

Leidraad

Cementbetonnen dijkbekledingen

VOORWOORD

Op initiatief van de Contactgroep "Natte Waterbouw", waarin zijn vertegenwoordigd de Nederlandse Cementindustrie, Rijkswaterstaat, de T.H.-Delft en de Landbouw Hogeschool te Wageningen, is besloten in een samenwerkingsverband van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW) en de Stichting voor onderzoek, voorschriften en kwaliteitseisen op het gebied van beton (CUR - VB) een studie aan te vatten op het gebied van cementbetonnen dijkbekledingen.

Hiertoe is een studietoelating opgericht die in TAW-verband door werkgroep 4 is ingesteld en wordt aangeduid als werkgroep 4B en in CUR-VB verband als onderzoekcommissie C45. De commissie had als taakstelling het schrijven van een leidraad betreffende ontwerp, uitvoering, beheer en onderhoud van cementbetonnen dijkbekledingen.

De redenen voor de studie waren onder meer:

- er zijn nog geen eisen ten aanzien van deze constructies geformuleerd;
- de toepassingsmogelijkheden worden bepaald door hetgeen de fabrikanten als systemen op de markt brengen, alleen ervaren beheerders terzake kunnen een oordeel vellen over de toepasbaarheid van deze systemen;
- de bestaande leemten in kennis kunnen leiden tot over- en/of onderdimensioneren;
- de cementbetonnen bekledingen kunnen in de toekomst qua kosten aantrekkelijker worden ten opzichte van asfaltbekledingen en vooral natuursteen en zullen daardoor dan meer toegepast worden.

Het resultaat van deze studie is hier in de vorm van een leidraad neergelegd.

De leidraad is primair gericht op de direct bij het ontwerp en beheer van dijken betrokken technici van waterschappen, ingenieursbureaus, provinciale waterstaatsdiensten en rijkswaterstaatsdiensten.

De leidraad is niet bedoeld als wetenschappelijk werk waarin theoretische grondslagen uitputtend worden behandeld.

Er is zoveel mogelijk naar gestreefd achtergrondinformatie te leveren zonder voor elk mogelijk probleem een oplossing te geven.

Dit laatste is wegens de verschillende geografische omstandigheden niet alleen onmogelijk maar ook ongewenst, omdat daardoor gemakkelijk een verstarring in de hand wordt gewerkt.

De in deze leidraad opgenomen zaken dienen te worden gezien als een opsomming van uitgangspunten waaraan een ontwerp voor een cementbetonnen dijkbekleding moet voldoen.

De nadruk ligt hierbij meer op het gedrag van een cementbetonnen bekleding onder invloed van de hydraulische belastingen en richtlijnen voor de uitvoering, dan op beschouwingen over het materiaal beton.

Bij het schrijven van de leidraad is gebruik gemaakt van recent verricht onderzoek door het Waterloopkundig Laboratorium en het Laboratorium voor Grondmechanica. Dit onderzoek is echter nog niet zodanig gevorderd dat de sterkte van diverse typen bekleding volledig bekend is.

Deze leidraad behoeft dus te zijner tijd een aanpassing.

Teneinde de leidraad leesbaar en beknopt te houden is menig punt enigszins globaal behandeld.

Voor meer achtergrondinformatie wordt verwezen naar het bij de TAW verkrijgbare rapport "Achtergronden bij de leidraad cementbetonnen dijkbekledingen", waarin het probleemveld meer theoretisch is benaderd. Hierin treft men ook uitgebreide literatuurverwijzingen aan.

Beklemt wordt echter dat deze leidraad als een zelfstandig geheel zonder de hulp van het hierboven genoemde rapport kan worden gelezen.

De samenstelling van de commissie was als volgt:

- prof.ir. A. Glerum, voorzitter
- ir. G.M. Wolsink, secretaris
- C.C. Bakker
- ir. W. Bandsma

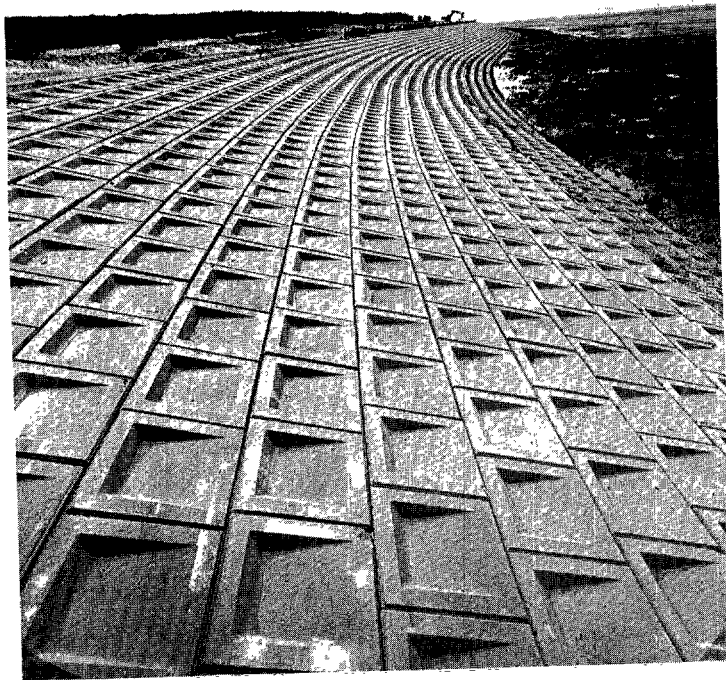
- ir. H. Burger
- ing. M.C.P. Cok
- ir. E.H. Ebbens
- ing. T.J. Leenknecht
- ing. M.G.M. Pat
- ing. L.A. Philipse
- ir. K.W. Pilarczyk
- ing. J.P. van der Rest
- C. Rook
- ing. A. Roos
- ir. A.P. van Vugt
- ir. P.C. Mazure, mentor voor de TAW
- ir. J.C. Slagter, mentor voor de CUR-VB.

Verder is veel dank verschuldigd aan ing. L.J. Weijdt en ing. W. Drooger voor hun vele praktische adviezen.

De Stichting voor Onderzoek, Voor-
schriften en Kwaliteitseisen op het
gebied van Beton (CUR-VB)

De Technische Adviescommissie voor de
Waterkeringen (TAW)

mei 1984



INHOUD:

Pag. no.:

Notaties

Hoofdstuk:

1.	INLEIDING	1
2.	TE STELLEN EISEN AAN DE BEKLEDING	5
2.1.	Functionele eisen	5
2.2.	Uitvoeringstechnische eisen	6
2.3.	Beheers- en onderhoudseisen	8
2.4.	Bijzondere eisen	8
3.	TYPEN BEKLEDING	10
3.1.	Algemeen	10
3.2.	Hoofdindeling	11
3.3.	Nevenindeling	19
4.	BETONTECHNOLOGIE	21
4.1.	Algemeen	21
4.2.	Eigenschappen van betonspecie en beton	21
4.3.	Eisen en voorschriften	23
4.4.	Toelichting	24
5.	TE STELLEN EISEN AAN ONDERLAGEN	26
5.1.	Algemeen	26
5.2.	Dichte onderlagen	26
5.3.	Doorlatende onderlagen	30
5.4.	Materiaaleigenschappen	33
5.4.1.	Klei	33
5.4.2.	Mijnsteen	36
5.4.3.	Silex	37
5.4.4.	Slakken	38
5.4.5.	Kunststofdoek/-vlies	38
5.4.6.	Zandasfalt, gebitumineerd zand	39

INHOUD: (vervolg)

Pag. no.:

Hoofdstuk:

5.5.	Filtereigenschappen	40
5.5.1.	Algemeen	40
5.5.2.	Soorten filters	42
5.5.3.	Zanddichtheidseisen	44
5.5.4.	Overige eisen	46
5.6.	Kwaliteitszorg	47
6.	BELASTINGZONES OP DIJKEN	50
6.1.	Zeedijken	50
6.2.	Meerdijken	53
6.3.	Rivierdijken	54
7.	PROFIEL VAN DE DIJK	56
7.1.	Dwarsprofiel	57
7.2.	Langsprofiel	59
8.	OPSLUITINGEN EN OVERGANGEN	60
8.1.	De teenconstructie	61
8.2.	De bovenbegrenzing van de harde bekleding	62
8.3.	De overgang naar een andere bekleding	64
9.	UITVOERINGSASPECTEN	69
9.1.	Algemeen	69
9.2.	Het produkt	69
9.3.	Opslag en transport	69
9.4.	Verwerking	70

INHOUD: (vervolg)

Pag. no.:

Hoofdstuk:

10.	BEHEER EN ONDERHOUD	72
10.1.	Inspecties	72
10.2.	Onderhoud	72
10.3.	Reparatiemogelijkheden	74
10.4.	Hergebruik	74
11.	HYDRAULISCHE RANDVOORWAARDEN	75
11.1.	Algemeen	75
11.2.	Golfkarakteristieken	76
11.2.1.	Individuele golf	76
11.2.2.	Lokale eigenschappen individueel golfveld	81
11.3.	Golfvervormingen	83
11.3.1.	Golfvervormingen voor de dijk	83
11.3.2.	Golfbreking op het dijktalud	85
12.	BIJZONDERE BELASTINGEN	91
13.	STABILITEIT GEZETTE BEKLEDING	94
13.1.	Algemeen	94
13.2.	Losliggende elementen	95
13.2.1.	Doorlatende ondergrond	96
13.2.2.	Ondoorlatende grond	105
13.3.	Geklemde zetting	105
13.4.	Samenvatting onderzoek in Deltagoot	106

INHOUD: (vervolg)

Pag.no.:

14.	VEILIGHEIDSBESCHOUWINGEN	111
14.1.	Algemeen	111
14.2.	Beschrijving probabilistische methoden	112
14.3.	Belasting en sterkte	117
14.4.	Veiligheidsniveau	119
15.	SAMENVATTING	122
	Literatuur	125
	Zusammenfassung	
	Résumé	
	Summary	

NOTATIES

b	dikte filterlaag
C	voortplantingssnelheid golven
C_o	voortplantingssnelheid golven in diep water
C_g	groepssnelheid golven
D	diameter zeefopening bij granulaire filters
d	diameter, waterdiepte, dikte steenzetting
E	energiedichtheid
$F_S(S)$	kansverdelingsfunctie van de belasting
$F_R(R)$	kansverdelingsfunctie van de sterkte
$f_s(s)$	kansdichtheidsfunctie van de belasting
$f_R(r)$	kansdichtheidsfunctie van de sterkte
F	frequentie
g	versnelling zwaartekracht
H	golfhoogte, verticale waterstandsvariatie
H_s	significante golfhoogte
I_c	consistentie-index
I_p	plasticiteitsindex
k	doorlatendheid filterlaag
k'	doorlatendheid steenzetting
L	golflengte
L_o	golflengte in diep water
n	rijpingsfactor
O	grootste opening bij kunststoffilters
R	sterkte van de constructie
S	belasting op de constructie
T	golfperiode
\bar{T}	gemiddelde golfperiode
T_s	significante golfperiode
X_n	basisvariabelen
Z	betrouwbaarheidsfunctie

NOTATIES (vervolg)

α	hellingshoek talud
γ	veiligheidscoëfficiënt
Δ	relatieve dichtheid van het bekledingsmateriaal
λ	lek lengte
ξ	golfbrekningsparameter
ρ_b	soortelijke massa bekleding
ρ_w	soortelijke massa water
$\Delta\phi$	maximale druk onder gezette bekleding

Hoofdstuk 1 - INLEIDING

De bekleding van een waterkering wordt in het kader van deze leidraad gedefinieerd als dat deel van de totale afdekkende laag, dat rechtstreeks door de golven wordt belast. Onder de bekleding is een onderlaag aanwezig van klei, granulair materiaal of gebitumineerd zand, die bij de nieuwere dijken de uit zand opgebouwde kern van de dijk afschermt. Tussen bekleding en onderlaag kan eventueel nog een tussenlaag aanwezig zijn.

Teneinde de aan ongebonden granulaire materialen gestelde zanddichtheidseisen eenvoudiger te verwezenlijken kunnen kunststofdoeken of vliezen aan de constructie worden toegevoegd.

Het doel van een harde bekleding op een dijk is, in samenhang met de onderlaag, het dijklichaam te beschermen tegen erosie als gevolg van golven, stromingen en bijzondere belastingen, zoals onder andere kruisend ijs.

In deze leidraad zal de aandacht hoofdzakelijk op de zeedijken zijn gericht, meer- en rivierdijken komen slechts beperkt aan de orde.

Reeds in het begin van deze eeuw is men begonnen met het toepassen van beton voor het versterken en beschermen van zeekeringen. De eerste toepassing is waarschijnlijk geweest het vastleggen, door het vullen van de openingen met beton, van oude en versleten glooiingen van gezette natuursteen.

Hierdoor ontstond wel een dicht aaneengesloten oppervlak, doch tevens een zo stijf geheel dat de constructie geen enkele beweging toeliet en er dus bij enig materiaalverlies uit de ondergrond breuk kon optreden. De soepelheid van een normaal gezette steenbekleding ging dus verloren. In het algemeen waren de resultaten met beton aanvankelijk niet bevredigend, hetgeen naast het toepassen van starre constructies vooral ook kon worden geweten aan de geringere kennis die men destijds had betreffende het samenstellen van betonmengsels voor het verkrijgen van een sterk en dicht beton.

Vooral bij vers beton, wanneer constructies in het werk werden gestort en het beton direkt in aanraking kwam met zeewater (beneden hoog water en tot iets daarboven), heeft dit geleid tot velerlei teleurstellingen. Al na vrij korte tijd gingen de glooiingen er haveloos uitzien.

Ook glooiingsblokken van beton heeft men in het verleden vaak nog ter plaatse op het werk vervaardigd. Als gevolg van een te geringe kennis van het materiaal beton en een minder zorgvuldige uitvoering (ongeschoold personeel, onvoldoende hulpmiddelen enz.) werd het beton meermalen aangetast en werden de blokken door de golfslag beschadigd, waardoor deze tenslotte als gruis uit elkaar vielen.

Bij het kiezen van de vorm heeft men in het verleden veel zorg besteed aan een dichte en toch soepele verbinding tussen de elementen onderling, die de glooiingsconstructie de nodige elasticiteit geeft om een zekere zetting van de grondslag toe te staan.

De in het verleden op de markt geweest zijnde systemen met allerlei geraffineerde vormen van interlock zijn grotendeels om economische redenen verdwenen. De ingewikkelde vorm liet een machinale vervaardiging vaak niet of moeilijk toe, terwijl bij de uitvoering het zetten van de blokken ook moeizamer verliep.

Vanaf het begin der toepassing van een blokkenglooiing tot circa 1965 is het zetten van de blokken praktisch uitsluitend handwerk geweest. Ieder blok werd apart, afhankelijk van de zwaarte, door één of twee man met de hand op het beloop gezet. De produktie bij deze glooiingwerken was bij betonblokken van wat grotere afmetingen niet groot. Door de toenemende omvang der uit te voeren werken, onder andere mogelijk gemaakt door de grotere zandproduktie en een sterker doorgevoerde mechanisatie om de loonkosten te drukken, moest worden gezocht naar een snellere verwerkingsmethode. Aan het gebruik van een blokkentang, waarmee in één handeling meerdere blokken op een tevoren gereed gemaakt beloop kunnen worden gezet, is het te danken dat grotere produkties per werkdag kunnen worden gehaald.

Het vervaardigen van gloopingen of onderdelen hiervan op de plaats waar ze in het werk moeten komen en vooral het ter plaatse van de getijzône storten van beton moet blijkens ervaringen worden afgeraden.

Alleen wanneer de vervaardiging plaatsvindt in hiervoor ingerichte werkplaatsen of fabrieken, waar de mortel onder gunstige omstandigheden machinaal kan worden gestampt, getrild of geschokt, kan men bij normaal beton gunstige resultaten verwachten.

Voor het in het werk storten van beton ter plaatse van de getijzône kan onder bepaalde omstandigheden een uitzondering op het bovenstaande worden gemaakt, als gevolg van meer recente ontwikkelingen op het gebied van speciaal "onderwaterbeton". Hierbij wordt door bijzondere toevoegingen en/of bereiding een bij het storten vergrote weerstand tegen uitspoelen verkregen (bijvoorbeeld colloïdaal beton).

De keuze (type en afmetingen) van de tot op heden uitgevoerde blokken-gloopingen berust alleen op ervaringsfeiten en op persoonlijk inzicht of voorkeur. Objectieve ontwerpcriteria waren niet voorhanden. Dit heeft tot gevolg dat in situaties waar ervaring niet aanwezig is of tekort schiet, dat wil zeggen voor extreme belastingcondities (superstorm), de vraag kan worden opgeworpen of het ontwerp in feite wel technisch en economisch verantwoord is (niet te licht, maar ook niet extreem zwaar).

Deze leidraad hoopt een bijdrage te leveren om tot een meer verantwoord ontwerp van een cementbetonnen dijkbekleding te komen.

Als gevolg van de complexiteit van de materie zijn echter eenvoudig hanteerbare rekenmodellen voor de stabiliteit van de bekleding onder golfaanval nog niet beschikbaar. Het onderzoek hiernaar door het Waterloopkundig Laboratorium en het Laboratorium voor Grondmechanica zal wellicht op de lange termijn een in de praktijk bruikbare aanpak leveren.

In afwachting hiervan is men echter voorshands in belangrijke mate aangewezen op de in hoofdstuk 13 gegeven resultaten van proeven in een golfgoot.

Voor dijkvakken van wat grotere omvang kan het nuttig zijn het betreffende dijkvak met de bijbehorende randvoorwaarden op zo groot mogelijke schaal bij een laboratorium in een golfgoet te beproeven.

Verder is het bij een nieuw type bekleding aan te bevelen indien mogelijk de bekleding door middel van proefvakken onder praktijkomstandigheden te toetsen.

Mits een onderliggende verborgen verdediging is aangebracht, kan dan worden nagegaan bij welke belastingomstandigheden de bekleding is bezweken.

Hoofdstuk 2 - TE STELLEN EISEN AAN DE BEKLEDING

2.1. Functionele eisen

Vanuit de doelstelling van de bekleding op een waterkering, namelijk het vormen van een bescherming van het dijklichaam, dienen de volgende functionele eisen te worden gesteld:

- a. De bekleding moet bestand zijn tegen de combinatie van golf- en stroomaanval, krachten uitgeoefend door onder andere drijfijis en aanvriezende ijs en overdrukken vanuit het dijklichaam ten gevolge van een verhoogde freatische lijn.
- b. De onderliggende gronddeeltjes moeten worden vastgehouden; de bekleding moet mede met een eventueel aanwezige filterconstructie voorkomen dat ze worden uitgespoeld en meegevoerd. Ook de filterconstructie zelf moet door de bekleding tegen uitspoeling worden beschermd.
- c. De bekleding moet duurzaam zijn, dat wil zeggen bestand zijn tegen erosie door overspoelend materiaal (zand, grind, stukken natuursteen e.d.) en tegen vorst en chemische invloeden.
- d. Om volledig aan haar doel te blijven beantwoorden is het van belang dat een bekleding eventuele vormveranderingen van het talud kan volgen (zettingen en/of ontgrondingen) zonder het beschermende oppervlak uit zijn verband te rukken. Wanneer de ondergrond plaatselijk verzakt, onderspoeld of door graafwerkzaamheden van dieren ondermijnd wordt en de bekleding dit niet kan volgen, ontstaan holten onder de bekleding, waardoor de constructie ernstig wordt verzwakt bij bijvoorbeeld een externe belasting door golfklappen. Een grote onderlinge klemming tussen de betonelementen, waardoor deze niet nazakken, kan in dit verband nadelig zijn, zie ook 7.1.

Daarentegen geven sterk geklemde elementen op een gave ondergrond, vergeleken met elementen die hun onderling verband alleen aan onderlinge wrijving ontleunen, een grotere stabiliteit onder golf-aanval te zien.

De eis van flexibiliteit is hier dus tegenstrijdig met de eis van grote stabiliteit onder golfaanval. In de praktijk zal een zo goed mogelijk compromis moeten worden nagestreefd.

- e. Het geheel van de bekleding en ondergrond moet stabiel zijn tegen afschuiven.

2.2. Uitvoeringstechnische eisen

Teneinde de kosten van aanleg te optimaliseren kunnen onder andere de volgende eisen worden gesteld:

- a. De bekleding moet snel en gemakkelijk zijn aan te brengen, bij voorkeur op machinale wijze.
Voor de aanleg van een zeewering is slechts de beperkte tijd van april tot oktober beschikbaar (buiten het stormseizoen). Voor de dagelijkse getijdzone op de waterkering geldt de eis van een snelle van verwerking nog duidelijker.
- b. De bekleding dient, vooral bij niet-rechte dijkvakken, zodanig te zijn dat een gemakkelijke maatvoering mogelijk is. Er zijn echter bekledingssystemen die zodanig zijn gevormd dat men zeer nauwkeurig moet werken omdat de toleranties vrijwel nihil zijn. Een typisch voorbeeld van zo'n systeem is gegeven in figuur 2.1.

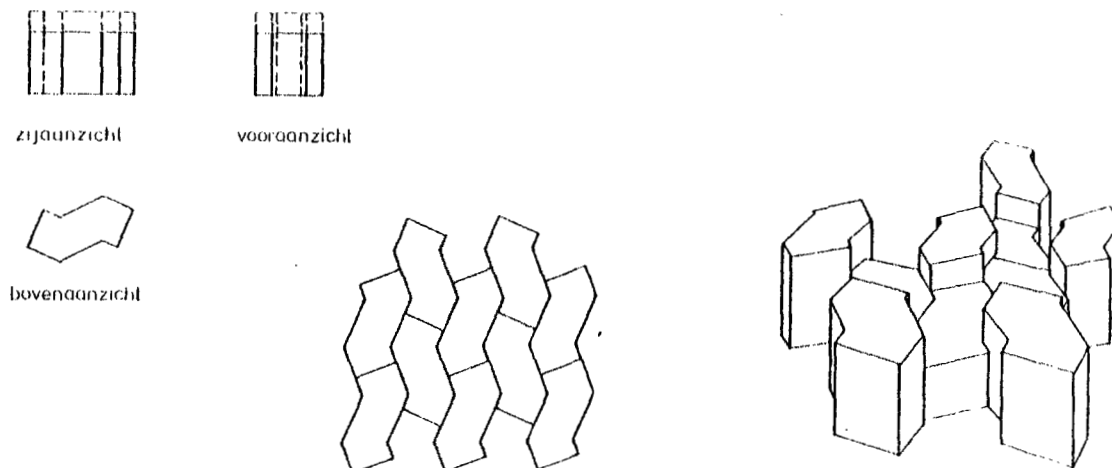
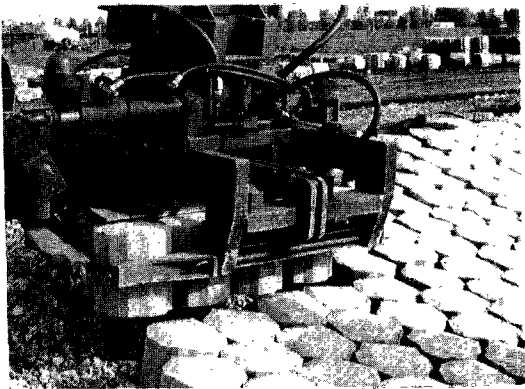
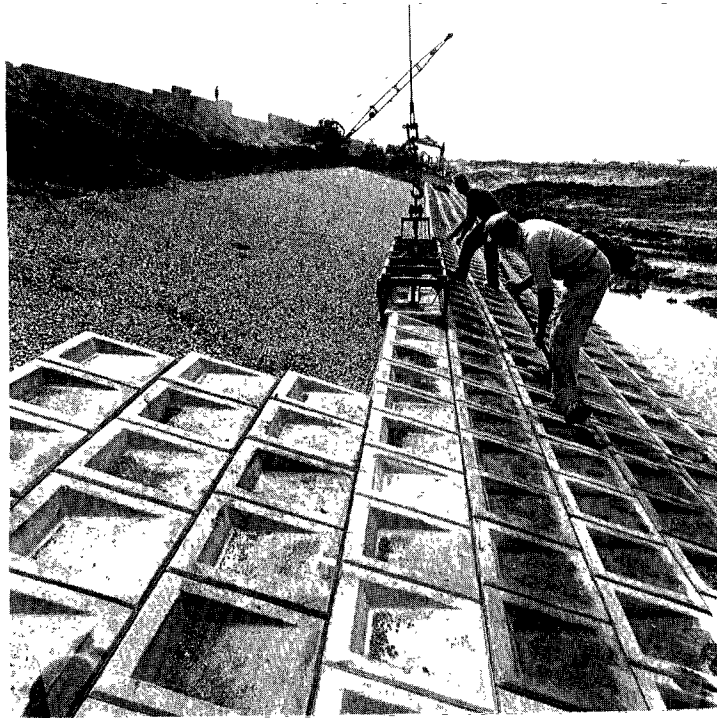


Fig. 2.1.: Voorbeeld van een systeem waarbij weinig vrijheid in de maatvoering aanwezig is



betere Foto beschikbaar

Het mechanisch zetten van betonelementen

Dit systeem laat niet toe van de rechte lijn af te wijken. Gebogen werk is hier alleen uitvoerbaar door in het werk aansluitingen te storten tussen rechte delen van geringe lengte. Dit is echter minder fraai, terwijl de betonkwaliteit en het verdere gedrag onder invloed van de belastingen en zettingen afwijkend kan zijn.

Door het open laten staan van de voegen is het bij vele systemen, binnen zekere grenzen, mogelijk een ronding in langsrichting aan te brengen. Wanneer de ronding niet te groot is, behoeven deze openstaande voegen bij een bekleding op een granulair filter van voldoende grof materiaal geen problemen op te leveren. Klei als onderlaag is in deze situatie minder geschikt.

Eventueel aanwezige tonrondte, dat wil zeggen een ronding van het talud loodrecht op de lengte-as van de dijk, dient niet te groot te zijn omdat dan het nazakken van de blokken wordt belemmerd en de inklemming (en daarmee de stabiliteit van de blokken) wordt verminderd.

2.3. Beheers- en onderhoudseisen

Opdat de bekleding zijn beschermende functie duurzaam blijft vervullen, dienen onder andere de volgende eisen te worden gesteld:

- a. Wanneer er onverhoopt plaatselijke schade optreedt is het van belang dat de bekleding op eenvoudige en snelle wijze is te repareren.
- b. De bekleding mag niet te gemakkelijk door vandalisme kunnen worden beschadigd.

2.4. Bijzondere eisen

Plaatselijke omstandigheden kunnen tot gevolg hebben dat één of meer van de volgende eisen worden gesteld:

- a. Bij een waterkering die onderhevig is aan frequent voorkomende golfaanval kan het nuttig zijn de golfoploop aan de bovenzijde van de bekleding te remmen door middel van blokken met speciale vormgeving (oploopremmende uitsteeksels en porositeit).
- b. Tijdelijke bekledingen moeten zoveel mogelijk steeds zo worden gesteld dat hergebruik elders mogelijk is.
- c. Er kunnen speciale eisen worden gesteld aan het uiterlijk van de bekleding, opdat deze geen storend element vormt in een landschappelijk waardevol gebied.
- d. De bekleding kan soms tezamen met de onderlaag voor de waterdichtheid zorg moeten dragen, wanneer hoge waterstanden gedurende langere tijd moeten worden gekeerd.

Hoofdstuk 3 - TYPEN BEKLEDING

3.1. Algemeen

Bij de keuze uit diverse in een bepaalde situatie mogelijke alternatieven, zullen aan de hand van de in het vorige hoofdstuk beschreven eisen beoordelingscriteria moeten worden geformuleerd (technische en financiële). Omdat de diverse technische criteria niet allemaal een even zware rol spelen bij de uiteindelijke keuze, kunnen weegfactoren worden vastgesteld.

Tenslotte worden dan de diverse alternatieven getoetst aan de beoordelingscriteria en tezamen met de hiervoren genoemde weegfactoren levert dat een technisch waarde-oordeel op. Voor verdere beschouwingen omtrent deze werkwijze wordt verwezen naar het rapport "Achtergronden bij de leidraad cementbetonnen dijkbekledingen".

Voor het indelen van de diverse cementbetonnen bekledingen kan men vele invalshoeken kiezen, zoals de volgende hoofdingeling:

- a. naar de vorm van de elementen
- b. naar de mate van doorlatendheid
- c. naar de relatie met de doorlatendheid van de onderlaag en eventuele tussenlaag
- d. naar de combinatie van geprefabriceerde betonmatten met kunststofdragers en/of kabels.

Als nevenindeling kunnen verder worden genoemd:

- e. machinale verwerking wel of niet mogelijk
- f. gewapend of ongewapend beton
- g. in het werk gestort beton of prefab-beton
- h. verwerking alleen boven water of onder en boven water mogelijk.

3.2. Hoofdindeling

ad a. vorm van cementbetonnen elementen

De elementen kunnen worden onderverdeeld in:

1. blok- en zuilvormige elementen
2. plaatvormige elementen
3. ononderbroken plaatvorm.

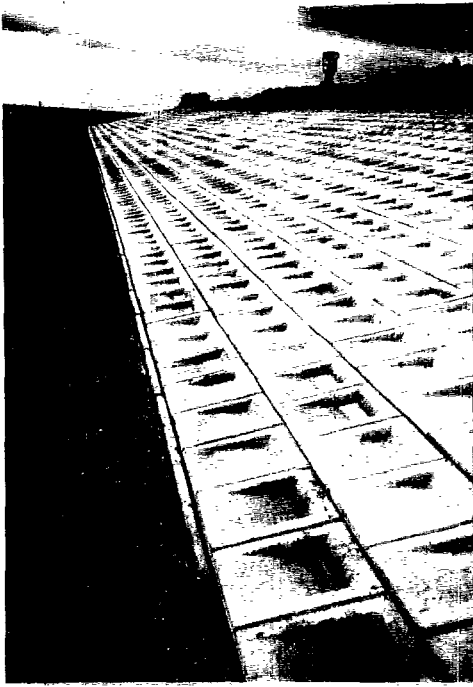
a.1. blok- en zuilvormige elementen

In Nederland worden hoofdzakelijk de blok- en zuilvormige elementen toegepast.

De blokvormige elementen zijn weer onder te verdelen aan de hand van de vormgeving, onderling verband tussen de blokken in verband met de mogelijkheid tot verschuiven van het ene blok ten opzichte van het andere, de klemmende werking, mate van golfremming, enzovoort.

De blokvormige elementen worden gewoonlijk uitgevoerd in grindbeton doch ook wel in basaltbeton om een hoger stukgewicht te krijgen. De blokken kunnen uit esthetische overwegingen aan de bovenzijde worden uitgewassen dan wel (bij grindbeton worden voorzien van een aparte deklaag van basaltbeton die wordt uitgewassen. Van de blokvormige elementen is de meest voorkomende bovenafmeting, ook wel kopafmeting genoemd, 50 x 50 cm of 25 x 30 cm, doch ook kopafmetingen van 30 x 30 cm en 25 x 25 cm komen voor. De bijbehorende dikte varieert in het algemeen tussen 15 en 30 cm. De blokvormige typen worden veelal in halfsteens verband op het talud aangebracht.

De zuil- of polygoonvormige elementen kunnen, afhankelijk van de fabrikant, regelmatig of onregelmatig van vorm zijn. Ze ontleen hun sterkte als bekledingsmateriaal tegenwoordig aan het voegvulmateriaal dat voor de onderlinge wrijving, ook wel interlocking genoemd, moet zorg dragen. De zuil moet dus zodanig zijn uitgevoerd dat voegvulmateriaal kan worden aangebracht.



Enkele typen bekleding

In het verleden werden allerlei typen bekleding met een interlock verkregen door in elkaar hakende delen op de markt gebracht.

Wegens problemen met de maatvoering en geautomatiseerde vervaardiging van de elementen vindt dit type bekleding geen toepassing meer.

De in de praktijk toegepaste dikte van de zuilvormige bekledingen varieert van 20 tot 60 cm en wordt ook wel in een gewicht per m² uitgedrukt. Als voegvulmateriaal kunnen grind, steenslag, gebroken puin en metaalslakken, mits niet hydraulisch, worden toegepast. De maximale stukafmeting van het voegvulmateriaal moet in overeenstemming zijn met de grootte van de gemiddelde opening tussen de zuilen onderling. Verder geeft enige opbouw in de gradering van het voegvulmateriaal betere resultaten tegen uitspoelen van de voegen door golfbelasting.

a.2. plaatvormige elementen

De gesloten plaatvormige elementen worden in Nederland niet of nauwelijks toegepast. Wel worden op ruime schaal plaatvormige elementen met gaten erin toegepast, de zogenaamde doorgroei-elementen. In het bovenoppervlak van de platen zijn bovendien ondiepe sleuven uitgespaard die in verbinding staan met de gaten. Als de sleuven met gaten worden gevuld met klei en het geheel is doorworteld en begroeid met gras kan een sterke bekleding ontstaan.

De elementen hebben in de regel afmetingen van 40 x 60 cm, of 40 x 40 cm en zijn leverbaar in dikten van 9 t/m 15 cm.

Deze bekleding wordt zowel met de hand als mechanisch gelegd en wordt voornamelijk toegepast ruim boven de invloed van het dagelijkse getij.

a.3. ononderbroken plaatvorm

Dit type bekleding komt in Nederland, wegens het gevaar van ongelijkmatige zettingen en ontgrondingen, niet of nauwelijks voor. In het buitenland vindt toepassing van deze bekleding wel op ruime schaal plaats.

ad b. mate van doorlatendheid van de cementbetonnen bekleding

De bekleding kan zijn:

- gesloten of nagenoeg gesloten
- open.

De waterdoorlatendheid van nauw aaneensluitende blokvormige elementen kan als zeer gering worden beschouwd ten opzichte van de doorlatendheid van de onderlaag. Om dergelijke bekledingen meer waterdoorlatend te maken, worden de blokvormige typen ook wel geleverd met afgeschuinde hoeken en/of uitsparingen in de zijkanten van de blokken. Hierdoor kan bij vullen van deze openingen en uitsparingen met voegvulmateriaal bovendien enige extra klemwerking worden gemobiliseerd.

De waterdoorlatendheid van de zuilvormige elementen met voegvulling is ten opzichte van de onderlaag zeer groot en de bekleding wordt daarom als zeer open beschouwd. Wordt een dergelijke glooiing gepenetreerd met een gietasfaltmastiëkmortel dan wordt dit type cementbeton bekleding volledig dicht en daarom als een gesloten bekleding beschouwd.

ad c. relatie cementbetonnen bekleding met doorlatendheid onderlaag en tussenlaag

Het gedrag van de hydraulische belastingen op de bekleding kan niet los worden gezien van de onderlinge verhouding in waterdoorlatendheden van onderlaag, tussenlaag en bekleding (zie ook hoofdstuk 13).

De keuze van de cementbetonnen bekleding wordt hierdoor dan ook in belangrijke mate bepaald. De hierna afgebeelde figuren geven slechts voorbeelden van mogelijke constructietypen. Volledigheid is niet nagestreefd; de figuren dienen daarom niet als standaardconstructies te worden geïnterpreteerd.

Omdat blokken rechtstreeks gelegd op een ondoorlatende onderlaag (klei) een grotere stabiliteit onder golfaanval bezitten, kan deze constructie de voorkeur verdienen. Niet altijd is echter toepassing van deze constructie mogelijk of verantwoord.

Op de lagere niveaus in de getijzône is de verwerking op het talud en de erosiebestendigheid van de klei onder de gezette bekleding problematisch, terwijl in het geval van mogelijke wateroverdrukken in het dijklichaam een doorlatende onderlaag noodzakelijk is.

Voor de vereiste eigenschappen van de klei wordt naar de paragrafen 5.2. en 5.4.1. verwezen.

Te onderscheiden zijn (zie bijgaande figuren voor voorbeelden van mogelijke constructies):

1. open bekleding op doorlatende tussenlaag met ondoorlatende onderlaag
2. open bekleding op doorlatende tussenlaag met doorlatende onderlaag
3. open bekleding zonder tussenlaag op doorlatende onderlaag
4. aaneengesloten bekleding op doorlatende tussenlaag met doorlatende onderlaag
5. aaneengesloten bekleding op doorlatende tussenlaag met ondoorlatende onderlaag
6. aaneengesloten bekleding zonder tussenlaag op ondoorlatende onderlaag
7. dichte bekleding op ondoorlatende tussenlaag met ondoorlatende onderlaag
8. begroeide bekleding op ondoorlatende onderlaag.

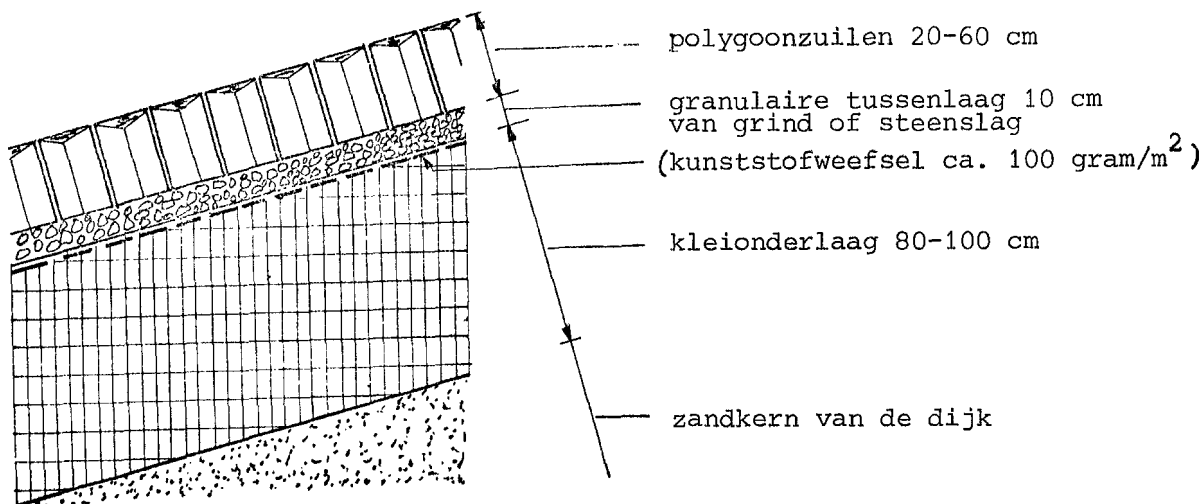


Fig. 3.1.: open bekleding op doorlatende tussenlaag met ondoorlatende

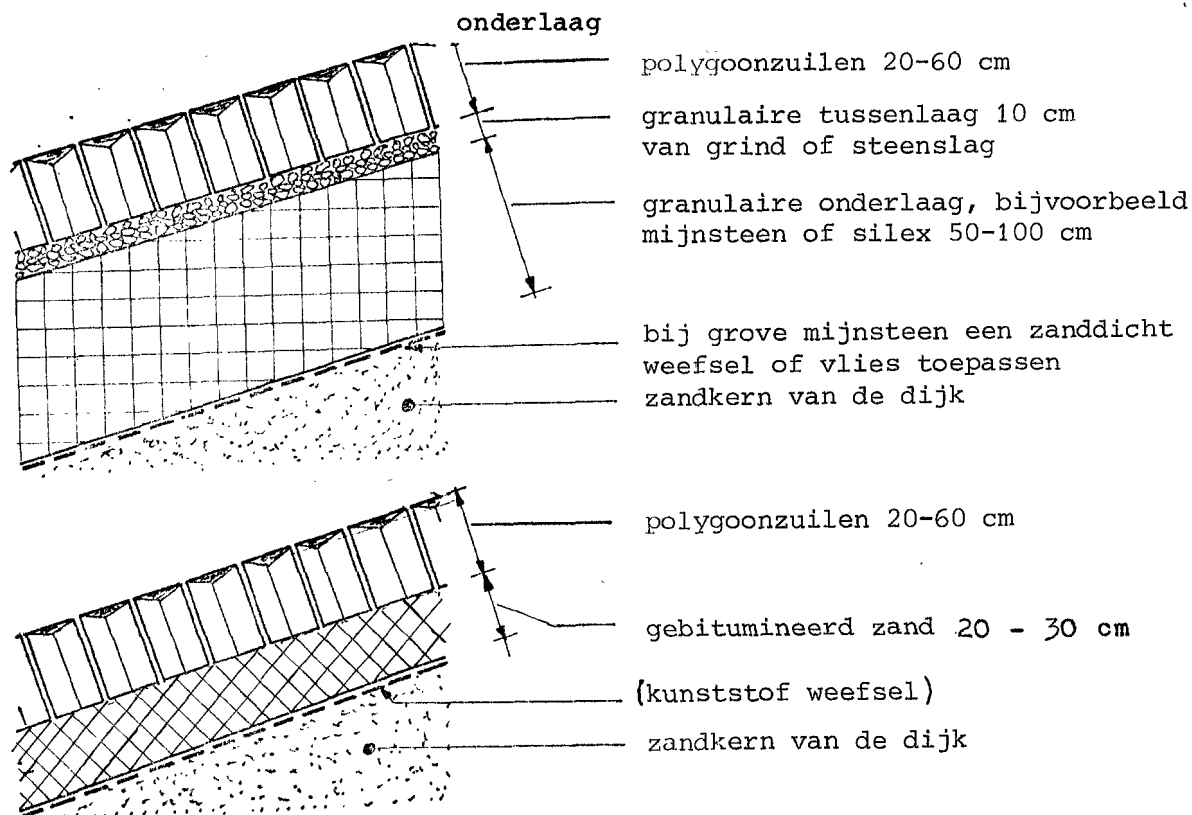


Fig. 3.2.: open bekleding op doorlatende tussenlaag met doorlatende onderlaag

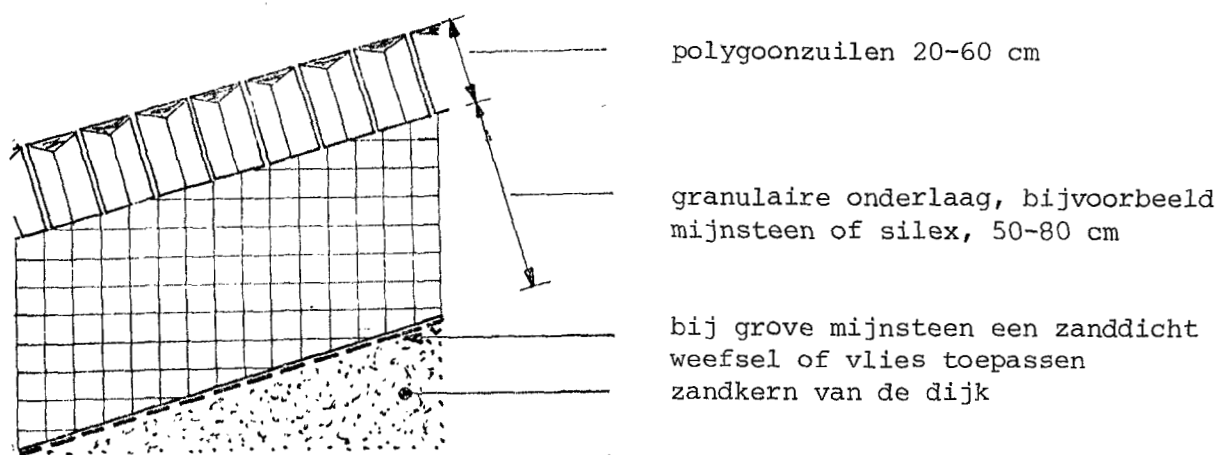


Fig. 3.3.: open bekleding zonder tussenlaag op doorlatende onderlaag

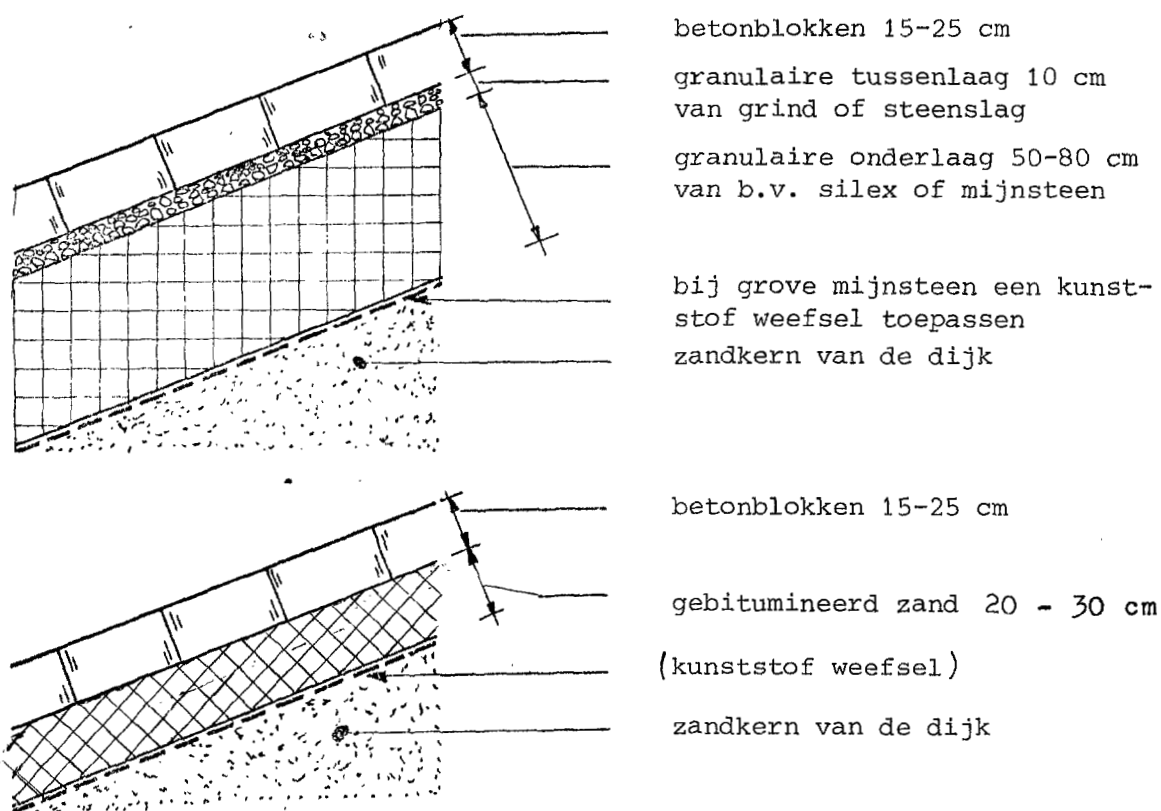


Fig. 3.4.: aaneengesloten bekleding op doorlatende tussenlaag met doorlatende onderlaag

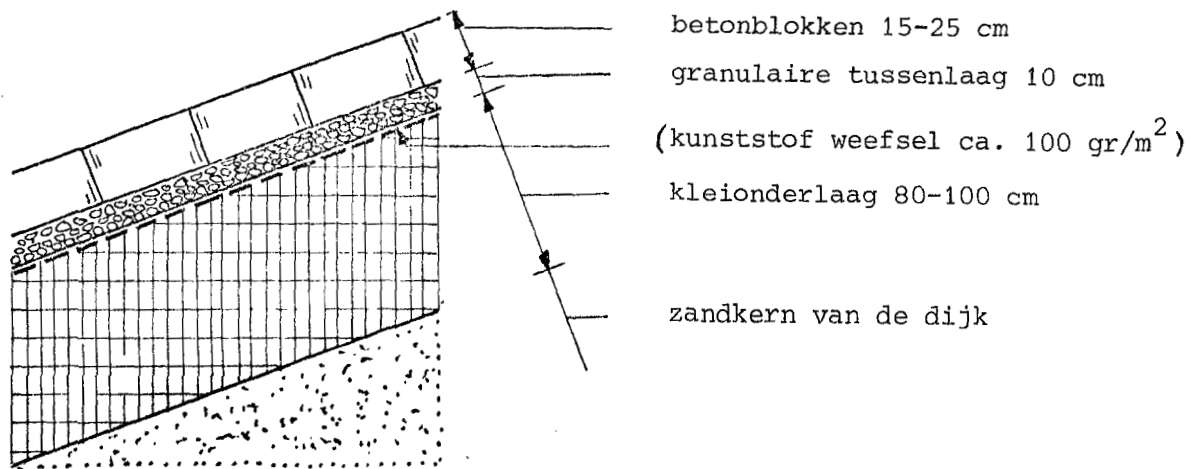


Fig. 3.5.: aaneengesloten bekleding op doorlatende tussenlaag met ondoorlatende onderlaag

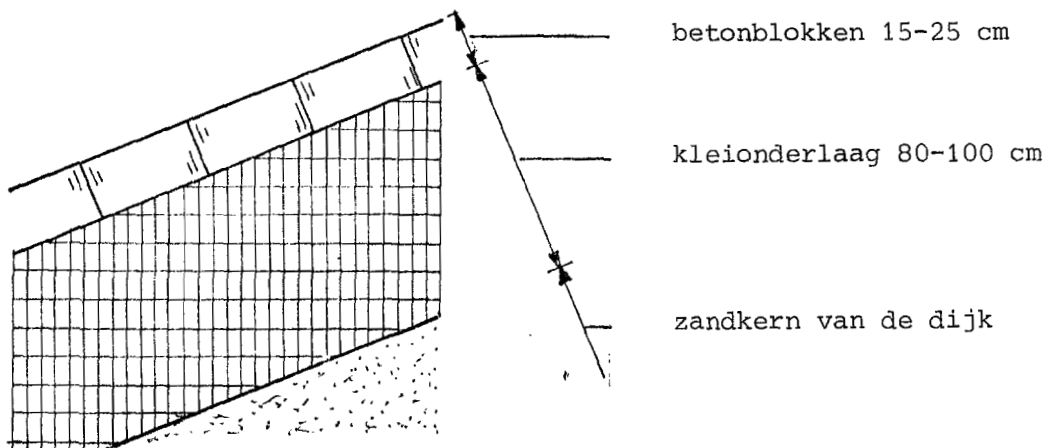


Fig. 3.6.: aaneengesloten bekleding zonder tussenlaag rechtstreeks op ondoorlatende onderlaag

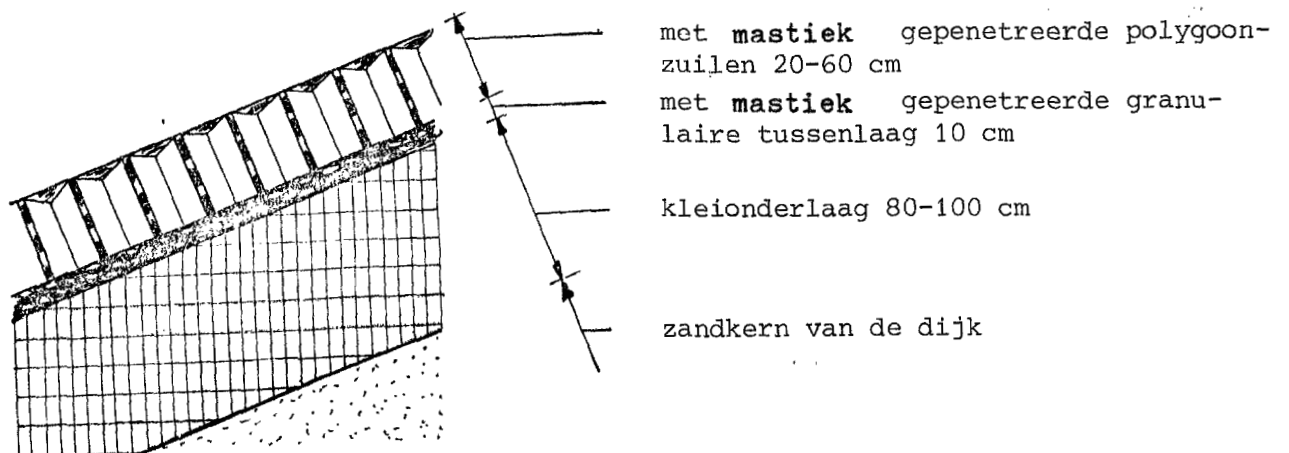


Fig. 3.7.: dichte bekleding op ondoorlatende tussenlaag met ondoorlatende onderlaag

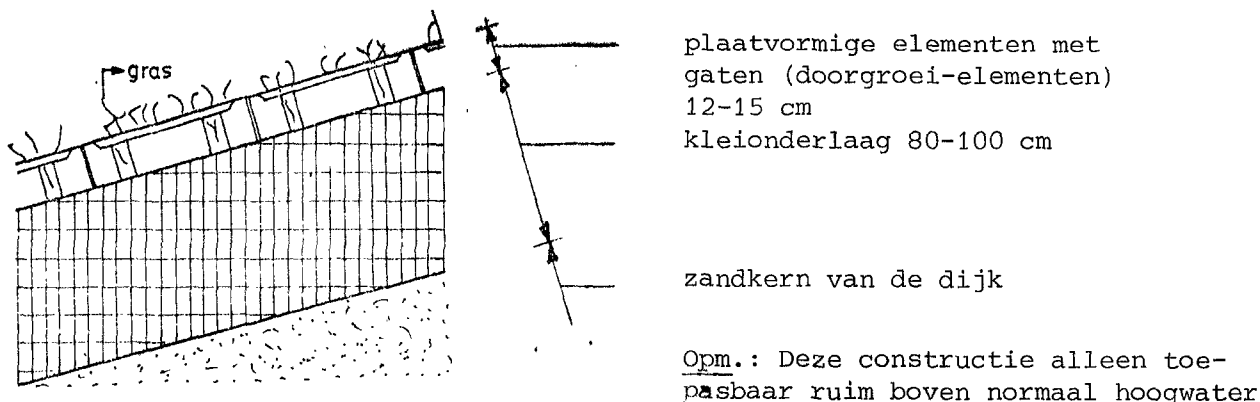


Fig. 3.8.: begroeide bekleding op ondoorlatende onderlaag

Waar in de voorgaande figuren tussen haakjes een kunststofweefsel is aangegeven, kan dit weefsel ook achterwege blijven. In verband met de verwerking kan het weefsel een afdekking vormen waarop de volgende laag zich gemakkelijker laat aanbrengen; het weefsel vormt dan onder andere een bescherming tegen het intrappen van het materiaal van de bovenste laag in de onderste laag.

ad d. geprefabriceerde betonmatten op kunststofdragers (blokkenmatten)

Een nieuwe ontwikkeling in de verdediging van oevers is de toepassing van in de fabriek aan elkaar gekoppelde betonblokken op een drager van filterweefsel of -vlies en soms voorzien van door de blokken gespannen kabels.

Toepassing vindt momenteel nog voornamelijk plaats als oeververdediging van kanalen, rivieren en meren.

De matten zijn waterdoorlatend en moeten dientengevolge tot de open bekledingen worden gerekend.

3.3. Nevenindeling

ad e. machinale verwerking wel of niet mogelijk

Er is een steeds grotere voorkeur voor systemen die machinale verwerking toelaten.

De ontwikkeling van de hiervoren beschreven blokkenmatten is hiervan een gevolg.

Aanvankelijk konden uitsluitend de blokvormige elementen machinaal in de bekleding worden verwerkt. Thans zijn ook de zuilvormige elementen mechanisch te verwerken, zodat kan worden gesteld dat de in Nederland meest gangbare bekledingstypen mechanisch in de bekleding kunnen worden geplaatst.

ad f. gewapend of ongewapend beton

Zowel de blokvormige, de zuilvormige als de doorgroeielementen worden in ongewapend beton uitgevoerd.

Uitsluitend betonelementen voor bijzondere bekledingsconstructies worden in Nederland in gewapend beton gemaakt.

ad g. in het werk gestort beton of prefab-beton

Wegens de in het algemeen betere betonkwaliteit verdient prefab-beton de voorkeur boven in het werk gestort beton. Zelfs pasblokken moeten bij voorkeur in prefab-beton worden uitgevoerd. Ook het vullen van naden en kieren met in het werk gestort beton moet zoveel mogelijk worden vermeden.

ad h. verwerking boven- en onderwater mogelijk

De blok- en zuilvormige betonelementen kunnen uitsluitend boven water worden toegepast. Alleen blokkenmatten zijn onderwater te verwerken, waarbij dan echter geen onder-opsluiting aanwezig zal zijn.

Een andere eveneens nieuwe ontwikkeling is het colloïdaal beton dat onderwater kan worden verwerkt.

Hoofdstuk 4 - BETONTECHNOLOGIE

4.1. Algemeen

Tijdens het gebruik als dijkbekleding kan beton in kwaliteit achteruitgaan. De oorzaken hiervan kunnen van mechanische, biologische, fysische of chemische aard zijn.

Mechanische aantasting van beton ontstaat door te hoge belasting of in dit geval hoofdzakelijk door de schurende werking van zand en water. Biologische invloeden kennen we in de vorm van begroeiing door algen, (water)planten en andere organismen. De begaanbaarheid of esthetische normen kunnen hierdoor worden aangetast, maar schade aan de betonhuid treedt hierdoor niet op.

Als fysische oorzaken van aantasting kunnen sterke temperatuurwisselingen en vorst worden genoemd.

Chemische aantasting kan optreden zowel door oppervlaktewater, zeewater, regenwater als gezuiverd water.

Corrosie van in of aan beton aanwezig staal werkt door volumevergroting destructief en moet, evenals alle andere vormen van schade aan het beton, worden voorkomen.

Bij de keuze van de grondstoffen en productie van betonnen onderdelen van een constructie spelen verwerkbaarheid van de verse betonspecie alsmede economische aspecten een belangrijke rol.

4.2. Eigenschappen van betonspecie en beton

De mate waarin een betonspecie zich laat verdichten is afhankelijk van een groot aantal factoren, zoals soort en hoeveelheid cement, korrelvorm en korrelopbouw van het toeslagmateriaal en vooral de hoeveelheid water met eventuele hulpstoffen in de betonspecie.

Waterafscheiding ofwel "bleeding" van de verse betonspecie kan door de keuze van een lagere waterhoeveelheid, het gebruik van hulpstoffen en door vergroting van het specifiek oppervlak van het mengsel worden tegengegaan.



Slecht en goed beton naast elkaar



Sterke erosie ten gevolge van de schurende werking van korrelig materiaal en water

De sterkte van een betonnen onderdeel van een constructie kan het best worden bepaald door het destructief beproeven van dat onderdeel. Als vervanging van deze proef kunnen diverse laboratoriumproeven dienen. Ook voor de bepaling van rekenwaarden van slijtvastheid, elasticiteitsmodulus, krimp, kruip en andere eigenschappen van het materiaal beton zijn standaardproeven in de laboratoria bekend. Door de keuze van zware toeslagmaterialen kan de volumieke massa van het beton vergroot worden, hetgeen een gunstig effect heeft op de stabiliteit onder golfaanval (zie hoofdstuk 13).

4.3. Eisen en voorschriften

- Het fabriceren en toepassen van beton is gebonden aan een aantal voorschriften (zie ook de literatuurlijst). Tenzij anders wordt aangegeven moet het beton, waarvan het product wordt gemaakt, evenals het product zelf, voldoen aan de in deze voorschriften gestelde eisen.
- Beton gebruikt in dijkbekledingen moet, om schade door mechanische, fysische of chemische invloeden te beperken, tenminste voldoen aan een in de betonvoorschriften gedefinieerde kwaliteit B30. Wanneer de sterkte tijdens het transport van belang is, kunnen grotere sterktes worden geëist.
- Om beter bestand te zijn tegen chemische invloeden moet het cement naast een verhoogde sulfaatbestendigheid een laag gehalte aan vrije kalk bezitten. De cementsoort die hieraan voldoet is hoogovencement en verdient hierom de voorkeur.
- De in het beton gebruikte toeslag moet voldoen aan de desbetreffende produktnorm.
- Indien wapening in het beton aanwezig is, moet - uitgaande van een agressief milieu - voldoende betondekking (zie het artikel "betondekking" in de geldende betonvoorschriften) worden aangehouden.
- Een zorgvuldige verdichting en nabehandeling is van belang voor het verkrijgen van een gesloten oppervlak. Tenminste een week moet het beton tegen uitdrogen worden beschermd.
- Contrôle op samenstelling van het beton, verwerking, nabehandeling en opslag is vereist.

4.4. Toelichting

Gelet op de ervaring bij het gebruik van beton als bouwmateriaal voor waterbouwkundige werken zijn voorgaande eisen en voorschriften geformuleerd. Overdreven eisen, gesteld aan de sterkte van het materiaal beton, kunnen resulteren in onnodig hoge kostprijzen.

Bouwmaterialen in een agressieve omgeving worden aangetast. Soms nauwelijks merkbaar, soms snel. De snelheid van aantasting hangt af van de bestandheid van het materiaal.

Belangrijk daarbij is natuurlijk de samenstelling en de poriënverdeling in het materiaal. Voor beton worden daarom eisen gesteld aan de grondstoffen, de fabricage, de opslag en de kwaliteit.

Afhankelijk van de cementsamenstelling kan beton in meer of mindere mate chemisch worden aangetast door de in zeewater aanwezige calcium- en magnesiumsulfaten.

Een gelukkige omstandigheid in zeewater is dat de sulfaataantasting veel minder is dan bij vergelijkende proeven in het laboratorium bij eenzelfde sulfaatconcentratie wordt gevonden. Dit is het gevolg van de aanwezigheid van chloride in het zeewater. In de praktijk blijkt dan ook meestal dat de betonaantasting in zeewater gering is, mits het beton goed en dicht is. In Nederland wordt voor constructies in en nabij zee bijna altijd hoogovencement voorgeschreven. Bij een voldoende hoog gehalte hoogovenslak (tenminste 65%) is dit cement bestand tegen sulfaataantasting.

Een andere vorm van aantasting wordt veroorzaakt door vorst. In CUR-rapport 64 "Vorstbestandheid beton" (lit. 10) worden proefresultaten gegeven die voor hoogovencement een betere bestandheid bij een bepaalde vriesproef tonen dan voor portlandcement.

Tenslotte kan er nog sprake zijn van verwerking van het beton onder invloed van diverse mechanismen. Genoemd kunnen bijvoorbeeld worden het mechanisch afschuren bij stromend water, vooral indien er zand wordt meegevoerd en het uitkristalliseren van zouten, waardoor soms zwelwerking kan optreden.

Door temperatuursinvloeden kunnen spanningen in de oppervlaktelagen ontstaan.

Ook daardoor kan beton verwerken.

Uit het voorgaande is het duidelijk, dat ook betonconstructies niet het "eeuwige leven" kunnen hebben.

De mate van aantasting kan echter sterk worden beïnvloed door de betonsamenstelling en de wijze van verwerken en nabehandelen.

Bij het toepassen van gewapend beton worden in de normen duidelijke richtlijnen gegeven.

De mogelijkheid tot corrosie van betonstaal als gevolg van het indringen van koolzuur uit de lucht en chloride uit het water is te beperken door een goede en dichte betonkwaliteit toe te passen. Behalve de genoemde betonkwaliteit moet ook nog een voldoende grote betondekking op de wapening aanwezig zijn, terwijl het optreden van scheuren zoveel mogelijk moet worden vermeden. Hierbij moet aangetekend worden dat bij het toepassen van beton als bekleding op dijken meestal geen wapening wordt toegepast.

Hoofdstuk 5 - TE STELLEN EISEN AAN ONDERLAGEN

5.1. Algemeen

Een onderlaag kan tesamen met een eventuele tussenlaag worden gedefinieerd als de overgangsconstructie van de meestal uit zand opgebouwde kern van de dijk naar de aan de buitenzijde aanwezige harde bekleding. Een onderlaag met tussenlaag kan, afhankelijk van de omstandigheden, diverse functies moeten vervullen:

- a. Het voorkomen van uitspoeling van grond uit het dijklichaam.
- b. Het vormen van een uitvlaklaag teneinde de bekleding gemakkelijker te kunnen aanbrengen (in het bijzonder van toepassing op tussenlagen).
- c. Het vormen van een extra veiligheid ingeval van schade aan de bekleding, waardoor de bodem van de dan ontstane ontgrondingskuil niet direct de onderliggende zandkern van de dijk bereikt.
- d. Het vormen van een waterdichte laag op de doorlatende kern van de dijk.
- e. Het vormen van juist een goed watervoerende laag direct onder de bekleding.
- f. Het vormen van een stroom- en golfbestendig tijdelijk bekledingsmateriaal tijdens de aanleg van de dijk.
- g. Het oorspronkelijk aangebracht zijn als perskade, waarna het als onderdeel van het dijklichaam blijft fungeren.

De onderlagen kunnen worden verdeeld in dichte en doorlatende lagen.

5.2. Dichte onderlagen

Een dichte onderlaag wordt in het algemeen verkregen door gebruik te maken van het materiaal klei. Wanneer tussen de klei en de harde bekleding een tussenlaag van granulair materiaal wordt aangebracht, eventueel met toepassing van kunststof doek of vlies tegen het intrappen van het granulair materiaal in de klei, dan heeft men echter, met het oog op de stabiliteit van de bekleding onder golfaanval, een doorlatende ondergrond verkregen.

Betonblokken direct op de klei gelegd en toegepast boven de getijzône, behoeven geen problemen op te leveren, mits de klei van een goede kwaliteit is en de bekleding vrij gesloten is. In de dagelijkse getijzône kan het gebruik van klei wel problemen geven in verband met de verwerking en erosiebestendigheid.

Wanneer de blokken goed tegen de klei aanliggen kunnen onder de blokken ten gevolge van de golfaanval moeilijk overdrukken ontstaan. Hierdoor hebben de blokken direct op klei onder golfaanval een stabielere ligging dan dezelfde blokken op een granulair filter.

De aansluiting van de blokken op de klei dient dan echter wel optimaal te zijn en te blijven; hierbij te denken aan:

- a. erosie van de klei onder de bekleding
- b. holten in de klei onder de bekleding
- c. plastische en visceuze eigenschappen van de klei
- d. krimp- en zwelgedrag
- e. verwerkbaarheid van de klei, waarbij vooral de condities tijdens verdichten van belang zijn.

Voor de formulering van enkele concrete eisen omtrent het materiaal klei wordt naar 5.4.1. verwezen. Hier wordt volstaan met het geven van enkele aan literatuur 20. ontleende aanwijzingen voor de verwerking van klei.

Hierbij dient gerealiseerd te worden, dat wegens de wisselende werkomstandigheden in de praktijk het moeilijk kan zijn deze optimale verwerkingscondities te realiseren. Teneinde een voor de bekleding goede onderlaag te verkrijgen is het, als de omstandigheden het enigszins toelaten, aan te bevelen de hierna te noemen grenzen aan te houden.

Aspecten bij de verwerking van klei zijn:

- a. in het werk brengen
- b. verdichten
- c. afvlakken van het talud en zetten van de blokken.

ad a.

De optimale verwerkingscondities, uitgedrukt in het watergehalte, liggen veelal binnen betrekkelijk nauwe grenzen.

Daardoor worden bij sommige kleisoorten deze grenzen snel overschreden, indien het watergehalte verandert als gevolg van weersveranderingen.

In dit verband is het van belang dat de plasticiteitsindex ^{*)} I_p van de klei niet te laag is, zodat de mogelijkheid van een snelle overgang van de halfvaste toestand naar de halfvloeibare toestand tijdens een regenperiode wordt uitgesloten ($I_p > 20\%$). Een goed criterium voor de verwerkbaarheid van klei vormt de zogenaamde consistentie-index ^{*)} I_c ($I_c > 0,8$). Door deze eis wordt voldoende afstand tot de vloeigrens verkregen.

ad b.

Bij de uitvoering zal moeten worden gestreefd naar een zo dicht mogelijke structuur (verdichting). Teneinde een optimale verdichting in het werk te verkrijgen is het ideaal wanneer het watergehalte binnen de volgende grenzen is gelegen:

- minimaal gelijk of slechts weinig lager dan het optimum watergehalte volgens de proctorproef (zie Eisen 1978, RWS)
- maximaal gelijk of slechts weinig hoger dan de uitrolgrens ^{*)}.

De verdichting dient circa 95% P.D. (proctordichtheid) te bedragen. Het verdichten zal in een zo homogeen mogelijke kleilaag moeten resulteren. De te verdichten laagdikte mag per keer niet te groot zijn: verdichting in zo nodig 2 lagen van maximaal 0,40 m dik.

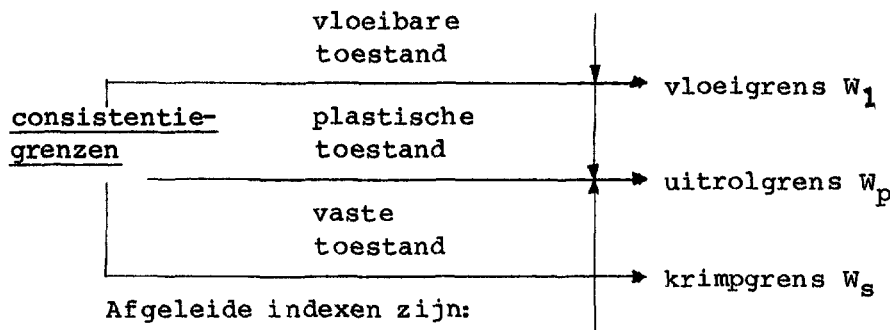
Contrôle op dichtheid en homogeniteit tijdens en na de verdichting dient te worden uitgevoerd.

Verder mag de klei geen zodanige kluiten bevatten dat niet voldaan kan worden aan de eis van een homogene verdichting.

^{*)} voor opmerking zie pag. 28a

*) Consistentiegrenzen uitgedrukt in het watergehalte (is gewicht van het water gedeeld door het gewicht aan droge stof x 100%):

- vloeigrens (liquid limit) W_1 :
het watergehalte waarbij een in een grondmonster aangebrachte groef juist is dichtgevloeid nadat het schaalpje waarin het monster is aangebracht 25 maal van een hoogte van 1 cm op een vaste ondergrond is gevallen.
- uitrolgrens (plastic limit) W_p :
het watergehalte waarbij het juist niet meer mogelijk is een balletje klei uit te rollen tot een draad van 3 mm diameter zonder dat de klei verbroevelt.
- krimpgrens (shrinkage limit) W_s :
het watergehalte waarbij het monster bij uitdroging juist niet meer in volume afneemt of het watergehalte nadat juist genoeg water aan een droog stuk grond is toegevoegd om alle poriën te vullen.



plasticiteitsindex $I_p = W_1 - W_p$

consistentie-index $I_c = \frac{W_1 - W}{I_p} = \frac{W_1 - W_p}{W_1 - W_p}$

waarin W het watergehalte van de grond in situ is.

ad c.

Bij het afvlakken van het talud moet voorkomen worden dat de bovenste centimeters van de kleilaag te los zijn. Dit kan bij zware belastingcondities optredend kort na de uitvoering, tot erosie respectievelijk schade leiden. In hetzelfde kader ligt het niet acceptabel zijn van het aanvullen van diepe rijsporen en dergelijke met losse kruimelige klei. Voorkomen moet dus worden dat het afgewerkte talud wordt bereden of intensief belopen.

Verder is het van belang plaatselijke verontreinigingen in de vorm van doorlatend materiaal te weren.

De gevolgen van dergelijke plekken kunnen zijn dat toch overdrukken ontstaan onder het dan te lichte blok of dat erosie optreedt.

Aanbevolen wordt de kleilaag zodanig aan te brengen dat deze na verdichting over de gehele oppervlakte enkele centimeters hoger ligt dan het te maken profiel. De te veel aangebrachte klei op een zodanige wijze van het talud afschaven dat het bovenvlak vlak, glad en dicht is. In het bovenvlak mogen geen scheuren zichtbaar zijn.

Teneinde de aansluiting van de blokken op de klei te verbeteren verdient het aanbeveling alle blokken met bijvoorbeeld een rol aan te drukken.

Tijdens regenval kan worden doorgewerkt zo lang de klei niet zodanig is verweekt, dat niet meer aan de verdichtings- en uitvoeringseisen kan worden voldaan.

Om uitdroging van het klei-oppervlak te voorkomen dienen de betonblokken in het algemeen te worden aangebracht op dezelfde dag dat de klei onder profiel wordt afgewerkt.

Tijdens vorst mogen geen betonblokken worden gezet; dit geldt ook zo lang de klei nog bevroren is.

Bij een dijklichaam opgebouwd uit zand, waarop een onderlaag van klei is aangebracht, dient, evenals bij elke andere gesloten afdekking (b.v. asfaltbeton bekleding), rekening te worden gehouden met het afdrukken van een te dunne laag door grondwaterdrukken vanuit het zandlichaam. In dit verband dient het binnentalud van de waterkering niet te worden vergeten.

Een andere reden waarom de onderlaag van klei voldoende dikte moet bezitten, vormt de in 5.1. genoemde functie van het vormen van een veiligheidszône bij schade aan de bekleding. In het algemeen wordt voor zeedijken een dikte van 80 à 100 cm aangehouden.

Soms wordt in de getijzône een soort werkvloer van grind of zand op de klei aangebracht, waardoor de klei tijdens de bouwfase enigszins wordt beschermd en het zetten van de blokken wordt vergemakkelijkt.

Het voordeel van een stabielere ligging van de blokken op de klei boven plaatsing op een granulair filter wordt dan echter deels teniet gedaan. Deze handelwijze moet daarom worden afgeraden.

Wil men bij een hooggelegen voorland de onderlaag van klei ver naar beneden doortrekken, dan is het beter tijdens de aanlegfase van de bekleding een tijdelijke kering, bijvoorbeeld een kleine grondkade, op te werpen zodat het laag gelegen deel van het talud droog blijft.

Bij een dieper gelegen voorland is men echter in het tijgebied aangewezen op stroom- en golfbestendige materialen zoals mijnsteen als onderlaag. In deze situatie kan het talud alleen boven de dagelijkse getijzône van een onderlaag van klei worden voorzien.

5.3. Doorlatende onderlagen

Doorlatende lagen kunnen worden verdeeld in:

- a. granulair materiaal, eventueel gecombineerd met een kunststofdoek of vlies, of een eronder liggende laag klei
- b. gebonden granulair materiaal.

ad a.

Doorlatende lagen hebben onder andere als functie uitspoeling van het onderliggende grondlichaam te voorkomen en moeten daarom voldoen aan het bij filterconstructies gebruikelijke criterium van zanddichtheid, zie 5.5.

Teneinde aan de eis van zanddichtheid te kunnen voldoen moet men bij een granulair filter voor een juiste opbouw van het filter zorg dragen. Een granulair filter kan uit één laag bestaan met een nagenoeg homogene korrelverdeling, of uit meerdere lagen met naar boven toe een oplopende grootte van de korrels. De onderste laag heeft dan de taak de korrels uit de ondergrond, het basismateriaal, op hun plaats te houden, terwijl iedere volgende laag dit moet doen met de korrels uit de onderliggende laag.

Bij de gegradeerde opbouw van het filter zal een verantwoord compromis tussen de technologische wensen en de economische mogelijkheden moeten worden nagestreefd.

Veelal is het eenvoudiger en goedkoper een kunststofdoek of vlies toe te passen voor het verkrijgen van een zanddichte onderlaag.

Ook de bekleding zelf moet voldoen aan het filterprincipe betreffende materiaaldichtheid. De afmetingen van de korrels in de buitenkant van het onderliggende filter moeten voldoende groot zijn opdat het filtermateriaal niet door de openingen (voegen en gaten) van de bekleding erodeert. Een te grove bovenmaat van de korrels van het granulaat onder een blokkenglooiing is echter ook fout, omdat men de blokken dan moeilijk vlak op de glooiing kan plaatsen en de steenzetter de neiging heeft grote stukken te gebruiken als onderstopping om een juiste hoogte te verkrijgen. Hierdoor bestaat de kans op nazakken en een onregelmatig oppervlak.

Verder kunnen aan een filter onder een bekleding eisen worden gesteld betreffende de waterdoorlatendheid.

Overdrukken op zich zijn niet erg zo lang ze worden gecompenseerd door extra gewicht, zodat oplichten van het filter en/of bekleding niet kan optreden, of zolang de overdruk niet leidt tot verweking van de ondergrond waardoor afglijden kan optreden door vermindering van de op te nemen schuifspanning.

Voor de stabiliteit van een bekleding opgebouwd uit losliggende elementen is een minder doorlatende laag direct onder de gezette bekleding gunstig, zie ook hoofdstuk 13.

Als filtermateriaal komen diverse materialen in aanmerking; bijvoorbeeld diverse soorten slakken, gebroken grind, steenslag, silex, mijnsteen, puin. Bij het gebruik van slakken moet worden nagegaan of het gevaar aanwezig is van uitloging van voor het omringende milieu schadelijke stoffen.

De in 5.1. genoemde functie van de onderlaag als ingebouwde extra veiligheid bij schade aan de bekleding kan worden verwezenlijkt door:

1. onder de laag granulair materiaal een laag klei aan te brengen
2. de onderlaag voldoende dikte te geven
3. materiaal met een hoge volumieke massa toe te passen
4. afmetingen van de stenen in de onderlaag voldoende groot te nemen.

Wanneer als ondergrond voor een deel van de bekleding mijnsteen afkomstig van een perskade aanwezig is, wordt aanbevolen de mijnsteen af te dekken met een tussenlaag van fijner granulair materiaal, bijvoorbeeld steenslag of gebroken grind, met een dikte van 5 à 10 cm. Hiervoor zijn twee redenen, namelijk:

1. indien de blokken direct op de mijnsteen worden gelegd spoelen de fijne delen van de mijnsteen weg, waardoor holle ruimten en/of verzakkingen kunnen ontstaan
2. de ongelijke grootte van mijnsteen maakt het moeilijk een vlak talud te verkrijgen.

Het direct aanbrengen van de blokkenbekleding op een kunststoffilter, dat weer op een dijklichaam van zand is gelegen, wordt sterk afgeraden. Er is in dit geval bij schade aan de bekleding hoegenaamd geen tweede verdedigingszone aanwezig, terwijl ook tijdens het zetten van de blokken het kunststoffilter gemakkelijk kan worden beschadigd.

Het combineren van een kunststoffilter en een laag granulair materiaal in één constructie behoort wel tot de mogelijkheden. Het voordeel van deze constructie is dat er geen, soms moeilijk te realiseren, filtereisen aan het granulaire materiaal behoeven te worden gesteld.

Wegens de in hoofdstuk 2 genoemde functionele eis van stabiliteit tegen afschuiven dient bij een onderlaag en tussenlaag van granulair materiaal aandacht te worden geschonken aan de vorm van de korrels. Ten einde voldoende stabiliteit te verkrijgen (vooral in de uitvoeringsfase) moeten de korrels, afhankelijk van de taludhelling, een zekere "hoekigheid" bezitten. In het algemeen wordt aan de eis van een hoekige vorm voldaan wanneer men gebroken materialen toepast, dus bij grind geen ongebroken maar gebroken grind gebruiken.

ad b.

Bij een gebonden filter onder de bekleding kan men denken aan cement en bitumen als bindmiddelen.

Door een juiste opbouw van het mengsel is het met beide bindmiddelen mogelijk een onderlaag te vervaardigen die een doorlatendheid bezit die die van ongebonden zand benadert.

De met cement gebonden onderlagen hebben als nadeel dat ongelijke zettingen en ontgrondingen slecht zonder scheurvorming worden gevolgd. Onderlagen gebonden op basis van bitumen zijn minder gevoelig voor ongelijke zettingen, dank zij de visceuze eigenschappen van het bitumen.

Voorwaarde is wel dat deze vervormingen geleidelijk zijn ontstaan. Het gehalte aan bitumen zal echter in sterke mate de grootte van de plasticiteit bepalen.

Bij het gebruik van een gebonden onderlaag kan de bekleding rechtstreeks op deze onderlaag worden geplaatst.

Ook bij dit type onderlaag hebben de blokken onder golfaanval een minder stabiele ligging dan bij goede klei het geval is.

5.4. Materiaaleigenschappen

5.4.1. Klei

Voor klei als laag direct onder een uit betonblokken opgebouwde bekleding is vooral het verschijnsel erosie van belang, in verband met de stabiliteit van de betonblokken onder golfaanval.

Bij het erosiegedrag van klei zijn diverse parameters van invloed:

- a. deeltjesafmeting; klei-, slib- en zandgehalte
- b. kleimineraal
- c. gehalte aan organisch materiaal
- d. consistentiegrenzen en afgeleide indexen
- e. wijze van sedimentatie en consolidatie
- f. dichtheid, (optimum) watergehalte en verdichtingsgraad
- g. doorlatendheid van de klei
- h. krimp- en zwelgedrag van de klei
- i. cohesie en schuifweerstand
- j. fysisch-chemische eigenschappen van klei, poriënwater en eroderend water
- k. homogeniteit.

Hoewel er zeker indicaties zijn aan te geven voor de mate van erosiegevoeligheid als functie van een aantal van deze factoren afzonderlijk, is het niet mogelijk deze in een erosieformule voor klei weer te geven.

De beschrijving van de invloed van de diverse parameters kan veelal niet meer dan kwalitatief zijn.

Teneinde de erosiebestendigheid van klei proefondervindelijk te bepalen zijn diverse soorten erosieproeven mogelijk.

Onderscheid kan worden gemaakt tussen proeven, waarbij de erosiebestendigheid volgens een gestandaardiseerde procedure wordt bepaald zonder dat een directe relatie met de omstandigheden in de praktijk aanwezig behoeft te zijn en proeven, waarbij die relatie wel aanwezig is.

Voor de keuze van een bepaalde beproevingsmethode wordt aanbevolen contact op te nemen met een ter zake kundig grondmechanisch laboratorium.

Hoewel de bestendigheid van een zekere klei tegen erosie zich moeilijk laat berekenen, zijn er wel enkele globale grenzen aan te geven (zie ook lit. 20):

- percentage lutum ($d < 0,002$ mm) minimaal ca. 20%
- percentage lutum maximaal ca. 40 à 50%
- percentage zand ($d > 0,063$ mm) maximaal ca. 25%
- percentage organische stof maximaal ca. 3%.

Bij klei afkomstig van schorren dient stil te worden gestaan bij het begrip "rijping". Als een met water verzadigde grond droogvalt, verliest hij water door verdamping; eerst rechtstreeks, later via gevormde krimpscheuren en begroeiing. Deze indroging wordt rijping genoemd. Door afname van de waterspanning neemt de korrelspanning geleidelijk toe, hierdoor wordt de klei steeds meer begaanbaar en verwerkbaar. Indien schorklei wordt toegepast, dient deze in ieder geval voldoende te zijn gerijpt, waarvoor dan de aanleg van een kleidepôt noodzakelijk is. Het rijpingsproces kan versneld worden door het kleidepôt enkele malen om te zetten.

Naast het watergehalte heeft ook het percentage lutum en organische stof invloed op de mate waarin de klei na verloop van tijd is gerijpt. Gehanteerd wordt daarom het begrip rijpingsfactor, het n-cijfer^{*)}. De rijpingsfactor wordt gedefinieerd als de waterhoeveelheid in grammen die door 1 gram van de lutumfractie wordt gebonden. Een volledig gerijpte klei bezit een rijpingsfactor $n < 0,5$.

*) De rijpingsfactor kan als volgt worden berekend:

$$n = \frac{W-p(100-L-H)}{L+bH}$$

Hierin is:

- b: de verhouding tussen het waterbindend vermogen van een bepaalde gewichtshoeveelheid organische stof tot dat van een zelfde hoeveelheid lutum ($b = \text{ca. } 3,0$)
- p: het aantal grammen vocht, gebonden door 1 gram niet-colloïdaal materiaal (droge klei minus lutum en organische stof) ($p = \text{ca. } 0,3$)
- L: het aantal grammen lutum per 100 gram droge stof
- H: het aantal grammen organische stof per 100 gram droge stof
- W: het aantal grammen water per 100 gram droge stof.

5.4.2. MijNSTEEN

MijNSTEEN komt vrij bij de winning van steenkool (zie b.v. lit. 19). Onder grote druk zijn bij het ontstaan veenlagen omgevormd tot steenkool en zand en klei tot zandsteen en kleischalie. MijNSTEEN bestaat voor het grootste deel uit kleischalie. Afhankelijk van de mate van consolidatie kan de kleischalie worden onderscheiden in kleisteen en de vastere leisteen. Het grootste deel van de kleischalie bestaat echter veelal uit kleisteen, terwijl de overgang naar de leisteen niet scherp is. Kleisteen is een zwak gesteente, dat aan de lucht blootgesteld in het algemeen gemakkelijk desintegreert tot kleinere fragmenten. Hierdoor kan de waterdoorlatendheid in de loop der tijd sterk afnemen. De mate waarin en de snelheid waarmee dit gebeurt hangt af van de mate van consolidatie. Het materiaal valt niet verder uiteen dan deeltjes waarvan de zeefmaat groter is dan 2 mm. Dit komt doordat door de grote druk waarmee klei tot kleisteen is gevormd de waterhuidjes rond de kleideeltjes zijn verdwenen en daarmee ook de klei-eigenschappen zoals plasticiteit, krimp- en zwelvermogen. Vochtige mijNSTEEN is niet bestand tegen vorst- en dooiwisselingen.

Bij het bepalen van de korrelgradering moet worden gerekend met een zekere verbrijzeling van de mijNSTEEN als gevolg van transport, opslag en verwerking.

De verdichtbaarheid van mijNSTEEN is sterk afhankelijk van het vochtgehalte en de korrelgrootte.

Indien het vochtgehalte van ongesorteerde mijNSTEEN uit steenberggen door neerslag enige procenten toeneemt bestaat er een grote kans dat het optimum vochtgehalte wordt overschreden, hetgeen kan leiden tot onverdichtbaarheid en onbegaanbaarheid.

Met water verzadigde mijNSTEEN is in principe gevoeliger voor zettingsvloeiing dan zand. In de Verenigde Staten zijn enkele mijNSTEENDAMMEN daardoor bezwaken.

Wanneer bij verwerking de mijNSTEEN niet al te zeer verkneed is, komt de waterdoorlatendheid overeen met de waarden voor zeer grof slibloos zand (ook na desintegratie tot kleinere fragmenten).

Door verdichting en berijding bij nat weer kan door verkneding van de mijnsteen een ernstige achteruitgang in de doorlatendheid optreden. Het verdichten kan met een dozer worden uitgevoerd. De mijnsteen wordt bij deze verdichtingswijze in het algemeen niet zodanig verkneed dat de waterdoorlatendheid sterk afneemt. Verdichten is noodzakelijk om ongelijkmatige zettingen te voorkomen.

In de waterbouw wordt de mijnsteen in het algemeen in twee graderingen geleverd: mijnsteen 0 - 70 en 10 - 125 mm. De volumieke massa van de korrels bedraagt 2200 à 2500 kg/m³.

De volumieke massa van het losgestorte materiaal bedraagt 1700 à 1800 kg/m³.

5.4.3. Silex

Silex, ook wel genoemd vuursteen, is een zeer harde steensoort. Het bestaat vrijwel geheel uit een microkristallijne vorm van SiO₂. De volumieke massa bedraagt 2600 kg/m³. De volumieke massa van het losgestorte materiaal is uiteraard afhankelijk van de gradering en bedraagt ca. 1600 kg/m³; door mechanisch verdichten kan ca. 1800 kg/m³ worden bereikt.

Silex komt voor in min of meer regelmatige lagen in de kalksteenafzettingen ('mergel') in Zuid-Limburg. Bij de winning voor de fabricage van cement, waarvoor deze kalksteen als grondstof dient, resteert een gedeelte van de silex als bijproduct. Het wordt geleverd in de korrelfracties 0 - 25, 0 - 90 en 25 - 70 mm.

Door de wijze van winnen en verwerken bevat deze silex altijd een hoeveelheid tauw. Dit zijn op kleur herkenbare brokken zuivere kalksteen, afkomstig van de bovenste laag van de mergel, die zo hard zijn dat ze in het maalproces niet zoals de overige kalksteen worden fijngemalen maar met de silex worden afgescheiden.

5.4.4. Slakken

Als onderlaag en vulling tussen de blokken komen in principe diverse slakken in aanmerking:

- a. L.D.-slakken (staalslakken), afkorting van Litz-Donawitz
L.D.-slak is een bijprodukt bij de produktie van staal volgens het L.D.-proces. De korrels dienen een volumieke massa te hebben van tenminste 3100 kg/m^3 .
In L.D.-slakken komen verontreinigingen voor, zoals: kalk, ingesloten ijzer- en staaldelen.
Een nadeel voor de verwerking is dat de kalk door de hydraulische werking voor verstening kan zorgen.
- b. Fosforslakken
Deze slak is een calciumsilicaat dat bij de fosforwinning uit fosforerts onder toevoeging van onder andere grind ontstaat. De volumieke massa van de slak bedraagt 2800 kg/m^3 . De slak heeft een natuursteenachtig uiterlijk en een hoekige vorm.

De in het verleden veelvuldig toegepaste loodslakken, met een zeer hoge volumieke massa, worden wegens het gevaar van uitloging van lood naar het milieu niet meer toegepast.

5.4.5. Kunststofdoek/-vlies

De sterkte van een weefsel wordt in het algemeen opgegeven als de kracht bij bezwijken per lengte-eenheid in de richting loodrecht op die van de kracht. De gemeten sterkte is mede afhankelijk van de vorm en grootte van de proefstrook, de wijze van inklemming en belasting. De reductie van de langeduursterkte ten opzichte van de sterkte bij kortdurende belasting kan in sommige gevallen wel 50% of meer bedragen. In civiele constructies is daarentegen het kunststofdoek veelal niet aan een opgelegde kracht onderworpen, maar aan een opgelegde vervorming.

Hiertegen zijn de kunststofdoeken in verband met de grote toelaatbare rekken goed bestand, mits de vervorming niet over een te kleine afstand optreedt.

Achteruitgang van mechanische eigenschappen kan worden veroorzaakt door chemische of fotochemische aantasting van het vezelmateriaal of door mechanische beschadiging van de constructie (zie lit. 17).

De duurzaamheid is in eerste instantie afhankelijk van de moleculaire opbouw van het vezelmateriaal.

De weerstand van het vezelmateriaal tegen de aantasting kan worden verbeterd door toevoeging van beschermende substanties aan de grondstof. Er wordt carbon black (roet) aan toegevoegd om de inwerking van de UV-straling tegen te gaan en verder nog verschillende antioxydanten. Uit onderzoek is echter gebleken dat de antioxydanten op den duur in aanzienlijke mate kunnen uitlogen. IJzerverbindingen bekorten de levensduur van polypropreenweefsels.

Zuren kunnen een negatieve invloed hebben op de werking van antioxydanten.

Bij polyamideweefsels speelt veroudering geen rol van betekenis.

5.4.6. Zandasfalt, gebitumineerd zand

Zandasfalt is een mengsel bestaande uit zand, vulstof en bitumen; laat men de vulstof weg dan wordt het aangeduid met de benaming gebitumineerd zand. Het gehalte aan bitumen bedraagt 3 - 5%. Het is een zeer ondervuld mengsel, het bitumen bindt alleen de korrels aan elkaar.

De geringe hoeveelheid bitumen in het mengsel heeft tot gevolg dat de zandkorrels slechts worden omhuld door een dun bitumenfilmje van enkele microns. Bovendien concentreert het bitumen zich op de raakvlakjes tussen de zandkorrels. Dit houdt in dat gebitumineerd zand, afhankelijk van de mate van verdichting, de korrelopbouw en korrelvorm een grote doorlatendheid bezit die, voor de in de praktijk voorkomende verdichtingsgraden, die van het ongebonden zand kan benaderen.

De duurzaamheid wordt bepaald door de blijvende bindende werking van het bitumen.

Voor een uitgebreidere behandeling van dit materiaal wordt verwezen naar de "Leidraad voor de toepassing van asfalt in de waterbouw"; een uitgave van de TAW.

5.5. Filtereigenschappen

5.5.1. Algemeen

Voor meer achtergronden wordt verwezen naar literatuur 15 tot en met 18.

Verreweg de belangrijkste eis te stellen aan een filter in een taludbescherming is het vermogen de ondergrond, bij de optredende stromingen ten gevolge van een golf of een verval, tegen uitspoelen te beschermen. Het filter moet voldoende zanddicht zijn. Bij het beschouwen van de zanddichtheid van filterconstructies moeten twee condities worden onderscheiden, namelijk:

- zanddichtheid onafhankelijk van de stromingscondities, hoe zwaar ook (geval a) en
- zanddichtheid onder voorwaarde dat bepaalde grenswaarden in de stromingstoestand niet worden overschreden (geval b).

Geval a: zanddichtheid onafhankelijk van de stromingscondities.

Voor dit geval berust de zanddichtheid op het niet kunnen binnendringen van materiaal uit de ondergrond in het filtermateriaal op grond van de korrelafmetingen in de ondergrond ten opzichte van de grootte van de poriën in het filter.

Geval b: zanddichtheid afhankelijk van stromingscondities.

Bij dit geval is het van belang te weten welke richting de stroming heeft ten opzichte van de oriëntatie van het filter. Als de stroming loodrecht op het scheidingsvlak tussen filter- en basismateriaal staat, is het filter altijd zanddicht als het verhang in het basismateriaal kleiner is dan ongeveer 100%. De verhangkracht maakt bij een verhang van 100% juist evenwicht met het gewicht van een kolom zand met $\rho = 2650 \text{ kg/m}^3$ en een poriëngehalte van 0,4 (ook wel fluïdisatievoorwaarde genoemd).

Zonder cohesiekrachten tussen de korrels of extra krachten ten gevolge van een bovenbelasting wordt bij grotere verhangen dan 100% het evenwicht verbroken en is beweging van de zanddeeltjes mogelijk. Bij zulke grote verhangen is het nog van belang of de stroom van richting wisselt.

Als er geen wisseling optreedt kan er brugvorming of boogvorming optreden bij de ingang van de poriën in het filter waardoor de zanddichtheid verbetert. Ook kan bij dergelijke toestanden een natuurlijk filter worden opgebouwd, waarbij het voor het zanddicht zijn voldoende is dat alleen de grootste korrels niet door de poriën in het filter kunnen dringen. Bij de opbouw van een natuurlijk filter stopt het transport omdat de overgebleven grove fractie als filter voor de onderliggende lagen gaat werken. Onder een cyclische belastingtoestand zou een natuurlijk filter mogelijk kunnen worden afgebroken.

Indien de stroming evenwijdig is gericht aan het scheidingsvlak tussen filter- en basismateriaal zijn vooral de grootte van het verhang en de daardoor opgewekte stroomsnelheden in de filterlaag van belang voor het al of niet zanddicht zijn.

Bij overschrijding van een kritische waarde van het verhang ontstaat een zodanige stroomsnelheid in het filter dat het basismateriaal in beweging komt en de zanddichtheid verloren gaat.

Bij granulaire filters is verder nog van belang de interne stabiliteit bij gegradeerde mengsels.

Bij kunststoffilters vragen het dichtslaan, dichtslibben, sterkte, rekvermogen en duurzaamheid de aandacht.

5.5.2. Soorten filters

a. Granulaire filters

Van oudsher zijn filters toegepast bestaande uit korrelige materialen, die grof, fijn, rond, afgeplat of hoekig kunnen zijn, weinig of sterk gegradeerd, een kleine of grote volumieke massa kunnen hebben.

Een dergelijk filter kan uit één laag bestaan met een nagenoeg homogene korrelverdeling of uit meerdere lagen met naar boven toe een oplopende grootte van de korrels.

Een voordeel van de granulaire filters is vooral de grote aanpasbaarheid aan de filtereisen door de grote vrijheid in het samenstellen van granulaire mengsels. Praktisch zullen hieraan grenzen zijn verbonden in verband met de kosten.

b. Kunststoffilters

Veel voorkomende vormen van kunststoffilters zijn:

- gazen
- bandjesweefsels
- matten
- doeken
- vliezen

Gazen zijn geweven uit nagenoeg ronde enkelvoudige draden (monofilament garen).

Karakteristiek is het regelmatig patroon van de openingen en het grote percentage openingen per oppervlakte-eenheid. De grootte van de openingen wordt voornamelijk bepaald door de dikte-afmetingen van de draden en de steek waarop de draden zijn gerangschikt.

Bandjesweefsels zijn geweven uit reepjes kunststof die vlak in het weefsel liggen en nauw tegen elkaar aansluiten. Kenmerkend is het geringe percentage openingen per oppervlakte-eenheid.

Matten zijn geweven uit splitfilmdraden die zijn vervaardigd uit versterkte film, al dan niet gefibrileerd en eventueel getordeerd. De draden krijgen door het fabricageproces een vezelachtige structuur. De grootte van de openingen is voornamelijk afhankelijk van de dikte van de samenstellende draden en steek.

Doeken zijn geweven uit al dan niet getwijnde multifilament garens. De draden liggen dicht tegen elkaar aan. Door de geringe dikte van het weefsel blijft het toch soepel. Het weefsel doet sterk aan textiel denken.

Vliezen bestaan uit lange of korte vezels die al of niet met een bindmiddel een onderlinge samenhang bezitten.

Kenmerkend is het warrige beeld van het uiterlijk, dat er overigens zeer dicht uitziet. De laagdikte kan variëren van onderdelen van centimeters tot onderdelen van millimeters.

Kunststoffilters hebben het voordeel van de zeer geringe dikte, vooral ten opzichte van de uit meerdere lagen bestaande granulaire filters, maar zijn anderzijds kwetsbaar voor beschadigingen.

c. Samengestelde filters

Bij deze groep kan onderscheid worden gemaakt tussen granulaire filters met een bindmiddel en granulaire filters met een omhulling van een kunststoffilter.

Voorbeelden van de eerste groep zijn de ondervulde mengsels van zand en steenachtige materialen met asfalt, zoals zandasfalt, gebitumineerd zand en open steenasfalt. Door de asfaltomhulling ontstaat een samenkitting waardoor het filtermateriaal beter bestand is tegen uitwendige belastingen.

5.5.3. Zanddichtheidseisen

Granulaire filters

- a. Onafhankelijk van de stromingscondities voor nagenoeg uniforme filter- en basismaterialen, dat wil zeggen steile zeefkrommen, treedt zanddichtheid op als:

$$D_{50f} < 4 \text{ à } 5 D_{50b} \quad [5.1.]$$

waarin D_{50} de diameter is van de zeefopening waarbij 50% van het totale gewicht van het monster door de zeef gaat. De index f staat voor het filter en de index b voor het basismateriaal.

Voor filter- en basismaterialen met vrij flauwe zeefkrommen geldt:

$$D_{15f} < 4 \text{ à } 5 D_{85b} \quad [5.2.]$$

Zie ook fig. 5.1. en fig. 5.2.

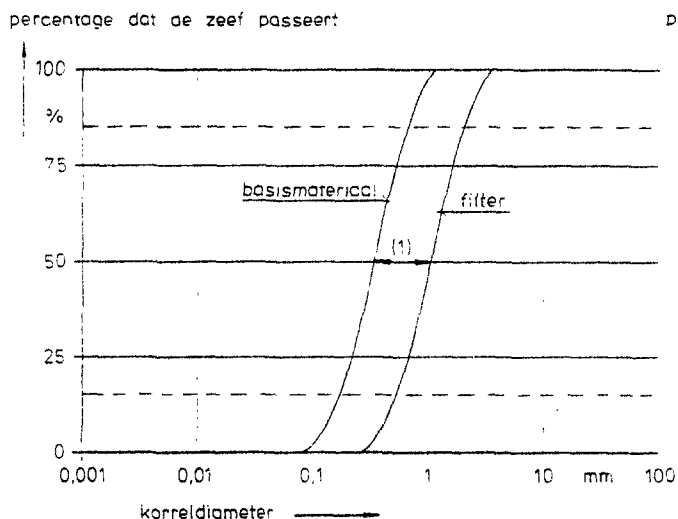


Fig. 5.1.: Filtereisen uniform materiaal

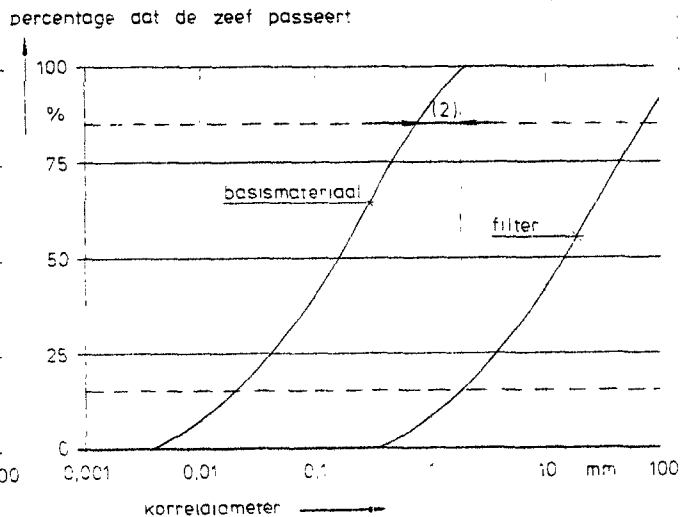


Fig.5.2.: Filtereisen niet-uniform materiaal

- b. Afhankelijk van de stromingscondities is het mogelijk de onder a. genoemde eisen te versoepelen. Indien men van deze mogelijkheid gebruik wil maken wordt aanbevolen contact met een terzake deskundig laboratorium op te nemen.

Verder dient te worden nagestreefd dat de zeefkrommen van basis- en filtermateriaal zoveel mogelijk evenwijdig lopen (zie fig. 5.1. en 5.2.), daar anders de formules [5.1.] en [5.2.] niet gelden. Het filtermateriaal dient te worden verdicht in niet te dikke lagen.

Kunststoffilters

- a. Onafhankelijk van de stromingscondities treedt zanddichtheid op als:

$$O_{\max} < D_{15b} \quad [5.3.]$$

Met O_{\max} de grootste opening in het kunststoffilter. Voor O_{\max} wordt als praktische maat voor de karakterisering van de grootste openingen veelal die waarde aangemerkt, die overeenkomt met de gemiddelde zanddiameter van de fractie, waarvan 2% door het filter gaat; O_{98} .

- b. Afhankelijk van de stromingscondities.
Wanneer bij een cyclische belasting zich een natuurlijk filter kan opbouwen, geldt:

$$O_{\max} < D_{85b} \quad [5.4.]$$

Onder een stationaire stromingsconditie geldt voor matten, gazen, bandweefsels en doeken:

$$O_{90} < D_{90b} \quad [5.5.]$$

Voor vliezen ligt deze grens gunstiger en geldt:

$$O_{90} < 1,8 D_{90b} \quad [5.6.]$$

Bij het ontwerpen van filters dient eerst te worden nagegaan welke stromingscondities aanwezig zullen zijn. Indien deze sterk cyclisch zijn met in het basismateriaal verhangen groter dan 100%, dienen de filterregels van geval a. te worden gehanteerd. Bij andere condities kunnen de regels vermeld onder b. worden aangehouden.

Bij stromingen voornamelijk evenwijdig aan het scheidingsvlak tussen filter- en basismateriaal kunnen bij niet te grote verhangen zelfs zeer open filters voldoende zanddicht zijn.

Bij bekledingsconstructies aan kusten vindt men vaak de hiervoor beschreven sterk cyclische stromingen (zie de eisen onder a.).

5.5.4. Overige eisen

Aan de waterdoorlatendheid van een filter kunnen ook eisen worden gesteld in verband met het gevaar van oplichten van de constructie ten gevolge van waterdrukken vanuit het dijklichaam.

Daarentegen is een weinig doorlatende ondergrond voordelig voor een meer stabiele ligging van blokken zonder al te veel klemmende werking.

Voor de interne stabiliteit van granulaire filters kan onderstaande waarde worden aangehouden:

$$D_{60f} \leq 10 D_{10f} \quad \bullet \text{ geen interne migratie onge-} \quad [5.7.]$$

acht grootte verhang

Opgemerkt wordt dat bij kleine verhangen de eis soepeler gehanteerd kan worden. Omtrent de preciese waarden voor de kritische verhangen voor interne instabiliteit is echter nog weinig bekend.

Ter voorkoming van verstopping van het granulaire filter geldt:

$$D_{5f} > 75 \mu\text{m} \quad [5.8.]$$

5.6. Kwaliteitszorg

Wil een dijk gedurende langere tijd goed functioneren, dan zullen zekere eisen aan de constructie als geheel moeten worden gesteld, maar ook aan onderdelen ervan en dus aan de bouwmaterialen.

In het voorgaande is, voor een aantal constructie-onderdelen en materialen, aangegeven welke eigenschappen van belang zijn en in sommige gevallen zijn ook getalswaarden genoemd.

Om te bereiken dat de uiteindelijk in het werk gebrachte materialen (en daarmee de constructie) aan de gestelde eisen (blijvend) voldoen, dient een bepaalde kwaliteitszorg te worden gerealiseerd.

Dit houdt in dat bij het ontwerp wordt aangegeven, welke materiaaleigenschappen essentieel zijn en op welk niveau de te stellen eisen liggen. De eisen moeten zodanig zijn geformuleerd dat contrôle er op mogelijk is. Tevens is het noodzakelijk, dat beproevingsmethoden voorhanden zijn, dan wel worden ontwikkeld.

Vervolgens dient te worden nagegaan of het materiaal volgens de opgestelde eisen leverbaar en te verwerken is en wat eventueel de invloed van verwerking op de eigenschappen is.

Tenslotte moet worden vastgesteld welke keuringsinspanning bij levering en/of uitvoering nodig is en tot welke consequenties dat zal leiden.

Uiteraard is bovenstaand proces er één waar terugkoppeling naar en bijstelling van de uitgangspunten onvermijdelijk zal zijn.

Een situatie waarbij de eisen en keuringsprocedures in normen, voorschriften en richtlijnen zijn verwerkt, zoals dit bij beton het geval is (zie hoofdstuk 4), is voor de verschillende waterbouwmaterialen nog niet bereikt. Wel is een aantal ontwikkelingen gaande, waarover (veelal nog tussentijdse) rapportages beschikbaar zijn. Bij het schrijven van voorgaande paragrafen werden hier vele gegevens aan ontleend.

Het verdient aanbeveling gebruik te maken van de ervaringen en inzichten zoals deze bij in de kwaliteitszorg gespecialiseerde instanties en bedrijven aanwezig is.

De uiteindelijke voordelen van een consequente kwaliteitszorg liggen niet alleen in de kwalitatieve verbetering van constructies en grotere duidelijkheid tussen leverancier en afnemer, maar ook in een meer constante en/of hogere materiaalkwaliteit. Dit geeft besparingen bij de uitvoering en maakt meer uitgekende ontwerpen mogelijk.

Bij de uitvoering van de kwaliteitszorg kunnen in het algemeen worden onderscheiden: vooronderzoek, onderzoek bij levering en/of verwerking, en onderzoek bij oplevering.

Het vooronderzoek is gericht op het bepalen van de geschiktheid van een bepaald materiaal of mengsel, ook gezien de beschikbare hoeveelheden in verband met de toepassing. Eén en ander gebeurt op basis van de (al dan niet in een bestek) opgestelde eisen.

Bij het onderzoek tijdens levering en/of verwerking wordt op het verkrijgen van de gewenste kwaliteit gelet, met als belangrijkste aspect een constant niveau (homogeen materiaal) en het behoud van dit niveau. Onderzoek bij oplevering richt zich op het eindresultaat van de totale constructie of onderdelen hiervan.

Vooraf keuringen bij levering en oplevering hangen samen met zaken als het niet accepteren, vervanging, korting en garantie.

Het is van het materiaal en de toepassing afhankelijk in welke fase (n) het accent van de kwaliteitszorg valt. Dit geldt ook voor de plaats van contrôle (produktiebedrijf of werk).

De verantwoordelijkheid voor de geleverde kwaliteit ligt bij leverancier, producent of aannemer. De opdrachtgever overtuigt zich van de kwaliteit door bepaalde contrôles, die hij zelf uitvoert of laat uitvoeren, of door zich te laten informeren over door de leverancier uitgevoerd onderzoek, de bedrijfscontrôle.

Voor de in 5.4. genoemde materialen mijnsteen, silex, grind en slakken worden de te stellen filtereisen vertaald in eisen voor de korrelverdeling (zie 5.5.), waarop dan bij de produktie of de aanvoer de nodige contrôle (zeefproef) plaats moet vinden. Waar door aantasting de korrelverdeling (en dus de filtereigenschappen) kan veranderen, vindt onderzoek plaats naar bestendigheid en sterkte (vries-dooi-proef, kookproef, bepaling van het kalkgehalte, verbrijzelingsproef e.a.).

In een aantal gevallen wordt de dichtheid bepaald, wegens de stroomstabiliteit of in samenhang met de sterkte-eigenschappen.

De bepaling van de gehalten aan zand, organisch materiaal en lutum in klei dient enerzijds te gebeuren in verband met het te verwachten gedrag van het materiaal, anderzijds is ook de homogeniteit van belang.

Onderzoek naar het vochtgehalte is vooral voor de verwerkbaarheid, dus tijdens de uitvoering, van belang. Erosie en krimp eisen nader onderzoek en zullen vooral bij het vooronderzoek aan bod komen.

Kunststoffilters worden qua filtereigenschappen op waterdoorlatendheid en zanddichtheid onderzocht. Sterkte en vervormingscapaciteit zijn van belang bij de uitvoering en in verband met zettingen ook in de gebruikssituatie; voor de bepaling ervan bestaan verschillende proeven. Het materiaal waaruit het filter is samengesteld, is van belang voor de te verwachten levensduur. Voor bijvoorbeeld polypropeen bestaat een beproevingsmethode die de veroudering in de tijd versneld simuleert. Doordat de produktie van deze kunststoffilters op een fabrieksmatige wijze gebeurt, verdient contrôle op de fabriek de voorkeur.

De aandacht wordt bij gebitumineerd zand vooral gericht op het gehalte en de aard van de bitumen, te bepalen bij de produktie.

Toezicht op de verwerking (temperatuur, aanbrengen) is van belang voor het verkrijgen van een in dikte en samenstelling homogene laag.

Hoofdstuk 6 - BELASTINGZONES OP DIJKEN

6.1. Zeedijken

De mate waarin een zeedijk bij stormtij door golfslag wordt aangeval-
len, is afhankelijk van zijn ligging ten opzichte van de overheersende
stormrichting, de grootte en sterkte van het windveld en de uitge-
strektheid van het wateroppervlak voor de dijk.

De aanwezigheid van voorland, hetzij schorren of zandplaten en de hoog-
te en breedte daarvan, diepe geulen voor de dijk en de breedte van deze
geulen, van havendammen, alsmede van eventuele zandbanken aan de over-
zijde van de geulen zijn eveneens van invloed.

Hoog voorland zal de golfaanval ter plaatse van de dijk in meer of
mindere mate reduceren.

Liggen de banken op enige kilometers uit de dijk, met tussen deze en de
zandbanken grotere diepten, dan krijgt de aanvankelijk op de zandbank
gereduceerde golf weer gelegenheid aan te groeien.

Door afbuiging (refractie) en door verstrooiing (diffractie) zullen
bijvoorbeeld de in de Noordzee ontstane golven sterk van karakter ver-
anderen wanneer zij het geulen- en bankengebied voor de kust naderen.
Voor de golfbeweging meer binnenwaarts in de zeegaten zijn deze zeegol-
ven dan ook niet maatgevend.

Getijstromen langs de dijk zijn daar bovendien van invloed op de golf-
beweging. De voortplanting van golfsystemen laat zich enigermate bere-
kenen, althans wanneer de configuratie van het betreffende gebied niet
te ingewikkeld is.

Waar mogelijk zullen de berekeningen moeten worden aangevuld en gecon-
troleerd door waarnemingen ter plaatse (veekranden en luchtfotografie).
Het is door het ingewikkelde proces van golfvervormingen veelal niet
mogelijk uit een berekening meer dan een benadering van de golfhoogte
voor de dijk te verkrijgen.

Er bestaat een zekere correlatie tussen de waterstand (getijde + wind-
opzet) en de grootte van de golven, omdat windopzet en golven beide
dezelfde oorzaak van ontstaan hebben.

Bij dijken in het tijgebied, gelegen aan diep water, kunnen zeer globaal de volgende zônes worden onderscheiden:

- I. De zône die zich voortdurend onder water bevindt.
- II. De zône tussen GLW en GHW; dit is de zône waar de dagelijkse golfaanval plaatsvindt.
In deze zône is vooral de voortdurende aanwezigheid van de golfbelasting van belang.
De grootte van de golven is veelal kleiner dan in de hierna volgende zône III.
- III. De zône tussen GHW en het ontwerppeil; deze zône kan zwaar door golven worden aangevallen, hetgeen echter naar boven gaand in de richting van het ontwerppeil steeds minder frequent zal voorkomen.
- IV. De zône boven het ontwerppeil, waar golfoploop aanwezig zal zijn.

Bij dijken in het tijgebied met een hooggelegen voorland vervalt de hierboven genoemde zône I. Afhankelijk van de hoogteligging van het voorland, beneden of iets boven GHW, is zône II gedeeltelijk te onderkennen of geheel afwezig.

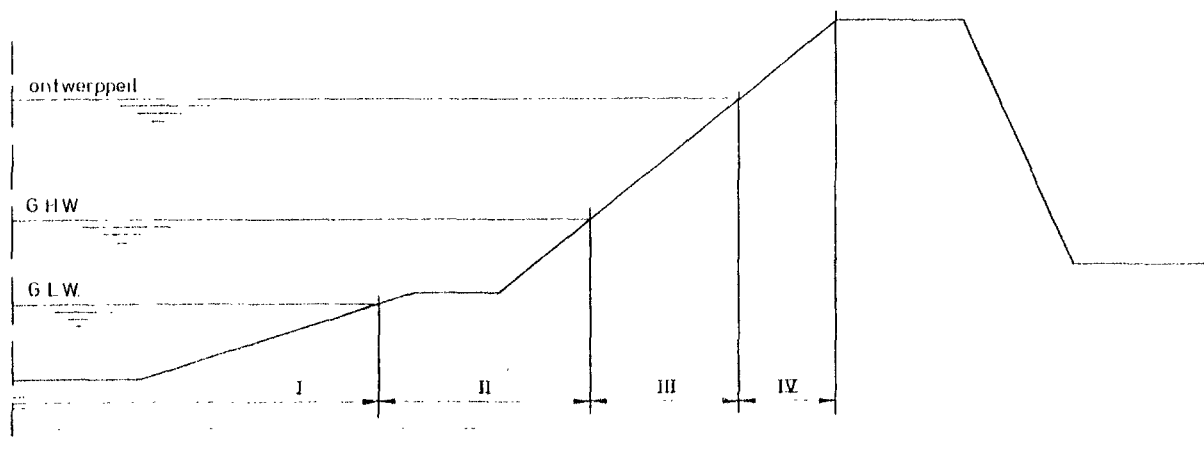


Fig. 6.1.: Indeling talud in zônes; voor zeedijken in tijgebied zonder voorland

Bij dijken in het tijgebied die een hooggelegen voorland bezitten, heeft men door de golfdempende invloed van dit voorland, op lagere niveaus op het talud een minder hevige golfaanval dan in het hiervoor genoemde geval van een dijk gelegen aan diep water.

De taludbescherming functioneert onder normale omstandigheden niet principieel anders dan onder extreme omstandigheden. Alleen ligt het accent op het aanhoudende karakter van de golfaanval en niet zo zeer op de grootte ervan, zie figuur 6.2.

De kwaliteit van het buitentalud kan, voorafgaand aan de extreme situatie, tijdens vrij normale omstandigheden reeds zodanig zijn aangetast, dat de sterkte niet langer voldoende is.

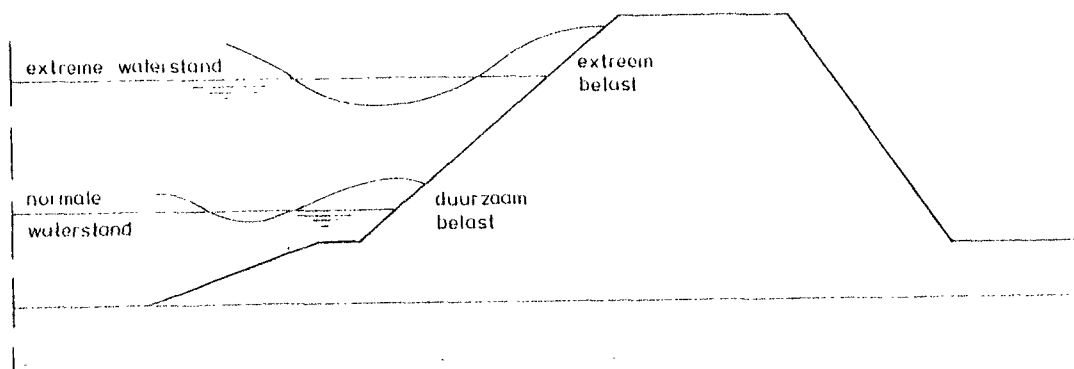


Fig. 6.2.: Het verschil in sterkte en plaats van de golfaanval onder normale en extreme omstandigheden

De indeling van het talud in belastingzônes staat in direct verband met de veiligheid tegen bezwijken van de bekleding; hiervoor wordt naar hoofdstuk 14 verwezen.

6.2. Meerdijken

Wisselt de waterstand tegen een zeedijk onder invloed van de getijbeweging gedurig, waardoor er zelden gedurende lange tijd achtereen golfaanval op eenzelfde niveau zal optreden, bij meerdijken zal er, behoudens buitengewone omstandigheden, weinig variatie in de waterstand zijn en zal de dagelijkse golfaanval steeds op ongeveer hetzelfde niveau plaatsvinden, namelijk op dat van de gemiddelde waterstand.

Globaal komt men voor meerdijken zonder hoog voorland, tot de volgende indeling van het talud in zônes:

I. De zône die zich voortdurend onder water bevindt.

Deze zône moet worden verdedigd tegen golfaanval en stroom door een constructie die onder water moet worden gemaakt en onderhouden. Zetwerk is hier niet mogelijk. Een afwijkende situatie kan zich voordoen bij afgesloten zeearmen, waarbij de gemiddelde waterstand zich bevindt boven de oorspronkelijke nabij laagwater gelegen plasberm, nu dus ergens op het beloop van de steenglooiing.

Dit heeft belangrijke nadelige consequenties voor het onderhoud van de glooiing beneden de waterspiegel.

II. De zône tussen de normale gemiddelde waterstand en het ontwerppeil.

Deze zône wordt aangevallen door golven en stroming, door ijs en andere drijvende voorwerpen. In deze zône treden de golfklappen op, juist onder het niveau van de optredende waterstand.

III. De zône boven het ontwerppeil, waar alleen golfoploop plaatsvindt.

In deze zône voldoet een grasmat vaak aan de eisen.

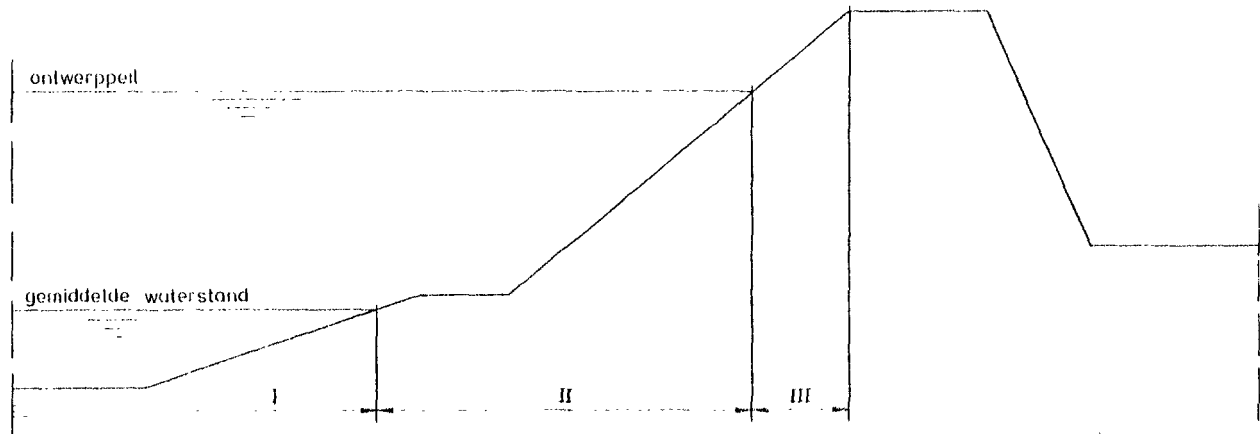


Fig. 6.3.: Indeling taluds in zônes; voor een meerdijk aan diep water

6.3. Rivierdijken

Rivierdijken worden in het algemeen als groene dijk uitgevoerd, alleen waar de dijk blootstaat aan grote aanvallen door het water wordt een harde bekleding aangebracht:

- a. op plaatsen waar een vernauwing van het doorstromingsprofiel optreedt
- b. op plaatsen waar de stroomdraad van de rivier dicht langs de oever loopt, zoals in bochten
- c. op plaatsen die ongunstig in de wind liggen
- d. nabij plaatsen waar een discontinuïteit in het stroombed is gelegen, zoals brugpijlers en dergelijke
- e. bij schaaldijken.

De plaats van de verdediging berust veelal op de ervaringen van beheerders met die dijkgedeelten waar in het verleden beschadigingen zijn opgetreden. De bekleding wordt van buiten veelal alleen door stroming belast, slechts bij de aanwezigheid van redelijk grote strijk lengten kan golfaanval door wind worden verwacht. Op bepaalde plaatsen kunnen spiegel daling en haalgolven ten gevolge van scheepvaart een belasting vormen.

In tegenstelling tot de situatie bij zeedijken komt het bij rivierdijken vaak voor dat de dijken gedurende langere tijd een hoogwatergolf moeten keren (weken).

Hierdoor raakt het dijklichaam verzadigd met water. Door het snel zakken van de buitenwaterstand (binnen een week) moet het grondwater in de dijk vrij naar buiten kunnen treden. Als bekleding komen daarom alleen de ten opzichte van de onderlaag meer open typen in aanmerking.

Hoofdstuk 7 - PROFIEL VAN DE DIJK

De vorm van het talud dient zowel in lengte- als in dwarsrichting te worden beschouwd.

7.1. Dwarsprofiel

Belangrijke aspecten bij de keuze van het dwarsprofiel zijn onder andere:

- a. de helling
- b. de vorm.

ad a.

De helling van het beloop mag niet zo steil zijn dat stabiliteitsverlies van het gehele talud of van de bekleding kan optreden (afschuivingen), dit zowel in de aanleg- als in de gebruiksfase.

Deze criteria geven dus een maximaal mogelijke hellingshoek van het talud. De toepassing van een flauwer talud leidt tot een geringere krachtswerking van de golven op de bekleding en een lagere golfoploop; de golfenergie wordt over een grotere lengte afgegeven.

Via de golfoploop is het dan bij bijvoorbeeld een trapeziumvormig profiel van de dijk mogelijk de hoogte van de kruin en daarmee de inhoud van de dijk te bepalen, bij een gegeven breedte van de kruin.

Het is echter geenszins gezegd, dat het kostenminimum samenvalt met het minimale grondverzet.

Een duur onderdeel van de dijk vormt de bekleding van het buitentalud en de oppervlakte daarvan neemt toe bij flauwere hellingen.

Overeenkomstige beschouwingen kunnen voor dijken met een buitenberm worden opgezet.

Het optimale dwarsprofiel kan nu worden bepaald als de prijzen van kernmateriaal per m^3 en bekleding per m^2 bekend zijn.

Oplettendheid is echter vereist omdat de kosten van bekleding niet onafhankelijk zullen zijn van de taludhelling.

Een ander punt dat bij de keuze van de taludhelling moet worden beschouwd is het ruimtebeslag van het dijklichaam in het terrein; dit punt kan bijvoorbeeld bij de aanwezigheid van andere al aanwezige bebouwing soms overheersen ten opzichte van de hiervoor genoemde economische optimalisatie.

ad b.

Het talud kan vlak, convex of concaaf worden uitgevoerd; hierover bestaan verschillende inzichten.

Bij een concaaf (hol) profiel lopen de golven bij minder hoge waterstanden niet zo hoog op als bij een convex (bol) profiel, doch bij hogere waterstanden is het omgekeerde het geval.

De flexibiliteit van de blokkenbekleding, in verband met mogelijke zettingen en ontgrondingen, wordt door een convexe taludvorm, als gevolg van de gewelfwerking, negatief beïnvloed.

Een concaaf talud is wat dit aspect betreft in het voordeel ten opzichte van de convexe vorm.

De grootte van de negatieve respectievelijk positieve beïnvloeding van de flexibiliteit, als functie van de grootte en vorm van de tonrondte, is niet eenvoudig te bepalen.

De concave taludvorm kan ervoor zorgen dat de blokken moeilijker door de golfbelasting uit het talud worden gedrukt of getrokken.

Wanneer een blok uit het talud dreigt te gaan, wordt dit als gevolg van de door de concave taludvorm veroorzaakte "omgekeerde" gewelfwerking tegengewerkt.

Een ander nadeel van grote tonrondtes bij een convex profiel is dat bij vele systemen de voegen tussen de blokken te ver open gaan staan.

De buitenberm is een element in de dijkbouw waarvan de functie zich met de tijd heeft gewijzigd en is vooral in Zeeland veelvuldig toegepast.

Zo kon vroeger de toepassing tot enige besparing op de steenglooïng leiden. Op de zeer flauwe berm kan zich reeds bij een lager peil een goede grasmat handhaven, beter dan tegen het steilere talud van een ononderbroken beloop.

Voorts bleek de buitenberm een aanzienlijke reductie van de golfoploop te geven.

Voorwaarde voor een goede vervulling van beide bovengenoemde functies, besparing van steenglooïng en reductie van de golfoploop, is dat de bermhoogte op juiste wijze is aangepast aan de maatgevende waterstanden die voor de dijk kunnen voorkomen.

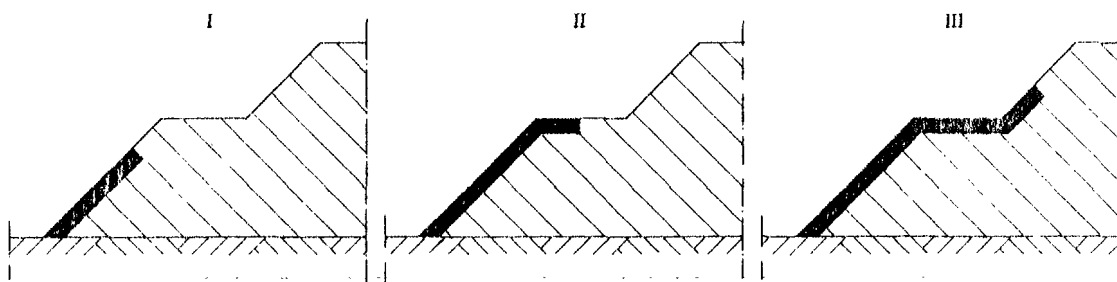
Het spreekt vanzelf, dat deze hoogte groter is naarmate de dijk een minder beschutte ligging heeft; van geval tot geval kan hierin verschil bestaan van enkele meters.

Voorts moet het peil van de berm, om een behoorlijke reductie van de golfoploop te verkrijgen, in de buurt liggen van de stilwaterstand van de maatgevende stormvloed.

Ligt hij daar te ver onder, dan komen bij de hoogste stormvloeden de golven daarop niet meer tot breking en worden zij onvoldoende in hun loop geremd.

Heden ten dage ligt de berm in het algemeen op het ontwerppeil zoals dit in het rapport van de Deltacommissie is aangegeven.

Bij een stormvloedsberm op dit ontwerppeil zullen er veelal geen problemen zijn met de grasgroei op de berm en het bovenste deel van het talud. Er kunnen zich echter omstandigheden voordoen waarbij het ook noodzakelijk is de buitenberm of zelfs een deel van het talud boven de berm te voorzien van een harde bekleding, zie schematisch figuur 7.1.



lichte golfaanval

matige golfaanval

zware golfaanval

Fig. 7.1.: Mogelijke beëindiging harde bekleding bij een buitenberm gelegen op ontwerppeil

Teneinde extra krachtswerking op de knikken in het talud bij het gebruik van een buitenberm te vermijden, dienen deze zoveel mogelijk afgerond te zijn. Een belangrijke functie van de buitenberm is voorts het gebruik als transportweg ten behoeve van het beheer en onderhoud van de dijk.

Bij rivierdijken begin de bekleding vaak hoog op het talud. De bekleding dient ook hier aan de onderzijde stevig te worden ondersteund. Deze beëindiging dient in zekere mate bestand te zijn tegen onderspoelen bij erosie van de grasmat.

7.2. Langsprofiel

Door onregelmatigheden in het langsprofiel van de dijk, in samenhang met de structuur van het voorliggende gebied, kunnen bepaalde delen van het talud extra worden aangevallen (o.a. als gevolg van refractie).

Niet alle glooiing-systemen zijn geschikt voor toepassing op een gekromd talud. Een drietal complicaties doet zich hierbij voor:

- a. het systeem laat niet toe van de rechte lijn af te wijken
- b. er ontstaan te grote openstaande voegen
- c. een mechanische wijze van zetten wordt bemoeilijkt.

Een mechanische wijze van zetten blijft in de praktijk hoofdzakelijk beperkt tot rechte dijkgedeelten en bochten met een niet te kleine straal en met een voldoende groot oppervlak.

Behalve het financiële voordeel van het zetten van de blokken met behulp van een hydraulische kraan en blokkentang, is het ook een positieve zaak dat de blokken hiermee stevig tegen elkaar kunnen worden gedrukt, beter dan met de hand mogelijk is. Hierdoor krijgen de elementen een beter onderling verband.

Bij eventuele schade aan de blokkenbekleding is het van belang dat de bekleding met de hand kan worden hersteld.

Hoofdstuk 8 - OPSLUITINGEN EN OVERGANGEN

De ervaring van veel beheerders is, dat bij de overgang van het ene naar het andere type bekleding en bij beëindigingen van de bekleding veel schade optreedt.

Men kan nog zoveel zorg besteden aan de bekledingsconstructie op zich, maar wanneer de zwakste schakel bezwijkt is dit maatgevend voor de veiligheid die de waterkering biedt. Vandaar dat hier aan deze constructies aandacht zal worden besteed.

8.1. De teenconstructie

De teenconstructie heeft als functie de bekleding te ondersteunen en tegen ontgrondingen vanaf de onderzijde van het talud te beschermen. Een onderscheid moet worden gemaakt tussen een zeedijk en een meerdijk. De dagelijkse golfaanval zal bij een meerdijk, in tegenstelling tot een zeedijk, bij benadering steeds op hetzelfde niveau plaatsvinden. De dagelijkse golfaanval zal moeten worden opgenomen door dat deel van de constructie dat daartoe juist het minst geschikt is, namelijk de plaats waar de bekleding van het onderwaterbeloop aansluit tegen de bekleding van het beloop boven water.

Bij zeedijken wordt de teenconstructie meestal om uitvoeringstechnische redenen boven LW aangebracht.

Golfaanval van betekenis zal daar op deze hoogte niet vaak optreden omdat de wind gepaard gaat met een verhoging van de waterstand, waardoor, zelfs op het tijdstip van LW, de golfaanval op een hoger niveau zal plaatsvinden.

Een uitzondering hierop vormt deining, die wel hevige golfaanval op lagere niveaus kan geven.

Bij dijken met een hooggelegen voorland wordt de teen als gevolg van de golfbreking op dit voorland altijd maar matig door de golven belast.

Bij het opzetten van een glooiing van rechthoekige betonblokken heeft men behoefte aan "rechte lijnen". Hiervoor worden schotten toegepast die tegen een open rij palen zijn bevestigd. Deze schotten kunnen zowel van hout als van beton zijn vervaardigd.

Voor zwaar aangevallen teenconstructies bij meerdijken is de voorgaande constructiewijze zeker niet altijd voldoende te achten; ook al ligt er voor de teen een steunberm waarop een zwaar bestort kraagstuk is aangebracht, dan nog loopt men de kans dat door de golfbeweging langzamerhand zand wordt meegenomen tot onder het schot, waarna de fundering onder de onderste glooiingselementen kan worden weggespoeld en de teen gaat verzakken.

Een betere constructie kan in dit geval een damwand van geploegde delen zijn, liefst aan de bovenkant nog versterkt door een gording.

Voor zwaar aangevallen teenconstructies is het profiel zoals aangegeven in figuur 8.1. beter; dit profiel geeft in de teen een meer geleidelijke overgang van het beloop naar de vlakke bestorte plasberm, hetgeen met het oog op de op- en teruglopende golven van belang is.

Ook geeft dit profiel een betere aansluiting van de eerste rij blokken aan de teenconstructie.

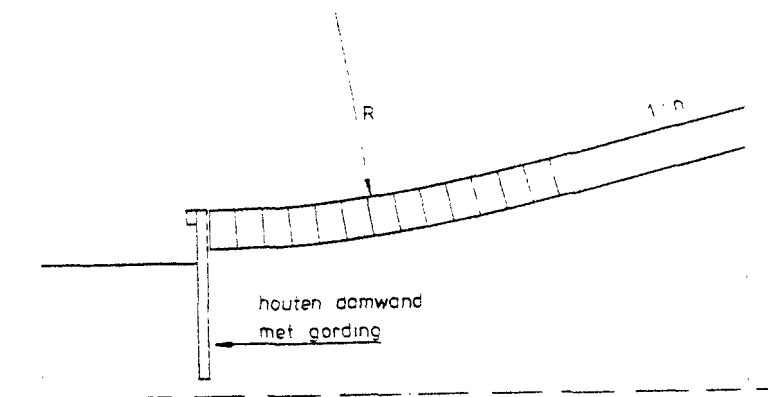


Fig. 8.1.: Teenconstructie met houten damwand als mogelijke oplossing bij meerdijken

Bij het ontwerpen van teenconstructies dient onder andere aandacht te worden besteed aan de volgende zaken:

- a. Indien de blokken direct tegen een gesloten rij perkoenpalen worden geplaatst, bestaat het gevaar van uitspoeling van het onderliggende materiaal; bovendien ontstaan geen rechte lijnen. Uitgangspunt bij rechthoekige blokken dient dan ook een teenschot te zijn. Als uitzondering is bij gebruik van polygoonvormige elementen de gesloten rij perkoenpalen wel goed mogelijk, maar ook hier dient veel aandacht te worden besteed aan de zanddichtheid van de teenconstructie.
- b. Indien de teenconstructie teveel boven het aansluitende voorland of de steunberm uitsteekt bestaat de kans op ondermijning van de glooiing en op het "vooroverkomen" van de teenconstructie, hetgeen zich in de regel al tijdens de uitvoering manifesteert.
- c. Indien de bestorting van de steunberm te hoog ligt geeft dit een discontinue overgang tussen steunberm en talud, hetgeen vooral bij de terugtrekkende golven vervelende extra krachtswerkingen op de teenconstructie geeft. Ook de stabiliteit van de steunberm wordt negatief beïnvloed.
- d. Indien het teenschot niet hoog genoeg is bestaat de kans op onderspoeling van de glooiing en bij verlaging van voorland of steunberm kans op stabiliteitsverlies.
- e. Bij een slappe ondergrond bestaat het gevaar dat een damwand of palenrij niet voldoende stabiel is.

8.2. De bovenbegrenzing van de harde bekleding

De overgang van de harde bekleding naar de grasmat vormt veelal een zwak punt in de constructie. Een goede grasmat is in zekere mate bestand tegen brekende golven, mits ze niet groot zijn en niet te vaak voorkomen. De meer frequent aanwezige golfklappen en golfoploop zal door de harde bekleding moeten worden verwerkt.

De plaats van de overgang van de harde bekleding naar de grasmat kan theoretisch lager worden gekozen als men rekening houdt met de golfoploop-remmende invloed van een ruw en open talud, de aanwezigheid van een buitenberm, de golfreducerende werking van een aanwezig hoog voorland, of een combinatie van deze mogelijkheden.

De bepaling van de plaats van de overgang is in de praktijk echter vaak een kwestie van ervaring gekoppeld aan de plaatselijke omstandigheden (veekwaarnemingen en in het verleden geconstateerde schadegevallen; volgens de "trial-and-error" methode) of het toepassen van een handzame vuistregel (b.v. halverwege ontwerppeil en kruinhoogte).

Over de bestendigheid van een grasmat tegen brekende golven en golfoploop is, gekoppeld aan de grootte en frequentie van voorkomen, nog betrekkelijk weinig bekend. Men moet er bij de overgang voor zorgen dat de discontinuïteit zo gering mogelijk is, teneinde het ontstaan van plaatselijke ontgrondingen tegen te gaan.

Het aanbrengen van een perkoenrij langs de bovenkant die uitsteekt boven de harde bekleding, met het doel het aanspoelen van "veek" op de grasmat tegen te gaan, moet dan ook worden ontraden.

Het principe van de overgangsconstructie moet zijn: een grotere sterkte dan de grasmat en een hydraulische ruwheid ongeveer gelijk aan die van de grasmat. Een strook op hun kant gestrate (10 cm hoog) of dubbeldikke klinkers, met kruimelaarde ingeveegd, kan voldoen; doch de strook klinkerglooiing moet de gelegenheid krijgen vast te groeien met een goed doorgroeide grasmat.

Een minder arbeidsintensieve en betere mogelijkheid is het toepassen van betonnen doorgroeitegels. De eenheden waarin deze worden toegepast zijn veel groter en zwaarder dan klinkers. De discontinuïteit in de overgang bekleding-ondergrond is geringer, waardoor mag worden verwacht dat het gras zich beter en dieper in de onderliggende kleilaag wortelt dan bij klinkers het geval is.

De overgang blijft echter kwetsbaar in de periode dat de grasmat zich moet ontwikkelen.

Onnauwkeurig aangebrachte elementen en elementen die door onvoldoende verdichting van de ondergrond een ongelijkmatige zetting hebben ondergaan, kunnen door de niet geheel vlakke ligging problemen opleveren bij het maaien.

Wanneer de bovenbegrenzing slechts bestaat uit een betonband, kan zelfs bij een betrekkelijk geringe ontgronding de constructie al aanzienlijk worden beschadigd. In dit geval is het aan te bevelen de betonband te steunen door perkoenpalen die met de kop gelijk of iets lager zitten dan de bovenzijde van deze betonband.

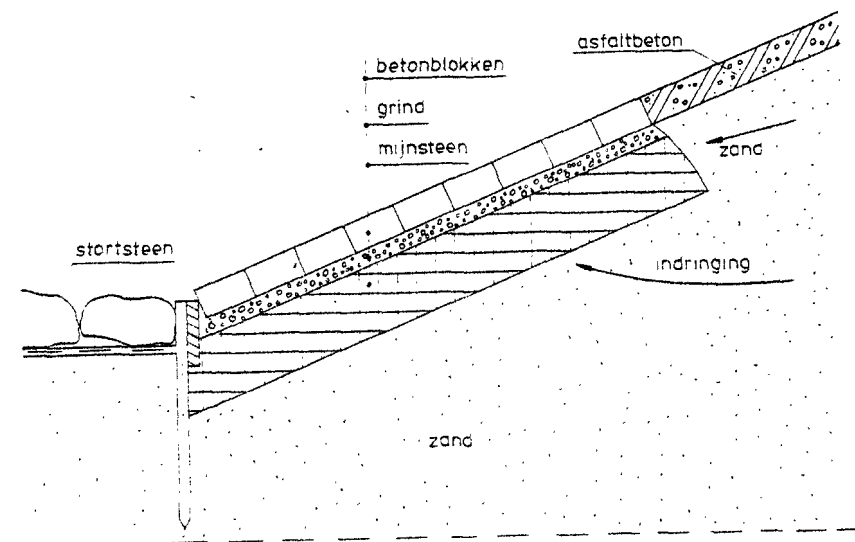
Bij het toepassen van een overgangsconstructie van bijvoorbeeld door-groeistenen, waaraan de voorkeur wordt gegeven, kunnen de perkoenpalen worden weggelaten omdat deze constructie minder kwetsbaar is.

Een belangrijke reden voor het toepassen van de bovengenoemde over-gangsconstructie is, ingeval van beweiding met schapen, ook het voorko-men van schapenpaadjes direct bovenlangs de harde bekleding.

8.3. De overgang naar een andere bekleding

Wanneer twee verschillende soorten bekleding aan elkaar grenzen, moet in het bijzonder de aandacht op de ondergrond worden gericht.

Wanneer een fijnkorrelig materiaal direct aansluit op een materiaal met grovere samenstelling bestaat het gevaar dat het fijne materiaal, onder invloed van grondwaterstromingen en gronddrukken, in het grove mate-riaal dringt, zie figuur 8.2.



Foutieve constructie

Fig. 8.2.: Indringing van zand in de mijnsteen

Dit is nadelig voor de drainerende werking van het grove materiaal en kan ook plaatselijke verzakkingen van de glooiing veroorzaken.

Door een goede granulaire opbouw van het grove materiaal kan aan de "zanddichtheidseis" worden voldaan. Vaak is het eenvoudiger en goedkoper door toepassing van een kunststofweefsel of betonband de migratie van deeltjes tegen te gaan.

Problemen kunnen in het algemeen ontstaan bij de overgang van enerzijds grove materialen zoals mijnsteen, verschillende soorten slak, grind, puin en anderzijds fijne materialen zoals zand en klei.

Bij de in figuur 8.2. getekende overgang moet niet alleen aandacht worden besteed aan de indringing van fijn materiaal in het gebied met grof materiaal, maar men moet ook voorzieningen aanbrengen opdat, wanneer schade aan de betonblokkenbekleding nabij de overgang optreedt, de asfaltbetonbekleding niet direct kan worden ondermijnd.

Verschillende constructiewijzen ter versterking van deze overgang zijn mogelijk. Genoemd worden:

- a. Het over een korte afstand laten doorlopen van de mijnsteen onder het asfaltbeton.

Een nadeel van deze constructie is dat de golfklappen ook onder het asfalt worden voortgeplant, waardoor het gevaar bestaat dat het asfaltdek van het talud wordt gelicht.

- b. Het aanbrengen van een verdikking van asfaltbeton.

Deze oplossing kan echter bij een wat krappe dimensionering van de verdieping problemen met de uitvoering geven. De voor de verdikking gegraven sleuf is dan moeilijk in stand te houden.

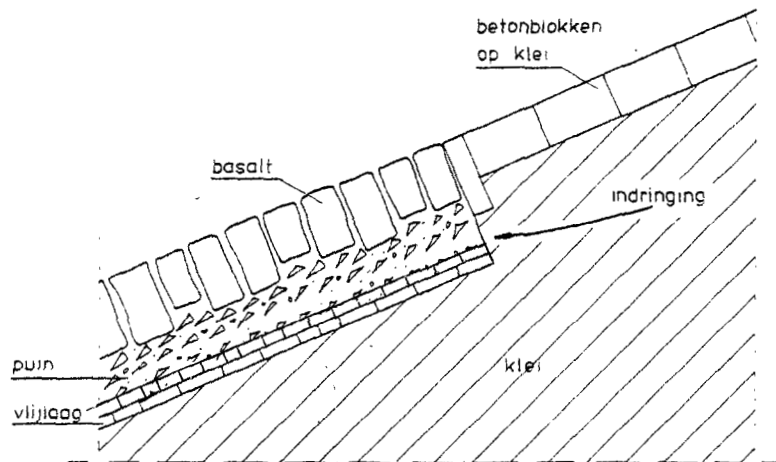
- c. Het aanbrengen van een perkoenpalenrij met schot (iets onder het oppervlak).

- d. Het penetreren van de bovenste lagen blokken met bitumen.

Dit penetreren is echter alleen mogelijk bij blokken die voldoende open ruimte bevatten.

Door het toepassen van opsluitende betonbanden is het, bij bijvoorbeeld de aansluiting van betonblokken op een bestaande glooïng van basaltzuilen, mogelijk te voorkomen dat klei van onder de betonblokken in de puinlaag dringt, zie figuur 8.3.

De betonband dient dan wel voldoende diep te steken.



Foutieve constructie

Fig. 8.3.: Overgang basalt op betonblokken

De ervaring van veel beheerders is wel dat bij het soort overgangen van het ene bekledingsmateriaal naar het andere volgens figuur 8.3. vrij veel schade optreedt. De oorzaak kan gelegen zijn in de mogelijkheid dat de basaltzuilen niet vast tegen de betonband aansluiten en in de discontinuïteit die in de opbouw van de fundering, ter plaatse van de overgang, aanwezig is.

Ten gevolge van het niet goed aansluiten tegen de betonband kunnen de basaltzuilen enigszins los in het beloop zitten.

De door de golfaanval via de openingen in de bekleding onder het basalt opgebouwde waterdrukken, in de funderingslaag van puin, kunnen ter plaatse van de overgang naar de kleifundering niet meer naar alle zijden ontwijken, waardoor de basaltzuilen ter plaatse van de overgang een grotere waterdruk vanuit de puinlaag ondervinden.

Door de basaltzuilen in een strook, aansluitend aan de betonblokken-glooiing, met behulp van bijvoorbeeld gietasfalt over een niet te brede strook (ca. 1/2 m) vast te leggen kan het geheel stabiel(er) worden gemaakt.

Voor betonglooiing-systemen met elementen die ongeveer dezelfde vorm hebben als de basaltzuil (polygoonvormig) en die ook op een granulaire filter moeten worden gezet, behoeft vaak geen speciale aandacht aan de overgang te worden besteed. De polygoonvormige betonzuilen kunnen zonder meer tegen de bestaande basaltglooiing worden aangezet. Wel moet worden opgelet dat als de betonzuilen bijvoorbeeld op gebroken grind zijn gezet, dit grind niet in de puinfundering dringt, hetgeen dan verzakkingen tot gevolg kan hebben.

Wanneer dit gevaar aanwezig is kan het eenvoudigst een tussenliggend granulaire filter worden aangebracht.

Teneinde te illustreren hoe de drukken onder een bekleding op kunnen lopen, als gevolg van het bijvoorbeeld met een betonschot dichtzetten van een doorlatend filter, is figuur 8.4. opgenomen. De hierin getekende stroom- en equipotentiaallijnen volgen uit een computerberekening; voor meer achtergronden wordt naar het rapport "Achtergronden bij de leidraad cementbetonnen dijkbekledingen" verwezen.

In het algemeen is het aan te bevelen overgangen in de bekleding in langsrichting op het beloop zoveel mogelijk te vermijden. Het is wenselijk vanaf de teen tot aan de bovenrand van het verdedigde talud dezelfde soort bekleding en vooral een onderlaag met dezelfde waterdoorlatendheid te hebben. Vaak is dit echter niet mogelijk, zoals bijvoorbeeld bij het verbreden van een reeds bestaande harde bekleding en de overgang bij vele moderne dijken van een steen- naar een asfaltbekleding.

verschuldrukken t.g.v. schot in het filter

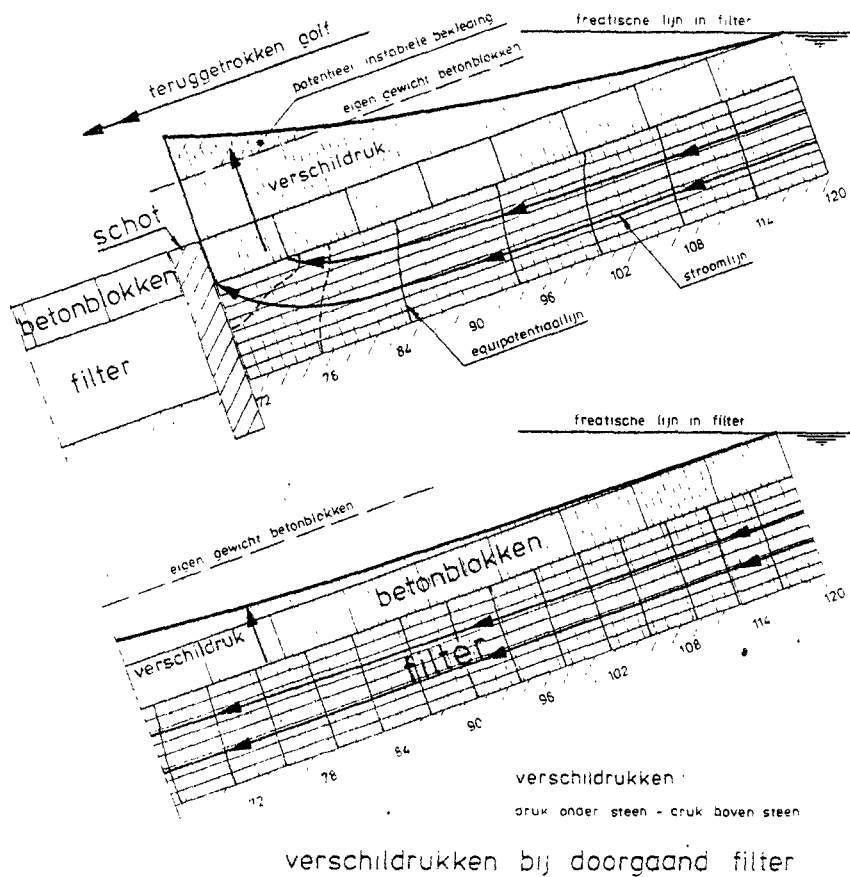


Fig. 8.4.: Verhoogde drukken bij verstoringen in het doorlatende filter

Bij betonbanden, geplaatst loodrecht op de langsrichting van het beloop liggen de zaken gunstiger. Alleen bij schief invallende golven zullen hier vooral in de hoek bij de bovenbegrenzing van de bekleding enige extra overdrukken onder de blokken op kunnen treden.

Een voordeel van betonbanden in deze richting geplaatst, is dat de dijk dan in vakken wordt opgedeeld, waardoor wordt voorkomen dat plaatselijk opgetreden schade zich over grote afstanden langs de dijk voortplant. Om de schade-ontwikkeling bij een betonband te doen stoppen dient deze niet te licht te zijn en voldoende diep te steken.

Extreem diep stekende betonbanden vormen daarentegen een nadelig werkende kerf in de laag onder de bekleding.

Een punt van aandacht vormt de goede en stevige aansluiting van de blokken tegen de betonbanden.

Hoofdstuk 9 - UITVOERINGSASPECTEN

9.1. Algemeen

De cementbetonnen bekledingen onderscheiden zich van de natuursteen-glooiingen door onder andere een gelijkmatige vorm en grote maatnauwkeurigheid. Dit type bekleding is dan ook niet alleen geschikt om op de traditionele manier te worden aangebracht - dat wil zeggen "met de hand" door vaklieden, de steenzetters - maar kan met het nodige vakmanschap ook worden aangebracht op machinale wijze. Met behulp van een kraan met tangen of klemmen worden de betonelementen op hun plaats gezet op het te beschermen oppervlak. Vooral deze laatste methode biedt bij grotere elementen goede mogelijkheden grotere produkties te halen die vaak vereist zijn omdat de werkzaamheden aan onze zeeeweringen moeten worden uitgevoerd tussen half april en half oktober en ook nog dikwijls gelegen zijn in de tijzône.

9.2. Het produkt

De blokken, zuilen of tegels van beton voor glooiingen dienen in goed geoutilleerde fabrieken en door deskundig personeel te worden vervaardigd opdat men verzekerd kan zijn van een constante hoge kwaliteit, die zowel wat betreft de samenstelling, belangrijk voor het gedrag in een agressief zeemilieu, als voor de maatvastheid noodzakelijk is voor het mechanisch verwerken.

De voor keuring in aanmerking komende glooiingelementen moeten op kwaliteitseisen worden gekeurd (zie NEN 7024 en hoofdstuk 4).

9.3. Opslag en transport

Na de fabricage dienen de blokken te worden opgeslagen voor het verhardingsproces waarbij mechanische beschadigingen moeten worden voorkomen en daarom het aantal handelingen moet worden beperkt.

Voor het transport naar het werk zal de opslagplaats gemakkelijk bereikbaar moeten zijn hetzij voor auto's, hetzij voor schepen.

Daar de plaats van verwerking slechts zelden zodanig is gesitueerd dat de blokken rechtstreeks uit de aanvoer in het werk kunnen worden geplaatst, hierbij te denken aan het werken in de getijzone en het niet geschikt zijn van de aanvoerwegen, is het vaak noodzakelijk de betonblokken op het werk gedeeltelijk in depôts te zetten.

Bij het mechanisch zetten is het raadzaam de blokken op de fabriek zo in eenheden samen te stellen dat deze zonder herschikking direct gezet kunnen worden.

De stapelingen moeten op een dusdanige vlakke ondergrond staan dat kantelen of wegglijden onmogelijk is.

Verder dient erop gelet te worden dat bij opslag en transport niet te veel grond aan de blokken blijft hangen, omdat dit problemen geeft bij het nauwaansluitend zetten van de blokken.

Het transport op het werk moet gebeuren met voor het terrein geschikte voertuigen.

9.4. Verwerking

Glooiingen van betonblokken of -zuilen worden over het algemeen rechtstreeks op bijvoorbeeld klei, mijnsteen, gebroken grind^{of} vsilex geplaatst. Doordat de betonelementen een goede maatvastheid bezitten is het noodzakelijk dat de grondslag onder de blokken nauwkeurig onder profiel wordt afgewerkt. Meestal wordt hiervoor gebruik gemaakt van mallen waartussen het talud wordt "afgeschaafd" of "afgereid", naar gelang de blokken op klei of een filter worden gezet (zie verder hoofdstuk 5).

Het plaatsen van de betonblokken en/of zuilen van wat groter afmetingen met de hand is zeer arbeidsintensief en beperkt de productiecapaciteit, zodat deze methode alleen zal worden gebruikt om goede aansluitingen te verkrijgen op bestaand werk, bij reparaties of bij systemen die niet geschikt zijn voor mechanisch zetten.

Bij het mechanisch zetten worden klemmen of tangen gebruikt die meerdere elementen tegelijk pakken, variërend van 1 tot 3 m², en dan met behulp van een kraan de blokken op het talud plaatsen.

Door de klem met de blokken met enige kracht tegen de reeds gezette blokken te plaatsen wordt een goede aansluiting verkregen.

Door meerdere kranen met klemmen in te zetten, kan elke gewenste productie worden gehaald.

Bij bekleding met grote voegen zoals bij polygoonvormige betonzuilen is het noodzakelijk de voegen met grote zorg te vullen, bijvoorbeeld met steenslag, zodat een onwrikbaar en toch open oppervlak ontstaat.

Problemen kunnen zich bij het zetten voordoen wanneer de nog niet met grof granulair materiaal gevulde openingen volstuiven met zand.

Hoofdstuk 10 - BEHEER EN ONDERHOUD

10.1. Inspecties

Jaarlijks wordt door de onderhoudsplichtigen, primair wegens de veiligheid, tenminste eenmaal een inspectie uitgevoerd van het volledige glooiingsbestand.

Onder onderhoudsplichtigen worden in het algemeen de Waterschappen verstaan; provinciale - en rijksdijken komen ook voor, alsmede incidenteel gemeentelijke dijken.

De aandacht is dan gericht op noodzakelijke herstellingen van bijvoorbeeld verzakte glooiinggedeelten en vernieuwing van versleten of uitbreiding van aanwezige glooiinggedeelten. Na ieder stormtij vindt, vanwege de onderhoudsplichtige, op laagwater een uitgebreide inspectie plaats in verband met mogelijke beschadigingen.

Het onderhoudspersoneel signaleert bij hun dagelijks werk de opgetreden schade aan de glooiingen.

In verband met het toezicht op de zeeweringen, worden ook van de zijde van de provincies inspecties uitgevoerd.

Vanwege de toezichthoudende taak valt de nadruk op controlerende inspecties en niet zozeer op het vinden van beschadigde dijkglooiingen.

10.2. Onderhoud

Het jaarlijks onderhoud omvat in grote lijnen de volgende werkzaamheden:

- Herstel van beschadigingen na zware golfaanval.
Dit kan beperkt blijven tot zeer plaatselijke beschadigingen, bijvoorbeeld een enkel blok of element dat "gelicht" is en niet meer terug op zijn plaats komt.
Het kan echter ook uitgebreider beschadigingen aantreffen, bijvoorbeeld bij aansluitingen op andere constructies.

Afhankelijk van de aard van de beschadiging zal kunnen worden volstaan met het uitbreken (verbrijzelen) van een enkel element en in het werk storten van een nieuw element of moet een grotere oppervlakte worden uitgebroken en, na aanvulling van het onderliggende materiaal, weer worden aangebracht.

Het optreden van beschadigingen telkenmale op dezelfde plaats zal uiteraard aanleiding zijn de constructie van het betreffende gloopvlak aan een onderzoek te onderwerpen en passende maatregelen te nemen.

- Herstellingen ter plaatse van verzakkingen die zijn opgetreden als gevolg van grondverlies of ten gevolge van bezwijken (verplaatsen) van de teenconstructie.
In deze gevallen vindt tevens een verbetering plaats van de teenconstructie en de onderliggende materialen. De kosten zijn vaak erg hoog omdat het gehele gloopvlak van onder af en aan weerszijden onder een hoek van 45° tot de bovenzijde moet worden uitgebroken.
- Tot het onderhoud kan ook worden gerekend de uitbreiding van bestaande gloopvlakken, naar beneden en naar boven. Naar beneden, bij afname van de vooroever, naar boven wanneer het schadepatroon daartoe aanleiding geeft.
- Ook verbeteringswerken van beperkte omvang, of het in een meerjarenplan uitvoeren van grotere verbeteringswerken worden wel tot het onderhoud gerekend. Deze verbeteringswerken kunnen vrij ingrijpend zijn en zowel de vernieuwing van teen-, onderlaag- als bekledingsconstructie betreffen.
- Herstel van schade als gevolg van door hengelaars uitgelichte blokken of vormen van baldadigheid.
- Herstel van beschadigingen ten gevolge van stranding van schepen, deklasten of kruierend ijs.

10.3. Reparatiemogelijkheden

Ten opzichte van natuursteenglooiingen zijn de reparatiemogelijkheden van cementbetonnen bekledingen in bepaalde gevallen wat beperkter:

- De onderlinge samenhang is vaak veel groter, waardoor het uitbreken van enkele elementen wordt bemoeilijkt.
- Het is ondoenlijk enkele elementen in een glooiing weer op hun plaats te brengen, ook al zijn geen onderlinge verbindingen aanwezig; het past nooit. Bovendien wordt ook de juiste lijn geweld aangedaan.
Bovenstaande geldt niet voor betonelementen met een ongeveer gelijke vorm als de basaltzuil.

Naast deze beperkingen zijn onder andere de volgende mogelijkheden aanwezig:

- Er kunnen ter plaatse enige elementen in het werk worden gestort zoals dit vaak bij pasblokken of in het werk te storten elementen wel gebeurt. Wegens de veelal betere kwaliteit van prefab-elementen dient echter de opgetreden schade zoveel mogelijk met behulp van deze prefab-elementen hersteld te worden. Indien men toch aangewezen is op het in het werk storten, dient men veel aandacht te besteden aan het verkrijgen van een goed en dicht beton (niet te hoge water-cementfactor) en een goede nabehandeling.
- De voor reparatie noodzakelijke nieuwe elementen zijn op korte termijn leverbaar, ook bij kleine hoeveelheden.

10.4. Hergebruik

Wanneer elementen zonder cementmortel of asfaltmestiek als voegvulling in het geding zijn dan is hergebruik vrijwel altijd mogelijk, tenzij de elementen te oud zijn en/of de beton van slechte kwaliteit was. Bij grotere elementen zoals platen en trapglooiingen is de bekleding niet voor hergebruik geschikt. Ook de met cementmortel of gietasfalt gepenetreerde constructies zijn voor hergebruik in een taludverdediging nauwelijks meer geschikt. Alleen als los gestort materiaal zijn ze wellicht nog te gebruiken.

Hoofdstuk 11 - HYDRAULISCHE RANDVOORWAARDEN

11.1. Algemeen

Het ligt, gezien de functie van waterkeringen, voor de hand, dat de belastingen veelal voortvloeien uit korte en/of lange golven. In zijn algemeenheid kunnen de volgende golfverschijnselen worden onderscheiden:

- a. laagfrequente waterspiegelveranderingen, zoals hoogwatergolven, getijgolven, opwaaiingsverhangen en seiches
- b. windgolven en deining
- c. scheepsgolven in vaarwegen:
 - primaire scheepsgolf met als onderdeel hiervan de haalgolf
 - secundaire scheepsgolven
 - combinatie van primaire en secundaire scheepsgolven.

Deze waterspiegelvariatiën bepalen in sterke mate het gebied waarover een harde bekleding dient te worden aangebracht.

De waterstandsverschillen op kanalen en boezems zijn relatief klein. Ze worden onder andere veroorzaakt door schutwater, kwelwater, afwatering en opwaaiing.

De waterstand op een meer kan onder andere variëren ten gevolge van opwaaiing, toe- of afvoer van water en verdamping.

De waterstand op een reservoir kan sterk variëren ten gevolge van lediging of vulling van het bekken, maar ook neerslag en opwaaiing kunnen een rol spelen.

De waterstand op een bovenrivier wordt in hoofdzaak bepaald door de afvoer van de rivier.

De waterstand op een benedenrivier wordt bepaald door de afvoer van de rivier, het getij en de opwaaiing.

De waterstand voor een zeedijk wordt bepaald door het getij en de opwaaiing.

De meest complexe situatie treedt op bij een zeedijk waar de fluctuaties van de waterspiegel in vrij veel vormen kunnen optreden. Om deze reden en terwille van de beperking van de omvang blijven de beschouwingen ook hier beperkt tot zeedijken.

Het doel van dit hoofdstuk is het geven van achtergrondinformatie over de diverse verschijnselen, als voorbereiding op hetgeen in hoofdstuk 12 en 14 wordt vermeld.

In dit kader zal aan de orde komen de beschrijving van windgolven en golfvormingen voor en op de dijk. Voor dieper gaande beschouwingen wordt verwezen naar het rapport "Achtergronden bij de leidraad cementbetonnen dijkbekledingen".

11.2. Golfkarakteristieken

11.2.1. Individuele golf

Algemeen

Golftheorieën zijn reeds gedurende tweehonderd jaar bekend. Zij zijn gebaseerd op de aanname dat de golf door golfhoogte H en de golfperiode T (of de golflengte L) kan worden beschreven en hebben betrekking op regelmatige golven. Regelmatige golven komen op zee eigenlijk nooit voor, maar ze zijn belangrijk omdat ze de grondelementen van een onregelmatige zee bevatten.

In het algemeen zijn werkelijke golfverschijnselen zeer complex en moeilijk mathematisch te beschrijven wegens niet-lineairiteiten, driedimensionale karakteristieken en het toevallige karakter van golven. Het is de opgave van de zogenaamde deterministische theorieën de vorm van het vrije oppervlak en de beweging van een regelmatige golf voor verschillende golfhoogten en perioden en bij verschillende waterdiepten zo nauwkeurig mogelijk op een mathematische wijze te formuleren. Daarbij is het gebruikelijk een onderscheid te maken tussen lineaire en niet-lineaire golftheorieën, al naar gelang tot welke orde stromingskrachten in de beschouwingen worden betrokken.

De betekenis van de belangrijkste theorieën is in figuur 11.1. aangegeven, die ook een overzicht van het geldigheidsgebied van deze theorieën verschaft.

Hierbij worden de dimensieloze parameters H/gT^2 en d/gT^2 gebruikt. De betekenis der variabelen is in deze leidraad als volgt:

- a. de golflengte L is de horizontale afstand tussen twee opeenvolgende kammen
- b. de periode T is de tijd die op een bepaald vast punt verloopt tussen het passeren van twee opeenvolgende golfkammen
- c. de frequentie f is het omgekeerde van de periode T
- d. de voortplantingssnelheid C , ook wel golfsnelheid of fasesnelheid genoemd, is de snelheid waarmee het beeld van het golfprofiel verloopt; het is dus niet de snelheid waarmee de waterdeeltjes zich verplaatsen
- e. de hoogte H is het hoogteverschil tussen de hoogste en de laagste punten van het golfprofiel
- f. de waterdiepte d wordt ten opzichte van het stilwaterniveau gemeten.

Een en ander is in figuur 11.2. nader aangeduid.

Er bestaan twee klassieke theorieën, de ene ontwikkeld door Airy (1845) en de ander door Stokes (1880), die de regelmatige golf beschrijven. Ze voorspellen het golfgedrag in het algemeen beter als de verhouding tussen waterdiepte en golflengte niet te klein wordt.

Voor ondiep water geeft de cnoïdale golftheorie, oorspronkelijk ontwikkeld door Korteweg en De Vries (1895), vaak een redelijke benadering van enkelvoudige golven. Deze theorie is echter vrij moeilijk toegankelijk voor berekening.

Voor golven op zeer ondiep water worden de golven het best beschreven door de eenling-golftheorie.

In tegenstelling tot de cnoïdale golftheorie is de eenling-golftheorie vrij eenvoudig te hanteren.

Zeegolven kunnen verder worden onderverdeeld in:

- a. zeegang; als de golven zich onder invloed van de wind ontwikkelen
- b. deining; dit zijn zeegolven onttrokken aan de werking van de wind die ze heeft opgewekt, hetzij dat de wind ging liggen, hetzij dat het windveld zich heeft verwijderd, hetzij dat de golven uit het windveld vandaan gelopen zijn.

Deining verschilt nogal van zeegang.

Ten eerste is al heel snel na het wegvallen of verminderen van de wind het uiterlijk van de golven belangrijk veranderd: witte koppen zijn verdwenen en de kortere golfjes zijn door inwendige wrijving uitgedempt, waardoor de golven een veel gladder aanzien krijgen. Over grotere afstanden ondergaan ze vervolgens nog twee geleidelijke veranderingen, namelijk hoogteverlies en een langer worden van de golfperiode. Doordat de stabiliteit van een gezette bekleding sterk afhankelijk is van de golfperiode, zie ook hoofdstuk 13, dient bij het ontwerp in bepaalde gevallen met het verschijnsel deining rekening te worden gehouden.

Voor het voorspellen van windgolven zijn diverse voorspellingsmethoden beschikbaar, korthedshalve wordt hier naar lit. 21 en 24 verwezen.

Lineaire golftheorie voor kleine amplituden

In deze leidraad wordt gerefereerd aan de lineaire golftheorie; daarom zullen hier globaal enkele begrippen en wetmatigheden worden behandeld.

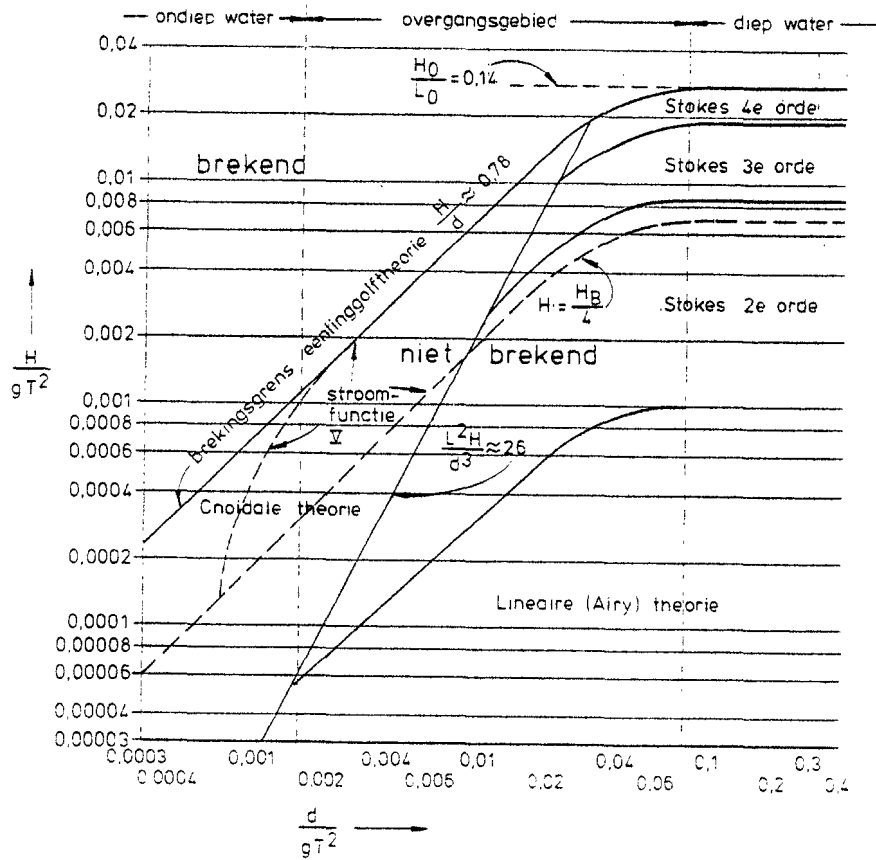


Fig. 11.1.: Geldigheidsgebieden van verschillende golftheorieën

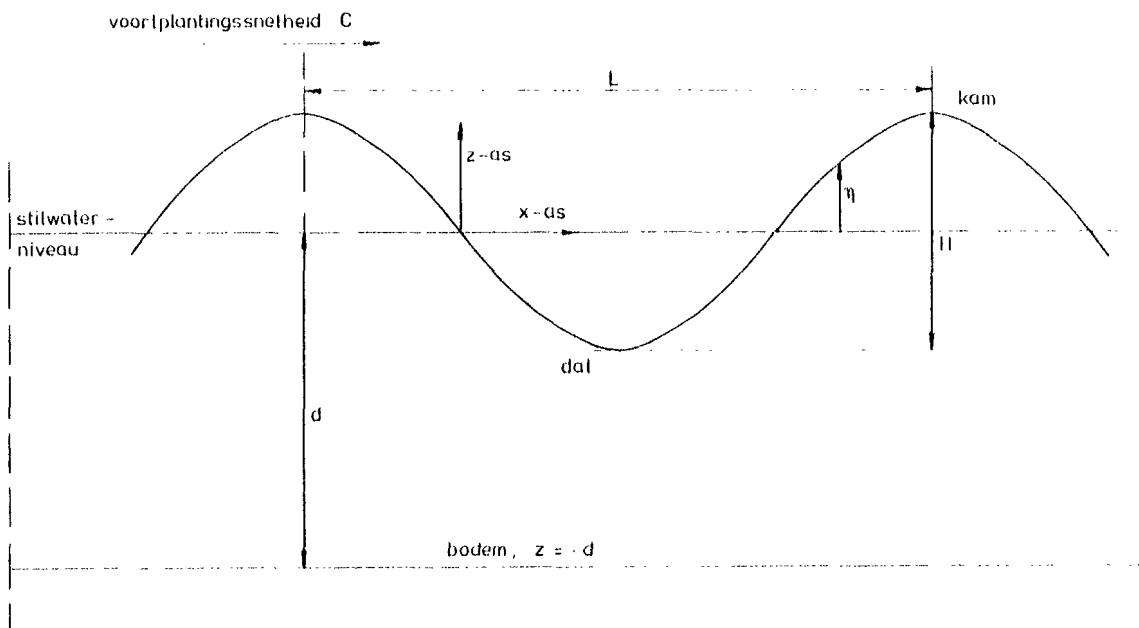


Fig. 11.2.: Profiel van een enkelvoudige golf

De lineaire of de Airy-Laplace golftheorie gaat uit van de volgende veronderstellingen:

- a. sinusvormig oppervlak van de waterspiegel
- b. kleine amplituden, dat wil zeggen $H \ll L$, $H \ll d$
- c. vlakke ondergrond
- d. ideale vloeistof, dat wil zeggen wrijvingsloos, incompressibel, homogeen
- e. geen invloed van de luchtbeweging op de golfbeweging.

Het is gebruikelijk de relatieve waterdiepte d/L als volgt in te delen:

- diep water $d/L > 0,5$
- overgangsgebied $0,5 > d/L > 0,04$ [11.1.]
- ondiep water $d/L \leq 0,04$.

De betrekking tussen golflengte (L), golfperiode (T) en voortplantings-snelheid (C) is als volgt:

$$C = L/T \quad [11.2.]$$

Deze betrekking geldt geheel algemeen, onafhankelijk van de hoogte van de golven of de diepte van het water.

De snelheid waarmee een groep golven zich voortbeweegt, is in het algemeen niet gelijk aan de voortplantingssnelheid van de golven in de groep zelf. Terwijl de golftoppen met hun eigen voortplantingssnelheid voortlopen, verplaatst ook de groep als zodanig zich met de groepssnelheid C_g . Zowel theoretisch als uit ervaring blijkt, dat een groep zich in diep water verplaatst met een snelheid die de helft is van de voortplantingssnelheid der individuele golven.

Bij zeer ondiep water zijn de voortplantingssnelheid van de golf en de groepssnelheid aan elkaar gelijk.

De voor praktische toepassings belangrijkste formules zijn samengevat in tabel 11.1.

	ondiep water $d/L < 0,04$	overgangsgebied	diep water
1.golfsnelheid	$C=L/T=\sqrt{gd}$	$C=L/T=\frac{gT}{2\pi}\tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$	$C=C_o=L/T=\frac{gT}{2\pi}$
2.groepssnelheid	$C_g=C=\sqrt{gd}$	$C_g=\frac{1}{2}\left(1+\frac{4\pi d/L}{\sinh(4\pi d/L)}\right)\cdot C$	$C_g=\frac{1}{2}C_o=\frac{gT}{4\pi}$
3.golflengte	$L=T\sqrt{gd}=CT$	$L=\frac{gT^2}{2\pi}\tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$	$L=L_o=\frac{gT^2}{2\pi}=C_o T$

Tabel 11.1.

11.2.2. Lokale eigenschappen individueel golfveld

Onregelmatige golven zijn aanzienlijk moeilijker te beschrijven dan regelmatige golven. Het chaotische karakter van golven die door de wind worden opgewekt is een wezenlijk kenmerk van die golven. Omdat deze schijnbare chaos alleen is te ordenen in termen van kansen van optreden van bepaalde verschijnselen wordt in de beschrijving gebruik gemaakt van de waarschijnlijkheidsleer.

De normaal gebruikelijke statistische parameters kunnen worden gebruikt om de verdeling van de golven te beschrijven. In de praktijk van de kustwaterbouwkunde worden de kleinere golven echter vaak verwaarloosd en het gemiddelde van het hoogste 1/3 deel van de golven als kenmerken- de grootheid genomen.

Dit gemiddelde wordt de significante golfhoogte genoemd en is ongeveer dezelfde golfhoogte zoals die door een ervaren waarnemer visueel wordt geschat. Deze waarde wordt aangeduid met H_s .

Een nadeel van de grootte H_s is dat het slechts een zeer globale beschrijving geeft van het totale golfbeeld. Doordat vele aan de wetten van het toeval onderworpen processen (zogenaamde stochastische processen) niet een geheel willekeurig karakter hebben, kunnen deze worden beschreven door theoretische verdelingsfuncties.

Met een redelijke nauwkeurigheid kunnen golfhoogten van onregelmatige windgolven met de Rayleigh verdelingsfunctie worden beschreven:

$$P_r(\underline{H} > H) = e^{-2(H/H_s)^2} \quad [11.3.]$$

waarin:

- $P_r(\underline{H} > H)$ = kans van overschrijding van de golfhoogte H
- \underline{H} = individuele golfhoogte als stochast (m)
- H = individuele golfhoogte (m)
- H_s = significante golfhoogte (m)

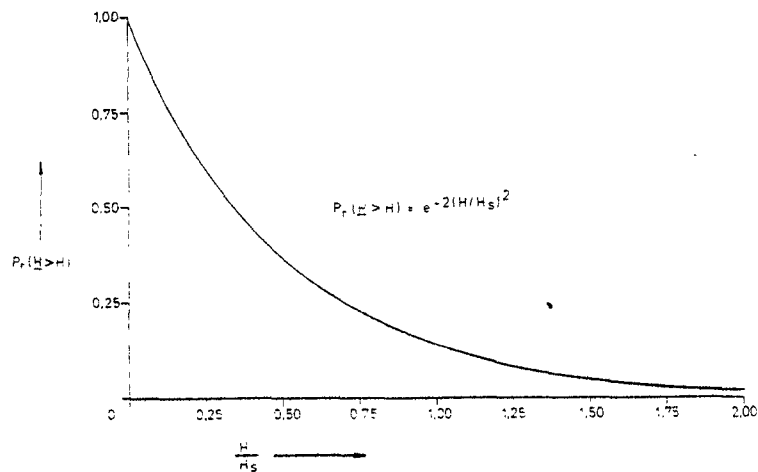


Fig. 11.3.: Het verloop van de Rayleigh verdelingsfunctie

De periode en lengte in een onregelmatig golfsysteem zijn wat meer gecompliceerd dan de hoogte. Voor praktische doeleinden worden ze wel gedefinieerd door de gemiddelde periode \bar{T} , die de gemiddelde waarde is van de tijd T tussen twee nulniveaupassages, of de significante golfperiode T_s , die de gemiddelde waarde is van het hoogste 1/3 deel van de golven.

Voor het beschrijven van onregelmatige golven kan dus gebruik worden gemaakt van twee grootheden: ten eerste de significante golfhoogte H_s en ten tweede van de gemiddelde golfperiode \bar{T} , of de significante golfperiode T_s .

Een andere mogelijkheid om een golfbeeld in tekening te brengen is het golfspectrum; dit beschrijft in tegenstelling tot de significante golfhoogte ten volle de statistische eigenschappen van onregelmatige golven.

Men definieert daarbij een energiedichtheid (E) als functie van de frequentie (f) van de spectrale componenten.

11.3. Golfvervormingen

11.3.1. Golfvervormingen voor de dijk

De golven, zoals die onze kust naderen, ondergaan in het algemeen grote vervormingen voordat ze de teen van de dijk hebben bereikt. Dit wordt veroorzaakt door:

a. refractie

Doordat een golf in water met andere diepte komt, veranderen de loop-snelheid, de lengte en de hoogte en daardoor verandert in omstandigheden waarbij de golfrichting niet samenvalt met de richting van de verondieping ook de richting van de golven. Eén van de belangrijkste punten waarover een refractieberekening uitsluitsel kan geven is de vraag waar eventueel voor de kust plaatsen zijn waar golfkammen samenkomen (convergeren en dan een versterkte golfbeweging voor de dijk veroorzaken).

b. diffRACTIE

Zonder dat de lengte en de periode van de golf veranderen, buigt de golf om vooruitspringende kustgedeelten of dammen heen. Meestal wordt het verschijnsel begeleid en overheerst door de refractie.

c. shoaling

Onder "shoaling" van golven wordt verstaan het proces van transformatie dat zij ondergaan als gevolg van de voortplanting in gebieden met variërende waterdiepte, waarbij de golfrichting evenwijdig loopt met de verondieping. Bij geleidelijk oplopende bodem neemt de golflengte af, terwijl de golfhoogte toeneemt, de golfperiode blijft hierbij constant.

d. bodemwrijving

In relatief diep water is deze te verwaarlozen, maar nabij de kust kan door dit verlies de golfenergie merkbaar afnemen.

In vele situaties blijkt de invloed hiervan betrekkelijk klein te zijn in vergelijking met de hierboven genoemde verschijnselen.

e. plaatselijke wind

De tegenhanger van het energieverlies door bodemwrijving is de energiewinst door plaatselijke wind.

Een golfveld dat de kust nadert kan hierdoor over bijvoorbeeld de laatste tien kilometers nog een merkbare hoeveelheid energie opnemen.

f. stroming

Door stroomverschillen, zoals vanuit een gebied met stroming naar een gebied zonder stroming ontstaan golfvervormingen. De golven hebben de neiging om te convergeren naar plaatsen waar hun snelheid het meest wordt verkleind of te divergeren van plaatsen waar hun snelheid wordt vergroot.

g. golfbreking

Een hooggelegen vooroever zal de golfaanval ter plaatse van de dijk in meer of mindere mate reduceren. Zo geeft de theorie der eenlinggolven (solitary-waves) voor zeer ondiep water een vaste verhouding tussen de diepte d_b waar de golven breken en de brekerhoogte H_b :

$$H_b = 0,78 d_b \quad [11.4.]$$

Onder de diepte d_b wordt hierbij verstaan de verticale afstand van de bodem tot het golfdal, dat bij dit type golven met het karakter van eenling-golven bijna samenvalt met het niveau dat ter plaatse bij stil water gevonden zou worden.

Een veel gebruikte formule voor onregelmatige golven is:

$$H_{s_{\max}} = 0,5 d_b \quad [11.5.]$$

waarin $H_{s_{\max}}$ = maximale significante golfhoogte na breking
 d_b = verticale afstand van de bodem tot het stilwaterniveau

Een hooggelegen vooroever of zandbank voor de dijk werkt dus voor de golven als een soort filter; alleen de lagere golven worden doorgelaten.

11.3.2. Golfbreking op het dijktalud

Indien golven breken op een dijktalud kunnen, afhankelijk van de golfsteilheid en de taludhelling, verschillende brekervormen worden onderscheiden, die niet alleen qua vorm maar ook qua energie-afgifte en uitgeoefende kracht van elkaar verschillen.

Een karakteristieke parameter die bij verschillende brekertypen wordt gebruikt is:

$$\xi = \frac{t \operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{H/L_0}} \quad [11.6.]$$

waarin:

α = hellingshoek van het dijktalud

H = golfhoogte

L_0 = golflengte op diep water = $\frac{gT^2}{2\pi}$

g = versnelling zwaartekracht

T = periode van de golf.

De verschillende typen brekers kunnen globaal volgens onderstaande lijst worden ingedeeld (glad talud):

$\xi < 1$	"spilling"	↑ toenemende golfsteilheid afnemende taludhelling ↑
$1 < \xi < 2,5$	"plunging"	
$2,5 < \xi < 3,2$	"plunging-collapsing"	
$3,2 < \xi < 3,4$	"collapsing-surgling"	
$3,4 < \xi$	"surgling"	

De brekerparameter ξ zal ook worden gebruikt om de stabiliteit van de gezette bekleding te beschrijven.

Spilling breaker: $\xi < 1$

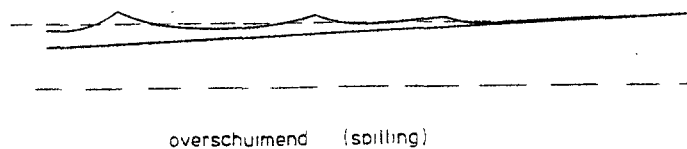


Fig. 11.4.: Vorm van de spilling breaker

De brekers van het overschuimende type (spilling breaker) treden op bij zeer flauwe bodemhellingen. Ze lopen over een geruime afstand voort en verliezen daarbij continu energie door te breken met schuimvorming aan hun kammen, totdat ze geheel verdwenen zijn.

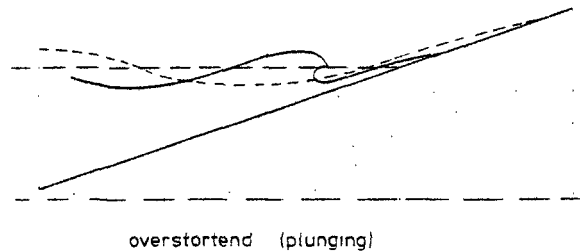


Fig. 11.5.: Vorm van de plunging breaker

De brekers van het overstortende type (plunging breaker) treden op bij wat grotere bodemhellingen en wanneer de ontwikkeling van de golfrug in ondiep water weinig wordt gestoord door andere effecten als wind, kruisende golven, stroom, onregelmatigheden van de bodem en dergelijke.

De overstortende breker wordt gekarakteriseerd door het optreden van een watergordijn, dat van de kam af als het ware wordt neergegoten en los is van de voorkant van de golfrug.

Zo'n breker heeft na het overstorten, dat in een korte spanne tijd gebeurt, slechts weinig energie overgehouden.

Daar bij een betrekkelijk steile bodemhelling het proces van de vorming der golven tot het uiteindelijke breken zich over een kortere afstand uitstrekt en er dus minder dan bij een zeer geringe bodemhelling voor storende invloeden gelegenheid is om in het spel te komen, is zulk een wat steilere helling in het algemeen een gunstige factor voor de ontwikkeling van overstortende brekers.

Verder is ook een geringe aanvankelijke steilheid der golven hiervoor bevorderlijk - indien althans andere omstandigheden niet tegenwerken.

Bij geringe aanvankelijke steilheid gaat namelijk de ontwikkeling naar een zogenaamde eenling-golf ver door en wordt bij eenzelfde aanvankelijke hoogte een grotere uiteindelijke hoogte, dus een sterkere ophefing van de kam bereikt dan bij aanvankelijk steilere golven.

Collapsing breaker: $\xi \approx 3,2$

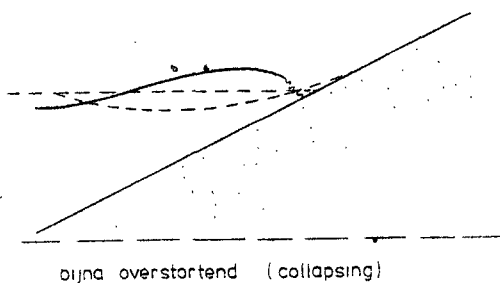


Fig. 11.6.: Vorm van de collapsing breaker

De brekers van het bijna overstortende type (collapsing breaker) zijn tussen een plunging en surging breaker in gelegen. Bij deze brekervorm is een verticale kam aanwezig, die slechts gedeeltelijk in elkaar is gezakt.

Surging breaker: $\xi > 3,4$

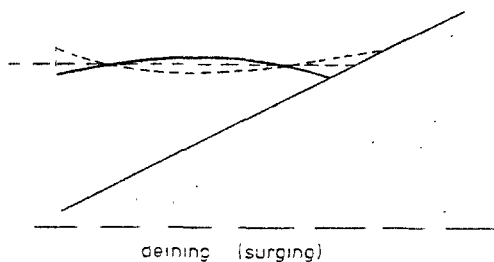


Fig. 11.7.: Vorm van de surging breaker

Deinende brekers (surging breaker) worden waargenomen als de taludhelling nog steiler is (en vooral als de golfsteilheid zeer klein is). Het voorfront van de golfkam wordt dan op de helling als het ware opgelicht voordat de golf kan overstorten en er ontstaat een op en neergaande waterbeweging met een betrekkelijk dunne schuimende waterlaag. De golfenergie wordt nu grotendeels teruggekaatst.

Deze deinende brekers vormen dus in feite het stadium tussen de overstortende brekers en de zuiver staande golven, waarbij geen breking meer optreedt en alle golfenergie wordt teruggekaatst.

Vergelijkt men de energie-afgifte van de plunging breaker kwalitatief met die van de spilling breaker, dan verkrijgt men onderstaand beeld.

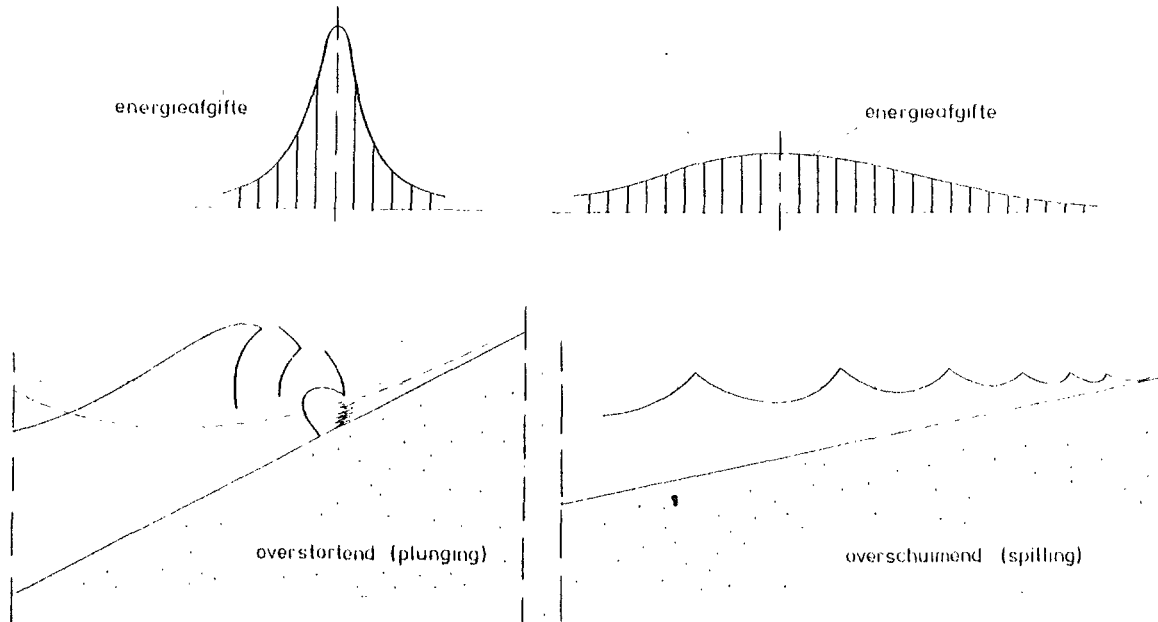


Fig. 11.8.: Vergelijking van de energie-afgifte

Beseft moet worden, dat in voorgaande schematisaties de werkelijkheid sterk is vereenvoudigd.

De gegeven beschouwingen zijn nog het best van toepassing op regelmatige golven die op een vlak en glad talud toelopen, een situatie die men in het laboratorium kan scheppen. In de vrije natuur bestaan er vele factoren die het gegeven beeld kunnen verstoren.

De door de plunging breaker veroorzaakte golfklap treedt op op een diepte die varieert van $1/3 H$ tot $2/3 H$ onder het niveau van stilwater. De grootte van de golfklap is langs theoretische weg slecht te bepalen. Als oorzaken kunnen worden genoemd:

- Bij het breken van een golf op een talud kan er een hoeveelheid lucht worden ingesloten tussen het golffront en het talud. Naarmate het opgesloten luchtkussen dunner is, zal de maximale drukkracht groter zijn en de duur van de schok korter.
- Het is ook mogelijk dat de golf slaat in de terugstromende laag water van de vorige golf. Hoe dikker deze laag, des te kleiner de golfklap. De invloed van het aflopende water is groter naarmate de taludhelling flauwer is.

Figuur 11.9. toont een schematisch beeld van de plunging breaker.

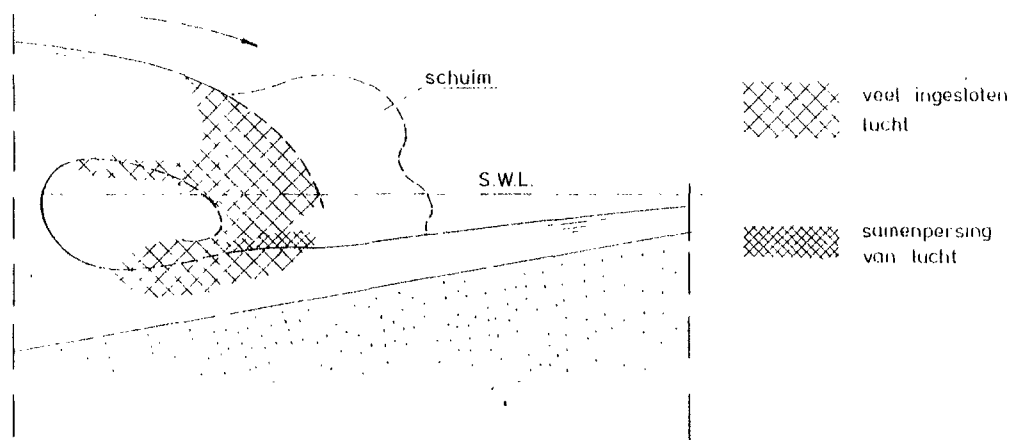


Fig. 11.9.: Schets van het neerkomen van de brekertong

Wanneer de bekleding een zekere doorlatendheid bezit, zal de uitwendig aangrijpende golfbelasting zich gedeeltelijk onder de bekleding in een daar aanwezig filter kunnen voortplanten, waarbij de drukken aan de onderzijde in fase verschoven zullen zijn ten opzichte van de drukken aan de bovenzijde van de bekleding. De drukvoortplantingskarakteristieken van het filter zijn echter ook moeilijk te modelleren en theoretisch te beschrijven.

Er is veel onderzoek verricht naar het verschijnsel golfklap; niemand is er echter nog in geslaagd het fenomeen voldoende te beschrijven, zodat geen theorie kan worden aangewezen die goed toepasbaar is. Teneinde toch een indruk te verkrijgen worden in onderstaande tabel enige gemeten waarden gegeven voor de grootte van de drukstoot.

helling	drukstoot in meter waterkolom
1 : 2	2,3 H
1 : 3	2,7 H
1 : 4	2,3 H
1 : 6	2 H

Deze cijfers gelden voor een glad ondoorlatend talud. De duur van de drukstoot ligt in de orde van grootte van $1/20$ à $1/4$ seconde.

Hoofdstuk 12 - BIJZONDERE BELASTINGEN

Te denken valt in dit verband aan:

- a. wrakhout en afgeslagen deklasten van schepen
- b. kruiend ijs
- c. drijvend vuil
- d. recreatie
- e. aantasting door zeeorganismen en plantengroei
- f. calamiteiten in de scheepvaart.

ad a.

Afhankelijk van de grootte van het wrakhout en de deklasten kunnen door de golven opgenomen voorwerpen grote krachten op de bekleding uitoefenen. In de dagelijkse praktijk valt het echter vaak nog wel mee, het blijft meestal wel zodanig binnen de perken dat het in het kader van het normale onderhoud te herstellen valt.

ad b.

Kruiend ijs is een verschijnsel dat in zoetwatermeren en rivieren in veel sterkere mate optreedt dan aan zee en op deze meren en rivieren aanleiding kan geven tot beschadiging van de waterkeringen.

Om voor beschouwingen met betrekking tot het voorspellen van een toekomstige ijstoestand een betrouwbare basis te verkrijgen is een nauwkeurige analyse van bestaande gegevens met betrekking tot de factoren die de ijsvorming en ijsbezetting beïnvloeden noodzakelijk.

Hierbij zijn van belang:

1. Factoren die bepalend zijn voor de waterbeweging.
 - Hydrografische gegevens: topografie (diepte en oppervlak), uitwisseling van water tussen de zee en het beschouwde estuarium.
 - Hydraulische gegevens: waterstanden (getij), snelheden en getijvermogens.

2. Factoren die de ijsvorming beïnvloeden:

- Klimatologische factoren: lucht- en watertemperatuur, wind enz.
- Zoutgehalte van het water
- Hydrografische factoren
- IJstoevoer door rivieren.

3. IJswaarnemingen.

Op een meer en in zout water op de ondiepere plaatsen kan een ijsveld met grote dikte ontstaan, dat plaatselijk door het op elkaar schuiven van enkele lagen nog aanzienlijk groter kan zijn en onder invloed van de wind in beweging komen, wat in het algemeen na het invallen van de dooi zal geschieden en zo ernstige schade aan de dijkbekledingen kan toebrengen.

Bij een meer is de situatie vooral ernstig doordat het aangrijpingspunt van de in eerste instantie door de ijslaag op het dijklichaam uitgeoefende krachten is gelegen ter hoogte van, of iets beneden de waterspiegel, met andere woorden ter plaatse van de teenconstructie en het aansluitende beloop daar beneden. In dit verband is ook de sterkte van het ijs belangrijk; zoutwaterijs is in het algemeen zwakker (zachter) dan zoetwaterijs. Stortsteen en gedeelten van de kraagstukken kunnen door het ijs worden opgenomen.

Dergelijke ijsvelden zullen zich niet door het dijkbeloop en nog minder door obstakels daarop laten tegenhouden. Het ijsveld zal de belopen en de eventueel aanwezige bermen van de dijk nauwkeurig volgen en alles wat daarboven uitsteekt "keurig" afscheren.

In dit verband moge erop worden gewezen, dat uitsteeksels van een gezette glooiing, zoals paalrijen en uitstekende delen van betonblokkenglooiingen (ten behoeve van remming golfoploop) aangrijpingspunten vormen voor de zeer grote krachten die een in beweging zijnd ijsveld kan uitoefenen.

Als gevolg van deze krachten kunnen niet alleen de uitsteeksels op de glooiingselementen worden beschadigd, maar de elementen kunnen uit de glooiing worden gelicht, ook kan het verband in de gezette glooiing ernstig worden verstoord.

Om schade door ijsgang zoveel mogelijk te voorkomen, is het gewenst de belopen glad af te werken.

ad c.

Drijvend vuil zal in het algemeen geen schade aan de harde bekleding aanrichten, wel is de grasmat gevoelig voor verstikking onder dit vuil. Bij rivieren kunnen boomstammen schade aanrichten.

ad d.

Door sportvissers kan soms een enkel element worden gelicht zonder dat dit wordt teruggezet.

De betonnen bekleding heeft verder in het algemeen weinig te lijden van de recreatieve belasting, de grasmat is voor bepaalde vormen van recreatie wel gevoelig hiervoor.

ad e.

Begroeiingen zullen hun houvast meestal vinden in de naden tussen de gezette elementen.

In de regelmatig overspoelde zône vindt vooral aangroei door algen en zeepokken plaats, bij de niet-regelmatig overspoelde zônes zijn het vooral de hogere planten die de begroeiing vormen.

Begroeiingen zijn in het algemeen niet schadelijk voor de kwaliteit van een met betonnen elementen afgedekte talud.

ad f.

Een storm is van directe invloed op ongelukken met schepen, de kans op het samenvallen is reëel. Vooral nabij drukke scheepvaartroutes moet hiermee rekening worden gehouden.

Bij deze calamiteiten kan de bekleding op zich niet zoveel bijdragen aan de bestendigheid van de waterkering tegen dit soort belastingen. Wanneer wordt geëist dat de dijk deze extreme belastingen kan weerstaan zal dit hoofdzakelijk moeten worden gezocht in de massa van het dijklichaam.

Hoofdstuk 13 - STABILITEIT GEZETTE BEKLEDING

13.1. Algemeen

De stabiliteit van een bekleding opgebouwd uit gezette elementen wordt door diverse variabelen beïnvloed, zoals:

- a. Eigenschappen van de constructie (bekleding plus onderlaag)
 - 1. gewicht en/of afmetingen van de gezette elementen
 - 2. volumieke massa van het materiaal
 - 3. wrijving van de elementen met de onderlaag en tussen de elementen onderling
 - 4. drukkrachten (voorspanning) in het vlak van de bekleding
 - 5. interlock tussen de elementen onderling
 - 6. doorlatendheid van bekleding en onderlaag
 - 7. taludhelling en vorm van het talud
 - 8. zanddichtheid en erosiebestendigheid van de onderlaag
 - 9. invloed van de overgangsconstructies op de sterkte van de bekleding
 - 10. ruwheid en waterbergend vermogen van de bekleding
 - 11. eigenschappen op de lange duur.

- b. Hydraulische randvoorwaarden
 - 1. golfspectrum (golfhoogten en perioden)
 - 2. groepering van de golven
 - 3. hoek van golfaanval
 - 4. brekertype en plaats van breking
 - 5. golfoploop
 - 6. windeffecten
 - 7. golfvervormingen voor de dijk
 - 8. stromingen
 - 9. momentane waterniveau
 - 10. frequentie van voorkomen van een bepaalde hydraulische randvoorwaarde op een bepaalde plaats op het talud.

Vorenstaande lijst is waarschijnlijk niet volledig, het geeft echter de omvang van het probleem aan.

Het kwantitatieve effect van vele hiervoor genoemde variabelen is nog onvoldoende bekend.

Bezwijken van een constructie of constructie-onderdeel treedt op als de optredende belasting de sterkte overtreft. Evenals bij traditionele bouwconstructies kan daarbij sprake zijn van een direct bezwijken bij hoge belastingen en een bezwijken als gevolg van gematigde maar frequent voorkomende belasting (o.a. erosieverschijnselen).

Het eerste type van bezwijken is met name van belang voor de bekleding, het tweede voor de onderlaag en daardoor indirect voor de bekleding.

Het begrip stabiliteit moet worden gezien voor individuele elementen en voor de glooiing als geheel. De weerstand tegen uitlichten van een individueel element ontleent het aan zijn eigen gewicht, eventueel verhoogd met wrijvingskrachten door de invloed van naastliggende elementen.

Wanneer de wrijvingskrachten tussen de elementen groot zijn of op een andere wijze samenhang is verkregen (interlocksystemen), dan is niet het individuele element maar de glooiing als geheel bepalend voor de stabiliteit.

Voor blokken die koud tegen elkaar zijn geplaatst is het een veilige benadering om bij de stabiliteitsbeschouwingen van het losliggende blok uit te gaan. Allereerst zal hier aandacht worden besteed aan het losliggende element, waarna enige beschouwingen worden gewijd aan de stabiliteit van geklemde zettingen.

13.2. Losliggende elementen

Een onderscheid moet worden gemaakt tussen elementen geplaatst op een doorlatende of ondoorlatende ondergrond.

13.2.1. Doorlatende ondergrond

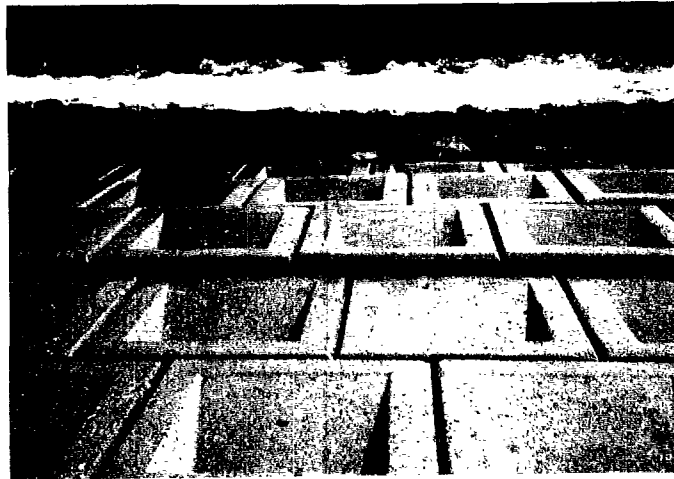
Voor de verstoring van de stabiliteit van een losliggend element op een doorlatende ondergrond worden volgens huidige inzichten een 8-tal mogelijke mechanismen onderscheiden (zie ook fig. 13.1.):

- a. Wanneer de golfloop haar maximale waarde heeft bereikt stroomt het water dank zij de zwaartekracht terug.
Wanneer het water op het talud terugstroomt nemen de drukken op de bekleding af. Wanneer een ruwe bekleding aanwezig is, kan deze terugloop van het water resulteren in stromings-, traagheids- en liftkrachten.
- b. Afhankelijk van de doorlatendheden en de geometrie kan het water in het filter niet direct terugstromen, hetgeen resulteert in krachten die de bekleding willen optillen. In het algemeen is de hoogte van de golfloop groter dan de hoogte waarover de golf zich beneden de stilwaterstand terugtrekt. Daarom lekt het water over een groter oppervlak in het filter dan het oppervlak waarover uitstroming plaatsvindt, hetgeen resulteert in een verhoging van de freatische lijn in het filter en daarmee drukverhogingen onder de gezette bekleding. Dit is een cumulatief effect van een aantal golven.
- c. Wanneer de volgende golf bij het talud aankomt, treedt een verhoging op van de drukken op het talud onder deze golf. Deze drukken kunnen zich door het filter vlak voor het golffront voortplanten, resulterend in drukken die de bekleding willen oplichten. Deze drukken zullen slechts over een beperkt gebied voor het golffront optreden.
- d. Na de bij c. geschetste fase treden ook aanzienlijke veranderingen op in het snelheidsveld ten gevolge van de naderende golf. Er ontstaan gekromde stroomlijnen, te vergelijken met wervels. Door dit gekromde snelheidsveld kunnen boven de bekleding drukverlagingen ontstaan.

- e. Een brekende golf zal op het talud een golfklap geven, hetgeen sterk stijgende drukken op het talud geeft met een tijdsduur in de orde van $1/20$ à $1/4$ s. Deze drukken op de bekleding kunnen zich via het filter voortplanten en resulteren in kortdurende drukken onder de bekleding.
- f. Na dit kortdurende fenomeen valt een massa water op het talud. De hoge drukken kunnen zich onder de bekleding, net voor het punt waar de golf breekt, voortplanten en dus resulteren in drukken die de bekleding willen oplichten.
- g. Nadat de golf het talud raakt, treedt een sterke reductie op (zelfs negatieve drukken ten opzichte van de atmosferische druk) in de drukken op de bekleding. Dit verschijnsel wordt uitgelegd als te zijn veroorzaakt door oscillaties van de ingesloten luchtcilinder in de brekende golf.
- h. Na de golfbreking treedt de golfoploop op. Gedurende deze fase nemen de drukken op de bekleding toe. Er zijn nu echter geen kritieke omstandigheden aanwezig; behalve wanneer de bekleding ruw is of wanneer de blokken gedeeltelijk uit de bekleding zijn getild. In deze gevallen ontstaan er stromings-, traagheids- en liftkrachten.

Uit door het Waterloopkundig Laboratorium en het Laboratorium voor Grondmechanica uitgevoerd onderzoek kan worden geconcludeerd dat, onder de bij de beproevingen heersende omstandigheden bezwijkmechanismen b. "quasi-stationaire verschildrukken" en c. "drukken ten gevolge van het naderende golfvront" zeer belangrijk zijn voor de stabiliteit van een blokkenbekleding.

De besproken mechanismen kunnen echter niet los van elkaar worden gezien, een combinatie van mechanismen kan optreden. Zo zullen zowel de golfkarakteristieken als de taludhelling van invloed zijn op het belang van de diverse mechanismen.



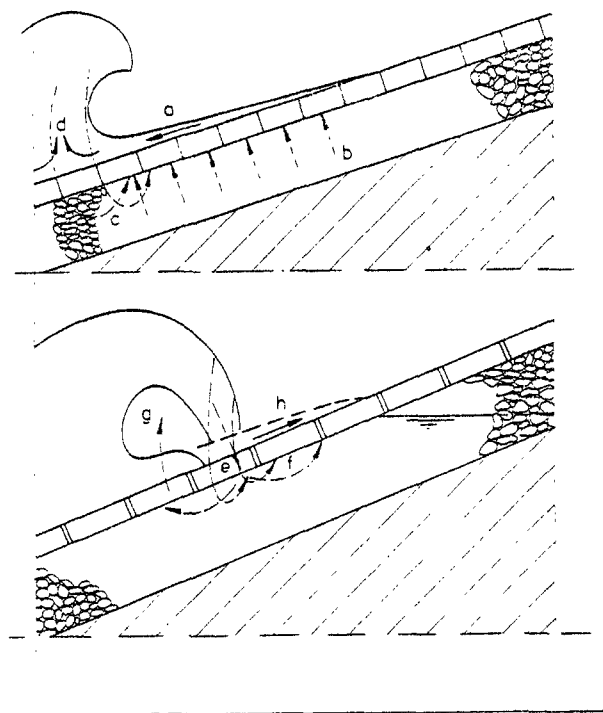
Door druk vanuit het filter opgeperste rij elementen



Patroon van schade bij
individuele instabiliteit
van de elementen



Schade bij de overgang
van een basalt naar een
betonnen glooiing



- a = krachten tengevolge van de golfterugloop
- b = quasi-stationaire drukken vanuit het filter
- c = drukken tengevolge van het naderende golffront
- d = veranderingen in het snelheidsveld
- e = golfklap
- f = drukken tengevolge van de massa van de brekende golf
- g = lage drukken door het ontsnappen van lucht uit de ingesloten lucht cilinder
- h = krachten tengevolge van de golfoploop

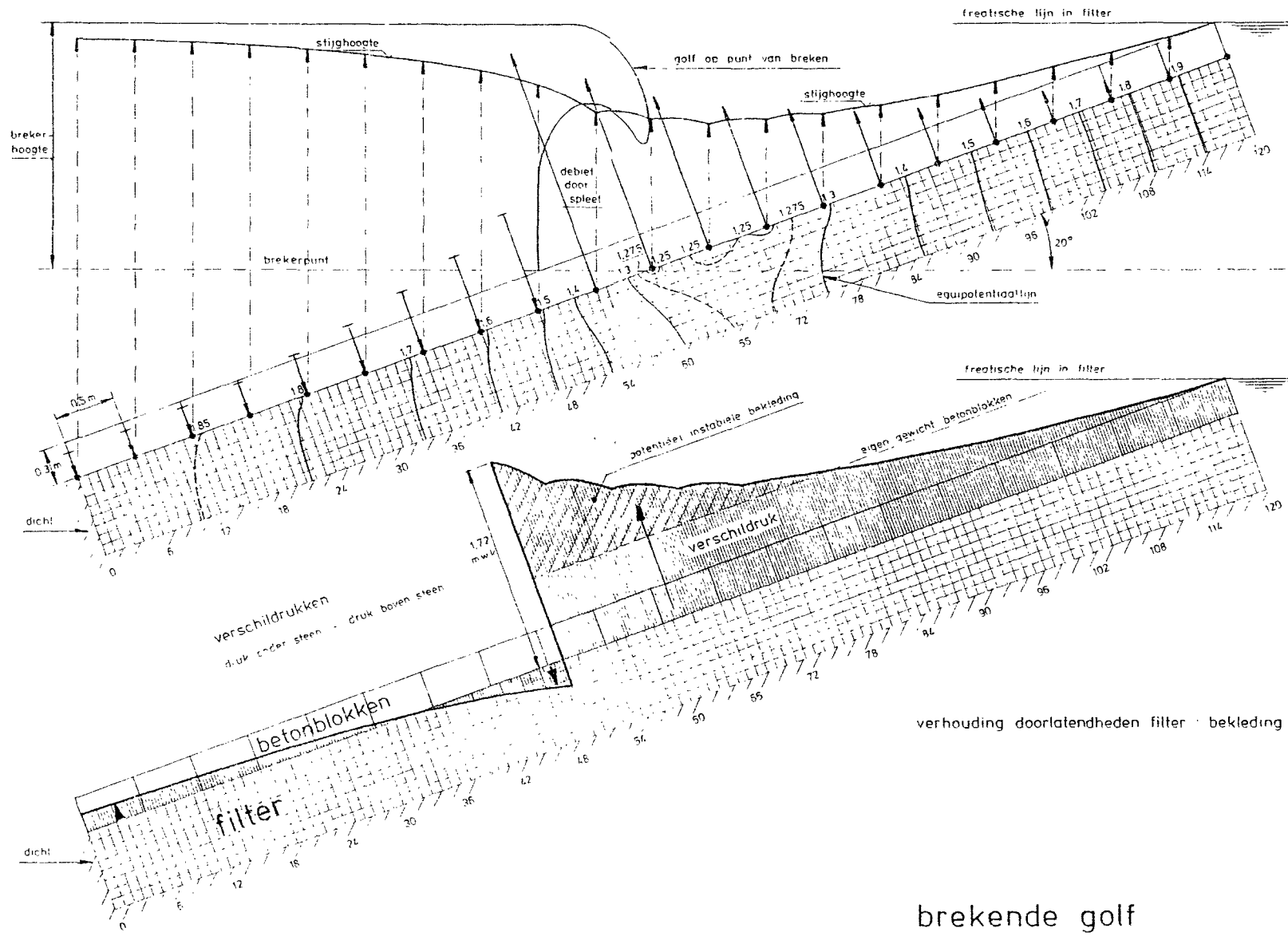
Fig. 13.1.: Schematische weergave van de mogelijke bezwijkmechanismen

Ter illustratie zijn in figuur 13.2. enkele resultaten van een computerberekening gegeven voor de mechanismen b. en c.

Bij de berekening is de tijd stil gezet op het moment dat de golf breekt, terwijl de freatische lijn in het filter zich nabij het stilwaterniveau bevindt.

Links van het golfbreekpunt wordt door de overdruk van de brekende golf water door de bekleding in het filter gestuwd (mechanisme c.).

Fig. 13.2.: Voorbeeldrekening van mechanisme n. b. en c.



verhouding doorlatendheden filter : bekleding = 1 : 0.04165

brekende golf

Ter rechterzijde vindt toestroming plaats vanuit de hooggelegen freatische lijn (mechanisme b.). Beide mechanismen beïnvloeden elkaar. Voor de stabiliteit van de bekleding is het tegelijk optreden van de mechanismen b. en c. van groter belang dan het optreden van de afzonderlijke mechanismen.

Uit de in de figuur gegeven verschildrukken (druk bovenzijde bekleding - druk onderzijde bekleding) blijkt dat de bekleding direct rechts van het golfbreekpunt potentieel instabiel is, hetgeen inhoudt dat de verschildruk groter is dan het eigen gewicht van de bekleding.

De hier geïllustreerde numerieke aanpak is voor de praktijk echter te omslachtig; voor verdere achtergronden wordt verwezen naar het rapport "Achtergronden bij de leidraad cementbetonnen dijkbekledingen".

Vorgaande beschouwingen maken duidelijk dat het geen eenvoudige zaak is een voor de praktijk gemakkelijk te hanteren analytisch rekenmodel voor alle mogelijke bezwijkmechanismen op te zetten; alleen voor mechanisme b. is dit met de nodige schematisaties redelijk gelukt.

Uit dit analytische rekenmodel, waarin geen golfbreking is opgenomen, maar alleen een in de tijd op- en neergaande buitenwaterspiegel, blijken de onderlinge verhoudingen van de waterdoorlatendheden van bekleding en onderliggend filter van groot belang te zijn.

Dit wordt uitgedrukt in de lek lengte λ :

$$\lambda = \sin \alpha \sqrt{k b d / k'}$$

waarin:

- α = hellingshoek talud
- k = doorlatendheid filterlaag
- k' = doorlatendheid steenzetting
- b = dikte filterlaag
- d = dikte steenzetting.

De uitwerking van de som geeft een verband tussen het maximum verschil in stijghoogte onder en boven de steenzetting $\Delta\phi$ en de verticale waterstandsvariatie H . In figuur 13.3. is hiervan een indicatief voorbeeld gegeven.

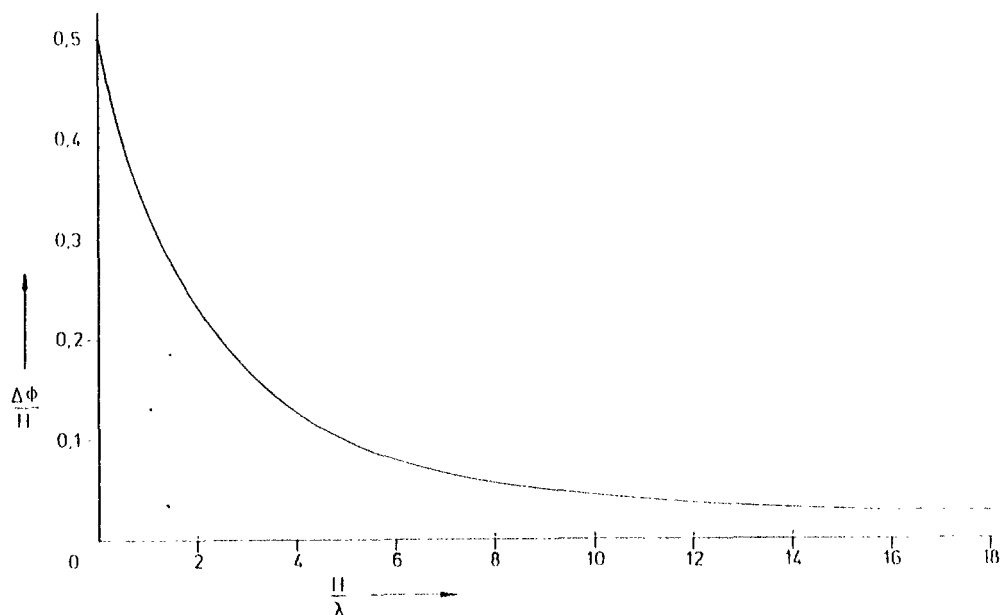


Fig. 13.3.: Maximum verschil tussen stijghoogte onder en boven de steenzetting ($\Delta\phi$) als functie van de lek lengte (λ); dimensieloos gemaakt door normering ten opzichte van de waterstandsvariatie (H)

Uit figuur 13.3. blijkt een gunstige invloed op de stabiliteit ($\Delta\phi$ is klein) van een doorlatende bekleding (k' is groot) en een dichte filterlaag (k is klein).

Ook een dunne filterlaag (b is klein) geeft minder hoge drukken onder de steenzetting.

Deze kwalitatieve resultaten komen overeen met de door het WL uitgevoerde proeven.

De diverse opgezette rekenmodellen laten het nog maar op beperkte schaal toe de zwaarte van de bekleding te berekenen. Vooralsnog is men hoofdzakelijk aangewezen op uit proeven verkregen resultaten.

Door de in de literatuur vermelde onderzoeksgegevens te combineren kan worden getracht een empirische formule op te stellen.

Daartoe kan via een sterk vereenvoudigde evenwichtsbeschouwing een formule worden afgeleid en de daarin opgenomen coëfficiënt worden geijkt met de proefresultaten.

Een voorbeeld hiervan is gegeven in fig. 13.4.

Hierin wordt de brekerparameter ξ , zie ook 11.3., uitgezet tegen de parameter $H_s/\Delta d$, waarin:

H_s = significante golfhoogte

L_o = golflengte op diep water; gebaseerd op de significante golfperiode

α = taludhelling

$\Delta = \frac{\rho_b - \rho_w}{\rho_w} =$ relatieve dichtheid van het blok

ρ_b = soortelijke massa van het blok

ρ_w = soortelijke massa van water

d = dikte van de blokken

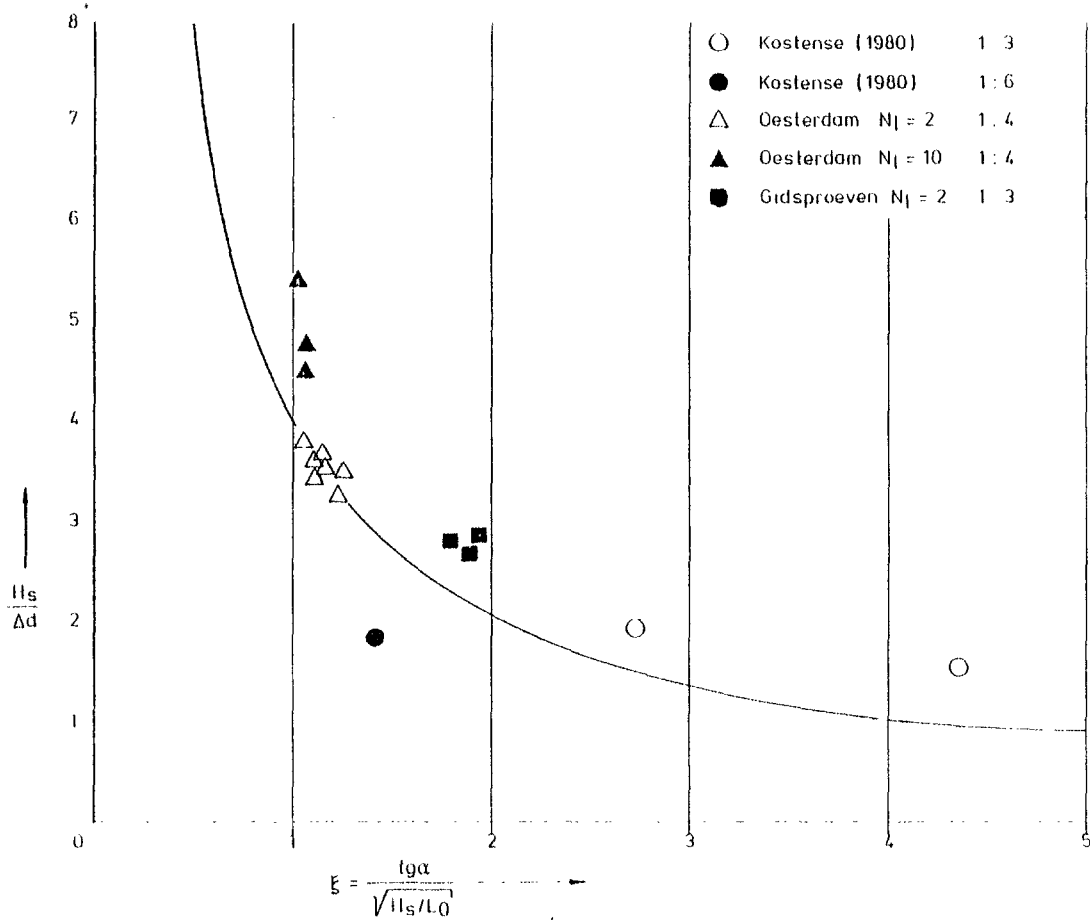


Fig. 13.4.: Onregelmatige golven, doorlatende funderingslaag

De hiervoor genoemde evenwichtsbeschouwing loodrecht op het talud geeft de volgende formule:

$$\frac{H}{\Delta d} = \frac{\cos \alpha}{c \xi}$$

met c de te ijken coëfficiënt.

Onder de veronderstelling $\cos \alpha \approx 1$ is in figuur 13.4. een enigszins veilige benadering gegeven met $c = 0,25$.

Duidelijk blijkt de invloed van de brekerparameter ξ op de stabiliteit van de gezette elementen.

Verder is naast de dikte van de bekleding d , ook de relatieve dichtheid van het blok Δ van groot belang voor de stabiliteit. Door een relatief beperkte toename van de soortelijke massa ρ_b neemt het gewicht van het blok onder water in versterkte mate toe.

De hier gepresenteerde "black-box" benadering is vrij grof; zo komt de invloed van de verhouding van de doorlatendheden van bekleding en ondergrond niet naar voren, evenmin als de horizontale afmetingen van de blokken en de dikte van het filter.

13.2.2. Ondoorlatende grond

Uit de door het WL uitgevoerde proeven in het kader van het ontwerp van de Oesterdam in de Deltagoot blijkt een bekleding van blokken, gezet op een onderlaag van klei een grotere stabiliteit te vertonen. De verklaring hiervoor is dat drukopbouw onder de bekleding wordt bemoeilijkt door het ondoorlatende karakter van de klei. Zodra een blok in een zetting ten gevolge van een initiële overdruk iets wordt opgelicht zal onder de steen water moeten toestromen om de holle ruimte op te vullen, ook dit vindt bij klei minder gemakkelijk plaats dan bij een granulair filter.

Teneinde blijvend te profiteren van de grotere stabiliteit dienen wel hoge eisen aan de klei te worden gesteld, zie ook hoofdstuk 5. Vooral de aanwezigheid van zandlenzen is nadelig, terwijl toepassing in de getijzone problematisch kan zijn.

Omtrent het bezwijkmechanisme is nog weinig bekend.

13.3. Geklemde zettingen

De evenwichtsbeschouwingen ten aanzien van opdrijven dienen nu niet op het enkele blok, maar op een aantal blokken te worden betrokken. Het uitvoeren van een berekening voor de stabiliteit van de glooiing als geheel wordt bemoeilijkt door:

- onbekendheid van de grootte van het oppervlak dat zich min of meer als plaat gaat gedragen
- onbekendheid met de mate waarin de blokken tegen elkaar worden gedrukt (voorspankracht)
- onbekendheid met de vervormingseigenschappen van de plaat
- onduidelijk bezwijkcriterium.

Vooral bij het aanbrengen van bekledingen die dank zij een betrouwbare interlock een hoge stabiliteit onder golfaanval bezitten, dient de sterkte van andere delen van de constructie niet te worden verwaarloosd. Zo is het denkbaar dat de voor de steenzetting toelaatbare golven in het onderliggende filter grote drukvariatiën opwekken. Hierdoor zou materiaal kunnen uitspoelen, migratie van het filter evenwijdig aan het talud en indringing van het zand uit het dijklichaam kunnen optreden, waardoor op de langere termijn de steenzetting wordt ondermijnd of grote vervormingen ondergaat.

13.4. Samenvatting onderzoek in Deltagoot

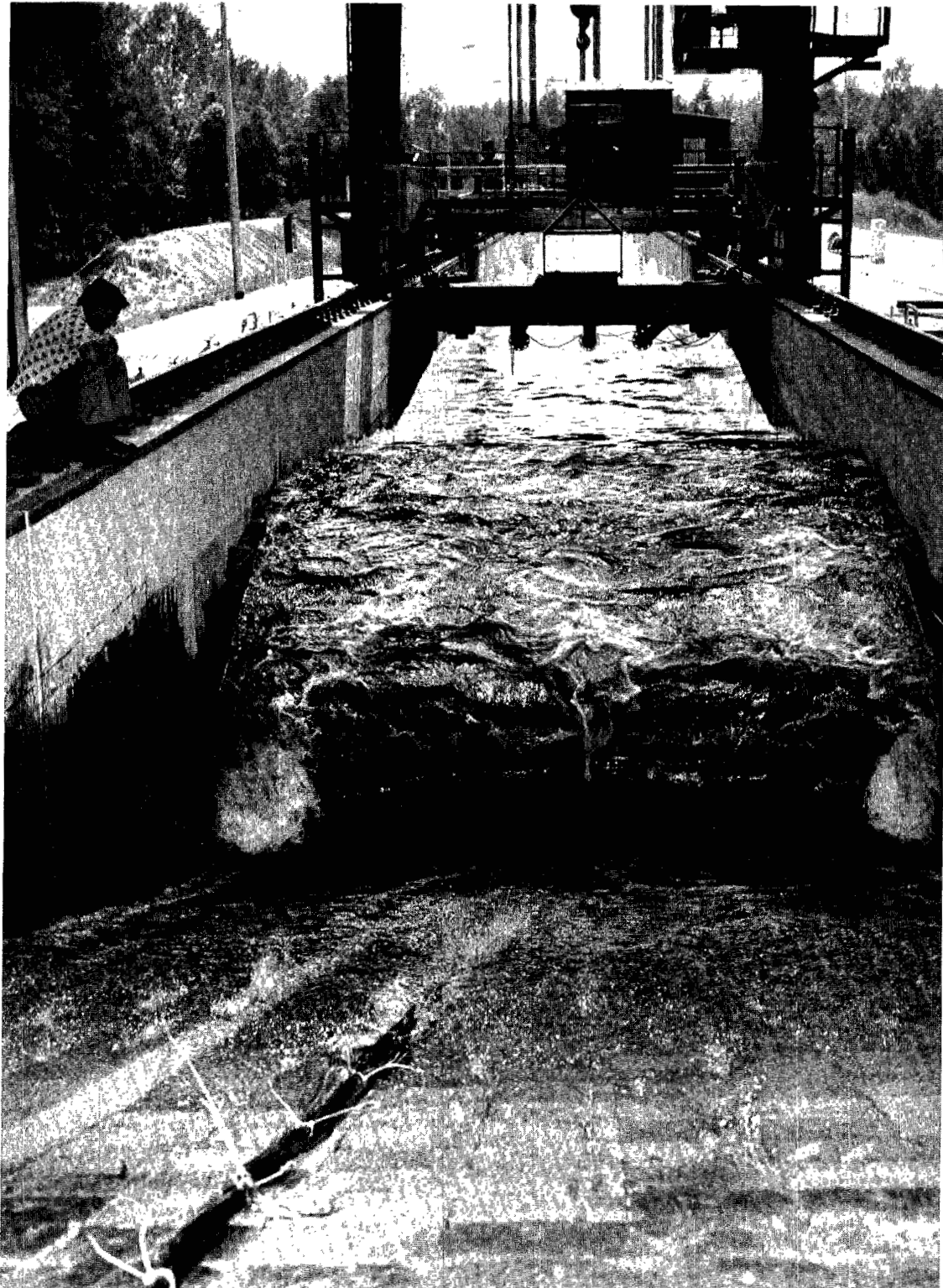
In de Deltagoot van het WL zijn diverse grootschalige proeven (lengteschaal van de blokken is 1 : 2) uitgevoerd. Figuur 13.5 en 13.6 geven een samenvatting voor respectievelijk regelmatige en onregelmatige golven. Vertaling van de resultaten van de proeven met regelmatige golven naar die van onregelmatige golven is nog niet mogelijk.

In deze figuren is de dimensieloos gemaakte golfhoogte waarbij schade optrad, uitgezet tegen de brekerparameter ξ .

Het type bekleding, de dikte van de bekleding, de golfperiode en de taludhelling zijn in de figuren weergegeven.

Uit de figuren blijkt het volgende:

- Variatie in de doorlatendheid van losliggende blokken op een filter had weinig invloed op de stabiliteit, de bekleding was dus blijkbaar in alle onderzochte gevallen doorlatend genoeg (figuur 13.6.).
- Blokken op goede klei bezitten een grotere stabiliteit, waarbij moet worden opgemerkt dat bij de korte duurproeven een nog grotere stabiliteit werd verkregen: $H_g/\Delta d = 6,9$ (figuur 13.6.)
- Blokken met een goed gedefinieerde interlock bezitten een zeer grote stabiliteit (figuren 13.5. en 13.6.). Het gedrag van het onderliggende filter kan echter een beperkende factor zijn.



Modelonderzoek naar de stabiliteit van dijkbekledingen van gezette steen in de deltagoot van het Waterloopkundig Laboratorium in de Voorst. Op de foto: een brekende golf juist voordat deze het talud zal treffen.

Bij de Armorflex- en Basaltonblokken wordt de stabiliteit door het vullen van de openingen tussen de blokken met granulair materiaal, als gevolg van de haakwerking, aanzienlijk vergroot. Het is zelfs niet mogelijk de bezwijkgrens exact weer te geven wegens de beperkte capaciteit van de Deltagoot.

Uit onderzoek is ook gebleken, dat bij vulling van de openingen tussen de blokken met granulair materiaal, de precieze vormgeving van de blokken niet van groot belang is. Bij alle onderzochte blokvormen lag de bezwijkgrens, als gevolg van de vulling met granulair materiaal, buiten de capaciteit van de golfgoot.

Ondanks dat in de figuren de stabiliteit van de blokken als functie van twee dimensieloze parameters wordt gegeven, is het niet zonder meer toegestaan de gevonden resultaten te extrapoleren naar gebieden die duidelijk ver naast het in de figuren gegeven meetgebied liggen, zoals bijvoorbeeld een andere taludhelling.

De oorzaak hiervan is dat de parameters $H/\Delta d$ en ξ maar zeer ten dele het bezwijkmechanisme karakteriseren. Enige voorzichtigheid bij het toepassen van de resultaten van de Deltagootproeven is dus geboden.

Voor Nederlandse estuaria (zonder deining) geldt veelal dat de golfsteilheid H_s/L_o varieert tussen 0,035 en 0,065. Nemen we als gemiddelde voor H_s/L_o de waarde 0,05 dan worden de ξ -waarden sterk begrensd:

$$\begin{aligned}\alpha = 1 : 3 - \xi &= 1,5 \\ \alpha = 1 : 4 - \xi &= 1,1 \\ \alpha = 1 : 5 - \xi &= 0,9 \\ \alpha = 1 : 6 - \xi &= 0,75\end{aligned}$$

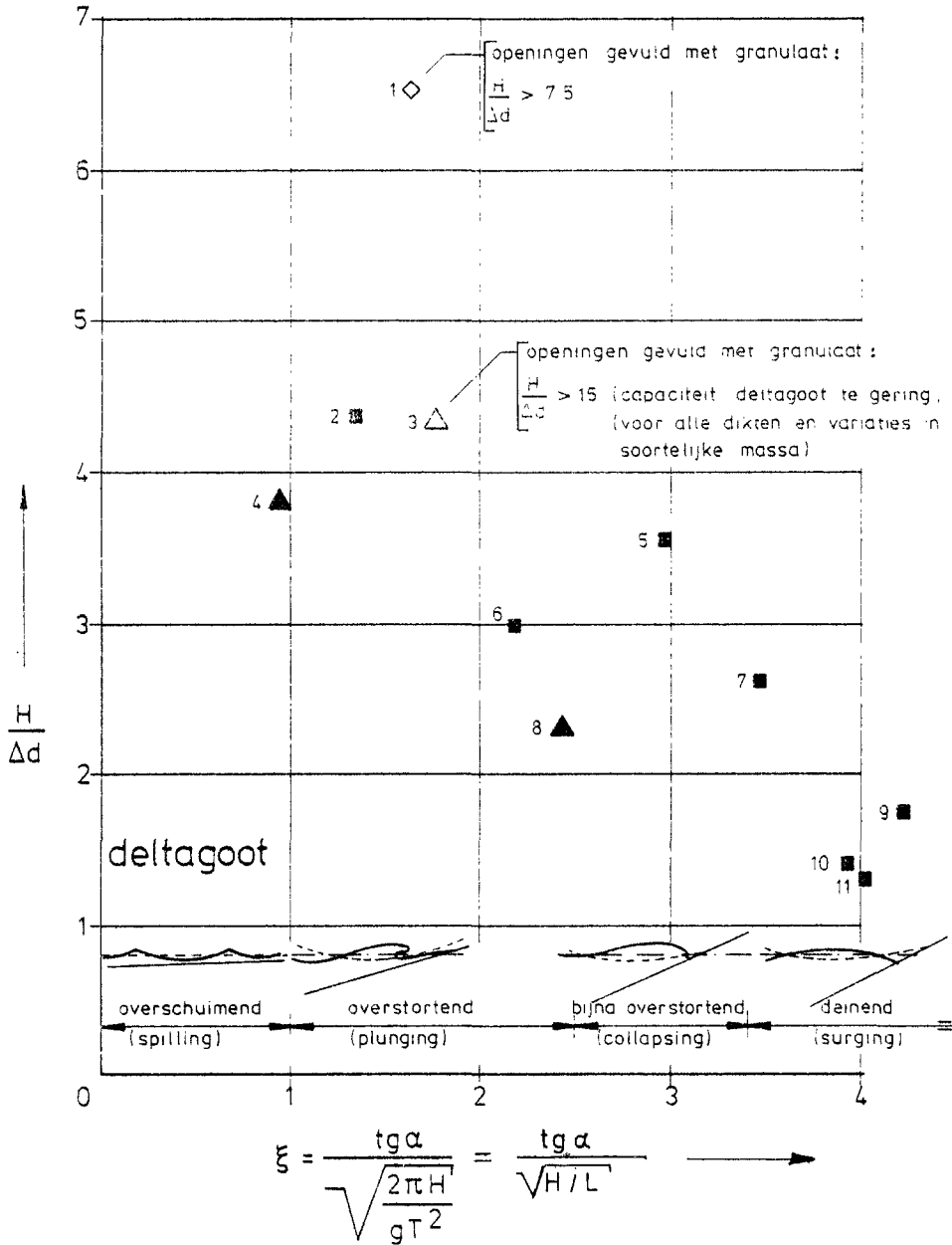
Bij deze ξ -waarden geeft figuur 13.6. voor losliggende blokken op een filterlaag geen lagere waarden voor $\frac{H}{\Delta d}$ dan 3.














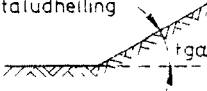
Dit mag wel als een ondergrens worden gezien.

Voor losliggende blokken op klei kan een waarde voor $\frac{H}{\Delta d}$ van ruim 5 worden aangehouden.

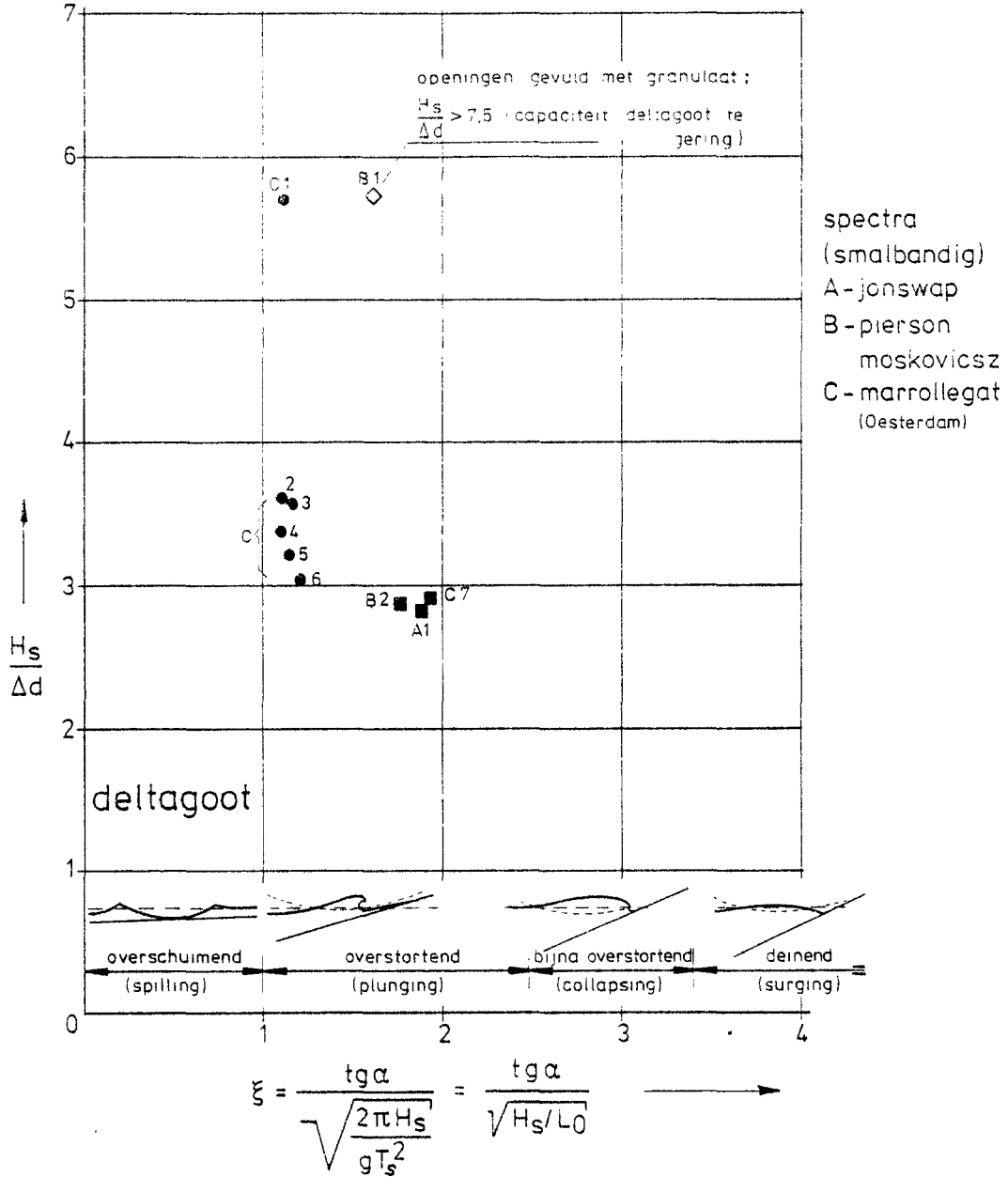
Voor systemen die een grote en betrouwbare interlock bezitten worden hogere waarden gevonden. Het gedrag van de onderlaag kan echter een beperkende factor vormen.

figuur 13.5.:
 stabiliteitsgetallen blokkenbekleding op filter
 regelmatige golven



1  ARMORFLEX 3,33 x 0,30 d = 0,115 tgα = 1/3 T = 4s niet ingewassen	4   0,25 x 0,25 d = 0,10 tgα = 1/4 T = 3s	7  zie 2 T = 6s	10  zie 2 T = 5s
2   0,25 x 0,25 d = 0,15 tgα = 1/3 T = 3s	5  zie 2 T = 6s	8  zie 4 T = 6s	11  zie 2 T = 5s
3  BASALTON PRISMA'S tgα = 1/3 T = 4,4s niet ingewassen	6  zie 2 T = 4s	9  zie 2 T = 6s	 taludheiling tgα

figuur 13.6.:
 stabiliteitsgetallen blokkenbekleding
 onregelmatige golven



<p>A1 0,25x0,25 tgα = 1/3 d = 0,15 T_s = 3s</p>	<p>C1 0,25x0,25 op klei d = 0,10 T_s = 4s</p>	<p>C4 0,25x0,25 d = 0,15 T_s = 4s</p>	<p>C7 zie A1</p>
<p>B1 0,33x0,30 ARMORFLEX NIET INGE- MASSEN d = 0,15 T_s = 3,75s tgα = 1/3</p>	<p>C2 0,25x0,25 4,5% d = 0,10 T_s = 3,5s</p>	<p>C5 0,25x0,25 4% d = 0,10 T_s = 3,5s</p>	<p>taludvorm (Oesterdam) ● C-spectrum</p>
<p>B2 zie A1</p>	<p>C3 0,25x0,25 d = 0,10 T_s = 3,5s</p>	<p>C6 0,25x0,25 d = 0,10 T_s = 3,5s</p>	

Hoofdstuk 14 - VEILIGHEIDSBESCHOUWINGEN

14.1. Algemeen

Het is bij belastingen en sterkteparameters in het algemeen niet mogelijk van te voren aan te geven welke precieze waarden zij in een constructie zullen aannemen. Belastingen en sterkte van de constructie blijken in de praktijk aan spreiding onderhevig te zijn, waardoor zij als stochastische grootheden moeten worden opgevat.

Onder een stochastische grootheid wordt een grootheid verstaan die niet door een enkele waarde is gekenmerkt, maar met behulp van statistische parameters beschreven wordt.

De tegenhanger van de stochastische grootheid is de deterministische grootheid. Dit is een grootheid waarvan de waarde met zekerheid bekend is. In de praktijk komen de deterministische grootheden in de vorm van belastingen en sterkten niet voor.

Soms is de spreiding die optreedt evenwel zo gering, dat het verantwoord is de betreffende grootheid als een deterministische grootheid op te vatten. Evenals belastingen en sterkten zijn ook afmetingen van constructies stochastisch.

De ervaring leert echter wel dat de meeste bezwijkgevallen niet worden veroorzaakt door stochastische variaties in sterkte en/of belasting, maar door gebreken in de constructie en door menselijke fouten. Hierbij valt te denken aan rekenfouten in de sterkteberekening of, een nog groter gevaar, is het over het hoofd zien van een maatgevend bezwijkmechanisme.

Ook in de bouwfase komen veel bezwijkgevallen voor, terwijl uitvoeringsfouten in het algemeen een bron van mogelijk bezwijken van de constructie vormen.

Ook verwaarlozing van noodzakelijke inspectie en onderhoud kan ernstige gevolgen hebben.

Het hierna volgende is slechts bedoeld om de filosofie en mogelijkheden van enige vrij recent ontwikkelde methoden naar voren te brengen, terwijl tenslotte iets wordt gezegd over het aan te houden veiligheidsniveau.

14.2. Beschrijving probabilistische methoden

Zijn de kansverdelingen van belasting en sterkte bekend, dan kan de bijdrage in de kans op bezwijken door een overschrijding van de sterkte worden bepaald, uitgedrukt in:

$$Z = R - S \quad [14.1.]$$

waarin:

Z = de betrouwbaarheidsfunctie

R = de sterkte van de constructie (resistance)

S = de belasting op de constructie (solicitation).

Teneinde een aan zijn doel beantwoordende constructie te verkrijgen moet Z groter dan nul zijn, er treedt dan geen bezwijken op.

Op hun beurt zullen de sterkte R en de belasting S in het algemeen weer functies zijn van andere variabelen.

De betrouwbaarheidsfunctie is daarmee te noteren als:

$$Z = R (X_1 \dots X_k) - S (X_{k+1} \dots X_n) \quad [14.2.]$$

Het is gebruikelijk de variabelen $X_1 \dots X_n$ uit de betrouwbaarheidsfunctie aan te duiden met de term "basisvariabelen".

Opgemerkt wordt, dat de betrouwbaarheidsfunctie Z niet in enige zin als een formule hoeft te worden opgevat; Z mag ook uit een complex rekenmodel voortkomen, zoals een computerprogramma.

Bij dijkbekledingen is niet op voorhand bekend welke de maatgevende toestand is, dat wil zeggen waterstand, golfhoogte, golfsteilheid enzovoort.

Wordt naar de bezwijkkans van de bekleding gekeken dan zijn vaak niet de bij de meest extreme waterstanden behorende golven (superstorm) maatgevend, maar golven bij een lagere waterstand. De reden hiervoor is dat ondanks de minder hevige golfaanval op dit lagere niveau de kans van voorkomen van zo'n storm groter is dan op een hoog niveau. Dit aspect komt alleen goed naar voren met behulp van een probabilistische berekening, waarbij belasting en sterkte als een onlosmakelijk geheel worden beschouwd.

Bij het ontwerpen van dijken is door de Deltacommissie, zie literatuur 29, ook een stochastisch element ingebracht, maar is uit praktische overwegingen teruggekeerd tot het aangeven van slechts de overschrijdingskans van de belasting.

De primaire waterkeringen dienen volgens de Deltacommissie zo ontworpen te worden, dat zij een stormvloed met een zekere overschrijdingskans volledig kunnen weerstaan. In de praktijk ontwerpt men de dijk vaak zo, dat afgezien van verborgen veiligheden, de gemiddelde sterkte juist de ontwerpbelasting evenaart. Dit betekent echter dat er 50% kans is dat de dijk bezwijkt tijdens de ontwerp stormvloed. Hetgeen niet in overeenstemming is met de eis van de Deltacommissie.

Figuur 14.1. geeft schematisch de aanpak volgens de huidige betonvoorschriften, waarbij ook de kansverdeling van de sterkte wordt beschouwd.

Met behulp van een centrale veiligheidscoëfficiënt wordt voldoende afstand tussen de kansdichtheden van belasting (S) en sterkte (R) geschapen.

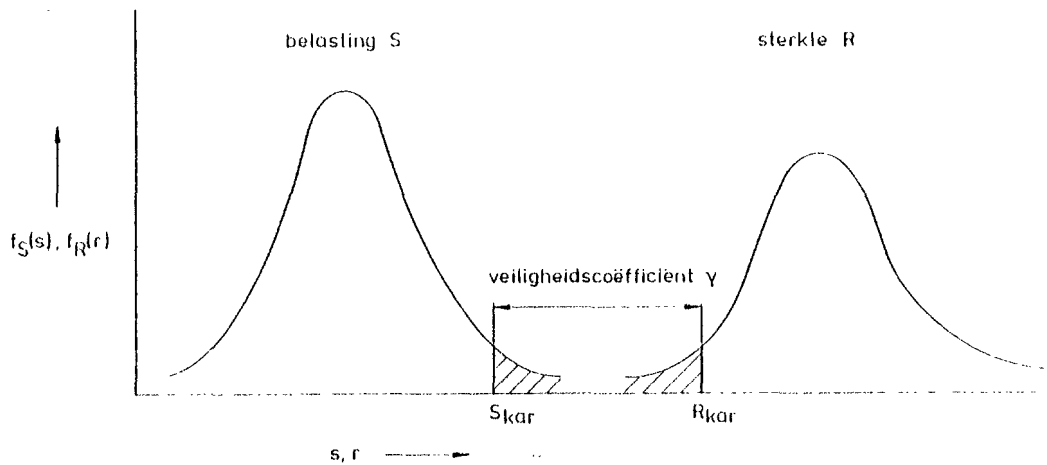


Fig. 14.1.: De dimensionering van een constructie volgens VB 1974
(niveau I)

De kern van de veiligheidsbeschouwing wordt gevormd door de zogenoemde probabilistische berekening.

Globaal gesproken wordt met een probabilistische berekening bedoeld de bepaling van de bezwijkkans uitgaande van onzekerheden in de optredende belastingen en in de sterkte van de constructie.

Een probabilistische berekening waarbij die onzekerheden op zuiver formele wijze worden verwerkt, leidt al gauw tot gecompliceerde of onoplosbare wiskundige formuleringen voor de kans op bezwijken.

Daarom is in de loop der tijd een aantal vereenvoudigingen ingevoerd, die betrekking hebben op de wijze waarop onzekerheden worden verwerkt.

Ter ordening van de verschillende mogelijke procedures wordt een viertal niveaus van de berekening onderscheiden, die variëren van volledig deterministisch tot volledig probabilistisch.

Deze niveaus zijn:

- niveau 0: een deterministische berekening. Voor de belasting en de sterkte worden bepaalde vaste waarden genomen en het rekenmodel wordt als vaststaand beschouwd.
Door middel van één algehele veiligheidscoëfficiënt worden alle onzekerheden in rekening gebracht.
- niveau I: een semi-probabilistische berekening. Voor de belasting en de sterkte wordt uitgegaan van karakteristieke waarden.
Door middel van partiële veiligheidscoëfficiënten - dat wil zeggen coëfficiënten die betrokken zijn op afzonderlijke grootheden - worden de resterende onzekerheden in rekening gebracht.
- niveau II: een probabilistische berekening waarin welomschreven vereenvoudigingen zijn aangebracht in de verwerking van de stochastische grootheden; hiervoor bestaan verschillende methoden.
- niveau III: een volledig probabilistische berekening.
De berekening is geheel gebaseerd op de leer van de stochastiek.

In wezen zijn de berekeningen op niveau 0 en I niet probabilistisch omdat het resultaat van de berekening geen bezwijkkans is.
De waarden van de veiligheidscoëfficiënten kunnen voor standaardproblemen evenwel worden afgeleid met een berekening op niveau II of III.
Impliciet kan daarmee een berekening op niveau 0 of I betrekking hebben op een bepaalde bezwijkkans.

De beschouwingen zullen hier wegens de praktische mogelijkheden verder worden beperkt tot probabilistische berekeningen op niveau II.

De vereenvoudigingen die bij de berekeningen op niveau II worden doorgevoerd zijn er allereerst op gericht een gecompliceerde betrouwbaarheidsfunctie terug te brengen tot een lineaire functie.

Vervolgens wordt de verdeling van de betrouwbaarheidsfunctie benaderd door een vervangende normale verdeling, waarvan het gemiddelde en de standaardafwijking uit de overeenkomstige parameters van de basisvariabelen worden afgeleid.

Het aanbrengen van de vereenvoudigingen in de betrouwbaarheidsfunctie kan op verschillende wijzen; in de praktijk worden hoofdzakelijk twee methoden toegepast:

- a. de "mean value" benadering
- b. de "advanced" benadering.

ad a.

Bij deze methode wordt de betrouwbaarheidsfunctie Z , voor het gemiddelde van de diverse basisvariabelen, in een reeks ontwikkeld die na de lineaire termen wordt afgebroken.

Het lineariseren in het gemiddelde houdt in het algemeen in dat wordt gelineariseerd in een punt dat niet op de bezwijkgrens $Z = 0$ ligt.

Verder blijkt de methode niet ongevoelig voor de wijze waarop de betrouwbaarheidsfunctie Z is geformuleerd.

Daartegenover staat evenwel dat de "mean value" berekening betrekkelijk eenvoudig is en in veel gevallen zelfs nog geheel met de hand kan worden uitgevoerd.

Er zijn meer ingewikkelde iteratieve berekeningen nodig, zoals bij de hierna volgende "advanced" methode om een beter ontwerp punt te vinden.

ad b.

Teneinde aan de genoemde bezwaren tegen de mean value benadering tegemoet te komen, zijn verbeterde betrouwbaarheidsanalyses op niveau II uitgewerkt. Bij de advanced benadering betreft de verbetering de keuze van het ontwerp punt.

Het lineariseren vindt niet meer plaats in het gemiddelde maar in een punt op de bezwijkgrens.

Op de bezwijkgrens wordt het ontwerp punt verder zodanig gekozen dat de waarschijnlijkheid van optreden van die waarde van Z zo groot mogelijk is. Bij van de normale verdeling afwijkende basisvariabelen wordt ervoor gezorgd dat de vervangende normale verdeling dezelfde kansdichtheid en overschrijdingskans bezit.

Het definitieve ontwerp punt wordt op een iteratieve wijze gevonden.

Een gevolg van het iteratieproces is dat de berekening in het algemeen niet meer met de hand kan worden uitgevoerd.

14.3. Belasting en sterkte

Van de basisvariabelen, die tezamen van belang zijn voor het formuleren van de betrouwbaarheidsfunctie Z, dienen kansverdelingsfuncties en onderlinge relaties bekend te zijn. In dit verband te denken aan:

- a. kansverdeling hoogwaterstand
- b. relatie golfhoogte-hoogwaterstand
- c. kansverdeling golfsteilheid
- d. golfbrekingscriterium voor golfbreking op het voorland
- e. model voor de beschrijving van de stabiliteit van de gezette bekleding
- f. kansverdeling van de diverse parameters die de sterkte van de bekleding bepalen, zoals taludhelling, dikte blokken en verklemming.

In het rapport "Achtergronden bij de leidraad cementbetonnen dijkbekledingen" is de aanzet gegeven tot een rekenmodel waarin de punten a. t/m f. zijn opgenomen. Aan de hand van een aantal rekenvoorbeelden worden daar de mogelijkheden van een probabilistische aanpak geïllustreerd.

Bij een probabilistische berekening wordt naast de bezwijkkans het ontwerppunt berekend. In het ontwerppunt is een zodanige combinatie van basisvariabelen aanwezig, dat de kans dat de betrouwbaarheidsfunctie Z kleiner dan nul wordt, zo groot mogelijk is.

Dus naast de bezwijkkans wordt onder andere informatie verkregen over de waterstand waarbij de kans op bezwijken het grootst is. Dit houdt in dat bij andere waterstanden de bekleding veiliger is.

Ook wordt informatie verkregen over de bijdrage van elke basisvariabele in de variantie van de betrouwbaarheidsfunctie Z . Hierdoor kan worden ingeschat hoe gevoelig de precieze waarden voor de kansverdeling van de betreffende stochast op de einduitkomst zijn.

Door de invoering van een golfbrekingscriterium is het mogelijk de gunstige invloed van golfbreking op een hoog voorland op de stabiliteit nader te kwantificeren.

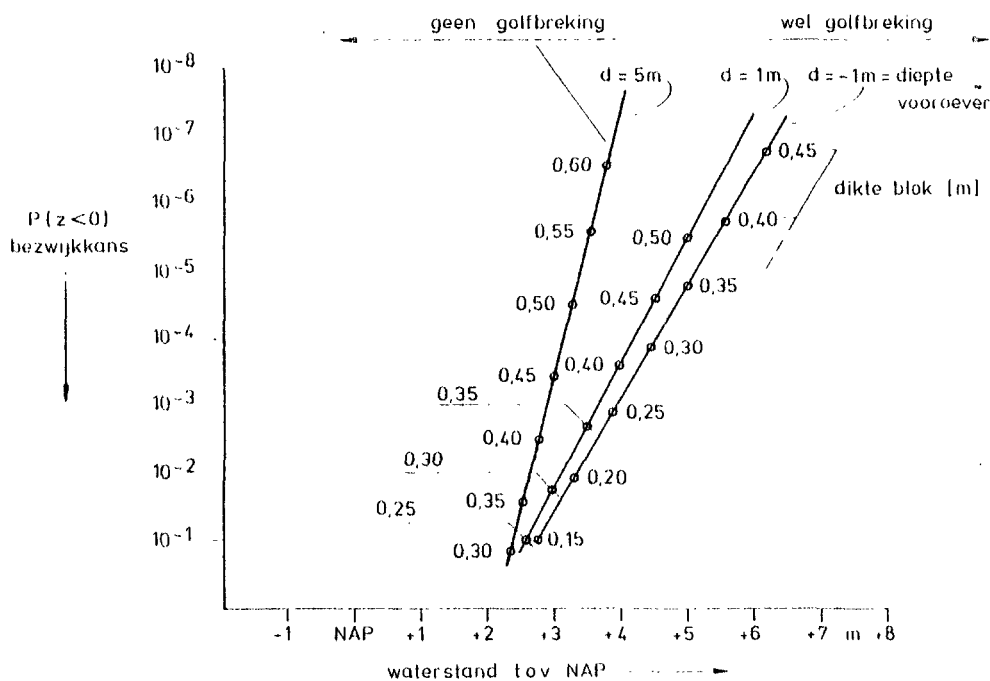


Fig. 14.2.: Voorbeeld van de resultaten van een probabilistische berekening

Ter illustratie zijn in figuur 14.2. enkele resultaten gegeven van een computerberekening volgens de "advanced" benadering, ontleend aan het hiervoor genoemde rapport. Op de verticale as is de bezwijkkans gegeven en horizontaal is de waterstand uitgezet, waarbij de bezwijkkans het grootst is. De lijnen in de figuur zijn ontstaan door variatie in de dikte van de bekleding en de diepte van de vooroever.

Uit de figuur blijkt de invloed van de golfbreking op een hooggelegen voorland op de plaats van de schade en de veiligheid tegen bezwijken. De grens tussen golfbreking en geen golfbreking op een voorland wordt beïnvloed door de waterstand en de golfhoogte. Tussen de waterstand en de golfhoogte bestaat een zeker verband: bij een hogere waterstand behoort een grotere golfhoogte. Een en ander heeft tot gevolg dat alleen gebieden van golfbreking en geen golfbreking aangegeven kunnen worden; de exacte grens is niet aan te duiden.

14.4. Veiligheidsniveau

Teneinde de zwaarte van de bekleding op een probabilistische wijze te kunnen berekenen moet de te accepteren bezwijkkans vastgesteld zijn. Tussen de dagelijkse praktijk van de dijkbouw en de in het Deltarapport neergelegde ontwerpfilosofie bestaat soms wat de bekledingen betreft een discrepantie.

De praktijk ontwerpt soms vanuit de ervaring, dat wil zeggen onder gebruiksomstandigheden.

Het Deltarapport daarentegen gaat uit van een ontwerpstorm die buiten het ervaringsgebied ligt. Tussen beide methoden gaapt een vrij brede kloof.

Op lagere niveaus worden in de praktijk af en toe schadegevallen aangetroffen, zeg een kans van bezwijken in de grootte-orde van 10^{-2} .

Laat men deze vrij grote bezwijkkans voor het gehele talud gelden dan zou dit inhouden dat de bekleding aanzienlijk minder ver naar boven doorgetrokken zou behoeven te worden dan thans gebruikelijk is.

Immers, de voorwaardelijke kans van optreden van een waterstand op de hogere niveaus is kleiner dan 10^{-2} .

De Deltacommissie geeft echter voor de berekening van de kruinhoogte een ontwerpwaterstand met een overschrijdingskans van 10^{-4} . Bij deze waterstand moet de dijk nog volledig als waterkering blijven functioneren.

Tussen het oplichten van een blok op dit hoge niveau en het bezwijken van de dijk zit nog het mechanisme van voortschrijdende ontgroning van de tussen- en onderlagen en de rest van het dijklichaam.

Het is niet bekend welke veiligheid dit extra geeft.

Uitgangspunt zal echter moeten zijn dat de bekleding bij een waterstand met een overschrijdingskans van 10^{-4} toch een zekere reserve aan sterkte moet bezitten. De geaccepteerde totale bezwijkkans bij het peil van de superstorm volgens het Deltarapport komt dan in een grootte-orde te liggen die kleiner dan 10^{-4} is.

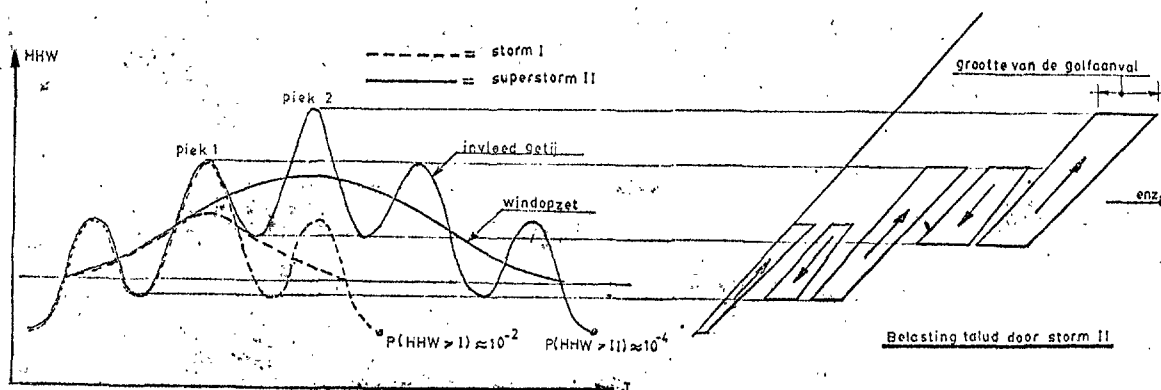


Fig. 14.4. : Waterstanden en golfaanval

In figuur 14.4. is als illustratie het verloop van de waterstand gegeven van twee stormen (I en II); afgezien is van faseverschuivingen tussen getij en windopzet.

Storm II duurt langer, bereikt een hoger waterpeil en geeft in zijn maximum grotere golven dan storm I.

Aangenomen wordt dat tot piek 1 de twee stormen volkomen identiek zijn. Storm I heeft natuurlijk een grotere kans van voorkomen dan storm II. Omdat storm I na piek 1 in kracht afneemt en bij deze lage waterstand de dijk wegens de grote breedte een grote restveiligheid bezit, kan wellicht een vrij grote bezwijkkans van de bekleding worden geaccepteerd. Na de storm zou dan het weggeslagen gedeelte van bekleding en dijklichaam hersteld kunnen worden.

Deze redering volgend komt men voor de hogere niveaus op het talud tot lagere te accepteren bezwijkkansen.

Deze redenering is echter niet juist.

Bij het optreden van storm II heeft men niet de tijd de schade bij piek 1 te herstellen. Het gevolg is dat deze storm de taludbekleding als het ware van onderen oprolt, waardoor het gevaar bestaat dat door snelle ontgroning de bekleding hoger op het talud wordt ondermijnd. Dit kan niet worden geaccepteerd.

De op lager niveau optredende schade zal tot gevolg hebben dat ook op hogere niveaus schade zal optreden, hoe veilig deze delen ook zijn geconstrueerd. De ketting is zo sterk als zijn zwakste schakel.

Geconcludeerd moet daarom worden dat op elk hoogteniveau dezelfde bezwijkkans van een grootte-orde kleiner dan 10^{-4} moet worden aangehouden. De consequentie is wel dat in Nederland zelden of nooit ernstige schaden aan bekleding en onderlaag zouden mogen worden geconstateerd.

Hoofdstuk 15 - SAMENVATTING

De leidraad is gericht op de direct bij het ontwerp en beheer van dijken betrokken technici.

Het is niet bedoeld als wetenschappelijk werk, waarin theoretische grondslagen uitputtend worden behandeld. Er is zoveel mogelijk naar gestreefd achtergrondinformatie te leveren zonder voor elk mogelijk probleem een oplossing te geven.

Voor diepergaande beschouwingen wordt verwezen naar het rapport "Achtergronden bij de leidraad cementbetonnen dijkbekleding".

Gezien de toepassing in Nederland worden de beschouwingen beperkt tot het type bekleding, dat is opgebouwd uit elementen van kleinere omvang.

Nadat in het eerste deel van deze eeuw veelvuldig in het werk is gestort met het toen nog nieuwe materiaal beton, waarbij de ervaringen niet altijd even gunstig waren, ging men daarna meer en meer over tot het toepassen van prefabbetonelementen (hoofdstuk 1).

Deze prefabelementen werden aanvankelijk met de hand gefabriceerd en op het talud gezet. De diversiteit in vormgeving van de elementen was groot.

Daarna deed de mechanisatie in het fabricageproces haar intrede, waarna ook het verwerken van de elementen voor een groot deel werd gemechaniseerd.

Gelijk oplopend met deze ontwikkeling werd de vormgeving van de elementen minder complex en divers.

Voor de bekleding op een waterkering worden eisen geformuleerd vanuit de doelstelling van de bekleding, vanuit de uitvoeringstechnische kant en vanuit mogelijke bijzondere omstandigheden (hoofdstuk 2).

In samenhang met de eigenschappen van het element en de onderlaag worden verschillende typen bekleding onderscheiden (hoofdstuk 3).

De materiaaltechnologische aspecten van het materiaal beton in een maritiem milieu komen slechts beknopt aan de orde, omdat op dit gebied uitvoerige, voor iedereen toegankelijke, literatuur, alsmede voorschriften bestaan (hoofdstuk 4).

Omdat het voor de stabiliteit van de bekleding onder golfaanval en het duurzaam blijven functioneren van de constructie belangrijk is, worden eisen aan de onderlagen gesteld (hoofdstuk 5).

Hierbij wordt een onderscheid gemaakt tussen doorlatende en ondoorlatende onderlagen. Uit onderzoek bij het Waterloopkundig Laboratorium blijkt dat een ondoorlatende laag (klei) de bekleding een grotere stabiliteit onder golfaanval geeft dan een doorlatende.

Teneinde van deze hogere stabiliteit blijvend voordeel te hebben, dienen eisen te worden gesteld aan de verwerking en materiaaleigenschappen van de klei en kunnen de omstandigheden beperkingen opleggen aan de toepasbaarheid.

Aangegeven wordt welke materialen voor een doorlatende onderlaag in aanmerking komen en welke eisen hieraan moeten worden gesteld, in het bijzonder met het oog op het indringen van materiaal uit de ondergrond in het filtermateriaal.

De golfaanval, welke in hoge mate bepalend is voor de stabiliteit van de bekleding, heeft op elk niveau op het talud een andere frequentie van voorkomen en verschilt in grootte. Dit is afhankelijk van het type dijk, zoals zee- en meerdijk, en van vele andere factoren. Door het definiëren van belastingzônes wordt het een en ander verduidelijkt (hoofdstuk 6).

De vorm van het profiel van de dijk heeft invloed op het type element dat voor toepassing in aanmerking komt (hoofdstuk 7).

De ervaring van veel beheerders is, dat bij de overgang van het ene naar het andere type bekleding en bij beëindigingen van de bekleding veel schade optreedt. Hewel het niet doenlijk is standaardoplossingen te geven kunnen wel duidelijke fouten worden blootgelegd. Achtereenvolgens worden de teenconstructie, de bovenbegrenzing van de harde bekleding en de overgang naar een andere bekleding behandeld (hoofdstuk 8).

In de daarop volgende hoofdstukken wordt ingegaan op de uitvoering (hoofdstuk 9) en op beheer en onderhoud (hoofdstuk 10).

Daarna wordt ingegaan op belasting en sterkte van de constructie. Allereerst worden de hydraulische randvoorwaarden, zoals golfkarakteristieken, golfvelden, golfvervormingen (waaronder golfbreking) behandeld (hoofdstuk 11), en vervolgens bijzondere belastingen vermeld (hoofdstuk 12).

Als tussentijds resultaat van nog lopend lange termijn onderzoek worden gegevens betreffende de stabiliteit van de gezette bekleding vermeld (hoofdstuk 13).

Enerzijds worden resultaten van theoretische modelvorming gegeven en anderzijds resultaten van recent onderzoek in een grote golfgoot (lengteschaal 1 : 2).

Hoewel het wegens de complexiteit van de materie nog niet zo ver is, dat een eenvoudig hanteerbaar rekenmodel ter beschikking staat voor diverse soorten bekleding en ondergrond, is het met behulp van de uit het empirisch onderzoek verkregen gegevens wel mogelijk globaal de dikte van een van de gegeven typen bekleding te bepalen.

Zowel de grootte en de plaats van de belasting op de bekleding als de sterkte van een dijkbekleding zijn aan spreiding onderhevig.

Bepaalde waarden hebben een zekere kans te worden overschreden dan wel onderschreden. Aan de hand hiervan wordt een veiligheidsbeschouwing gegeven (hoofdstuk 14).

Aangegeven wordt wat een mogelijke aanpak zou kunnen zijn om meer inzicht te verkrijgen in de werkelijke veiligheid van een cementbetonnen dijkbekleding. Voor het aan te houden veiligheidsniveau wordt, in aansluiting op het werk van de Deltacommissie, een grootte-orde gegeven.

LITERATUUR

Hieronder is een beknopt overzicht gegeven van literatuurbronnen waarin dieper op bepaalde in de leidraad aangesneden zaken wordt ingegaan.

Algemene dijkbouw

1. Kley van der, J.;, Zuidweg, H.J.
Polders en dijken
Agon Elsevier Amsterdam/Brussel, 1969
2. Agema, J.F.
Collegedictaat waterkeringen, f3/f11
Technische Hogeschool Delft
3. Die Küste
Archiv für Forschung und Technik an der Nord- und Ostsee
Heft 36 - 1981
Herausgeber: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen.
4. Bekker, M.E., Boer de, J., Jong de, J.
Kust- en Oeverwerken
Stam Technische Boeken, 1974

Geschiedenis

5. Olijn, P.J;
Zee- en rivierwerken
N.V. Uitgeversmaatschappij, voorheen van Mantgem & De Does, 1921
6. Muralt de, R.R.L;
Dijk- en oeverwerken van gewapend beton volgens het "Systeem de Muralt".
Technische Boekhandel en Drukkerij J. Waltman Jr., Delft, 1913

Betontechnologie

7. NEN 3861
Voorschriften Beton, VB 1974
Deel A, gemeenschappelijk gedeelte
Nederlands Normalisatie Instituut

8. NEN 7024
Glooiñgelementen van beton
Nederlands Normalisatie Instituut

9. CUR-rapport 22
Weerbestendigheid van beton
Uitgave: Betonvereniging

10. CUR-rapport 64
Vorstbestendigheid van beton
Uitgave: Betonvereniging

11. CUR-rapport 90
Reparaties van betonconstructies
Uitgave: Betonvereniging

12. CUR/VB-rapport 96
Beton en afvalwater
Uitgave: Betonvereniging

13. CUR/VB-rapport 99
Erosie van beton
Uitgave: Betonvereniging

14. CUR/VB-rapport 100
Duurzaamheid maritieme constructies
Uitgave: Betonvereniging

Materiaaleigenschappen in verband met onderlagen

15. Kust- en oeverwerken, in praktijk en theorie
Nederlandse Vereniging Kust- en Oeverwerken, 1979
16. Kunststoffen en oeverbescherming
Uitgegeven onder auspiciën van de Nederlandse Vereniging Kust-
en Oeverwerken
Stam Technische Boeken, 1975
17. Kunststoffilters in Kust- en Oeverwerken
Nederlandse Vereniging Kust- en Oeverwerken, 1983
18. Grauw de, A.F.F., Koenders, M.A.
Stand van zaken bij het onderzoek naar granulaire filters
Waterloopkundig Laboratorium en Laboratorium voor Grondmechanica
Nota S 469, Delft, 1980
19. Iaan, G.J.
De toepasbaarheid van mijnsteen in de waterbouw
WKE-R-78156
Rijkswaterstaat
Deltadienst, werkgroep keuring bouwstoffen voor de waterbouw,
1980
20. Interimrapport "Klei onder steenzettingen voor Oesterdam en
Philipsdam"
Werkgroep klei
Deltadienst, Rijkswaterstaat, 1984

Hydraulische randvoorwaarden

21. Shore protection manual
Volumes I, II and III
U. S. Army Coastal Engineering Research Center, 1977

22. Battjes, J.A.
Golfoploop en golfoverslag
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen
's Gravenhage, 1972

23. Over het berekenen van Deltaprofielen voor dijken langs de
Westerschelde
Rijkswaterstaat
Publicatie van de Directie Zeeland
Studiedienst Vlissingen, 1972

24. Groen, P., Dorrestein, R.
Zeegolven
Staatdrukkerij 's Gravenhage, 1976

Stabiliteit gezette bekleding

25. Waterloopkundig Laboratorium en Laboratorium voor Grondmechanica
Taludbekleding van gezette steen
Deel I t/m XV
M 1795/M 1881

26. Waterloopkundig Laboratorium en Laboratorium voor Grondmechanica
Stabiliteit Armorflex - steenzetting onder golfaanval
Verslag modelonderzoek, M 1910, 1983

27. Waterloopkundig Laboratorium en Laboratorium voor Grondmechanica
Basalton
Stabiliteit onder golfaanval
Verslag modelonderzoek, M 1900, 1983

28. Waterloopkundig Laboratorium
Gobi-blokken als taludbekleding, M 1184, 1973

Veiligheid

29. Rapporten Deltacommissie
Deel 1 t/m 6
Staatsdrukkerij en Uitgeverijbedrijf, 's Gravenhage

30. Vrouwenvelder, A.C.W.M., Wrijling, J.K.
Collegedictaat b3, Probabilistische ontwerpen
Afdeling der Civiele Techniek
Technische Hogeschool Delft

31. CUR/VB-rapport 109
Veiligheid van bouwconstructies, een probabilistische benadering
Uitgave: Betonvereniging.

Achtergronden

bij de leidraad

Cementbetonnen Dijkbekledingen

Inhoud

V o o r w o o r d

Hoofdstuk 1 - Voorbeelden van mogelijke constructiewijzen

- 1.1. Inleiding
- 1.2. Blokvormige elementen
 - 1.2.1. Verband loodrecht op de teen
 - 1.2.2. Verband loodrecht op en evenwijdig aan de teen
 - 1.2.3. Verband loodrecht op het vlak van het talud en loodrecht op de teen
 - 1.2.4. Verband loodrecht op het vlak van het talud, loodrecht op en evenwijdig aan de teen
 - 1.2.5. Doorgroeistenen
- 1.3. Plaatvormige elementen
 - 1.3.1. Gewapend beton
 - 1.3.2. Voorgespannen beton
- 1.4. Ononderbroken plaatvorm

Inhoud (vervolg)

Hoofdstuk 2 - Beslissingssysteem tussen alternatieve oplossingen

- 2.1. Inleiding
- 2.2. Beschrijving van de werkwijze
 - 2.2.1. Keuze van de algemene beoordelingscriteria en sub-criteria
 - 2.2.2. Bepaling van de waarderingsfactoren voor de algemene criteria
 - 2.2.3. Bepaling van de waarderingsfactoren voor de sub-criteria
 - 2.2.4. Keuze van alternatieve oplossingen
 - 2.2.5. Toetsing van de diverse alternatieven aan de criteria
 - 2.2.6. Interpretatie
- 2.3. Opmerkingen bij het gebruik van de methode op het gebied van de waterkeringen
 - 2.3.1. Keuze van de algemene beoordelingscriteria en sub-criteria
 - 2.3.2. Bepaling van de waarderingsfactoren voor de algemene criteria
 - 2.3.3. Bepaling van de waarderingsfactoren voor de sub-criteria
 - 2.3.4. Keuze van alternatieve oplossingen

Inhoud (vervolg)

Hoofdstuk 3 - Het gedrag van beton

- 3.1. Inleiding
- 3.2. Eigenschappen van betonspecie en verhard beton
- 3.3. Fysische aantasting
 - 3.3.1. Vorstbestendigheid
 - 3.3.2. Temperatuurwisselingen
 - 3.3.3. Vochtinwerking
 - 3.3.4. Aangroeiingen
- 3.4. Mechanische aantasting
 - 3.4.1. Scheurvorming door belasting
 - 3.4.2. Erosie
- 3.5. Chemische aantasting
 - 3.5.1. Regenwater
 - 3.5.2. Zeewater
 - 3.5.3. Andere agressieve stoffen
 - 3.5.4. Corrosie wapening
- 3.6. Algemene conclusies

Appendix

Literatuur

Inhoud (vervolg)

Hoofdstuk 4 - Golfkarakteristieken, golfgroei en waterstanden

- 4.1. Inleiding
- 4.2. Golfkarakteristieken
 - 4.2.1. Individuele golf
 - 4.2.2. Lokale eigenschappen individueel golfveld
 - 4.2.3. Klimatologische verzameling van golfvelden
- 4.3. Golfgroei
 - 4.3.1. Algemeen
 - 4.3.2. Golfvoorspellingsmethoden voor standaard windveld
 - 4.3.3. Golfvoorspellingsmethoden voor variërend windveld
- 4.4. Deining
- 4.5. Waterstanden
 - 4.5.1. Inleiding
 - 4.5.2. Getijden
 - 4.5.3. Windopzet

Literatuur

Inhoud (vervolg)

Hoofdstuk 5 - Golfvervormingen

- 5.1. Inleiding
- 5.2. Refractie
- 5.3. Diffractie
- 5.4. Shoaling
- 5.5. Bodemwrijving
- 5.6. Plaatselijke wind
- 5.7. Stroming
- 5.8. Golfbreking
 - 5.8.1. Breking in diep water
 - 5.8.2. Breking in ondiep water
 - 5.8.3. Breking op een hellend talud
 - 5.8.4. Run-down

Literatuur

Inhoud (vervolg)

Hoofdstuk 6 - Golfoploop

- 6.1. Inleiding
- 6.2. Glad en vlak talud
 - 6.2.1. Algemeen
 - 6.2.2. Regelmatige golven
 - 6.2.3. Onregelmatige golven
- 6.3. Vlak talud voorzien van ruwheidselementen
 - 6.3.1. Algemeen
 - 6.3.2. Regelmatige golven
 - 6.3.3. Onregelmatige golven
- 6.4. Vlak, ruw en doorlatend talud
 - 6.4.1. Algemeen
 - 6.4.2. Regelmatige golven
 - 6.4.3. Onregelmatige golven
- 6.5. Niet vlak, glad talud
 - 6.5.1. Algemeen
 - 6.5.2. Regelmatige golven
 - 6.5.3. Onregelmatige golven
- 6.6. Scheve inval
 - 6.6.1. Regelmatige golven
 - 6.6.2. Onregelmatige golven
 - 6.6.3. Klassieke golfoploopformule
- 6.7. Invloed verruwd talud op de overslag
- 6.8. Invloed van een hoog voorland op de golfoploop
 - 6.8.1. Algemeen
 - 6.8.2. Verandering van het golfbeeld op het voorland
 - 6.8.3. Voorbeelden van resultaten van golfoploop bij een bepaalde configuratie van voorland en talud
 - 6.8.4. Enkele conclusies (vlak en horizontaal voorland)

Literatuur

Inhoud (vervolg)

Hoofdstuk 7 - Sterkte van de bekleding

- 7.1. Inleiding
- 7.2. Stabiliteit losliggende elementen
 - 7.2.1. Stabiliteit onder golfaanval
 - 7.2.2. Stabiliteit onder stationaire stromingscondities
- 7.3. Stabiliteit gezette elementen onder golfaanval
 - 7.3.1. Algemeen
 - 7.3.2. "Black-box" benadering
- 7.4. Mogelijke bezwijkmechanismen
- 7.5. Rekenmodellen
 - 7.5.1. Algemeen
 - 7.5.2. Analytische oplossing voor een bijzonder geval
 - 7.5.3. Numerieke rekenmodellen

Literatuur

Appendix 7.1

Appendix 7.2

Inhoud (vervolg)

Hoofdstuk 8 - Veiligheidsbeschouwingen

- 8.1. Inleiding
- 8.2. Beschrijving probabilistische methoden
- 8.3. Hydraulische randvoorwaarden
 - 8.3.1. De hoogwaterstand
 - 8.3.2. De golfhoogte bij een zekere waterstand
 - 8.3.3. De golfsteilheid
 - 8.3.4. Golfbreking voor de dijk
- 8.4. De bekleding
- 8.5. Rekenvoorbeelden
- 8.6. Veiligheidsniveau

Literatuur

Appendix 8.1.

Appendix 8.2.

Voorwoord

Op initiatief van de Contactgroep "Natte Waterbouw", waarin zijn vertegenwoordigd de Nederlandse Cementindustrie, Rijkswaterstaat, de T.H.-Delft en de Landbouw Hogeschool te Wageningen, is besloten in een samenwerkingsverband van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), met als werkorgaan het Centrum voor Onderzoek Waterkeringen (COW), en de Stichting voor onderzoek, voorschriften en kwaliteitseisen op het gebied van beton (CUR-VB) een studie aan te vatten op het gebied van cementbetonnen dijkbekledingen.

Hiertoe is een studietoelating opgericht die in TAW-verband door werkgroep 4 is ingesteld en wordt aangeduid als werkgroep 4B en in CUR-VB-verband als onderzoekcommissie C45.

De commissie had als taakstelling het schrijven van een leidraad betreffende ontwerp, uitvoering, beheer en onderhoud van cementbetonnen dijkbekledingen.

De redenen voor de studie waren onder meer:

- er zijn nog geen eisen ten aanzien van deze constructies geformuleerd;
- de toepassingsmogelijkheden worden bepaald door hetgeen de fabrikanten als systemen op de markt brengen, alleen ervaren beheerders terzake kunnen een oordeel vellen over de toepasbaarheid van deze systemen;
- de bestaande leemten in kennis kunnen leiden tot over- en/of onderdimensioneren;
- de cementbetonnen bekledingen kunnen in de toekomst qua kosten aantrekkelijker worden ten opzichte van asfaltbekledingen en vooral natuursteen en zullen daardoor dan meer worden toegepast.

De werkzaamheden hebben geresulteerd in een leidraad en in het onderhavige rapport. In de leidraad wordt op een beschrijvende wijze een opsomming gegeven van uitgangspunten waaraan een ontwerp voor een cementbetonnen dijkbekleding moet voldoen. Hierbij worden de theoretische grondslagen niet uitputtend behandeld. Het tweede deel gaat daarentegen meer in op de achtergronden van de in het eerste deel aangesneden onderwerpen.

Het rapport is samengesteld op basis van literatuurstudie en onderzoek zoals uitgevoerd in het kader van de realisering van de leidraad. Vaak betreft dit zaken die ook elders in de literatuur wel te vinden zijn. Het leek de commissie echter zeer zinvol alle verzamelde informatie te bundelen in één rapport toegespitst op dijkbekledingen.

De leidraad kan als zodanig los van dit rapport worden gebruikt. De lezer van de leidraad, die meer in detail op een bepaald onderwerp wil ingaan, kan in eerste instantie terugvallen op dit rapport. Bij dit rapport, dat evenals de leidraad geschreven is door de projectleider ir. G.M. Wolsink, is niet in alle details nagegaan of de uit literatuur aangehaalde zaken en andere onderzoeksresultaten overeenkomen met de meningen die leefden binnen de commissie of het COW.

Over de inhoud van dit rapport worden hieronder enkele algemene opmerkingen gemaakt.

Voor het ontwerp van een cementbetonnen dijkbekleding zijn naast het materiaalgedrag de hydraulische belastingen en de sterkte van de bekleding onder invloed van de hydraulische belastingen van belang.

Door de complexiteit van de hydraulische belastingen moet ook in dit rapport veelal worden volstaan met het beschrijven van de verschijnselen. Waar mogelijk is echter aangegeven welke wiskundige formuleringen beschikbaar zijn.

Ook de modelvorming omtrent de sterkte van de bekleding is nog niet uitgekristalliseerd.

Aangegeven wordt wat de huidige stand van de inzichten op deze gebieden is.

Bij het schrijven van het hoofdstuk omtrent de sterkte van de bekleding is gebruik gemaakt van recent verricht onderzoek door het Waterloopkundig Laboratorium en het Laboratorium voor Grondmechanica. Dit onderzoek is echter nog niet afgerond, zodat resultaten van verder onderzoek herziening en/of uitbreiding van het betreffende hoofdstuk te zijner tijd noodzakelijk kan maken.

Verder wordt aangegeven welke mogelijkheden aanwezig zijn om belastingen en sterkte te koppelen via een benaderingswijze waarbij rekening wordt gehouden met het stochastisch karakter van de diverse grootheden.

De indeling van dit rapport is zodanig opgezet dat de diverse hoofdstukken op zichzelf staande eenheden vormen. Zo volgen de bij het hoofdstuk horende appendices en literatuuropgaven direct na de tekst van het betreffende hoofdstuk.

DE STICHTING VOOR ONDERZOEK,
VOORSCHRIFTEN EN KWALITEITSEISEN
OP HET GEBIED VAN BETON (CUR-VB)

HET CENTRUM VOOR ONDERZOEK
WATERKERINGEN

juli 1984

Hoofdstuk 1 - Voorbeelden van mogelijke constructietypen

1.1. Inleiding

In het navolgende zal een overzicht worden gegeven van diverse mogelijkheden om het talud van een dijk met behulp van een betonnen bekleding te versterken. Het overzicht pretendeert niet volledig te zijn, terwijl niet alle systemen heden ten dage nog leverbaar zijn.

Voor het indelen van de diverse constructietypen kan men vele invalshoeken kiezen.

Een hoofdindeling van de dijkbekledingen kan worden gevonden in:

- a. gesloten bekledingen;
- b. open bekledingen.

Meestal heeft de betonnen bekleding een zekere open structuur.

Een tweede onderverdeling kan worden gevonden in:

- a. alleen boven water aan te brengen;
- b. boven en onder water aan te brengen.

Het merendeel van de constructietypen laat zich alleen boven water aanbrengen.

Een derde onderverdeling kan worden gevonden in:

- a. machinale verwerking mogelijk;
- b. geen machinale verwerking mogelijk.

De tendens is dat men meer en meer de voorkeur geeft aan systemen welke machinale verwerking toelaten.

Een vierde onderverdeling kan worden gevonden in:

- a. in het werk gestort beton;
- b. prefab-beton.

In het algemeen moet de voorkeur worden gegeven aan prefab-beton boven in het werk gestort beton.

Voor bijzondere toepassingen, bijvoorbeeld het onder water aanbrengen van een bekleding met behulp van speciaal beton (zoals colloïdaal beton) kan het in het werk storten echter wel in aanmerking komen.

Een vijfde onderverdeling kan worden gevonden in:

- a. ongewapend beton;
- b. gewapend beton;
- c. voorgespannen beton.

Het ongewapend beton vindt verreweg de meeste toepassing als bekleding voor een dijk.

Tenslotte kan een onderverdeling worden gevonden in:

- a. blok-vormige elementen;
- b. plaat-vormige elementen;
- c. ononderbroken plaatvorm.

De blok-vormige elementen worden het meest toegepast.

De blok-vormige elementen zijn weer te verdelen in:

- a.1. blokken met een verband in het vlak van het talud loodrecht op de teen;
- a.2. blokken met een verband in het vlak van het talud loodrecht op en evenwijdig aan de teen;
- a.3. blokken met een verband loodrecht op het vlak van het talud, in het vlak loodrecht op de teen;
- a.4. blokken met een verband loodrecht op het vlak van het talud, in het vlak loodrecht op en evenwijdig aan de teen.

In het vlak van het talud kan het verband worden verkregen door middel van een bijzondere vormgeving of plaatsing van de blokken.

Zo ontstaat door een "halfsteens" zetting een samenhang van de bekleding in de richting loodrecht op de teen van het talud.

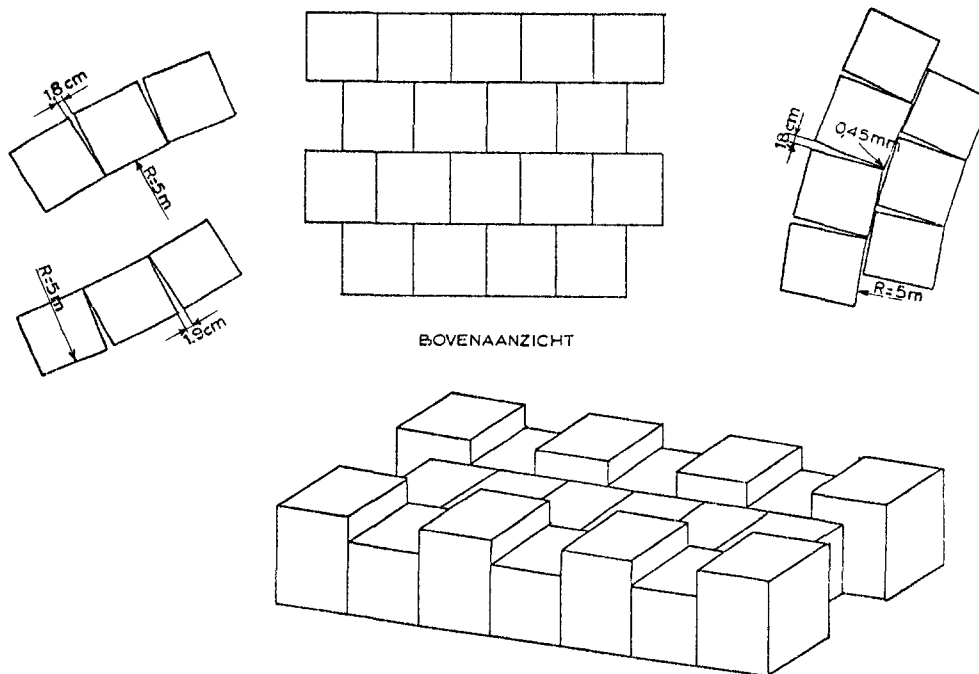
Het verband loodrecht op het vlak van het talud kan worden verkregen door een speciale vormgeving; bijvoorbeeld uitstekende en in elkaar grijpende delen, door vulling van de openingen tussen de blokken met korrelig materiaal met een grote haakweerstand, enzovoort.

Opmerking: Bij de beschouwing van het verband tussen de elementen is de onderlinge wrijving verwaarloosd.

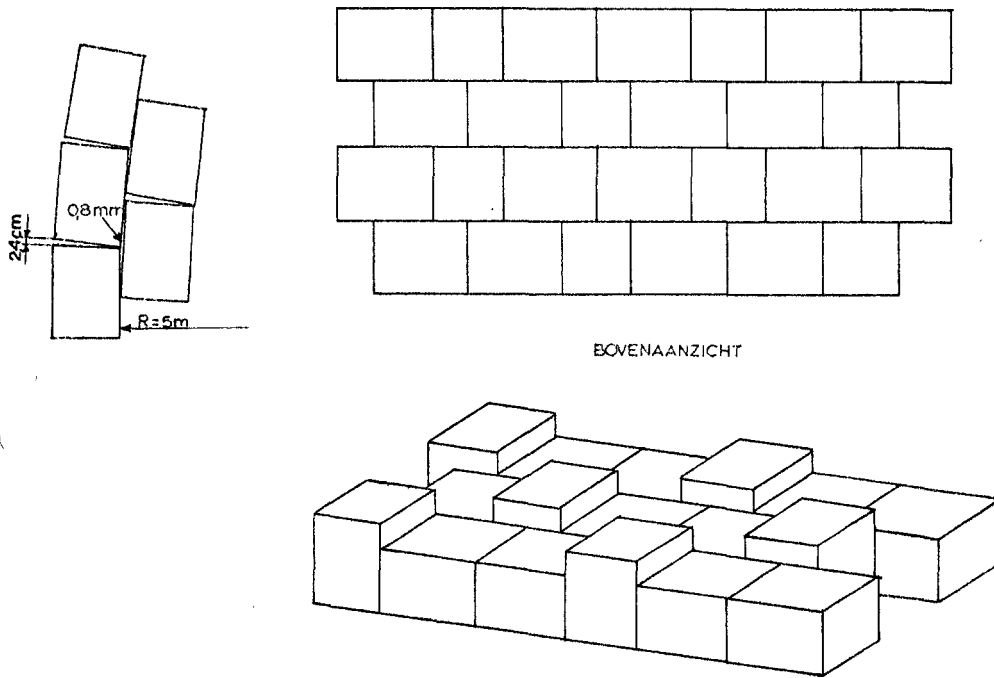
De hierna volgende systemen zijn gegroepeerd volgens de laatst genoemde onderverdeling (blok-vormige elementen, plaat-vormige elementen en ononderbroken plaatvorm).

1.2. Blok-vormige elementen

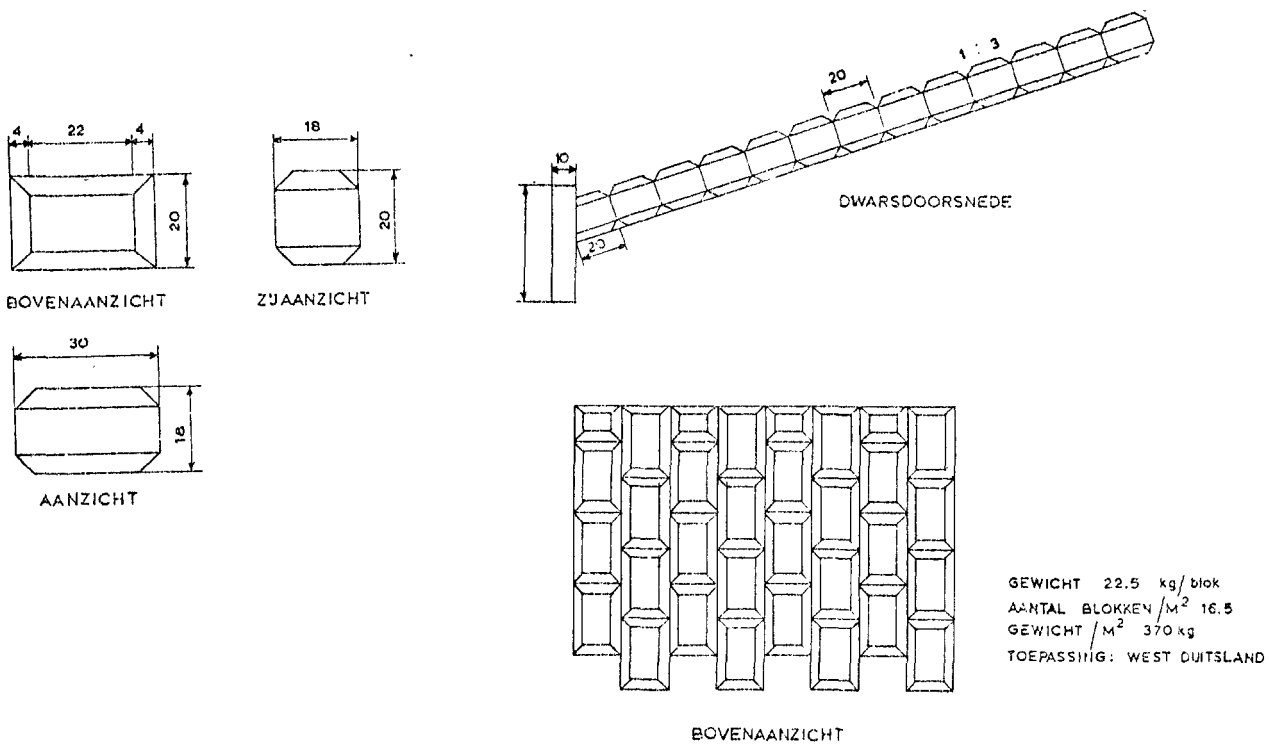
1.2.1. Verband loodrecht op de teen



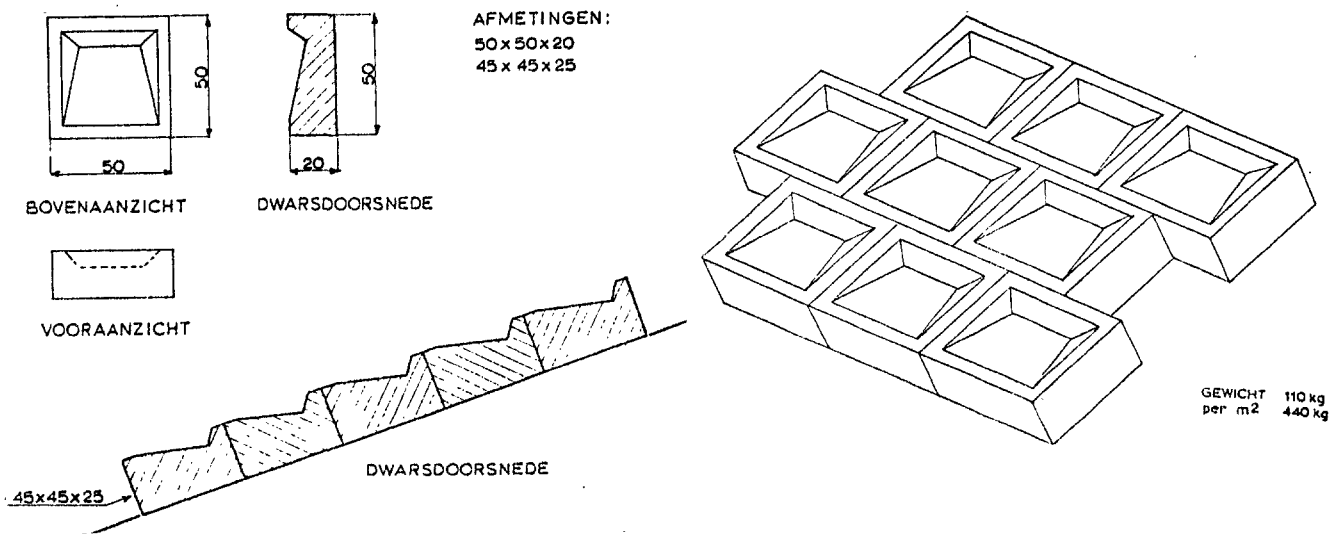
figuur 1.1. betonblokken in de vorm van een kubus



figuur 1.2. rechthoekige betonblokken

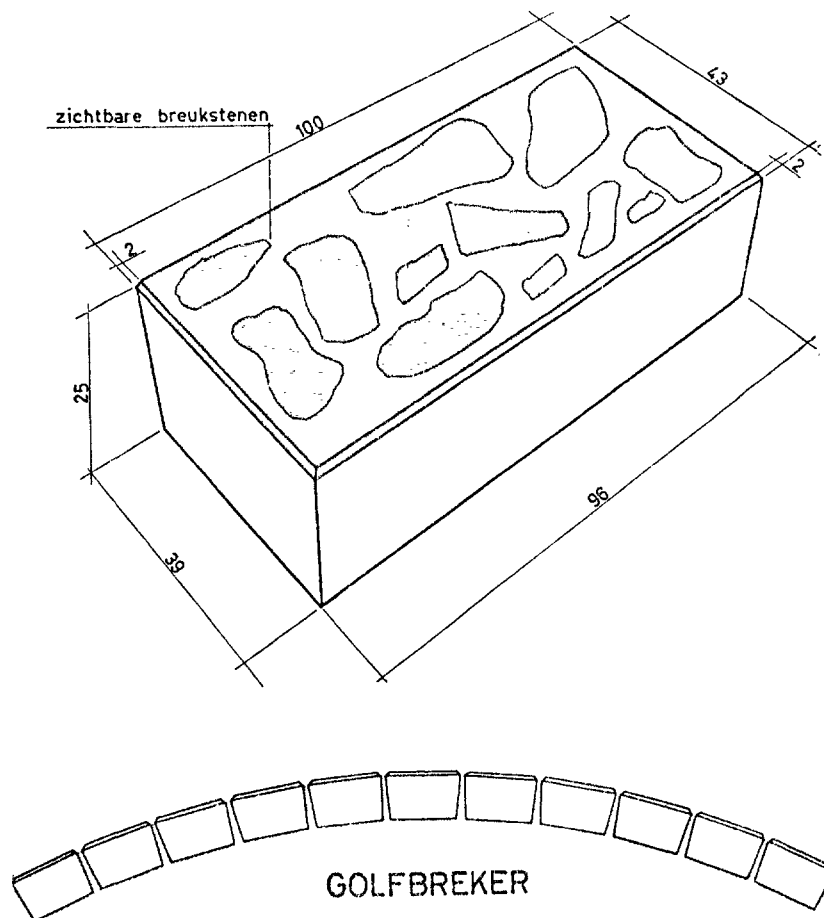


figuur 1.3. Duits systeem



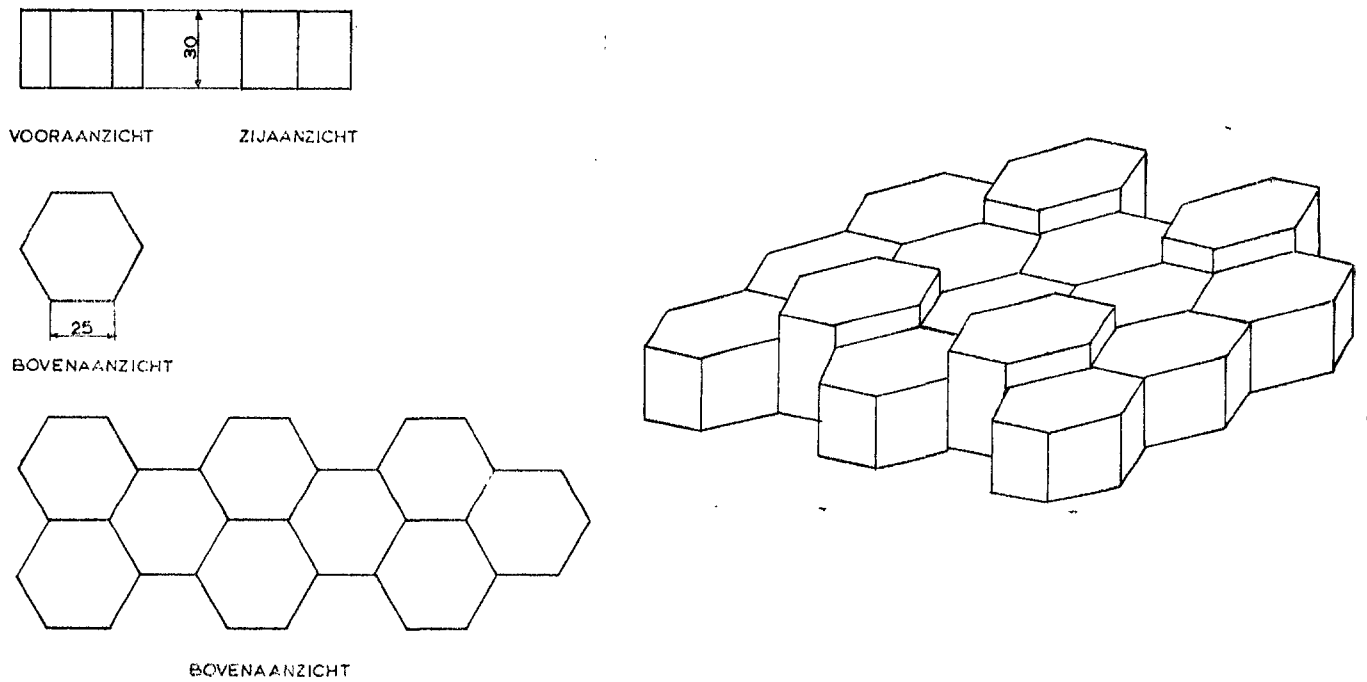
figuur 1.4. systeem "Haringman"

BLOKKEN IN CYCLOPENBE- TON VOOR ZEEWERING

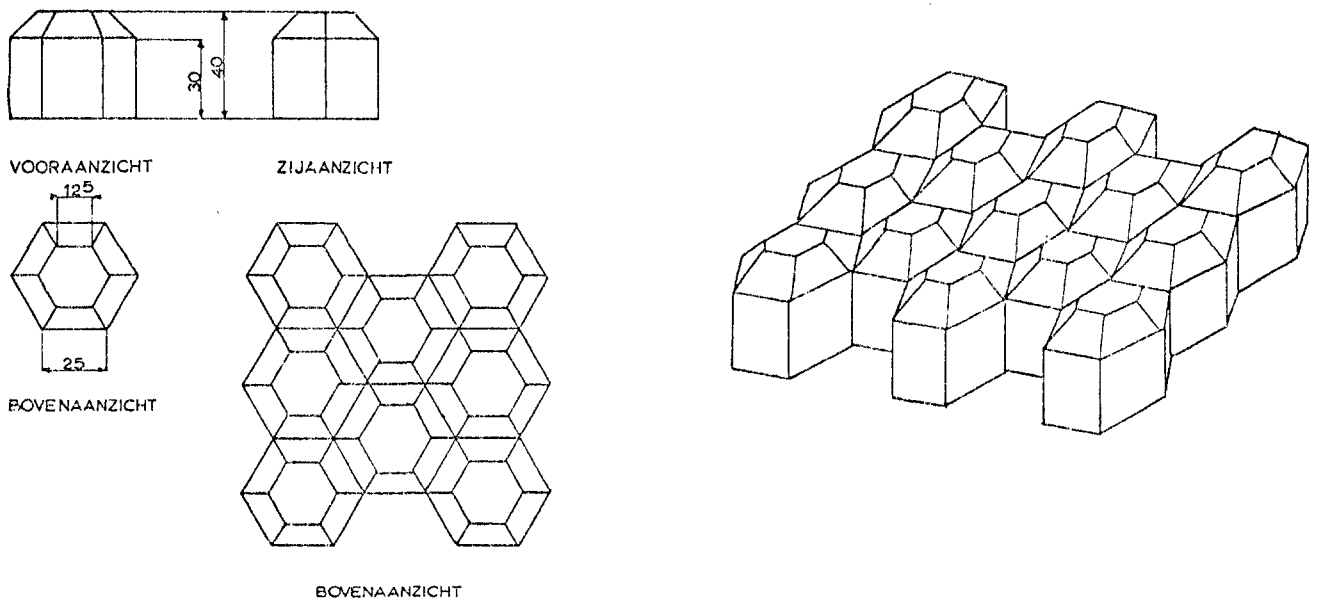


figuur 1.5. Belgisch systeem

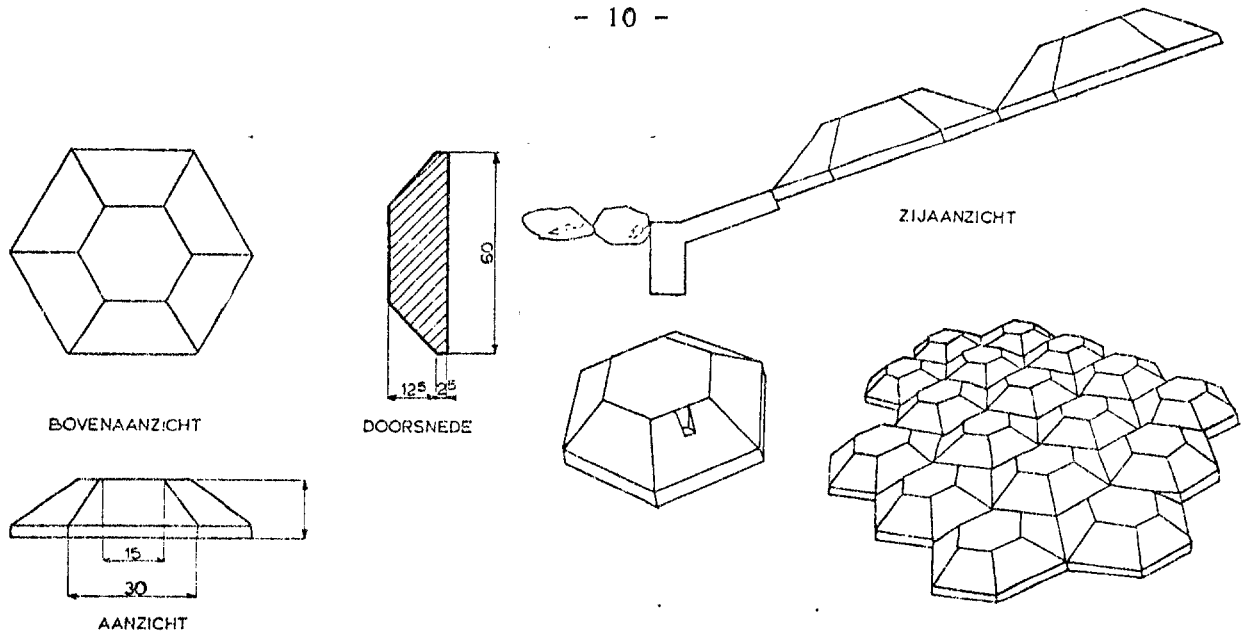
1.2.2. Verband loodrecht op en evenwijdig aan de teen



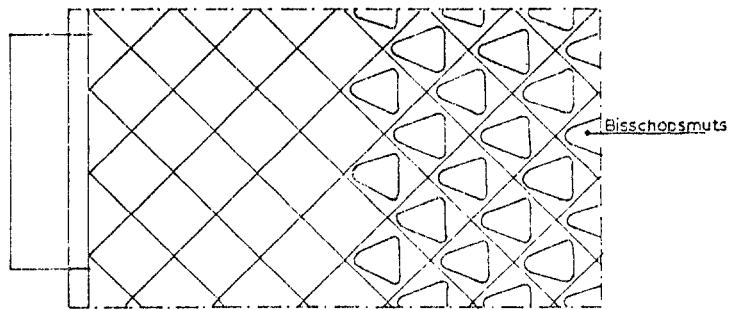
figuur 1.6. betonzuilen



figuur 1.7. betonzuilen met piramidevormige verhoging

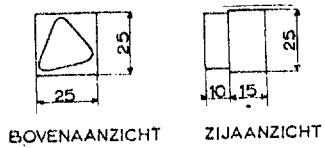


figuur 1.8. zeshoekig betonblok



BOVENAANZICHT

Schaal 1:20
 GEWICHT
 blokken 25x25x15 = 30 kg
 30x30x15 = 40 kg
 per m² 440 kg

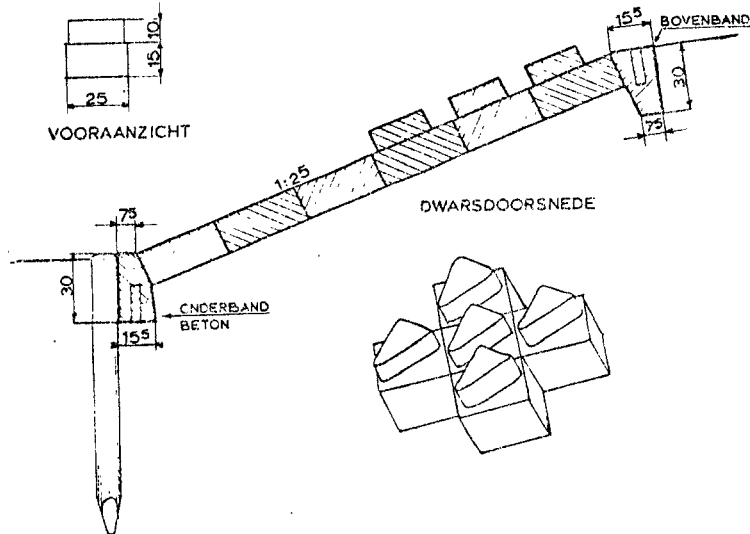


BOVENAANZICHT ZIJAANZICHT

BLOKKEN 25x25x15
 ook in grotere afmetingen

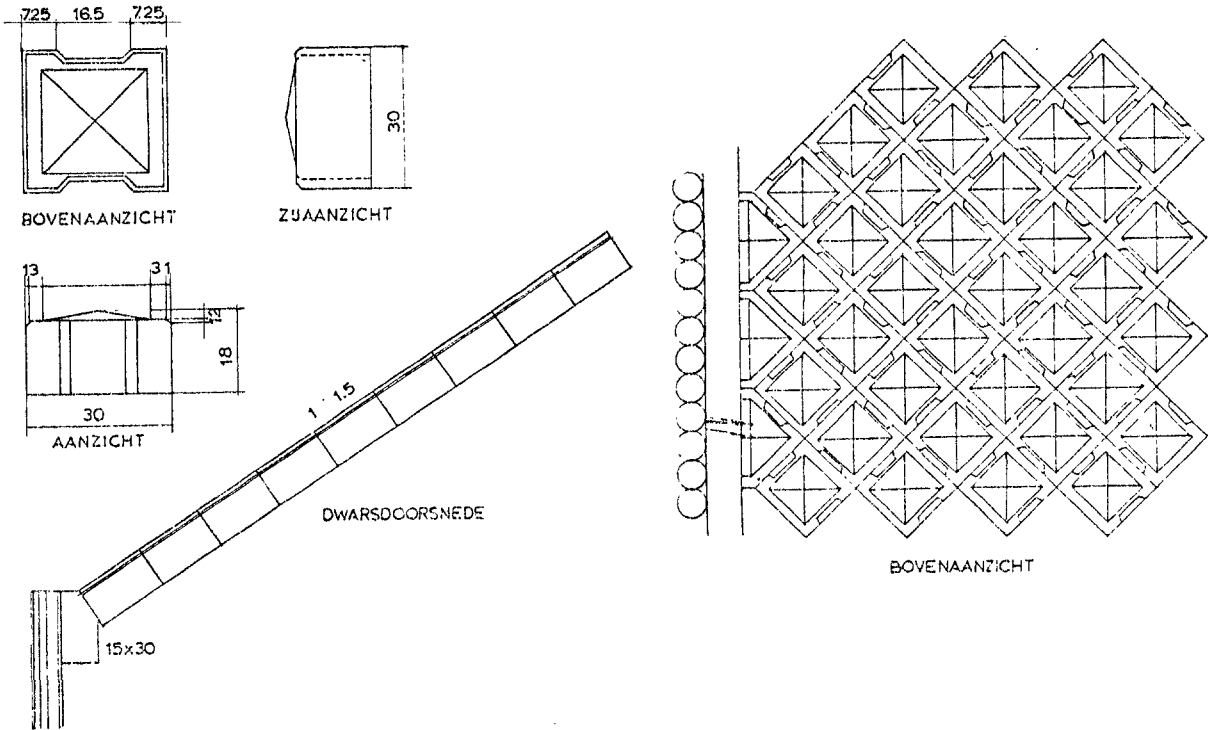


VOORAANZICHT

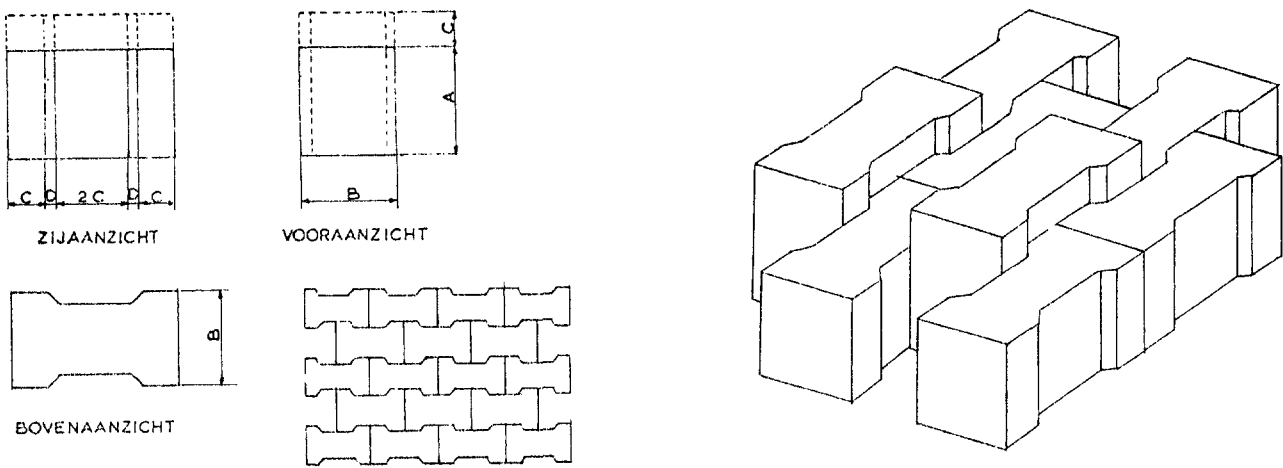


DWARSDOORSNEDE

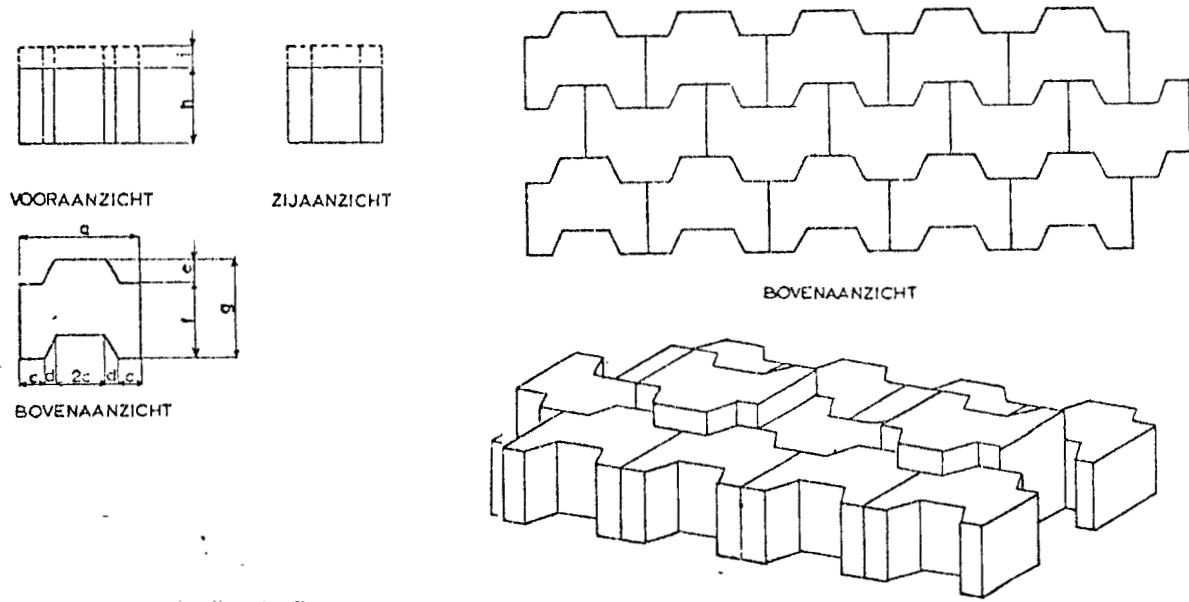
figuur 1.9. "beverkop" glooping



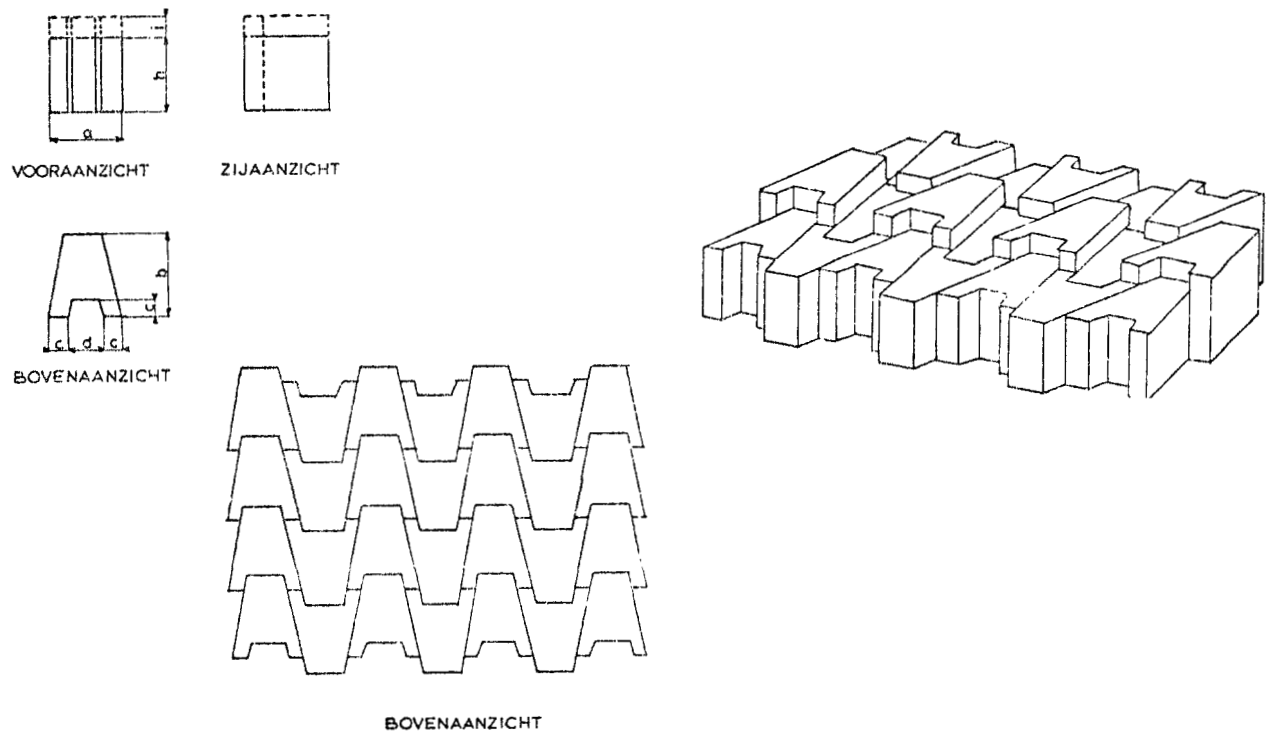
figuur 1.10. systeem "Oosthoek"



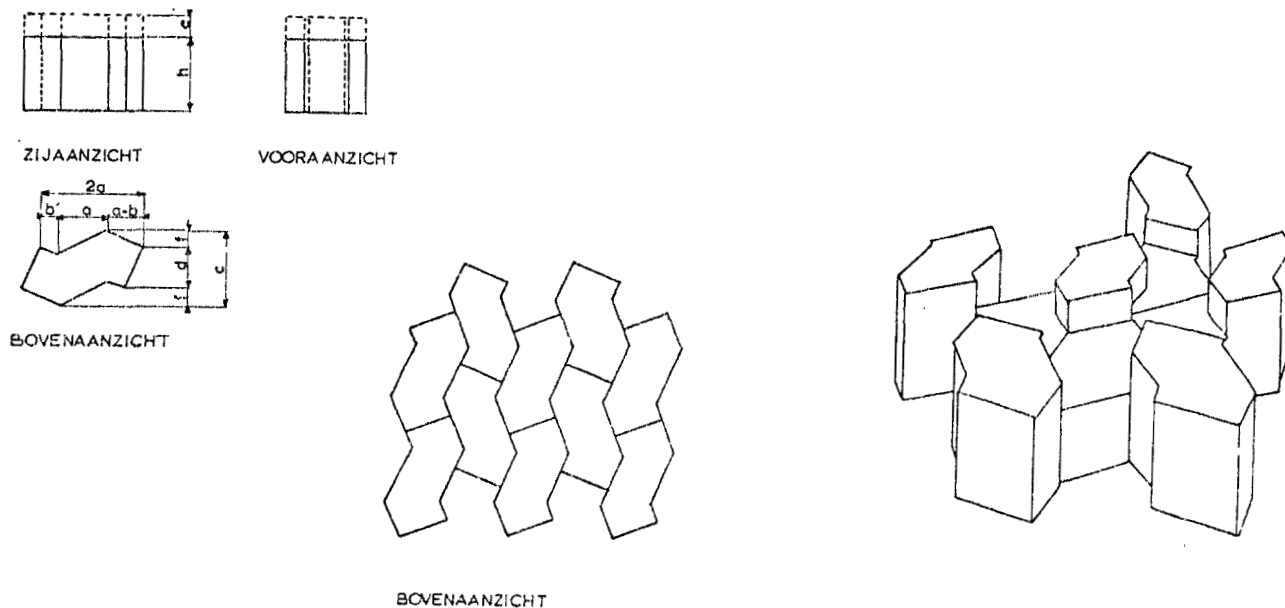
figuur 1.11. Ipro-blokken



figuur 1.12. betonstenen

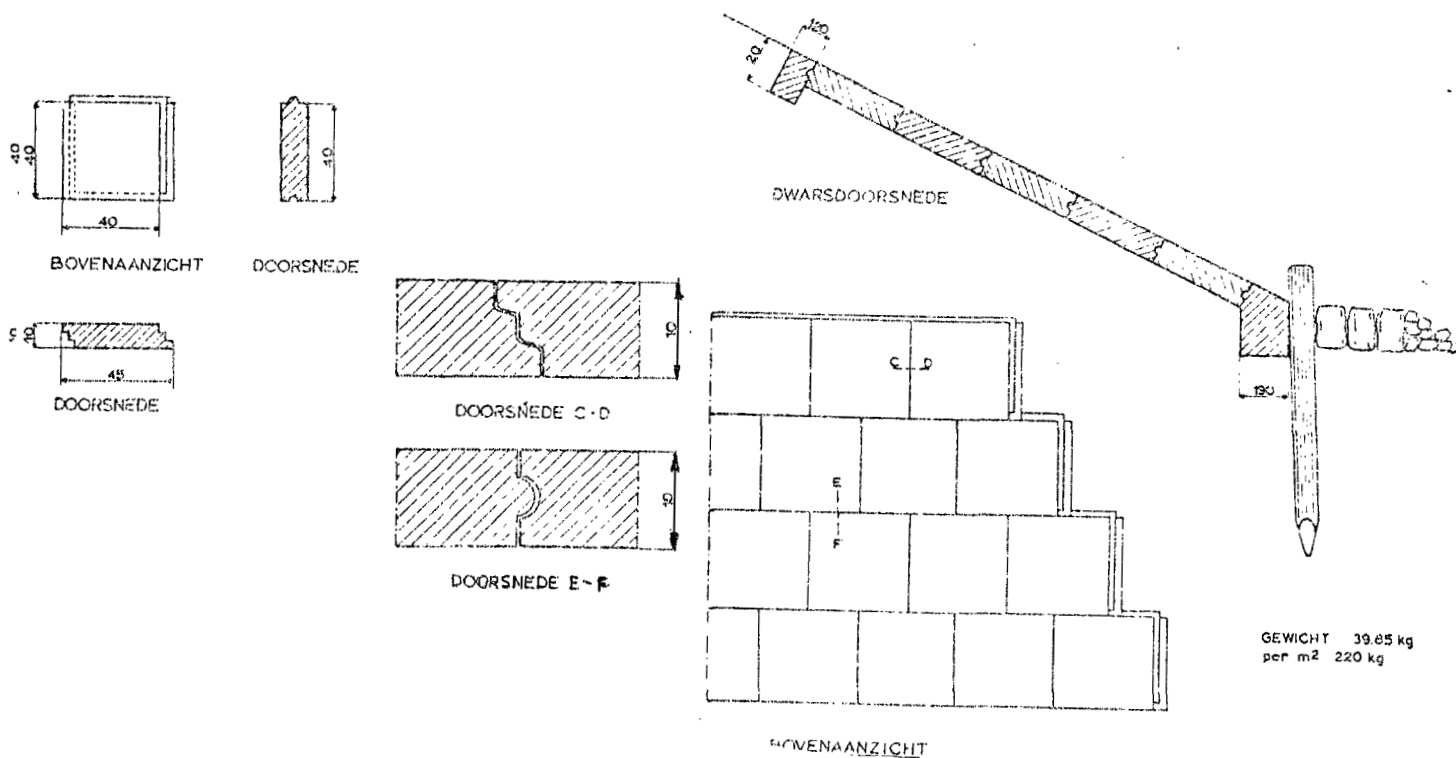


figuur 1.13. betonstenen met verband in V-vorm

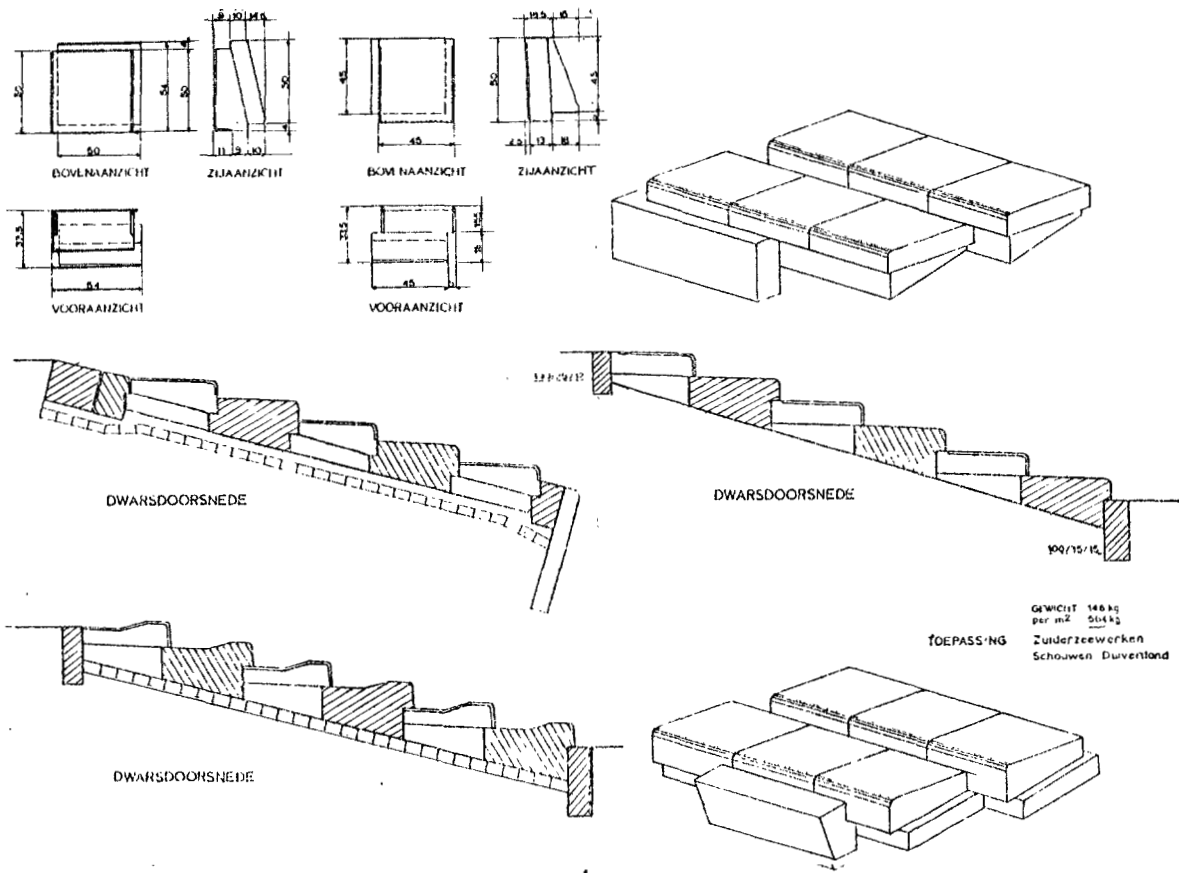


figuur 1.14. SF-stenen

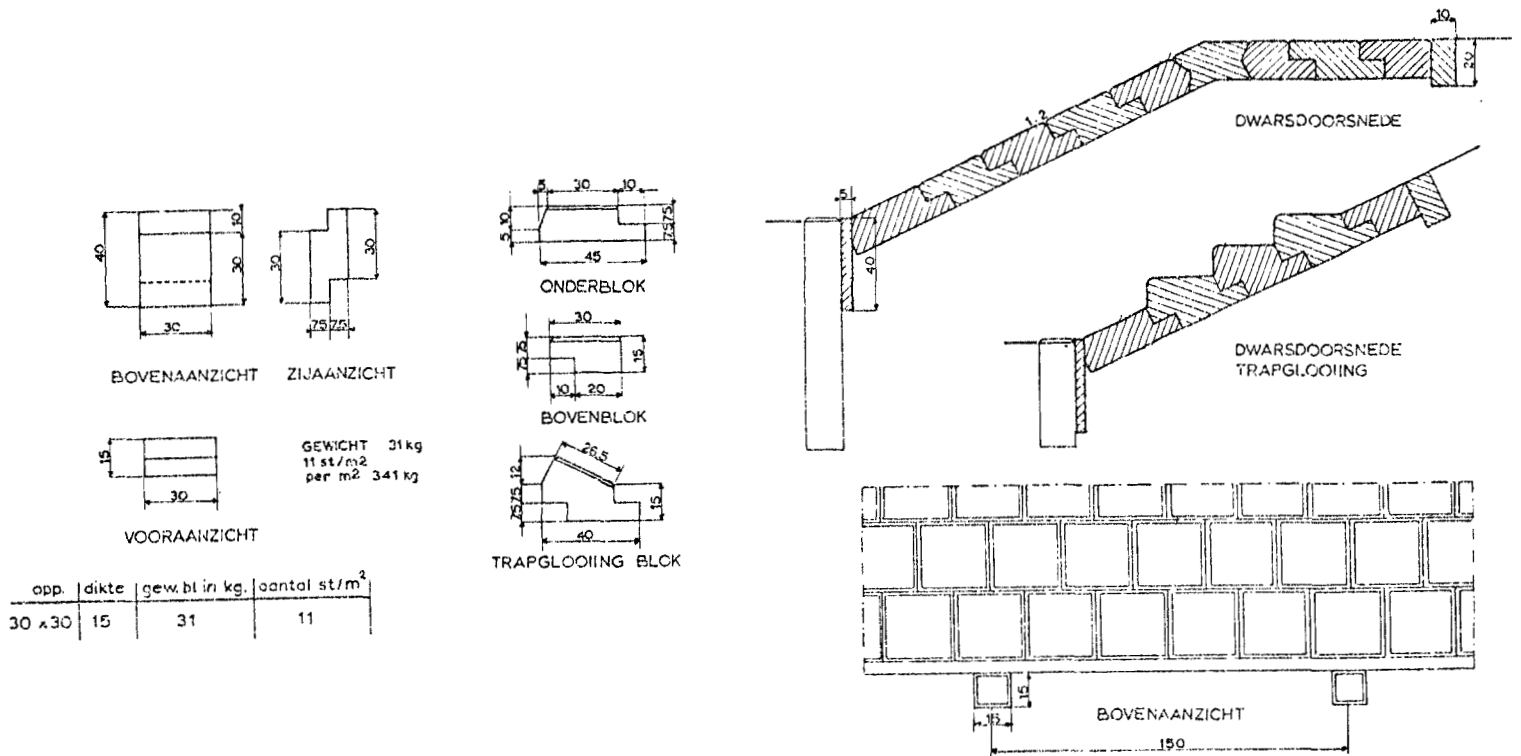
1.2.3. Verband loodrecht op het vlak van het talud en loodrecht op de teen



figuur 1.15. systeem "J. en A. de Boer"

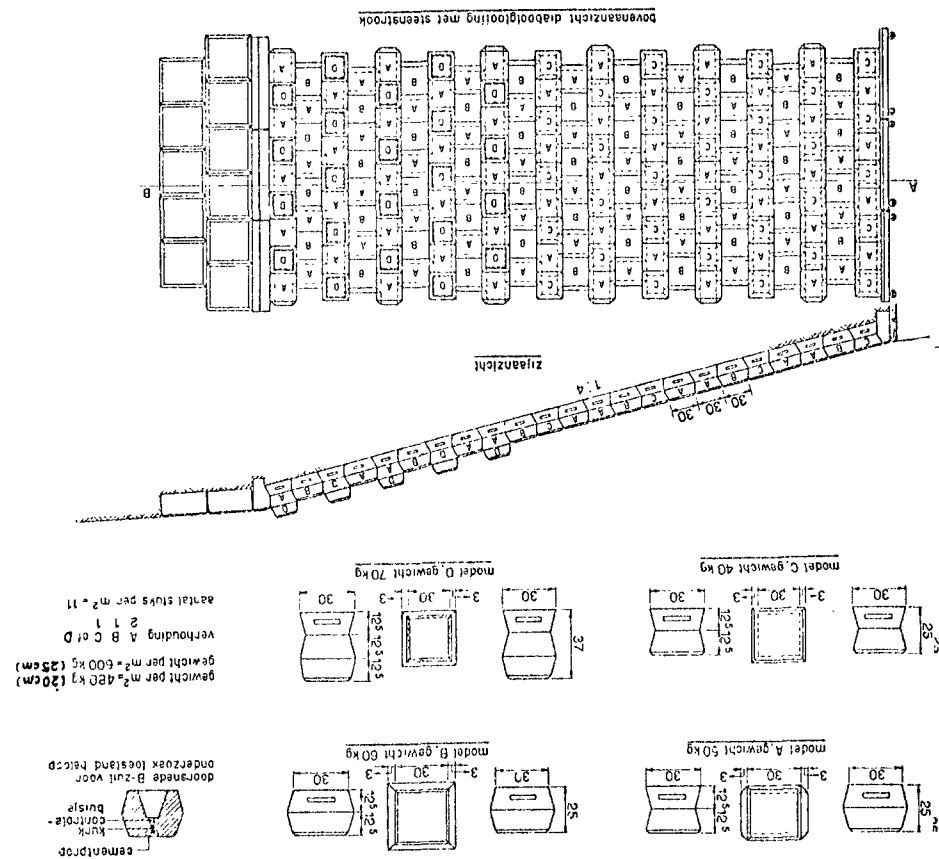


figuur 1.16. systeem "Leendertse"

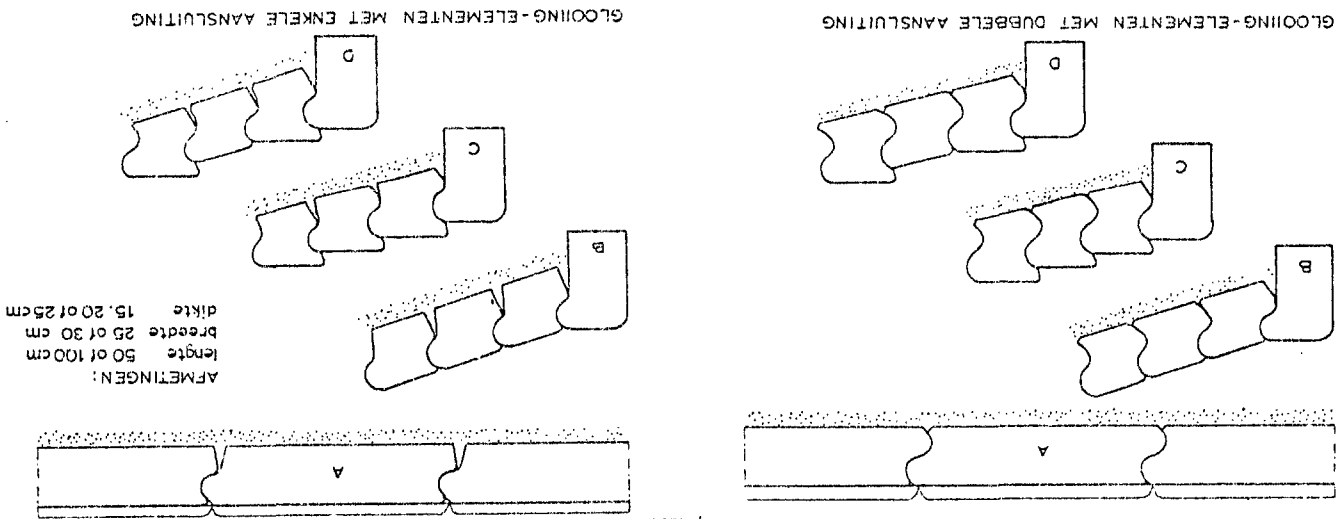


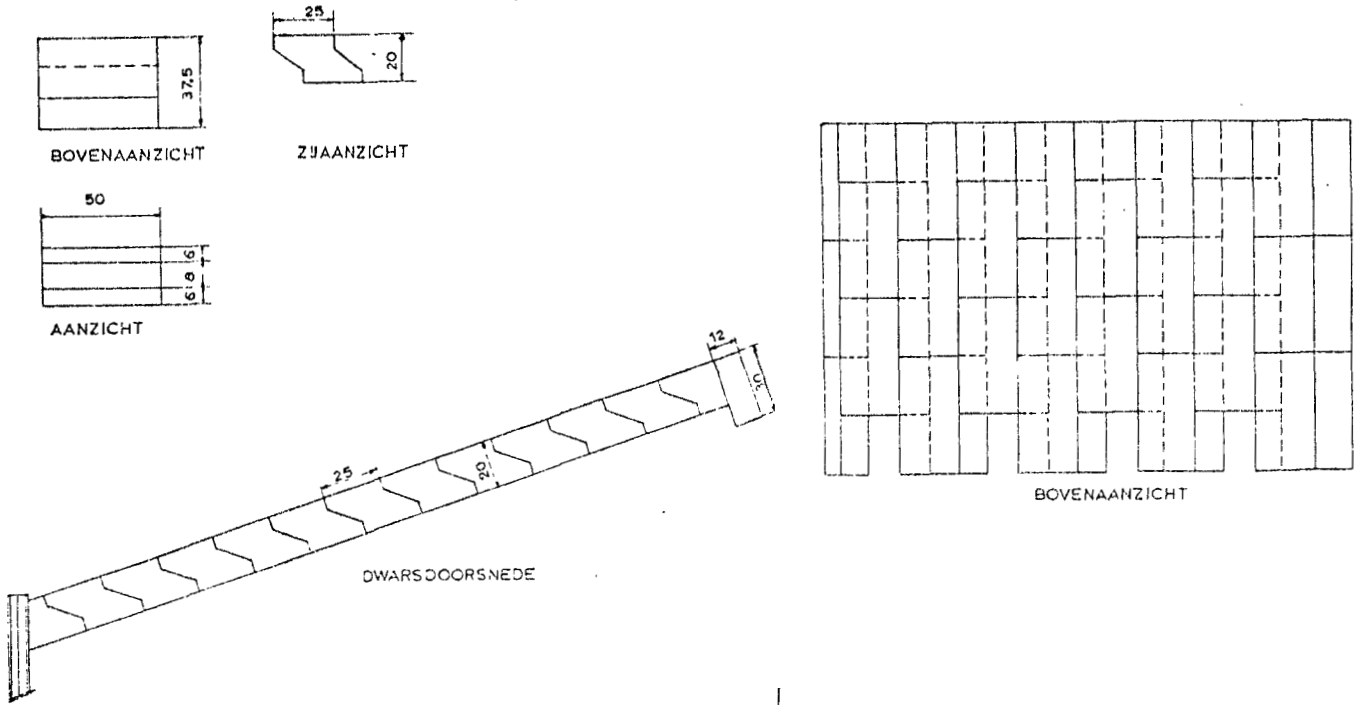
figuur 1.17. systeem "Oord"

Figuur 1.19. systeem "Streefkerk" (diaboolglooiing)



Figuur 1.18. systeem "Gemfj"





figuur 1.20. systeem met overlappende elementen

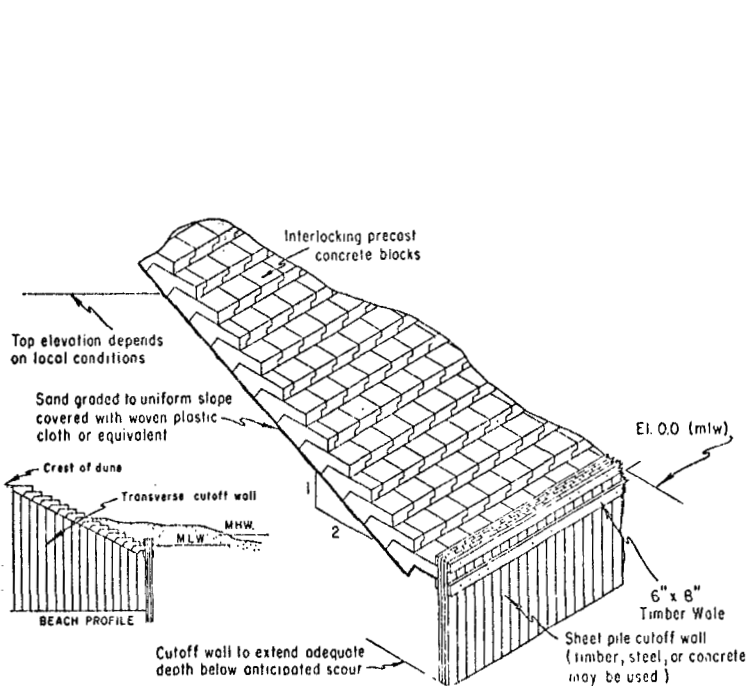
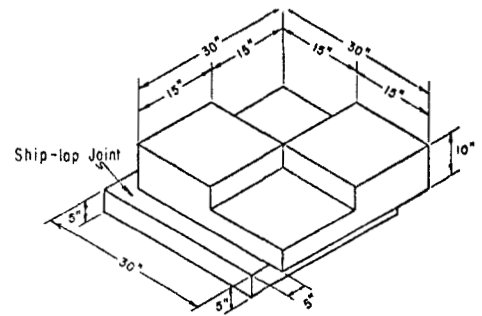
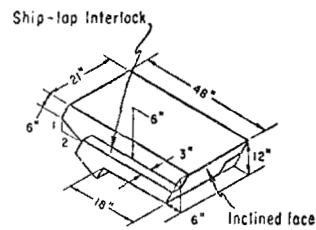


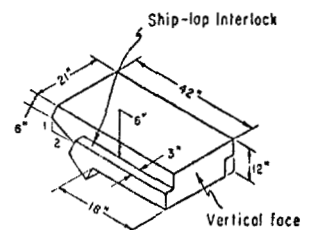
FIGURE 1. STEPPED TYPE INTERLOCKING PRECAST CONCRETE BLOCK SEAWALL



DESIGN-A
WAFFLE TYPE



DESIGN-B
INCLINED-FACE

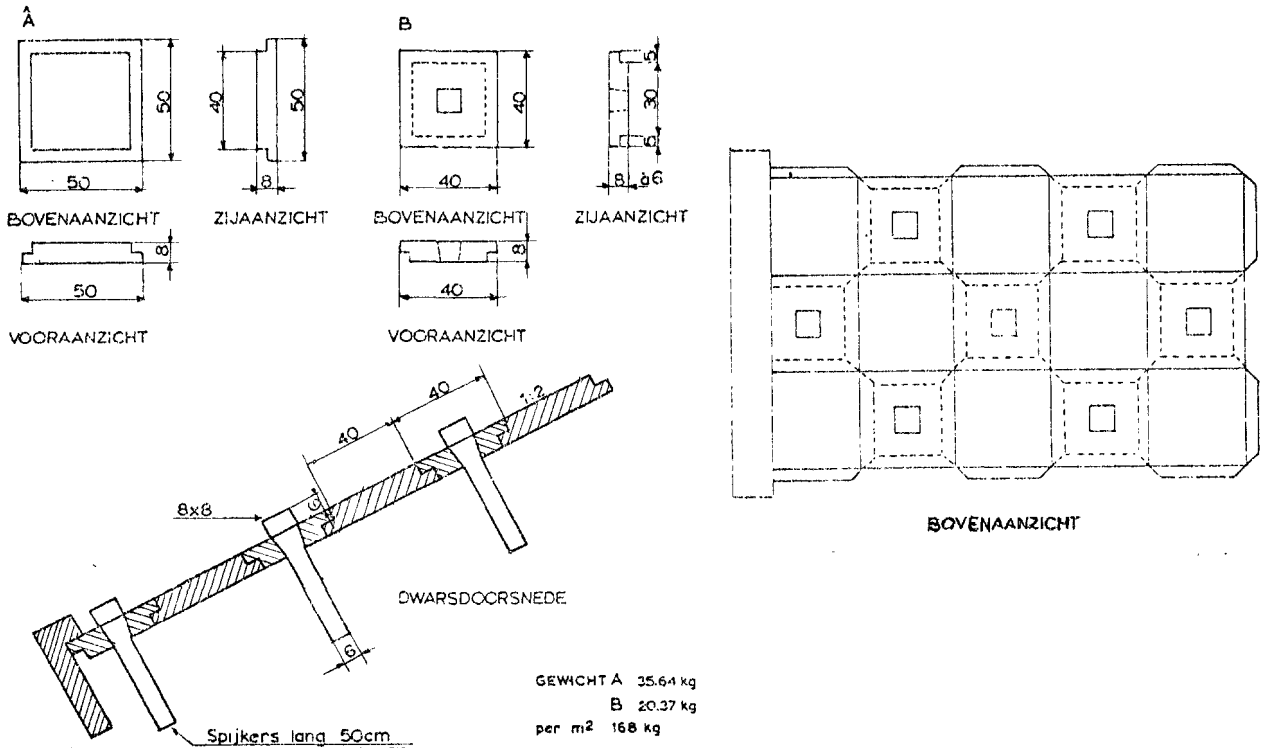


DESIGN-C
VERTICAL-FACE

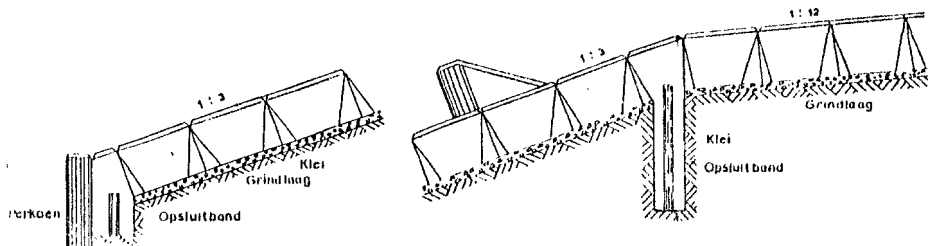
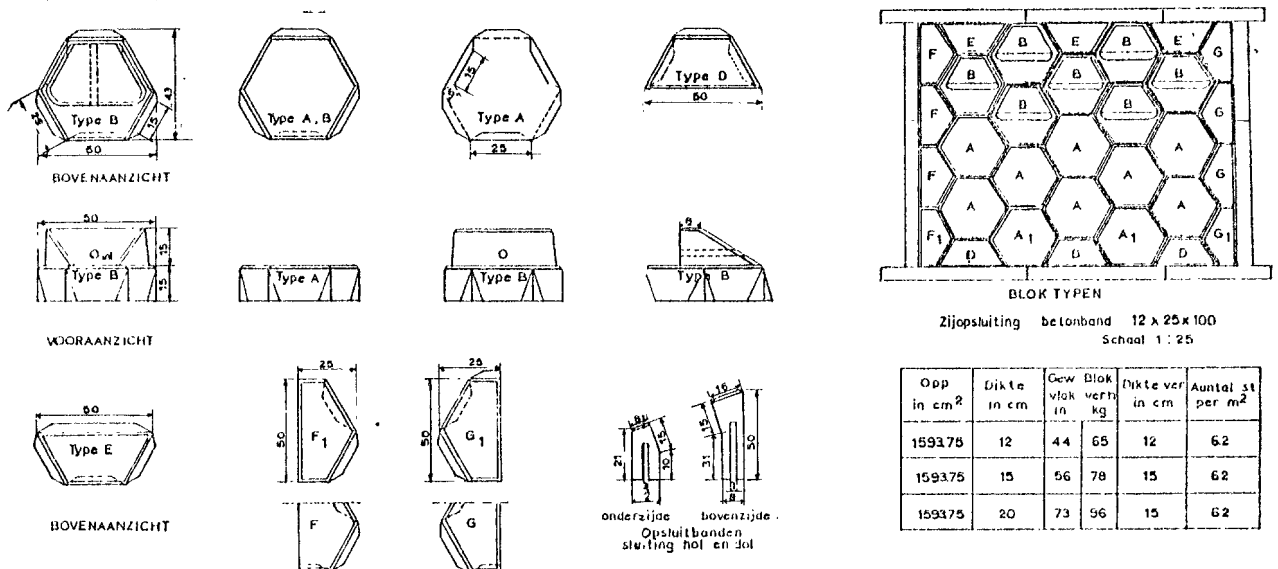
FIGURE 2. INTERLOCKING PRECAST CONCRETE BLOCK

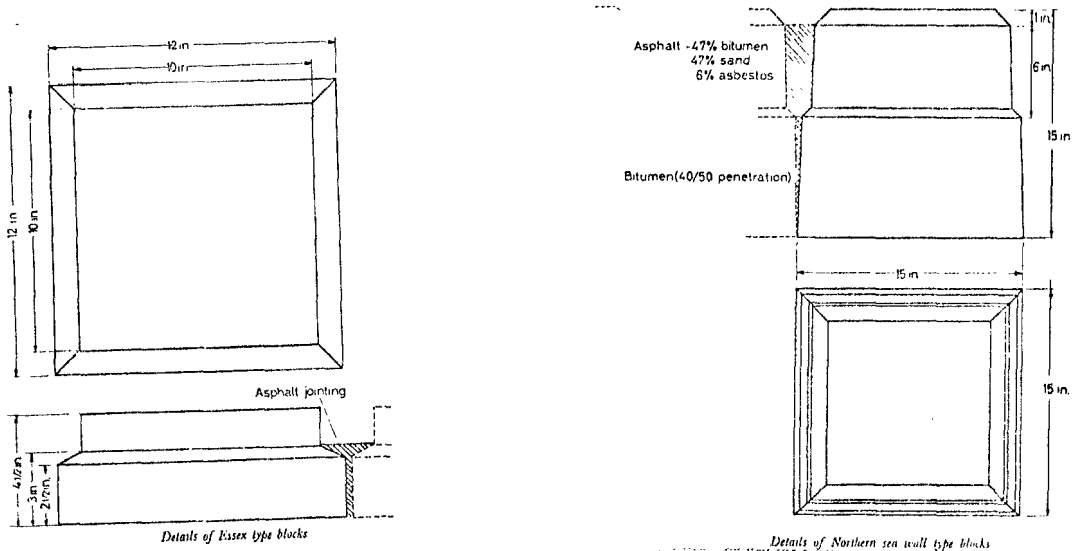
figuur 1.21. Amerikaans systeem

1.2.4. Verband loodrecht op het vlak van het talud, loodrecht op en evenwijdig aan de teen

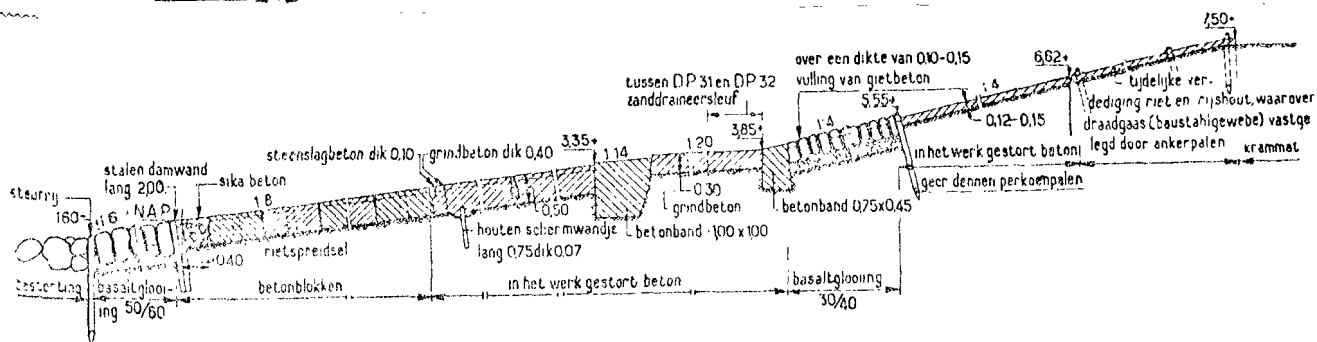
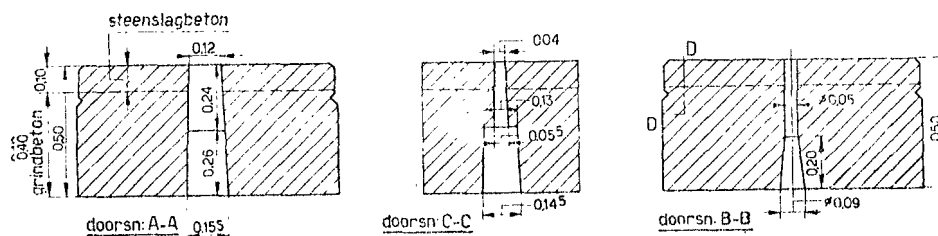
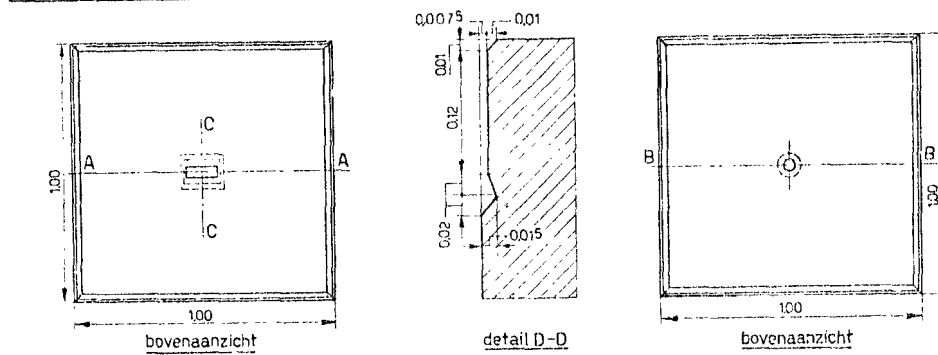
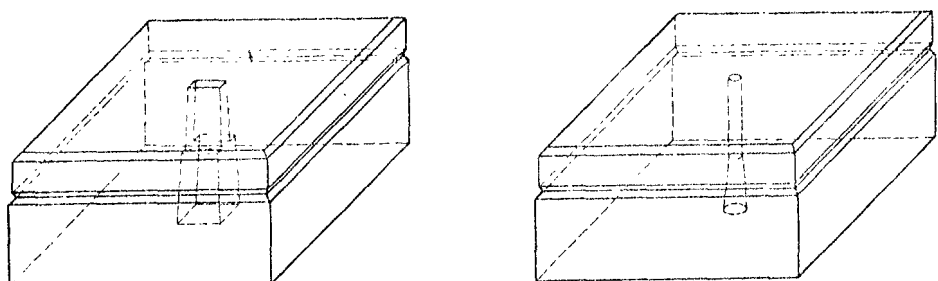


figuur 1.22. spijkerglooïng (de Muralt)



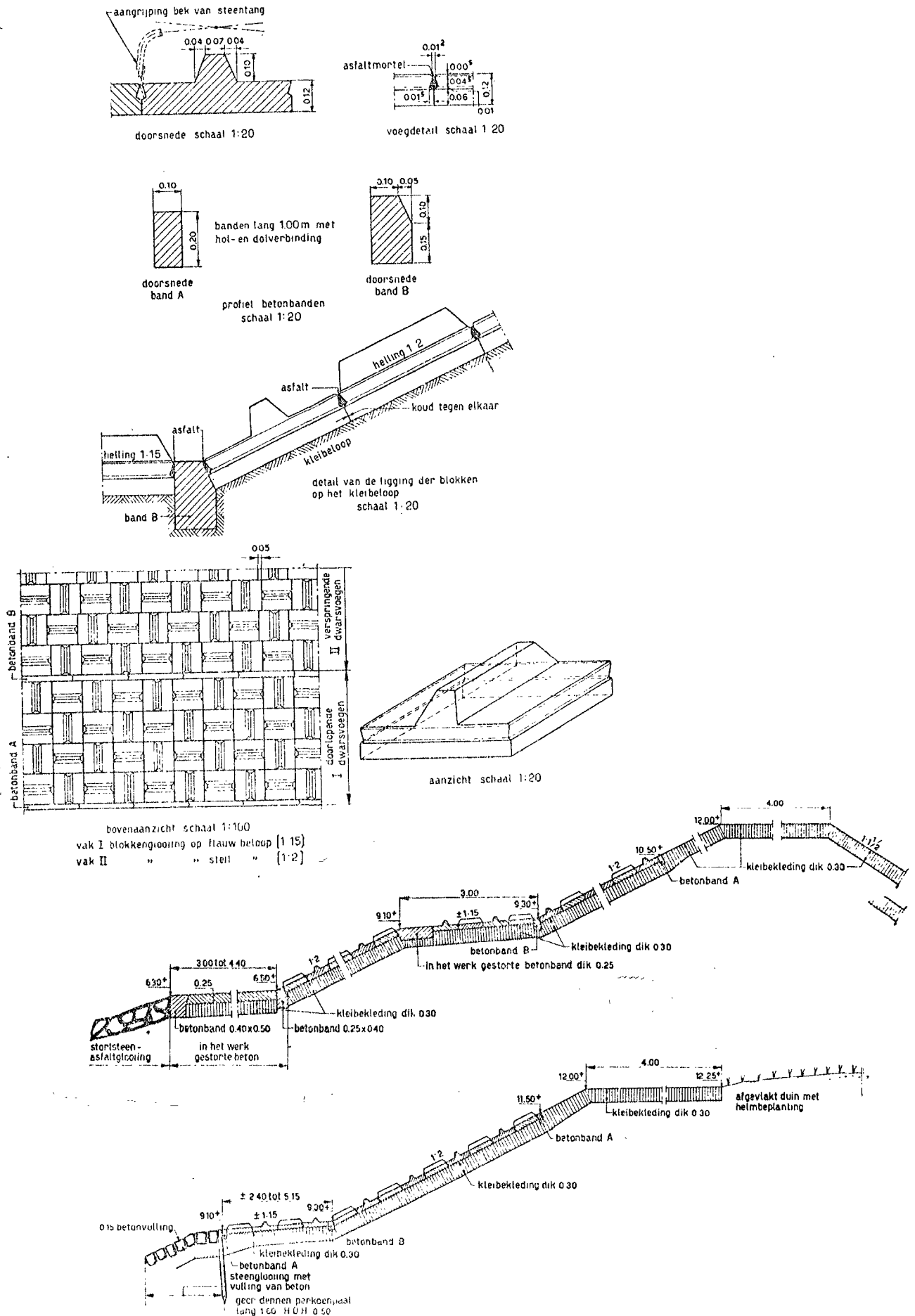


figuur 1.24. Engels systeem, voegen gevuld met asfalt

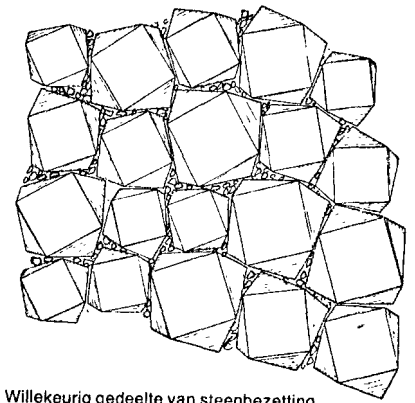
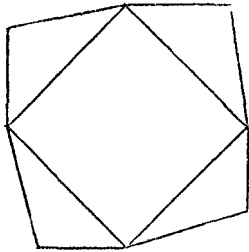
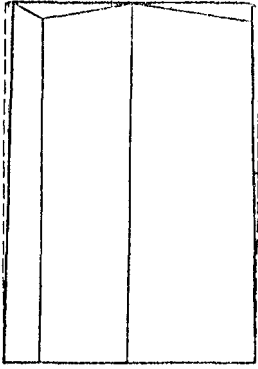


figuur 1.25. betonblokken toegepast op de Westkapelse zeekering, 1946

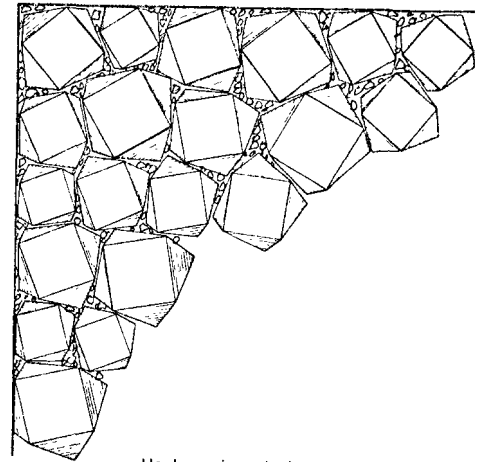
Geribde betonblokken als materiaal voor dijksbekleding.



figuur 1.26. golfremmende elementen toegepast op de Westkapelse Zee-
wering, 1949



Willekeurig gedeelte van steenbezetting



Hoekvormig gedeelte van steenbezetting

Zuil- hoogte in cm	vol. gew. 2,9		vol. gew. 2,6		vol. gew. 2,4		Zuil- hoogte in cm
	t/m ²	m ² /t	t/m ²	m ² /t	t/m ²	m ² /t	
18	0,452	2,21	0,409	2,44	0,374	2,67	18
20	0,503	1,99	0,451	2,22	0,416	2,40	20
25	0,630	1,59	0,565	1,77	0,521	1,92	25
27	0,682	1,47	0,611	1,64	0,564	1,77	27
30	0,759	1,32	0,681	1,47	0,628	1,59	30
35	0,858	1,17	0,770	1,30	0,710	1,41	35
40	0,980	1,02	0,879	1,14	0,811	1,23	40
45	1,105	0,90	0,991	1,01	0,914	1,09	45

figuur 1.27. systeem "Basalton", met vulling van granulair materiaal in de openingen tussen de zuilen

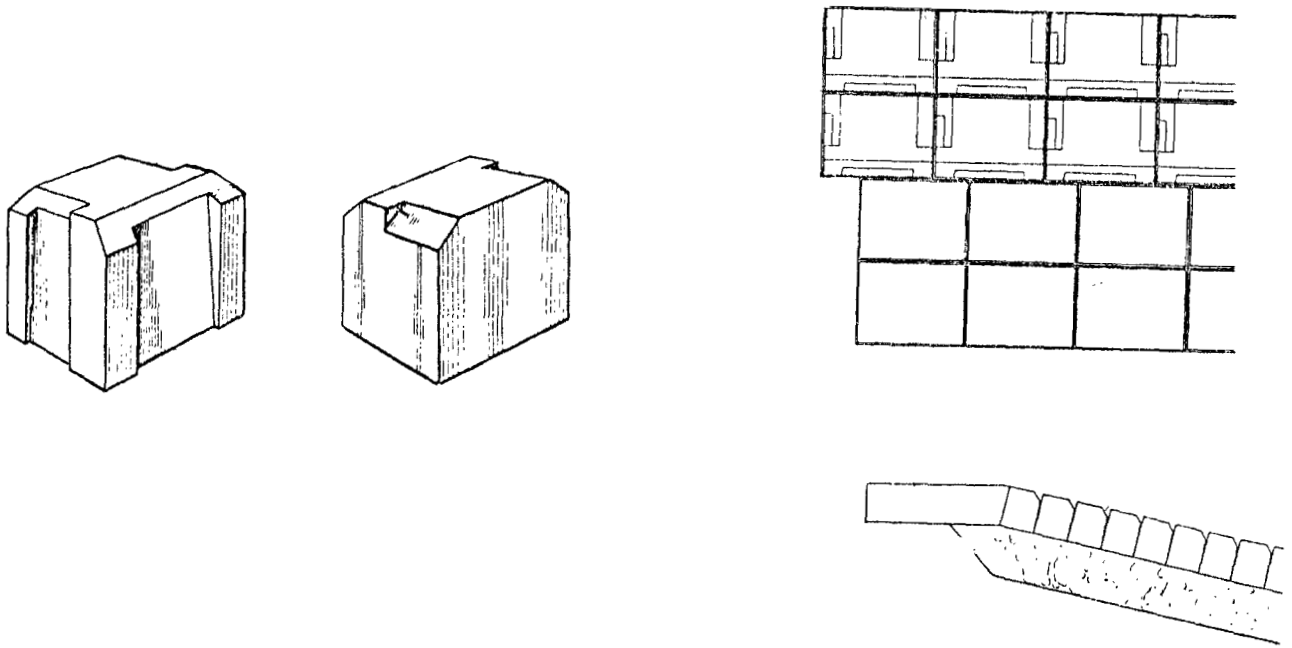
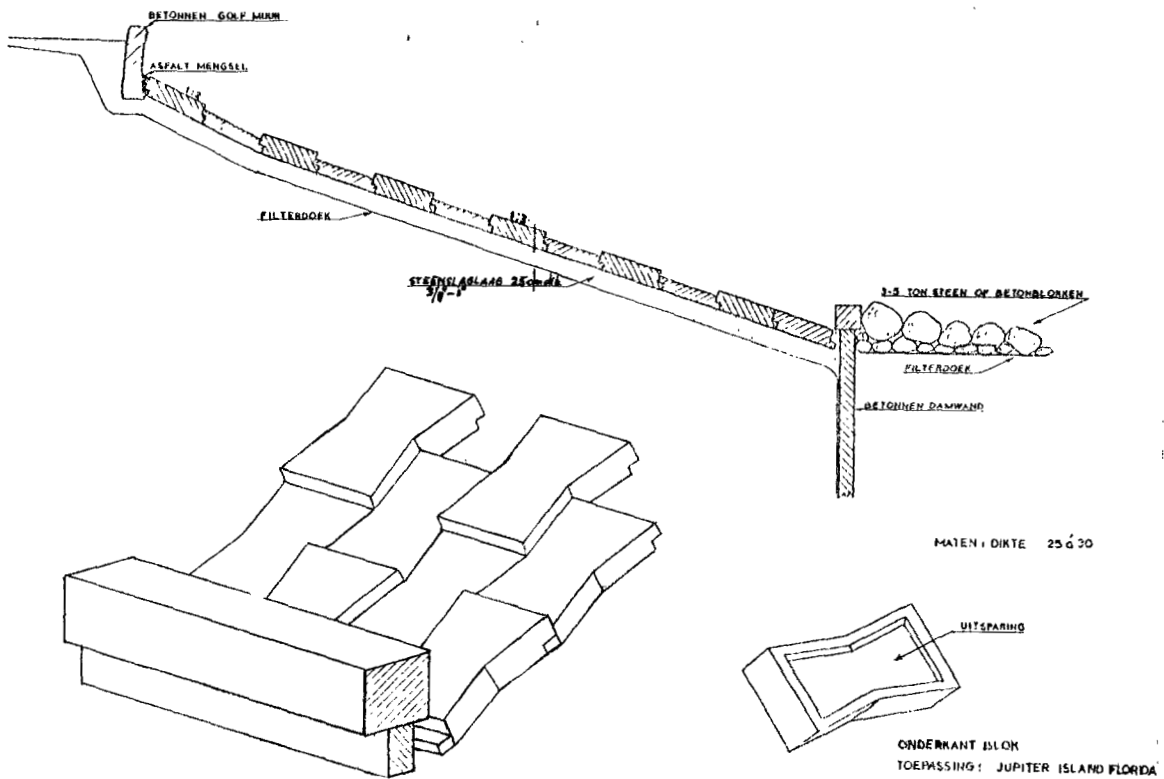
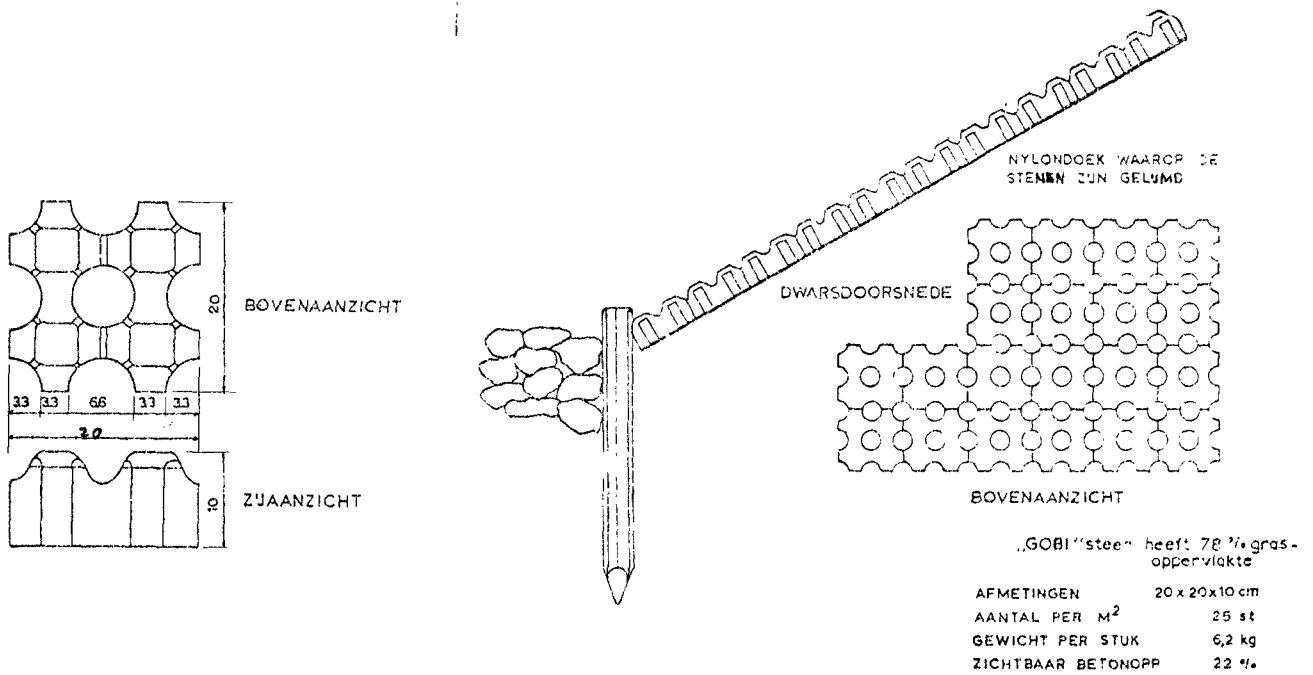


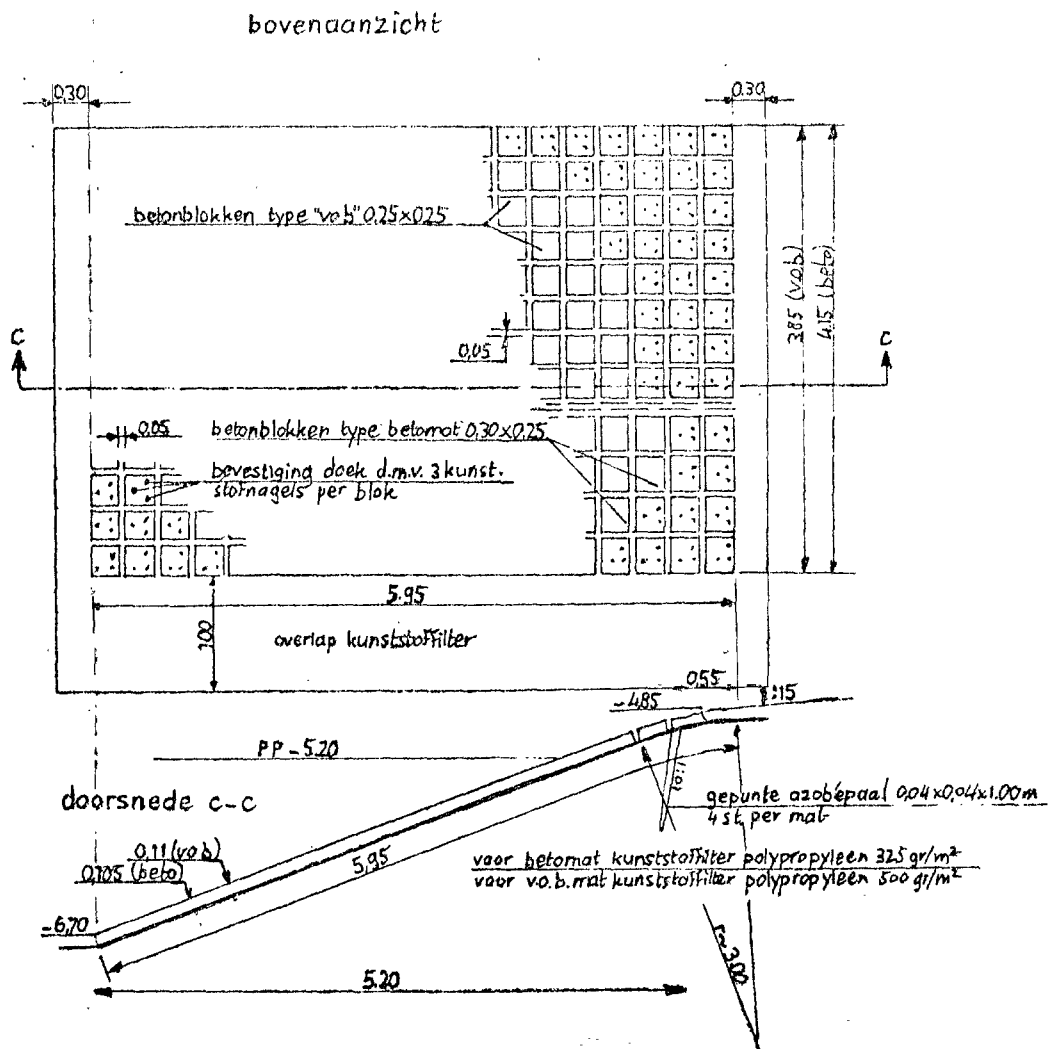
fig.1.27a. systeem met openingen gevuld met granulair materiaal



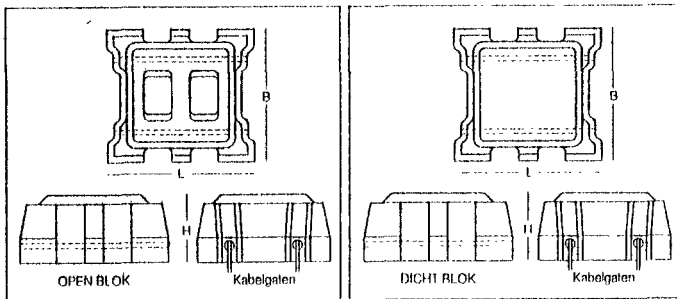
figuur 1.28. afgeleide Ipro-vorm



figuur 1.29. geprefabriceerde mat-systeem "Gobi"



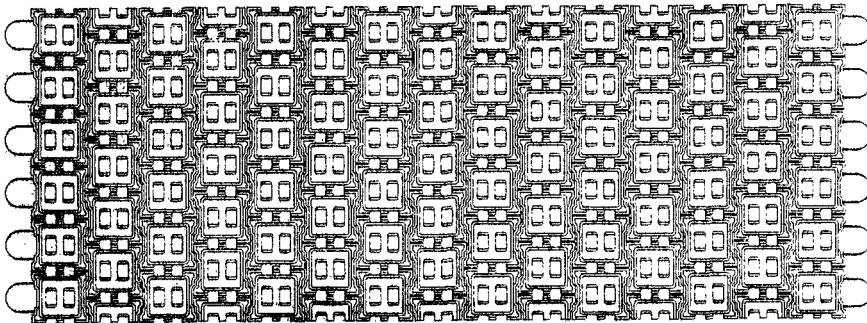
figuur 1.30. geprefabriceerde mat



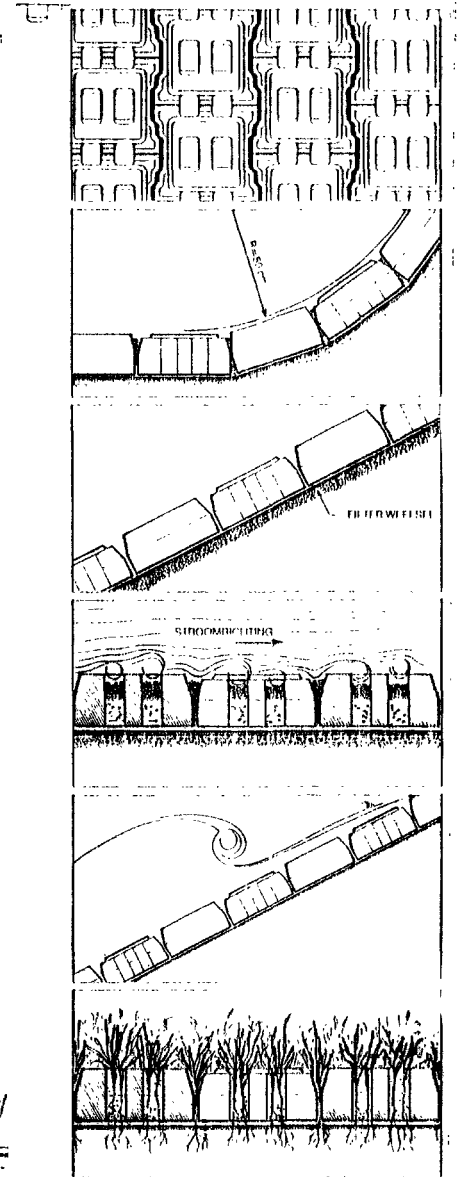
ARMORFLEX® BETONBLOK SPECIFIKATIE

MATEN EN GEWICHTEN

Type	Maten steen in cm			Gewicht steen in kg	Gewicht mat in kg/m ²	Open oppervlak in %	Staal-kabel Ø in mm
	L	B	H				
Open blok 1	33	30	12	18	180	25	4
<i>De navolgende mattypos zijn in ontwikkeling.</i>							
Open blok 2	33	30	15	22	220	20	4
Open blok 3	39	44	23	58	350	20	6
Dicht blok 4	33	30	12	25	250	10	4
Dicht blok 5	33	30	15	30	300	10	5
Dicht blok 6	39	44	23	70	425	10	6



figuur 1.31. geprefabriceerde mat, type "Armorflex"



bovenaanzicht

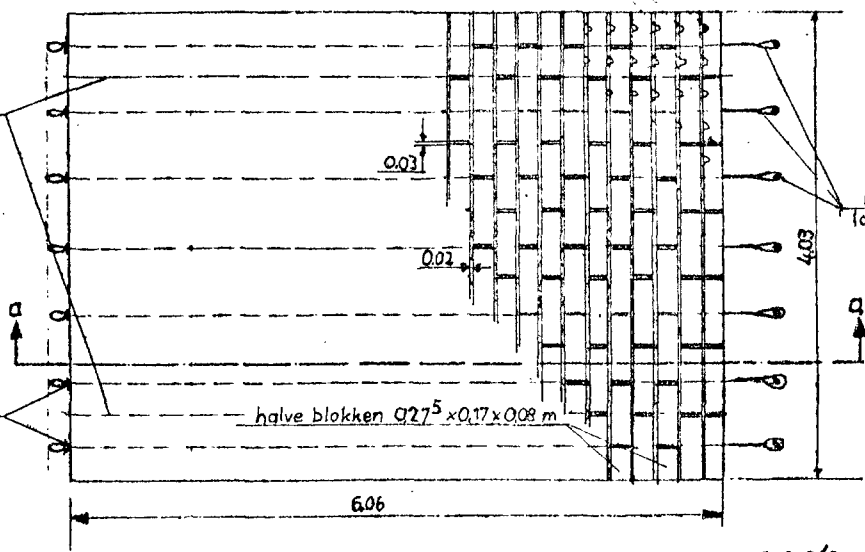
verbinding hol en dal

2 gegalvaniseerde draden
Ø 5 mm lang 7,00 m

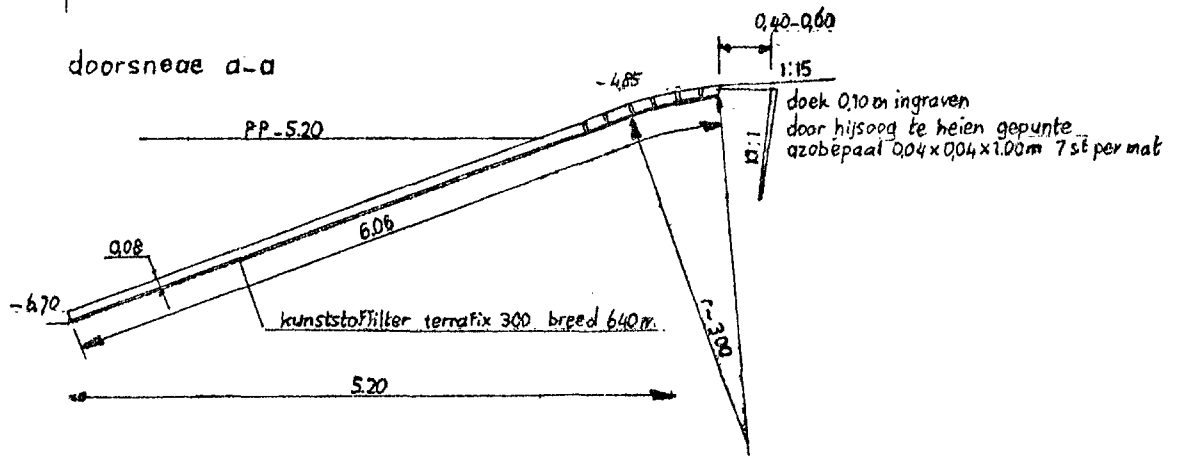
remanitdraden Ø 5 mm
lang 7,00 m, hijssoog gelast

strijkplaat 48x48x4 mm
met ring

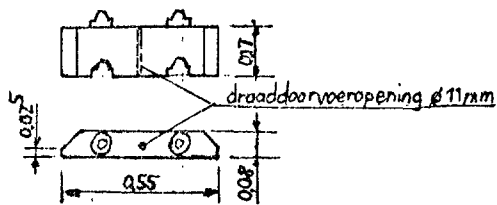
halve blokken 0,275 x 0,17 x 0,08 m



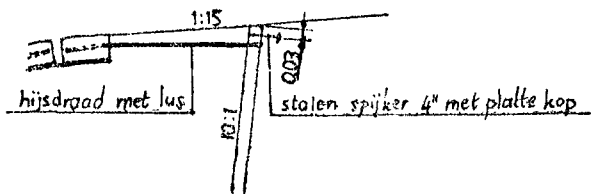
doorsnede a-a



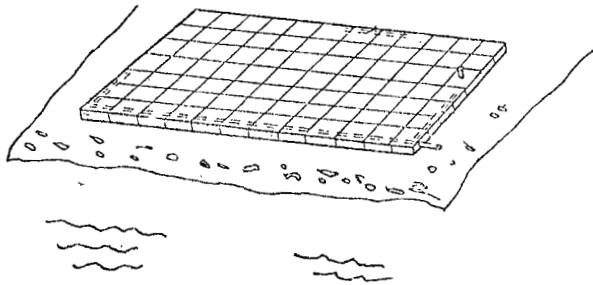
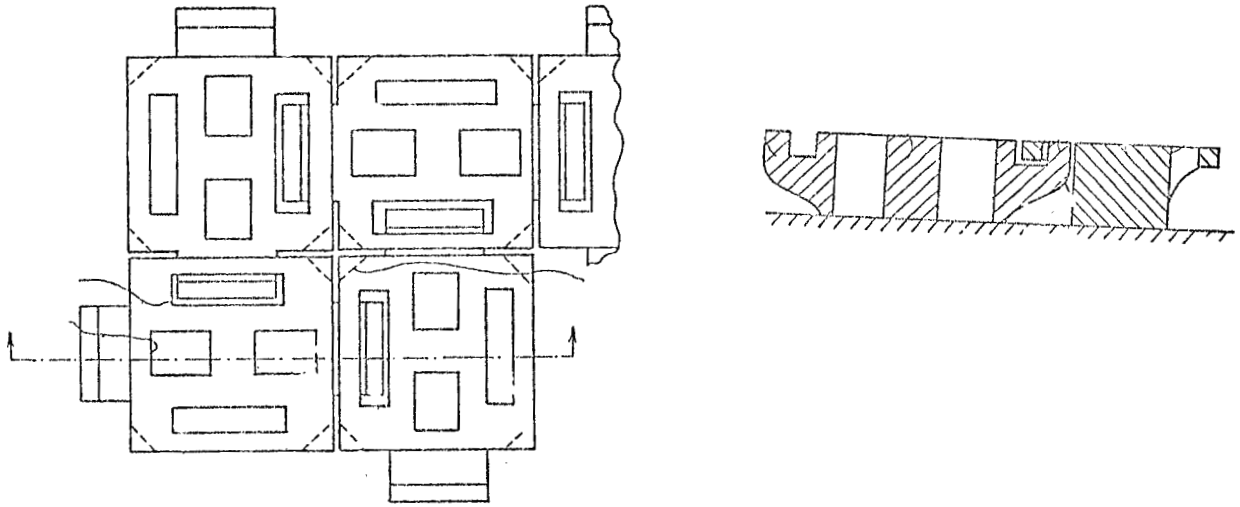
detail blok



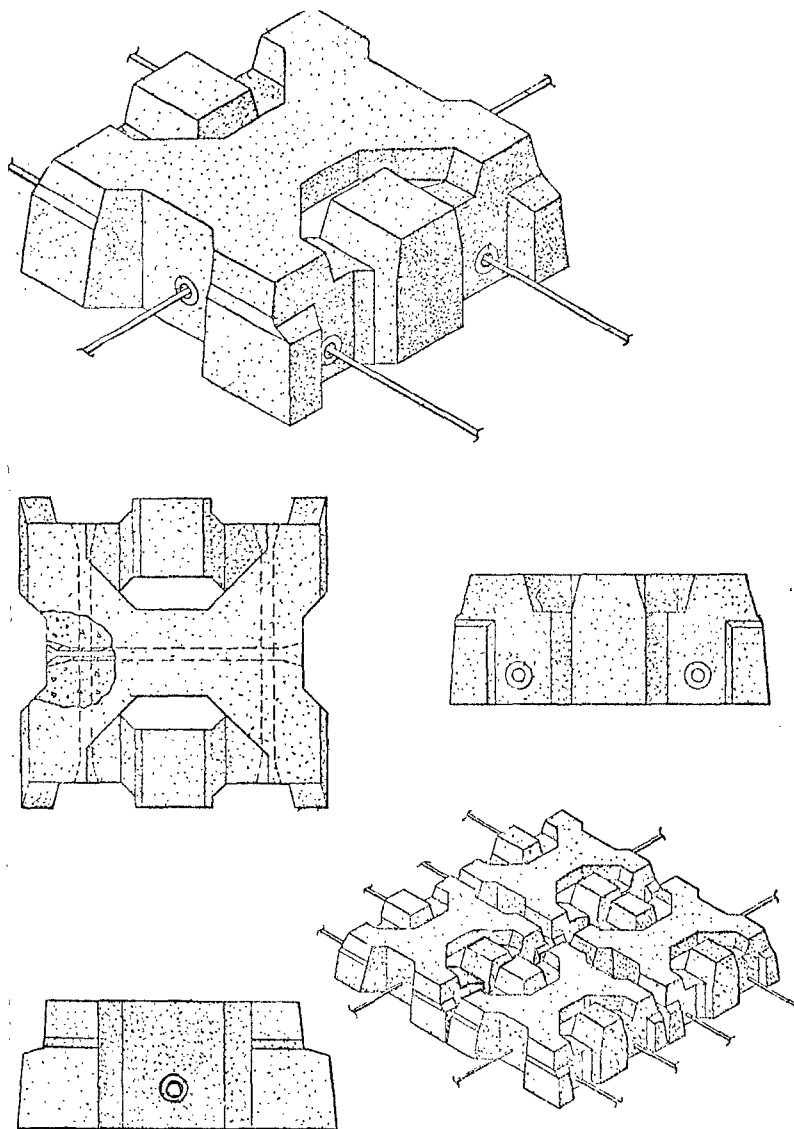
detail bevestiging hijsdraad



figuur 1.32. geprefabriceerde mat, type "Terrafix"

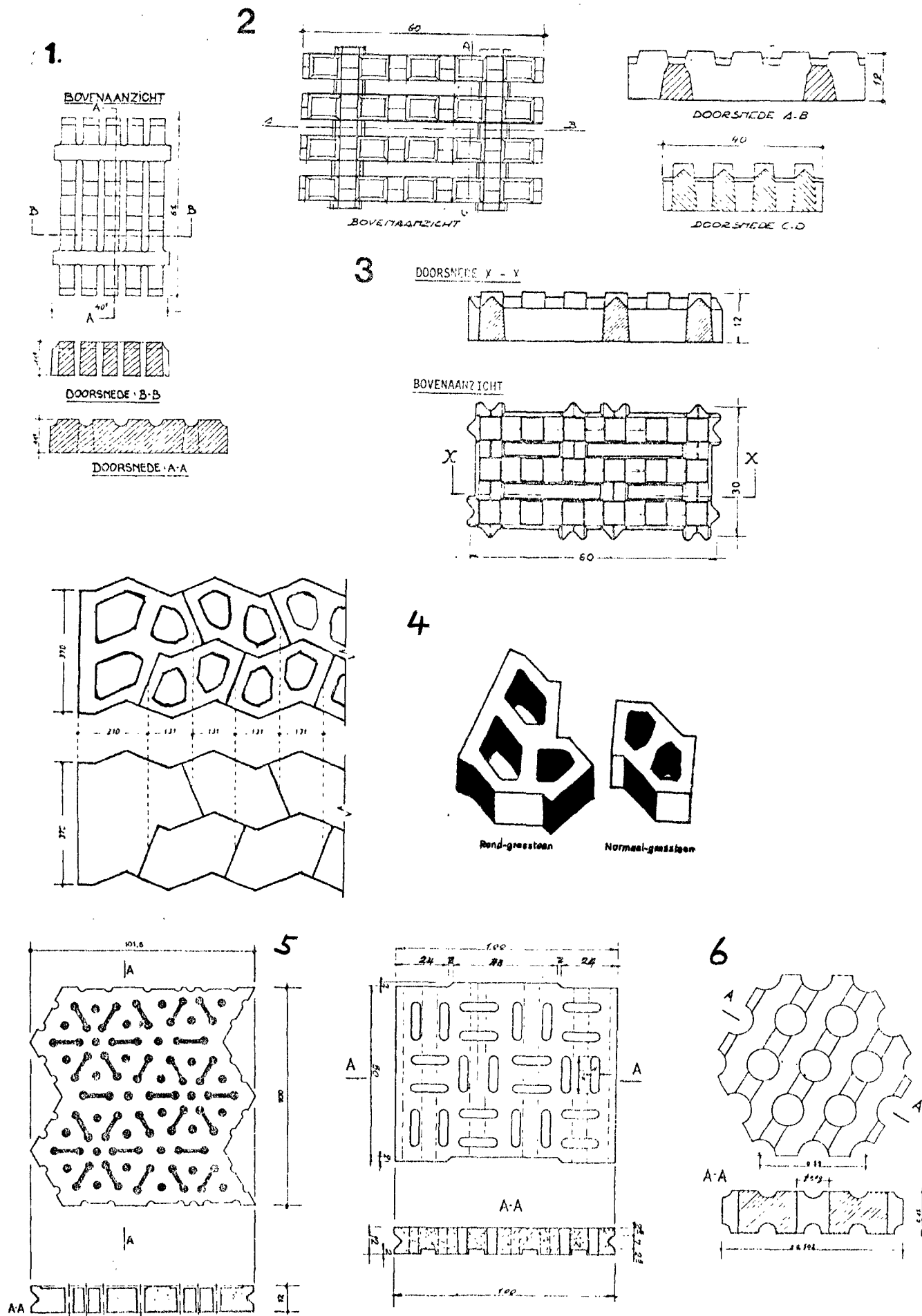


figuur 1.33. systeem met in elkaar grijpende blokken



figuur 1.34. blokken door draden aan elkaar verbonden

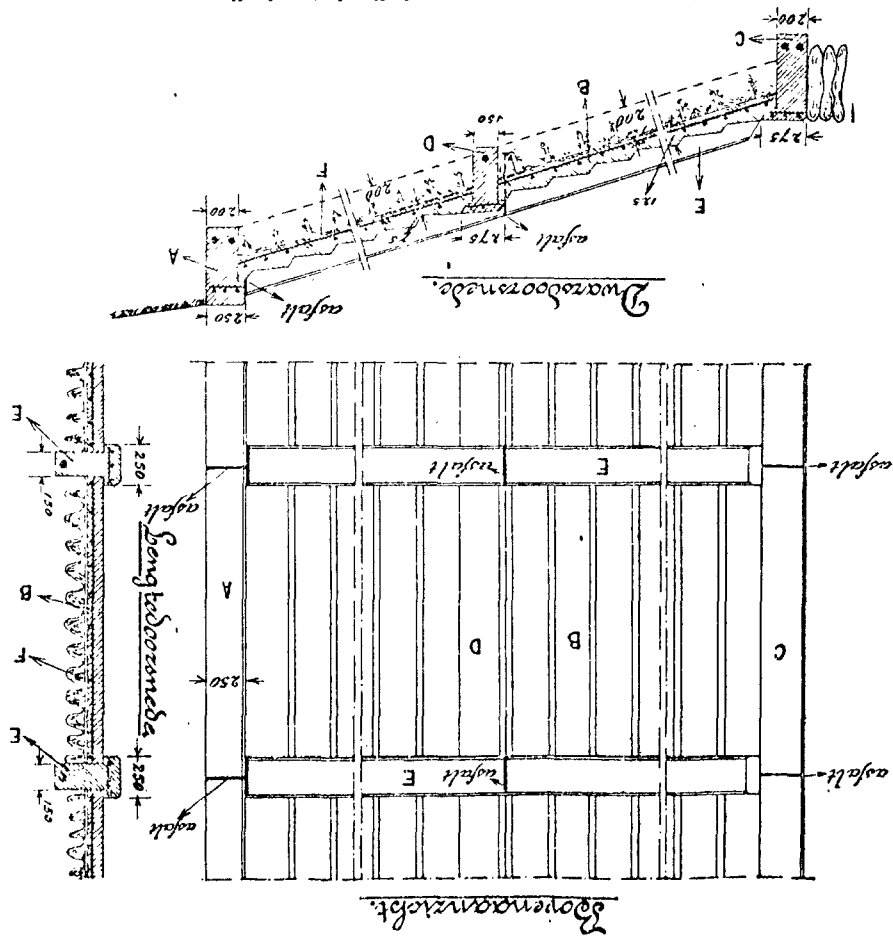
1.2.5. Doorgroeistenen



figuur 1.35. voorbeelden van doorgroeistenen

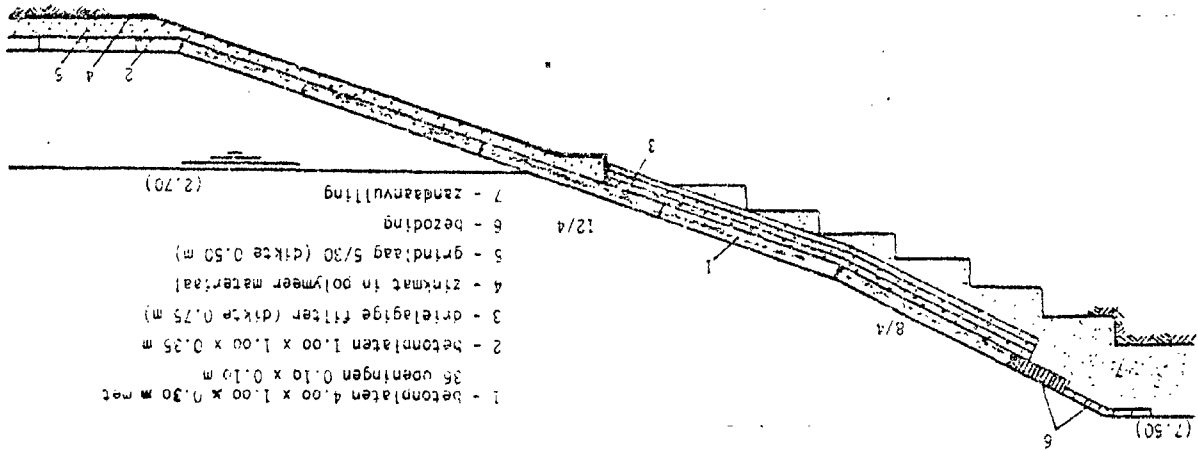
1.3. Platvormige elementen

1.3.1. Gewapend beton



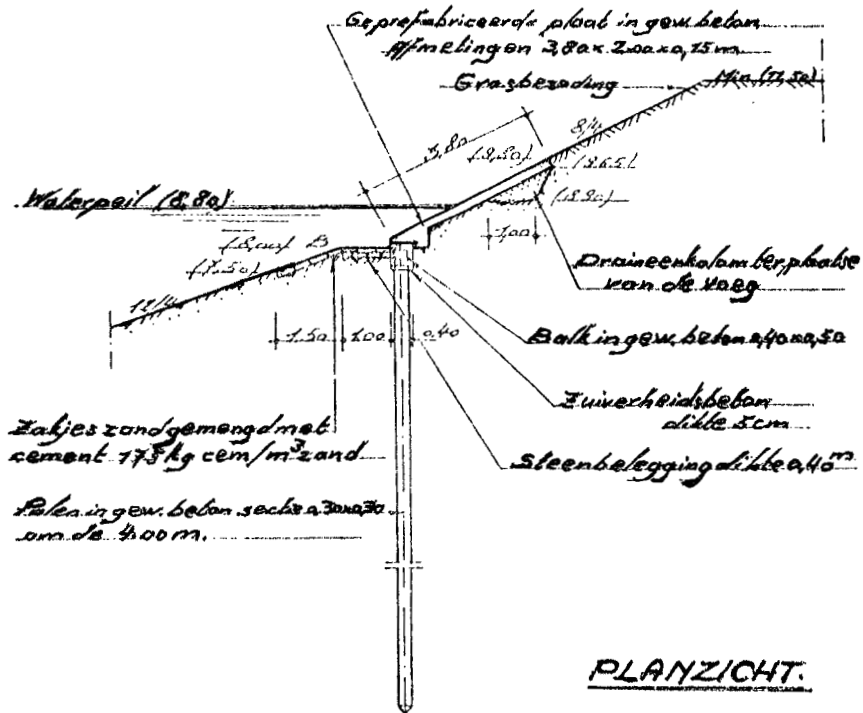
Figuur 1.36. trapjesglooiing van de Muralt

Algemeen ontwerp van een balkenbetonglooiing.

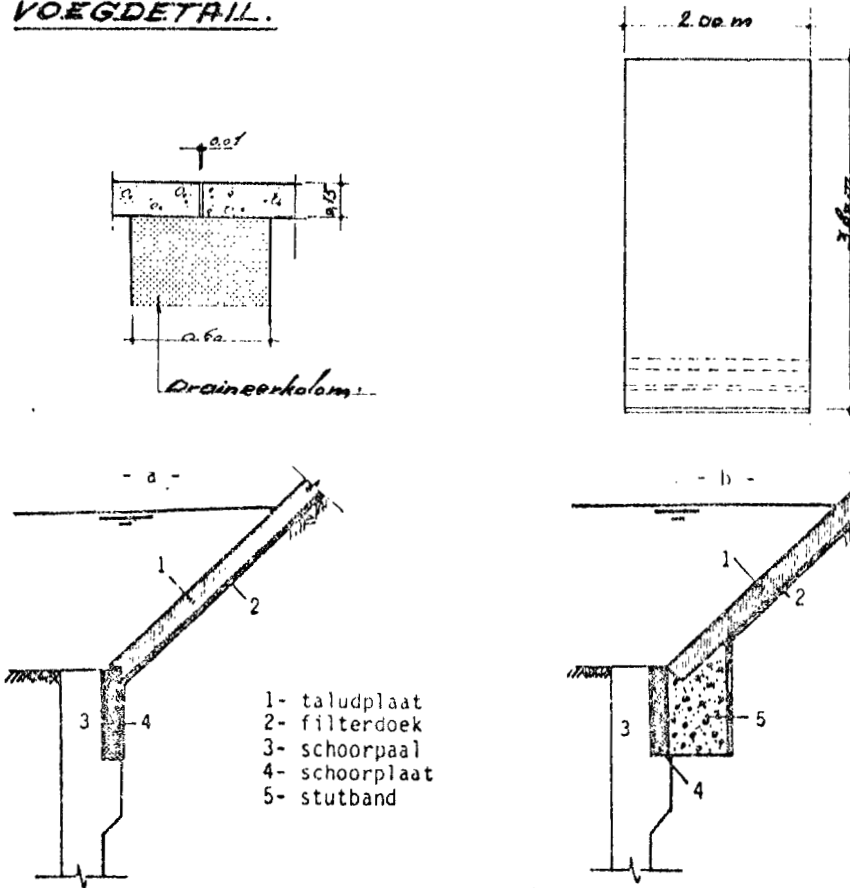


Figuur 1.37. waterwegprofiel vervedigd met grote betonplaten

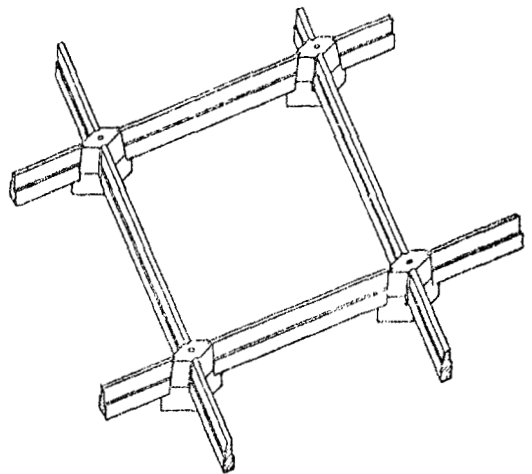
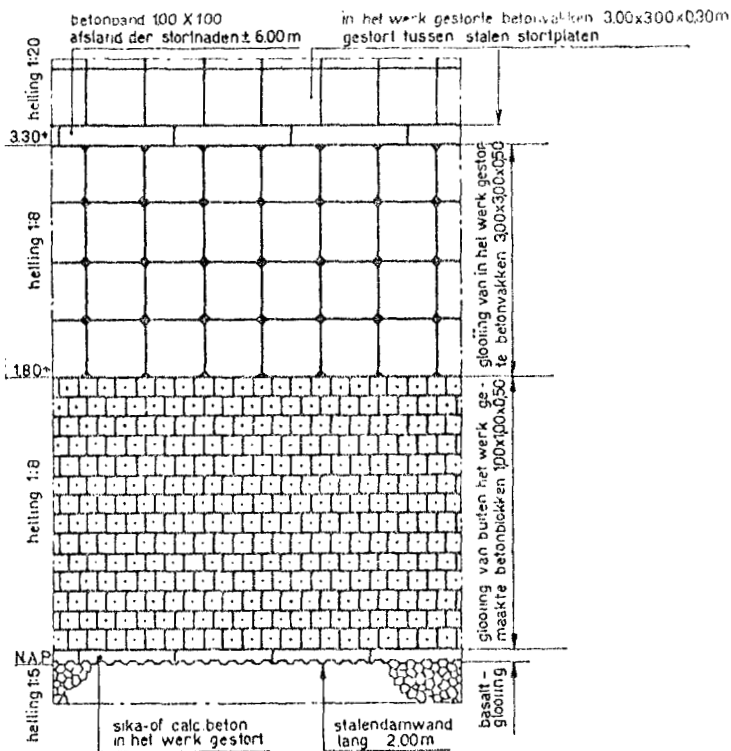
Voorbeeld van verdediging met grote prefabbetonplaten



VOEGDETAIL.

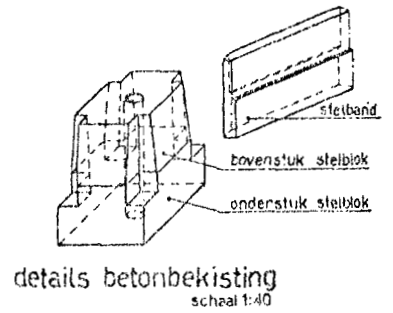
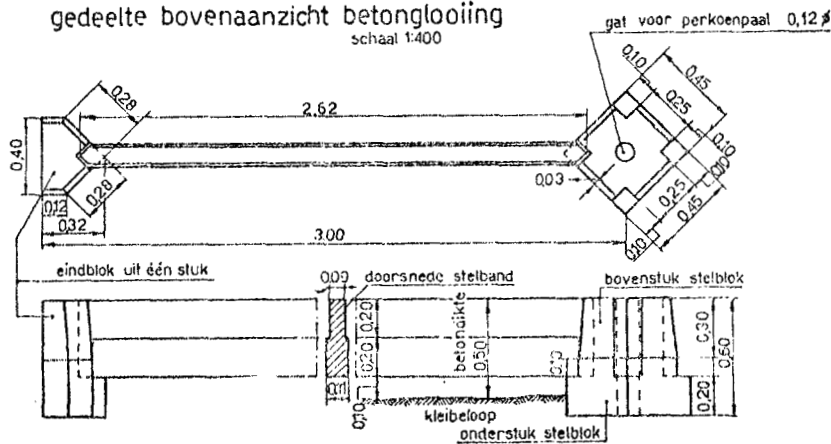


figuur 1.38. voorbeelden van toepassing van betonplaten bij waterwegen



aanzicht gestelde betonbekisting
schaal 1:100

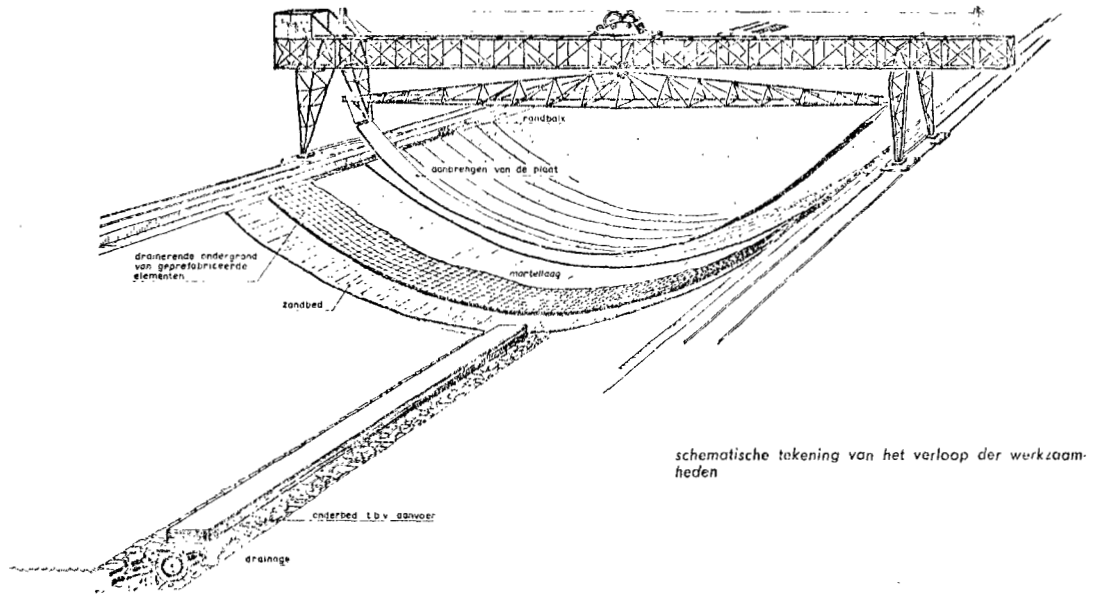
gedeelte bovenaanzicht betonglooiing
schaal 1:400



details betonbekisting
schaal 1:40

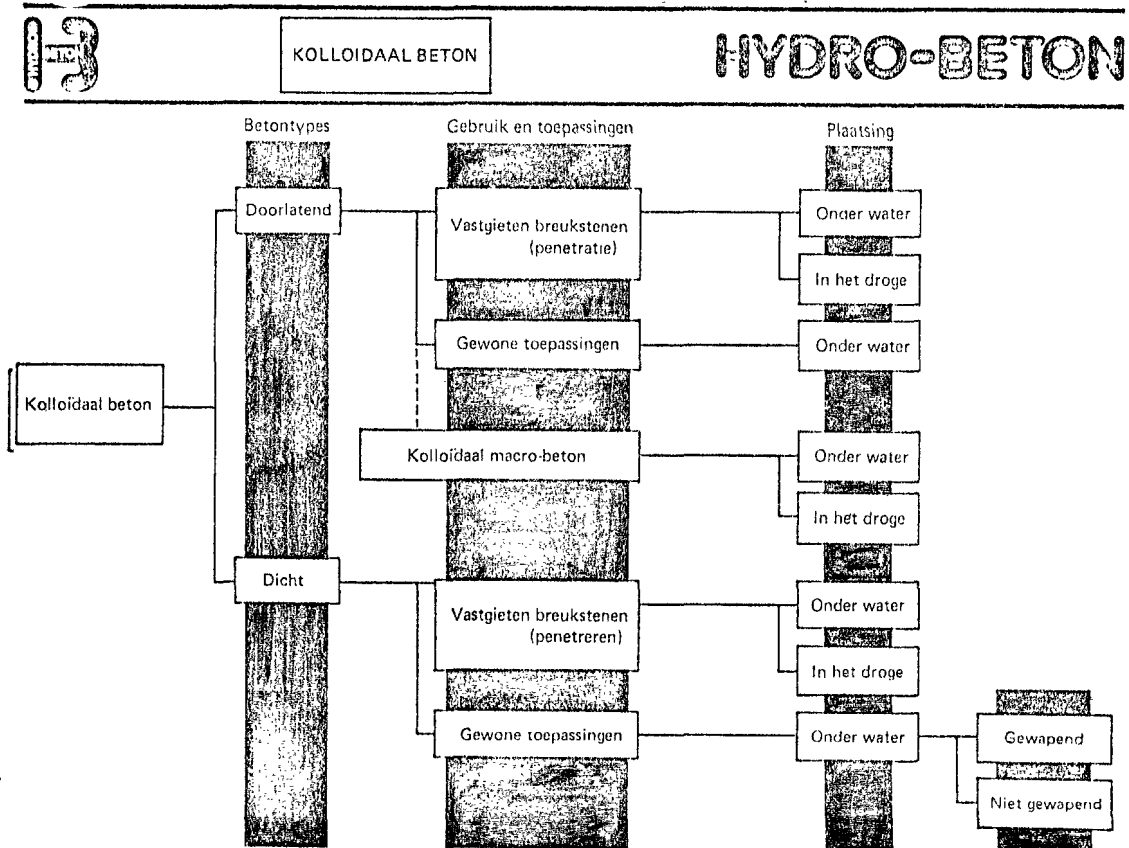
figuur 1.39. toepassing van betonplaten op de Westkapelse Zeewering;
in het werk gestort

1.3.2. Voorgespannen beton



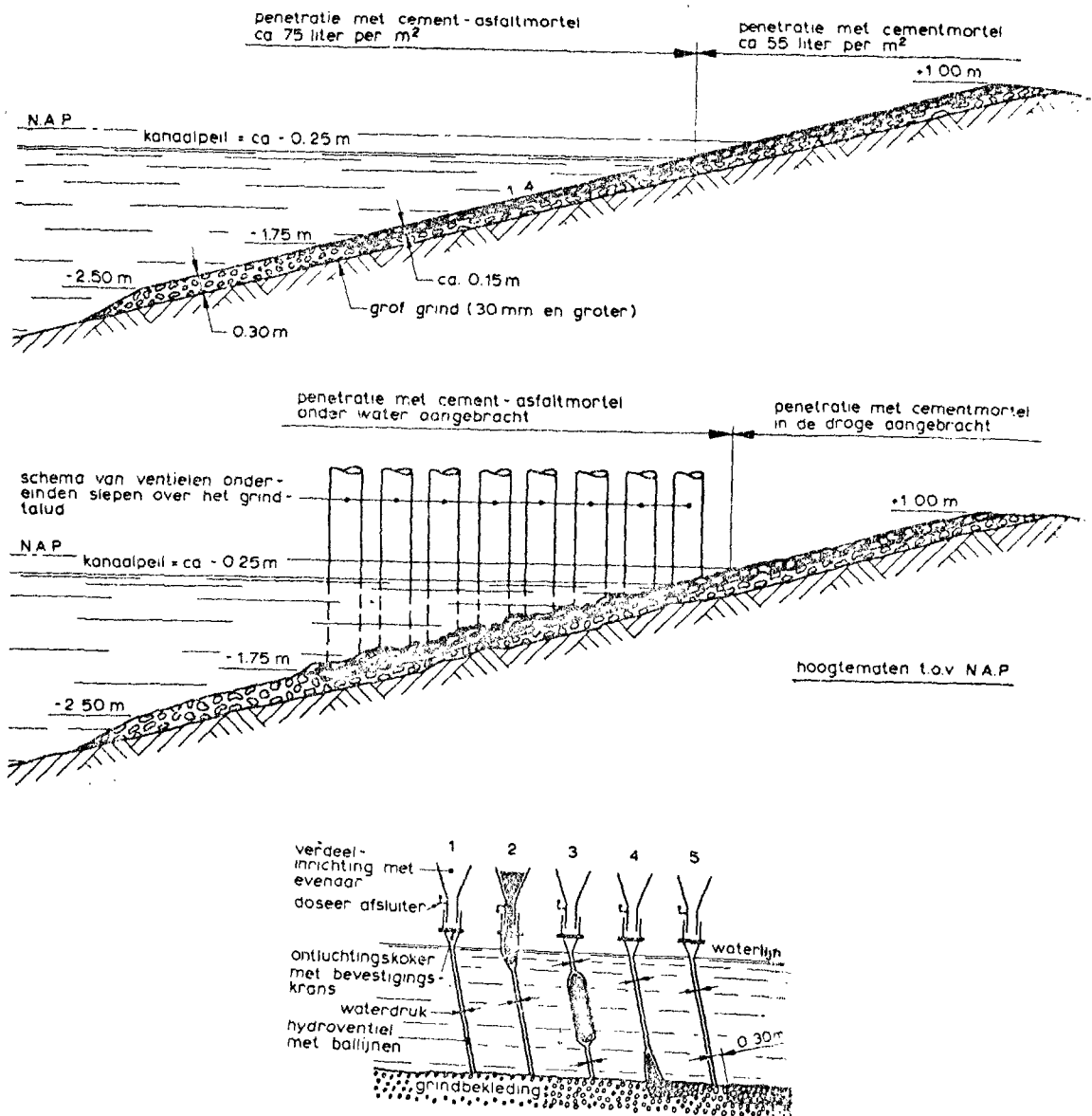
figuur 1.40. dunne voorgespanning betonplaten (Italiaanse toepassing)

1.4. Ononderbroken plaatvorm



Figuur 1.41. Kolloïdaal beton

Door een speciale toevoeging en/of menging wordt een beton verkregen welke, bij niet te grote stroomsnelheid, niet ontmengt bij het storten onder water



figuur 1.42. penetratie van grof grind, Prepakt-cementmortel

Hoofdstuk 2 - Beslissingssysteem tussen alternatieve oplossingen

2.1. Inleiding

Teneinde de toepassing van een bepaald type bekleding onder bepaalde omstandigheden te kunnen beoordelen, is getracht een beslissingssysteem op te zetten.

Bij de keuze uit diverse alternatieven zal een aantal beoordelingscriteria meespelen, onder te verdelen in technische en financiële criteria. Het hier gegeven beslissingssysteem richt zich hoofdzakelijk op de technische criteria.

Omdat de diverse technische criteria niet allemaal een even zware rol bij de uiteindelijke keuze spelen, worden waarderings- en weegfactoren vastgesteld. Tenslotte worden de diverse alternatieven getoetst aan de beoordelingscriteria en tezamen met de hiervoor genoemde weegfactoren levert dit een technisch waarde-oordeel op.

De aanpak kan globaal als volgt worden onderverdeeld:

1. keuze van de algemene beoordelingscriteria en sub-criteria
2. bepaling van de waarderingsfactoren voor de algemene criteria
3. bepaling van de waarnemingsfactoren voor de sub-criteria
4. keuze van de alternatieven
5. toetsing van de verschillende alternatieven aan de sub-criteria
6. interpretatie.

Allereerst zal, teneinde de werkwijze te verduidelijken, op een abstracte wijze een hypothetisch voorbeeld worden uitgewerkt.

Vervolgens worden aanvullende opmerkingen gemaakt ten behoeve van de toepassing van de methode op het gebied van de waterkeringen.

2.2. Beschrijving van de werkwijze

2.2.1. Keuze van de algemene beoordelingscriteria en sub-criteria

Wat de keuze van de diverse criteria betreft moet worden gewaakt voor afhankelijkheid, want dan wordt hetzelfde criterium dubbel geteld. Ook dient het aantal algemene beoordelingscriteria niet te groot te zijn, daar anders het risico bestaat dat de scores van de diverse alternatieven geen significante verschillen meer vertonen.

Het bepalen van de beoordelingscriteria kan in twee stappen gebeuren:

stap 1: bepaling van algemene criteria (eisen) waaraan in de betreffende situatie voldaan moet worden

stap 2: detaillering van wat met stap 1 wordt bedoeld, dus bepaling van de sub-criteria.

Stel in dit hypothetische voorbeeld:

stap 1: de algemene criteria: a, b, c, d, e

stap 2: de sub-criteria: a1, a2, b1, b2, c1, c2, d1, d2, e1, e2, 23.

N.B. In een reëel geval dienen de diverse criteria volledig te worden omschreven, waarbij het 'waarom' van het gepostuleerde criterium duidelijk naar voren moet komen. Hierdoor kan men verder volstaan met een meer abstracte aanduiding.

2.2.2. Bepaling van de waarderingsfactoren voor de algemene criteria

Bij de bepaling van deze waarderingsfactoren moet men een zekere situatie in gedachten hebben, waardoor de omstandigheden, randvoorwaarden en dergelijke vastliggen.

Alleen dan kan men de diverse criteria tegen elkaar afwegen.

Er wordt in dit voorbeeld slechts één situatie beschouwd: situatie I.

Voor de bepaling van de waarderingsfactoren bij de algemene criteria staat een tweetal methoden ter beschikking:

1. de matrix-methode
2. de grafische methode.

ad 1 - matrix-methode

In een matrix worden de diverse criteria twee aan twee op belangrjkheid tegen elkaar afgewogen en daarna wordt aan de belangrijkste (zwaarste) een '1' en aan de minder belangrijke (lichtste) een '0' toegekend.

Zo is bijvoorbeeld in figuur 2.1. criterium a. belangrijker dan b. (matrix-coördinaat (1,2) heeft de waarde '1' gekregen en coördinaat (2,1) de waarde '0').

Men moet een asymmetrisch beeld rondom de hoofddiagonaal krijgen, hetgeen een handig hulpmiddel is bij de controle of men de matrix wel consistent heeft ingevuld.

De horizontale optelling geeft de belangrjkheid aan van de algemene criteria: de waarderingsfaktor (A). De diagonaalelementen worden hierbij meegeteld.

waarderingstabel algemene criteria							
algemene criteria		a	b	c	d	e	waardering (A)
		1	2	3	4	5	
a	1	1	1	1	1	1	5
b	2	0	1	1	1	1	4
c	3	0	0	1	1	0	2
d	4	0	0	0	1	0	1
e	5	0	0	1	1	1	3

situatie I

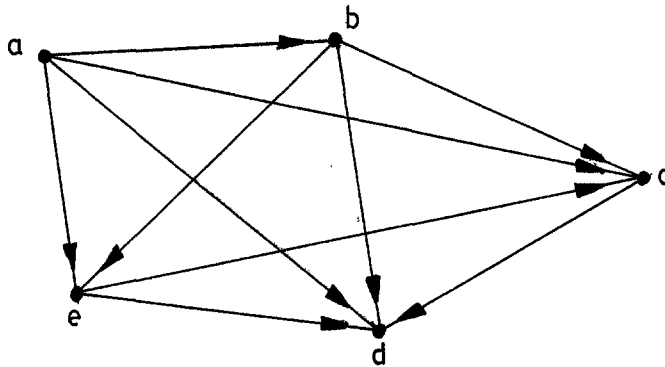
figuur 2.1.

ad 2 - grafische methode

Bij deze methode wordt een pijlenschema toegepast.

De notatie $a \rightarrow b$ wil zeggen: a is belangrijker dan b.

We krijgen dan het volgende schema:



figuur 2.2.

Het aantal uitgaande lijntjes per criterium geeft de belangrijkheid van elk criterium aan.

In dit geval is de rangschikking:

<u>criterium</u>	<u>waardering</u>
a	4 + 1 = 5
b	3 + 1 = 4
c	1 + 1 = 2
d	0 + 1 = 1
e	2 + 1 = 3

2.2.3. Bepaling van de waarderingsfactoren voor de sub-criteria

Per algemeen criterium heeft men 10 punten beschikbaar om over de bijbehorende sub-criteria te verdelen, zie figuur 2.3.

Ook hier geldt, evenals bij punt 2.2.2., dat men deze afweging alleen kan maken wanneer men een bepaalde situatie in gedachten heeft.

waarderingstabel sub-criteria		
algemene criteria	sub-criteria	waarderingsfaktor (B)
a	a1	5
	a2	5
b	b1	6
	b2	4
c	c1	3
	c2	4
	c3	3
d	d1	3
	d2	7
e	e1	2
	e2	3
	e3	5

situatie I

figuur 2.3.

2.2.4. Keuze van alternatieve oplossingen

Laten we aannemen, dat er drie alternatieven zijn: U, V, W.

De keuze van deze alternatieven is gebaseerd op de voorhanden zijnde reële technische mogelijkheden.

2.2.5. Toetsing van de diverse alternatieven aan de criteria

Per sub-criterium vragen we ons af in welke mate de verschillende alternatieven aan dit criterium voldoen. Dit wordt uitgedrukt in een waarderingsfaktor (D).

De volgende codering wordt voor deze waarderingsfaktor voorgesteld:

- 2 = slecht
- 1 = matig
- 0 = neutraal/niet van toepassing
- + 1 = redelijk
- + 2 = goed

Het een en ander kan in tabelvorm worden uitgewerkt, zie figuur 2.4. De invulling spreekt grotendeels voor zich.

De beoordelingsfaktor (E) is het produkt van de weegfaktor (C) en de waarderingsfaktor (D).

Sommatie per alternatief, van de getallen in de kolommen gemerkt met '(E)', geeft een beoordeling van het alternatief op basis van de technische eigenschappen.

Vaak is het interessant om de kosten van elk alternatief te delen door het verkregen aantal punten, om zodoende een inzicht te krijgen inzake de kosten per punt. Hoe lager hoe beter.

2.2.6. Interpretatie

In het in figuur 2.4. (zie volgend blad) uitgewerkte hypothetische voorbeeld blijkt alternatief 'V' technisch het best te zijn.

Uit het oogpunt van kosten blijkt alternatief 'U' het voordeligst te zijn. Wanneer echter kwaliteit en kosten gekoppeld worden komt alternatief 'W' als beste uit de bus (per waardepunt de geringste kosten).

Het uiteindelijke besluit ligt in handen van het management, welke beslissen moet of aan de technische aspecten dan wel aan de financiële aspecten voorrang wordt gegeven.

KEUZE-TABEL; situatie I

algemene criteria	waardingsfaktor (A)	sub-criteria	waardingsfaktor (B)	weegfaktor (C) = (A x B)	ideaalfactor (+2 x C)	Alternatieven					
						U		V		W	
						(D)	(E) = (C x D)	(D)	(E) = (C x D)	(D)	(E) = (C x D)
a	5	a1	5	25	+ 50	+ 1	+ 25	+ 2	+ 50	+ 1	+ 25
		a2	5	25	+ 50	+ 2	+ 50	+ 1	+ 25	+ 1	+ 25
b	4	b1	6	24	+ 48	- 1	- 24	+ 1	+ 24	+ 2	+ 48
		b2	4	16	+ 32	0	0	- 1	- 16	+ 2	+ 32
c	2	c1	3	6	+ 12	- 2	- 12	- 1	- 6	- 1	- 6
		c2	4	8	+ 16	- 2	- 16	- 1	- 8	0	0
		c3	3	6	+ 12	+ 2	+ 12	0	0	- 2	- 12
d	1	d1	3	3	+ 6	+ 1	+ 3	+ 1	+ 3	+ 1	+ 3
		d2	7	7	+ 14	+ 2	+ 14	+ 1	+ 7	+ 2	+ 14
e	3	e1	2	6	+ 12	- 2	- 12	+ 1	+ 6	0	0
		e2	3	9	+ 18	- 1	- 9	+ 1	+ 9	- 1	- 9
		e3	5	15	+ 30	0	0	+ 2	+ 30	- 2	- 30
sommatie: ΣE					+ 300		+ 31		+ 124		+ 90
som aanleg + gekapitaliseerde onderhoudskosten: f,-						f 1020,--		f 1900,--		f 1300,--	
$\alpha = f,-/\Sigma E$						+ 32,9		+ 15,3		+ 14,4	

Figuur 2.4

2.3. Opmerkingen bij het gebruik van de methode op het gebied van de waterkeringen

Teneinde de mogelijkheden van de toepassing van de in 2.2. beschreven keuze-techniek na te gaan, wordt hier een aanzet gegeven voor een mogelijke uitwerking. De lezer kan eventueel zelf naar eigen inzicht aanvullingen en/of wijzigingen aanbrengen.

2.3.1. Keuze van de algemene beoordelingscriteria en sub-criteria

Voorgesteld wordt de volgende algemene criteria in de beschouwingen op te nemen:

- a. 'sterkte' van de bekleding
- b. flexibiliteit van de bekleding ten opzichte van de ondergrond
- c. flexibiliteit in de maatvoering
- d. snelheid bij het aanbrengen van de bekleding
- e. beperking van de golfoploop
- f. reparatiemogelijkheden
- g. hergebruik als bekleding
- h. esthetische overwegingen
- i. afscherming van de ondergrond
- j. bestendigheid tegen vandalisme.

De volgende sub-criteria worden voorgesteld:

- a.1. stabiliteit van de bekleding loodrecht op het talud onder invloed van de golfbelasting
- a.2. stabiliteit van de bekleding onder invloed van interne statische of quasi-statische grondwaterdrukken
- a.3. stabiliteit onder invloed van externe stromingen
- a.4. mechanische sterkte van de bekleding

- b.1. het kunnen volgen van differentiële zettingen van de ondergrond
- b.2. het kunnen volgen van plaatselijke ontgrondingen.
- ad c.geen sub-criteria
- ad d.geen sub-criteria
- e.1. bewust aangebrachte ruwheid
- e.2. open structuur van de bekleding
- f.1. reparatie door vervanging met dezelfde constructie-delen of materialen
- f.2. reparatie door toepassing van andere constructie-delen of materialen
- f.3. opnieuw aanbrengen van dezelfde bekleding
- ad g.geen sub-criteria
- ad h.geen sub-criteria
- ad i.geen sub-criteria
- ad j.geen sub-criteria.

Nadere beschrijving van de diverse criteria.

a. 'sterkte' van de bekleding

Omdat een exacte berekening van de 'sterkte' van de bekleding (nog) niet tot de mogelijkheden behoort, moet deze ook op een meer subjectieve wijze worden beoordeeld.

- a.1. stabiliteit van de bekleding loodrecht op het talud onder invloed van de golfbelasting

De bedoelde stabiele ligging wordt bepaald door de dikte, de samenhang, de onderliggende constructie en de doorlatendheid van de bekleding. Uitgaande van een bepaalde soortelijke massa van het bekledingsmateriaal zal bij een grotere dikte van de bekleding deze stabielere zijn. De onderliggende constructie, granulair filter of klei, bepaalt of er wel of niet een drukopbouw onder de bekleding mogelijk is ten gevolge van de golfbelasting.

Bij een ondergrond van klei sluit de bekleding nauw aan, waardoor het geheel stabiel wordt.

Daarentegen kan in een granulair filter de golfbelasting zich onder de bekleding voortplanten, waardoor de blokken eruit gedrukt kunnen worden. Door de bekleding zeer doorlatend te maken kunnen de overdrukken weer begrensd worden gehouden, hetgeen weer een vergrote stabiliteit tot gevolg heeft.

Bij een blokken bekleding kan een 'interlock' tussen de elementen de stabiliteit van de bekleding ook vergroten. Zonder deze bewust aangebrachte 'interlock' is men afhankelijk van de onderlinge wrijving tussen de blokken, waarin echter een grote spreiding aanwezig kan zijn. Bij de beoordeling van het een en ander moet een minimale dikte van de bekleding worden nagestreefd.

a.2. stabiliteit van de bekleding onder invloed van interne statische of quasi-statische grondwaterdrukken

In de waterkering kan een hoge freatische lijn aanwezig zijn, ten gevolge van bijvoorbeeld getijwerking of soms door aandrang uit het achterland.

Bij een gesloten bekleding kan dit grote overdrukken opleveren, waardoor de bekleding opgedrukt kan worden.

a.3. stabiliteit onder invloed van externe stromingen

Bij de aanwezigheid van sterke stromingen over het talud kunnen vooral losliggende elementen met een ruw oppervlak aan de haal gaan.

a.4. mechanische sterkte van de bekleding

Door het overschrijden van de trek- of druksterkte van het bekledingsmateriaal kan dit beschadigd worden.

Bij de beoordeling van dit aspect dient alleen de beschadiging in het werk te worden beschouwd. Beschadigingen tijdens het transport worden buiten de beoordeling gelaten.

b. flexibiliteit van de bekleding ten opzichte van de ondergrond

Wanneer de ondergrond plaatselijk verzakt en de bekleding dit niet kan volgen, ontstaan er holten.

Hierdoor wordt de constructie ernstig verzwakt bij bijvoorbeeld een externe belasting door golfklappen. 'Interlock' kan in dit verband nadelig zijn.

b.1. het kunnen volgen van differentiële zettingen van de ondergrond

Differentiële zettingen kunnen ontstaan ten gevolge van een ongelijke verdichting, een inhomogene samenstelling van de ondergrond of door een variabele grootte van de ophooghoogte.

Ook kan een oorzaak worden gevonden in plaatselijk aangrijpende golfbelastingen (golfklappen).

b.2. het kunnen volgen van plaatselijke ontgrondingen

Ontgrondingen kunnen door het uitspoelen van de ondergrond door de bekleding ontstaan.

Ook kunnen plaatselijke calamiteiten opgetreden zijn, zoals plaatselijk uitgeslagen delen van de bekleding of beschadigde aanliggende constructiedelen.

Een andere oorzaak van de ontgrondingen kan gevonden worden in het graven van bepaalde dieren.

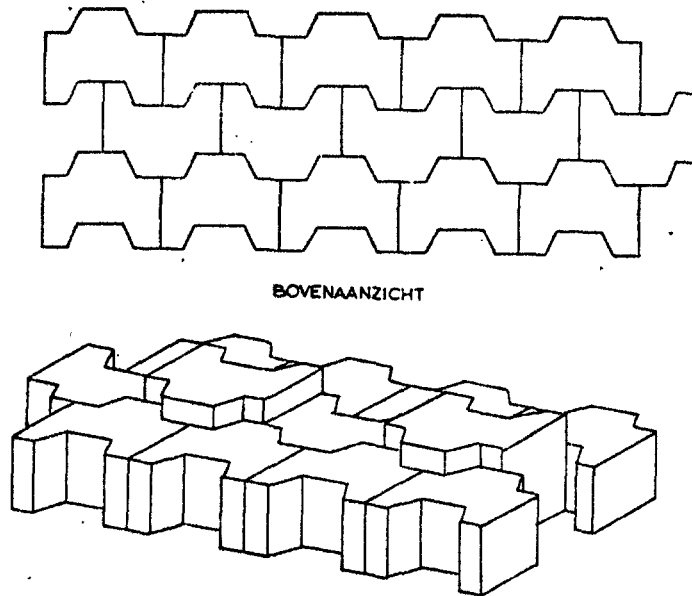
c. flexibiliteit in de maatvoering

Bepaalde bekledingssystemen zijn zodanig opgezet dat men zeer nauwkeurig moet werken, omdat de toleranties vrijwel nihil zijn.

Het gevolg is dan vaak dat men plaatselijk open voegen verkrijgt of de toevlucht tot lapmiddelen moet nemen.

Hierbij kan het volgende onderscheid worden gemaakt:

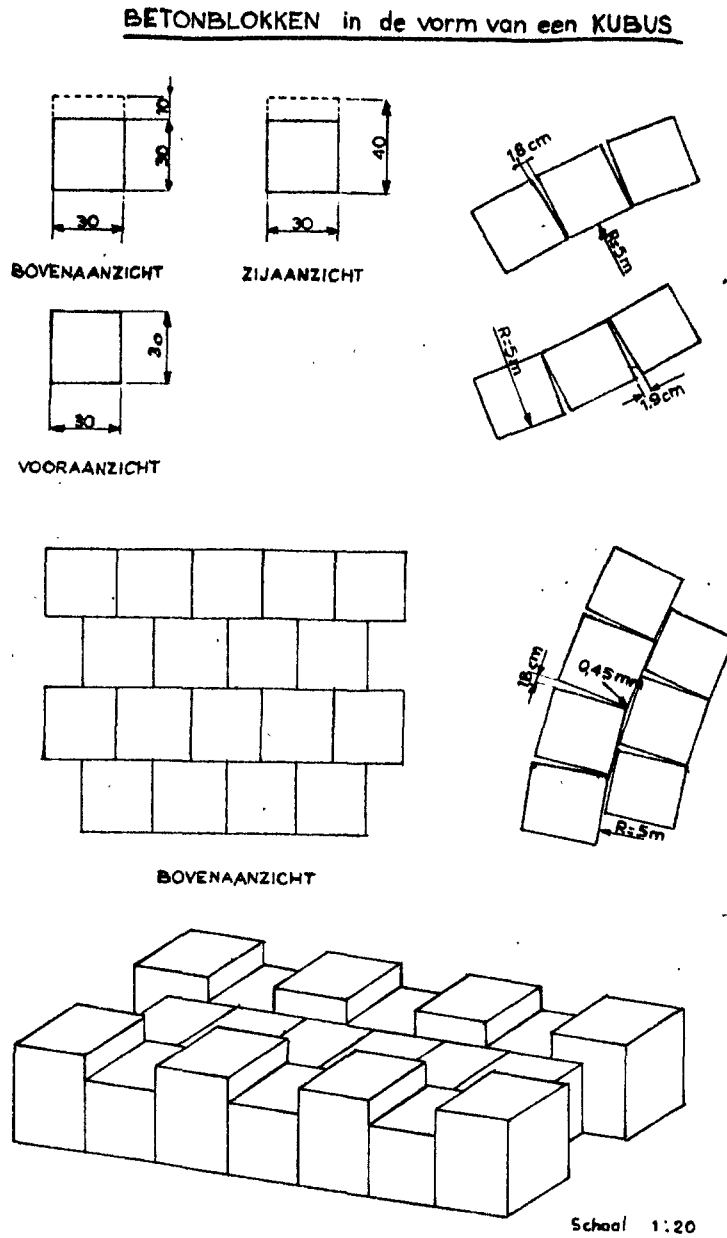
1. systemen met 'vierzijdige maatvoering', zie figuur 2.5.



Schaal 1:20

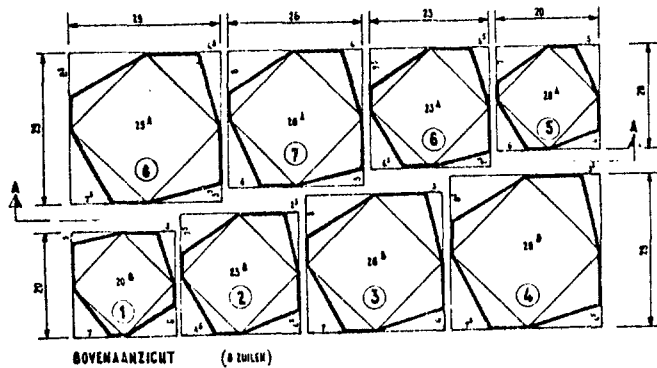
figuur 2.5. voorbeeld 'vierzijdig maatvoerend' systeem

2. systeem met 'tweezijdige maatvoering', zie figuur 2.6.



figuur 2.6. voorbeeld tweezijdig maatvoerend systeem

3. systeem met vrije maatvoering, zie figuur 2.7.



figuur 2.7. voorbeeld met vrije maatvoering

d. snelheid bij het aanbrengen van de bekleding

De snelheid van het aanbrengen is onder andere afhankelijk van het feit of een machinale verwerking mogelijk is.

Bij het gebruik van prefab-elementen bepaalt de grootte hiervan ook in zekere mate de verwerkingssnelheid.

De snelheid kan van belang zijn omdat men maar een beperkte periode van het jaar voor de aanleg van een waterkering beschikbaar heeft.

e. beperking van de golfoploop

Wanneer men de golfoploop weet te beperken kan de bovenste begrenzing van de bekleding lager worden genomen. Bij een lagere golfoploop kan ook de kruinhoogte van de waterkering lager worden (de remming van de golfoploop moet dan echter ook over het bovendeel van het talud aanwezig zijn).

e.1. bewust aangebrachte ruwheid

Het golfoploopremmend vermogen van de bekleding kan verkregen worden door het aanbrengen van een zekere ruwheid, bijvoorbeeld door uitsteeksel of holten. Een bijkomend voordeel is dan een betere beloopbaarheid.

e.2. open structuur van de bekleding

Wanneer de bekleding een zekere open structuur bezit (poreusheid), wordt door het mechanisme van berging van water de golfoploop geremd.

f. reparatiemogelijkheden

Het is, vanwege de nog gebrekkige kennis op het gebied van de dijkbekledingen, altijd mogelijk dat door welke oorzaak dan ook schade is opgetreden. Deze schade dient gemakkelijk en snel verholpen te kunnen worden, waarbij het gerepareerde deel niet van een veel mindere kwaliteit mag zijn of een geheel ander uiterlijk mag hebben.

f.1. reparatie door vervanging met dezelfde constructie-delen of materialen

Bij een blokkensysteem vervangt men bijvoorbeeld de beschadigde of uitgeslagen blokken door nieuwe van hetzelfde type.

f.2. reparatie door toepassing van andere constructie-delen of materialen

Hier kan bijvoorbeeld worden gedacht aan het in het werk aanstorten van uitgeslagen of beschadigde blokken.

f.3. opnieuw aanbrengen van dezelfde bekleding

Bij een blokken bekleding kan men hierbij denken aan het herzetten van deze blokken.

g. hergebruik als bekleding

Het kan onder bepaalde omstandigheden, bijvoorbeeld bij tijdelijk werk, financieel aantrekkelijk zijn dat de bekleding voor hergebruik elders geschikt is.

h. esthetische overwegingen

De gekozen bekleding mag geen storend element vormen in het uiterlijk van de waterkering. Er kunnen dus soms speciale eisen gesteld worden aan het uiterlijk van de bekleding.

i. afscherming van de ondergrond

De bekleding moet zodanig zijn opgebouwd dat de ondergrond voldoende wordt beschermd (ook op langere termijn), omdat de ondergrond als fundering voor de bekleding een onmisbaar onderdeel van de constructie is. Bij een bekleding van blokken geplaatst op een granulair filter moet er voor worden gezorgd dat de voegen of andere openingen (afgeschuinde hoeken, gaten in het blok) niet zodanig grote afmetingen hebben dat het filter door de bekleding heen gespoeld kan worden.

Bij een bekleding direkt op klei gelegd, dienen de voegen zo klein mogelijk te zijn, teneinde corrosie van de klei te voorkomen.

j. bestendigheid tegen vandalisme

Bij losliggende blokken kunnen deze bijvoorbeeld door vissers worden verwijderd.

Een bekleding waarop weinig houvast is te krijgen, is wat dit aspect betreft in het voordeel.

2.3.2. Bepaling van de waarderingsfactoren voor de algemene criteria

Allereerst dient men de situatie van de waterkering goed te omschrijven. Te denken valt hierbij bijvoorbeeld aan:

- ligging aan diep of ondiep water, in verband met grootte van de golfbelasting
 - grootte van de getijwerking
 - verwacht gedrag van de ondergrond
 - ligging freatische lijn in de waterkering
 - recht dijkvak of gekromd dijkvak
 - beschikbare tijd voor het aanbrengen van de bekleding
 - tijdelijke of permanente bekleding
- etc. etc.

Met de goed gedefinieerde situatie in het achterhoofd worden dan de algemene criteria gewogen, overeenkomstig de beschreven procedure(s) in paragraaf 2.2.

2.3.3. Bepaling van de waarderingsfactoren voor de sub-criteria

Voor de methode wordt verwezen naar 2.2.3. Wanneer bij een bepaald algemeen beoordelingscriterium geen sub-criterium is vermeld, wordt het algemene criterium als zodanig gebruikt (de waarderingsfaktor (B) krijgt dan de waarde '10').

2.3.4. Keuze van alternatieve oplossingen

Bij de keuze van de diverse alternatieven dient ook vermeld te worden hoe de ondergrond is samengesteld, granulair filter of op klei.

Tenslotte kan de keuze-tabel opgesteld worden, zie figuur 2.4.

Hoofdstuk 3 - Het gedrag van beton

3.1. Inleiding

Tijdens het gebruik als dijkbekleding kan beton in kwaliteit achteruitgaan. De oorzaken hiervan kunnen van fysische, mechanische of chemische aard zijn. Aan deze schademechanismen zal de nodige aandacht worden besteed, waarbij vooral de vorst- en erosiebestendigheid van belang blijken te zijn. In de praktijk kunnen tegelijkertijd verschillende mechanismen werkzaam zijn.

Omtrent mengselontwerp, fabricageproces en dergelijke zal hier worden volstaan met enkele opmerkingen daar dit niet van direkt belang is voor de betrokkenen bij de keuze van het type dijkbekleding en ook omdat dit aspect van de betontechnologie voldoende ver is ontwikkeld en vastgelegd in handboeken en voorschriften.

3.2. Eigenschappen van betonspecie en verhard beton

Tijdens de keuze van de grondstoffen en produktie van betonnen elementen voor een dijkbekleding spelen verwerkbaarheid van de verse betonspecie alsmede economische aspecten een belangrijke rol.

De mate waarin een betonspecie zich laat verdichten is afhankelijk van een groot aantal factoren zoals soort en hoeveelheid cement, korrelvorm en korrelopbouw van het toeslagmateriaal en vooral de hoeveelheid water met eventuele hulpstoffen in de betonspecie.

Waterafscheiding ofwel 'bleeding' van de verse betonspecie kan door de keuze van een lagere waterhoeveelheid, het gebruik van hulpstoffen en door vergroting van het specifiek oppervlak van het mengsel worden tegengegaan.

De sterkte van het beton kan het best worden bepaald door het destructief te beproeven, als vervanging kunnen diverse niet-destructieve beproevingsmethoden dienen.

Ook voor de bepaling van rekenwaarden als elasticiteitsmodulus, krimp, kruip, slijtvastheid en dergelijke zijn standaardproeven in de laboratoria bekend.

Tenzij anders wordt aangegeven moet het beton waarvan het produkt wordt gemaakt, evenals het produkt zelf, voldoen aan de geldende voorschriften (zie lit. 8 en 22).

3.3. Fysische aantasting

3.3.1. Vorstbestendigheid

A l g e m e e n

Poreuze materialen - waaronder beton - kunnen bij daling van de temperatuur beneden 0°C worden beschadigd wanneer het daarin aanwezige water bevriest.

Over de precieze oorzaak van het optreden van deze schade zijn de meningen verdeeld.

Vroeger werd algemeen aangenomen dat deze schade het gevolg was van de volumevergroting bij de overgang van water naar ijs. Door onderzoekingen over de gehele wereld is het duidelijk geworden dat er meer mechanismen voor drukopbouw en, daardoor het ontstaan van schade, zijn.

Mogelijke mechanismen zijn:

a. volumetoeneming

a.1. water door ijs in zakvormige poriën ingesloten.

IJs van 0°C neemt een volume in dat ongeveer 1,1 keer groter is dan dat van een gelijke massa water van 0°C . Bij het bevriezen van water moet er dus een groter volume beschikbaar zijn. Wanneer nu de ingang van een poriënsysteem dichtvriest en het resterende poriënvolume kleiner is dan 1,1 keer het volume van het ingesloten water zal bij voortgaande ont-trekking van warmte eerst het gehele beschikbare volume worden ingenomen, waarna er een druk wordt opgebouwd.

Deze druk kan toenemen tot de smeltdruk bij de heersende temperatuur; af te lezen uit het p-T-diagram voor water, zie fig. 3.1.

Wanneer de opgebouwde druk in de poriën van het beton zodanige trekspanningen veroorzaakt dat de treksterkte van het beton wordt overschreden, treedt breuk op. Wegens de nauwe poriën in beton zal dit mechanisme een belangrijke rol spelen.

Daar eventueel aanwezige luchtbellens als expansieruimte fungeren, is de onderlinge afstand van deze luchtbellens bepalend voor het maximale drukverschil dat kan optreden.

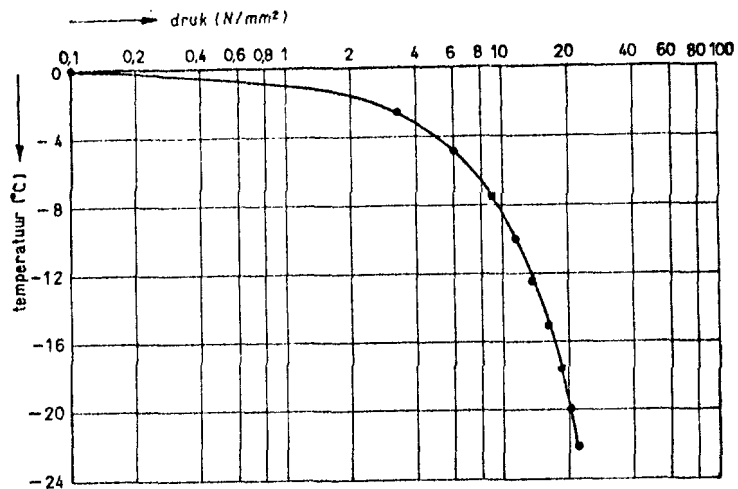
b. excessieve krimp van ijs vergeleken met beton

De lineaire uitzettingscoëfficiënt van ijs is ongeveer een factor 5 groter dan die van beton.

Wanneer een bepaalde open ruimte in een poreus materiaal zich volledig heeft gevuld met ijs van 0°C en de temperatuur daalt vervolgens verder onder nul, dan zal het ijs zich lostrekken van de wanden en zal er een open ruimte ontstaan. Door diffusie van waterdamp, gevolgd door sublimatie, kan in deze ruimte bij lagere temperatuur nieuw ijs ontstaan. Latere temperatuurstijging doet het ijs weer uitzetten, doch de oorspronkelijke ruimte is nu niet meer aanwezig en drukopbouw is dus het gevolg.

c. verschillen in thermodynamische potentiaal tussen grote ijskristallen en kleine

Volgens de thermodynamica kan er slechts evenwicht bestaan tussen kleine en grote kristallen als de druk op de laatste groter is. IJsvorming in een nauw capillair vanuit een grotere holte treedt dan ook niet direkt op, maar er zal water vanaf de warmere plaatsen via het capillair naar de holte stromen en daar bevriezen. Wanneer de holte geheel is gevuld, wordt daarna in het grote ijskristal druk opgebouwd tot het ijs in de nauwe porie kan groeien of tot het materiaal breekt. Wanneer een breuk in het materiaal optreedt verplaatst het ijsfront zich niet, maar wordt ter plaatse van de breuk een ijslens gevormd. Vandaar dat wel wordt gesproken over het ijslensmechanisme.



figuur 3.1.: smeltpunt van ijs als functie van de druk bij constant volume

a.2. Water door ijs in langwerpige poriën

Het onder a.1. genoemde geval zal in de praktijk slechts zelden voorkomen, aangezien de drukopbouw in het resterende water vrijwel steeds tot gevolg zal hebben dat de ijsafsluiting breekt, waarna het water op een andere plaats kan bevriezen. Er zal zich dan ook steeds water van de plaats van ijsvorming moeten verwijderen via de nog open zijnde poriën. Bij eenzijdige bevroering impliceert dit dus meestal een waterbevroering naar de warme zijde. Het poreuze materiaal bezit echter een stromingsweerstand, zodat er een drukverschil zal blijven bestaan zolang er water wordt getransporteerd. De grootte van dit drukverschil hangt af van:

- de stromingsweerstand tussen de plaats van ijsvorming en de dichtstbijzijnde niet met water gevulde ruimte
- het watergehalte
- de warmte-onttrekking.

d. osmotische drukken

Wanneer zouten in het beton aanwezig zijn, ontstaan bij temperaturen onder nul concentratieverschillen doordat zuiver water uitvriest en een meer geconcentreerde zoutoplossing achterblijft. De zoutconcentratie bij het ijsfront van het resterende water kan daardoor belangrijk afwijken van de concentratie elders.

Het gevolg is dat het water met de laagste zoutconcentratie zich naar het ijsfront toe beweegt tegen de concentratiegradiënt in. Het watergehalte neemt daar toe.

Is het vochtgehalte bij het ijsfront reeds maximaal dan wordt druk opgebouwd, de osmotische druk.

Het is nauwelijks voor te stellen dat deze druk in staat is schade te veroorzaken; de waterbeweging naar het ijsfront, waardoor plaatselijk het watergehalte toeneemt, kan echter funest zijn bij voortgaande bevriezing.

e. hydratatie van zouten

De geneigdheid van zouten om kristalwater op te nemen, hangt onder andere af van de temperatuur. Ook zal de stabiliteit van bepaalde, veel kristalwater opnemende dubbelzouten pas beneden een bepaalde temperatuur groot genoeg zijn om schadelijke concentraties mogelijk te maken. Bij hydratatie van zouten verandert het volume. Wanneer deze volumeverandering door het materiaal wordt verhinderd wordt druk opgebouwd. Deze druk kan schade veroorzaken die op het oog overeenkomt met gewone vorstschade. De grootte van de kans op optreden van dit mechanisme hangt samen met de chemische samenstelling van het beton en met de gebruiksomstandigheden.

I n v l o e d s f a c t o r e n

Achtereenvolgens kunnen de volgende aspecten worden beschouwd:

- a. verdichtingswijze
- b. cementsoort
- c. water-cementfactor
- d. korrelverdeling
- e. cementhoeveelheid
- f. hulpstoffen.

De volgende conclusies zijn aan lit. 2 ontleend, waarbij de vries-dooi-proeven begonnen bij het bereiken van een druksterkte van ongeveer 5 N/mm^2 (dus bij jong beton) en een water-cementfactor die varieerde van 0,4 tot 0,6.

ad a

Stampen bleek iets beter dan trillen. De verschillen zijn echter zo gering dat hieruit nauwelijks een conclusie valt te trekken.

ad b

Het gebruik van hoogovencement gaf een duidelijk voordeel te zien boven portlandcement. Hierbij moet worden opgemerkt dat bij de gekozen vries-dooi-proef in hoofdzaak het kernbeton werd beoordeeld. Uit andere vries-dooiproeven is later gebleken dat met hoogovencement vervaardigd beton geneigd is eerder vorstschade aan het oppervlak te vertonen dan met portlandcement vervaardigd beton, zodat de conclusie niet eenduidig is.

ad c

Een verhoging van de water-cementfactor leidt tot een minder vorstbestendig produkt.

ad d

Hierover is geen uit spraak te geven.

ad e

Bij de onderzochte cementhoeveelheden (400 en 325 kg portlandcement) werd slechts een geringe invloed op de vorstbestendigheid waargenomen.

ad f

De verbetering van de vorstbestendigheid door luchtbelvormers is aanzienlijk ten opzichte van beton zonder hulpstof.

Gebleken is dat voor een verbetering van de vorstbestendigheid tenminste 4 à 5% lucht in de betonspecie aanwezig moet zijn.

Niet alleen de hoeveelheid lucht in het beton is van belang, maar ook de manier waarop de luchtbellen in het beton zitten.

Zo bleek het met behulp van plastificeermiddelen ook mogelijk vrij veel lucht in het beton opgenomen te krijgen; de vorstbestendigheid werd echter niet noemenswaardig verhoogd.

I n v o o r s c h r i f t e n g e g e v e n e i s e n

VB-1974 (lit. 22)*)

In artikel A-603.9 wordt het volgende gesteld:

Beton waaraan hoge eisen worden gesteld ten aanzien van het bestand zijn tegen vorst moet tenminste van de kwaliteit B 22,5 zijn. Het luchtgehalte van de specie voor dergelijke beton in de vorm van fijn verdeelde luchtbelletjes moet voor de consistentiegebieden 2 en 3 liggen tussen 4 en 6% (V/V).

N.B. consistentiegebied 2 = halfplastisch; zetmaat 20 tot 80, verdichtingsmaat 1,2 t.m. 1,1.
consistentiegebied 3 = plastisch; zetmaat 80 tot 120.

Toelichting op artikel A-603.9:

Onder hoge eisen wordt in dit verband verstaan, dat het beton in vochtige toestand bestand moet zijn tegen de invloeden van veelvuldige wisselingen van vorst en dooi. In het bijzonder is jong beton gevoelig voor dergelijke invloeden. Onder de invloed van dooizouten wordt de schadelijke werking van vriezen en dooien nog aanzienlijk versterkt.

*) Bij het verschijnen van dit rapport is al bekend, dat in de nieuw op stapel staande Nederlandse voorschriften de invulling van de consistentiegebieden wat wordt gewijzigd (VB 1974/1984, NEN 3880).
consistentiegebied 2: zetmaat 50 t.m. 90, verdichtingsmaat
1,25 t.m. 1,11
consistentiegebied 3: zetmaat 100 t.m. 150, verdichtingsmaat
1,10 t.m. 1,04.

Nadrukkelijk wordt erop gewezen, dat hier wordt bedoeld het luchtgehalte, verkregen door toevoeging van een luchtbelvormer. Dit vergroot namelijk het bestand zijn tegen vorst en de weerstand tegen de invloed van dooizouten.

DIN 1045 (lit. 10)

In DIN 1045 wordt het volgende geëist:

Het toeslagmateriaal dient vorstbestendig te zijn (volgens DIN 4226).

Het beton dient ondoorlatend te zijn. De water-cementfaktor moet een waarde hebben kleiner dan 0,6.

Het in onderstaande tabel - afgezien van beton met zeer lage consistentie - aangegeven luchtgehalte is noodzakelijk:

Größtkorn des Zuschlaggemisches mm	Mittlerer Luftgehalte Vol. %
8	> 5
16	> 4
32	> 3,5
63	> 3

Tabel 1: de afzonderlijke waarden mogen hoogstens 0,5% lager zijn dan de aangegeven waarden

NEN 7024 Glooiïngselementen van beton (lit. 8)

Hierin wordt een grens van 10% gesteld voor de gemiddelde wateropname. De dichtheid dient ten minste 2,28 g/cm³ te bedragen.

Merkblatt für Deckwerksteine aus Beton für den Uferschutz (lit. 9)

Hierin wordt een eis gesteld aan de wateropname van max. 12% (volume-percenten).

Verder wordt bij het gebruik van luchtbelvormers verwezen naar het hiervoor aangehaalde uit DIN 1045.

B e o o r d e l i n g

De grote moeilijkheid is om een type vries-dooiproef aan te wijzen dat de praktijk benadert. Een dergelijke proef is nagenoeg niet aan te geven. Bij beproevingen komt men direkt in de problemen: men wil de praktijk zo dicht mogelijk benaderen maar toch het proces sterk versnellen. Vriezen we langzaam dan spelen insluitingen en hydraulische druk nauwelijks een rol. Vriezen we snel dan treedt het ijslensmechanisme nauwelijks op. Doordat voor een bepaald materiaal het ene mechanisme belangrijker kan zijn dan voor het andere kan men in de literatuur pleidooien zowel voor langzaam als voor snel vriezen tegenkomen. Geheel onafhankelijk van de gebruikte vriesproef en los van de methode om het optreden van schade vast te stellen, is de vorstbestendigheid van een materiaal tot dusver steeds uitgedrukt in het aantal vries-dooicycli dat het materiaal zonder schade kan weerstaan. Men denkt dan ook aan een cumulatie van micro-beschadigingen.

Een voorbeeld van zo'n proef is de Amerikaanse snelle vries-dooiproef in water (ASTM C 290).

Bij deze proef worden proefstukken in met water gevulde bakjes geplaatst, die in 1 uur worden gekoeld van + 5°C tot - 18°C en vervolgens gedurende 2 uur bij + 5°C worden gedooid (totale tijdsduur van één cyclus dus 3 uren).

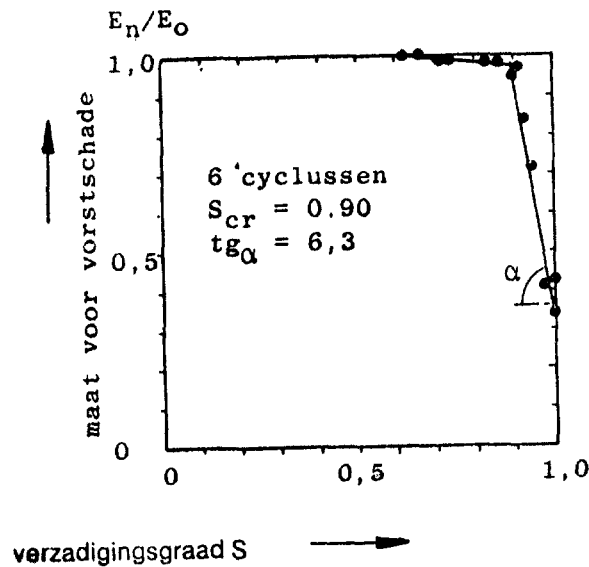
Als criteria voor de vorstbestendigheid na een aantal vorst-dooicycli kunnen worden gesteld:

- visuele beoordeling
- massaverandering
- sterkte
- resonantiefrequentie (dynamische elasticiteitsmodulus)
- voortplantingssnelheid van geluidsimpulsen
- lengteverandering.

Volgens meer recente inzichten (lit. 23) geldt dat echter niet zo zeer het aantal reeds doorstane cycli van belang is voor het optreden van vorstschade als wel het watergehalte op het moment van bevriezen.

Het blijkt dan dat vele cycli vriezen en dooien bij een watergehalte beneden een bepaalde waarden, aangeduid met S_{kr} , geen schade doet ontstaan, terwijl zelfs één cyclus bij een hoger watergehalte reeds een vermindering van de sterkte te zien geeft.

De kritische verzadigingsgraad is vrij goed gedefinieerd. Deze kan in het laboratorium worden bepaald door monsters met een verschillende verzadigingsgraad aan een aantal vorst-dooicycli te onderwerpen en daarna met behulp van ultra-sonore metingen de achteruitgang in de elasticiteitsmodulus na te gaan. Deze achteruitgang is een goede maat voor de beschadiging ten gevolge van inwendige scheurvorming in het monster. In fig. 3.2., ontleend aan lit. 23, is een voorbeeld gegeven waarin de achteruitgang van de elasticiteitsmodulus na 6 vries-dooicycli is gegeven bij verschillende mate van verzadiging met water.



figuur 3.2.: vorstschade versus verzadigingsgraad

De kritische verzadigingsgraad S_{kr} blijkt in dit geval 0,9 te zijn. Dus wanneer een hoeveelheid water is opgenomen die groter is dan 90% van de hoeveelheid water bij volledige verzadiging dan ontstaat vorstschade. De marge tussen de gemeten natuurlijke verzadigingsgraad en de kritische verzadigingsgraad geeft aan of er vorstschade kan worden verwacht.

Deze marge geeft de 'veiligheid' aan tegen het optreden van vorstschade.

Het is duidelijk dat de natuurlijke verzadigingsgraad behalve door de externe omstandigheden voor een belangrijk deel wordt bepaald door het poriënvolume, de vorm van de poriën en de poriënverdeling.

Bij het trekken van conclusies uit vorstproeven in een laboratorium dient men voorzichtig te werk te gaan. Stel dat we bijvoorbeeld 2 betonsoorten A en B vergelijken. Uit laboratoriumproeven blijkt dat de kritische verzadigingsgraad van beton A hoger is dan die van beton B. We zouden dan kunnen concluderen, dat de vorstbestendigheid van beton A beter is dan die van beton B. Het is echter best mogelijk dat de poriënstructuur van beton B leidt tot een lagere natuurlijke verzadigingsgraad onder bepaalde externe omstandigheden dan die van beton A. Dit kan ertoe leiden dat de marge tussen de natuurlijke verzadigingsgraad voor beton B groter is dan voor beton A. Dit betekent dan dat onder de beschouwde omstandigheden de vorstbestendigheid van beton B groter is dan die van beton A, hoewel beton B toch een lagere kritische verzadigingsgraad bezit. Voor goede conclusies moeten we dus altijd de verzadigingsgraad in de natuurlijke omstandigheden vergelijken met de kritische verzadigingsgraad, zoals bepaald in het laboratorium. Vorstproeven alléén zeggen niet alles.

3.3.2. Temperatuurwisselingen

Onderscheid moet worden gemaakt tussen:

- a. Eenmaal voorkomende afkoeling van door de hydratatie van het cement opgewarmde zware betonconstructies.
Dit mechanisme is voor een bekleding bestaande uit betonblokken niet van belang.
- b. Temperatuurwisselingen onder invloed van zonbestraling en zeewater.
Voor deklagen kunnen hiervoor gevoelig zijn doordat deze een elasticiteitsmodulus kunnen bezitten die sterk afwijkt van het onderliggende beton. Hierdoor kunnen trekspanningen in de deklaag ontstaan, waardoor deze los kan raken en/of kan gaan scheuren.

In NEN 7024, 'Glooiingsselementen van beton' wordt dan ook gesteld:
"Indien een deklaag wordt toegepast, moet deze bestaan uit een mengsel van cement en toeslagmateriaal zoals grind, basalt, porfier, zand of een andere gelijkwaardige toeslag.

De deklaag mag nergens minder dan 6 mm dik zijn. Er moet een deugdelijke en duurzame verbinding zijn tussen de deklaag en het overige gedeelte van het element."

3.3.3. Vochtinwerking

In verhard beton bevinden zich verbindingen, en wel bepaalde calcium-silicaathydraten, die in staat zijn water in het inwendige van het kristal te adsorberen, waarmee een volumevergroting gepaard gaat. Bij verdamping van dit adsorptiewater treedt krimp op. Het is vermoedelijk voor een groot deel verantwoordelijk voor uitzetting en krimp door vochtinvloeden. Bij losse blokken kunnen de uitzetting en krimp ten gevolge van de vochtinwerking alleen bijdragen aan het ontstaan van schade wanneer dit onregelmatig over de doorsnede gebeurt.

Eén en ander is sterk afhankelijk van de mate van waterabsorptie van het beton.

3.3.4. Aangroeiingen

In de getijdenzône is er vaak sprake van aangroeiingen van bijvoorbeeld zeepokken en algen. Verwijdert men deze aangroeiingen dan blijkt steeds een gaaf betonoppervlak aanwezig te zijn, zie lit. 6.

3.4. Mechanische aantasting

3.4.1. Scheurvorming door belasting

Onderscheid kan worden gemaakt in belastingen tijdens het transport en opslag en bij het functioneren als bekleding op de dijk.

De kans op beschadiging tijdens transport is in grote mate afhankelijk van de vormgeving van de blokken (uitstekende delen, scherpe hoeken etc.) en de treksterkte van het beton.

Wanneer de bekleding eenmaal op het talud ligt zullen kleinere elementen zonder uitstekende delen weinig schade meer ondervinden.

Door de golfbelasting worden de blokken veelal onbeschadigd uit het talud geslagen. Bij grotere plaatvormige elementen kunnen, wanneer deze als gevolg van ontgrondingen slechts plaatselijk ondersteund zijn, door de golfbelasting wel scheuren ontstaan.

3.4.2. Erosie

A l g e m e e n

Onder erosie wordt hier verstaan het afslijten van een oppervlak door stromend water en de daarin meegevoerde sedimenten.

De werking van de erosie kan als volgt worden voorgesteld:

de vaste deeltjes, voor zover deze niet in suspensie zijn, zullen niet alleen langs het oppervlak schuren, maar soms ook rollen of springen. Bij oneffenheden zullen de deeltjes tegen het beton botsen en punten of kanten eraf kunnen stoten. Tevens kan bij hoge snelheden ten gevolge van turbulentie een onderdruk in het water ontstaan die trekkrachten op het beton uitoefent.

Hoe ruwer en ongelijkmatiger het oppervlak hoe eerder een dergelijk verschijnsel kan optreden.

Elke component van het beton is aan deze belasting blootgesteld, zowel de cementsteen als het toeslagmateriaal. Aan het oppervlak is de structuur van het beton anders dan midden in het beton. Er zullen meer cementsteen en fijne bestanddelen van het toeslagmateriaal aanwezig zijn naarmate de afstand tot het oppervlak kleiner wordt.

De buitenhuid van het beton zal in hoofdzaak bestaan uit cementsteen en fijn materiaal. De kans op de aanwezigheid van scheurtjes ten gevolge van krimp en afkoeling is in deze zone het grootst.

Het verloop van de erosie in de tijd kan er dan zo uitzien:

doordat de sterkte en de dichtheid van de matrix (cementsteen plus fijne deeltjes) minder is dan die van het toeslagmateriaal, valt te verwachten dat de buitenhuid veel sneller slijt dan een deel uit het midden van een stuk beton.

Is de buitenhuid eenmaal verwijderd, dan moet, als de mate van erosiebelasting constant blijft, de erosie met gelijkblijvende snelheid blijven doorgaan.

Anderzijds is het oppervlak eerst glad waardoor de erosie minder sterk kan aangrijpen.

Afhankelijk van de hoeveelheid en de grootte van het door het water meegevoerde materiaal zal de werking in hoofdzaak schurend of stotend zijn. Bij een schurende werking is de mate van afslijting afhankelijk van de hardheid van het abrasieve materiaal en het aangetaste beton. Het is aan te nemen dat de cementsteen minder hard is dan het in het water meegevoerde materiaal. Bij een schurende werking zal daarom de aantasting van cementsteen sneller blijven gaan dan die van het toeslagmateriaal.

Is er daarentegen ook een sterk stotende werking aanwezig dan kunnen cementsteen en toeslagmateriaal even snel afslijten omdat de stotende werking de toeslagkorrels sneller doet afslijten dan de schurende werking alleen.

C o n c l u s i e s u i t o n d e r z o e k (l i t . 5 e n 7)

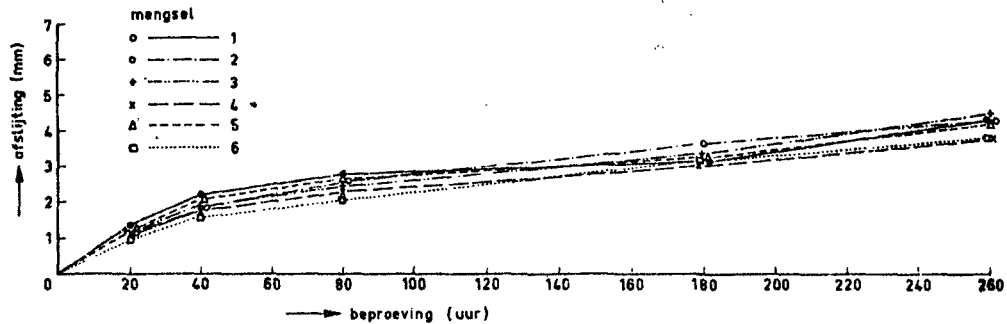
De versnelling van de erosie bij het onderzoek is er de oorzaak van dat de resultaten van de proeven nauwelijks kunnen worden gebruikt om een voorspelling te doen ten aanzien van de kwantitatieve grootte en het verloop in de tijd van de erosie bij een werkelijke constructie.

Wel is echter een onderlinge vergelijking van materialen mogelijk. Het onderzoek omvatte 15 betonmengsels met als variabelen het cementgehalte (tussen 225 en 384 kg/m³), water-cementfaktor (tussen 0,37 en 0,63), de nabehandeling (enerzijds droog opgeslagen bij 20°C en 40 tot 50% relatieve vochtigheid, anderzijds na het storten afgedekt om uitdroging te voorkomen en daarna gedurende ten minste twee weken opgeslagen bij 20°C en 99% relatieve vochtigheid), het al dan niet toepassen van een hulpstof (superplastificeerder).

Als cement werd hoogovencement toegepast.

De kubusdruksterkten na 28 dagen lagen tussen 21 N/mm² en 48 N/mm². De erosieproeven werden in een open cirkelvormige goot uitgevoerd, waarin water tezamen met abrasief materiaal over betonnen proefstukken werd geleid.

De erosieproeven leidden alle tot een soortgelijk erosieverloop: in het begin (eerste 40 uur) een sterke slijtage van de buitenhuid (enkele mm's), daarna een verminderde toename van de slijtage en daarop aansluitend (na 80 uur) een tamelijk constante slijtagesnelheid tot aan het eind van de proef (240 uur). Een beeld van dit verloop geeft figuur 3.4.



figuur 3.4.: totale gemiddelde afslijting per mengsel (48 meetpunten per mengsel)

Als belangrijkste conclusies zijn aan te geven:

- de druksterkte van het beton heeft een duidelijke invloed. Naarmate de druksterkte toeneemt, neemt ook de erosiebestendigheid toe. Beton van slechte kwaliteit, ook al zou dat slechts plaatselijk aanwezig zijn, zal eerder door erosie worden aangetast.
- De nabehandeling is vooral bij een lage druksterkte van invloed. Goede nabehandeling verbetert de erosiebestendigheid, waardoor de invloed van de druksterkte in mindere mate optreedt. Bij hoge betonkwaliteiten was de invloed van de nabehandeling niet aantoonbaar.

- Het al dan niet toepassen van een superplastificeerder als hulpstof vertoonde naast de variatie in druksterkte geen extra invloed.
- Een zwakke relatie was aanwezig tussen de hoeveelheid toeslagmateriaal en de erosiebestendigheid. De tendens was duidelijk voor het beton met weinig cement (waardoor de water-cementfactor hoger en dus de sterkte minder was).

Deze conclusies zijn in overeenstemming met de gegevens uit de literatuur. Ook daar wordt de druksterkte vermeld als voornaamste factor voor het erosiegedrag.

Over de samenstelling van het beton is men in de literatuur niet eensluidend; door sommigen wordt aangeraden grof toeslagmateriaal te gebruiken (steenslagbeton), terwijl anderen de maximale korreldiameter klein willen houden voor een betere homogeniteit van het beton.

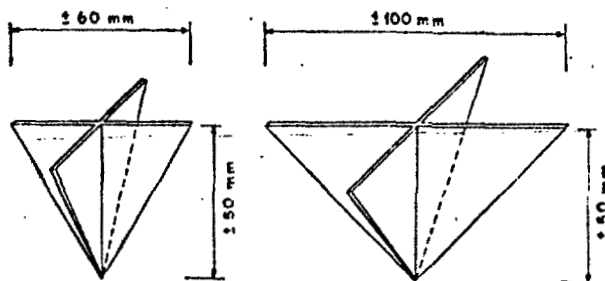
De resultaten van het onderzoek volgens lit. 5 en 7 kunnen deze vraag niet beantwoorden omdat bij kubusdruksterkten van circa 40 N/mm^2 geen invloed van de maximale korrel werd geconstateerd.

O v e r i g e m e t h o d e n v a n o n d e r z o e k

Andere methoden van onderzoek naar de erosiebestendigheid van beton zijn onder andere zandblaasproeven (lit. 8) en afslijpproeven.

Het is echter zeer moeilijk de uitkomsten van de proeven met de praktijk te correleren.

Gezien het mechanisme bij de beproeving lijkt het beter bij het zoeken naar het beste betonmengsel, een proef met een erosiegoot als middel van onderzoek te prefereren. Teneinde de afslijting in het werk in de loop der tijd te kunnen volgen kan men de blokken voorzien van ingebetonnerde slijtkruisjes, zie lit. 20.



figuur 3.5.: slijtkruisjes

Van deze kruisjes worden vooraf de afmetingen vastgelegd waardoor op eenvoudige wijze door opmeting van tijd tot tijd de slijtage is na te gaan.

3.5. Chemische aantasting

3.5.1. Regenwater

Regenwater is zwak zuur door opgelost koolzuurgas (CO_2) uit de lucht. Doordat ook zwaveldioxide (SO_2) uit verbrandingsgassen in industrie- en woongebieden in regenwater wordt opgelost, neemt de zuurgraad en daarmee de agressieve werking nog toe. Het oplossen van vrije kalk zal des te sneller plaatsvinden naarmate het beton gemakkelijker toegankelijker is, dat wil zeggen poreuzer is.

In matig zuur-agressieve omgeving heeft zeer dicht beton een behoorlijke duurzaamheid. Naast de vereiste grote dichtheid geldt voor dit type aantasting een lichte voorkeur voor gebruik van kalkarm hoogoven-cement.

3.5.2. Zeewater

Het water van de oceanen bevat in totaal ongeveer 35 g/l aan zouten. De voornaamste bestanddelen hiervan zijn:

chloride	(Cl^-)	19,8 g/l
sulfaat	(SO_4^{--})	2,73 g/l
calcium	(Ca^{++})	0,43 g/l
magnesium	(Mg^{++})	1,31 g/l
natrium	(Na^{++})	10,9 g/l
kalium	(K^+)	0,4 g/l.

Afhankelijk van de cementsamenstelling kan cementsteen in meer of mindere mate chemisch worden aangetast door de in het zeewater aanwezige calcium- en magnesiumsulfaten.

De aantasting ontstaat door een verbinding van het tricalciumaluminaat (C_3A) uit het cement met sulfaat uit het water, waarbij ettringiet wordt gevormd dat een groter volume inneemt.

Bij de daarmee gepaard gaande zwelwerking treedt destructie van de cementsteen op.

Dit proces treedt op vanaf het oppervlak en zet zich van daaruit voort naar het inwendige deel van het beton. Als naast een sulfaat ook een chloride aanwezig is, hetgeen bij zeewater het geval is, dan wordt in hoofdzaak calciumchloridealuminaat gevormd; deze verbinding is niet destructief voor beton.

De sulfaatagressiviteit is in dit geval veel minder dan op grond van het sulfaatgehalte van zeewater alleen zou kunnen worden aangenomen.

Als sulfaatbestendig gelden:

- hoogovencement met een slakgehalte van ten minste 65%
- portlandcement met een tricalciumaluminaat (C_3A)-gehalte van ten hoogste 3% en een aluminiumtrioxide (Al_2O_3)-gehalte van maximaal 5%.

Door de gunstige invloed van het chloride blijkt de sulfaataantasting in zeewater, ook bij gebruik van portlandcement, gering te zijn, mits het beton goed is, dat wil zeggen als het beton dicht is.

3.5.3. Andere agressieve stoffen

In hoeverre kan bijvoorbeeld rivierwater voor beton schadelijke stoffen bevatten?

Hierbij te denken aan huishoudelijk en industrieel afvalwater.

Deze concentraties zijn veelal te laag om schade te kunnen berokkenen aan het beton.

Door agressief grondwater is ook aantasting mogelijk. Het grondwater kan koolzuur bevatten in de omgeving van koolzuurhoudende bronnen. In veengebieden kan grondwater veenzuren bevatten. Bij stilstaand grondwater worden veenzuren door de vrije kalk uit het beton snel geneutraliseerd en stopt de aantasting.

In bepaalde gedeelten van ons land, vooral waar gronden met sulfaathoudend water zijn doordrenkt, komt klei voor met een hoog sulfidegehalte. Wanneer door drooglegging, ontwatering of ontgraving lucht in de grond binnendringt, wordt het sulfide geoxydeerd, waarbij als één van de reactieproducten zwavelzuur ontstaat. In gronden met sulfidehoudende klei, waarin zwavelvuur is gevormd zonder dat neutralisatie heeft plaatsgevonden, zijn pH-waarden lager dan 2 gevonden. Dit zwavelzuur is als sterk zuur zeer agressief; de vrije kalk uit beton wordt erdoor omgezet tot calciumsulfaat.

3.5.4. Corrosie wapening

De wapening in het beton wordt tegen roesten beschermd door de hoge alkaliteit in het betonmilieu. De pH-waarde in het beton is 12 à 13. Door koolzuurindringing (carbonatie) vanuit de atmosfeer daalt de pH-waarde tot 8 à 9.

In een dergelijk milieu is het staal niet meer beschermd tegen roesten. Zo lang de carbonatiediepte geringer is dan de betondekking zou er dus geen corrosie te vrezen zijn. Door de aanwezigheid van chloriden echter kan de wapening ook in niet-gecarbonateerd beton toch gaan roesten. Dit hangt af van de hoeveelheid chloride ten opzichte van cement.

Het cement kan een bepaalde hoeveelheid chloride binden zodat deze onschadelijk is voor corrosie.

Het is gebleken dat beton met hoogovencement voor chloriden moeilijker doordringbaar is dan beton met portlandcement.

Dus bij voorkeur hoogovencement gebruiken en een dicht beton maken met de vereiste betondekking. Er is echter geen zekere grens aan te geven voor het chloridegehalte beneden welke er geen gevaar bestaat voor corrosie en boven welke wel corrosie optreedt. De dekking zal dan ook ruim moeten worden aangehouden.

3.6. Algemene conclusies

- Een goede en vooral dichte betonkwaliteit is van allesoverheersend belang.
Dit kan worden bereikt door een goede korrelverdeling van het toetslagmaterialenmengsel, een lage water-cementfaktor (ca. 0,4 à 0,45), intensieve verdichting en zorgvuldige nabehandeling. Een zorgvuldige nabehandeling is van essentieel belang voor het verkrijgen van een dicht oppervlak. Tot ten minste één week na het storten moet het beton tegen uitdrogen worden beschermd.
- Het jonge beton mag niet te vlug in aanraking komen met zeewater. Voor prefabbeton wordt aanbevolen hiervoor een tijdsduur van minimaal 28 dagen te nemen.
- Omtrent de cementsoort kan worden gesteld dat hoogovencement de voorkeur verdient.
- Controle op samenstelling van het beton, verwerking, nabehandeling en opslag is vereist.

Appendix bij Hoofdstuk 3

Samenvatting eisen

1. NEN 7024, glooiingselementen van beton (lit. 8)

Materiaal

De elementen moeten zijn vervaardigd van beton met een zowel in de kern als in de eventuele deklaag gelijkmatige samenstelling, in hoofdzaak bestaande uit een mengsel van cement, zand en grind of andere geschikte toeslagstoffen.

Vorm en uiterlijk

Gelijkmatig van vorm, alle zijden vlak, kantig en gaaf, geen structuurgebreken als grindnesten, holten of scheuren. Ernstige gebreken mogen niet worden bijgewerkt. De elementen moeten zorgvuldig van bramen zijn ontdaan en mogen niet worden gesausd.

De bovenkant van de elementen moet ten minste zijn voorzien van twee vellingkanten.

Maten en toleranties

De nominale maten worden door de fabrikant opgegeven. De lengte en breedte mogen niet meer dan ± 2 mm afwijken van de nominale maten. De hoogte van de elementen mag niet meer dan $\begin{matrix} +5 \\ -2 \end{matrix}$ mm afwijken van de nominale maten.

Het grootste onderlinge verschil van de drie metingen van de lengte en van de breedte mag ten hoogste 22 mm en van de hoogte ten hoogste 5 mm bedragen.

Deklaag

Indien een deklaag wordt toegepast moet deze bestaan uit een mengsel van cement en toeslagmateriaal zoals grind, basalt, porfier, zand of een andere gelijkwaardige toeslag. De deklaag mag nergens minder dan 6 mm dik zijn. Er moet een deugdelijke en duurzame verbinding zijn tussen de deklaag en het overige gedeelte van het element.

Druksterkte

De gemiddelde druksterkte (van 5 elementen) moet ten minste 60 N/mm² bedragen.

Wateropneming

De gemiddelde wateropneming mag ten hoogste 10% (V/V) bedragen.

Dichtheid

De gemiddelde dichtheid (van 5 elementen) mag niet minder dan 2,28 g/cm³ bedragen.

Massaverlies bij de zandblaasproef (facultatief)

Het gemiddelde massaverlies bij de zandblaasproef (volgens het principe van Vogel en Schemann) mag ten hoogste 35 g bedragen.

In een toelichting wordt aanbevolen voor de toepassing in zout en brak water hoogovencement als bindmiddel te gebruiken en, indien mogelijk, ongewapende elementen toe te passen. De buitenkant van al het wapeningsstaal, de beugels inbegrepen, moet ten minste 25 mm van de buitenkant van het beton verwijderd blijven.

2. Merkblatt für Deckwerksteine aus Beton für den Uferschutz (lit. 9)

Maten en toleranties

Voor de lengte- en breedtemaat: \pm 3 mm

Voor de hoogtemaat : \pm 5 mm

Druksterkte

De druksterkte moet bij aflevering, op zijn laatst na 28 dagen, minstens 35 N/mm² bedragen (beproeven volgens DIN 1048, Blatt 1).

Wateropname

De natuurlijke wateropname mag niet meer dan 12% (V/V) bedragen.

Water-cementfactor en cementgehalte

W.c.f. : 0,5.

cementgehalte : 330 kg/m³.

Fijne stofgehalte (d.w.z. cement en korrels < 0,25 mm)

grootste korrel 16 mm 450 kg/m³

32 mm 400 kg/m³

Een te hoog gehalte aan fijn materiaal kan de waterbehoefte van de betonspecie vergroten en daarmee de eigenschappen van het verharde beton nadelig beïnvloeden.

Nabehandeling en opslag

De elementen moeten de eerste 7 dagen tegen vorst en uitdroging worden beschermd. Ook na een warmtebehandeling moeten de stenen nog enige tijd vochtig worden gehouden. De elementen dienen zo te worden opgeslagen en vervoerd dat ze niet worden beschadigd.

Literatuur

1. CUR-rapport 22
Weerbestendigheid van beton
2. CUR-rapport 64
Vorstbestendigheid van beton
3. CUR-rapport 90
Reparaties van betonconstructies
4. CUR/VB-rapport 96
Beton en afvalwater
5. CUR/VB-rapport 99
Erosie van beton
6. CUR/VB-rapport 100
Duurzaamheid maritieme constructies
7. Pat, M.G.M., Fontijn, H.L., Reinhardt, H.W., Stroeven, P.
Erosie van beton
Stevin-rapport 5-79-30, maart 1979
8. NEN 7024
Glooiingselementen van beton
9. Merkblatt für Deckwerksteine aus Beton für den Uferschutz
Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 38/1971
Verein Deutscher Zementwerke, Düsseldorf
10. DIN 1045
Beton- und Stahlbetonbau
Bemessung und Ausführung

Literatur (vervolg)

11. Die Küste

Archiv für Forschung und Technik an der Nord- und Ostsee.

Herausgeber: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen,
Heft 36 - 1981.

12. Eckhardt, A., Kronsbein, P.W.

Beton und Zement im Seewasser

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 102

13. Hummel, A., Wesche, K.

Beton im Seewasser

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 124

14. Walz, K.

Witterungsbeständigkeit von Beton

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 127

15. Seidel, K.

Beton in chemisch angreifenden Wässern

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 134

16. Schäfer, A.

Frostwiderstand und Porengefüge des Betons,

Beziehungen und Prüfverfahren

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 167

17. Wesche, K.

Der Einfluss der Zementsteinporen auf die Widerstandsfähigkeit von
Beton im Seewasser

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 168

Literatuur (vervolg)

18. Schröder, H.T., Hallauer, O., Scholz, W.
Beständigkeit verschiedener Betonarten im Meerwasser und in sulfat-
haltigem Wasser
Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 252

19. Walz, K., Hartmann, E.
Witterungsbeständigkeit von Beton
Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 274

20. Ferguson, H.a.
Houdbaarheid van beton als dijkbekleding; ervaringen opgedaan bij
de Westkapelse zeedijk
Weg- en Waterbouw, jan./febr. 1959

21. Keulen, J. van
Achtergronden van het probleem vorstbestendigheid, mechanismen en
beproeving
Polytechnisch Tijdschrift, Bouwkunde 1971, blz. 589 - 596

22. NEN 3861
Voorschriften Beton, VB 1974
Deel A, Gemeenschappelijk gedeelte

23. Fagerlund, G.
Theoretical degree of saturation method of assessing the
freeze/thaw resistance of concrete
Materials and structures, vol. 10, nr. 58, 1977.

24. Betonkunde, deel A en B
Collegedictaat
Afdeling der Civiele Techniek, Technische Hogeschool Delft

Hoofdstuk 4 - Golfkarakteristieken, golfgroei en waterstanden

4.1. Inleiding

Het ligt, gezien de functie van waterkeringen, voor de hand dat de belastingen veelal voortvloeien uit waterstanden en golven. Deze verschijnselen worden meestal samengevat onder de naam "natuurrandvoorwaarden". In zijn algemeenheid kunnen de volgende golfverschijnselen worden onderscheiden:

1. laagfrequente waterspiegelveranderingen, zoals hoogwatergolven, opwaaiingsverhangen en seiches
2. windgolven
3. scheepsgolven in vaarwegen
 - 3.1. primaire scheepsgolf, met als onderdeel hiervan de haalgolf
 - 3.2. secundaire scheepsgolven
 - 3.3. combinatie van primaire en secundaire scheepsgolven.

Deze waterspiegelvariaties bepalen in sterke mate het gebied waarover een bekleding dient te worden aangebracht.

Tabel 1 geeft een globaal inzicht hoe het dijctype samenhangt met de natuurrandvoorwaarden.

De waterstandsverschillen op kanalen en boezems zijn relatief klein. Ze worden veroorzaakt door schutwater, kwelwater, afwatering, opwaaiing enzovoort.

De waterstand op een meer kan variëren tengevolge van opwaaiing, toe- of afvoer van water en verdamping.

De waterstand op een reservoir kan sterk variëren ten gevolge van lediging of vulling van het bekken, maar ook neerslag en opwaaiing kunnen een rol spelen.

De waterstand op een bovenrivier wordt in hoofdzaak bepaald door de afvoer van de rivier.

De waterstand op een getijrivier wordt bepaald door de afvoer van de rivier, het getij en de opwaaiing.

De waterstand voor een zeedijk wordt bepaald door het getij en de opwaaiing.

dijktype	ontwerp-natuurrandvoorwaarden					
	waterstandsverschil h	duur hoge water	dh/dt	frequentie	stroomsnelheid	golfhoogte
kanaaldijk	klein	lang	klein	vaak	klein	klein
boezemdijk	klein	lang	klein	vrij vaak	klein	klein
meerdijk	variabel	kort	var.	zelden	klein	matig
reservoirdijk	groot	lang	klein	vaak	klein	matig
bovenrivier	groot	lang	var.	zelden	groot	klein
getijrivier	groot	kort	groot	zelden	groot	matig
zeedijk	groot	kort	groot	zelden	groot	groot

Tabel 1: Samenhang dijktype met natuurrandvoorwaarden

De meest complexe situatie treedt op bij een zeedijk, waar de fluctuaties van de waterspiegel in vrijwel alle vormen kunnen optreden.

Om deze reden en terwille van de beperking van de omvang blijven de beschouwingen hierna beperkt tot zeedijken.

In dit kader zullen achtereenvolgens aan de orde komen de beschrijving van windgolven, de groei van windgolven en de waterstanden op zee.

Voor het beschrijven van het golfbeeld bestaan diverse methoden. De keuze hangt af van de schaal die wordt beschouwd. Zo zal men bijvoorbeeld voor problemen op het gebied van de golfklimatologie in het algemeen een andere beschrijvingsmethode kiezen dan voor processen die zich binnen enkele seconden of minuten voltrekken. In deze paragraaf wordt daarom eerst een aantal schalen onderscheiden.

In het kader van dit rapport wordt uitgegaan van vier schalen, die betrekking hebben op:

1. een individuele golf
2. lokale eigenschappen van een individueel golfveld
3. een klimatologische verzameling van golfvelden
4. groei en voortplanting van een individueel golfveld.

De kleinste (eerste) schaal die hier wordt beschouwd is bepaald door de fluctuaties in de momentane waterstand. De tijd- en ruimteschalen liggen dan in de orde van grootte van één golfperiode of één golflengte en kunnen variëren van enkele seconden tot 10 à 20 seconden en van enkele meters tot enkele honderden meters.

De volgende (tweede) schaal is groot ten opzichte van de eerste. Op deze schaal is het niet praktisch en zinvol meer om als beschrijving van het golfbeeld een weergave van de waterstandsvariaties zelf te gebruiken.

Het is nu nodig deze gegevens te comprimeren tot een hanteerbare hoeveelheid parameters.

Wat betreft de afmetingen van de tweede schaal:

enerzijds moeten deze zo groot zijn dat gemiddelde eigenschappen en dergelijke van het golfbeeld zinvol bepaald kunnen worden, anderzijds moeten ze zo klein zijn dat het golfbeeld binnen deze schaal nog als vrijwel stationair en homogeen beschouwd kan worden.

Het compromis dat meestal wordt gehanteerd is dat de tijd- en ruimteschalen enige honderden kenmerkende golfperioden en golflengten omvatten.

Hierbij worden dan afmetingen bereikt van enkele minuten tot een uur en van enige tientallen meters tot enige kilometers. De beschrijving van het golfbeeld op deze schaal is van statistische aard; als representatieve parameter wordt veelal het energiedichtheidsspectrum gebruikt maar ook eenvoudiger parameters zoals de significante golfhoogte en de gemiddelde nuldoorgangsperiode worden gebruikt.

De derde tijdschaal wordt gehanteerd bij overwegingen van klimatologische aard.

Deze schaal kenmerkt zich door zijn grote duur (decennia) en door het feit dat de beschrijvingswijze statistisch van aard is.

De vierde schaal wordt bepaald door de groei en voortplanting van een individueel golfveld.

Als alleen de ontwikkeling van het golfveld in de groeifase wordt beschouwd dan zijn de tijd- en ruimteschalen van het golfveld bepaald door die van het windveld. Als daarentegen ook de voortplanting van golven in de vorm van deining van belang is, dan wordt tijd, en ruimteschalen bepaald door de afmetingen van het beschikbare wateroppervlak. Zij kunnen dus liggen in de orde van grootte van enkele uren tot enkele dagen, resp. enkele kilometers tot duizenden kilometers.

Op deze schaal worden de lokale parameters (die van de tweede schaal) behandeld als langzaam variërende functies van tijd en plaats. Aan de beschrijving hiervan ligt een deterministisch, mechanisch model ten grondslag.

4.2. Golfkarakteristieken

4.2.1. Individuele golf

A l g e m e e n

Golftheorieën zijn reeds gedurende tweehonderd jaar bekend. Zij zijn gebaseerd op de aanname dt de golf door de golfhoogte H en de golfperiode T (of de golflengte L) kan worden beschreven en hebben betrekking op regelmatige golven.

Regelmatige golven komen op zee eigenlijk nooit voor, maar ze zijn belangrijk omdat ze de grondelementen van een onregelmatige zee bevatten. In het algemeen zijn werkelijke golfverschijnselen zeer complex en moeilijk mathematisch te beschrijven wegens niet-lineariteiten, drie-dimensionale karakteristieken en het stochastisch karakter van golven.

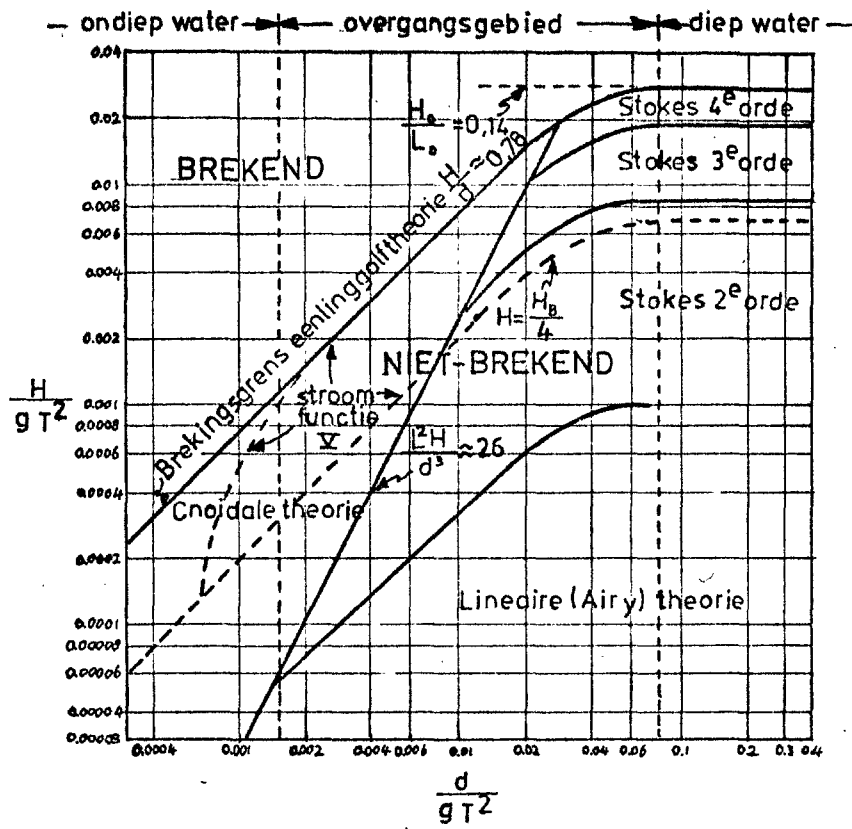
Het is de opgave van de zogenaamde deterministische theorieën de vorm van het vrije oppervlak en de beweging van een regelmatige golf voor verschillende golfhoogten en perioden en bij verschillende waterdiepten zo nauwkeurig mogelijk op een mathematische wijze te formuleren.

Daarbij is het gebruikelijk een onderscheid te maken tussen lineaire en niet-lineaire golftheorieën, al naar gelang tot welke orde stromingskrachten in de beschouwingen worden betrokken.

De betekenis van de belangrijkste theorieën is in figuur 4.1. aangegeven, welke ook een overzicht van het geldigheidsgebied van deze theorieën verschaft. Hierbij worden de dimensieloze parameters $H/g T^2$ en $d/g T^2$ gebruikt.

De betekenis der variabelen is als volgt:

- a. De golflengte L is de horizontale afstand tussen twee opeenvolgende kammen.
- b. De periode T is de tijd die op een bepaald vast punt verloopt tussen het passeren van twee opeenvolgende golfkammen.
- c. De frequentie f is het omgekeerde van de periode T .
- d. De voortplantingssnelheid C , ook wel golfsnelheid of fase-snelheid genoemd, is de snelheid waarmee het beeld van het golfprofiel verloopt; er is hier dus geen sprake van een snelheid waarmee de waterdeeltjes zich verplaatsen.
- e. De hoogte H is het hoogteverschil tussen de hoogste en de laagste punten van het golfprofiel.
- f. De steilheid is de verhouding van golfhoogte tot golflengte, dus H/L .



Figuur 4.1.: Geldigheidsgebieden van verschillende golftheorieën

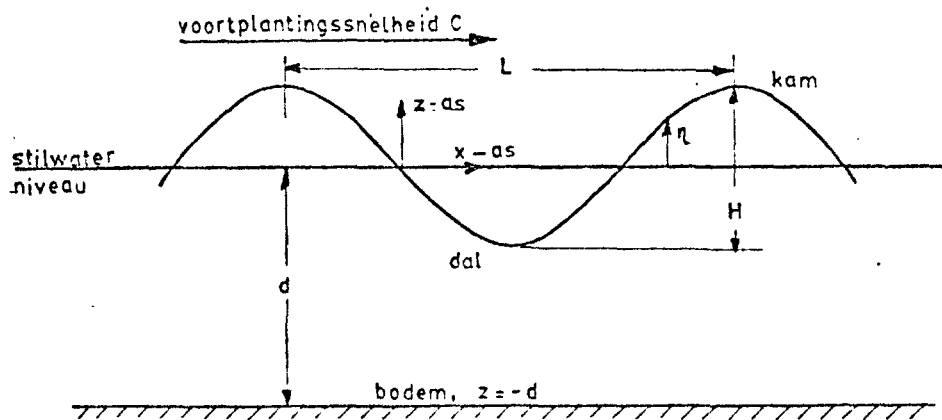


Fig. 4.2.: Profiel van een enkelvoudige golf

Er bestaan twee klassieke theorieën, de een ontwikkeld door Airy (1845) en de ander door Stokes (1880), die de enkelvoudige golf beschrijven.

De bovengenoemde twee theorieën voorspellen het golfgedrag in het algemeen beter als de verhouding tussen waterdiepte en golflengte niet te klein wordt.

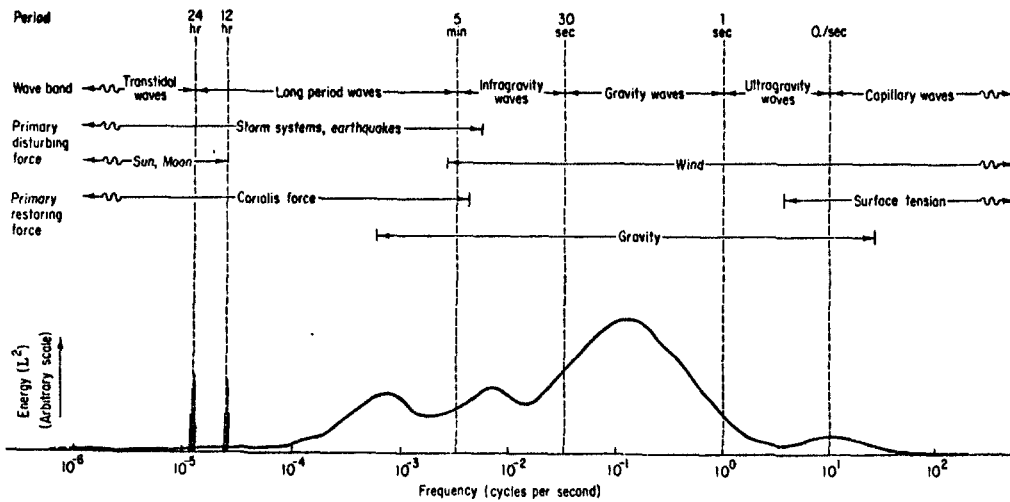
Voor ondiep water geeft de cnoïdale golftheorie, oorspronkelijk ontwikkeld door Korteweg en De Vries (1895), vaak een redelijke benadering van enkelvoudige golven. Deze theorie is echter vrij moeilijk toegankelijk voor berekening.

Voor golven op zeer ondiep water worden de golven het best beschreven door de eenling-golftheorie.

In tegenstelling tot de cnoïdale golftheorie is de eenling-golftheorie vrij eenvoudig te hanteren.

Het is van belang een onderscheid te maken tussen verschillende watergolven.

Het is mogelijk de golven te classificeren met behulp van de golfperiode T of door de reciproke waarde van T , de golffrequentie f . In figuur 4.3. is een voorbeeld gegeven.



Figuur 4.3.: Classificatie van oppervlaktegolven en de globale energieverdeling als functie van de golffrequentie (lit. 37).

De golven die in figuur 4.3. worden aangeduid als "zwaartekrachtgolven" met een golfperiode van 1 tot 30 seconden zijn het belangrijkste.

Bij dit type golven is de invloed van de zwaartekracht belangrijk; de zwaartekracht tracht de golf weer in zijn evenwichtspositie terug te brengen.

Figuur 4.3. laat ook zien dat een groot deel van de totale golfenergie in de zwaartekrachtgolven is opgehoopt.

Zwaartekrachtgolven kunnen verder worden onderverdeeld in:

- a. zeevang; als de golven zich onder invloed van de wind ontwikkelen
- b. deining; als de golven zich uit het windveld bewegen naar een gebied zonder windinvloed.

In het navolgende worden geen afleidingen gegeven, slechts de resultaten van bepaalde theorieën worden gegeven.

Voor diepergaande beschouwingen wordt verwezen naar onder andere lit. 4, 33, 37, 38 en 41.

Lineaire golftheorie voor kleine amplituden

Vele verschijnselen zijn met de lineaire- of de Airy-Laplace golftheorie - met voldoende nauwkeurigheid te behandelen.

De theorie waarin alle kwadratische termen en de delen van de basis-hydrodynamische vergelijkingen van hogere orde worden verwaarloosd, gaat uit van de volgende veronderstellingen:

1. sinusvormig oppervlak van de waterspiegel
2. kleine amplituden, dat wil zeggen $H \ll L$, $H \ll d$
3. vlakke ondergrond
4. ideale vloeistof, dat wil zeggen wrijvingsloos, incompressibel, homogeen
5. geen invloed van de luchtbeweging op de golfbeweging.

Het is gebruikelijk de relatieve waterdiepte d/L als volgt in te delen:

- diep water $d/L \geq 0,5$
- overgangsgedebied $0,5 > d/L > 0,04$ (4.1.)
- ondiep water $d/L \leq 0,04$

De betrekking tissen golflengte (L), golfperiode (T) en voortplantings-snelheid (C) is als volgt:

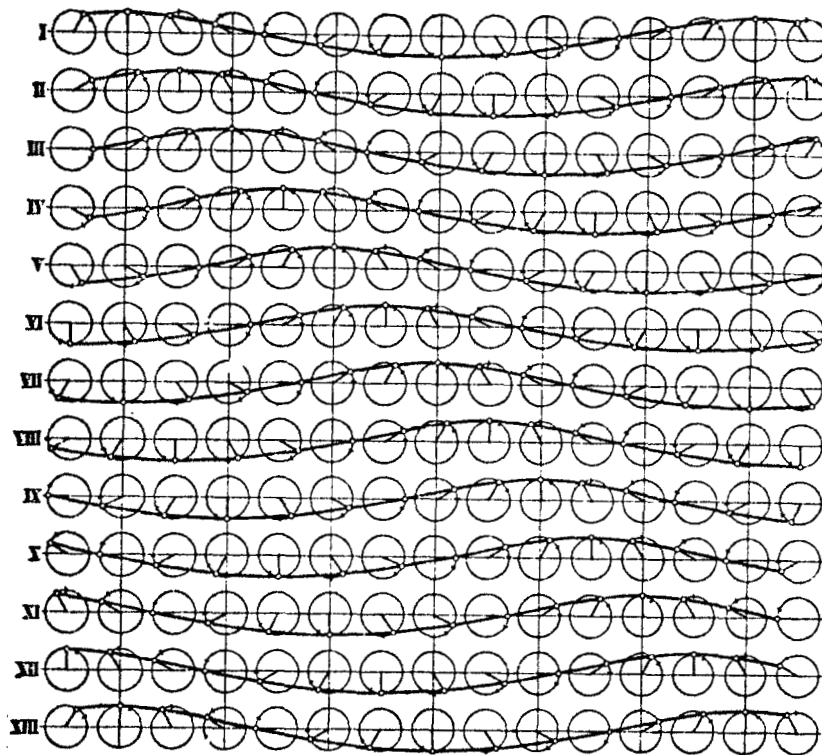
$$C = L/T \quad (4.2.)$$

Deze betrekking geldt geheel algemeen, onafhankelijk van de hoogte van de golven of de diepte van het water.

Als er golven over het water gaan, moeten de waterdeeltjes zich uit de aard der zaak op en neer bewegen.

Bij nauwkeuriger waarneming van lichte voorwerpen die op het water drijven blijkt echter, dat het water niet alleen maar op en neer gaat, maar ook vooruit en achteruit.

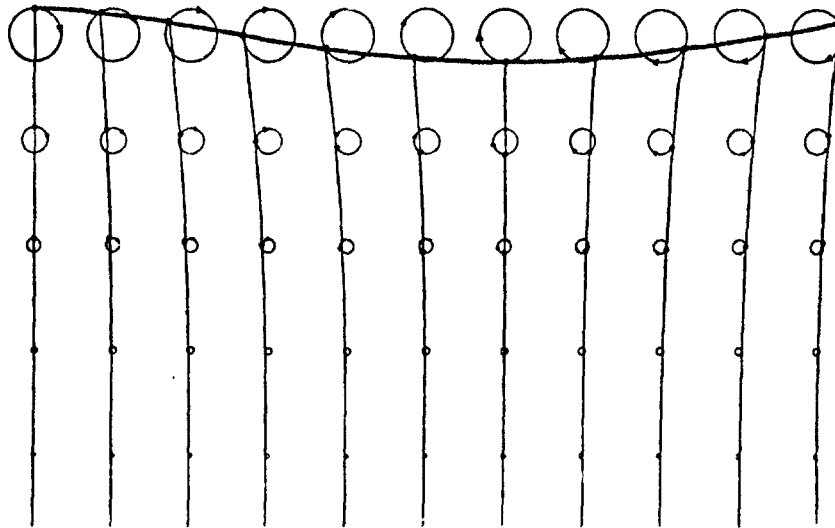
In feite beschrijven de waterdeeltjes kringen in een vertikaal vlak. Is de diepte van het water groot genoeg (gelijk aan of meer dan een halve golflengte) dan zijn deze kringen nagenoeg cirkels. Figuur 4.4. geeft een beeld van wat de waterdeeltjes doen bij een enkelvoudige golving.



Figuur 4.4.: Voortschrijding van een enkelvoudige golfbeweging
13 momentopnamen met tijdsintervallen van telkens
1/12 periode

Aan het oppervlak beschrijven al die waterdeeltjes cirkels met een middellijn gelijk aan de hoogte van de golven. Elk deeltje beschrijft in het tijdsverloop van één periode juist eenmaal zijn eigen cirkel. Het gaat door zijn hoogste punt met een voorwaartse beweging op het ogenblik dat de golfkam dit punt passeert en gaat door zijn diepste punt met een teruggaande beweging op het moment dat het het daaropvolgende golfdal voorbijgaat.

Niet alleen het water aan het oppervlak gaat op en neer en heen en weer, maar ook het water onder het oppervlak; de waterdeeltjes daar doen mee met het beschrijven van kringen. Het is echter zo dat, hoe dieper we komen, hoe kleiner de kringen zijn, zie figuur 4.5.



Figuur 4.5.: Banen van waterdeeltjes op verschillende diepten bij een enkelvoudige golf in diep water; de middelpunten van de cirkeltjes verschillen telkens ongeveer $1/9$ van de golflengte in hoogte

De diameter van de kringen volgt uit de volgende formule:

$$\text{diameter} = H e^{2\pi z/L} \quad (4.3.)$$

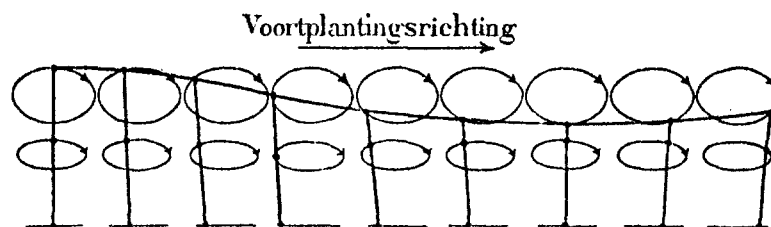
Voor de betekenis der variabelen zie figuur 4.2.

Daar de waterdeeltjes op alle diepten hun banen in dezelfde tijd, namelijk de periode, eenmaal doorlopen houdt dit dus ook in dat de snelheden van de waterdeeltjes op de verschillende diepten op dezelfde wijze als de diameter van de kringen met toenemende diepte afnemen.

Hieruit volgen twee belangrijke dingen:

- hoe groter de golflengte, hoe groter ook de diepte waarop de golfbeweging nog merkbaar is
- beneden een diepte van $1/2 L$ bedragen de bewegingen van het water minder dan 4% van de bewegingen aan het oppervlak.

Is het water zo ondiep, of zijn de golven zo lang dat, volgens (4.3.) het water op de bodem cirkeltjes van een merkbare straal zou moeten beschrijven (voor de praktijk rekent men dat dit het geval is zodra de diepte kleiner is dan $1/2 L$), dan gaan de hiervoor gegeven beschouwingen niet geheel meer op. Immers, het water op de bodem kan geen verticale kringetjes van merkbare afmetingen beschrijven, het kan alleen maar langs de bodem heen en weer als het in beweging moet zijn. Op hogere niveaus kan het water weliswaar op en neer, maar er worden dan toch nergens cirkels beschreven, maar afgeplatte ellipsen zoals is afgebeeld in figuur 4.6.



Figuur 4.6.: Banen van de waterdeeltjes bij een enkelvoudige golf in ondiep water

Hoe dichter bij de bodem hoe korter, maar ook hoe platter de ellipsen. Golven op ondiep water zijn gekenmerkt door een grotere horizontale waterbeweging dan golven van dezelfde hoogte op diep water en zijn daardoor dus gevaarlijker.

De snelheid waarmee een groep golven zich voortbeweegt is in het algemeen niet gelijk aan de voortplantingssnelheid van de golven in de groep zelf. Terwijl de golftoppen met de hun eigen voortplantingssnelheid voortlopen, verplaatst ook de groep als zodanig zich met de groepssnelheid C_g .

Zowel theoretisch als uit de ervaring blijkt, dat een groep zich in diep water verplaatst met een snelheid die de helft is van de voortplantingssnelheid der individuele golven.

Bij zeer ondiep water zijn de voortplantingssnelheid van de golf en de groepssnelheid aan elkaar gelijk.

Onder de energie van watergolven verstaat men het arbeidsvermogen dat er aan en onder het golvende wateroppervlak per eenheid van oppervlak gemiddeld aanwezig is in de vorm van arbeidsvermogen van plaats en van arbeidsvermogen van beweging. Wanneer deze energieën worden berekend dan blijkt dat de twee delen van de energie, de potentiële en de kinetische energie, beiden even groot zijn:

$$E_{kin} = E_{pot} = 1/8 g \rho H^2 \quad (4.4.)$$

waarin ρ = dichtheid van water.

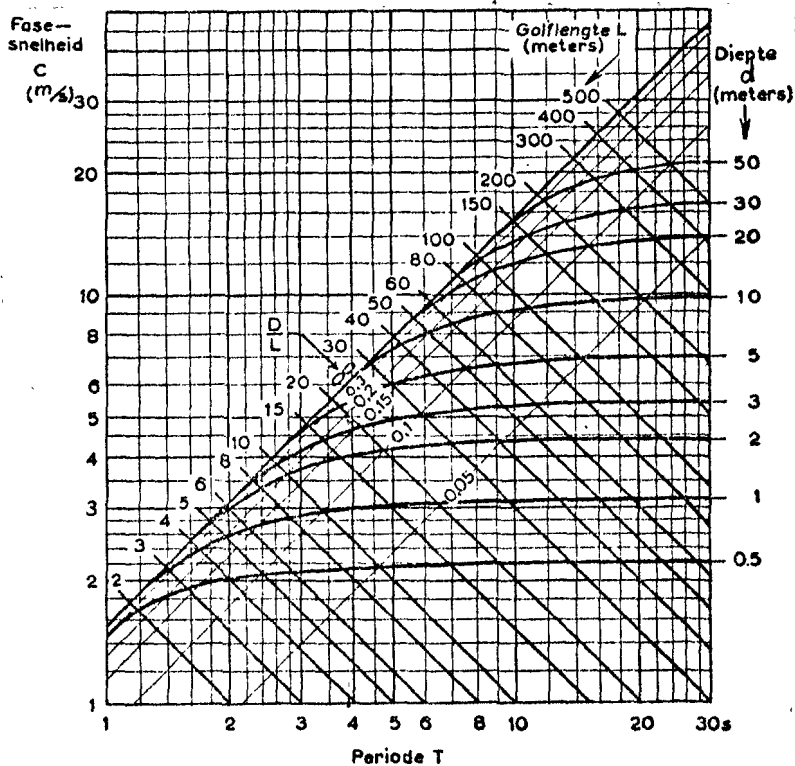
De energie plant zich voort met de groepssnelheid C_g .

De voor praktische toepassing belangrijkste formules zijn samengevat in tabel 2.

	ondiep water $d/L < 1/25$	overgangsgebied $1/25 < d/L < 1/2$	diep water $d/L > 1/2$
1. golfprofiel	idem	$\eta = \frac{H}{2} \cos \left[\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T} \right] = \frac{H}{2} \cos \theta$	idem
2. golfsnelheid	$C = \frac{L}{T} = \sqrt{gd}$	$C = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi} \tanh \left(\frac{2\pi d}{L} \right)$	$C = C_0 = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi}$
3. golflengte	$L = T \sqrt{gd} = CT$	$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \left(\frac{2\pi d}{L} \right)$	$L = L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} = C_0 T$
4. groepssnelh.	$C_g = C = \sqrt{gd}$	$C_g = nC = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{4\pi d/L}{\sinh(4\pi d/L)} \right] \cdot C$	$C_g = \frac{1}{2} C = \frac{gT}{4\pi}$
5. snelh. waterd.			
a. hor.	$u = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{d}} \cos \theta$	$u = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \cos \theta$	$u = \frac{\pi H}{T} e^{\frac{2\pi z}{L}} \cos \theta$
b. vert.	$w = \frac{H\pi}{T} \left(1 + \frac{z}{d}\right) \sin \theta$	$w = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\sinh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \sin \theta$	$w = \frac{\pi H}{T} e^{\frac{2\pi z}{L}} \sin \theta$
6. versn. waterd.			
a. hor.	$a_x = \frac{H\pi}{T} \sqrt{\frac{g}{d}} \sin \theta$	$a_x = \frac{g\pi H}{L} \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \sin \theta$	$a_x = 2H \left(\frac{\pi}{T}\right)^2 e^{\frac{2\pi z}{L}} \sin \theta$
b. vert.	$a_z = -2H \left(\frac{\pi}{T}\right)^2 \left(1 + \frac{z}{d}\right) \cos \theta$	$a_z = -\frac{g\pi H}{L} \frac{\sinh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \cos \theta$	$a_z = -2H \left(\frac{\pi}{T}\right)^2 e^{\frac{2\pi z}{L}} \cos \theta$
7. verpl. waterd.			
a. hor.	$\xi = -\frac{HT}{4\pi} \sqrt{\frac{g}{d}} \sin \theta$	$\xi = -\frac{H}{2} \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\sinh(2\pi d/L)} \sin \theta$	$\xi = -\frac{H}{2} e^{\frac{2\pi z}{L}} \sin \theta$
b. vert.	$\zeta = \frac{H}{2} \left(1 + \frac{z}{d}\right) \cos \theta$	$\zeta = \frac{H}{2} \frac{\sinh[2\pi(z+d)/L]}{\sinh(2\pi d/L)} \cos \theta$	$\zeta = \frac{H}{2} e^{\frac{2\pi z}{L}} \cos \theta$
8. waterdruk	$p = \rho g (\eta - z)$	$p = \rho g \eta \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} - \rho g z$	$p = \rho g \eta e^{\frac{2\pi z}{L}} - \rho g z$

Tabel 2: Samenvatting lineaire (Airy) golftheorie

Fig. 4.7. toont grafisch het verband tussen de verschillende grootheden.



Figuur 4.7.: Grafiek ter bepaling van de golflengte L (in m), de fase- of golfsnelheid C (in m/s) of de golfperiode T (in sec.) voor een enkelvoudige golf, wanneer één van deze grootheden en de diepte d (in m) zijn gegeven (lit. 4).

Voor golven op zeer ondiep water gelden de voorgaande formules niet meer als de golfhoogte vergelijkbaar wordt met de diepte. In dit geval zijn de golven zodanig vervormd, dat de dalen steeds vlakker en breder en de ruggen in verhouding steeds nauwer worden naarmate het water ondieper is. De energie gaat zich dan in hoofdzaak nabij de kammen ophopen. Tussen de kammen is het water in zwakke gelijkmatige achterwaartse beweging en de kammen worden praktisch onafhankelijk van elkaar. Ze gaan dan gelijken op een serie zogenaamde eenlinggolven. Voor de snelheid van zulke golven geeft de theorie, die wordt bevestigd door metingen:

$$C = \sqrt{g (H + d)} \quad (4.5.)$$

waarin

d = de diepte, gemeten beneden de vlakke gedeelten

H = de golfhoogte

Voor de energie per eenheid van kamlengte geeft de theorie de volgende uitdrukking:

$$E = \frac{8}{3\sqrt{3}} \rho g H^{3/2} d^{3/2} \quad (4.6.)$$

Hieronder wordt een samenvatting gegeven van enkele belangrijke formules uit de theorie der eenlinggolven.

1. Golfprofiel $y_s = d + H \operatorname{sech}^2 \left[\sqrt{\frac{3}{4}} \frac{H}{d} (x - Ct) \right]$ (4.7.)

2. Golfsnelheid $C = \sqrt{g (H + d)}$ (4.8.)

3. Golflengte $L = T \sqrt{g (H + d)} = CT$ (4.9.)

4. Snelheid waterdeeltjes

a. horizontaal $u = CN \frac{1 + \cos (M y/d) \cosh (M x/d)}{[\cos (M y/d) + \cosh (M x/d)]^2}$ (4.10.)

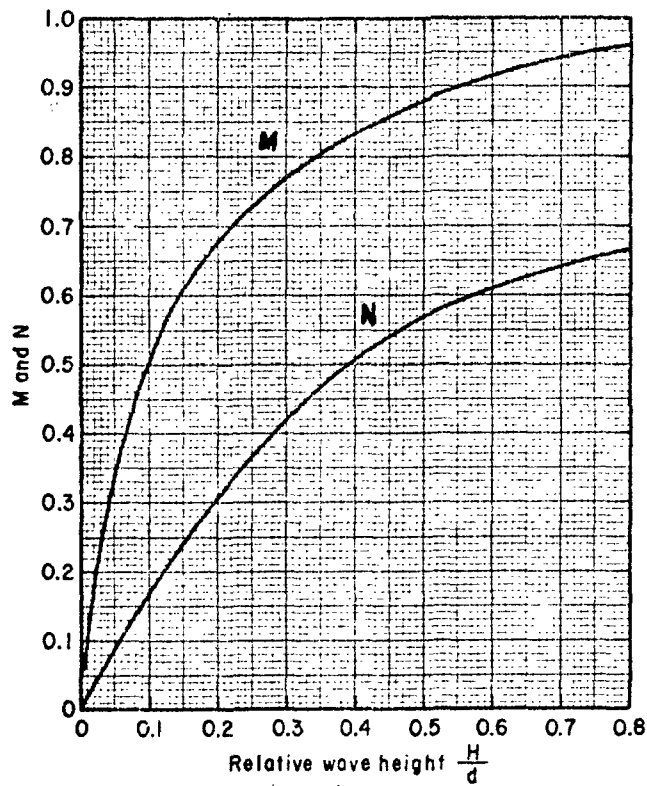
b. vertikaal $w = CN \frac{\sin (M y/d) \sinh (M x/d)}{[\cos (M y/d) + \cosh (M x/d)]^2}$ (4.11.)

5. Waterdruk $p = \rho g (y_s - y)$

waarin y_s = stand waterspiegel gemeten vanaf de bodem

y = plaats gerekend vanaf de bodem.

De grootheden M en N kunnen uit figuur 4.8. worden afgelezen.



Figuur 4.8.: Functies M en N in de theorie der eenlinggolven

Afgezien wordt hier verder van de behandeling van de hogere orde Stokes golven en de coïdale theorie, daar dit in het kader van dit rapport te ver zou voeren.

4.2.2. Lokale eigenschappen individueel golfveld

Onregelmatige golven zijn aanzienlijk moeilijker te beschrijven dan regelmatige golven.

Het door de wind opgewekte golfbeeld heeft een onregelmatig karakter, dat te beschrijven is als de som van een groot aantal sinusvormige componenten, elk met een eigen amplitude en frequentie.

$$A(t) = \sum_{n=1}^N A_n \sin\left(\frac{2\pi t}{T_n} + \phi_n\right) \quad (4.13.)$$

waarin A_n = amplitude van de n^e component (m)

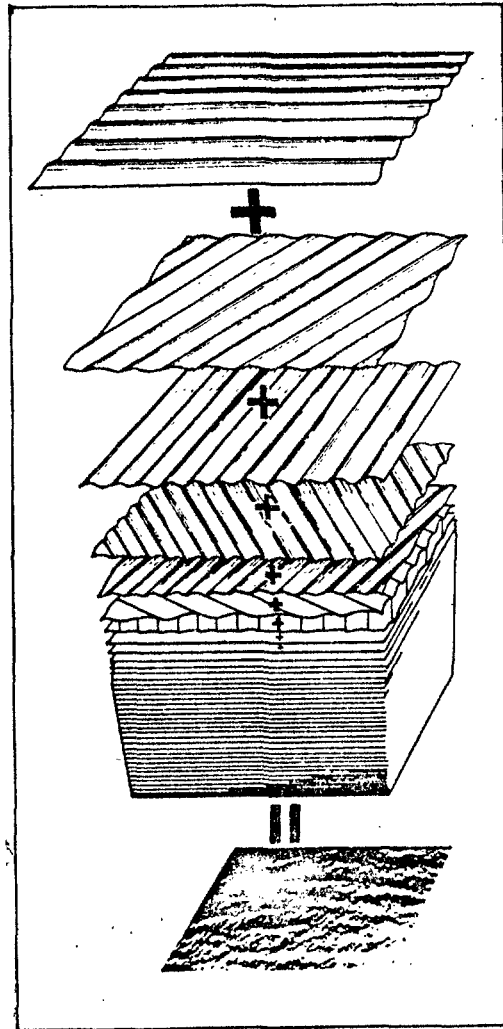
T_n = periode van de n^e component (s)

ϕ_n = fase van de n^e component (rad.)

Formule 4.13. zal dan ook nog in de diverse richtingen moeten worden toegepast wegens het ruimtelijk karakter van de windgolven, zie figuur 4.9.

Het chaotische karakter van golven die door de wind worden opgewekt is een wezenlijk kenmerk van die golven. Omdat deze schijnbare chaos alleen is te ordenen in termen van kansen van optreden van bepaalde verschijnselen wordt in de beschrijving van dit aspect gebruik gemaakt van de waarschijnlijkheidsleer.

De normale statistische parameters kunnen worden gebruikt om de verdeling van de golven te beschrijven. In de praktijk van de kustwaterbouw worden de kleinere golven echter vaak verwaarloosd en het gemiddelde van het hoogste 1/3 deel van de golven als kenmerkende grootheid genomen. Dit gemiddelde wordt de significante golfhoogte genoemd en is ongeveer dezelfde golfhoogte zoals die door een ervaren waarnemer visueel wordt geschat.



Figuur 4.9.: Ontleding van het zeeoppervlak in een groot aantal regelmatigige golfbewegingen

Deze waarde wordt aangeduid met H_s .

Een andere parameter is de "root-mean-square" golfhoogte. Voor een groep van N golven wordt dit gedefinieerd als:

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N H_i^2}{N}} \quad (4.14.)$$

Op gelijksoortige wijze kan een karakteristieke golfperiode worden bepaald.

Een nadeel van de hiervoor genoemde parameters H_s en H_{rms} is dat het slechts een zeer globale beschrijving geeft van het totale golfbeeld.

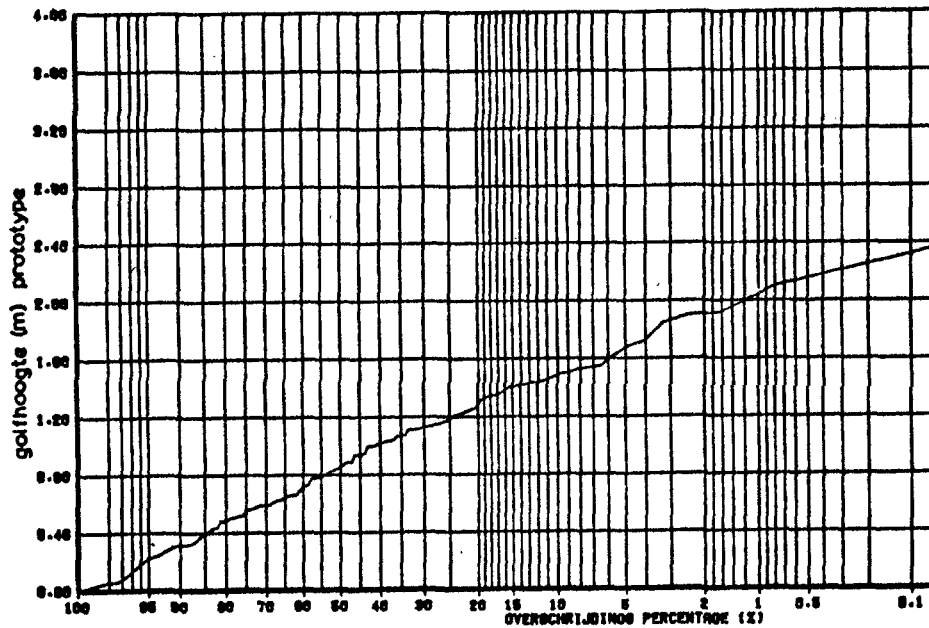
Doordat vele stochastische processen niet een geheel willekeurig karakter hebben, kunnen deze worden beschreven door theoretische verdelingsfuncties.

Met een redelijke nauwkeurigheid kunnen golfhoogten van onregelmatige windgolven met de Rayleigh verdelingsfunctie worden beschreven. Deze verdeling wordt gekarakteriseerd met behulp van één parameter:

$$P_r (\underline{H} > H) = e^{-2 (H/H_s)^2} \quad (4.15.)$$

waarin $P_r (\underline{H} > H)$ = de kans van overschrijding van de golfhoogte H
 \underline{H} = individuele golfhooftte als stochast (m)
 H = individuele golfhoogte (m)
 H_s = significante golfhoogte (m)

Met behulp van speciaal papier is het mogelijk formule (4.15.) bij benadering tot een rechte lijn te transformeren, zie figuur 4.10.



Figuur 4.10.: Rayleigh verdeling

Enige handige relaties, gebaseerd op de Rayleigh verdeling zijn:

$$H_{sig} = \sqrt{2} H_{rms} \quad (4.16.)$$

$$\bar{H} = 0,886 H_{rms} \quad (4.17.)$$

waarin \bar{H} het gemiddelde van alle golven is.

De meest waarschijnlijke golfhoogte in een golfsysteem is natuurlijk afhankelijk van de significante golfhoogte, maar ook van de hoeveelheid golven die men beschouwt.

Wanneer men een klein aantal golven neemt is er weinig kans dat er een paar van de hoogste golven bij zijn, maar als we met hetzelfde weer verscheidene honderden golven beschouwen, kunnen we verwachten enkele van de hoogste golven te hebben waargenomen. Deze verhouding kan worden uitgedrukt met de volgende formule:

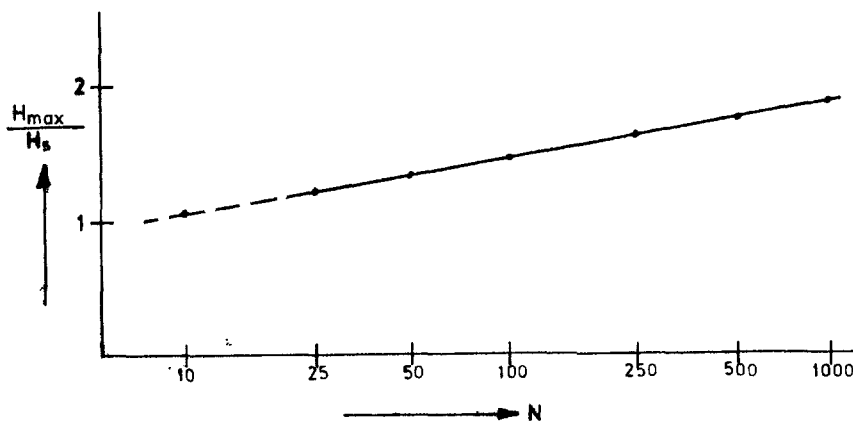
$$H_{max} = H_s \sqrt{\frac{\ln N}{2}} \quad (4.18.)$$

waarin $\ln N$ = de natuurlijke logaritme van N

N = het aantal golven.

Deze formule geldt slechts voor grote waarden van N en is bruikbaar als N groter is dan circa 20.

Zoals aangetoond wordt in figuur 4.11. varieert H_{max} langzaam met N , als vuistregel kan men zeggen dat de maximale golfhoogte het dubbele is van de significante golfhoogte.



Figuur 4.11.: Verhouding tussen de grootste golfhoogte en de significante golfhoogte als functie van het aantal golven

De periode en lengte in een onregelmatig golfsysteem zijn wat meer gecompliceerd dan de hoogte, maar voor praktische doeleinden worden ze gedefinieerd door de gemiddelde periode \bar{T} , die de gemiddelde waarde is van de tijd T tussen twee nulniveaupassages.

Voor het beschrijven van onregelmatige golven kunnen we dus gebruik maken van twee grootheden.

Ten eerste van de significante golfhoogte H_s en ten tweede van de gemiddelde golfperiode T .

Een andere mogelijkheid om een golfbeeld in tekening te brengen is het golfspectrum en beschrijft in tegenstelling tot het begrip significante golfhoogte ten volle de statistische eigenschappen van onregelmatige golven.

Men definieert daarbij een energiedichtheid (E) als de functie van de frequentie (f) van de spectrale componenten, zodanig dat de hoeveelheid energie die door de componenten met frequenties f_1 en f_2 wordt bijgedragen aan het totaal gelijk is aan:

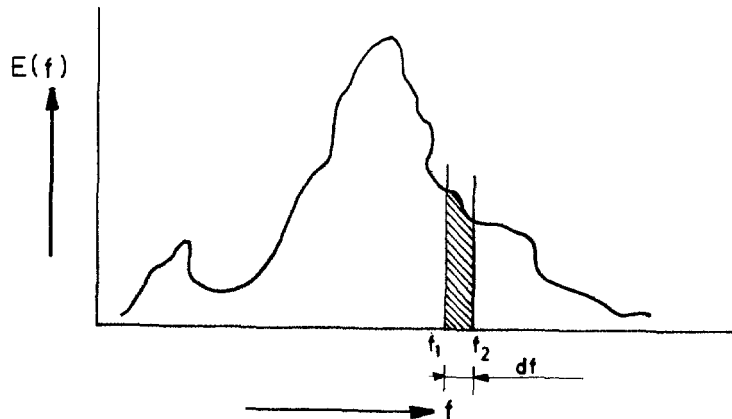
$$\int_{f_2}^{f_1} E(f) df$$

De totale energie wordt geleverd door alle frequenties gezamenlijk:

$$\text{totale energie} = \int_0^{\infty} E(f) df \quad (4.19.)$$

$$\text{waarbij } E(f) = \frac{\rho g H^2}{8} \quad (4.20.)$$

In figuur 4.12. wordt een en ander geïllustreerd.



Figuur 4.12.: Eendimensionaal energiedichtheidsspectrum

In de praktijk wordt vaak niet gerekend met de energie per eenheid van oppervlak, maar met een grootte die gelijk is aan de energie per eenheid van oppervlak gedeeld door ρ g; dit wordt het variantiedichtheidsspectrum genoemd.

Zijn de spectrale componenten niet onafhankelijk van elkaar dan beschrijft het spectrum het golfbeeld niet meer volledig, hoewel het ook dan een zeer bruikbare grootte is.

Voor zover het spectrum het golfbeeld in statistische zin volledig beschrijft, is het in principe mogelijk statistische eigenschappen van het golfbeeld uit het spectrum te berekenen.

Zo zijn bijvoorbeeld de significante golfhoogte H_s en de gemiddelde nuldoorgang \bar{T} aan de hand van de Rayleigh-verdeling te schatten met behulp van het nulde en tweede moment van het spectrum.

$$H_s \approx 4 \sqrt{m_0} \tag{4.21.}$$

$$\bar{T} \approx \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \tag{4.22.}$$

waarin $m_n = \int_0^\infty f^n E(f) df$ (4.23.)

In het voorgaande werd de beschouwing beperkt tot het golfbeeld op één bepaalde plaats als functie van de tijd.

Men kan het wateroppervlak ook beschouwen op één tijdstip als functie van de ruimte: $h = h(x, y)$; een "bevroren" oppervlak.

In analogie met de beschouwing is het ook hier voldoende alleen de amplituden te kennen; nu niet als functie van de frequentie maar als functie van golflengte en richting.

De golflengte (L) is het ruimtelijk equivalent van de golfperiode (T) en zoals het gebruikelijk is de frequentie te hanteren als de reciproke van de periode ($f = 1/T$), zo is het gebruikelijk het golfgetal te hanteren als reciproke van de golflengte ($k = 1/L$).

Er is nu sprake van een energiedichtheidsspectrum dat aangeeft hoe de energie is verdeeld over de golfgetallen (k) en richtingen.

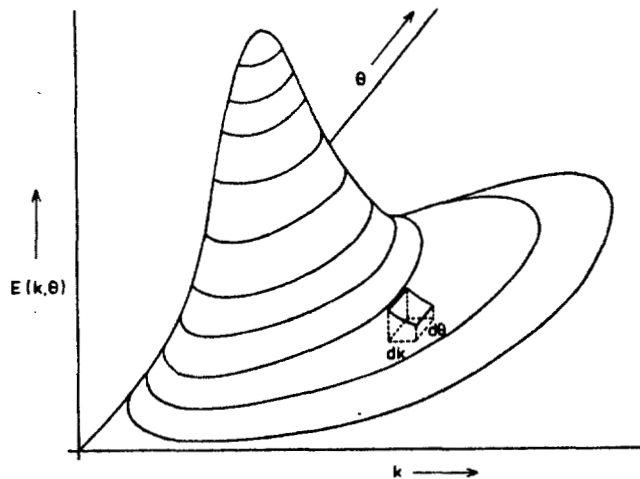
De definitie van dit tweedimensionale spectrum $E(k, \theta)$ is analoog aan die van het ééndimensionale frequentiespectrum $E(f)$: de bijdrage aan de totale hoeveelheid energie van de componenten met golfgetallen tussen k_1 en k_2 en met richtingen tussen θ_1 en θ_2 wordt weergegeven door:

$$\int_{k_1}^{k_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} E(k, \theta) dk d\theta \quad (4.24.)$$

De totale energie is gelijk aan de inhoud van dit spectrum:

$$\text{Totale energie} = \int_0^{\infty} \int_{-\pi}^{+\pi} E(k, \theta) dk d\theta \quad (4.25.)$$

In figuur 4.12. is een schets gegeven van een dergelijk spectrum.



Figuur 4.12.: Tweedimensionaal energiedichtheidsspectrum

Het frequentiespectrum $E(f)$ kan uit het tweedimensionale spectrum $E(f, \theta)$ worden berekend door per frequentie de bijdragen uit alle richtingen samen te voegen volgens:

$$E(f) = \int_{-\pi}^{+\pi} E(f, \theta) d\theta \quad (4.26.)$$

De spreiding van de energiedichtheid over de richtingen kan voor elke frequentie worden weergegeven met behulp van een aparte functie: de genormeerde richtingsverdelingsfunctie.

De normering komt tot stand door de energiedichtheid te delen door de totale energiedichtheid bij die gegeven frequentie, volgens:

$$D(\theta; f) = E(f, \theta)/E(f) \quad (4.27.)$$

Uit deze definitie volgt:

$$\int_{-\pi}^{+\pi} D(\theta; f) = 1 \quad (4.28.)$$

Analoog aan de Rayleigh-verdeling voor de kenmerkende golf is het mogelijk standaard spectra te definiëren.

De meest bekende uitdrukkingen voor het standaard frequentiespectrum kunnen vrijwel allemaal worden weergegeven door de volgende uitdrukking:

$$E(f) = \alpha_0 g^2 (2\pi)^{-4} f^{-m} \exp \left[-\frac{m}{n} \left(\frac{f}{f_m} \right)^{-n} \right] \gamma(f) \quad (4.29.)$$

Hierin is $\gamma(f)$ de zogenaamde piekversterkingsfunctie, die van de volgende vorm is:

$$\gamma(f) = \gamma_0 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{f - f_m}{\sigma f_m} \right)^2 \right] \quad (4.30.)$$

De parameters m , n , γ_0 en σ zijn de vormparameters.

De parameter α_0 is een dimensieloze coëfficiënt, f_m is de piekfrequentie.

Formule (4.29.) is te schrijven als het produkt van drie functies volgens:

$$E(f) = a \cdot \phi_1 \cdot \phi_2 \cdot \phi_3 \quad (4.31.)$$

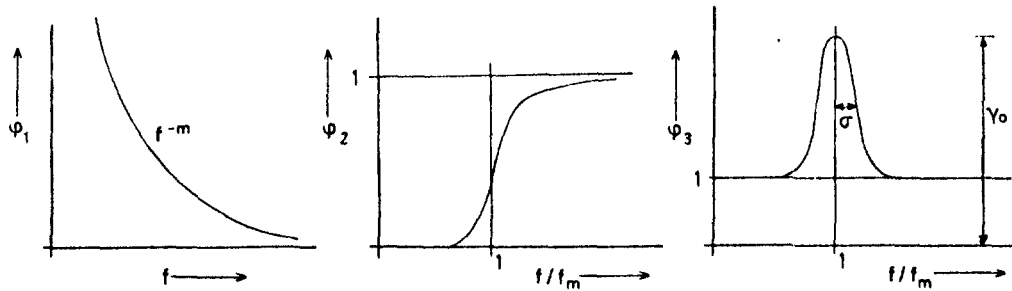
waarbij a = evenredigheidsconstante

$$\phi_1 = f^{-m}$$

$$\phi_2 = \exp \left[-\frac{m}{n} \left(\frac{f}{f_m} \right)^{-n} \right]$$

$$\phi_3 = \gamma(f)$$

Deze drie functies hebben schematisch weergegeven ongeveer het verloop dat is geschetst in figuur 4.13.



Figuur 4.13.: Opbouw van het standaard frequentiespectrum

De waarden van m en n hebben voornamelijk invloed op de hoog- resp. laag-frequente flank van het spectrum, terwijl γ_0 en σ de hoogte en de breedte van de piek beheersen.

Door vele onderzoekers zijn spectra vastgesteld:

● Neumann spectrum

$$\gamma(f) = 1, m = 6, n = 2, \alpha_0 = 4,1 \cdot 10^{-3} \text{ en } \tilde{f}_m = 0,816 \text{ g}/(2\pi U_{7,5})$$

($\tilde{f}_m = 0,314$ als $U_{7,5} = U_{10}$)

waarin $\tilde{f}_m = f_m U/g$

U = windsnelheid op een zekere hoogte gemeten.

Spectra waar dezelfde waarden voor de vormparameters zijn gebruikt maar waar α_0 en \tilde{f}_m andere waarden hebben worden spectra van het Neumann-type genoemd.

● Pierson-Moskowitz spectrum

$$\gamma(f) = 1, m = 5, n = 4, \alpha_0 = 8,1 \cdot 10^{-3} \text{ en } \tilde{f}_m = 0,88 \text{ g}/(2\pi U_{19,5})$$

($\tilde{f}_m = 0,13$ als $U_{19,5} = 1,07 U_{10}$).

Als de laatste twee parameters andere waarden hebben, dan wordt van een Pierson-Moskowitz spectrum gesproken.

● Jonswap spectrum

$m = 5, n = 4, \gamma_0$ varieert tussen 1 en 7 met een gemiddelde van 3,2,
 $\alpha_0 = 8,1 \cdot 10^{-3}$ (voor volledig ontwikkelde zeevang).

Voor σ geldt:

$$\sigma = \sigma_a \text{ voor } f < f_m = 0,07 \text{ (gemiddeld)}$$

$$\sigma = \sigma_b \text{ voor } f > f_m = 0,09 \text{ (gemiddeld)}$$

Als deze parameters andere waarden hebben dan wordt van een Jonswap type spectrum gesproken.

Een Pierson-Moskowitz spectrum en een Pierson-Moskowitz-type spectrum zijn dus Jonswap-type spectra.

Bovenvermelde waarden gelden voor volgroeide zeevang; voor niet vol-groeide zeevang wordt verwezen naar 4.3.3.

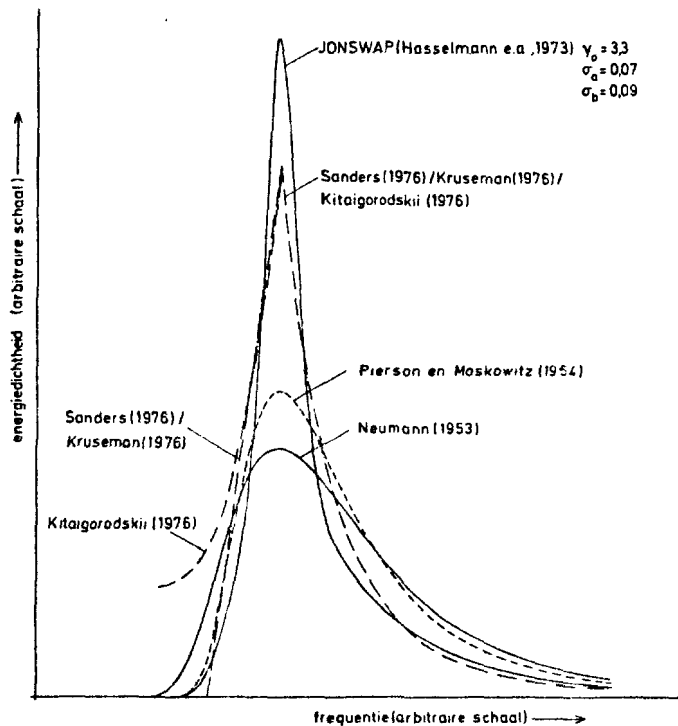
In de literatuur worden nog vele andere spectrumvormen voorgesteld; in het kader van dit rapport wordt het overzicht echter beperkt tot boven-genoemde 3 typen spectra. Een illustratie van de verschillende spectra wordt gegeven in figuur 4.14.

Het is ook mogelijk het standaardspectrum in termen van significante golfhoogte- en -periode op te geven; zie formule (4.29.).

Voor $\gamma_0 = 1$ en voor de gebruikelijke waarden $m = 5$ en $n = 4$ krijgt men dan:

$$E(f) = \frac{5}{16} H_s^2 f^{-5} \left(\frac{T_s}{\beta}\right)^{-4} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f T_s}{\beta}\right)^{-4} \right] \quad (4.32.)$$

waarin $T_s = \beta/f_m \approx 0,95/f_m$



Figuur 4.14.: Enkele genormaliseerde frequentiespectra

Het Bretschneider spectrum is gelijk aan deze uitdrukking als

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{4}{5}} \approx 0,95 \text{ wordt gesubstitueerd, zodat dit spectrum kan}$$

worden geschreven als:

$$E(f) = 1/4 H_s^2 T_s^{-4} \exp [- (f T_s)^{-4}] \tag{4.33.}$$

4.2.3. Klimatologische verzameling van golfvelden

Eerder werd vermeld hoe men een gegeven onregelmatig golfsysteem kan definiëren en hoe de afzonderlijke golven in zo'n systeem variëren over een kort tijdsbestek. Zulke variaties gedurende korte tijd met stationaire toestand worden "korttijds verdelingen" genoemd.

Wanneer men de significante golfhoogte en de periode waarneemt op een bepaalde plaats gedurende lange tijd, variëren deze waarden inmiddels ook wanneer het weer verandert. Deze statistische verdelingsfuncties over lange tijd worden "langtijds verdelingen" genoemd.

Alle zeegebieden hebben verschillende langtijdsverdelingen. Een schatting van extreme golven op grond van korttijdsverdelingen naar langtijdsverdelingen bijvoorbeeld naar een tijdsduur van 100 jaar, moet met het nodige voorbehoud worden beoordeeld. Golfmetingen, die gewoonlijk naar hun kengetallen (bijvoorbeeld de hoogte H_g en de periode T_g) worden ingedeeld, kunnen in een histogram worden weergegeven, zie als voorbeeld tabel 3.

		golfperiode T (s)										
		4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5	
g o l f h o o g t e H	0,3	14	40	34	8							
	0,9	64	159	135	40	4						
	1,5	18	103	164	78	24	2					
	2,1	6	53	126	95	33	7	1				
	2,7		19	103	72	41	8	2				
	3,3		9	46	71	31	3	1				
	3,9		1	23	63	38	6	1				
	4,5			6	20	31	10	2	1			
	5,1			5	13	15	12	1				
	5,7			1	9	4	6	3				
	6,3				2	2	4	2				2
	6,9					1	3	7				
	7,5				1	1		4	2			
8,1					2							
8,7							2	2				
9,3											2	

verdeling van 1924 waarnemingen

Tabel 3: Voorbeeld van een histogram welke van twee parameters (H en T) afhankelijk is (lit. 42)

Voor elk paar waarnemingen H en T kan een aan de momentane omstandigheden aangepaste Rayleigh verdeling worden gegeven:

$$P(\underline{H} < H, T_j) = 1 - \exp \left[-2 \frac{H}{H_j} \right]^2 \tag{4.34.}$$

Een sommering van deze afzonderlijke verdelingen, waarbij rekening wordt gehouden met de procentuele bijdrage aan het totale histogram, leidt tot een verdeling van de lange duur:

$$P_{LD}(\underline{H} < H') = 1 - \left[\sum_i \sum_j \exp \left\{ -2 \left(\frac{H'}{H_i} \right)^2 \right\} n_{ij} / T_j \right] / \bar{N} \quad (4.35.)$$

waarbij n_{ij} het aandeel in de tijd is, waarvoor aan de volgende voorwaarde wordt voldaan:

$$H_i - \frac{\Delta H}{2} < H < H_i + \frac{\Delta H}{2} \quad (4.36.)$$

$$T_j - \frac{\Delta T}{2} < T < T_j + \frac{\Delta T}{2}$$

\bar{N} is het gemiddeld aantal golven per tijdseenheid

$$\bar{N} = \sum_i \sum_j n_{ij} / T_j \quad (4.37.)$$

De op deze wijze gevonden langtijdsverdeling kan vervolgens met bijvoorbeeld de Weibull-verdelingsfunctie

$$P(\underline{H} < H) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{H - \alpha}{\beta} \right) \right] \quad (4.38.)$$

of een Gumbel-verdelingsfunctie

$$P(\underline{H} < H) = \exp \left[- \exp \left\{ - \left(\frac{H - \delta}{\xi} \right) \right\} \right] \gamma \quad (4.39.)$$

worden benaderd.

De parameters α , β , γ evenals δ en ξ moeten met behulp van de waarnemingen worden bepaald.

Als voorbeeld geeft figuur 4.14., aan de hand van de waarden in tabel 3, de verdelingsfunctie van de golfhoogten op Weibull-waarschijnlijkheidspapier.

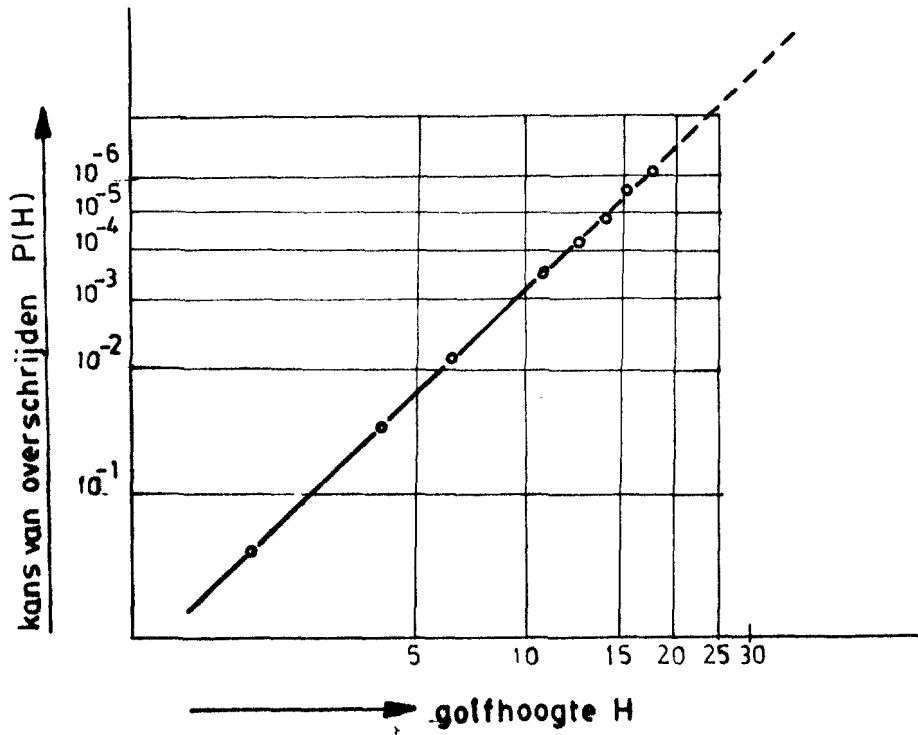
De assen werden zo gekozen dat aan de hand van de Weibull-verdelingsfunctie een rechte lijn ontstond.

De vergelijking van de Weibull-verdeling kan als volgt worden beschreven:

$$\ln[\ln(1-P(\underline{H} < H))^{-1}] = \gamma \ln(H - \alpha) - \gamma \ln \beta \quad (4.40.)$$

De afbeelding van $\ln[\ln(1 - P(\underline{H} < H))^{-1}]$ als functie van $\ln(H - \alpha)$ in figuur 4.1.4. laat zien dat met goede overeenstemming een rechte wordt verkregen.

In het algemeen blijft echter bij een extrapolatie de vraag open of de hieraan ten grondslag liggende tijdruimte ook als representatief kan worden beschouwd voor de gehele tijd waarover de extrapolatie plaatsvindt.



Figuur 4.14.: Langtijdsverdeling van golven volgens een Weibull-verdeling (lit. 42)

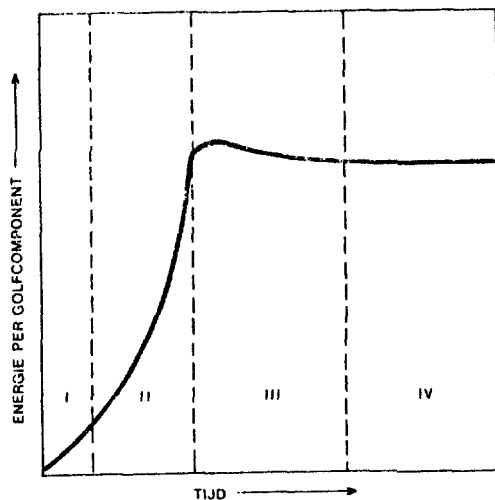
4.3. Golfgroei (zeegang)

4.3.1. Algemeen

Het groeien van zeegolven ten gevolge van de actie van de wind gaat in hoofdzaak op twee manieren: door drukking en zuiging enerzijds en door meesleping anderzijds. Beide effecten hebben hetzelfde gevolg: een versnelling van de bewegingen van de waterdeeltjes aan het oppervlak. Vooral ten behoeve van de ontwikkeling van verwachtingsmethoden voor zeegang heeft men getracht het proces van overdracht van energie van wind naar golven wiskundig te beschrijven.

Men onderscheidt per golfcomponent aanvankelijk drie stadia in de tijd, achtereenvolgens lineaire groei (I), exponentiële groei (II) en verzadiging (IV).

Later bleek er nog een tussenstadium te bestaan voordat de toestand van verzadiging is bereikt, waarbij de golfenergie tijdelijk uitschiet boven het uiteindelijke verzadigingsniveau (III); zie figuur 4.15.



Figuur 4.15.: Opbouw van de golfenergie in vier stadia

De groei van een bepaalde component begint lineair, dat wil zeggen met een constante energietoename per tijdseenheid als gevolg van de onregelmatige drukfluctuaties.

Heeft de component een bepaalde amplitude bereikt, dan ontstaat een positieve terugkoppeling tussen de golf en de wind op een zekere hoogte vlak boven het wateroppervlak, namelijk daar waar de windsnelheid U gelijk is aan de snelheid C van de golfcomponent.

Bij een positieve terugkoppeling hoort een exponentiële groei. Deze houdt echter vrij abrupt op als de golven zo steil zijn geworden dat ze gaan breken.

Uit proeven op zee bleek dat de groei per golfcomponent veel sneller verliep dan theoretisch kan worden verklaard met het terugkoppelingsmechanisme; bovendien schoot de groei nog tijdelijk door boven het eindstadium. Dit verschijnsel is later verklaard door te onderstellen dat de golfcomponenten niet alleen rechtstreeks door de wind worden opgewekt, maar ook door een samenspel van andere golfcomponenten, die wat van hun energie afstaan ten behoeve van de nieuwe component. Evenals het golfbeeld is het windveld een bijzonder complexe grootheid en evenals de waterstandsvariatie in een golfveld dient de windsnelheidsvector te worden beschouwd als een stochastische variabele.

De golfvoorspellingsmethoden kunnen worden onderscheiden in twee categorieën; een categorie waarbinnen het golfbeeld wordt voorspeld in een homogeen, stationair windveld en een categorie waarbinnen golfverwachtingen worden opgesteld in een variërend windveld. Verder kan onderscheid worden gemaakt in golfgroei op diep en ondiep water.

De golfvoorspellingsmethoden zijn van belang om:

1. voor situaties in het verleden waarbij wel windgegevens, maar geen golfwaarnemingen bekend zijn deze laatste alsnog bij benadering te kunnen vaststellen
2. voor toekomstige situaties op grond van windverwachtingen ook golfverwachtingen te kunnen opstellen.

Natuurlijk zit in zo'n geval de volle onzekerheid van de verwachte wind ook in de verwachte golven.

Het laatste wordt in het Engels aangeduid met "Forecasting"; het eerste met "Hindcasting".

4.3.2. Golfvoorspellingsmethoden voor standaard windveld

Verondersteld wordt dat bij een standaard windveld het windveld een begrenzing kent die bestaat uit een rechte lijn die loodrecht staat op de gemiddelde windrichting.

De breedte van het windveld wordt zo groot gedacht dat de numerieke waarde daarvan niet meer van belang is voor de golfvoorspelling.

Naast deze begrenzingen in de ruimte kent het windveld ook een startpunt in de tijd. De wind wordt verondersteld plotseling te zijn gaan waaien op tijdstip $t = 0$.

De kenmerkende parameters die nodig zijn voor een plaats en tijdstip in het windveld zijn de afstand tot de bovenwindse begrenzing (strijklengte) en de tijd die verstreken is sinds de aanvang van de wind (windduur). Deze parameters geven in feite weer de mate waarin de wind gelegenheid heeft gehad energie over te dragen aan het golfveld.

Voor het beschrijven van de golfgroei in een standaard windveld kan men gebruik maken van de methode van de kenmerkende golf (a) en de methode van het standaard spectrum (b).

a. Methode van de kenmerkende golf

Met behulp van de methode van de kenmerkende golf kan men, als functie van plaats en tijd in het standaardwindveld, de 'golfhoogte' en de 'golfperiode' voorspellen. De gemiddelde golfrichting wordt a priori gelijkgesteld aan de gemiddelde windrichting.

Uit waarnemingen en berekeningen zijn tal van grafieken ontwikkeld die alle een verband aangeven tussen de genoemde grootheden.

Tot de meest bekende behoren die van Groen en Dorrestein, Bretschneider, Thijsse en Schijf.

De golfhoogte H wordt afhankelijk gesteld van de volgende factoren:

1. de strijklengte van de wind (F)
2. de waterdiepte (d)
3. de windsnelheid (U)
4. de duur van de wind (t)

In een aantal grafieken heeft men de grootheden F , d , t en de golfkarakteristieken H en T in de volgende dimensieloze grootheden uitgedrukt:

$$\tilde{F} = \frac{g F}{U^2} \quad (4.41.)$$

$$\tilde{d} = \frac{g d}{U^2} \quad (4.42.)$$

$$\tilde{t} = \frac{g t}{U} \quad (4.43.)$$

$$\tilde{H} = \frac{g H}{U^2} \quad (4.44.)$$

$$\tilde{T} = \frac{g T}{U} \quad (4.45.)$$

Voor H en T worden meestal H_s en T_s genomen.

In beginsel zouden de dimensieloze golfkarakteristieken \tilde{H} en \tilde{T} moeten worden behandeld als functie van de drie onafhankelijke variabelen \tilde{F} , \tilde{t} en \tilde{d}

$$\tilde{H} = \tilde{H}(\tilde{F}, \tilde{t}, \tilde{d}) \quad (4.46.)$$

$$\tilde{T} = \tilde{T}(\tilde{F}, \tilde{t}, \tilde{d}) \quad (4.47.)$$

Dergelijke waarnemingsverzamelingen zijn echter zeldzaam en gezien de wijze waarop waarnemingen worden gepresenteerd in de meeste publicaties, moet een splitsing in variabelen worden gemaakt:

categorie I

$$\left. \begin{aligned} \tilde{H} &= \tilde{H}(\tilde{F}) \\ \tilde{T} &= \tilde{T}(\tilde{F}) \end{aligned} \right\} \text{ met } \tilde{t} \text{ en } \tilde{d} \text{ onbeperkt} \quad (4.48.)$$

categorie II

$$\left. \begin{aligned} \tilde{H} &= \tilde{H}(\tilde{d}) \\ \tilde{T} &= \tilde{T}(\tilde{d}) \end{aligned} \right\} \text{ met } \tilde{F} \text{ en } \tilde{t} \text{ onbeperkt} \quad (4.49.)$$

categorie III

$$\left. \begin{aligned} \tilde{H} &= \tilde{H}(\tilde{t}) \\ \tilde{T} &= \tilde{T}(\tilde{t}) \end{aligned} \right\} \text{ met } \tilde{F} \text{ en } \tilde{d} \text{ onbeperkt} \quad (4.50.)$$

Af en toe wordt in de literatuur ook een combinatie van twee categorieën aangetroffen.

In een bepaald punt kan een golf met een hoogte \tilde{H}_1 op twee manieren ontstaan: hetzij door een beperkte strijklengte \tilde{F}_1 en een lange tijdsduur \tilde{t}_1 , hetzij door een grote strijklengte \tilde{F}_1 en een beperkte tijdsduur \tilde{t}_1 .

Op de vraag hoe de windsnelheid gedefinieerd moet worden is in de literatuur een verscheidenheid aan antwoorden te vinden. In de meeste publicaties wordt een tijdsgemiddelde gebruikt van de windsnelheid op een constante hoogte (z) boven het gemiddelde waterniveau. Deze hoogte varieert van ongeveer 7,5 tot ongeveer 20 meter. In andere publicaties wordt voorgesteld de wrijvingssnelheid (U_*) te gebruiken.

Deze fictieve windsnelheid wordt bepaald door de verhouding tussen de schuifspanning op het wateroppervlak en de dichtheid van de lucht:

$$U_* = \sqrt{\tau / \rho_d} \quad (4.51.)$$

Van deze mogelijke definities is U_z de meest praktische.

Uit de literatuur blijkt dat er in het algemeen een voorkeur bestaat om $z = 10$ m te kiezen.

De verhouding tussen de windsnelheden op verschillende hoogten onderling en tussen de windsnelheid op een hoogte van 10 m kan worden berekend als wordt uitgegaan van een logaritmisch windsnelheidsprofiel zoals gegeven in onderstaande vergelijking:

$$U_z = U_{10} \left[1 + \frac{C_{10}^{1/2}}{K} \ln \left(\frac{z}{10} \right) \right] \quad (4.52.)$$

Hierin is K de constante van van Kármán (= 0,4) en C_{10} de wrijvingscoëfficiënt, die zelf weer een functie is van U_{10} .

Dit profiel is overigens een soort standaard profiel; het werkelijke windsnelheidsprofiel kan hiervan sterk afwijken door bijvoorbeeld thermische effecten die de stabiliteit van de luchtlagen beïnvloeden.

Voor een nadere beschouwing over de invloed van de definitie van de windsnelheid op de golfvoorspelling wordt verwezen naar lit. 2.

Golfgroei op diep water

In de literatuur wordt een veelheid van groeikrommen aangetroffen: bijvoorbeeld Bretschneider (lit. 49), Groen en Dorrestein (lit. 4), Krylov e.a. (lit. 43), Ou en Tang (lit. 45), Sverdrup en Munk (lit. 46), Thijsse (lit. 47, 50, 51, 7), Wilson (lit. 48) etc.

Ter illustratie is in figuur 4.16. een vergelijking gemaakt van de diverse groeikrommen.

Hieronder vindt u in formulevorm een overzicht van enkele in Nederland veel gebruikte methoden:

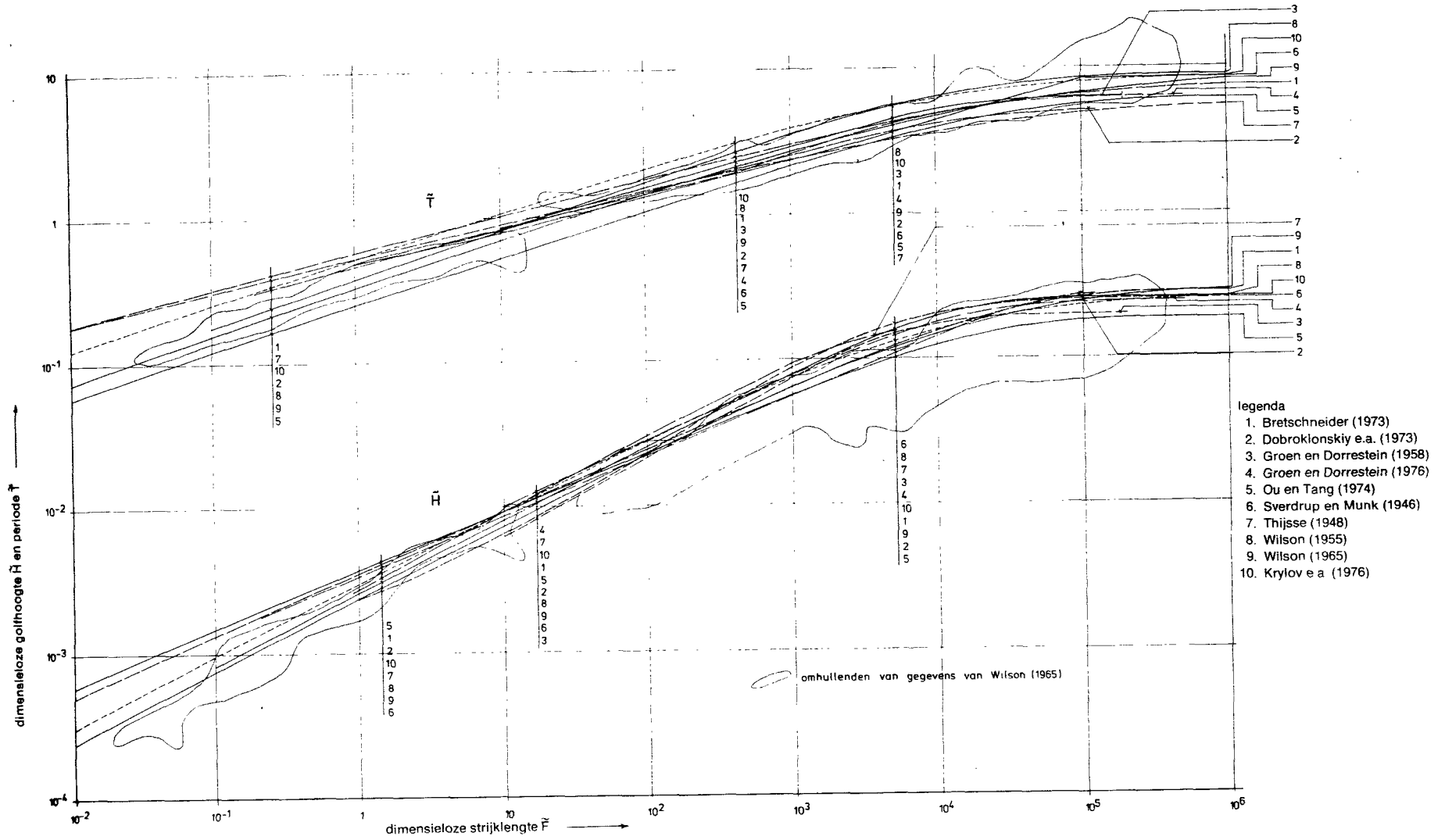
Bretschneider:

$$\tilde{H} = 0,283 \tanh (0,0125 \tilde{F}^{0,42})$$

$$\tilde{T} = 2,4 \pi \tanh (0,0077 \tilde{F}^{0,25})$$

(4.53.)

Figuur 4.16.: Vergelijking diverse groeikrommen (lit. 2)



Groen en Dorrestein:

$$\begin{aligned} \tilde{H} &= 0,24 \tanh (0,015 \tilde{F}^{0,45}) \text{ voor } \tilde{F} > 10 \\ \tilde{T} &= 2 \pi \tanh (0,0345 \tilde{F}^{0,37}) \text{ voor } \tilde{F} > 400 \\ \tilde{T} &= 0,502 \tilde{F}^{0,225} \text{ voor } 10 < \tilde{F} < 400 \end{aligned} \quad (4.54.)$$

Golfgroei op ondiep water

De mate waarin de waterdiepte een beperkende invloed kan hebben op de golfgroei hangt af van de verhouding tussen de significante golflengte en de waterdiepte.

Naarmate deze verhouding groter wordt zal de bodem de waterbeweging die wordt veroorzaakt door de golven sterker beïnvloeden en zullen bodem dissapatieprocessen zoals bijvoorbeeld bodemwrijving belangrijker worden. Daarnaast zal ook het breken van de golven een belangrijker invloed krijgen.

Aankankelijk, dat wil zeggen in de beginfase van de golfgroei, is de significante golflengte kort en zal de verhouding significante golflengte/bodemdiepte nog klein zijn. Voor kleine waarden van \tilde{F} zullen de groeikrommen voor ondiep water dus nauwelijks afwijken van die voor diep water, dat wil zeggen voor $\tilde{F} \rightarrow 0$ worden de uitdrukkingen gelijk aan die voor diep water voor $\tilde{F} \rightarrow 0$.

Voor grotere waarden van \tilde{F} neemt de golflengte en dus de bodeminvloed toe.

In de literatuur worden de volgende uitdrukkingen gebruikt:

$$\tilde{H} = A \tanh (k_3 \tilde{d}^{m_3}) \tanh \left[\frac{k_1 \tilde{F}^{m_1}}{\tanh (k_3 \tilde{d}^{m_3})} \right] \quad (4.55.)$$

$$\tilde{T} = 2\pi B \tanh (k_4 \tilde{d}^{m_4}) \tanh \left[\frac{k_2 \tilde{F}^{m_2}}{\tanh (k_4 \tilde{d}^{m_4})} \right] \quad (4.56.)$$

Hieronder vindt u in formulevorm een overzicht van enkele in Nederland veel gebruikte methoden:

Bretschneider:

$$\tilde{H} = 0,283 \tanh(0,530 \tilde{d}^{0,750}) \tanh\left[\frac{0,0125 \tilde{F}^{0,420}}{\tanh(0,530 \tilde{d}^{0,750})}\right] \quad (4.57.)$$

$$\tilde{T} = 2,4 \pi \tanh(0,833 \tilde{d}^{0,375}) \tanh\left[\frac{0,077 \tilde{F}^{0,250}}{\tanh(0,833 \tilde{d}^{0,375})}\right] \quad (4.58.)$$

Groen en Dorrestein:

In lit. 4 worden illustraties gegeven van H_{∞}/d en T/d als functie van U/\sqrt{d} .

De functies kunnen volgens lit. 2 redelijk goed worden benaderd met:

$$\tilde{H}_{\infty} = 0,24 \tanh(0,710 \tilde{d}^{0,763}) \quad (4.59.)$$

$$\tilde{T}_{\infty} = 2 \pi \tanh(0,855 \tilde{d}^{0,365}) \quad (4.60.)$$

Thijsse:

De waarden van \tilde{H}_{∞} als functie van \tilde{d} kunnen voor $0,01 < \tilde{d} < 0,5$ volgens lit. 2 worden benaderd door:

$$\tilde{H}_{\infty} = 0,25 \tilde{d}^{0,9} \quad (4.61.)$$

$$\tilde{T}_{\infty} = 1,154 \tilde{d}^{0,325} \quad (4.62.)$$

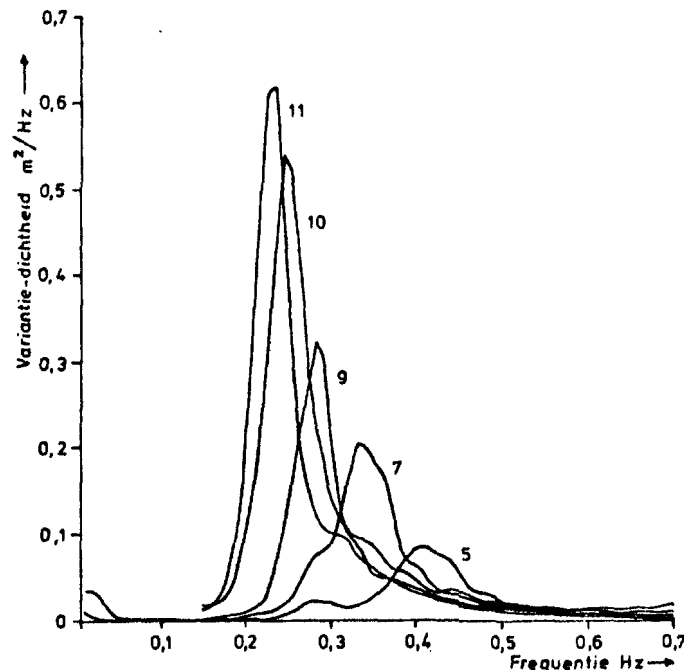
b. Methode van het standaardspectrum

De methode van het standaardspectrum kan worden beschouwd als een uitbreiding van de methode van de kenmerkende golf, in die zin, dat naast een kenmerkende maat voor de golfperiode en golfhoogte ook spectrale informatie wordt verkregen.

Deze laatste informatie bestaat in wezen alleen uit het formuleren van een standaard vorm van het spectrum en het geven van de waarden van de bijbehorende vormparameters, zie ook 4.2.2.

Figuur 4.17. geeft een voorbeeld van een reeks golfspectra afgeleid uit golfregistraties die zijn gedaan langs een raai lopende van het Duitse eiland Sylt in west-noordwestelijke richting, tijdens een ongeveer constant waiende wind uit oost-zuidoostelijke richting, dus recht van het land af. De lengten van de windbaan voor de verschillende stations zijn bij de figuur aangegeven.

De figuur toont duidelijk het met toenemende windbaan toenemen van de totale golfenergie, zowel als het toenemen van de gemiddelde golfperiode (afnemen van de frequentie).



Figuur 4.17.: Ontwikkeling van het frequentiespectrum voor zeevang bij toenemende windbaan tijdens de afluende wind bewesten Sylt.
De nummers geven de stations aan:

station no.	5	7	9	10	11
windbaan (km)	9,5	20	37	52	80
windsnelheid	7,0 m/s (15 sept. 1968, 11-12 h)				

In het navolgende worden de beschouwingen beperkt tot de golfvoorspel-
 ling met behulp van het Jonswap-spectrum en alleen voor diep water.

Zoals reeds in paragraaf 4.2.2. vermeld (formule (4.29.)) heeft het
 Jonswap-spectrum de volgende gedaante:

$$E(f) = \alpha_o g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_m} \right)^{-4} \right] \gamma(f) \quad (4.63.)$$

met

$$\gamma(f) = \gamma_o \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{f - f_m}{\sigma f_m} \right)^2 \right] \quad (4.64.)$$

De volgende vergelijkingen worden gebruikt (lit. 5, 36):

a. Zeegang met beperkte strijklengte ($\tilde{t} = \infty$)

$$\tilde{f}_m = 2,85 \tilde{F}^{-0,3} \quad (4.65.)$$

$$\alpha_o = 0,029 \tilde{f}_m^{2/3} \quad (4.66.)$$

$$\tilde{H} = 1,64 \cdot 10^{-3} \tilde{F}^{1/2} \quad (4.67.)$$

b. Zeegang met beperkte windduur ($\tilde{F} = \infty$)

$$\tilde{f}_m = 16,8 \tilde{t}^{-3/7} \quad (4.68.)$$

$$\alpha_o = 0,028 \tilde{f}_p^{2/3} \quad (4.69.)$$

$$\tilde{H} = 8,46 \cdot 10^{-5} \tilde{t}^{5/7} \quad (4.70.)$$

Algemeen geldt:

$$\gamma_0 = 3,2 \quad (4.71.)$$

$$\sigma = \sigma_a = 0,07 \text{ voor } f < f_m \quad (4.72.)$$

$$\sigma = \sigma_b = 0,09 \text{ voor } f > f_m \quad (4.73.)$$

De overgangsvoorwaarde tussen beide toestanden, die aangeeft hoe lang de wind met een constante snelheid moet hebben gewaaid opdat bij een gegeven strijklengte F de maximale golfhoogte H wordt bereikt, wordt weergegeven door de betrekking:

$$\tilde{t}_{\min} = 63,8 \tilde{F}^{0,7} \quad (4.74.)$$

De parameters in de formules (4.65.) t/m (4.74.) hebben de volgende betekenis:

$$\tilde{f}_m = \frac{U f_m}{g}, \quad \tilde{H} = \frac{g H}{U^2}, \quad \tilde{t} = \frac{g t}{U}, \quad \tilde{F} = \frac{g F}{U^2}$$

f_m = piek van het spectrum

U = windsnelheid

g = versnelling zwaartekracht

H = golfhoogte

t = windduur

F = strijklengte

Over de vorm- en schaalparameters van een standaard spectrum voor ondiep water is zeer weinig bekend, zowel in fundamenteel als in empirisch opzicht.

4.3.3. Golfvoorspellingsmethoden voor variërend windveld

De toepasbaarheid van de methoden die in de vorige paragraaf zijn behandeld is beperkt omdat de eisen die aan het windveld worden gesteld nogal streng zijn. Voor grotere wateroppervlakken waar de variaties in het windveld en de waterdiepte een essentiële invloed uitoefenen op de ontwikkeling van het golfbeeld zullen golfvoorspellingsmodellen moeten worden gebruikt die daarop zijn afgestemd.

In de literatuur worden diverse methoden behandeld, waarbij drie verschillende soorten kunnen worden onderscheiden.

De eerste soort heeft betrekking op aangepaste versies van de methoden voor het standaard windveld, die in de vorige paragraaf werden behandeld.

De tweede en derde soort betreffen methoden die zijn gebaseerd op een fundamenteel andere benadering van het golfvoorspellingsprobleem. Deze methoden hebben als basis het uitwerken van de energiehuishouding van het golfveld.

De meest gedetailleerde weergave van deze energiehuishouding wordt gebruikt in de tweede soort waar per golfcomponent de energiebalans wordt bijgehouden.

In de derde soort wordt expliciet gebruik gemaakt van het feit dat een deel van deze energiebalans er voor zorgt dat het spectrum een bepaalde standaardvorm behoudt, ook in variabele windvelden. De energiehuishouding kan daardoor worden uitgedrukt in termen van de vorm- en schaalparameters van het spectrum.

Omdat het hierboven geschetste nogal complex en specialistisch van aard is en ook omdat er nog geen eenheid van opvatting in de literatuur wordt aangetroffen, wordt in het kader van dit rapport afgezien van een verdere behandeling van golfvoorspellingsmethoden in een variërend windveld; volstaan wordt met te verwijzen naar de literatuur, bijvoorbeeld lit. 2.

4.4. Deining

Zijn zeegolven eenmaal onttrokken aan de werking van de wind, die ze heeft opgewekt - hetzij dat de wind ging liggen, hetzij dat het windveld zich heeft verwijderd, hetzij dat de golven uit het windveld vandaan gelopen zijn - dan zijn ze deining geworden. Wat gebeurt er verder met deze deininggolven?

Ten eerste is al heel snel na het wegvallen of verminderen van de wind het uiterlijk van de golven belangrijk veranderd: witte koppen zijn verdwenen en de kortere golfjes zijn door inwendige wrijving uitgedempt, waardoor de golven een veel gladder aanzien krijgen. Over grotere afstanden ondergaan ze vervolgens nog twee geleidelijke veranderingen, namelijk hoogteverlies en (in het algemeen) een langer worden van de significante golflengte en -periode.

Bij het hoogteverlies en de periodeveranderingen zijn verschillende factoren in het spel:

- a. Het energieverlies door inwendige wrijving in het water en door luchtweerstand. De tweede factor is waarschijnlijk nauwelijks van belang als er weinig wind is.

De inwendige wrijving die de golfbeweging ondervindt wordt beheerst door de turbulente bewegingstoestand van het water. Deze op zijn beurt wordt, behalve door de golven zelf, vooral bepaald door de turbulente werking van een eventueel waaiende wind en door eventuele plaatselijke stromingen.

In het geval van deining, met weinig wind, lopen de golfcomponenten in het spectrum vrijwel geheel onafhankelijk van elkaar en die houden daarbij hun periode en richting. Nu is de inwendige wrijving in hoofdzaak werkzaam voor de kortere componenten van het deiningsspectrum; de langere componenten lopen dus als het ware voordeliger. Het gevolg is dat in een deining die loopt uit een stationair stormveld de significante periode geleidelijk met de afstand toeneemt.

In het geval van deining veroorzaakt het verlies van de totale golfenergie uiteraard een vermindering van de significante hoogte.

Twee andere factoren zijn over grote afstanden kwantitatief zeer belangrijk voor het hoogteverlies van deininggolven. Deze zijn:

- b. Het verschil in voortplantingssnelheid voor korte en lange golven (de zogenaamde dispersie)
- c. Het uitwaaiëren van de deining uit een windveld.

Wanneer in een beperkt gebied gedurende een beperkte tijd golven worden opgewekt (met verschillende perioden en richtingen), zal de hierin opgehoopte energie enige tijd later, door toedoen van deze beide factoren, zijn uitgespreid over een groter gebied en dit betekent noodzakelijk een vermindering van de energie per eenheid van oppervlak en dus van de golfhoogte.

Door het verschil in voortplantingssnelheid van de golven maakt de storm ver weg van het punt van ontstaan zich altijd het eerst merkbaar door deiningen met de langste perioden.

Deze zijn in het begin, bij perioden van meer dan 20 seconden, zeer laag, hun aanwezigheid kan dan alleen langs instrumentele weg (door analyse van golfregistraties) worden aangetoond. Daarna wordt de ter plaatse waargenomen deining geleidelijk korter; dat wil zeggen geleidelijk aan arriveren daar nu steeds kortere golven - met hun kleinere snelheden. De hoogte neemt eerst toe en daarna weer af. Golven beneden een zekere periode bereiken het punt in kwestie niet meer doordat ze onderweg door wrijving zijn weggedempt.

Een vierde factor die invloed heeft op het gedrag van deining is:

- d. Het voorkomen van wind in het gebied waar de deining loopt.

Hier zijn verschillende gevallen mogelijk.

De directe invloed van winden die niet harder zijn dan 3 Beaufort (ca. 5 m/s) kan wel worden verwaarloosd.

Krachtige en stormachtige winden wekken een zegang op met golfcomponenten die wisselwerking kunnen hebben met de aanwezige deining, die daardoor vrij snel verdwijnt.

De invloed van matige winden op deining hangt af van de grootte van het verschil tussen frequentie van de deining en de frequenties van de belangrijkste zeegangscomponenten en van het verschil in richting van de deining en de zeegang.

Is het verschil in frequentie groot, hetgeen in feite wil zeggen dat de deining een veel lagere frequentie heeft dan de zeegang, dan is de invloed te verwaarlozen.

De energie-uitwisseling tussen een deining en een zeegang is theoretisch wel te berekenen als de volledige spectra van beide golfsystemen bekend zijn, maar voor de praktijk is het moeilijk zekere regels te geven. De rechtstreekse invloed van de wind op deining, dus zonder tussenkomst van zeegang, is gering.

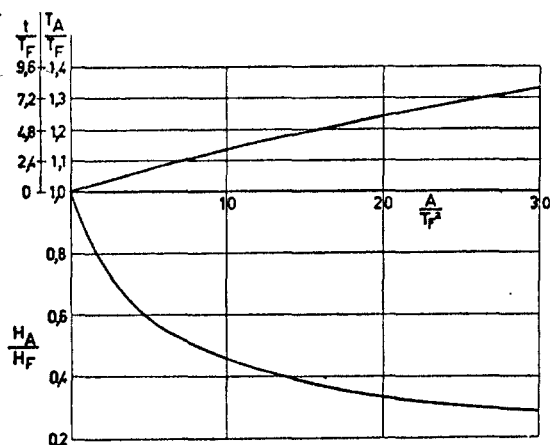
De als zeegang tot groei gekomen golven bewegen zich dus verder voort als deining en wel met een snelheid die gelijk is aan de groepssnelheid behorende bij hun periode.

Door de resultaten van waarnemingen uit alle zeeën te middelen heeft men grafieken samengesteld (zie o.a. lit. 4 en 49), waaruit de te verwachten hoogte H_A en periode T_A van deining kunnen worden afgelezen voor elke afstand A die de deining na het verlaten van het verwekkende windveld heeft afgelegd, wanneer de hoogte H_F en de periode T_F waarmee deze deining dit veld verliet bekend zijn.

Uit het voorgaande volgt, dat het werken met een significante golfhoogte en periode een wel erg grove schematisatie is. Het nut van deze grafieken is dan ook zeer beperkt en gezien dit onzekere karakter worden ze hier dan ook niet gegeven.

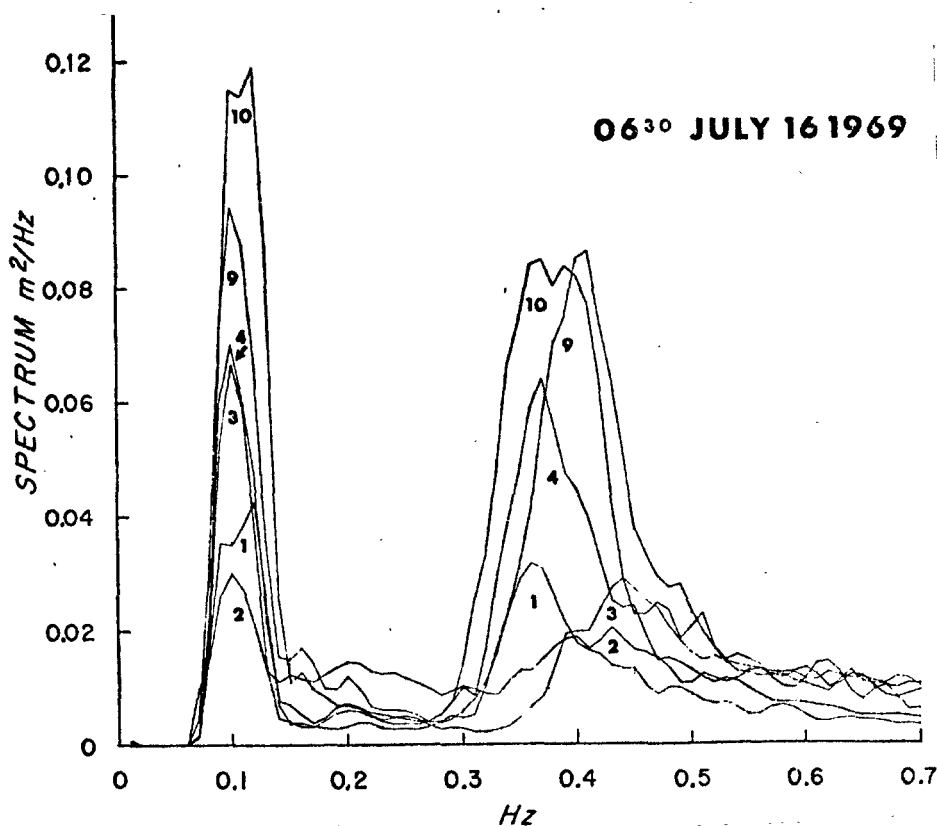
Om een indruk te geven dient de basisgrafiek volgens figuur 4.18. (lit. 4). De horizontale coördinaat is evenredig met de doorlopen afstand, gedeeld door de golflengte van de deining bij het verlaten van het windveld ($L_F = 1,56 T_F^2$).

De periodetoename bedraagt hierbij ongeveer 1 seconde voor elke 24 uren die de deining heeft voortgelopen.



Figuur 4.18.: Grafiek ter schatting van de hoogte H_A en de looptijd t (in uren) van deining als de beginhoogte H_F , de beginperiode T_F (in s) en de doorlopen afstand A (in km) gegeven zijn.

In golfspectra is deining vaak te herkennen als een tweede piek. Figuur 4.19. geeft een beeld van dit verschijnsel (lit. 36).



Figuur 4.19.: Voorbeeld van een spectrum met deining en zeegang; links is deining, rechts is zeegang

4.5. Waterstanden

4.5.1. Inleiding

De waterstand op de bovenrivieren is afhankelijk van de afvoer, een sterk variabele grootte, die afhangt van het klimaat in het bovenstroomse gebied en de grootte en de aard van het stroomgebied.

Een rivier die zijn stroomgebied in de gematigde zone met depressies heeft, zal in principe na elke regenval van betekenis een golf in de afvoer vertonen.

Omdat depressies gedurende het gehele jaar optreden, zal de afvoer zelden zéér laag of zeer hoog zijn, maar sterk wisselend in de tijd. Behalve wanneer tijdens een strenge winter de neerslag in vaste vorm in het bovenstroomse gebied blijft liggen totdat de dooi intreedt.

Ook de grootte en de aard van het stroomgebied spelen een rol. Zo zal van een stroomgebied dat groot is ten opzichte van de depressies, een dempende werking uitgaan.

Anderzijds beperken bergingsmogelijkheden in het stroomgebied, zoals meren, uiterwaarden etc. de bodemgesteldheid of de aanwezigheid van sneeuwvelden in gebergten, de variaties in de afvoer.

In het voorgaande zijn enige factoren beschreven die de waterstanden op een rivier bepalen.

Bij de vaststelling van ontwerp-waterstanden zal men deze relaties echter meestal niet benutten, doch vertrouwen op statistische methoden. Daartoe dient de rivierwaterstand een aantal jaren te worden geregistreerd (zie de jaarboeken der waterhoogten, uitgegeven door Rijkswaterstaat).

Door de jaar-maxima op waarschijnlijkheidspapier (Gumbel) uit te zetten tegen de relatieve frequentie, ontstaat een puntenwolk.

Door de puntenwolk is vaak bij goede benadering een rechte lijn te trekken, die de frequentie van maximale waterstanden aangeeft.

Door middel van extrapolatie van de lijn tot een gekozen ontwerp-frequentie kan nu een ontwerp-waterstand worden vastgesteld. Grote voorzichtigheid is echter geboden bij deze werkwijze. Indien bijvoorbeeld na overschrijding van een bepaalde waterstand grote delen overstromen, zullen de geregistreerde waterstanden te laag zijn.

Na de aanleg van verhoogde dijken kan de waterstand, in verband met de nu ontbrekende bergingsmogelijkheid, hoger stijgen dan werd verwacht. Dit rapport zal zich in hoofdzaak beperken tot waterkeringen aan zee, zodat hier met bovenstaande beschouwingen over de rivieren wordt volstaan.

Vanuit theoretisch standpunt gezien kunnen de waargenomen waterstanden op zee worden gedacht uit de drie volgende componenten te zijn opgebouwd:

- a. Het getij, zoals het zich zou hebben gemanifesteerd bij afwezigheid van de storm
- b. De invloed van de storm, zoals deze zich zou hebben gemanifesteerd zonder getijbeweging
- c. De wisselwerkingseffecten, die tot ontwikkeling komen door het samentreffen van de invloed b en getij a.

Vanuit praktisch standpunt kunnen waterstanden samengesteld worden gedacht uit de twee volgende componenten:

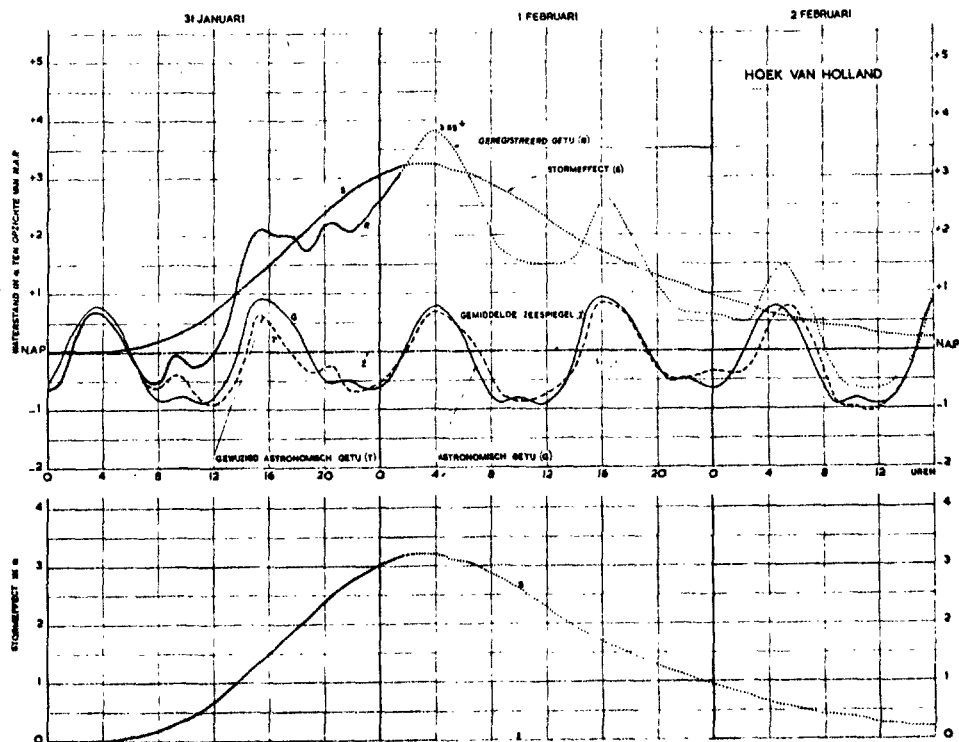
- a. Het getij zoals het zich praktisch aan ons voordoet en dus is beïnvloed door de stormvloed. Volgens de praktijkervaring blijkt dat het periodieke verschijnsel van het getij is verkleind, vertraagd en vervormd.
- b. Het stormeffect zoals dit als regelmatig verloopend verschijnsel zich praktisch aan ons voordoet.
In grootte, vorm en verloop in de tijd is dit wel enigszins beïnvloed door het getij en de wijze van samentreffen, doch als zodanig vertoont het geen variaties in de perioden van het astronomisch getij.

In een groot gedeelte van het gebied der benedenrivieren heeft de afvoer van Rijn en Maas invloed op de hoogte van de waterstanden ter plaatse.

Naast het astronomisch getij en de door de wind veroorzaakte opzet worden, tijdens uitschietende extra harde stormwind, vaak onregelmatige schommelingen van de waterspiegel waargenomen. Men spreekt van "bui-stoten" als het gaat om een enkele verstoring van de waterspiegel. Indien de verstoringen zich min of meer periodiek voordoen, wordt van bui-oscillaties gesproken.

In de regel bedraagt de periode een groot aantal minuten (15 à 45 min.) en hun hoogte in de lijn van de kust enkele decimeters tot een halve meter.

Buistoten gedragen zich als lange golven en kunnen zich langs de kust en tot in zeearmen voortplanten. Bij buistoten en bui-oscillaties is oplettendheid vereist ten aanzien van resonantie met havenbekkens of zeearmen.

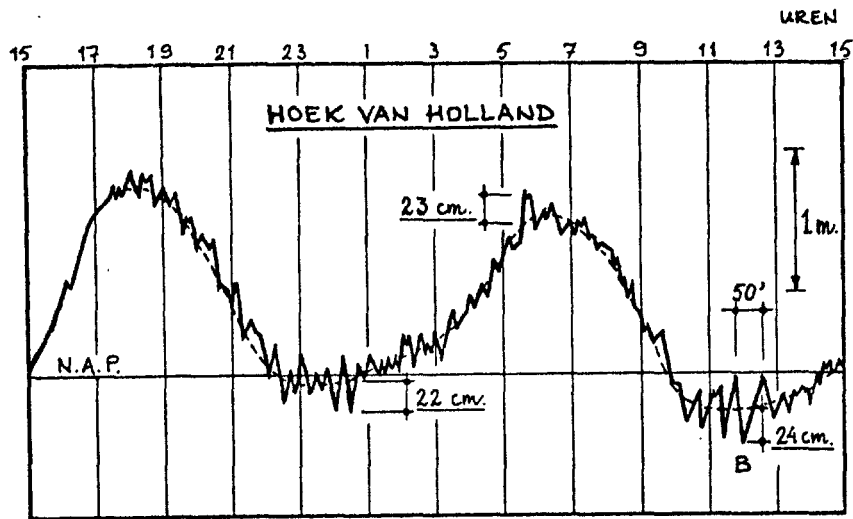


Figuur 4.20.: Normale en door de storm gestoorde waterstanden te Hoek van Holland (lit. 7).

Indien de gemiddelde periode der waterbeweging de eigen trillingstijd van het bekken benadert, kan aanzienlijke opslinging het gevolg zijn (seiches).

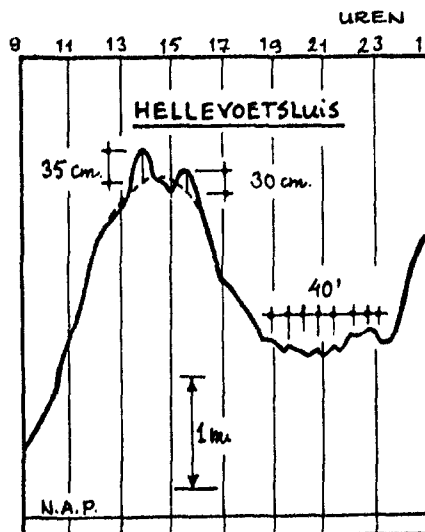
Figuur 4.20. geeft een beeld van de waterstandskromme te Hoek van Holland tijdens de watersnoodramp in 1953.

Figuur 4.21. geeft een waterstandskromme waarin te herkennen zijn windopzet, astronomisch getij en bui-oscillaties. De bui-oscillaties hebben hier perioden van 10 à 50 minuten en (halve) amplituden van ongeveer 25 cm.



Figuur 4.21.: Waterstandskromme te Hoek van Holland, geregistreerd bij de storm van 9-10 november 1937 (lit. 32)

Figuur 4.22. geeft een voorbeeld van een waterstandskromme waarin te herkennen zijn windopzet, astronomisch getij en een buistoot. Buistoot van 35 cm en bui-oscillatie van 30 cm van top tot dal.



Figuur 4.22.: Waterstandskromme te Hellevoetsluis, geregistreerd op 23 december 1954

4.5.2. Getijden

Het verschijnsel getijden zal in het kader van dit rapport niet diepgaand kunnen worden behandeld. Er zal worden volstaan met een summiere behandeling; zie verder onder andere lit. 1, 31, 52 en 53.

Ten gevolge van de aantrekkingskrachten die zon, aarde en maan op elkaar uitoefenen en ten gevolge van slingering van het stelsel aarde-maan om een gemeenschappelijk zwaartepunt, zal het op aarde aanwezige water de vorm van een ellipsoïde trachten aan te nemen.

Daarbij is de maansinvloed belangrijk groter dan de zonsinvloed. De invloeden verhouden zich ongeveer als 5 : 2.

De navolgende (eenvoudige) beschouwingen hebben betrekking op het systeem aarde-maan.

Die voor het systeem aarde-zon zijn identiek.

De wederzijdse aantrekkingskracht tussen de aarde en de maan zorgt voor de draaiing van het systeem aarde-maan om een gemeenschappelijk zwaartepunt dat binnen de aarde zelf ligt.

Het gehele systeem maakt 1 omwenteling in 27,32 dagen.

Door de rotatie van het gehele systeem beschrijft de aarde een baan, die opgebouwd kan worden gedacht uit een translatie en een rotatie.

De aarde roteert zelf ook nog eens om zijn as. Beide rotaties hebben een identieke invloed op het getij, zodat het voor de hand ligt deze rotaties bij elkaar te voegen.

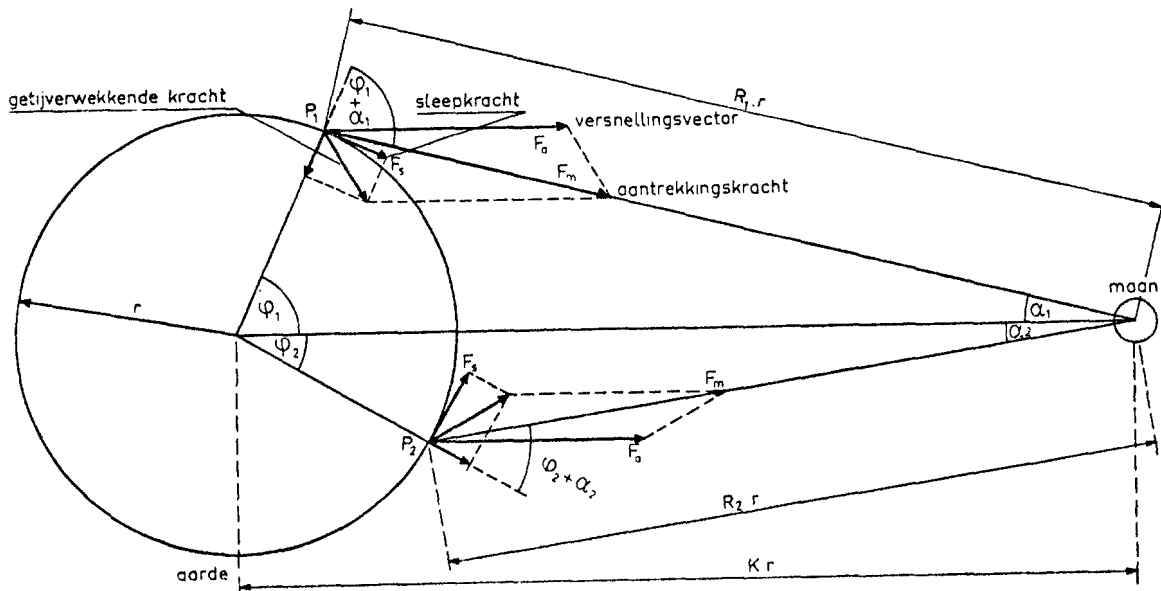
De andere beweging, de translatie, zal nu nader worden beschouwd; de rotatie komt in het vervolg aan de orde.

Als gevolg van de translatie heeft ieder deeltje van de aarde dezelfde versnelling in richting en grootte (F_a). De versnelling is gericht evenwijdig aan de verbindingslijn van de zwaartepunten van resp. aarde en maan.

De versnelling F_a zal moeten worden geleverd door de aantrekkingskracht op een deeltje op aarde, zoals deze door de maan wordt uitgeoefend. Deze kracht is afhankelijk van de afstand tussen de maan en de beschouwde plaats op aarde (F_m).

Voor een verduidelijking van het bovenstaande wordt verwezen naar figuur 4.23.

Zoals de figuur duidelijk laat zien kan F_m worden samengesteld uit F_a en een residukracht $\bar{F}_m - \bar{F}_a$, welke de getijverwekkende kracht wordt genoemd omdat dit verschilkrachtje de direkte oorzaak is voor het ontstaan van getijden op aarde.



Figuur 4.23.: Getijverwekkende kracht voor twee willekeurige plaatsen op aarde

Van de getijverwekkende kracht is echter alleen de component van $\bar{F}_m - \bar{F}_a$, gericht langs het aardoppervlak, van belang. Deze component wordt de sleepkracht, F_s , genoemd.

Figuur 4.24. geeft aan hoe de sleepkracht over de aarde verdeeld is.



Figuur 4.24.: Verdeling sleepkracht over de aarde

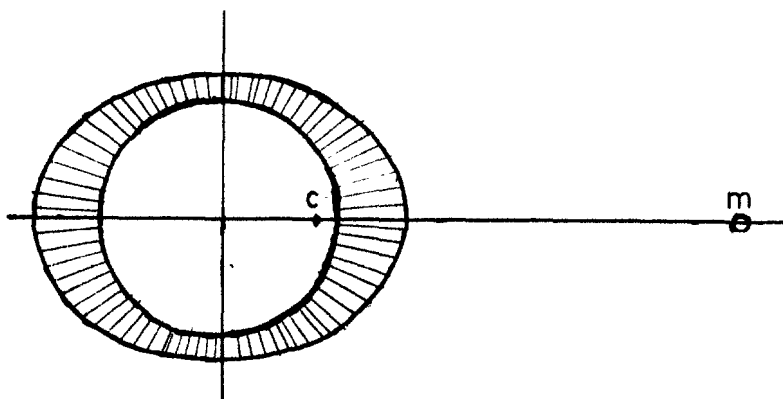
De grootte van de sleepkrachten is erg klein; zodanig klein dat zij weinig invloed hebben op vaste deeltjes van de aarde. De invloed op de waterdeeltjes, die wel kunnen bewegen, is veel groter.

Om deze invloed te berekenen, zou de sleepkracht kunnen worden geïntroduceerd in de bewegingsvergelijkingen voor de stroming van het water. Tot nu toe is men er echter nog niet in geslaagd deze vergelijkingen op te lossen voor gevallen, waarin bodemligging en begrenzingen van de oceanen op realistische wijze waren meegegaan. Wel zijn er berekeningen voor oceanen met uniforme diepte en begrensd door 2 meridianen.

De amplitude van het getij daarin blijft beperkt tot enkele centimeters en dat is merkwaardig als men bedenkt dat de orde van grootte van het werkelijke getij op aarde ongeveer één meter bedraagt.

De verklaring is dat de responsie van waterbekkens als oceanen voornamelijk afhangt van de eigen slingerfrequenties van deze waterbekkens. Als één van de eigen frequenties in de buurt komt van een frequentie in de exciterende kracht (sleepkracht F_s) is een grote responsie mogelijk (resonantie). Door diepte-invloeden en begrenzingen kan de amplitude van het getij nog weer aanzienlijk toenemen. De vorm van slingering van de watermassa's in zeeën en oceanen heeft een bijzonder karakter als gevolg van de rotatie van de aarde.

Deze beschouwingen zijn echter tamelijk gecompliceerd, daarom wordt de behandeling in dit rapport beperkt tot enkele eenvoudige beschouwingen die enkele fundamentele eigenschappen van het getij illustreren. Wanneer de aardbol wordt beschouwd als geheel bedekt te zijn met water heeft de sleepkracht tot gevolg dat het wateroppervlak een vorm aanneemt zoals in figuur 4.25. is aangegeven.



Figuur 4.25.: Geschematiseerd wateroppervlak

Met andere woorden, er ontstaat een verhoging van de waterspiegel, die gericht is naar de maan, maar ook een verhoging diametraal daar tegenover. Het getij dat op deze wijze ontstaat wordt het evenwichtsgetij genoemd.

Tot nu toe is niet gesproken over de rotatie van de aarde zelf. Hierbij is de as van rotatie van groot belang. Deze maakt een hoek (gemiddeld $23,5^\circ$) met de verbindingslijn van aarde en maan.

Om duidelijk te maken waartoe dit leidt worden de volgende gevallen beschouwd:

- a. As van rotatie staat loodrecht op de verbindingslijn van aarde en maan.

Iemand die zich op een vaste plaats op aarde bevindt zal nu bij rotatie 2 maal per dag een hoogwater en 2 maal per dag een laagwater waarnemen: dubbeldaags getij.

b. As van rotatie maakt een hoek met de verbindingslijn van de zwaartepunten van aarde en maan.

Nu zijn er plaatsen, met name op de hogere breedten, waar 1 maal per dag een hoogwater en een laagwater kunnen worden waargenomen: enkeldaags getij.

Aangezien getijden zich voortplanten kan worden geconstateerd dat het werkelijke getij op aarde zowel dubbeldaags als enkeldaagse componenten zal bevatten.

De enkeldaagse componenten hebben tot gevolg dat gedurende een dag beide hoogwaters een verschillende hoogte hebben; ditzelfde geldt voor de laagwaters: dagelijkse ongelijkheid. Zie figuur 4.26., dat enige voorbeelden van getijkrommen langs de Nederlandse kust bevat.

In werkelijkheid zal het hoogwater niet optreden als de maan de beschouwde meridiaan passeert.

Het echte HW zal later optreden. Het tijdsverschil tussen het moment dat het HW werkelijk optreedt wordt havengetal genoemd.

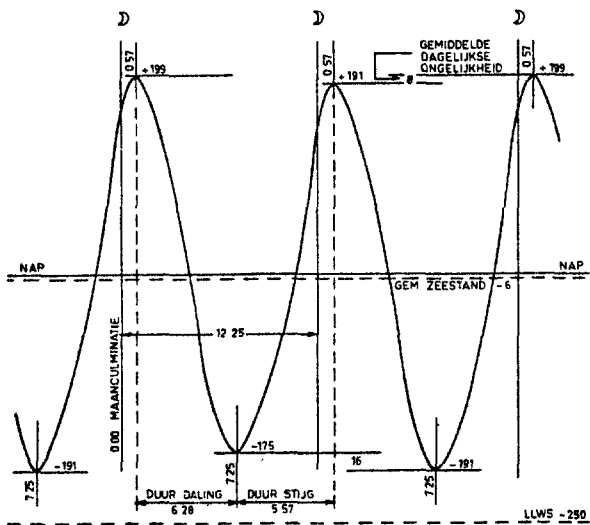
Dit is een constante, behorend bij iedere vaste plaats op aarde.

Hoewel de invloed van de zon in het voorgaande nagenoeg onbesproken bleef, is het duidelijk, dat de invloeden van zon en maan elkaar kunnen versterken en verzwakken. Figuur 4.27. geeft aan bij welke standen van maan en zon ten opzichte van de aarde springtij dan wel doodtij optreedt.

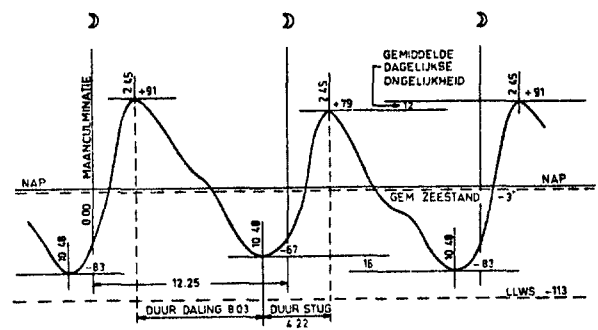
Aangezien de maan in ongeveer 29 dagen om de aarde draait, zal ongeveer een week na springrij doodtij optreden en omgekeerd; springtij en doodtij treden dus ongeveer eens in de 2 weken op.

Tevens is in figuur 4.27 voor 2 havens aan de Nederlandse kust het verloop van het getij gedurende een maand aangegeven. Duidelijk is te zien, dat het echte springtij (doodtij) later optreedt dan uit de stand van de maan valt af te leiden. Deze tijdsverschuiving wordt de leeftijd van het getij genoemd en bedraagt normaliter 2 à 3 dagen.

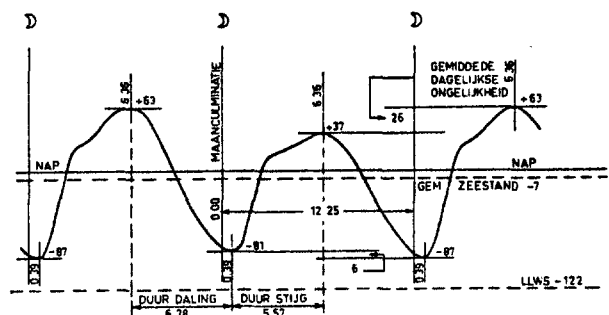
Ten opzichte van de zwaartekracht is de getijkracht zeer klein; ze verhouden zich ongeveer als $1 : 10^{-7}$.



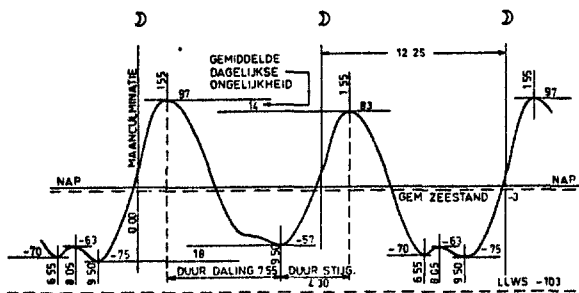
Vlissingen



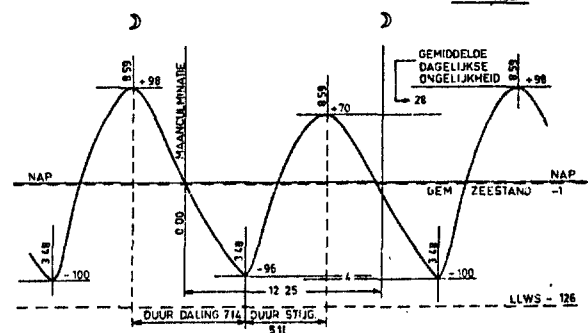
IJmuiden



Den Helder

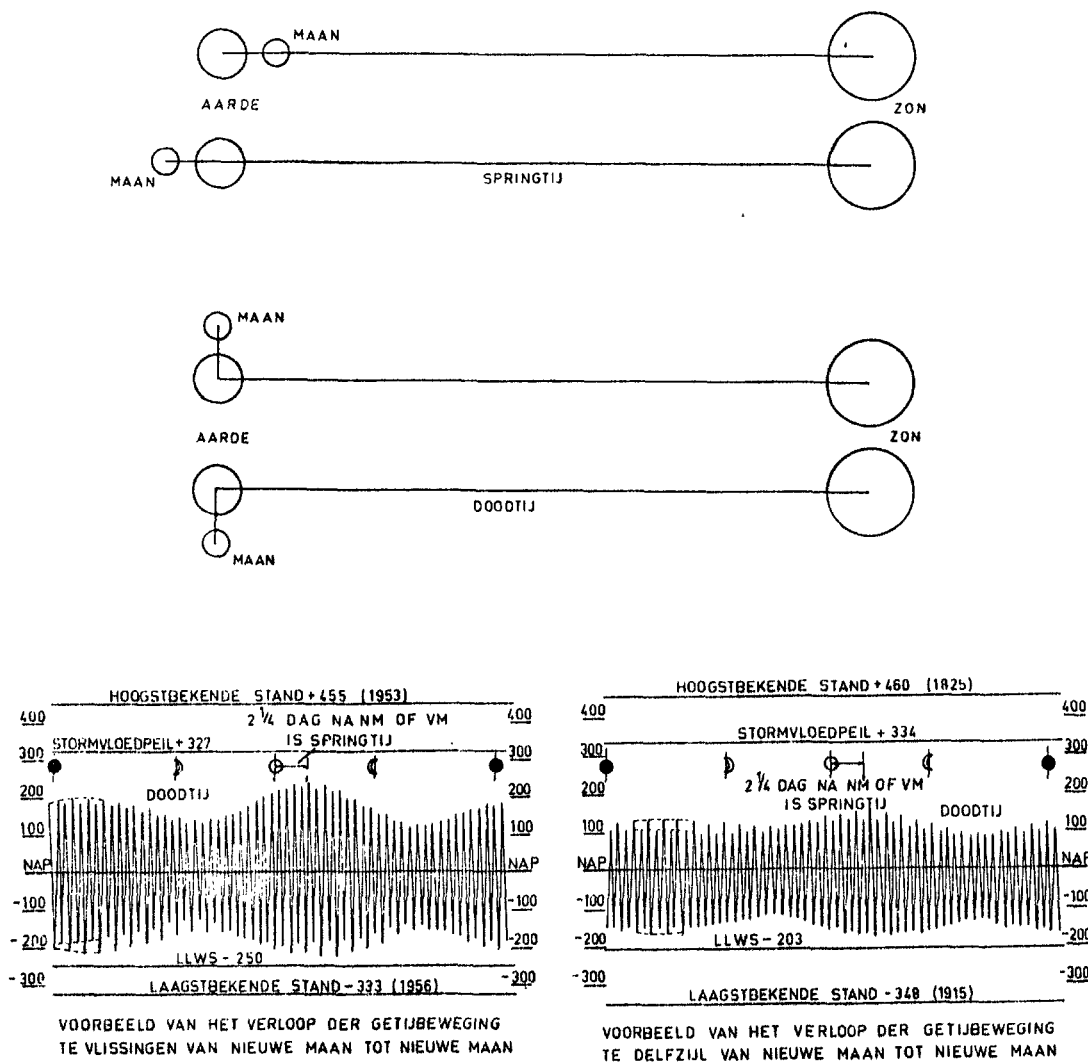


Hoek van Holland



Harlingen

Figuur 4.26.: Gemiddelde getijkrommen voor enkele plaatsen langs de Nederlandse kust



Figuur 4.27.: Springtij en doodtij en de daarbij behorende maanstanden

Ondanks de geringe kracht is de getijbeweging groot te noemen. De getijgolf kan zich alleen ten zuiden van de continenten voortbewegen. Vanuit die zone plant ze zich voort in de noordelijke oceanen waar de getijkrachten evenzeer een rol spelen en waar, mede ten gevolge van terugkaatsing, splitsing, absorptie en dergelijke, een vaak zeer gecompliceerd getijbeeld kan ontstaan.

Op de Noordzee ontwikkelt zich ten gevolge van terugkaatsing een staande golf.

Onder invloed van de Corioliskracht ontstaat een waterbeweging om zogenaamde punten van amfidromie.

In de monden van de zeearmen treedt de getijgolf als een sinusoïdaal lopende golf binnen.

In de zeearmen vindt gedeeltelijke of gehele terugkaatsing plaats, waardoor een gecompliceerd beeld ontstaat van de combinatie van een lopende en een staande golf. Bij een lopende golf treden de grootste horizontale snelheden op in de top en in het dal van de golf.

Bij een staande golf treden de grootste snelheden op in de middenstand. De kenteringspunten, dat zijn de punten waarin de horizontale snelheid tot nul is afgenomen en van richting gaat veranderen, liggen bij de lopende golf in de middenstand en bij de staande golf in de top en in het dal.

Bij een combinatie van een lopende en een staande golf zal de kentering kortere of langere tijd na het moment van hoog- of laagwater optreden. De vloedperiode is de periode tussen de laagwaterkentering en de hoogwaterkentering, de ebperiode die tussen de hoogwater- en de laagwaterkentering.

Hoewel de fysische mechanismen die het astronomisch getij veroorzaken bekend zijn, is het door het complexe gedrag niet mogelijk het getij op een bepaalde plaats op aarde langs deze weg te berekenen.

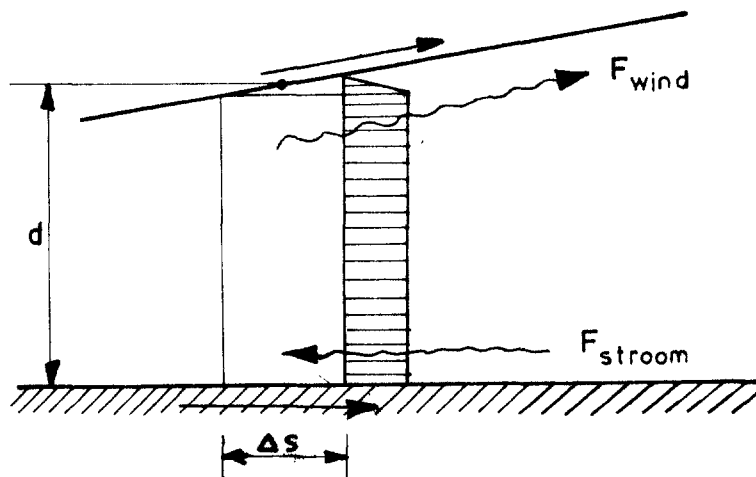
Berekening en voorspelling zijn echter goed mogelijk met behulp van de Fourier-analyse.

Nadat uit een historische meetreeks de harmonische componenten en de faseverschillen zijn bepaald kan het verloop in de toekomst worden voorspeld: zie de getijtafels (lit. 52, 53).

4.5.3. Windopzet

Op zeeën en meren kunnen windvelden de waterstanden aanzienlijk beïnvloeden door opstuwning van het water, de zogenaamde windopzet.

Een eenvoudig model zou er als volgt kunnen uitzien (zie figuur 4.28. en lit. 32):



Figuur 4.28.: Het evenwicht van een kolom water onder invloed van de schuifspanning veroorzaakt door de wind

$$F_{wind} = \rho_l U^2 \cdot c_1 \cdot \Delta s \quad (4.75.)$$

waarin:

F_{wind} = aan de oppervlakte van een waterkolom door de wind uitgeoefende kracht

ρ_l = dichtheid van lucht

U = windsnelheid

c_1 = constante

Δs = lengte waterkolom

$$F_{stroom} = i \cdot \Delta s \cdot \rho_w \cdot g \cdot d \quad (4.76.)$$

waarin:

F_{stroom} = kracht waardoor het water langs de bodem terugstroomt

i = opwaaiingsverhang

ρ_w = dichtheid water

g = versnelling van de zwaartekracht

d = waterdiepte

Bij verwaarlozing van de wrijving geldt:

$$F_{wind} = F_{stroom} \quad (4.77.)$$

Vergelijkingen (4.75.) en (4.76.) gesubstitueerd in (4.77.) geeft:

$$i = \frac{\rho_l}{\rho_w} \frac{U^2 c_1}{g d} = c \frac{U^2}{g d} \quad (4.78.)$$

met

$$c \approx 3,5 \text{ à } 4 \cdot 10^{-6}$$

De totale windopzet in de evenwichtssituatie is bij benadering gelijk aan:

$$s = c \frac{U^2}{g d} F \quad (4.79.)$$

waarin:

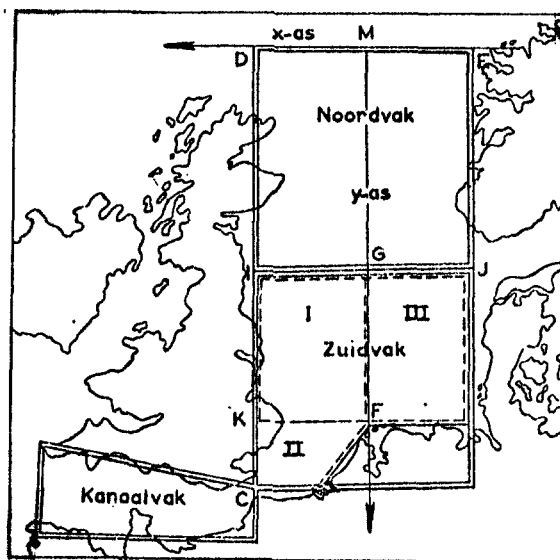
F = strijklengte

s = windopzet.

De werkelijkheid is echter vaak te ingewikkeld om met het hiervoor beschreven eenvoudige model het verschijnsel windopzet voldoende nauwkeurig te kunnen beschrijven.

Met het toch ook nog redelijk eenvoudige model van Weenink (lit. 7, 9, 10) is het mogelijk de windopzet in de evenwichtssituatie te berekenen als de sterkte en de vorm van het windveld boven de Noordzee bekend zijn.

Weenink schematiseert daartoe de Noordzee in 5 gebieden; in elk gebied wordt een constante windsnelheid en -richting aangenomen, zie figuur 4.29.



Figuur 4.29.: Het windopzetmodel van Weenink

Ieder gebied levert een bijdrage aan de opzet (s) voor de kust. Verder wordt aangenomen dat het superpositiebeginsel geldt, waardoor het totale windeffect op een zeker punt opgebouwd kan worden gedacht uit de windeffecten die elk vak afzonderlijk zou geven in het betrokken punt in geval van windstilte boven de overige vakken. Voor een zeker punt P aan de zuidkust van de Noordzee geldt in het algemeen:

$$s(P) = s^I(P) + s^{II}(P) + s^{III}(P) + s^N(P) + s^k(P) \quad (4.80.)$$

waarin de bovengedaatste indices aangeven op welk vak de bijdrage betrekking heeft.

De opwaaiing $s^i(P)$ kan steeds worden geschreven als

$$s^i(P) = (a^i \cos \alpha_i + b^i \sin \alpha_i) \phi_i \quad (4.81.)$$

waarin a^i en b^i coëfficiënten zijn, die zowel afhangen van de plaats waarvoor we het windeffect willen weten als van het betrokken vak (i). α_i is de hoek in vak (i) tussen de windrichting en de y-as (zie figuur 4.27.).

ϕ_i kan met behulp van lit. 7, 9 en 10 worden bepaald.

Zo geldt voor Hoek van Holland het volgende:

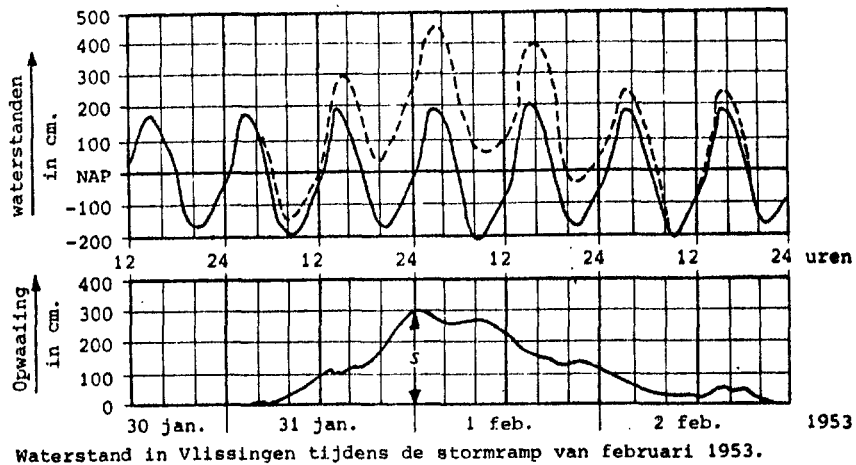
$$\begin{aligned} s^I &= (0,33 \cos \alpha_I - 0,09 \sin \alpha_I) \cdot 5,87 \cdot 10^{-3} U_I^2 \\ s^{II} &= (0,13 \cos \alpha_{II} - 0,22 \sin \alpha_{II}) \cdot 5,84 \cdot 10^{-3} U_{II}^2 \\ s^{III} &= (0,04 \cos \alpha_{III} + 0,02 \sin \alpha_{III}) \cdot 8,28 \cdot 10^{-3} U_{III}^2 \quad (4.82.) \\ s^N &= (0,56 \cos \alpha_N + 0,02 \sin \alpha_N) \cdot 8,93 \cdot 10^{-4} U_N^2 \\ s^k &= - (3,01 \cos \alpha_k + 8,27 \sin \alpha_k) \cdot 8,77 \cdot 10^{-7} U_k^2 \end{aligned}$$

Voor Calais, Vlissingen, Den Helder, Eierlandse Gat, Borkum en Cuxhaven zijn analoge verbanden opgezet.

Voor de windsnelheid wordt veelal het gedurende 9 aaneengesloten uurvakken overschreden uurgemiddelde U_9 genomen.

Opgemerkt zij nog dat s de maximum windopzet is tijdens een storm, zie figuur 4.30.

Als een verdere ontwikkeling op het gebied van de berekening van windopzetten zijn onder andere bij het KNMI computermodellen gemaakt; het eenvoudige model van Weenink is echter in goede overeenstemming met deze modellen.



Figuur 4.30.: De windopzet tijdens een storm

Literatuur

1. Dronkers, J.J.
Tidal computations in rivers and coastal waters
North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1964
2. Holthuijsen, L.H.
Methoden voor golfvoorspelling, Deel 1 en 2
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 1980
3. Vrijling, J.K., Bruinsma, J.
Symposium on hydraulic aspects of coastal structures
Hydraulic boundary conditions
Delft University Press, Delft 1980
4. Groen, P. Dorrestein, R.
Zeegolven
Opstellen op oceanografisch en maritiem meteorologisch gebied, nr.
11, Staatsdrukkerij Den Haag, 1976
5. Die Küste
Archiv für Forschung und Technik an der Nord- und Ostsee
Heft 36 - 1981
Westholsteinische Verlaganstalt Boyens & Co., Heide I. Holst.
6. Beschouwingen over de golfbeweging op de Waddenzee en de golfoploop
tegen dijken bij stormvloeden
Nota 63.2
Rijkswaterstaat, Studiedienst Hoorn, mei 1963
7. Rapport Deltacommissie
Deel 1 t/m 6, 1960
Staatsdrukkerij en uitg. bedrijf, Den Haag

Literatuur (vervolg)

8. Nordenstrøm, N.
Wat weten wij van golven?
Polytechnisch Tijdschrift 25 (1970)

9. Bruinsma, J., Van de Graaff, J.
Notitie WWKZ - 82 G.259
Golfhoogte - waterstandrelatie ter plaatse van de NAP - 20 m lijn
nabij Hoek van Holland t.b.v. de leidraad Duinafslag (nog niet
gepubliceerd)

10. Weenink, M.P.h.
A theory and method of calculation of wind effects on sea levels in
a partly enclosed sea, with special application to the southern
coast of the North Sea
KNMI, Med. en Verh. nr. 73, 1958

11. Svasek, J.N.
Statistical evaluation of wave conditions in a deltaic area
Proc. Symposium research on wave action, volume 1
Delft Hydraulic Laboratory, Delft, juli 1969

12. Johanson, J.C.P.
Berekening golfhoogten (niet gepubliceerd)
Centrum voor Onderzoek Waterkeringen, 1980

13. Ebbens, E.H., Roelse, P.
Nota, . Golfrandvoorwaarden duinwaterkeringen in Zeeland (niet
gepubliceerd)

14. Inventarisatie van methoden voor de berekening van de kruinhoogten
van zeedijken
S.75.039A
Centrum voor Onderzoek Waterkeringen, 1978

Literatuur (vervolg)

15. Van der Put, J;L;, Soudijn, B.J.J.
Bepaling van de dijktafelhoogten voor waterkeringen in het
deltagebied binnen de provincie Zuid Holland
Provinciale Waterstaat Zuid-Holland

16. Van Malde, J., Schoenmakers, N., Verhage, D.C.
Over het berekenen van deltaprofielen voor dijken langs de
Westerschelde
Rijkswaterstaat. Publ. van de directie Zeeland, Studiedienst
Vlissingen

17. Gerner, J.W.
Toetsing van de kruinhoogte van de Friese Waddenzeedijk tussen de
Afsluitdijk en Slachte
Rijkswaterstaat, dir. Waterhuishouding en Waterbeweging
District Kust en Zee
Studiedienst Hoorn, 1979

18. Deltawerken
Driemaandelijks bericht
nr. 76, mei 1976
De belastingen op de stormvloedkering, pg. 301

19. Deltawerken
Driemaandelijks bericht nr. 79, februari 1977
De vervorming van het getij door de compartimentering van het
Oosterscheldebekken, pg. 479.

20. Deltawerken
Driemaandelijks bericht, nr. 24, mei 1978
 - De probabilistische benadering van bouwkundige ontwerpen I,
pg. 171
 - Ontwikkelingen in het denken over dijken, pg. 175

Literatuur (vervolg)

21. Deltawerken

Driemaandelijks bericht, nr. 85, augustus 1978

- De probabilistische benadering van het ontwerpen van de stormvloedkering II
Veiligheidscoëfficiënten en foutenbronnen, pg. 257

22. Deltawerken

Driemaandelijks bericht, nr. 86, november 1978

- De probabilistische benadering van het ontwerpen van de stormvloedkering III
Natuurrandvoorwaarden en belastingen, pg. 279

23. Deltawerken

Driemaandelijks bericht, nr, 91, febr. 1980 en nr. 92, mei 1980

- De stormvloedwaarschuwingsdienst, pg. 3
- Golfverwachtingen op de Noordzee en aan de Nederlandse kust, pg. 98

24. Deltawerken

Driemaandelijks bericht, nr. 93, augustus 1980

- Werkbaarheidsverwachtingen voor de Oosterschelde, pg. 139
- Golfrichtingsonderzoek in de mond van de Oosterschelde, pg. 142.

25. Deltawerken

Driemaandelijks bericht, nr. 97, augustus 1981

Golven in de mond van de Oosterschelde, pg. 377

26. Bakker, W.T., Vrijling, J.K.

Probabilistic design of sea defenses

Bijdrage aan de Coastal Engineering Conference te Sydney, 1980

Literatuur (vervolg)

27. Langendoen, L.A.

GOLVEROS; een rekenprogramma gemaakt voor het voorspellen van golfspectra ter plaatse van de stormvloedkering in de Oosterschelde

RWS Deltadienst

Nota DDWT - 80.001, 1980

28. Langendoen, L.A.

VOORFIL; een programma voor de berekening van de golven in een bankengebied voor de kust

RWS, Deltadienst

Nota DDWT - 79.036, 1979

29. Langendoen, L.A.

OSWAT; een programma voor de berekening van de Oosterschelde waterstanden bij gesloten kering

RWS, Deltadienst

Nota DDWT - 81.014, 1981

30. Bijker, E.W.

Statistical Description of Ocean Waves

Delft University of Technology, 1973

31. Kalkwijk, J.P.T.

De analyse van getijden

Collegedictaat b75

Afd. der Civiele Techniek, TH Delft, 1979

32. Agema, J.F.

Waterkeringen

Collegedictaat

Vakgroep Waterbouwkunde, afd. Civiele Techniek, TH Delft, 1982

Literatuur (vervolg)

33. Battjes, J.A.
Korte golven
Collegedictaat b76
Afd. Civiele Techniek, TH Delft

34. Battjes, J.A.
Windgolven
Collegedictaat b78
Afd. Civiele Techniek, TH Delft

35. Massie, W.W.
Coastal Engineering, Vol. I, II and III
Coastal Engineering Group, Dept. of civ. Engineering, Delft
University of Technology

36. Hasselmann, K. e.o.
Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint
North Sea Wave Project (JONSWAP) 1963

37. Kinsman, B.
Windwaves, their generation and propagation on the ocean surfaces
Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1965

38. Stoker, J.J.
Waterwaves
The Mathematical Theory with Applications
Institute of mathematical sciences
New York University, New York, 1957

39. Heteren, J. van, Bruinsma, J.
A method to calculate the probability of exceedance of the design
wave height
Coastal Engineering 5 (1981) 83-91

Literatuur (vervolg)

40. Battjes, J.A.
Report nr. 72
Probabilistic aspects of ocean waves
Laboratory of Fluid Mechanics
Communications on Hydraulics
Dept. of Civ. Eng., Delft University of Technology

41. Wiegel, R.L.
Oceanographic Engineering
Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.Y., 1964

42. Holmes, P;
Wave Climate
Design Rubble-mound breakwaters
British Hovercraft Corporation
Isle of Wight, Pap. nr. 1, 1977

43. Krylov, Yu, Strekalov, S.S., Tsyplukhin, V.F.
Vetrovye volny i ich vozdesjstvie na zooruzeniya
(windgoeven en hun invloed op constructies), in russisch,
Hydrometeoizdat Leningrad, 1976

44. Dobroknonsky, S.V., Kontoboytseva, N.V., Ha Za Huen
Empirical relationships between steady-state waves and wind speeds
for a wide range of fetches
Engelse vertaling: Oceanology, vol. 13, blz. 640-645, 1973

45. Ou, S.H., Tang, F.L.W.
Wave characteristics in the Taiwan straits
Proc. Int. Symp. on ocean wave measurements and analysis
New Orleans, Louisiana, New York, SCE, Vol. 2, vlz. 139-158, 1974

Literatuur (vervolg)

46. Sverdrup, H.U., Munk, W.H.
Empirical and theoretical relations between wind, sea and swell
Trans. Am. Geoph. Union, vol. 27, nr. 6, blz. 823-827, 1946

47. Thijsse, J.Th.
Dimensions of wind generated waves
Congress of the UGGI, Oslo, 1948

48. Wilson, B.W.
Numerical prediction of ocean waves in the North Atlantic for
December 1959 Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Vol. 18, nr. 3,
blz. 114-130, 1965

49. Shore protection manual
Vol. 1, 1977
US Army Coastal Engineering Research Center

50. Heummen, T.L. van, Heerde, G. van
Verhoging zeedijk noordkust Groningen
Verslag modelonderzoek, M 996
Waterloopkundig Laboratorium Delft

51. Thijsse, J.Th., Schijf, J.B.
Penetration of waves and swells into harbours
Proc. XVIIth Int. Navigation Congress, Section II, Communication 4,
Lisbon, 1949

52. Getijtafels voor de zeehavens in Nederland en voor Antwerpen
(Prosperpolder) en Zeebrugge
Staatsuitgeverij, Den Haag

53. Getijtafels voor Nederland
Staatsuitgeverij, Den Haag

Literatuur (vervolg)

54. Golfbeweging Waddenzee bij Ameland
Nota 722
RWS, Studiedienst Hoorn, november 1982
55. Vrouwenvelder, A.C.W.M., Vrijling, J.K.
Probabilistisch otwerpen, college b3
Afd. Civiele Techniek, TH Delft
56. CUR-VB-rapport 109
Veiligheid van bouwconstructies; een probabilistische benadering,
1982
57. Kraker, A. de, Tichler, J.W., Vrouwenvelder, A.C.W.M.
Safety, reliability and service life of structures
Heron, Vol. 27, 1982, nr. 1
58. Vrijling, J.K.
Probabilistische methoden in het ontwerp van de stormvloedkering
Cement 1982, nr. 11
59. Massie, W.W.
Hydrodynamic aspects of fixed offshore structures
Coastal Engineering Group, Workgroup offshore Technology
Delft University of Technology, Delft, 1979
60. Vrijling, J.K.
Risico en veiligheid
Vakgroep Waterbouwkunde, TH Delft, 1980
62. Battjes, J.A.
Statistische eigenschappen van stationaire Gaussische processen
De Ingenieur, jrg. 84, nr. 27 (1972)

Literatuur (vervolg)

64. Vrijling, J.K.

Onderzoek naar het golfklimaat in de monding van de Oosterschelde
t.b.v. de bouw van de stormvloedkering

RWS, Deltadienst

Hoofdstuk 5 - Golfvervormingen

5.1. Inleiding

De golven, zoals die onze kust naderen, ondergaan in het algemeen grote vervormingen voordat ze de teen van de dijk hebben bereikt.

Dit wordt veroorzaakt door:

a. Refractie

Doordat een golf in water met andere diepte komt, veranderen de loop-snelheid, de lengte en de hoogte en daardoor verandert in omstandighe-den waarbij de golfrichting niet samenvalt met de richting van de ver-ondieping ook de richting van de golven.

b. Diffractie

Zonder dat de lengte en de periode van de golf veranderen, buigt de golf om vooruitspringende kustgedeelten of dammen heen.

c. Shoaling

Onder "shoaling" van golven wordt verstaan het proces van transformatie dat zij ondergaan als gevolg van de voortplanting in gebieden met va-riërende waterdiepte, waarbij de golfrichting evenwijdig loopt met de verondieping.

d. Bodemwrijving

In relatief diepe zeeën is deze te verwaarlozen, maar nabij de kust kan door dit verlies de golfenergie merkbaar afnemen.

e. Plaatselijke wind

Een golfveld, dat de kust nadert, kan hierdoor over bijvoorbeeld de laatste tien kilometers nog een merkbare hoeveelheid energie opnemen.

f. Stroming

Deze beïnvloedt alle golfafmetingen, in het bijzonder wanneer de stroomrichting evenwijdig is aan de richting, waarin de golven zich voortplanten.

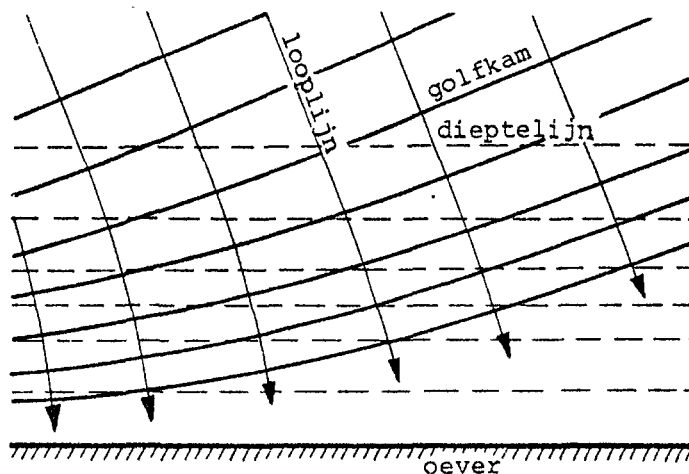
g. Het breken

Dit treedt op wanneer de hoogte van de golf ten opzichte van de waterdiepte zo groot is geworden, dat de golf niet meer stabiel is, of als de golfsteilheid erg groot wordt.

5.2. Refractie

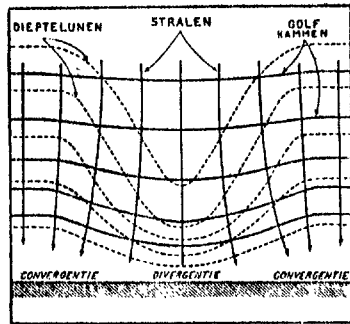
Nadert een schuin invallende golf de kust, waarvan de vooroever regelmatig ondieper wordt en met dieptelijnen evenwijdig aan de kust, dan zal de snelheid van de golfkam dicht bij de kust kleiner worden dan de snelheid van verder van de kust lopende delen van de golfkam en dus ten opzichte daarvan achterblijven.

De golven gaan bijdraaien en daardoor zullen de golfkammen trachten evenwijdig aan de kust te gaan lopen (golfstralen loodrecht op de kustlijn); zie figuur 5.1. Voor een nadere theoretische beschouwing van het verschijnsel wordt korthedshalve verwezen naar lit. 2 en 5.

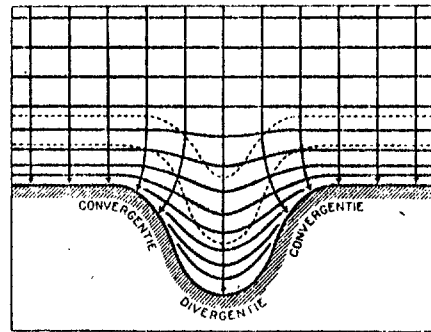


Figuur 5.1.: Refractie bij een rechte kust met daarvoor een gelijkmatig hellende zeebodem met rechte evenwijdige dieptelijnen

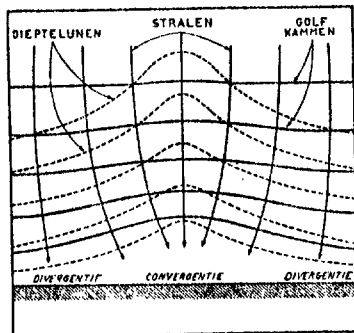
Figuur 5.2. laat het effect zien van een onderzees dal,
Figuur 5.3. laat dat van een onderzeese rug zien,
Figuur 5.4. toont de refractie voor en in een baai.
In figuur 5.5. is aangegeven hoe, ten gevolge van het
refractieverschijnsel, een uitstulping aan een kust sterker wordt
aangevallen dan de kust ter weerszijden daarvan, terwijl figuur 5.6.
een schiereiland laat zien met golven die van terzij komen aanlopen.



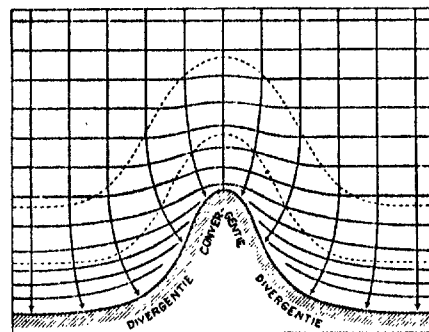
Figuur 5.2. Refractie boven een onderzees dal



Figuur 5.4. Refractie voor en in een baai



Figuur 5.3. Refractie boven een onderzeese rug



Figuur 5.5. Refractie voor een schiereiland of kaap; recht van voren aankomende deining (lit. 2)

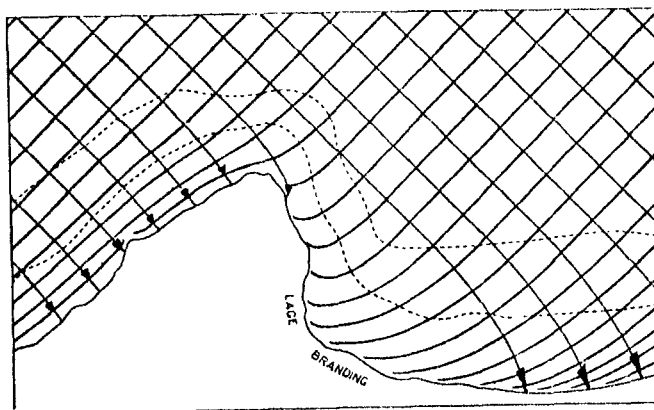


Fig. 5.6. Refractie van zijdelings aankomende golf bij een schiereiland of kaap (lit. 2)

Al dergelijke golvenpatronen kunnen soms zeer fraai worden gezien op luchtfoto's.

Bij verschillende waterstanden - en dus verschillende waterdiepten - is het refractiepatroon ook verschillend, zodat de golfaanval op een dijkvak met de waterstand zal variëren, ook al zouden alle andere invloeden niet veranderen. Daar de golfperiode de golflengte en de voortplantingssnelheid bepaalt, is deze mede van invloed op het refractiepatroon.

5.3. Diffractie

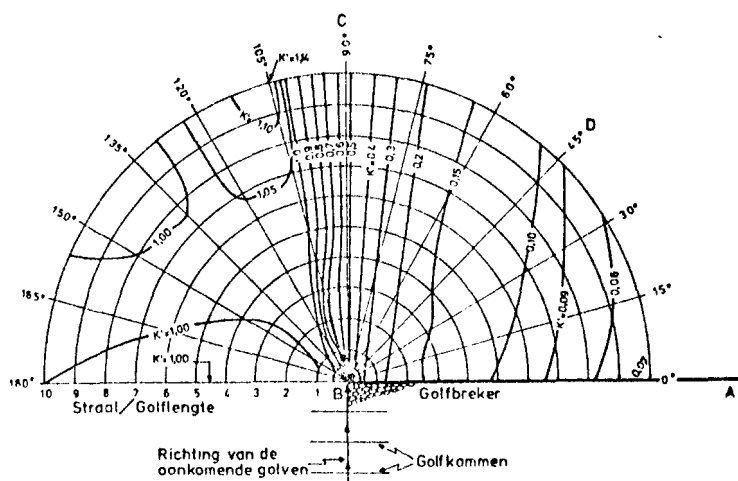
De buiging van golven om een obstakel heen is een algemeen verschijnsel, dat bij watergolven zowel als bij licht- en geluidsgolven optreedt. Op dit verschijnsel is alleen de golfperiode van invloed en wel temeer naarmate deze toeneemt.

Het diffractieverschijnsel treedt op wanneer een schaduwgebied achter bijvoorbeeld een golfbreker wordt beïnvloed door langsgaande golven. De golven geven dankzij het verschijnsel diffractie energie af aan het schaduwgebied.

In figuur 5.7. waarin AB zulk een obstakel (recht) voortstelt en waarin de van beneden aanrollende golfkammen door daaraan evenwijdige lijntjes worden aangeduid, zou dan rechts van BC zulk een schaduw aanwezig zijn, zodat daar geen golven zouden binnendringen.

In werkelijkheid komen ze er wel binnen: ze worden om de rand B heen "gebogen".

In de sectie BCDA treden nu golven op, die van het punt B schijnen uit te "stralen". Doordat er dus energie de sector BCDA binnen "lekt" zijn de golven langs de straal BC nu maar half zo hoog als ze anders zouden zijn. De verschillende lijnen geven aan waar de golfhoogte een bepaalde factor K' maal de oorspronkelijke golfhoogte bedraagt. Voor andere gevallen van diffractie, zoals bijvoorbeeld scheef invallende golven, het binnendringen van golven in een haven door een opening van de golfbrekers enzovoort, wordt korthedshalve verwezen naar lit. 5.



figuur 5.7. Diffractie van golven om het uiteinde van een golfbreker heen. De golven komen in de figuur van beneden af. De lijnen geven aan de verhouding "K" van de ter plaatse berekende golfhoogte tot de golfhoogte voor de golfbreker. De gebruikte theorie is in wezen dezelfde als die van A. Sommerfeld (1896) voor het overeenkomstige optische geval. De theorie is door laboratoriumproeven bevestigd (lit. 2).

Het diffractieverschijnsel treedt aan onze kusten zelden in zuivere vorm op.

Het wordt meestal begeleid en overheerst door de refractie.

5.4. Shoaling

In deze paragraaf onderstellen we een rechte kust en in het ondiepe water daarvoor rechte evenwijdige dieptelijnen en geringe bodemhellingen (minder dan 1 : 10); verder onderstellen we dat er enkelvoudige golven recht op de kust toelopen, met hun kammen evenwijdig aan de dieptelijnen. Bij zulk een geleidelijke overgang blijft de periode van de golven dezelfde ($T = \text{constant}$).

Maar dan volgt dat de voortplantingssnelheid C zal afnemen naarmate de golven in minder diep water geraken, zie hoofdstuk 4.

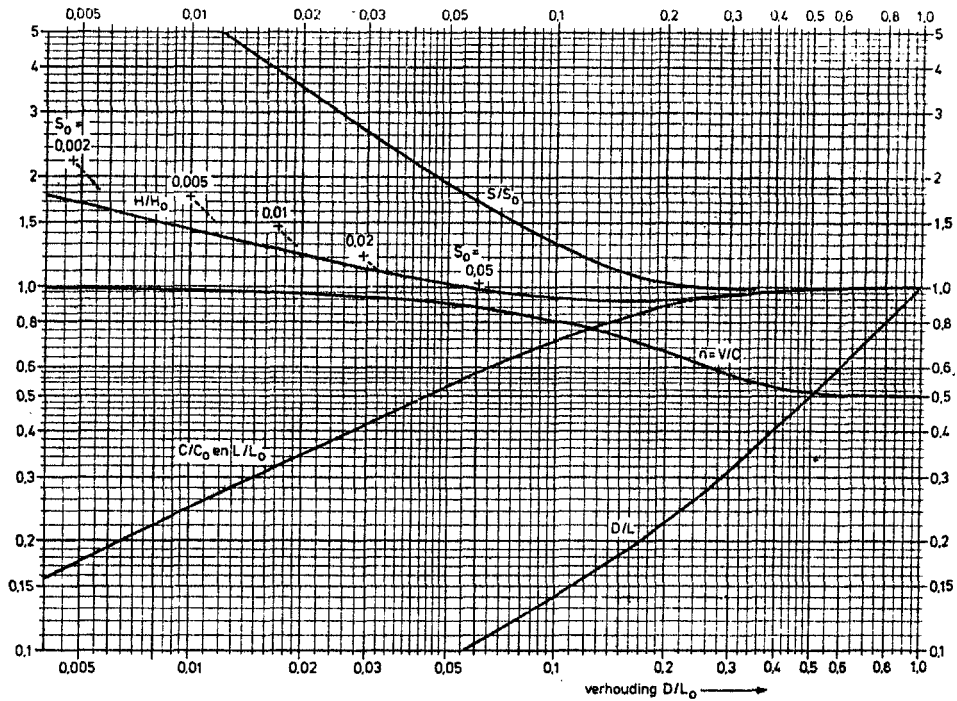
In evenredigheid met C neemt ook de golflengte L af (immers $L = CT$). Behalve een verandering in C en L treedt ook een geleidelijke verandering op in de golfhoogte. Deze neemt namelijk eerst iets af om later weer toe te nemen totdat de golf breekt (branding).

De kromme gemerkt H/H_0 in figuur 5.8. laat dit verloop zien in de vorm van een grafiek, waarin horizontaal is uitgezet de verhouding van de diepte D tot de diepwater-golflengte L_0 , terwijl vertikaal de verhouding van H , de golfhoogte, tot H_0 , de hoogte die de golven in diep water hadden, wordt afgelezen.

Zoals men ziet is de aanvankelijke afneming van H maar gering en zeer geleidelijk, de toeneming later daarentegen vrij snel.

De golflengte neemt tijdens deze verandering van de hoogte voortdurend af, zoals we zagen.

Ten gevolge daarvan neemt met de aanvankelijke afneming van H de steilheid H/L nauwelijks af; zij blijft eerst praktisch gelijk, tot D/L_0 ongeveer 0,25 is. Daarna neemt, door snellere afneming van L , de steilheid voortdurend toe. Zie de kromme gemerkt S/S_0 in figuur 5.8.



figuur 5.8. Grafiek ter bepaling van de verandering in golfhoogte H , golfsnelheid C en golflengte L , steilheid s en energietransportfactor n voor golven die geleidelijk in ondieper water komen. D is de diepte. De index 0 duidt "diep water" aan (lit. 2).

Voor de theoretische achtergrond wordt hier verwezen naar lit. 2.

N.B. Het is nodig er de aandacht op te vestigen, dat in deze paragraaf uitsluitend gebruik is gemaakt van de "lineaire" theorie die, zoals bekend, een beperkte geldigheid heeft, zeker voor golven in zeer ondiep water (geen brekende golven). Laboratoriumproeven met bodemhellingen tot 1 : 20 hebben de juistheid van de theoretische redelijk goed bevestigd voor waarden van D/L_0 boven ca. 0,05. Voor lagere waarden van D/L_0 zijn de in figuur 5.8. gegeven krommen minder betrouwbaar.

5.5. Bodemwrijving

De beweging van de waterdeeltjes in een golf neemt af van de oppervlakte naar de bodem.

Is de golflengte kleiner dan tweemaal de waterdiepte, dan is de golfbeweging op de zeebodem nauwelijks merkbaar en is de bodemwrijving te verwaarlozen.

Is daarentegen de golflengte groot ten opzichte van de waterdiepte, dan bestaat er langs de bodem een alternerende stroomsnelheid, waardoor een energieverlies optreedt, dat zich niet manifesteert door een verhang van de waterspiegel, zoals bij een rivier, maar door vermindering van de golfhoogte naarmate de golf voortschrijdt. Dit energieverlies wordt versterkt in een poreuze bodem (zoals zand) waar het water tussen de korrels, door de drukfluctuaties die aan de bovenzijde van de poreuze laag optreden, in beweging wordt gebracht. Dit laatste verschijnsel heet percolatie. Deze wrijving aan de bodem is één van de oorzaken waardoor de wind op water van beperkte diepte de golven minder kan doen groeien dan op diep water.

Voor gegeven eigenschappen van de bodem (ruwheid, porositeit) en gegeven golfparameters kan men het energieverlies per meter lengte theoretisch redelijk schatten.

In lit. 69 wordt door Miche een mogelijke aanpak beschreven; het gaat in grote lijnen als volgt.

Beschouwt men de twee dwarsraaien 1 en 2 aan het begin en het eind van een vak met een constante diepte d en lengte x dan gelden volgens Miche voor de halve golfhoogten h_1 en h_2 de onderstaande twee formules:

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{\alpha h_1 x + 1} \quad (5.1.)$$

met

$$\alpha = \frac{4g}{3\pi k_m^2 d^{7/3}} \quad (5.2.)$$

waarin:

h_1 = halve golfhoogte aan het begin van het vak
 h_2 = halve golfhoogte aan het eind van het vak
 g = versnelling van de zwaartekracht
 k_m = wrijvingsfactor volgens Manning-Strickler

verder

$$\begin{aligned}
 c &= \text{coëfficiënt van De Chézy} \\
 &= k_m \sqrt[6]{d}
 \end{aligned}
 \tag{5.3.}$$

Voor c wordt veelal de formule van White-Colebrook voor ruwe leidingen aangehouden, waarin de zandruwheid k voorkomt.

Bij benadering kan worden gesteld dat voor $3,6 < \frac{d}{k} < 680$ volgens de formule van Manning-Strickler zou gelden:

$$c = 24 \sqrt[6]{\frac{d}{k}} \tag{5.4.}$$

$$\text{Uit (5.3.) en (5.4.) volgt } k_m = \frac{24}{\sqrt[6]{k}} \tag{5.5.}$$

De factor 24 wordt voor $1,5 < \frac{d}{k} < 3,6$ verlaagd tot 22 à 23.

Miche heeft de formules (1) en (2) mede afgeleid aan de hand van modelonderzoekingen met behulp van regelmatige golven en getoetst aan de hand van natuurmetingen. Er mag dan ook worden gesteld dat $h = 0,5 H_{50}$ als H_{50} de golfhoogte uit een golfveld is met 50% overschrijdingskans. Daar geldt $H_{1/3} \approx 1,6 H_{50}$ (Rayleigh-verdeling) kan (5.1.) als volgt worden geschreven:

$$\frac{(H_{1/3})_2}{(H_{1/3})_1} = \frac{3,2}{\alpha (H_{1/3})_1 + 3,2} \tag{5.6.}$$

Voor ondiepe gedeelten geldt $k_m \approx 20 \text{ à } 25 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$. Hetgeen volgens (5.5.) een zandruwheid inhoudt van 3,0 à 0,8 m, veroorzaakt door zandribbels.

5.6. Plaatselijke wind

De tegenhanger van het energieverlies door bodemwrijving is de energiewinst door plaatselijke wind.

Wanneer in het gebied voor de kust een sterk windveld aanwezig is, zullen de golven nog in hoogte toenemen, vooral wanneer de windrichting niet veel van de golfrichting afwijkt. Deze invloed is in sommige gevallen niet te verwaarlozen omdat daardoor de dijken op te geringe golfaanval zouden worden ontworpen.

Vooraf wanneer de waterdiepte gering is en het ondiepe gebied grote afmetingen heeft, zijn bodemwrijving en windinvloed van belang.

Is het gebied groot genoeg, dan kan zich geen nieuw evenwicht van de energiebalans instellen, waarbij de winst en het verlies van energie elkaar compenseren en de golfhoogte verder niet verandert.

5.7. Stroming

Bevindt zich de zeewatermassa in haar geheel in beweging (ten opzichte van de aarde) dan blijven alle wetmatigheden zoals hiervoor, onder andere in hoofdstuk 4, zijn besproken van kracht, mits alle gegevens maar worden betrokken op het bewegende water of, met andere woorden, mits alle snelheden en perioden maar zo gedefinieerd worden als een met het water zich meebewegende waarnemer ze zou meten (de meting van de golflengte wordt door de bewegingstoestand van de waarnemer niet beïnvloed). Dit geldt niet alleen de onderlinge relaties tussen golflengte, periode en snelheid, maar ook de relaties tussen de wind en de golven, mits dus als windsnelheid maar genomen wordt de windsnelheid ten opzichte van het water (de schijnbare windsnelheid gemeten door een met het water meedrijvende waarnemer) en mits de stroomsnelheid van het water in het gehele beschouwde gebied maar gelijk is.

Anders wordt het wanneer golven uit een gebied zonder stroom in een gebied met stroom geraken, of over water lopen, waarin van plaats tot plaats de stroom verschillend is.

Hier zullen wij ons beperken tot het geval dat golven in diep water, komend uit een gebied zonder stroom van betekenis, geleidelijk in een gebied met mee- of tegenstroom geraken, zoals vooral het geval kan zijn bij zeegaten waar sterke getijstromen lopen.

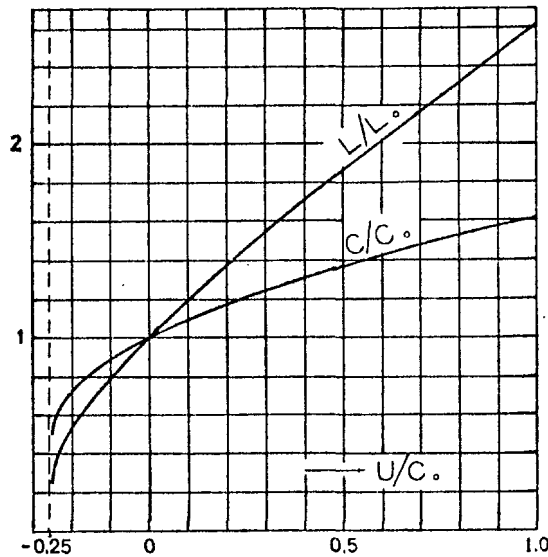
We beschouwen een stationaire situatie en beperken ons tot de lineaire golftheorie.

Voor enkele theoretische achtergronden wordt verwezen naar lit. 2.

In fig. 5.9. is de verandering van golflengte en golfvoortplantings-
snelheid gegeven van golven die in stromend water geraken.

In de figuur hebben de variabelen de volgende betekenis:

- L_0 = golflengte buiten het stroomgebied
- C_0 = golfvoortplantingssnelheid buiten het stroomgebied
- L = golflengte in het stroomgebied
- C = golfvoortplantingssnelheid ten opzichte van het water in het stroomgebied
- U = stroomsnelheid in het stroomgebied; U positief als de stroom met de golven meeloopt, in het andere geval is U negatief.



figuur 5.9. Verandering van snelheid en golflengte van golven, die in stromend water geraken (lit. 2).

Bij meestroom is $C > C_0$, bij tegenstroom is $C < C_0$.

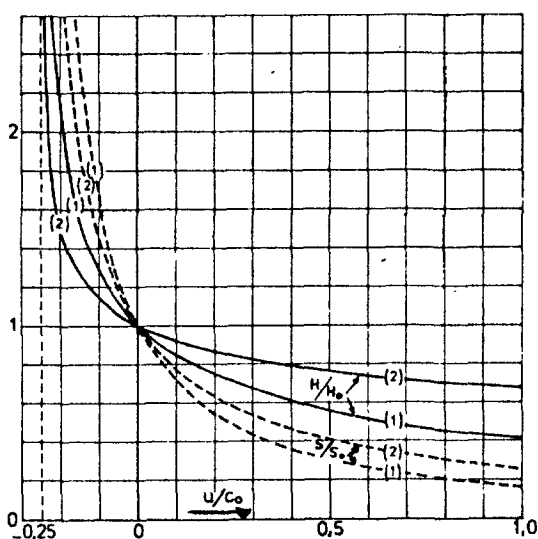
In het laatste geval wordt voor absolute waarden van U die groter dan $C_0/4$ zijn geen oplossing meer gevonden, de golfgroepen kunnen dan niet meer tegen de stroom inlopen. De golven zullen echter bij een minder sterke tegenstroom door te grote steilheid van de golf reeds instabiel zijn geworden, zie 5.8.

Het verloop van de golfhoogte wordt in figuur 5.10. weergegeven, waarin:

H_0 = golfhoogte buiten het stroomgebied

H = golfhoogte in het stroomgebied.

De curve gemerkt met (1) geldt alleen indien alle snelheden in de horizontale richting loodrecht op de stroom- en golfrichting nul zijn, met andere woorden indien de gehele waterbeweging zich in evenwijdige verticale vlakken afspeelt. Er vindt een stroming plaats van water uit de diepte. De curve gemerkt met (2) geldt alleen indien de stroming zuiver horizontaal is, er vindt dus alleen toestroming van opzij plaats. Wederom geldt: toenemende meestroom geeft verlaging van de golven, tegenstroom verhoging.



figuur 5.10. Verandering van hoogte en steilheid van golven, die in stromend water geraken (lit. 2)

De figuren 5.9 en 5.10 gelden voor diep water.

Ze kunnen ook in kustwateren en riviermonden worden toegepast, mits de golven maar kort genoeg zijn.

In deze situatie lijkt toestroming of uitwijking van het water in horizontale richting waarschijnlijker dan in verticale richting, zodat curve 2 in figuur 5.10 eerder van toepassing zal zijn dan curve 1.

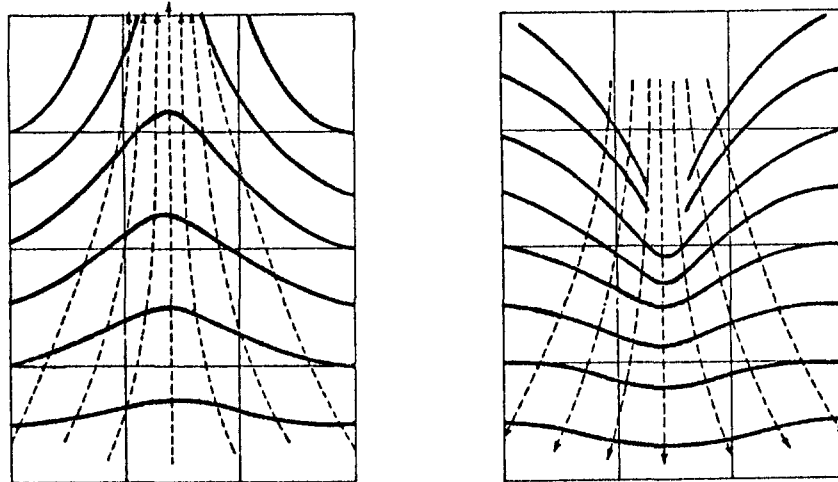
Voor $U = -C_0/4$ (tegenstroom) en dus $C/C_0 = 1/2$ (zie fig. 5.9.) wordt H/H_0 volgens figuur 5.10. oneindig.

In werkelijkheid wordt reeds bij kleinere waarden van U de steilheid zo groot dat de grenswaarde daarvan - die theoretisch $1/7$ is, doch in werkelijkheid meestal lager ligt - wordt overschreden en de golven gaan breken. De verandering die de steilheid (s) ondergaat wordt in figuur 5.10. grafisch voorgesteld door de kromme gemerkt s/s_0 ;

$$s/s_0 = \frac{H}{H_0} / \frac{L}{L_0}$$

Men ziet hier een verklaring voor het bekende feit dat de golven niet alleen lager, maar ook vlakker worden wanneer zij in een gebied met meestroom komen en steiler wanneer zij in een gebied met tegenstroom komen.

Daar plaatselijke verschillen in snelheid der golfkammen refractie geven kunnen ook stromen refractie geven. De golven hebben de neiging om te convergeren naar plaatsen waar hun snelheid het meest wordt verkleind of te divergeren van plaatsen waar hun snelheid wordt vergroot. In zeegaten is de stroom meestal het snelst in het midden. Bij ebstroom blijven dus in het midden de golfkammen het meest achter; er treedt convergentie op, zie figuur 5.11. Loopt daarentegen bij vloedstroom de stroom met de golven mee en is hij in het midden weer het snelst, dan vindt het tegengestelde plaats, namelijk divergentie.



figuur 5.11. Refractie van golven in een riviermonding of zeegat ten gevolge van verschillen in stroomsnelheid. De stippellijnen duiden hier de stroomverdeling aan: waar zij spreiden is de stroom zwakker, waar ze dringen is hij sterk. De golven komen in de tekeningen van boven af. Links zou kunnen zijn: ebstroom uit een zeegat; rechts: vloedstroom naar binnen (lit. 2)

Convergentie betekent weer: verhoging der golven, divergentie: verlaging. De refractie door stroomverschillen werkt dus bijvoorbeeld mede om de golven steiler te doen zijn wanneer ze tegen de stroom een zeegat inlopen en vlakker wanneer ze met de stroom meelopen.

Een verschil met de refractie door diepteverschillen is, dat deze het eerst op de langere golven werkt, terwijl de refractie door stroomverschillen het meest op de kortere golven invloed heeft; immers, bij deze laatste refractie is de verhouding van stroomsnelheid tot golfvoortplantingssnelheid van belang.

5.8. Golfbreking

5.8.1. Breking in diep water

Een golf wordt onstabiel en breekt wanneer de voorwaartse snelheid van de waterdeeltjes in de kamlijn (de allerhoogste waterdeeltjes van de golf) groter wordt dan de voortplantingssnelheid van de golf.

Volgens de theorie van Stokes gebeurt dit in het algemeen wanneer de kamhoek - dat is de hoek gevormd door de raaklijnen aan de steilste plaatsen voor en achter de golfkam - afneemt tot 120° en volgens deze theorie wordt deze grenshoek bereikt bij een steilheid van $1/7$ of $0,14$.

Het bovenstaande geldt voor diep water.

Bereiken golven deze steilheid reeds in diep water - bijvoorbeeld door de werking van wind of stroom - dan breken ze dus ook reeds daar. Is dit niet het geval, dan veranderen lengte en hoogte zodra de golven in ondiep water geraken; zie 5.4.

5.8.2. Breking in ondiep water

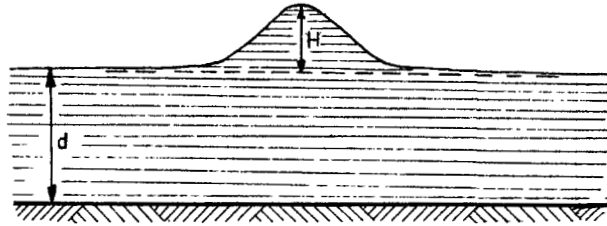
Golven die oorspronkelijk een geringe steilheid hadden zullen dan nog een eind kunnen doorlopen voor zij breken en daarbij eerst aanzienlijk aan hoogte kunnen winnen.

Bij eenzelfde aanvankelijke golfhoogte (H_0) zullen langere golven dus een hogere branding geven dan kortere golven. Naar het breken van periodieke golven op een horizontale bodem van beperkte diepte is veel onderzoek verricht.

Voor golven op zeer ondiep water (lengte golf \gg waterdiepte) zijn deze zodanig vervormd dat de dalen steeds vlakker en breder en de ruggen steeds nauwer worden naarmate het water ondieper is.

De energie gaat zich dan in hoofdzaak nabij de kammen ophopen. Tussen de kammen is het water in zwakke gelijkmatige achterwaartse beweging en de kammen worden praktisch onafhankelijk van elkaar. Ze gaan dan gelijken op een serie zogenaamde "solitary waves" of eenling-golven.

Een zuivere eenling-golf bestaat uit één enkele kam, die voortloopt over een overigens vrijwel horizontaal wateroppervlak. Het profiel wordt strikt genomen pas horizontaal in het oneindige, maar praktisch al veel dichterbij, zie figuur 5.12.



figuur 5.12.: Eenling-golf of "solitary wave"

waarin:

d = diepte, gemeten beneden de vlakke gedeelten

H = hoogte eenling-golf

Gebleken is dat zulke golven slechts kunnen bestaan wanneer de verhouding H/d kleiner is dan 0,78.

Wordt deze waarde bereikt, dan moeten ze breken. Bij windinvloed zal de orbitaalsnelheid in de golfkam toenemen, waardoor het breken bij een lagere H/d verhouding zal optreden.

Voor praktisch gebruik kan figuur 5.13. worden toegepast, strikt genomen geldig voor een bodemhelling van 1 op 50 (lit. 2).

Dit levert bij gegeven waarde van H_o^* en van de periode (waaruit L_o volgt) onmiddellijk de brekerhoogte.

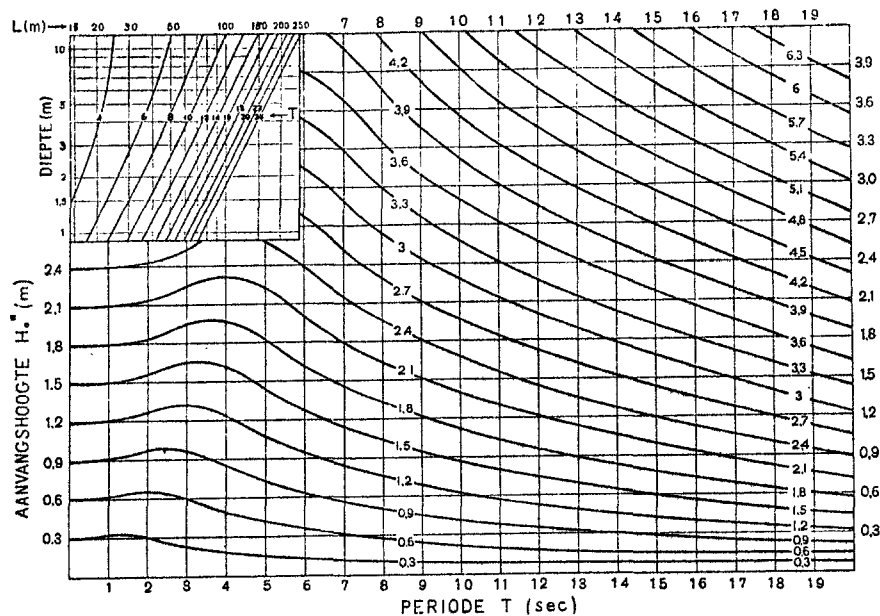
Voor de praktijk moet men ook de plaats weten waar de golven breken (onder andere om de breedte van de brandingsstrook vast te stellen).

Deze plaats is bepaald, wanneer de diepte bekend is.

Deze diepte d_b , waar de golven breken, staat bij eenling-golven volgens de theorie in een vaste verhouding tot de brekerhoogte H_b , namelijk

$$H_b = 0,78 d_b \text{ of } d_b = 1,28 H_b. \quad (5.7.)$$

Onder de diepte d_b wordt hierbij verstaan de verticale afstand van de bodem tot het golfdal, dat bij deze golven met het karakter van eenling-golven bijna samenvalt met het niveau dat ter plaatse bij stil water gevonden zou worden.



figuur 5.13. Grafiek ter bepaling van de brekerhoogte H_b voor golven

van bekende periode T en aanvangshoogte H_0^* , welke kammen overall evenwijdig aan de dieptelijnen zijn. In de inzet: grafieken ter bepaling van L uit T en D (lit. 2).

Vele waarnemingen in de natuur en ook proeven met watergolven op verkleinde schaal leveren voor de verhouding van brekerdiepte tot brekerhoogte waarden die een vrij aanzienlijke spreiding vertonen, maar meestal wel tussen 1 en 1,4 liggen, dus niet ver verwijderd van de bovengenoemde theoretische waarde 1,28.

Op grond van ervaring kan men dus stellen:

$$d_b = 1,2 H_b \quad (5.8.)$$

Bij het maken van verwachtingen omtrent branding bepaalt men dus eerst de brekerhoogte H_b en daaruit door vermenigvuldiging met de factor 1,2 de diepte d_b waar de branding begint.

Bij toepassing van het bovenstaande in de natuur moet men uiteraard rekening houden met de onophoudelijke fluctuaties in de hoogten der uit zee aankomende golven.

Deze hoogste golven zullen het verst buiten de kust breken. Lagere golven breken verder naar binnen, voor zover zij in hun loop niet worden belemmerd door de ongeordende waterbeweging, ontstaan door even eerder gebroken hogere golven.

Al het bovenstaande is alleen geldig wanneer zich, behalve de geleidelijk naar de kust toe afnemende diepte, geen verdere storende invloeden voordoen; zoals genoemd in de vorige paragrafen.

5.8.3. Breking op een hellend talud

A l g e m e e n

Indien golven breken op een hellend talud, kunnen afhankelijk van de golfsteilheid en de taludhelling verschillende brekervormen worden onderscheiden, die niet alleen qua vorm maar ook qua energie-afgifte en uitgeoefende kracht van elkaar verschillen.

Een karakteristieke parameter die bij verschillende brekertypen voor een glad en vlak talud vaak wordt gebruikt is:

$$\xi = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{H/L_0}} \quad (5.9.)$$

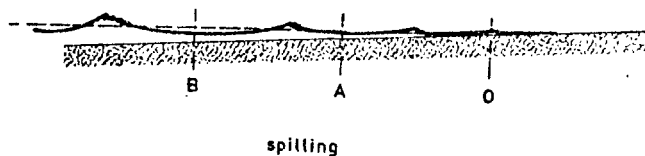
waarin:

- α = hellingshoek van het talud
- H = golfhoogte
- L_0 = golflengte op diep water = $\frac{g T^2}{2\pi}$
- g = versnelling zwaartekracht
- T = periode van de golf

De verschillende typen brekers kunnen globaal volgens onderstaande lijst worden ingedeeld:

	$\xi < 1$	spilling	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; height: 100px; width: 20px;"></div> <div style="text-align: center;"> <p>↑</p> <p>toenemende golfsteilheid</p> <p>afnemende taludhelling</p> <p>↑</p> </div> </div>
1 <	$\xi < 2,5$	plunging	
2,5 <	$\xi < 3,2$	plunging-collapsing	
3,2 <	$\xi < 3,4$	collapsing-surgung	
3,4 <	ξ	surgung	

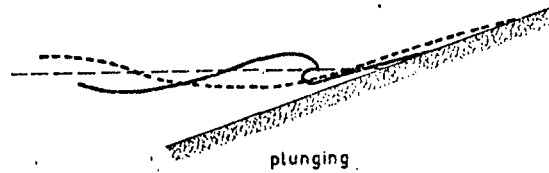
Spilling breaker: $\xi < 1$



figuur 5.14. vorm van de spilling breaker

De brekers van het overschuimende type (spilling breaker) treden op bij zeer flauwe bodemhelling. Ze lopen over een geruime afstand voort en verliezen daarbij continu energie door te breken met schuimvorming aan hun kammen, totdat ze geheel verdwenen zijn.

Plunging breaker: $1 < \xi < 2,5$



figuur 5.15. vorm van de plunging breaker

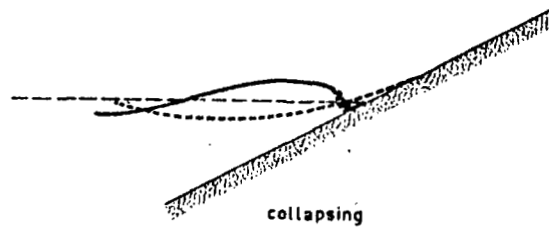
De brekers van het overstortende type (plunging breaker) treden op bij wat grotere bodemhellingen en wanneer de ontwikkeling van de golfbrug in ondiep water weinig wordt gestoord door andere effecten als: wind, kruisende golven, stroom, onregelmatigheden van de bodem en dergelijke.

De overstortende breker wordt gekarakteriseerd door het optreden van een watergordijn, dat van de kam af als het ware wordt neergegoten en los is van de voorkant van de golfbrug. Zo'n breker heeft na het overstorten, dat in een korte spanne tijds gebeurt, slechts weinig energie overgehouden.

Daar bij een betrekkelijk steile bodemhelling het proces van de vervorming der golven tot het uiteindelijke breken zich over een kortere afstand uitstrekt en er dus minder dan bij een zeer geringe bodemhelling voor storende invloeden gelegenheid is om in het spel te komen, is zulk een wat steilere helling in het algemeen een gunstige factor voor de ontwikkeling van overstortende brekers.

Verder is ook een geringe aanvankelijke steilheid der golven hiervoor bevorderlijk - indien althans andere omstandigheden niet tegenwerken; bij geringe aanvankelijke steilheid gaat namelijk de ontwikkeling naar een zogenaamde eenling-golf ver door en wordt bij eenzelfde aanvankelijke hoogte een grotere uiteindelijke hoogte, dus een sterkere ophefing van de kam bereikt dan bij aanvankelijk steilere golven.

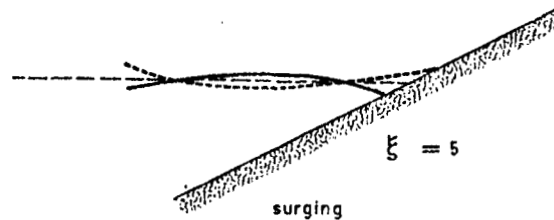
Collapsing breaker: $\xi \approx 3,2$



figuur 5.16. vorm van de collapsing breaker

De brekers van het bijna overstortende type (collapsing breaker) zijn tussen een plunging en surging breaker in gelegen. Bij deze brekervorm is een verticale kam aanwezig, die slechts gedeeltelijk in elkaar is gezakt.

Surging breaker: $\xi > 3,4$

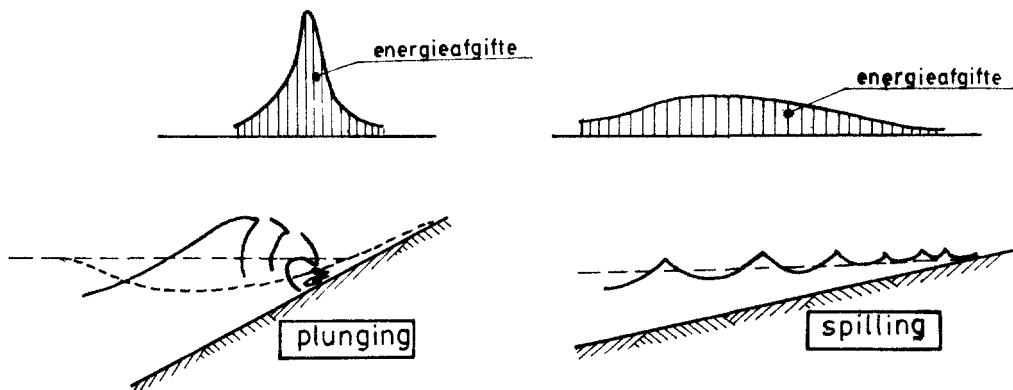


figuur 5.17. vorm van de surging breaker.

Deinende brekers (surging breaker) worden waargenomen als de helling nog steiler is (en vooral als de golfsteilheid zeer laag is). Het voorfront van de golfkam wordt dan op de helling als het ware opgelicht voordat de golf kan overstorten en er ontstaat een op en neergaande waterbeweging met een betrekkelijk dunne schuimende waterlaag. De golfenergie wordt nu grotendeels teruggekaatst.

Deze "deinende" brekers vormen dus in feite het stadium tussen de overstortende brekers en de zuiver staande golven, waarbij geen breking meer optreedt en alle golfenergie wordt teruggekaatst.

Vergelijkt men de energie-afgifte van de plunging breaker kwalitatief met die van de spilling breaker dan verkrijgt men onderstaand beeld.



figuur 5.18. vergelijking van de energie-afgifte

Ook andere karakteristieken in de brekerzone zijn afhankelijk van de vorm van de breker, zoals uit tabel 1 blijkt, waarin:

- H_b = hoogte golf in breekpunt
- d_b = stil-water diepte in breekpunt
- r = reflectiecoëfficiënt

ξ	≈ 0.1	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
	breaking				no breaking		
	spilling		plunging		collapsing/surgling		
H_b/d_b	≈ 0.8	1.0	1.1	1.2			
$N^{*})$	6-7	2-3	1-2	0-1	0-1		
r	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	4×10^{-1}	8×10^{-1}		
	absorption				reflection		
	progressive wave				standing wave		
	set-up predominant			run-up predominant			

*) number of waves in surf zone

Tabel 1: afhankelijkheid karakteristieken in de brekerzone (lit. 51)

Beseft moet worden dat in voorgaande schematisaties de werkelijkheid sterk is geïdealiseerd,

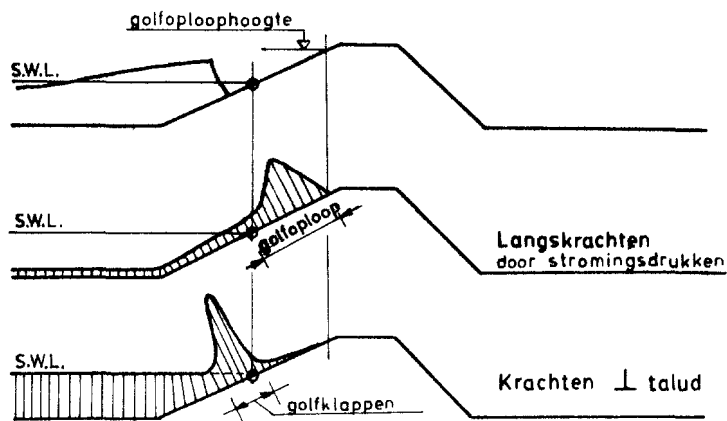
De gegeven beschouwingen zijn nog het best van toepassing op regelmatige golven die op een vlak en glad talud toelopen, een situatie die men in het laboratorium kan scheppen. In de vrije natuur bestaan er vele factoren die het gegeven beeld kunnen verstoren.

Krachten op het talud

Bij de golfbelasting van dijken kunnen twee krachtswerkingen worden onderscheiden:

- a. langskrachten die ontstaan door schuifspanningen (veroorzaakt door op- en aflopend water)
- b. krachten loodrecht op het talud, onder andere golfklappen.

Figuur 5.19. laat schematisch zien waar op het talud de krachten optreden.



Figuur 5.19. belasting van het talud

De langskrachten ontstaan door de wrijving tussen het water en het oppervlak van het talud zijn in eerste benadering evenredig met het kwadraat van de stroomsnelheid van het water ter plaatse.

Zeewaarts van het breekpunt worden de stroomsnelheden aan de teen door de orbitaalsnelheden in de golf bepaald en op het punt van breking is de component van de stroomsnelheid evenwijdig aan het talud klein.

Hoge stroomsnelheden treden pas op wanneer na het breken van de golf de tong van de gebroken golf vrij komt uit de turbulente watermassa en met hoge snelheid tegen het talud oploopt, daarbij wordt de energie deels door wrijving en deels door omzetting in potentiële energie verbruikt. De hoogste belasting door langsstromen wordt daarom boven de stilwater-spiegel gevonden.

Voor de stabiliteit van een gezette bekleding zijn echter de krachten loodrecht op het talud van groter belang.

De drukbelasting op het talud en op de teen heeft beneden het golfdal een grootte, die niet veel afwijkt van de hydrostatische drukhoogte, welke met de door de golfbeweging wisselende waterdiepte overeenkomt.

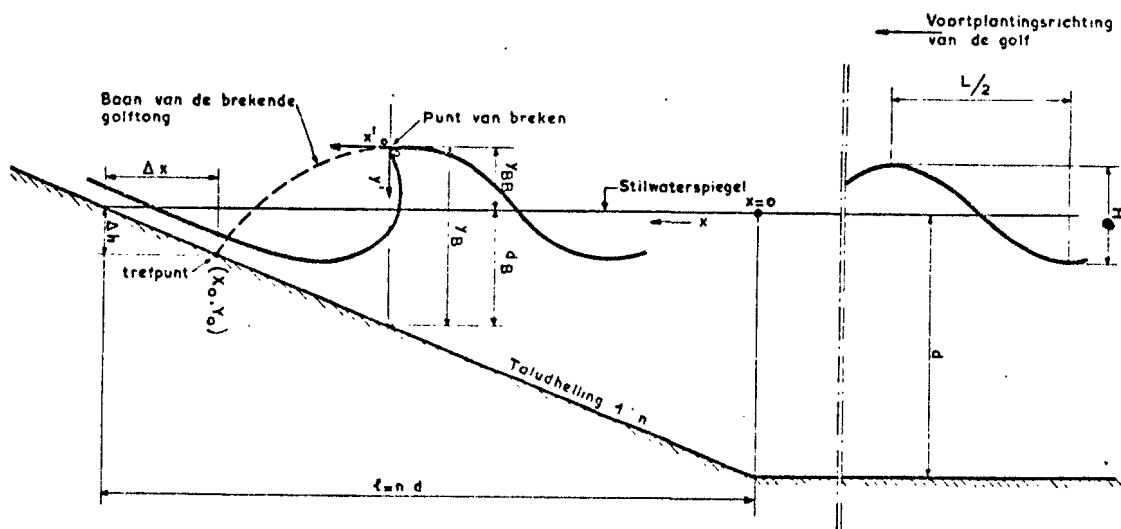
Op de plaats waar de golfkam van de brekende golf het talud treft kan men echter plaatselijk zeer hoge drukken verwachten omdat op het moment dat de golf op het talud breekt de kinetische energie, welke in de steile golftong is opgeslagen, gedurende een zeer korte tijd vrijkomt. Omdat de plunging breaker op de relatief steile taluds het meest voorkomt en omdat de hierdoor veroorzaakte belasting het grootst is, kan men zich wat de golfklap betreft beperken tot het beschouwen van de plunging breaker.

Bij het verschijnsel golfklap op een dijktalud zijn van belang de grootte, de tijdsduur van de klap en tevens de plaats waar en het gebied waarover deze optreedt.

De plaats op het talud bij het begin van breking

Over het punt van breken is veel literatuur beschikbaar.

Er zal hier echter slechts een beknopt uittreksel uit de beschikbare literatuur worden gegeven en hoofdzakelijk beperkt blijven tot regelmatige golven en loodrechte inval.



figuur 5.20. parameters van de brekende golf (plunging breaker)

Via een eerste orde benadering van de niet-lineaire ondiep-water golftheorie wordt, met behulp van de methode der karakteristieken, het volgende theoretische verband verkregen:

$$\frac{Y_B}{d_B} = 2 \quad (5.10.)$$

waarin:

Y_B = de hoogte van de golfklap boven de bodem op het punt waar de golf begint te breken

d_B = waterdiepte op het punt van breken, zie ook fig. 5.20.

Dus theoretisch is de verhouding Y_B/d_B steeds gelijk aan 2, onafhankelijk van de taludhelling en de steilheid van de invallende golf; zie lit. 8. In bovenstaande benadering zijn echter zowel de wrijvingsverliezen als de reflectie van de golfenergie verwaarloosd.

Bij volledige reflectie, hetgeen resulteert in de vorming van een staand golfpatroon, geldt voor de breking van de staande golf het volgende:

$$\frac{Y_B}{d_B} = 1,3 \text{ voor ondiep-water condities, d.w.z. } \frac{d}{L} < 0,05 \quad (5.11.)$$

$$\frac{Y_B}{d_B} = 1,1 \text{ voor diep-water condities, d.w.z. } \frac{d}{L} > 0,50 \quad (5.12.)$$

waarin:

d = waterdiepte voor het talud

L = golflengte van de aankomende golf, zie ook figuur 5.20.

Op grond van dimensie-analyse kan worden aangetoond, dat de karakteristieken van brekende golven op relatief steile taluds afhankelijk zijn van de taludhelling en de golfsteilheidsparameter $H_0/g T^2$.

De invloed van de wrijving mag worden verwaarloosd omdat het breken zich over een relatief korte afstand afspeelt.

In het Franzius Instituut te Hannover is door Ayyar (lit. 45) met regelmatige golven een groot aantal modelproeven uitgevoerd op vlakke en gladde doorgaande taluds met diverse hellingen.

Uit het experimentele onderzoek van Ayyar blijkt het volgende:

$\frac{Y_B}{d_B}$	taludhelling 1 : n
1,22	1 : 2
1,27	1 : 3
1,36	1 : 4
1,46	1 : 5
1,51	1 : 6

Tabel 2: punt van breken als functie van de taludhelling

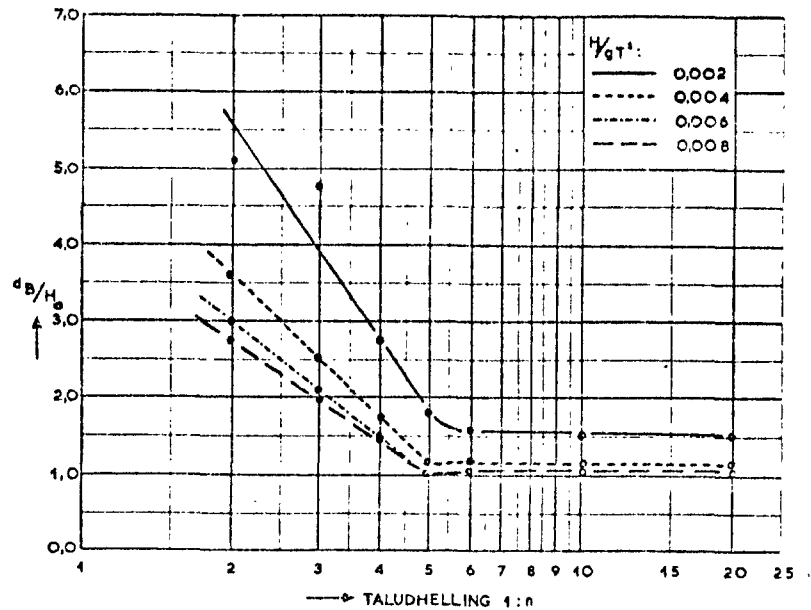
De in tabel 2 gegeven waarden zijn gemiddelde waarden voor de meest voorkomende golfsteilheden, dat wil zeggen:

$$0,004 < \frac{H_0}{g T^2} < 0,009 \quad (5.13.)$$

Tabel 2 is een benadering van de volgende meer algemeen geldende vergelijking:

$$\frac{Y_B}{d_B} = \log \left(40 n^{0,5} \left(\frac{H_0}{g T^2} \right)^{0,25} \right) \quad (5.14.)$$

De resultaten van Ayyar kunnen ook op een meer praktisch bruikbare wijze worden weergegeven, zie figuur 5.21., waarin de verhouding $\frac{d_B}{H_0}$ als functie van de taludhelling voor verschillende waarden van $\frac{H_0}{g T^2}$ is uitgezet.



figuur 5.21. de waarde d_B/H_0 als functie van $H_0/g T^2$ en de taludhelling 1 : n

Uit figuur 5.21. blijkt, dat voor golven met een constante waarde van $H_0/g T^2$ de verhouding d_B/H_0 vrijwel constant blijft voor alle taludhellingen flauwer dan 1 : 5 en sterk toeneemt voor steilere hellingen.

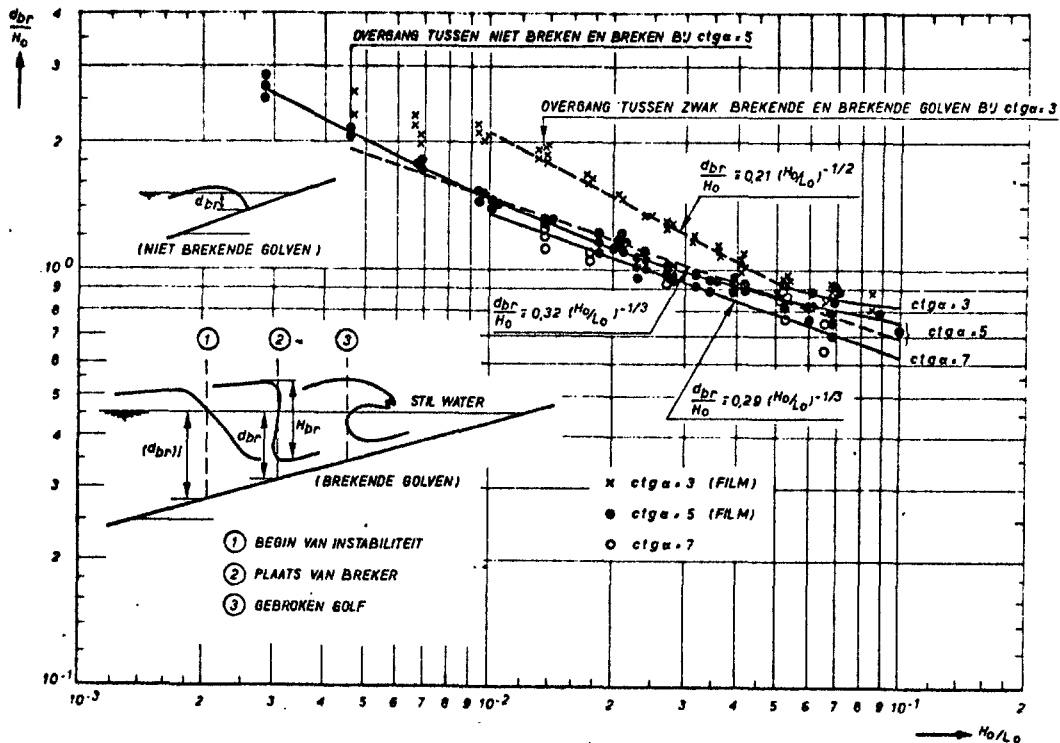
Een verklaring hiervoor is, dat bij hellingen tot 1 : 5 de voortgaande waterbeweging is opgewassen tegen de tegenwerkende krachten als gevolg van de reflectie en het teruglopende water, waardoor de golf eerst breekt bij het bereiken van de grenssteilheid.

Echter, bij hellingen steiler dan 1 : 5 nemen de tegenwerkende krachten als gevolg van de reflectie en het teruglopende water sterk toe.

Daardoor wordt het breekpunt zeewaarts verplaatst en neemt de waarde d_B sterk toe.

Het zal verder duidelijk zijn, dat de verplaatsing groter is naarmate de steilheid kleiner is, in verband met de toename van de reflectiecoëfficiënt bij afnemende golfsteilheid.

In figuur 5.22. zijn enkele resultaten uit literatuur 54 samengevat. Vergeleken met de waarden gegeven in figuur 5.21. blijken de brekerdiepten in figuur 5.22. aanzienlijk lager te zijn. Gezien ook recent onderzoek in de Deltagoot van het Waterloopkundig Laboratorium lijken de gegeven waarden in figuur 5.22. meer realistisch.



figuur 5.22. relatieve brekingsdiepte voor taluds 1 : 3, 1 : 5 en 1 : 7

De plaats van het trefpunt op het talud

Voor de configuratie van de brekende golf wordt verwezen naar figuur 5.20. Volgens het voorlopig rapport 1961 (lit. 9) treedt de golfklap op op een diepte die varieert van $1/3 H$ tot $2/3 H$ onder het niveau van het stilwater. Na deze globale indicatie zal hieronder met behulp van wat theoretische onderbouwing worden getracht het trefpunt nader te specificeren als functie van de omstandigheden.

Voor lopende golven is het kinematisch stabiliteitscriterium algemeen aanvaard als voorwaarde voor het begin van breken op steile taluds.

Dit houdt in dat de horizontale snelheid van de waterdeeltjes in de golftop juist gelijk is aan de voortplantingssnelheid van de golf, c , waardoor de top van de golf als het ware de ondersteuning van het onderliggende water verliest. Zodra de golftop zich losmaakt uit de golf wordt zijn baan alleen bepaald door de aanvangssnelheid en de zwaartekracht. Führböter, lit. 10, heeft deze voorstelling gebruikt om enkele karakteristieke grootheden van de brekende golf mathematisch te berekenen. Volgens de theoretische benadering van de brekergeometrie volgens Führböter is de verticale afstand tussen de stilwaterspiegel en het punt waar de brekende golf het talud treft, Δh , zie figuur 5.20., gelijk aan:

$$\Delta h = -d_B + Y_B \left(1 - \frac{1}{2} f^2(n)\right) \quad (5.15.)$$

waarin:

$$f(n) = \frac{1}{n} \left[\sqrt{1 + 2n^2} - 1\right]$$

$n = \text{taludhelling}$

en waarbij de tekens zodanig zijn gekozen dat het trefpunt beneden de stilwaterspiegel ligt indien Δh negatief is.

Uit de resultaten van de reeds eerder genoemde modelproeven van Ayyar, lit. 45, kan voor de steilere hellingen van 1 : 2 tot 1 : 6 voor de waarde $\frac{Y_B - d_B}{H_0}$ worden afgeleid dat deze waarde vrijwel constant is en een waarde heeft van 0,60.

Met $\frac{Y_B - d_B}{H} = 0,60$ gaat vergelijking 5.15. over in:

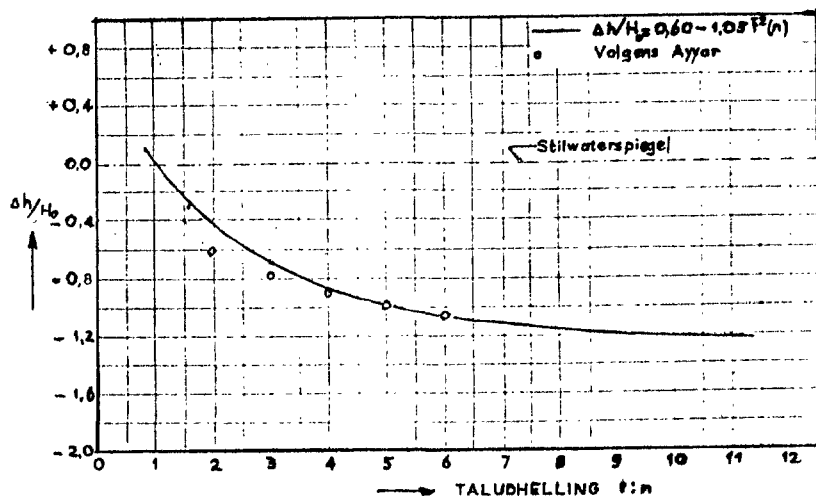
$$\frac{\Delta h}{H_0} = 0,60 - \left(0,60 + \frac{d_B}{H_0}\right) \left(\frac{1}{2} f^2(n)\right) \quad (5.16.)$$

Hoewel, zoals blijkt uit figuur 5.21., de verhouding d_B/H_0 afhankelijk is van de golfsteilheidsparameter $H_0/g T^2$ en de taludhelling n , wordt als gemiddelde aangenomen dat $d_B/H_0 = 1,5$. Deze laatste waarde ingevuld in (5.16.) geeft:

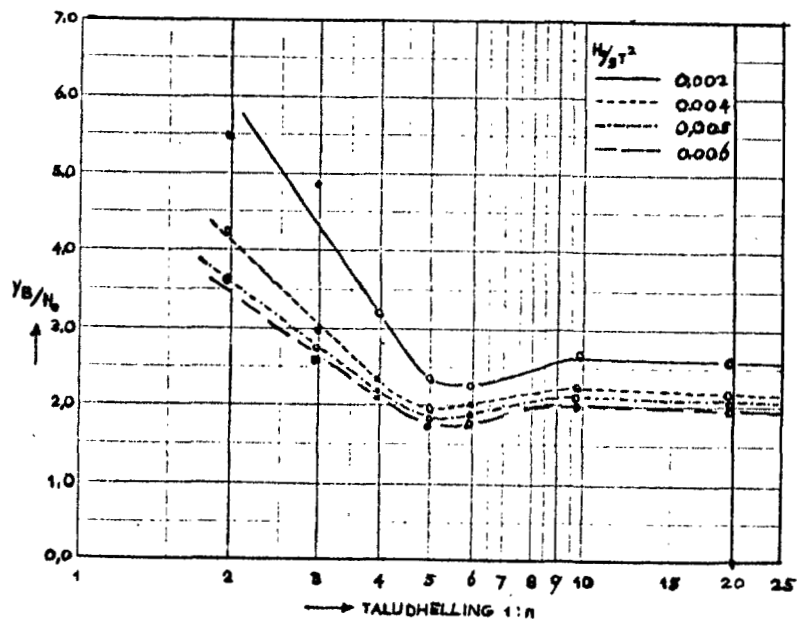
$$\frac{\Delta h}{H_0} = 0,60 - 1,05 f^2 (n) \tag{5.17.}$$

De volgens vergelijking 5.17. berekende waarde van $\Delta h/H_0$ als functie van de taludhelling is weergegeven in figuur 5.23., terwijl tevens de modelresultaten volgens Ayyar zijn vermeld.

In figuur 5.24. is het verband tussen Y_B/H_0 en de taludhelling gegeven opdat men ook eventueel formule (5.15.) kan toepassen.



figuur 5.23. $\Delta h/H_0$ als functie van de taludhelling 1 : n



figuur 5.24. de waarde van Y_B/H_0 als functie van $H_0/g T^2$ en de taludhelling 1 : n

Door vergelijking met resultaten uit andere literatuurbronnen wordt de indruk verkregen dat de resultaten van Führböter en Ayyar, zoals deze in figuur 5.23. naar voren komen, vrij grote waarden voor Δh opleveren.

De grootte en duur van de golfklap en de grootte van het gebied waar deze optreedt

De grootte van de golfklap is langs theoretische weg slecht te bepalen.

Als oorzaken kunnen worden genoemd:

- bij het breken van een golf op een talud kan er een hoeveelheid lucht worden ingesloten tussen het golffront en het talud
Naarmate het opgesloten luchtkussen dunner is, zal de maximale drukkracht groter zijn en de duur van de schok korter.

- Het is ook mogelijk dat de golf slaat in de terugstromende laag water van de vorige golf. Hoe dikker deze laag des te kleiner de golfklap. De invloed van het aflopende water is groter naarmate de taludhelling flauwer is.

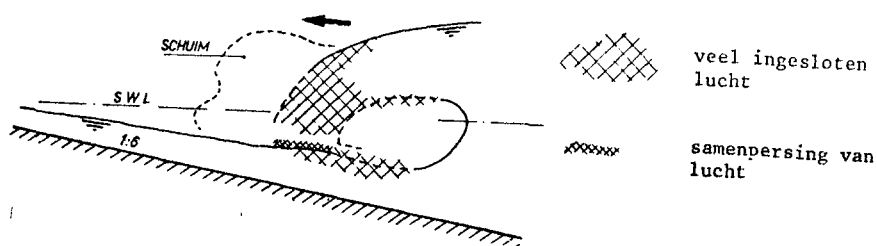
Allereerst zal hieronder een fenomenologische beschrijving van het verschijnsel golfklap bij het optreden van een "plunging breaker" worden gegeven, onder te verdelen in:

- a. de brekende golf tot aan het moment van de klap
- b. de beweging na het begin van de klap
- c. opvallende aspecten bij drukregistraties.

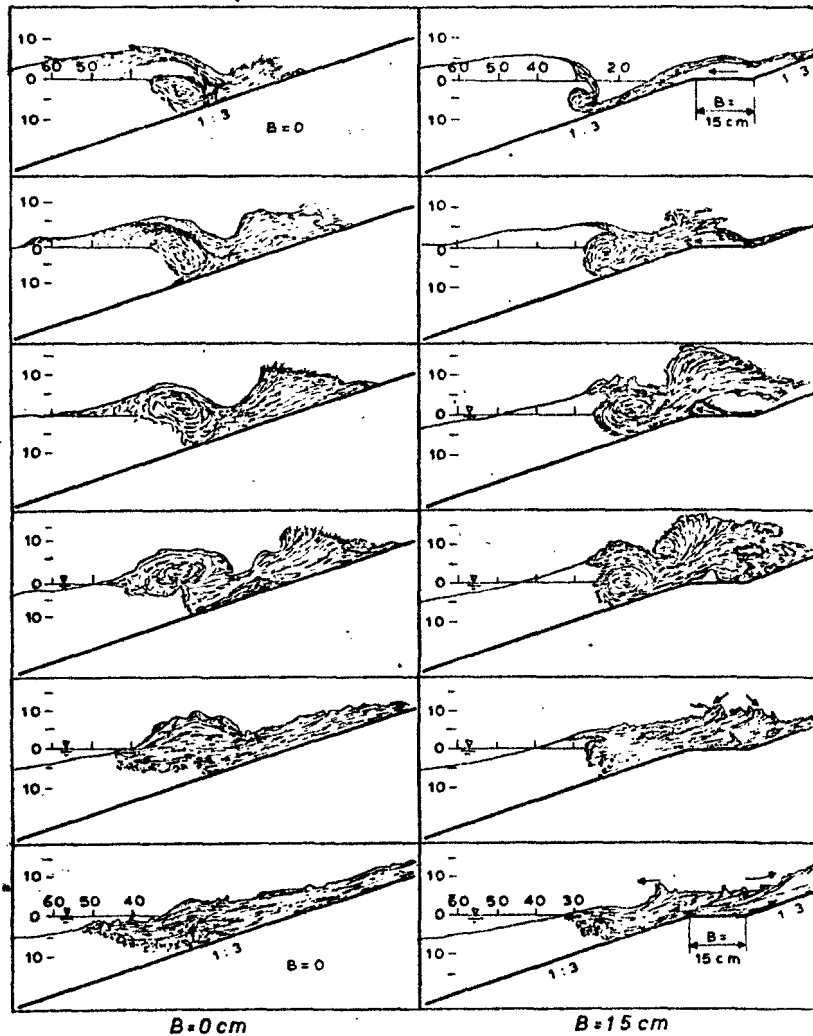
ad a

Figuur 5.25. toont een schets van het neerkomen van een brekertong op het talud, waar op dat moment nog een terugstromend laagje water aanwezig is.

Figuur 5.26. geeft een indruk van het proces van breken als functie van tijd en plaats op het talud. Of er wel of niet een waterlaag op het talud aanwezig is, is afhankelijk van de golfkarakteristieken en de taludhelling.



figuur 5.25. schets van het neerkomen van de brekertong



$$H/L_0 = 0,0485$$

ONTLEEND AAN FILMOPNAMEN.

figuur 5.26. het verloop van het golfbreekproces in de tijd (lit. 54)

Tijdens het breken en het neerslaan van de golftong wordt er op verschillende manieren lucht ingesloten.

Bij het vallen van de golftong wordt er veel lucht in de waterstraal zelf opgenomen.

Gelijktijdig wordt er meestal schuimend water naast de eigenlijke straal gevormd.

Onder de overstortende golftong wordt een grote, globaal tweedimensionale luchtbel opgesloten.

Afhankelijk van de uitwijkingsmogelijkheid van de lucht hierin zal het in meer of mindere mate worden samengeperst, waarbij een opstelling in een golfgoet wezenlijk anders kan werken dan in het prototype. De wanden van de golfgoet sluiten de luchtcilinder onder de golftong zijdelings af, dit in tegenstelling tot prototype-omstandigheden.

Tussen de (meestal rafelige) voorkant van de golftong en het talud, inclusief het daarop nog aanwezige waterlaagje, wordt een geringere hoeveelheid lucht opgesloten en samengeperst.

Als een hoeveelheid water uit de golftong met een bol front de onderliggende waterlaag treft, wordt er fijn verdeelde lucht mee in de waterlaag gedreven.

Op plaatsen waar het water uit de golftong met een hol front het talud nadert, wordt een luchtbel ingesloten waarvan de grootte wordt bepaald door de geometrie van het holle front.

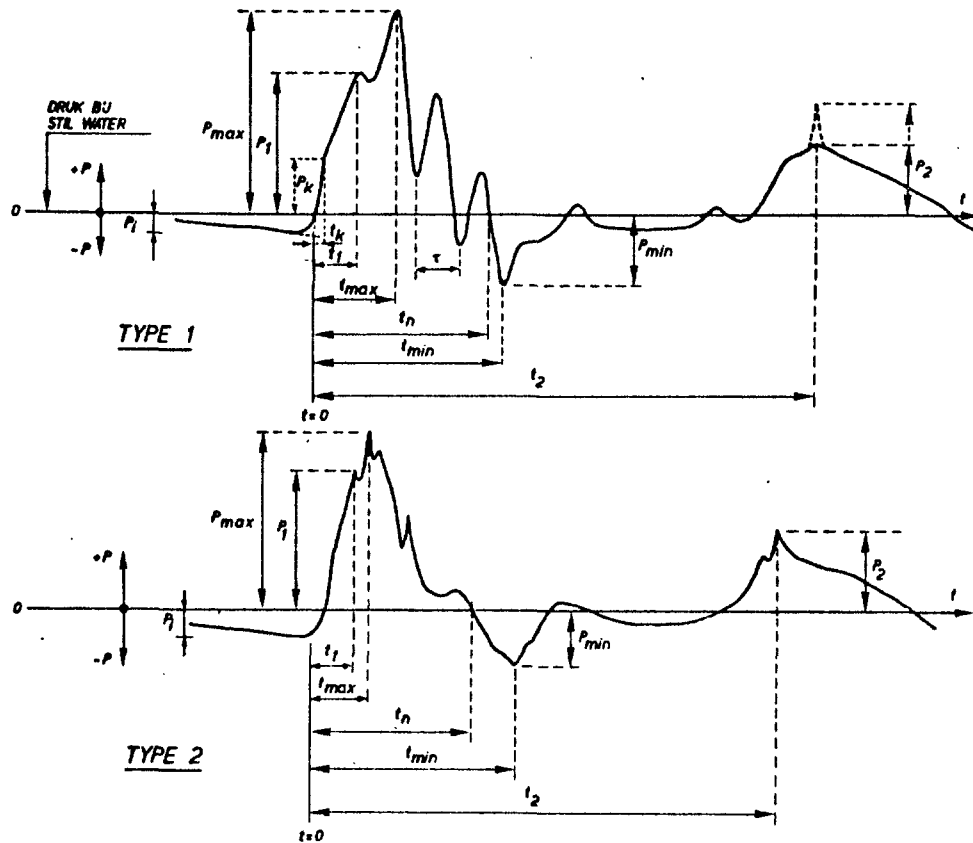
ad b

Na het neerkomen van de golftong wordt het water langs het talud vooral in voorwaartse richting maar ook in achterwaartse richting gedreven. In voorwaartse richting wordt een grote hoeveelheid water opgeworpen en in achterwaartse richting wordt een circulatie rond de luchtcilinder aangedreven, het geheel verrijkt met een grote hoeveelheid lucht.

Tijdens het begin van de circulatie verkleint het oppervlak van de dwarsdoorsnede van de luchtcilinder, waarbij er waarschijnlijk lucht in de vorm van bellen uit de luchtcilinder verdwijnt. Gedurende korte tijd na het neerkomen van de golftong verplaatst de tong zich tezamen met luchtcilinder en de circulatie daaromheen nog in voorwaartse richting. Daarna blijft de cilinder nog een ogenblik bestaan terwijl de plaats niet veel meer verandert, om vervolgens in elkaar te zakken en/of uit elkaar te vallen. Het water/luchtmengsel loopt eerst nog het talud op en stroomt daarna steeds rustiger wordend naar beneden waarbij ook de waterrug, van wat er is overgebleven van de genoemde hoeveelheid opgeworpen water, in elkaar zakt. Onderwijl stijgen de met het oog waar te nemen luchtbellen in de waterlaag geleidelijk naar de oppervlakte. Deze bellen zijn praktisch alle verdwenen op het moment dat de volgende golftong in de waterlaag slaat, een en ander is echter afhankelijk van de tijd tussen opeenvolgende golven.

ad c

Het drukverloop op een bepaalde plaats op het talud kan ten gevolge van een golfklap een zeer grillig verloop in de tijd hebben, zie figuur 5.27.



figuur 5.27. karakteristieken van een golfklap

Karakteristiek bij de meeste golfklappen is, zoals dat in figuur 5.27. tot uiting komt, het optreden van globaal twee maxima P_{max} en P_2 met een minimum P_{min} daar tussen in. Soms is P_2 nog groter dan P_{max} , maar de hogere drukken zijn dan altijd zeer kortdurend.

Bij de kortste stijgtijden van de druk (t_1 of t_{max} in figuur 5.27.) zal de golftong op de betreffende drukopnemer terecht zijn gekomen. Bij relatief kleine golfklapdrukken en/of wanneer de golftong niet op de drukopnemer terecht is gekomen kan de gemeten druk het gevolg zijn van een samenspel van quasi-statische druk (golfbeweging en stromingsdruk) en golfklappen.

In een model kunnen daarbij dus verschillende schalen een rol spelen. Het verschil tussen de golfklaptypen 1 en 2 is de duidelijke oscillatie (met periode τ) die wel in type 1 en niet in type 2 voorkomt. Aangenomen wordt dat dit fenomeen de drukvariatie is ten gevolge van het oscilleren van de ingesloten luchtcilinder en daarom wellicht alleen bij golfgoten van groot belang is, omdat in prototype-omstandigheden de luchtcilinder zijdelings wordt belucht.

Deze duidelijke oscillatie lijkt gesuperponeerd op de druk ten gevolge van de neerslaande golftong en is meestal zichtbaar gedempt.

Er komen ook nog allerlei frequenties voor die het gevolg zouden kunnen zijn van een opeenvolging van waterspetters en/of oscillerende kleinere luchtinsluitingen.

Hoewel de juiste toedracht moeilijk is te achterhalen omdat bedoelde oscillaties vaak maar kort duren en/of ernstig worden gestoord door andere verschijnselen, wordt bij 'nette' gedempte slingeringen vooral aan luchtbeloscillaties en in de overige gevallen vooral aan waterspetters gedacht.

Na het bovenstaande zal het duidelijk zijn dat hetgeen zich tijdens een golfklap afspeelt zeer ingewikkeld is. Stellig zijn er meerdere (stochastische) processen gelijktijdig werkzaam (hydrodynamisch, aerodynamisch, warmteprocessen en schokgolven), hetgeen tot uiting komt in de verschillende tijd- en amplitudeschalen.

Fysische en mathematische modellen

Zoals hiervoor reeds vermeld is de grootte van de klap langs theoretische weg slecht af te leiden; volstaan wordt dan ook met het globaal aangeven van enkele modellen.

Als het water aankomt met een golffront parallel aan de constructie, zou dit theoretisch oneindig snel afgeremd moeten worden, hetgeen ook tot oneindig grote drukken zou leiden. Omdat dit fysisch niet mogelijk is, is een aantal golfklapmodellen ontwikkeld waarbij het afremmen van het water niet plotseling gebeurt.

Een overzicht hiervan is reeds in 1969 gegeven door Lundgren (lit. 29).

Te onderscheiden zijn (lit. 55):

- a. Het stromingsdrukmodel (inclusief het geleidelijk afremmen van de waterkolom), door Lundgren genoemd "ventilated shock", waarbij wordt aangenomen dat het water wel zijdelings afstroomt doordat het golffront niet geheel parallel aan de wand aankomt.
- b. Het schokgolfmodel (Lundgren: Hammershock) waarbij, analoog als bij waterslag een schokgolf in het water ontstaat.
- c. Het schokgolfmodel met luchtinvloed, dat is analoog aan b, maar het betreft hier een lucht/watermengsel.
- d. Het waterpistonmodel (Lundgren: Compression shock) waarbij een kolom water van beperkte lengte (te bepalen via een zogenaamde toegevoegde watermassabeschouwing) een ingesloten luchtkussen doet inveren.

In werkelijkheid zijn uiteraard mengvormen mogelijk en zelfs niet onwaarschijnlijk.

Elk van de modellen leidt tot een andere schatting van de piekdruk van de golfklap en tot een andere extrapolatie van gemeten klapdrukken in een hydraulisch model.

Om nu na te gaan welk model geldt, is het volgende mogelijk:

1. afschatten van de fysische waarschijnlijkheid
2. vergelijken orde van grootte van berekende en gemeten klapgrootten
3. hydraulisch (model-)onderzoek met parametervariatie (incl. schaalvariatie).

Uit onderzoek naar schaalearsfecten bij golfklappen op een talud stelt een rapport van het Waterloopkundig Laboratorium (lit. 35):

- schaaleardeffekten ten gevolge van de luchtconcentraties in het water zijn pas bij redelijk grote modellen te voorkomen
 - schaaleardeffekten ten gevolge van de compressibiliteit en/of de stoming (verdringing) van lucht zijn niet of nauwelijks te verwachten indien de brekende golf terecht komt in een relatief dikke waterlaag die nog op het talud aanwezig is.
- De schaal (N) voor de golfklapdrukken op het talud, die dan niet erg snel verlopen en niet erg hoog zijn, is dan bij benadering de Froudeschaal:

$$N_p = N_\rho \cdot N_L ; N_t = \sqrt{N_L}$$

N_p = schaal voor golfklapdrukken

N_ρ = schaal voor dichtheid water-luchtmengsel

N_L = lengteschaal van het model

N_t = drukduur schaal

Indien de brekertong terecht komt in een relatief dunne waterlaag of op een droog talud en de drukken relatief snel stijgen tot een relatief grote waarde is er geen eenduidig recept te geven voor de vertaling van model naar praktijk. Voor praktische gevallen ligt de schaal N_p tussen $\sqrt{N_L}$ en N_L ; N_t tussen N_L en $\sqrt{N_L}$.

Het stromingsmodel (a)

Beschouwd wordt, ter vergelijking met de situatie die bij golfklappen voorkomt, een straal water die tegen een wand komt volgens het schema A of B; zie figuur 5.28.

Uiteindelijk leidt de botsing van de straal tot stromingssituatie C. Voor geval A volgt met behulp van de Navier-Stokes vergelijking en een toegevoegde watermassabeschoouwing:

$$\bar{P} = - 0,27 \rho B v_o / \Delta t \quad (5.18.)$$

waarin:

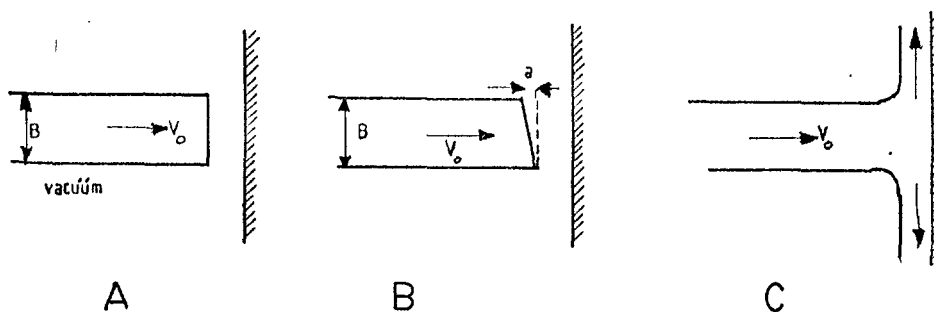
\bar{P} = druk over de botstijd constant

v_0 = beginsnelheid

Δt = tijd om v_0 af te remmen tot $v = 0$

B = breedte van de straal

ρ = soortelijke massa van het water



figuur 5.28. stromingsmodel (a)

Voor geval B is het aannemelijk dat Δt gekoppeld is aan a/v_0 , zodat uit (5.18.) volgt:

$$\bar{P} = - C_p \frac{B}{a} v_0^2 \quad (5.19.)$$

Hieruit volgt dat de stromingsdruk, $P = 1/2 \rho v^2$, en de druk ten gevolge van de lokale versnelling gekoppeld zijn via een constante factor n , die afhankelijk is van de geometrie van het waterfront en van de constructie, er geldt:

$$P_{\max} = n. (1/2 \rho v^2) \quad (5.20.)$$

Hoe steiler de helling is van het golffront (B/a), hoe groter de factor n wordt.

In geval A zou n oneindig zijn, maar dan verliest deze beschouwing zijn geldigheid en is de vloeistof niet meer als incompressibel te beschouwen; er ontstaat een schokgolf (model b).

Het stromingsmodel is alleen geldig zolang de berekende druk P_{\max} klein is ten opzichte van de druk berekend volgens het schokgolfmodel.

In tabel 3 is een rekenvoorbeeld gegeven.

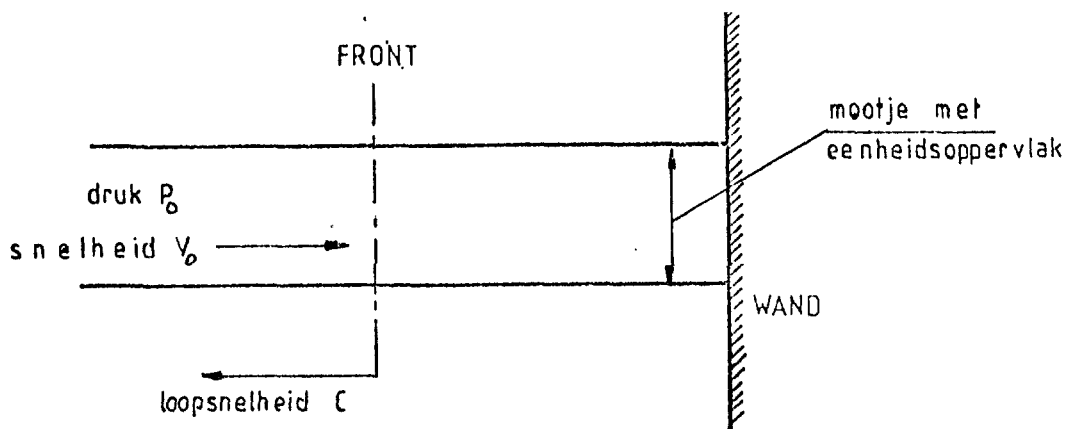
Voor v_0 is een waarde ingevoerd die in orde van grootte gelijk is aan de voortplantingssnelheid van een wind- of deiningsgolf.

In tabel 4 is nagegaan hoe de resultaten van een hydraulisch model 'opgeschaald' moeten worden.

Omdat bij een dergelijk model de Froudeschaal geldt (drukken ten gevolge van zwaartekracht $\rho g z$ en stromingsdrukken ρv^2 zijn aan elkaar gekoppeld) volgt uit (5.20.) dat de drukken volgens de lengteschaal worden vertaald.

Het schokgolfmodel (b)

Komt een steil golffront tegen een starre wand en het water kan niet of niet voldoende snel zijdelings afvloeien, dan zal een schokgolf ontstaan die van de wand af in het water wegloopt. Tussen het golffront van de schokgolf en de wand is het water in rust gekomen. Voor de schematisatie zie figuur 5.29.



figuur 5.29. schokgolfmodel (b)

De druk die ontstaat (zie lit. 35 en 55) is:

$$p = \rho c v_0 \quad (5.21.)$$

waarin:

c = geluidssnelheid in water; ca. 1400 m/s

of:

$$p = v_0 \sqrt{\rho K} \quad (5.22.)$$

waarin:

K = kompressiemodulus van het water (ca. $2 \cdot 10^9$ N/m²)

De berekende druk in tabel 3 is met (5.21) uitgevoerd. Voor de berekening van de modelwaarde in deze tabel is verondersteld dat tot vlak voor de klap de Froudeschaal geldig is, dat wil zeggen dat de v_0 in het model

$\sqrt{n_L}$ (met n_L = lengteschaalfactor) kleiner is.

Evenzo is in tabel 4 gesteld dat v_0 in prototype $\sqrt{n_L}$ groter is.

Voor wat betreft de waarschijnlijkheid van voorkomen van dit type klap moet worden gesteld dat de kans dat het watervlak volledig vlak is en precies evenwijdig aan de constructie aankomt klein is.

In een hydraulisch model zijn de maximaal gemeten drukken een paar meter waterkolom en er zijn nooit waarden gemeten die liggen in de orde van 200 m waterkolom, als berekend in tabel 3; ook de prototypewaarden liggen zo hoog dat bijvoorbeeld de toelaatbare druksterkte van beton wordt overschreden (max. gemeten waarden zijn tot tientallen meters waterkolom). Om deze reden valt dit model af.

Het schokgolfmodel met een water/luchtmengsel (c)

Dit model is in principe gelijk aan het voorgaande, waarbij blijkt (zie literatuur 35 en 55) dat bij benadering kan worden gesteld dat de compressibiliteit van het mengsel geheel door de lucht en de massa geheel door het water wordt bepaald.

Zodoende gelden de vergelijkingen (5.20.) en (5.21.) weer.

De compressibiliteit van lucht volgt uit de druk, waarbij mag worden gesteld dat de warmte die bij compressie ontstaat bij kleine bellen direkt door het water wordt afgevoerd (isotherme compressie). Bij geringe indrukking geldt dat $K_{\text{lucht}} = P_0$ met P_0 is de begindruk voordat de schokgolf ontstaat (atmosferische druk).

Voor het mengsel met een luchtgehalte α wordt dit:

$$K_{\text{mengsel}} = P_0 / \alpha \quad (5.23.)$$

Verder geldt:

$$\rho_{\text{mengsel}} = (1 - \alpha) \rho_{\text{water}} \quad (5.24.)$$

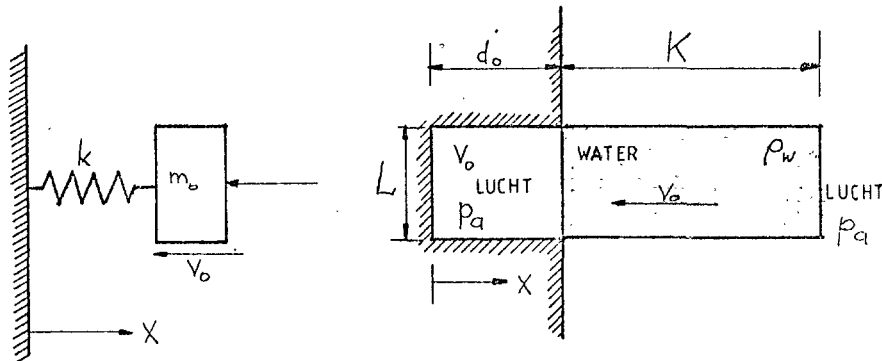
Ook voor de schokgolfklap met een lucht/watermengsel geldt dat hij alleen voorkomt bij een vlak golffront evenwijdig aan de wand. Omdat de piekdruk veel kleiner is dan bij het vorige model (b) en de impulsinhoud gelijk is, is de tijdsduur van de klap groter.

De druk van de klap in tabel 3 is in het hydraulisch model nog aan de grote kant ten opzichte van de gemeten waarden, maar aangezien de klap daar bij benadering evenredig is met v_0^2 / α en beide waarden slechts geschat zijn is het voorkomen van dit schokgolfmodel niet meer uiterst onwaarschijnlijk.

In een hydraulisch model op verkleinde schaal is het luchtgehalte lager dan in prototype, dit komt door de in verhouding grote bellenstijgsnelheid.

Het waterpistonmodel (d)

Het mechanisme van een golfklap waarbij lucht wordt gecomprimeerd kan geschematiseerd worden tot een massa-veersysteem. Een "zuiger" van water wordt in een afgesloten cilinder, gevuld met lucht gedreven. Het "waterpistonmodel" werd geïntroduceerd door Bagnold, lit. 16, zie figuur 5.30.



figuur 5.30. waterpistonmodel (d)

Op de berekening van de maximale klapdruk wordt hier niet nader ingegaan, deze wordt onder andere aangetroffen in literatuur 16, 35 en 55. Omdat de klap kort duurt en de ingesloten luchtbel veel groter is dan de bellen bij het schokgolfmodel (c) moet hier worden gerekend met opwarming van de lucht bij compressie.

Voor kleine indrukking van de lucht (gelineariseerde gebied) blijkt er een grote overeenkomst te zijn tussen de drukken berekend volgens het schokgolfmodel (c) en volgens het waterpistonmodel, als we het luchtgehalte vervangen door de verhouding luchtkussendikte/lengte waterkolom en als we in acht nemen dat bij het schokgolfmodel de isotherme en bij het waterpistonmodel de adiabatische compressie geldt.

Uit de waarden voor een hydraulisch model in tabel 3 blijkt dat de berekende drukken sterk afhankelijk zijn van de lengte van de aangenomen luchtkolom. Het waterpistonmodel zal nooit alleen voorkomen, want voordat een luchtbel is ingesloten zal ook het stromingsdrukmodel gelden voor dat water dat de luchtbel zal opsluiten.

Behalve de bovenbeschreven modellen worden in de literatuur door diverse auteurs variaties op deze modellen uitgewerkt.

Zo geeft Mitsuyasu (lit. 23) een uitbreiding aan het oorspronkelijke zuigermodel door de mogelijkheid van wegstromen van lucht tijdens de klap mee te nemen, hetgeen een gedempte slingering oplevert.

In een model, welk het golfklapverschijnsel goed beschrijft, moet ook rekening worden gehouden met de eventuele aanwezigheid van een laagje water op het talud. Zo heeft Führböter drukmetingen verricht op de dempende invloed van een laagje water op het meetvlak na te gaan. De maximale druk ten aanzien van de stromingsdruk bleek bij een waterlaagdikte gelijk aan 5 cm gereduceerd te zijn tot 0,16 à 0,37 maal de waarde zonder waterlaagje.

Uit het bovenstaande kan worden geconcludeerd, dat niemand er nog in geslaagd is het fenomeen golfklap voldoende te beschrijven, zodat er geen theorie kan worden aangewezen die goed toepasbaar is.

Tabel 3: afschatting van golfdrukken bij verschillende "modellen"

Uitgangspunten:

ρ water		1000 kg/m ³
v_o = loopsnelheid golf		10 m/s
golfhoogte H		4 m
waterpistonmodel	lengte piston = 1/2 H	2 m
	lengte luchtkussen	0,1 m en 0,5 m
p_o = atm. druk		10 ⁵ pascal
schokgolfmodel: luchtgehalte		2% *)

Golfdrukken	prototype		model 1 : 40
	pascal	m waterkolom	m waterkolom
a. stromingsdrukmodel	$n^{**}) \times (5 \cdot 10^4)$	5 n ^{**)}	0,125 ^{**)}
b. schokgolfmod. water	$1,4 \cdot 10^7$	1400	220
c. schokgolfmod. water/ lucht	$5 \cdot 10^6$	500	19
d. waterpistonmodel			
luchtkolom 0,1 m	$3,2 \cdot 10^7$	3200	15
luchtkolom 0,5 m	$1,4 \cdot 10^6$	140	4,5

*) voor de hoeveelheid lucht die vrij in water in de vorm van kleine bellen voorkomt na een verstoring is 1% al een grote waarde

***) n hangt af van de helling tussen waterfront en het vlak van de constructie, en kan elke waarde aannemen.

Tabel 4

Extrapolatie vanuit modelwaarden (schaal 1 : 40) als in model- een bepaalde golfdruk is gemeten (bij atmosferische druk).

- ad a. opschaling volgens n_L
- ad b. opschaling volgens $\sqrt{n_L}$
- ad c. opschaling volgens van toepassing zijnde theorie
- ad d. opschaling volgens van toepassing zijnde theorie.

model	extrapolatie naar prototype			
	gemeten model-waarde	stromings-druk (a)	schokgolf water (b)	schokgolf water/lucht (c)*
1 m wk	40 m	6,3 m	8,4	9 m
2 m wk	80 m	12,6 m	20	28 m
5 m wk	200 m	32 m	80	178 m

*) Dit is berekend onder aanname dat in prototype het luchtgehalte hetzelfde is als in het model. Het is goed denkbaar dat dit in prototype hoger is, dan nemen klapgrootten af.

Metingen van golfklappen

De meeste waarnemingen hebben betrekking op loodrechte wanden, er is weinig onderzoek verricht naar golfklappen op taluds.

Bij het vergelijken van prototype- en modelmetingen moet bijzonder voorzicht te werk worden gegaan.

Modelmetingen zijn namelijk niet direkt omrekenbaar naar prototype-omstandigheden. Belangrijke oorzaken hiervan zijn waarschijnlijk het verschil in luchtinsluiting en de dikte van de afstromende laag op het talud.

Ook de metingen zelf moeten kritisch worden bekeken aangezien er vaak onvolkomenheden zitten in de meetappartuur en de plaatsing hiervan op het talud.

Modelmetingen blijken (indien lineair opgeschaald) veelal grotere belastingen en kortere belastingtijden te geven dan prototype-metingen. Bij een doorlatende bekleding zal de golfklap zich door de bekleding in het onderliggende filter voortplanten. De karakteristieken van deze respons onder de bekleding zijn in samenhang met de drukken op de bekleding van groot belang voor de stabiliteit van deze bekleding. Bij een "open" bekleding zal dan ook de nodige aandacht aan dit verschijnsel moeten worden besteed.

Skladnev en Popov (lit. 30) verrichtten modelproeven met golven die in hoogte varieerden van 3 tot 120 cm en een constante steilheid van 1/10 op een talud 1 : 4. Schaalearselen worden volgens Skladnev en Popov voorkomen indien de golfhoogte groter is dan 0,5 m.

Hieruit werd geconcludeerd dat indien de maximum golfhoogte b.v. 4 m is, de minimum modelafmetingen niet kleiner mogen zijn dan 1/8 van de prototype afmetingen om betrouwbare waarden te verkrijgen.

Hieronder zal een beknopt overzicht worden gegeven van de belangrijkste model- en prototypemetingen, waarbij het geheel beperkt wordt tot taluds.

Voor waarnemingen op modelschaal voor golfklappen op verticale vlakken wordt verwezen naar b.v.: Bagnold (16), Denny (59), Ross (48), Hyashi en Hattori (60), Mitsuyasu (23), Nagai (61), Prins (31), Aartsen e.a. (32 en 33), Van der Burgt (62).

Voor waarnemingen van golfklappen in de natuur op verticale vlakken kan worden verwezen naar: Rouville e.a. (63), Haringvlietluizen (28), Shonian en Sommer (15), Kuribayashi (64), Richert (34).

a. Skladnev en Popov (30) hebben schaalproeven uitgevoerd met golfklappen op een talud 1 : 4, afgedekt met betonplaten (4 x 1,98 m² met een dikte van 0,15 m, gelegd op filter, naden 2 cm breed).

Hierbij is gebruik gemaakt van een grote golfgoot met een lengte van 115 m, een breedte van 4 m en een diepte van 7,5 m (waterdiepte \pm 6 m).

Onder een schaalserie wordt door de auteurs verstaan proeven met constante golfsnelheid H/L en verschillende golfhoogten.

De golfhoogte varieerde van 0,5 tot 2 m, golflengte van 5 tot 40 m en golfperiode van 1,8 tot 5,8 s.

De resultaten van drukmetingen op een helling van 1 : 4 voor een golfsteilheid 1 op 10 zijn in figuur 5.31. afgebeeld.

De term golfdruk wordt hier gebruikt om het verschil aan te geven tussen de druk P op het talud in een zeker punt en de hydrostatische druk P_0 bij het stilwaterniveau, in dit geval $\Delta P = P - P_0$.

In deze figuur is langs de y -as de maximum en minimum golfdruk uitgezet en dimensieloos gemaakt door het te delen door de golfhoogte (H) en de soortelijke massa (ρ).

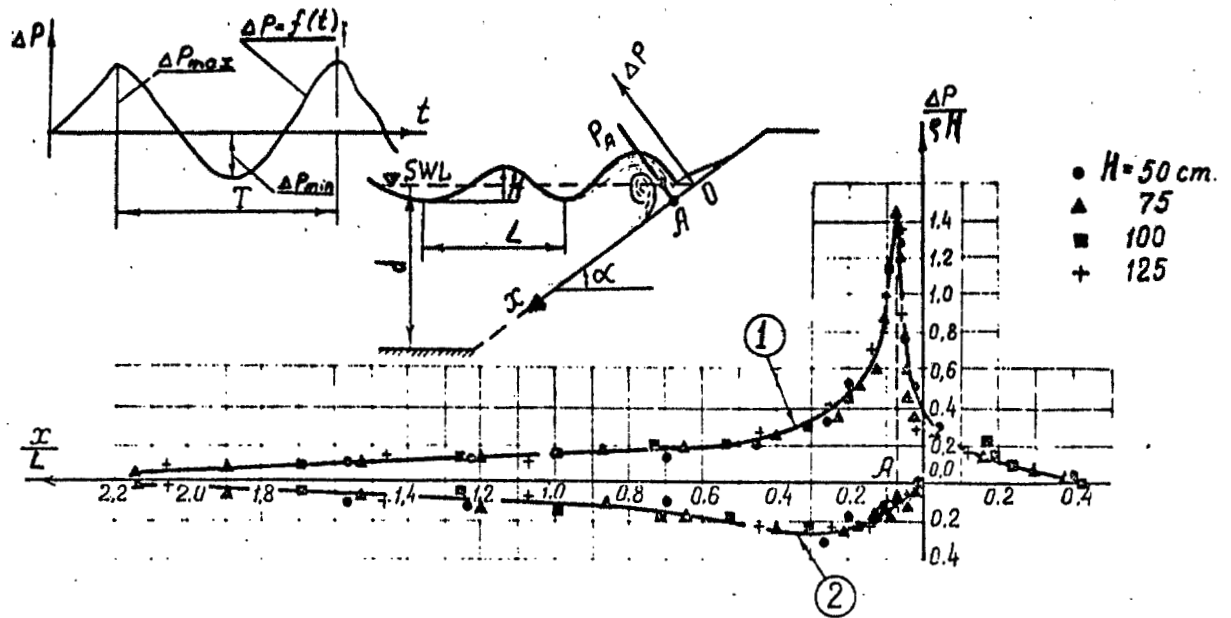
Op de x -as is de relatieve afstand uitgezet tot het snijpunt van de lijn van stilwater en de bovenzijde van het talud.

Opgemerkt moet worden dat de drukken die in figuur 5.31. worden getoond extremen zijn.

Deze drukken treden niet gelijk op, maar met een faseverschuiving in de tijd.

Het volgende kan uit figuur 5.31. worden geconcludeerd:

1. de maximum druk $\Delta P_{\max} = 1,45 \rho H$ en $P_{\max} \approx 1,62 \rho H$
2. de maximum druk treedt voor $x = 0,07 L$ op ($\Delta x = 0,7 H$, zie figuur 5.19.)
3. de minimum druk is ongeveer $\Delta P_{\min} = - 0,25 \rho H$ en treedt op voor $x/L = 0,2 \text{ à } 0,4$
4. de experimentele resultaten verkregen bij verschillende golfhoogten ($H = 50, 75, 100$ en 125 m) zijn geconcentreerd rond de in figuur 5.31. gegeven curves, hetgeen duidt op het bestaan van een stabiele functionele relatie.

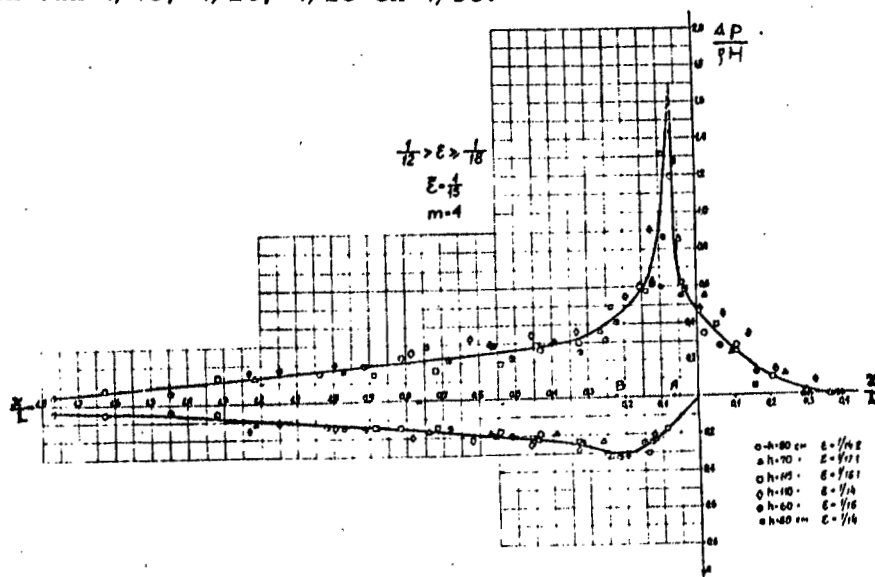


Distribution of extreme values of wave pressure on the upper surface of the slab protection (data based on experimental studies on the wave stand).

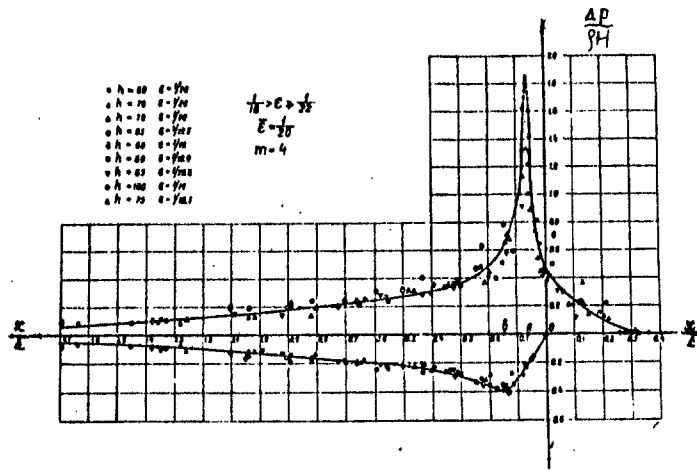
① $\frac{\Delta P_{max}}{\rho H}$; ② $\frac{\Delta P_{min}}{\rho H}$; $\epsilon = \frac{H}{L} = \frac{1}{10}$; $\frac{d}{L} = 0,48-1,1$; $ctg \alpha = 4$.

figuur 5.31.

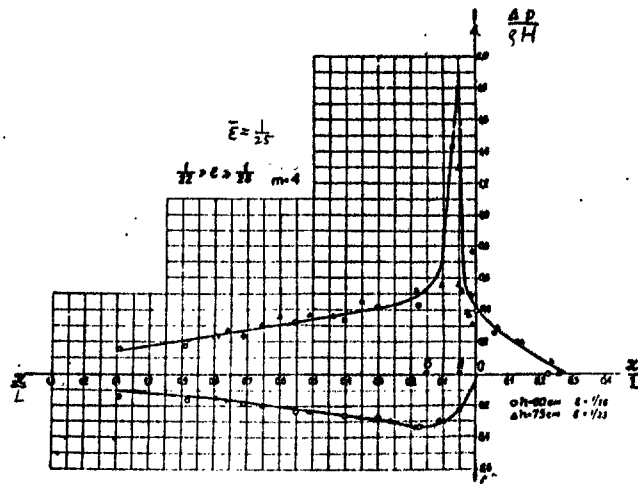
In de figuren 5.31. a t/m d zijn de drukverdelingen gegeven bij golfsteilheden van 1/15, 1/20, 1/25 en 1/35.



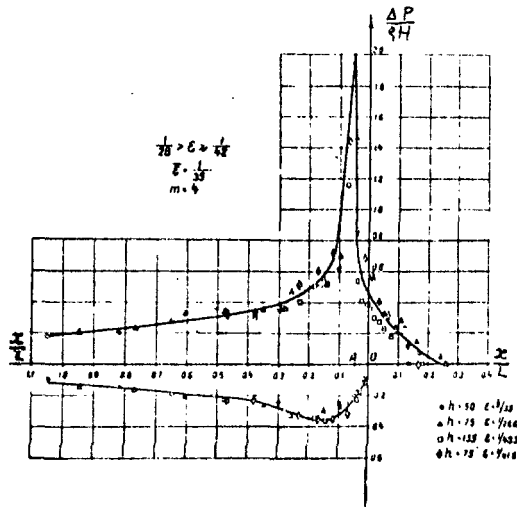
figuur 5.31.a. golfsteilheid $\bar{\epsilon} = H/L = 1/15$



figuur 5.31.b. golfsteilheid $\bar{E} = H/L = 1/20$



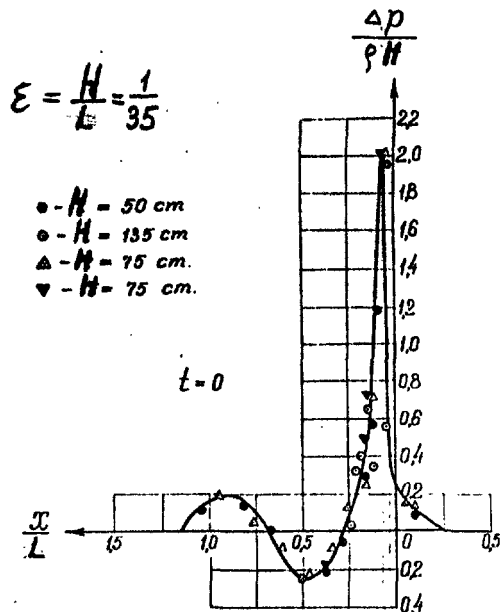
figuur 5.31.c. golfsteilheid $\bar{E} = H/L = 1/25$



figuur 5.31.d. golfsteilheid $\bar{\epsilon} = H/L = 1/35$

Uit bovenstaande figuren blijkt, zoals was te verwachten, dat drukken bij afnemende golfsteilheid toenemen. De lengte van impact zone x/L verandert slechts gering met afnemende golfsteilheden.

Figuur 5.32. geeft een beeld van de golfklap op $t = 0$, dat wil zeggen het moment van breken, als functie van de plaats op het talud.

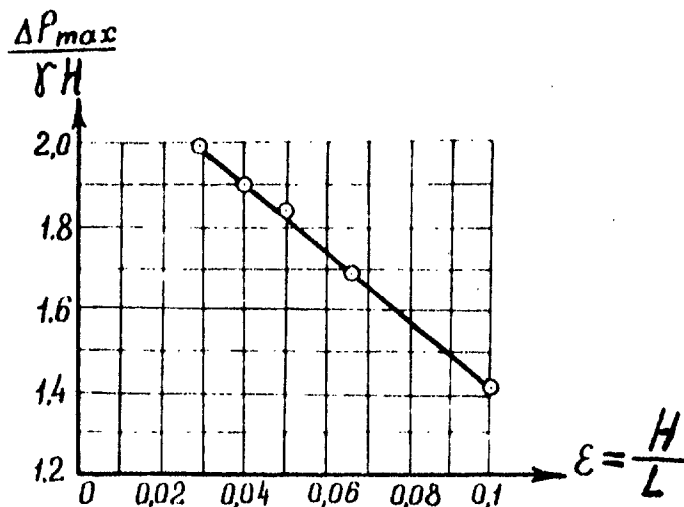


figuur 5.32. beeld van de golfklap voor een golfsteilheid van 1/35

Piekwaarden voor andere golfsteilheden kunnen met behulp van figuur 5.33. worden bepaald.

Zoals uit het voorgaande blijkt wordt in het artikel van Skladnev en Popov alleen informatie gegeven omtrent maximum drukken als functie van de plaats op het talud. Over de duur van de belasting wordt niets vermeld.

Omdat echter het golfklapmechanisme sterk dynamisch van karakter is, beperkt dit de toepasbaarheid van de resultaten aanzienlijk.



figuur 5.33.: effect van de golfsteilheid op de "golfdruk" in de brekerzone

Wanneer de bekleding een zekere doorlatendheid bezit zal de uitwendige aangrijpende golfbelasting zich gedeeltelijk onder de bekleding in een daar aanwezig filter kunnen voortplanten, waarbij de drukken aan de onderzijde in fase verschoven zullen zijn ten opzichte van de drukken aan de bovenzijde van de bekleding. Bij de hier toegepaste constructie van betonplaten met vrij brede voegen is de plaats van de golfklap ten opzichte van de voeg tussen twee betonplaten van grote invloed op de drukvoortplanting onder de bekleding. De drukvoortplantingskarakteristieken van het filter zijn echter moeilijk te modelleren en theoretisch te beschrijven.

In figuur 5.34. is een beeld gegeven van de resulterende drukken op de bekleding, waarbij:

$$\frac{\Delta p}{\rho H} = \frac{\Delta p_1 + \Delta p_2}{\rho H}$$

met

Δp_1 = druk aan de bovenzijde van de betonplaten

Δp_2 = druk aan de onderzijde van de betonplaten.

De dam was opgebouwd uit fijn zand.

De buitenzijde van de dam was beschermd door betonnen platen 4 x 1,98 m, 15 cm dik, met 2 cm brede voegen tussen de platen.

De bekleding was op een 25 cm dik granulair filter geplaatst, de grootste deeltjesafmeting in het filter was 70 mm.

De ongunstigste combinaties van drukken op de plaat traden op gedurende twee fasen:

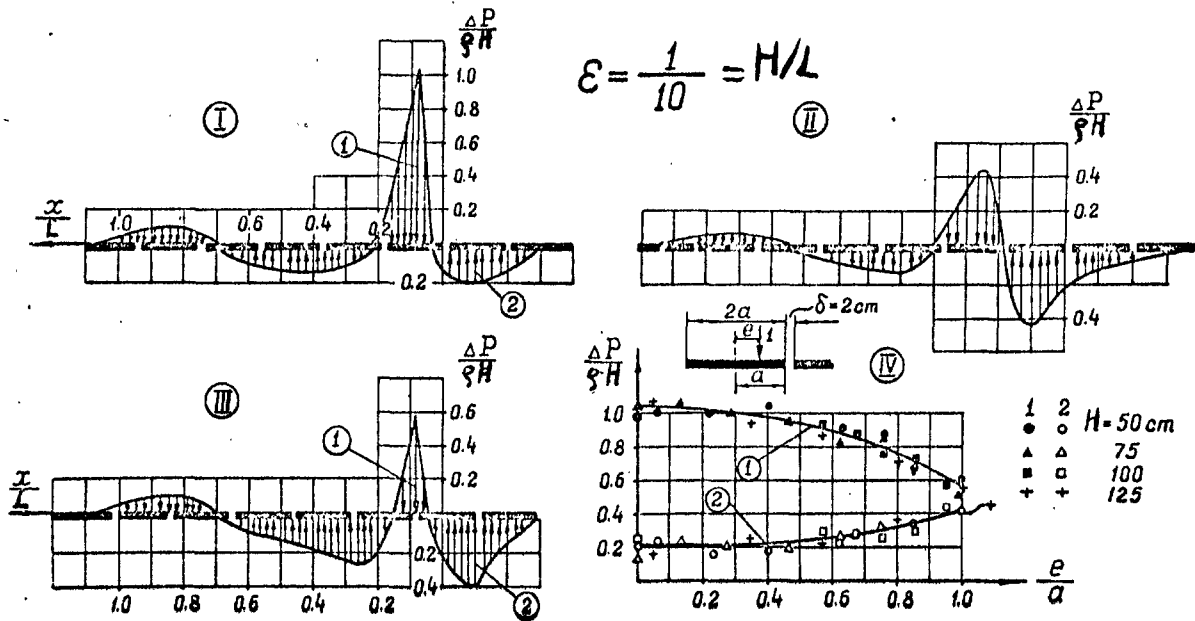
1. op het moment van breken op het talud, met een corresponderende maximum druk op de buitenzijde van de plaat
2. op het moment voorafgaande aan de brekende golf, wanneer maximum oplichtende drukken onder de bekleding optreden.

Lijnen van resulterende drukken zijn in figuur 5.34. I en II gegeven voor het geval dat de zone waar de golfklap optreedt in het centrale deel van de plaat ligt.

In figuur 5.34. III zijn de resulterende drukken gegeven voor het geval dat de golfklap precies op een voeg valt.

In dat geval zijn dank zij de instantane overdracht van de externe druk naar de zone onder de bekleding, de oplichtende drukken onder de platen boven en beneden de zone waar de golfklap optreedt toegenomen en de resulterende neerwaartse drukken aan de buitenzijde in het gebied van de golfklap afgenomen (tot 40%).

De verandering van de maximum drukken aan boven- en onderzijde van de platen als functie van de plaats van de golfklappen in relatie tot de plaats van de voeg is in figuur 5.34. IV weergegeven.



figuur 5.34. De resulterende drukken op de betonnen platen
 I - met $t = 0,0$ (moment de van golfklap) golfklap op de
 II - met $t = 0,2 T$ (voor de golfklap) centrale zone
 van de plaat
 III - met $t = 0,0$ golfklap op de voeg tussen de platen
 IV - variatie van de drukken als functie van de plaats van de
 golfklap in relatie tot de plaats van de
 voeg tussen de platen.

De uitgevoerde onderzoeken leidden tot de volgende conclusies:

1. Het gedeeltelijk samenvallen in fase van de drukken op boven- en onderzijde van de bekleding wordt gerealiseerd door de voegen tussen de platen doorlatend te maken en het geheel op een granulaair filter te plaatsen.

2. Het samenvallen in fase van de drukken leidt tot een reductie (tot 40%) in de totale belasting aan de bovenzijde van de platen en tot een aanzienlijke toename van de oplichtende kracht onder de bekleding.
3. Periodieke drukvariaties onder de betonnen platen hebben een nadelige invloed op het gedrag van het filter, daarom moeten de aan het filter te stellen eisen betreffende materiaaldichtheid en interne stabiliteit zwaarder zijn dan die bij een bekleding zonder voegen.
4. Het probleem van de mate van doorlatendheid van de bekleding moet worden opgelost op basis van een economische vergelijking tussen verschillende ontwerpen voor een bekleding op een dijk.

b. Greslau en Montaz (lit. 14) hebben uitvoerige proeven verricht ter bepaling van de maximale drukken op een talud.

In een modelopstelling werden zes verschillende taludhellingen tussen 1 : 1,3 en 1 : 5 onderzocht.

Kenmerkend voor dit onderzoek is dat bij een constante diepte (0,30 m) steeds die golf werd bepaald waarbij de hoogste druk werd gevonden. Om deze reden zijn de gevonden resultaten onafhankelijk van de golfhoogte H, de golflengte is echter wel systematisch gevarieerd.

De golfgoot was 27 m lang en was ter plaatse van de proefopstelling 0,3 m breed, het talud was vlak, glad en ondoorlatend (stalen plaat).

Hier wordt afgezien van een uitputtende behandeling van het artikel omdat, wegens de kleine schaal, om redenen zoals eerder genoemd, de opschaling naar prototype problematisch is.

Een samenvatting van de resultaten, geëxtrapoleerd naar prototype-omstandigheden wordt in tabel 5 gegeven.

waterdiepte d in m, voor het talud	p _{max} in meter waterkolom voor de verschillende hellingen 1 : n					
	1 : 1,3	1 : 1,7	1 : 2	1 : 2,5	1 : 3	1 : 5
9	55,5	39,6	29,4	17,7	12,6	12,6
15	92,5	66,0	49,0	29,5	21,0	21,0
24	148,5	105,6	78,4	47,2	33,6	33,6

Tabel 5: korte samenvatting resultaten Greslau en Montaz

Door de wijze waarop de maximale druk voor de verschillende taludhellingen is bepaald, blijkt de maximale druk lineair met de waterdiepte voor het talud toe te nemen.

Voor de taludhellingen 1 : 1,3 en 1 : 2 werden bovendien proeven met onregelmatige golven uitgevoerd.

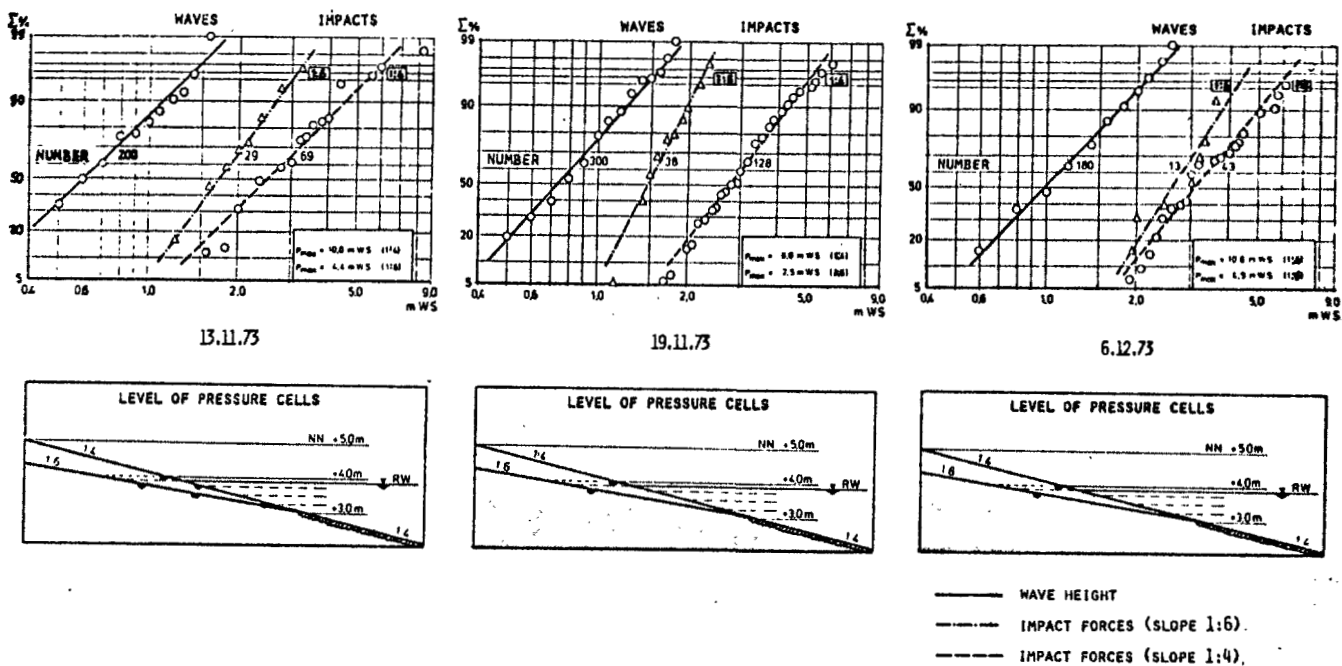
Hierbij bleek dat de grootte en de plaats van de maximale druk vrijwel niet afweken van de voor regelmatige golven gevonden waarden.

Ook in dit artikel wordt niets vermeld omtrent de duur van de golfklappen.

c. Boelke en Relotius (lit. 37) hebben golfklappen gemeten op een met asfalt beklede dam in de monding van de Eider met hellingen van 1 : 4 en 1 : 6. Figuur 5.35. geeft voor beide hellingen gemeten waarden gedurende de zware stormen in 1973.

De invloed van de taludhelling blijkt duidelijk uit de grootte van de golfklap.

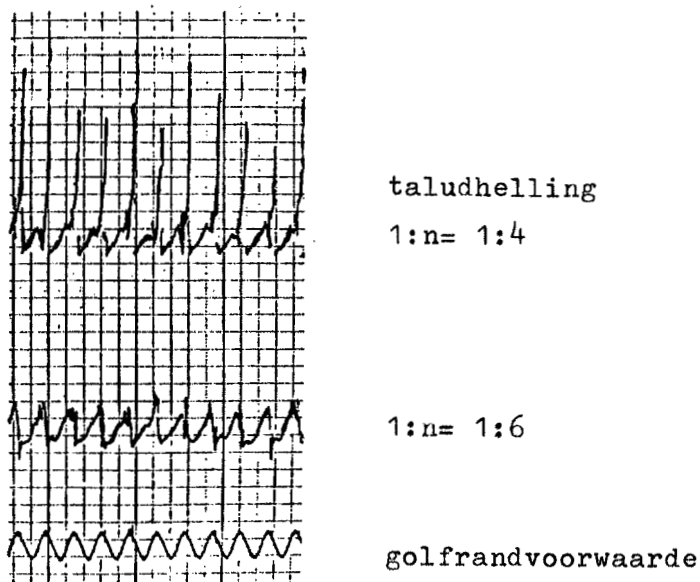
Het verschil in de grootte van de golfklap bij een taludhelling van 1 : 4 en 1 : 6 wordt verklaard doordat bij een helling van 1 : 4 en steiler het aflopende water het talud meestal al heeft verlaten als de volgende golf op het talud breekt, bij hellingen van 1 : 6 en flauwer is het reeds onwaarschijnlijk dat een "plunging breaker" op een watervrij talud slaat.



figuur 5.35.: gemeten golfklappen gedurende 3 stormperiodes

Figuur 5.36. (lit. 3) laat duidelijk het verschil in karakter zien tussen de golfklappen op een talud 1 : 4 en 1 : 6.

Terwijl bij een helling van 1 : 6 de drukspanningen nog in het quasi-hydrostatisch bereik blijven, bereiken de toppen van de drukken op een helling van 1 : 4 in de vorm van golfklappen een veelvoud van de drukhoogten der golven.



figuur 5.36.: verschil in drukverloop bij verschillende taludhellingen

In aanvulling op de waarnemingen in de natuur zijn proeven op schaal uitgevoerd, teneinde na te gaan op welke verticale afstand Δh beneden het niveau van stilwater de golfklap optreedt.

Waargenomen werd dat de belangrijkste golfklappen ongeveer de helft van de significante golfhoogte H_s beneden het niveau van stilwater lagen.

d. Het voorlopig rapport 1961 van de Werkgroep Gesloten dijkbekledingen (lit. 57) geeft de volgende waarden (tabel 6):

helling	drukstoot in meter waterkolom	meting
1 : 2	3 H	lab. één proefreeks
1 : 3	4 H à 5 H	lab. één proefreeks
1 : 4	2,5 H à 3 H	lab. meerdere proefreeksen
1 : 6	2 H	Westkapelse zeedijk

Tabel 6: globale waarden voor de golfklap

Deze cijfers gelden voor een doorgaand beloop zonder berm.

Voor belopen met een berm zijn de drukstoten van dezelfde orde van grootte, indien de golf beneden de berm breekt. Breken de golven op de berm, dan worden stoten gemeten van $1/2$ à $1/3$ van die op een doorgaand beloop. De duur van de drukstoot ligt in de orde van grootte van $1/10$ seconde.

De grootste drukken worden waargenomen even onder het niveau van stilwater, op een diepte variërend van $1/3 H$ tot $2/3 H$ onder dat niveau, indien H de golfhoogte voorstelt.

Het oppervlak, dat gelijktijdig door de drukstoot wordt getroffen is niet rechtstreeks gemeten, maar geschat wordt dat de breedte in de richting haaks op de dijk niet veel meer bedraagt dan 0,50 m.

In tabel 6 wordt geen verband gelegd met de golfvorm, zoals de golfsteilheid H/L bij Skladnev en Popov, waardoor de tabel slechts een globale indruk kan geven.

Uit meer recent onderzoek, zie lit. 68, worden wat lagere waarden dan de in tabel 6 gegeven waarden gevonden, zie tabel 7.

helling	drukstoot in meter waterkolom
1 : 2	2,3 H
1 : 3	2,7 H
1 : 4	2,3 H
1 : 6	2 H

Tabel 7: herziene waarden voor de golfklap

e. Waterloopkundig Laboratorium (lit. 65)

In het kader van het onderzoek naar de stabiliteit van de gezette bekleding op de Oesterdam zijn ook de drukken op en onder de bekleding gemeten. De taludhelling bedroeg 1 : 4, de constructie is opgebouwd op schaal 1 : 2. De geïstrumenteerde blokken waren voorzien van:

- een golfdrukmeter aan de bovenzijde
- een grondrukmeter aan de onderzijde
- een filter waterspanningsmeter aan de onderzijde
- een versnellingsopnemer.

In het onderzoek zijn de volgende grootheden gevarieerd:

- golfcondities, gekarakteriseerd door H_s en \bar{T}_z , respectievelijk H en T
- de waterstand
- de funderingslaag onder de blokken
- de dikte van de blokken
- de doorlatendheid van de bekleding
- de wrijving en het verband tussen de blokken.

Hierna worden als voorbeeld enkele resultaten van één bepaalde proef vermeld:

- onregelmatige golven; per proef stapsgewijze verhoging van de H_s/T_z -combinatie ter bepaling van de "begin-van-beweging" golfhoogte en de schadegolfhoogte bij een waterstand van NAP + 4,00 m (prototype-waarde).

De schade trad bij deze proef op bij een golfhoogte $H_s = 1,48$ m, gemiddelde golfperiode $T_z = 3,9$ sec. en circa 1 m onder de stilwaterlijn (prototype-waarden).

Voor de proefopstelling zie figuur 5.37.

De golfkarakteristieken zijn gegeven in figuur 5.38.

Figuur 5.39. geeft de registratie van het geïnstrumenteerde blok aan de filterzijde van de golfgoot, verminderd met de bij de opnemer behorende stilwaterregistratie (modelwaarden).

Voor de gepresenteerde gronddruk moet worden vermeld dat de registratie sterk afhankelijk is van de manier van aanliggen van de drukdoos op het onderliggende materiaal.

De richting van de krachtswerking is in elke figuur aangegeven.

In figuur 5.40. en 5.41. zijn gecombineerde signalen gepresenteerd (modelwaarden). Figuur 5.40. geeft de resulterende waterdruk op het geïnstrumenteerde blok (rij 14) in de bovenste grafiek (dit is de waterspanning in het filter onder het blok minus de golfdruk op het blok). De onderste grafiek geeft weer de korrelspanningsvariatie tegen de onderzijde van het blok (dit is gronddruk minus waterspanning); In figuur 5.41. zijn de resulterende waterdrukken op de glooiing gegeven in rij 10, 12, 16 en 20.

Teneinde te kunnen zien wanneer schade zou kunnen optreden is tevens aangegeven wat het drukequivalent van het steengewicht is.

In formule:
$$\frac{\text{gewicht van steen} - \text{gewicht verplaatst water}}{\text{oppervlak van de steen}}$$

Hier is geen rekening gehouden met de onderlinge wrijving van de blokken. De in deze figuren gepresenteerde gronddruk-waterspanning (dat wil zeggen korrelspanning) geeft voornamelijk inzicht in het feit of het desbetreffende blok contact maakt met de onderlaag en op welke manier een golfklap aan het blok wordt doorgegeven of op welke manier een golfklap via het blok wordt doorgegeven aan de ondergrond (hetzij als korrelspanning, hetzij als poriënwaterspanning of een combinatie van beide).

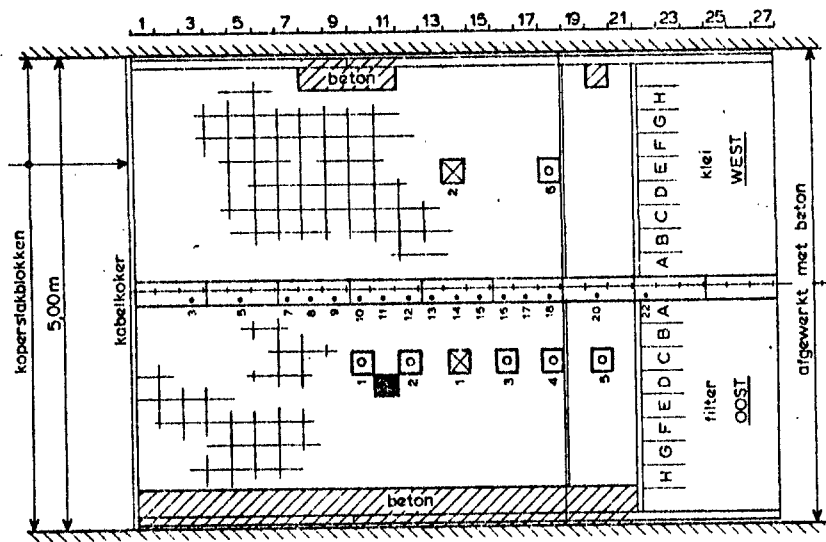
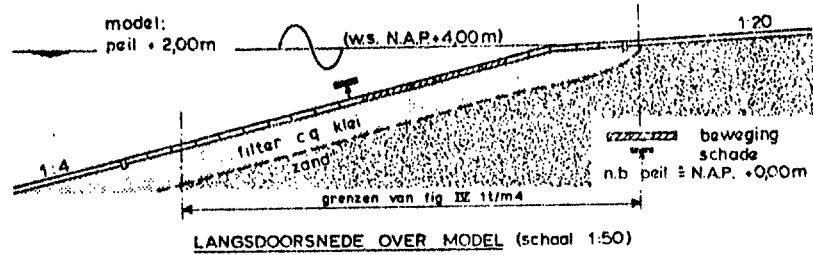
Figuur 5.42. geeft door middel van momentopnamen een indruk van het drukverloop langs de glooiing (modelwaarden). De grijs gearceerde delen geven het verschil in drukverloop onder en boven de bekleding (oplichtende werking).

Opmerking: Het hier gegeven verslag van de resultaten van het Waterloopkundig Laboratorium heeft een voorlopig karakter, daar het onderzoek en bijbehorende evaluatie nog in volle gang is. Wellicht kunnen uit de met regelmatige golven uitgevoerde proeven nog wat duidelijker en vooral eenduidiger resultaten worden verkregen.

Er van uitgaande dat globaal de grootste golfklap ter plaatse van het geïnstrumenteerde blok optreedt, wordt in figuur 5.39. een maximale druk waargenomen van ongeveer 8 kN/m^2 , dat wil zeggen 0,8 m waterkolom (modelwaarde).

Voor de totale druk moet hierbij nog de waarde van de bij de opnemer behorende stilwater-registratie worden opgeteld. Dit geeft een maximale druk van $0,8 + 0,25 = 1,05 \text{ m}$ waterkolom. Wanneer men globaal, ten behoeve van de eenvoud, een koppeling met H_{sign} maakt, vindt men in de formule

$$p_{\text{max}} = \alpha H_{\text{sign}} \text{ voor } \alpha \text{ de waarde } \underline{1,42}.$$



BOVENAANZICHT MODEL (schaal 1:50)

PROEVENSERIE OP DIKKE BLOKKEN

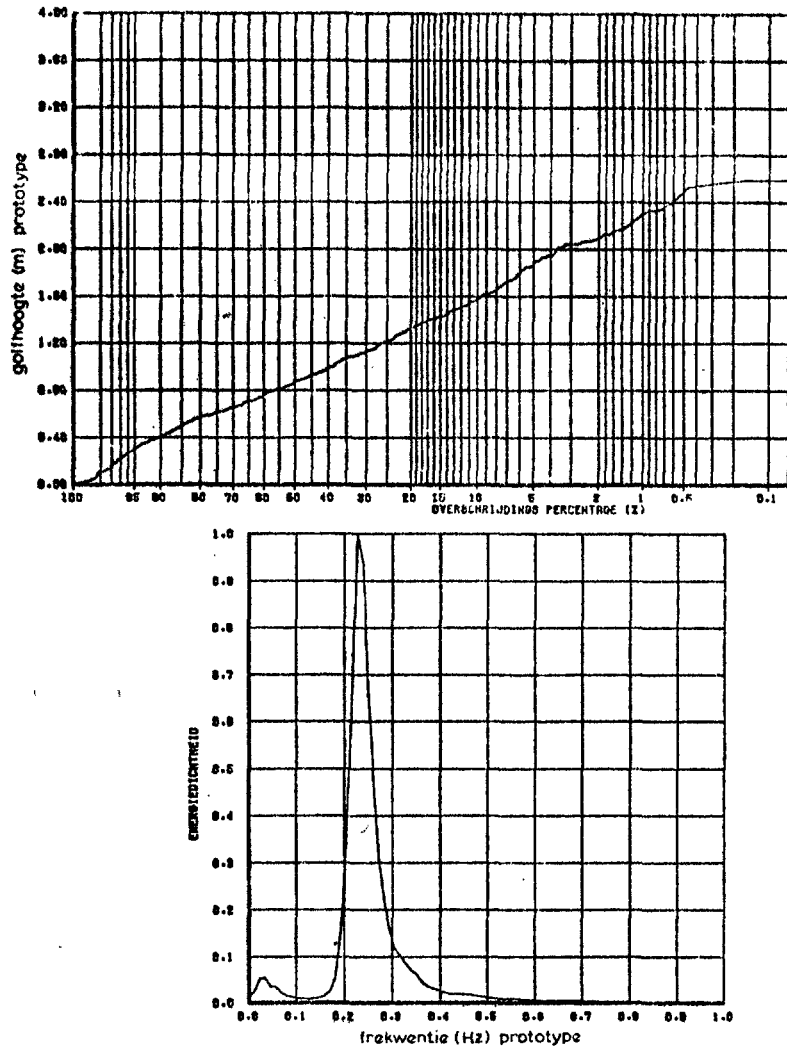
plaats instrumenten:

- ↔ oplopmeter
- golfdrukmeter
- schade - steen
- ⊗ geïnstrumenteerde - steen
- ⊙ waterspanningsopnemer in steen

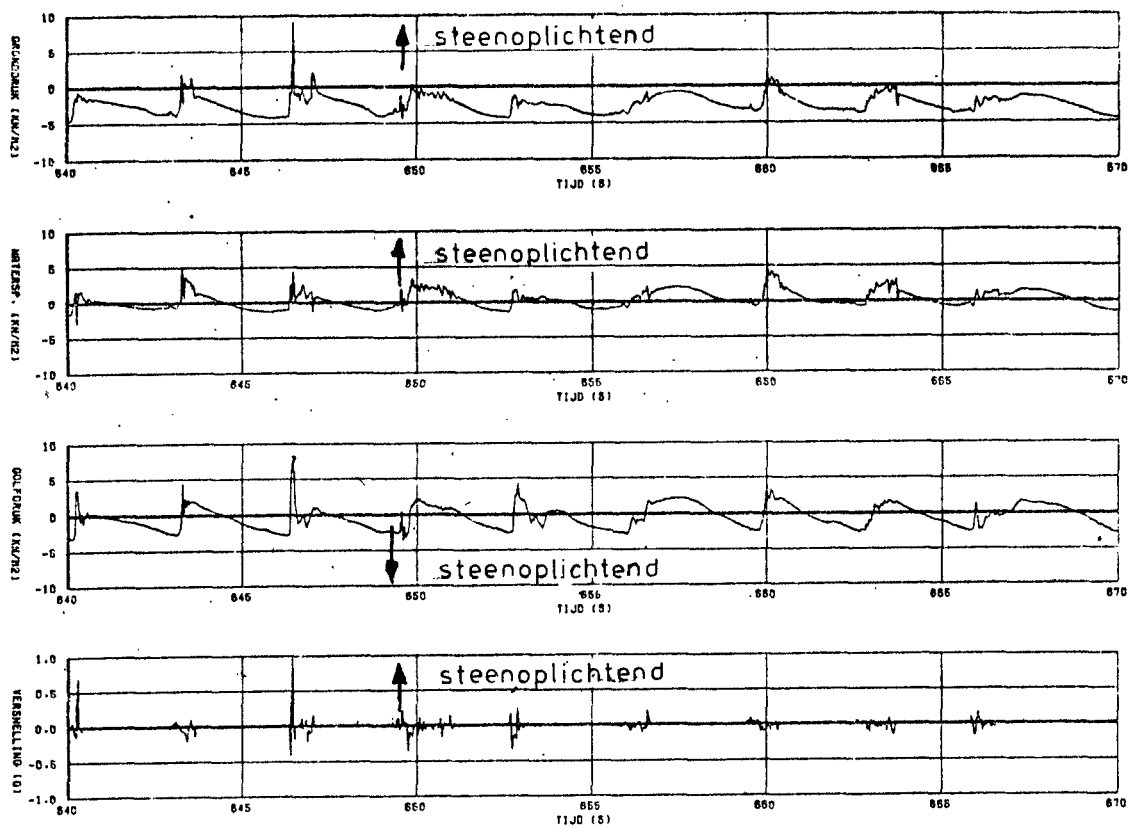
(blokdimensies in model:

afm.: 25 x 25 x 15 cm³
 massa: 22,5 kg)

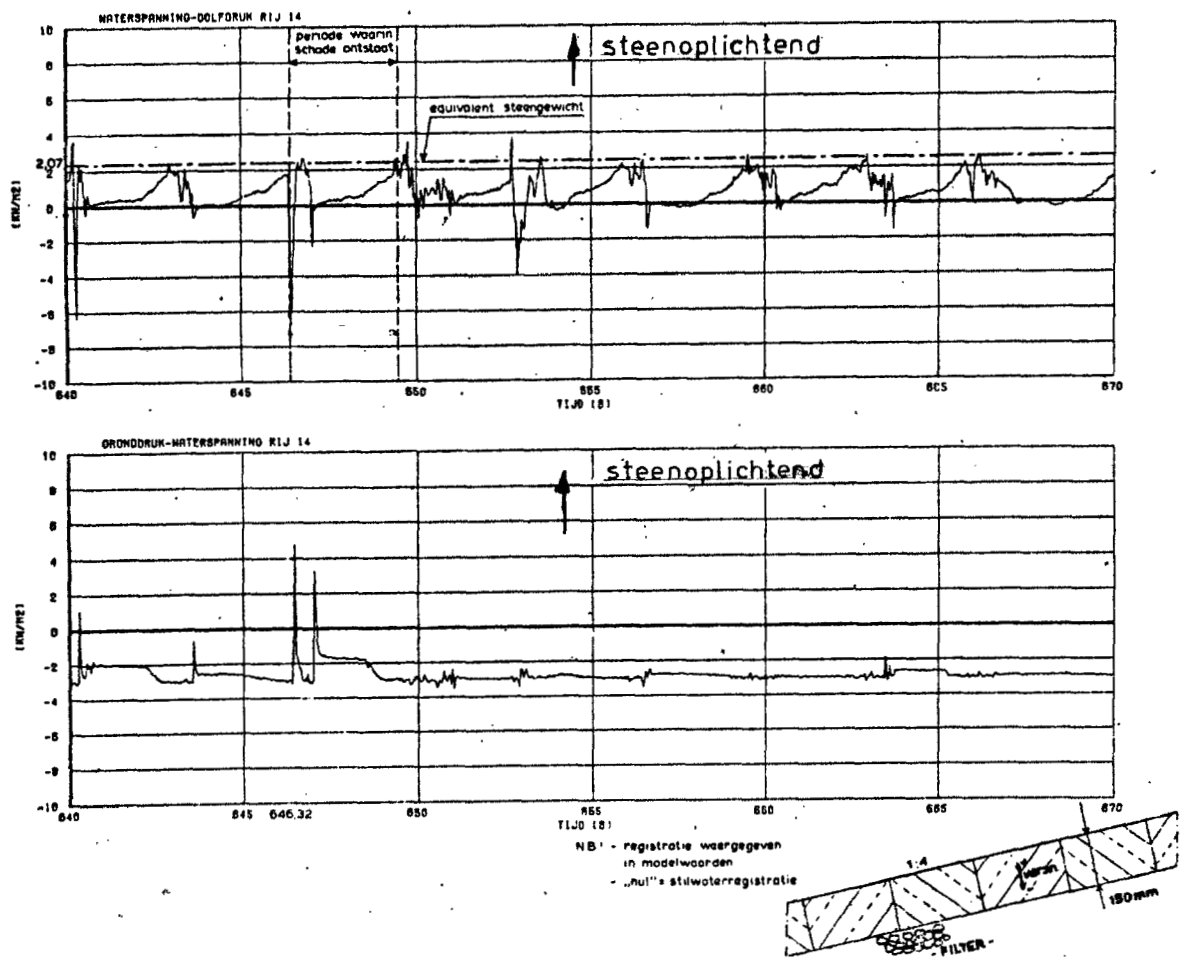
figuur 5.37.: instrumentatie van de blokkenglooiing gedurende de "schadegolfproef"



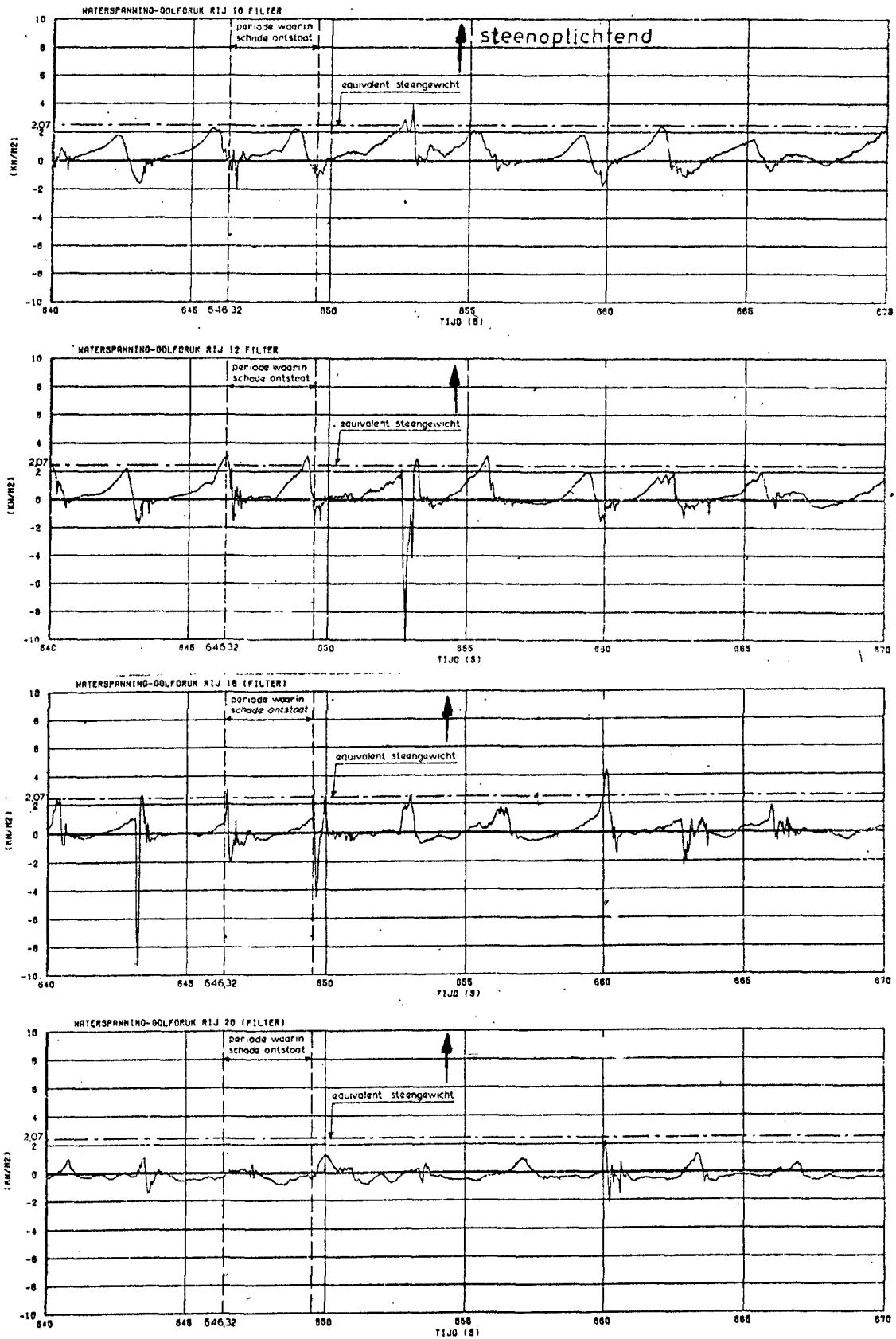
figuur 5.38.: overschrijdingskromme en spectrum van de gemeten golffhoogte (H_g) gedurende de "schadegolf"



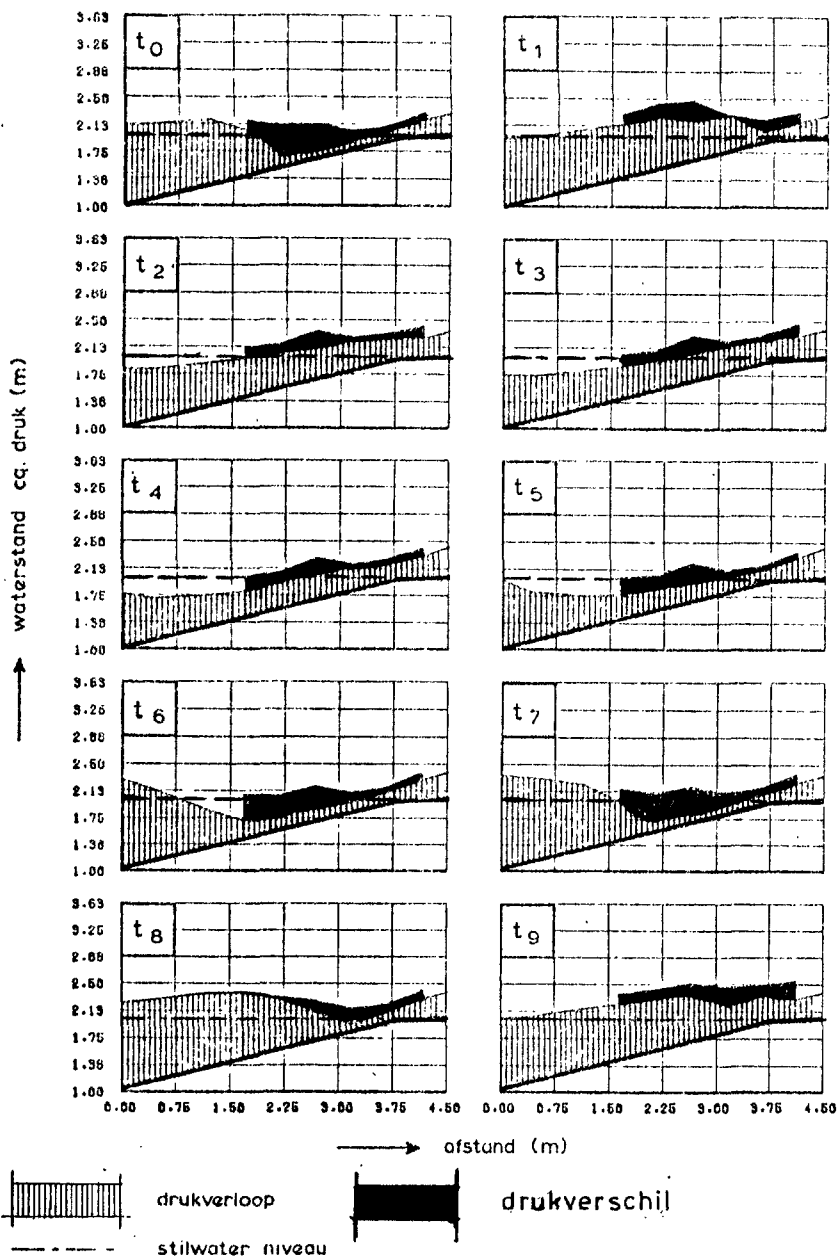
figuur 5.39.: opnemer-registraties van het geïnstrumenteerde blok op de filterzijde omstreeks het schadetijdstip



figuur 5.40.: resulterende waterdruk en korrelspanning op de geïnstrumenteerde steen (rij 14, zie ook fig. 5.37.), aan de filterzijde omstreeks het schadetijdstip



figuur 5.41.: resulterende waterdrukken op de glooïng in rij 10, 12, 16 en 20, aan de filterzijde omstreeks het schadetijdstip



figuur 5.42.: drukverloop op en onder het talud (voor de tijdsduur zie "periode waarin schade ontstaat" in figuur 5.40. en 5.41.

begintijd: 646,32

tijdstap Δt : 0,40

Vergelijking van de meetwaarden

De waarden van Greslau en Montaz kunnen, omdat de drukstoot alleen gerelateerd is aan de waterdiepte voor de dijk, niet worden vergeleken met de overige waarnemingen.

Ook het onderling vergelijken van de overige waarnemingen is wegens het verschil in omstandigheden niet goed mogelijk (regelmatige - onregelmatige golven). De vergelijking zal hier dan ook zeer globaal geschieden.

a. Skladnev en Popov

talud 1 : 4, golfsteilheid H/L = 1 : 10

$$\Delta p_{\max} = 1,47 H \text{ meter waterkolom}$$

$$p_{\max} \approx 1,62 H \text{ meter waterkolom}$$

b. Boelke en Relotius

talud 1 : 4

$$p_{\max} \approx 5 H \text{ meter waterkolom}$$

c. Werkgroep gesloten dijkbekledingen

talud 1 : 4

$$p_{\max} \approx 2,5 \text{ à } 3 H \text{ meter waterkolom}$$

d. Waterloopkundig Laboratorium

talud 1 : 4

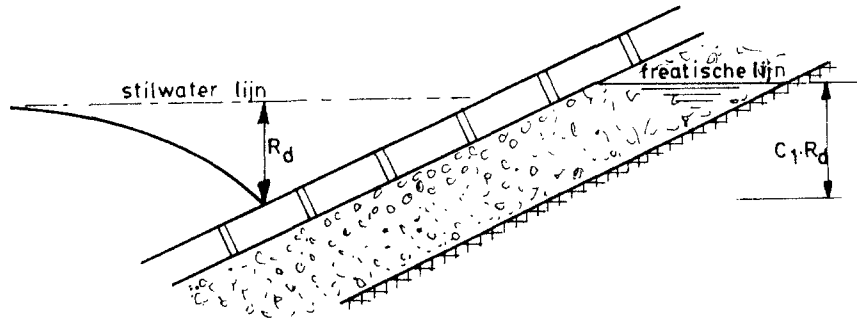
$$p_{\max} \approx 1,42 H \text{ meter waterkolom.}$$

5.8.4. "Run-down"

Metingen van de "run-down" hoogte zijn erg zeldzaam en indien beschikbaar niet erg nauwkeurig, omdat "run-down" experimenteel moeilijk exact te definiëren valt.

De "run-down" bepaalt het laagste punt op het talud tot waar het water na breking daalt (scheiding nat - droog).

De plaats van dit punt is van belang voor de stabiliteit van de bekleding onder invloed van het drukhoogteverschil onder en boven de bekleding, zie figuur 5.43.



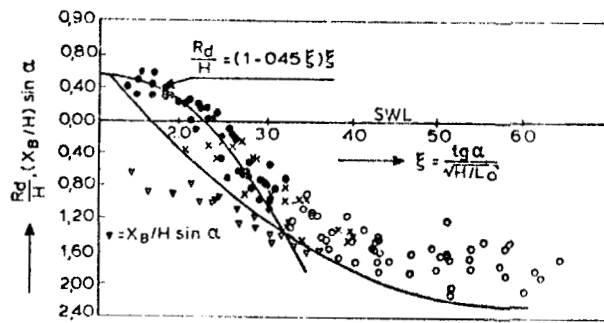
figuur 5.43.: invloed "run-down" op de stabiliteit van de bekleding

Waarnemingen

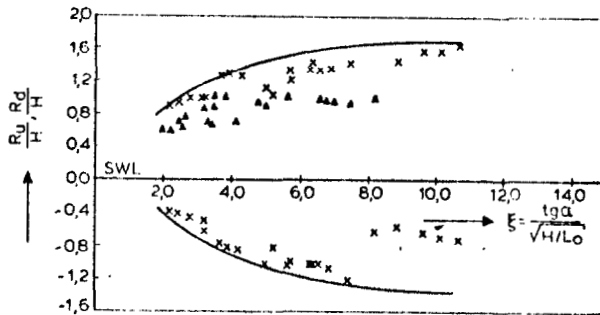
a. Bruun en Günbak (lit. 58) geven voor de "run-down" op een vlak talud de volgende empirische relatie:

$$\frac{R_d}{H} = (1 - 0,45 \xi) \xi \text{ voor } 1 < \xi < 3 \quad (5.25.)$$

In figuur 5.44. zijn metingen voor de run-down uitgezet als functie van ξ .



(b) run-down and breaking point on smooth



(c) run-up / run-down on smooth quarry stone slope

figuur 5.44.: "run-down" volgens Bruun en Günbak 81977)

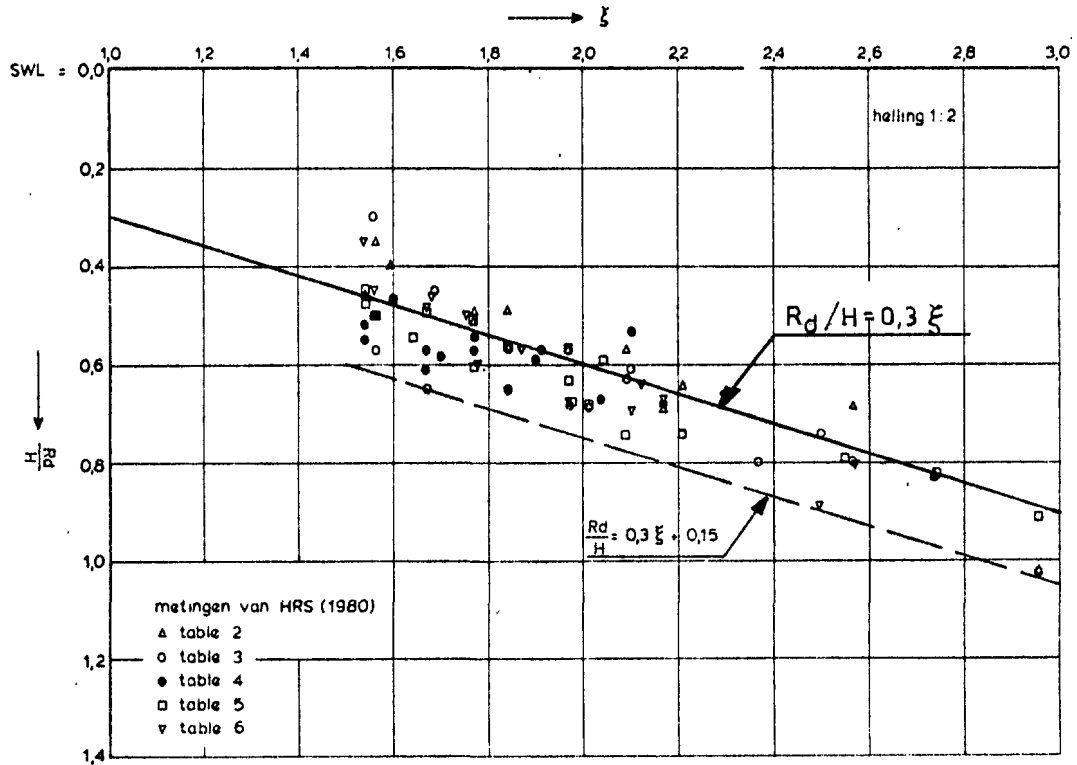
De "run-down" wordt gereduceerd door de ruwheid van het talud.

b. In het onderzoek van het "Hydraulics Research Station" (lit. 66) is run-down op een talud 1 : 2 met gezette steen gemeten.

De resultaten zijn gegeven in figuur 5.45.

Al de waarnemingen voor $1,5 < \xi < 3,0$ liggen boven de lijn $R_d/H = 0,3 \xi + 0,15$.

Opmerking: voor een beschrijving van het verschijnsel golfloop wordt verwezen naar hoofdstuk 6.



figuur 5.45.: run-down op talud van gezette steen

5.9. Conclusies

1. Er valt geen duidelijke uitspraak te doen met betrekking tot de grootte en plaats van de golfklap aangezien vergelijkingsmateriaal onvoldoende aanwezig is en het niet mogelijk blijkt door rekenmodellen een voorspelling te doen.
2. Schaalears effecten bij golfklappen zijn onvoldoende bekend. Door lineair op te schalen wordt aan de veilige kant gebleven; bij kleine schalen kan dit opschalen echter extreem grote en vrijwel onmogelijke drukken opleveren.
3. De waarnemingen beperken zich bij golfklappen veelal in hoofdzaak tot het bepalen van de maximaal mogelijk optredende drukken. Aan de plaats en uitgestrektheid op het talud en vooral de tijdsduur van deze grote drukken is veel minder aandacht besteed.

4. Algemeen geldt dat het probleem van de golfvervormingen slecht toegankelijk is voor berekening, meer dan een globale indicatie kan op deze wijze niet worden verkregen.

Voor meer nauwkeurige resultaten blijft men grotendeels aangewezen op waarneming in het laboratorium en in de natuur.

Literatuur

1. Rapport Delta commissie
Onderzoekingen van belang voor het ontwerpen van dijken en dammen
Deel 6
Staatsdrukkerij en uitgeverijbedrijf, 's Gravenhage

2. Groen, P. en Dorrestein, R.
Zeegolven
Opstellen en oceanografisch en maritiem meteorologisch gebied nr.
11, 1976
Staatsdrukkerij, 's Gravenhage

3. Die Küste
Archiv für Forschung und Technik an der Nord- und Ostsee
Heft 36, 1981
Westholsteinische Verlagsanstalt Bayens & Co., Heide I. Holst.

4. Agema, J.F.
Waterkeringen
Collegedictaat f 11, 1982
Afdeling der Civiele Techniek
Technische Hogeschool Delft

5. Shore protection manual
Volume 1, 1977
U.S. Army Coastal Engineering Research Center

6. Nota: Golfbelasting op taluds
Waterloopkundig Laboratorium, juli 1969

7. Battjes, J.A.
Collegedictaat korte golven
Technische Hogeschool Delft

Literatuur (vervolg)

8. Waterloopkundig Laboratorium
Plaatsbepaling van brekende golven op de afsluitdijk
M 1095, juli 1971
9. Schijf, J.B. e.a.
Werkgroep gesloten dijkbekledingen
Voorlopig rapport 1961
10. Führböter, A.
Der Druckschlag durch Brecher auf Deichbösumgen
Mitteilungen des Franzius Institut für Grund- en Wasserbau der
Technischen Universität
Hannover, 1966
Heft 28
11. Führböter, A. e.a.
Response of seadykes to wave impacts
Coastal Engineering Conference
Chapter150, 1976, Hawai
12. Führböter, A.
Laboratory investigations of impact forces
Symposium: Research on wave action
Vol. II, Delft, July 1959
13. Singamsetti, S.R., Wind, H.G.
Breaking waves
Characteristics of shoaling and breaking. Periodic waves normally
incident to plane beaches of constant slope
M 1371, July 1980 (TOW)
Waterloopkundig Laboratorium

Literatuur (vervolg)

14. Greslau, L., Montaz, J.P.
Pressure measurements on an embankment breakwater
Bulletin of the permanent international association of navigation
congresses, 1962, vol. III
15. Shönian, E., Sommer, P.
Spannungen und Verfassungen in Asphaltdeckwerken unter
Wellenbeanspruchungen am Beispiel Eiderabdämmung
Wasserwirtschaft 62, 1972/7
16. Bagnold, R.A.
Interim Report on wave-pressure research
Journal of the Institution of Civil engineers
Vol. 12, June 1939
17. Apelt, C.J., Macknight, A.
Wave action on large off-shore structures
Coastal Engineering Proceedings, Vol. III, 1976, Hawaii
18. Nichols, B.D., Hirt, C.W.
Numerical calculation of wave forces on structures
Coastal Engineering Proceedings, Vol. III, 1976, Hawaii
19. Magridge, C.R., Jamieson, W.W.
Wave forces on square caissons
Coastal Engineering Proceedings, Vol. III, 1976, Hawaii
20. Miller, R.L. e.a.
Field measurements of impact pressure in surf
Coastal Engineering Proceedings, Vol. III, 1974, Copenhagen
21. Ackermann, N.L., Ping-Ho Chen
Impact pressures produced by breaking waves
Coastal Engineering Proceedings, Vol. III, 1974, Copenhagen

Literatuur (vervolg)

22. Kamel, A.M.
Wave pressure on seawalls and breakwaters
Permanent International Association of Navigation Congresses, 1971.
Vol. II, no. 8

23. Mitsuyasu, H.
Shock pressure of breaking waves
Coastal Engineering Proceedings, Vol. I, Tokyo, 1966

24. Yoshio Maraki
Field observations of wave pressure, wave run-up, and oscillation
of breakwater
Coastal Engineering Proceedings, Vol. I, Tokyo, 1966

25. Tsutomu Kiskim Hiroshi Seaki
The shoaling, breaking and run-up of the solitary wave on
impermeable rough slopes
Coastal Engineering Proceedings, Vol. I, Tokyo, 1966

26. Molero, F.
Protection against wave action based on hydro-elastic effect
Coastal Engineering Proceedings, Vol. II, Tokyo, 1966

27. Krylov, V.V. e.a.
On design of wave pressure acting on structures of sloping type
Coastal Engineering Proceedings, Vol. II, Tokyo, 1966

28. Deltawerken
Metingen aan de Haringvlietsluizen
Driemaandelijks Bericht nr. 67, februari 1974

Literatuur (vervolg)

29. Lundgren, H.
Wave shock forces: An analysis of deformation and forces in the
wave and in the foundation
Symposium research on wave action, Vol. II, Delft, July 1969
30. Skladnev, M.F., Popov, I.Ya.
Studies of wave loads on concrete slope protections of earthdams
Symposium research on wave action, Vol. II, Delft, July 1969
31. Prins, J.E.
Model investigation of wind wave forces
Waterloopkundig Laboratorium Delft, publikatie nr. 24
32. Aartsen, A.M. e.a.
Wave impacts on the steel gates of a discharge sluice
Waterloopkundig Laboratorium Delft, publikatie nr. 16, april 1959
33. Aartsen, A.M., Venis, W.A.
Model investigations on wave attack on structures
Waterloopkundig Laboratorium Delft, publikatie nr. 17, april 1959
34. Richert, G.
Shock pressures of breaking waves
Stockholm, 1974
35. Waterloopkundig Laboratorium Delft
Schaaleffecten bij golfklappen op een talud
M 1057 (deel I en II), augustus 1979
36. Waterloopkundig Laboratorium Delft
Stabiliteit van de bekleding bij verschillende modelschalen
M 1410, 1980

Literatuur (vervolg)

37. Boelke, S., Relotius, P.C.

Ueber die wellenerzeugten Druckschlagbelastungen von Seedeichen im
Bösschungsbereich zwischen 1 : 4 und 1 : 6

Leichweiss-Institut für Wasserbau der Techn. Univ. Braunschweig
Mitteilungen Heft 42, 1974

38. Bruns, E.

Berechnung des Wellenstosses auf Molen und Wellenbrecher

Jahrbuch der Hafenbautechn. Gesellschaft, 9. Band, 1941-1949,
Berlin

39. Boom, J. de, Oudshoorn, B.

Onderzoek naar de invloed van de dichtheid en de compressibiliteit
van lucht op golfklappen

Afstudeerverslag Technische Hogeschool Delft, 1975, Afd. Civiele
Techniek

40. Ramkema

A model law for wave impacts on coastal structures

Procs. 16th Coastal Engineering Conference, Hamburg, Vol. III, Ch.
139, 1978

41. Richert, G.

Shock pressure of breaking waves

Hydraulics Laboratory

Royal Institute of Technology

Stockhol, Bulletin nr. 84, 1974

42. Waterloopkundig Laboratorium

Golfklappen op de schuif in de Oosterschelde-caisson

Verslag modelonderzoek, M 1335-KI, 1977

Literatuur (vervolg)

43. Waterloopkundig Laboratorium
Golfklappen: een zuigermodel met samendrukbaar water
Verslag onderzoek, M 1335-II, 1979

44. Waterloopkundig Laboratorium
Golfklappen: een literatuuroverzicht en schaaleffecten in
modelonderzoek
Verslag studie, M 1335-III, 1979

45. Ayyar, H.
On the hydromechanics of breakers on steep slopes
Mitteilungen des Franzius Instituts für Grund- und Wasserbau der
Techn. Univ., Hannover, Heft 33, 1969

46. Battjes, J.A.
Golfoploop en golfoverslag
Technische adviescommissie voor de waterkeringen
's Gravenhage, 1972

47. Iversen, H.W.
Laboratory study of breakers
Gravity waves
National Bureau of standard Circular, 21, 1952

48. Ross, C.W.
Shock pressure of breaking waves
Proc. of the 4th Conf. on Coastal Engineering
Council on wave research, Univ. of California, Berkeley, 1954

49. Losada, M.A., Giménez-Curto, L.a.
Flow characteristics on rough, permeable slopes under wave action
Coastal Engineering, 4 (1981)

Literatuur (vervolg)

50. Ahrens, J.P.; McCartney, B.L.
Wave period effect on the stability of rip-rap
Proc. Civil Eng. in the Oceans/III, Vol. 2, 1975

51. Battjes, J.A.
Computation of set-up, longshore currents, run-up and overtopping
due to wind generated waves
Communications on Hydraulics
Delft University of Technology, Rep. 74-2

52. Battjes, J.A.
Surf similarity
Proc. Conf. on Coastal Eng., 14th, Copenhagen, 1974

53. Roos, A.
Experimenteel onderzoek naar het gedrag van tegen taluds oplopende
regelmatige golven
Afstudeerverslag Technische Hogeschool, 1972

54. Waterloopkundig Laboratorium
Invloed van bermen op de oploop van regelmatige golven
Verslag modelonderzoek, M 1130, 1976

55. Kolkman, P.A.
Maximale golfdrukken volgens het stromingsmodel, het
schokgolfmodel en het waterpistonmodel
Notitie, juli 1981 (niet gepubliceerd)
Afd. Civiele Techniek, Technische Hogeschool Delft

56. Mou-Hsing Wang
Wave impact pressures
Asian Institute of Technology
Bangkok, Thailand, 1974

Literatuur (vervolg)

57. Voorlopig rapport, 1961
Werkgroep gesloten dijkbekledingen
58. Waterloopkundig Laboratorium
Taludbekleding van gezette steen, fase 0
Hydraulische aspecten, verslag literatuurstudie
M 1795, deel III? 1982
59. Denny, D.F.
Further experiments on wave pressures
Journal of the Institution of Civil Engineers, Vol. 35, 1951
60. Hayashi, T., Hattori, M;
Thrusts exerted upon composite-type breakwaters by the action of
breaking waves
Coastal Engineering in Japan, Vol. III? 1964
61. Nagai, S.
Shock pressure exerted by breaking waves on breakwaters
Transactions ASCE
Vol. 126, Part IV, 1961
62. Van der Burgt, C.
Die Abdämmung der Lauwerszee
Die Küste, Jahrgang 12, 1964
63. Bouville, M.A., Besson, P., Petry, P.
Etat actuel des Etudes Internationales sur les efforts dus aux
lames
Annales des Ponts et Chaussées, 1938

Literatuur (vervolg)

64. Kuribayashi, T., Muraki, Y., Udai, G.
Field investigations of wave forces on breakwater
Coastal Engineering in Japan, Vol. 2, 1959
65. Waterloopkundig Laboratorium
Grootschalig onderzoek ten behoeve van de Oesterdam
M 1795, deel VI, 1982
66. Hydraulics Research Station
The stability of revetment blocks under wave attack
Report IT 195, Wallingford, Englandf, 1980
67. Le Méhauté, B., Wang, J.D.
Proc. ASCE, J. Waterw., Portt. Coast. and Ocean Div., 108 (1982) WW
68. Stive, R.,
Golfklappen op een taludbekleding
Waterloopkundig Laboratorium Delft - 19 juli 1983
69. Miche, M.R.,
Propriétés des trains d'ondes océaniques et de laboratoire.
Comité Central d'Océanographie et d'etude des Côtes, 1954

Hoofdstuk 6 - Golfoploop

6.1. Inleiding

De hoogte van de golfoploop is van primair belang voor de bepaling van de kruinhoogte van de dijk.

In mindere mate beïnvloedt de grootte van de golfoploop ook de plaats tot waar de harde bekleding doorgetrokken wordt.

Door de bekleding een zekere ruwheid te geven of uit te gaan van een speciale vormgeving van het beloop kan de mate van golfoploop worden beperkt.

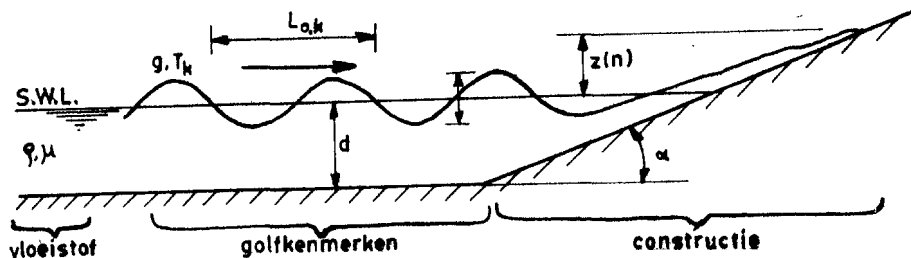
In dit hoofdstuk wordt een beeld gegeven van de wijze waarop de golfoploop berekend kan worden.

Er zijn diverse formules beschikbaar die het golfoploopproces beschrijven.

Golfoplooptheorieën kunnen worden onderscheiden in theorieën voor niet-brekende golven en theorieën voor brekende golven. Hierbij kan weer een onderverdeling worden aangehouden in regelmatige - en onregelmatige golven.

In zeegang (golven onder de invloed van de wind die ze opwekt) is de golfsteilheid zodanig, dat bij taluds onder een helling van 1 : 3 of minder vrijwel alle golven breken. Anderzijds lopen de meeste golven op zonder te breken bij een helling van 1 : 1,5 of meer.

In het navolgende wordt, in verband met het toepassingsgebied van een cementbetonnen dijkbekleding, de beschouwing beperkt tot brekende golven.



figuur 6.1.: definitie parameters

6.2. Glad en vlak talud

6.2.1. Algemeen

De oploop van golven die breken op een vlak, glad talud onder helling α is gegeven door:

$$z(n) = f_1(n) \sqrt{H_k L_{O,k}} \tan \alpha \quad (6.1.)$$

Met behulp van:

$$L_{O,k} = \frac{g T_k^2}{2\pi} \text{ kan (6.1.) worden herleid tot:}$$

$$z(n) = f_2(n) T_k \sqrt{g H_k} \tan \alpha \quad (6.2.)$$

Hierin is $z(n)$ de oploophoogte met overschrijdingspercentage n . De functies $f_1(n)$ en $f_2(n)$ geven de vorm weer van de waarschijnlijkheidsverdeling van de oploop en hangen, naast de keuze van de kenmerkende parameters, af van de statistische opbouw van de invallende golven, zoals van de vorm van het energiedichtheidsspectrum of van de simultane verdeling van H en T . Verder is H de golfhoogte en T de golfperiode.

De index "O" duidt op diep water en de index "k" betekent kenmerkend.

6.2.2. Regelmatige golven

Volgens Hunt (1959) geldt:

$$z = \sqrt{H_O L_O} \tan \alpha \quad (6.3.)$$

Door substitutie van $L_O = \frac{g T^2}{2\pi}$ in formule (6.3.) krijgt men dan:

$$z = 0,4 T_O \sqrt{g H_O} \tan \alpha \quad (6.4.)$$

6.2.3. Onregelmatige golven

Voor de kenmerkende periode T_k wordt de periode gekozen van de spectrale component met de maximale energiedichtheid (T).

Voor de kenmerkende golfhoogte H_k wordt de gemiddelde hoogte van het hoogste derde deel van de golven in een serie gekozen (H_{sign}).

Als maat voor de relatieve breedte van het energiedichtheidsspectrum wordt ϵ als parameter genomen.

Vergelijking (6.2.) gaat nu over in:

$$z(n) = C(n)(\epsilon)T \sqrt{g H_{sign}} \tan \alpha \tag{6.5.}$$

Als overschrijdingsfrequentie wordt voor n een waarde van 2% aangehouden. Dit percentage is gekozen om aan te sluiten bij gangbare formules; de keuze impliceert niet dat de 2% oploop een buitengewone betekenis heeft, anders dan een historische.

De spreiding van de waarschijnlijkheidsverdeling van de oploop neemt toe met de breedte van het spectrum. Van de gemeten verdelingen komt die met de grootste spreiding overeen met een Rayleigh-verdeling, in welk geval de oploop met willekeurig overschrijdingspercentage n kan worden berekend uit $z(2)$ volgens:

$$\frac{z(n)}{z(2)} = 0,77 \sqrt{2 - 10 \log n} \tag{6.6.}$$

Uit metingen op de Noordzee is gebleken dat de waarde van $C(2)(\epsilon)$ ca. 0,7 is, de 2% golfoploop is dan:

$$z(2) \approx 0,7 T \sqrt{g H_{sign}} \tan \alpha \tag{6.7.}$$

Bij een Raileigh-verdeling geldt:

$$\Pr (z > z(2)) = e^{-2(z(2)/z_{sign})^2} = 2\%$$

Hieruit volgt:

$$z(2) = 1,4 z_{\text{sign}} \quad (6.8.)$$

Door (6.8.) in (6.7.) te substitueren krijgt men:

$$z_{\text{sign}} = 0,5 \hat{T} \sqrt{g H_{\text{sign}}} \tan \alpha \quad (6.9.)$$

Met behulp van de relatie $L_{O,k} = \frac{g T_k^2}{2\pi}$ en bij een golfsteilheid $H_{\text{sign}}/L_{O,k}$ van ca. 5,5% (dat wil zeggen jonge zeegang) verkrijgt men de bekende "Delftse formule".

$$z(2) = 8 H_{\text{sign}} \tan \alpha \quad (6.10.)$$

Bovenstaande formule geldt voor een talud met steenzetting (basalt), een zekere ruwheid van het talud is dus in de formule verdisconteerd. Deze formule heeft in Nederland meer bekendheid gekregen dan het feit dat hij alleen van toepassing is voor een golfsteilheid van ca. 0,055.

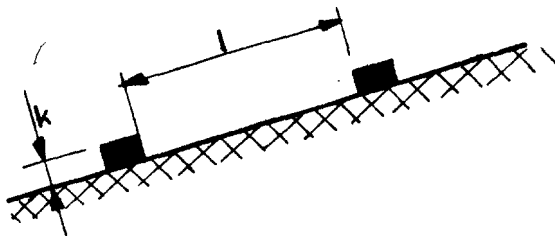
6.3. Vlak talud voorzien van ruwheidselementen

6.3.1. Algemeen

In dit deel zal de invloed worden besproken die op de golfoploop wordt uitgeoefend door ruwheidselementen die zijn aangebracht op of in een overigens vlak en gesloten talud.

De invloed van ruwheidselementen wordt kwantitatief uitgedrukt in een factor r , gedefinieerd als de verhouding van de oploop op het verruwde talud tot die op een glad, gesloten talud onder overigens identieke omstandigheden.

6.3.2. Regelmatige golven

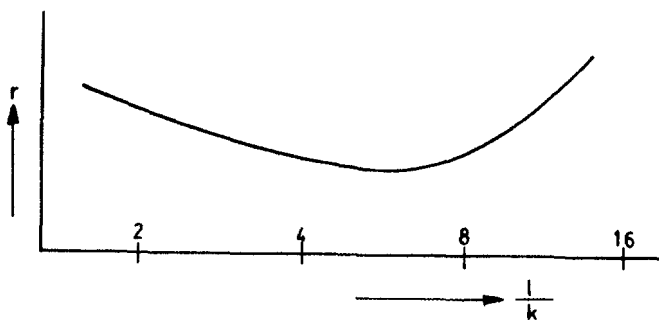


figuur 6.2.: maatvoering ribbels op vlak en gesloten talud

Uit onderzoek, zie literatuur 1, blijkt dat de invloed van ribbels met een vierkant profiel aanzienlijk kan zijn: minimale r -waarden waren ca. 0,5.

De werking van ribbels berust ten dele op de berging die mogelijk is achter elke ribbel en ten dele op de zogontwikkeling.

De optimale afstand van vierkante ribbels blijkt tussen 4 en 8 keer hun hoogte te liggen.



figuur 6.3.: invloed grootte en ligging ribbels

Uit vergelijkende proeven is gebleken dat de precieze vorm van de elementen weinig invloed heeft, zolang ze maar scherpkantig zijn aan alle zijden. Of het voorfront verticaal is dan wel loodrecht op het talud bleek evenmin invloed te hebben.

Naarmate de ribbels een grotere hoogte hebben ten opzichte van de dikte van de oplopende watertong groeit hun invloed op de oploop. Het is echter niet nodig dat de hoogte meer is dan de dikte van de oplopende tong water die optreedt bij omstandigheden waarop het ontwerp wordt gebaseerd.

In de literatuur worden weinig kwantitatieve gegevens aangetroffen over de dikte. Daarom wordt geprobeerd de invloed van de ruwheidshoogte direct te correleren met de golfhoogte.

Uit diverse proeven blijkt dat nagenoeg geen extra reductie wordt gewonnen door de ribbels een hoogte te geven van meer dan ca. 10% van de golfhoogte voor de dijk. In de proefnemingen waarop deze conclusie berust varieerde H_o/L_o van 0,08 tot 0,053 en was $2,7 < \cot \alpha < 5$.

De invloed van de ruwheidselementen op de golfoploop wordt mede bepaald door de ligging van de verruwde zone ten opzichte van de stilwaterstand en door de uitgestrektheid ervan. Het aanbrengen van ruwheid beneden de waterlijn heeft geen invloed op de oploop.

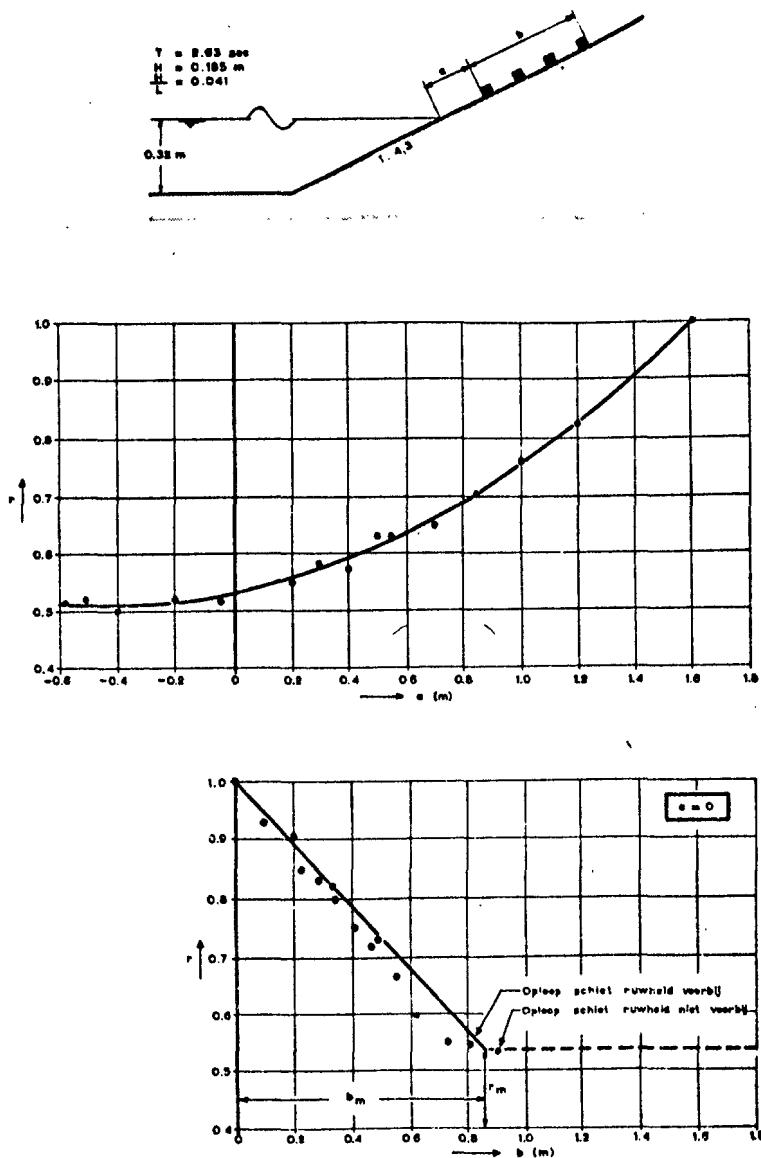
Om de grootst mogelijke reductie in oploop te bereiken moet men de ruwheidselementen tenminste aanbrengen vanaf de ontwerp-waterstand tot het punt waar de oploop van de ontwerp-golf wordt verwacht, zie figuur 6.4.

De reductie in oploop blijkt vrijwel recht evenredig te zijn met de breedte van de ruwe zone vanaf de waterlijn, zolang de bovenste begrenzing van de ruwe zone ligt tussen de waterlijn en de maximale oploop:

$$\begin{aligned} r &= 1 - (1 - r_m) \frac{b}{b_m} \quad \text{als } \begin{matrix} a = 0 \\ b < b_m \end{matrix} \\ r &= r_m \quad \text{als } \begin{matrix} a = 0 \\ b > b_m \end{matrix} \end{aligned} \tag{6.11.}$$

waarin:

- r_m = de waarde van r als de ruwe zone zich uitstrekt van de waterlijn tot (minstens) het hoogste punt dat door de oploop wordt bereikt
- b_m = de kleinste waarde van b waarbij de oploop de ruwe zone niet voorbyschiet
- r = verhouding tussen gereduceerde en niet-gereduceerde oploop



figuur 6.4.: invloed ligging en grootte van de verruwde zone op de reductiecoëfficiënt

Er is een niet te verwaarlozen invloed van de golfsteilheid en taludhelling op de grootte van r .

In de literatuur bestaat echter geen overeenstemming met betrekking tot de grootte en het teken van deze invloed. Als gevolg hiervan zullen in het algemeen gesproken additionele proefnemingen nodig zijn voor een ontwerp waarin de ruwheid een essentiële rol speelt in de bepaling van de kruinhoogte.

6.3.3. Onregelmatige golven

Van de invloeden van de verschillende parameters is minder bekend dan in het geval van regelmatige golven.

Dit is zowel een gevolg van het feit dat, over het geheel genomen, minder aandacht is besteed aan de onregelmatige golven als van het feit dat het een ingewikkelder verschijnsel betreft, waarbij het minder gemakkelijk is bepaalde verbanden te herkennen.

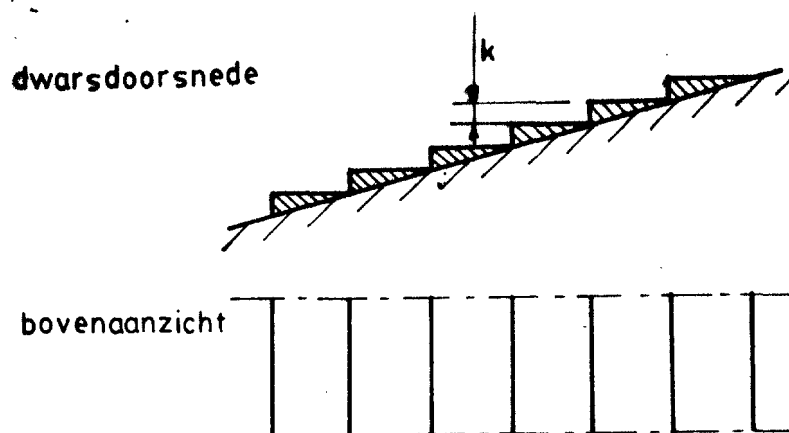
De hier te noemen r -waarden hebben betrekking op de 2% oploop.

Bij het ontwerpen van de ruwheidselementen ging men aanvankelijk uit van de gedachte dat de elementen optimaal zouden functioneren als het oplopende water zoveel mogelijk weerstand ondervond en het neerstromende water zo weinig mogelijk. Dit leidde tot elementen van een driehoekige doorsnede, met de basis in het vlak van het talud, de zeewaartse zijde loodrecht hierop of vertikaal en de bovenzijde horizontaal.

Het eenvoudigste voorbeeld hiervan is de trapglooiing (systeem Leendertse), schematisch weergegeven in figuur 6.5.

In het model bleek de hierbij behorende r -waarde ca. 0,8 te zijn.

Er is tevens onderzoek verricht naar het effect van ruwheidselementen met een soortgelijke dwarsdoorsnede maar van beperkte lengte, die in een bepaald patroon op het talud waren geplaatst. De r -waarden varieerden van 0,76 tot 0,84.

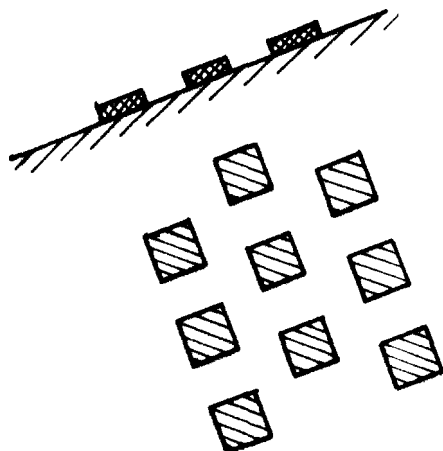


figuur 6.5. trapglooiing

Ook elementen met een rechthoekige dwarsdoorsnede zijn onderzocht. Bij het blokkenpatroon, geschetst in figuur 6.6., bleek een r-waarde van ca. 0,85 te behoren.

Een middel tot het verkrijgen van een grotere reductie werd gezocht in het aanbrengen van valkuilen in het talud. Deze gaven inderdaad een verbetering; de r-waarden waren minimaal ca. 0,6.

Om dit resultaat te bereiken was echter een relatief grote sleufdiepte nodig.



figuur 6.6.: speciale rangschikking ruwheidselementen

6.4. Vlak, ruw en doorlatend talud

6.4.1. Algemeen

In het voorgaande werd besproken de invloed van ruwheidselementen aangebracht op een overigens glad talud. Hier komt nu de ruwheid ter sprake die inherent is aan bepaalde bekledingen, met name steenzettingen en dergelijke. Behalve een ruwheid hebben deze bekledingen in het algemeen een zekere doorlatendheid, waardoor enige berging van het oplopende water in het talud mogelijk is. Dit kan aanzienlijk bijdragen tot de reductie van de oploop. Omdat de effecten niet te scheiden zijn kan de invloed van ruwheid en doorlatendheid niet afzonderlijk, maar slechts gezamenlijk worden nagegaan. Het gezamenlijk effect wordt weer uitgedrukt in de factor r .

6.4.2. Regelmatige golven

Battjes (lit. 1) geeft een aantal waarden van de coëfficiënt r voor ruwe, doorlatende taluds, zie tabel 1.

	r
gladde, gesloten bekleding	1
betonplaten	0,9
gezette steen	0,75-0,8
ronde stenen	0,6 -0,65
gestorte breuksteen	0,5 -0,55

Tabel 1

Uit proeven blijkt dat r afneemt met afnemende golfsteilheid en taludhelling. De spreiding in de resultaten is echter groot, daarom wordt er hier verder geen aandacht aan besteed.

6.4.3. Onregelmatige golven

Er zijn slechts weinig kwantitatieve gegevens van de oploop van onregelmatige golven op taluds met een natuurlijke ruwheid en doorlatendheid. Voor basalt- en bloksteenglooiingen wordt voor de 2% oploop een r-waarde gegeven van 0,85 à 0,90 ten opzichte van een glad talud. Uit metingen op een vlak stortsteen talud kan een r-waarde van 0,5 à 0,6 worden afgeleid.

Bovenstaande waarden komen ongeveer overeen met die voor regelmatige golven. In hoeverre dit ook het geval is voor andere typen taludbekledingen is niet bekend.

6.5. Niet vlak, glad talud

6.5.1. Algemeen

Niet alleen de ruwheid of doorlatendheid van een talud, maar ook de vorm ervan heeft invloed op de golfoploop.

De vorm van het talud moet dan ook als een onafhankelijke variabele worden beschouwd. De invloed van de vorm is echter niet gemakkelijk kwantitatief uit te drukken in een vermenigvuldigingsfactor, zoals gebruikt voor het ruwe, vlakke talud, omdat bij niet-vlakke taluds meestal niet eenduidig vaststaat wat het overeenkomstige vlakke talud is dat zou kunnen dienen als referentie.

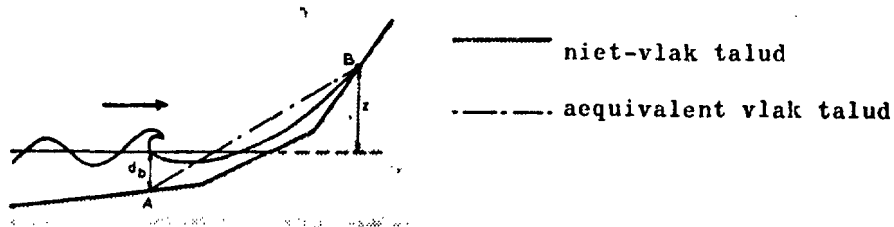
Dit geldt vooral voor holle of bolle taluds.

Een uitzondering wordt gevormd door een talud met een berm, mits de hellingen onder en boven de berm gelijk zijn. Een overeenkomstig vlak talud wordt dan gedefinieerd als het grensgeval waarin de bermbreedte nul wordt. Een bijzondere manier van generalisering wordt voorgesteld door Saville (1958) voor regelmatige golven op een talud van willekeurige vorm. Deze methode wordt eerst besproken. Daarna zullen enige resultaten worden gegeven voor taluds met berm.

6.5.2. Regelmatige golven

a. De equivalente-helling-methode van Saville

Volgens Saville komt de oploop op een niet-vlak talud overeen met de oploop op een equivalent vlak talud dat het niet-vlakke talud snijdt ter plaatse van het breekpunt van de golf en ter plaatse van de grootste golfoploop, zoals is aangegeven in figuur 6.7.



figuur 6.7.: principe-schets equivalente-helling-methode

De oploop z wordt iteratief bepaald door gebruik te maken van de genoemde definitie van het equivalente vlakke talud en van bekende gegevens voor de oploop op een vlak talud. De door Saville voorgestelde procedure is als volgt:

1. Gegeven: g , T , H , d , taludvorm, oploop op vlak talud als functie van taludhelling, g , T , H en d

waarin g = versnelling van de zwaartekracht

T = golfperiode

H = golfhoogte

d = waterdiepte

2. Bepaal de brekingsdiepte d_b uit:

$$\frac{d_b}{H_0} = 0,39 \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-1/3} \quad (6.12.)$$

3. Bepaal het punt A waar de diepte gelijk is aan d_b .
4. Maak een schatting van de oploop.
5. Bepaal het punt B dat juist door de oploop wordt bereikt.
6. Bepaal de helling van de lijn AB.
7. Bepaal de oploop van de gegeven golf op een fictief vlak talud met de onder 6. bepaalde helling.
8. Vergelijk de zo verkregen oploop met de geschatte.
Indien dit verschil te groot is, herhaal dan de procedure vanaf punt 4, waarbij de nieuwe schatting van de oploop gelijk is aan de onder punt 7 berekende oploop.

Het is eveneens mogelijk het equivalente vlakke talud grafisch te bepalen. In dat geval wordt voor een aantal geschatte oploopwaarden de overeenkomstige oploop berekend volgens de punten 5, 6 en 7. De geschatte en de berekende oplopen worden tegen elkaar uitgezet in een grafiek. Het punt waar ze aan elkaar gelijk zijn moet dan door interpolatie worden bepaald.

De methode is niet erg betrouwbaar bij de aanwezigheid van horizontale bermen. Met toenemende berm breedte neemt de oploop, berekend volgens Saville, sneller af dan de gemeten oploop.

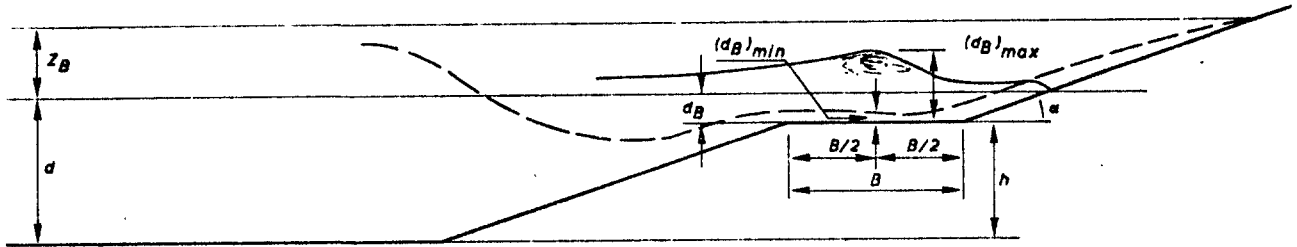
b. Talud met berm

Uit verschillende onderzoeken is gebleken dat het effect van een berm met een constante breedte maximaal is als de berm ongeveer op het stilwaterniveau ligt. Voorts is komen vast te staan dat de oploop afneemt met toenemende berm breedte, maar dat voorbij een zekere minimale breedte die afname snel minder wordt.

Beschouw het geval van loodrechte inval, een talud grenzend aan een horizontaal voorland, een horizontale berm op een diepte d_b beneden de gemiddelde waterspiegel en gelijke hellingen van het onder- en bovenloop, zie figuur 6.8.

De reductiecoëfficiënt r is een functie van een aantal parameters.

$$r = f(H, T, g, d, \alpha, B, d_b) \quad (6.13.)$$



figuur 6.8.: definitie parameters, dijk met een berm

Vaak wordt r echter beschouwd afhankelijk te zijn van slechts één parameter, die een relatieve bermbreedte voorstelt. De grote spreiding die voorkomt in de resultaten wijst er wel op dat de invloed van de overige parameters niet verwaarloosbaar is.

De nu volgende gegevens zijn overgenomen uit lit. 2.

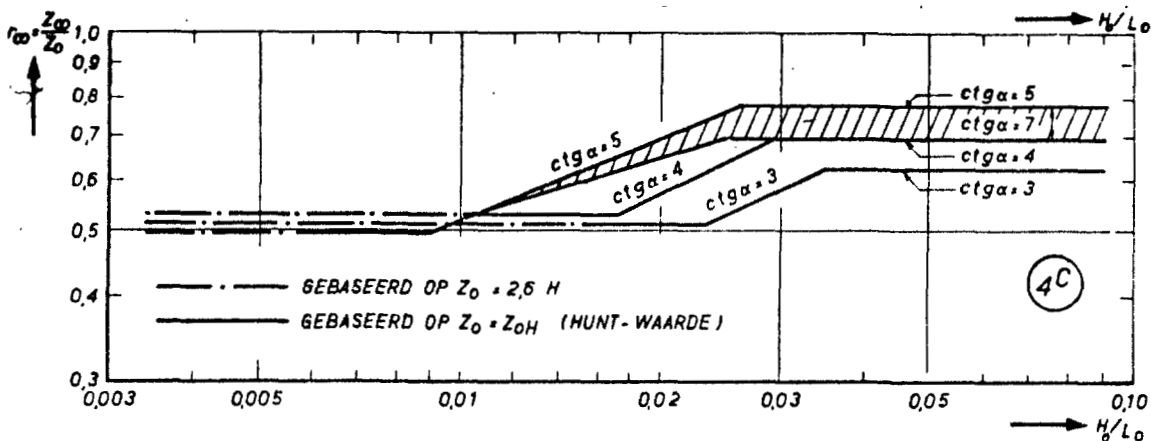
In figuur 6.9. is de reductiecoëfficiënt $r_\infty = \frac{z_\infty}{z_0}$ uitgezet als functie van H_0/L_0 .

De index " ∞ " geeft aan dat bij nog grotere bermbreedtes de golfoploop nauwelijks meer afneemt.

Z_0 is de golfoploop op een talud zonder berm berekend volgens Hunt ($Z_0 = \sqrt{H_0 L_0} \tan \alpha$).

Het rechterdeel van de figuur beschrijft het gebied waar de golf intensief breekt $H_0/H_L > 0,03$ à $0,04$, bij de toestand ter linkerkant vindt geen golfbreking plaats.

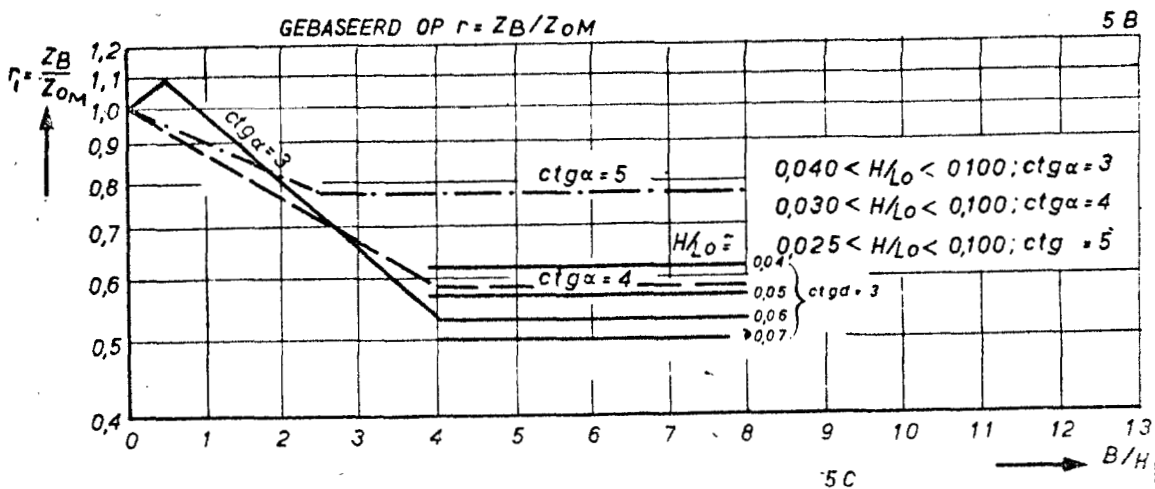
Bij een brekende golf moet de bermbreedte minimaal gelijk aan $4 H_0$ worden genomen. Bij een niet-brekende golf moet om z_∞ te bereiken gelden $B/L_0 > 0,25$.



figuur 6.9.: maximale reductie als functie van de golfsteilheid

Uit de figuur blijkt dat een berm bij talud 1 : 5 minder reducerend werkt op de ophoop dan bij de andere onderzochte taluds (lit. 2). Vooral de steilere taluds geven meer reductie.

In figuur 6.10. is de ophoopreductie als functie van de bermbreedte gegeven voor op het talud brekende golven ($d_B = 0$); in deze figuur is de waarde van Z_0 gebaseerd op de in het model bij één bepaalde proef gemeten waarde.



figuur 6.10.: reductie als functie van het quotient van bermbreedte en golfhoogte

De invloed van de bermdiepte d_B op de oploopreductie bij B_∞ is te verwaarlozen indien de berm minder dan $1/3 Z_0$ boven respectievelijk minder dan H_0 beneden het gemiddelde niveau ligt.

De berm geeft geen reductie meer indien hij Z_0 boven respectievelijk $2,5 H_0$ beneden de waterlijn ligt.

Indien de berm in het talud onder een flauwe helling (1 : 20) komt te liggen wordt de oploop bij kleine bermbreedtes groter dan die bij een horizontale berm.

6.5.3. Onregelmatige golven

Talud met berm

Omtrent het gedrag van een berm bij onregelmatige golven bestaan geen recente gegevens.

Een veel gebruikte waarde voor de reductiecoëfficiënt is:

$$r = 1 - \frac{B}{\bar{L}_0} \text{ voor } \frac{B}{\bar{L}_0} < \text{ca. } 0,25 \text{ en } r = 0,75 \text{ voor } B/\bar{L}_0 > 0,25$$

(6.14.)

waarin \bar{L}_0 is de gemiddelde golflengte.

De keuze van B/\bar{L}_0 als onafhankelijke variabele is niet geheel duidelijk. De uitkomsten van de proeven zouden evenzeer de invoering van de breuk B/\bar{H}_0 of $B/\sqrt{\bar{H}_0 \bar{L}_0}$ rechtvaardigen.

6.6. Scheve inval

6.6.1. Regelmatige golven

Gegevens over oploop van regelmatige golven bij scheve inval zijn zeer schaars.

De conclusie kan worden getrokken dat de invloed van de invalrichting op de oploop van brekende golven op een vlak talud te benaderen is met behulp van een vermenigvuldigingsfactor $\cos \beta$. β is de hoek tussen de golfvoortplantingsrichting en de horizontale component van de normaal op het talud ($\beta < 60^\circ$).

6.6.2. Onregelmatige golven

Ook hier wordt de vermenigvuldigingsfactor $\cos \beta$ toegepast.

Als het effect van een berm bij loodrechte inval wordt weergegeven door $(1 - B/\bar{L}_0)$ dan kan men het effect van een berm bij scheve inval weergeven door $(1 - B/\bar{L}_0 \cos \beta)$. Als bovendien de invloed van de afname van de schijnbare taludhelling in rekening wordt gebracht door met $\cos \beta$ te vermenigvuldigen ontstaat de veel gebruikte factor $(\cos \beta - B/\bar{L}_0)$.

6.6.3. Klassieke golfoploopformule

Door het voorgaande te combineren verkrijgt men de door de Deltacommissie aanbevolen formule:

$$z_{z\%} = 8 R H_{\text{sign}} \tan \alpha \quad (6.15.)$$

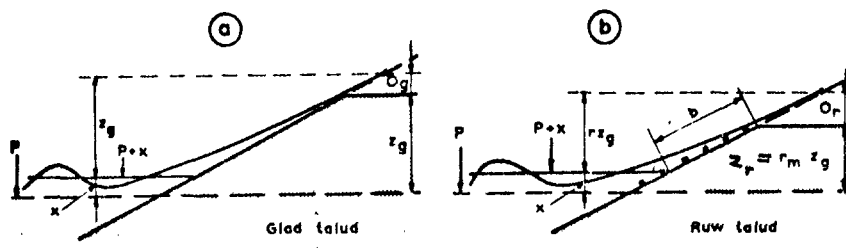
$$R = r \left(\cos \beta - \frac{B}{\bar{L}_0} \right) \text{ met } B/\bar{L}_0 < 0,25 \quad (6.16.)$$

waarin:

- r = een ruweheidsfactor ten opzichte van de ruwheid van een steenzetting van basalt
- β = invalshoek met de normaal
- H_{sign} = significante golfhoogte
- B = breedte van de berm
- \bar{L}_0 = gemiddelde golflengte
- α = helling van het talud

6.7. Involed verruwd talud op de overslag

Er zijn zekere nadelen verbonden aan verruwde taluds. Indien namelijk een stormvloedstand optreedt die hoger is dan de ontwerpwaterstand zal bij een ruw talud meer overslag optreden dan bij een glad talud.



figuur 6.11.: definitie parameters bij overslag

Stel het ontwerppeil is P en de ontwerpoploop voor het gladde, respectievelijk ruwe talud z_g en z_r .

De ruwe zone loopt van de ontwerpstand tot aan de kruin van de dijk, waarvan wordt aangenomen dat hij juist op het niveau van de ontwerpoploop ligt.

Dan geldt:

$$b = b_m = \frac{z_r}{\sin \alpha} \quad (6.17.)$$

en

$$z_r = r_m z_g \quad (6.18.)$$

met r_m = de waarde van r als de ruwe zone zich uitstrekt van de waterlijn tot (minstens) het hoogste punt dat door de oploop wordt bereikt.

Als er bij overigens gelijke omstandigheden een waterstand optreedt die een hoogte x boven de ontwerpstand ligt, dan zal de oploop de kruin voorbijschieten.

Voor dit geval wordt de fictieve oploophoogte O gedefinieerd als de oploophoogte boven de kruin van de dijk, die zou optreden als het talud doorliep zonder ruwheid (O_g bij glad talud en O_r bij ruw talud).

Er geldt nu:

$$O_g = x$$

$$O_r = x/r_m$$

Hieruit volgt:

$$O_r = O_g / r_m \quad (6.19.)$$

r_m kan circa 0,5 zijn, zodat de fictieve oploophoogte boven de kruin van een ruw talud dan ongeveer het dubbele is van de overeenkomstige waarde bij een glad talud.

Vanzelfsprekend geldt dit niet alleen voor taluds met ribbels en dergelijke, maar ook voor ruwe en doorlatende taluds en voor taluds met een berm op het niveau van de ontwerpwaterstand.

6.8. Invloed van een hoog voorland op de golfoploop

6.8.1. Algemeen

Indien de waterdiepte te groot is, dringen de golven ongehinderd door tot de bekleding op de dijk. Indien de waterdiepte op enige afstand voor de oever klein is, wordt de golf daardoor beïnvloed. Wanneer de golf contact krijgt met de bodem, dat wil zeggen in het overgangsgebied en in het ondiepe deel, wordt de orbitaalbeweging van de waterdeeltjes gestoord; de banen worden samengedrukt. Gelijkzeitig neemt de snelheid van de golf met kleiner wordende waterdiepte af. Door de vertraging neemt de golfhoogte toe ten gevolge van een proces dat "shoaling" heet, zonder dat de golfperiode wijzigt. De hoogte kan echter niet onbeperkt toenemen omdat de golven breken zodra een bepaalde golfhoogte wordt overschreden.

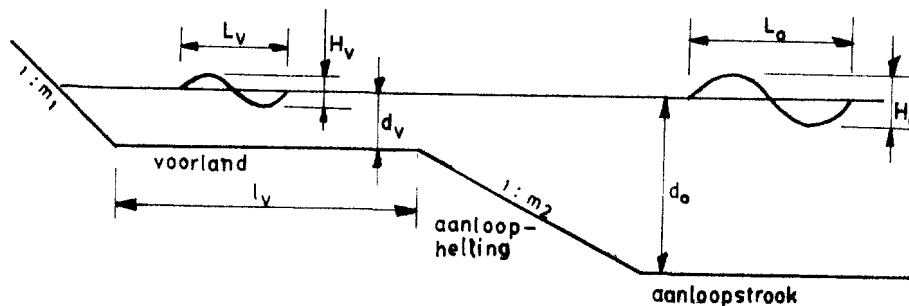
Als globale vuistregel kan men aanhouden dat de golven breken bij een significante golfhoogte van meer dan 0,4 à 0,5 maal de waterdiepte ter plaatse. Dit betekent dat de golfaanval heviger doordringt naarmate de waterstand hoger wordt.

De (geringe) waterdiepte stelt een limiet aan de golfwerking op het voorland en begrenst daarmee de grootte van de golfoploophoogte tegen de dijk (lit. 8).

6.8.2. Verandering van het golfbeeld op het voorland

De situatie van de bodem is als volgt: allereerst een gedeelte waar de waterdiepte dusdanig groot is, dat de golfbeweging geen invloed van de bodem ondervindt.

Dit wordt gevolgd door de aanloophelling die het diepe water met het voorland verbindt. Het voorland dat hier op volgt kan zowel horizontaal als flauw hellend zijn. De lengte van het voorland kan in de loop der tijd veranderen als gevolg van zandtransport, door de werking van golven en stromingen.



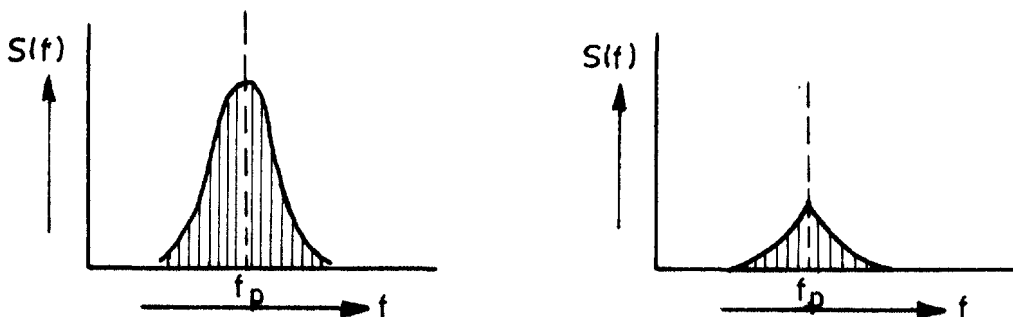
figuur 6.12.: definitieve parameters

De grootte van deze wijziging in de natuurlijke randvoorwaarden dient te worden afgeschat.

Voor het gunstige effect dat een voorland heeft op de golfoploop moet dan ook van de in de loop der tijd ontstane kleinste afmetingen van het voorland worden uitgegaan.

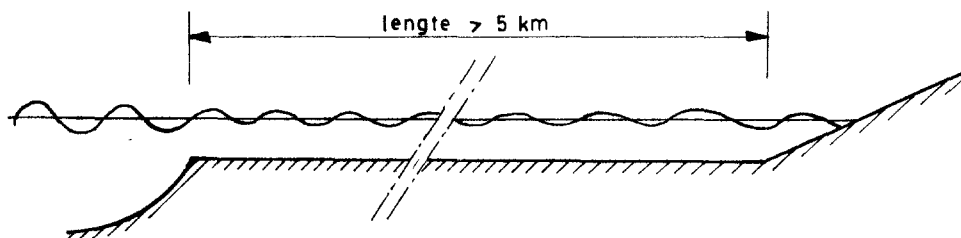
De waterdiepte op het voorland wordt sterk beïnvloed door het getij en eventuele opstuwing van het water door de wind.

Het golfspectrum voor de waterkering wordt bepaald door de piekperiode van het spectrum op diep water en de significante golfhoogte die na breking overblijft, zie figuur 6.13. Met andere woorden, de periode blijft constant.



figuur 6.13.: golfspectra op diep en ondiep water

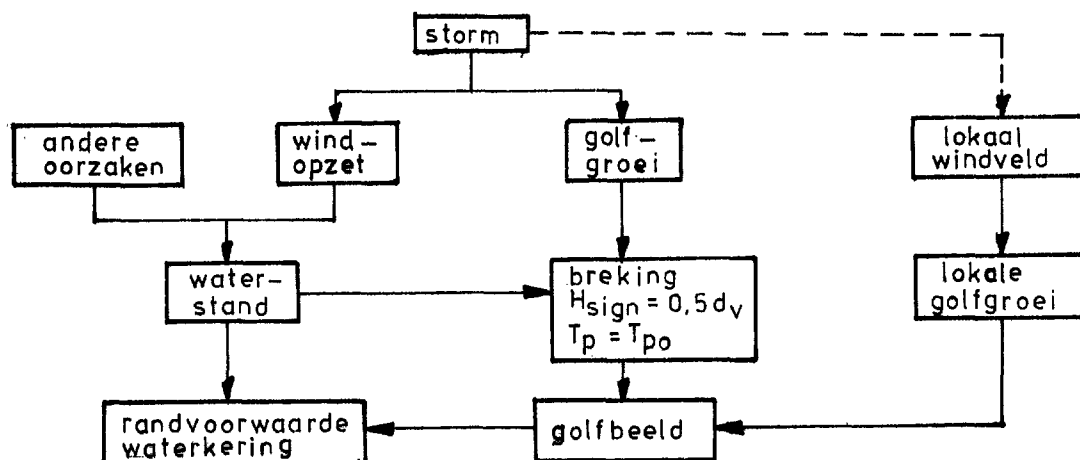
Een extra invloed treedt op indien het ondiepe voorland zo lang is dat de golven na breking opnieuw groeien.



figuur 6.14.: voorland van grote lengte

Het golfbeeld voor de waterkering bestaat nu uit twee componenten:

- een gebroken deiningscomponent die van dieper water afkomstig is
- een boven het voorland opgewekte windgolf.

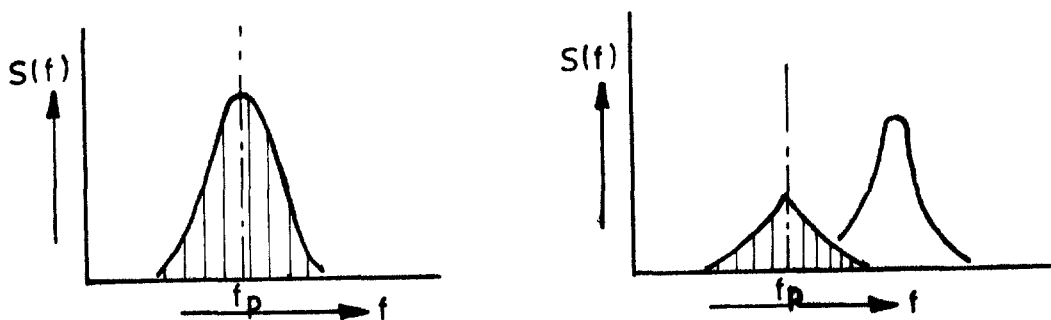


figuur 6.15.: de samenhang der natuurrandvoorwaarde bij aanwezigheid van een lang voorland

De totale golfhoogte voor de waterkering kan volgens lit. 5 worden benaderd door:

$$H_{\text{sign}} (\text{totaal}) = \sqrt{H_{\text{sign}}^2 (\text{gebroken}) + H_{\text{sign}}^2 (\text{wind})} \quad (6.20.)$$

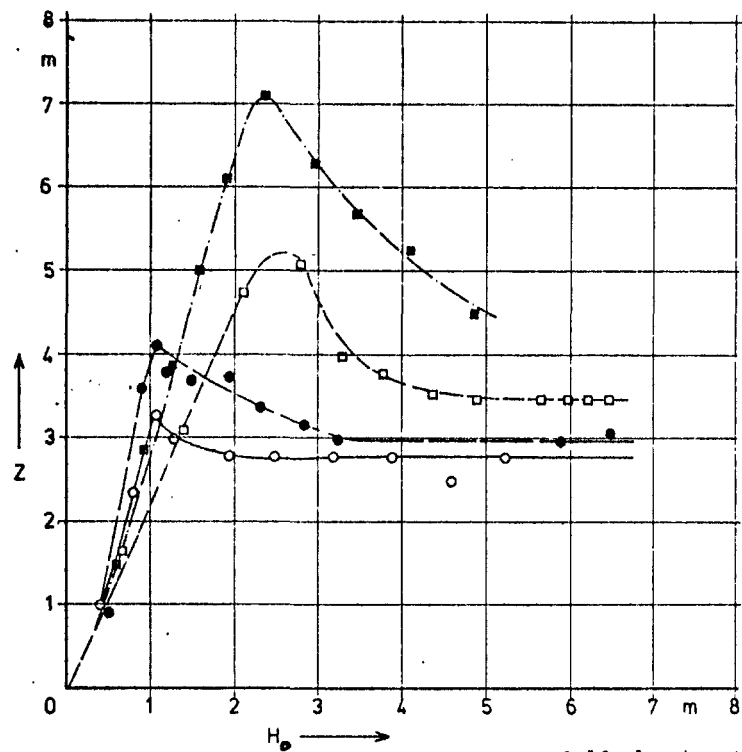
Het tweeledig karakter van het golfbeeld is meestal in het spectrum te herkennen omdat de lokaal opgewekte golven in verband met de korte strijklengte een hogere frequentie hebben dan de golven op diep water, zie figuur 6.16.



figuur 6.16.: golfspectra op diep en ondiep water

6.8.3. Voorbeelden van resultaten van golfoploop bij een bepaalde configuratie van voorland en talud (lit. 6)

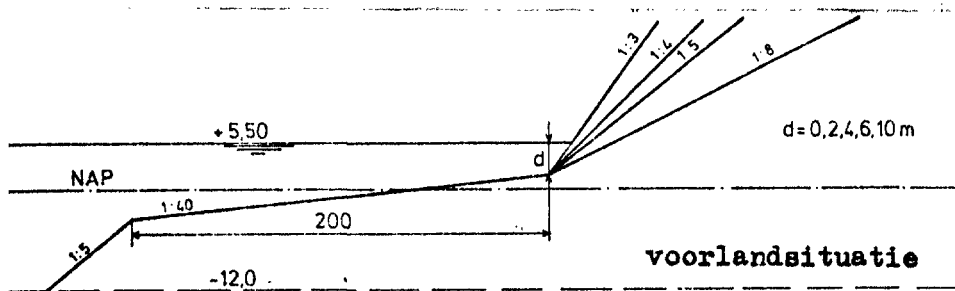
In de literatuur worden met betrekking tot voorlandsituaties vrij veel gegevens gepresenteerd van de golfoploop bij een bepaalde vaste geometrische configuratie van voorland en dijklichaam. Dit heeft als nadeel dat niet is na te gaan in welke mate de waterdiepte op het voorland en het talud van de dijk de waarde van de golfoploophoogte bepalen. Teneinde een indruk te geven van de golfoploopreducerende werking van een hoog voorland is in figuur 6.17. de hoogte (z) weergegeven als functie van de golfhoogte bij een regelmatige golf.



helling boventalud = 1:4
schaalmodel/prototype = 1:50

○ d = 2 m t = 8,5 s ———
● d = 2 m t = 11 s - - - -
□ d = 4 m t = 8,5 s - - - -
■ d = 4 m t = 11 s ———

Golfoploophoogte als functie van de golfhoogte bij aanwezigheid van een hoog voorland



figuur 6.17.: voorbeeld beperking van de golfoploop bij de aanwezigheid van een voorland

Alle krommen vertonen een vrijwel identiek verloop: allereerst een bij benadering lineair verband tussen golfoploophoogte en golfhoogte tot de maximale golfoploop wordt bereikt. Verdere toeneming van de golfhoogte geeft een afname van de golfoploophoogte te zien tot een zekere limietwaarde, hierna blijft de oploophoogte constant.

In het eerste gebied waar de golfoploop lineair toeneemt heeft het voorland een negatief effect op de golfoploop omdat door de beperkte diepte van het voorland de hoogte van de golven groter wordt, waarbij de golven pas op het talud breken. Wordt de hoogte tenslotte nog wat opgevoerd, dan breekt de golf reeds voor het talud, waardoor een deel van de energie reeds vroegtijdig wordt vernietigd, ten koste van de golfoploop.

Bij verdere vergroting van de golfhoogte schuift het breekpunt van de golf verder van de teen van het talud af, waarbij de hoogte ter plaatse van het talud een min of meer constante (minimale) waarde krijgt.

6.8.4. Enkele conclusies (lit. 8) (vlak en horizontaal voorland)

- a. De waterdiepte op het voorland is de bepalende invloedsfactor op de grootte van de golfhoogte op het voorland. De verhouding H_v/d_v varieert tussen 0,3 en 0,5 met een gemiddelde van circa 0,4.
- b. De verhouding tussen de golfhoogte op diep water en de waterdiepte op het voorland, waarbij de golf zich nog juist zonder te breken over het voorland voortplant bedraagt

$$(H_o/d_v)_{\text{grens}} = 0,52 \text{ à } 0,56 \quad (6.21.)$$

- c. De breedte van de brekerzone bedraagt 0,5 à 2 maal de golflengte op diep water en neemt ongeveer lineair toe als functie van de golfsteilheid, zie figuur 6.18. De brekerzone is het gebied dat de golven nodig hebben om tot volledige breking te komen.

Voorbeeld:

$$\begin{aligned} \text{Gegeven: } H_o &= 4,0 \text{ m} \\ T_o &= 8,5 \text{ s} \\ d_v &= 3,5 \text{ m} \end{aligned}$$

Gevraagd: breedte van de brekerzone (L_B).

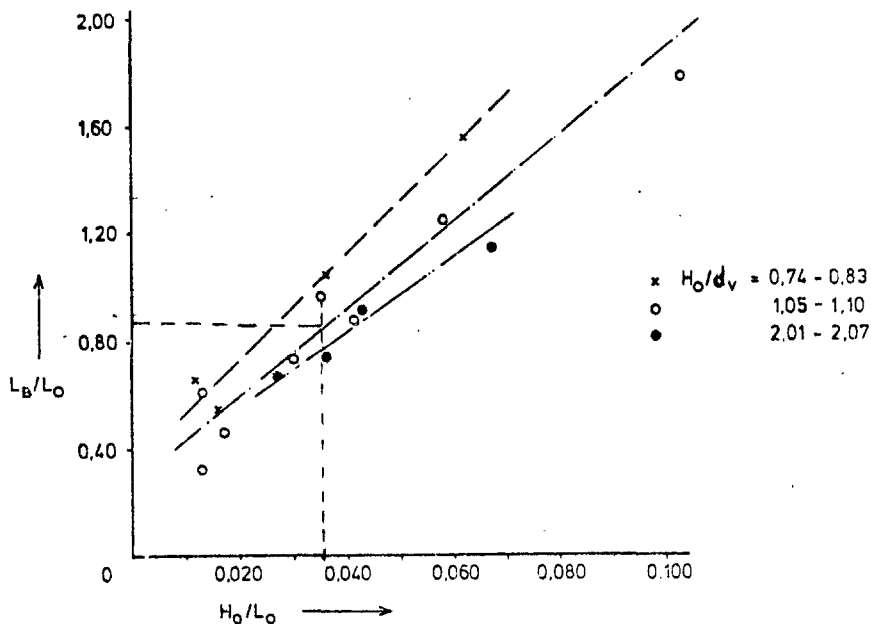
Oplossing: $L_o = \frac{T_o^2 g}{2} = 113 \text{ m}$

$H_o/d_v = 1,14$

$H_o/L_o = 0,035$

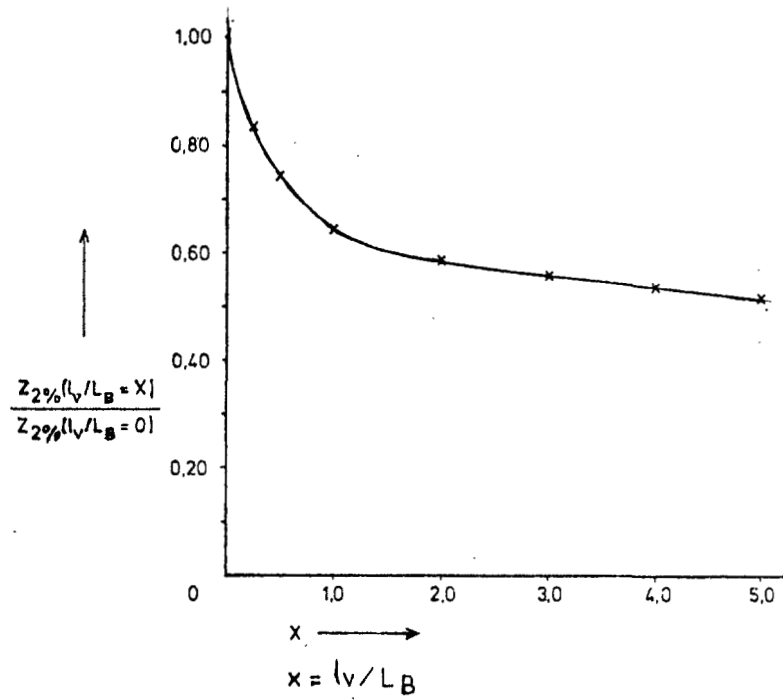
met behulp van figuur 6.18. vindt men dan $L_B/L_o \approx 0,9$

dus $L_B \approx 100 \text{ m}$



figuur 6.18.: breedte van de brekerzone als functie van de golfsteilheid voor vaste waarden van de parameter H_o/d_v

- d. De golfoploop reducerende werking van een voorland is afhankelijk van de verhouding tussen de breedte van het voorland en de breedte van de brekerzone.
Is deze verhouding groter dan één ($L_v/L_B > 1$), dan heeft een verdere vergroting van de voorlandbreedte slechts een geringe afname van de golfoploop tot gevolg, zie figuur 6.19.



figuur 6.19.: golfploophoogte met een overschrijdingspercentage van 2% als functie van de voorlandbreedte de waterdiepte op het voorland bedraagt 3 m en de steilheid van de aanloophelling is 1 : 5

Literatuur

1. Battjes, J.A.
Golfoploop en golfoverslag
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen
's Gravenhage, 1972
2. Invloed van bermen op de oploop van regelmatige golven
Verslag modelonderzoek M 1130
Waterloopkundig Laboratorium, oktober 1976
3. Battjes, J.A.
Computation of set-up longshore currents, run-up and overtopping
due to wind-generated waves
Proefschrift
Technische Hogeschool, Delft, juni 1974
4. Roos, A.
Experimenteel onderzoek naar het gedrag van tegen taluds oplopende
regelmatige golven
Afstudeerverslag Technische Hogeschool Delft, oktober 1972
5. Agema, J.F.
Waterkeringen
Collegedictaat f3/f11
Technische Hogeschool, Delft
6. Golfoploop op een dijk met hoog voorland
Rapport modelonderzoek M 1084
Waterloopkundig Laboratorium, juli 1971
7. Over het berekenen van Deltaprofielen voor dijken langs de Wester-
schelde
Rijkswaterstaat
Publikatie van de Directie Zeeland
Studiedienst Vlissingen, juli 1972

Literatuur (vervolg)

8. Most, H. van der
Golfvervorming bij een hoog voorland
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 1979

9. Groen, P. en Dorrestein, R.
Zeegolven
Staatsdrukkerij, 's Gravenhage, 1976

10. Bruins, M.A.
Golfoploonderzoek aan de Afsluitdijk, oktober 1981
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen

11. Hunt, I.A.
Design of seawalls and breakwaters
Proc. ASCE, nr. 85, WW 3, September 1959

Hoofdstuk 7 - Sterkte van de bekleding

7.1. Inleiding

Na de aandacht die in dit rapport is gegeven aan de hydraulische belastingen op de bekleding, wordt in dit hoofdstuk de aandacht gericht op de sterkte van de bekleding.

Voor de bekleding van een dijk kunnen drie typen worden onderscheiden:

1. losliggende elementen
2. gezette elementen
3. plaatvormige bekleding

Er valt een geleidelijke technische ontwikkeling van type 1 naar type 3 te onderkennen, zie figuur 7.1.

Allereerst zal hierna kort worden ingegaan op de stabiliteit van de losliggende elementen.

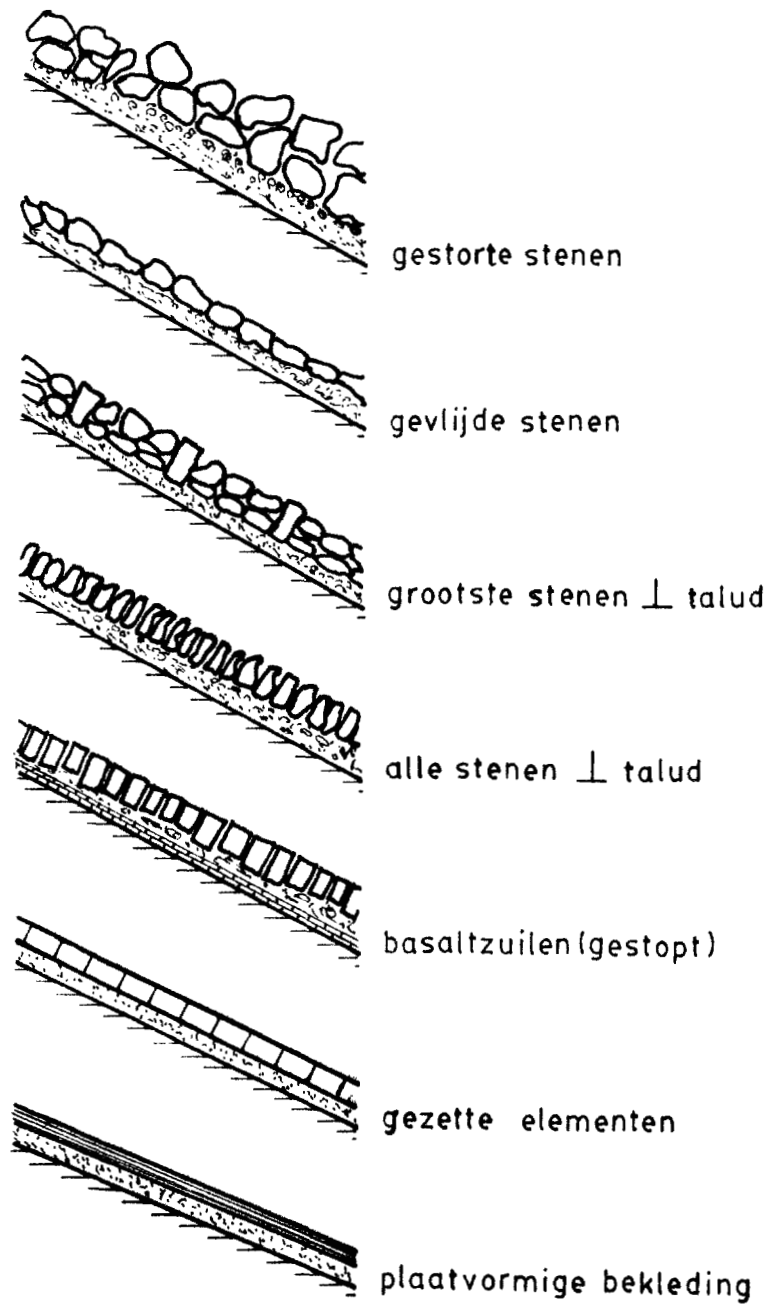
De stabiliteit van gezette elementen krijgt daarna de meeste aandacht. Door het Waterloopkundig Laboratorium en het Laboratorium voor Grondmechanica wordt onderzoek gedaan naar de stabiliteit van een gezette bekleding onder golfaanval.

Daar plaatvormige bekleding in Nederland niet veel wordt toegepast, wordt hier van een behandeling afgezien.

Bij het schrijven van dit hoofdstuk is gebruik gemaakt van de tot nu toe verkregen resultaten uit dit onderzoek en diverse literatuurbronnen. Te zijner tijd zal, wanneer het onderzoek meer concrete resultaten heeft opgeleverd, dit hoofdstuk gewijzigd en aangevuld dienen te worden.

7.2. Stabiliteit losliggende elementen

Met losliggende elementen worden bedoeld elementen die niet nauwkeurig tegen elkaar zijn geplaatst, waardoor weinig of geen stabiliteit aan de omringende elementen kan worden ontleend.



figuur 7.1.: Technische ontwikkeling in de bekledingstypen

De stabiliteit van een enkel element onder invloed van de waterbeweging kan onder andere op de volgende twee wijzen worden verstoord:

1. stabiliteit onder golfaanval
2. stabiliteit onder stromingscondities

7.2.1. Stabiliteit onder golfaanval

Voor golfbrekers zijn vele empirische formules opgesteld om de zwaarte van deze elementen te bepalen. Enige schade aan de golfbreker wordt hierbij geaccepteerd.

De algemene vorm van deze formules is:

$$W = \frac{\rho_b}{\Delta^3} H^3 N f(\alpha) \quad (7.1.)$$

waarin:

W = gewicht van het element in de lucht

ρ_b = soortelijke massa van het element

ρ_w = soortelijke massa van water

$\Delta = \frac{\rho_b - \rho_w}{\rho_w}$ = relatieve dichtheid van het element

H = maatgevende golfhoogte

α = hellingshoek van het talud

N = empirische te bepalen coëfficiënt

De bekendste formules zijn die van Iribarren (lit. 30) en Hudson (lit. 28):

$$W = \frac{\rho_b g f H^3}{\Delta^3 (\mu \cos \alpha \pm \sin \alpha)^3} \quad (\text{Iribarren}) \quad (7.2.)$$

en

$$W = \frac{\rho_b g H^3}{K_D \Delta^3 \cot(\alpha)} \quad (\text{Hudson}) \quad (7.3.)$$

De grootheid μ staat voor de wrijvingscoëfficiënt tussen de elementen en de ondergrond.

De grootheden K_D en f zijn stabiliteitscoëfficiënten, die in grafische of tabellarische vorm ter beschikking staan, zie onder andere lit. 5. In de praktijk maakt men het meest gebruik van de formule van Hudson omdat vrij veel onderzoek is gedaan naar de K_D -waarden van diverse typen constructies. De oorspronkelijke proeven van Hudson werden verricht met regelmatige golven. Veelal wordt aangenomen dat men bij benadering de monochromatische golfhoogte H mag vervangen door de significante golfhoogte H_{sign} .

In de formules (7.2.) en (7.3.) wordt de invloed van de golf op de stabiliteit alleen gekarakteriseerd door de golfhoogte H .

Uit meer recent onderzoek, zie lit. 23, 24, 25 en 26, is gebleken dat ook de golfsteilheid grote invloed heeft.

Figuur 7.2., ontleend aan lit. 24 en 25 geeft een voorbeeld hoe de parameter N_{ZD} varieert met ξ .

waarin:

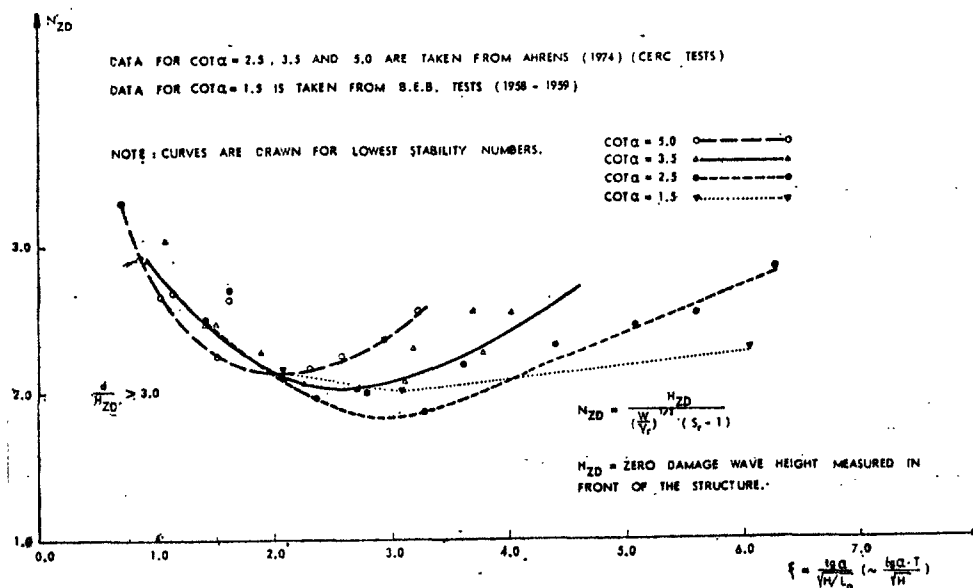
$$N_{ZD} = \frac{H}{\Delta D_n} = \text{stabiliteitsparameter bij geen schade}$$

$$H = \text{golfhoogte}$$

$$\Delta = \text{relatieve dichtheid} = \frac{\rho_b - \rho_w}{\rho_w}$$

$$D_n = \text{nominale dikte (equivalent met de afmetingen van een kubus)}$$

$\xi = \text{tg } \alpha / \sqrt{H/L_0}$
 $\alpha = \text{hellingshoek talud}$
 $L_0 = \text{golflengte op diep water}$



figuur 7.2.: stabiliteitsgetal N_{ZD} versus ξ

In de figuur wordt de invloed van de golfsteilheid op de stabiliteit duidelijk gedemonstreerd.

7.2.2. Stabiliteit onder stationaire stromingscondities

De Spanjaard Iribarren heeft een onderzoek ingesteld naar de relatie tussen stroomsnelheid en steengewicht (lit. 12, 16 en 30).

Hij vond voor een horizontaal liggend blok:

$$W \geq \frac{f_2 \rho_b V^6}{2.3 g \Delta^3} \quad (7.4.)$$

waarin:

- W = gewicht van het blok in de lucht
- f_2 = een constante, afhankelijk van vorm en ruwheid van het blok, en de wrijving met de ondergrond
- ρ_b = soortelijke massa van het blok
- ρ_w = soortelijke massa van water
- V = stroomsnelheid
- g = versnelling van de zwaartekracht
- Δ = relatieve dichtheid van het blok

Voor stromingen op een talud moet de gegeven formule worden vermenigvuldigd met een factor C, aldus:

$$W > \frac{f_2 \rho_b V^6}{g \Delta^3} \cdot C \quad (7.5.)$$

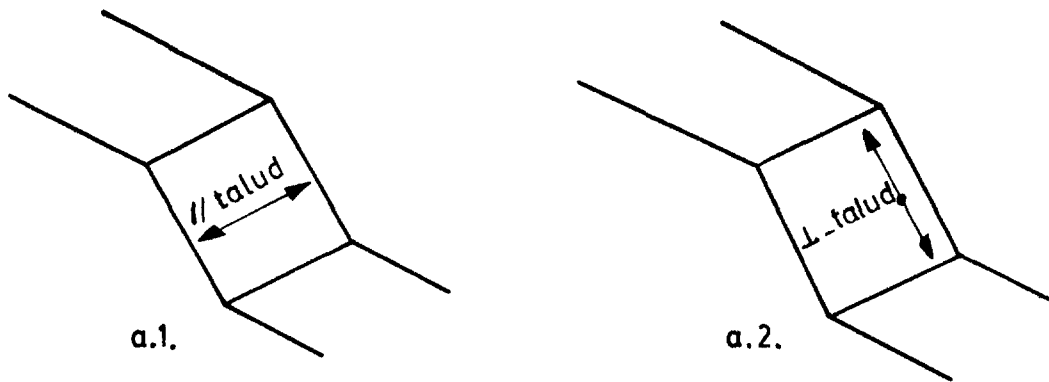
De stromingen kunnen diverse richtingen hebben:

a. langs het talud:

- a.1. evenwijdig lengterichting talud
- a.2. loodrecht op het talud
 - a.2.1. loodrecht talud af
 - a.2.2. loodrecht talud op

b. uit het talud

- b.1. loodrecht uit het talud
- b.2. horizontaal uit het talud



figuur 7.3.: stromingen langs het talud



figuur 7.4.: stromingen uit het talud

In tabel 1 wordt een overzicht gegeven van de factor C als functie van de stromingscondities.

stromings- conditie	factor C
a.1.	$\left[\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha / f_1 \right]^{-3/2}$
a.2.1.	$\left[\cos \alpha - \sin \alpha / f_1 \right]^{-3}$
a.2.2.	$\left[\cos \alpha + \sin \alpha / f_1 \right]^{-3}$
a.1. en a.2.1.	$\cos \beta \left[\sqrt{\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha \cos^2 \beta / f_1} - \sin \alpha \cdot \sin \beta / f_1 \right]^{-3}$
a.1. en a.2.2.	$\cos \beta \left[\sqrt{\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha \cos^2 \beta / f_1} + \sin \alpha \cdot \sin \beta / f_1 \right]^{-3}$
a.1. en b.1.	$\left[(\cos \alpha - i/\Delta)^2 - \sin^2 \alpha / f_1 \right]^{-3/2}$
a.2.1. en b.1.	$\left[\cos \alpha - i/\Delta - \sin \alpha / f_1 \right]^{-3}$
a.2.2. en b.1.	$\left[\cos \alpha - i/\Delta + \sin \alpha / f_1 \right]^{-3}$

Tabel 1: overzicht diverse factoren C

waarin:

α = hellingshoek van het talud

f_1 = wrijvingscoëfficiënt tussen element en ondergrond

β = $\arctan \left(\frac{k_2}{k_1} \right)$ of $k_2 = k_1 \tan \beta$

k_1 = stromingskracht gericht langs het talud (a.1.)

k_2 = stromingskracht gericht loodrecht op het talud (a.2.)

i = verhang van het grondwater ter plaatse van het materiaal

$\Delta = \frac{\rho_b - \rho_w}{\rho_w}$ = relatieve dichtheid van het materiaal

7.3. Stabiliteit gezette elementen onder golfaanval

7.3.1. Algemeen

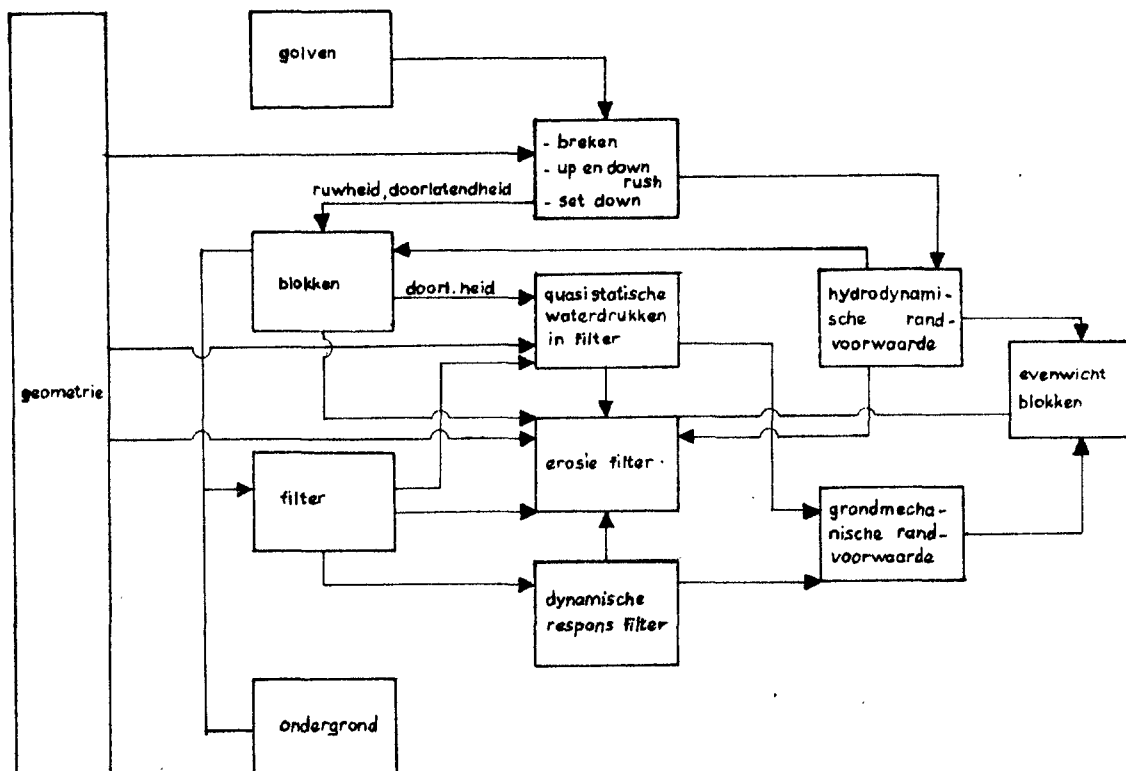
De stabiliteit van een bekleding opgebouwd uit gezette elementen wordt door diverse variabelen beïnvloed, zoals:

- a. Eigenschappen van de constructie (bekleding plus onderlaag)
 - a.1. Gewicht en/of afmetingen van het gezette element
 - a.2. Soortelijke massa van het materiaal
 - a.3. Wrijving van de elementen met de onderlaag en tussen de elementen onderling
 - a.4. Drukkrachten (voorspanning) in het vlak van de bekleding
 - a.5. Interlock tussen de elementen onderling
 - a.6. Doorlatendheid van bekleding en onderlaag
 - a.7. Taludhelling en vorm van het talud
 - a.8. Filterstabiliteit van de onderlaag
 - a.9. Erosiebestendigheid van de onderlaag
 - a.10. Invloed van de overgangsconstructies en beëindigingen op de sterkte van de bekleding
 - a.11. Ruwheid en waterbergend vermogen van de bekleding
 - a.12. Eigenschappen op de lange duur

- b. Hydraulische randvoorwaarden
 - b.1. Golfspectrum
 - b.2. Groepering van de golven
 - b.3. Hoek van golfaanval
 - b.4. Brekertype en plaats van breking
 - b.5. Golfoploop
 - b.6. Windeffecten
 - b.7. Golfvervormingen voor de dijk
 - b.8. Stromingen
 - b.9. Momentane waterniveau
 - b.10. Frequentie van voorkomen van een bepaalde hydraulische randvoorwaarde op een bepaalde plaats op het talud

Vorenstaande lijst is waarschijnlijk niet volledig, het geeft echter de omvang van het probleem aan. Het kwantitatieve effect van de vele hierboven genoemde variabelen is nog onvoldoende bekend.

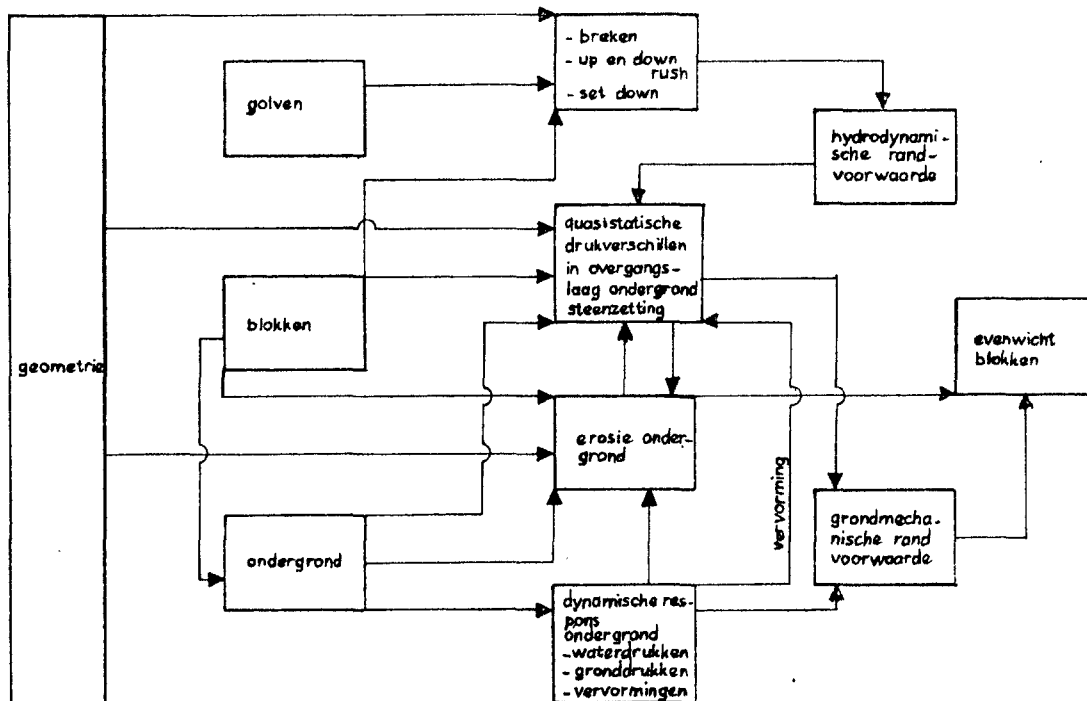
Een globale aanduiding van de bezwijkmechanismen voor een gezette bekleding geplaatst op een filter respectievelijk op klei, is achter-eenvolgens in figuur 7.5. en 7.6. gegeven.



figuur 7.5.: bezwijkmechanismen gezette bekleding op een filter

Bezwijken van een constructie of een constructie-onderdeel treedt op als de optredende belasting de beschikbare sterkte overtreft. Evenals bij traditionele bouwconstructies kan daarbij sprake zijn van een instantaan bezwijken bij hoge belasting en een bezwijken als gevolg van gematigde maar frequent voorkomende belasting (onder andere erosieverschijnselen).

Het eerste type is met name van belang voor de bekleding, het tweede voor de onderlaag en daardoor indirect voor de bekleding.



figuur 7.6.: bezwijkmechanismen gezette bekleding op klei

In deze leidraad zal voornamelijk worden uitgegaan van het eerste type, bezwijken ten gevolge van een hoge belasting.

Het begrip sterkte dient te worden gezien voor de individuele steen en voor de glooiing als geheel.

Bij de individuele steen is de som van uitwendige belastingen en reactiekrachten nul in de fase van grensstabiliteit. Bij een blok in een gezette glooiing kunnen langs het talud gerichte belastingen op naastliggende stenen worden overgedragen, waardoor het bezwijkmechanisme anders zal zijn dan bij de in 7.2. genoemde losgestorte bekledingen.

Bepalend is nu de weerstand tegen oplichten en in mindere mate tegen kantelen.

Deze weerstand ontleent het blok aan zijn eigen gewicht, eventueel verhoogd met wrijvingskrachten door de invloed van naastliggende blokken.

Wanneer de wrijvingskrachten tussen de stenen groot zijn of door de aanwezigheid van een op andere wijze verkregen samenhang (interlock-systemen), dan is niet de individuele steen maar de glooiing als totaal bepalend voor de stabiliteit. Horizontale en verticale reactiekrachten worden nu door de glooiing in zijn geheel opgenomen.

De evenwichtsbeschouwing ten aanzien van opdrijven dient nu niet op het enkele blok, maar op een gehele plaat te worden betrokken. Het uitvoeren van een berekening voor de stabiliteit van de glooiing als geheel wordt bemoeilijkt door:

- onbekendheid van de grootte van het oppervlak dat zich als plaat gaat gedragen
- onbekendheid van de mate waarin de blokken tegen elkaar worden gedrukt (voorspankracht)
- onbekendheid van de vervormingseigenschappen van de plaat
- onduidelijk bezwijkcriterium

De mate van voorspanning, die overigens in de diverse richtingen een verschillende grootte kan hebben, zal afhankelijk zijn van de vervormingstoestand van de glooiing als geheel. Deze vervormingstoestand wordt weer beïnvloed door de voorgeschiedenis van de hydraulische belastingen op het talud en ondersteunende voetconstructies. Ook inhomogeniteiten in de ondergrond en verschillende aandrukkrachten bij het zetten van de blokken zorgen ervoor dat de voorspanning slecht gedefinieerd is. Waar de vervormingen in de glooiing evenwijdig aan het talud gering zijn, zullen de spanningen zich gaan concentreren, hierdoor kunnen spanningspaden ontstaan waartussen de blokken vrij los in de glooiing zitten. Uit trekproeven (lit. 35) blijkt inderdaad dat de grootte van de kracht waarmee een blok uit het talud wordt getrokken slecht is gecorreleerd met de plaats op het talud.

Uit het voorgaande kan worden geconcludeerd dat de grootte van de voorspanning per plaats en per tijdstip voortdurend kan variëren en daardoor als een stochast dient te worden opgevat.

De grootte van de plaat, het meewerkend oppervlak, wordt anderzijds weer beïnvloed door de vrij onbekende voorspanning.

Voor blokkensystemen die koud tegen elkaar zijn geplaatst, is het een veilige benadering om bij de stabiliteitsbeschouwingen van het losliggende blok uit te gaan.

Voor systemen met één of andere vorm van interlock (spletten opgevuld met granulair materiaal, in- en uitstekende delen, kabels etc.) is de benadering van het losliggende blok daarentegen een te ongunstige.

In het kader van het lopende WL- en LGM-onderzoek zal worden getracht meer inzicht te verkrijgen in het gedrag van de glooiing als geheel; voorshands zijn hiervan nog geen resultaten te melden.

Bij het aanbrengen van bekledingen die dank zij een betrouwbare interlock een hoge stabiliteit onder golfaanval bezitten, dient de sterkte van andere delen van de constructie niet te worden verwaarloosd.

Zo is het denkbaar dat de toelaatbare golfhoogten voor de steenzetting in het onderliggende filter grote drukvariatiën opwekken. Hierdoor zou materiaal uit kunnen spoelen, migratie van het filter evenwijdig aan het talud en indringing van het zand uit het dijklichaam kunnen optreden, waardoor op de langere termijn de steenzetting wordt ondermijnd of, wat gunstiger is, grote vervormingen ondergaat. De sterkte van de filters en ondergrond wordt in het geval van erosie veelal beschreven door de kritieke verhangen van de lagen en laagovergangen. Onder het kritieke verhang wordt verstaan: het verhang waarbij nog net geen beweging van deeltjes optreedt. Over het verschijnsel in verband met een gezette steenbekleding is nog weinig bekend.

Bij gezette blokken op een onderlaag van klei kan erosie van deze klei een gevolg zijn van een te laag lutumgehalte of van de aanwezigheid van zandlenzen. De erosie kan binnen de laag optreden en de vorm van piping aannemen of over de laagscheiding heen plaatsvinden. Uit de door het WL uitgevoerde proeven in het kader van het ontwerp van de Oesterdam in de Deltagoot blijkt een bekleding van blokken koud tegen elkaar op een onderlaag van klei gezet een grote stabiliteit te vertonen.

Door erosie van ondeugdelijke klei kan de stabiliteit echter negatief worden beïnvloed, waardoor het voordeel van grotere stabiliteit verloren gaat. Ook eventuele uitdroging en scheurvorming van de klei onder de blokken is nadelig.

Een ander punt dat niet mag worden verwaarloosd zijn de discontinuïteiten in de constructie, zoals palen, trappen, betonplanken, teenconstructies, overgangen van het ene type naar het andere type bekleding enzovoort. Ze leveren verstoringen in het krachtenspel en hebben daardoor invloed op de plaatselijke sterkte.

Ten opzichte van een continue glooiing zal dit tot een reductie van de toelaatbare golfhoogte kunnen leiden. Kwantitatieve uitspraken hieromtrent zijn voorshands nog maar beperkt mogelijk.

Alvorens te trachten meer inzicht te verkrijgen in de beschrijving van de diverse variabelen wordt een "black-box" benadering gegeven van diverse typen bekleding. Hierbij wordt de stabiliteit van het element onder golfaanval met behulp van een stabiliteitsparameter uitgezet tegen een karakteristieke grootte die de helling van het talud en de golfsteilheid bevat. Uit deze beschouwingen kunnen enkele globale tendenzen worden afgeleid betreffende de stabiliteit.

Daarna zal worden getracht de black-box enigszins te openen teneinde een meer fundamenteel inzicht te krijgen in het gedrag van de gezette bekleding.

Wanneer alle schademechanismen in samenhang met de hydraulische belasting in voldoende mate bekend zijn, is het in principe mogelijk een rekenmodel te vervaardigen waarmee de zwaarte van een gezette bekleding kan worden bepaald. Hierbij valt te denken aan een geïntegreerde ontwerpprocedure, ontwerpkaarten, ontwerpnomogrammen, ontwerpformules en dergelijke.

Het onderzoek is echter nog niet zover gevorderd. In deze leidraad zal, in afwachting van het nog lopende onderzoek, moeten worden volstaan met het aangeven van enkele bouwstenen voor een in een later stadium te voltooien model van het totale verschijnsel.

7.3.2. "Black-box" benadering

A l g e m e e n

Teneinde de keuze van de dimensieloze grootheden $\frac{H}{\Delta d}$ en ξ bij het weer-
geven van proefresultaten te illustreren wordt hier een korte en glo-
bale afleiding gegeven.

Voor het evenwicht van een losliggend blok loodrecht op het talud
geldt (zie figuur 7.7.):

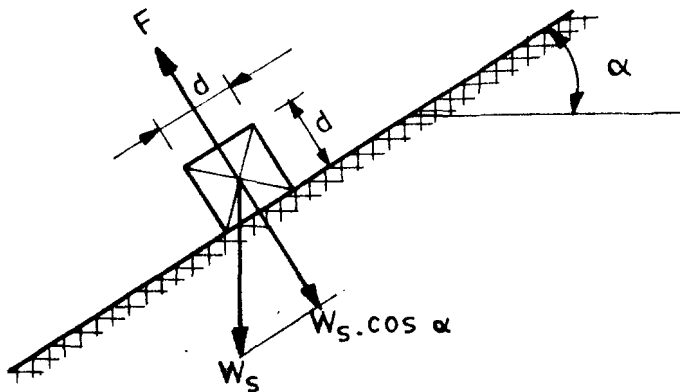
$$F < W_s \cos \alpha \quad (7.6.)$$

waarin:

F = belasting als gevolg van de golfbreking op het blok uit-
ge oefend

W_s = gewicht van het blok ondergedompeld in water

N.B.: traagheidskrachten zijn bij deze eenvoudige beschouwing ver-
waarloosd



figuur 7.7.: evenwicht losliggend blok op talud

Stel $F = f(\xi, H, \rho_w, g, d^2)$ (7.7.)

waarin:

$\xi = \tan \alpha / \sqrt{H/L_0}$ (kriterium voor het type van de breker,
zie hoofdstuk 5)

H = golfhoogte

ρ_w = soortelijke massa van water

g = versnelling zwaartekracht

d = blokafmetingen

$L_0 = \frac{g T^2}{2\pi}$ met T = golfperiode

Stel verder:

$$F = a(\xi) \rho_w g H d^2 \quad (7.8.)$$

$$W_s = (\rho_b - \rho_w) g b d^3 \quad (7.9.)$$

waarin:

ρ_b = soortelijke massa van het blok

b = constante (afhankelijk van de vorm van het blok)

Verder uitgewerkt geeft dit:

$$W > \frac{\rho_b g H^3}{K_D(\xi) \Delta^3 \cos^3 \alpha} \quad (7.10.)$$

met:

$$\Delta = \frac{\rho_b - \rho_w}{\rho_w}$$

W = gewicht van het blok in lucht

V = volume van het blok

$$K_D(\xi) = \frac{H^3}{V \Delta^3 \cos^3 \alpha} \quad (7.11.)$$

of

$$K_D(\xi)^{1/3} = \frac{H}{\Delta d \cos \alpha} \quad (7.12.)$$

Voor niet al te grote α geldt $\cos \alpha \approx 1$, formule (7.12.) wordt dan:

$$[K_D(\xi)]^{1/3} = \frac{H}{\Delta d} \quad (7.13.)$$

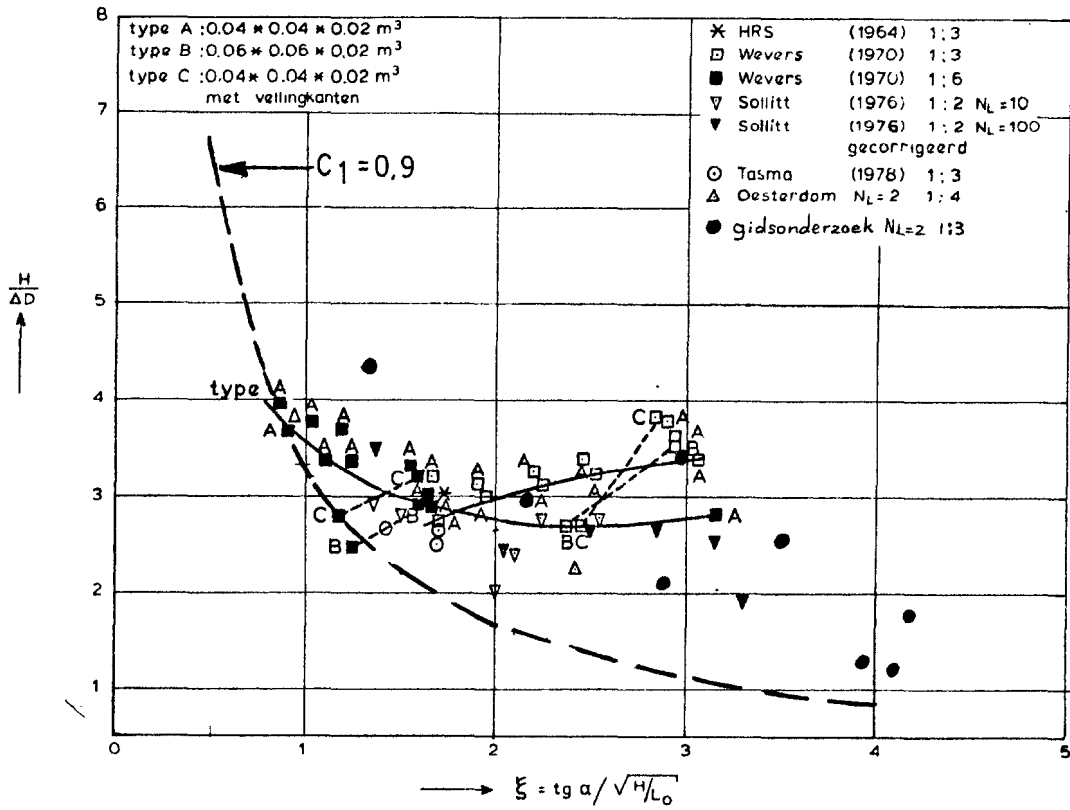
Door nu de stabiliteitsparameter $H/\Delta d$ tegen ξ uit te zetten voor elk type constructie krijgt men inzicht in de stabiliteit van het ene type constructie ten opzichte van het andere.

Opmerking: De bovenstaande afleiding is een zeer sterke schematisatie. De invloed van de taludhelling wordt in (7.13.) alleen door de parameter ξ weergegeven, de werkelijkheid is veelal ingewikkelder waardoor in de $H/\Delta d - \xi$ grafiek verschillende curven bij verschillende taludhellingen ontstaan. Verder blijkt veelal dat bij diverse proeven de parameter ξ niet voldoende is gevarieerd om de grafiek in zijn geheel te tekenen. Ook is het schademoment niet altijd duidelijk gedefinieerd.

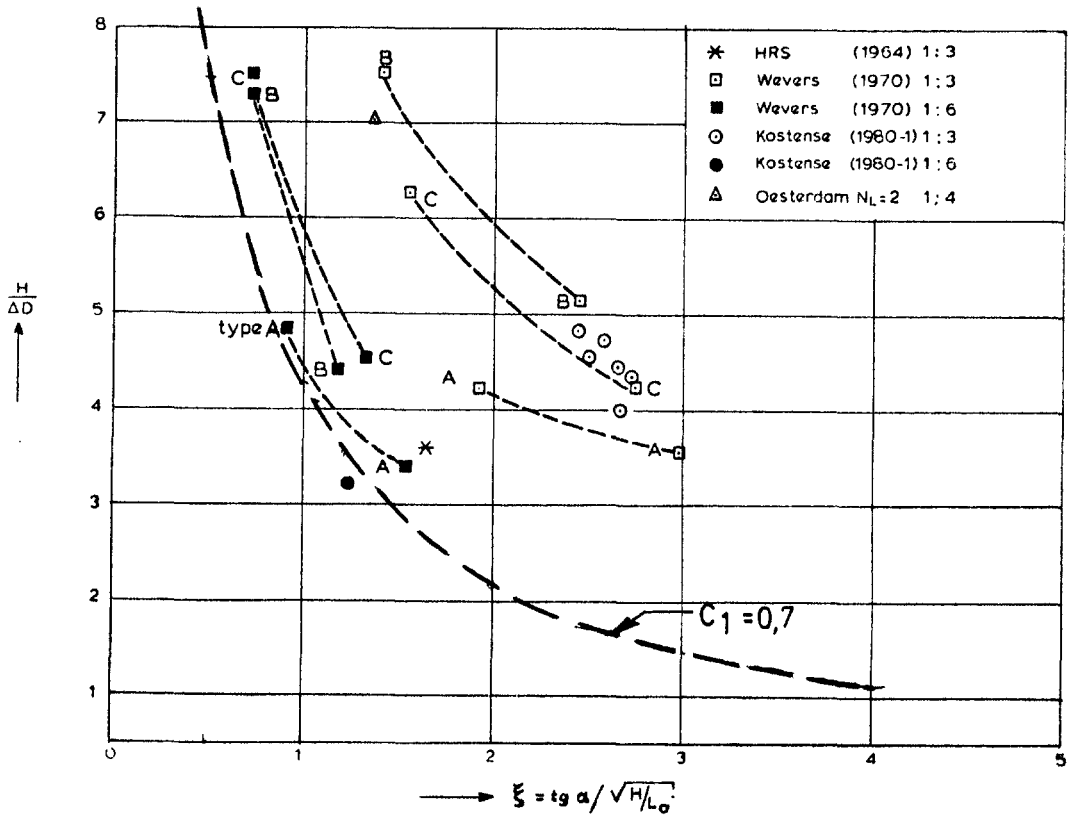
Kort overzicht van in de literatuur aangetroffen meetwaarden

In de figuren 7.7. t/m 7.8. worden de in de diverse modelproeven gemeten waarden samengevat.

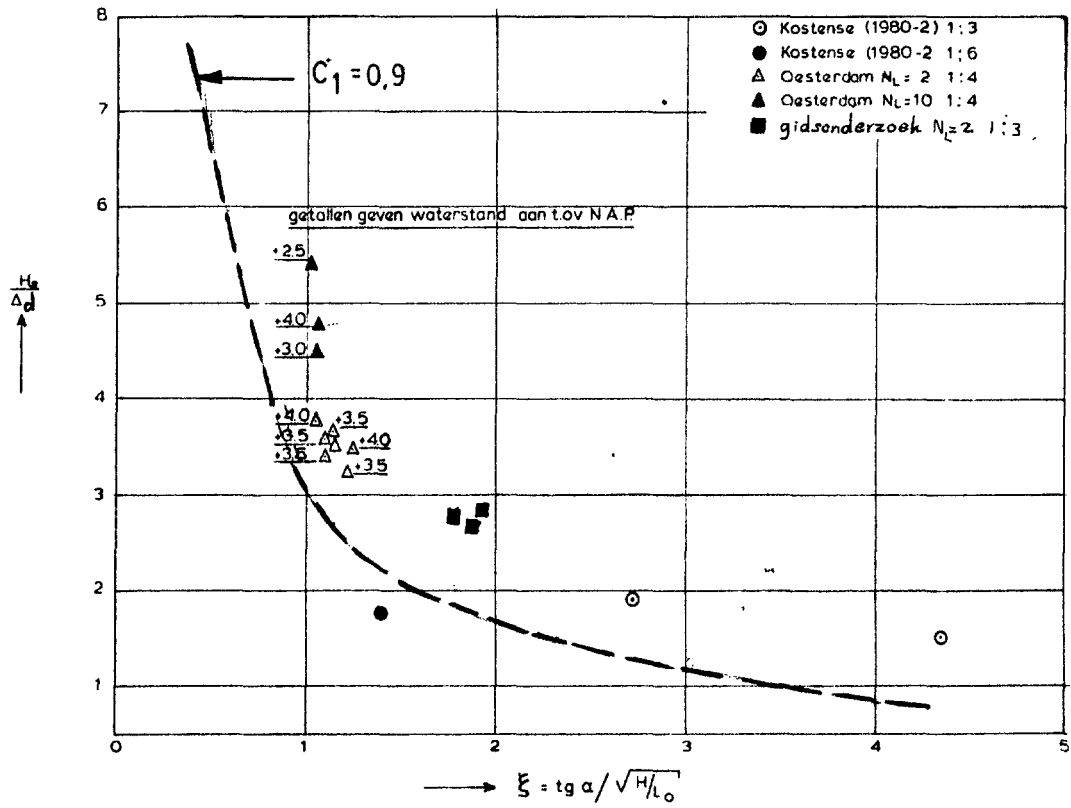
Hierbij zijn allerlei modelschalen, diktes van onderlagen, doorlatendheden en dergelijke op één hoop geveegd, waardoor de onderlinge vergelijking slechts globaal kan zijn.



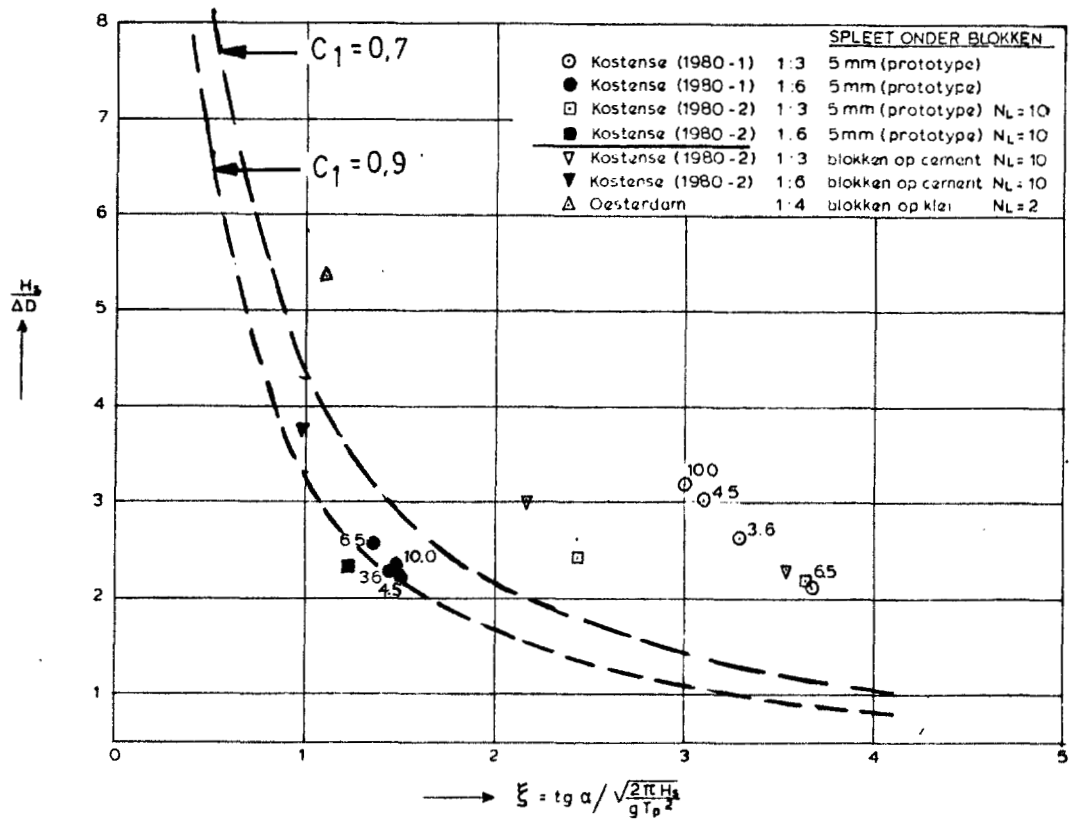
figuur 7.7.: regelmatige golven, doorlatende funderingslaag



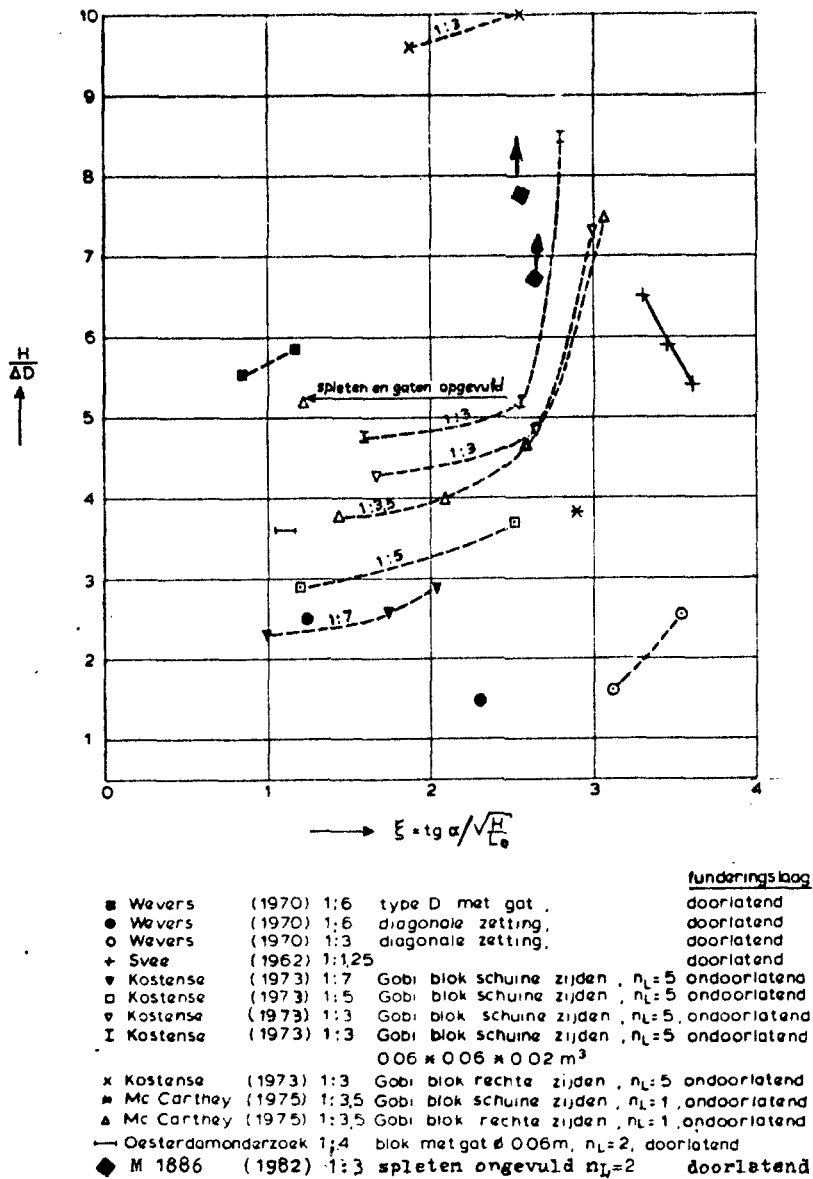
figuur 7.8.: regelmatige golven, ondoorlatende funderingslaag



figuur 7.9.: onregelmatige golven, doorlatende funderingslaag



figuur 7.10.: onregelmatige golven, ondoortalende funderingslaag

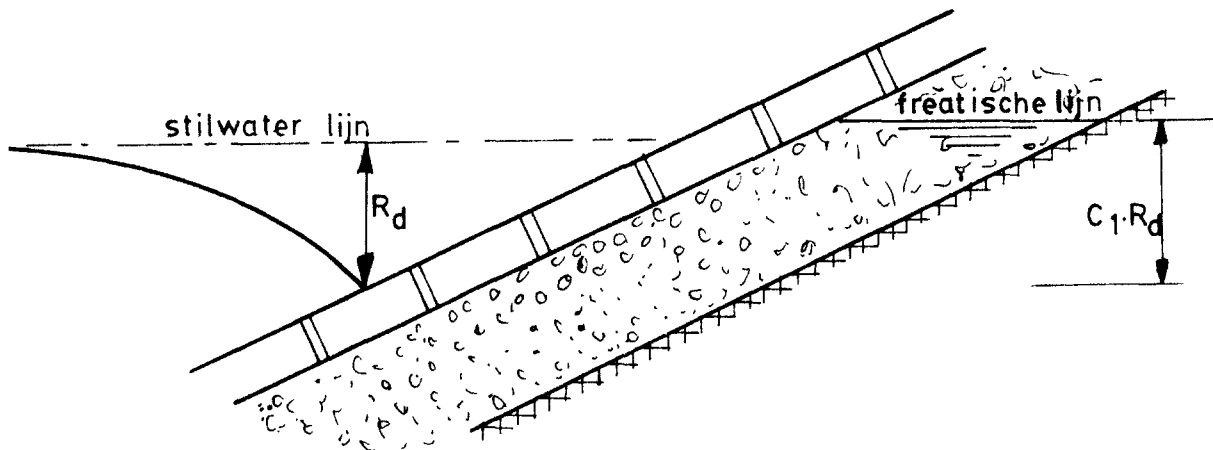


figuur 7.11.: regelmatige golven, speciale blokken

Teneinde de resultaten op een eenvoudige wijze te kunnen weergeven, wordt hier aan de hand van een globale beschouwing, de stabiliteitsparameter $H/\Delta d$ als functie van de parameter ξ in een formule uitgedrukt.

Dit betreft een variant op de hiervoor gegeven afleiding, resulterende in formule 7.13.

Stel dat de situatie zoals in figuur 7.12. aanwezig is.



figuur 7.12.: buitenwaterstand en freatische lijn in filter

Hierin is:

R_d = run-down ten opzichte van stilwaterlijn

c_1 = coëfficiënt bepaald door waterniveau in het filter

De overdruk ter plaatse van "run-down" is:

$$p = \rho_w g c_1 R_d \quad (7.14.)$$

Uit de gemeten waarden van run-down door het Hydraulics Research Station (zie 5.8.4.) blijkt dat de meetpunten bij benadering kunnen worden weergegeven door:

$$R_d = 0,3 \xi H \quad (7.15.)$$

Dit ingevuld in (7.14.) geeft:

$$p = \rho_w g c_1 0,3 \xi H \quad (7.16.)$$

Het eigen gewicht van een blok onder water is per m^2 :

$$(\rho_b - \rho_w) g d \cos \alpha \quad (7.17.)$$

waarin:

ρ_b = soortelijke massa van beton

ρ_w = soortelijke massa van water

g = versnelling zwaartekracht

d = dikte van de steen

α = hellingshoek talud

Instabiliteit treedt op als de overdruk groter is dan het eigen gewicht per m^2 (afgezien van wrijvingskrachten).

$$\rho_w g c_1 0,3 \xi H > (\rho_b - \rho_w) g d \cos \alpha \quad (7.18.)$$

$$\frac{H}{\Delta d} = \frac{\cos \alpha}{c_1 0,3 \xi} \quad (7.19.)$$

Bij een taludhelling 1 : 2 is $\cos \alpha \approx 0,9$ zodat:

$$\frac{H}{\Delta d} = \frac{3}{c_1 \xi} \quad (7.20.)$$

c_1 is nu nog onbekend en wordt afhankelijk gesteld van het type constructie.

In de figuren 7.7. t/m 7.11. zijn veilige benaderingen met behulp van formule (7.20.) gegeven; met vermelding van de coëfficiënt c_1 .

In figuur 7.10. zijn de door Kostense uitgevoerde proeven, door de aanwezigheid van een spleet tussen het blok en de ondoorlatende ondergrond, wat afwijkend. Laat men deze bij de beschouwing weg, dan geeft $c_1 = 0,7$ weer een redelijke ondergrens.

Zoals uit de figuren 7.7. t/m 7.10. blijkt is formule (7.20.) voor $\xi > 2,5$ een erg ongunstige waarde, zodat de formule beperkt blijft tot $\xi < 2,5$.

Zeer globaal kan dan de volgende klasse-indeling worden aangehouden:

klasse I: Ondoorlatende en dicht tegen elkaar gezette blokken op goed doorlatende ondergrond.

Als veilige benadering geldt:

$$\frac{H}{\Delta d} < \frac{3,3}{\xi} \text{ met } \xi < 2,5 \quad (7.21.)$$

Bij onregelmatige golven mag bij benadering voor H de significante golfhoogte worden toegepast.

klasse II: Overeenkomstige blokken als bij klasse I, nu echter gezet op een ondoorlatende ondergrond of blokkensysteem geplaatst op doorlatende ondergrond met een doorlatendheid van de zetting van voldoende grootte.

Als veilige benadering geldt:

$$\frac{H}{\Delta d} < \frac{4,3}{\xi} \text{ met } \xi < 2,5 \quad (7.22.)$$

Bij onregelmatige golven mag bij benadering voor H de significante golfhoogte worden toegepast.

klasse III: bijzondere systemen.

Hiermee worden systemen bedoeld die in grote mate doorlatend zijn en/of waarbij een betrouwbare interlock aanwezig is (door vormgeving van de elementen en/of door vulling van de openingen met korrelig materiaal en/of de aanwezigheid van kabels).

Over de sterkteparameter valt weinig te zeggen. Wel blijkt uit het onderzoek in de Deltagoot dat waarden voor $H/\Delta d$ van circa 8 kunnen worden bereikt. Bij hoge $H/\Delta d$ waarden blijkt veelal de sterkte van de bekleding niet kritisch meer te zijn, maar de erosiebestendigheid van de ondergrond.

Het bezwijkcriterium is nu niet meer het oplichten van een enkel blok uit het talud, maar het na zekere tijd optreden van excessief grote vervormingen van bekleding en ondergrond.

Over deze verschijnselen is echter nog weinig bekend.

7.4. Mogelijke bezwijkmechanismen

Na analyse van metingen van de drukken boven en onder de steen werden reeds in 1970 door Wevers (lit. 35) de volgende drie schademechanismen gesignaleerd:

- quasistatische verschildrukken
- dynamische verschildrukken
- verschildrukken ten gevolge van faseverschuiving.

In een latere fase is onderkend dat het optreden van een bepaald schademechanisme afhankelijk is van de combinatie van hydraulische randvoorwaarden en constructieparameters.

Dit zou in principe de mogelijkheid openen om door middel van wijzigingen in de constructie doelgericht een bepaald schademechanisme te elimineren, waardoor de schadegolfhoogte kan worden opgevoerd.

Het onderzoek is nu echter nog in een stadium dat niet exact bekend is wanneer welk mechanisme overheerst.

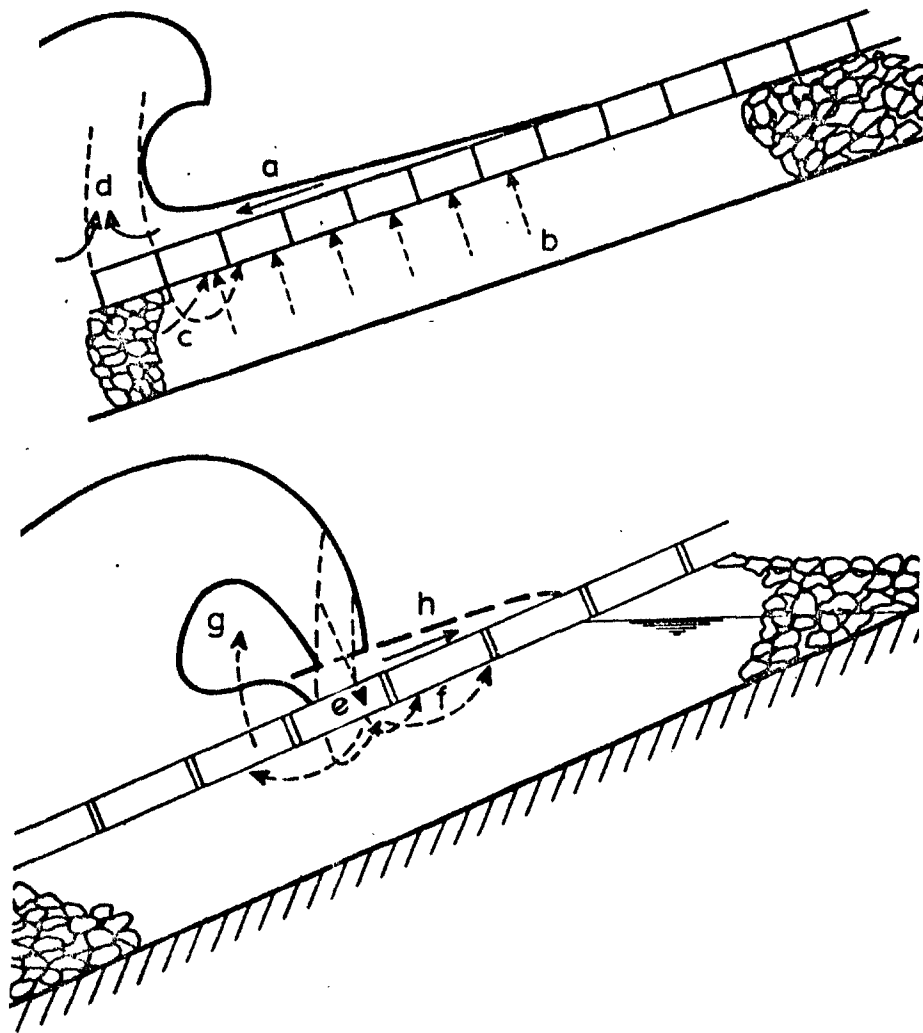
Vooraf het inzicht in de stabiliteit van een gezette bekleding op een ondoorlatende ondergrond als klei is nog gering. In het navolgende worden de beschouwingen dan ook beperkt tot een doorlatende onderlaag.

Volgens huidige inzichten wordt er een 8-tal mogelijke mechanismen onderscheiden (lit. 64).

- a. Wanneer de golfoploop haar maximale waarde heeft bereikt stroomt het water dank zij de zwaartekracht terug. Gedurende deze fase stroomt water tussen de voegen van de bekleding naar de filterlaag, hetgeen kan resulteren in een verhoging van de freatische lijn in de filterlaag; onder andere afhankelijk van de doorlatendheden van bekleding en filter.
- Wanneer het water op het talud terugstroomt, nemen de drukken op de bekleding af.
- Wanneer een ruwe bekleding aanwezig is kan deze terugloop van het water resulteren in stromings-, traagheids- en liftkrachten, zie figuur 7.13.
- b.1. Afhankelijk van de doorlatendheden en de geometrie kan het water in het filter niet direct terugstromen, hetgeen resulteert in krachten die de bekleding willen optillen, zie figuur 7.13. en 7.14.
- b.2. In het algemeen is de golfoploop groter dan de golfterugloop. Daarom lekt het water over een groter oppervlak in het filter dan het oppervlak waarover uitstroming plaatsvindt, hetgeen resulteert in een verhoging van de freatische lijn in het filter en daarmee drukverhogingen onder de gezette bekleding. Dit is een cumulatief effect van een aantal golven, zie figuur 7.14.
- c. Wanneer de volgende golf bij het talud aankomt, treedt een verhoging op van de drukken op het talud onder deze golf. Deze drukken kunnen zich door het filter vlak voor het golffront voortplanten, resulterend in drukken die de bekleding willen oplichten. Deze drukken zullen slechts over een beperkt gebied voor het golffront optreden, zie figuur 7.13. en 7.15.
- d. Na de bij c. geschetste fase treden ook aanzienlijke veranderingen op in het snelheidsveld ten gevolge van de naderende golf, hierdoor ontstaan gekromde stroomlijnen te vergelijken met wervels. Door dit gekromde snelheidsveld kunnen drukverlagingen ontstaan, zie figuur 7.13.

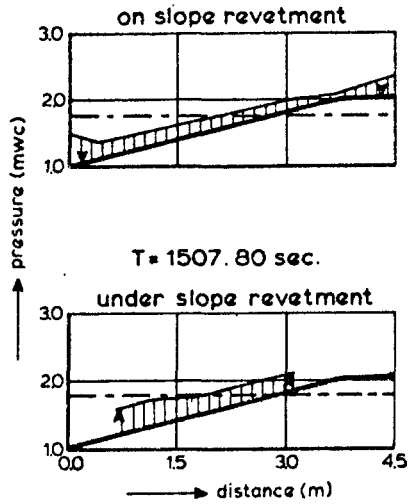
- e. Een brekende golf zal op het talud een golfklap geven, hetgeen sterk stijgende drukken op het talud geeft met een tijdsduur in de orde van 0,1 s. Deze drukken op de bekleding kunnen zich via het filter voortplanten en resulteren in kortdurende drukken onder de bekleding, zie figuur 7.13.
- f. Na dit kortdurende fenomeen valt een massa water op het talud. De hoge drukken kunnen zich onder de bekleding, net voor het punt waar de golf breekt, voortplanten en dus resulteren in drukken die de bekleding willen oplichten, zie figuur 7.13. en 7.16.
- g. Nadat de golf het talud raakt treedt een sterkte reductie (zelfs negatieve drukken ten opzichte van de atmosferische druk) in de drukken op de bekleding op gedurende een tijdsduur van ongeveer 0,1 s. Dit verschijnsel wordt uitgelegd als te zijn veroorzaakt door oscillaties van de ingesloten luchtcilinder in de brekende golf. Deze lage drukken op het talud kunnen bezwijken tot gevolg hebben, zie figuur 7.13. en 7.17.
- h. Na de golfbreking treedt de golfoploop op. Gedurende deze fase nemen de drukken op de bekleding toe. Er zijn nu echter geen kritieke omstandigheden aanwezig, behalve wanneer de bekleding ruw is of wanneer de blokken gedeeltelijk uit de bekleding zijn getild; in deze gevallen ontstaan er stromings-, traagheids- en liftkrachten, zie figuur 7.13.

De bovenbesproken mechanismen kunnen niet los van elkaar worden gezien, een combinatie van bezwijkmechanismen kan optreden.

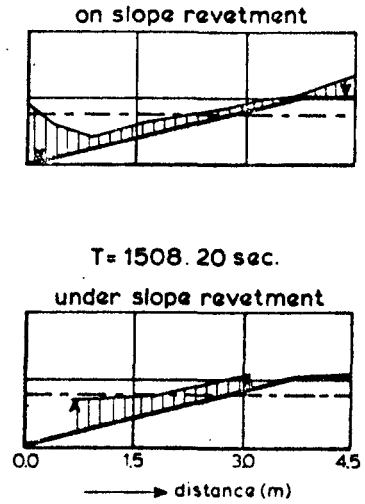


figuur 7.13.: schematische weergave van de mogelijke bezwijkmechanismen

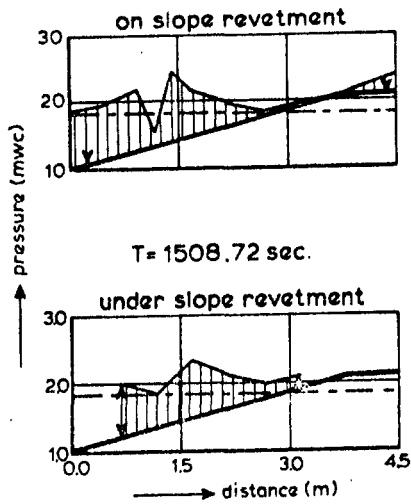
- a = krachten ten gevolge van de golfterugloop
- b = quasi-stationaire drukken vanuit het filter
- c = drukken ten gevolge van het naderende golffront
- d = veranderingen in het snelheidsveld
- e = golfklap
- f = drukken ten gevolge van de massa van de brekende golf
- g = lage drukken door het ontsnappen van lucht uit de ingesloten luchtcilinder
- h = krachten ten gevolge van de golfoploop



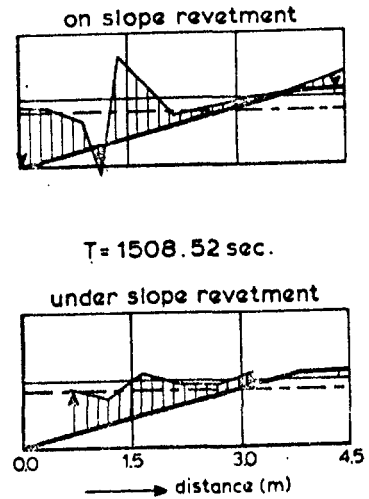
figuur 7.14.: drukverdeling bij
mechanisme b



figuur 7.15.: drukverdeling bij
mechanisme c

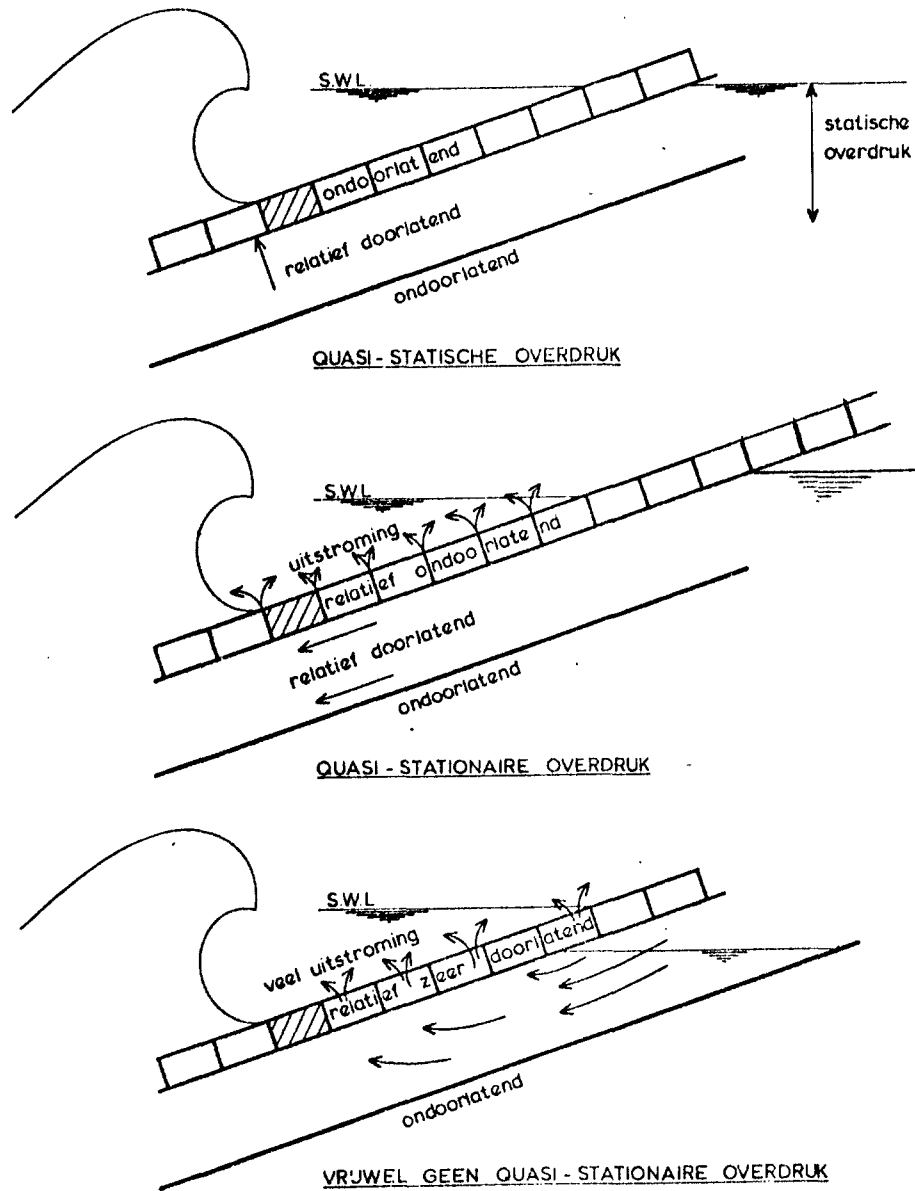


figuur 7.16: drukverdeling bij
mechanisme f



figuur 7.17.: drukverdeling bij
mechanisme g

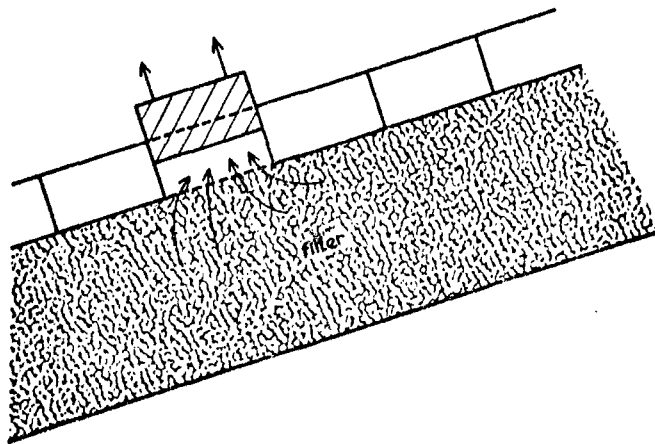
Uit het door WL en LGM uitgevoerde onderzoek kan worden geconcludeerd dat, onder de bij de beproeving heersende omstandigheden, bezwijkmechanisme b "quasi-stationaire verschildrukken" van groot belang is. Of en zo ja, in welke mate quasi-statische of quasi-stationaire verschildrukken van betekenis optreden is afhankelijk van de constructie zoals in figuur 7.18. geïllustreerd.



figuur 7.18.: mechanisme quasi-stationaire verschildrukken

Ook de taludhelling heeft invloed op de vorm van het bezwijkmechanisme.

De initiële druktoestand van een steen is echter in het algemeen niet voldoende om de steen uit de zetting te laten komen. De beweging van zo'n instabiele steen beïnvloedt namelijk op zich ook weer de drukken die hem in beweging brengen of houden. Zodra een steen in een zetting ten gevolge van een initiële overdruk iets wordt opgelicht zal onder die steen iets moeten toestromen om de holle ruimte op te vullen, zie figuur 7.19.



figuur 7.19.: toestromen water onder blok

Dit toestromen van water uit het filter zal slechts plaatsvinden ten gevolge van een drukverhang.

De grootte van het verhang dat nodig is om in een bepaalde tijd een bepaalde hoeveelheid water te laten stormen is afhankelijk van de doorlatendheid van het filter. Hoe minder doorlatend het filter des te groter is het benodigde verhang. Afhankelijk van de doorlatendheid van het filter wordt een groter deel van de overdruk aan de onderzijde van de steen verbruikt voor het toestromen van water. Behalve de relatieve doorlatendheden van steenzetting en filter speelt dus ook de absolute doorlatendheid van het filter een grote rol in de stabiliteit van de zetting.

Afhankelijk van de golfsteilheid en de taludhelling kan een brekende golf een drukstoot op een steenzetting uitoefenen. Deze drukstoot is echter neerwaarts gericht en zal dus op de plaats van de klap geen steen uit de zetting kunnen werken.

De drukstoot kan zich echter wel voortplanten door een met water verzadigde onderlaag, waardoor blokken, gelegen buiten het golfklapgebied, in beweging kunnen worden gebracht. Ook in dit geval zal er iets moeten toestromen aan de onderzijde van de steen.

Zelfs bij een zeer doorlatende filterlaag is het niet waarschijnlijk dat in de korte tijd dat de drukstoot duurt (orde 1/10 sec.) één steenvolume water kan toestromen. Het toestromen van lucht, van de bovenzijde, door een redelijk doorlatende zetting kan echter plaatsvinden onder een geringe drukverlaging.

Dit schademechanisme kan dus slechts optreden binnen zeer nauwe grenzen van combinaties van randvoorwaarden en constructieparameters. Alleen het optreden van een golfklap zal meestal niet voldoende zijn om dit mechanisme als veroorzaker van geconstateerde schade te beschouwen. Momenteel bestaat daarom de indruk dat de dynamische drukken van ondergeschikte betekenis zijn bij het optreden van schade.

7.5. Rekenmodellen

7.5.1. Algemeen

In lit. 51 is een analytisch rekenmodel opgesteld voor de drukvoortplanting door en onder een poreuze gezette bekleding als reactie op een in tijd op en neergaande buitenwaterspiegel.

Golfbreking is dus niet in het model opgenomen; het model beschrijft drukverschillen als gevolg van quasi-stationaire stromingen.

Naast de analytische som is het gedrag gesimuleerd met behulp van een elektrisch analogon (ELNAG), zie lit. 51. In het elektrische analogon kan het discrete karakter van de doorlatendheid van de bekleding eenvoudig worden meegenomen, terwijl ook de geometrie van het talud en bekleding gemakkelijk kunnen worden gewijzigd. In grote lijnen komen de resultaten overeen met de eerder genoemde analytische som.

Ook is het mogelijk met een numerieke aanpak (computerprogramma) de drukken als functie van de hydraulische randvoorwaarde te berekenen. Naast de grotere vrijheid bij het beschrijven van de hydraulische randvoorwaarde gelden nog de volgende voordelen:

- a. In de analytische oplossing is het noodzakelijk de doorlatendheid van de steenzetting, die alleen ter plaatse van de spleten tussen de stenen aanwezig is, te schematiseren tot een continue doorlatendheid.
Bij een numerieke oplossing is dit discrete karakter van de doorlatendheid van de steenzetting eenvoudig in te brengen.
- b. De invloed van de eindigheid van de steenzetting, het tweedimensionale karakter van de stromingen in het filter, de fysisch niet-lineaire stromingen in het filter en door de bekleding, kunnen in een numerieke berekening worden ingebracht.

In principe is het ook mogelijk tijdsafhankelijke verschijnselen in het rekenmodel op te nemen, in dit rapport worden de beschouwingen echter beperkt tot stationaire omstandigheden.

7.5.2. Analytische oplossing voor een bijzonder geval

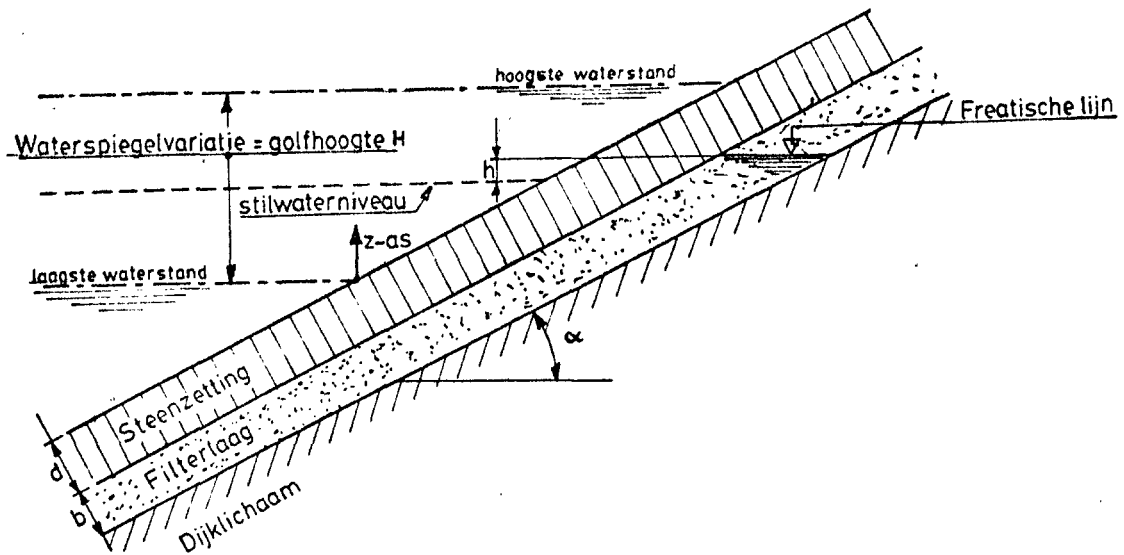
Voor de afleiding van het analytische rekenmodel kan naar lit. 51 worden verwezen; korthedshalve wordt hier volstaan met het geven van enkele resultaten.

De geometrie van het model is geschetst in figuur 7.20. waarbij het talud een oneindige uitgestrektheid bezit.

De steenzetting wordt gevlijd op een filterlaag, die wordt aangebracht op het dijklichaam.

Het dijklichaam wordt als ondoorlatend beschouwd.

Tussen de stenen door (door de voegen) lekt er water naar de filterlaag, waar de eigenlijke stroming evenwijdig aan het talud plaatsheeft.



figuur 7.20.: doorsnede over steenzetting met hydraulische randvoorwaarden

De golflengte is zeer groot verondersteld, dat wil zeggen de waterspiegel blijft bij benadering horizontaal.

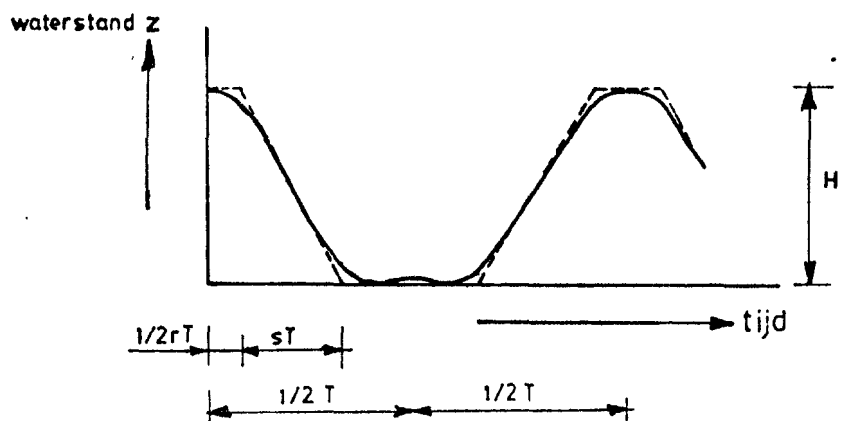
De steenzetting heeft een dikte d , de filterlaag een dikte b .

De hellingshoek van het talud is aangegeven door α . Voor de stroming in de filterlaag worden twee zones onderscheiden. Een verzadigde onder de vrije waterspiegel en een niet-verzadigde erboven.

Aangenomen wordt dat de golf dermate snel fluctueert dat de voegen in de bekleding tot aan het hoogste punt van de onvervormde golf altijd zijn gevuld met water, onafhankelijk van de ligging van de freatische lijn in het filter.

Uit de wiskundige beschrijving van het model, zie lit. 51, blijkt dat de hoogte van de freatische lijn zich na een zeker aantal golven bij benadering in een evenwichtstoestand bevindt.

Bij de berekening wordt met een schematisatie van de uitwendige golf-randvoorwaarden gewerkt, zie figuur 7.21.

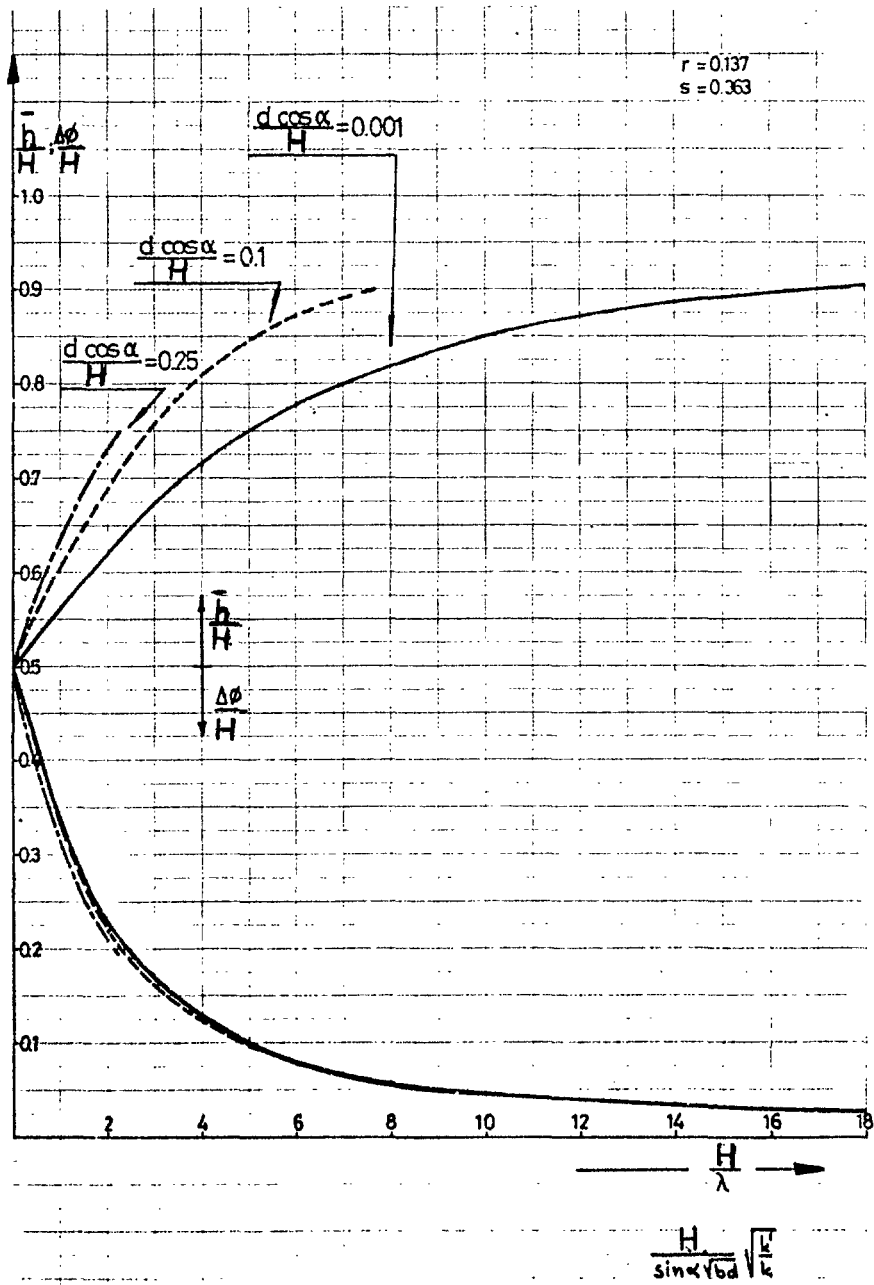


figuur 7.21.: verloop waterstand in de tijd

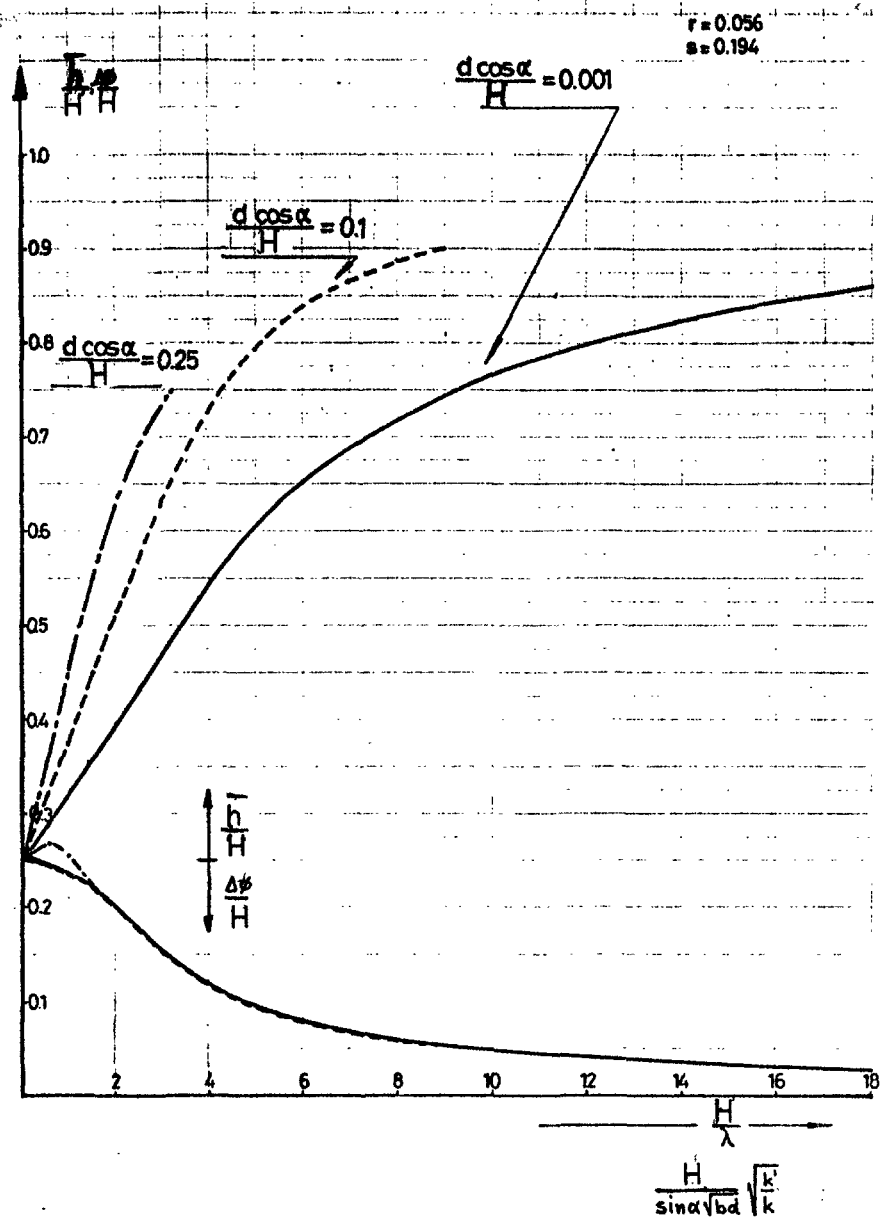
Voor verschillende waarden van r en s zijn de relaties tussen \bar{h}/H en H/λ en tussen $\Delta\phi/H$ en H/λ bepaald voor variabele $d \cos \alpha/H$, zie de figuren 7.22. en 7.23.

De variabelen hebben hier de volgende betekenis:

- \bar{h} = gemiddelde hoogte van de freatische lijn in het filter ten opzichte van vergelijkingsvlak
- H = golfhoogte
- $\lambda = \sin \alpha \sqrt{k b d/k'}$ = leklengte
- k = doorlatendheid filterlaag
- k' = doorlatendheid steenzetting
- b = dikte filterlaag
- d = dikte steenzetting
- $\Delta\phi$ = maximum waterdruk over de steenzetting
- α = taludhelling



figuur 7.22.: verheffing van de freatische lijn in het filter (\bar{h}) en maximum waterdruk over de steenzetting ($\Delta\phi$), dimensieloos gemaakt door normering ten opzichte van de waterstandsvariatie (H), bij $r = 0,137$ en $s = 0,363$.



figuur 7.23.: verheffing van de freatische lijn in het filter (\bar{h}) en maximum waterdruk over de steenzetting ($\Delta\phi$), dimensieloos gemaakt door normering ten opzichte van de waterstandsvariatie (H), bij $r = 0,056$ en $s = 0,194$.

Het blijkt dat $d/H \cos \alpha$ op \bar{h}/H invloed heeft, op $\Delta\phi/H$ echter nauwelijks.

De waarden voor r en s zijn zodanig gekozen, dat in figuur 7.22. een sinusvormig in de tijd verloopende waterstand is gesimuleerd, terwijl in figuur 7.23. een hiervan afwijkend verloop is aangenomen.

Het laatste verloop heeft een lagere gemiddelde hoogte dan het sinusvormig verloop, zodat de waarden voor $\Delta\phi/H$ dientengevolge kleiner zijn. Echter de hoogte H is weer groter, zodat waarden voor $\Delta\phi$ voor beide typen vergelijkbaar zijn.

Uit de figuren 7.22. en 7.23. blijkt een gunstige invloed op de stabiliteit ($\Delta\phi$ is klein) van een doorlatende bekleding (k' is groot) en een dichte filterlaag (k is klein).

Ook een dune filterlaag (b is klein) geeft minder hoge drukken onder de steenzetting. Deze kwalitatieve resultaten komen overeen met de door het WL uitgevoerde proeven. De grootte van de lek lengte λ bepaalt dus in grote mate de stabiliteit van een los gezette bekleding. Een kleine waarde voor λ geeft lage drukken onder de bekleding.

Aan de hand van figuur 7.24. kan op een andere wijze de fysische betekenis van de parameter λ worden verduidelijkt.

In deze figuur is een taludbekleding weergegeven en het waterniveau in de filterlaag en daarbuiten. In deze situatie zal een overdruk over de stenen aanwezig zijn. De overdruk is het grootst ter hoogte van de buitenwaterstand.

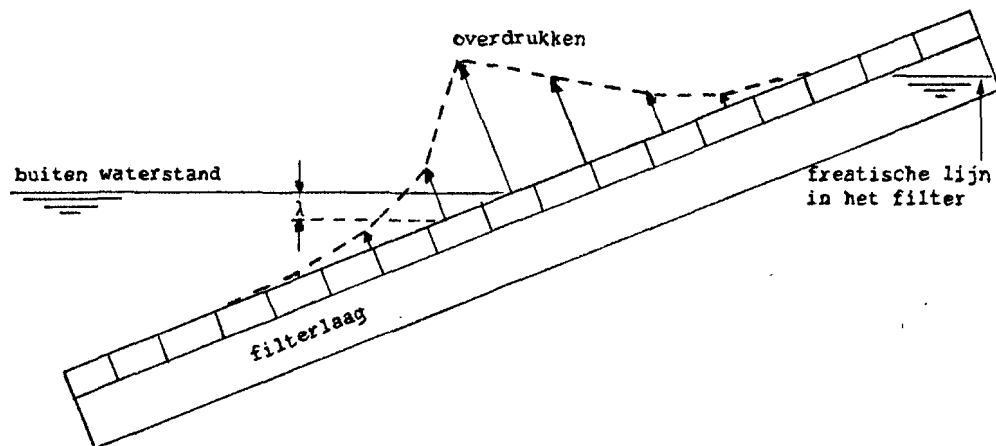
Hoger op het talud en verder onder het buitenwaterniveau zal de overdruk lager zijn.

De afname van de druk hoger op het talud is afhankelijk van de ligging van de freatische lijn, de dikte van de blokken en de lek lengte en zal verderop worden beschouwd.

Uit de analytische oplossing van de stromingsvergelijking volgt dat, bij een voldoende lang talud, de afname van de drukken onder het buitenwaterniveau alleen maar wordt bepaald door de lek lengteparameter λ .

In dit geval is de fysische betekenis van λ eenvoudig. De lek lengte blijkt de karakteristieke lengte te zijn die aangeeft onder welke verticale afstand onder het buitenwater niveau nog goed overdrukken meetbaar zijn.

Een λ lengte-eenheid onder het niveau van het buitenwater is de overdruk nog $1/e = 0,37$ maal de overdruk op het niveau van het buitenwater. Weer een λ eenheid verder is die druk nog maar $1/e^2 = 0,135$ maal de oorspronkelijke. Een kleine waarde voor λ wil dus zeggen dat de op het niveau van het buitenwater gemeten overdrukken even onder dat niveau al niet meer te meten zijn.



figuur 7.24.: verloop van overdrukken over een steenzetting bij een gegeven horizontale buitenwaterstand, als de freatische lijn in het filter hoger is dan de buitenwaterstand

Van de freatische lijn in het filter gaande naar de buitenwaterstand zullen de drukken in het filter toenemen.

Wanneer echter het hoogteverschil tussen de freatische lijn in het filter en het buitenwater veel groter is dan λ , zal de overdruk op het niveau van het buitenwater niet hoger zijn dan de orde van λ meter waterkolom (uit 51. blijkt dat het preciese getal $0,5 \lambda$ is).

Dit omdat, zoals is aangeduid in het voorafgaande, de druk in de filterlaag op een bepaalde plaats alleen maar wordt beïnvloed door drukken in die filterlaag in een gebied met een karakteristiek hoogteverschil van λ eenheden.

Bij grote potentiaalverschillen tussen de freatische lijn in het filter en het buitenwater, zal dit verschil bijna geheel worden verbruikt om in het tussengelegen deel van het talud water door de filterlaag en uit de steenzetting te persen. Pas als het hoogteverschil tussen het water in de filterlaag en het buitenwater kleiner is dan λ zal een belangrijk deel van het potentiaalverschil bijdragen tot een hogere overdruk. Bij een grotere λ is de hoeveelheid water in de filterlaag die een bijdrage geeft tot de maximale overdruk op het niveau van de buitenwaterstand groter, en dit heeft dus tot gevolg dat ook de maximale overdruk groter wordt.

Opgemerkt moet worden dat de bovenvermelde conclusies alleen kwantitatieve geldigheid hebben bij de bij de analytische som aangehouden eenvoudige schematisaties van hydraulische belasting, fysische stromingsrelaties en opbouw van de constructie. Voor numerieke rekenmodellen, waarbij de schematisering wat complexer kan zijn, gelden de conclusies alleen in kwalitatieve zin.

Evenwichtsbeschouwingen voor de steenzetting

Zien we af van onzekere wrijvingskrachten, dan moet de gewichtscomponent van de steen in de richting loodrecht op het talud groter zijn dan de stromingsdruk teneinde de stabiliteit te garanderen.

In formulevorm:

$$\frac{\Delta \phi}{H} < \frac{\rho_b - \rho_w}{\rho_w} \frac{d \cos \alpha}{H} = \frac{\Delta d \cos \alpha}{H} \quad (7.23.)$$

waarin:

ρ_b = soortelijke massa beton

ρ_w = soortelijke massa water

$$\Delta = \frac{\rho_b - \rho_w}{\rho_w}$$

Met behulp van bijvoorbeeld figuur 7.22. kan nu eenvoudig worden bepaald of aan deze voorwaarde wordt voldaan. Voor bijvoorbeeld $d/H \cos \alpha = 0,1$ en $\rho_b/\rho_w = 2,65$ blijkt stabiliteit verzekerd voor $H/\lambda > 3$.

Voor het gebied $H/\lambda > 3$ is bij benadering $\Delta\phi/H \approx 1/2 \lambda/H$. Voorwaarde (7.23.) wordt dan wel erg eenvoudig:

$$\frac{k'}{k} > \frac{\text{tg}^2 \alpha b}{4 \Delta^2 d} \quad (7.24.)$$

7.5.3. Numerieke rekenmodellen

1. A l g e m e e n

Ook voor een numeriek rekenmodel moeten vereenvoudigingen op het in 7.3.1. geschetste algemene kader worden aangebracht.

De constructie wordt hier geschematiseerd tot een onbeweeglijke doorlatende bekleding met daaronder een doorlatende filterlaag.

Bij de hydraulische randvoorwaarde wordt een enkele brekende golf beschouwd, die loodrecht op het talud invalt.

In feite is het gebeuren een tijdsafhankelijk verschijnsel. Zo variëren de door de brekende golf uitgeoefende drukken tegen de buitenzijde van de bekleding in de tijd. Dit verschijnsel is in alle details nog niet mathematisch te beschrijven. Als gevolg van de door de brekende golf uitgeoefende drukken zal de ligging van de freatische lijn in het onder de bekleding liggende filter ook een tijdsafhankelijk gedrag vertonen.

Hier wordt afgezien van het hierboven beschreven tijdsafhankelijk gebeuren; de tijd is stilgezet.

Uitgegaan wordt van één maatgevende toestand, namelijk het moment waarop de golf op het punt van breken staat.

Het filter kan geometrisch één- of tweedimensionaal worden geschematiseerd. Het voordeel van een tweedimensionale schematisatie is dat ook informatie wordt verkregen over de stromingscomponenten loodrecht op het filter; waaronder informatie in detail over de toestroming naar de spleten in de bekleding.

Het blijkt dat in de spleten tussen de gezette elementen van de bekleding en in de filterlaag al vrij vlug stroomsnelheden heersen waarbij de stroming zich niet meer fysisch-lineair gedraagt. Ook hieraan zal aandacht worden besteed.

Een en ander mondt uit in een aantal computerprogramma's, die al of niet een geometrisch tweedimensionaal filter en fysisch niet-lineaire stromingen kunnen beschrijven.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de in deze notitie besproken modellen.

punt	bekleding	filter	
	fysisch gedrag	geometrie	fysisch gedrag
5	lineair	ééndimensionaal	lineair
6	lineair	tweedimensionaal	lineair
7	niet-lineair	ééndimensionaal	lineair
8	niet-lineair	tweedimensionaal	niet-lineair
10	niet-lineair	ééndimensionaal	niet-lineair

Allereerst worden in deze paragraaf de theoretische fundamenten van de programmatuur behandeld. Daarna worden aan de hand van rekenvoorbeelden de mogelijkheden van de diverse programma's en de verschillen in uitkomsten getoond.

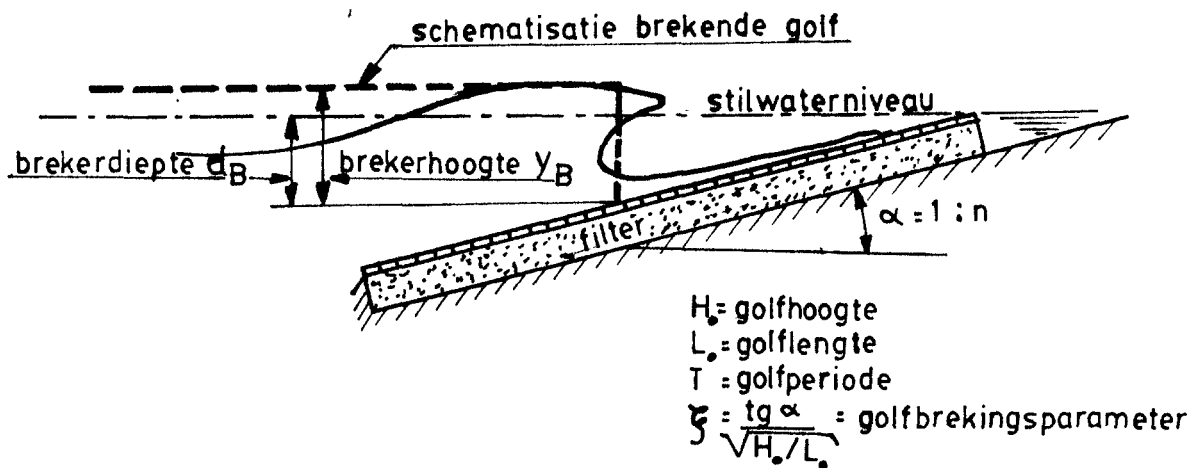
Oorspronkelijk waren alle programma's in Basic geschreven en geïmplementeerd op een micro-computer.

Ter beperking van de omvang zijn echter slechts twee computerlistings, voor de in punt 8 en 10 behandelde theorie, opgenomen (appendix 7.1. en 7.2.). Teneinde de overdraagbaarheid te bevorderen zijn deze in Fortran 77 overgezet.

2. H y d r a u l i s c h e r a n d v o o r w a a r d e n

Zoals bij Algemeen vermeld blijven de beschouwingen hier beperkt tot een stationaire beschrijving van het gedrag van de bekleding onder golfaanval. Dit houdt in dat ook voor de hydraulische randvoorwaarde de tijd als het ware wordt stilgezet. Gekozen is hier voor het tijdstip waarop de golf op het punt van breken staat. Hierdoor blijft het toepassingsgebied van de beschreven rekenmodellen beperkt tot het gedrag van de bekleding onder invloed van sterk brekende golven, dus geen brekers van het overschuimende (spilling) en deinende (surging) type.

Figuur 7.25. geeft de schematisatie van de brekende golf.



figuur 7.25.: schematisatie hydraulische randvoorwaarde

Bij de in deze paragraaf aangehouden brekende golf wordt de bekleding nabij het golfbreekpunt door overdrukken vanuit het filter belast als gevolg van een tweetal invloeden:

- toestroming als gevolg van de drukken door de brekende golf via de spleten in de bekleding naar het filter
- toestroming vanuit de hoger gelegen freatische lijn in het filter.

Het samengaan van deze twee invloeden is voor de stabiliteit van de bekleding belangrijker dan de effecten van de afzonderlijke invloeden, vandaar dat hierna veelal de combinatie wordt beschouwd.

In het Franzius Institut te Hannover is door Ayyar (lit. 65) met regelmatige golven een groot aantal modelproeven uitgevoerd op vlakke doorgaande taluds met diverse hellingen. Uit de resultaten van de proeven is een algemene vergelijking afgeleid die een verband geeft tussen de brekerhoogte Y_B en brekerdiepte d_B :

$$\frac{Y_B}{d_B} = \log \left[40 n^{0,5} \left(\frac{H_o}{g T^2} \right)^{0,25} \right] \quad (7.25.)$$

of:

$$\frac{Y_B}{d_B} = \log \left[40 \left(\frac{1}{\text{tg } \alpha} \right)^{0,5} \left(\frac{\text{tg}^2 \alpha}{\xi^2 2\pi} \right)^{0,25} \right] \quad (7.26.)$$

Voor de betekenis van de variabelen wordt verwezen naar figuur 7.25. Nu de verhouding Y_B/d_B vast ligt dient of de brekerhoogte of de brekerdiepte nog als functie van de golfparameters en taludhelling bekend te zijn.

In lit. 66 worden formules voor de brekerdiepte aangetroffen van de volgende vorm:

$$d_B/H_o = f(\alpha) (H_o/L_o)^{-1/\beta} \quad (7.27.)$$

of:

$$d_B/H_o = f(\alpha) (\text{tg } \alpha)^{-2/\beta} \xi^{2/\beta} \quad (7.28.)$$

Verder geldt:

$$\operatorname{tg} \alpha = 1/7 \text{ ————— } f(\alpha) = 0,29 \quad \beta = 3 \quad (7.29.)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = 1/5 \text{ ————— } f(\alpha) = 0,32 \quad \beta = 3 \quad (7.30.)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = 1/3 \text{ ————— } f(\alpha) = 0,21 \quad \beta = 2 \quad (7.31.)$$

Voor tussenliggende waarden van de taludhelling wordt in de bij dit rapport behorende programmatuur lineair geïnterpoleerd.

Door toepassing van (7.26.) en (7.28.) zijn de karakteristieken van de brekende golf als functie van de taludhelling, golfhoogte en golflengte vastgelegd. Voor een afbeelding van de formules, die de hydraulische randvoorwaarde beschrijven wordt naar 5.8.3. verwezen.

3. L i g g i n g f r e a t i s c h e l i j n i n h e t f i l t e r

In lit. 51 wordt aan de hand van een analytische benadering een formule gegeven voor de hoogteligging van de freatische lijn in het onder de bekleding aanwezige filter, zie ook paragraaf 7.5.2.

Uitgangspunten van deze analytische berekening zijn onder andere:

- de filterlaag wordt als een eendimensionale laag beschouwd, hetgeen inhoudt dat in de dikte van het filter geen variantie in de stijghoogte mogelijk is
- zowel de bekleding als het filter vertonen een fysisch lineair gedrag (Darcy stroming)
- de hydraulische randvoorwaarde is geschematiseerd tot een in de loop der tijd, in het tempo van de golfbeweging, op en neergaande horizontale waterspiegel
- de doorlatendheid van de bekleding, ontstaan door de aanwezigheid van spleten, wordt homogeen verdeeld verondersteld.

Voor de schematisatie van de constructie zie figuur 7.20.

Uit een vrij complexe beschouwing, korthedshalve wordt hiervoor verwezen naar lit. 51, volgt als benadering de onderstaande formule:

$$\begin{aligned} & \exp \left(- \frac{h+d \cos \alpha}{\lambda} \right) \left[\left(r + 2 s \frac{\lambda}{H_o} \right) \left(\exp \left(\frac{H_o}{\lambda} \right) - 1 \right) + 1 - 2s \right] = \\ & = 1 - \frac{d}{\lambda} \cos \alpha \frac{H_o - d \cos \alpha - h + \lambda}{\lambda} \end{aligned} \quad (7.32.)$$

waarin:

$$\begin{aligned} \lambda &= \sin \alpha \sqrt{k/k'} \quad b \quad d = \text{lek lengte} & (7.33.) \\ k' &= \text{doorlatendheid steenzetting} \\ k &= \text{doorlatendheid filterlaag} \\ b &= \text{dikte filterlaag} \\ d &= \text{dikte steenzetting} \\ h &= \text{gemiddelde hoogteligging van de freatische lijn in het} \\ & \quad \text{filter} \\ \alpha &= \text{taludhelling} \\ H_o &= \text{golfhoogte van de regelmatige golf} \end{aligned}$$

r en s beschrijven de vorm van de waterstandsvariatie in de loop der tijd, zie figuur 7.21.

Uit (7.32.) is nu als onbekende h te bepalen.

Hoewel in de berekeningen in deze paragraaf de tijd geen rol speelt, is, door het opnemen van vergelijkingen (7.32.) in de programmatuur, toch het tijdsafhankelijk effect van insijpeling van water in het filter en de daardoor optredende verhoging van de freatische lijn in het filter ten opzichte van het stilwaterniveau gesimuleerd.

Hierbij moet wel worden beseft dat de variatie in hoogteligging in de tijd van de freatische lijn niet wordt beschouwd, terwijl vergelijking (7.32.) wegens de genoemde uitgangspunten ook nogal wat beperkingen kent.

De door (7.32.) beschreven bepaling van de ligging van de freatische lijn is in een vrij laat stadium in de programmatuur opgenomen, vandaar dat bij de hierna volgende rekenvoorbeelden veelal is uitgegaan van een ligging ter plaatse van het stilwaterniveau.

Veel verschil in de rekenresultaten geeft dit echter niet. De reden hiervoor is dat veelal het mechanisme van de brekende golf overheerst ten opzichte van de toestroming vanuit het filter (zie ook 7.5.2.).

4. Doorlatendheden

In het algemeen geldt de volgende formule voor waterstroming door poreuze media:

$$\frac{Q_f}{A} = U_f = k \left(\frac{\Delta H}{L}\right)^n = k i^n \quad (7.34.)$$

waarin:

Q_f = totale debiet (de volumestroom) per tijdseenheid

A = oppervlak van de doorstroomopening

U_f = filtersnelheid

k = doorlatendheidscoëfficiënt

ΔH = totaal verlies in drukhoogte

L = lengte van het monster

i = verhang

n = coëfficiënt afhankelijk van het stromingstype

Voor laminaire stroming geldt, overeenkomstig de Wet van Darcy, dat $n = 1$.

Voor turbulente stroming geldt dat $n = 0,5$.

In het overgangsgebied, tussen laminaire en turbulente stroming, beweegt n zich tussen deze beide uiterste waarden.

Ook voor de doorlatendheid van de bekleding gelden overeenkomstige stromingstypen.

Doorlatendheid van het filter

Voor de doorlatendheid van het filter wordt, in de rekenmodellen die fysisch niet-lineair gedrag beschrijven, de formule van Cohen de Lara gebruikt (zie lit. 59):

$$k = \sqrt{\frac{2 g D_n \varepsilon^5}{C_f}} \quad (7.35.)$$

en

$$U_f = k i^{0,5} \quad (7.36.)$$

waarin:

k = doorlatendheidscoëfficiënt

g = versnelling van de zwaartekracht

D_n = maatgevende diameter van de korrels (hiervoor wordt gewoonlijk D_{10} genoemd)

ε = poriëngehalte

C_f = coëfficiënt afhankelijk van het Reynoldsgetal (Re)

Venis (lit. 60) geeft de volgende uitdrukkingen voor C_f :

$$Re \leq 4 \quad \text{---} \quad C_f = \frac{24}{Re} \quad (\text{laminair gebied}) \quad (7.37.)$$

$$4 < Re < 576 \quad \text{---} \quad C_f = \frac{12}{\sqrt{Re}} \quad (\text{overgangsgebied}) \quad (7.38.)$$

$$Re \geq 576 \quad \text{---} \quad C_f = \frac{1}{2} \quad (\text{turbulent gebied}) \quad (7.39.)$$

met

$$Re = \frac{U_f \cdot D_n}{\nu} \quad (7.40.)$$

waarin

ν = kinematische viscositeit; voor water: $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Doorlatendheid van de bekleding

Voor de doorlatendheid van de bekleding worden resultaten van onderzoek gebruikt zoals gerapporteerd in lit. 57.

Voor het type stroming wordt uitgegaan van het volgende:

Voor $s < 6 \cdot 10^{-3}$ m geldt:

$$(0,006 - s)^2 + 1,8 \cdot 10^{-4} (n - 1)^2 - 3,6 \cdot 10^{-5} = 0 \quad (7.41.)$$

Voor $s \geq 6 \cdot 10^{-3}$ m geldt:

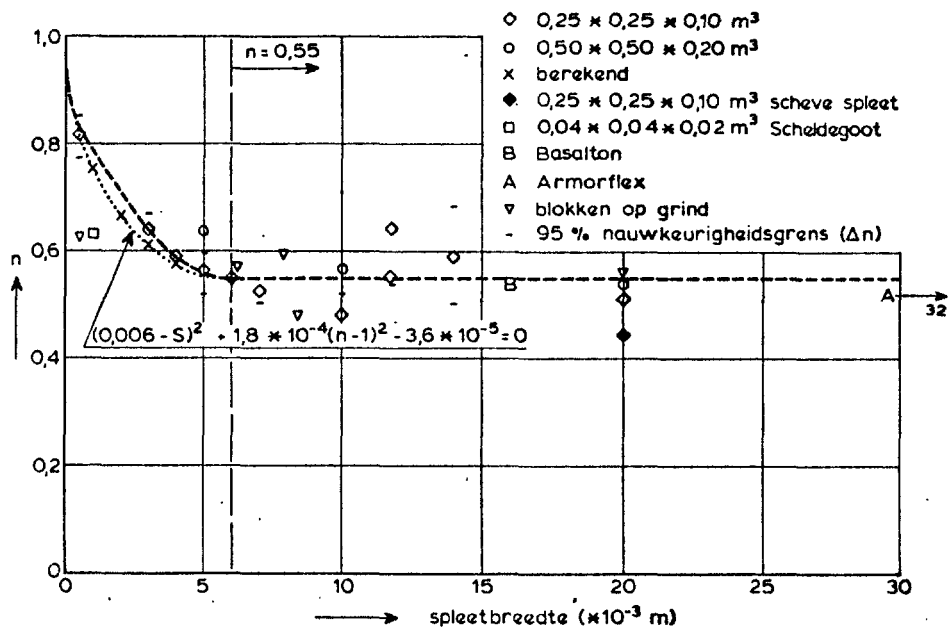
$$n = 0,553 \quad (7.42.)$$

waarin:

s = spleetbreedte in de bekleding

n = stromingstype, zie (7.34.)

Voor een grafische afbeelding van één en ander zie figuur 7.26.



figuur 7.26.: de constante n als functie van de spleetbreedte

Voor de doorlatendheid is het volgende aangehouden:

$$k' = s (-6.16 \Delta X + 9.38) \quad (7.43.)$$

waarin:

k' = doorlatendheid van de steenzetting (per oppervlakte-eenheid)

ΔX = spleetafstand in de zetting (blokafmeting)

Formule (7.43.) is het resultaat van een lineaire interpolatie van de in lit. 57 gegeven resultaten voor blokken $0,50 \times 0,50 \times 0,20 \text{ m}^3$ ($k' = 6,3 \text{ s}$) en $0,25 \times 0,25 \times 0,10 \text{ m}^3$ ($k' = 7,84 \text{ s}$).

5. F y s i s c h l i n e a i r e g r o n d w a t e r s t r o m i n g e n , f i l t e r g e o m e t r i s c h e e n d i m e n s i o n a a l

Voor het beschrijven van grondwaterstromingen wordt gebruik gemaakt van het begrip stijghoogte, gedefinieerd als volgt:

$$\phi = z + p/\gamma_w \quad (7.44.)$$

waarin:

ϕ = stijghoogte

z = plaatshoogte

p = waterdruk

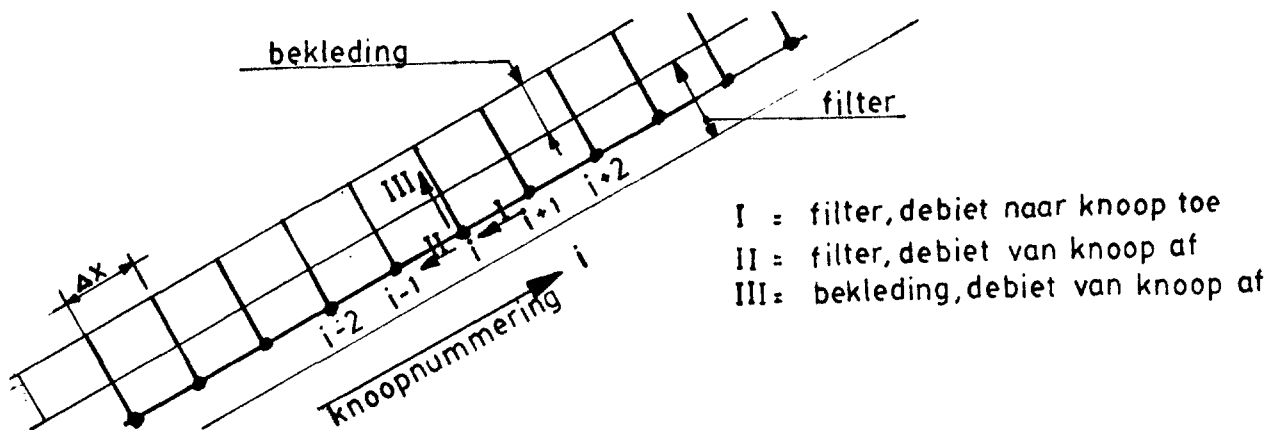
γ_w = volumegewicht

Volgens Darcy geldt voor een ééndimensionale stroming in een poreus medium:

$$q = -k \delta\phi/\delta x = k i \quad (7.45.)$$

Numerieke benadering

De bekleding en het filter worden geschematiseerd overeenkomstig figuur 7.27.



figuur 7.27.: schematisatie constructie

Ter plaatse van een knoop geldt de volgende continuïteitsbeschouwing:

$$\frac{kb}{\Delta x} (\phi_{i+1} - \phi_i) - \frac{kb}{\Delta x} (\phi_i - \phi_{i-1}) - \frac{k' \Delta x}{d} (\phi_i - \phi_b) = 0 \quad (7.46.)$$

waarin:

- k = doorlatendheid filter
- b = dikte filterlaag
- Δx = afstand spleten in bekleding
- d = dikte bekleding
- ϕ_b = stijghoogte bovenzijde bekleding
- ϕ_i = stijghoogte i in filter

Door de ééndimensionale schematisatie van het filter kan het stromingsverloop in het filter maar globaal worden bepaald, vandaar dat hierna naar een tweedimensionale beschrijving van het filter wordt overgegaan.

6. Fysische lineaire grondwaterstromingen, filter geometrisch tweedimensionaal

Volgens Darcy geldt voor tweedimensionale stroming in een poreus medium:

$$q_x = -k \delta\phi/\delta x \quad (7.47.)$$

$$q_y = -k \delta\phi/\delta y \quad (7.48.)$$

waarin:

q_x en q_y de specifieke debieten in respectievelijk x- en y-richting zijn

k = doorlatendheidscoëfficiënt

Behoud van volume geeft nu:

$$\frac{\delta q_x}{\delta x} + \frac{\delta q_y}{\delta y} = 0 \quad (7.49.)$$

Formules (7.47.) en (7.48.) in (7.49.) gesubstitueerd geeft:

$$\frac{\delta^2 \phi}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \phi}{\delta y^2} = 0 \quad (7.50.)$$

waarbij als aanname wordt gesteld dat de doorlatendheid van het filter constant is.

Numerieke benadering

Van vergelijking (7.50.) kan met behulp van eindige differenties een numeriek equivalent worden opgesteld.

Eindige differenties:

$$\frac{\delta\phi}{\delta x} = \frac{\phi_{i+1, j} - \phi_{i-1, j}}{2h} + 0 (h^2) \quad (7.51.)$$

$$\frac{\delta\phi}{\delta y} = \frac{\phi_{i, j+1} - \phi_{i, j-1}}{2h} + 0 (h^2) \quad (7.52.)$$

$$\frac{\delta^2\phi}{\delta x^2} = \frac{\phi_{i-1, j} - 2\phi_{i, j} + \phi_{i+1, j}}{h^2} + 0 (h^2) \quad (7.53.)$$

$$\frac{\delta^2\phi}{\delta y^2} = \frac{\phi_{i, j-1} - 2\phi_{i, j} + \phi_{i, j+1}}{h^2} + 0 (h^2) \quad (7.54.)$$

met h = roosterafstand.

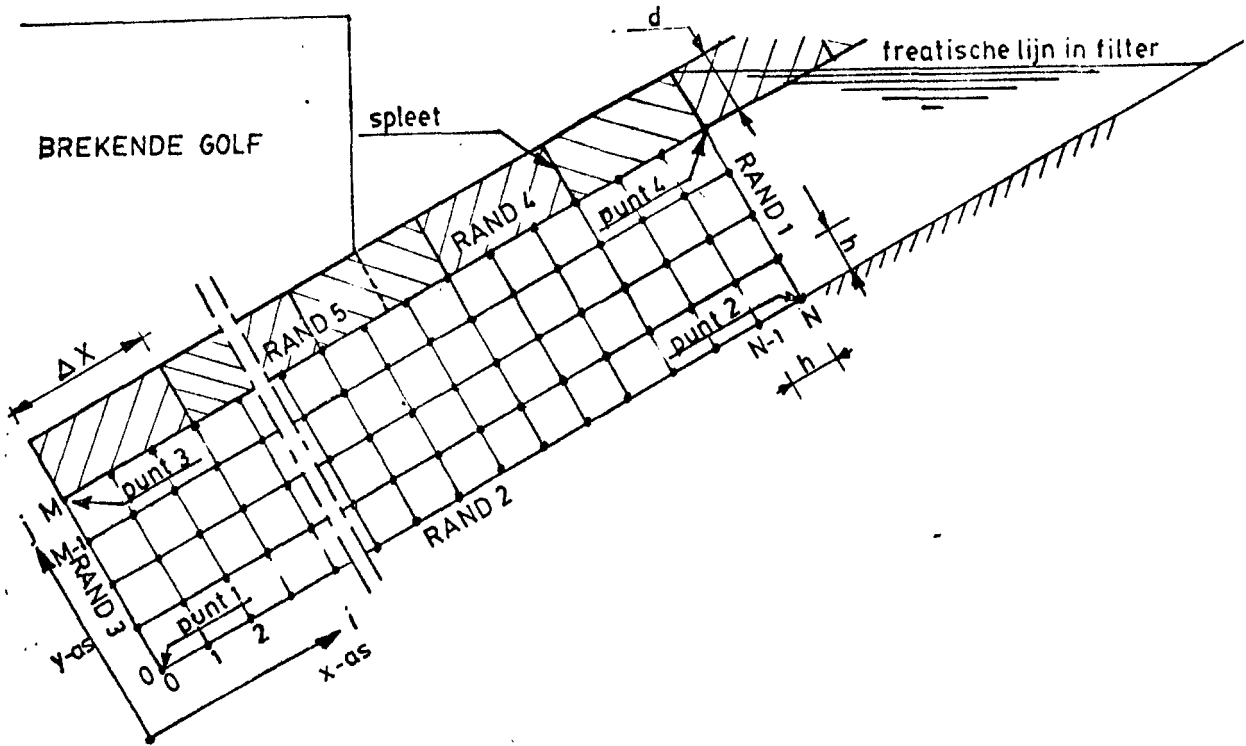
(7.53.) en (7.54) in (7.50) ingevuld geeft:

$$\phi_{i-1, j} + \phi_{i, j-1} - 4\phi_{i, j} + \phi_{i+1, j} + \phi_{i, j+1} = 0 \quad (7.55.)$$

$$i = 0, 1, 2 \text{ -----}N$$

$$j = 0, 1, 2 \text{ -----}M$$

i en j zijn indices die de knopen in het differentierooster in respectievelijk x - en y -richting nummeren, zie figuur 7.28.



figuur 7.28.: differentierooster

Vergelijking (7.55.) geldt in het midden van het in figuur 7.28. aangegeven rooster; aan de diverse randen vinden verstoringen plaats.

Rand 1

Hier is een stijghoogte opgelegd ter grootte van de ligging van de freatische lijn:

$$\phi_{N, j} = h^1 \quad (7.56.)$$

Rand 2

Op deze rand vindt geen stroming in de y-richting plaats:

$$\frac{\delta\phi}{\delta y} = \phi_{i, 1} - \phi_{i, -1} = 0 \quad (7.57.)$$

Rand 3

Op deze rand vindt geen stroming in x-richting plaats:

$$\frac{\delta\phi}{\delta x} = \phi_{1, j} - \phi_{-1, j} = 0 \quad (7.58.)$$

Randvoorwaarden ter plaatse van spleten in bekleding

Voor de lek door de spleten in de bekleding geldt:

$$Q_y = \frac{k' \Delta x (\phi_{i,M} - \phi_b)}{d} \quad (7.59.)$$

waarin:

- Q_y = debiet door spleet
- k' = doorlatendheid bekleding (uitgesmeerd)
- Δx = spleetafstand
- $\phi_{i, M}$ = stijghoogte onder bekleding
- ϕ_b = stijghoogte aan bovenzijde van bekleding
- d = dikte bekleding

Vanuit het filter gezien geldt ter plaatse van de spleet (zie formule (7.52.) en (7.48.)):

$$Q_y = \frac{-k \cdot h(\phi_{i, M+1} - \phi_{i, M-1})}{2 h} \quad (7.60.)$$

met

k = doorlatendheid van filter.

Uit (7.59.) en (7.60) volgt:

$$\phi_{i, M+1} = \phi_{i, M-1} + \frac{2 k' \Delta x}{k d} (\phi_b - \phi_{i, M}) \quad (7.61.)$$

Randvoorwaarden tussen spleten onder de bekleding

Op deze rand vindt geen stroming in de y-richting plaats:

$$\frac{\delta \phi}{\delta y} = \phi_{i, M+1} - \phi_{i, M-1} = 0 \quad (7.62.)$$

Punt 1

In punt 1 is geen enkele stroming mogelijk, ligt op rand 2 en rand 3.

$$\frac{\delta\phi}{\delta x} = \phi_{0, 1} - \phi_{0, -1} = 0 \quad (7.63.)$$

$$\frac{\delta\phi}{\delta y} = \phi_{1, 0} - \phi_{-1, 0} = 0 \quad (7.64.)$$

Punt 3

Punt 3 bevindt zich op rand 3 en ter plaatse van een spleet:

$$\frac{\delta\phi}{\delta x} = \phi_{1, M} - \phi_{-1, M} = 0 \quad (7.65.)$$

$$\phi_{0, m+1} = \phi_{0, M-1} + \frac{2 k' \Delta x}{k d} (\phi_b - \phi_{0, M}) \quad (7.66.)$$

De door de formules (7.56.) t/m (7.66.) vastgelegde randvoorwaarden worden door substitutie in formule (7.55.) verwerkt.

Zoals uit figuur 7.28. blijkt is het differentierooster niet tot de horizontaal liggende freatische lijn in het filter doorgetrokken. Er is wel een poging gewaagd dit te programmeren; wegens problemen met de convergentie van het rekenproces is dit pogen echter afgebroken. De fout, veroorzaakt door het niet opnemen van het bovenbedoelde driehoekige gebied in het differentierooster, wordt niet erg groot geacht.

7. F y s i s c h n i e t - l i n e a i r e s t r o m i n g e n i n
d e s p l e t e n t u s s e n d e b l o k k e n , f i l t e r
f y s i s c h l i n e a i r e n g e o m e t r i s c h é é n -
d i m e n s i o n a a l

Voor de stroming door de spleten tussen de blokken wordt uitgegaan van de formules (7.41.) t/m (7.43.)

De in (7.43.) gegeven continue doorlatendheidscoëfficiënt k' wordt naar de spleten geconcentreerd:

$$k_c = k' \cdot \Delta x \quad (7.67.)$$

met Δx = afstand tussen spleten
 k_c = geconcentreerde doorlatendheidscoëfficiënt

Er geldt nu:

$$Q_s = k_c \cdot i^n \quad (7.68.)$$

met

Q_s = debiet door spleet
 i = verhang over de bekleding
 n = coëfficiënt die stromingstype weergeeft

Teneinde in principe de aanpak volgens (7.46.) te kunnen blijven volgen, wordt (7.68.) als volgt gemodificeerd:

$$Q_s = k_c \cdot i^n = k_c^* i \quad (7.69.)$$

met

$$k_c^* = k_c \cdot i^{n-1}$$

Het fysisch niet-lineaire gedrag van de bekleding wordt dus ondergebracht in de doorlatendheidscoëfficiënt.

Bij het hierna volgende punt 8 wordt de hier gegeven aanpak ook voor het filter gevolgd.

Voor de schematisering van het geometrisch eendimensionale filter wordt verwezen naar punt 5.

8. F y s i s c h n i e t - l i n e a i r e g r o n d w a t e r - s t r o m i n g e n , f i l t e r g e o m e t r i s c h t w e e - d i m e n s i o n a a l

Bij fysisch niet-lineaire grondwaterstromingen is de differentiaalvergelijking (7.50.) niet meer van toepassing.

Wanneer in het poreuze medium op elke plaats een stroming heerst van hetzelfde type, dat wil zeggen de coëfficiënt n in (7.34.) is constant, is het mogelijk (7.50.) tot een meer algemene vorm uit te breiden:

$$\left(\frac{\delta^2\phi}{\delta x^2} + \frac{\delta^2\phi}{\delta y^2}\right) \left[\left(\frac{\delta\phi}{\delta x}\right)^2 + \left(\frac{\delta\phi}{\delta y}\right)^2\right] + (n-1) \cdot \left[\left(\frac{\delta\phi}{\delta x}\right)^2 \frac{\delta^2\phi}{\delta x^2} + 2 \frac{\delta\phi}{\delta x} \frac{\delta\phi}{\delta y} + \left(\frac{\delta\phi}{\delta y}\right)^2 \frac{\delta^2\phi}{\delta y^2}\right] = 0 \quad (7.70.)$$

Voor meer achtergronden wordt verwezen naar lit. 67, 68 en 69.

Wanneer in (7.70.) voor n de waarde 1 wordt ingevuld (laminaire stroming), wordt (7.50.) verkregen.

Teneinde plaatselijk verschillende stromingstypen in het filter in de berekening te kunnen opnemen is hier voor een andere aanpak gekozen.

Uitgaande van de vergelijkingen (7.47.), (7.48.) en (7.49.) wordt bij een niet-constante doorlatendheidscoëfficiënt de volgende vergelijking verkregen:

$$\frac{\delta}{\delta x} \left(k(\phi) \frac{\delta\phi}{\delta x}\right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(k(\phi) \frac{\delta\phi}{\delta y}\right) = 0 \quad (7.71.)$$

Verder uitgewerkt:

$$\frac{\delta k(\phi)}{\delta x} \frac{\delta\phi}{\delta x} + k(\phi) \frac{\delta^2\phi}{\delta x^2} + \frac{\delta k(\phi)}{\delta y} \frac{\delta\phi}{\delta y} + k(\phi) \frac{\delta^2\phi}{\delta y^2} = 0 \quad (7.72.)$$

De gedachte achter deze aanpak is het fysisch niet-lineaire gedrag te verwerken in een doorlatendheidscoëfficiënt die een functie is van de plaatselijke stormingstoestand.

De plaatselijke doorlatendheid is dus niet van te voren bekend, maar zal op een iteratieve wijze moeten worden bepaald.

Numerieke benadering

Naast de eindige differenties (7.51.) t/m (7.54.) moeten nu ook nog de twee afgeleiden van de doorlatendheidscoëfficiënt op een numerieke wijze worden vastgelegd:

$$\frac{\delta k(\Phi)}{\delta x} = \frac{k_{i+1, j} - k_{i-1, j}}{2 h} \quad (7.73.)$$

$$\frac{\delta k(\Phi)}{\delta y} = \frac{k_{i, j+1} - k_{i, j-1}}{2 h} \quad (7.74.)$$

Vergelijking (7.72.) uitgeschreven in eindige differenties geeft:

$$\begin{aligned} & \frac{(-k_{i+1, j} + k_{i-1, j} + 4 k_{i, j})}{4} \Phi_{i-1, j} + \\ & \frac{(-k_{i, j+1} + k_{i, j-1} + 4 k_{i, j})}{4} \Phi_{i, j-1} - 4 k_{i, j} \Phi_{i, j} + \\ & \frac{(k_{i+1, j} - k_{i-1, j} + 4 k_{i, j})}{4} \Phi_{i+1, j} + \\ & \frac{(k_{i, j+1} - k_{i, j-1} + 4 k_{i, j})}{4} \Phi_{i, j+1} = 0 \end{aligned} \quad (7.75.)$$

De randvoorwaarden worden op overeenkomstige wijze als bij punt 6 verwerkt.

Teneinde het fysisch niet-lineaire gedrag te verwerken kan (7.34.) als volgt wordt gemodificeerd:

$$U_f = k i^n = k i^{n-1} i = k^* i \quad (7.76.)$$

Door in (7.75.) de doorlatendheid k te veranderen in k^* wordt dan aan twee voorwaarden voldaan:

- (7.75.) beschrijft niet-lineaire grondwaterstromingen
- (7.75.) blijft voldoen aan de lineaire differentiaalvergelijking (7.72.)

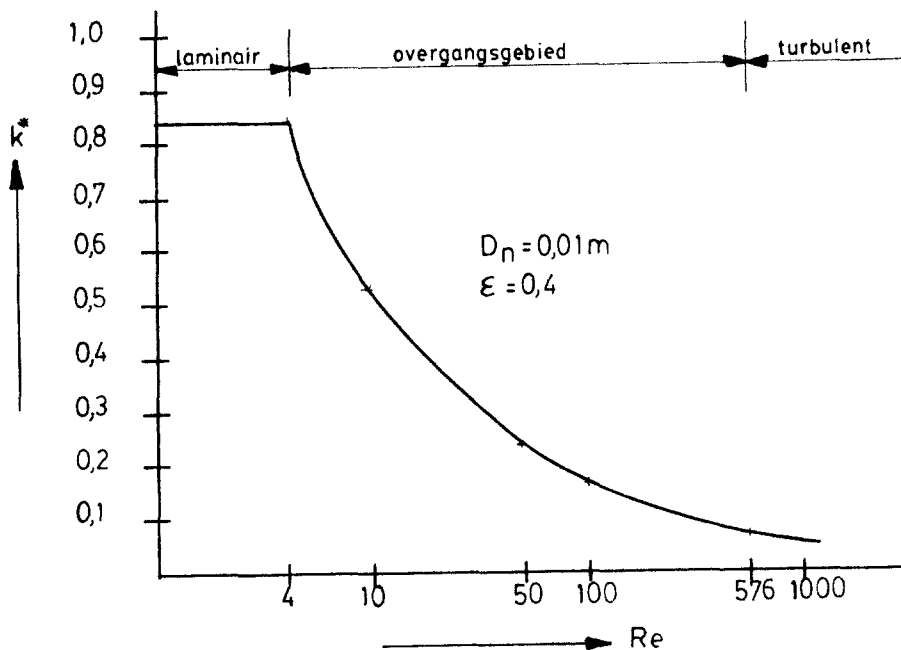
Als gevolg van deze aanpak is de doorlatendheidscoëfficiënt k^* een functie van het plaatselijk optredende verhang en dus van de stromingstoestand geworden.

Omdat in (7.72.) een tweedimensionale stromingstoestand wordt beschreven dient de modificatie volgens (7.76.) in x- en y-richting te worden uitgevoerd, waarbij ook weer eindige differenties worden toegepast.

Een analoge aanpak dient bij de doorlatendheid van de bekleding te worden gevolgd.

Ter illustratie is in figuur 7.29. het verband gegeven tussen de stroomsnelheid uitgedrukt in het Reynoldsgetal (Re) en de doorlatendheidscoëfficiënt (k^*) voor een poreus materiaal met een poriëngehalte van 0,4 en korreldiameter van 0,01 m.

Bij de berekening van de figuur is gebruik gemaakt van (7.35.) t/m (7.40.) en (7.76.).



Figuur 7.29.: doorlatendheidscoëfficiënt - Reynoldsgetal

Met behulp van (7.75.) is het verder zonder meer mogelijk lagen van verschillende doorlatendheden in het filter te definiëren.

In de bij deze paragraaf behorende programmatuur is geen scherpe scheiding van de lagen mogelijk.

De reden hiervoor is dat een knoop in het differentierooster een zekere omgeving van die knoop vertegenwoordigt. Hierdoor wordt numeriek altijd een tussenlaag gevormd, waarvan de doorlatendheidseigenschappen het gemiddelde zijn van de twee aanliggende lagen. De dikte van deze tussenlaag is gelijk aan de maasafstand in het differentierooster. Door ter weerszijden van de laagovergang knopen aan te brengen, dat wil zeggen een rij knopen per laag extra, is het echter in principe mogelijk een scherpe overgang in de berekeningen te betrekken.

Opmerkingen bij het rekenproces

Voor het oplossen van de stelsels vergelijkingen, zoals door (7.46.), (7.55) en (7.75.) zijn weergegeven, is in de programmatuur gebruik gemaakt van een indirecte oplossingsmethode, waardoor op een iteratieve wijze het eindresultaat wordt verkregen.

In wat vereenvoudigde vorm werkt het iteratieve oplossingsproces (Gauss-Seidel) als volgt:

Zij gegeven het stelsel vergelijkingen

$$A \underline{x} = \underline{b} \text{ met } A = (a_{ij}) \quad (7.77.)$$

Neem een willekeurige start-vector $\underline{x}^{(0)}$

De i^e component van het $(m+1)^e$ iteraat wordt nu als volgt berekend:

$$x_i^{(m+1)} = x_i^{(m)} + \frac{\omega}{a_{ii}} r_i^{(m)} \quad (7.78.)$$

waarin:

$$r_i^{(m)} = b_i - \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} x_j^{(m+1)} - \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j^{(m)} \quad (7.79.)$$

ω = overrelaxatiecoëfficiënt

De overrelaxatiecoëfficiënt ω heeft tot doel het iteratieproces te versnellen. Teneinde divergentie te voorkomen moet $0 < \omega < 2$ zijn. De optimale waarde voor ω is probleem-afhankelijk en niet op voorhand bekend; $\omega = 1,5$ lijkt in het algemeen een goede waarde.

Het werkelijke iteratieproces is bij fysische niet-lineariteit complexer dan door (7.77.) t/m (7.79.) aangeduid.

Formule (7.77.) moet dan ook als volgt worden gemodificeerd:

$$A(\underline{x}) \underline{x} = \underline{b} \quad (7.80.)$$

Met andere woorden: de systeemeigenschappen zijn een functie van de nog onbekende vector \underline{x} (doorlatendheid in de knopen is een functie van de plaatselijke stromingstoestand).

Als gevolg van de bovenbeschreven onderlinge afhankelijkheden is de convergentie problematisch geworden.

De toepassing van wat kunstgrepen blijkt onvermijdelijk te zijn:

- a. $A(\underline{x})$ in het begin van het iteratieproces niet na elke iteratiestap aanpassen met behulp van de nieuwe waarde van \underline{x} maar hiermee wachten totdat een zekere nauwkeurigheid in \underline{x} is bereikt.

Stel de toelaatbare fout in \underline{x} is F . Het iteratieproces gaat dan voort, zonder aanpassen van $A(\underline{x})$, totdat de fout in \underline{x} een grootte heeft van αF , met $\alpha \gg 1$.

- b. De nieuwe schatting van $A(\underline{x})$ dient wat onderrelaxatie mee te krijgen, hetgeen wil zeggen dat het verschil van de nieuwe waarde van $A(\underline{x})$ ten opzichte van de oude waarde maar voor een deel in de berekening wordt opgenomen. De aanpassing van de doorlatendheden in de diverse knopen wordt dus gedempt (β).

Stel $A^o(\underline{x})$ is de oude waarde voor $A(\underline{x})$ en $A(\underline{x})^n$ de nieuwe waarde.

Gerekend wordt dan verder met:

$$A^r(\underline{x}) = (A^o(\underline{x}) + \beta A^n(\underline{x})) / (1 + \beta) \quad (7.81.)$$

De juiste afregeling van het onder a. en b. beschrevene is afhankelijk van het probleem, waardoor geen eenduidige uitspraak kan worden gedaan over de meest optimale waarden voor α en β .

Door voor de geometrisch tweedimensionale berekening eerst een een-dimensionale berekening te maken en de resultaten hiervan als beginschatting voor het tweedimensionale geval te gebruiken, kan het rekenproces ook nog worden versneld.

Om de volgende redenen is gekozen voor een iteratieve oplossingswijze van de stelsels vergelijkingen:

- Er is naar verhouding weinig computergeheugen nodig.
De matrix $A(x)$ in (7.80.) hoeft niet te worden opgeslagen, de elementen van $A(x)$ worden bij elke iteratiestap opnieuw bepaald.
Alleen de vectoren \underline{x} en \underline{b} moeten worden opgeslagen. Van \underline{x} , dat wil zeggen de stijghoogten in de knopen van het eindige differentierooster, moeten twee versies worden onthouden; een oude en nieuwe versie (zie ook formule (7.78.)).
- In aansluiting op het hierboven gestelde geldt dat voor fysisch niet-lineair gedrag de matrix $A(x)$ voortdurend moet worden aangepast. In dit geval geeft het iteratieve oplossingsproces een sneller resultaat.
- Tot slot geldt dat de iteratieve oplossingsprocedure eenvoudiger op een rekenautomaat te implementeren is.

Verder zij opgemerkt dat het hier beschreven iteratieve oplossingsproces voor alle hiervoor genoemde rekenmodellen toegepast kan worden. Het is hier bij punt 8. behandeld omdat het hier in zijn meest complexe vorm naar voren komt.

In appendix 7.1. is een computerlisting opgenomen van het hier besproken rekenmodel. In het programma wordt als eerste benadering het filter eendimensionaal opgevat (voor de theorie zie punt 7.), waarna de resultaten van deze benadering als beginschatting worden gebruikt voor het uiteindelijke iteratieproces.

Het doel van een en ander is het rekenproces te versnellen.

9. R e k e n v o o r b e e l d e n

In het voorgaande is de theorie gegeven met behulp waarvan een aantal computerprogramma's is geschreven. Het gereedschap is nu dus klaar. Door vergelijking van de resultaten van berekeningen met behulp van de diverse programma's kan inzicht worden verkregen in de vraag in hoeverre een eenvoudig rekenprogramma de resultaten van een complexer programma benadert.

Beseft moet echter worden dat de hier getrokken conclusies niet zonder meer een algemene geldigheid toegekend kunnen worden, daarvoor zijn de parameters in dit beperkte kader te weinig gevarieerd.

a. Eéndimensionale parameterstudie

Allereerst wordt hier gebruik gemaakt van de bij de punten 2, 4, 5 en 7 beschreven theorie (resp. fysisch-lineaire en fysisch niet-lineaire storming door de zetting, bij een fysisch lineair en geometrisch één-dimensionaal filter).

Figuur 7.30. geeft de resultaten van een berekening van een constructie zoals deze in de Deltagoot heeft gelegen (Oesterdam). Het filter komt echter niet geheel overeen. In de Deltagoot bestond het filter uit mijnsteen met daarboven een grindlaag. Dit is echter met de hier gebruikte programma's niet te modelleren. Voor een vergelijking met de resultaten van de proeven in de Deltagoot wordt verwezen naar figuur 7.44.

In figuur 7.30. is de breedte van de spleten tussen de blokken gevarieerd: $3 \cdot 10^{-4}$, $7 \cdot 10^{-4}$ en $1,5 \cdot 10^{-3}$ m. De doorlatendheid van de spleten is een functie van de stromingstoestand, dat wil zeggen fysisch niet-lineaire stroming. De hydraulische randvoorwaarde komt overeen met de in punt 2 gegeven verbanden, zie V en VI (figuur 7.30.). Voor de ligging van de freatische lijn is in afwijking van het gestelde bij punt 3 het stilwaterniveau aangehouden.

I geeft de maximale verschildruk ter plaatse van het punt van golfbreking.

De drukken zijn zodanig dat de bekleding vrijwel steeds op zijn minst potentieel instabiel is.

In werkelijkheid zal, doordat de bekleding in beweging komt, het stromingsbeeld zich wijzigen. Dit wordt hier echter verwaarloosd.

In III wordt ter illustratie het verloop van de verschildrukken bij een spleetbreedte van $3 \cdot 10^{-4}$ m gegeven.

Onder het begrip "verschildruk" wordt verstaan het drukverschil tussen boven- en onderzijde van de bekleding.

In IV wordt eveneens ter illustratie het verloop gegeven van de doorlatendheden van de bekleding voor twee punten in I.

Uit I zijn de volgende conclusies te trekken:

- de spleetbreedte heeft maar een betrekkelijke invloed op de maximale verschildrukken
- duidelijk blijkt de invloed van een randstoring, in dit geval de dichte onderste begrenzing van het filter.

Figuur 7.31. geeft voor hetzelfde probleem als in figuur 7.30. de effecten weer van een variatie in de doorlatendheid van het filter. Zoals uit de figuur blijkt wordt de grootte van de maximale verschildruk sterk door de doorlatendheid van het filter beïnvloed.

Een en ander doet vermoeden dat fysische niet-lineariteit, dat wil zeggen plaatselijke verlaging van de doorlatendheid, een aanzienlijke invloed moet hebben.

In figuur 7.32. wordt een vergelijking gemaakt tussen een fysisch lineaire en niet-lineaire stroming door de bekleding; het betreft hetzelfde probleem als in figuur 7.30.

Geconcludeerd moet worden dat de verschillen klein zijn.

Figuur 7.33. geeft de resultaten als gevolg van een afwijkende hydraulische randvoorwaarde. Er vindt nu alleen toestroming plaats vanuit de freatische lijn in het filter.

Door vergelijking met de figuren 7.30. en 7.33. blijkt dat het effect van de brekende golf op de verschildrukken overheerst.

Ook hier blijkt in I de invloed van de onderste begrenzing van het filter.

Verder volgt uit I ook weer dat het weinig uitmaakt of de bekleding fysisch lineair dan wel niet-lineair wordt doorgerekend.

b. Twee-dimensionale rekenvoorbeelden

b.1. Fysisch lineaire stromingen

De hier gegeven resultaten van berekening zijn verkregen met programmatuur overeenkomstig de bij punt 6 gegeven theorie.

Ter illustratie van de mogelijkheden van deze aanpak zijn in de figuren 7.34. en 7.36. de resultaten gegeven van een berekening voor respectievelijk de brekende golf en de teruggetrokken golf.

In figuur 7.34. geeft de afbeelding van de potentiaallijnen in de omgeving van kolom 66, dat wil zeggen iets voorbij het punt van golfbreking, een waterscheiding te zien.

In deze strook ontmoeten twee stromingen elkaar; een stroming van beneden als gevolg van de brekende golf en een stroming van boven uit de freatische lijn. Een en ander uit zich ook in de richting van de stroming door de bekleding; beneden het punt van golfbreking het filter in en daarboven het filter uit.

In de figuren 7.36. en 7.37. worden ook weer ter illustratie enkele resultaten gegeven van wat detailstudies.

Figuur 7.38. laat het effect zien van een waterdicht schot en met bitumen gevulde voegen ten opzichte van een doorgaande bekleding en filter. Deze constructie komt bij overgangen in de praktijk veelvuldig voor, bijvoorbeeld bij een bestaande basaltbekleding waarop later een ander type bekleding wordt aangesloten.

Overeenkomstig de verwachting geeft de bovenste afbeelding de grootste verschillen.

b.2. Fysisch niet-lineaire stromingen

In de figuren 7.39. en 7.40. worden twee rekenvoorbeelden gegeven. In aanvulling op de hiervoor in b.1. gegeven figuren is een tweetal afbeeldingen toegevoegd: equi-Reynoldslijnen en equi-doorlatendheidslijnen. Voor de betekenis van één en ander wordt verwezen naar punt 4. De grootte van het Reynoldsgetal (of het optredende verhang) is onder andere van belang voor het afschatten van de mogelijkheid tot interne erosie in het filter.

Hoewel de maximale verschillen ter plaatse van het punt van golfbreking in de figuren 7.39. en 7.40. niet veel verschilt, is de stromingstoestand afwijkend.

Door de grotere spleetbreedte en diameter van de korrels in het filter is de stroming in figuur 7.40. meer turbulent dan in figuur 7.39. Een en ander valt direct af te lezen aan het verloop van de equi-Reynoldslijnen.

Zo bedraagt de maximale waarde voor het Reynoldsgetal in figuur 7.39. ca. 300 en in figuur 7.40. ca. 650.

Verder blijkt in de dikte van het filter nogal veel variatie in stroomsnelheden aanwezig te zijn; de concentratie van de stromingen naar de spleten toe is duidelijk waar te nemen.

Ook de eerder genoemde waterscheiding (op enige afstand boven het punt van golfbreking) valt duidelijk aan de Reynoldsgetalen te traceren. Zoals beschreven bij punt 4 is de doorlatendheid een functie van het Reynoldsgetal.

Hieruit volgt dat er twee laminaire gebieden in het filter te onderkennen moeten zijn: ter plaatse van de waterscheiding en in de omgeving van de knoop geheel links aan de onderkant van het differentieerrooster (in dit punt kan geen water stromen).

Zowel in figuur 7.39. als 7.40. zit er een factor 10 tussen de kleinste en grootste doorlatendheidscoëfficiënt in het filter. Zoals uit de onderste afbeelding in de beide figuren blijkt varieert de doorlatendheid van de spleten in de bekleding ook aanzienlijk.

In de onderste afbeeldingen is door middel van een streepjeslijn het resultaat van een berekening gegeven voor de verschildrukken met volledige fysische lineariteit (zowel bekleding als filter), waarbij het filter ook weer geometrisch tweedimensionaal wordt opgevat. Uitgegaan werd hierbij van doorlatendheidscoëfficiënten overeenkomend met een laminaire stroming.

Bij onderlinge vergelijking blijkt er een aanzienlijk verschil te bestaan tussen de twee rekenmethoden, waarbij de fysisch lineaire berekening de voor de bekleding meest ongunstige toestand oplevert. Verdere berekeningen met een geometrisch eendimensionaal filter blijken verschildrukken op te leveren die maar zeer weinig afwijken van de streepjeslijnen in beide figuren.

In overeenstemming met de resultaten, gegeven in de figuren 7.32. en 7.33, heeft het stromingstype in de spleten weinig invloed op de uitkomsten. In dit geval zelfs zo weinig dat het geen zin heeft de diverse rekenmethoden in één figuur op te nemen; de verschillen zijn te gering.

Uit het bovenstaande kan dan ook worden geconcludeerd, dat de in de figuren 7.39. en 7.40. geconstateerde verschillen voor een groot deel op rekening van het fysisch niet-lineaire gedrag van het filter moeten worden geschreven.

b.3. Fysisch niet-lineaire stromingen in gelaagd filter

Met de in appendix 7.1. opgenomen programmatuur is het mogelijk een gelaagd filter fysisch niet-lineair door te rekenen.

In figuur 7.41. en 7.42. worden de resultaten van twee rekenvoorbeelden gegeven. Bij beide voorbeelden is het filter opgebouwd uit twee lagen met een verschillende maatgevende diameter van het korrelig materiaal.

In figuur 7.41. is de bovenste laag (laag 2) uit grover materiaal samengesteld dan de onderste laag (laag 1).

In figuur 7.42. is dit omgekeerd; verder zijn alle gegevens gelijk. Doordat in figuur 7.41. direkt onder de bekleding een meer open materiaal ($d = 15 \text{ mm}$) aanwezig is dan in figuur 7.42. ($d = 7 \text{ mm}$), zijn de verschildrukken in figuur 7.41. het grootst.

De gelaagdheid van het filter komt in beide figuren vooral tot uiting bij de afbeeldingen van de equi-Reynoldslijnen en equi-doorlatendheidslijnen. Over een korte afstand in de richting loodrecht op het filter variëren de grootheden aanzienlijk, waarbij de lijnen in beide figuren een tegengesteld verloop hebben.

De laminaire doorlatendheidscoëfficiënt bedraagt:

$$d = 15 \text{ mm} - k = 1,88 \text{ m/s}$$

$$d = 7 \text{ mm} - k = 0,41 \text{ m/s.}$$

De bovenstaande waarden zijn berekend met behulp van (7.35) t/m 7.37.).

Ten gevolge van de fysische niet-lineariteit varieert de doorlatendheidscoëfficiënt k^* (zie (7.76.)) als volgt:

figuur 7.41.

$$\text{laag 1 } d = 7 \text{ mm } k^* \approx 0,41 - 0,10 \text{ m/s}$$

$$\text{laag 2 } d = 15 \text{ mm } k^* \approx 1,88 - 0,08 \text{ m/s}$$

figuur 7.42.

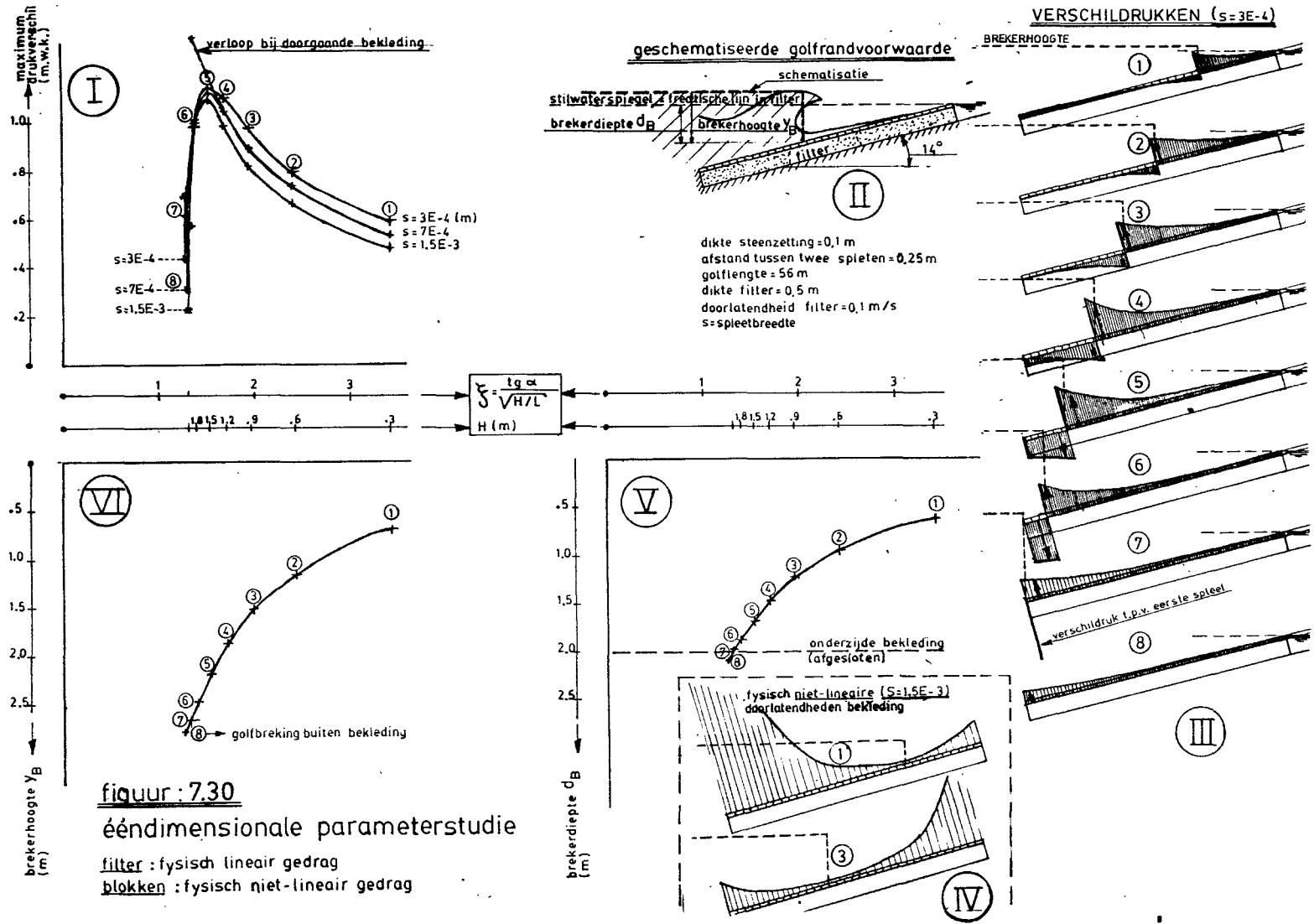
$$\text{laag 1 } d = 15 \text{ mm } k^* \approx 1,88 - 0,14 \text{ m/s}$$

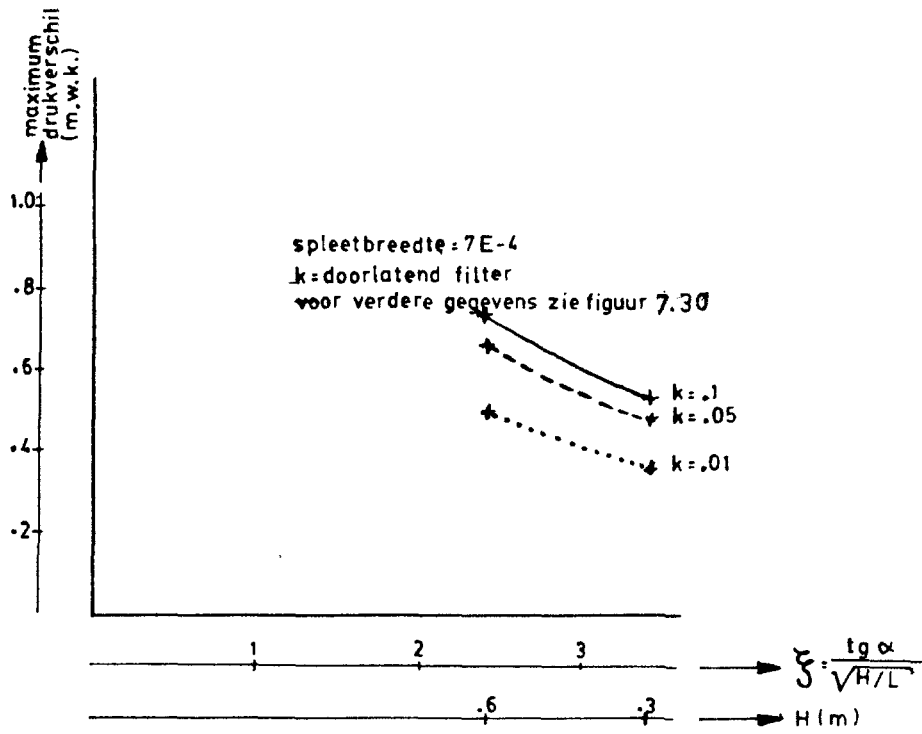
$$\text{laag 2 } d = 7 \text{ mm } k^* \approx 0,41 - 0,05 \text{ m/s}$$

Uit deze cijfers blijkt dat de doorlatendheid in laag 2 het meest varieert.

Verder valt op dat de bij b.1. beschreven waterscheiding in figuur 7.41. veel hoger ligt dan in figuur 7.42.

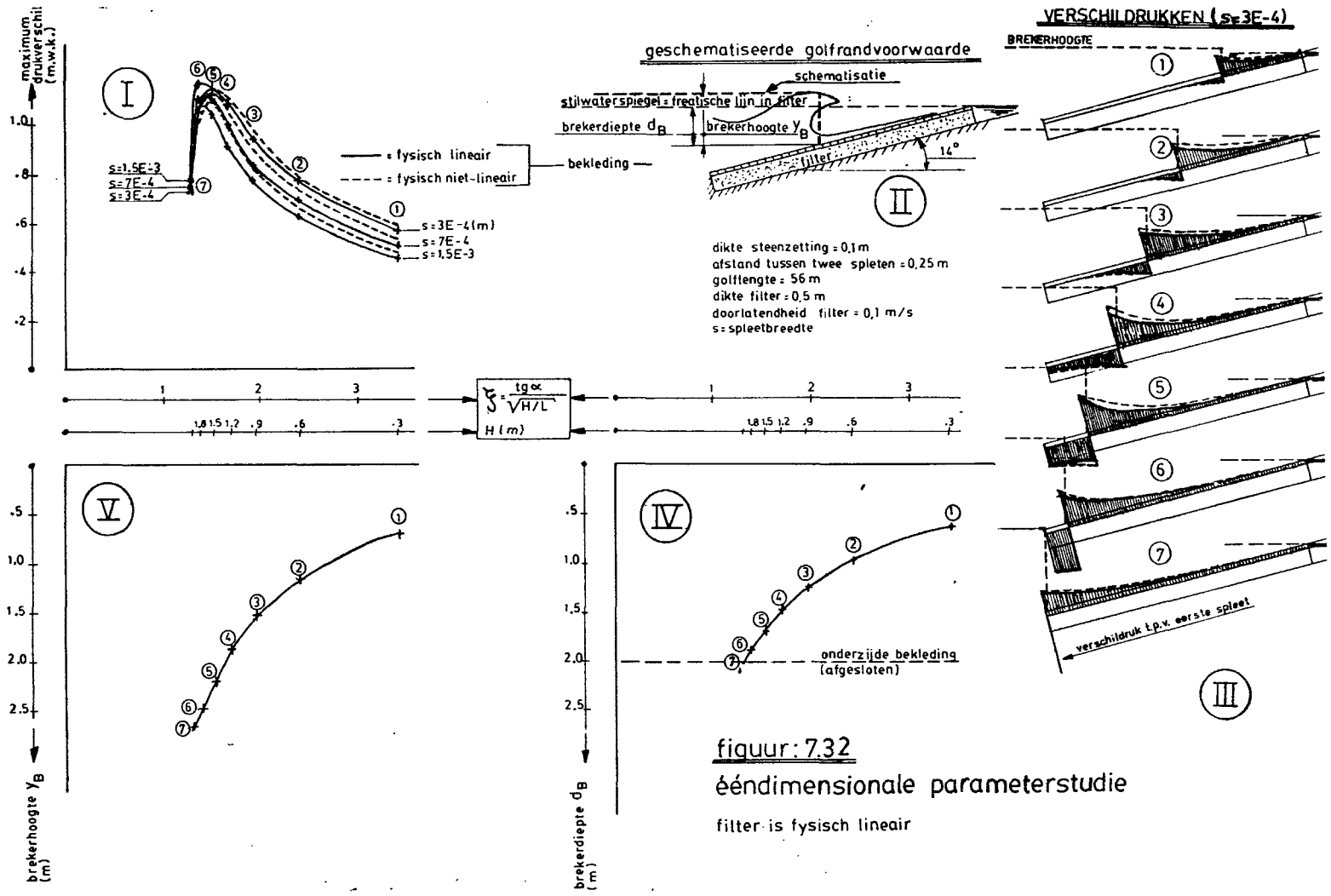
Figuur 7.30.: eëndimensionale parameterstudie



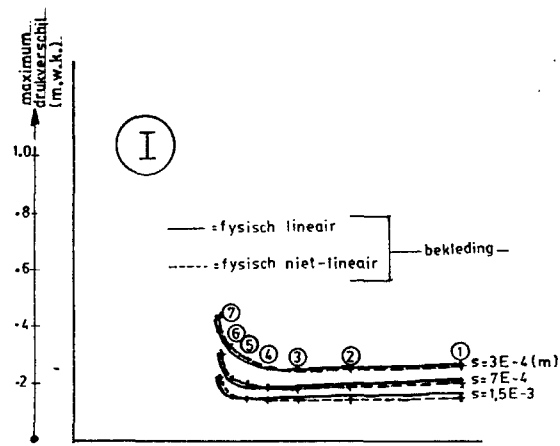


figuur 7.31.: variatie in de doorlatendheden van het filter

Figuur 7.32.: eendimensionale parameterstudie

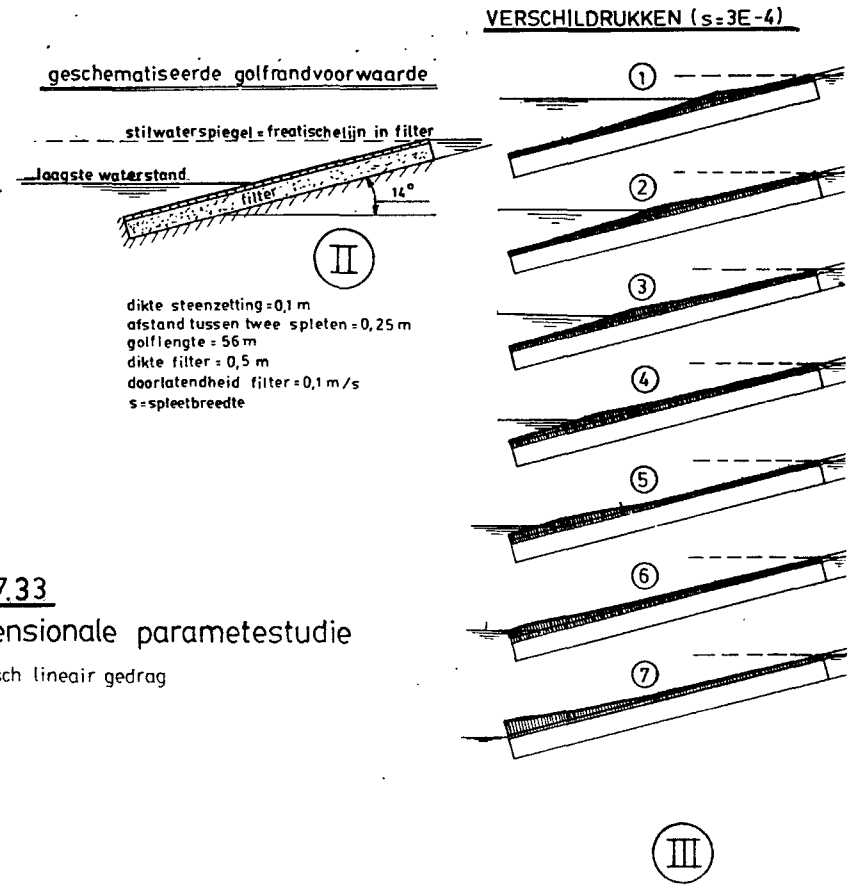
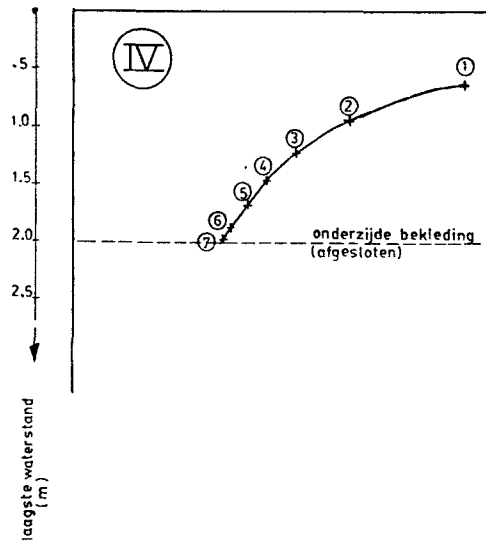


figuur 7.33 : eendimensionale parameterstudie



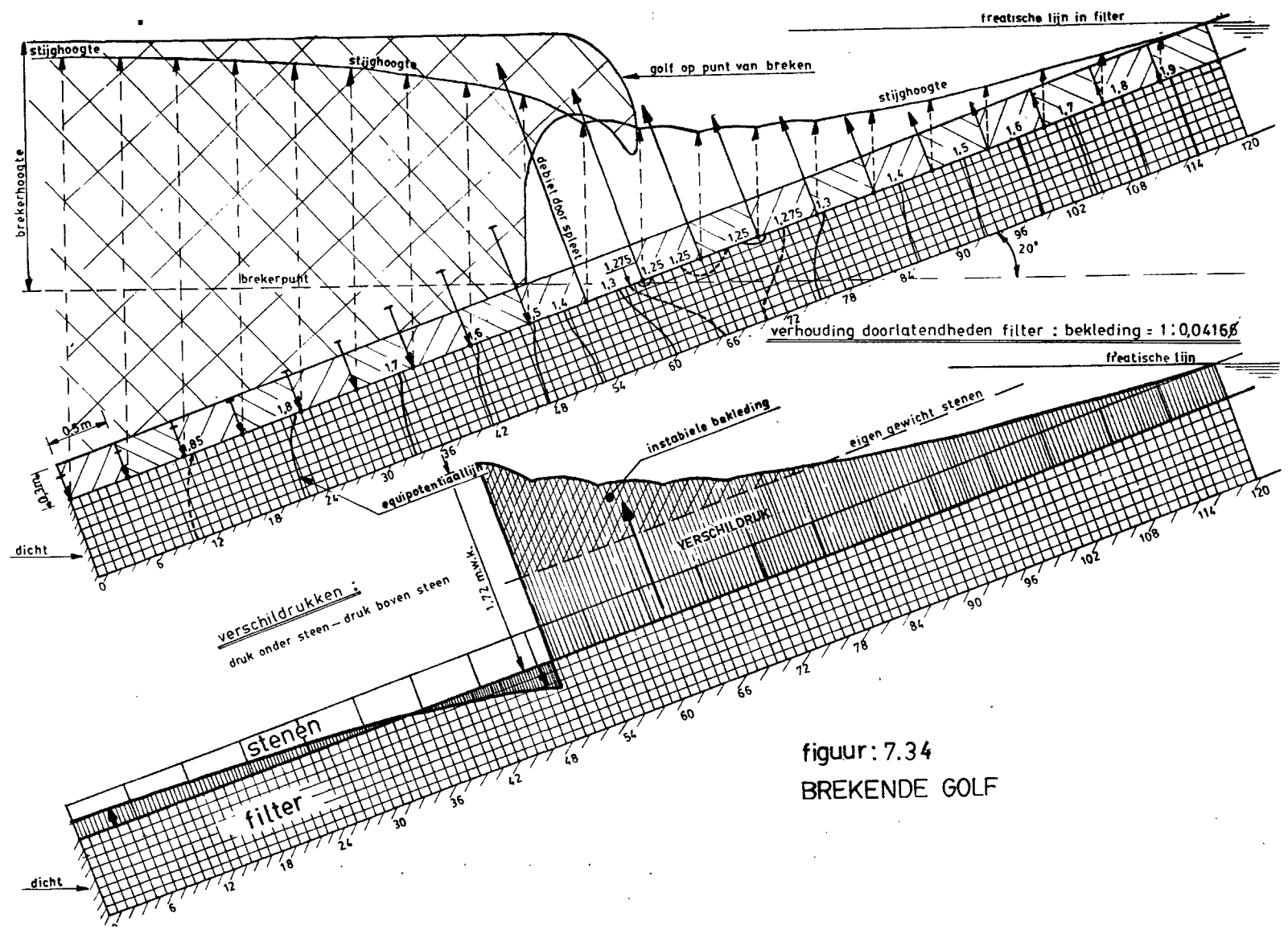
$$\xi = \frac{tg \alpha}{\sqrt{H/L}}$$

$$H (m)$$



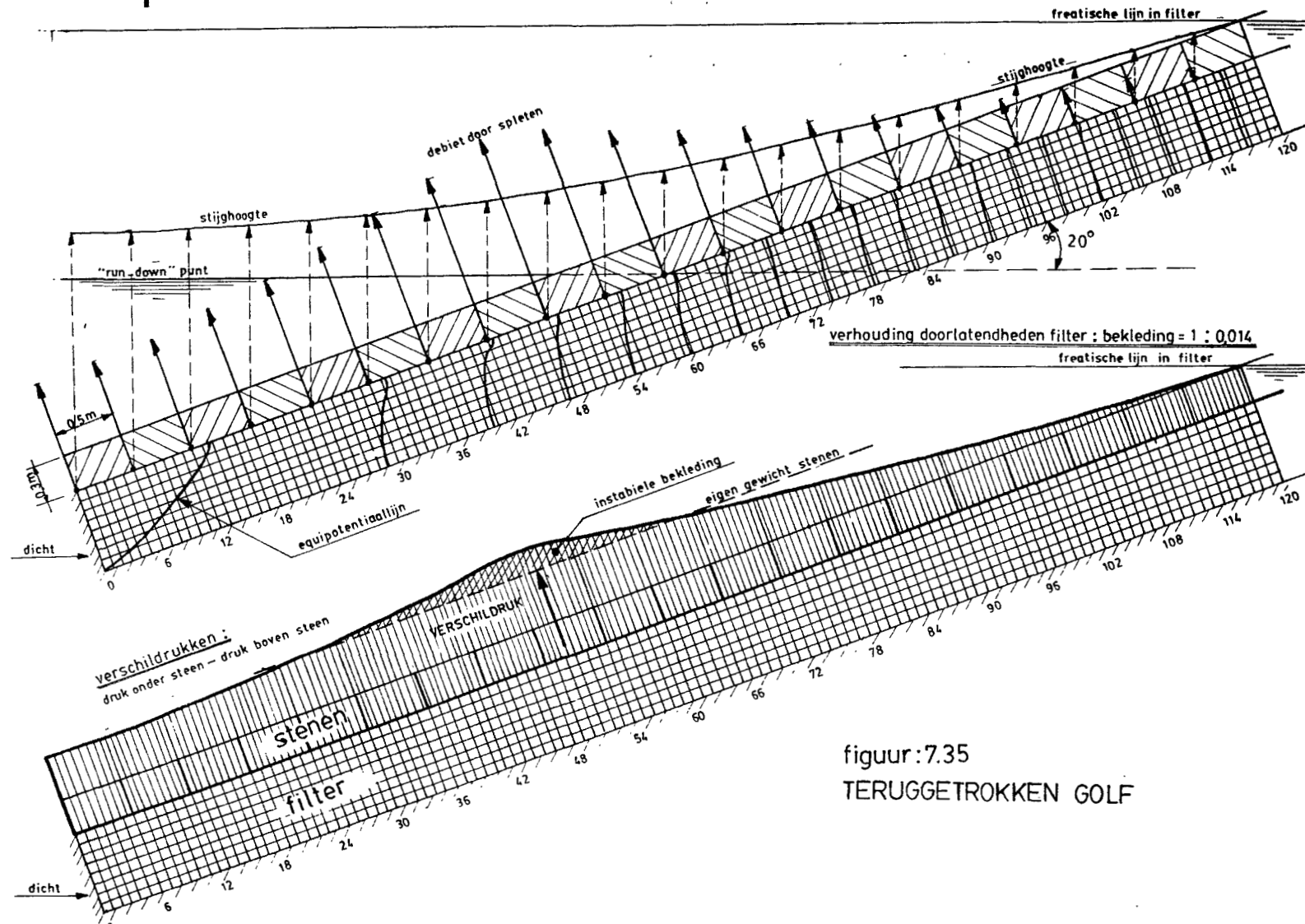
figuur : 7.33
ééndimensionale parametrestudie
filter : fysisch lineair gedrag

figuur 7.34.: brekende golf

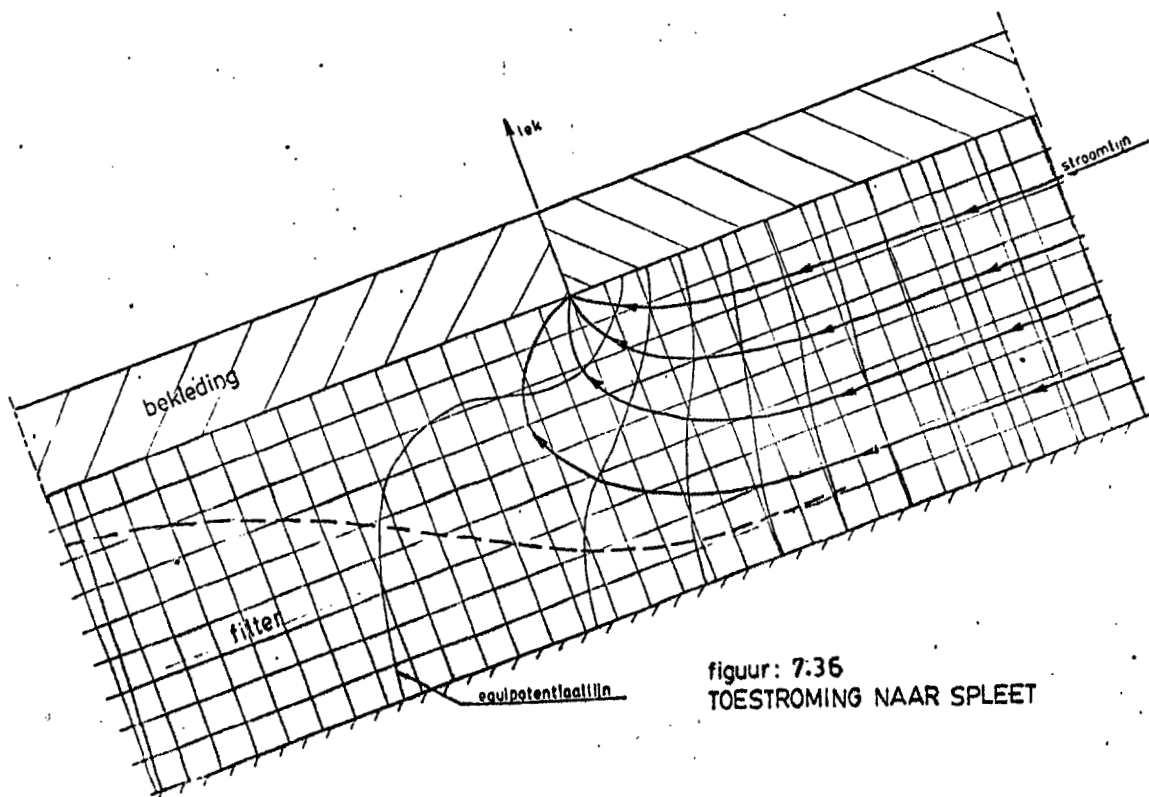


figuur: 7.34
BREKENDE GOLF

Figuur 7.35. teruggetrokken golf

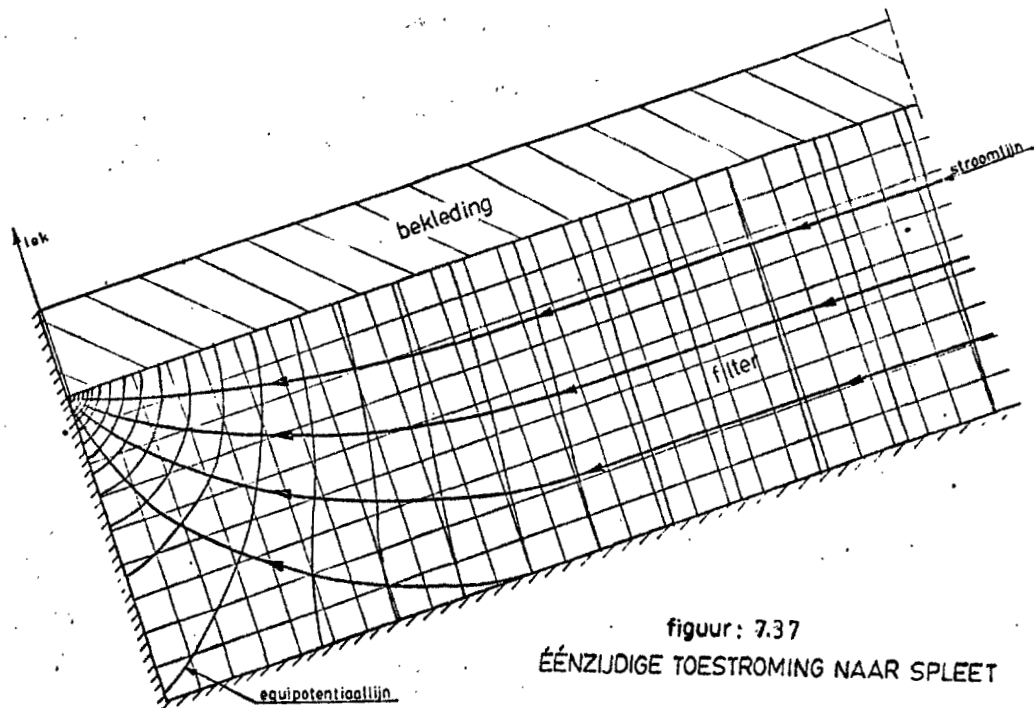


figuur:7.35
TERUGGETROKKEN GOLF

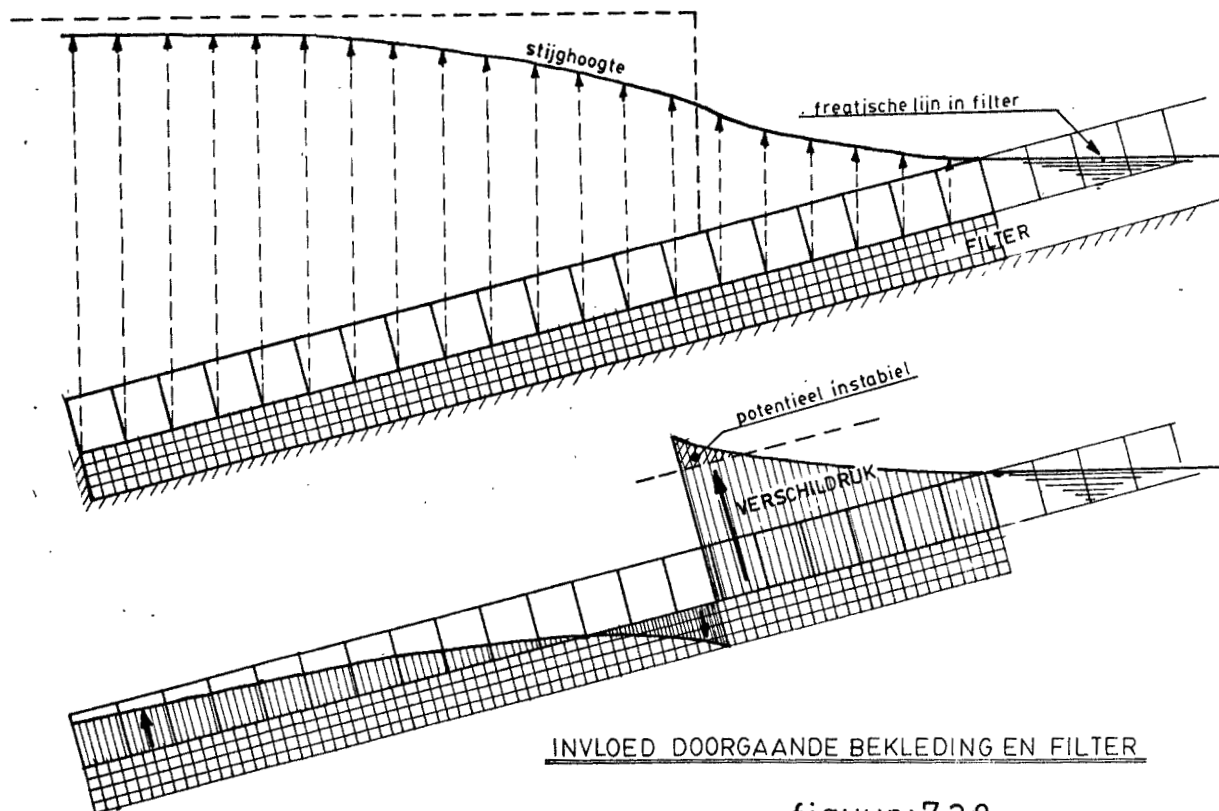
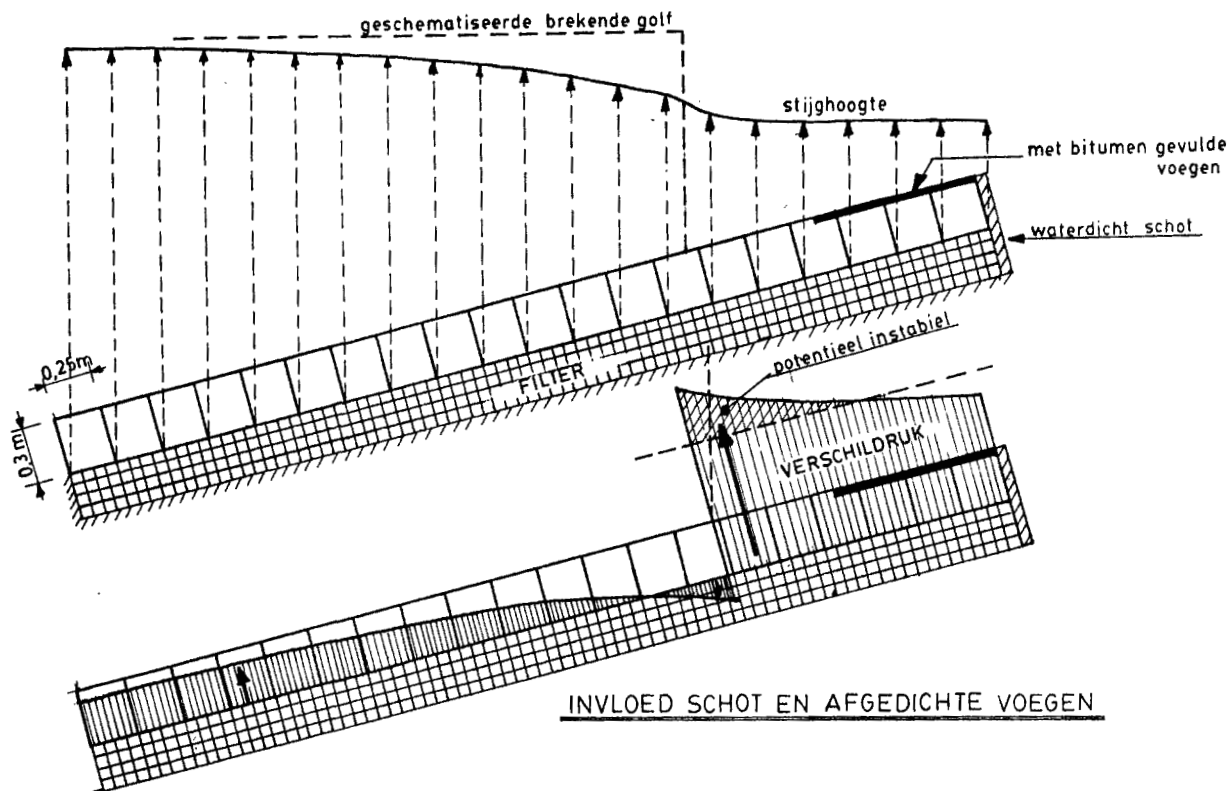


figuur: 7.36
TOESTROMING NAAR SPLEET

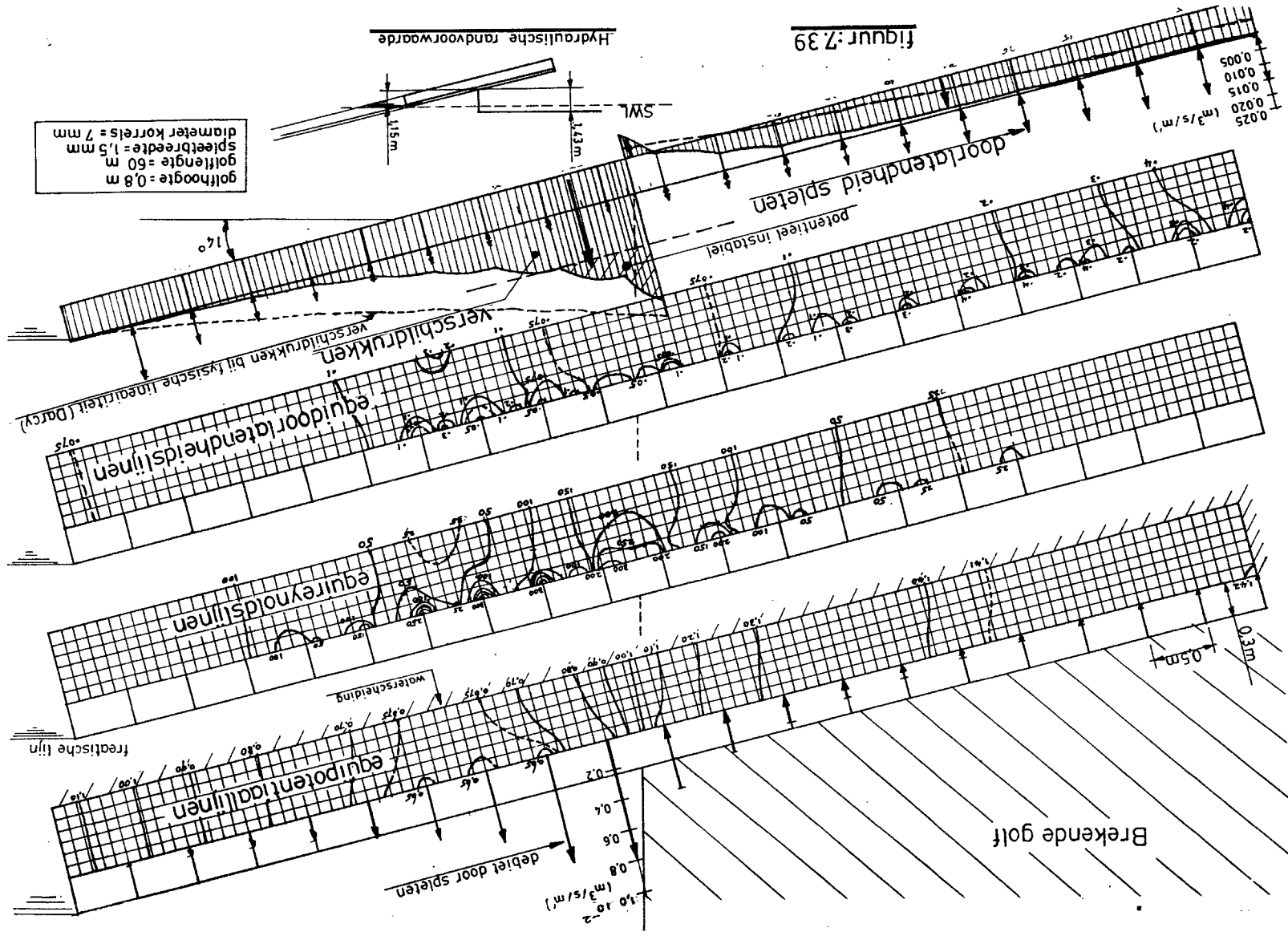
stroming bij bv. betonband



figuur: 7.37
ÉÉNZIJDIGE TOESTROMING NAAR SPLEET

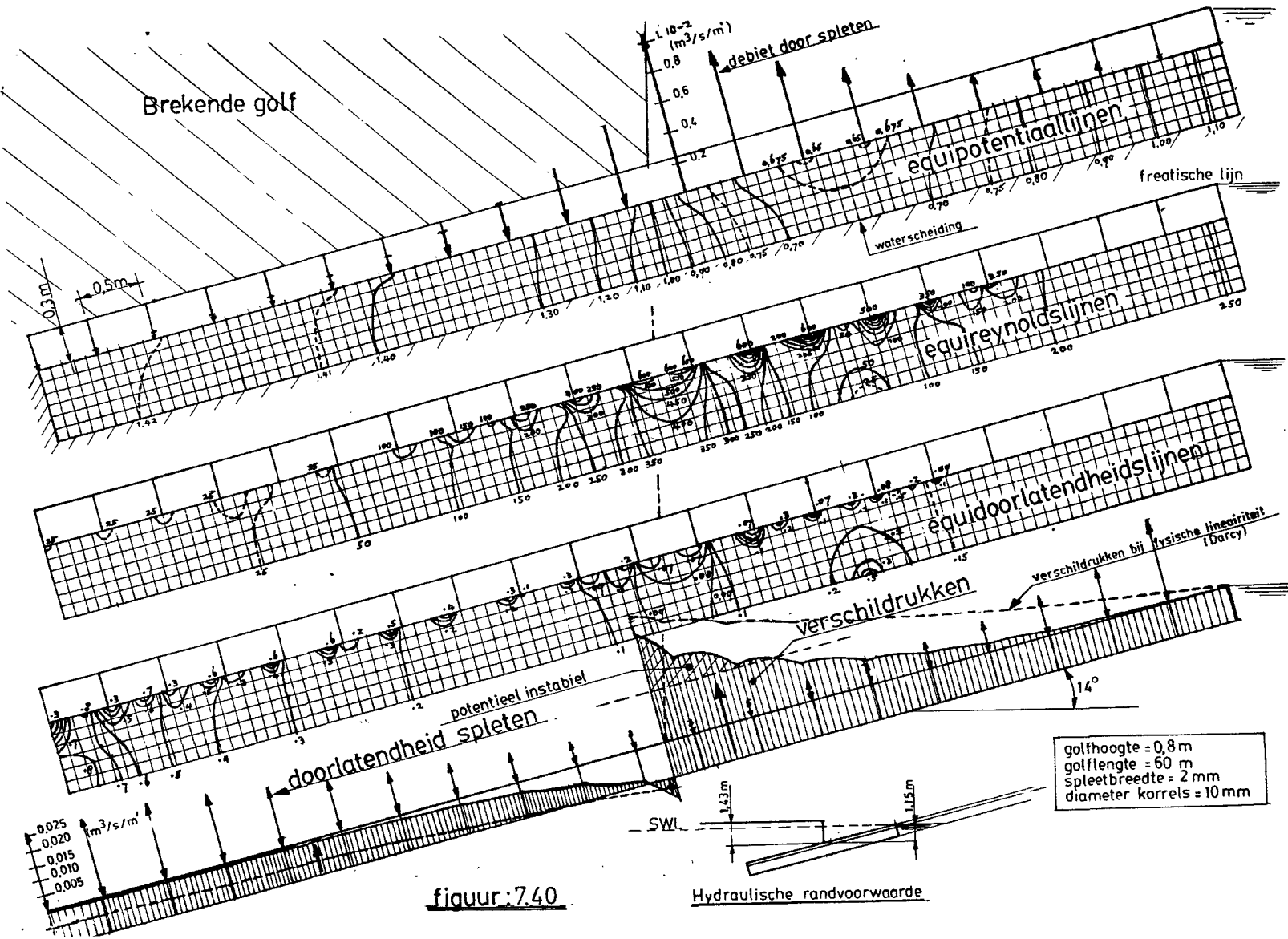


figuur:7.38



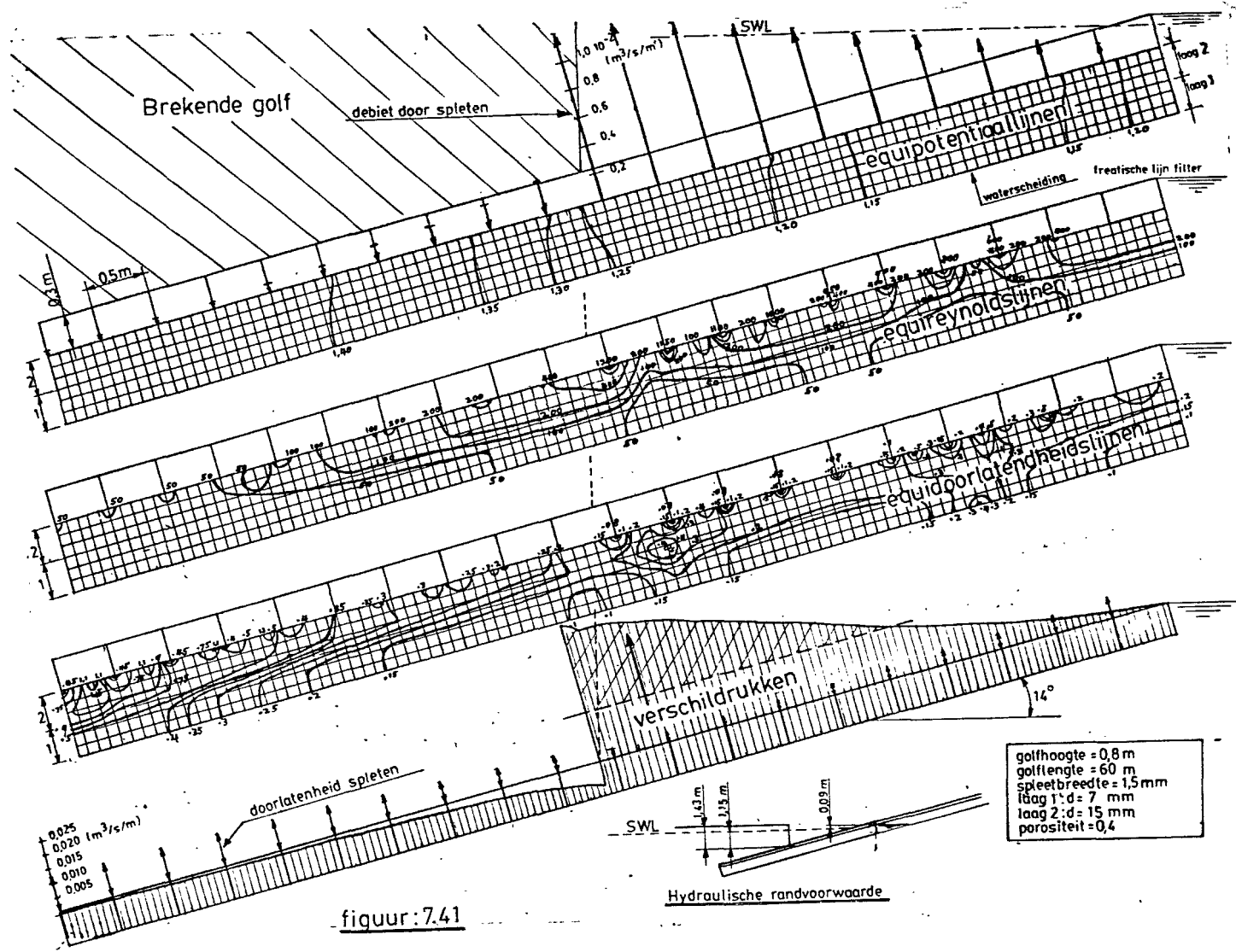
figuur 7.39.

Figuur 7.40.



figuur: 7.40

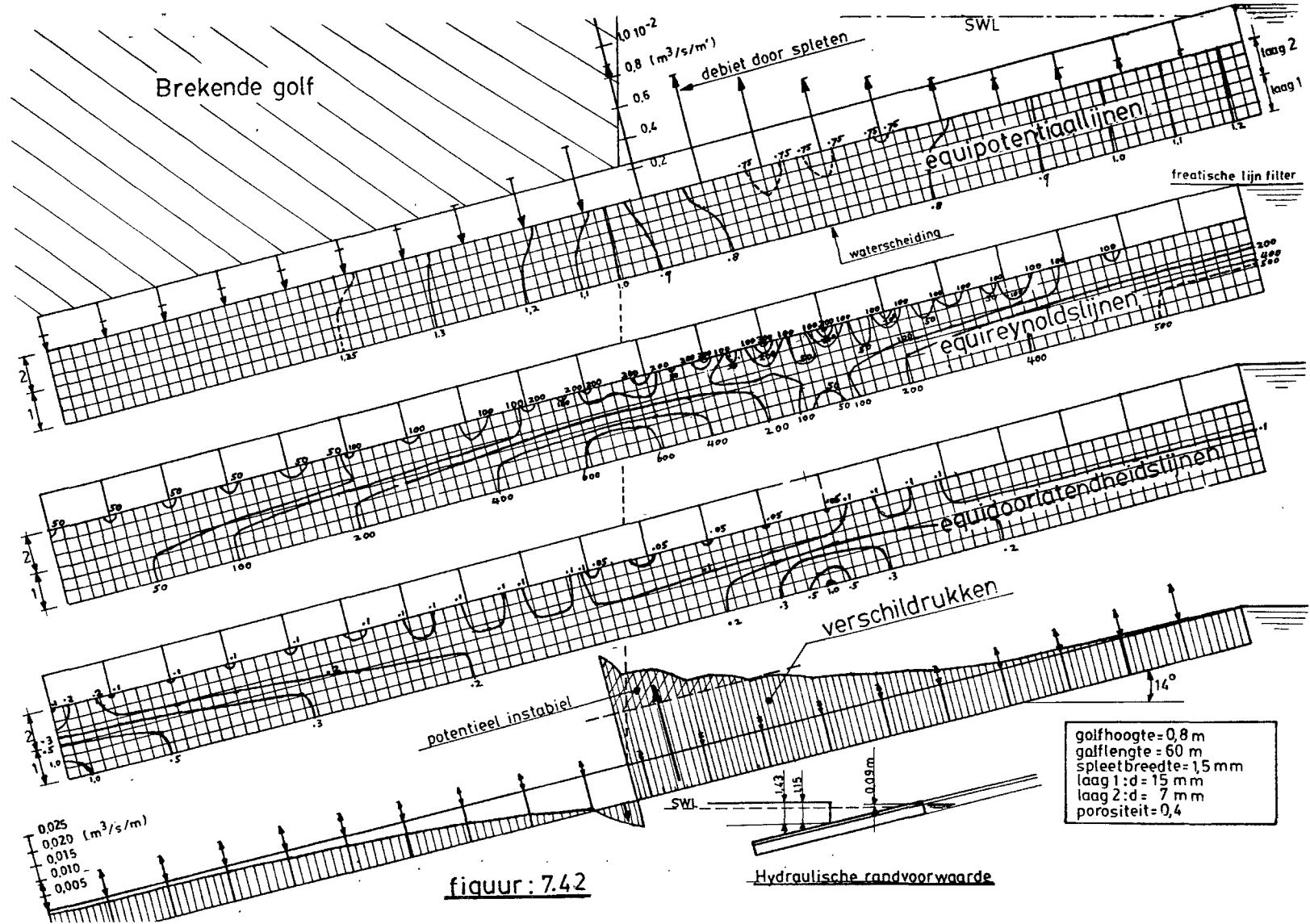
figuur 7.41.



figuur: 7.41

golffoogte = 0,8 m
 golflengte = 60 m
 spleetbreedte = 1,5 mm
 laag 1: d = 7 mm
 laag 2: d = 15 mm
 porositeit = 0,4

Figuur 7.42.



figuur: 7.42

10. V e r g e l i j k i n g d i v e r s e r e k e n m e t h o d e n

Bij het vorige punt zijn de volgende methoden gebruikt:

- I. fysische lineariteit van de bekleding en het filter, filter geometrisch eendimensionaal
- II. fysische niet-lineariteit van de bekleding en fysische lineariteit van het filter, filter geometrisch eendimensionaal
- III. fysische lineariteit van de bekleding en het filter, filter geometrisch tweedimensionaal
- IV. fysische niet-lineariteit van de bekleding en het filter, filter geometrisch tweedimensionaal (met eventueel fysisch lineair gedrag van bekleding of filter).

Uit de gemaakte berekeningen kan worden geconcludeerd dat de grootte van de doorlatendheid van het filter van overheersend belang is ten opzichte van die van de bekleding. Tevens blijkt dat bij fysische lineariteit een geometrisch eendimensionale benadering van het filter niet wezenlijk andere waarden oplevert dan een tweedimensionale benadering. Wel geeft de tweedimensionale benadering meer inzicht in de stromingen in detail.

Het ligt voor de hand te veronderstellen dat een geometrisch eendimensionaal en fysisch niet-lineair filter het geheel vrij goed zal beschrijven tegen een redelijke rekentijd.

Appendix 7.2. geeft de programma-listing voorzien van de bovengenoemde specificaties (met voorbeeld van de uitvoer).

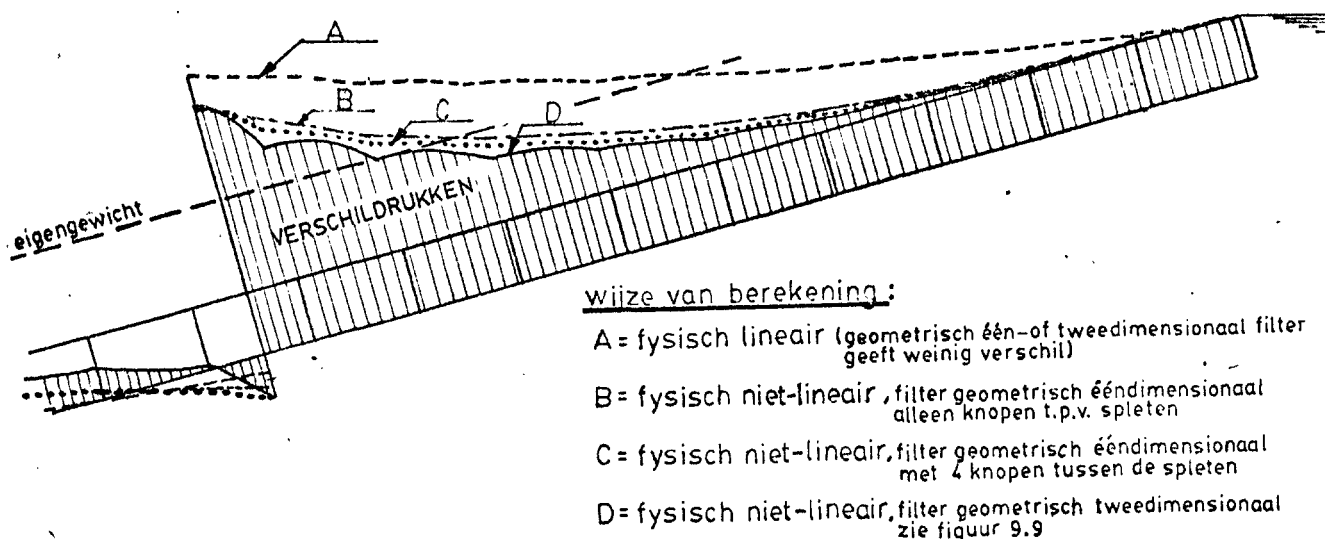
Het programma is gebaseerd op een combinatie van de bij punt 2, 4 en 6 gegeven theorie.

Figuur 7.43. geeft een vergelijking van de grootten van de verschillen bij verschillende rekenmethoden. De conclusie is duidelijk. De methoden B, C en D verschillen onderling niet veel; alleen methode A wijkt nogal af.

De rekentijden variëren aanzienlijk: $B : C : D \approx 1 : 9 : 200$.

Hierbij is de rekentijd van B ongeveer 20 minuten op een Apple II microcomputer. Gezien de uitkomsten en de rekentijden ligt het in het kader van toekomstige parameterstudies voor de hand gebruik te maken van de programmatuur van appendix 7.2. (B en C).

Wil men daarentegen detailinformatie verkrijgen, heeft men meerdere lagen in het filter of een referentiekader nodig, dan is de programmatuur in appendix 7.1. de aangewezen weg.



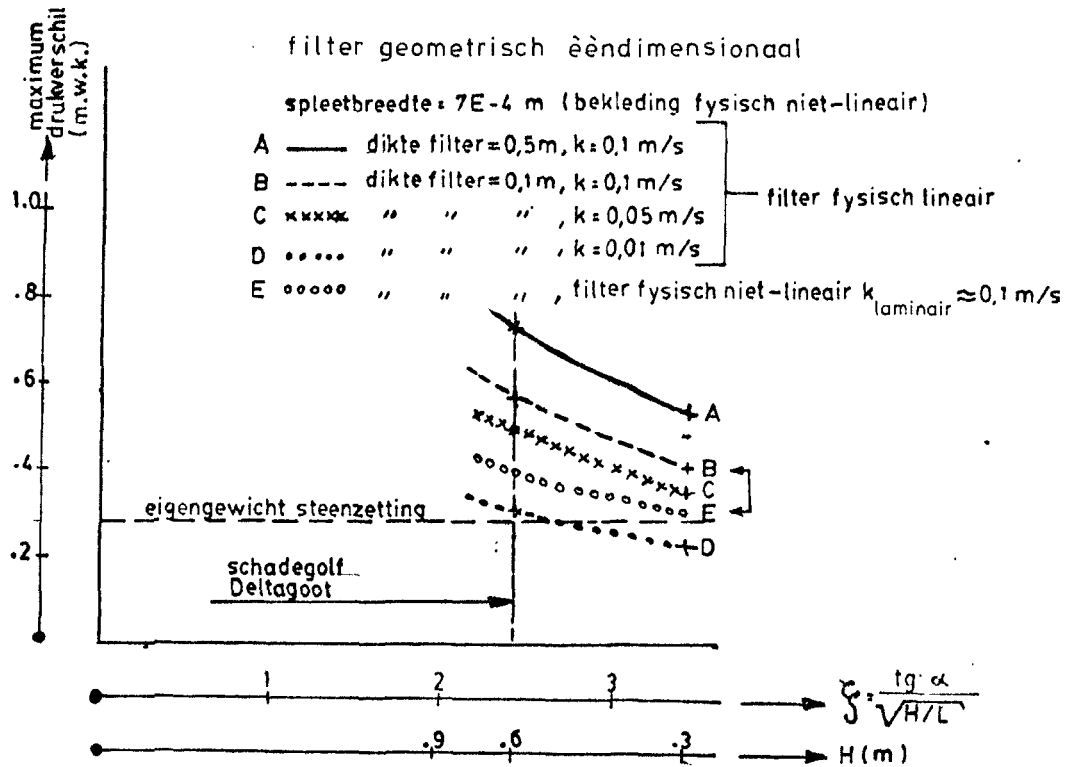
figuur 7.43.: vergelijking verschillende berekeningswijzen

Figuur 7.44. geeft een vergelijking van verschillende rekenmethoden voor een in de Deltagoot beproefde constructie.

Uit de spreiding in de resultaten blijkt duidelijk de invloed van de doorlatendheid van het filter.

Bij de vergelijking van de berekening met fysisch niet-lineair gedrag van het filter E, met een laminaire doorlatendheidscoëfficiënt gelijk aan B, blijken de drukken weer aanzienlijk lager te liggen.

De drukken bij E liggen nog wel vrij ver boven het eigen gewicht van de steenzetting. Mogelijk was er in de Deltagoot wat klemming tussen de blokken onderling, was de stormingstoestand niet stationair, is de hydraulische randvoorwaarde niet voldoende nauwkeurig in de programmatuur opgenomen, enzovoort.



figuur 7.44.: vergelijking met proef in de Deltagoot (Oesterdam)

Tot nu toe is de brekende golf alleen met de in punt 2 behandelde geschematiseerde vorm in de berekeningen opgenomen.

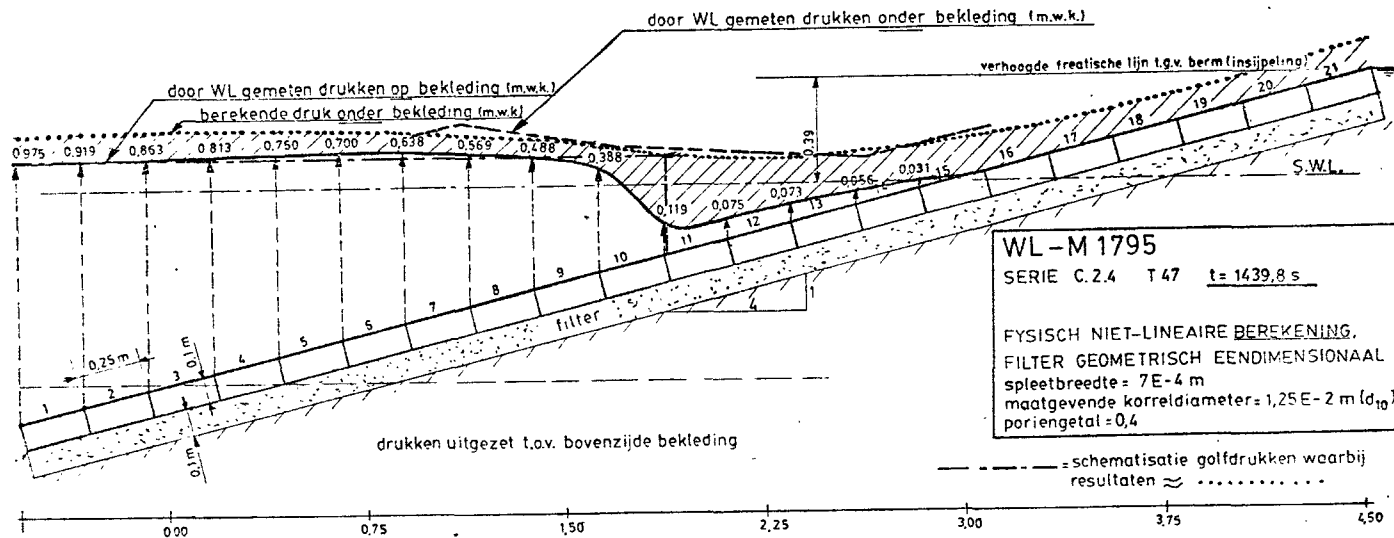
Door ter plaatse van elke spleet de door het WL gemeten golfdrukken op de bekleding als hydraulische randvoorwaarde in de programmatuur van appendix 7.2. in te voeren is het mogelijk te controleren of de gemeten en berekende drukken onder de bekleding overeenkomen.

Figuur 7.45. geeft een voorbeeld van zo'n aanpak.

Aansluitend op de weergave van de meetresultaten in lit. 53 en in afwijking van de voorafgaande figuren is de druk onder de bekleding aan de bovenzijde van de bekleding naar boven uitgezet.

In de figuur is de ligging van de freatische lijn in het filter vrij hoog aangenomen wegens de aanwezige berm, waar door achterblijvend water van de golfloop een voortdurende insijpeling plaatsvindt.

figuur 7.45.: vergelijking gemeten en berekende drukk



Vergelijking gemeten en berekende drukk

figuur: 7.45

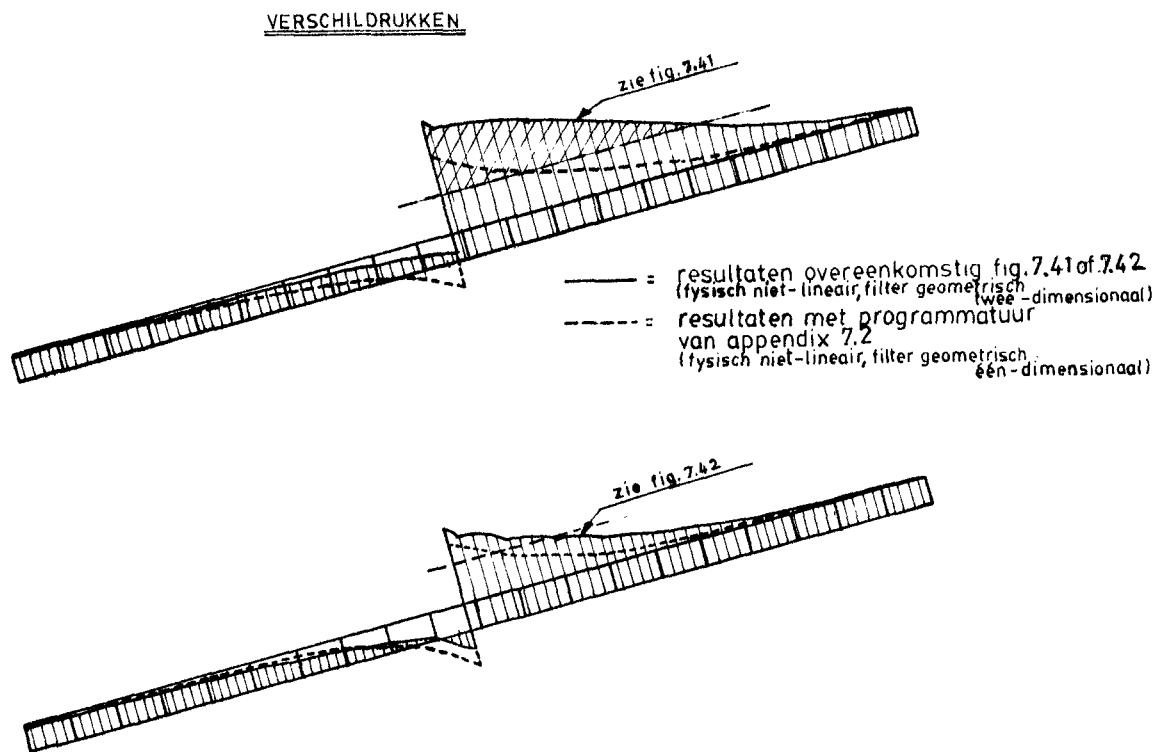
Geconcludeerd kan worden dat er een goede overeenkomst bestaat tussen gemeten en brekende drukken onder de bekleding.

Verder blijkt een schematisatie van de golfdrukken overeenkomstig punt 2 nagenoeg dezelfde resultaten op te leveren.

Tenslotte wordt in figuur 7.46. een vergelijking gemaakt van de in de figuren 7.41. en 7.42. gevonden resultaten met een berekening volgens de programmatuur van appendix 7.2. (fysisch niet-lineair, filter geometrisch eendimensionaal).

Bij de geometrische eendimensionale benadering van het filter is alleen de bovenste laag (laag 2) uit figuur 7.41. en 7.42. beschouwd.

De dikte van het filter bedraagt dan 0,3 m.



figuur 7.46.: invloed verwaarlozing gelaagdheid filter

Uit figuur 7.43. blijkt dat de invloed van de onderste laag in het filter niet verwaarloosd kan worden. Verwaarlozing zou leiden tot een onderschatting van de verschildrukken.

Literatuur

1. Agema, J.F.
Waterkeringen
Handleiding college f11
Technische Hogeschool Delft, 1982
2. Kust- en Oeverwerken, in praktijk en theorie
Vereniging Kust- en Oeverwerken
3. Coastal Engineering
Volume I, II & III
Coastal Engineering Group
Department of Civil engineering
Delft University of Technology, 1976
4. Shore protection manual
Volumes I, II & III
US Army Coastal Engineering Research Center, 1977
5. Die Küste
Archiv für Forschung und Technik an der Nord- und Ostsee
Heft 36 - 1981
Herausgeber: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen
6. Thabet, R. e.a.
Aantasting in dwarsprofielen in vaarwegen,
Erosie en stabiliteit van bodem en oevers, inleiding tot relevante
verschijnselen
Verslag onderzoek M 1115, deel VIII, januari 1982
Waterloopkundig Laboratorium
7. Bröszkamp, K.H. u.a.
Seedeichbau, Theorie und Praxis
Vereinigung der Naszbaggerunternehmen e.V., 1976

Literatuur (vervolg)

8. Pilarczyk, K.W.
Stabiliteit van oeververdedigingen in het Grevelingenbekken
Nota W-74.097
Waterloopkundige Afdeling Deltadienst
Rijkswaterstaat, 1974

9. Lacunes in kennis en ervaring betreffende ontwerp en ontwerpregels
voor open oeververdedigingen
OB 16, R 1521, juli 1980
Waterloopkundig Laboratorium Delft

10. C.E.R.A. Research Report 4:
Riprap protection for slopes subject to wave attack, 1974

11. Bruun, P., Johannesson, P.J;
A critical review of the hydraulics of rubble mound structures
Division of port and ocean engineering
The University of Trondheim
The Norwegian Institute of Technology
Trondheim, Norway, 1974

12. Bendegom, L. van
Algemene Waterbouwkunde
Dictaat 1967, deel 1, De Natuur, deel 2, De Techniek
Afdeling der Weg- en Waterbouwkunde, Technische Hogeschool Delft

13. Lambe, T.W., Whitman, R.V.
Soil Mechanics
Massachusetts Institute of Technology, 1969
John Wiley & Sons, Inc.

14. Harr, M.E.
Groundwater and Seepage
McGraw Hill Book company inc., 1962

Literatuur (vervolg)

15. Prins, A.
Sedimenttransport
Collegedictaat f10
Vakgroep Waterbouwkunde, Afd. der Civiele Techniek
Technische Hogeschool Delft, 1978

16. Bendegom, L. van a.o.
Principles governing the design and construction of economic
revetments for protecting the banks of rivers and canals for ocean
and inland-navigation
XXII International Navigation Congress, France, 1969

17. Paintal, A.S.
Concept of critical shear stress in loose boundary open channels,
J. Hydr. Res. 9 (1971) 1

18. Vries, M. de
Inleiding Vloeistofmechanica
Handleiding college b72
Vakgroep Vloeistofmechanica, afd. der Civiele Techniek
Technische Hogeschool Delft

19. Barends, F.B.J.
Dynamics of elastic plates on a flexible subsoil
LGM-mededelingen, part XXI, nr. 2, June 1980
Laboratorium voor Grondmechanica

20. Bouma, . A.L., Kuiper, B.
Voortgezette dynamica van constructies
Handleiding bij het college b15-B
Afdeling der Civiele Techniek
Technische Hogeschool Delft

Literatuur (vervolg)

21. Sridharan, A. Raman, J.
Damping characteristics of soils
Central Board of irrigation and power
Research scheme applied to river valley projects
Technical report nr. 21
New Delhi, December 1977

22. Richart, F.E., Hall, J.R., Woods, R.D.
Vibrations of soils and foundations
Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1970

23. Ahrens, J.P;
Large wave tank tests on rip-rap stability
Technical Memorandum no. 51, May 1975
US Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center

24. Ahrens, J.P., McCartney, B.L.
Wave period effect on the stability of Rip-rap
Proc. Civil Eng. in the Oceans
Univ. of Delaware, June 9-12, 1975

25. Bruun, P., Günbak, A.R.
Hydraulic and friction parameters affecting the stability of
rubble mounds
PIANC Bull., nr. 24, 1976

26. Bruun, P. Günbak, A.R.
Risk criteria in design stability of sloping
Structure in relation to
Symposium on design of rubble mound breakwaters
England, 1977

Literatuur (vervolg)

27. Hudson, R.Y.
Design of quarry-stone cover layers for rubble-mound breakwaters
Research report nr. 2-2, July 1958
US Army Waterways Experiment Station
Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi

28. Hudson, R.Y.
Concrete armor unites for protection against wave attack; report
of Ad Hoc committee on artificial armor units for coastal
structures
US Army Engineer Waterways Experiment Station/Hydr. Lab., 1974

29. McCartney, B.L.;, Ahrens, J.P.
Technical Memorandum no. 55, October 1975
US Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center

30. Iribarren, C.
Formule pour le calcul des digues en enrochements naturels ou
éléments artificiels
XXI Intern. Navig. Congress, Stockholm 1965

31. Svee, R.
Journal of the Waterways and Harbour Division
Proc. of the American Society of Civil engineers, May 1962

32. Svee, R.
XXIste International Navigation Congress, Stockholm 1965

33. Hydraulics Research Station
Mangla Dam West-Pakistan
Report Ex 202, Wallingford, England, 1964

Literatuur (vervolg)

34. Hall, I.V.
Wave test on revetment using machine-produced interlocking blocks
Coastal Engineering Conference, Chapter 60, 1966
35. Wevers, A.
Stabiliteit taludbekleding van gezette steen onder golfaanval
Waterloopkundig Laboratorium, M 1057, 1970
36. Kostense J.K.,
Gobi-blokken als taludbekleding
Waterloopkundig Laboratorium, M 1184, 1973
37. McCartney, B.L., Ahrens, J.P;
Stability of Gobiblock revetment to wave attack
Technical memorandum nr. 55
US Army Corps of Engineers
Coastal Engineering Research Center
Fort Belvoir, October 1975
38. Sollitt, C.K., De Bok, D.H.
Large Scale model tests of placed stone breakwaters
Coastal Engineering Conference, Chapter 148, 1976
39. Führböter, A. e.a.
Modellversuche für Deckwerk aus Betonformsteinen
Leichtweiss-Institut für Wasserbau, Braunschweig
Bericht nr. 266, 1974
40. Führböter, A. e.a.
Response of sea dikes to wave impacts
Coastal Engineering Conference, Chapter 150, 1976
41. Tasma, H.W.
Bepaling van de zwaarte van een gladde betonblokkenglooïing onder
golfaanval
Polytechnisch tijdschrift, Bouwkunde, 33, 1978, nr. 5

Literatuur (vervolg)

42. Hydraulics Research Station
The stability of revetment blocks under wave attack
Report IT 195, Wallingford, England, 1980
43. Berkeley Thorn, R., Roberts, A.G.
Sea defence and coast protection works
London, Thomas Telford, 2nd ed., 1981
44. Kostense, J.K.
Stabiliteit taludbekleding van gezette steen onder golfaanval
Rekenmodel drukvoortplanting onder steenzetting ten gevolge van
golfklappen
Waterloopkundig Laboratorium, M 1075, 1975
45. Kostense, J.K.
Taludbekleding van gezette steen onder golfaanval
Stabiliteit van de bekleding bij verschillende modelschalen
Waterloopkundig Laboratorium, M 1410, deel I, 1980
46. Kostense, J.K.
Taludbekleding van gezette steen onder golfaanval
Invloed van de doorlatendheid van de fundering
Waterloopkundig Laboratorium, M 1410, deel II, 1980
47. Tetra Tech. Inc.
Wave tests of Armorflex block slope protection mats
Technical report TC - 3475, 1981
Prepared for Armortec, Inc. Atlanta, Georgia
48. Boer, K. den, Kenter, C.J.
Taludbekleding van gezette steen, fase 0
Algemene beschrijving van de opzet van het onderzoek, M 1795, deel
1, WL, CO-258900/7, LGM, juli 1982
Waterloopkundig Laboratorium- Laboratorium voor Grondmechanica

Literatuur (vervolg)

49. Boer, K. den
Taludbekleding van gezette steen, fase 0
Hydraulische aspecten, verslag literatuurstudie
M 1795, deel II, WL, CO-255780/43 LGM, juli 1982
Waterloopkundig Laboratorium - Laboratorium voor Grondmechanica
50. Bezuijen, A.
Taludbekleding van gezette steen, fase 0
Grondmechanische aspecten, verslag literatuurstudie
M 1795, deel III, WL, CO-255780/44 LGM, juli 1982
Waterloopkundig Laboratorium - Laboratorium voor Grondmechanica
51. Kenter, C.J., Sellmeyer, J.B., van den Burg, J.C., Bezuijen, A.
Taludbekleding van gezette steen, fase 0
Oriënterende grondmechanische studies, verslag onderzoek
M 1795, deel IV, WL, CO-255780/45 LGM, juli 1982
Waterloopkundig Laboratorium - Laboratorium voor Grondmechanica
52. Boer, K. den
Taludbekleding van gezette steen, fase 0
Kleinschalig onderzoek ten behoeve van oesterdam (meetverslag),
verslag onderzoek
M 1795, deel V, WL, CO-258840/9 LGM, juli 1982
Waterloopkundig Laboratorium - Laboratorium voor Grondmechanica
53. Visser, P.J.
Taludbekleding van gezette steen, fase 1
Grootschalig onderzoek ten behoeve van de Oesterdam (meetverslag),
band A en B, verslag modelonderzoek
M 1795, deel VI, WL, CO-258840/7 LGM, juli 1982
Waterloopkundig Laboratorium - Laboratorium voor Grondmechanica

Literatuur (vervolg)

54. Burger, A.M.
Fundamenteel onderzoek stabiliteit steenzettingen
Grootschalig gidsonderzoek in de Deltagoot
M 1975, deel IX, november 1983, Waterloopkundig Laboratorium
55. Pilarczyk, K.W.
Stability of revetments under wave attack
Delta-Department, Hydraulics division
Governmental Public Works Department
The Hague, the Netherlands, 1982
56. Hannoura, A.A., Barends, F.B.J.
Non-Darcy flow, A state of the art
Proc. of Euromech 143/Delft/2-4 September 1981
57. Visser P.J.
Taludbekleding van gezette steen, fase 1
Bepaling geotechnische eigenschappen van het Oesterdam-model
Verslag onderzoek M 1795/M 1881, deel VII - WL, CO-258901/118 LGM
Waterloopkundig Laboratorium - Laboratorium voor Grondmechanica
58. Grauw, A.F.F. de, Koenders, M.A.
Stand van zaken bij het onderzoek naar granulaire filters
Waterloopkundig Laboratorium - Laboratorium voor Grondmechanica
nota 469, Delft, 1980
59. De Lara, G.C.
Coefficient de perte de charge en milieux paveux basé à
l'équilibre hydrodynamique d'un massif
La Houille Blanche, vol. 2, 1955
60. Venis, M.
Rijkswaterstaat nota W 833, 1965

Literatuur (vervolg)

61. Purday, H.F.P.
Streamline flow
Constable & Company, 1949
62. Nortier, I.W., Velde, H. van der
Hydraulica voor waterbouwkundigen
De Technische Uitgeverij H. Stam N.V.
63. Weide, J. van der, Burger, A.M., Kenter, C.J., Seijffert, J.J.W.
Samenvattingen informatiedag steenzettingen, 20 oktober 1982
Waterloopkundig Laboratorium - Laboratorium voor Grondmechanica
Rijkswaterstaat Deltadienst, Centrum voor Onderzoek Waterkeringen
64. Boer, K. den, Kenter, C.J., Pilarczyk, K.W.
Large scale model tests on placed blocks revetment
Paper presented at Coastal Structures 1983
Washington DC, March 9-11, 1983
65. Ayyar, H.
On the hydromechanics of breakers on steep slopes
Mitteilungen des Franzius Instituts für Grund- und Wasserbau der
Technischen Universität, Hannover, Heft 33, 1969.
66. Waterloopkundig Laboratorium
Invloed van bermen op de oploop van regelmatige golven
Verslag modelonderzoek, M 1130
67. Breth, H., Klüber, T.
Die Standsicherheit durchströmter Steinschüttdämme
Auswertung eines Schadenfalles
Wasserwirtschaft 63 (1973) 3

Literatuur (vervolg)

68. Parkin, A.K., a.o.

Rockfill structures subject to water flow

Journal of the Soil mechanics and Foundation Division

Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Nov. 1966

69. Volker, R.E.

Non-linear flow in porous media by finite elements

Journal of the Hydraulics Division

Proceedings of the American Society of Civil Engineers

APPENDIX 7.1

```

1      PROGRAM BLOK1
C*****GEOMETRISCH 2 - DIMENSIONAAL, FYSISCH NIET-LINEAIR*****
2      REAL PO(0:120,0:10),PN(0:120,0:10),ZZ(0:120),
      * Z(0:120,0:11),AK(0:120,0:10),A(0:120),P(0:120),PW(0:120,0:10),
      * RE(0:120,0:10),EE(0:9),DN(0:9),C11(0:9),C22(0:9),XI(0:120,0:10)
      * ,YI(0:120,0:10)
3      INTEGER MM(0:9),MMM(0:9)

C*****INLEZEN GEGEVENS*****
C      AL = HELLINGSHOEK
C      D = DIKTE STEENZETTING
C      N = AANTAL STENEN
C      DX = AFSTAND TUSSEN TWEE SPLETEN
C      GH = GOLFHOOGTE
C      GL = GOLFLENGTE
C      S = SPLEETBREEDTE
C      IS = AANTAL KNOPEN TUSSEN TWEE SPLETEN
C      MI = AANTAL TOEGESTANE ITERATIES
C      FF = NAGESTREEFDE RELATIEVE AFBREEKFOOT
C      LL = STUURPARAMETER VOOR AANPASSEN DOORLATENDHEDEN
C      BX = DEMPINGSCOEFFICIENT
C      IFFS = AANPASSEN FILTER (1= WEL, 0= NIET)
C      IBKS = AANPASSEB BEKLEDING (1= WEL, 0= NIET)
C      ITF = AANTAL FILTERLAGEN
C      EE(I) = PORIENGETAL FILTER "I"
C      DN(I) = MAATGEVENDE DIAMETER KORRELS FILTER "I"
C      MM(I) = AANTAL ROOSTERLIJNEN IN FILTER "I"

4      DATA AL,D,N,DX,GH,GL,S,IS,MI,FF,LL,BX,IFFS,IBKS
      */14.0,.3,20,.5,.8,60.0,1.5E-3,4,2500,1.0E-6,500,.1,1,1/
5      DATA ITF,EE(0),DN(0),MM(0)
      */1,.4,.007,6/

C*****INITIEREN ARRAYS*****
6      DO 12 I=0,120
7          DO 13 J=0,10
8              AK(I,J)=0.0
9      13      CONTINUE
10     12      CONTINUE
11     DO 14 I=0,120
12         A(I) = 0.0
13     14      CONTINUE
14         L = 0
15         W = 1.5
16         ITF = ITF - 1

C*****UITVOER INLEESGEGEVENS*****
17     WRITE (6,10)
18     10      FORMAT (///,20X,'** INVOERGROOTHEDEN **',//)
19     WRITE (6,15) AL
20     15      FORMAT (1X,'HELLINGSHOEK= ',F5.2)
21     WRITE (6,20) D
22     20      FORMAT (1X,'DIKTE STEENZETTING= ',F4.2)
23     WRITE (6,25) N
24     25      FORMAT (1X,'AANTAL STENEN= ',I3)
25     WRITE (6,30) DX
26     30      FORMAT (1X,'AFSTAND TUSSEN TWEE SPLETEN= ',F5.3)
27     WRITE (6,40) GH
28     40      FORMAT (1X,'GOLFHOOGTE "H"= ',F4.2)
29     WRITE (6,45) GL
30     45      FORMAT (1X,'GOLFLENGTE "L"= ',F6.2)
31     WRITE (6,50) S
32     50      FORMAT (1X,'SPLEETBREEDTE BEKLEDING= ',E8.3)
33     DO 63 I=0,ITF
34         WRITE (6,53) I+1
35     53      FORMAT (/ ,1X,'FILTERNO.= ',I2)
36         WRITE (6,55) EE(I)
37     55      FORMAT (1X,'PORIENGEHALTE FILTER= ',F4.2)
38         WRITE (6,60) DN(I)
39     60      FORMAT (1X,'MAATGEVENDE DIAMETER KORRELS= ',E8.3,/)
40     63      CONTINUE
41         WRITE (6,65) IS
42     65      FORMAT (1X,'AANTAL ROOSTERLIJNEN IN FILTER TUSSEN SPLETEN= ',I2)
43     DO 72 I=0,ITF
44         WRITE (6,70) I+1,MM(I)
45     70      FORMAT (1X,'AANTAL STROKEN IN FILTER ',I2,' = ',I2)
46     72      CONTINUE
47         WRITE (6,77) FF
48     77      FORMAT (1X,'RELATIEVE AFBREEKFOOT= ',E8.3)

```



```
49      WRITE (6,80) LL
50 80    FORMAT (1X,'PARAMETER "LL"= ',I7)
51      WRITE (6,85) BX
52 85    FORMAT (1X,'PARAMETER "BX"= ',F4.2)
53      IF (IFFS.EQ.1) THEN
54        WRITE (6,90)
55 90    FORMAT (1X,'FILTER WORDT AANGEPAST')
56      END IF
57      IF (IBKS.EQ.1) THEN
58        WRITE (6,95)
59 95    FORMAT (1X,'BEKLEDING WORDT AANGEPAST')
60      END IF

C*****VOORBEREIDINGEN*****
61      AAK = S*(-6.16*DX+9.38)
62      M = 0
63      DO 97 I=0,ITF
64        M = M + MM(I)
65        MMM(I) = M
66        C22(I) = DN(I)/1.0E-6
67        C11(I) = 19.6*DN(I)*EE(I)**5
68 97    CONTINUE
69      H = DX/(IS+1)
70      AL = AL*ATAN(1.0)/45.0
71      GW = 9.8E3
72      TA = TAN(AL)

C*****HYDRAULISCHE RANDVOORWAARDEN*****
73      IF (TA.LE..1428571429) THEN
74        FA = .29
75        BE = 3.0
76      END IF
77      IF ((TA.GT..1428571429).AND.(TA.LE..2)) THEN
78        FA = .525*TA+.215
79        BE = 3.0
80      END IF
81      IF ((TA.GT..2).AND.(TA.LE..3333333333)) THEN
82        FA = -.825*TA+.485
83        BE = -7.5*TA+4.5
84      END IF
85      IF (TA.GT..3333333333) THEN
86        FA = .21
87        BE = 2.0
88      END IF
89      N = N*(IS+1)
90      SK = TA/SQRT(GH/GL)
91      BEE = 2.0/BE
92      DB = GH*FA*(TA**(-BEE))*(SK**BEE)
93      YB = DB*LOG(25.265*SQRT(1.0/SK))
94      YB = YB/LOG(10.0)
95      BB = M*H
96      CC1 = 0
97      CC2 = 0
98      DO 98 I=0,ITF
99        CC1 = CC1+C11(I)
100       CC2 = CC2+C22(I)
101 98    CONTINUE
102      CC1 = CC1/(ITF+1)
103      CC2 = CC2/(ITF+1)
104      UF = 4.0/CC2
105      FK = CC1/6.0/UF
106      DL = SIN (AL)*SQRT(FK/AAK*BB*D)
107      R = .137
108      SS = .363
109      HH = .49*GH
110      HF = 0.0
111 99    FL = EXP((HH+D*COS(AL))/(-DL))*(R+2.0*SS*DL/GH)*(EXP(GH/DL)
* -1.0)+1.0-2.0*SS)
112      FR = 1.0-D/DL*COS(AL)*(GH-D*COS(AL)-HH+DL)/DL
113      IF (ABS(FL-FR).GT.(GH/500.0)) THEN
114        HH = HH+GH/500.0
115        GOTO 99
116      END IF
117      HF = HH-GH/2.0
118      HA = DB+HF
119      C*****UITVOER HYDRAULISCHE RANDVOORWAARDE*****
      WRITE (6,100)
```

```

120 100  FORMAT (//,1X,"BELASTINGGEVAL: ** BREKENDE GOLF **",//)
121      WRITE (6,105) YB
122 105  FORMAT (1X,"BREKERHOOGTE= ",F6.4)
123      WRITE (6,110) DB
124 110  FORMAT (1X,"BREKERPUNT  = ",F6.4)
125      WRITE (6,115) SK
126 115  FORMAT (1X,"KSI          = ",F6.4)
127      WRITE (6,117) HF
128 117  FORMAT (1X,"HOOGTE FREATISCHE LIJN BOVEN WATERNIVEAU= ",F6.4)
129      WRITE (6,118) FK
130 118  FORMAT (1X,"LAMINAIRE DOORLATENDHEID FILTER (GEMIDDELD)= ",F6.4)
131      HSI = N*H*SIN(AL)
132      IF (HA.GT.HSI) THEN
133          WRITE (6,120)
134 120  FORMAT (///,1X,"** HET VERSCHIJNSEL SPEELT ZICH OP DE
      *PLASBERM AF **")
135      STOP
136      END IF

C*****BEPALING LIGGING STENEN*****
137      DO 125 I=N,0,-1
138          Z(I,M+1) = HA+(I-N)*H*SIN(AL)
139          IF (Z(I,M+1).GE.0.0) THEN
140              IPP = I
141              P(I) = 0.0
142          ELSE
143              P(I) = (ABS(Z(I,M+1))+YB)*GW
144          END IF
145 125  CONTINUE

C*****INITIALISATIE STIJGHOOGTES*****
146      DO 135 I=0,N
147          DO 130 J=0,M
148              Z(I,J) = Z(I,M+1)-D*COS(AL)-(M-J)*H*COS(AL)
149              PO(I,J) = HA
150              PN(I,J) = HA
151 130  CONTINUE
152 135  CONTINUE

C*****STROMINGSTOESTAND IN DE SPLETEN*****
153      IF (S.LT.6E-3) THEN
154          SNN = 1.0-SQRT((3.6E-5-(.006-S)**2)/1.8E-4)
155      END IF
156      IF (S.GE.6E-3) THEN
157          SNN = .552786
158      END IF

C*****1-DIMENSIONALE SCHATTING*****
159      IF (IBKS.NE.1) THEN
160          DO 500 I=0,N-1,IS+1
161              A(I) = AAK*DX
162 500  CONTINUE
163          GO TO 510
164      END IF
165      DO 520 I=0,N-1,IS+1
166          PP = (PN(I,M)-(Z(I,M+1)+P(I)/GW))

167          A(I) = AAK*DX*(ABS(PP)/D)**(SNN-1)
168 520  CONTINUE
169 510  FO = 0.0
170      DO 530 I=0,N-1,IS+1
171          AA = A(I)*DX/FK/D/BB
172          IF (I.EQ.0) GO TO 540
173          IF (I.LT.IPP) GO TO 550
174          IF (I.GE.IPP) THEN
175              ZZ(I) = Z(I,M+1)
176              R = -AA*ZZ(I)-(PN(I-IS-1,M)-(2+AA)*PO(I,M)+PO(I+IS+1,M))
177              PN(I,M) = PO(I,M)-W/(2+AA)*R
178              CALL FOUT (FO,PN,PO,I,M)
179              GO TO 530
180          END IF
181 540  ZZ(I) = Z(I,M+1)+P(I)/GW
182          R = -AA*ZZ(I)-((-1-AA)*PO(I,M)+PO(I+IS+1,M))
183          PN(I,M) = PO(I,M)-W/(1+AA)*R
184          CALL FOUT (FO,PN,PO,I,M)
185          GO TO 530
186 550  ZZ(I) = Z(I,M+1)+P(I)/GW
187          R = -AA*ZZ(I)-(PN(I-IS-1,M)-(2+AA)*PO(I,M)+PO(I+IS+1,M))
188          PN(I,M) = PO(I,M)-W/(2+AA)*R
189          CALL FOUT (FO,PN,PO,I,M)
190 530  CONTINUE

```

```
191      IF ((FO.LT.(FF*LL)).AND.(IRKS.EQ.1)) THEN
192          DO 560 I=0,N-1,IS+1
193              PP = (PN(I,M)-(Z(I,M+1)+P(I)/GW))
194              A(I) = AAK*DX*(ABS(PP)/D)**(SNN-1)
195      560      CONTINUE
196      END IF
197      DO 570 I=0,N-1,IS+1
198          PQ(I,M) = PN(I,M)
199      570      CONTINUE
200      IF (L.GT.MI) THEN
201          WRITE (6,580)
202      580      FORMAT (///,1X,'*** NIET AAN AFBREEKFOUT VOLDAAN ***')
203          GO TO 590
204      END IF
205      L = L+1
206      IF (FO.GT.FF) GO TO 510
207      590      IF (IS.EQ.0) GO TO 620
208          DO 600 I=0,N-1,IS+1
209              DS = (PN(I+IS+1,M)-PN(I,M))/(IS+1)
210              DO 610 J=1,IS
211                  PN(I+J,M) = PN(I,M)+J*DS
212      610      CONTINUE
213      600      CONTINUE

C*****BEPALING BEGINSCHATTING*****
214      620      AX = BX
215              BX = 1000000.0
216              CF = 6.0
217              L = 0
218              IC = 1
219              CALL DOORL (N,M,IC,PN,H,IS,Z,D,A,IPP,P,AK,C22,C11,UF,BX,RE,GH
*,SNN,DX,AAK,CF,IRKS,IFFS,MMM,ITP,XI,YI)
220              IC = 0
221              BX = AX

C*****BEREKENING*****
222      235      FO = 0.0
223              DO 210 I=0,N-1
224              DO 200 J=0,M

C*****SCANNEN VAN DE PLAATS*****

C*****IN HET MIDDEN VAN HET FILTER*****
225      IF ((J.NE.0).AND.(I.NE.0).AND.(J.NE.M)) GO TO 140
226      TP = I/(IS+1)
227      ITP = INT(TP)

C*****RAND 2*****
228      IF ((J.EQ.0).AND.(I.NE.0)) GO TO 150

C*****RAND 4*****
229      IF((J.EQ.M).AND.(I.GE.IPP).AND.(ITP.EQ.TP)) GO TO 155

C*****RAND 5*****
230      IF ((J.EQ.M).AND.(I.NE.0).AND.(I.LT.IPP).AND.(ITP.EQ.TP))
*GO TO 160

C*****RAND 3*****
231      IF ((I.EQ.0).AND.(J.NE.0).AND.(J.NE.M)) GO TO 165

C*****TUSSEN TWEË SPLETEN*****
232      IF ((J.EQ.M).AND.(ITP.NE.TP).AND.(I.NE.0)) GO TO 170

C*****PUNT 1*****
233      IF((I.EQ.0).AND.(J.EQ.0)) GO TO 175

C*****PUNT 3*****
234      IF ((I.EQ.0).AND.(J.EQ.M)) GO TO 180

C*****BEREKENING STIJGHODGTES*****
C*****IN HET FILTER*****

235      140      R = -((-AK(I+1,J)+AK(I-1,J)+4*AK(I,J))/4*PN(I-1,J)+(-AK(I,J+1)
*+AK(I,J-1)+4*AK(I,J))/4*PN(I,J-1)-4*AK(I,J)*PO(I,J)+(AK(I+1,J)
*-AK(I-1,J)+4*AK(I,J))/4*PO(I+1,J)+(AK(I,J+1)-AK(I,J-1)+4*AK(I,J)
*)/4*PO(I,J+1))
236      PN(I,J) = PO(I,J)+W/(-4*AK(I,J))*R
237      CALL FOUT (FO,PN,PQ,I,J)
238      GO TO 200
```

```

C*****RAND 2*****
239 150 R = -((-AK(I+1,0)+AK(I-1,0)+4*AK(I,0))/4*PN(I-1,0)-4*AK(I,0)*
      *PO(I,0)+(AK(I+1,0)-AK(I-1,0)+4*AK(I,0))/4*PO(I+1,0)+2*AK(I,0)*
      *PO(I,1))
240      PN(I,0) = PO(I,0)+W/(-4*AK(I,0))*R
241      CALL FOUT (FO,PN,PO,I,J)
242      GO TO 200

```

```

C*****RAND 4*****
243 155 ZZ(I) = Z(I,M+1)
244 145 PR = -(-2*AK(I,M-1)+6*AK(I,M))/2*A(I)/AK(I,M)/D
245      R = -((-AK(I+1,M)+AK(I-1,M)+4*AK(I,M))/4*PN(I-1,M)+2*AK(I,M)*
      *PN(I,M-1)+(-4*AK(I,M)+PR)*PO(I,M)+(AK(I+1,M)-AK(I-1,M)+4*AK(I,M))
      */4*PO(I+1,M))+PR*ZZ(I)
246      PN(I,M) = PO(I,M)+W/(-4*AK(I,M)+PR)*R
247      CALL FOUT (FO,PN,PO,I,J)
248      GOTO 200

```

```

C*****RAND 5*****
249 160 ZZ(I) = Z(I,M+1)+P(I)/GW
250      GO TO 145

```

```

C*****RAND 3*****
251 165 R = -((-AK(0,J+1)+AK(0,J-1)+4*AK(0,J))/4*PN(0,J-1)-4*AK(0,J)*PO
      *(0,J)+2*AK(0,J)*PO(1,J)+(AK(0,J+1)-AK(0,J-1)+4*AK(0,J))/4*PO
      *(0,J+1))
252      PN(0,J) = PO(0,J)+W/(-4*AK(0,J))*R
253      CALL FOUT (FO,PN,PO,I,J)
254      GO TO 200

```

```

C*****TUSSEN TWE SPLETEN*****
255 170 R = -((-AK(I+1,M)+AK(I-1,M)+4*AK(I,M))/4*PN(I-1,M)+2*AK(I,M)*PN
      *(I,M-1)-4*AK(I,M)*PO(I,M)+(AK(I+1,M)-AK(I-1,M)+4*AK(I,M))/4*PO
      *(I+1,M))
256      PN(I,M) = PO(I,M)-W/(4*AK(I,M))*R
257      CALL FOUT (FO,PN,PO,I,J)
258      GO TO 200

```

```

C*****PUNT 1*****
259 175 R = -(-4*PO(0,0)+2*PO(1,0)+2*PO(0,1))
260      PN(0,0) = PO(0,0)-W/4*R
261      CALL FOUT (FO,PN,PO,I,J)
262      GO TO 200

```

```

C*****PUNT 3*****
263 180 ZZ(0) = Z(0,M+1)+P(0)/GW
264      PR = -(-2*AK(0,M-1)+6*AK(0,M))/2*A(I)/AK(0,M)/D
265      R = -(2*AK(0,M)*PO(1,M)+2*AK(0,M)*PN(0,M-1)+(-4*AK(0,M)+PR)*PO
      *(0,M))+PR*ZZ(0)
266      PN(0,M) = PO(0,M)+W/(-4*AK(0,M)+PR)*R
267      CALL FOUT (FO,PN,PO,I,J)

```

```

268 200 CONTINUE
269 210 CONTINUE

270      DO 220 I=0,N-1
271      DO 215 J=0,M
272      PO(I,J) = PN(I,J)
273 215 CONTINUE
274 220 CONTINUE

```

C*****FOUT CONTROLES*****

```

275      IF (L.GT.MI) THEN
276      WRITE (6,225)
277 225      FORMAT (//,1X,'*** NIET AAN AFBREEKFOUT VOLDAAN ***')
278      GO TO 410
279      END IF
280      FFL = FF*LL
281      L = L+1
282      IF ((IFFS.NE.1).AND.(IBKS.NE.1)) GO TO 227
283      IF (FO.GT.FFL) GO TO 235
284      CALL DOORL (N,M,IC,PM,H,IS,Z,O,A,IPP,P,AK,C22,C11,UF,BX,RE,GW
      *,SIN,DX,AAK,CF,IBKS,IFFS,MMM,ITF,XI,YI)
285 227      IF (FO.GT.FF) GO TO 235

```

```
C*****UITVOER VAN HET PROBLEEM*****  
286 410 WRITE (6,240)  
287 240 FORMAT (///,11X,'***** UITVOER *****',//)  
288 WRITE (6,245) L  
289 245 FORMAT (1X,'AANTAL ITERATIES= ',I4)  
290 WRITE (6,250) FO  
291 250 FORMAT (1X,'GROOTSTE RELATIEVE FOUT= ',F9.4)  
292 WRITE (6,255)  
293 255 FORMAT (///,1X,'STIJGHOGTES',//)  
294 WRITE (6,260)  
295 260 FORMAT (5X,'0',10X,'1',10X,'2',10X,'3',10X,'4',10X,'5',10X,'6'  
*,10X,'7',10X,'8',10X,'9',10X,'10')  
  
296 DO 265 I=0,N  
297 WRITE (6,270) I,(PN(I,J),J=0,M)  
298 265 CONTINUE  
299 270 FORMAT (1X,I3,1X,10(E10.4,1X))  
300 WRITE (6,275)  
301 275 FORMAT (///1X,'WATERDRUKKEN',//)  
302 WRITE (6,260)  
303 M1 = M+1  
304 DO 285 I=0,N  
305 DO 280 J=0,M+1  
306 IF (J.EQ.M1) THEN  
307 PW(I,J) = P(I)  
308 GO TO 285  
309 END IF  
310 PW(I,J) = (PN(I,J)-Z(I,J))*GW  
311 280 CONTINUE  
312 285 CONTINUE  
313 DO 295 I=0,N  
314 WRITE (6,290) I,(PW(I,J),J=0,M+1)  
315 290 FORMAT (1X,I3,1X,11(E10.5,1X))  
316 295 CONTINUE  
317 WRITE (6,300)  
318 300 FORMAT (///,1X,'DOORLATENDHEIDSCOEFFICIENTEN SPLETEN TUSSEN BLOKKE  
*N:',//)  
319 DO 310 I=0,N-1,IS+1  
320 WRITE (6,305) I,A(I)  
321 305 FORMAT (1X,'A(',I3,')= ',E9.4)  
322 310 CONTINUE  
323 WRITE (6,315)  
324 315 FORMAT (///,1X,'DOORLATENDHEIDSCOEFFICIENTEN IN FILTER:',//)  
  
325 WRITE (6,260)  
326 DO 320 I=0,N  
327 WRITE (6,270) I, (AK(I,J),J=0,M)  
328 320 CONTINUE  
329 WRITE (6,325) SNN  
330 325 FORMAT (///,1X,'STROMINGSTOESTAND IN SPLETEN: N= ',F6.4,///)  
331 WRITE (6,330)  
332 330 FORMAT (1X,'GETAL VAN REYNOLDS (RE) IN FILTER: ',//,  
*1X,'RE <= 4 -----> LAMINAIR',//,  
*1X,'4 > RE < 576 -----> OVERGANGSGEBIED',//,  
*1X,'RE >= 576 -----> TURBULENT',//)  
333 WRITE (6,260)  
334 DO 335 I=0,N  
335 WRITE (6,270) I,(RE(I,J),J=0,M)  
336 335 CONTINUE  
337 WRITE (6,331)  
338 331 FORMAT (///,1X,'VERHANGEN IN X-RICHTING:',//)  
339 WRITE (6,260)  
340 DO 332 I=0,N  
341 WRITE (6,270) I,(XI(I,J),J=0,M)  
342 332 CONTINUE  
343 WRITE (6,333)  
344 333 FORMAT (///,1X,'VERHANGEN IN Y-RICHTING:',//)  
345 WRITE (6,260)  
346 DO 334 I=0,N  
347 WRITE (6,270) I,(YI(I,J),J=0,M)  
348 334 CONTINUE  
349 WRITE (6,340)  
350 340 FORMAT (///,1X,'DERIETEN DOOR SPLETEN:',//)  
351 DO 350 I=0,N-1,IS+1  
352 Q = A(I)*(PN(I,M)-Z(I,M+1)-P(I)/GW)/O  
353 WRITE (6,345) I,Q  
354 345 FORMAT (1X,'Q(',I3,')= ',E10.4)  
355 350 CONTINUE  
356 WRITE (6,360)  
357 360 FORMAT(///,'*** EINDE BEREKENING ***')  
358 STOP  
359 END
```

```
C*****BEPALING GROOTSTE FOOT IN STIJGHOOGTES*****
1  SUBROUTINE FOOT (FO,PN,PO,I,J)
2  REAL PO(0:120,0:10),PN(0:120,0:10)

3  ER = ABS((PN(I,J)-PO(I,J))/PN(I,J))
4  IF (ER.GT.FO) THEN
5    FO = ER
6  END IF

7  RETURN
8  END

C*****BEPALING DOORLATENDHEIDSCOEFFICIENTEN*****
1  SUBROUTINE DOORL (N,M,IC,PN,H,IS,Z,D,A,IPP,P,AK,C22,C11,UF,BX,RE,
  *GW,SNN,DX,AAK,CF,IBKS,IFFS,MMM,ITF,XI,YI)

2  REAL Z(0:120,0:11),A(0:120),P(0:120),AK(0:120,0:10)
  *,RE(0:120,0:10),PN(0:120,0:10),ZZ(0:120),C11(0:9),C22(0:9)
  *,XI(0:120,0:11),YI(0:120,0:10)
3  INTEGER MMM(0:9)

4  FO1 = 1E10
C*****EERSTE MAAL EN INDIEN INGESTELD OVERSLAAN*****
5  IF ((IFFS.NE.1).AND.(IC.NE.1)) GOTO 385

6  DO 370 I = 0,N
7  DO 365 J = 0,M
8  ICODE = 0
9  DO 357 II=0,ITF
10  IF (IC.EQ.1) THEN
11    UF = 4.0/C22(II)
12  END IF
13  IF ((II.EQ.ITF).AND.(J.EQ.M)) THEN
14    C1 = C11(ITF)
15    C2 = C22(ITF)
16    GO TO 357
17  END IF
18  IF ((J.EQ.MMM(II)).AND.(ICODE.NE.1)) THEN
19    C1 = (C11(II)+C11(II+1))/2.0
20    C2 = (C22(II)+C22(II+1))/2.0
21    ICODE = 1
22    GO TO 357
23  END IF
24  IF((J.LT.MMM(II)).AND.(ICODE.NE.1)) THEN
25    C1 = C11(II)
26    C2 = C22(II)
27    ICODE =1
28  END IF
29 357  CONTINUE

C*****EERSTE MAAL OVERSLAAN*****
30  IF (IC.EQ.1) GO TO 380
C*****DIREKT GESTUURD NAAR HART VAN HET FILTER*****
31  IF ((I.NE.0).AND.(J.NE.0).AND.(J.NE.M).AND.(I.NE.N)) GO TO 355

C*****VERHANGEN IN FILTER*****

C*****RAND 1*****
32  IF (I.EQ.N) THEN
33    XI(I,J) = (PN(N,J)-PN(N-1,J))/H
34    YI(I,J) = 0.0
35    GO TO 360
36  END IF

C*****RAND 3*****
37  IF ((I.EQ.0).AND.(J.NE.0).AND.(J.NE.M)) THEN
38    XI(I,J) = 0.0
39    YI(I,J) = (PN(0,J+1)-PN(0,J-1))/2/H
40    GO TO 360
41  END IF

C*****RAND 2*****
42  IF ((J.EQ.0).AND.(I.NE.0)) THEN
43    XI(I,J) = (PN(I+1,0)-PN(I-1,0))/2/H
44    YI(I,J) = 0.0
45    GO TO 360
46  END IF
```

```
C*****TUSSEN TWEE SPLETEN*****
47      TP = I/(IS+1.)
48      ITP = INT (TP)
49      IF ((J.EQ.M).AND.(ITP.NE.TP).AND.(I.NE.0)) THEN
50          XI(I,J) = (PN(I+1,M)-PN(I-1,M))/2/H
51          YI(I,J) = 0.0
52          GO TO 360
53      END IF

C*****RAND 4*****
54      IF ((J.EQ.M).AND.(I.GE.IPP).AND.(ITP.EQ.TP)) THEN
55          ZZ(I) = Z(I,M+1)
56          XI(I,J) = (PN(I+1,M)-PN(I-1,M))/2/H
57          YI(I,J) = -A(I)/AK(I,M)/H*(PN(I,M)-ZZ(I))/D
58          GO TO 360
59      END IF

C*****RAND 5*****
60      IF ((J.EQ.M).AND.(I.NE.0).AND.(I.LT.IPP).AND.(ITP.EQ.TP))
61      *THEN
62          ZZ(I) = Z(I,M+1)+P(I)/GW
63          XI(I,J) = (PN(I+1,M)-PN(I-1,M))/2/H
64          YI(I,J) = -A(I)/AK(I,M)/H*(PN(I,M)-ZZ(I))/D
65      END IF

C*****PUNT 1*****
66      IF ((I.EQ.0).AND.(J.EQ.0)) THEN
67          XI(I,J) = 0.0
68          YI(I,J) = 0.0
69          GO TO 360
70      END IF

C*****PUNT 3*****
71      IF ((I.EQ.0).AND.(J.EQ.M)) THEN
72          ZZ(I) = Z(I,M+1) + P(I)/GW
73          XI(I,J) = 0.0
74          YI(I,J) = -A(I)/AK(I,M)/H*(PN(I,M)-ZZ(I))/D
75          GO TO 360
76      END IF

C*****IN HET FILTER*****
77      355 XI(I,J) = (PN(I+1,J)-PN(I-1,J))/2/H
78          YI(I,J) = (PN(I,J+1)-PN(I,J-1))/2/H
79          XXYY = SQRT(XI(I,J)*XI(I,J)+YI(I,J)*YI(I,J))
C*****BEGRENZING*****
80      IF (XXYY.GT.5.0) THEN
81          XXYY = 5.0
82      END IF
83      IF (XXYY.LT.1E-10) THEN
84          XXYY = 1E-10
85      END IF
86      UF = AK(I,J)*XXYY
87      RE(I,J) = C2*UF

C*****LAMINAIRE STROMING*****
88      IF (RE(I,J).LE.4.0) THEN
89          CF = 576.0/(C2*C2*C1*XXYY)
90      END IF

C*****OVERGANGSGERIED*****
91      IF ((RE(I,J).GT.4.0).AND.(RE(I,J).LT.576.0)) THEN
92          CF = (20736.0/(C2*C2*C1*XXYY))**.333333
93      END IF

C*****TURBULENT*****
94      IF (RE(I,J).GE.576.0) THEN
95          CF = .5
96      END IF

C*****WEERSTANDSCOEFFICIENTEN*****
97      380 AK(I,J) = (C1/CF/UF*BX+AK(I,J))/(BX+1.0)
98          IF (AK(I,J).GT.F01) THEN
99              AK(I,J) = F01
100     END IF

101     365 CONTINUE
102     370 CONTINUE
103     IF (IC.EQ.1) THEN
104         F01 = AK(0,0)
105     END IF
106     385 IF ((IBKS.NE.1).AND.(IC.NE.1)) GO TO 400
```

```

C*****DOORLATENDHEID BEKLEDING*****
107 DO 375 I=0,N-1,IS+1
108 PV = (PNCI,M)-(Z(I,M+1)+P(I)/GW))
109 A(I) = (AAK*DX*(ABS(PV)/D)**(SNN-1))*BX+A(I))/(BX+1.0)
110 IF (IC.EQ.1) THEN
111 A(I) = AAK*DX
112 END IF
113 375 CONTINUE

114 400 RETURN
115 END

```

*** INVOERGRROOTHEDEN ***

HELLINGSHOEK= 14.00
DIKTE STEENZETTING= 0.30
AANTAL STENEN= 20
AFSTAND TUSSEN TWEE SPLETEN= 0.500
GOLPHOOGTE "H"= 0.80
GOLFLENGTE "L"= 60.00
SPLEETBREEDTE BEKLEDING= .150E-02

FILTERNO.= 1
PORIENGEMHALTE FILTER= 0.40
MAATGEVENDE DIAMETER KORRELS= .700E-02

AANTAL ROOSTERLIJNEN IN FILTER TUSSEN SPLETEN= 4
AANTAL STROKEN IN FILTER 1 = 6
RELATIEVE AFBREEKFOUT= .100E-05
PARAMETER "LL"= 500
PARAMETER "BX"= 0.10
FILTER WORDT AANGEPAST
BEKLEDING WORDT AANGEPAST

BELASTINGGEVAL: *** BREKENDE GOLF ***

BREKERHOOGTE= 1.4253
BREKERPUNT = 1.1537
KSI = 2.1592
HOOGTE FREATISCHE LIJN BOVEN WATERNIVEAU= 0.1312
LAMINAIRE DOORLATENDHEID FILTER (GEMIDDELD)= 0.4098

*** NIET AAN AFBREEKFOUT VOLDAAN ***

*** UITVOER ***

AANTAL ITERATIES= 2501
GROOTSTE RELATIEVE FOUT= .2027E-05

STIJGHOOGTES

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1417E+01	0.1417E+01	
1	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1417E+01	
2	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	
3	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	
4	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	
5	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1417E+01	
6	0.1415E+01	0.1415E+01	0.1415E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	
7	0.1415E+01	0.1415E+01	0.1415E+01	0.1415E+01	0.1415E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	
8	0.1415E+01	0.1415E+01	0.1415E+01	0.1415E+01	0.1415E+01	0.1415E+01	0.1415E+01	
9	0.1414E+01	0.1414E+01	0.1415E+01	0.1415E+01	0.1415E+01	0.1415E+01	0.1415E+01	
10	0.1414E+01	0.1414E+01	0.1414E+01	0.1414E+01	0.1414E+01	0.1415E+01	0.1416E+01	
11	0.1413E+01	0.1413E+01	0.1414E+01	0.1414E+01	0.1414E+01	0.1414E+01	0.1414E+01	
12	0.1413E+01	0.1413E+01	0.1413E+01	0.1413E+01	0.1413E+01	0.1413E+01	0.1413E+01	
13	0.1412E+01	0.1412E+01	0.1412E+01	0.1412E+01	0.1413E+01	0.1413E+01	0.1413E+01	
14	0.1411E+01	0.1411E+01	0.1411E+01	0.1411E+01	0.1412E+01	0.1412E+01	0.1413E+01	
15	0.1410E+01	0.1410E+01	0.1410E+01	0.1411E+01	0.1411E+01	0.1412E+01	0.1413E+01	

WATERDRUKKEN

0	1	2	3	4	5	6	7
0 .33551E+05	.32600E+05	.31650E+05	.30700E+05	.29750E+05	.28802E+05	.27859E+05	.25084E+05
1 .33314E+05	.32363E+05	.31412E+05	.30462E+05	.29513E+05	.28563E+05	.27614E+05	.24847E+05
2 .33076E+05	.32125E+05	.31175E+05	.30225E+05	.29275E+05	.28325E+05	.27375E+05	.24610E+05
3 .32838E+05	.31887E+05	.30937E+05	.29987E+05	.29037E+05	.28088E+05	.27137E+05	.24373E+05
4 .32600E+05	.31649E+05	.30699E+05	.29749E+05	.28799E+05	.27850E+05	.26901E+05	.24135E+05
5 .32361E+05	.31411E+05	.30460E+05	.29510E+05	.28561E+05	.27613E+05	.26671E+05	.23898E+05
6 .32122E+05	.31172E+05	.30221E+05	.29271E+05	.28322E+05	.27373E+05	.26423E+05	.23661E+05
7 .31883E+05	.30932E+05	.29982E+05	.29032E+05	.28082E+05	.27132E+05	.26182E+05	.23424E+05
8 .31642E+05	.30692E+05	.29742E+05	.28792E+05	.27842E+05	.26893E+05	.25943E+05	.23187E+05
9 .31401E+05	.30451E+05	.29501E+05	.28551E+05	.27602E+05	.26654E+05	.25706E+05	.22950E+05
10 .31160E+05	.30209E+05	.29259E+05	.28310E+05	.27361E+05	.26415E+05	.25475E+05	.22713E+05
11 .30917E+05	.29967E+05	.29017E+05	.28067E+05	.27118E+05	.26170E+05	.25222E+05	.22476E+05
12 .30674E+05	.29723E+05	.28773E+05	.27824E+05	.26875E+05	.25926E+05	.24976E+05	.22239E+05
13 .30429E+05	.29479E+05	.28529E+05	.27580E+05	.26632E+05	.25683E+05	.24734E+05	.22002E+05
14 .30184E+05	.29233E+05	.28284E+05	.27335E+05	.26388E+05	.25441E+05	.24494E+05	.21765E+05
15 .29937E+05	.28987E+05	.28037E+05	.27089E+05	.26142E+05	.25198E+05	.24263E+05	.21528E+05
16 .29689E+05	.28738E+05	.27789E+05	.26840E+05	.25893E+05	.24946E+05	.23999E+05	.21290E+05
17 .29439E+05	.28488E+05	.27539E+05	.26591E+05	.25643E+05	.24695E+05	.23746E+05	.21053E+05
18 .29187E+05	.28237E+05	.27288E+05	.26340E+05	.25393E+05	.24447E+05	.23497E+05	.20816E+05
19 .28933E+05	.27983E+05	.27035E+05	.26088E+05	.25143E+05	.24200E+05	.23256E+05	.20579E+05
20 .28677E+05	.27727E+05	.26779E+05	.25833E+05	.24889E+05	.23950E+05	.23027E+05	.20342E+05
21 .28419E+05	.27469E+05	.26520E+05	.25574E+05	.24629E+05	.23685E+05	.22741E+05	.20105E+05
22 .28157E+05	.27207E+05	.26259E+05	.25313E+05	.24368E+05	.23422E+05	.22474E+05	.19868E+05
23 .27893E+05	.26943E+05	.25996E+05	.25051E+05	.24107E+05	.23164E+05	.22215E+05	.19631E+05
24 .27625E+05	.26675E+05	.25729E+05	.24785E+05	.23845E+05	.22909E+05	.21969E+05	.19394E+05
25 .27352E+05	.26403E+05	.25457E+05	.24515E+05	.23577E+05	.22648E+05	.21715E+05	.19157E+05
26 .27076E+05	.26126E+05	.25180E+05	.24238E+05	.23298E+05	.22360E+05	.21420E+05	.18920E+05
27 .26794E+05	.25845E+05	.24899E+05	.23957E+05	.23016E+05	.22074E+05	.21127E+05	.18683E+05
28 .26506E+05	.25557E+05	.24613E+05	.23673E+05	.22735E+05	.21797E+05	.20850E+05	.18445E+05
29 .26212E+05	.25264E+05	.24321E+05	.23383E+05	.22453E+05	.21529E+05	.20597E+05	.18208E+05
30 .25910E+05	.24962E+05	.24020E+05	.23085E+05	.22157E+05	.21247E+05	.20328E+05	.17971E+05
31 .25600E+05	.24652E+05	.23710E+05	.22774E+05	.21843E+05	.20916E+05	.19986E+05	.17734E+05
32 .25280E+05	.24333E+05	.23392E+05	.22457E+05	.21524E+05	.20590E+05	.19666E+05	.17497E+05
33 .24951E+05	.24004E+05	.23065E+05	.22133E+05	.21207E+05	.20280E+05	.19355E+05	.17260E+05
34 .24609E+05	.23663E+05	.22726E+05	.21800E+05	.20886E+05	.19986E+05	.19069E+05	.17023E+05
35 .24253E+05	.23307E+05	.22373E+05	.21450E+05	.20542E+05	.19665E+05	.18871E+05	.16786E+05
36 .23881E+05	.22936E+05	.22002E+05	.21078E+05	.20163E+05	.19255E+05	.18343E+05	.16549E+05
37 .23493E+05	.22548E+05	.21615E+05	.20693E+05	.19776E+05	.18856E+05	.17918E+05	.16312E+05
38 .23086E+05	.22142E+05	.21213E+05	.20297E+05	.19392E+05	.18484E+05	.17544E+05	.16075E+05
39 .22657E+05	.21714E+05	.20790E+05	.19884E+05	.19001E+05	.18142E+05	.17254E+05	.15838E+05
40 .22202E+05	.21261E+05	.20339E+05	.19438E+05	.18567E+05	.17750E+05	.17089E+05	.15600E+05
41 .21719E+05	.20778E+05	.19856E+05	.18954E+05	.18086E+05	.17195E+05	.16316E+05	.15363E+05
42 .21206E+05	.20266E+05	.19346E+05	.18444E+05	.17554E+05	.16658E+05	.15730E+05	.15126E+05
43 .20662E+05	.19722E+05	.18807E+05	.17916E+05	.17043E+05	.16169E+05	.15237E+05	.14889E+05
44 .20082E+05	.19144E+05	.18233E+05	.17354E+05	.16518E+05	.15734E+05	.14900E+05	.14652E+05
45 .19464E+05	.18525E+05	.17611E+05	.16732E+05	.15907E+05	.15197E+05	.14798E+05	.14415E+05
46 .18813E+05	.17870E+05	.16943E+05	.16037E+05	.15162E+05	.14324E+05	.13500E+05	.14178E+05
47 .18140E+05	.17190E+05	.16244E+05	.15303E+05	.14369E+05	.13442E+05	.12510E+05	.00000E+00
48 .17462E+05	.16506E+05	.15539E+05	.14559E+05	.13566E+05	.12565E+05	.11579E+05	.00000E+00
49 .16801E+05	.15838E+05	.14851E+05	.13833E+05	.12773E+05	.11663E+05	.10528E+05	.00000E+00
50 .16174E+05	.15207E+05	.14206E+05	.13158E+05	.12037E+05	.10751E+05	.89181E+04	.00000E+00
51 .15595E+05	.14627E+05	.13623E+05	.12577E+05	.11479E+05	.10329E+05	.91813E+04	.00000E+00
52 .15056E+05	.14099E+05	.13101E+05	.12071E+05	.11013E+05	.99477E+04	.89312E+04	.00000E+00
53 .14583E+05	.13618E+05	.12627E+05	.11610E+05	.10575E+05	.95422E+04	.85511E+04	.00000E+00
54 .14142E+05	.13179E+05	.12191E+05	.11178E+05	.10141E+05	.90829E+04	.80206E+04	.00000E+00
55 .13739E+05	.12777E+05	.11791E+05	.10778E+05	.97274E+04	.85893E+04	.71188E+04	.00000E+00
56 .13371E+05	.12410E+05	.11428E+05	.10424E+05	.93970E+04	.83548E+04	.73376E+04	.00000E+00
57 .13034E+05	.12074E+05	.11098E+05	.10105E+05	.90986E+04	.80912E+04	.71165E+04	.00000E+00
58 .12721E+05	.11764E+05	.10792E+05	.98067E+04	.88113E+04	.78168E+04	.68482E+04	.00000E+00
59 .12431E+05	.11474E+05	.10505E+05	.95225E+04	.85244E+04	.75095E+04	.64864E+04	.00000E+00
60 .12158E+05	.11203E+05	.10235E+05	.92532E+04	.82466E+04	.71796E+04	.58728E+04	.00000E+00
61 .11902E+05	.10947E+05	.99819E+04	.90031E+04	.80090E+04	.69985E+04	.59784E+04	.00000E+00
62 .11658E+05	.10704E+05	.97397E+04	.87645E+04	.77807E+04	.67976E+04	.58349E+04	.00000E+00
63 .11422E+05	.10468E+05	.95047E+04	.85315E+04	.75503E+04	.65699E+04	.56096E+04	.00000E+00
64 .11193E+05	.10239E+05	.92768E+04	.83041E+04	.73210E+04	.63338E+04	.53654E+04	.00000E+00
65 .10975E+05	.10021E+05	.90584E+04	.80857E+04	.70971E+04	.60712E+04	.48953E+04	.00000E+00
66 .10768E+05	.98137E+04	.88516E+04	.78811E+04	.69008E+04	.59092E+04	.49112E+04	.00000E+00
67 .10572E+05	.96178E+04	.86558E+04	.76866E+04	.67114E+04	.57351E+04	.47698E+04	.00000E+00
68 .10388E+05	.94331E+04	.84703E+04	.74998E+04	.65227E+04	.55442E+04	.45779E+04	.00000E+00
69 .10215E+05	.92602E+04	.82964E+04	.73232E+04	.63389E+04	.53440E+04	.43523E+04	.00000E+00
70 .10055E+05	.91002E+04	.81363E+04	.71622E+04	.61732E+04	.51536E+04	.40343E+04	.00000E+00
71 .99079E+04	.89532E+04	.79906E+04	.70200E+04	.60408E+04	.50532E+04	.40650E+04	.00000E+00
72 .97722E+04	.88178E+04	.78566E+04	.68892E+04	.59173E+04	.49454E+04	.39833E+04	.00000E+00
73 .96471E+04	.86928E+04	.77320E+04	.67651E+04	.57938E+04	.48227E+04	.38624E+04	.00000E+00
74 .95321E+04	.85778E+04	.76166E+04	.66481E+04	.56718E+04	.46878E+04	.37070E+04	.00000E+00
75 .94275E+04	.84732E+04	.75121E+04	.65429E+04	.55628E+04	.45615E+04	.34983E+04	.00000E+00
76 .93328E+04	.83789E+04	.74189E+04	.64527E+04	.54800E+04	.45012E+04	.35236E+04	.00000E+00
77 .92471E+04	.82936E+04	.73350E+04	.63718E+04	.54054E+04	.44390E+04	.34800E+04	.00000E+00
78 .91693E+04	.82161E+04	.72582E+04	.62961E+04	.53312E+04	.43665E+04	.34088E+04	.00000E+00
79 .90988E+04	.81456E+04	.71877E+04	.62250E+04	.52575E+04	.42854E+04	.33147E+04	.00000E+00
80 .90353E+04	.80821E+04	.71244E+04	.61614E+04	.51913E+04	.42080E+04	.31881E+04	.00000E+00

81	.89784E+04	.80255E+04	.70686E+04	.61076E+04	.51422E+04	.41728E+04	.32044E+04	.00000E+00
82	.89276E+04	.79750E+04	.70191E+04	.60601E+04	.50991E+04	.41381E+04	.31819E+04	.00000E+00
83	.88819E+04	.79295E+04	.69741E+04	.60161E+04	.50564E+04	.40969E+04	.31417E+04	.00000E+00
84	.88409E+04	.78885E+04	.69332E+04	.59751E+04	.50139E+04	.40502E+04	.30872E+04	.00000E+00
85	.88042E+04	.78519E+04	.68963E+04	.59384E+04	.49758E+04	.40051E+04	.30129E+04	.00000E+00
86	.87718E+04	.78196E+04	.68650E+04	.59079E+04	.49480E+04	.39857E+04	.30238E+04	.00000E+00
87	.87430E+04	.77911E+04	.68371E+04	.58814E+04	.49243E+04	.39672E+04	.30131E+04	.00000E+00
88	.87174E+04	.77656E+04	.68120E+04	.58570E+04	.49009E+04	.39450E+04	.29916E+04	.00000E+00
89	.86945E+04	.77428E+04	.67894E+04	.58343E+04	.48776E+04	.39195E+04	.29620E+04	.00000E+00
90	.86742E+04	.77225E+04	.67692E+04	.58142E+04	.48566E+04	.38947E+04	.29209E+04	.00000E+00
91	.86563E+04	.77047E+04	.67518E+04	.57974E+04	.48415E+04	.38842E+04	.29271E+04	.00000E+00
92	.86405E+04	.76891E+04	.67365E+04	.57830E+04	.48288E+04	.38745E+04	.29218E+04	.00000E+00
93	.86264E+04	.76751E+04	.67228E+04	.57698E+04	.48163E+04	.38629E+04	.29108E+04	.00000E+00
94	.86138E+04	.76625E+04	.67104E+04	.57575E+04	.48038E+04	.38496E+04	.28956E+04	.00000E+00
95	.86025E+04	.76512E+04	.66992E+04	.57464E+04	.47925E+04	.38365E+04	.28751E+04	.00000E+00
96	.85922E+04	.76411E+04	.66893E+04	.57369E+04	.47838E+04	.38300E+04	.28763E+04	.00000E+00
97	.85829E+04	.76318E+04	.66803E+04	.57285E+04	.47763E+04	.38241E+04	.28725E+04	.00000E+00
98	.85743E+04	.76233E+04	.66720E+04	.57206E+04	.47691E+04	.38176E+04	.28665E+04	.00000E+00
99	.85660E+04	.76151E+04	.66640E+04	.57129E+04	.47618E+04	.38107E+04	.28597E+04	.00000E+00
100	.85580E+04	.76071E+04	.66562E+04	.57053E+04	.47544E+04	.38036E+04	.28527E+04	.00000E+00

DOORLATENDHEIDSCOEFFICIENTEN SPLETEN TUSSEN BLOKKEN:

A(0)=	.1384E-01
A(5)=	.1370E-01
A(10)=	.1321E-01
A(15)=	.1227E-01
A(20)=	.1102E-01
A(25)=	.9634E-02
A(30)=	.8277E-02
A(35)=	.7030E-02
A(40)=	.5930E-02
A(45)=	.4975E-02
A(50)=	.3814E-02
A(55)=	.4232E-02
A(60)=	.4688E-02
A(65)=	.5262E-02
A(70)=	.6187E-02
A(75)=	.7399E-02
A(80)=	.8980E-02
A(85)=	.1117E-01
A(90)=	.1438E-01
A(95)=	.2000E-01

DOORLATENDHEIDSCOEFFICIENTEN IN FILTER:

	0	1	2	3	4	5	6
0	0.4098E+00	0.4098E+00	0.4098E+00	0.4098E+00	0.3599E+00	0.2632E+00	0.1619E+00
1	0.4098E+00	0.4098E+00	0.4098E+00	0.4098E+00	0.4015E+00	0.3575E+00	0.2695E+00
2	0.4098E+00	0.4098E+00	0.4098E+00	0.4098E+00	0.4098E+00	0.4098E+00	0.4098E+00
3	0.4098E+00	0.4098E+00	0.4098E+00	0.4098E+00	0.4098E+00	0.4098E+00	0.4098E+00
4	0.4098E+00	0.4098E+00	0.3986E+00	0.3826E+00	0.3701E+00	0.3710E+00	0.2929E+00
5	0.3767E+00	0.3742E+00	0.3661E+00	0.3502E+00	0.3177E+00	0.2511E+00	0.1598E+00
6	0.3453E+00	0.3441E+00	0.3404E+00	0.3328E+00	0.3184E+00	0.2910E+00	0.2356E+00
7	0.3205E+00	0.3203E+00	0.3176E+00	0.3190E+00	0.3196E+00	0.3209E+00	0.3105E+00
8	0.2998E+00	0.2999E+00	0.3002E+00	0.3022E+00	0.3105E+00	0.3403E+00	0.4098E+00
9	0.2815E+00	0.2814E+00	0.2811E+00	0.2809E+00	0.2835E+00	0.3067E+00	0.3206E+00
10	0.2655E+00	0.2652E+00	0.2641E+00	0.2609E+00	0.2509E+00	0.2187E+00	0.1518E+00
11	0.2516E+00	0.2515E+00	0.2508E+00	0.2489E+00	0.2436E+00	0.2298E+00	0.1973E+00
12	0.2394E+00	0.2396E+00	0.2399E+00	0.2408E+00	0.2426E+00	0.2439E+00	0.2387E+00
13	0.2281E+00	0.2284E+00	0.2292E+00	0.2314E+00	0.2381E+00	0.2574E+00	0.2939E+00
14	0.2173E+00	0.2174E+00	0.2177E+00	0.2185E+00	0.2214E+00	0.2393E+00	0.3588E+00
15	0.2072E+00	0.2072E+00	0.2068E+00	0.2054E+00	0.2002E+00	0.1817E+00	0.1372E+00
16	0.1981E+00	0.1981E+00	0.1979E+00	0.1970E+00	0.1938E+00	0.1848E+00	0.1628E+00
17	0.1899E+00	0.1900E+00	0.1905E+00	0.1914E+00	0.1931E+00	0.1942E+00	0.1899E+00
18	0.1819E+00	0.1821E+00	0.1829E+00	0.1849E+00	0.1904E+00	0.2058E+00	0.2280E+00
19	0.1742E+00	0.1743E+00	0.1746E+00	0.1754E+00	0.1778E+00	0.1924E+00	0.3777E+00
20	0.1669E+00	0.1668E+00	0.1666E+00	0.1657E+00	0.1620E+00	0.1491E+00	0.1191E+00
21	0.1601E+00	0.1601E+00	0.1600E+00	0.1594E+00	0.1570E+00	0.1501E+00	0.1336E+00
22	0.1539E+00	0.1540E+00	0.1544E+00	0.1552E+00	0.1566E+00	0.1574E+00	0.1536E+00
23	0.1478E+00	0.1480E+00	0.1486E+00	0.1503E+00	0.1548E+00	0.1676E+00	0.1837E+00
24	0.1417E+00	0.1418E+00	0.1421E+00	0.1428E+00	0.1447E+00	0.1568E+00	0.3561E+00
25	0.1359E+00	0.1359E+00	0.1357E+00	0.1350E+00	0.1321E+00	0.1222E+00	0.1006E+00
26	0.1305E+00	0.1305E+00	0.1304E+00	0.1299E+00	0.1280E+00	0.1226E+00	0.1095E+00
27	0.1254E+00	0.1255E+00	0.1259E+00	0.1266E+00	0.1277E+00	0.1284E+00	0.1250E+00
28	0.1205E+00	0.1207E+00	0.1212E+00	0.1226E+00	0.1264E+00	0.1371E+00	0.1495E+00
29	0.1156E+00	0.1157E+00	0.1160E+00	0.1165E+00	0.1181E+00	0.1280E+00	0.3113E+00
30	0.1109E+00	0.1109E+00	0.1108E+00	0.1102E+00	0.1079E+00	0.9996E-01	0.8356E-01
31	0.1065E+00	0.1065E+00	0.1064E+00	0.1061E+00	0.1046E+00	0.1001E+00	0.8959E-01
32	0.1024E+00	0.1025E+00	0.1028E+00	0.1034E+00	0.1043E+00	0.1048E+00	0.1020E+00
33	0.9841E-01	0.9854E-01	0.9899E-01	0.1001E+00	0.1032E+00	0.1120E+00	0.1220E+00
34	0.9441E-01	0.9448E-01	0.9469E-01	0.9515E-01	0.9644E-01	0.1046E+00	0.2607E+00
35	0.9054E-01	0.9053E-01	0.9044E-01	0.8997E-01	0.8812E-01	0.8169E-01	0.6867E-01

36	0.8696E-01	0.8696E-01	0.8692E-01	0.8661E-01	0.8538E-01	0.8176E-01	0.7322E-01
37	0.8363E-01	0.8370E-01	0.8393E-01	0.8440E-01	0.8516E-01	0.8558E-01	0.8331E-01
38	0.8039E-01	0.8048E-01	0.8084E-01	0.8176E-01	0.8426E-01	0.9144E-01	0.9961E-01
39	0.7714E-01	0.7719E-01	0.7734E-01	0.7769E-01	0.7872E-01	0.8535E-01	0.2133E+00
40	0.7402E-01	0.7400E-01	0.7389E-01	0.7346E-01	0.7191E-01	0.6664E-01	0.5605E-01
41	0.7117E-01	0.7115E-01	0.7105E-01	0.7071E-01	0.6963E-01	0.6663E-01	0.5967E-01
42	0.6858E-01	0.6860E-01	0.6868E-01	0.6892E-01	0.6939E-01	0.6963E-01	0.6775E-01
43	0.6614E-01	0.6615E-01	0.6627E-01	0.6679E-01	0.6857E-01	0.7420E-01	0.8082E-01
44	0.6383E-01	0.6377E-01	0.6362E-01	0.6352E-01	0.6395E-01	0.6896E-01	0.1750E+00
45	0.6186E-01	0.6168E-01	0.6114E-01	0.6012E-01	0.5818E-01	0.5353E-01	0.4522E-01
46	0.6047E-01	0.6022E-01	0.5944E-01	0.5804E-01	0.5584E-01	0.5245E-01	0.4698E-01
47	0.5987E-01	0.5958E-01	0.5870E-01	0.5721E-01	0.5514E-01	0.5269E-01	0.5065E-01
48	0.6014E-01	0.5983E-01	0.5890E-01	0.5731E-01	0.5508E-01	0.5239E-01	0.4996E-01
49	0.6136E-01	0.6106E-01	0.6012E-01	0.5842E-01	0.5569E-01	0.5142E-01	0.4414E-01
50	0.6357E-01	0.6333E-01	0.6256E-01	0.6107E-01	0.5801E-01	0.5016E-01	0.3459E-01
51	0.6667E-01	0.6655E-01	0.6621E-01	0.6582E-01	0.6613E-01	0.7148E-01	0.7281E-01
52	0.7047E-01	0.7045E-01	0.7048E-01	0.7092E-01	0.7299E-01	0.8051E-01	0.1064E+00
53	0.7483E-01	0.7481E-01	0.7483E-01	0.7507E-01	0.7588E-01	0.7716E-01	0.7553E-01
54	0.7984E-01	0.7976E-01	0.7945E-01	0.7863E-01	0.7647E-01	0.7095E-01	0.5812E-01
55	0.8587E-01	0.8573E-01	0.8519E-01	0.8352E-01	0.7814E-01	0.6303E-01	0.3948E-01
56	0.9327E-01	0.9320E-01	0.9292E-01	0.9252E-01	0.9376E-01	0.1057E+00	0.7359E-01
57	0.1023E+00	0.1023E+00	0.1023E+00	0.1027E+00	0.1060E+00	0.1224E+00	0.2312E+00
58	0.1135E+00	0.1134E+00	0.1129E+00	0.1120E+00	0.1122E+00	0.1150E+00	0.1064E+00
59	0.1284E+00	0.1278E+00	0.1251E+00	0.1189E+00	0.1095E+00	0.9602E-01	0.7212E-01
60	0.1507E+00	0.1490E+00	0.1401E+00	0.1242E+00	0.1021E+00	0.7351E-01	0.4464E-01
61	0.1932E+00	0.1833E+00	0.1583E+00	0.1374E+00	0.1222E+00	0.1059E+00	0.7554E-01
62	0.3218E+00	0.2207E+00	0.1708E+00	0.1486E+00	0.1411E+00	0.1438E+00	0.1213E+00
63	0.2731E+00	0.2183E+00	0.1731E+00	0.1512E+00	0.1451E+00	0.1671E+00	0.3443E+00
64	0.1900E+00	0.1826E+00	0.1630E+00	0.1455E+00	0.1379E+00	0.1470E+00	0.9218E-01
65	0.1565E+00	0.1546E+00	0.1469E+00	0.1338E+00	0.1146E+00	0.8520E-01	0.5123E-01
66	0.1381E+00	0.1373E+00	0.1341E+00	0.1280E+00	0.1185E+00	0.1048E+00	0.8140E-01
67	0.1261E+00	0.1257E+00	0.1245E+00	0.1226E+00	0.1203E+00	0.1174E+00	0.1101E+00
68	0.1171E+00	0.1169E+00	0.1165E+00	0.1162E+00	0.1178E+00	0.1262E+00	0.1491E+00
69	0.1099E+00	0.1097E+00	0.1092E+00	0.1084E+00	0.1086E+00	0.1165E+00	0.1394E+00
70	0.1041E+00	0.1038E+00	0.1030E+00	0.1012E+00	0.9703E-01	0.8560E-01	0.6129E-01
71	0.9947E-01	0.9924E-01	0.9847E-01	0.9688E-01	0.9383E-01	0.8798E-01	0.7631E-01
72	0.9588E-01	0.9574E-01	0.9531E-01	0.9455E-01	0.9337E-01	0.9147E-01	0.8847E-01
73	0.9296E-01	0.9290E-01	0.9276E-01	0.9271E-01	0.9320E-01	0.9511E-01	0.9832E-01
74	0.9040E-01	0.9036E-01	0.9026E-01	0.9027E-01	0.9093E-01	0.9461E-01	0.1196E+00
75	0.8813E-01	0.8805E-01	0.8779E-01	0.8729E-01	0.8622E-01	0.8288E-01	0.7047E-01
76	0.8618E-01	0.8609E-01	0.8576E-01	0.8508E-01	0.8371E-01	0.8084E-01	0.7444E-01
77	0.8459E-01	0.8451E-01	0.8429E-01	0.8387E-01	0.8317E-01	0.8206E-01	0.8059E-01
78	0.8326E-01	0.8322E-01	0.8313E-01	0.8305E-01	0.8312E-01	0.8366E-01	0.8476E-01
79	0.8208E-01	0.8206E-01	0.8201E-01	0.8203E-01	0.8237E-01	0.8391E-01	0.9052E-01
80	0.8101E-01	0.8097E-01	0.8087E-01	0.8068E-01	0.8035E-01	0.7941E-01	0.7462E-01
81	0.8006E-01	0.8001E-01	0.7986E-01	0.7954E-01	0.7887E-01	0.7738E-01	0.7380E-01
82	0.7926E-01	0.7923E-01	0.7911E-01	0.7888E-01	0.7849E-01	0.7785E-01	0.7703E-01
83	0.7859E-01	0.7857E-01	0.7852E-01	0.7846E-01	0.7846E-01	0.7866E-01	0.7913E-01
84	0.7799E-01	0.7798E-01	0.7795E-01	0.7796E-01	0.7814E-01	0.7888E-01	0.8166E-01
85	0.7743E-01	0.7742E-01	0.7736E-01	0.7728E-01	0.7715E-01	0.7686E-01	0.7531E-01
86	0.7694E-01	0.7691E-01	0.7683E-01	0.7667E-01	0.7631E-01	0.7551E-01	0.7346E-01
87	0.7652E-01	0.7650E-01	0.7643E-01	0.7630E-01	0.7607E-01	0.7570E-01	0.7522E-01
88	0.7616E-01	0.7615E-01	0.7612E-01	0.7607E-01	0.7605E-01	0.7611E-01	0.7632E-01
89	0.7585E-01	0.7584E-01	0.7582E-01	0.7582E-01	0.7590E-01	0.7626E-01	0.7754E-01
90	0.7556E-01	0.7555E-01	0.7552E-01	0.7547E-01	0.7541E-01	0.7532E-01	0.7488E-01
91	0.7530E-01	0.7529E-01	0.7524E-01	0.7515E-01	0.7496E-01	0.7453E-01	0.7342E-01
92	0.7508E-01	0.7507E-01	0.7503E-01	0.7495E-01	0.7482E-01	0.7461E-01	0.7434E-01
93	0.7491E-01	0.7490E-01	0.7487E-01	0.7484E-01	0.7480E-01	0.7481E-01	0.7488E-01
94	0.7475E-01	0.7475E-01	0.7473E-01	0.7472E-01	0.7474E-01	0.7489E-01	0.7541E-01
95	0.7462E-01	0.7461E-01	0.7460E-01	0.7457E-01	0.7453E-01	0.7450E-01	0.7440E-01
96	0.7451E-01	0.7450E-01	0.7447E-01	0.7442E-01	0.7432E-01	0.7412E-01	0.7360E-01
97	0.7442E-01	0.7441E-01	0.7439E-01	0.7433E-01	0.7425E-01	0.7412E-01	0.7398E-01
98	0.7437E-01	0.7436E-01	0.7433E-01	0.7429E-01	0.7424E-01	0.7418E-01	0.7415E-01
99	0.7433E-01	0.7433E-01	0.7431E-01	0.7428E-01	0.7424E-01	0.7421E-01	0.7420E-01
100	0.7432E-01	0.7431E-01	0.7430E-01	0.7427E-01	0.7424E-01	0.7422E-01	0.7421E-01

STROMINGSTOESTAND IN SPLETEN: N= 0.7042

GETAL VAN REYNOLDS (RE) IN FILTER:
RE <= 4 -----> LAMINAIR
4 > RE < 576 -----> OVERGANGSGEBIED
RE >= 576 -----> TURBULENT

0	1	2	3	4	5	6
0 0.2868E-06	0.9985E+00	0.2011E+01	0.3324E+01	0.5202E+01	0.9690E+01	0.2561E+02
1 0.9164E+00	0.1364E+01	0.2190E+01	0.3114E+01	0.4177E+01	0.5265E+01	0.9248E+01
2 0.1846E+01	0.2056E+01	0.2642E+01	0.3251E+01	0.3638E+01	0.3523E+01	0.3734E+01
3 0.2790E+01	0.2947E+01	0.3351E+01	0.3801E+01	0.3901E+01	0.2967E+01	0.7933E+00
4 0.3843E+01	0.3989E+01	0.4253E+01	0.4597E+01	0.4886E+01	0.4866E+01	0.7819E+01
5 0.4728E+01	0.4815E+01	0.5034E+01	0.5494E+01	0.6660E+01	0.1064E+02	0.2630E+02
6 0.5624E+01	0.5664E+01	0.5799E+01	0.6065E+01	0.6628E+01	0.7925E+01	0.1208E+02
7 0.6537E+01	0.6539E+01	0.6561E+01	0.6593E+01	0.6566E+01	0.6522E+01	0.6954E+01
8 0.7475E+01	0.7459E+01	0.7455E+01	0.7336E+01	0.6958E+01	0.5791E+01	0.3337E+01
9 0.8476E+01	0.8483E+01	0.8501E+01	0.8505E+01	0.8349E+01	0.7125E+01	0.6550E+01
10 0.9525E+01	0.9562E+01	0.9614E+01	0.9863E+01	0.1067E+02	0.1404E+02	0.2914E+02
11 0.1061E+02	0.1062E+02	0.1067E+02	0.1083E+02	0.1131E+02	0.1272E+02	0.1726E+02
12 0.1171E+02	0.1169E+02	0.1167E+02	0.1159E+02	0.1141E+02	0.1129E+02	0.1179E+02
13 0.1289E+02	0.1286E+02	0.1278E+02	0.1256E+02	0.1186E+02	0.1014E+02	0.7768E+01
14 0.1422E+02	0.1421E+02	0.1417E+02	0.1406E+02	0.1372E+02	0.1173E+02	0.5209E+01
15 0.1565E+02	0.1566E+02	0.1571E+02	0.1591E+02	0.1676E+02	0.2033E+02	0.3566E+02
16 0.1711E+02	0.1712E+02	0.1715E+02	0.1731E+02	0.1788E+02	0.1966E+02	0.2535E+02
17 0.1864E+02	0.1861E+02	0.1853E+02	0.1833E+02	0.1802E+02	0.1782E+02	0.1862E+02
18 0.2029E+02	0.2025E+02	0.2008E+02	0.1964E+02	0.1853E+02	0.1587E+02	0.1292E+02
19 0.2213E+02	0.2210E+02	0.2202E+02	0.2183E+02	0.2123E+02	0.1815E+02	0.4688E+01
20 0.2412E+02	0.2413E+02	0.2420E+02	0.2447E+02	0.2558E+02	0.3020E+02	0.4732E+02
21 0.2620E+02	0.2621E+02	0.2624E+02	0.2646E+02	0.2725E+02	0.2979E+02	0.3763E+02
22 0.2837E+02	0.2833E+02	0.2817E+02	0.2788E+02	0.2739E+02	0.2711E+02	0.2848E+02
23 0.3076E+02	0.3068E+02	0.3041E+02	0.2973E+02	0.2803E+02	0.2391E+02	0.1991E+02
24 0.3344E+02	0.3340E+02	0.3327E+02	0.3294E+02	0.3206E+02	0.2733E+02	0.5289E+01
25 0.3638E+02	0.3639E+02	0.3647E+02	0.3687E+02	0.3846E+02	0.4499E+02	0.6631E+02
26 0.3946E+02	0.3946E+02	0.3950E+02	0.3979E+02	0.4097E+02	0.4472E+02	0.5603E+02
27 0.4208E+02	0.4261E+02	0.4238E+02	0.4190E+02	0.4116E+02	0.4076E+02	0.4297E+02
28 0.4622E+02	0.4612E+02	0.4570E+02	0.4467E+02	0.4205E+02	0.3575E+02	0.3004E+02
29 0.5024E+02	0.5017E+02	0.4995E+02	0.4947E+02	0.4816E+02	0.4096E+02	0.6932E+01
30 0.5463E+02	0.5464E+02	0.5475E+02	0.5533E+02	0.5769E+02	0.6723E+02	0.9618E+02
31 0.5923E+02	0.5922E+02	0.5928E+02	0.5971E+02	0.6144E+02	0.6702E+02	0.8368E+02
32 0.6404E+02	0.6393E+02	0.6357E+02	0.6286E+02	0.6174E+02	0.6114E+02	0.6453E+02
33 0.6934E+02	0.6917E+02	0.6855E+02	0.6698E+02	0.6305E+02	0.5354E+02	0.4511E+02
34 0.7535E+02	0.7525E+02	0.7492E+02	0.7418E+02	0.7221E+02	0.6139E+02	0.9878E+01
35 0.8193E+02	0.8195E+02	0.8211E+02	0.8297E+02	0.8649E+02	0.1007E+03	0.1424E+03
36 0.8882E+02	0.8882E+02	0.8890E+02	0.8955E+02	0.9214E+02	0.1005E+03	0.1253E+03
37 0.9602E+02	0.9587E+02	0.9534E+02	0.9428E+02	0.9260E+02	0.9170E+02	0.9677E+02
38 0.1039E+03	0.1037E+03	0.1028E+03	0.1005E+03	0.9459E+02	0.8033E+02	0.6769E+02
39 0.1129E+03	0.1127E+03	0.1123E+03	0.1113E+03	0.1084E+03	0.9219E+02	0.1476E+02
40 0.1226E+03	0.1227E+03	0.1230E+03	0.1245E+03	0.1299E+03	0.1512E+03	0.2138E+03
41 0.1326E+03	0.1327E+03	0.1330E+03	0.1343E+03	0.1385E+03	0.1513E+03	0.1886E+03
42 0.1428E+03	0.1427E+03	0.1424E+03	0.1414E+03	0.1395E+03	0.1385E+03	0.1463E+03
43 0.1536E+03	0.1535E+03	0.1529E+03	0.1506E+03	0.1428E+03	0.1220E+03	0.1028E+03
44 0.1648E+03	0.1652E+03	0.1660E+03	0.1665E+03	0.1642E+03	0.1412E+03	0.2192E+02
45 0.1755E+03	0.1765E+03	0.1797E+03	0.1858E+03	0.1984E+03	0.2344E+03	0.3285E+03
46 0.1837E+03	0.1852E+03	0.1901E+03	0.1946E+03	0.2154E+03	0.2441E+03	0.3043E+03
47 0.1874E+03	0.1892E+03	0.1949E+03	0.2052E+03	0.2209E+03	0.2419E+03	0.2618E+03
48 0.1857E+03	0.1876E+03	0.1936E+03	0.2045E+03	0.2214E+03	0.2447E+03	0.2691E+03
49 0.1784E+03	0.1801E+03	0.1858E+03	0.1968E+03	0.2165E+03	0.2540E+03	0.3447E+03
50 0.1662E+03	0.1675E+03	0.1716E+03	0.1801E+03	0.1996E+03	0.2670E+03	0.5612E+03
51 0.1511E+03	0.1517E+03	0.1533E+03	0.1550E+03	0.1536E+03	0.1314E+03	0.1267E+03
52 0.1352E+03	0.1353E+03	0.1352E+03	0.1335E+03	0.1261E+03	0.1036E+03	0.5930E+02
53 0.1200E+03	0.1200E+03	0.1199E+03	0.1192E+03	0.1167E+03	0.1128E+03	0.1177E+03
54 0.1054E+03	0.1056E+03	0.1064E+03	0.1086E+03	0.1149E+03	0.1334E+03	0.1989E+03
55 0.9110E+02	0.9137E+02	0.9255E+02	0.9628E+02	0.1100E+03	0.1691E+03	0.4309E+03
56 0.7720E+02	0.7733E+02	0.7779E+02	0.7846E+02	0.7641E+02	0.6014E+02	0.1240E+03
57 0.6414E+02	0.6417E+02	0.6420E+02	0.6365E+02	0.5980E+02	0.4484E+02	0.1257E+02
58 0.5210E+02	0.5223E+02	0.5272E+02	0.5357E+02	0.5339E+02	0.5082E+02	0.5928E+02
59 0.4076E+02	0.4112E+02	0.4293E+02	0.4751E+02	0.5605E+02	0.7286E+02	0.1291E+03
60 0.2958E+02	0.3026E+02	0.3422E+02	0.4354E+02	0.6442E+02	0.1243E+03	0.3371E+03
61 0.1799E+02	0.1999E+02	0.2681E+02	0.3558E+02	0.4901E+02	0.5990E+02	0.1177E+03
62 0.6485E+01	0.1379E+02	0.2301E+02	0.3042E+02	0.3373E+02	0.3250E+02	0.4563E+02
63 0.9004E+01	0.1410E+02	0.2242E+02	0.2938E+02	0.3189E+02	0.2407E+02	0.5664E+01
64 0.1861E+02	0.2015E+02	0.2527E+02	0.3171E+02	0.3530E+02	0.3107E+02	0.7905E+02
65 0.2744E+02	0.2811E+02	0.3111E+02	0.3752E+02	0.5113E+02	0.9253E+02	0.2560E+03
66 0.3521E+02	0.3564E+02	0.3732E+02	0.4099E+02	0.4780E+02	0.6121E+02	0.1014E+03
67 0.4226E+02	0.4251E+02	0.4333E+02	0.4472E+02	0.4644E+02	0.4874E+02	0.5540E+02
68 0.4897E+02	0.4912E+02	0.4952E+02	0.4976E+02	0.4841E+02	0.4218E+02	0.3022E+02
69 0.5558E+02	0.5578E+02	0.5634E+02	0.5711E+02	0.5694E+02	0.4951E+02	0.3657E+02
70 0.6200E+02	0.6230E+02	0.6333E+02	0.6562E+02	0.7135E+02	0.9165E+02	0.1788E+03
71 0.6788E+02	0.6820E+02	0.6927E+02	0.7156E+02	0.7629E+02	0.8676E+02	0.1153E+03
72 0.7306E+02	0.7327E+02	0.7394E+02	0.7513E+02	0.7703E+02	0.8028E+02	0.8581E+02
73 0.7773E+02	0.7783E+02	0.7806E+02	0.7814E+02	0.7732E+02	0.7425E+02	0.6948E+02
74 0.8218E+02	0.8227E+02	0.8244E+02	0.8243E+02	0.8124E+02	0.7503E+02	0.4699E+02
75 0.8648E+02	0.8664E+02	0.8714E+02	0.8815E+02	0.9034E+02	0.9779E+02	0.1352E+03

VERHANGEN IN X-RICHTUNG:

0	0	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
1	0	0.3195E-03	0.3388E-03	0.3576E-03	0.3766E-03	0.3958E-03	0.4152E-03
2	2	0.6437E-03	0.6342E-03	0.6294E-03	0.6246E-03	0.6198E-03	0.6150E-03
3	3	0.9727E-03	0.9346E-03	0.8965E-03	0.8584E-03	0.8203E-03	0.7822E-03
4	4	0.1340E-02	0.1340E-02	0.1340E-02	0.1340E-02	0.1340E-02	0.1340E-02
5	5	0.1793E-02	0.1793E-02	0.1793E-02	0.1793E-02	0.1793E-02	0.1793E-02
6	6	0.2322E-02	0.2322E-02	0.2322E-02	0.2322E-02	0.2322E-02	0.2322E-02
7	7	0.2913E-02	0.2890E-02	0.2867E-02	0.2844E-02	0.2821E-02	0.2798E-02
8	8	0.3562E-02	0.3524E-02	0.3486E-02	0.3448E-02	0.3410E-02	0.3372E-02
9	9	0.4301E-02	0.4272E-02	0.4243E-02	0.4214E-02	0.4185E-02	0.4156E-02
10	10	0.5126E-02	0.5116E-02	0.5106E-02	0.5096E-02	0.5086E-02	0.5076E-02
11	11	0.6027E-02	0.6003E-02	0.5979E-02	0.5955E-02	0.5931E-02	0.5907E-02
12	12	0.6990E-02	0.6938E-02	0.6886E-02	0.6834E-02	0.6782E-02	0.6730E-02
13	13	0.8073E-02	0.8006E-02	0.7939E-02	0.7872E-02	0.7805E-02	0.7738E-02
14	14	0.9346E-02	0.9244E-02	0.9142E-02	0.9040E-02	0.8938E-02	0.8836E-02
15	15	0.1079E-01	0.1075E-01	0.1071E-01	0.1067E-01	0.1063E-01	0.1059E-01
16	16	0.1234E-01	0.1230E-01	0.1226E-01	0.1222E-01	0.1218E-01	0.1214E-01
17	17	0.1402E-01	0.1395E-01	0.1388E-01	0.1381E-01	0.1374E-01	0.1367E-01
18	18	0.1593E-01	0.1582E-01	0.1571E-01	0.1560E-01	0.1549E-01	0.1538E-01
19	19	0.1814E-01	0.1804E-01	0.1790E-01	0.1776E-01	0.1762E-01	0.1748E-01
20	20	0.2065E-01	0.2058E-01	0.2044E-01	0.2030E-01	0.2016E-01	0.2002E-01
21	21	0.2335E-01	0.2314E-01	0.2293E-01	0.2272E-01	0.2251E-01	0.2230E-01
22	22	0.2635E-01	0.2620E-01	0.2605E-01	0.2590E-01	0.2575E-01	0.2560E-01
23	23	0.2973E-01	0.2952E-01	0.2931E-01	0.2910E-01	0.2889E-01	0.2868E-01
24	24	0.3371E-01	0.3350E-01	0.3329E-01	0.3308E-01	0.3287E-01	0.3266E-01
25	25	0.3826E-01	0.3813E-01	0.3790E-01	0.3767E-01	0.3744E-01	0.3721E-01
26	26	0.4322E-01	0.4307E-01	0.4286E-01	0.4265E-01	0.4244E-01	0.4223E-01
27	27	0.4861E-01	0.4835E-01	0.4814E-01	0.4793E-01	0.4772E-01	0.4751E-01
28	28	0.5478E-01	0.5441E-01	0.5404E-01	0.5367E-01	0.5330E-01	0.5293E-01
29	29	0.6207E-01	0.6171E-01	0.6134E-01	0.6097E-01	0.6060E-01	0.6023E-01
30	30	0.7039E-01	0.7015E-01	0.6991E-01	0.6967E-01	0.6943E-01	0.6919E-01
31	31	0.7946E-01	0.7920E-01	0.7894E-01	0.7868E-01	0.7842E-01	0.7816E-01
32	32	0.8934E-01	0.8885E-01	0.8836E-01	0.8787E-01	0.8738E-01	0.8689E-01
33	33	0.1007E+00	0.9996E-01	0.9985E-01	0.9974E-01	0.9963E-01	0.9952E-01
34	34	0.1140E+00	0.1134E+00	0.1128E+00	0.1122E+00	0.1116E+00	0.1110E+00
35	35	0.1293E+00	0.1277E+00	0.1261E+00	0.1245E+00	0.1229E+00	0.1213E+00
36	36	0.1459E+00	0.1455E+00	0.1449E+00	0.1443E+00	0.1437E+00	0.1431E+00
37	37	0.1640E+00	0.1631E+00	0.1622E+00	0.1613E+00	0.1604E+00	0.1595E+00
38	38	0.1847E+00	0.1835E+00	0.1823E+00	0.1811E+00	0.1799E+00	0.1787E+00
39	39	0.2090E+00	0.2079E+00	0.2067E+00	0.2055E+00	0.2043E+00	0.2031E+00
40	40	0.2366E+00	0.2360E+00	0.2354E+00	0.2348E+00	0.2342E+00	0.2336E+00
41	41	0.2662E+00	0.2657E+00	0.2651E+00	0.2645E+00	0.2639E+00	0.2633E+00
42	42	0.2975E+00	0.2965E+00	0.2955E+00	0.2945E+00	0.2935E+00	0.2925E+00
43	43	0.3317E+00	0.3306E+00	0.3296E+00	0.3286E+00	0.3276E+00	0.3266E+00
44	44	0.3689E+00	0.3690E+00	0.3682E+00	0.3674E+00	0.3666E+00	0.3658E+00
45	45	0.4054E+00	0.4081E+00	0.4108E+00	0.4135E+00	0.4162E+00	0.4189E+00
46	46	0.4439E+00	0.4391E+00	0.4443E+00	0.4497E+00	0.4551E+00	0.4605E+00
47	47	0.4772E+00	0.4737E+00	0.4802E+00	0.4867E+00	0.4932E+00	0.4997E+00
48	48	0.4411E+00	0.4478E+00	0.4545E+00	0.4612E+00	0.4679E+00	0.4746E+00
49	49	0.4153E+00	0.4238E+00	0.4323E+00	0.4408E+00	0.4493E+00	0.4578E+00
50	50	0.3736E+00	0.3763E+00	0.3790E+00	0.3817E+00	0.3844E+00	0.3871E+00
51	51	0.3237E+00	0.3236E+00	0.3235E+00	0.3234E+00	0.3233E+00	0.3232E+00
52	52	0.2741E+00	0.2774E+00	0.2807E+00	0.2840E+00	0.2873E+00	0.2906E+00
53	53	0.2290E+00	0.2274E+00	0.2258E+00	0.2242E+00	0.2226E+00	0.2210E+00
54	54	0.1885E+00	0.1874E+00	0.1863E+00	0.1852E+00	0.1841E+00	0.1830E+00
55	55	0.1516E+00	0.1504E+00	0.1492E+00	0.1480E+00	0.1468E+00	0.1456E+00

56	-.1182E+00	-.1167E+00	-.1117E+00	-.1015E+00	-.7889E-01	-.1220E-01	0.2408E+00
57	-.8954E-01	-.8792E-01	-.8281E-01	-.7325E-01	-.5689E-01	-.3258E-01	-.7763E-02
58	-.6555E-01	-.6423E-01	-.6050E-01	-.5527E-01	-.5102E-01	-.5487E-01	-.7956E-01
59	-.4536E-01	-.4429E-01	-.4194E-01	-.4049E-01	-.4620E-01	-.8318E-01	-.2558E+00
60	-.2804E-01	-.2692E-01	-.2501E-01	-.2304E-01	-.2103E-01	-.1879E-01	-.1726E-01
61	-.1330E-01	-.1256E-01	-.1102E-01	-.7399E-02	0.4216E-02	0.4702E-01	0.2226E+00
62	-.2879E-02	-.2654E-02	-.1507E-02	0.1293E-02	0.7891E-02	0.2325E-01	0.5373E-01
63	0.4710E-02	0.4846E-02	0.5744E-02	0.7035E-02	0.7397E-02	0.5279E-02	0.2350E-02
64	0.1400E-01	0.1387E-01	0.1420E-01	0.1445E-01	0.1067E-01	-.1251E-01	-.1225E+00
65	0.2505E-01	0.2483E-01	0.2500E-01	0.2611E-01	0.2754E-01	0.2528E-01	0.1018E-01
66	0.3641E-01	0.3632E-01	0.3651E-01	0.3830E-01	0.4513E-01	0.7042E-01	0.1779E+00
67	0.4788E-01	0.4772E-01	0.4738E-01	0.4737E-01	0.4899E-01	0.5572E-01	0.7188E-01
68	0.5973E-01	0.5947E-01	0.5858E-01	0.5652E-01	0.5190E-01	0.4241E-01	0.2895E-01
69	0.7223E-01	0.7209E-01	0.7150E-01	0.6966E-01	0.6365E-01	0.4261E-01	-.3543E-01
70	0.8510E-01	0.8527E-01	0.8588E-01	0.8722E-01	0.8980E-01	0.9353E-01	0.9530E-01
71	0.9748E-01	0.9785E-01	0.9921E-01	0.1022E+00	0.1113E+00	0.1357E+00	0.2159E+00
72	0.1088E+00	0.1091E+00	0.1100E+00	0.1119E+00	0.1159E+00	0.1243E+00	0.1386E+00
73	0.1195E+00	0.1195E+00	0.1195E+00	0.1199E+00	0.1167E+00	0.1105E+00	0.1010E+00
74	0.1299E+00	0.1299E+00	0.1297E+00	0.1286E+00	0.1241E+00	0.1086E+00	0.5615E-01
75	0.1402E+00	0.1404E+00	0.1410E+00	0.1422E+00	0.1440E+00	0.1467E+00	0.1483E+00
76	0.1499E+00	0.1503E+00	0.1516E+00	0.1546E+00	0.1616E+00	0.1795E+00	0.2326E+00
77	0.1585E+00	0.1589E+00	0.1599E+00	0.1620E+00	0.1660E+00	0.1732E+00	0.1833E+00
78	0.1603E+00	0.1664E+00	0.1668E+00	0.1670E+00	0.1665E+00	0.1635E+00	0.1576E+00
79	0.1735E+00	0.1736E+00	0.1737E+00	0.1732E+00	0.1706E+00	0.1611E+00	0.1294E+00
80	0.1805E+00	0.1807E+00	0.1812E+00	0.1820E+00	0.1831E+00	0.1845E+00	0.1856E+00
81	0.1870E+00	0.1873E+00	0.1882E+00	0.1903E+00	0.1949E+00	0.2062E+00	0.2387E+00
82	0.1927E+00	0.1929E+00	0.1937E+00	0.1953E+00	0.1981E+00	0.2032E+00	0.2099E+00
83	0.1977E+00	0.1978E+00	0.1981E+00	0.1985E+00	0.1985E+00	0.1971E+00	0.1936E+00
84	0.2023E+00	0.2024E+00	0.2025E+00	0.2023E+00	0.2008E+00	0.1951E+00	0.1762E+00
85	0.2067E+00	0.2068E+00	0.2071E+00	0.2077E+00	0.2083E+00	0.2090E+00	0.2096E+00
86	0.2107E+00	0.2109E+00	0.2115E+00	0.2128E+00	0.2157E+00	0.2226E+00	0.2420E+00
87	0.2142E+00	0.2143E+00	0.2149E+00	0.2159E+00	0.2179E+00	0.2212E+00	0.2255E+00
88	0.2172E+00	0.2173E+00	0.2176E+00	0.2179E+00	0.2181E+00	0.2176E+00	0.2158E+00
89	0.2199E+00	0.2200E+00	0.2201E+00	0.2201E+00	0.2193E+00	0.2163E+00	0.2058E+00
90	0.2224E+00	0.2225E+00	0.2228E+00	0.2231E+00	0.2235E+00	0.2239E+00	0.2241E+00
91	0.2247E+00	0.2248E+00	0.2252E+00	0.2260E+00	0.2277E+00	0.2316E+00	0.2424E+00
92	0.2267E+00	0.2268E+00	0.2271E+00	0.2278E+00	0.2290E+00	0.2310E+00	0.2336E+00
93	0.2283E+00	0.2284E+00	0.2286E+00	0.2289E+00	0.2292E+00	0.2292E+00	0.2285E+00
94	0.2297E+00	0.2297E+00	0.2299E+00	0.2300E+00	0.2298E+00	0.2285E+00	0.2237E+00
95	0.2309E+00	0.2310E+00	0.2311E+00	0.2314E+00	0.2317E+00	0.2320E+00	0.2321E+00
96	0.2320E+00	0.2320E+00	0.2323E+00	0.2328E+00	0.2337E+00	0.2356E+00	0.2406E+00
97	0.2328E+00	0.2328E+00	0.2331E+00	0.2336E+00	0.2344E+00	0.2356E+00	0.2369E+00
98	0.2333E+00	0.2334E+00	0.2336E+00	0.2340E+00	0.2345E+00	0.2350E+00	0.2354E+00
99	0.2336E+00	0.2337E+00	0.2339E+00	0.2341E+00	0.2345E+00	0.2347E+00	0.2349E+00
100	0.2337E+00	0.2338E+00	0.2340E+00	0.2342E+00	0.2345E+00	0.2347E+00	0.2347E+00

VERHANGEN IN Y-RICHTING:

0	1	2	3	4	5	6	
0	0.0000E+00	0.3481E-03	0.7010E-03	0.1159E-02	0.2065E-02	0.5260E-02	0.2259E-01
1	0.0000E+00	0.3433E-03	0.6866E-03	0.1025E-02	0.1383E-02	0.1626E-02	0.0000E+00
2	0.0000E+00	0.3338E-03	0.6723E-03	0.9489E-03	0.1087E-02	0.9012E-03	0.0000E+00
3	0.0000E+00	0.3576E-03	0.7010E-03	0.1001E-02	0.1168E-02	0.9775E-03	0.0000E+00
4	0.0000E+00	0.3719E-03	0.7677E-03	0.1187E-02	0.1616E-02	0.1874E-02	0.0000E+00
5	0.0000E+00	0.3815E-03	0.8011E-03	0.1345E-02	0.2384E-02	0.5765E-02	0.2344E-01
6	0.0000E+00	0.3719E-03	0.7725E-03	0.1168E-02	0.1559E-02	0.1793E-02	0.0000E+00
7	0.0000E+00	0.4005E-03	0.7963E-03	0.1121E-02	0.1259E-02	0.9680E-03	0.0000E+00
8	0.0000E+00	0.4625E-03	0.9298E-03	0.1340E-02	0.1554E-02	0.1245E-02	0.0000E+00
9	0.0000E+00	0.5388E-03	0.1121E-02	0.1745E-02	0.2370E-02	0.2604E-02	0.0000E+00
10	0.0000E+00	0.5913E-03	0.1245E-02	0.2036E-02	0.3452E-02	0.7639E-02	0.2694E-01
11	0.0000E+00	0.6151E-03	0.1235E-02	0.1798E-02	0.2298E-02	0.2480E-02	0.0000E+00
12	0.0000E+00	0.6676E-03	0.1297E-02	0.1764E-02	0.1893E-02	0.1369E-02	0.0000E+00
13	0.0000E+00	0.7772E-03	0.1526E-02	0.2179E-02	0.2475E-02	0.1869E-02	0.0000E+00
14	0.0000E+00	0.9203E-03	0.1864E-02	0.2913E-02	0.4025E-02	0.4263E-02	0.0000E+00
15	0.0000E+00	0.1016E-02	0.2098E-02	0.3405E-02	0.5641E-02	0.1183E-01	0.3551E-01
16	0.0000E+00	0.1059E-02	0.2079E-02	0.3014E-02	0.3800E-02	0.3996E-02	0.0000E+00
17	0.0000E+00	0.1149E-02	0.2208E-02	0.2900E-02	0.3161E-02	0.2203E-02	0.0000E+00
18	0.0000E+00	0.1364E-02	0.2680E-02	0.3781E-02	0.4225E-02	0.2937E-02	0.0000E+00
19	0.0000E+00	0.1631E-02	0.3333E-02	0.5193E-02	0.7238E-02	0.7353E-02	0.0000E+00
20	0.0000E+00	0.1807E-02	0.3719E-02	0.6037E-02	0.9923E-02	0.2016E-01	0.5287E-01
21	0.0000E+00	0.1874E-02	0.3691E-02	0.5355E-02	0.6700E-02	0.6981E-02	0.0000E+00
22	0.0000E+00	0.2050E-02	0.3924E-02	0.5302E-02	0.5555E-02	0.3781E-02	0.0000E+00
23	0.0000E+00	0.2451E-02	0.4792E-02	0.6757E-02	0.7491E-02	0.4854E-02	0.0000E+00
24	0.0000E+00	0.2942E-02	0.6003E-02	0.9389E-02	0.1321E-01	0.1306E-01	0.0000E+00
25	0.0000E+00	0.3262E-02	0.6714E-02	0.1090E-01	0.1787E-01	0.3573E-01	0.8611E-01
26	0.0000E+00	0.3395E-02	0.6661E-02	0.9651E-02	0.1207E-01	0.1256E-01	0.0000E+00
27	0.0000E+00	0.3715E-02	0.7105E-02	0.9575E-02	0.9961E-02	0.6704E-02	0.0000E+00
28	0.0000E+00	0.4444E-02	0.8702E-02	0.1227E-01	0.1351E-01	0.8402E-02	0.0000E+00
29	0.0000E+00	0.5355E-02	0.1094E-01	0.1714E-01	0.2423E-01	0.2358E-01	0.0000E+00
30	0.0000E+00	0.5951E-02	0.1224E-01	0.1986E-01	0.3254E-01	0.6455E-01	0.1489E+00
31	0.0000E+00	0.6189E-02	0.1215E-01	0.1760E-01	0.2200E-01	0.2286E-01	0.0000E+00
32	0.0000E+00	0.6785E-02	0.1297E-01	0.1746E-01	0.1814E-01	0.1215E-01	0.0000E+00
33	0.0000E+00	0.8125E-02	0.1591E-01	0.2242E-01	0.2466E-01	0.1510E-01	0.0000E+00
34	0.0000E+00	0.9804E-02	0.2003E-01	0.3139E-01	0.4444E-01	0.4304E-01	0.0000E+00
35	0.0000E+00	0.1089E-01	0.2241E-01	0.3637E-01	0.5955E-01	0.1178E+00	0.2672E+00

DEBIETEN DOOR SPLETEN:

QC 0)= -0.3658E-03
QC 5)= -0.3745E-03
QC 10)= -0.4089E-03
QC 15)= -0.4873E-03
QC 20)= -0.6298E-03
QC 25)= -0.8665E-03
QC 30)= -0.1244E-02
QC 35)= -0.1835E-02
QC 40)= -0.2751E-02
QC 45)= -0.4179E-02
QC 50)= 0.7868E-02
QC 55)= 0.6141E-02
QC 60)= 0.4815E-02
QC 65)= 0.3656E-02
QC 70)= 0.2487E-02
QC 75)= 0.1625E-02
QC 80)= 0.1025E-02
QC 85)= 0.6088E-03
QC 90)= 0.3337E-03
QC 95)= 0.1523E-03

** EINDE BEREKENING ***

APPENDIX 7.2

```

1      PROGRAM BLOK2
2      C*****GEOMETRISCH EENDIMENSIONAAL, FYSISCH NIET-LINEAIR*****
      REAL PD(0:300),PH(0:300),Z(0:300,0:1),P(0:300),A(0:300),K(0:300)
      *,XI(0:300),ORO(0:300),Q(0:300)

      C*****INLEZEN GEGEVENS*****

      C      AL= HELLINGSHOEK
      C      D = DIKTE STEENZETTING
      C      N = AANTAL STENEN
      C      DX= AFSTAND TUSSEN TWEE SPLETEN
      C      HF= HOOGTE FREATISCHE LIJN BOVEN STILWATERNIVEAU
      C      GH= GOLFHOOGTE
      C      GL= GOLFLENGTE
      C      S = SPLEETBREEDTE BEKLEDING
      C      EE= PORIENGETAL FILTER
      C      DN= MAATGEVENDE DIAMETER KORRELS
      C      BB= DIKTE FILTER
      C      IS= AANTAL KNOPEN TUSSEN TWEE SPLETEN
      C      BX= DEMPINGSCOEFFICIENT
      C      LL= STUURPARAMETER VOOR AANPASSEN DOORLATENDHEDEN
      C      MI= AANTAL TOEGESTANE ITERATIES
      C      FF= NAGESTREEFDE RELATIEVE AFBREEKFOUT

3      DATA AL,D,N,DX,HF,GH,GL,S,EE,DN,BB,IS,BX,LL,MI,FF
      */14.0,0.3,20,0.5,0.0,0.8,60.0,1.5E-3,0.4,7.0E-3,0.6,4,0.1,500,
      *2000,1E-6/

      C*****UITVOER INLEESGEGEVENS*****
4      WRITE (6,20)
5      20  FORMAT (///,20X,'***: STEENZET ***',/)
6      WRITE (6,30)
7      30  FORMAT (1X,'FYSISCH NIET-LINEAIR, GEOMETRISCH EENDIMENSIONAAL',
      *//)
8      WRITE (6,35)
9      35  FORMAT (//,10X,'***: INVDERGROOTHEDEN ***',//)
10     WRITE (6,40) AL
11     40  FORMAT (1X,'HELLINGSHOEK= ',F5.2)
12     WRITE (6,50) D
13     50  FORMAT (1X,'DIKTE STEENZETTING= ',F4.2)
14     WRITE (6,60) N
15     60  FORMAT(1X,'AANTAL STENEN= ',I3)
16     WRITE (6,70) DX
17     70  FORMAT (1X,'AFSTAND TUSSEN TWEE SPLETEN= ',F5.3)
18     WRITE (6,80) HF
19     80  FORMAT (1X,'HOOGTE FREATISCHE LIJN BOVEN STILWATERNIVEAU= ',
      *F5.3)
20     WRITE (6,90) GH
21     90  FORMAT (1X,'GOLFHOOGTE "H" = ',F4.2)
22     WRITE (6,100) GL
23     100 FORMAT (1X,'GOLFLENGTE "L" = ',F6.2)
24     WRITE (6,110) S
25     110 FORMAT (1X,'SPLEETBREEDTE BEKLEDING= ',E8.3)
26     WRITE (6,120) EE
27     120 FORMAT (1X,'PORIENGETAL FILTER= ',F4.2)
28     WRITE (6,130) DN
29     130 FORMAT (1X,'MAATGEVENDE DIAMETER KORRELS= ',E8.3)
30     WRITE (6,140) BB
31     140 FORMAT (1X,'DIKTE FILTER= ',F4.2)
32     WRITE (6,150) IS
33     150 FORMAT (1X,'AANTAL KNOPEN TUSSEN TWEE SPLETEN= ',I2)
34     WRITE (6,160) BX
35     160 FORMAT (1X,'DEMPINGSCOEFFICIENT "BX" = ',F4.2)
36     WRITE (6,170) LL
37     170 FORMAT (1X,'STUURPARAMETER "LL" = ',I7)
38     WRITE (6,180) MI
39     180 FORMAT (1X,'AANTAL TOEGESTANE ITERATIES= ',I7)
40     WRITE (6,190) FF
41     190 FORMAT (1X,'NAGESTREEFDE RELATIEVE AFBREEKFOUT= ',E8.3)

      C*****VOORBEREIDINGEN*****
42     H = DX/(IS+1)
43     C2 = DN/1E-6
44     C1 = 19.6*DN*EE*5
45     AK = S*(-6.16*DX+9.38)
46     L = 0

      C*****STROMINGSTOESTAND IN SPLETFN*****
47     IF (S.LT.6E-3) THEN
48         ANN = 1.0-SQRT((3.6E-5-(0.006-S)**2)/1.8E-4)
49     ELSE
50         ANN = 0.552786
51     END IF
52     AL = AL*ATAN(1.0)/45.0
53     W = 1.5
54     TA = TAN(AL)

```

```
C*****HYDRAULISCHE RANDVOORWAARDEN*****
55 IF (TA.LE.0.1428571429) THEN
56   FA = 0.29
57   BE = 3.0
58 END IF
59 IF ((TA.GT.0.1428571429).AND.(TA.LE.0.2)) THEN
60   FA = 0.525*TA+0.215
61   BE = 3.0
62 END IF
63 IF ((TA.GT.0.2).AND.(TA.LE.0.3333333333)) THEN
64   FA = -0.825*TA+0.485
65   BE = -7.5*TA+4.5
66 END IF
67 IF (TA.GT.0.3333333333) THEN
68   FA = 0.21
69   BE = 2.0
70 END IF
71 N = N*(IS+1)
72 SK = TA/SQRT(GH/GL)
73 BEE = 2.0/BE
74 DB = GH*FA*(TA**(-BEE))*(SK**BEE)
75 YB = DB*LOG(25.265*SQRT(1.0/SK))
76 YB = YB/LOG(10.0)
77 GW = 9.8E3
78 HA = DB+HF

C*****UITVOER HYDRAULISCHE RANDVOORWAARDEN*****
79 WRITE (6,195)
80 195 FORMAT (///,10X,'*** UITVOER ***',/)
81 WRITE (6,200)
82 200 FORMAT (1X,'BELASTINGGEVAL: ** BREKENDE GOLF **',/)
83 WRITE (6,210) YB
84 210 FORMAT (1X,'BREKERHOOGTE= ',F6.4)
85 WRITE (6,220) DB
86 220 FORMAT (1X,'BREKERPUUNT = ',F6.4)
87 WRITE (6,230) SK
88 230 FORMAT (1X,'KSI = ',F6.4,/)
89 HSI = N*H*SIN(AL)
90 IF (HA.GT.HSI) THEN
91   WRITE (6,240)
92 240 FORMAT (///,1X,'*** GOLFBREKING BUITEN TALUD ***')
93 STOP
94 END IF

C*****BEPALING LIGGING STENEN*****
95 DO 250 I=N,0,-1
96   Z(I,1) = HA+(I-N)*H*SIN(AL)
97   IF (Z(I,1).GE.0.0) THEN
98     IPP = I
99     P(I) = 0.0
100   ELSE
101     P(I) = (ABS(Z(I,1))+YB)*GW
102   END IF
103 250 CONTINUE

C*****INITIALISATIE*****
104 DO 260 I=0,N
105   Z(I,0) = Z(I,1)-D*COS(AL)
106   PO(I) = HA
107   PN(I) = HA
108 260 CONTINUE
109 RE = 4.0
110 UF = RE/C2
111 CF = 24.0/RE
112 AAK = C1/CF/UF
113 DO 270 I=0,N
114   K(I) = AAK
115 270 CONTINUE
116 DO 280 I=0,N-1,IS+1
117   AP = PN(I)-(Z(I,1)+P(I))/GW
118   A(I) = AK*DX*(ABS(AP)/D)**(ANN-1)
119 280 CONTINUE

C*****GAUSS-SEIDEL*****
120 360 FO = 0
C*****CONTROLLEREN PLAATS IN FILTER*****
121 DO 290 I=0,N-1
122   AA = A(I)*H/K(I)/D/BB
123   TP = I/(IS+1.)
124   ITP = INT(TP)
125   IF (I.EQ.0) GO TO 320
126   IF ((I.LT.IPP).AND.(ITP.EQ.TP)) GO TO 310
127   IF ((I.GE.IPP).AND.(ITP.EQ.TP)) GO TO 305
128   IF (ITP.NE.TP) GO TO 330
```

```

C*****BEREKENINGEN*****
129 305 ZZ = Z(I,1)
130 300 R = -AA*ZZ-(PN(I-1)-(2+AA)*PO(I)+PO(I+1))
131 PN(I) = PO(I)-W/(2+AA)*R
132 CALL FOUT (FO,PN,PO,I)
133 GO TO 290
134 310 ZZ = Z(I,1)+P(I)/GW
135 GO TO 300
136 320 ZZ = Z(I,1)+P(I)/GW
137 R = -AA*ZZ-((-1-AA)*PO(I)+PO(I+1))
138 PN(I) = PO(I)-W/(1+AA)*R
139 CALL FOUT (FO,PN,PO,I)
140 GO TO 290
141 330 R = -(K(I+1)-K(I-1))/4*(PO(I+1)-PN(I-1))+K(I)*(PN(I-1)-2*PO(I)
* +PO(I+1))
142 PN(I) = PO(I)-W/(2*K(I))*R
143 CALL FOUT (FO,PN,PO,I)
144 290 CONTINUE

C*****BESTURING GAUSSSEIDEL PROCES*****
145 FLL = F*LL
146 IF (FO.LT.FLL) THEN
147 CALL DOORL (N,H,IS,Z,D,A,P,AAK,PN,C2,C1,XI,CF,K,AK,ANN,DX,GW
*,BX)
148 END IF
149 DO 340 I=0,N-1
150 PQ(I) = PN(I)
151 340 CONTINUE
152 IF (L.GT.MI) THEN
153 WRITE (6,350)
154 350 FORMAT (//,1X, '*** NIET AAN AFBREEKCRITERIUM VOLDAAN ***')
155 GO TO 355
156 END IF
157 L = L+1
158 IF (FO.GT.FF) GO TO 360

C*****UITVOER*****
159 355 WRITE (6,370) L
160 370 FORMAT (1X, 'AANTAL ITERATIFS= ',I5)
161 WRITE (6,380) FO
162 380 FORMAT (1X, 'GROOTTE RELATIEVE FOUT= ',E9.4)
163 WRITE (6,390)
164 390 FORMAT (//,1X, 'STIJGHOOGTES (M)',/,1X,
*"KNOOP NR.": "STIJGHOOGTE" ETC.',/)
165 DO 410 I=0,N,8
166 WRITE (6,430) (J,PN(J),J=I,I+7)
167 410 CONTINUE
168 430 FORMAT (1X,6(I3,':',E11.4,1X))
169 WRITE (6,440)
170 440 FORMAT (//,1X, 'WATERDRUKKEN (N/M2)',/,/,
*"KNOOP NR.": "WATERDRUK BOVENZIJDE/WATERDRUK ONDERZIJDE" ETC.',/)
171 DO 450 I=0,N,4
172 DO 460 J=I,I+3
173 DRO(J) = (PN(J)-Z(J,0))*GW
174 460 CONTINUE
175 WRITE (6,470) (J,P(J),DRO(J),J=I,I+3)
176 450 CONTINUE
177 470 FORMAT (1X,4(I3,':',E10.3,/,',E11.4,1X))
178 WRITE (6,480) ANN
179 480 FORMAT (//,1X, 'STROMINGSCOEFFICIENT "N" TUSSEN SPLETEN= ',
*E10.3,/)
180 WRITE (6,490)
181 490 FORMAT(/,1X, 'DOORLATENDHEIDSCOEFFICIENTEN SPLETEN TUSSEN BLOKKEN:'
*,/, "KNOOP NR.": "DOORLATENDHEIDSCOEFFICIENT" ETC.',/)
182 DO 500 I=0,N-1,8*(IS+1)
183 WRITE (6,430) (J,A(J),J=I,I+7*(IS+1),IS+1)
184 500 CONTINUE
185 WRITE (6,530)
186 530 FORMAT (//,1X, 'DOORLATENDHEIDSCOEFFICIENTEN FILTER:',/,/,
*"KNOOP NR.": "DOORLATENDHEIDSCOEFFICIENT" ETC.',/)
187 DO 540 I=0,N,8
188 WRITE (6,430) (J,K(J),J=I,I+7)
189 540 CONTINUE
190 WRITE (6,544)
191 544 FORMAT(/,1X, 'VERHANGEN IN X-RICHTING IN HET FILTER',/)
192 DO 542 I=0,N,8
193 WRITE (6,430) (J,XI(J),J=I,I+7)
194 542 CONTINUE

```

```

195      WRITE (6,560)
196 560   FORMAT (//,1X,"DEBIET DOOR SPLETEN (M2/S)",/)
197      DO 570 I=0,N-1,8*(IS+1)
198          DO 580 J=I,I+7*(IS+1),IS+1
199              ZZ = Z(J,1)+P(J)/GW
200              Q(J) = A(J)/D*(PN(J)-ZZ)
201 580   CONTINUE
202       WRITE (6,430)( J,Q(J),J=I,I+7*(IS+1),IS+1)
203 570   CONTINUE
204       WRITE (6,575)
205 575   FORMAT (//,1X,"***** EINDE BEREKENING *****")
206       STOP
207       END

```

```

C*****FOUT IN STIJGHOOGTES*****
1      SUBROUTINE FOUT (FO,PN,PO,I)
2      REAL PO(0:300),PN(0:300)
3      ER = ABS((PN(I)-PO(I))/PN(I))
4      IF (ER.GT.FO) THEN
5          FO = ER
6      END IF
7      RETURN
8      END

```

```

C*****BEPALING DOORLATENDHEIDSCOEFFICIENTEN*****
1      SUBROUTINE DOORL (H,H,IS,Z,D,A,P,AAK,PN,C2,C1,XI,CF,K,AK,ANN,DX
2          *,GW,BX)
3      REAL Z(0:300,0:1),A(0:300),K(0:300),XI(0:300),PN(0:300),P(0:300)
4      DO 600 I=0,N
5          IF (I.EQ.N) THEN
6              XI(N) = (PN(N)-PN(N-1))/H
7              GO TO 610
8          END IF
9          IF (I.EQ.0) THEN
10             XI(0) = 0.0
11             GOTO 610
12         END IF
13 610    XI(I) = (PN(I+1)-PN(I-1))/2/H
14        XXI = ABS(XI(I))
15        IF (XXI.LT.1E-10) THEN
16            XXI = 1E-10
17        END IF
18        UF = K(I)*XXI
19        RE = C2*UF
20        IF (RE.LE.4.0) THEN
21            CF = 576.0/(C2*C2*C1*XXI)
22        END IF
23        IF ((RE.GT.4.0).AND.(RE.LT.576.0)) THEN
24            CF = (20736.0/(C2*C2*C1*XXI))*0.3333333333
25        END IF
26        IF (RE.GE.576.0) THEN
27            CF = 0.5
28        END IF
29        IF (CF.LT.1E-10) THEN
30            CF = 1E-10
31        END IF
32        K(I) = (K(I)+BX*C1/CF/UF)/(BX+1)
33        IF (K(I).GT.AAK) THEN
34            K(I) = AAK
35        END IF
36 600   CONTINUE
37       DO 620 I=0,N-1,IS+1
38           TP = PN(I)-(Z(I,1)+P(I)/GW)
39           A(I) = (A(I)+BX*AK*DX*(ABS(TP)/D)**(ANN-1))/(BX+1)
40 620   CONTINUE
41       RETURN
42       END

```

*** STEENZET ****

FYSISCH NIET-LINEAIR, GEOMETRISCH EENDIMENSIONAAL

*** INVOERGRROOTHEDEN ***

HELLINGSHOEK= 14.00
DIKTE STEENZETTING= 0.30
AANTAL STENEN= 20
AFSTAND TUSSEN TWEE SPLETEN= 0.500
HOOGTE FREATISCHE LIJN BOVEN STILWATERNIVEAU= 0.000
GOLPHOOGTE "H" = 0.80
GOLFLENGTE "L" = 60.00
SPLEETBREEDTE BEKLEDING= .150E-02
PORIENGETAL FILTER= 0.40
MAATGEVENDE DIAMETER KORRELS= .700E-02
DIKTE FILTER= 0.60
AANTAL KNOEPEN TUSSEN TWEE SPLETEN= 4
DEMPINGSCOEFFICIENT "BX" = 0.10
STUURPARAMETER "LL" = 500
AANTAL TOEGESTANE ITERATIES= 2000
NAGESTREEFDE RELATIEVE AFBREEKFOUT= .100E-05

*** UITVOER ***

BELASTINGGEVAL: ** BREKENDE GOLF **

BREKERHOOGTE= 1.4253
BREKERPUNT = 1.1537
KSI = 2.1592

AANTAL ITERATIES= 1379
GROOTTE RELATIEVE FOUT= .9847E-06

STIJGHOOGTES (M)
"KNOOP NR.": "STIJGHOOGTE" ETC.

0:	0.1415E+01	1:	0.1415E+01	2:	0.1415E+01	3:	0.1414E+01	4:	0.1414E+01	5:	0.1414E+01	6:	0.1414E+01	7:	0.1413E+01
8:	0.1413E+01	9:	0.1412E+01	10:	0.1412E+01	11:	0.1411E+01	12:	0.1410E+01	13:	0.1409E+01	14:	0.1408E+01	15:	0.1407E+01
16:	0.1405E+01	17:	0.1404E+01	18:	0.1402E+01	19:	0.1400E+01	20:	0.1399E+01	21:	0.1396E+01	22:	0.1393E+01	23:	0.1391E+01
24:	0.1388E+01	25:	0.1385E+01	26:	0.1381E+01	27:	0.1376E+01	28:	0.1372E+01	29:	0.1368E+01	30:	0.1363E+01	31:	0.1356E+01
32:	0.1349E+01	33:	0.1342E+01	34:	0.1335E+01	35:	0.1328E+01	36:	0.1317E+01	37:	0.1306E+01	38:	0.1294E+01	39:	0.1283E+01
40:	0.1271E+01	41:	0.1253E+01	42:	0.1235E+01	43:	0.1217E+01	44:	0.1198E+01	45:	0.1179E+01	46:	0.1151E+01	47:	0.1121E+01
48:	0.1092E+01	49:	0.1062E+01	50:	0.1031E+01	51:	0.9845E+00	52:	0.9364E+00	53:	0.8882E+00	54:	0.8403E+00	55:	0.7952E+00
56:	0.7725E+00	57:	0.7515E+00	58:	0.7307E+00	59:	0.7100E+00	60:	0.6911E+00	61:	0.6847E+00	62:	0.6790E+00	63:	0.6733E+00
64:	0.6678E+00	65:	0.6634E+00	66:	0.6641E+00	67:	0.6647E+00	68:	0.6653E+00	69:	0.6659E+00	70:	0.6666E+00	71:	0.6719E+00
72:	0.6779E+00	73:	0.6840E+00	74:	0.6902E+00	75:	0.6967E+00	76:	0.7079E+00	77:	0.7196E+00	78:	0.7314E+00	79:	0.7433E+00
80:	0.7554E+00	81:	0.7713E+00	82:	0.7876E+00	83:	0.8039E+00	84:	0.8202E+00	85:	0.8368E+00	86:	0.8560E+00	87:	0.8754E+00
88:	0.8949E+00	89:	0.9144E+00	90:	0.9341E+00	91:	0.9554E+00	92:	0.9768E+00	93:	0.9983E+00	94:	0.1020E+01	95:	0.1041E+01
96:	0.1064E+01	97:	0.1086E+01	98:	0.1109E+01	99:	0.1131E+01	100:	0.1154E+01						

WATERDRUKKEN (N/M2)

KNOOP NR.": "WATERDRUK BOVENZIJDJE/WATERDRUK ONDERZIJDJE" ETC

0:	0.264E+05/	0.2912E+05	1:	0.261E+05/	0.2888E+05	2:	0.259E+05/	0.2864E+05	3:	0.257E+05/	0.2840E+05
4:	0.254E+05/	0.2817E+05	5:	0.252E+05/	0.2793E+05	6:	0.249E+05/	0.2769E+05	7:	0.247E+05/	0.2744E+05
8:	0.245E+05/	0.2720E+05	9:	0.242E+05/	0.2696E+05	10:	0.240E+05/	0.2672E+05	11:	0.238E+05/	0.2647E+05
12:	0.235E+05/	0.2622E+05	13:	0.233E+05/	0.2598E+05	14:	0.231E+05/	0.2573E+05	15:	0.228E+05/	0.2549E+05
16:	0.226E+05/	0.2523E+05	17:	0.223E+05/	0.2498E+05	18:	0.221E+05/	0.2473E+05	19:	0.219E+05/	0.2447E+05
20:	0.216E+05/	0.2422E+05	21:	0.214E+05/	0.2396E+05	22:	0.212E+05/	0.2369E+05	23:	0.209E+05/	0.2343E+05
24:	0.207E+05/	0.2317E+05	25:	0.204E+05/	0.2290E+05	26:	0.202E+05/	0.2262E+05	27:	0.200E+05/	0.2234E+05
28:	0.197E+05/	0.2206E+05	29:	0.195E+05/	0.2178E+05	30:	0.193E+05/	0.2150E+05	31:	0.190E+05/	0.2120E+05
32:	0.188E+05/	0.2089E+05	33:	0.185E+05/	0.2058E+05	34:	0.183E+05/	0.2028E+05	35:	0.181E+05/	0.1997E+05
36:	0.178E+05/	0.1963E+05	37:	0.176E+05/	0.1928E+05	38:	0.174E+05/	0.1893E+05	39:	0.171E+05/	0.1858E+05
40:	0.169E+05/	0.1823E+05	41:	0.166E+05/	0.1782E+05	42:	0.164E+05/	0.1740E+05	43:	0.162E+05/	0.1698E+05
44:	0.159E+05/	0.1657E+05	45:	0.157E+05/	0.1614E+05	46:	0.155E+05/	0.1563E+05	47:	0.152E+05/	0.1510E+05
48:	0.150E+05/	0.1457E+05	49:	0.148E+05/	0.1404E+05	50:	0.145E+05/	0.1350E+05	51:	0.143E+05/	0.1281E+05
52:	0.140E+05/	0.1210E+05	53:	0.000E+00/	0.1139E+05	54:	0.000E+00/	0.1069E+05	55:	0.000E+00/	0.1001E+05
56:	0.000E+00/	0.9548E+04	57:	0.000E+00/	0.9105E+04	58:	0.000E+00/	0.8664E+04	59:	0.000E+00/	0.8225E+04
60:	0.000E+00/	0.7802E+04	61:	0.000E+00/	0.7502E+04	62:	0.000E+00/	0.7209E+04	63:	0.000E+00/	0.6917E+04
64:	0.000E+00/	0.6626E+04	65:	0.000E+00/	0.6345E+04	66:	0.000E+00/	0.6115E+04	67:	0.000E+00/	0.5884E+04
68:	0.000E+00/	0.5652E+04	69:	0.000E+00/	0.5421E+04	70:	0.000E+00/	0.5191E+04	71:	0.000E+00/	0.5006E+04
72:	0.000E+00/	0.4828E+04	73:	0.000E+00/	0.4651E+04	74:	0.000E+00/	0.4474E+04	75:	0.000E+00/	0.4301E+04
76:	0.000E+00/	0.4173E+04	77:	0.000E+00/	0.4051E+04	78:	0.000E+00/	0.3930E+04	79:	0.000E+00/	0.3809E+04
80:	0.000E+00/	0.3691E+04	81:	0.000E+00/	0.3609E+04	82:	0.000E+00/	0.3532E+04	83:	0.000E+00/	0.3454E+04
84:	0.000E+00/	0.3378E+04	85:	0.000E+00/	0.3303E+04	86:	0.000E+00/	0.3254E+04	87:	0.000E+00/	0.3207E+04
88:	0.000E+00/	0.3161E+04	89:	0.000E+00/	0.3115E+04	90:	0.000E+00/	0.3071E+04	91:	0.000E+00/	0.3042E+04
92:	0.000E+00/	0.3015E+04	93:	0.000E+00/	0.2989E+04	94:	0.000E+00/	0.2962E+04	95:	0.000E+00/	0.2936E+04
96:	0.000E+00/	0.2919E+04	97:	0.000E+00/	0.2902E+04	98:	0.000E+00/	0.2886E+04	99:	0.000E+00/	0.2869E+04
100:	0.000E+00/	0.2853E+04	101:	0.000E+00/	0.0000E+00	102:	0.000E+00/	0.0000E+00	103:	0.000E+00/	0.0000E+00

STROMINGSKOEFFICIENT "N" TUSSEN SPLETEN= 0.704E+00

DOORLATENDHEIDSKOEFFICIENTEN SPLETEN TUSSEN BLOKKEN:

KNOOP NR.": "DOORLATENDHEIDSKOEFFICIENT" ETC.

0:	0.1292E-01	5:	0.1249E-01	10:	0.1177E-01	15:	0.1078E-01	20:	0.9666E-02	25:	0.8560E-02	30:	0.7526E-02	35:	0.6589E-02
40:	0.5752E-02	45:	0.5011E-02	50:	0.4357E-02	55:	0.3632E-02	60:	0.4050E-02	65:	0.4490E-02	70:	0.5056E-02	75:	0.5826E-02
80:	0.6849E-02	85:	0.8230E-02	90:	0.1020E-01	95:	0.1354E-01	100:	0.0000E+00	105:	0.0000E+00	110:	0.0000E+00	115:	0.0000E+00

DOORLATENDHEIDSKOEFFICIENTEN FILTER:

KNOOP NR.": "DOORLATENDHEIDSKOEFFICIENT" ETC.

0:	0.4098E+00	1:	0.3740E+00	2:	0.3710E+00	3:	0.3707E+00	4:	0.3649E+00	5:	0.3065E+00	6:	0.2720E+00	7:	0.2688E+00
8:	0.2683E+00	9:	0.2656E+00	10:	0.2376E+00	11:	0.2180E+00	12:	0.2161E+00	13:	0.2158E+00	14:	0.2139E+00	15:	0.1954E+00
16:	0.1816E+00	17:	0.1802E+00	18:	0.1800E+00	19:	0.1785E+00	20:	0.1644E+00	21:	0.1536E+00	22:	0.1526E+00	23:	0.1523E+00
24:	0.1512E+00	25:	0.1397E+00	26:	0.1308E+00	27:	0.1299E+00	28:	0.1298E+00	29:	0.1288E+00	30:	0.1191E+00	31:	0.1116E+00
32:	0.1109E+00	33:	0.1107E+00	34:	0.1099E+00	35:	0.1016E+00	36:	0.9527E-01	37:	0.9462E-01	38:	0.9449E-01	39:	0.9376E-01
40:	0.8669E-01	41:	0.8123E-01	42:	0.8068E-01	43:	0.8056E-01	44:	0.7993E-01	45:	0.7385E-01	46:	0.6917E-01	47:	0.6870E-01
48:	0.6860E-01	49:	0.6806E-01	50:	0.6293E-01	51:	0.5881E-01	52:	0.5842E-01	53:	0.5844E-01	54:	0.5909E-01	55:	0.6567E-01
56:	0.7602E-01	57:	0.7711E-01	58:	0.7734E-01	59:	0.7858E-01	60:	0.9115E-01	61:	0.1165E+00	62:	0.1192E+00	63:	0.1199E+00
64:	0.1244E+00	65:	0.1722E+00	66:	0.2455E+00	67:	0.2533E+00	68:	0.2532E+00	69:	0.2428E+00	70:	0.1470E+00	71:	0.1192E+00
72:	0.1165E+00	73:	0.1161E+00	74:	0.1149E+00	75:	0.1028E+00	76:	0.9427E-01	77:	0.9342E-01	78:	0.9329E-01	79:	0.9280E-01
80:	0.8813E-01	81:	0.8421E-01	82:	0.8382E-01	83:	0.8375E-01	84:	0.8352E-01	85:	0.8126E-01	86:	0.7920E-01	87:	0.7899E-01
88:	0.7896E-01	89:	0.7884E-01	90:	0.7768E-01	91:	0.7658E-01	92:	0.7647E-01	93:	0.7645E-01	94:	0.7640E-01	95:	0.7585E-01
96:	0.7532E-01	97:	0.7527E-01	98:	0.7526E-01	99:	0.7526E-01	100:	0.7526E-01	101:	0.0000E+00	102:	0.0000E+00	103:	0.0000E+00

VERHANGEN IN X-RICHTING IN HET FILTER

0: 0.0000E+00	1: -0.1836E-02	2: -0.1879E-02	3: -0.1884E-02	4: -0.1974E-02	5: -0.3333E-02	6: -0.4768E-02	7: -0.4940E-02
8: -0.4964E-02	9: -0.5121E-02	10: -0.7153E-02	11: -0.9265E-02	12: -0.9508E-02	13: -0.9551E-02	14: -0.9804E-02	15: -0.1287E-01
16: -0.1603E-01	17: -0.1639E-01	18: -0.1647E-01	19: -0.1686E-01	20: -0.2159E-01	21: -0.2646E-01	22: -0.2702E-01	23: -0.2714E-01
24: -0.2778E-01	25: -0.3520E-01	26: -0.4285E-01	27: -0.4374E-01	28: -0.4392E-01	29: -0.4494E-01	30: -0.5679E-01	31: -0.6897E-01
32: -0.7038E-01	33: -0.7068E-01	34: -0.7233E-01	35: -0.9138E-01	36: -0.1110E+00	37: -0.1132E+00	38: -0.1137E+00	39: -0.1164E+00
40: -0.1473E+00	41: -0.1790E+00	42: -0.1827E+00	43: -0.1835E+00	44: -0.1879E+00	45: -0.2382E+00	46: -0.2900E+00	47: -0.2960E+00
48: -0.2973E+00	49: -0.3044E+00	50: -0.3369E+00	51: -0.4717E+00	52: -0.4813E+00	53: -0.4807E+00	54: -0.4651E+00	55: -0.3387E+00
56: -0.2184E+00	57: -0.2093E+00	58: -0.2074E+00	59: -0.1977E+00	60: -0.1267E+00	61: -0.6072E-01	62: -0.5666E-01	63: -0.5565E-01
64: -0.4981E-01	65: -0.1878E-01	66: 0.6487E-02	67: 0.5904E-02	68: 0.5912E-02	69: 0.6699E-02	70: 0.3023E-01	71: 0.5664E-01
72: 0.6066E-01	73: 0.6127E-01	74: 0.6334E-01	75: 0.8845E-01	76: 0.1145E+00	77: 0.1177E+00	78: 0.1182E+00	79: 0.1200E+00
80: 0.1402E+00	81: 0.1607E+00	82: 0.1630E+00	83: 0.1633E+00	84: 0.1647E+00	85: 0.1788E+00	86: 0.1931E+00	87: 0.1947E+00
88: 0.1949E+00	89: 0.1958E+00	90: 0.2047E+00	91: 0.2137E+00	92: 0.2146E+00	93: 0.2147E+00	94: 0.2152E+00	95: 0.2198E+00
96: 0.2245E+00	97: 0.2250E+00	98: 0.2251E+00	99: 0.2251E+00	100: 0.2251E+00	101: 0.0000E+00	102: 0.0000E+00	103: 0.0000E+00

DEBIET DOOR SPLETEN (M2/S)

0: -0.4390E-03	5: -0.4672E-03	10: -0.5376E-03	15: -0.6634E-03	20: -0.8598E-03	25: -0.1148E-02	30: -0.1560E-02	35: -0.2141E-02
40: -0.2959E-02	45: -0.4109E-02	50: -0.5730E-02	55: 0.8839E-02	60: 0.6819E-02	65: 0.5334E-02	70: 0.4022E-02	75: 0.2870E-02
80: 0.1953E-02	85: 0.1261E-02	90: 0.7569E-03	95: 0.3855E-03	100: 0.0000E+00	105: 0.0000E+00	110: 0.0000E+00	115: 0.0000E+00

**** EINDE BEREKENING ****

Hoofdstuk 8 - Veiligheidsbeschouwingen

8.1. Inleiding

Het is bij belastingen en sterkteparameters in het algemeen niet mogelijk om van te voren aan te geven welke preciese waarden zij in een constructie zullen aannemen.

Bij de belastingen komt nog de moeilijkheid dat niet exact is aan te geven waar op het talud en hoe vaak de betreffende belasting optreedt. Belastingen en sterkte van de constructie blijken in de praktijk aan spreiding onderhevig te zijn, waardoor zij als stochastische grootheden opgevat moeten worden.

De tegenhanger van de stochastische grootheid is de deterministische grootheid.

Dit is een grootheid waarvan de waarde met zekerheid bekend is.

In de praktijk komen deterministische grootheden in de vorm van belastingen en sterkten niet voor.

Soms is de spreiding die optreedt evenwel zo gering dat het verantwoord is om de betreffende grootheid als een deterministische grootheid op te vatten.

Evenals belastingen en sterkten zijn ook afmetingen van constructies stochastisch.

De ervaring leert echter wel dat de meeste bezwijkgevallen niet worden veroorzaakt door gebreken in de constructie maar door menselijke fouten.

Hierbij te denken aan rekenfouten in de sterkteberekening of wat een nog groter gevaar vormt is het over het hoofd zien van een maatgevend bezwijkmechanisme.

Ook in de bouwfase komen veel bezwijkgevallen voor, terwijl uitvoeringsfouten in het algemeen een bron van mogelijk bezwijken van de constructie vormen.

Ook verwaarlozing van noodzakelijke inspectie en onderhoud kan ernstige gevolgen hebben.

8.2. Beschrijving probabilistische methoden

Zijn de kansverdelingen van belasting en sterkte berekend dan kan de bijdrage in de kans op bezwijken door een overschrijding van de sterkte bepaald worden, uitgedrukt in:

$$Z = R - S \quad (8.1.)$$

waarin:

Z = de betrouwbaarheidsfunctie

R = de sterkte van de constructie (resistance)

S = de belasting op de constructie (solicitation)

Teneinde een aan zijn doel beantwoordende constructie te verkrijgen moet Z groter dan nul zijn; er treedt dan geen bezwijken op.

Op hun beurt zullen de sterkte R en de belasting S in het algemeen weer functies van andere variabelen zijn.

De betrouwbaarheidsfunctie is daarmee te noteren als:

$$Z = R (X_1 \dots X_k) - S (X_{k+1} \dots X_n) \quad (8.2.)$$

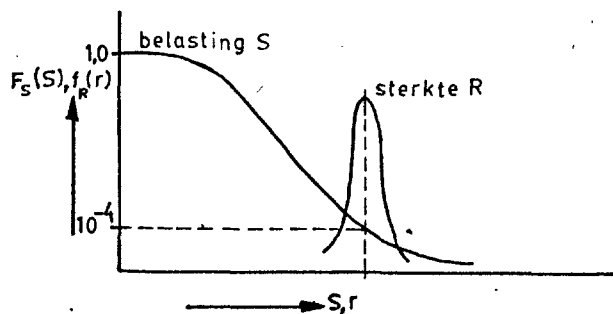
Het is gebruikelijk om de variabelen $X_1 \dots X_n$ uit de betrouwbaarheidsfunctie aan te duiden met de term "basisvariabelen".

Opgemerkt wordt dat de betrouwbaarheidsfunctie Z niet in enge zin als een formule opgevat hoeft te worden; Z mag ook uit een complex rekenmodel voortkomen, zoals een computerprogramma.

Bij dijkbekledingen is niet op voorhand bekend welke de maatgevende toestand is, dat wil zeggen waterstand, golfhoogte, golfsteilheid enzovoort. Wordt naar de bezwikkans van de bekleding gekeken dan zijn meestal niet de bij de meest extreme waterstand behorende golven (superstorm) maatgevend, maar golven bij een lagere waterstand. De reden hiervoor is dat ondanks de minder hevige golfaanval op dit lagere niveau de kans van voorkomen van zo'n storm groter is dan op een hoog niveau.

Dit aspect komt alleen goed naar voren met behulp van een probabilistische berekening, waarbij belasting en sterkte als een onlosmakelijk geheel worden beschouwd.

Bij het ontwerpen van dijken is door de Deltacommissie ook een stochastisch element ingebracht, maar is uit praktische overwegingen teruggekeerd tot het aangeven van slechts de overschrijdingskans van de belasting, zie figuur 8.1.

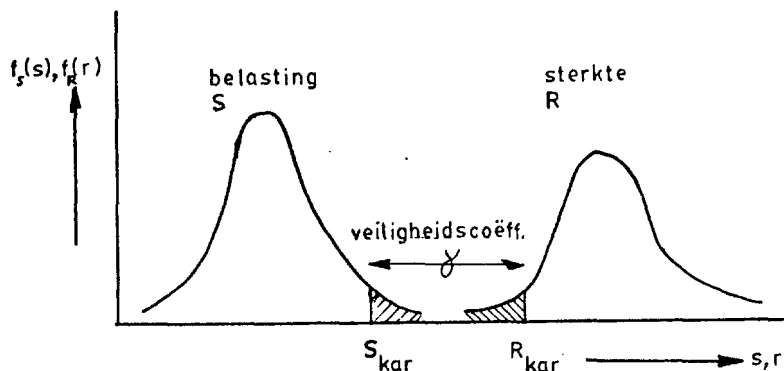


figuur 8.1.: een Nederlands dijkontwerp

Figuur 8.2. geeft schematisch de aanpak volgens de huidige betonvoorschriften.

De kern van de probabilistische veiligheidsbeschouwing wordt gevormd door de zogenoemde probabilistische berekening. Globaal gesproken wordt daarmee bedoeld de bepaling van de bezwijkkans uitgaande van onzekerheden in de optredende belastingen en in de sterkte van de constructie.

Een probabilistische berekening waarbij die onzekerheden op zuiver formele wijze worden verwerkt, leidt al gauw tot gecompliceerde of onoplosbare wiskundige formuleringen voor de kans op bezwijken. Daarom zijn in de loop der tijd een aantal vereenvoudigingen ingevoerd, die betrekking hebben op de wijze waarop onzekerheden worden verwerkt.



figuur 8.2.: de dimensionering van een constructie volgens de VB '74 (niveau I)

Ter ordening van de verschillende mogelijke procedures wordt een vier-tal niveaus van de berekening ingevoerd, die variëren van volledig deterministisch tot volledig probabilistisch.

Deze niveaus zijn:

niveau 0: een deterministische berekening. Voor de belasting en de sterkte worden bepaalde vaste waarden genomen en het rekenmodel wordt als vaststaand beschouwd. Door middel van één algehele veiligheidscoëfficiënt worden alle onzekerheden in rekening gebracht;

niveau I: een semi-probabilistische berekening. Voor de belasting en de sterkte wordt uitgegaan van karakteristieke waarden. Door middel van partiële veiligheidscoëfficiënten - dat wil zeggen coëfficiënten die betrokken zijn op afzonderlijke grootheden - worden de resterende onzekerheden in rekening gebracht;

niveau II: een probabilistische berekening waarin welomschreven vereenvoudigingen zijn aangebracht in de verwerking van de stochastische grootheden, hiervoor bestaan verschillende methoden;

niveau III: een volledig probabilistische berekening.

De berekening is geheel gebaseerd op de leer der stochastiek.

In wezen zijn de berekeningen op niveau 0 en I niet probabilistisch, omdat het resultaat van de berekening geen bezwijkkans is.

De waarden van de veiligheidscoëfficiënten kunnen voor standaardproblemen evenwel worden afgeleid met een berekening op niveau II of III.

Impliciet kan daarmee een berekening op niveau 0 of I betrekking hebben op een bepaalde bezwijkkans.

De beschouwingen zullen hier verder beperkt worden tot probabilistische berekeningen op niveau II.

De vereenvoudigingen die bij de berekeningen op niveau II worden doorgevoerd, zijn allereerst erop gericht om een gecompliceerde betrouwbaarheidsfunctie terug te brengen tot een lineaire functie.

Vervolgens wordt de verdeling van de betrouwbaarheidsfunctie benaderd door een vervangende normale verdeling, waarvan het gemiddelde en de standaardafwijking uit de overeenkomstige parameters van de basisvariabelen worden afgeleid.

Het aanbrengen van de vereenvoudigingen in de betrouwbaarheidsfunctie kan op verschillende wijzen, in de praktijk worden hoofdzakelijk twee methoden toegepast:

- a. de "mean value" benadering
- b. de "advanced" benadering.

ad a

Bij deze methode wordt de betrouwbaarheidsfunctie Z, voor het gemiddelde van de diverse basisvariabelen, in een Taylorreeks ontwikkeld die na de lineaire termen wordt afgebroken.

$$Z \approx Z(\mu(X_1), \mu(X_2) \dots \mu(X_n)) + \sum_{i=1}^n (X_i - \mu(X_i)) \frac{\delta Z}{\delta X_i} \quad (8.3.)$$

waarin:

Z = de betrouwbaarheidsfunctie

$\mu(X_i)$ = de gemiddelde van basisvariabele i.

Het lineariseren in het punt $\mu(X_i)$ houdt in het algemeen in dat wordt gelineariseerd in een punt dat niet op de bezwijkgrens $Z = 0$ ligt. Verder blijkt de methode niet ongevoelig voor de wijze waarop de betrouwbaarheidsfunctie Z geformuleerd is.

Daar tegenover staat evenwel dat de "mean value" berekening betrekkelijk eenvoudig is en in veel gevallen zelfs nog geheel met de hand kan worden uitgevoerd.

Er zijn ingewikkelde iteratieve berekeningen nodig, zoals bij de hierna volgende "advanced" methode om een beter ontwerp punt te vinden.

Na het lineariseren van de betrouwbaarheidsfunctie blijft nog over om de verdelingen van eventueel niet-normaal verdeelde basisvariabelen te vervangen door normale verdelingen.

Bij de "mean value" benadering wordt dit gedaan door aan niet-normaal verdeelde basisvariabelen een normale verdeling toe te kennen met het gemiddelde en de standaardafwijking van de oorspronkelijke verdeling. Door het lineariseren en het vervangen van verdelingen is bereikt, dat:

- Z normaal is verdeeld
- $\mu(Z) = Z(\mu(X_i))$ voor $i = 1$ tot n (8.4.)
- $\sigma(Z) = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\delta Z}{\delta X_i} \right)^2 \sigma^2(X_i) \right]^{1/2}$

De bezwijkkans, $P(Z < 0)$, volgt nu uit de tabel van de normale verdeling, met behulp van $\beta = \frac{\mu(Z)}{\sigma(Z)}$.

ad b

Teneinde aan de genoemde bezwaren tegen de "mean value" benadering tegemoet te komen, zijn verbeterde betrouwbaarheidsanalyses op niveau II uitgewerkt.

Bij de "advanced" benadering betreft de verbetering de keuze van het ontwerp punt.

Het lineariseren vindt niet meer plaats in het punt $\mu(X_i)$ maar in een punt op de bezwijkgrens, er geldt dus $Z(X_i^X) = 0$.

Op de bezwijkgrens wordt het ontwerp punt verder zodanig gekozen dat de waarschijnlijkheid van optreden van die waarde van Z zo groot mogelijk is. Bij van de normale verdeling afwijkende basisvariabelen wordt er voor gezorgd dat de vervangende normale verdeling dezelfde kansdichtheid en overschrijdingskans bezit.

Het definitieve ontwerp punt wordt op een iteratieve wijze gevonden. Een gevolg van het iteratieproces is dat de berekening in het algemeen niet meer met de hand kan worden uitgevoerd.

Met deze globale beschrijving van de methoden wordt hier volstaan, voor meer achtergronden wordt naar de literatuur verwezen, bijvoorbeeld lit. 6 en 7.

Een computerlisting voor een niveau II berekening treft u in appendix 8.1. aan, terwijl in appendix 8.2 een rekenvoorbeeld gedeeltelijk met de hand is uitgewerkt.

8.3. Hydraulische randvoorwaarden

8.3.1. De hoogwaterstand

Volgens Wemelsfelder, zie lit. 1, is voor de verdeling van de hoogwaterstanden een Gumbelverdeling aan te houden:

$$P(\underline{h} > h) = 1 - e^{-e^{-\left(\frac{h - \alpha}{\beta}\right)}} \quad (8.5.)$$

waarin:

h = hoogte waterstand ten opzichte van NAP

α en β zijn constanten te bepalen uit overschrijdingslijnen van Wemelsfelder.

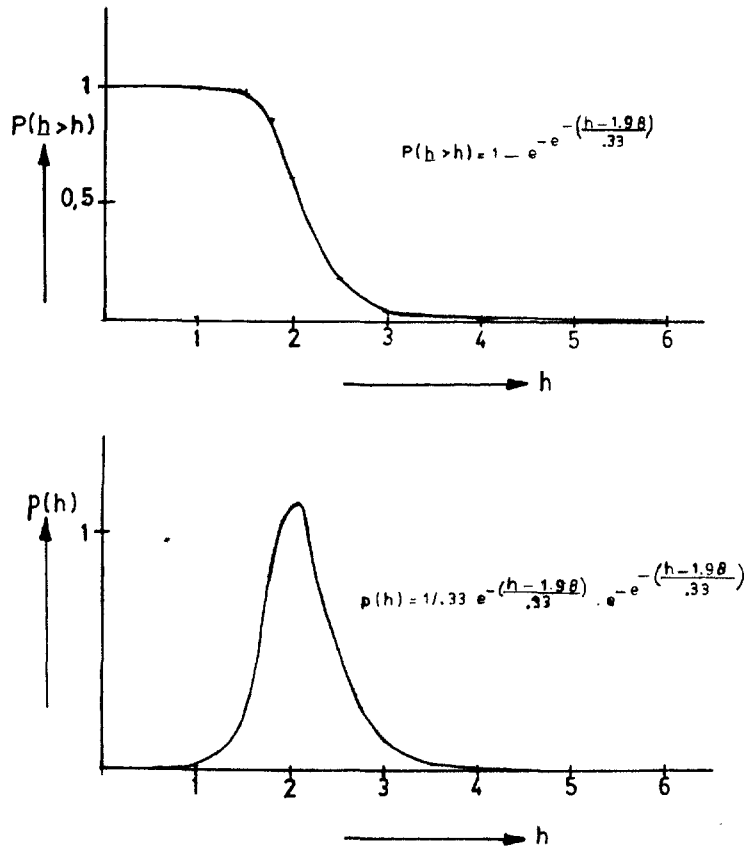
Formule (8.5.) is voor $\alpha = 1,98$ en $\beta = 0,33$ (Hoek van Holland) in figuur 8.3. afgebeeld, evenals de kansdichtheidsfunctie.

8.3.2. De golfhoogte bij een zekere waterstand

De golfhoogten, die op de 20 m dieptelijn optreden tijdens de stormvloed zijn gebaseerd op de benadering volgens Bruinsma, zie lit. 2. Het hierbij toegepaste simulatiemodel berust op het feit dat zowel de windopzet als de golfvelden voor de Nederlandse kust worden veroorzaakt door hetzelfde windveld boven de Noordzee.

De berekening van de windopzet geschiedt met het model van Weenink (lit. 8) en de golfhoogten worden met een van Bretschneider afkomstige relatie bepaald.

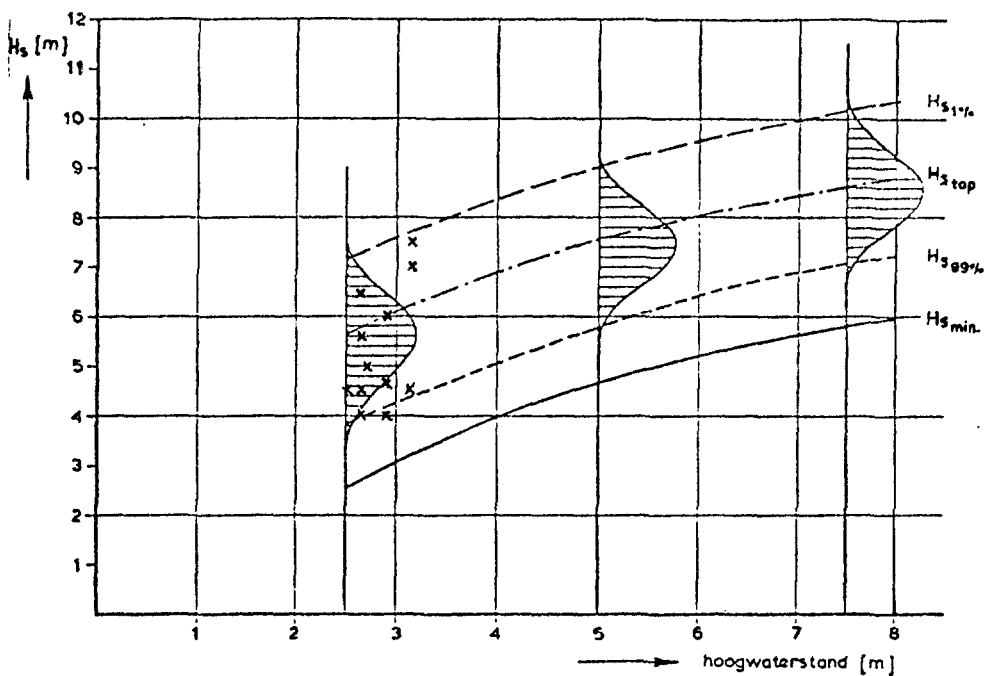
Voorts wordt verondersteld dat de gedurende een storm optredende windsnelheden behorende bij een gegeven waterstand Weibull-verdeeld zijn en dat de parameters van deze verdeling te koppelen zijn aan de opgetreden hoogwaterstand.



figuur 8.3.: kansverdelingsfunctie (I) en kansdichtheidsfunctie (II) van de hoogwaterstanden

Deze koppeling maakt het mogelijk de voorwaardelijke kansverdeling van significante golfhoogten bij een gegeven hoogwaterstand te bepalen. Voor een uitgebreidere beschrijving van de gebruikte technieken wordt naar lit. 2 en 5 verwezen.

Ter illustratie wordt het verband van de golfhoogte met de waterstand, ontleend aan lit. 2, voor Hoek van Holland, in figuur 8.4. gegeven.



x = waarnemingen LEG, MA Y, HA I.

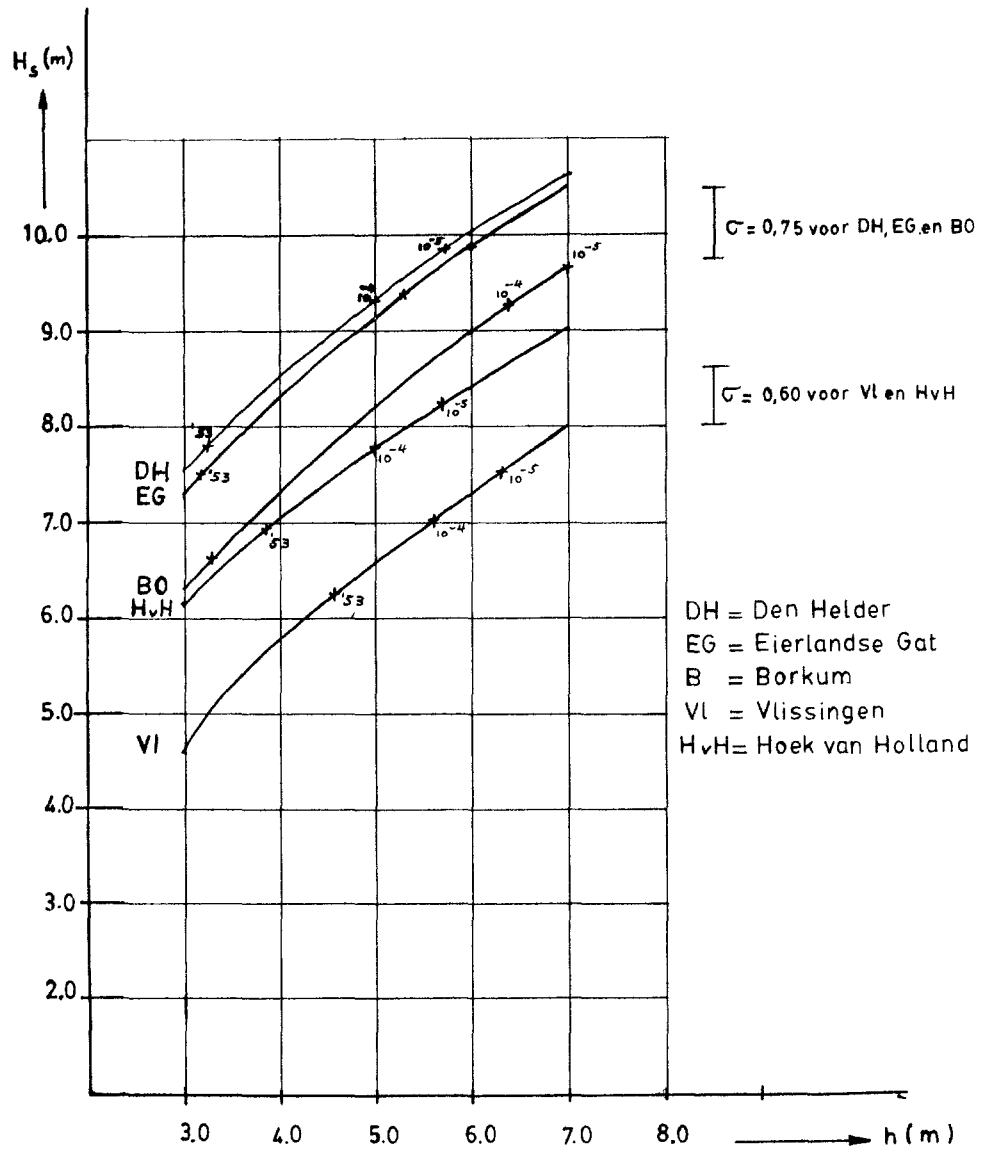
figuur 8.4.: significante golfhoogte versus de waterstand voor Hoek van Holland op de - 20 N A P lijn

De simultane kansdichtheid van hoogwaterstand en significante golfhoogte wordt verkregen door de hoogwaterstandsdichtheidsfunctie te vermenigvuldigen met de voorwaardelijke kansdichtheid van H_s gegeven de hoogwaterstand h .

Deze voorwaardelijke kansdichtheid H_s kan door een Weibull- of normale verdeling worden benadering.

Als uitbreiding op het werk van Bruinsma (lit. 2) zijn door Van Aalst (lit. 5) ook voor andere plaatsen langs de kust golfhoogte-waterstandsrelaties bepaald, zie figuur 8.5.

De aanpak is iets afwijkend van de door Bruinsma gevolgde werkwijze.



figuur 8.5.: significante golfhoogte versus de waterstand voor diverse plaatsen langs de Nederlandse kust

In figuur 8.5. is de voorwaardelijke kansverdeling van de golfhoogte normaal verdeeld verondersteld.

De getallen 10^{-4} en 10^{-5} hebben betrekking op de overschrijdingskans van h , zie formule 8.5.

"'53" geeft de hoogwaterstand voor de stormvloedstand van 1953.

De resultaten volgens figuur 8.4. en 8.5. kunnen voor waarden groter dan het grenspeil, dat is het peil dat gemiddeld éénmaal per twee jaar wordt overschreden, worden benaderd door een polynoom.

Als voorbeeld:

$$\mu (H_s) = \gamma_1 h^2 + \gamma_2 h + \gamma_3 \text{ voor } h > \text{grenspeil} \quad (8.6.)$$

Zo wordt met behulp van figuur 8.4. voor Hoek van Holland gevonden:

$$\mu (H_s) = - 0,06 h^2 + 1,22 h + 2,82 \quad (8.7.)$$

Verder wordt uitgegaan van een normale verdeling:

$$\sigma (H_s) = 0,60 \quad (8.8.)$$

Voor $h < \text{grenspeil}$ moet een uit waarnemingen bekende verdeling van de golfhoogte als functie van de waterstand worden aangehouden (extreme waarden).

8.3.3. De golfsteilheid

Uit diverse golfgroeigrafieken blijkt de golfsteilheid bij ontwikkelde zeegang een vrijwel constante waarde te bezitten.

Bij jonge zeegang is de golfsteilheid wat groter.

Door Vrijling (lit. 2) wordt voor de golfsteilheid op diep water

(H_s/L_o) een normale verdeling aangehouden:

$$\mu (H_s/L_o) = 0,0375 \quad (8.9.)$$

$$\sigma (H_s/L_o) = 0,006 \quad (8.10.)$$

8.3.4. Golfbreking

Treedt bij nadering van de kust golfbreking op dan wordt de golfhoogte bij benadering gereduceerd tot:

$$H_{s_{\max}} = 0,5 (h + d) \quad (8.11.)$$

waarin:

$$\begin{aligned} H_{s_{\max}} &= \text{maximum significante golfhoogte} \\ h &= \text{hoogwaterstand ten opzichte van NAP} \\ d &= \text{waterdiepte ten opzichte van NAP} \end{aligned}$$

De golfperiode T_p wijzigt niet.

De randvoorwaarde voor de dijk wordt dan gegeven door:

$$H_{s_{\max}} \text{ en } \frac{g T_p^2}{2\pi} = L_o \quad (8.12.)$$

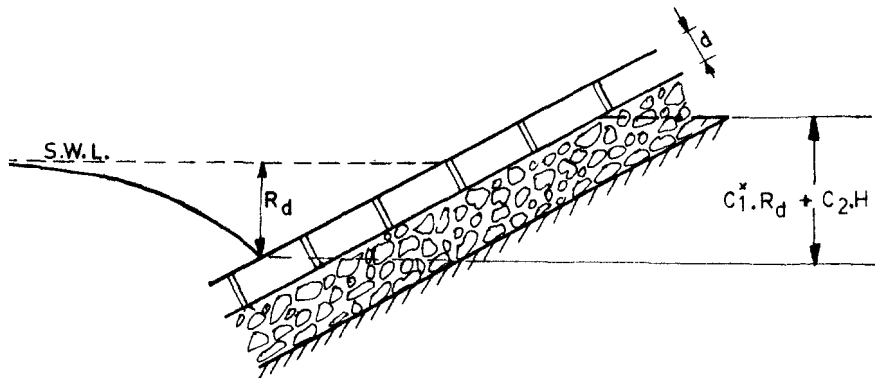
De golfsteilheid wordt dus bij gelijkblijvende golflengte en afnemende golfhoogte kleiner.

8.4. De bekleding

Voor het berekenen van de sterkte van de bekleding wordt uitgegaan van een sterk geschematiseerd rekenmodel. Wanneer te zijner tijd een beter rekenmodel ter beschikking staat, kan dat het hier gegeven model vervangen. De aanpak blijft in hoofdlijnen hetzelfde.

De hierin opgenomen constanten worden bepaald aan de hand van de in lit. 9 aangetroffen proefresultaten.

Omdat de belasting (waaronder het verschijnsel golfklap) en sterkte van de bekleding nog niet gescheiden kunnen worden moeten deze tezamen in de beschouwingen worden betrokken.



Figuur 8.6.: vereenvoudigd rekenmodel

De overdruk ter plaatse van "run-down" is:

$$p = \rho_w g (C_1 R_d + C_2 H) \quad (8.13.)$$

Uit onderzoek (lit. 4) blijkt:

$$R_d \approx 0,3 \xi H \quad (8.14.)$$

waaruit volgt:

$$p = \rho_w g H (C_1 \xi + C_2) \quad (8.15.)$$

Het eigen gewicht van een blok onder water is:

$$(\rho_b - \rho_w) g d \cos \alpha \quad (8.16.)$$

Stabiliteitsverlies treedt op indien:

$$\rho_w g H (C_1 \xi + C_2) \geq (\rho_b - \rho_w) g d \cos \alpha \quad (8.17.)$$

(S) \qquad \qquad (R)

Verder uitgewerkt levert dit:

$$\frac{H}{\Delta d} = \frac{\cos \alpha}{(C_1 \xi + C_2)} \quad (8.18.)$$

De variabelen hebben de volgende betekenis:

- H = golfhoogte
- R_d = run-down punt
- p = druk onder de blokken in run-down punt
- g = versnelling zwaartekracht
- α = taludhelling
- d = dikte bekleding
- ρ_b = soortelijke massa bekleding
- ρ_w = soortelijke massa water
- Δ = (ρ_b - ρ_w)/ρ_w
- ξ = tg α/√H/L_o

Als bezwijkcriterium is hier dus het oplichten van een enkel blok gekozen, er is verder geen rekening gehouden met veranderingen in de sterkte in de loop der tijd.

Verder wordt gesteld dat voor de golfhoogte H ook de significante golfhoogte H_s gelezen mag worden. Opgemerkt wordt dat bij de rekenvoorbeelden soms voorbij het gebied van de empirische waarnemingen wordt gerekend, waardoor de resultaten in die gebieden met enige voorzichtigheid geïnterpreteerd moeten worden.

De constanten C₁ en C₂ moeten worden bepaald aan de hand van voorhanden zijnd empirisch materiaal (lit. 9).

Zo kan bijvoorbeeld met het in figuur 8.7., voor losliggende blokken op een doorlatende onderlaag, gegeven verband tussen ξ en H_s/Δd door middel van regressieanalyse de constanten C₁ en C₂ worden bepaald.

Voor de in figuur 8.7. gegeven waarden wordt gevonden:

$$C_1 = 0,1196 \text{ en } C_2 = 0,1194.$$

Eén waarneming, Kostense 1980-2, is vanwege het afwijkende beeld wegge-
 laten. De correlatie-coëfficiënt bedraagt nu 0,96.

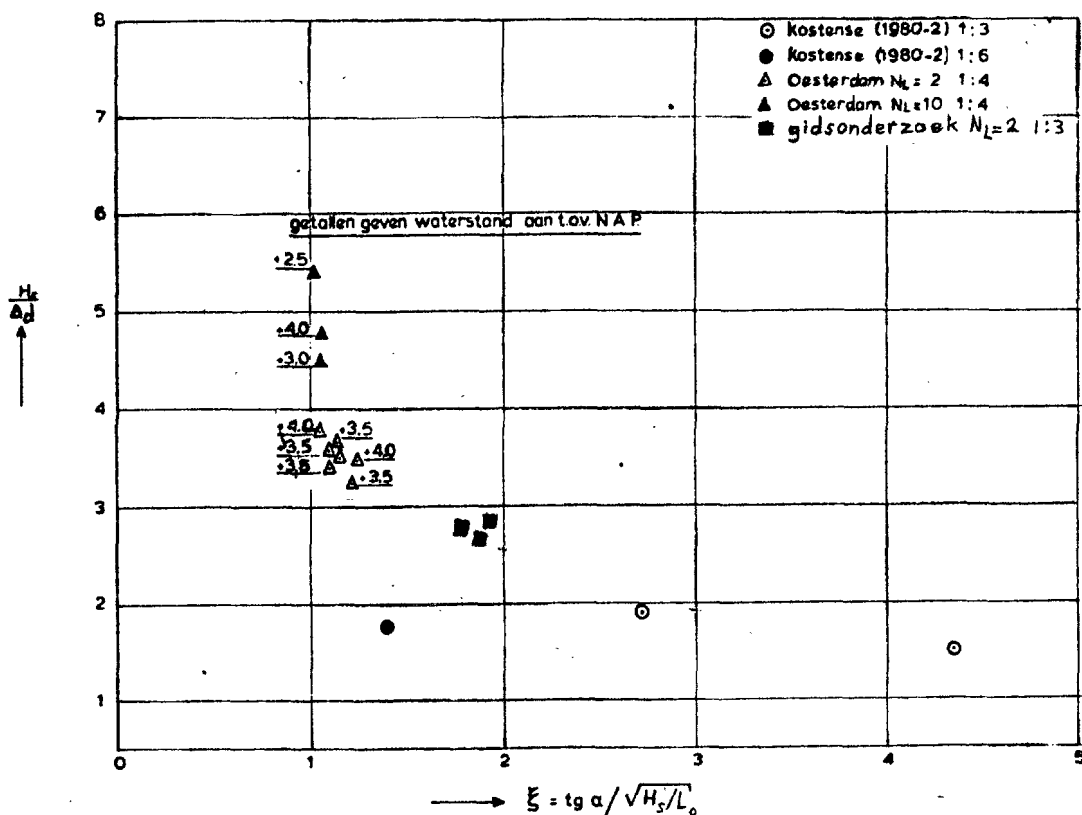
Teneinde het stochastische karakter naar voren te laten komen wordt aan
 constante C_1 een normale verdeling toegekend:

$$\mu (C_1) = 0,1196$$

$$\sigma (C_1) = 0,025$$

Veelal zullen bij wat zwaardere hydraulische randvoorwaarden de in
 figuur 8.7. gegeven waarden voor losliggende blokken niet voldoen.
 Bekend is dat geklemde zettingen een aanzienlijk hogere stabiliteit
 bezitten.

Er is echter niet voldoende empirisch materiaal voorhanden om voor dit
 type bekleding functionele verbanden tussen $\frac{H}{\Delta d}$ en ξ af te leiden.



Figuur 8.7.: losliggende blokken op doorlatende ondergrond

Teneinde toch met deze sterkere constructie te kunnen rekenen, wordt hier aangenomen, dat het evenwicht niet alleen aan het eigen gewicht van slechts één element ontleend behoeft te worden, formule 8.17. krijgt dan de volgende vorm:

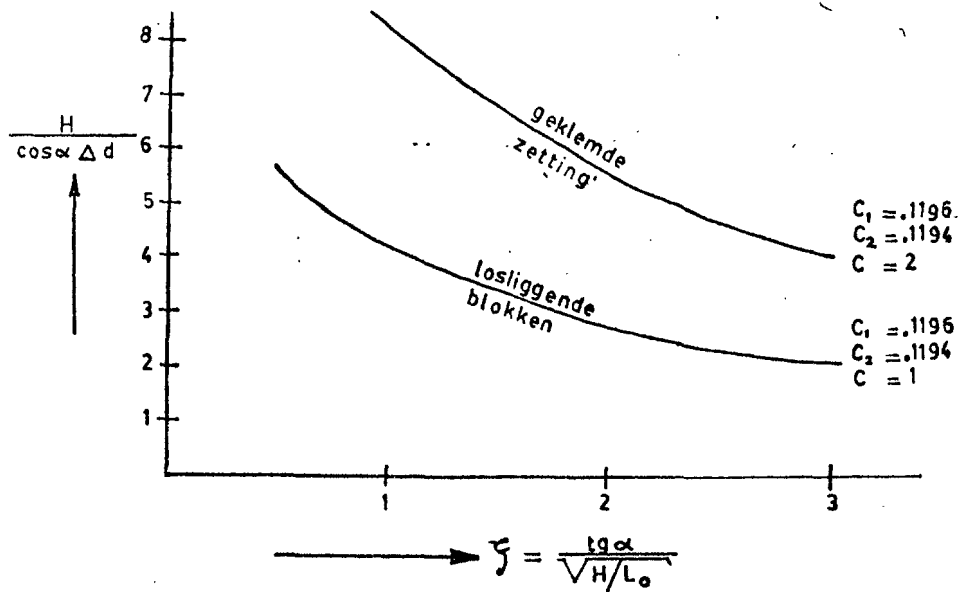
$$\rho_w g H (C_1 \xi + C_2) \geq C (\rho_b - \rho_w) g d \cos \alpha \quad (8.19.)$$

waarin C het aantal blokken is.

De betrouwbaarheidsfunctie Z krijgt nu de volgende gedaante:

$$Z = C (\rho_b - \rho_w) g d \cos \alpha - \rho_w g H (C_1 \xi + C_2) \quad (8.20.)$$

Het hier aangenomen gedrag van een geklemde zetting ten opzichte van een zetting opgebouwd uit losliggende blokken is in figuur 8.8. geïllustreerd.



figuur 8.8.: stabiliteit blokken

8.5. Rekenvoorbeelden

Met behulp van de hiervoor behandelde rekentechnieken en uitgangspunten is het nu mogelijk de kans van bezwijken van een gezette bekleding bij sterk geschematiseerde hydraulische randvoorwaarden te bepalen.

De golfaanval vindt plaats loodrecht op de dijkas, via een correctiecoëfficiënt voor de golfhoogte kan een van diep water afwijkend golfklimaat worden gesimuleerd.

Via het golfbreekcriterium is het mogelijk een ondiepte voor de dijk te simuleren.

De hier gepresenteerde rekenvoorbeelden hebben tot doel de mogelijkheden van een probabilistische aanpak te illustreren. Wegens de aangebrachte schematisaties kunnen uit de verkregen resultaten niet meer dan kwalitatieve conclusies worden getrokken.

Rekenvoorbeeld 1

De dikte van de bekleding en daarmee de sterkte wordt constant verondersteld, de dikte is dus geen functie van de plaats op het talud (het computerprogramma laat dit in principe wel toe).

De waarden van de diverse basisvariabelen zijn in tabel 1 samengevat. Daarna is in de computeruitvoer de resultaten van de niveau II berekening gegeven.

In de eerste kolom zijn de namen van de stochasten afgedrukt.

De tweede kolom bevat de actuele waarde van de stochast.

De derde kolom geeft de afgeleide van de betrouwbaarheidsfunctie Z in het punt X (I).

De standaardafwijking van de stochast is in kolom vier gegeven.

Kolom vijf geeft het percentage dat de betreffende stochast bijdraagt in de totale variantie van de betrouwbaarheidsfunctie.

Bij de "advanced" benadering zijn in de zesde kolom de partiële veiligheidscoëfficiënten gebaseerd op de gemiddelde waarden gegeven:

$$\gamma_i = \frac{x_i^x}{\mu(x_i)}$$

In de zevende kolom zijn de partiële veiligheidscoëfficiënten gegeven gebaseerd op de karakteristieke waarden:

$$Y_i = \frac{X_i^x}{\mu(X_i) \pm 1,64 \sigma(X_i)}$$

stochast	type verdeling	gemiddelde	standaard-afwijking
hoogwater (HHW)	Gumbel formule 8.5.	-	-
golfsteilheid (H/L)	Normaal	0,0375	0,006
sterkte coëfficiënt (C ₁)	Normaal	0,1196	0,025
variatie golfhoogte (SHS)	Normaal	0	0,6
dikte bekleding (DI)	Normaal	0,35	0,005
diepte vooroever (D)	Normaal	10	0
taludhelling (ALFA)	Normaal	0,197 (1 : 5)	0,01

Tabel 1

Verder vindt men correctiecoëfficiënten gegeven voor de golfhoogte en de klemming van de zetting.

De coëfficiënt voor de golfhoogte reduceert de golfhoogte en simuleert zo een dijk die wat uit de wind ligt of meer landinwaarts is gelegen. De coëfficiënt voor de klemming komt overeen met de constante C uit formule 8.19.

Bij dit rekenvoorbeeld blijkt de grootste bezwijkkans bij een hoogwaterstand van 2,883 + NAP op te treden; op andere hoogten is de bezwijkkans kleiner.

Een gedeelte van dit rekenvoorbeeld is in appendix 8.2 met de hand uitgewerkt.

"MEAN VALUE" BENADERING

BETA = 2.82414874
FAALKANS = 2.37038125E-03

	X(I)	Z'(I)	SI(I)	PERC(I)
HHW	2.7	-858.51	.602	26.34
H/L	.0375	36716.143	6E-03	4.78
C1	.1196	-23027.115	.025	32.67
SHS	1E-03	-954.167	.6	32.31
DI	.35	23617.554	5E-03	1.37
D	10	0	0	0
ALFA	.197	-15998.268	.01	2.52

HS= 2.27
KSI= 1.03
HS/(DELTA.D.COS(A))= 4.73

CORRECTIECOEFF. GOLFHOOGTE= 2.5
CORRECTIECOEFF. KLEMMING= 1.75

"ADVANCED" BENADERING

DEF. BETA = 3.03750895
FAALKANS = 1.19279071E-03

	X(I)	Z'(I)	SI(I)	PERC(I)	GAMMA	GAMMAKAR.
HHW	2.893	-1062.885	.663	25.45		
H/L	.0312	80758.413	6E-03	12.02	.032	1.127
C1	.1619	-31129.456	.025	31.01	1.354	1.008
SHS	.9493	-1210.709	.6	27.02	948.28	.963
DI	.3497	23589.325	5E-03	.71	.996	1.02
D	10	0	0	0	1	1
ALFA	.2029	-27207.947	.01	3.79	1.03	.951

HS= 2.72
KSI= 1.17
HS/(DELTA.D.COS(A))= 5.68

CORRECTIECOEFF. GOLFHOOGTE= 2.5
CORRECTIECOEFF. KLEMMING= 1.75

Z = 1.89590454E-03

Met nadruk wordt erop gewezen dat het werkelijke schadepunt op het talud veelal lager ligt dan de stilwaterlijn. Voor de eenvoud wordt hier als uitgangspunt genomen dat het schadepunt samenvalt met het rundown-punt.

Voor het rundown-punt wordt verder formule 8.14. aangehouden.

De hier berekende bezwijkkans is de totale kans van optreden van een bepaalde waterstand en de kans van bezwijken van een enkel blok.

De voorwaardelijke kans op bezwijken van een enkel blok bij een gegeven waterstand is onderaan het talud aanzienlijk kleiner dan op de meer naar boven gelegen zones.

Door de waterstand voor diverse niveaus te fixeren, dat wil zeggen invoeren als deterministische grootheid, zijn deze voorwaardelijke kansen eventueel eenvoudig te berekenen.

Rekenvoorbeeld 2

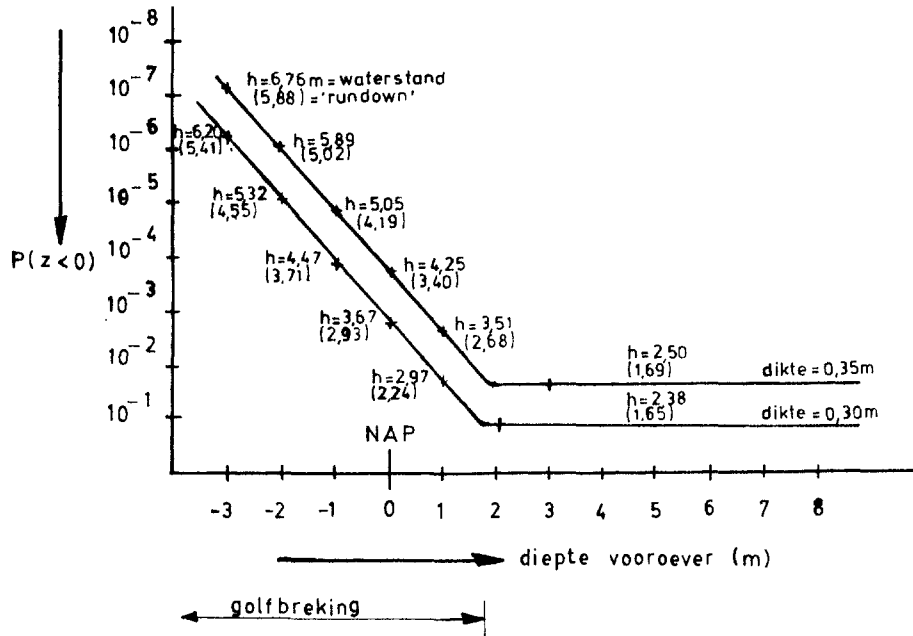
Door de waarden van enkele stochasten te variëren kan men eenvoudig de effecten op de bezwijkkans van de bekleding, dat wil zeggen op oplichten van een enkel blok, nagaan.

De resultaten van de parameterstudie zijn in figuur 8.9. gegeven. De waarden van de invoergegevens komen grotendeels overeen met het eerste rekenvoorbeeld, alleen de correctiecoëfficiënt voor de klemming is verlaagd tot 1,45.

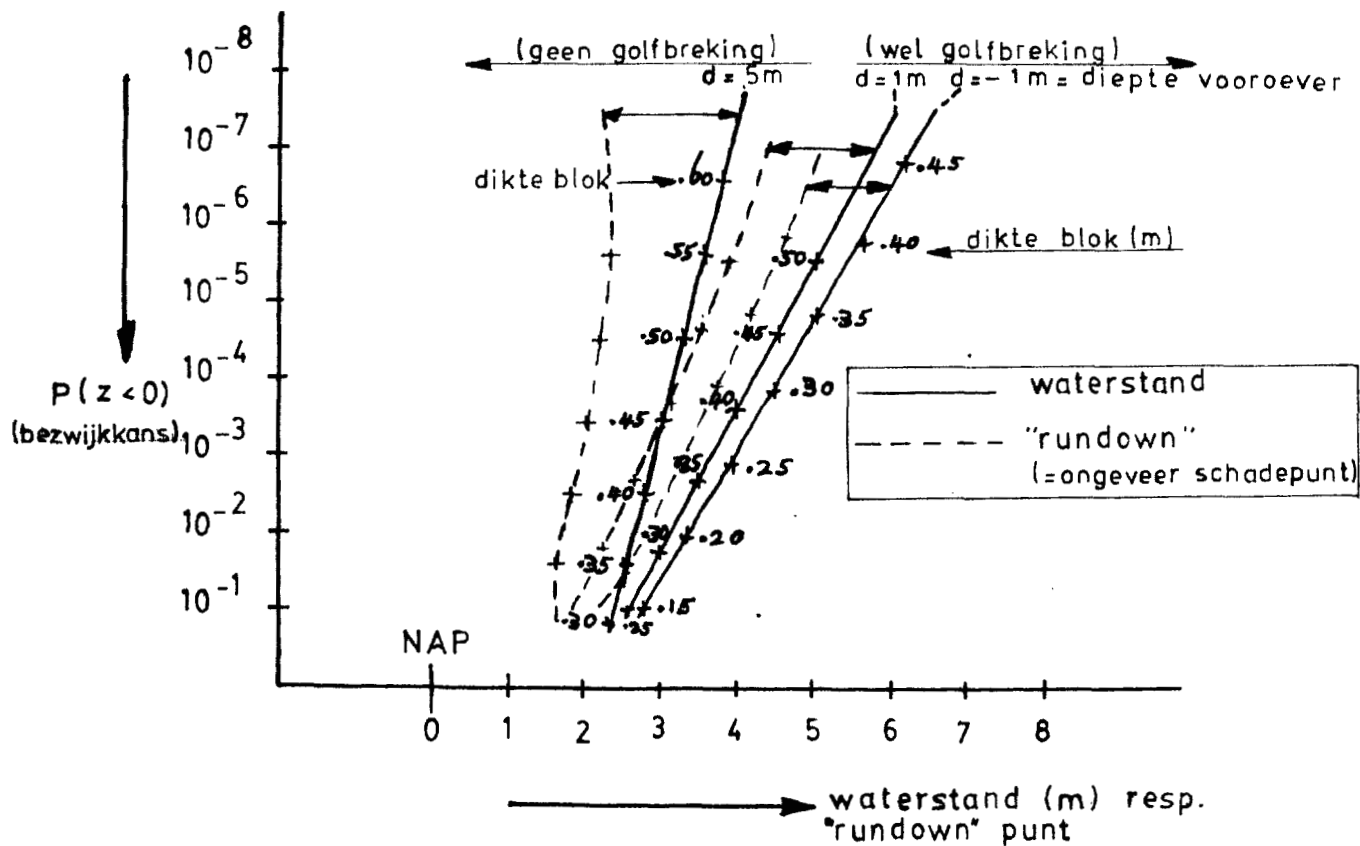
Duidelijk blijkt uit figuur 8.9. de gunstige invloed van een hooggelegen vooroever.

Het punt met de grootste kans op schade komt bij een hoger gelegen vooroever op een hoger niveau op het talud te liggen.

Door de dikte van de blokken meer systematisch te variëren verkrijgt men een beeld overeenkomstig figuur 8.10.



Figuur 8.9.: invloed diepte vooroever en dikte van de bekleding



Figuur 8.10.: invloed blokdikte en diepte vooroever

Rekenvoorbeeld 3

Bij dit rekenvoorbeeld wordt de taludhelling gevarieerd.

Een uitvoervoorbeeld voor één van de punten uit figuur 8.11. vindt u hieronder.

*** MEAN VALUE * BENADERING**

BETA = 2.6729953
FAALKANS = 3.75891064E-03

	X(I)	Z'(I)	SI(I)	PERC(I)
MHW	3	-1584.739	.712	32.14
H/L	.0375	92313.131	6E-03	7.74
C1	.1196	-57896.118	.025	52.83
SHS	1E-03	-582.193	.6	3.08
DI	.35	46730.041	5E-03	1.38
D	4	-1081.432	0	0
ALFA	.245	-33517.838	.01	2.83

HS= 3.5
KSI= 1.68
HS/(DELTA.D.COS(A))= 7.36

CORRECTIECOEFF. GOLFHOOGTE= 1
CORRECTIECOEFF. KLEMMING= 3.5

*** ADVANCED * BENADERING**

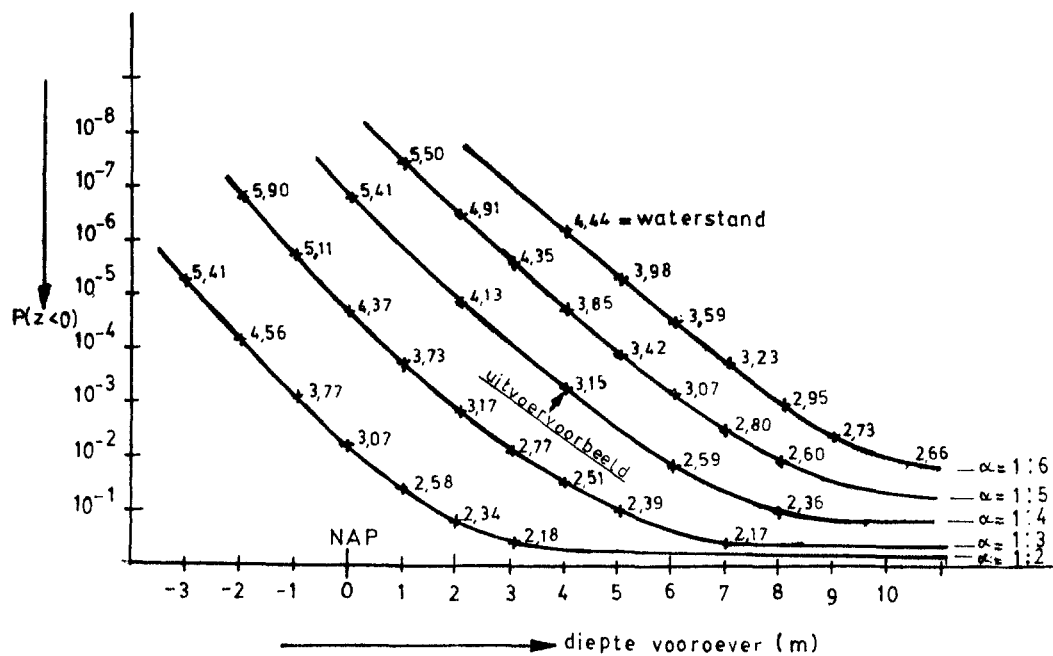
DEF. BETA = 3.24027296
FAALKANS = 5.97138634E-04

	X(I)	Z'(I)	SI(I)	PERC(I)	GAMMA	GAMMAKAR.
MHW	3.1531	-2220.591	.761	34.7		
H/L	.0291	207733.154	6E-03	18.86	.775	1.051
C1	.1698	-71132.282	.025	38.39	1.42	1.057
SHS	.3886	-934.185	.6	3.81	380.642	.386
DI	.3487	46657.562	5E-03	.66	.996	1.02
D	4	-1430.153	0	0	1	1
ALFA	.2511	-54318.619	.01	3.58	1.025	.961

HS= 3.58
KSI= 2.02
HS/(DELTA.D.COS(A))= 7.56

CORRECTIECOEFF. GOLFHOOGTE= 1
CORRECTIECOEFF. KLEMMING= 3.5

Z = 4.24957275E-03



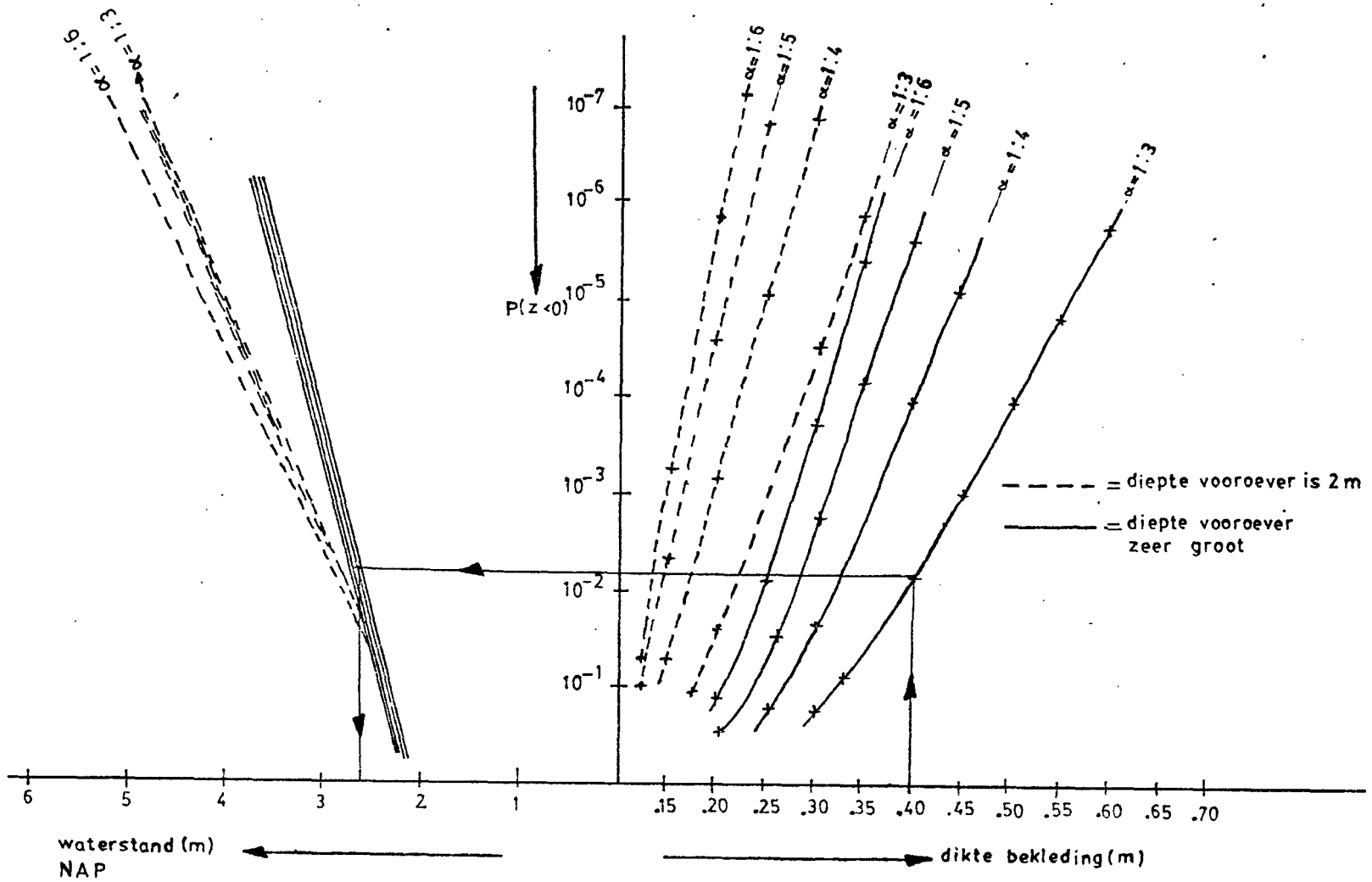
figuur 8.11.: invloed taludhelling en diepte vooroever

Rekenvoorbeeld 4

In dit voorbeeld wordt een ontwerpgrafiek berekend voor één lokatie en één type bekleding, zie figuur 8.12., waarbij op voorhand geen uitspraak wordt gedaan over de te accepteren bezwijkkans.

De lokatie is weer Hoek van Holland, de correctiecoëfficiënt voor de golfhoogte is 1 en voor de klemming 5.

De dijk ligt dus aan open zee, terwijl de zetting sterk is geklemd.



Figuur 8.12.: Ontwerpgrafiek

Rekenvoorbeeld 5

In dit rekenvoorbeeld wordt de sterkte van de bekleding als functie van het hoogteniveau ingevoerd.

Gekozen is voor een continue functie die de dikte van de bekleding laat variëren.

In de praktijk zal men echter de dikte of het gewicht van de blokken sprongsgewijs variëren.

Vanwege het iteratieve rekenproces levert dit echter vaak problemen met de convergentie op.

Uitvoer bij constante dikte van de bekleding

*** MEAN VALUE * BENADERING**

BETA = 2.6729953
FAALKANS = 3.75891064E-03

	X(I)	Z'(I)	SI(I)	PERC(I)
HHW	3	-1584.739	.712	32.14
H/L	.0375	92313.131	6E-03	7.74
C1	.1196	-57896.118	.025	52.83
SHS	1E-03	-582.193	.6	3.08
DI	.35	46730.841	5E-03	1.38
D	4	-1081.432	0	0
ALFA	.245	-33517.838	.01	2.83

HS= 3.5
KSI= 1.68
HS/(DELTA.D.COS(A))= 7.36

CORRECTIECOEFF. GOLFHOOGTE= 1
CORRECTIECOEFF. KLEMMING= 3.5

*** ADVANCED * BENADERING**

DEF. BETA = 3.24827296
FAALKANS = 5.97138634E-04

	X(I)	Z'(I)	SI(I)	PERC(I)	GAMMA	GAMMAKAR.
HHW	3.1531	-2220.591	.761	34.7		
H/L	.0291	267733.154	6E-03	18.86	.775	1.051
C1	.1698	-71132.202	.025	38.39	1.42	1.057
SHS	.3806	-934.105	.6	3.81	380.642	.386
DI	.3487	46657.562	5E-03	.66	.996	1.02
D	4	-1430.153	0	0	1	1
ALFA	.2511	-54318.619	.01	3.58	1.025	.961

HS= 3.58
KSI= 2.02
HS/(DELTA.D.COS(A))= 7.56

CORRECTIECOEFF. GOLFHOOGTE= 1
CORRECTIECOEFF. KLEMMING= 3.5

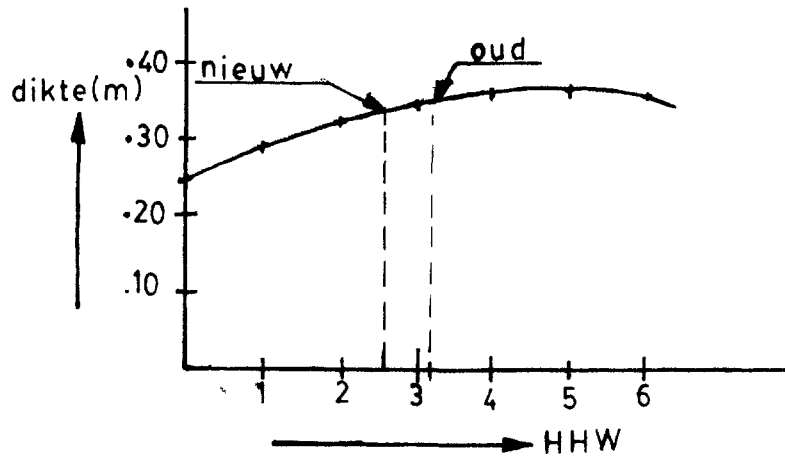
Z = 4.24957275E-03

In de volgende berekening is de dikte van de bekleding opgegeven als:

$$\text{dikte} = 0,25 + 0,0475 \cdot \text{HHW} - 0,005 \cdot \text{HHW}^2 \quad (8.21.)$$

met HHW = hoogwaterstand

Voor HHW = 3,1531, dat wil zeggen de waarde voor HHW in het ontwerp punt voor een bekleding van constante dikte, wordt dan weer een dikte van 0,35 m gevonden. Formule 8.20 is grafisch in figuur 8.13. uitgezet.



figuur 8.13.: blokdikte als functie van de hoogte op het talud

Zoals was te voorzien is het punt met de grootste kans van bezwijken nu lager op het talud gelegen: HHW = 2,55 m.

Wanneer het verloop volgens figuur 8.14 wordt aangehouden zal het punt met de grootste bezwijkkans hoger op het talud komen te liggen: HHW = 3,44 m.

Uitvoer bij variabele dikte van de bekleding

"MEAN VALUE" BENADERING

BETA = 3.01134936
FAALKANS = 1.30051632E-03

	X(I)	Z'(I)	SI(I)	PERC(I)
HHW	3	-767.152	.712	9.99
H/L	.0375	92313.131	6E-03	10.26
C1	.1196	-57896.118	.025	70.08
SHS	1E-03	-582.193	.6	4.08
DI	0	46729.516	5E-03	1.83
D	4	-1081.432	0	0
ALFA	.245	-33488.846	.01	3.75

HS= 3.5
KSI= 1.68

CORRECTIECOEFF. GOLFHOOGTE= 1
CORRECTIECOEFF. KLEMMING= 3.5

"ADVANCED" BENADERING

DEF. BETA = 3.1493642
FAALKANS = 0.1819706E-04

	X(I)	Z'(I)	SI(I)	PERC(I)	GAMMA	GAMMAKAR.
HHW	2.5513	-1374.926	.55	9.78		
H/L	.0273	217473.348	6E-03	29.11	.728	.987
C1	.1749	-67927.399	.025	49.31	1.462	1.089
SHS	.4644	-988.471	.6	6.01	464.409	.471
DI	-1.5E-03	46645.355	5E-03	.93	-150.861	.184
D	4	-1493.595	0	0	1	1
ALFA	.2519	-53269.577	.01	4.85	1.028	.964

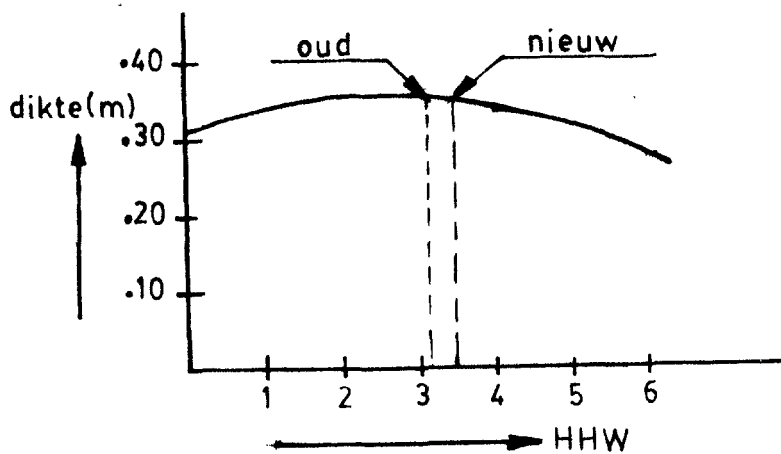
HS= 3.28
KSI= 2.11

CORRECTIECOEFF. GOLFHOOGTE= 1
CORRECTIECOEFF. KLEMMING= 3.5

Z = -4.50134277E-04

De dikte van de bekleding is in dit geval gegeven als:

$$\text{dikte} = 0,315 + 0,03 \cdot \text{HHW} - 0,006 \cdot \text{HHW}^2 \quad (8.21.)$$



figuur 8.14.: blokdikte als functie van de hoogte op het talud

Uitvoer bij variabele dikte van de bekleding

*** MEAN VALUE * BENADERING**

BETA = 2.54370837
FAALKANS = 5.4841541E-03

	X(I)	Z'(I)	SI(I)	PERC(I)
HHW	3	-1865.288	.712	39.62
H/L	.0375	92313.131	6E-03	6.08
C1	.1196	-57896.118	.025	47.01
SHS	1E-03	-582.193	.6	2.74
DI	0	46730.041	5E-03	1.22
D	4	-1081.432	0	0
ALFA	.245	-33529.663	.01	2.52

HS= 3.5
KSI= 1.68

CORRECTIECOEFF. GOLFHOOGTE= 1
CORRECTIECOEFF. KLEMMING= 3.5

*** ADVANCED * BENADERING**

DEF. BETA = 3.21889989
FAALKANS = 6.434802E-04

	X(I)	Z'(I)	SI(I)	PERC(I)	GAMMA	GAMMAKAR.
HHW	3.4439	-2626.949	.857	49.52		
H/L	.0305	193088.531	6E-03	13.13	.013	1.103
C1	.1646	-71547.852	.025	31.29	1.376	1.025
SHS	.3224	-886.955	.6	2.77	322.409	.327
DI	-1.2E-03	46664.429	5E-03	.53	-116.43	.142
D	4	-1378.052	0	0	1	1
ALFA	.2503	-53204.346	.01	2.77	1.022	.958

HS= 3.72
KSI= 1.96

CORRECTIECOEFF. GOLFHOOGTE= 1
CORRECTIECOEFF. KLEMMING= 3.5

Z = 1.22070313E-04

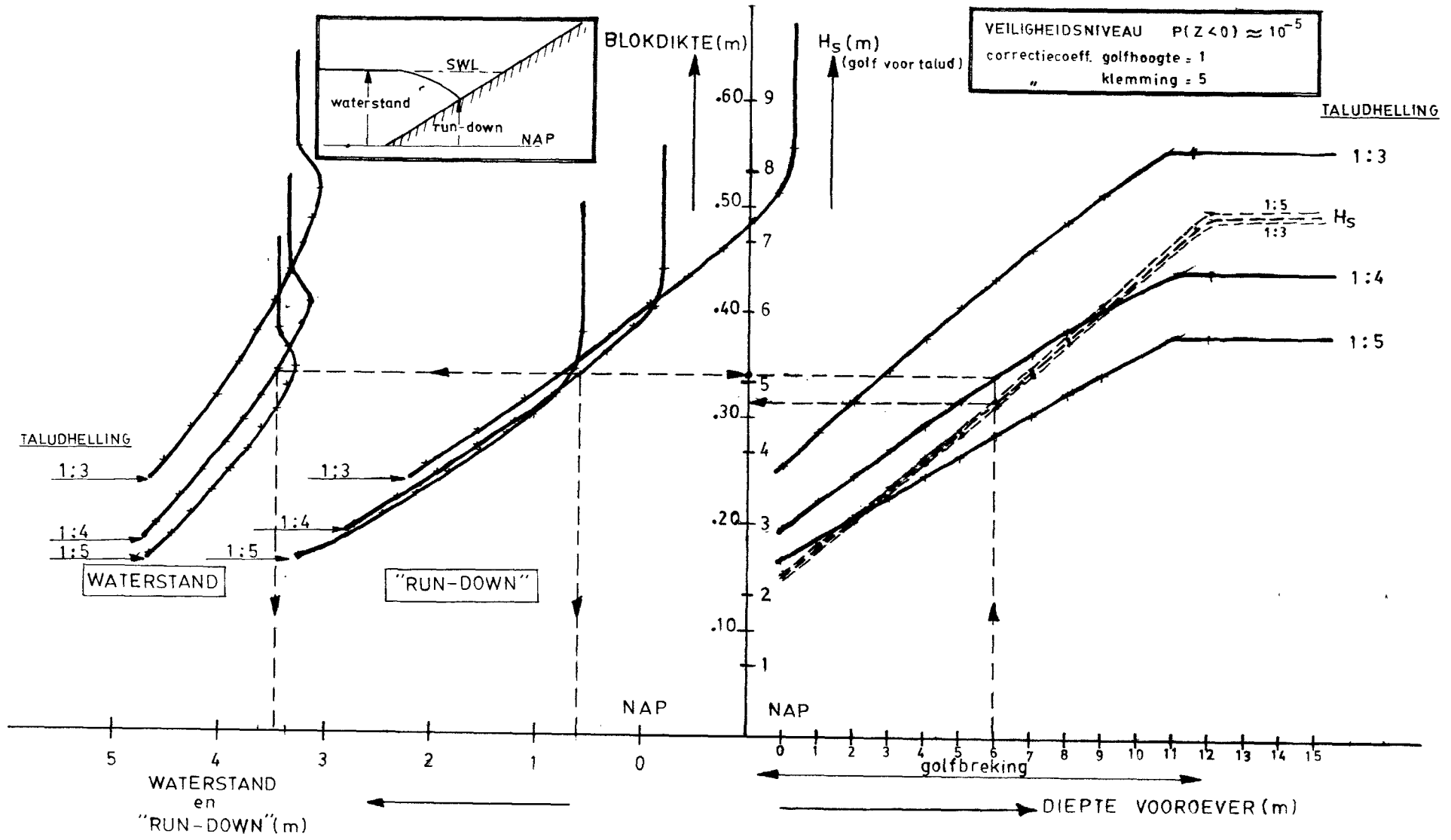
Rekenvoorbeeld 6

Bij dit rekenvoorbeeld wordt ervan uitgegaan dat op elk niveau van het talud een zelfde maximale kans op bezwijken aanwezig dient te zijn, zie ook paragraaf 8.6.

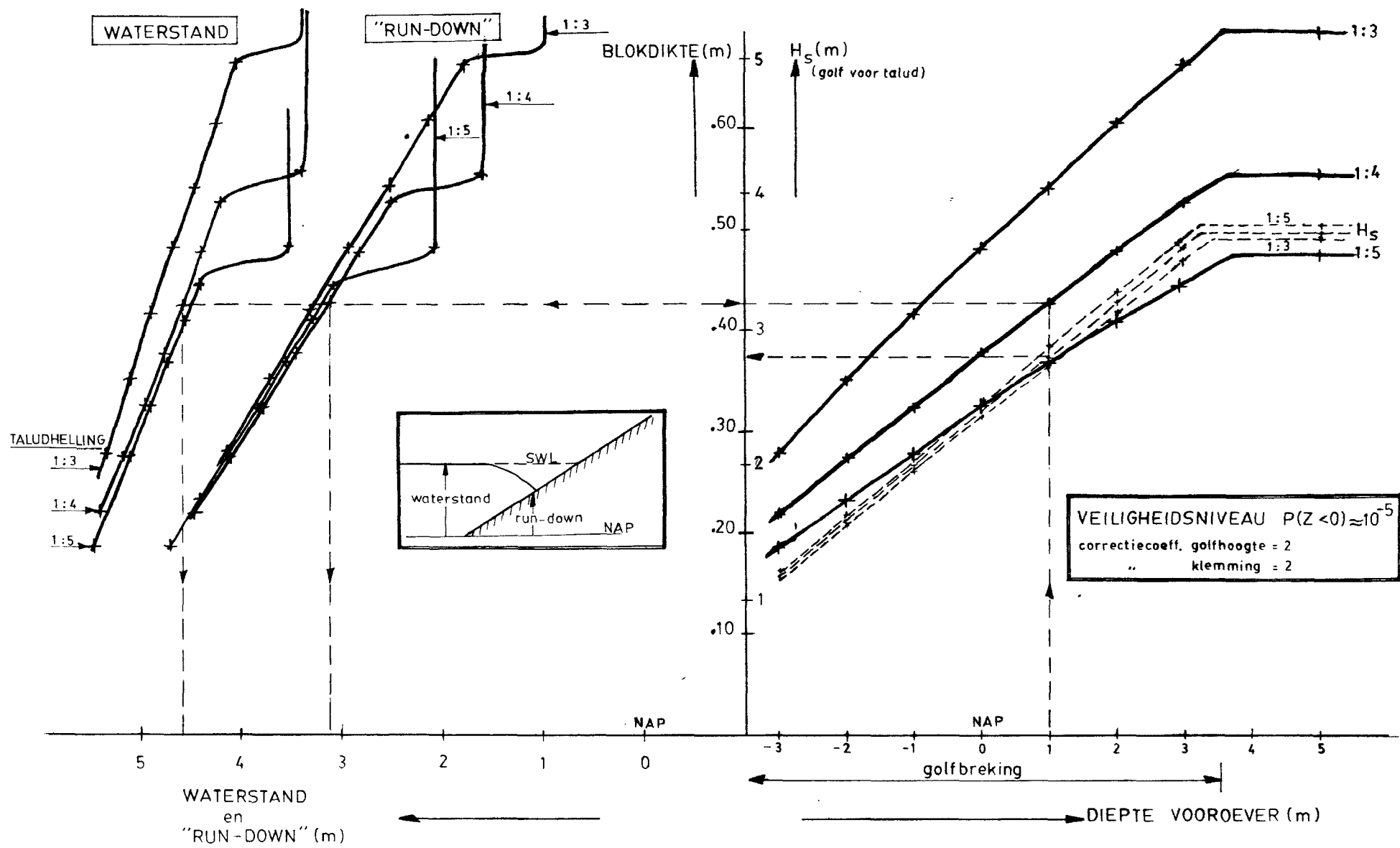
De kans van bezwijken bedraagt 10^{-5} ($P(Z < 0) \approx 10^{-5}$).

De bekleding heeft op elk niveau dezelfde sterkte.

In de figuren 8.15. en 8.16. zijn de resultaten weergegeven, waarbij de correctiecoëfficiënten voor golfhoogte en klemming, respectievelijk 1 - 5 en 2 - 2 zijn. Door een stippellijn is aangegeven hoe de grafiek moet worden afgelezen. Duidelijk komt in figuur 8.16. de invloed van het mildere golfklimaat tot uiting in de wijze van golfbreking.



figuur 8.15: Ontwerpgrafiek



figuur 8.16: Ontwerpgrafiek

8.6. Veiligheidsniveau

Teneinde de zwaarte van de bekleding op een probabilistische wijze te kunnen berekenen dient de te accepteren bezwijkkans vastgesteld te zijn.

Tussen de dagelijkse praktijk van de dijkbouw en de in het Deltarapport neergelegde ontwerpfilosofie bestaat wat de bekledingen betreft een discrepantie.

De praktijk ontwerpt veelal vanuit de ervaring, dat wil zeggen onder gebruiksomstandigheden.

Het Deltarapport gaat daarentegen uit van een ontwerpstorm.

Tussen beide methoden gaapt een vrij brede kloof.

Op lagere niveaus worden in de praktijk zo af en toe schadegevallen aangetroffen, zeg een kans van bezwijken in de grootte-orde van 10^{-2} . Laat men deze vrij grote bezwijkkans voor het gehele talud gelden dan zou dit inhouden dat de bekleding aanzienlijk minder ver naar boven doorgetrokken zou behoeven te worden dan thans gebruikelijk is. Immers de voorwaardelijke kans van optreden van een watertand op de hogere niveaus is kleiner dan 10^{-2} .

De Deltacommissie geeft echter voor de berekening van de kruinhoogte een ontwerpwaterstand met een overschrijdingskans van 10^{-4} .

Bij deze waterstand moet de dijk nog volledig als waterkering blijven functioneren.

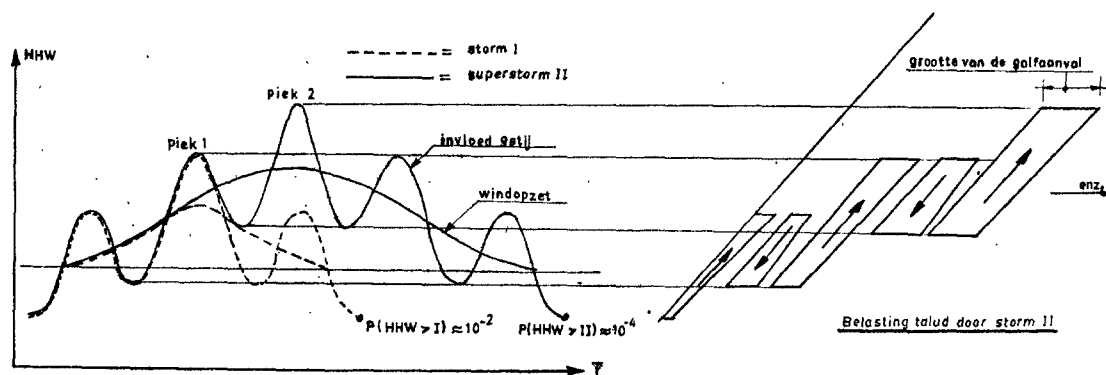
Tussen het oplichten van een blok op dit hoge niveau en het bezwijken van de dijk zit nog het mechanisme van voortschrijdende ontgroning van de fundering van de bekleding en de rest van het dijklichaam.

Het is niet bekend welke veiligheid dit extra geeft.

Uitgangspunt zal echter moeten zijn dat de bekleding bij een waterstand met een overschrijdingskans van 10^{-4} toch een zekere reserve aan sterkte dient te bezitten, dat wil zeggen $P(Z < 0 \mid h) < 1$.

De geaccepteerde bezwijkkans bij het peil van de superstorm volgens het Deltarapport komt dan in de grootte-orde van 10^{-4} à 10^{-5} te liggen.

In figuur 8.17. is als illustratie het verloop van de waterstand gegeven van twee stormen (I en II), afgezien is van faseverschuivingen tussen getij en windopzet.



figuur 8.17.: waterstanden en golfaanval

Storm II duurt langer, bereikt een hoger waterpeil en geeft in zijn maximum grotere golven dan storm I.

Aangenomen wordt dat tot piek 1 de twee stormen volkomen identiek zijn. Storm I heeft natuurlijk een grotere kans van voorkomen dan storm II. Omdat storm I na piek 1 in kracht afneemt en bij deze lage waterstand de dijk wegens de grote breedte een grote restveiligheid bezit, kan wellicht een vrij grote bezwijkkans worden geaccepteerd met het oog op mogelijke reparatie in het kader van het onderhoud van de waterkering. Deze redenering volgend komt men voor de hogere niveaus op het talud tot lagere te accepteren bezwijkkansen.

Deze redenering is echter niet juist.

Bij het optreden van storm II heeft men niet de tijd de schade bij piek 1 te herstellen. Het gevolg is dat deze storm de taludbekleding als het ware van onderen oprolt, waardoor het gevaar bestaat dat door snelle ontgronding de bekleding hoger op het talud wordt ondermijnd.

Dit kan niet worden geaccepteerd.

De dan ontstane situatie is te vergelijken met de stevig geconstrueerde bovenste verdiepingen van een gebouw rustende op zeer onveilige kolommen. De op lager niveau optredende schade zal tot gevolg hebben dat ook op hogere niveaus schade zal optreden, hoe veilig deze delen ook zijn geconstrueerd. De ketting is zo sterk als zijn zwakste schakel.

Geconcludeerd moet daarom worden dat op elk hoogteniveau dezelfde bezwijkkans in de grootte-orde van 10^{-4} à 10^{-5} aangehouden moet worden. De consequentie is wel dat in Nederland zelden of nooit schaden aan bekledingen mogen worden geconstateerd, hetgeen echter in tegenspraak is met de ervaringen in de praktijk.

Literatuur

1. Rapport Deltacommissie
Beschouwingen over stormvloeden en getijbeweging
Deel 4

2. Bruinsma, J., Graaff van de, J.
Golfhoogte - waterstandrelatie ter plaatse van de NAP - 20 m lijn
nabij Hoek van Holland ten behoeve van de leidraad Duinafslag

3. Vrijling, J.K.
Een oriënterend onderzoek naar de richtlijnen voor het ontwerp van
zeeweringen van de Deltacommissie, januari 1983
Afdeling der Civiele Techniek
Vakgroep Waterbouwkunde
Technische Hogeschool Delft

4. Hydraulics Research Station
The stability of revetment blocks under wave attack
Report IT 195, Wallingford, England 1980

5. Aalst, J. van
Golfhoogte - waterstandrelatie ter plaatse van de NAP - 20 m lijn
langs de Nederlandse kust
Deltadienst, maart 1983

6. Vrouwenvelder, A.C.W.M., Vrijling, J.K.
Collegedictaat b3 probabilistisch ontwerpen
Afdeling der Civiele Techniek
Technische Hogeschool Delft

7. CUR - VB rapport 109
Veiligheid van bouwconstructies, een probabilistische benadering

Literatuur (vervolg)

8. Rapport Deltacommissie

Beschouwingen omtrent windeffecten en waterhoogten langs de
Nederlandse kust

Deel 2

9. Boer, K. den

Taludbekledingen van gezette steen, fase 0

Hydraulische aspecten, verslag literatuurstudie, 1982

M 1795, deel II WL, CO-255780/43 LGM

Waterloopkundig Laboratorium

Laboratorium voor Grondmechanica

APPENDIX 8.1

```

10 REM   PROBAB-ADVANCED 2E MOMENT METHOD+ APPR. FULL DIS
    TRIBUTION
13 QW = .39894228:B0 = .2316419:B1 = .31938153:B2 = - .356
    56378:B3 = 1.781477937:B4 = - 1.821255978:B5 = 1.3302
    74429
16 C0 = 2.515517:C1 = .802653:C2 = .010328:D1 = 1.432788:D2
    = .189269:D3 = .001308
19 E = .0001
22 DEF FN P(X) = QW * EXP ( - .5 * X ^ 2)
25 READ N
28 DIM X(N),X1(N),A(N),M(N),S(N),AU(N),A$(N)
31 FOR I = 1 TO N: READ A$(I),M(I),S(I),AU(I):X(I) = M(I):
    NEXT
34 GOSUB 60000
37 M1 = Z
40 Q = 0
43 PRINT : PRINT
46 REM   CORRECTIE  U. MU EN SI
110 FOR I = 1 TO N
120 IF AU(I) = 0 THEN 170
125 PRINT "X("I")= "X(I)
130 ON I GOSUB 30100,30200,30300,30400,30500,30600,30700,3
    0800
135 PRINT "PF= "PF"  PD= "PD
140 GOSUB 20000
143 PRINT "BI=":BI
144 PRINT "*****"
145 PRINT "M("I")= "M(I)"  S("I")="S(I)
150 S(I) = FN P(BI) / PD
160 M(I) = X(I) - BI * S(I)
165 PRINT "M("I")= "M(I)"  S("I")="S(I)"  NA AANPASSING"

170 NEXT
200 REM   BEREKENING AFGELEIDEN Z1(I)
210 GOSUB 60000:Z1 = Z
220 FOR I = 1 TO N
230 A = X(I)
250 IF S(I) = 0 THEN DX = E: GOTO 270
260 DX = E * S(I)
270 X(I) = A + DX
280 GOSUB 60000:Z2 = Z
290 X(I) = A
300 Z1(I) = (Z2 - Z1) / DX
310 NEXT
320 S1 = 0:S2 = 0
330 FOR I = 1 TO N
340 S1 = S1 + Z1(I) * (M(I) - X(I))
350 A(I) = Z1(I) * S(I)
360 S2 = S2 + A(I) ^ 2
370 NEXT
380 S2 = SQR (S2)
390 B = (Z1 + S1) / S2
392 FOR I = 1 TO N
394 A(I) = A(I) / S2
396 NEXT
430 IF Q < > 0 THEN 500
435 REM EERSTE BETA - GEM. WAARDE
437 INPUT "WILT U DE PRINTER INSCHAKELEN (J/N)?:P$
438 IF P$ = "J" THEN PR# 1
439 PRINT : PRINT : PRINT CHR$(14)"MEAN VALUE" BENADERI
    NG": PRINT
440 B = M1 / S2: PRINT "BETA = ":B:X = B: GOSUB 10000: PRINT
    "FAALKANS = ":P: PRINT

```

```
450 GOSUB 2000
460 Q = 1: PR# 0
500 REM BEREKENING X(I)
510 F = 0
520 FOR I = 1 TO N
530 A = X(I)
540 X(I) = M(I) - A(I) * B * S(I)
550 F = F + ((A - X(I)) / X(I)) ^ 2
560 NEXT
700 GOSUB 60000: PRINT "Z = ":Z
710 IF ABS(Z) > E THEN 200
760 F = B0 - E: B0 = B
780 PRINT : PRINT "BETA = ":B
785 PRINT "FOUT= "F: PRINT
790 IF ABS(F) > E THEN 46
800 IF P# = "J" THEN PR# 1: PRINT : PRINT
802 PRINT CHR#(14)"ADVANCED" BENADERING": PRINT
804 TT = 1
805 PRINT "DEF. BETA = ":B:X = B
810 GOSUB 10000: PRINT "FAALKANS = ":P
820 PRINT : PRINT : GOSUB 2000
825 GOSUB 60000: PRINT : PRINT : PRINT "Z = ":Z
826 PRINT "TEL-Z = ":TZ
830 END
2000 PRINT "          X(I)          Z'(I)          SI(I)          PERC(
I)":
2005 IF TT = 1 THEN PRINT "          GAMMA          GAMMAKAR.":
2006 PRINT
2010 FOR I = 1 TO N:PERC = A(I) ^ 2
2020 PRINT A#(I) TAB( 10) INT (X(I) * 10000 + .5) / 10000 TAB(
20) INT (Z1(I) * 1000 + .5) / 1000 TAB( 33) INT (S(I) *
1000 + .5) / 1000 TAB( 42) INT (PERC * 10000 + .5) / 1
00:
2022 IF TT = 1 AND I < > 1 THEN PRINT TAB( 13) INT (X(I
) / M(I) * 1000 + .5) / 1000:
2024 IF TT = 1 AND (I = 2 OR I = 5) THEN PRINT TAB( 23) INT
(X(I) / (M(I) - 1.64 * S(I)) * 1000 + .5) / 1000:
2026 IF TT = 1 AND (I = 3 OR I = 4 OR I = 6 OR I = 7) THEN
PRINT TAB( 23) INT (X(I) / (M(I) + 1.64 * S(I)) * 10
00 + .5) / 1000:
2027 PRINT : NEXT
2028 KSI = TAN (X(7)) / SQR (ST):RD = .3 * KSI * HS
2030 PRINT : PRINT "HS= " INT (HS * 100 + .5) / 100: PRINT
"KSI= " INT ( TAN (X(7)) / SQR (ST) * 100 + .5) / 100
2035 PRINT "HS/(DELTA.D.COS(A))= " INT (HS / (1.4 * X(5) *
COS (X(7))) * 100 + .5) / 100
2036 PRINT "RUN-DOWN= " INT (RD * 100 + .5) / 100: PRINT
2037 PRINT "CORRECTIECOEFF. GOLFHOOGTE= "CC: PRINT "CORREC
TIECOEFF. KLEMMING= "C
2040 RETURN
10000 REM P= GAUSS(X)
10010 T = 1 / (1 + B0 * X)
10020 P = FN P(X) * (B1 * T + B2 * T ^ 2 + B3 * T ^ 3 + B4
* T ^ 4 + B5 * T ^ 5)
10030 RETURN
20000 REM BI=INVERSE GAUSS(PF)
20010 GA = 0
20015 IF PF > .5 THEN PF = 1 - PF:GA = 1
20020 T = SQR ( LOG (1 / PF ^ 2))
20030 T2 = T * T:T3 = T2 * T
20040 BI = T - (C0 + C1 * T + C2 * T2) / (1 + D1 * T + D2 *
T2 + D3 * T3)
```

```
20050 IF GA = 1 THEN BI = - BI
20060 RETURN
30100 REM VERDELING VAN X(1)
30110 TG = .33: XN = (X(1) - 1.98) / TG
30115 PR = EXP (- XN): PU = EXP (- PR)
30120 PF = 1 - PU: PD = PU * PR / TG
30130 RETURN
50000 DATA 7
50010 DATA "HHW", 3, .01, 1
50020 DATA "H/L", .0375, .006, 0
50030 DATA "CI", .1196, .025, 0
50040 DATA "SHS", 1E-3, .6, 0
50050 DATA "DI", .35, .005, 0
50060 DATA "D", 4, 0, 0
50070 DATA "ALFA", .245, .01, 0
60000 REM GOLFHOOGTE, WATERSTANDS-RELATIE
60002 IF X(1) >= 2.5 THEN HS = -.0588 * X(1) * X(1) +
1.2173 * X(1) + 2.823 + X(4)
60003 ST = X(2)
60004 REM BENEDEN GRENSPEIL
60005 IF X(1) < 2.5 THEN HS = -.2 * X(1) * X(1) + 2.3 *
X(1) + 1 + X(4)
60006 REM REDUCTIE GOLFHOOGTE
60007 CC = 1
60008 HS = HS / CC
60009 IF HS < 0 THEN HS = 0
60010 HB = .5 * (X(1) + X(6)): IF HS > HB THEN ST = ST * HB
/ HS: HS = HB
60015 IF ST < 0 THEN ST = .0001
60017 SK = TAN (X(7)) / SQRT (ST)
60018 REM CORRECTIE INKLEMMING
60019 C = 3.5
60020 R = (13762 * X(5) * COS (X(7))) * C
60030 S = 9830 * HS * (X(3) * SK + .1194)
60040 Z = R - S
60050 TZ = TZ + 1: RETURN
```


*** MEAN VALUE * BENADERING**

BETA = 2.67234839
FAALKANS = 3.76616549E-03

	X(I)	Z'(I)	SI(I)	PERC(I)
HHW	3	-1584.905	.712	32.14
H/L	.0375	92328.389	6E-03	7.74
C1	.1196	-57901.001	.025	52.83
SHS	1E-03	-582.314	.6	3.08
DI	.35	46745.3	5E-03	1.38
D	4	-1081.543	0	0
ALFA	.245	-33519.745	.01	2.83

HS= 3.5
KSI= 1.68
HS/(DELTA.D.COS(A))= 7.36
RUN-DOWN= 1.77

CORRECTIECOEFF. GOLFHOOGTE= 1
CORRECTIECOEFF. KLEMMING= 3.5

*** ADVANCED * BENADERING**

DEF. BETA = 3.23978924
FAALKANS = 5.98152429E-04

	X(I)	Z'(I)	SI(I)	PERC(I)	GAMMA	GAMMAKAR.
HHW	3.1597	-2219.178	.767	35.02		
H/L	.0291	207411.448	6E-03	18.73	.776	1.052
C1	.1697	-71116.638	.025	38.23	1.419	1.057
SHS	.3797	-933.711	.6	3.8	379.721	.386
DI	.3487	46646.118	5E-03	.66	.996	1.02
D	4	-1429.52	0	0	1	1
ALFA	.2511	-54313.66	.01	3.57	1.025	.961

HS= 3.58
KSI= 2.02
HS/(DELTA.D.COS(A))= 7.57
RUN-DOWN= 2.17

CORRECTIECOEFF. GOLFHOOGTE= 1
CORRECTIECOEFF. KLEMMING= 3.5

Z = 2.28881836E-05
TEL-Z = 182

APPENDIX 8.2.

Gedeeltelijke handberekening van rekenvoorbeeld 1

a. Het model

De volgende basisvariabelen worden onderscheiden:

- X_1 = de waterstand ten opzichte van NAP
- X_2 = de golfsteilheid
- X_3 = de sterktecoëfficiënt (C_1 uit formule 8.19.)
- X_4 = de variatie in de golfhoogte
- X_5 = de dikte van de blokken
- X_6 = de diepte van de vooroever
- X_7 = de hellinghoek van het talud.

Opmerking: In dit rekenvoorbeeld vindt geen golfbreking plaats, waardoor X_6 verder niet in de berekening voorkomt.

Verder worden nog coëfficiënten toegepast, teneinde respectievelijk het golfklimaat en de klemming tussen de blokken in te kunnen stellen:

CC = coëfficiënt voor verandering van de golfhoogte

$$(H_s^* = H_s / CC)$$

C = coëfficiënt voor verandering van de klemming (zie ook formule 8.19.)

De betrouwbaarheidsfunctie Z is overeenkomstig formule (8.20.) als volgt geformuleerd:

$$Z = C (\rho_b - \rho_w) g X_5 \cos X_7 - \rho_w g H_s^* (X_3 \xi + 0,1194) \quad (\text{App. 1})$$

Volgens formule (8.7.) geldt een directe relatie tussen golfhoogte en waterstand:

$$H_s^* = (- 0,0588 X_1^2 + 1,2173 X_1 + 2,823 + X_4) / CC \quad (\text{App. 2})$$

De variabele X_4 heeft een afwijkend karakter ten opzichte van de overige basisvariabelen, het representeert alleen het onafhankelijke deel van de golfhoogte.

Verder geldt:

$$\xi = \tan X_7 / \sqrt{X_2} \quad (\text{App. 3})$$

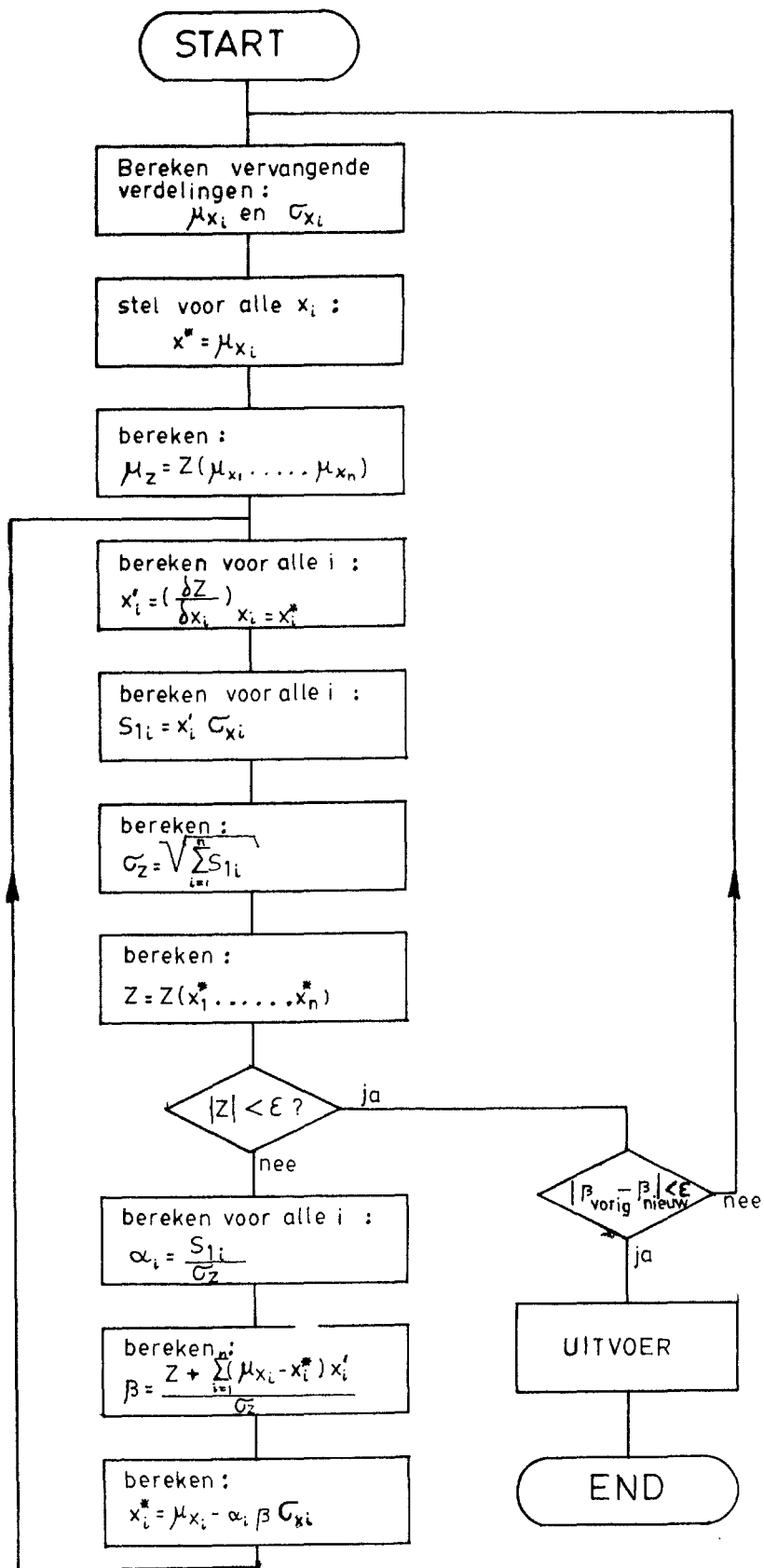
Vergelijking (App. 2) en (App. 3) in (App. 1) gesubstitueerd en voor $CC = 2,5$, $C = 1,75$, $\rho_b = 2400 \text{ kg/m}^3$ en $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ geeft:

$$Z = 24083,5 X_5 \cos X_7 - 3932 (- 0,0588 X_1^2 + 1,2173 X_1 + 2,823 + X_4) (X_3 \tan X_7 / \sqrt{X_2} + 0,1194) \quad (\text{App. 4})$$

b. De methode

Hierna vindt u een globaal stroomschema van het rekenproces.

In blok no. 1 van het stroomschema wordt aangegeven dat niet normaal verdeelde basisvariabelen (in dit geval alleen de hoogwaterstand X_1) zo goed mogelijk benaderd moeten worden door een normale verdeling, dit gebeurt als volgt:



Stroomschema rekenproces

1. Bepaal de overschrijdingskans van de ontwerpwaarde X_i^* van de basisvariabele: $P = F_E(X_i^*)$ (App. 5)
2. Met behulp van de inverse normale verdeling stelt men vast hoeveel malen de standaardafwijking het gemiddelde μ_{X_i} van de benaderde normale verdeling van de ontwerpwaarde verwijderd moet zijn:
 $\beta' = F_N^{-1}(P)$ (App. 6)
3. Uit een vergelijking van de kansdichtheden (richtingen) volgt de standaardafwijking:

$$\sigma_{X_{iN}} = \frac{f_N(\beta')}{f_E(X_i^*)} \quad (\text{App. 7})$$

waarbij $f_N(\beta')$ een eenheidsnormale verdeling bezit, dat wil zeggen gemiddelde 0 en standaardafwijking 1.

4. De waarde van het gemiddelde van de benaderde verdeling ligt nu vast volgens:

$$\mu_{X_i} = X_i^* - \beta' \sigma_{X_{iN}} \quad (\text{App. 8})$$

Een eerste benadering voor de nog onbekende gelineariseerde bezwijkgrens is:

$$Z \approx Z(X_1^* \dots X_7^*) + \sum_{i=1}^7 (X_i - X_i^*) \frac{\delta Z}{\delta X_i} = 0 \quad (\text{App. 9})$$

waarin $\frac{\delta Z}{\delta X_i}$ wordt berekend in X_i^* .

Het gemiddelde van Z is nu:

$$\mu_z = z(x_1^* \dots x_7^*) + \sum_{i=1}^7 (\mu_{x_i} - x_i^*) \frac{\delta z}{\delta x_i} \quad (\text{App. 10})$$

en

$$\sigma_z = \left\{ \sum_{i=1}^7 \left(\frac{\delta z}{\delta x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2 \right\}^{1/2} \quad (\text{App. 11})$$

Deze laatste betrekking wordt nu uitgedrukt in een lineaire functie van de standaardafwijkingen:

$$\sigma_z = \sum_{i=1}^7 \alpha_i \frac{\delta z}{\delta x_i} \sigma_{x_i} \quad (\text{App. 12})$$

waarin:

$$\alpha_i = \frac{\frac{\delta z}{\delta x_i} \sigma_{x_i}}{\left\{ \sum_{j=1}^7 \left(\frac{\delta z}{\delta x_j} \right)^2 \sigma_{x_j}^2 \right\}^{1/2}} \quad (\text{App. 13})$$

Nu wetend dat het punt x^{**} op de bezwijkgrens ligt, geldt:

$$z = z(x_1^* \dots x_7^*) = 0 \quad (\text{App. 14})$$

Nu volgt:

$$\frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{\sum_{i=1}^7 (\mu_{x_i} - x_i^*) \frac{\delta z}{\delta x_i}}{\sum_{i=1}^7 \alpha_i \frac{\delta z}{\delta x_i} \sigma_{x_i}} = \beta \quad (\text{App. 15})$$

De oplossing van deze vergelijking geeft een nieuwe schatting voor X^{**} dat gewoonlijk het ontwerppunt wordt genoemd:

$$X_i^* = \mu X_i - \alpha_i \beta \sigma X_i \quad (\text{App. 16})$$

De waarden van de potentiële afgeleiden werden echter in het oude punt bepaald.

Een herhaling van de procedure is daarom noodzakelijk totdat een stabiele waarde voor het ontwerppunt X^{**} is gevonden.

Maar in dit nieuw gevonden punt zal de betrouwbaarheidsfunctie niet langer gelijk aan nul zijn.

Dit betekent dat het nieuwe punt niet op de bezwijkgrens $Z = 0$ ligt, zoals werd aangenomen.

Deze afwijking wordt gecorrigeerd door de waarde aan te passen volgens:

$$\beta_0 = \frac{\mu Z}{\sigma Z} = \frac{Z(X^{**}) + \sum_{i=1}^7 (\mu X_i - X_i^*) \frac{\delta Z}{\delta X_i}}{\sum_{i=1}^7 \alpha_i \frac{\delta Z}{\delta X_i} \sigma X_i} \quad (\text{App. 17})$$

De gehele procedure moet worden herhaald voor deze nieuwe waarde van β . De correcte oplossing wordt dus door middel van een iteratieprocedure gevonden, zie ook het stroomschema.

c. De handberekening

Allereerst dient de niet-normale verdeling van de hoogwaterstand door een normale verdeling benaderd te worden.

De hoogwaterstand heeft bij dit rekenvoorbeeld een Gumbel-verdeling:

$$P(\underline{X}_1 > X_1) = 1 - e^{-e^{-\frac{(X_1 - 1,98)}{0,33}}} \quad (\text{App. 18})$$

1. In de eerste benadering van het ontwerppunt $x_1 = 2,7$ geldt:

$$P(\underline{X}_1 > 2,7) = 0,1067$$

2. Met behulp van de inverse normale verdeling (opzoeken in tabel 3) volgt:

$$\beta' = 1,24$$

$$3. f_N(\beta') = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-1/2 \beta'^2} = 0,1839$$

$$f_E(x_i^*) = \frac{1}{0,33} e^{-\frac{(2,7 - 1,98)}{0,33}} e^{-e^{-\frac{(2,7 - 1,98)}{0,33}}} = 0,3054$$

$$\sigma_{X_{iN}} = \frac{f_N(\beta')}{f_E(x_i^*)} = 0,602$$

$$4. \mu_{X_i} = 2,7 - 1,24 \cdot 0,602 = 1,9509$$

Voor de verdere berekening moeten de partiële afgeleiden nog worden bepaald:

$$\frac{\delta Z}{\delta x_1} = -3932 (-0,1176 x_1 + 1,2173) (x_3 \tan x_7 / \sqrt{x_2} + 0,1194)$$

$$\frac{\delta Z}{\delta x_2} = 1966 x_3 \tan x_7 x_2^{-3/2} (-0,0588 x_1^2 + 1,2171 x_1 + 2,823 + x_4)$$

$$\frac{\delta Z}{\delta x_3} = -3932 (-0,0599 x_1^2 + 1,2173 x_1 + 2,823 + x_4) (\tan x_7 / \sqrt{x_2})$$

$$\frac{\delta Z}{\delta x_4} = -3932 (x_3 \tan x_7 / \sqrt{x_2} + 0,1194)$$

$$\frac{\delta Z}{\delta X_5} = 24083,5 \cos X_7$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta Z}{\delta X_7} = & - 24083,5 X_5 \sin X_7 - 3932(- 0,0599 X_1^2 + 1,2173 X_1 + \\ & + 2,823 + X_4) \left(\frac{X_3}{\cos^2 X_7 \sqrt{X_2}} \right) \end{aligned}$$

In het computerprogramma worden deze afgeleiden op een numerieke wijze berekend.

De verdere berekening zal in tabelvorm worden uitgevoerd.

Met behulp van formule (App. 4) en de waarden van tabel 1 vinden we:

$$Z(X_i^*) = 2838,13$$

De mean-value benadering geeft dan:

$$\beta = \frac{Z(X_i^*)}{\sigma Z} = 2,82$$

Met behulp van de tabel voor de normale verdeling geeft dit een faalkans van $2,4 \cdot 10^{-3}$ (vergelijk met computeruitvoer rekenvoorbeeld 1).

Hierna wordt met behulp van formule (App. 16) een nieuw ontwerp punt berekend. De resultaten staan in de eerste kolom van tabel 2 vermeld. Gevonden wordt nu $Z(X_i^*) = 331,76$.

Bij deze iteratiestap wordt met behulp van formule (App. 17) gevonden:

$$\beta = 3,05.$$

Hierna wordt met behulp van formule (App. 16) weer een nieuw ontwerp-punt bepaald. Al verder itererend gaat $Z(X_i^*)$ naar nul.

Is dit ongeveer het geval dan wordt de niet-normale verdeling van de waterstanden opnieuw met een normale verdeling benaderd etc.

Het iteratieproces wordt zover doorgevoerd totdat stabiele eindwaarden worden bereikt, zie het stroomschema.

Eénmaal geprogrammeerd is dit een eenvoudige taak voor het rekentuig.

basis- variabele	X_i^*	μX_i	σX_i	$\frac{\delta Z}{\delta X_i}$	$\frac{\delta Z}{\delta X_i} \sigma X_i$	$(\frac{\delta Z}{\delta X_i} \sigma X_i)^2$	$\alpha_i = \frac{\delta Z}{\delta X_i} \sigma X_i / \sigma_Z$	$(\mu X_i - X_i^*) \frac{\delta Z}{\delta X_i}$
$X_1 = \text{HHW}$	2,7	1,9509	0,602	- 859,45	- 517,39	$2,6769 \cdot 10^5$	- 0,5130	643,814
$X_2 = \text{H/L}$	0,0375	0,0375	0,006	36797,09	220,78	$4,8745 \cdot 10^4$	0,2189	0
$X_3 = C_1$	0,1196	0,1196	0,025	-23075,10	- 576,88	$3,3279 \cdot 10^5$	- 0,5720	0
$X_4 = \text{SHS}$	0,001	0,001	0,6	- 955,18	- 573,11	$3,2845 \cdot 10^5$	- 0,5682	0
$X_5 = \text{DI}$	0,35	0,35	0,005	23615,79	118,08	$1,3942 \cdot 10^4$	0,1171	0
$X_7 = \text{ALFA}$	0,1974	0,1974	0,01	-16003,70	- 160,04	$2,5612 \cdot 10^4$	- 0,1587	0
					$\Sigma = \sigma_Z^2$	$1,0172 \cdot 10^6$	$\Sigma =$	643,814

Tabel 1

basis- variabele	x_i^*	μx_i	σx_i	$\frac{\delta Z}{\delta x_i}$	$\frac{\delta Z}{\delta x_i} \sigma x_i$	$(\frac{\delta Z}{\delta x_i} \sigma x_i)^2$	$\alpha_i = \frac{\frac{\delta Z}{\delta x_i} \sigma x_i}{\sigma_z}$	$(\mu x_i - x_i^*) \frac{\delta Z}{\delta x_i}$
$x_1 = \text{HHW}$	2,82	1,9509	0,602	- 1035,29	- 623,24	$3,8843 \cdot 10^5$	- 0,4806	899,774
$x_2 = \text{H/L}$	0,0338	0,0375	0,006	69826,36	418,96	$1,7553 \cdot 10^5$	0,3231	258,36
$x_3 = C_1$	0,1598	0,1196	0,025	-29538,56	- 738,46	$5,4533 \cdot 10^5$	- 0,5695	1187,45
$x_4 = \text{SHS}$	0,9603	0,001	0,6	- 1168,94	- 701,36	$4,919 \cdot 10^5$	- 0,5409	1121,36
$x_5 = \text{DI}$	0,3384	0,35	0,005	23594,44	117,97	$1,3917 \cdot 10^4$	0,0909	37,75
$x_7 = \text{ALFA}$	0,2019	0,1974	0,01	-25712,57	- 257,13	$6.6114 \cdot 10^4$	- 0,1983	114,94
					$\Sigma = \sigma_z^2$	$1,6812 \cdot 10^6$	$\Sigma =$	3619,63

Tabel 2

TABEL VOOR DE NORMALE VERDELING

$-\beta$	kans	$-\beta$	kans	$-\beta$	kans	$-\beta$	kans
0,00	$5,00 \times 10^{-1}$	2,55	$5,45 \times 10^{-3}$	5,05	$2,30 \times 10^{-7}$	7,55	$2,22 \times 10^{-14}$
0,05	$4,80 \times 10^{-1}$	2,60	$4,70 \times 10^{-3}$	5,10	$1,70 \times 10^{-7}$	7,60	$1,51 \times 10^{-14}$
0,10	$4,60 \times 10^{-1}$	2,65	$4,10 \times 10^{-3}$	5,15	$1,35 \times 10^{-7}$	7,65	$1,02 \times 10^{-14}$
0,15	$4,40 \times 10^{-1}$	2,70	$3,50 \times 10^{-3}$	5,20	$1,00 \times 10^{-7}$	7,70	$6,93 \times 10^{-15}$
0,20	$4,20 \times 10^{-1}$	2,75	$3,05 \times 10^{-3}$	5,25	$7,90 \times 10^{-8}$	7,75	$4,68 \times 10^{-15}$
0,25	$4,00 \times 10^{-1}$	2,80	$2,60 \times 10^{-3}$	5,30	$5,80 \times 10^{-8}$	7,80	$3,15 \times 10^{-15}$
0,30	$3,80 \times 10^{-1}$	2,85	$2,25 \times 10^{-3}$	5,35	$4,55 \times 10^{-8}$	7,85	$2,12 \times 10^{-15}$
0,35	$3,60 \times 10^{-1}$	2,90	$1,90 \times 10^{-3}$	5,40	$3,30 \times 10^{-8}$	7,90	$1,42 \times 10^{-15}$
0,40	$3,40 \times 10^{-1}$	2,95	$1,60 \times 10^{-3}$	5,45	$2,60 \times 10^{-8}$	7,95	$9,49 \times 10^{-16}$
0,45	$3,25 \times 10^{-1}$	3,00	$1,30 \times 10^{-3}$	5,50	$1,90 \times 10^{-8}$	8,00	$6,33 \times 10^{-16}$
0,50	$3,10 \times 10^{-1}$	3,05	$1,14 \times 10^{-3}$	5,55	$1,50 \times 10^{-8}$	8,05	$4,21 \times 10^{-16}$
0,55	$2,90 \times 10^{-1}$	3,10	$9,70 \times 10^{-4}$	5,60	$1,10 \times 10^{-8}$	8,10	$2,80 \times 10^{-16}$
0,60	$2,70 \times 10^{-1}$	3,15	$8,20 \times 10^{-4}$	5,65	$8,50 \times 10^{-9}$	8,15	$1,85 \times 10^{-16}$
0,65	$2,55 \times 10^{-1}$	3,20	$6,70 \times 10^{-4}$	5,70	$6,00 \times 10^{-9}$	8,20	$1,22 \times 10^{-16}$
0,70	$2,40 \times 10^{-1}$	3,25	$5,75 \times 10^{-4}$	5,75	$4,65 \times 10^{-9}$	8,25	$8,05 \times 10^{-17}$
0,75	$2,25 \times 10^{-1}$	3,30	$4,80 \times 10^{-4}$	5,80	$3,30 \times 10^{-9}$	8,30	$5,29 \times 10^{-17}$
0,80	$2,10 \times 10^{-1}$	3,35	$4,05 \times 10^{-4}$	5,85	$2,55 \times 10^{-9}$	8,35	$3,47 \times 10^{-17}$
0,85	$1,95 \times 10^{-1}$	3,40	$3,30 \times 10^{-4}$	5,90	$1,80 \times 10^{-9}$	8,40	$2,27 \times 10^{-17}$
0,90	$1,80 \times 10^{-1}$	3,45	$2,80 \times 10^{-4}$	5,95	$1,38 \times 10^{-9}$	8,45	$1,48 \times 10^{-17}$
0,95	$1,70 \times 10^{-1}$	3,50	$2,30 \times 10^{-4}$	6,00	$1,02 \times 10^{-9}$	8,50	$9,63 \times 10^{-18}$
1,00	$1,60 \times 10^{-1}$	3,55	$1,95 \times 10^{-4}$	6,05	$7,45 \times 10^{-10}$	8,55	$6,25 \times 10^{-18}$
1,05	$1,50 \times 10^{-1}$	3,60	$1,60 \times 10^{-4}$	6,10	$5,45 \times 10^{-10}$	8,60	$4,05 \times 10^{-18}$
1,10	$1,40 \times 10^{-1}$	3,65	$1,35 \times 10^{-4}$	6,15	$3,98 \times 10^{-10}$	8,65	$2,62 \times 10^{-18}$
1,15	$1,30 \times 10^{-1}$	3,70	$1,10 \times 10^{-4}$	6,20	$2,90 \times 10^{-10}$	8,70	$1,69 \times 10^{-18}$
1,20	$1,20 \times 10^{-1}$	3,75	$9,10 \times 10^{-5}$	6,25	$2,11 \times 10^{-10}$	8,75	$1,08 \times 10^{-18}$
1,25	$1,10 \times 10^{-1}$	3,80	$7,20 \times 10^{-5}$	6,30	$1,53 \times 10^{-10}$	8,80	$6,95 \times 10^{-19}$
1,30	$1,00 \times 10^{-1}$	3,85	$6,00 \times 10^{-5}$	6,35	$1,11 \times 10^{-10}$	8,85	$4,44 \times 10^{-19}$
1,35	$9,05 \times 10^{-2}$	3,90	$4,80 \times 10^{-5}$	6,40	$7,97 \times 10^{-11}$	8,90	$2,83 \times 10^{-19}$
1,40	$8,10 \times 10^{-2}$	3,95	$4,00 \times 10^{-5}$	6,45	$5,74 \times 10^{-11}$	8,95	$1,80 \times 10^{-19}$
1,45	$7,40 \times 10^{-2}$	4,00	$3,20 \times 10^{-5}$	6,50	$4,12 \times 10^{-11}$	9,00	$1,15 \times 10^{-19}$
1,50	$6,70 \times 10^{-2}$	4,05	$2,65 \times 10^{-5}$	6,55	$2,95 \times 10^{-11}$	9,05	$7,25 \times 10^{-20}$
1,55	$6,10 \times 10^{-2}$	4,10	$2,10 \times 10^{-5}$	6,60	$2,11 \times 10^{-11}$	9,10	$4,58 \times 10^{-20}$
1,60	$5,50 \times 10^{-2}$	4,15	$1,70 \times 10^{-5}$	6,65	$1,50 \times 10^{-11}$	9,15	$2,89 \times 10^{-20}$
1,65	$4,95 \times 10^{-2}$	4,20	$1,30 \times 10^{-5}$	6,70	$1,07 \times 10^{-11}$	9,20	$1,82 \times 10^{-20}$
1,70	$4,50 \times 10^{-2}$	4,25	$1,05 \times 10^{-5}$	6,75	$7,57 \times 10^{-12}$	9,25	$1,14 \times 10^{-20}$
1,75	$4,05 \times 10^{-2}$	4,30	$7,93 \times 10^{-6}$	6,80	$5,35 \times 10^{-12}$	9,30	$7,12 \times 10^{-21}$
1,80	$3,60 \times 10^{-2}$	4,35	$6,38 \times 10^{-6}$	6,85	$3,78 \times 10^{-12}$	9,35	$4,44 \times 10^{-21}$
1,85	$3,25 \times 10^{-2}$	4,40	$4,83 \times 10^{-6}$	6,90	$2,66 \times 10^{-12}$	9,40	$2,77 \times 10^{-21}$
1,90	$2,90 \times 10^{-2}$	4,45	$4,11 \times 10^{-6}$	6,95	$1,87 \times 10^{-12}$	9,45	$1,72 \times 10^{-21}$
1,95	$2,60 \times 10^{-2}$	4,50	$3,40 \times 10^{-6}$	7,00	$1,31 \times 10^{-12}$	9,50	$1,06 \times 10^{-21}$
2,00	$2,30 \times 10^{-2}$	4,55	$2,74 \times 10^{-6}$	7,05	$9,14 \times 10^{-13}$	9,55	$6,57 \times 10^{-22}$
2,05	$2,05 \times 10^{-2}$	4,60	$2,09 \times 10^{-6}$	7,10	$6,37 \times 10^{-13}$	9,60	$4,05 \times 10^{-22}$
2,10	$1,80 \times 10^{-2}$	4,65	$1,70 \times 10^{-6}$	7,15	$4,43 \times 10^{-13}$	9,65	$2,49 \times 10^{-22}$
2,15	$1,60 \times 10^{-2}$	4,70	$1,31 \times 10^{-6}$	7,20	$3,08 \times 10^{-13}$	9,70	$1,53 \times 10^{-22}$
2,20	$1,40 \times 10^{-2}$	4,75	$1,04 \times 10^{-6}$	7,25	$2,13 \times 10^{-13}$	9,75	$9,34 \times 10^{-23}$
2,25	$1,25 \times 10^{-2}$	4,80	$7,75 \times 10^{-7}$	7,30	$1,47 \times 10^{-13}$	9,80	$5,70 \times 10^{-23}$
2,30	$1,10 \times 10^{-2}$	4,85	$6,26 \times 10^{-7}$	7,35	$1,01 \times 10^{-13}$	9,85	$3,47 \times 10^{-23}$
2,35	$9,60 \times 10^{-3}$	4,90	$4,77 \times 10^{-7}$	7,40	$6,95 \times 10^{-14}$	9,90	$2,11 \times 10^{-23}$
2,40	$8,20 \times 10^{-3}$	4,95	$3,83 \times 10^{-7}$	7,45	$4,76 \times 10^{-14}$	9,95	$1,28 \times 10^{-23}$
2,45	$7,20 \times 10^{-3}$	5,00	$2,90 \times 10^{-7}$	7,50	$3,25 \times 10^{-14}$	10,00	$7,72 \times 10^{-24}$
2,50	$6,20 \times 10^{-3}$						

Tabel 3

Literatuur (vervolg)

21. Sridharan, A. Raman, J.
Damping characteristics of soils
Central Board of irrigation and power
Research scheme applied to river valley projects
Technical report nr. 21
New Delhi, December 1977

22. Richart, F.E., Hall, J.R., Woods, R.D.
Vibrations of soils and foundations
Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1970

23. Ahrens, J.P;
Large wave tank tests on rip-rap stability
Technical Memorandum no. 51, May 1975
US Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center

24. Ahrens, J.P., McCartney, B.L.
Wave period effect on the stability of Rip-rap
Proc. Civil Eng. in the Oceans
Univ. of Delaware, June 9-12, 1975

25. Bruun, P., Günbak, A.R.
Hydraulic and friction parameters affecting the stability of
rubble mounds
PIANC Bull., nr. 24, 1976

26. Bruun, P. Günbak, A.R.
Risk criteria in design stability of sloping
Structure in relation to
Symposium on design of rubble mound breakwaters
England, 1977

Literatuur (vervolg)

27. Hudson, R.Y.
Design of quarry-stone cover layers for rubble-mound breakwaters
Research report nr. 2-2, July 1958
US Army Waterways Experiment Station
Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi

28. Hudson, R.Y.
Concrete armor unites for protection against wave attack; report
of Ad Hoc committee on artificial armor units for coastal
structures
US Army Engineer Waterways Experiment Station/Hydr. Lab., 1974

29. McCartney, B.L.;, Ahrens, J.P.
Technical Memorandum no. 55, October 1975
US Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center

30. Iribarren, C.
Formule pour le calcul des digues en enrochements naturels ou
éléments artificiels
XXI Intern. Navig. Congress, Stockholm 1965

31. Svee, R.
Journal of the Waterways and Harbour Division
Proc. of the American Society of Civil engineers, May 1962

32. Svee, R.
XXIste International Navigation Congress, Stockholm 1965

33. Hydraulics Research Station
Mangla Dam West-Pakistan
Report Ex 202, Wallingford, England, 1964

Literatuur (vervolg)

34. Hall, I.V.
Wave test on revetment using machine-produced interlocking blocks
Coastal Engineering Conference, Chapter 60, 1966
35. Wevers, A.
Stabiliteit taludbekleding van gezette steen onder golfaanval
Waterloopkundig Laboratorium, M 1057, 1970
36. Kostense J.K.,
Gobi-blokken als taludbekleding
Waterloopkundig Laboratorium, M 1184, 1973
37. McCartney, B.L., Ahrens, J.P;
Stability of Gobiblock revetment to wave attack
Technical memorandum nr. 55
US Army Corps of Engineers
Coastal Engineering Research Center
Fort Belvoir, October 1975
38. Sollitt, C.K., De Bok, D.H.
Large Scale model tests of placed stone breakwaters
Coastal Engineering Conference, Chapter 148, 1976
39. Führböter, A. e.a.
Modellversuche für Deckwerk aus Betonformsteinen
Leichtweiss-Institut für Wasserbau, Braunschweig
Bericht nr. 266, 1974
40. Führböter, A. e.a.
Response of sea dikes to wave impacts
Coastal Engineering Conference, Chapter 150, 1976
41. Tasma, H.W.
Bepaling van de zwaarte van een gladde betonblokkenglooïng onder
golfaanval
Polytechnisch tijdschrift, Bouwkunde, 33, 1978, nr. 5

Literatuur (vervolg)

42. Hydraulics Research Station
The stability of revetment blocks under wave attack
Report IT 195, Wallingford, England, 1980

43. Berkeley Thorn, R., Roberts, A.G.
Sea defence and coast protection works
London, Thomas Telford, 2nd ed., 1981

44. Kostense, J.K.
Stabiliteit taludbekleding van gezette steen onder golfaanval
Rekenmodel drukvoortplanting onder steenzetting ten gevolge van
golfklappen
Waterloopkundig Laboratorium, M 1075, 1975

45. Kostense, J.K.
Taludbekleding van gezette steen onder golfaanval
Stabiliteit van de bekleding bij verschillende modelschalen
Waterloopkundig Laboratorium, M 1410, deel I, 1980

46. Kostense, J.K.
Taludbekleding van gezette steen onder golfaanval
Invloed van de doorlatendheid van de fundering
Waterloopkundig Laboratorium, M 1410, deel II, 1980

47. Tetra Tech. Inc.
Wave tests of Armorflex block slope protection mats
Technical report TC - 3475, 1981
Prepared for Armortec, Inc. Atlanta, Georgia

48. Boer, K. den, Kenter, C.J.
Taludbekleding van gezette steen, fase 0
Algemene beschrijving van de opzet van het onderzoek, M 1795, deel
1, WL, CO-258900/7, LGM, juli 1982
Waterloopkundig Laboratorium- Laboratorium voor Grondmechanica

Literatuur (vervolg)

49. Boer, K. den
Taludbekleding van gezette steen, fase 0
Hydraulische aspecten, verslag literatuurstudie
M 1795, deel II, WL, CO-255780/43 LGM, juli 1982
Waterloopkundig Laboratorium - Laboratorium voor Grondmechanica
50. Bezuijen, A.
Taludbekleding van gezette steen, fase 0
Grondmechanische aspecten, verslag literatuurstudie
M 1795, deel III, WL, CO-255780/44 LGM, juli 1982
Waterloopkundig Laboratorium - Laboratorium voor Grondmechanica
51. Kenter, C.J., Sellmeyer, J.B., van den Burg, J.C., Bezuijen, A.
Taludbekleding van gezette steen, fase 0
Oriënterende grondmechanische studies, verslag onderzoek
M 1795, deel IV, WL, CO-255780/45 LGM, juli 1982
Waterloopkundig Laboratorium - Laboratorium voor Grondmechanica
52. Boer, K. den
Taludbekleding van gezette steen, fase 0
Kleinschalig onderzoek ten behoeve van oesterdam (meetverslag),
verslag onderzoek
M 1795, deel V, WL, CO-258840/9 LGM, juli 1982
Waterloopkundig Laboratorium - Laboratorium voor Grondmechanica
53. Visser, P.J.
Taludbekleding van gezette steen, fase 1
Grootschalig onderzoek ten behoeve van de Oesterdam (meetverslag),
band A en B, verslag modelonderzoek
M 1795, deel VI, WL, CO-258840/7 LGM, juli 1982
Waterloopkundig Laboratorium - Laboratorium voor Grondmechanica

Literatuur (vervolg)

54. Burger, A.M.
Fundamenteel onderzoek stabiliteit steenzettingen
Grootschalig gidsonderzoek in de Deltagoot
M 1975, deel IX, november 1983, Waterloopkundig Laboratorium
55. Pilarczyk, K.W.
Stability of revetments under wave attack
Delta-Department, Hydraulics division
Governmental Public Works Department
The Hague, the Netherlands, 1982
56. Hannoura, A.A., Barends, F.B.J.
Non-Darcy flow, A state of the art
Proc. of Euromech 143/Delft/2-4 September 1981
57. Visser P.J.
Taludbekleding van gezette steen, fase 1
Bepaling geotechnische eigenschappen van het Oesterdam-model
Verslag onderzoek M 1795/M 1881, deel VII - WL, CO-258901/118 LGM
Waterloopkundig Laboratorium - Laboratorium voor Grondmechanica
58. Grauw, A.F.F. de, Koenders, M.A.
Stand van zaken bij het onderzoek naar granulaire filters
Waterloopkundig Laboratorium - Laboratorium voor Grondmechanica
nota 469, Delft, 1980
59. De Lara, G.C.
Coefficient de perte de charge en milieux paveux basé à
l'équilibre hydrodynamique d'un massif
La Houille Blanche, vol. 2, 1955
60. Venis, M.
Rijkswaterstaat nota W 833, 1965

Literatuur (vervolg)

61. Purday, H.F.P.
Streamline flow
Constable & Company, 1949
62. Nortier, I.W., Velde, H. van der
Hydraulica voor waterbouwkundigen
De Technische Uitgeverij H. Stam N.V.
63. Weide, J. van der, Burger, A.M., Kenter, C.J., Seijffert, J.J.W.
Samenvattingen informatiedag steenzettingen, 20 oktober 1982
Waterloopkundig Laboratorium - Laboratorium voor Grondmechanica
Rijkswaterstaat Deltadienst, Centrum voor Onderzoek Waterkeringen
64. Boer, K. den, Kenter, C.J., Pilarczyk, K.W.
Large scale model tests on placed blocks revetment
Paper presented at Coastal Structures 1983
Washington DC, March 9-11, 1983
65. Ayyar, H.
On the hydromechanics of breakers on steep slopes
Mitteilungen des Franzius Instituts für Grund- und Wasserbau der
Technischen Universität, Hannover, Heft 33, 1969.
66. Waterloopkundig Laboratorium
Invloed van bermen op de oploop van regelmatige golven
Verslag modelonderzoek, M 1130
67. Breth, H., Klüber, T.
Die Standsicherheit durchströmter Steinschüttdämme
Auswertung eines Schadenfalles
Wasserwirtschaft 63 (1973) 3

Literatuur (vervolg)

68. Parkin, A.K., a.o.

Rockfill structures subject to water flow

Journal of the Soil mechanics and Foundation Division

Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Nov. 1966

69. Volker, R.E.

Non-linear flow in porous media by finite elements

Journal of the Hydraulics Division

Proceedings of the American Society of Civil Engineers

APPENDIX 7.1

```
1      PROGRAM BLOK1
C*****GEOMETRISCH 2 - DIMENSIONAAL, FYSISCH NIET-LINEAIR*****
2      REAL PO(0:120,0:10),PN(0:120,0:10),ZZ(0:120),
* Z(0:120,0:11),AK(0:120,0:10),A(0:120),P(0:120),PW(0:120,0:10),
* RE(0:120,0:10),EE(0:9),DN(0:9),C11(0:9),C22(0:9),XI(0:120,0:10)
* ,YI(0:120,0:10)
3      INTEGER MM(0:9),MMM(0:9)

C*****INLEZEN GEGEVENS*****
C      AL = HELLINGSHOEK
C      D = DIKTE STEENZETTING
C      N = AANTAL STENEN
C      DX = AFSTAND TUSSEN TWEE SPLETEN
C      GH = GOLFHOOGTE
C      GL = GOLFLENGTE
C      S = SPLEETBREEDTE
C      IS = AANTAL KNOPEN TUSSEN TWEE SPLETEN
C      MI = AANTAL TOEGESTANE ITERATIES
C      FF = NAGESTREEFDE RELATIEVE AFBREEKFOOT
C      LL = STUURPARAMETER VOOR AANPASSEN DOORLATENDHEDEN
C      BX = DEMPINGSCOEFFICIENT
C      IFFS = AANPASSEN FILTER (1= WEL, 0= NIET)
C      IBKS = AANPASSEB BEKLEDING (1= WEL, 0= NIET)
C      ITF = AANTAL FILTERLAGEN
C      EE(I) = PORIENGETAL FILTER "I"
C      DN(I) = MAATGEVENDE DIAMETER KORRELS FILTER "I"
C      MM(I) = AANTAL ROOSTERLIJNEN IN FILTER "I"

4      DATA AL,D,N,DX,GH,GL,S,IS,MI,FF,LL,BX,IFFS,IBKS
* /14.0,.3,20,.5,.8,60.0,1.5E-3,4,2500,1.0E-6,500,.1,1,1/
5      DATA ITF,EE(0),DN(0),MM(0)
* /1,.4,.007,6/

C*****INITIEREN ARRAYS*****
6      DO 12 I=0,120
7          DO 13 J=0,10
8              AK(I,J)=0.0
9      13      CONTINUE
10     12      CONTINUE
11     DO 14 I=0,120
12         A(I) = 0.0
13     14      CONTINUE
14         L = 0
15         W = 1.5
16         ITF = ITF - 1

C*****UITVOER INLEESGEGEVENS*****
17     WRITE (6,10)
18     10      FORMAT (///,20X,'** INVOERGROOTHEDEN **',//)
19     WRITE (6,15) AL
20     15      FORMAT (1X,'HELLINGSHOEK= ',F5.2)
21     WRITE (6,20) D
22     20      FORMAT (1X,'DIKTE STEENZETTING= ',F4.2)
23     WRITE (6,25) N
24     25      FORMAT (1X,'AANTAL STENEN= ',I3)
25     WRITE (6,30) DX
26     30      FORMAT (1X,'AFSTAND TUSSEN TWEE SPLETEN= ',F5.3)
27     WRITE (6,40) GH
28     40      FORMAT (1X,'GOLFHOOGTE "H"= ',F4.2)
29     WRITE (6,45) GL
30     45      FORMAT (1X,'GOLFLENGTE "L"= ',F6.2)
31     WRITE (6,50) S
32     50      FORMAT (1X,'SPLEETBREEDTE BEKLEDING= ',E8.3)
33     DO 63 I=0,ITF
34         WRITE (6,53) I+1
35     53      FORMAT (/ ,1X,'FILTERNO.= ',I2)
36         WRITE (6,55) EE(I)
37     55      FORMAT (1X,'PORIENGEHALTE FILTER= ',F4.2)
38         WRITE (6,60) DN(I)
39     60      FORMAT (1X,'MAATGEVENDE DIAMETER KORRELS= ',E8.3,/)
40     63      CONTINUE
41         WRITE (6,65) IS
42     65      FORMAT (1X,'AANTAL ROOSTERLIJNEN IN FILTER TUSSEN SPLETEN= ',I2)
43     DO 72 I=0,ITF
44         WRITE (6,70) I+1,MM(I)
45     70      FORMAT (1X,'AANTAL STROKEN IN FILTER ',I2,' = ',I2)
46     72      CONTINUE
47         WRITE (6,77) FF
48     77      FORMAT (1X,'RELATIEVE AFBREEKFOOT= ',E8.3)
```

```

49      WRITE (6,80) LL
50 80    FORMAT (1X,'PARAMETER "LL"= ',I7)
51      WRITE (6,85) BX
52 85    FORMAT (1X,'PARAMETER "BX"= ',F4.2)
53      IF (IFFS.EQ.1) THEN
54        WRITE (6,90)
55 90    FORMAT (1X,'FILTER WORDT AANGEPAST')
56      END IF
57      IF (IBKS.EQ.1) THEN
58        WRITE (6,95)
59 95    FORMAT (1X,'BEKLEDING WORDT AANGEPAST')
60      END IF

C*****VOORBEREIDINGEN*****
61      AAK = S*(-6.16*DX+9.38)
62      M = 0
63      DO 97 I=0,ITF
64        M = M + MM(I)
65        MMM(I) = M
66        C22(I) = DN(I)/1.0E-6
67        C11(I) = 19.6*DN(I)*EE(I)**5
68 97    CONTINUE
69      H = DX/(IS+1)
70      AL = AL*ATAN(1.0)/45.0
71      GW = 9.8E3
72      TA = TAN(AL)

C*****HYDRAULISCHE RANDVOORWAARDEN*****
73      IF (TA.LE..1428571429) THEN
74        FA = .29
75        BE = 3.0
76      END IF
77      IF ((TA.GT..1428571429).AND.(TA.LE..2)) THEN
78        FA = .525*TA+.215
79        BE = 3.0
80      END IF
81      IF ((TA.GT..2).AND.(TA.LE..3333333333)) THEN
82        FA = -.825*TA+.485
83        BE = -7.5*TA+4.5
84      END IF
85      IF (TA.GT..3333333333) THEN
86        FA = .21
87        BE = 2.0
88      END IF
89      N = N*(IS+1)
90      SK = TA/SQRT(GH/GL)
91      BEE = 2.0/BE
92      DB = GH*FA*(TA**(-BEE))*(SK**BEE)
93      YB = DB*LOG(25.265*SQRT(1.0/SK))
94      YB = YB/LOG(10.0)
95      BB = M*H
96      CC1 = 0
97      CC2 = 0
98      DO 98 I=0,ITF
99        CC1 = CC1+C11(I)
100       CC2 = CC2+C22(I)
101 98    CONTINUE
102      CC1 = CC1/(ITF+1)
103      CC2 = CC2/(ITF+1)
104      UF = 4.0/CC2
105      FK = CC1/6.0/UF
106      DL = SIN (AL)*SQRT(FK/AAK*BB*D)
107      R = .137
108      SS = .363
109      HH = .49*GH
110      HF = 0.0
111 99    FL = EXP((HH+D*COS(AL))/(-DL))*((R+2.0*SS*DL/GH)*(EXP(GH/DL)
*-1.0)+1.0-2.0*SS)
112      FR = 1.0-D/DL*COS(AL)*(GH-D*COS(AL)-HH+DL)/DL
113      IF (ABS(FL-FR).GT.(GH/500.0)) THEN
114        HH = HH+GH/500.0
115        GOTO 99
116      END IF
117      HF = HH-GH/2.0
118      HA = DB+HF
C*****UITVOER HYDRAULISCHE RANDVOORWAARDE*****
119      WRITE (6,100)

```

```

120 100  FORMAT (//,1X,"BELASTINGGEVAL: ** BREKENDE GOLF **",//)
121      WRITE (6,105) YB
122 105  FORMAT (1X,"BREKERHOOGTE= ",F6.4)
123      WRITE (6,110) DB
124 110  FORMAT (1X,"BREKERPUNT = ",F6.4)
125      WRITE (6,115) SK
126 115  FORMAT (1X,"KSI          = ",F6.4)
127      WRITE (6,117) HF
128 117  FORMAT (1X,"HOOGTE FREATISCHE LIJN BOVEN WATERNIVEAU= ",F6.4)
129      WRITE (6,118) FK
130 118  FORMAT (1X,"LAMINAIRE DOORLATENDHEID FILTER (GEMIDDELD)= ",F6.4)
131      HSI = N*H*SIN(AL)
132      IF (HA.GT.HSI) THEN
133          WRITE (6,120)
134 120  FORMAT (///,1X,"** HET VERSCHIJNSEL SPEELT ZICH OP DE
        *PLASBERM AF **")
135      STOP
136      END IF

C*****BEPALING LIGGING STENEN*****
137      DO 125 I=N,0,-1
138          Z(I,M+1) = HA+(I-N)*H*SIN(AL)
139          IF (Z(I,M+1).GE.0.0) THEN
140              IPP = I
141              P(I) = 0.0
142          ELSE
143              P(I) = (ABS(Z(I,M+1))+YB)*GW
144          END IF
145 125  CONTINUE

C*****INITIALISATIE STIJGHOOGTES*****
146      DO 135 I=0,N
147          DO 130 J=0,M
148              Z(I,J) = Z(I,M+1)-D*COS(AL)-(M-J)*H*COS(AL)
149              PO(I,J) = HA
150              PN(I,J) = HA
151 130  CONTINUE
152 135  CONTINUE

C*****STROMINGSTOESTAND IN DE SPLETEN*****
153      IF (S.LT.6E-3) THEN
154          SNN = 1.0-SQRT((3.6E-5-(.006-S)**2)/1.8E-4)
155      END IF
156      IF (S.GE.6E-3) THEN
157          SNN = .552786
158      END IF

C*****1-DIMENSIONALE SCHATTING*****
159      IF (IBKS.NE.1) THEN
160          DO 500 I=0,N-1,IS+1
161              A(I) = AAK*DX
162 500  CONTINUE
163          GO TO 510
164      END IF
165      DO 520 I=0,N-1,IS+1
166          PP = (PN(I,M)-(Z(I,M+1)+P(I)/GW))
167          A(I) = AAK*DX*(ABS(PP)/D)**(SNN-1)
168 520  CONTINUE
169 510  FO = 0.0
170      DO 530 I=0,N-1,IS+1
171          AA = A(I)*DX/FK/D/BB
172          IF (I.EQ.0) GO TO 540
173          IF (I.LT.IPP) GO TO 550
174          IF (I.GE.IPP) THEN
175              ZZ(I) = Z(I,M+1)
176              R = -AA*ZZ(I)-(PN(I-IS-1,M)-(2+AA)*PO(I,M)+PO(I+IS+1,M))
177              PN(I,M) = PO(I,M)-W/(2+AA)*R
178              CALL FOUT (FO,PN,PO,I,M)
179              GO TO 530
180          END IF
181 540  ZZ(I) = Z(I,M+1)+P(I)/GW
182          R = -AA*ZZ(I)-((-1-AA)*PO(I,M)+PO(I+IS+1,M))
183          PN(I,M) = PO(I,M)-W/(1+AA)*R
184          CALL FOUT (FO,PN,PO,I,M)
185          GO TO 530
186 550  ZZ(I) = Z(I,M+1)+P(I)/GW
187          R = -AA*ZZ(I)-(PN(I-IS-1,M)-(2+AA)*PO(I,M)+PO(I+IS+1,M))
188          PN(I,M) = PO(I,M)-W/(2+AA)*R
189          CALL FOUT (FO,PN,PO,I,M)
190 530  CONTINUE

```



```
191      IF ((FO.LT.(FF*LL)).AND.(IRKS.EQ.1)) THEN
192          DO 560 I=0,N-1,IS+1
193              PP = (PN(I,M)-(Z(I,M+1)+P(I)/GW))
194              A(I) = AAK*DX*(ABS(PP)/D)**(SNN-1)
195      560      CONTINUE
196      END IF
197      DO 570 I=0,N-1,IS+1
198          PQ(I,M) = PN(I,M)
199      570      CONTINUE
200      IF (L.GT.MI) THEN
201          WRITE (6,580)
202      580      FORMAT (///,1X,'*** NIET AAN AFBREEKFOUT VOLDAAN ***')
203          GO TO 590
204      END IF
205      L = L+1
206      IF (FO.GT.FF) GO TO 510
207      590      IF (IS.EQ.0) GO TO 620
208          DO 600 I=0,N-1,IS+1
209              DS = (PN(I+IS+1,M)-PN(I,M))/(IS+1)
210              DO 610 J=1,IS
211                  PN(I+J,M) = PN(I,M)+J*DS
212      610      CONTINUE
213      600      CONTINUE

C*****BEPALING BEGINSCHATTING*****
214      620      AX = BX
215              BX = 1000000.0
216              CF = 6.0
217              L = 0
218              IC = 1
219              CALL DOORL (N,M,IC,PN,H,IS,Z,D,A,IPP,P,AK,C22,C11,UF,BX,RE,GH
*,SNN,DX,AAK,CF,IRKS,IFFS,MMM,ITP,XI,YI)
220              IC = 0
221              BX = AX

C*****BEREKENING*****
222      235      FO = 0.0
223              DO 210 I=0,N-1
224              DO 200 J=0,M

C*****SCANNEN VAN DE PLAATS*****

C*****IN HET MIDDEN VAN HET FILTER*****
225      IF ((J.NE.0).AND.(I.NE.0).AND.(J.NE.M)) GO TO 140
226      TP = I/(IS+1)
227      ITP = INT(TP)

C*****RAND 2*****
228      IF ((J.EQ.0).AND.(I.NE.0)) GO TO 150

C*****RAND 4*****
229      IF((J.EQ.M).AND.(I.GE.IPP).AND.(ITP.EQ.TP)) GO TO 155

C*****RAND 5*****
230      IF ((J.EQ.M).AND.(I.NE.0).AND.(I.LT.IPP).AND.(ITP.EQ.TP))
*GO TO 160

C*****RAND 3*****
231      IF ((I.EQ.0).AND.(J.NE.0).AND.(J.NE.M)) GO TO 165

C*****TUSSEN TWEË SPLETEN*****
232      IF ((J.EQ.M).AND.(ITP.NE.TP).AND.(I.NE.0)) GO TO 170

C*****PUNT 1*****
233      IF((I.EQ.0).AND.(J.EQ.0)) GO TO 175

C*****PUNT 3*****
234      IF ((I.EQ.0).AND.(J.EQ.M)) GO TO 180

C*****BEREKENING STIJGHODGTES*****
C*****IN HET FILTER*****

235      140      R = -((-AK(I+1,J)+AK(I-1,J)+4*AK(I,J))/4*PN(I-1,J)+(-AK(I,J+1)
*+AK(I,J-1)+4*AK(I,J))/4*PN(I,J-1)-4*AK(I,J)*PO(I,J)+(AK(I+1,J)
*-AK(I-1,J)+4*AK(I,J))/4*PO(I+1,J)+(AK(I,J+1)-AK(I,J-1)+4*AK(I,J)
*)/4*PO(I,J+1))
236      PN(I,J) = PO(I,J)+W/(-4*AK(I,J))*R
237      CALL FOUT (FO,PN,PQ,I,J)
238      GO TO 200
```

```

C*****RAND 2*****
239 150 R = -((-AK(I+1,0)+AK(I-1,0)+4*AK(I,0))/4*PN(I-1,0)-4*AK(I,0)*
      *PO(I,0)+(AK(I+1,0)-AK(I-1,0)+4*AK(I,0))/4*PO(I+1,0)+2*AK(I,0)*
      *PO(I,1))
240      PN(I,0) = PO(I,0)+W/(-4*AK(I,0))*R
241      CALL FOUT (FO,PN,PO,I,J)
242      GO TO 200

```

```

C*****RAND 4*****
243 155 ZZ(I) = Z(I,M+1)
244 145 PR = -(-2*AK(I,M-1)+6*AK(I,M))/2*A(I)/AK(I,M)/D
245      R = -((-AK(I+1,M)+AK(I-1,M)+4*AK(I,M))/4*PN(I-1,M)+2*AK(I,M)*
      *PN(I,M-1)+(-4*AK(I,M)+PR)*PO(I,M)+(AK(I+1,M)-AK(I-1,M)+4*AK(I,M))
      */4*PO(I+1,M))+PR*ZZ(I)
246      PN(I,M) = PO(I,M)+W/(-4*AK(I,M)+PR)*R
247      CALL FOUT (FO,PN,PO,I,J)
248      GOTO 200

```

```

C*****RAND 5*****
249 160 ZZ(I) = Z(I,M+1)+P(I)/GW
250      GO TO 145

```

```

C*****RAND 3*****
251 165 R = -((-AK(0,J+1)+AK(0,J-1)+4*AK(0,J))/4*PN(0,J-1)-4*AK(0,J)*PO
      *(0,J)+2*AK(0,J)*PO(1,J)+(AK(0,J+1)-AK(0,J-1)+4*AK(0,J))/4*PO
      *(0,J+1))
252      PN(0,J) = PO(0,J)+W/(-4*AK(0,J))*R
253      CALL FOUT (FO,PN,PO,I,J)
254      GO TO 200

```

```

C*****TUSSEN TWE SPLETEN*****
255 170 R = -((-AK(I+1,M)+AK(I-1,M)+4*AK(I,M))/4*PN(I-1,M)+2*AK(I,M)*PN
      *(I,M-1)-4*AK(I,M)*PO(I,M)+(AK(I+1,M)-AK(I-1,M)+4*AK(I,M))/4*PO
      *(I+1,M))
256      PN(I,M) = PO(I,M)-W/(4*AK(I,M))*R
257      CALL FOUT (FO,PN,PO,I,J)
258      GO TO 200

```

```

C*****PUNT 1*****
259 175 R = -(-4*PO(0,0)+2*PO(1,0)+2*PO(0,1))
260      PN(0,0) = PO(0,0)-W/4*R
261      CALL FOUT (FO,PN,PO,I,J)
262      GO TO 200

```

```

C*****PUNT 3*****
263 180 ZZ(0) = Z(0,M+1)+P(0)/GW
264      PR = -(-2*AK(0,M-1)+6*AK(0,M))/2*A(I)/AK(0,M)/D
265      R = -(2*AK(0,M)*PO(1,M)+2*AK(0,M)*PN(0,M-1)+(-4*AK(0,M)+PR)*PO
      *(0,M))+PR*ZZ(0)
266      PN(0,M) = PO(0,M)+W/(-4*AK(0,M)+PR)*R
267      CALL FOUT (FO,PN,PO,I,J)

```

```

268 200 CONTINUE
269 210 CONTINUE

270      DO 220 I=0,N-1
271      DO 215 J=0,M
272      PO(I,J) = PN(I,J)
273 215 CONTINUE
274 220 CONTINUE

```

```

C*****FOUT CONTROLES*****
275      IF (L.GT.MI) THEN
276      WRITE (6,225)
277 225  FORMAT (//,1X,'*** NIET AAN AFBREEKFOUT VOLDAAN ***')
278      GO TO 410
279      END IF
280      FFL = FF*LL
281      L = L+1
282      IF ((IFFS.NE.1).AND.(IBKS.NE.1)) GO TO 227
283      IF (FO.GT.FFL) GO TO 235
284      CALL DOORL (N,M,IC,PM,H,IS,Z,O,A,IPP,P,AK,C22,C11,UF,BX,RE,GW
      *,SIN,DX,AAK,CF,IBKS,IFFS,MMM,ITF,XI,YI)
285 227 IF (FO.GT.FF) GO TO 235

```

```

C*****UITVOER VAN HET PROBLEEM*****
286 410 WRITE (6,240)
287 240 FORMAT (///,11X,'***** UITVOER *****',/)
288 WRITE (6,245) L
289 245 FORMAT (1X,'AANTAL ITERATIES= ',I4)
290 WRITE (6,250) FO
291 250 FORMAT (1X,'GROOTSTE RELATIEVE FOUT= ',F9.4)
292 WRITE (6,255)
293 255 FORMAT (///,1X,'STIJGHOGTES',/)
294 WRITE (6,260)
295 260 FORMAT (5X,'0',10X,'1',10X,'2',10X,'3',10X,'4',10X,'5',10X,'6'
*,10X,'7',10X,'8',10X,'9',10X,'10')

296 DO 265 I=0,N
297 WRITE (6,270) I,(PN(I,J),J=0,M)
298 265 CONTINUE
299 270 FORMAT (1X,I3,1X,10(E10.4,1X))
300 WRITE (6,275)
301 275 FORMAT (///1X,'WATERDRUKKEN',/)
302 WRITE (6,260)
303 M1 = M+1
304 DO 285 I=0,N
305 DO 280 J=0,M+1
306 IF (J.EQ.M1) THEN
307 PW(I,J) = P(I)
308 GO TO 285
309 END IF
310 PW(I,J) = (PN(I,J)-Z(I,J))*GW
311 280 CONTINUE
312 285 CONTINUE
313 DO 295 I=0,N
314 WRITE (6,290) I,(PW(I,J),J=0,M+1)
315 290 FORMAT (1X,I3,1X,11(E10.5,1X))
316 295 CONTINUE
317 WRITE (6,300)
318 300 FORMAT (///,1X,'DOORLATENDHEIDSCOEFFICIENTEN SPLETEN TUSSEN BLOKKE
* N: ',/)
319 DO 310 I=0,N-1,IS+1
320 WRITE (6,305) I,A(I)
321 305 FORMAT (1X,'A(',I3,')= ',E9.4)
322 310 CONTINUE
323 WRITE (6,315)
324 315 FORMAT (///,1X,'DOORLATENDHEIDSCOEFFICIENTEN IN FILTER:',/)

325 WRITE (6,260)
326 DO 320 I=0,N
327 WRITE (6,270) I,(AK(I,J),J=0,M)
328 320 CONTINUE
329 WRITE (6,325) SNN
330 325 FORMAT (///,1X,'STROMINGSTOESTAND IN SPLETEN: N= ',F6.4,///)
331 WRITE (6,330)
332 330 FORMAT (1X,'GETAL VAN REYNOLDS (RE) IN FILTER: ',/,
*1X,'RE <= 4 -----> LAMINAIR',/,
*1X,'4 > RE < 576 -----> OVERGANGSGEBIED',/,
*1X,'RE >= 576 -----> TURBULENT',/)
333 WRITE (6,260)
334 DO 335 I=0,N
335 WRITE (6,270) I,(RE(I,J),J=0,M)
336 335 CONTINUE
337 WRITE (6,331)
338 331 FORMAT (///,1X,'VERHANGEN IN X-RICHTING:',/)
339 WRITE (6,260)
340 DO 332 I=0,N
341 WRITE (6,270) I,(XI(I,J),J=0,M)
342 332 CONTINUE
343 WRITE (6,333)
344 333 FORMAT (///,1X,'VERHANGEN IN Y-RICHTING:',/)
345 WRITE (6,260)
346 DO 334 I=0,N
347 WRITE (6,270) I,(YI(I,J),J=0,M)
348 334 CONTINUE
349 WRITE (6,340)
350 340 FORMAT (///,1X,'DERIETEN DOOR SPLETEN:',/)
351 DO 350 I=0,N-1,IS+1
352 Q = A(I)*(PN(I,M)-Z(I,M+1)-P(I)/GW)/O
353 WRITE (6,345) I,Q
354 345 FORMAT (1X,'Q(',I3,')= ',E10.4)
355 350 CONTINUE
356 WRITE (6,360)
357 360 FORMAT(///,'*** EINDE BEREKENING ***')
358 STOP
359 END

```

```
C*****BEPALING GROOTSTE FOUT IN STIJGHOOGTES*****
1  SUBROUTINE FOUT (FO,PN,PO,I,J)
2  REAL PO(0:120,0:10),PN(0:120,0:10)

3  ER = ABS((PN(I,J)-PO(I,J))/PN(I,J))
4  IF (ER.GT.FO) THEN
5    FO = ER
6  END IF

7  RETURN
8  END

C*****BEPALING DOORLATENDHEIDSCOEFFICIENTEN*****
1  SUBROUTINE DOORL (N,M,IC,PN,H,IS,Z,D,A,IPP,P,AK,C22,C11,UF,BX,RE,
  *GW,SNN,DX,AAK,CF,IBKS,IFFS,MMM,ITF,XI,YI)

2  REAL Z(0:120,0:11),A(0:120),P(0:120),AK(0:120,0:10)
  *,RE(0:120,0:10),PN(0:120,0:10),ZZ(0:120),C11(0:9),C22(0:9)
  *,XI(0:120,0:11),YI(0:120,0:10)
3  INTEGER MMM(0:9)

4  FO1 = 1E10
C*****EERSTE MAAL EN INDIEN INGESTELD OVERSLAAN*****
5  IF ((IFFS.NE.1).AND.(IC.NE.1)) GOTO 385

6  DO 370 I = 0,N
7  DO 365 J = 0,M
8  ICODE = 0
9  DO 357 II=0,ITF
10  IF (IC.EQ.1) THEN
11    UF = 4.0/C22(II)
12  END IF
13  IF ((II.EQ.ITF).AND.(J.EQ.M)) THEN
14    C1 = C11(ITF)
15    C2 = C22(ITF)
16    GO TO 357
17  END IF
18  IF ((J.EQ.MMM(II)).AND.(IC.NE.1)) THEN
19    C1 = (C11(II)+C11(II+1))/2.0
20    C2 = (C22(II)+C22(II+1))/2.0
21    ICODE = 1
22    GO TO 357
23  END IF
24  IF((J.LT.MMM(II)).AND.(IC.NE.1)) THEN
25    C1 = C11(II)
26    C2 = C22(II)
27    ICODE = 1
28  END IF
29 357  CONTINUE

C*****EERSTE MAAL OVERSLAAN*****
30  IF (IC.EQ.1) GO TO 380
C*****DIREKT GESTUURD NAAR HART VAN HET FILTER*****
31  IF ((I.NE.0).AND.(J.NE.0).AND.(J.NE.M).AND.(I.NE.N)) GO TO 355

C*****VERHANGEN IN FILTER*****

C*****RAND 1*****
32  IF (I.EQ.N) THEN
33    XI(I,J) = (PN(N,J)-PN(N-1,J))/H
34    YI(I,J) = 0.0
35    GO TO 360
36  END IF

C*****RAND 3*****
37  IF ((I.EQ.0).AND.(J.NE.0).AND.(J.NE.M)) THEN
38    XI(I,J) = 0.0
39    YI(I,J) = (PN(0,J+1)-PN(0,J-1))/2/H
40    GO TO 360
41  END IF

C*****RAND 2*****
42  IF ((J.EQ.0).AND.(I.NE.0)) THEN
43    XI(I,J) = (PN(I+1,0)-PN(I-1,0))/2/H
44    YI(I,J) = 0.0
45    GO TO 360
46  END IF
```

```
C*****TUSSEN TWE E SPLETEN*****
47      TP = I/(IS+1.)
48      ITP = INT (TP)
49      IF ((J.EQ.M).AND.(ITP.NE.TP).AND.(I.NE.0)) THEN
50          XI(I,J) = (PN(I+1,M)-PN(I-1,M))/2/H
51          YI(I,J) = 0.0
52          GO TO 360
53      END IF

C*****RAND 4*****
54      IF ((J.EQ.M).AND.(I.GE.IPP).AND.(ITP.EQ.TP)) THEN
55          ZZ(I) = Z(I,M+1)
56          XI(I,J) = (PN(I+1,M)-PN(I-1,M))/2/H
57          YI(I,J) = -A(I)/AK(I,M)/H*(PN(I,M)-ZZ(I))/D
58          GO TO 360
59      END IF

C*****RAND 5*****
60      IF ((J.EQ.M).AND.(I.NE.0).AND.(I.LT.IPP).AND.(ITP.EQ.TP))
61      *THEN
62          ZZ(I) = Z(I,M+1)+P(I)/GW
63          XI(I,J) = (PN(I+1,M)-PN(I-1,M))/2/H
64          YI(I,J) = -A(I)/AK(I,M)/H*(PN(I,M)-ZZ(I))/D
65      END IF

C*****PUNT 1*****
66      IF ((I.EQ.0).AND.(J.EQ.0)) THEN
67          XI(I,J) = 0.0
68          YI(I,J) = 0.0
69          GO TO 360
70      END IF

C*****PUNT 3*****
71      IF ((I.EQ.0).AND.(J.EQ.M)) THEN
72          ZZ(I) = Z(I,M+1) + P(I)/GW
73          XI(I,J) = 0.0
74          YI(I,J) = -A(I)/AK(I,M)/H*(PN(I,M)-ZZ(I))/D
75          GO TO 360
76      END IF

C*****IN HET FILTER*****
77      355 XI(I,J) = (PN(I+1,J)-PN(I-1,J))/2/H
78          YI(I,J) = (PN(I,J+1)-PN(I,J-1))/2/H
79          XXYY = SQRT(XI(I,J)*XI(I,J)+YI(I,J)*YI(I,J))
C*****BEGRENZING*****
80      IF (XXYY.GT.5.0) THEN
81          XXYY = 5.0
82      END IF
83      IF (XXYY.LT.1E-10) THEN
84          XXYY = 1E-10
85      END IF
86      UF = AK(I,J)*XXYY
87      RE(I,J) = C2*UF

C*****LAMINAIRE STROMING*****
88      IF (RE(I,J).LE.4.0) THEN
89          CF = 576.0/(C2*C2*C1*XXYY)
90      END IF

C*****OVERGANGSGERIED*****
91      IF ((RE(I,J).GT.4.0).AND.(RE(I,J).LT.576.0)) THEN
92          CF = (20736.0/(C2*C2*C1*XXYY))**.333333
93      END IF

C*****TURBULENT*****
94      IF (RE(I,J).GE.576.0) THEN
95          CF = .5
96      END IF

C*****WEERSTANDSCOEFFICIENTEN*****
97      380 AK(I,J) = (C1/CF/UF*BX+AK(I,J))/(BX+1.0)
98          IF (AK(I,J).GT.F01) THEN
99              AK(I,J) = F01
100     END IF

101     365 CONTINUE
102     370 CONTINUE
103     IF (IC.EQ.1) THEN
104         F01 = AK(0,0)
105     END IF
106     385 IF ((IBKS.NE.1).AND.(IC.NE.1)) GO TO 400
```

```

C*****DOORLATENDHEID BEKLEDING*****
107 DO 375 I=0,N-1,IS+1
108 PV = (PNCI,M)-(Z(I,M+1)+P(I)/GW))
109 A(I) = (AAK*DX*((ABS(PV)/D)**(SNN-1))*BX+A(I))/(BX+1.0)
110 IF (IC.EQ.1) THEN
111 A(I) = AAK*DX
112 END IF
113 375 CONTINUE

114 400 RETURN
115 END

```

*** INVOERGRROOTHEDEN ***

HELLINGSHOEK= 14.00
DIKTE STEENZETTING= 0.30
AANTAL STENEN= 20
AFSTAND TUSSEN TWEE SPLETEN= 0.500
GOLPHOOGTE "H"= 0.80
GOLFLENGTE "L"= 60.00
SPLEETBREEDTE BEKLEDING= .150E-02

FILTERNO.= 1
PORIENGEMHALTE FILTER= 0.40
MAATGEVENDE DIAMETER KORRELS= .700E-02

AANTAL ROOSTERLIJNEN IN FILTER TUSSEN SPLETEN= 4
AANTAL STROKEN IN FILTER 1 = 6
RELATIEVE AFBREEKFOUT= .100E-05
PARAMETER "LL"= 500
PARAMETER "BX"= 0.10
FILTER WORDT Aangepast
BEKLEDING WORDT Aangepast

BELASTINGGEVAL: *** BREKENDE GOLF ***

BREKERHOOGTE= 1.4253
BREKERPUNT = 1.1537
KSI = 2.1592
HOOGTE FREATISCHE LIJN BOVEN WATERNIVEAU= 0.1312
LAMINAIRE DOORLATENDHEID FILTER (GEMIDDELD)= 0.4098

*** NIET AAN AFBREEKFOUT VOLDAAN ***

*** UITVOER ***

AANTAL ITERATIES= 2501
GROOTSTE RELATIEVE FOUT= .2027E-05

STIJGHOOGTES

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1417E+01	0.1417E+01	
1	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1417E+01	
2	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	
3	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	
4	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	
5	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1417E+01	
6	0.1415E+01	0.1415E+01	0.1415E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	
7	0.1415E+01	0.1415E+01	0.1415E+01	0.1415E+01	0.1415E+01	0.1416E+01	0.1416E+01	
8	0.1415E+01	0.1415E+01	0.1415E+01	0.1415E+01	0.1415E+01	0.1415E+01	0.1415E+01	
9	0.1414E+01	0.1414E+01	0.1415E+01	0.1415E+01	0.1415E+01	0.1415E+01	0.1415E+01	
10	0.1414E+01	0.1414E+01	0.1414E+01	0.1414E+01	0.1414E+01	0.1415E+01	0.1416E+01	
11	0.1413E+01	0.1413E+01	0.1414E+01	0.1414E+01	0.1414E+01	0.1414E+01	0.1414E+01	
12	0.1413E+01	0.1413E+01	0.1413E+01	0.1413E+01	0.1413E+01	0.1413E+01	0.1413E+01	
13	0.1412E+01	0.1412E+01	0.1412E+01	0.1412E+01	0.1413E+01	0.1413E+01	0.1413E+01	
14	0.1411E+01	0.1411E+01	0.1411E+01	0.1411E+01	0.1412E+01	0.1412E+01	0.1413E+01	
15	0.1410E+01	0.1410E+01	0.1410E+01	0.1411E+01	0.1411E+01	0.1412E+01	0.1413E+01	

WATERDRUKKEN

0	1	2	3	4	5	6	7
0 .33551E+05	.32600E+05	.31650E+05	.30700E+05	.29750E+05	.28802E+05	.27859E+05	.25084E+05
1 .33314E+05	.32363E+05	.31412E+05	.30462E+05	.29513E+05	.28563E+05	.27614E+05	.24847E+05
2 .33076E+05	.32125E+05	.31175E+05	.30225E+05	.29275E+05	.28325E+05	.27375E+05	.24610E+05
3 .32838E+05	.31887E+05	.30937E+05	.29987E+05	.29037E+05	.28088E+05	.27137E+05	.24373E+05
4 .32600E+05	.31649E+05	.30699E+05	.29749E+05	.28799E+05	.27850E+05	.26901E+05	.24135E+05
5 .32361E+05	.31411E+05	.30460E+05	.29510E+05	.28561E+05	.27613E+05	.26671E+05	.23898E+05
6 .32122E+05	.31172E+05	.30221E+05	.29271E+05	.28322E+05	.27373E+05	.26423E+05	.23661E+05
7 .31883E+05	.30932E+05	.29982E+05	.29032E+05	.28082E+05	.27132E+05	.26182E+05	.23424E+05
8 .31642E+05	.30692E+05	.29742E+05	.28792E+05	.27842E+05	.26893E+05	.25943E+05	.23187E+05
9 .31401E+05	.30451E+05	.29501E+05	.28551E+05	.27602E+05	.26654E+05	.25706E+05	.22950E+05
10 .31160E+05	.30209E+05	.29259E+05	.28310E+05	.27361E+05	.26415E+05	.25475E+05	.22713E+05
11 .30917E+05	.29967E+05	.29017E+05	.28067E+05	.27118E+05	.26170E+05	.25222E+05	.22476E+05
12 .30674E+05	.29723E+05	.28773E+05	.27824E+05	.26875E+05	.25926E+05	.24976E+05	.22239E+05
13 .30429E+05	.29479E+05	.28529E+05	.27580E+05	.26632E+05	.25683E+05	.24734E+05	.22002E+05
14 .30184E+05	.29233E+05	.28284E+05	.27335E+05	.26388E+05	.25441E+05	.24494E+05	.21765E+05
15 .29937E+05	.28987E+05	.28037E+05	.27089E+05	.26142E+05	.25198E+05	.24263E+05	.21528E+05
16 .29689E+05	.28738E+05	.27789E+05	.26840E+05	.25893E+05	.24946E+05	.23999E+05	.21290E+05
17 .29439E+05	.28488E+05	.27539E+05	.26591E+05	.25643E+05	.24695E+05	.23746E+05	.21053E+05
18 .29187E+05	.28237E+05	.27288E+05	.26340E+05	.25393E+05	.24447E+05	.23497E+05	.20816E+05
19 .28933E+05	.27983E+05	.27035E+05	.26088E+05	.25143E+05	.24200E+05	.23256E+05	.20579E+05
20 .28677E+05	.27727E+05	.26779E+05	.25833E+05	.24889E+05	.23950E+05	.23027E+05	.20342E+05
21 .28419E+05	.27469E+05	.26520E+05	.25574E+05	.24629E+05	.23685E+05	.22741E+05	.20105E+05
22 .28157E+05	.27207E+05	.26259E+05	.25313E+05	.24368E+05	.23422E+05	.22474E+05	.19868E+05
23 .27893E+05	.26943E+05	.25996E+05	.25051E+05	.24107E+05	.23164E+05	.22215E+05	.19631E+05
24 .27625E+05	.26675E+05	.25729E+05	.24785E+05	.23845E+05	.22909E+05	.21969E+05	.19394E+05
25 .27352E+05	.26403E+05	.25457E+05	.24515E+05	.23577E+05	.22648E+05	.21745E+05	.19157E+05
26 .27076E+05	.26126E+05	.25180E+05	.24238E+05	.23298E+05	.22360E+05	.21420E+05	.18920E+05
27 .26794E+05	.25845E+05	.24899E+05	.23957E+05	.23016E+05	.22074E+05	.21127E+05	.18683E+05
28 .26506E+05	.25557E+05	.24613E+05	.23673E+05	.22735E+05	.21797E+05	.20850E+05	.18445E+05
29 .26212E+05	.25264E+05	.24321E+05	.23383E+05	.22453E+05	.21529E+05	.20597E+05	.18208E+05
30 .25910E+05	.24962E+05	.24020E+05	.23085E+05	.22157E+05	.21247E+05	.20322E+05	.17971E+05
31 .25600E+05	.24652E+05	.23710E+05	.22774E+05	.21843E+05	.20916E+05	.19986E+05	.17734E+05
32 .25280E+05	.24333E+05	.23392E+05	.22457E+05	.21524E+05	.20590E+05	.19646E+05	.17497E+05
33 .24951E+05	.24004E+05	.23065E+05	.22133E+05	.21207E+05	.20280E+05	.19335E+05	.17260E+05
34 .24609E+05	.23663E+05	.22726E+05	.21800E+05	.20886E+05	.19986E+05	.19069E+05	.17023E+05
35 .24253E+05	.23307E+05	.22373E+05	.21450E+05	.20542E+05	.19665E+05	.18871E+05	.16786E+05
36 .23881E+05	.22936E+05	.22002E+05	.21078E+05	.20163E+05	.19255E+05	.18343E+05	.16549E+05
37 .23493E+05	.22548E+05	.21615E+05	.20693E+05	.19776E+05	.18856E+05	.17918E+05	.16312E+05
38 .23086E+05	.22142E+05	.21213E+05	.20297E+05	.19392E+05	.18484E+05	.17544E+05	.16075E+05
39 .22657E+05	.21714E+05	.20790E+05	.19884E+05	.19001E+05	.18142E+05	.17254E+05	.15838E+05
40 .22202E+05	.21261E+05	.20339E+05	.19438E+05	.18567E+05	.17750E+05	.17089E+05	.15600E+05
41 .21719E+05	.20778E+05	.19856E+05	.18954E+05	.18086E+05	.17195E+05	.16316E+05	.15363E+05
42 .21206E+05	.20266E+05	.19346E+05	.18444E+05	.17554E+05	.16658E+05	.15730E+05	.15126E+05
43 .20662E+05	.19722E+05	.18807E+05	.17916E+05	.17043E+05	.16169E+05	.15237E+05	.14889E+05
44 .20082E+05	.19144E+05	.18233E+05	.17354E+05	.16518E+05	.15734E+05	.14900E+05	.14652E+05
45 .19464E+05	.18525E+05	.17611E+05	.16732E+05	.15907E+05	.15197E+05	.14798E+05	.14415E+05
46 .18813E+05	.17870E+05	.16943E+05	.16037E+05	.15162E+05	.14324E+05	.13500E+05	.14178E+05
47 .18140E+05	.17190E+05	.16244E+05	.15303E+05	.14369E+05	.13442E+05	.12510E+05	.00000E+00
48 .17462E+05	.16506E+05	.15539E+05	.14559E+05	.13566E+05	.12565E+05	.11579E+05	.00000E+00
49 .16801E+05	.15838E+05	.14851E+05	.13833E+05	.12773E+05	.11663E+05	.10528E+05	.00000E+00
50 .16174E+05	.15207E+05	.14206E+05	.13158E+05	.12037E+05	.10751E+05	.89181E+04	.00000E+00
51 .15595E+05	.14627E+05	.13623E+05	.12577E+05	.11479E+05	.10329E+05	.91813E+04	.00000E+00
52 .15055E+05	.14099E+05	.13101E+05	.12071E+05	.11013E+05	.99477E+04	.89312E+04	.00000E+00
53 .14583E+05	.13618E+05	.12627E+05	.11610E+05	.10575E+05	.95422E+04	.85511E+04	.00000E+00
54 .14142E+05	.13179E+05	.12191E+05	.11178E+05	.10141E+05	.90829E+04	.80206E+04	.00000E+00
55 .13739E+05	.12777E+05	.11791E+05	.10778E+05	.97274E+04	.85893E+04	.71188E+04	.00000E+00
56 .13371E+05	.12410E+05	.11428E+05	.10424E+05	.93970E+04	.83548E+04	.73376E+04	.00000E+00
57 .13034E+05	.12074E+05	.11098E+05	.10105E+05	.90986E+04	.80912E+04	.71165E+04	.00000E+00
58 .12721E+05	.11764E+05	.10792E+05	.98067E+04	.88113E+04	.78168E+04	.68482E+04	.00000E+00
59 .12431E+05	.11474E+05	.10505E+05	.95225E+04	.85244E+04	.75095E+04	.64864E+04	.00000E+00
60 .12158E+05	.11203E+05	.10235E+05	.92532E+04	.82466E+04	.71796E+04	.58728E+04	.00000E+00
61 .11902E+05	.10947E+05	.99819E+04	.90031E+04	.80090E+04	.69985E+04	.59784E+04	.00000E+00
62 .11658E+05	.10704E+05	.97397E+04	.87645E+04	.77807E+04	.67976E+04	.58349E+04	.00000E+00
63 .11422E+05	.10468E+05	.95047E+04	.85315E+04	.75503E+04	.65699E+04	.56096E+04	.00000E+00
64 .11193E+05	.10239E+05	.92768E+04	.83041E+04	.73210E+04	.63338E+04	.53654E+04	.00000E+00
65 .10975E+05	.10021E+05	.90584E+04	.80857E+04	.70971E+04	.60712E+04	.48953E+04	.00000E+00
66 .10768E+05	.98137E+04	.88516E+04	.78811E+04	.69008E+04	.59092E+04	.49112E+04	.00000E+00
67 .10572E+05	.96178E+04	.86558E+04	.76866E+04	.67114E+04	.57351E+04	.47698E+04	.00000E+00
68 .10388E+05	.94331E+04	.84703E+04	.74998E+04	.65227E+04	.55442E+04	.45779E+04	.00000E+00
69 .10215E+05	.92602E+04	.82964E+04	.73232E+04	.63389E+04	.53440E+04	.43523E+04	.00000E+00
70 .10055E+05	.91002E+04	.81363E+04	.71622E+04	.61732E+04	.51536E+04	.40343E+04	.00000E+00
71 .99079E+04	.89532E+04	.79906E+04	.70200E+04	.60408E+04	.50532E+04	.40650E+04	.00000E+00
72 .97722E+04	.88178E+04	.78566E+04	.68892E+04	.59173E+04	.49454E+04	.39833E+04	.00000E+00
73 .96471E+04	.86928E+04	.77320E+04	.67651E+04	.57938E+04	.48227E+04	.38624E+04	.00000E+00
74 .95321E+04	.85778E+04	.76166E+04	.66481E+04	.56718E+04	.46878E+04	.37070E+04	.00000E+00
75 .94275E+04	.84732E+04	.75121E+04	.65429E+04	.55628E+04	.45615E+04	.34983E+04	.00000E+00
76 .93328E+04	.83789E+04	.74189E+04	.64527E+04	.54800E+04	.45012E+04	.35236E+04	.00000E+00
77 .92471E+04	.82936E+04	.73350E+04	.63718E+04	.54054E+04	.44390E+04	.34800E+04	.00000E+00
78 .91693E+04	.82161E+04	.72582E+04	.62961E+04	.53312E+04	.43665E+04	.34088E+04	.00000E+00
79 .90988E+04	.81456E+04	.71877E+04	.62250E+04	.52575E+04	.42854E+04	.33147E+04	.00000E+00
80 .90353E+04	.80821E+04	.71244E+04	.61614E+04	.51913E+04	.42080E+04	.31881E+04	.00000E+00

81	.89784E+04	.80255E+04	.70686E+04	.61076E+04	.51422E+04	.41728E+04	.32044E+04	.00000E+00
82	.89276E+04	.79750E+04	.70191E+04	.60601E+04	.50991E+04	.41381E+04	.31819E+04	.00000E+00
83	.88819E+04	.79295E+04	.69741E+04	.60161E+04	.50564E+04	.40969E+04	.31417E+04	.00000E+00
84	.88409E+04	.78885E+04	.69332E+04	.59751E+04	.50139E+04	.40502E+04	.30872E+04	.00000E+00
85	.88042E+04	.78519E+04	.68963E+04	.59384E+04	.49758E+04	.40051E+04	.30129E+04	.00000E+00
86	.87718E+04	.78196E+04	.68650E+04	.59079E+04	.49480E+04	.39857E+04	.30238E+04	.00000E+00
87	.87430E+04	.77911E+04	.68371E+04	.58814E+04	.49243E+04	.39672E+04	.30131E+04	.00000E+00
88	.87174E+04	.77656E+04	.68120E+04	.58570E+04	.49009E+04	.39450E+04	.29916E+04	.00000E+00
89	.86945E+04	.77428E+04	.67894E+04	.58343E+04	.48776E+04	.39195E+04	.29620E+04	.00000E+00
90	.86742E+04	.77225E+04	.67692E+04	.58142E+04	.48566E+04	.38947E+04	.29209E+04	.00000E+00
91	.86563E+04	.77047E+04	.67518E+04	.57974E+04	.48415E+04	.38842E+04	.29271E+04	.00000E+00
92	.86405E+04	.76891E+04	.67365E+04	.57830E+04	.48288E+04	.38745E+04	.29218E+04	.00000E+00
93	.86264E+04	.76751E+04	.67228E+04	.57698E+04	.48163E+04	.38629E+04	.29108E+04	.00000E+00
94	.86138E+04	.76625E+04	.67104E+04	.57575E+04	.48038E+04	.38496E+04	.28956E+04	.00000E+00
95	.86025E+04	.76512E+04	.66992E+04	.57464E+04	.47925E+04	.38365E+04	.28751E+04	.00000E+00
96	.85922E+04	.76411E+04	.66893E+04	.57369E+04	.47838E+04	.38300E+04	.28763E+04	.00000E+00
97	.85829E+04	.76318E+04	.66803E+04	.57285E+04	.47763E+04	.38241E+04	.28725E+04	.00000E+00
98	.85743E+04	.76233E+04	.66720E+04	.57206E+04	.47691E+04	.38176E+04	.28665E+04	.00000E+00
99	.85660E+04	.76151E+04	.66640E+04	.57129E+04	.47618E+04	.38107E+04	.28597E+04	.00000E+00
100	.85580E+04	.76071E+04	.66562E+04	.57053E+04	.47544E+04	.38036E+04	.28527E+04	.00000E+00

DOORLATENDHEIDSCOEFFICIENTEN SPLETEN TUSSEN BLOKKEN:

A(0)=	.1384E-01
A(5)=	.1370E-01
A(10)=	.1321E-01
A(15)=	.1227E-01
A(20)=	.1102E-01
A(25)=	.9634E-02
A(30)=	.8277E-02
A(35)=	.7030E-02
A(40)=	.5930E-02
A(45)=	.4975E-02
A(50)=	.3814E-02
A(55)=	.4232E-02
A(60)=	.4688E-02
A(65)=	.5262E-02
A(70)=	.6187E-02
A(75)=	.7399E-02
A(80)=	.8980E-02
A(85)=	.1117E-01
A(90)=	.1438E-01
A(95)=	.2000E-01

DOORLATENDHEIDSCOEFFICIENTEN IN FILTER:

	0	1	2	3	4	5	6
0	0.4098E+00	0.4098E+00	0.4098E+00	0.4098E+00	0.3599E+00	0.2632E+00	0.1619E+00
1	0.4098E+00	0.4098E+00	0.4098E+00	0.4098E+00	0.4015E+00	0.3575E+00	0.2695E+00
2	0.4098E+00	0.4098E+00	0.4098E+00	0.4098E+00	0.4098E+00	0.4098E+00	0.4098E+00
3	0.4098E+00	0.4098E+00	0.4098E+00	0.4098E+00	0.4098E+00	0.4098E+00	0.4098E+00
4	0.4098E+00	0.4098E+00	0.3986E+00	0.3826E+00	0.3701E+00	0.3710E+00	0.2929E+00
5	0.3767E+00	0.3742E+00	0.3661E+00	0.3502E+00	0.3177E+00	0.2511E+00	0.1598E+00
6	0.3453E+00	0.3441E+00	0.3404E+00	0.3328E+00	0.3184E+00	0.2910E+00	0.2356E+00
7	0.3205E+00	0.3203E+00	0.3176E+00	0.3190E+00	0.3196E+00	0.3209E+00	0.3105E+00
8	0.2998E+00	0.2999E+00	0.3002E+00	0.3022E+00	0.3105E+00	0.3403E+00	0.4098E+00
9	0.2815E+00	0.2814E+00	0.2811E+00	0.2809E+00	0.2835E+00	0.3067E+00	0.3206E+00
10	0.2655E+00	0.2652E+00	0.2641E+00	0.2609E+00	0.2509E+00	0.2187E+00	0.1518E+00
11	0.2516E+00	0.2515E+00	0.2508E+00	0.2489E+00	0.2436E+00	0.2298E+00	0.1973E+00
12	0.2394E+00	0.2396E+00	0.2399E+00	0.2408E+00	0.2426E+00	0.2439E+00	0.2387E+00
13	0.2281E+00	0.2284E+00	0.2292E+00	0.2314E+00	0.2381E+00	0.2574E+00	0.2939E+00
14	0.2173E+00	0.2174E+00	0.2177E+00	0.2185E+00	0.2214E+00	0.2393E+00	0.3588E+00
15	0.2072E+00	0.2072E+00	0.2068E+00	0.2054E+00	0.2002E+00	0.1817E+00	0.1372E+00
16	0.1981E+00	0.1981E+00	0.1979E+00	0.1970E+00	0.1938E+00	0.1848E+00	0.1628E+00
17	0.1899E+00	0.1900E+00	0.1905E+00	0.1914E+00	0.1931E+00	0.1942E+00	0.1899E+00
18	0.1819E+00	0.1821E+00	0.1829E+00	0.1849E+00	0.1904E+00	0.2058E+00	0.2280E+00
19	0.1742E+00	0.1743E+00	0.1746E+00	0.1754E+00	0.1778E+00	0.1924E+00	0.3777E+00
20	0.1669E+00	0.1668E+00	0.1666E+00	0.1657E+00	0.1620E+00	0.1491E+00	0.1191E+00
21	0.1601E+00	0.1601E+00	0.1600E+00	0.1594E+00	0.1570E+00	0.1501E+00	0.1336E+00
22	0.1539E+00	0.1540E+00	0.1544E+00	0.1552E+00	0.1566E+00	0.1574E+00	0.1536E+00
23	0.1478E+00	0.1480E+00	0.1486E+00	0.1503E+00	0.1548E+00	0.1676E+00	0.1837E+00
24	0.1417E+00	0.1418E+00	0.1421E+00	0.1428E+00	0.1447E+00	0.1568E+00	0.3561E+00
25	0.1359E+00	0.1359E+00	0.1357E+00	0.1350E+00	0.1321E+00	0.1222E+00	0.1006E+00
26	0.1305E+00	0.1305E+00	0.1304E+00	0.1299E+00	0.1280E+00	0.1226E+00	0.1095E+00
27	0.1254E+00	0.1255E+00	0.1259E+00	0.1266E+00	0.1277E+00	0.1284E+00	0.1250E+00
28	0.1205E+00	0.1207E+00	0.1212E+00	0.1226E+00	0.1264E+00	0.1371E+00	0.1495E+00
29	0.1156E+00	0.1157E+00	0.1160E+00	0.1165E+00	0.1181E+00	0.1280E+00	0.3113E+00
30	0.1109E+00	0.1109E+00	0.1108E+00	0.1102E+00	0.1079E+00	0.9996E-01	0.8356E-01
31	0.1065E+00	0.1065E+00	0.1064E+00	0.1061E+00	0.1046E+00	0.1001E+00	0.8959E-01
32	0.1024E+00	0.1025E+00	0.1028E+00	0.1034E+00	0.1043E+00	0.1048E+00	0.1020E+00
33	0.9841E-01	0.9854E-01	0.9899E-01	0.1001E+00	0.1032E+00	0.1120E+00	0.1220E+00
34	0.9441E-01	0.9448E-01	0.9469E-01	0.9515E-01	0.9644E-01	0.1046E+00	0.2607E+00
35	0.9054E-01	0.9053E-01	0.9044E-01	0.8997E-01	0.8812E-01	0.8169E-01	0.6867E-01

36	0.8696E-01	0.8696E-01	0.8692E-01	0.8661E-01	0.8538E-01	0.8176E-01	0.7322E-01
37	0.8363E-01	0.8370E-01	0.8393E-01	0.8440E-01	0.8516E-01	0.8558E-01	0.8331E-01
38	0.8039E-01	0.8048E-01	0.8084E-01	0.8176E-01	0.8426E-01	0.9144E-01	0.9961E-01
39	0.7714E-01	0.7719E-01	0.7734E-01	0.7769E-01	0.7872E-01	0.8535E-01	0.2133E+00
40	0.7402E-01	0.7400E-01	0.7389E-01	0.7346E-01	0.7191E-01	0.6664E-01	0.5605E-01
41	0.7117E-01	0.7115E-01	0.7105E-01	0.7071E-01	0.6963E-01	0.6663E-01	0.5967E-01
42	0.6858E-01	0.6860E-01	0.6868E-01	0.6892E-01	0.6939E-01	0.6963E-01	0.6775E-01
43	0.6614E-01	0.6615E-01	0.6627E-01	0.6679E-01	0.6857E-01	0.7420E-01	0.8082E-01
44	0.6383E-01	0.6377E-01	0.6362E-01	0.6352E-01	0.6395E-01	0.6896E-01	0.1750E+00
45	0.6186E-01	0.6168E-01	0.6114E-01	0.6012E-01	0.5818E-01	0.5353E-01	0.4522E-01
46	0.6047E-01	0.6022E-01	0.5944E-01	0.5804E-01	0.5584E-01	0.5245E-01	0.4698E-01
47	0.5987E-01	0.5958E-01	0.5870E-01	0.5721E-01	0.5514E-01	0.5269E-01	0.5065E-01
48	0.6014E-01	0.5983E-01	0.5890E-01	0.5731E-01	0.5508E-01	0.5239E-01	0.4996E-01
49	0.6136E-01	0.6106E-01	0.6012E-01	0.5842E-01	0.5569E-01	0.5142E-01	0.4414E-01
50	0.6357E-01	0.6333E-01	0.6256E-01	0.6107E-01	0.5801E-01	0.5016E-01	0.3459E-01
51	0.6667E-01	0.6655E-01	0.6621E-01	0.6582E-01	0.6613E-01	0.7148E-01	0.7281E-01
52	0.7047E-01	0.7045E-01	0.7048E-01	0.7092E-01	0.7299E-01	0.8051E-01	0.1064E+00
53	0.7483E-01	0.7481E-01	0.7483E-01	0.7507E-01	0.7588E-01	0.7716E-01	0.7553E-01
54	0.7984E-01	0.7976E-01	0.7945E-01	0.7863E-01	0.7647E-01	0.7095E-01	0.5812E-01
55	0.8587E-01	0.8573E-01	0.8519E-01	0.8352E-01	0.7814E-01	0.6303E-01	0.3948E-01
56	0.9327E-01	0.9320E-01	0.9292E-01	0.9252E-01	0.9376E-01	0.1057E+00	0.7359E-01
57	0.1023E+00	0.1023E+00	0.1023E+00	0.1027E+00	0.1060E+00	0.1224E+00	0.2312E+00
58	0.1135E+00	0.1134E+00	0.1129E+00	0.1120E+00	0.1122E+00	0.1150E+00	0.1064E+00
59	0.1284E+00	0.1278E+00	0.1251E+00	0.1189E+00	0.1095E+00	0.9602E-01	0.7212E-01
60	0.1507E+00	0.1490E+00	0.1401E+00	0.1242E+00	0.1021E+00	0.7351E-01	0.4464E-01
61	0.1932E+00	0.1833E+00	0.1583E+00	0.1374E+00	0.1222E+00	0.1059E+00	0.7554E-01
62	0.3218E+00	0.2207E+00	0.1708E+00	0.1486E+00	0.1411E+00	0.1438E+00	0.1213E+00
63	0.2731E+00	0.2183E+00	0.1731E+00	0.1512E+00	0.1451E+00	0.1671E+00	0.3443E+00
64	0.1900E+00	0.1826E+00	0.1630E+00	0.1455E+00	0.1379E+00	0.1470E+00	0.9218E-01
65	0.1565E+00	0.1546E+00	0.1469E+00	0.1338E+00	0.1146E+00	0.8520E-01	0.5123E-01
66	0.1381E+00	0.1373E+00	0.1341E+00	0.1280E+00	0.1185E+00	0.1048E+00	0.8140E-01
67	0.1261E+00	0.1257E+00	0.1245E+00	0.1226E+00	0.1203E+00	0.1174E+00	0.1101E+00
68	0.1171E+00	0.1169E+00	0.1165E+00	0.1162E+00	0.1178E+00	0.1262E+00	0.1491E+00
69	0.1099E+00	0.1097E+00	0.1092E+00	0.1084E+00	0.1086E+00	0.1165E+00	0.1394E+00
70	0.1041E+00	0.1038E+00	0.1030E+00	0.1012E+00	0.9703E-01	0.8560E-01	0.6129E-01
71	0.9947E-01	0.9924E-01	0.9847E-01	0.9688E-01	0.9383E-01	0.8798E-01	0.7631E-01
72	0.9588E-01	0.9574E-01	0.9531E-01	0.9455E-01	0.9337E-01	0.9147E-01	0.8847E-01
73	0.9296E-01	0.9290E-01	0.9276E-01	0.9271E-01	0.9320E-01	0.9511E-01	0.9832E-01
74	0.9040E-01	0.9036E-01	0.9026E-01	0.9027E-01	0.9093E-01	0.9461E-01	0.1196E+00
75	0.8813E-01	0.8805E-01	0.8779E-01	0.8729E-01	0.8622E-01	0.8288E-01	0.7047E-01
76	0.8618E-01	0.8609E-01	0.8576E-01	0.8508E-01	0.8371E-01	0.8084E-01	0.7444E-01
77	0.8459E-01	0.8451E-01	0.8429E-01	0.8387E-01	0.8317E-01	0.8206E-01	0.8059E-01
78	0.8326E-01	0.8322E-01	0.8313E-01	0.8305E-01	0.8312E-01	0.8366E-01	0.8476E-01
79	0.8208E-01	0.8206E-01	0.8201E-01	0.8203E-01	0.8237E-01	0.8391E-01	0.9052E-01
80	0.8101E-01	0.8097E-01	0.8087E-01	0.8068E-01	0.8035E-01	0.7941E-01	0.7462E-01
81	0.8006E-01	0.8001E-01	0.7986E-01	0.7954E-01	0.7887E-01	0.7738E-01	0.7380E-01
82	0.7926E-01	0.7923E-01	0.7911E-01	0.7888E-01	0.7849E-01	0.7785E-01	0.7703E-01
83	0.7859E-01	0.7857E-01	0.7852E-01	0.7846E-01	0.7846E-01	0.7866E-01	0.7913E-01
84	0.7799E-01	0.7798E-01	0.7795E-01	0.7796E-01	0.7814E-01	0.7888E-01	0.8166E-01
85	0.7743E-01	0.7742E-01	0.7736E-01	0.7728E-01	0.7715E-01	0.7686E-01	0.7531E-01
86	0.7694E-01	0.7691E-01	0.7683E-01	0.7667E-01	0.7631E-01	0.7551E-01	0.7346E-01
87	0.7652E-01	0.7650E-01	0.7643E-01	0.7630E-01	0.7607E-01	0.7570E-01	0.7522E-01
88	0.7616E-01	0.7615E-01	0.7612E-01	0.7607E-01	0.7605E-01	0.7611E-01	0.7632E-01
89	0.7585E-01	0.7584E-01	0.7582E-01	0.7582E-01	0.7590E-01	0.7626E-01	0.7754E-01
90	0.7556E-01	0.7555E-01	0.7552E-01	0.7547E-01	0.7541E-01	0.7532E-01	0.7488E-01
91	0.7530E-01	0.7529E-01	0.7524E-01	0.7515E-01	0.7496E-01	0.7453E-01	0.7342E-01
92	0.7508E-01	0.7507E-01	0.7503E-01	0.7495E-01	0.7482E-01	0.7461E-01	0.7434E-01
93	0.7491E-01	0.7490E-01	0.7487E-01	0.7484E-01	0.7480E-01	0.7481E-01	0.7488E-01
94	0.7475E-01	0.7475E-01	0.7473E-01	0.7472E-01	0.7474E-01	0.7489E-01	0.7541E-01
95	0.7462E-01	0.7461E-01	0.7460E-01	0.7457E-01	0.7453E-01	0.7450E-01	0.7440E-01
96	0.7451E-01	0.7450E-01	0.7447E-01	0.7442E-01	0.7432E-01	0.7412E-01	0.7360E-01
97	0.7442E-01	0.7441E-01	0.7439E-01	0.7433E-01	0.7425E-01	0.7412E-01	0.7398E-01
98	0.7437E-01	0.7436E-01	0.7433E-01	0.7429E-01	0.7424E-01	0.7418E-01	0.7415E-01
99	0.7433E-01	0.7433E-01	0.7431E-01	0.7428E-01	0.7424E-01	0.7421E-01	0.7420E-01
100	0.7432E-01	0.7431E-01	0.7430E-01	0.7427E-01	0.7424E-01	0.7422E-01	0.7421E-01

STROMINGSTOESTAND IN SPLETEN: N= 0.7042

GETAL VAN REYNOLDS (RE) IN FILTER:
RE <= 4 -----> LAMINAIR
4 > RE < 576 -----> OVERGANGSGEBIED
RE >= 576 -----> TURBULENT

0	1	2	3	4	5	6
0 0.2868E-06	0.9985E+00	0.2011E+01	0.3324E+01	0.5202E+01	0.9690E+01	0.2561E+02
1 0.9164E+00	0.1364E+01	0.2190E+01	0.3114E+01	0.4177E+01	0.5265E+01	0.9248E+01
2 0.1846E+01	0.2056E+01	0.2642E+01	0.3251E+01	0.3638E+01	0.3523E+01	0.3734E+01
3 0.2790E+01	0.2947E+01	0.3351E+01	0.3801E+01	0.3901E+01	0.2967E+01	0.7933E+00
4 0.3843E+01	0.3989E+01	0.4253E+01	0.4597E+01	0.4886E+01	0.4866E+01	0.7819E+01
5 0.4728E+01	0.4815E+01	0.5034E+01	0.5494E+01	0.6660E+01	0.1064E+02	0.2630E+02
6 0.5624E+01	0.5664E+01	0.5799E+01	0.6065E+01	0.6628E+01	0.7925E+01	0.1208E+02
7 0.6537E+01	0.6539E+01	0.6561E+01	0.6593E+01	0.6566E+01	0.6522E+01	0.6954E+01
8 0.7475E+01	0.7459E+01	0.7455E+01	0.7336E+01	0.6958E+01	0.5791E+01	0.3337E+01
9 0.8476E+01	0.8483E+01	0.8501E+01	0.8505E+01	0.8349E+01	0.7125E+01	0.6550E+01
10 0.9525E+01	0.9562E+01	0.9614E+01	0.9863E+01	0.1067E+02	0.1404E+02	0.2914E+02
11 0.1061E+02	0.1062E+02	0.1067E+02	0.1083E+02	0.1131E+02	0.1272E+02	0.1726E+02
12 0.1171E+02	0.1169E+02	0.1167E+02	0.1159E+02	0.1141E+02	0.1129E+02	0.1179E+02
13 0.1289E+02	0.1286E+02	0.1278E+02	0.1256E+02	0.1186E+02	0.1014E+02	0.7768E+01
14 0.1422E+02	0.1421E+02	0.1417E+02	0.1406E+02	0.1372E+02	0.1173E+02	0.5209E+01
15 0.1565E+02	0.1566E+02	0.1571E+02	0.1591E+02	0.1676E+02	0.2033E+02	0.3566E+02
16 0.1711E+02	0.1712E+02	0.1715E+02	0.1731E+02	0.1788E+02	0.1966E+02	0.2535E+02
17 0.1864E+02	0.1861E+02	0.1853E+02	0.1833E+02	0.1802E+02	0.1782E+02	0.1862E+02
18 0.2029E+02	0.2025E+02	0.2008E+02	0.1964E+02	0.1853E+02	0.1587E+02	0.1292E+02
19 0.2213E+02	0.2210E+02	0.2202E+02	0.2183E+02	0.2123E+02	0.1815E+02	0.4688E+01
20 0.2412E+02	0.2413E+02	0.2420E+02	0.2447E+02	0.2558E+02	0.3020E+02	0.4732E+02
21 0.2620E+02	0.2621E+02	0.2624E+02	0.2646E+02	0.2725E+02	0.2979E+02	0.3763E+02
22 0.2837E+02	0.2833E+02	0.2817E+02	0.2788E+02	0.2739E+02	0.2711E+02	0.2848E+02
23 0.3076E+02	0.3068E+02	0.3041E+02	0.2973E+02	0.2803E+02	0.2391E+02	0.1991E+02
24 0.3344E+02	0.3340E+02	0.3327E+02	0.3294E+02	0.3206E+02	0.2733E+02	0.5289E+01
25 0.3638E+02	0.3639E+02	0.3647E+02	0.3687E+02	0.3846E+02	0.4499E+02	0.6631E+02
26 0.3946E+02	0.3946E+02	0.3950E+02	0.3979E+02	0.4097E+02	0.4472E+02	0.5603E+02
27 0.4208E+02	0.4261E+02	0.4238E+02	0.4190E+02	0.4116E+02	0.4076E+02	0.4297E+02
28 0.4622E+02	0.4612E+02	0.4570E+02	0.4467E+02	0.4205E+02	0.3575E+02	0.3004E+02
29 0.5024E+02	0.5017E+02	0.4995E+02	0.4947E+02	0.4816E+02	0.4096E+02	0.6932E+01
30 0.5463E+02	0.5464E+02	0.5475E+02	0.5533E+02	0.5769E+02	0.6723E+02	0.9618E+02
31 0.5923E+02	0.5922E+02	0.5928E+02	0.5971E+02	0.6144E+02	0.6702E+02	0.8368E+02
32 0.6404E+02	0.6393E+02	0.6357E+02	0.6286E+02	0.6174E+02	0.6114E+02	0.6453E+02
33 0.6934E+02	0.6917E+02	0.6855E+02	0.6698E+02	0.6305E+02	0.5354E+02	0.4511E+02
34 0.7535E+02	0.7525E+02	0.7492E+02	0.7418E+02	0.7221E+02	0.6139E+02	0.9878E+01
35 0.8193E+02	0.8195E+02	0.8211E+02	0.8297E+02	0.8649E+02	0.1007E+03	0.1424E+03
36 0.8882E+02	0.8882E+02	0.8890E+02	0.8955E+02	0.9214E+02	0.1005E+03	0.1253E+03
37 0.9602E+02	0.9587E+02	0.9534E+02	0.9428E+02	0.9260E+02	0.9170E+02	0.9677E+02
38 0.1039E+03	0.1037E+03	0.1028E+03	0.1005E+03	0.9459E+02	0.8033E+02	0.6769E+02
39 0.1129E+03	0.1127E+03	0.1123E+03	0.1113E+03	0.1084E+03	0.9219E+02	0.1476E+02
40 0.1226E+03	0.1227E+03	0.1230E+03	0.1245E+03	0.1299E+03	0.1512E+03	0.2138E+03
41 0.1326E+03	0.1327E+03	0.1330E+03	0.1343E+03	0.1385E+03	0.1513E+03	0.1886E+03
42 0.1428E+03	0.1427E+03	0.1424E+03	0.1414E+03	0.1395E+03	0.1385E+03	0.1463E+03
43 0.1536E+03	0.1535E+03	0.1529E+03	0.1506E+03	0.1428E+03	0.1220E+03	0.1028E+03
44 0.1648E+03	0.1652E+03	0.1660E+03	0.1665E+03	0.1642E+03	0.1412E+03	0.2192E+02
45 0.1755E+03	0.1765E+03	0.1797E+03	0.1858E+03	0.1984E+03	0.2344E+03	0.3285E+03
46 0.1837E+03	0.1852E+03	0.1901E+03	0.1946E+03	0.2154E+03	0.2441E+03	0.3043E+03
47 0.1874E+03	0.1892E+03	0.1949E+03	0.2052E+03	0.2209E+03	0.2419E+03	0.2618E+03
48 0.1857E+03	0.1876E+03	0.1936E+03	0.2045E+03	0.2214E+03	0.2447E+03	0.2691E+03
49 0.1784E+03	0.1801E+03	0.1858E+03	0.1968E+03	0.2165E+03	0.2540E+03	0.3447E+03
50 0.1662E+03	0.1675E+03	0.1716E+03	0.1801E+03	0.1996E+03	0.2670E+03	0.5612E+03
51 0.1511E+03	0.1517E+03	0.1533E+03	0.1550E+03	0.1536E+03	0.1314E+03	0.1267E+03
52 0.1352E+03	0.1353E+03	0.1352E+03	0.1335E+03	0.1261E+03	0.1036E+03	0.5930E+02
53 0.1200E+03	0.1200E+03	0.1199E+03	0.1192E+03	0.1167E+03	0.1128E+03	0.1177E+03
54 0.1054E+03	0.1056E+03	0.1064E+03	0.1086E+03	0.1149E+03	0.1334E+03	0.1989E+03
55 0.9110E+02	0.9137E+02	0.9255E+02	0.9628E+02	0.1100E+03	0.1691E+03	0.4309E+03
56 0.7720E+02	0.7733E+02	0.7779E+02	0.7846E+02	0.7641E+02	0.6014E+02	0.1240E+03
57 0.6414E+02	0.6417E+02	0.6420E+02	0.6365E+02	0.5980E+02	0.4484E+02	0.1257E+02
58 0.5210E+02	0.5223E+02	0.5272E+02	0.5357E+02	0.5339E+02	0.5082E+02	0.5928E+02
59 0.4076E+02	0.4112E+02	0.4293E+02	0.4751E+02	0.5605E+02	0.7286E+02	0.1291E+03
60 0.2958E+02	0.3026E+02	0.3422E+02	0.4354E+02	0.6442E+02	0.1243E+03	0.3371E+03
61 0.1799E+02	0.1999E+02	0.2681E+02	0.3558E+02	0.4901E+02	0.5990E+02	0.1177E+03
62 0.6485E+01	0.1379E+02	0.2301E+02	0.3042E+02	0.3373E+02	0.3250E+02	0.4563E+02
63 0.9004E+01	0.1410E+02	0.2242E+02	0.2938E+02	0.3189E+02	0.2407E+02	0.5664E+01
64 0.1861E+02	0.2015E+02	0.2527E+02	0.3171E+02	0.3530E+02	0.3107E+02	0.7905E+02
65 0.2744E+02	0.2811E+02	0.3111E+02	0.3752E+02	0.5113E+02	0.9253E+02	0.2560E+03
66 0.3521E+02	0.3564E+02	0.3732E+02	0.4099E+02	0.4780E+02	0.6121E+02	0.1014E+03
67 0.4226E+02	0.4251E+02	0.4333E+02	0.4472E+02	0.4644E+02	0.4874E+02	0.5540E+02
68 0.4897E+02	0.4912E+02	0.4952E+02	0.4976E+02	0.4841E+02	0.4218E+02	0.3022E+02
69 0.5558E+02	0.5578E+02	0.5634E+02	0.5711E+02	0.5694E+02	0.4951E+02	0.3457E+02
70 0.6200E+02	0.6230E+02	0.6333E+02	0.6562E+02	0.7135E+02	0.9165E+02	0.1788E+03
71 0.6788E+02	0.6820E+02	0.6927E+02	0.7156E+02	0.7629E+02	0.8676E+02	0.1153E+03
72 0.7306E+02	0.7327E+02	0.7394E+02	0.7513E+02	0.7703E+02	0.8028E+02	0.8581E+02
73 0.7773E+02	0.7783E+02	0.7806E+02	0.7814E+02	0.7732E+02	0.7425E+02	0.6948E+02
74 0.8218E+02	0.8227E+02	0.8244E+02	0.8243E+02	0.8124E+02	0.7503E+02	0.4699E+02
75 0.8648E+02	0.8664E+02	0.8714E+02	0.8815E+02	0.9034E+02	0.9779E+02	0.1352E+03

0	0.0000E+00	1	0.0000E+00
1	0.3195E-03	2	0.3388E-03
2	0.6437E-03	3	0.6294E-03
3	0.9727E-03	4	0.9346E-03
4	0.1340E-02	5	0.1316E-02
5	0.1793E-02	6	0.1793E-02
6	0.2322E-02	7	0.2322E-02
7	0.2890E-02	8	0.2832E-02
8	0.3562E-02	9	0.3424E-02
9	0.4301E-02	10	0.4126E-02
10	0.5126E-02	11	0.4951E-02
11	0.6027E-02	12	0.5951E-02
12	0.6990E-02	13	0.6828E-02
13	0.8073E-02	14	0.7920E-02
14	0.9346E-02	15	0.9108E-02
15	0.1079E-01	16	0.1055E-01
16	0.1234E-01	17	0.1221E-01
17	0.1402E-01	18	0.1372E-01
18	0.1593E-01	19	0.1545E-01
19	0.1814E-01	20	0.1770E-01
20	0.2065E-01	21	0.2022E-01
21	0.2335E-01	22	0.2310E-01
22	0.2635E-01	23	0.2577E-01
23	0.2973E-01	24	0.2884E-01
24	0.3371E-01	25	0.3290E-01
25	0.3826E-01	26	0.3780E-01
26	0.4322E-01	27	0.4276E-01
27	0.4861E-01	28	0.4756E-01
28	0.5478E-01	29	0.5314E-01
29	0.6207E-01	30	0.6056E-01
30	0.7039E-01	31	0.6955E-01
31	0.7942E-01	32	0.7848E-01
32	0.8934E-01	33	0.8510E-01
33	1.0077E+00	34	0.9290E-01
34	1.1408E+00	35	1.0695E+00
35	1.2938E+00	36	1.2655E+00
36	1.4598E+00	37	1.4447E+00
37	1.6408E+00	38	1.6058E+00
38	1.8470E+00	39	1.7938E+00
39	2.0908E+00	40	2.0225E+00
40	2.3665E+00	41	2.3447E+00
41	2.6622E+00	42	2.6467E+00
42	2.9755E+00	43	2.9338E+00
43	3.3178E+00	44	3.2611E+00
44	3.6899E+00	45	3.6282E+00
45	4.0545E+00	46	4.1222E+00
46	4.4399E+00	47	4.5567E+00
47	4.7722E+00	48	4.7478E+00
48	4.4111E+00	49	4.4383E+00
49	4.1538E+00	50	4.3763E+00
50	3.7366E+00	51	3.2366E+00
51	3.2377E+00	52	2.2747E+00
52	2.2747E+00	53	2.2224E+00
53	2.2224E+00	54	1.8747E+00
54	1.8747E+00	55	1.5047E+00

VERHANGEN IN X-RICHTUNG:

76	0.9043E+02	0.9132E+02
77	0.9387E+02	0.9454E+02
78	0.9690E+02	0.9719E+02
79	0.9969E+02	0.9985E+02
80	0.1024E+03	0.1027E+03
81	0.1048E+03	0.1053E+03
82	0.1069E+03	0.1073E+03
83	0.1088E+03	0.1089E+03
84	0.1104E+03	0.1105E+03
85	0.1120E+03	0.1122E+03
86	0.1135E+03	0.1138E+03
87	0.1147E+03	0.1150E+03
88	0.1158E+03	0.1159E+03
89	0.1168E+03	0.1168E+03
90	0.1177E+03	0.1178E+03
91	0.1185E+03	0.1186E+03
92	0.1192E+03	0.1193E+03
93	0.1197E+03	0.1197E+03
94	0.1202E+03	0.1203E+03
95	0.1206E+03	0.1207E+03
96	0.1210E+03	0.1211E+03
97	0.1213E+03	0.1214E+03
98	0.1214E+03	0.1215E+03
99	0.1216E+03	0.1216E+03
100	0.1216E+03	0.1216E+03

56	-.1182E+00	-.1167E+00	-.1117E+00	-.1015E+00	-.7889E-01	-.1220E-01	0.2408E+00
57	-.8954E-01	-.8792E-01	-.8281E-01	-.7325E-01	-.5689E-01	-.3258E-01	-.7763E-02
58	-.6555E-01	-.6423E-01	-.6050E-01	-.5527E-01	-.5102E-01	-.5487E-01	-.7956E-01
59	-.4536E-01	-.4429E-01	-.4194E-01	-.4049E-01	-.4620E-01	-.8318E-01	-.2558E+00
60	-.2804E-01	-.2692E-01	-.2501E-01	-.2304E-01	-.2103E-01	-.1879E-01	-.1726E-01
61	-.1330E-01	-.1256E-01	-.1102E-01	-.7399E-02	0.4216E-02	0.4702E-01	0.2226E+00
62	-.2879E-02	-.2654E-02	-.1507E-02	0.1293E-02	0.7891E-02	0.2325E-01	0.5373E-01
63	0.4710E-02	0.4846E-02	0.5744E-02	0.7035E-02	0.7397E-02	0.5279E-02	0.2350E-02
64	0.1400E-01	0.1387E-01	0.1420E-01	0.1445E-01	0.1067E-01	-.1251E-01	-.1225E+00
65	0.2505E-01	0.2483E-01	0.2500E-01	0.2611E-01	0.2754E-01	0.2528E-01	0.1018E-01
66	0.3641E-01	0.3632E-01	0.3651E-01	0.3830E-01	0.4513E-01	0.7042E-01	0.1779E+00
67	0.4788E-01	0.4772E-01	0.4738E-01	0.4737E-01	0.4899E-01	0.5572E-01	0.7188E-01
68	0.5973E-01	0.5947E-01	0.5858E-01	0.5652E-01	0.5190E-01	0.4241E-01	0.2895E-01
69	0.7223E-01	0.7209E-01	0.7150E-01	0.6966E-01	0.6365E-01	0.4261E-01	-.3543E-01
70	0.8510E-01	0.8527E-01	0.8588E-01	0.8722E-01	0.8980E-01	0.9353E-01	0.9530E-01
71	0.9748E-01	0.9785E-01	0.9921E-01	0.1022E+00	0.1113E+00	0.1357E+00	0.2159E+00
72	0.1088E+00	0.1091E+00	0.1100E+00	0.1119E+00	0.1159E+00	0.1243E+00	0.1386E+00
73	0.1195E+00	0.1195E+00	0.1195E+00	0.1199E+00	0.1167E+00	0.1105E+00	0.1010E+00
74	0.1299E+00	0.1299E+00	0.1297E+00	0.1286E+00	0.1241E+00	0.1086E+00	0.5615E-01
75	0.1402E+00	0.1404E+00	0.1410E+00	0.1422E+00	0.1440E+00	0.1467E+00	0.1483E+00
76	0.1499E+00	0.1503E+00	0.1516E+00	0.1546E+00	0.1616E+00	0.1795E+00	0.2326E+00
77	0.1585E+00	0.1589E+00	0.1599E+00	0.1620E+00	0.1660E+00	0.1732E+00	0.1833E+00
78	0.1603E+00	0.1664E+00	0.1668E+00	0.1670E+00	0.1665E+00	0.1635E+00	0.1576E+00
79	0.1735E+00	0.1736E+00	0.1737E+00	0.1732E+00	0.1706E+00	0.1611E+00	0.1294E+00
80	0.1805E+00	0.1807E+00	0.1812E+00	0.1820E+00	0.1831E+00	0.1845E+00	0.1856E+00
81	0.1870E+00	0.1873E+00	0.1882E+00	0.1903E+00	0.1949E+00	0.2062E+00	0.2387E+00
82	0.1927E+00	0.1929E+00	0.1937E+00	0.1953E+00	0.1981E+00	0.2032E+00	0.2099E+00
83	0.1977E+00	0.1978E+00	0.1981E+00	0.1985E+00	0.1985E+00	0.1971E+00	0.1936E+00
84	0.2023E+00	0.2024E+00	0.2025E+00	0.2023E+00	0.2008E+00	0.1951E+00	0.1762E+00
85	0.2067E+00	0.2068E+00	0.2071E+00	0.2077E+00	0.2083E+00	0.2090E+00	0.2096E+00
86	0.2107E+00	0.2109E+00	0.2115E+00	0.2128E+00	0.2157E+00	0.2226E+00	0.2420E+00
87	0.2142E+00	0.2143E+00	0.2149E+00	0.2159E+00	0.2179E+00	0.2212E+00	0.2255E+00
88	0.2172E+00	0.2173E+00	0.2176E+00	0.2179E+00	0.2181E+00	0.2176E+00	0.2158E+00
89	0.2199E+00	0.2200E+00	0.2201E+00	0.2201E+00	0.2193E+00	0.2163E+00	0.2058E+00
90	0.2224E+00	0.2225E+00	0.2228E+00	0.2231E+00	0.2235E+00	0.2239E+00	0.2241E+00
91	0.2247E+00	0.2248E+00	0.2252E+00	0.2260E+00	0.2277E+00	0.2316E+00	0.2424E+00
92	0.2267E+00	0.2268E+00	0.2271E+00	0.2278E+00	0.2290E+00	0.2310E+00	0.2336E+00
93	0.2283E+00	0.2284E+00	0.2286E+00	0.2289E+00	0.2292E+00	0.2292E+00	0.2285E+00
94	0.2297E+00	0.2297E+00	0.2299E+00	0.2300E+00	0.2298E+00	0.2285E+00	0.2237E+00
95	0.2309E+00	0.2310E+00	0.2311E+00	0.2314E+00	0.2317E+00	0.2320E+00	0.2321E+00
96	0.2320E+00	0.2320E+00	0.2323E+00	0.2328E+00	0.2337E+00	0.2356E+00	0.2406E+00
97	0.2328E+00	0.2328E+00	0.2331E+00	0.2336E+00	0.2344E+00	0.2356E+00	0.2369E+00
98	0.2333E+00	0.2334E+00	0.2336E+00	0.2340E+00	0.2345E+00	0.2350E+00	0.2354E+00
99	0.2336E+00	0.2337E+00	0.2339E+00	0.2341E+00	0.2345E+00	0.2347E+00	0.2349E+00
100	0.2337E+00	0.2338E+00	0.2340E+00	0.2342E+00	0.2345E+00	0.2347E+00	0.2347E+00

VERHANGEN IN Y-RICHTING:

0	1	2	3	4	5	6	
0	0.0000E+00	0.3481E-03	0.7010E-03	0.1159E-02	0.2065E-02	0.5260E-02	0.2259E-01
1	0.0000E+00	0.3433E-03	0.6866E-03	0.1025E-02	0.1383E-02	0.1626E-02	0.0000E+00
2	0.0000E+00	0.3338E-03	0.6723E-03	0.9489E-03	0.1087E-02	0.9012E-03	0.0000E+00
3	0.0000E+00	0.3576E-03	0.7010E-03	0.1001E-02	0.1168E-02	0.9775E-03	0.0000E+00
4	0.0000E+00	0.3719E-03	0.7677E-03	0.1197E-02	0.1616E-02	0.1874E-02	0.0000E+00
5	0.0000E+00	0.3815E-03	0.8011E-03	0.1345E-02	0.2384E-02	0.5765E-02	0.2344E-01
6	0.0000E+00	0.3719E-03	0.7725E-03	0.1168E-02	0.1559E-02	0.1793E-02	0.0000E+00
7	0.0000E+00	0.4005E-03	0.7963E-03	0.1121E-02	0.1259E-02	0.9680E-03	0.0000E+00
8	0.0000E+00	0.4625E-03	0.9298E-03	0.1340E-02	0.1554E-02	0.1245E-02	0.0000E+00
9	0.0000E+00	0.5388E-03	0.1121E-02	0.1745E-02	0.2370E-02	0.2604E-02	0.0000E+00
10	0.0000E+00	0.5913E-03	0.1245E-02	0.2036E-02	0.3452E-02	0.7639E-02	0.2694E-01
11	0.0000E+00	0.6151E-03	0.1235E-02	0.1798E-02	0.2298E-02	0.2480E-02	0.0000E+00
12	0.0000E+00	0.6676E-03	0.1297E-02	0.1764E-02	0.1893E-02	0.1369E-02	0.0000E+00
13	0.0000E+00	0.7772E-03	0.1526E-02	0.2179E-02	0.2475E-02	0.1869E-02	0.0000E+00
14	0.0000E+00	0.9203E-03	0.1864E-02	0.2913E-02	0.4025E-02	0.4263E-02	0.0000E+00
15	0.0000E+00	0.1016E-02	0.2098E-02	0.3405E-02	0.5641E-02	0.1183E-01	0.3551E-01
16	0.0000E+00	0.1059E-02	0.2079E-02	0.3014E-02	0.3800E-02	0.3996E-02	0.0000E+00
17	0.0000E+00	0.1149E-02	0.2208E-02	0.2900E-02	0.3161E-02	0.2203E-02	0.0000E+00
18	0.0000E+00	0.1364E-02	0.2680E-02	0.3781E-02	0.4225E-02	0.2937E-02	0.0000E+00
19	0.0000E+00	0.1631E-02	0.3333E-02	0.5193E-02	0.7238E-02	0.7353E-02	0.0000E+00
20	0.0000E+00	0.1807E-02	0.3719E-02	0.6037E-02	0.9923E-02	0.2016E-01	0.5287E-01
21	0.0000E+00	0.1874E-02	0.3691E-02	0.5355E-02	0.6700E-02	0.6981E-02	0.0000E+00
22	0.0000E+00	0.2050E-02	0.3924E-02	0.5302E-02	0.5555E-02	0.3781E-02	0.0000E+00
23	0.0000E+00	0.2451E-02	0.4792E-02	0.6757E-02	0.7491E-02	0.4854E-02	0.0000E+00
24	0.0000E+00	0.2942E-02	0.6003E-02	0.9389E-02	0.1321E-01	0.1306E-01	0.0000E+00
25	0.0000E+00	0.3262E-02	0.6714E-02	0.1090E-01	0.1787E-01	0.3573E-01	0.8611E-01
26	0.0000E+00	0.3395E-02	0.6661E-02	0.9651E-02	0.1207E-01	0.1256E-01	0.0000E+00
27	0.0000E+00	0.3715E-02	0.7105E-02	0.9575E-02	0.9961E-02	0.6704E-02	0.0000E+00
28	0.0000E+00	0.4444E-02	0.8702E-02	0.1227E-01	0.1351E-01	0.8402E-02	0.0000E+00
29	0.0000E+00	0.5355E-02	0.1094E-01	0.1714E-01	0.2423E-01	0.2358E-01	0.0000E+00
30	0.0000E+00	0.5951E-02	0.1224E-01	0.1986E-01	0.3254E-01	0.6455E-01	0.1489E+00
31	0.0000E+00	0.6189E-02	0.1215E-01	0.1760E-01	0.2200E-01	0.2286E-01	0.0000E+00
32	0.0000E+00	0.6785E-02	0.1297E-01	0.1746E-01	0.1814E-01	0.1215E-01	0.0000E+00
33	0.0000E+00	0.8125E-02	0.1591E-01	0.2242E-01	0.2466E-01	0.1510E-01	0.0000E+00
34	0.0000E+00	0.9804E-02	0.2003E-01	0.3139E-01	0.4444E-01	0.4304E-01	0.0000E+00
35	0.0000E+00	0.1089E-01	0.2241E-01	0.3637E-01	0.5955E-01	0.1178E+00	0.2672E+00

DEBIETEN DOOR SPLETEN:

QC 0) = -0.3658E-03
QC 5) = -0.3745E-03
QC 10) = -0.4089E-03
QC 15) = -0.4873E-03
QC 20) = -0.6298E-03
QC 25) = -0.8665E-03
QC 30) = -0.1244E-02
QC 35) = -0.1835E-02
QC 40) = -0.2751E-02
QC 45) = -0.4179E-02
QC 50) = 0.7868E-02
QC 55) = 0.6141E-02
QC 60) = 0.4815E-02
QC 65) = 0.3656E-02
QC 70) = 0.2487E-02
QC 75) = 0.1625E-02
QC 80) = 0.1025E-02
QC 85) = 0.6088E-03
QC 90) = 0.3337E-03
QC 95) = 0.1523E-03

** EINDE BEREKENING ***

APPENDIX 7.2

```

1      PROGRAM BLOK2
2      C*****GEOMETRISCH EENDIMENSIONAAL, FYSISCH NIET-LINEAIR*****
      REAL PD(0:300),PH(0:300),Z(0:300,0:1),P(0:300),A(0:300),K(0:300)
      *,XI(0:300),ORO(0:300),Q(0:300)

      C*****INLEZEN GEGEVENS*****

      C      AL= HELLINGSHOEK
      C      D = DIKTE STEENZETTING
      C      N = AANTAL STENEN
      C      DX= AFSTAND TUSSEN TWEE SPLETEN
      C      HF= HOOGTE FREATISCHE LIJN BOVEN STILWATERNIVEAU
      C      GH= GOLFHOOGTE
      C      GL= GOLFLENGTE
      C      S = SPLEETBREEDTE BEKLEDING
      C      EE= PORIENGETAL FILTER
      C      DN= MAATGEVENDE DIAMETER KORRELS
      C      BB= DIKTE FILTER
      C      IS= AANTAL KNOPEN TUSSEN TWEE SPLETEN
      C      BX= DEMPINGSCOEFFICIENT
      C      LL= STUURPARAMETER VOOR AANPASSEN DOORLATENDHEDEN
      C      MI= AANTAL TOEGESTANE ITERATIES
      C      FF= NAGESTREEFDE RELATIEVE AFBREEKFOUT

3      DATA AL,D,N,DX,HF,GH,GL,S,EE,DN,BB,IS,BX,LL,MI,FF
      */14.0,0.3,20,0.5,0.0,0.8,60.0,1.5E-3,0.4,7.0E-3,0.6,4,0.1,500,
      *2000,1E-6/

      C*****UITVOER INLEESGEGEVENS*****
4      WRITE (6,20)
5      20  FORMAT (///,20X,'***: STEENZET ***',/)
6      WRITE (6,30)
7      30  FORMAT (1X,'FYSISCH NIET-LINEAIR, GEOMETRISCH EENDIMENSIONAAL',
      *//)
8      WRITE (6,35)
9      35  FORMAT (//,10X,'***: INVDERGROOTHEDEN ***',//)
10     WRITE (6,40) AL
11     40  FORMAT (1X,'HELLINGSHOEK= ',F5.2)
12     WRITE (6,50) D
13     50  FORMAT (1X,'DIKTE STEENZETTING= ',F4.2)
14     WRITE (6,60) N
15     60  FORMAT(1X,'AANTAL STENEN= ',I3)
16     WRITE (6,70) DX
17     70  FORMAT (1X,'AFSTAND TUSSEN TWEE SPLETEN= ',F5.3)
18     WRITE (6,80) HF
19     80  FORMAT (1X,'HOOGTE FREATISCHE LIJN BOVEN STILWATERNIVEAU= ',
      */F5.3)
20     WRITE (6,90) GH
21     90  FORMAT (1X,'GOLFHOOGTE "H" = ',F4.2)
22     WRITE (6,100) GL
23     100 FORMAT (1X,'GOLFLENGTE "L" = ',F6.2)
24     WRITE (6,110) S
25     110 FORMAT (1X,'SPLEETBREEDTE BEKLEDING= ',E8.3)
26     WRITE (6,120) EE
27     120 FORMAT (1X,'PORIENGETAL FILTER= ',F4.2)
28     WRITE (6,130) DN
29     130 FORMAT (1X,'MAATGEVENDE DIAMETER KORRELS= ',E8.3)
30     WRITE (6,140) BB
31     140 FORMAT (1X,'DIKTE FILTER= ',F4.2)
32     WRITE (6,150) IS
33     150 FORMAT (1X,'AANTAL KNOPEN TUSSEN TWEE SPLETEN= ',I2)
34     WRITE (6,160) BX
35     160 FORMAT (1X,'DEMPINGSCOEFFICIENT "BX" = ',F4.2)
36     WRITE (6,170) LL
37     170 FORMAT (1X,'STUURPARAMETER "LL" = ',I7)
38     WRITE (6,180) MI
39     180 FORMAT (1X,'AANTAL TOEGESTANE ITERATIES= ',I7)
40     WRITE (6,190) FF
41     190 FORMAT (1X,'NAGESTREEFDE RELATIEVE AFBREEKFOUT= ',E8.3)

      C*****VOORBEREIDINGEN*****
42     H = DX/(IS+1)
43     C2 = DN/1E-6
44     C1 = 19.6*DN*EE**5
45     AK = S*(-6.16*DX+9.38)
46     L = 0

      C*****STROMINGSTOESTAND IN SPLETFN*****
47     IF (S.LT.6E-3) THEN
48         ANN = 1.0-SQRT((3.6E-5-(0.006-S)**2)/1.8E-4)
49     ELSE
50         ANN = 0.552786
51     END IF
52     AL = AL*ATAN(1.0)/45.0
53     W = 1.5
54     TA = TAN(AL)

```



```
C*****HYDRAULISCHE RANDVOORWAARDEN*****
55 IF (TA.LE.0.1428571429) THEN
56   FA = 0.29
57   BE = 3.0
58 END IF
59 IF ((TA.GT.0.1428571429).AND.(TA.LE.0.2)) THEN
60   FA = 0.525*TA+0.215
61   BE = 3.0
62 END IF
63 IF ((TA.GT.0.2).AND.(TA.LE.0.3333333333)) THEN
64   FA = -0.825*TA+0.485
65   BE = -7.5*TA+4.5
66 END IF
67 IF (TA.GT.0.3333333333) THEN
68   FA = 0.21
69   BE = 2.0
70 END IF
71 N = N*(IS+1)
72 SK = TA/SQRT(GH/GL)
73 BEE = 2.0/BE
74 DB = GH*FA*(TA**(-BEE))*(SK**BEE)
75 YB = DB*LOG(25.265*SQRT(1.0/SK))
76 YB = YB/LOG(10.0)
77 GW = 9.8E3
78 HA = DB+HF

C*****UITVOER HYDRAULISCHE RANDVOORWAARDEN*****
79 WRITE (6,195)
80 195 FORMAT (///,10X,'*** UITVOER ***',/)
81 WRITE (6,200)
82 200 FORMAT (1X,'BELASTINGGEVAL: ** BREKENDE GOLF **',/)
83 WRITE (6,210) YB
84 210 FORMAT (1X,'BREKERHOOGTE= ',F6.4)
85 WRITE (6,220) DB
86 220 FORMAT (1X,'BREKERPUUNT = ',F6.4)
87 WRITE (6,230) SK
88 230 FORMAT (1X,'KSI = ',F6.4,/)
89 HSI = N*H*SIN(AL)
90 IF (HA.GT.HSI) THEN
91   WRITE (6,240)
92 240 FORMAT (///,1X,'*** GOLFBREKING BUITEN TALUD ***')
93 STOP
94 END IF

C*****BEPALING LIGGING STENEN*****
95 DO 250 I=N,0,-1
96   Z(I,1) = HA+(I-N)*H*SIN(AL)
97   IF (Z(I,1).GE.0.0) THEN
98     IPP = I
99     P(I) = 0.0
100   ELSE
101     P(I) = (ABS(Z(I,1))+YB)*GW
102   END IF
103 250 CONTINUE

C*****INITIALISATIE*****
104 DO 260 I=0,N
105   Z(I,0) = Z(I,1)-D*COS(AL)
106   PO(I) = HA
107   PN(I) = HA
108 260 CONTINUE
109 RE = 4.0
110 UF = RE/C2
111 CF = 24.0/RE
112 AAK = C1/CF/UF
113 DO 270 I=0,N
114   K(I) = AAK
115 270 CONTINUE
116 DO 280 I=0,N-1,IS+1
117   AP = PN(I)-(Z(I,1)+P(I))/GW
118   A(I) = AK*DX*(ABS(AP)/D)**(ANN-1)
119 280 CONTINUE

C*****GAUSS-SEIDEL*****
120 360 FO = 0
C*****CONTROLLEREN PLAATS IN FILTER*****
121 DO 290 I=0,N-1
122   AA = A(I)*H/K(I)/D/BB
123   TP = I/(IS+1.)
124   ITP = INT(TP)
125   IF (I.EQ.0) GO TO 320
126   IF ((I.LT.IPP).AND.(ITP.EQ.TP)) GO TO 310
127   IF ((I.GE.IPP).AND.(ITP.EQ.TP)) GO TO 305
128   IF (ITP.NE.TP) GO TO 330
```

```

C*****BEREKENINGEN*****
129 305 ZZ = Z(I,1)
130 300 R = -AA*ZZ-(PN(I-1)-(2+AA)*PO(I)+PO(I+1))
131 PN(I) = PO(I)-W/(2+AA)*R
132 CALL FOUT (FO,PN,PO,I)
133 GO TO 290
134 310 ZZ = Z(I,1)+P(I)/GW
135 GO TO 300
136 320 ZZ = Z(I,1)+P(I)/GW
137 R = -AA*ZZ-((-1-AA)*PO(I)+PO(I+1))
138 PN(I) = PO(I)-W/(1+AA)*R
139 CALL FOUT (FO,PN,PO,I)
140 GO TO 290
141 330 R = -(K(I+1)-K(I-1))/4*(PO(I+1)-PN(I-1))+K(I)*(PN(I-1)-2*PO(I)
* +PO(I+1))
142 PN(I) = PO(I)-W/(2*K(I))*R
143 CALL FOUT (FO,PN,PO,I)
144 290 CONTINUE

C*****BESTURING GAUSSSEIDEL PROCES*****
145 FFLL = FF*LL
146 IF (FO.LT.FFLL) THEN
147 CALL DOORL (N,H,IS,Z,D,A,P,AAK,PN,C2,C1,XI,CF,K,AK,ANN,DX,GW
*,BX)
148 END IF
149 DO 340 I=0,N-1
150 PQ(I) = PN(I)
151 340 CONTINUE
152 IF (L.GT.MI) THEN
153 WRITE (6,350)
154 350 FORMAT (//,1X,'*** NIET AAN AFBREEKCRITERIUM VOLDAAN ***')
155 GO TO 355
156 END IF
157 L = L+1
158 IF (FO.GT.FF) GO TO 360

C*****UITVOER*****
159 355 WRITE (6,370) L
160 370 FORMAT (1X,'AANTAL ITERATIFS= ',I5)
161 WRITE (6,380) FO
162 380 FORMAT (1X,'GROOTTE RELATIEVE FOUT= ',E9.4)
163 WRITE (6,390)
164 390 FORMAT (//,1X,'STIJGHOOGTES (M)',/,1X,
*"KNOOP NR.": "STIJGHOOGTE" ETC.',/)
165 DO 410 I=0,N,8
166 WRITE (6,430) (J,PN(J),J=I,I+7)
167 410 CONTINUE
168 430 FORMAT (1X,6(I3,':',E11.4,1X))
169 WRITE (6,440)
170 440 FORMAT (//,1X,'WATERDRUKKEN (N/M2)',/,/,
*"KNOOP NR.": "WATERDRUK BOVENZIJDE/WATERDRUK ONDERZIJDE" ETC.',/)
171 DO 450 I=0,N,4
172 DO 460 J=I,I+3
173 DRO(J) = (PN(J)-Z(J,0))*GW
174 460 CONTINUE
175 WRITE (6,470) (J,P(J),DRO(J),J=I,I+3)
176 450 CONTINUE
177 470 FORMAT (1X,4(I3,':',E10.3,/,',E11.4,1X))
178 WRITE (6,480) ANN
179 480 FORMAT (//,1X,'STROMINGSCOEFFICIENT "N" TUSSEN SPLETEN= ',
*E10.3,/)
180 WRITE (6,490)
181 490 FORMAT(/,1X,'DOORLATENDHEIDSCOEFFICIENTEN SPLETEN TUSSEN BLOKKEN:'
*,/,,"KNOOP NR.": "DOORLATENDHEIDSCOEFFICIENT" ETC.',/)
182 DO 500 I=0,N-1,8*(IS+1)
183 WRITE (6,430) (J,A(J),J=I,I+7*(IS+1),IS+1)
184 500 CONTINUE
185 WRITE (6,530)
186 530 FORMAT (//,1X,'DOORLATENDHEIDSCOEFFICIENTEN FILTER:',/,/,
*"KNOOP NR.": "DOORLATENDHEIDSCOEFFICIENT" ETC.',/)
187 DO 540 I=0,N,8
188 WRITE (6,430) (J,K(J),J=I,I+7)
189 540 CONTINUE
190 WRITE (6,544)
191 544 FORMAT(/,1X,'VERHANGEN IN X-RICHTING IN HET FILTER',/)
192 DO 542 I=0,N,8
193 WRITE (6,430) (J,XI(J),J=I,I+7)
194 542 CONTINUE

```

```

195      WRITE (6,560)
196 560    FORMAT (//,1X,"DEBIET DOOR SPLETEN (M2/S)",/)
197      DO 570 I=0,N-1,8*(IS+1)
198          DO 580 J=I,I+7*(IS+1),IS+1
199              ZZ = Z(J,1)+P(J)/GW
200              Q(J) = A(J)/D*(PN(J)-ZZ)
201 580      CONTINUE
202          WRITE (6,430)( J,Q(J),J=I,I+7*(IS+1),IS+1)
203 570      CONTINUE
204          WRITE (6,575)
205 575    FORMAT (//,1X,"**** EINDE BEREKENING ****")
206      STOP
207      END

```

```

C*****FOOT IN STIJGHOOGTES*****
1      SUBROUTINE FOOT (FO,PN,PO,I)
2      REAL PO(0:300),PN(0:300)
3      ER = ABS((PN(I)-PO(I))/PN(I))
4      IF (ER.GT.FO) THEN
5          FO = ER
6      END IF
7      RETURN
8      END

```

```

C*****BEPALING DOORLATENDHEIDSCOEFFICIENTEN*****
1      SUBROUTINE DOORL (H,H,IS,Z,D,A,P,AAK,PN,C2,C1,XI,CF,K,AK,ANN,DX
2          *,GW,BX)
3      REAL Z(0:300,0:1),A(0:300),K(0:300),XI(0:300),PN(0:300),P(0:300)
4      DO 600 I=0,N
5          IF (I.EQ.N) THEN
6              XI(N) = (PN(N)-PN(N-1))/H
7              GO TO 610
8          END IF
9          IF (I.EQ.0) THEN
10             XI(0) = 0.0
11             GOTO 610
12         END IF
13 610     XI(I) = (PN(I+1)-PN(I-1))/2/H
14         XXI = ABS(XI(I))
15         IF (XXI.LT.1E-10) THEN
16             XXI = 1E-10
17         END IF
18         UF = K(I)*XXI
19         RE = C2*UF
20         IF (RE.LE.4.0) THEN
21             CF = 576.0/(C2*C2*C1*XXI)
22         END IF
23         IF ((RE.GT.4.0).AND.(RE.LT.576.0)) THEN
24             CF = (20736.0/(C2*C2*C1*XXI))*0.333333333333
25         END IF
26         IF (RE.GE.576.0) THEN
27             CF = 0.5
28         END IF
29         IF (CF.LT.1E-10) THEN
30             CF = 1E-10
31         END IF
32         K(I) = (K(I)+BX*C1/CF/UF)/(BX+1)
33         IF (K(I).GT.AAK) THEN
34             K(I) = AAK
35         END IF
36 600     CONTINUE
37     DO 620 I=0,N-1,IS+1
38         TP = PN(I)-(Z(I,1)+P(I)/GW)
39         A(I) = (A(I)+BX*AK*DX*(ABS(TP)/D)**(ANN-1))/(BX+1)
40 620     CONTINUE
41     RETURN
42     END

```

*** STEENZET ****

FYSISCH NIET-LINEAIR, GEOMETRISCH EENDIMENSIONAAL

*** INVOERGRROOTHEDEN ***

HELLINGSHOEK= 14.00
DIKTE STEENZETTING= 0.30
AANTAL STENEN= 20
AFSTAND TUSSEN TWEE SPLETEN= 0.500
HOOGTE FREATISCHE LIJN BOVEN STILWATERNIVEAU= 0.000
GOLPHOOGTE "H" = 0.80
GOLFLENGTE "L" = 60.00
SPLEETBREEDTE BEKLEDING= .150E-02
PORIENGETAL FILTER= 0.40
MAATGEVENDE DIAMETER KORRELS= .700E-02
DIKTE FILTER= 0.60
AANTAL KNOEPEN TUSSEN TWEE SPLETEN= 4
DEMPINGSCOEFFICIENT "BX" = 0.10
STUURPARAMETER "LL" = 500
AANTAL TOEGESTANE ITERATIES= 2000
NAGESTREEFDE RELATIEVE AFBREEKFOUT= .100E-05

*** UITVOER ***

BELASTINGGEVAL: ** BREKENDE GOLF **

BREKERHOOGTE= 1.4253
BREKERPUNT = 1.1537
KSI = 2.1592

AANTAL ITERATIES= 1379
GROOTTE RELATIEVE FOOT= .9847E-06

STIJGHOOGTES (M)
"KNOOP NR.": "STIJGHOOGTE" ETC.

0:	0.1415E+01	1:	0.1415E+01	2:	0.1415E+01	3:	0.1414E+01	4:	0.1414E+01	5:	0.1414E+01	6:	0.1414E+01	7:	0.1413E+01
8:	0.1413E+01	9:	0.1412E+01	10:	0.1412E+01	11:	0.1411E+01	12:	0.1410E+01	13:	0.1409E+01	14:	0.1408E+01	15:	0.1407E+01
16:	0.1405E+01	17:	0.1404E+01	18:	0.1402E+01	19:	0.1400E+01	20:	0.1399E+01	21:	0.1396E+01	22:	0.1393E+01	23:	0.1391E+01
24:	0.1388E+01	25:	0.1385E+01	26:	0.1381E+01	27:	0.1376E+01	28:	0.1372E+01	29:	0.1368E+01	30:	0.1363E+01	31:	0.1356E+01
32:	0.1349E+01	33:	0.1342E+01	34:	0.1335E+01	35:	0.1328E+01	36:	0.1317E+01	37:	0.1306E+01	38:	0.1294E+01	39:	0.1283E+01
40:	0.1271E+01	41:	0.1253E+01	42:	0.1235E+01	43:	0.1217E+01	44:	0.1198E+01	45:	0.1179E+01	46:	0.1151E+01	47:	0.1121E+01
48:	0.1092E+01	49:	0.1062E+01	50:	0.1031E+01	51:	0.9845E+00	52:	0.9364E+00	53:	0.8882E+00	54:	0.8403E+00	55:	0.7952E+00
56:	0.7725E+00	57:	0.7515E+00	58:	0.7307E+00	59:	0.7100E+00	60:	0.6911E+00	61:	0.6847E+00	62:	0.6790E+00	63:	0.6733E+00
64:	0.6678E+00	65:	0.6634E+00	66:	0.6641E+00	67:	0.6647E+00	68:	0.6653E+00	69:	0.6659E+00	70:	0.6666E+00	71:	0.6719E+00
72:	0.6779E+00	73:	0.6840E+00	74:	0.6902E+00	75:	0.6967E+00	76:	0.7079E+00	77:	0.7196E+00	78:	0.7314E+00	79:	0.7433E+00
80:	0.7554E+00	81:	0.7713E+00	82:	0.7876E+00	83:	0.8039E+00	84:	0.8202E+00	85:	0.8368E+00	86:	0.8560E+00	87:	0.8754E+00
88:	0.8949E+00	89:	0.9144E+00	90:	0.9341E+00	91:	0.9554E+00	92:	0.9768E+00	93:	0.9983E+00	94:	0.1020E+01	95:	0.1041E+01
96:	0.1064E+01	97:	0.1086E+01	98:	0.1109E+01	99:	0.1131E+01	100:	0.1154E+01						

WATERDRUKKEN (N/M2)

KNOOP NR.": "WATERDRUK BOVENZIJDE/WATERDRUK ONDERZIJDE" ETC

0:	0.264E+05/	0.2912E+05	1:	0.261E+05/	0.2888E+05	2:	0.259E+05/	0.2864E+05	3:	0.257E+05/	0.2840E+05
4:	0.254E+05/	0.2817E+05	5:	0.252E+05/	0.2793E+05	6:	0.249E+05/	0.2769E+05	7:	0.247E+05/	0.2744E+05
8:	0.245E+05/	0.2720E+05	9:	0.242E+05/	0.2696E+05	10:	0.240E+05/	0.2672E+05	11:	0.238E+05/	0.2647E+05
12:	0.235E+05/	0.2622E+05	13:	0.233E+05/	0.2598E+05	14:	0.231E+05/	0.2573E+05	15:	0.228E+05/	0.2549E+05
16:	0.226E+05/	0.2523E+05	17:	0.223E+05/	0.2498E+05	18:	0.221E+05/	0.2473E+05	19:	0.219E+05/	0.2447E+05
20:	0.216E+05/	0.2422E+05	21:	0.214E+05/	0.2396E+05	22:	0.212E+05/	0.2369E+05	23:	0.209E+05/	0.2343E+05
24:	0.207E+05/	0.2317E+05	25:	0.204E+05/	0.2290E+05	26:	0.202E+05/	0.2262E+05	27:	0.200E+05/	0.2234E+05
28:	0.197E+05/	0.2206E+05	29:	0.195E+05/	0.2178E+05	30:	0.193E+05/	0.2150E+05	31:	0.190E+05/	0.2120E+05
32:	0.188E+05/	0.2089E+05	33:	0.185E+05/	0.2058E+05	34:	0.183E+05/	0.2028E+05	35:	0.181E+05/	0.1997E+05
36:	0.178E+05/	0.1963E+05	37:	0.176E+05/	0.1928E+05	38:	0.174E+05/	0.1893E+05	39:	0.171E+05/	0.1858E+05
40:	0.169E+05/	0.1823E+05	41:	0.166E+05/	0.1782E+05	42:	0.164E+05/	0.1740E+05	43:	0.162E+05/	0.1698E+05
44:	0.159E+05/	0.1657E+05	45:	0.157E+05/	0.1614E+05	46:	0.155E+05/	0.1563E+05	47:	0.152E+05/	0.1510E+05
48:	0.150E+05/	0.1457E+05	49:	0.148E+05/	0.1404E+05	50:	0.145E+05/	0.1350E+05	51:	0.143E+05/	0.1281E+05
52:	0.140E+05/	0.1210E+05	53:	0.000E+00/	0.1139E+05	54:	0.000E+00/	0.1069E+05	55:	0.000E+00/	0.1001E+05
56:	0.000E+00/	0.9548E+04	57:	0.000E+00/	0.9105E+04	58:	0.000E+00/	0.8664E+04	59:	0.000E+00/	0.8225E+04
60:	0.000E+00/	0.7802E+04	61:	0.000E+00/	0.7502E+04	62:	0.000E+00/	0.7209E+04	63:	0.000E+00/	0.6917E+04
64:	0.000E+00/	0.6626E+04	65:	0.000E+00/	0.6345E+04	66:	0.000E+00/	0.6115E+04	67:	0.000E+00/	0.5884E+04
68:	0.000E+00/	0.5652E+04	69:	0.000E+00/	0.5421E+04	70:	0.000E+00/	0.5191E+04	71:	0.000E+00/	0.5006E+04
72:	0.000E+00/	0.4828E+04	73:	0.000E+00/	0.4651E+04	74:	0.000E+00/	0.4474E+04	75:	0.000E+00/	0.4301E+04
76:	0.000E+00/	0.4173E+04	77:	0.000E+00/	0.4051E+04	78:	0.000E+00/	0.3930E+04	79:	0.000E+00/	0.3809E+04
80:	0.000E+00/	0.3691E+04	81:	0.000E+00/	0.3609E+04	82:	0.000E+00/	0.3532E+04	83:	0.000E+00/	0.3454E+04
84:	0.000E+00/	0.3378E+04	85:	0.000E+00/	0.3303E+04	86:	0.000E+00/	0.3254E+04	87:	0.000E+00/	0.3207E+04
88:	0.000E+00/	0.3161E+04	89:	0.000E+00/	0.3115E+04	90:	0.000E+00/	0.3071E+04	91:	0.000E+00/	0.3042E+04
92:	0.000E+00/	0.3015E+04	93:	0.000E+00/	0.2989E+04	94:	0.000E+00/	0.2962E+04	95:	0.000E+00/	0.2936E+04
96:	0.000E+00/	0.2919E+04	97:	0.000E+00/	0.2902E+04	98:	0.000E+00/	0.2886E+04	99:	0.000E+00/	0.2869E+04
100:	0.000E+00/	0.2853E+04	101:	0.000E+00/	0.0000E+00	102:	0.000E+00/	0.0000E+00	103:	0.000E+00/	0.0000E+00

STROMINGS-COEFFICIENT "M" TUSSEN SPLETEN= 0.704E+00

DOORLATENDHEIDSCOEFFICIENTEN SPLETEN TUSSEN BLOKKEN:

KNOOP NR.": "DOORLATENDHEIDSCOEFFICIENT" ETC.

0:	0.1292E-01	5:	0.1249E-01	10:	0.1177E-01	15:	0.1078E-01	20:	0.9666E-02	25:	0.8560E-02	30:	0.7526E-02	35:	0.6589E-02
40:	0.5752E-02	45:	0.5011E-02	50:	0.4357E-02	55:	0.3632E-02	60:	0.4050E-02	65:	0.4490E-02	70:	0.5056E-02	75:	0.5826E-02
80:	0.6849E-02	85:	0.8230E-02	90:	0.1020E-01	95:	0.1354E-01	100:	0.0000E+00	105:	0.0000E+00	110:	0.0000E+00	115:	0.0000E+00

DOORLATENDHEIDSCOEFFICIENTEN FILTER:

KNOOP NR.": "DOORLATENDHEIDSCOEFFICIENT" ETC.

0:	0.4098E+00	1:	0.3740E+00	2:	0.3710E+00	3:	0.3707E+00	4:	0.3649E+00	5:	0.3065E+00	6:	0.2720E+00	7:	0.2688E+00
8:	0.2683E+00	9:	0.2656E+00	10:	0.2376E+00	11:	0.2180E+00	12:	0.2161E+00	13:	0.2158E+00	14:	0.2139E+00	15:	0.1954E+00
16:	0.1816E+00	17:	0.1802E+00	18:	0.1800E+00	19:	0.1785E+00	20:	0.1644E+00	21:	0.1536E+00	22:	0.1526E+00	23:	0.1523E+00
24:	0.1512E+00	25:	0.1397E+00	26:	0.1308E+00	27:	0.1299E+00	28:	0.1298E+00	29:	0.1288E+00	30:	0.1191E+00	31:	0.1116E+00
32:	0.1109E+00	33:	0.1107E+00	34:	0.1099E+00	35:	0.1016E+00	36:	0.9527E-01	37:	0.9462E-01	38:	0.9449E-01	39:	0.9376E-01
40:	0.8669E-01	41:	0.8123E-01	42:	0.8068E-01	43:	0.8056E-01	44:	0.7993E-01	45:	0.7385E-01	46:	0.6917E-01	47:	0.6870E-01
48:	0.6860E-01	49:	0.6806E-01	50:	0.6293E-01	51:	0.5881E-01	52:	0.5842E-01	53:	0.5844E-01	54:	0.5909E-01	55:	0.6567E-01
56:	0.7602E-01	57:	0.7711E-01	58:	0.7734E-01	59:	0.7858E-01	60:	0.9115E-01	61:	0.1165E+00	62:	0.1192E+00	63:	0.1199E+00
64:	0.1244E+00	65:	0.1722E+00	66:	0.2455E+00	67:	0.2533E+00	68:	0.2532E+00	69:	0.2428E+00	70:	0.1470E+00	71:	0.1192E+00
72:	0.1165E+00	73:	0.1161E+00	74:	0.1149E+00	75:	0.1028E+00	76:	0.9427E-01	77:	0.9342E-01	78:	0.9329E-01	79:	0.9280E-01
80:	0.8813E-01	81:	0.8421E-01	82:	0.8382E-01	83:	0.8375E-01	84:	0.8352E-01	85:	0.8126E-01	86:	0.7920E-01	87:	0.7899E-01
88:	0.7896E-01	89:	0.7884E-01	90:	0.7768E-01	91:	0.7658E-01	92:	0.7647E-01	93:	0.7645E-01	94:	0.7640E-01	95:	0.7585E-01
96:	0.7532E-01	97:	0.7527E-01	98:	0.7526E-01	99:	0.7526E-01	100:	0.7526E-01	101:	0.0000E+00	102:	0.0000E+00	103:	0.0000E+00

VERHANGEN IN X-RICHTING IN HET FILTER

0: 0.0000E+00	1: -0.1836E-02	2: -0.1879E-02	3: -0.1884E-02	4: -0.1974E-02	5: -0.3333E-02	6: -0.4768E-02	7: -0.4940E-02
8: -0.4964E-02	9: -0.5121E-02	10: -0.7153E-02	11: -0.9265E-02	12: -0.9508E-02	13: -0.9551E-02	14: -0.9804E-02	15: -0.1287E-01
16: -0.1603E-01	17: -0.1639E-01	18: -0.1647E-01	19: -0.1686E-01	20: -0.2159E-01	21: -0.2646E-01	22: -0.2702E-01	23: -0.2714E-01
24: -0.2778E-01	25: -0.3520E-01	26: -0.4285E-01	27: -0.4374E-01	28: -0.4392E-01	29: -0.4494E-01	30: -0.5679E-01	31: -0.6897E-01
32: -0.7038E-01	33: -0.7068E-01	34: -0.7233E-01	35: -0.9138E-01	36: -0.1110E+00	37: -0.1132E+00	38: -0.1137E+00	39: -0.1164E+00
40: -0.1473E+00	41: -0.1790E+00	42: -0.1827E+00	43: -0.1835E+00	44: -0.1879E+00	45: -0.2382E+00	46: -0.2900E+00	47: -0.2960E+00
48: -0.2973E+00	49: -0.3044E+00	50: -0.3369E+00	51: -0.4717E+00	52: -0.4813E+00	53: -0.4807E+00	54: -0.4651E+00	55: -0.3387E+00
56: -0.2184E+00	57: -0.2093E+00	58: -0.2074E+00	59: -0.1977E+00	60: -0.1267E+00	61: -0.6072E-01	62: -0.5666E-01	63: -0.5565E-01
64: -0.4981E-01	65: -0.1878E-01	66: 0.6487E-02	67: 0.5904E-02	68: 0.5912E-02	69: 0.6699E-02	70: 0.3023E-01	71: 0.5664E-01
72: 0.6066E-01	73: 0.6127E-01	74: 0.6334E-01	75: 0.8845E-01	76: 0.1145E+00	77: 0.1177E+00	78: 0.1182E+00	79: 0.1200E+00
80: 0.1402E+00	81: 0.1607E+00	82: 0.1630E+00	83: 0.1633E+00	84: 0.1647E+00	85: 0.1788E+00	86: 0.1931E+00	87: 0.1947E+00
88: 0.1949E+00	89: 0.1958E+00	90: 0.2047E+00	91: 0.2137E+00	92: 0.2146E+00	93: 0.2147E+00	94: 0.2152E+00	95: 0.2198E+00
96: 0.2245E+00	97: 0.2250E+00	98: 0.2251E+00	99: 0.2251E+00	100: 0.2251E+00	101: 0.0000E+00	102: 0.0000E+00	103: 0.0000E+00

DEBIET DOOR SPLETEN (M2/S)

0: -0.4390E-03	5: -0.4672E-03	10: -0.5376E-03	15: -0.6634E-03	20: -0.8598E-03	25: -0.1148E-02	30: -0.1560E-02	35: -0.2141E-02
40: -0.2959E-02	45: -0.4109E-02	50: -0.5730E-02	55: 0.8839E-02	60: 0.6819E-02	65: 0.5334E-02	70: 0.4022E-02	75: 0.2870E-02
80: 0.1953E-02	85: 0.1261E-02	90: 0.7569E-03	95: 0.3855E-03	100: 0.0000E+00	105: 0.0000E+00	110: 0.0000E+00	115: 0.0000E+00

**** EINDE BEREKENING ****

Hoofdstuk 8 - Veiligheidsbeschouwingen

8.1. Inleiding

Het is bij belastingen en sterkteparameters in het algemeen niet mogelijk om van te voren aan te geven welke preciese waarden zij in een constructie zullen aannemen.

Bij de belastingen komt nog de moeilijkheid dat niet exact is aan te geven waar op het talud en hoe vaak de betreffende belasting optreedt. Belastingen en sterkte van de constructie blijken in de praktijk aan spreiding onderhevig te zijn, waardoor zij als stochastische grootheden opgevat moeten worden.

De tegenhanger van de stochastische grootheid is de deterministische grootheid.

Dit is een grootheid waarvan de waarde met zekerheid bekend is.

In de praktijk komen deterministische grootheden in de vorm van belastingen en sterkten niet voor.

Soms is de spreiding die optreedt evenwel zo gering dat het verantwoord is om de betreffende grootheid als een deterministische grootheid op te vatten.

Evenals belastingen en sterkten zijn ook afmetingen van constructies stochastisch.

De ervaring leert echter wel dat de meeste bezwijkgevallen niet worden veroorzaakt door gebreken in de constructie maar door menselijke fouten.

Hierbij te denken aan rekenfouten in de sterkteberekening of wat een nog groter gevaar vormt is het over het hoofd zien van een maatgevend bezwijkmechanisme.

Ook in de bouwfase komen veel bezwijkgevallen voor, terwijl uitvoeringsfouten in het algemeen een bron van mogelijk bezwijken van de constructie vormen.

Ook verwaarlozing van noodzakelijke inspectie en onderhoud kan ernstige gevolgen hebben.

8.2. Beschrijving probabilistische methoden

Zijn de kansverdelingen van belasting en sterkte berekend dan kan de bijdrage in de kans op bezwijken door een overschrijding van de sterkte bepaald worden, uitgedrukt in:

$$Z = R - S \quad (8.1.)$$

waarin:

Z = de betrouwbaarheidsfunctie

R = de sterkte van de constructie (resistance)

S = de belasting op de constructie (solicitation)

Teneinde een aan zijn doel beantwoordende constructie te verkrijgen moet Z groter dan nul zijn; er treedt dan geen bezwijken op.

Op hun beurt zullen de sterkte R en de belasting S in het algemeen weer functies van andere variabelen zijn.

De betrouwbaarheidsfunctie is daarmee te noteren als:

$$Z = R (X_1 \dots X_k) - S (X_{k+1} \dots X_n) \quad (8.2.)$$

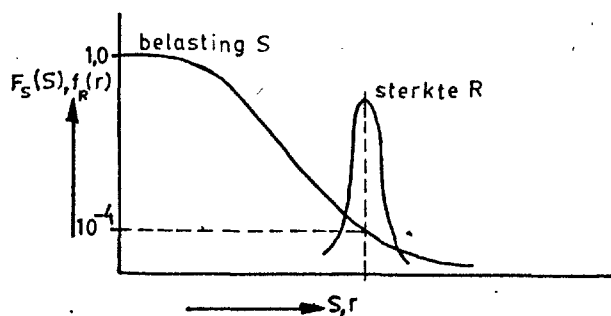
Het is gebruikelijk om de variabelen $X_1 \dots X_n$ uit de betrouwbaarheidsfunctie aan te duiden met de term "basisvariabelen".

Opgemerkt wordt dat de betrouwbaarheidsfunctie Z niet in enge zin als een formule opgevat hoeft te worden; Z mag ook uit een complex rekenmodel voortkomen, zoals een computerprogramma.

Bij dijkbekledingen is niet op voorhand bekend welke de maatgevende toestand is, dat wil zeggen waterstand, golfhoogte, golfsteilheid enzovoort. Wordt naar de bezwikkans van de bekleding gekeken dan zijn meestal niet de bij de meest extreme waterstand behorende golven (superstorm) maatgevend, maar golven bij een lagere waterstand. De reden hiervoor is dat ondanks de minder hevige golfaanval op dit lagere niveau de kans van voorkomen van zo'n storm groter is dan op een hoog niveau.

Dit aspect komt alleen goed naar voren met behulp van een probabilistische berekening, waarbij belasting en sterkte als een onlosmakelijk geheel worden beschouwd.

Bij het ontwerpen van dijken is door de Deltacommissie ook een stochastisch element ingebracht, maar is uit praktische overwegingen teruggekeerd tot het aangeven van slechts de overschrijdingskans van de belasting, zie figuur 8.1.

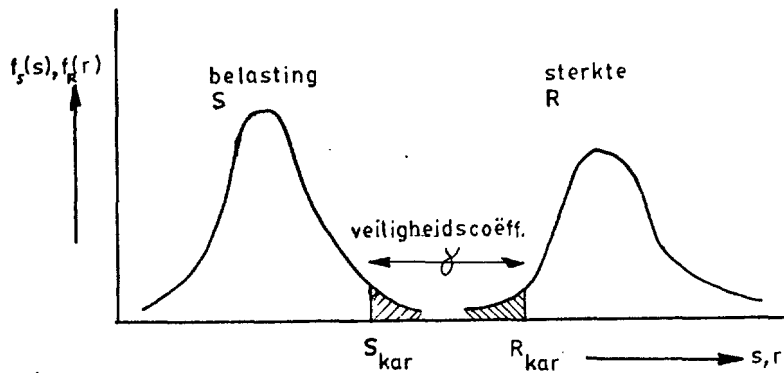


figuur 8.1.: een Nederlands dijkontwerp

Figuur 8.2. geeft schematisch de aanpak volgens de huidige betonvoorschriften.

De kern van de probabilistische veiligheidsbeschouwing wordt gevormd door de zogenoemde probabilistische berekening. Globaal gesproken wordt daarmee bedoeld de bepaling van de bezwijkkans uitgaande van onzekerheden in de optredende belastingen en in de sterkte van de constructie.

Een probabilistische berekening waarbij die onzekerheden op zuiver formele wijze worden verwerkt, leidt al gauw tot gecompliceerde of onoplosbare wiskundige formuleringen voor de kans op bezwijken. Daarom zijn in de loop der tijd een aantal vereenvoudigingen ingevoerd, die betrekking hebben op de wijze waarop onzekerheden worden verwerkt.



figuur 8.2.: de dimensionering van een constructie volgens de VB '74 (niveau I)

Ter ordening van de verschillende mogelijke procedures wordt een vier-tal niveaus van de berekening ingevoerd, die variëren van volledig deterministisch tot volledig probabilistisch.

Deze niveaus zijn:

niveau 0: een deterministische berekening. Voor de belasting en de sterkte worden bepaalde vaste waarden genomen en het rekenmodel wordt als vaststaand beschouwd. Door middel van één algehele veiligheidscoëfficiënt worden alle onzekerheden in rekening gebracht;

niveau I: een semi-probabilistische berekening. Voor de belasting en de sterkte wordt uitgegaan van karakteristieke waarden. Door middel van partiële veiligheidscoëfficiënten - dat wil zeggen coëfficiënten die betrokken zijn op afzonderlijke grootheden - worden de resterende onzekerheden in rekening gebracht;

niveau II: een probabilistische berekening waarin welomschreven vereenvoudigingen zijn aangebracht in de verwerking van de stochastische grootheden, hiervoor bestaan verschillende methoden;

niveau III: een volledig probabilistische berekening.

De berekening is geheel gebaseerd op de leer der stochastiek.

In wezen zijn de berekeningen op niveau 0 en I niet probabilistisch, omdat het resultaat van de berekening geen bezwijkkans is.

De waarden van de veiligheidscoëfficiënten kunnen voor standaardproblemen evenwel worden afgeleid met een berekening op niveau II of III.

Impliciet kan daarmee een berekening op niveau 0 of I betrekking hebben op een bepaalde bezwijkkans.

De beschouwingen zullen hier verder beperkt worden tot probabilistische berekeningen op niveau II.

De vereenvoudigingen die bij de berekeningen op niveau II worden doorgevoerd, zijn allereerst erop gericht om een gecompliceerde betrouwbaarheidsfunctie terug te brengen tot een lineaire functie.

Vervolgens wordt de verdeling van de betrouwbaarheidsfunctie benaderd door een vervangende normale verdeling, waarvan het gemiddelde en de standaardafwijking uit de overeenkomstige parameters van de basisvariabelen worden afgeleid.

Het aanbrengen van de vereenvoudigingen in de betrouwbaarheidsfunctie kan op verschillende wijzen, in de praktijk worden hoofdzakelijk twee methoden toegepast:

- a. de "mean value" benadering
- b. de "advanced" benadering.

ad a

Bij deze methode wordt de betrouwbaarheidsfunctie Z, voor het gemiddelde van de diverse basisvariabelen, in een Taylorreeks ontwikkeld die na de lineaire termen wordt afgebroken.

$$Z \approx Z(\mu(X_1), \mu(X_2) \dots \mu(X_n)) + \sum_{i=1}^n (X_i - \mu(X_i)) \frac{\delta Z}{\delta X_i} \quad (8.3.)$$

waarin:

Z = de betrouwbaarheidsfunctie

$\mu(X_i)$ = de gemiddelde van basisvariabele i.

Het lineariseren in het punt $\mu(X_i)$ houdt in het algemeen in dat wordt gelineariseerd in een punt dat niet op de bezwijkgrens $Z = 0$ ligt. Verder blijkt de methode niet ongevoelig voor de wijze waarop de betrouwbaarheidsfunctie Z geformuleerd is.

Daar tegenover staat evenwel dat de "mean value" berekening betrekkelijk eenvoudig is en in veel gevallen zelfs nog geheel met de hand kan worden uitgevoerd.

Er zijn ingewikkelde iteratieve berekeningen nodig, zoals bij de hierna volgende "advanced" methode om een beter ontwerp punt te vinden.

Na het lineariseren van de betrouwbaarheidsfunctie blijft nog over om de verdelingen van eventueel niet-normaal verdeelde basisvariabelen te vervangen door normale verdelingen.

Bij de "mean value" benadering wordt dit gedaan door aan niet-normaal verdeelde basisvariabelen een normale verdeling toe te kennen met het gemiddelde en de standaardafwijking van de oorspronkelijke verdeling. Door het lineariseren en het vervangen van verdelingen is bereikt, dat:

- Z normaal is verdeeld
- $\mu(Z) = Z(\mu(X_i))$ voor $i = 1$ tot n (8.4.)
- $\sigma(Z) = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\delta Z}{\delta X_i} \right)^2 \sigma^2(X_i) \right]^{1/2}$

De bezwijkkans, $P(Z < 0)$, volgt nu uit de tabel van de normale verdeling, met behulp van $\beta = \frac{\mu(Z)}{\sigma(Z)}$.

ad b

Teneinde aan de genoemde bezwaren tegen de "mean value" benadering tegemoet te komen, zijn verbeterde betrouwbaarheidsanalyses op niveau II uitgewerkt.

Bij de "advanced" benadering betreft de verbetering de keuze van het ontwerp punt.

Het lineariseren vindt niet meer plaats in het punt $\mu(X_i)$ maar in een punt op de bezwijkgrens, er geldt dus $Z(X_i^X) = 0$.

Op de bezwijkgrens wordt het ontwerp punt verder zodanig gekozen dat de waarschijnlijkheid van optreden van die waarde van Z zo groot mogelijk is. Bij van de normale verdeling afwijkende basisvariabelen wordt er voor gezorgd dat de vervangende normale verdeling dezelfde kansdichtheid en overschrijdingskans bezit.

Het definitieve ontwerp punt wordt op een iteratieve wijze gevonden. Een gevolg van het iteratieproces is dat de berekening in het algemeen niet meer met de hand kan worden uitgevoerd.

Met deze globale beschrijving van de methoden wordt hier volstaan, voor meer achtergronden wordt naar de literatuur verwezen, bijvoorbeeld lit. 6 en 7.

Een computerlisting voor een niveau II berekening treft u in appendix 8.1. aan, terwijl in appendix 8.2 een rekenvoorbeeld gedeeltelijk met de hand is uitgewerkt.

8.3. Hydraulische randvoorwaarden

8.3.1. De hoogwaterstand

Volgens Wemelsfelder, zie lit. 1, is voor de verdeling van de hoogwaterstanden een Gumbelverdeling aan te houden:

$$P(\underline{h} > h) = 1 - e^{-e^{-\left(\frac{h - \alpha}{\beta}\right)}} \quad (8.5.)$$

waarin:

h = hoogte waterstand ten opzichte van NAP

α en β zijn constanten te bepalen uit overschrijdingslijnen van Wemelsfelder.

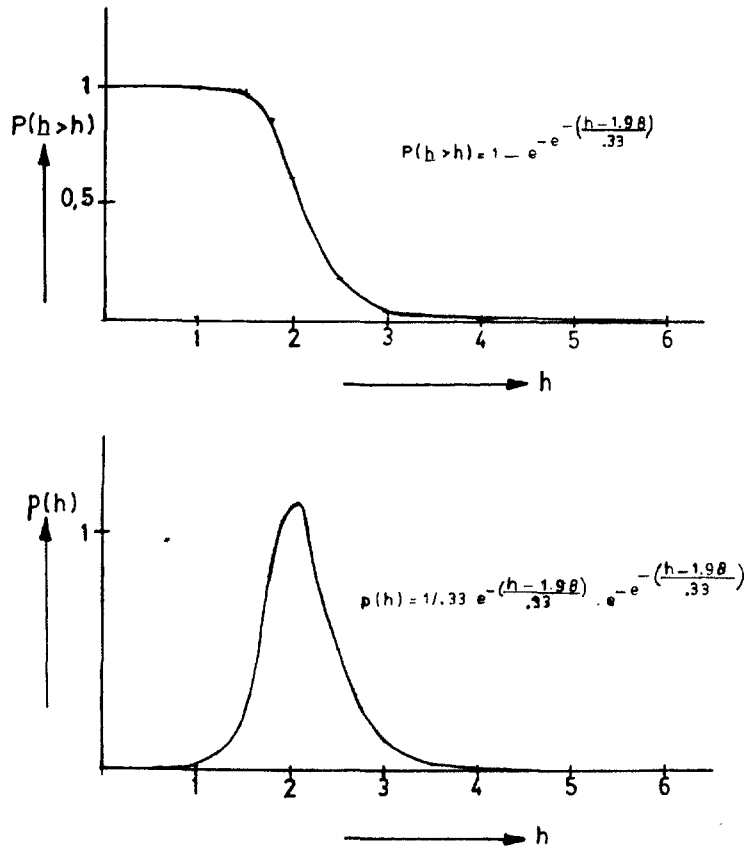
Formule (8.5.) is voor $\alpha = 1,98$ en $\beta = 0,33$ (Hoek van Holland) in figuur 8.3. afgebeeld, evenals de kansdichtheidsfunctie.

8.3.2. De golfhoogte bij een zekere waterstand

De golfhoogten, die op de 20 m dieptelijn optreden tijdens de stormvloed zijn gebaseerd op de benadering volgens Bruinsma, zie lit. 2. Het hierbij toegepaste simulatiemodel berust op het feit dat zowel de windopzet als de golfvelden voor de Nederlandse kust worden veroorzaakt door hetzelfde windveld boven de Noordzee.

De berekening van de windopzet geschiedt met het model van Weenink (lit. 8) en de golfhoogten worden met een van Bretschneider afkomstige relatie bepaald.

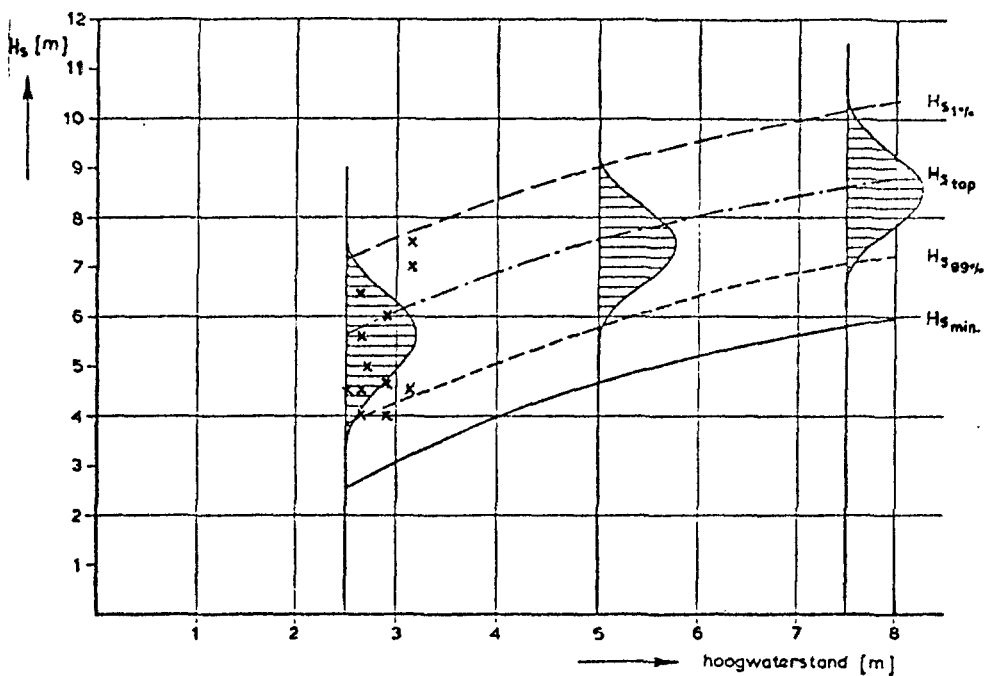
Voorts wordt verondersteld dat de gedurende een storm optredende windsnelheden behorende bij een gegeven waterstand Weibull-verdeeld zijn en dat de parameters van deze verdeling te koppelen zijn aan de opgetreden hoogwaterstand.



figuur 8.3.: kansverdelingsfunctie (I) en kansdichtheidsfunctie (II) van de hoogwaterstanden

Deze koppeling maakt het mogelijk de voorwaardelijke kansverdeling van significante golfhoogten bij een gegeven hoogwaterstand te bepalen. Voor een uitgebreidere beschrijving van de gebruikte technieken wordt naar lit. 2 en 5 verwezen.

Ter illustratie wordt het verband van de golfhoogte met de waterstand, ontleend aan lit. 2, voor Hoek van Holland, in figuur 8.4. gegeven.



x = waarnemingen LEG, MAZ, HAI.

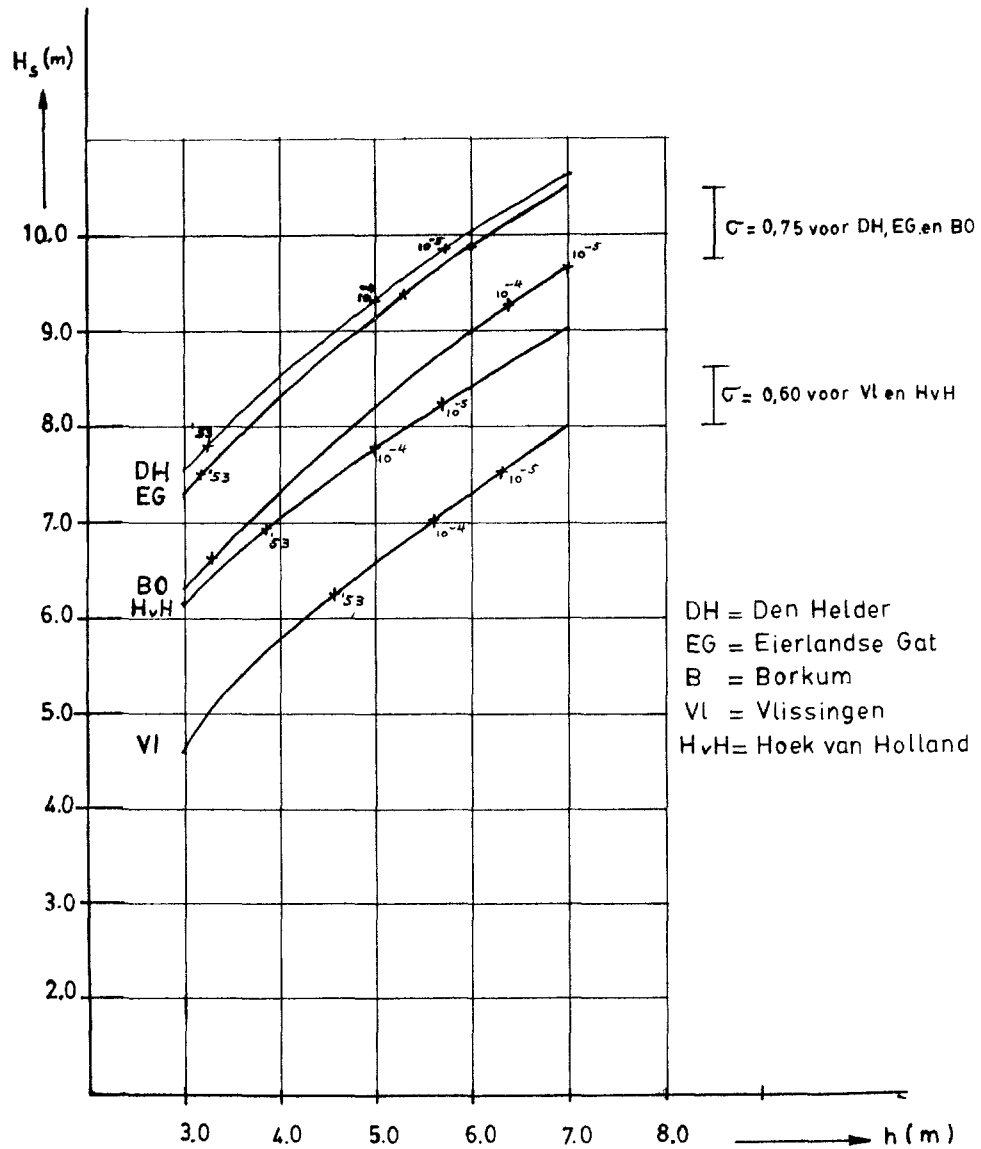
figuur 8.4.: significante golfhoogte versus de waterstand voor Hoek van Holland op de - 20 N A P lijn

De simultane kansdichtheid van hoogwaterstand en significante golfhoogte wordt verkregen door de hoogwaterstandsdichtheidsfunctie te vermenigvuldigen met de voorwaardelijke kansdichtheid van H_s gegeven de hoogwaterstand h .

Deze voorwaardelijke kansdichtheid H_s kan door een Weibull- of normale verdeling worden benadering.

Als uitbreiding op het werk van Bruinsma (lit. 2) zijn door Van Aalst (lit. 5) ook voor andere plaatsen langs de kust golfhoogte-waterstandsrelaties bepaald, zie figuur 8.5.

De aanpak is iets afwijkend van de door Bruinsma gevolgde werkwijze.



figuur 8.5.: significante golfhoogte versus de waterstand voor diverse plaatsen langs de Nederlandse kust

In figuur 8.5. is de voorwaardelijke kansverdeling van de golfhoogte normaal verdeeld verondersteld.

De getallen 10^{-4} en 10^{-5} hebben betrekking op de overschrijdingskans van h , zie formule 8.5.

"'53" geeft de hoogwaterstand voor de stormvloedstand van 1953.

De resultaten volgens figuur 8.4. en 8.5. kunnen voor waarden groter dan het grenspeil, dat is het peil dat gemiddeld éénmaal per twee jaar wordt overschreden, worden benaderd door een polynoom.

Als voorbeeld:

$$\mu (H_s) = \gamma_1 h^2 + \gamma_2 h + \gamma_3 \text{ voor } h > \text{grenspeil} \quad (8.6.)$$

Zo wordt met behulp van figuur 8.4. voor Hoek van Holland gevonden:

$$\mu (H_s) = - 0,06 h^2 + 1,22 h + 2,82 \quad (8.7.)$$

Verder wordt uitgegaan van een normale verdeling:

$$\sigma (H_s) = 0,60 \quad (8.8.)$$

Voor $h < \text{grenspeil}$ moet een uit waarnemingen bekende verdeling van de golfhoogte als functie van de waterstand worden aangehouden (extreme waarden).

8.3.3. De golfsteilheid

Uit diverse golfgroeigrafieken blijkt de golfsteilheid bij ontwikkelde zeegang een vrijwel constante waarde te bezitten.

Bij jonge zeegang is de golfsteilheid wat groter.

Door Vrijling (lit. 2) wordt voor de golfsteilheid op diep water

(H_s/L_o) een normale verdeling aangehouden:

$$\mu (H_s/L_o) = 0,0375 \quad (8.9.)$$

$$\sigma (H_s/L_o) = 0,006 \quad (8.10.)$$

8.3.4. Golfbreking

Treedt bij nadering van de kust golfbreking op dan wordt de golfhoogte bij benadering gereduceerd tot:

$$H_{s_{\max}} = 0,5 (h + d) \quad (8.11.)$$

waarin:

$$\begin{aligned} H_{s_{\max}} &= \text{maximum significante golfhoogte} \\ h &= \text{hoogwaterstand ten opzichte van NAP} \\ d &= \text{waterdiepte ten opzichte van NAP} \end{aligned}$$

De golfperiode T_p wijzigt niet.

De randvoorwaarde voor de dijk wordt dan gegeven door:

$$H_{s_{\max}} \text{ en } \frac{g T_p^2}{2\pi} = L_o \quad (8.12.)$$

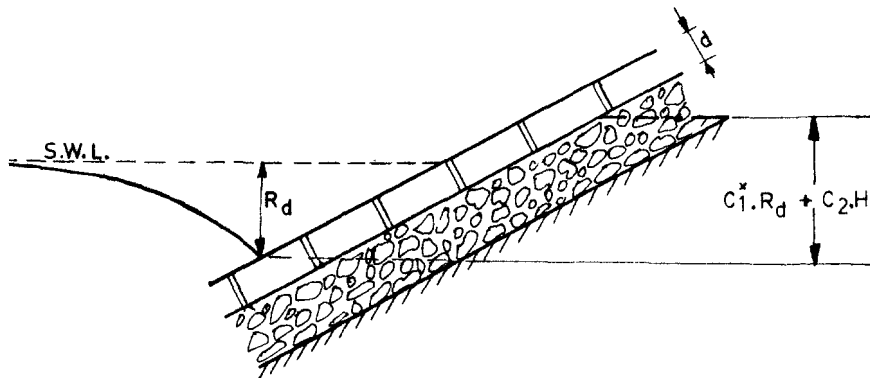
De golfsteilheid wordt dus bij gelijkblijvende golflengte en afnemende golfhoogte kleiner.

8.4. De bekleding

Voor het berekenen van de sterkte van de bekleding wordt uitgegaan van een sterk geschematiseerd rekenmodel. Wanneer te zijner tijd een beter rekenmodel ter beschikking staat, kan dat het hier gegeven model vervangen. De aanpak blijft in hoofdlijnen hetzelfde.

De hierin opgenomen constanten worden bepaald aan de hand van de in lit. 9 aangetroffen proefresultaten.

Omdat de belasting (waaronder het verschijnsel golfklap) en sterkte van de bekleding nog niet gescheiden kunnen worden moeten deze tezamen in de beschouwingen worden betrokken.



Figuur 8.6.: vereenvoudigd rekenmodel

De overdruk ter plaatse van "run-down" is:

$$p = \rho_w g (C_1^x R_d + C_2 H) \quad (8.13.)$$

Uit onderzoek (lit. 4) blijkt:

$$R_d \approx 0,3 \xi H \quad (8.14.)$$

waaruit volgt:

$$p = \rho_w g H (C_1 \xi + C_2) \quad (8.15.)$$

Het eigen gewicht van een blok onder water is:

$$(\rho_b - \rho_w) g d \cos \alpha \quad (8.16.)$$

Stabiliteitsverlies treedt op indien:

$$\rho_w g H (C_1 \xi + C_2) > (\rho_b - \rho_w) g d \cos \alpha \quad (8.17.)$$

(S) (R)

Verder uitgewerkt levert dit:

$$\frac{H}{\Delta d} = \frac{\cos \alpha}{(C_1 \xi + C_2)} \quad (8.18.)$$

De variabelen hebben de volgende betekenis:

- H = golfhoogte
- R_d = run-down punt
- p = druk onder de blokken in run-down punt
- g = versnelling zwaartekracht
- α = taludhelling
- d = dikte bekleding
- ρ_b = soortelijke massa bekleding
- ρ_w = soortelijke massa water
- Δ = (ρ_b - ρ_w)/ρ_w
- ξ = tg α/√H/L_o

Als bezwijkcriterium is hier dus het oplichten van een enkel blok gekozen, er is verder geen rekening gehouden met veranderingen in de sterkte in de loop der tijd.

Verder wordt gesteld dat voor de golfhoogte H ook de significante golfhoogte H_s gelezen mag worden. Opgemerkt wordt dat bij de rekenvoorbeelden soms voorbij het gebied van de empirische waarnemingen wordt gerekend, waardoor de resultaten in die gebieden met enige voorzichtigheid geïnterpreteerd moeten worden.

De constanten C₁ en C₂ moeten worden bepaald aan de hand van voorhanden zijnd empirisch materiaal (lit. 9).

Zo kan bijvoorbeeld met het in figuur 8.7., voor losliggende blokken op een doorlatende onderlaag, gegeven verband tussen ξ en H_s/Δd door middel van regressieanalyse de constanten C₁ en C₂ worden bepaald.

Voor de in figuur 8.7. gegeven waarden wordt gevonden:

$$C_1 = 0,1196 \text{ en } C_2 = 0,1194.$$

Eén waarneming, Kostense 1980-2, is vanwege het afwijkende beeld wegge-
 laten. De correlatie-coëfficiënt bedraagt nu 0,96.

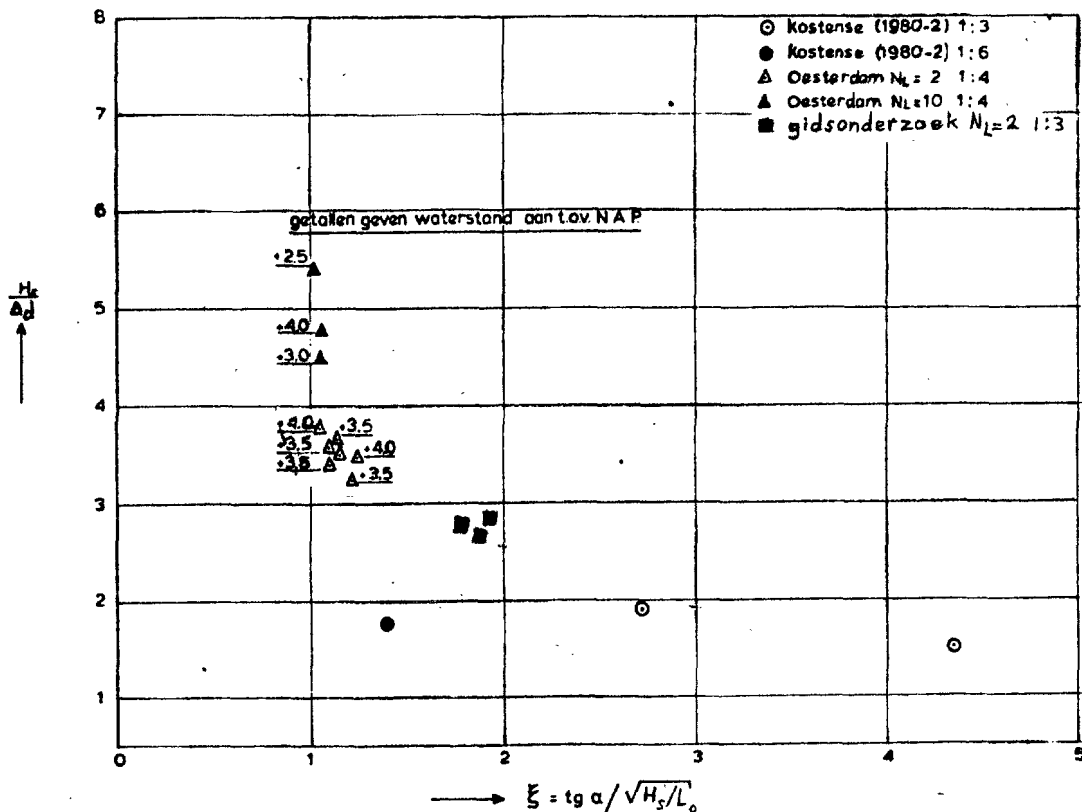
Teneinde het stochastische karakter naar voren te laten komen wordt aan
 constante C_1 een normale verdeling toegekend:

$$\mu (C_1) = 0,1196$$

$$\sigma (C_1) = 0,025$$

Veelal zullen bij wat zwaardere hydraulische randvoorwaarden de in
 figuur 8.7. gegeven waarden voor losliggende blokken niet voldoen.
 Bekend is dat geklemde zettingen een aanzienlijk hogere stabiliteit
 bezitten.

Er is echter niet voldoende empirisch materiaal voorhanden om voor dit
 type bekleding functionele verbanden tussen $\frac{H}{\Delta d}$ en ξ af te leiden.



Figuur 8.7.: losliggende blokken op doorlatende ondergrond

Teneinde toch met deze sterkere constructie te kunnen rekenen, wordt hier aangenomen, dat het evenwicht niet alleen aan het eigen gewicht van slechts één element ontleend behoeft te worden, formule 8.17. krijgt dan de volgende vorm:

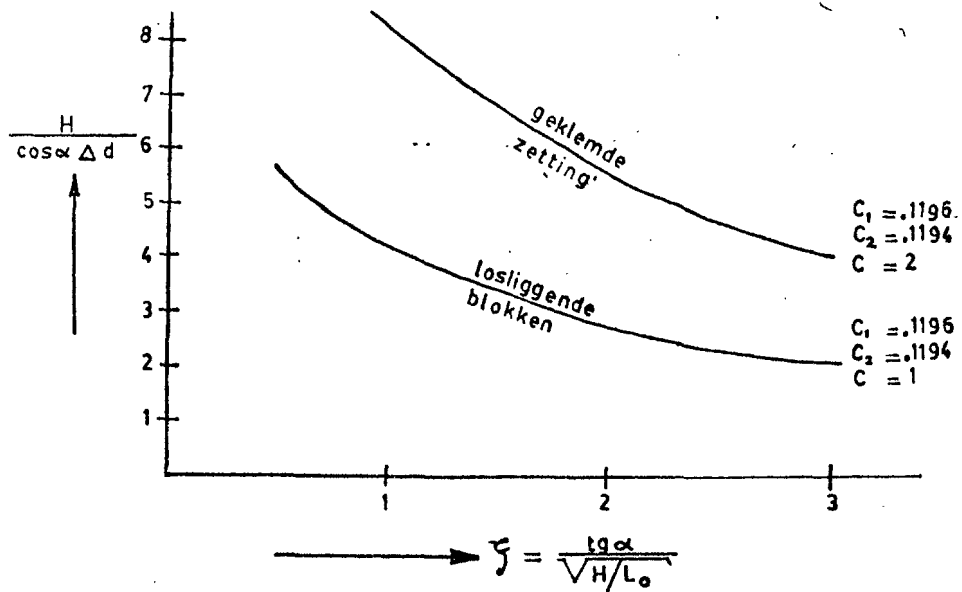
$$\rho_w g H (C_1 \xi + C_2) \geq C (\rho_b - \rho_w) g d \cos \alpha \quad (8.19.)$$

waarin C het aantal blokken is.

De betrouwbaarheidsfunctie Z krijgt nu de volgende gedaante:

$$Z = C (\rho_b - \rho_w) g d \cos \alpha - \rho_w g H (C_1 \xi + C_2) \quad (8.20.)$$

Het hier aangenomen gedrag van een geklemde zetting ten opzichte van een zetting opgebouwd uit losliggende blokken is in figuur 8.8. geïllustreerd.



figuur 8.8.: stabiliteit blokken

8.5. Rekenvoorbeelden

Met behulp van de hiervoor behandelde rekentechnieken en uitgangspunten is het nu mogelijk de kans van bezwijken van een gezette bekleding bij sterk geschematiseerde hydraulische randvoorwaarden te bepalen.

De golfaanval vindt plaats loodrecht op de dijkas, via een correctiecoëfficiënt voor de golfhoogte kan een van diep water afwijkend golfklimaat worden gesimuleerd.

Via het golfbreekcriterium is het mogelijk een ondiepte voor de dijk te simuleren.

De hier gepresenteerde rekenvoorbeelden hebben tot doel de mogelijkheden van een probabilistische aanpak te illustreren. Wegens de aangebrachte schematisaties kunnen uit de verkregen resultaten niet meer dan kwalitatieve conclusies worden getrokken.

Rekenvoorbeeld 1

De dikte van de bekleding en daarmee de sterkte wordt constant verondersteld, de dikte is dus geen functie van de plaats op het talud (het computerprogramma laat dit in principe wel toe).

De waarden van de diverse basisvariabelen zijn in tabel 1 samengevat. Daarna is in de computeruitvoer de resultaten van de niveau II berekening gegeven.

In de eerste kolom zijn de namen van de stochasten afgedrukt.

De tweede kolom bevat de actuele waarde van de stochast.

De derde kolom geeft de afgeleide van de betrouwbaarheidsfunctie Z in het punt X (I).

De standaardafwijking van de stochast is in kolom vier gegeven.

Kolom vijf geeft het percentage dat de betreffende stochast bijdraagt in de totale variantie van de betrouwbaarheidsfunctie.

Bij de "advanced" benadering zijn in de zesde kolom de partiële veiligheidscoëfficiënten gebaseerd op de gemiddelde waarden gegeven:

$$\gamma_i = \frac{x_i^x}{\mu(x_i)}$$

In de zevende kolom zijn de partiële veiligheidscoëfficiënten gegeven gebaseerd op de karakteristieke waarden:

$$Y_i = \frac{X_i^x}{\mu(X_i) \pm 1,64 \sigma(X_i)}$$

stochast	type verdeling	gemiddelde	standaard-afwijking
hoogwater (HHW)	Gumbel formule 8.5.	-	-
golfsteilheid (H/L)	Normaal	0,0375	0,006
sterkte coëfficiënt (C ₁)	Normaal	0,1196	0,025
variatie golfhoogte (SHS)	Normaal	0	0,6
dikte bekleding (DI)	Normaal	0,35	0,005
diepte vooroever (D)	Normaal	10	0
taludhelling (ALFA)	Normaal	0,197 (1 : 5)	0,01

Tabel 1

Verder vindt men correctiecoëfficiënten gegeven voor de golfhoogte en de klemming van de zetting.

De coëfficiënt voor de golfhoogte reduceert de golfhoogte en simuleert zo een dijk die wat uit de wind ligt of meer landinwaarts is gelegen. De coëfficiënt voor de klemming komt overeen met de constante C uit formule 8.19.

Bij dit rekenvoorbeeld blijkt de grootste bezwijkkans bij een hoogwaterstand van 2,883 + NAP op te treden; op andere hoogten is de bezwijkkans kleiner.

Een gedeelte van dit rekenvoorbeeld is in appendix 8.2 met de hand uitgewerkt.

"MEAN VALUE" BENADERING

BETA = 2.82414874
FAALKANS = 2.37038125E-03

	X(I)	Z'(I)	SI(I)	PERC(I)
HHW	2.7	-858.51	.602	26.34
H/L	.0375	36716.143	6E-03	4.78
C1	.1196	-23027.115	.025	32.67
SHS	1E-03	-954.167	.6	32.31
DI	.35	23617.554	5E-03	1.37
D	10	0	0	0
ALFA	.197	-15998.268	.01	2.52

HS= 2.27
KSI= 1.03
HS/(DELTA.D.COS(A))= 4.73

CORRECTIECOEFF. GOLFHOOGTE= 2.5
CORRECTIECOEFF. KLEMMING= 1.75

"ADVANCED" BENADERING

DEF. BETA = 3.03750895
FAALKANS = 1.19279071E-03

	X(I)	Z'(I)	SI(I)	PERC(I)	GAMMA	GAMMAKAR.
HHW	2.893	-1062.885	.663	25.45		
H/L	.0312	80758.413	6E-03	12.02	.032	1.127
C1	.1619	-31129.456	.025	31.01	1.354	1.008
SHS	.9493	-1210.709	.6	27.02	948.28	.963
DI	.3497	23589.325	5E-03	.71	.996	1.02
D	10	0	0	0	1	1
ALFA	.2029	-27207.947	.01	3.79	1.03	.951

HS= 2.72
KSI= 1.17
HS/(DELTA.D.COS(A))= 5.68

CORRECTIECOEFF. GOLFHOOGTE= 2.5
CORRECTIECOEFF. KLEMMING= 1.75

Z = 1.89590454E-03

Met nadruk wordt erop gewezen dat het werkelijke schadepunt op het talud veelal lager ligt dan de stilwaterlijn. Voor de eenvoud wordt hier als uitgangspunt genomen dat het schadepunt samenvalt met het rundown-punt.

Voor het rundown-punt wordt verder formule 8.14. aangehouden.

De hier berekende bezwijkkans is de totale kans van optreden van een bepaalde waterstand en de kans van bezwijken van een enkel blok.

De voorwaardelijke kans op bezwijken van een enkel blok bij een gegeven waterstand is onderaan het talud aanzienlijk kleiner dan op de meer naar boven gelegen zones.

Door de waterstand voor diverse niveaus te fixeren, dat wil zeggen invoeren als deterministische grootheid, zijn deze voorwaardelijke kansen eventueel eenvoudig te berekenen.

Rekenvoorbeeld 2

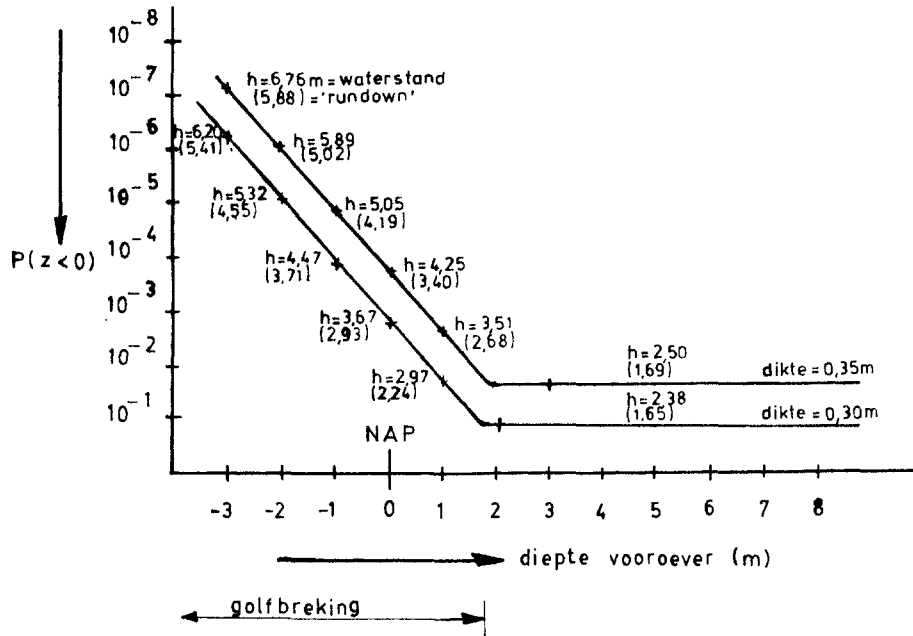
Door de waarden van enkele stochasten te variëren kan men eenvoudig de effecten op de bezwijkkans van de bekleding, dat wil zeggen op oplichten van een enkel blok, nagaan.

De resultaten van de parameterstudie zijn in figuur 8.9. gegeven. De waarden van de invoergegevens komen grotendeels overeen met het eerste rekenvoorbeeld, alleen de correctiecoëfficiënt voor de klemming is verlaagd tot 1,45.

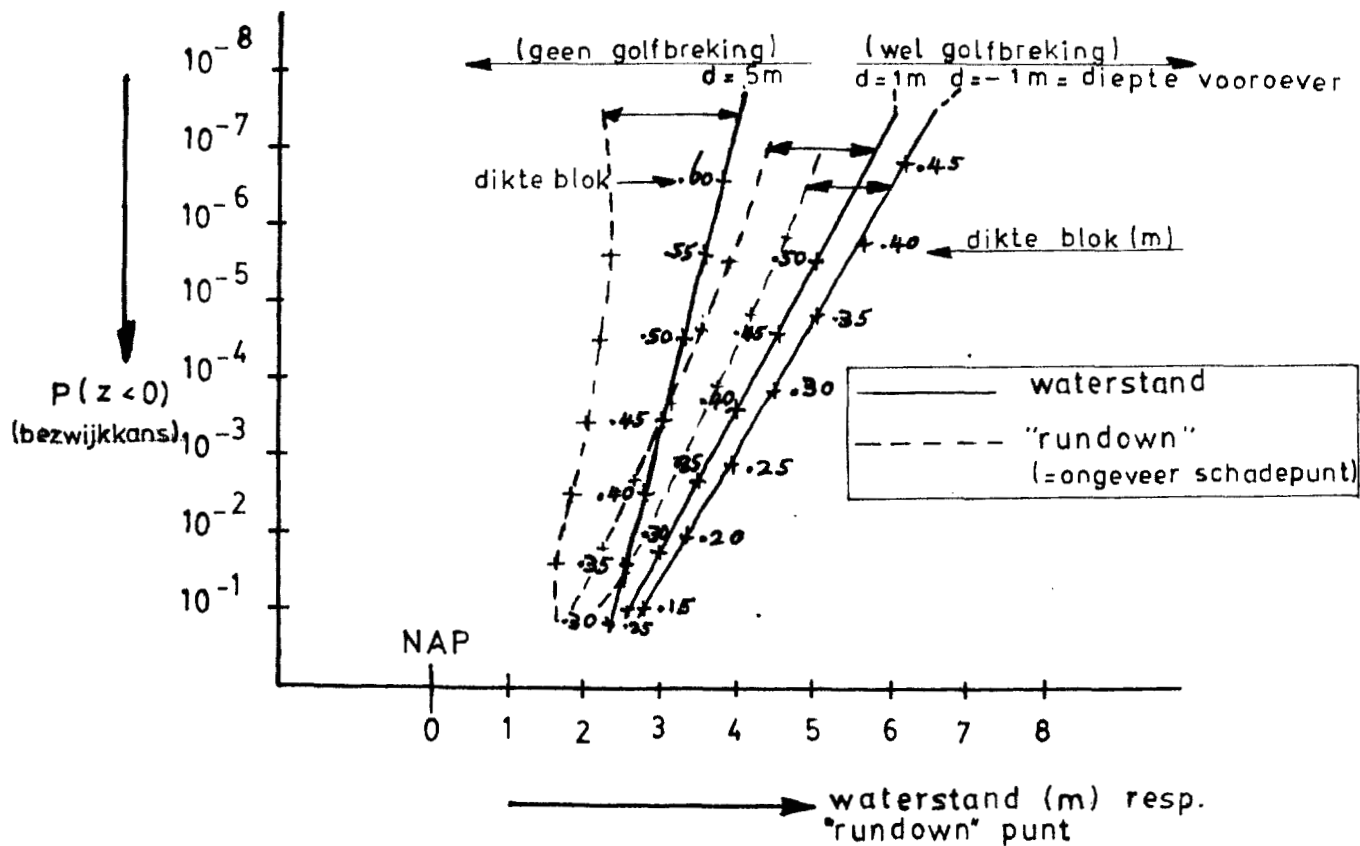
Duidelijk blijkt uit figuur 8.9. de gunstige invloed van een hooggelegen vooroever.

Het punt met de grootste kans op schade komt bij een hoger gelegen vooroever op een hoger niveau op het talud te liggen.

Door de dikte van de blokken meer systematisch te variëren verkrijgt men een beeld overeenkomstig figuur 8.10.



Figuur 8.9.: invloed diepte vooroever en dikte van de bekleding



Figuur 8.10.: invloed blokdikte en diepte vooroever

Rekenvoorbeeld 3

Bij dit rekenvoorbeeld wordt de taludhelling gevarieerd.

Een uitvoervoorbeeld voor één van de punten uit figuur 8.11. vindt u hieronder.

*** MEAN VALUE * BENADERING**

BETA = 2.6729953
FAALKANS = 3.75891064E-03

	X(I)	Z'(I)	SI(I)	PERC(I)
MHW	3	-1584.739	.712	32.14
H/L	.0375	92313.131	6E-03	7.74
C1	.1196	-57896.118	.025	52.83
SHS	1E-03	-582.193	.6	3.08
DI	.35	46730.041	5E-03	1.38
D	4	-1081.432	0	0
ALFA	.245	-33517.838	.01	2.83

HS= 3.5
KSI= 1.68
HS/(DELTA.D.COS(A))= 7.36

CORRECTIECOEFF. GOLFHOOGTE= 1
CORRECTIECOEFF. KLEMMING= 3.5

*** ADVANCED * BENADERING**

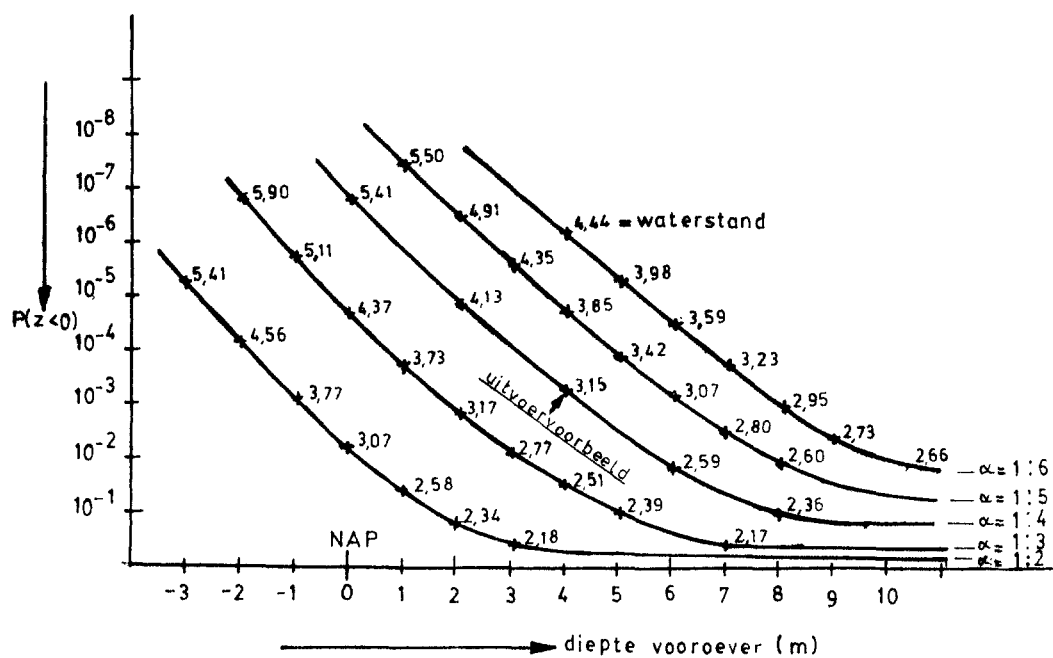
DEF. BETA = 3.24027296
FAALKANS = 5.97138634E-04

	X(I)	Z'(I)	SI(I)	PERC(I)	GAMMA	GAMMAKAR.
MHW	3.1531	-2220.591	.761	34.7		
H/L	.0291	207733.154	6E-03	18.86	.775	1.051
C1	.1698	-71132.282	.025	38.39	1.42	1.057
SHS	.3886	-934.185	.6	3.81	380.642	.386
DI	.3487	46657.562	5E-03	.66	.996	1.02
D	4	-1430.153	0	0	1	1
ALFA	.2511	-54318.619	.01	3.58	1.025	.961

HS= 3.58
KSI= 2.02
HS/(DELTA.D.COS(A))= 7.56

CORRECTIECOEFF. GOLFHOOGTE= 1
CORRECTIECOEFF. KLEMMING= 3.5

Z = 4.24957275E-03



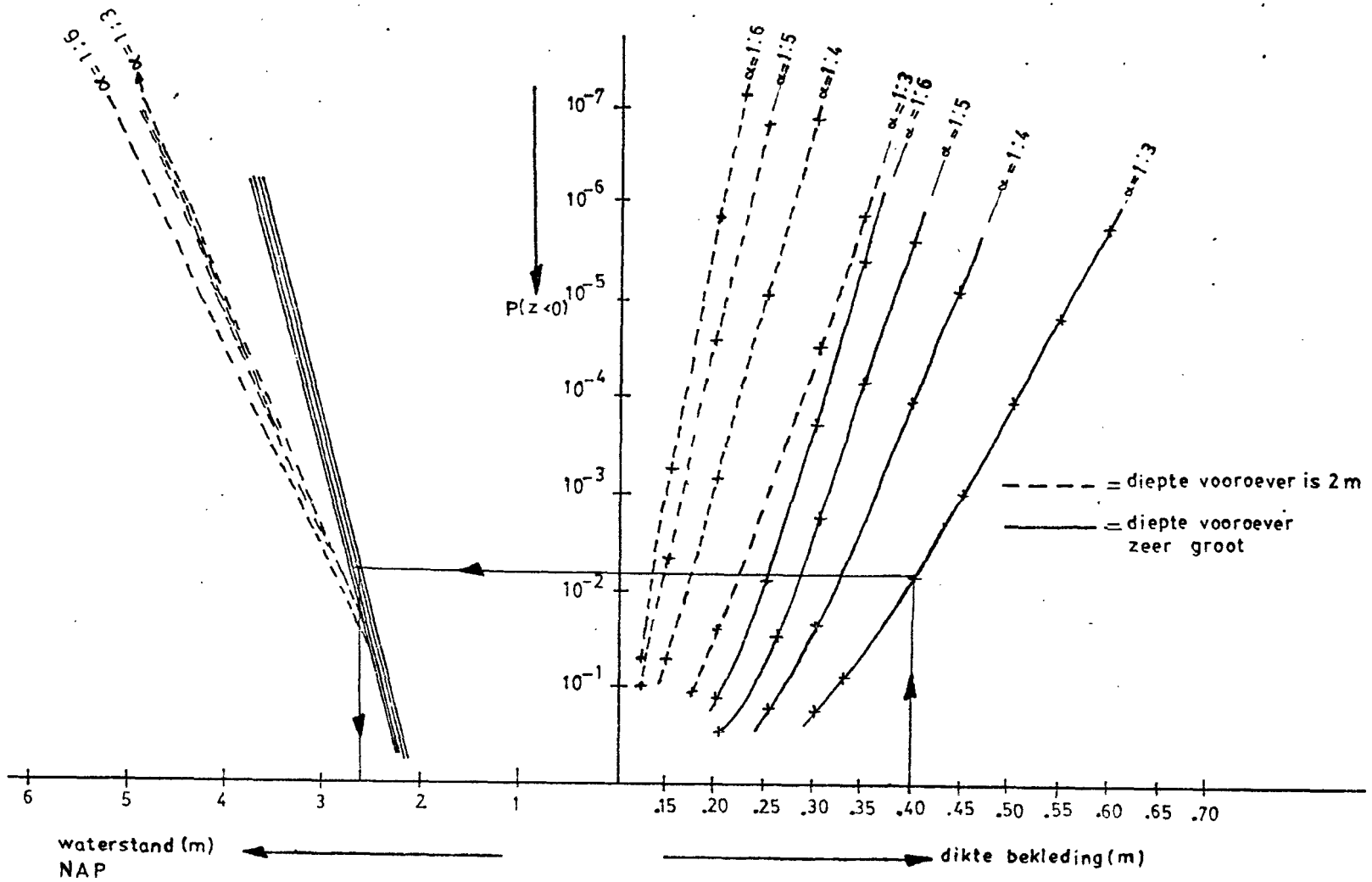
figuur 8.11.: invloed taludhelling en diepte vooroever

Rekenvoorbeeld 4

In dit voorbeeld wordt een ontwerpgrafiek berekend voor één lokatie en één type bekleding, zie figuur 8.12., waarbij op voorhand geen uitspraak wordt gedaan over de te accepteren bezwijkkans.

De lokatie is weer Hoek van Holland, de correctiecoëfficiënt voor de golfhoogte is 1 en voor de klemming 5.

De dijk ligt dus aan open zee, terwijl de zetting sterk is geklemd.



Figuur 8.12.: Ontwerpgrafiek

Rekenvoorbeeld 5

In dit rekenvoorbeeld wordt de sterkte van de bekleding als functie van het hoogteniveau ingevoerd.

Gekozen is voor een continue functie die de dikte van de bekleding laat variëren.

In de praktijk zal men echter de dikte of het gewicht van de blokken sprongsgewijs variëren.

Vanwege het iteratieve rekenproces levert dit echter vaak problemen met de convergentie op.

Uitvoer bij constante dikte van de bekleding

*** MEAN VALUE * BENADERING**

BETA = 2.6729953
FAALKANS = 3.75891064E-03

	X(I)	Z'(I)	SI(I)	PERC(I)
HHW	3	-1584.739	.712	32.14
H/L	.0375	92313.131	6E-03	7.74
C1	.1196	-57896.118	.025	52.83
SHS	1E-03	-582.193	.6	3.08
DI	.35	46730.841	5E-03	1.38
D	4	-1081.432	0	0
ALFA	.245	-33517.838	.01	2.83

HS= 3.5
KSI= 1.68
HS/(DELTA.D.COS(A))= 7.36

CORRECTIECOEFF. GOLFHOOGTE= 1
CORRECTIECOEFF. KLEMMING= 3.5

*** ADVANCED * BENADERING**

DEF. BETA = 3.24827296
FAALKANS = 5.97138634E-04

	X(I)	Z'(I)	SI(I)	PERC(I)	GAMMA	GAMMAKAR.
HHW	3.1531	-2220.591	.761	34.7		
H/L	.0291	267733.154	6E-03	18.86	.775	1.051
C1	.1698	-71132.202	.025	38.39	1.42	1.057
SHS	.3806	-934.105	.6	3.81	380.642	.386
DI	.3487	46657.562	5E-03	.66	.996	1.02
D	4	-1430.153	0	0	1	1
ALFA	.2511	-54318.619	.01	3.58	1.025	.961

HS= 3.58
KSI= 2.02
HS/(DELTA.D.COS(A))= 7.56

CORRECTIECOEFF. GOLFHOOGTE= 1
CORRECTIECOEFF. KLEMMING= 3.5

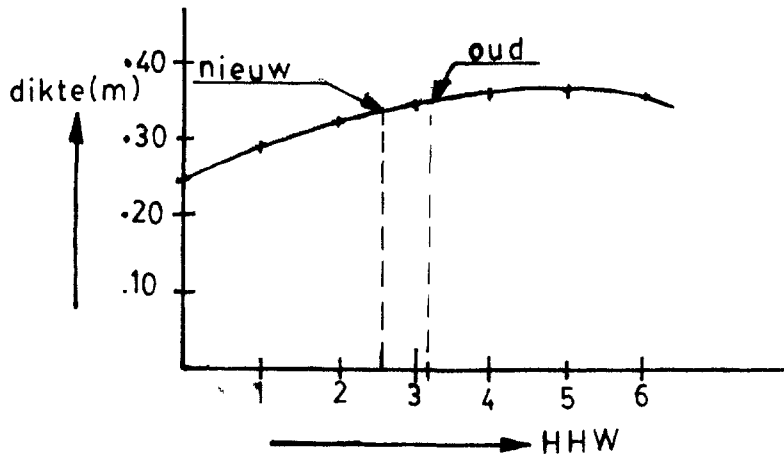
Z = 4.24957275E-03

In de volgende berekening is de dikte van de bekleding opgegeven als:

$$\text{dikte} = 0,25 + 0,0475 \cdot \text{HHW} - 0,005 \cdot \text{HHW}^2 \quad (8.21.)$$

met HHW = hoogwaterstand

Voor HHW = 3,1531, dat wil zeggen de waarde voor HHW in het ontwerp punt voor een bekleding van constante dikte, wordt dan weer een dikte van 0,35 m gevonden. Formule 8.20 is grafisch in figuur 8.13. uitgezet.



figuur 8.13.: blokdikte als functie van de hoogte op het talud

Zoals was te voorzien is het punt met de grootste kans van bezwijken nu lager op het talud gelegen: HHW = 2,55 m.

Wanneer het verloop volgens figuur 8.14 wordt aangehouden zal het punt met de grootste bezwijkkans hoger op het talud komen te liggen: HHW = 3,44 m.

Uitvoer bij variabele dikte van de bekleding

"MEAN VALUE" BENADERING

BETA = 3.01134936
FAALKANS = 1.30051632E-03

	X(I)	Z'(I)	SI(I)	PERC(I)
HHW	3	-767.152	.712	9.99
H/L	.0375	92313.131	6E-03	10.26
C1	.1196	-57896.118	.025	70.08
SHS	1E-03	-582.193	.6	4.08
DI	0	46729.516	5E-03	1.83
D	4	-1081.432	0	0
ALFA	.245	-33488.846	.01	3.75

HS= 3.5
KSI= 1.68

CORRECTIECOEFF. GOLFHOOGTE= 1
CORRECTIECOEFF. KLEMMING= 3.5

"ADVANCED" BENADERING

DEF. BETA = 3.1493642
FAALKANS = 0.1819706E-04

	X(I)	Z'(I)	SI(I)	PERC(I)	GAMMA	GAMMAKAR.
HHW	2.5513	-1374.926	.55	9.78		
H/L	.0273	217473.348	6E-03	29.11	.728	.987
C1	.1749	-67927.399	.025	49.31	1.462	1.089
SHS	.4644	-988.471	.6	6.01	464.409	.471
DI	-1.5E-03	46645.355	5E-03	.93	-150.861	.184
D	4	-1493.595	0	0	1	1
ALFA	.2519	-53269.577	.01	4.85	1.028	.964

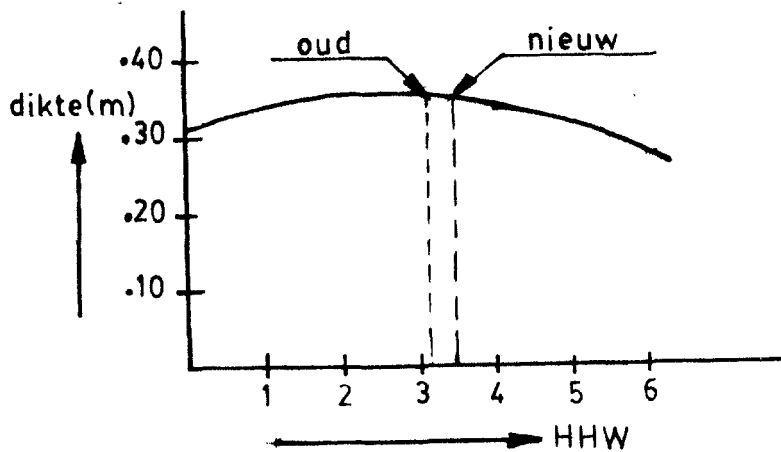
HS= 3.28
KSI= 2.11

CORRECTIECOEFF. GOLFHOOGTE= 1
CORRECTIECOEFF. KLEMMING= 3.5

Z = -4.50134277E-04

De dikte van de bekleding is in dit geval gegeven als:

$$\text{dikte} = 0,315 + 0,03 \cdot \text{HHW} - 0,006 \cdot \text{HHW}^2 \quad (8.21.)$$



figuur 8.14.: blokdikte als functie van de hoogte op het talud

Uitvoer bij variabele dikte van de bekleding

* MEAN VALUE * BENADERING

BETA = 2.54370837
FAALKANS = 5.4841541E-03

	X(I)	Z'(I)	SI(I)	PERC(I)
HHW	3	-1865.288	.712	39.62
H/L	.0375	92313.131	6E-03	6.08
C1	.1196	-57896.118	.025	47.01
SHS	1E-03	-582.193	.6	2.74
DI	0	46730.041	5E-03	1.22
D	4	-1081.432	0	0
ALFA	.245	-33529.663	.01	2.52

HS= 3.5
KSI= 1.68

CORRECTIECOEFF. GOLFHOOGTE= 1
CORRECTIECOEFF. KLEMMING= 3.5

* ADVANCED * BENADERING

DEF. BETA = 3.21889989
FAALKANS = 6.434802E-04

	X(I)	Z'(I)	SI(I)	PERC(I)	GAMMA	GAMMAKAR.
HHW	3.4439	-2626.949	.857	49.52		
H/L	.0305	193088.531	6E-03	13.13	.813	1.103
C1	.1646	-71547.852	.025	31.29	1.376	1.025
SHS	.3224	-886.955	.6	2.77	322.409	.327
DI	-1.2E-03	46664.429	5E-03	.53	-116.43	.142
D	4	-1378.052	0	0	1	1
ALFA	.2503	-53204.346	.01	2.77	1.022	.958

HS= 3.72
KSI= 1.96

CORRECTIECOEFF. GOLFHOOGTE= 1
CORRECTIECOEFF. KLEMMING= 3.5

Z = 1.22070313E-04

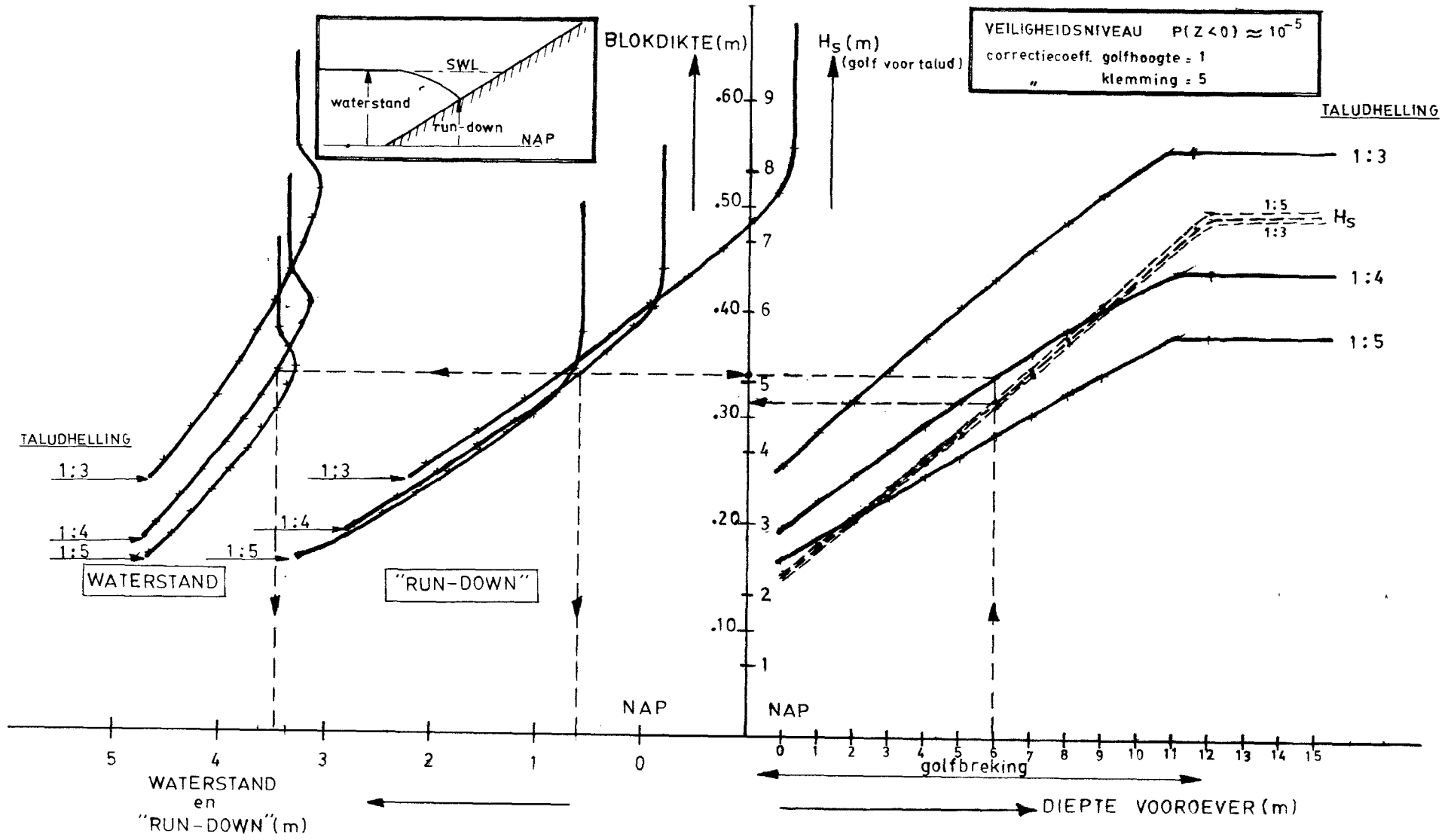
Rekenvoorbeeld 6

Bij dit rekenvoorbeeld wordt ervan uitgegaan dat op elk niveau van het talud een zelfde maximale kans op bezwijken aanwezig dient te zijn, zie ook paragraaf 8.6.

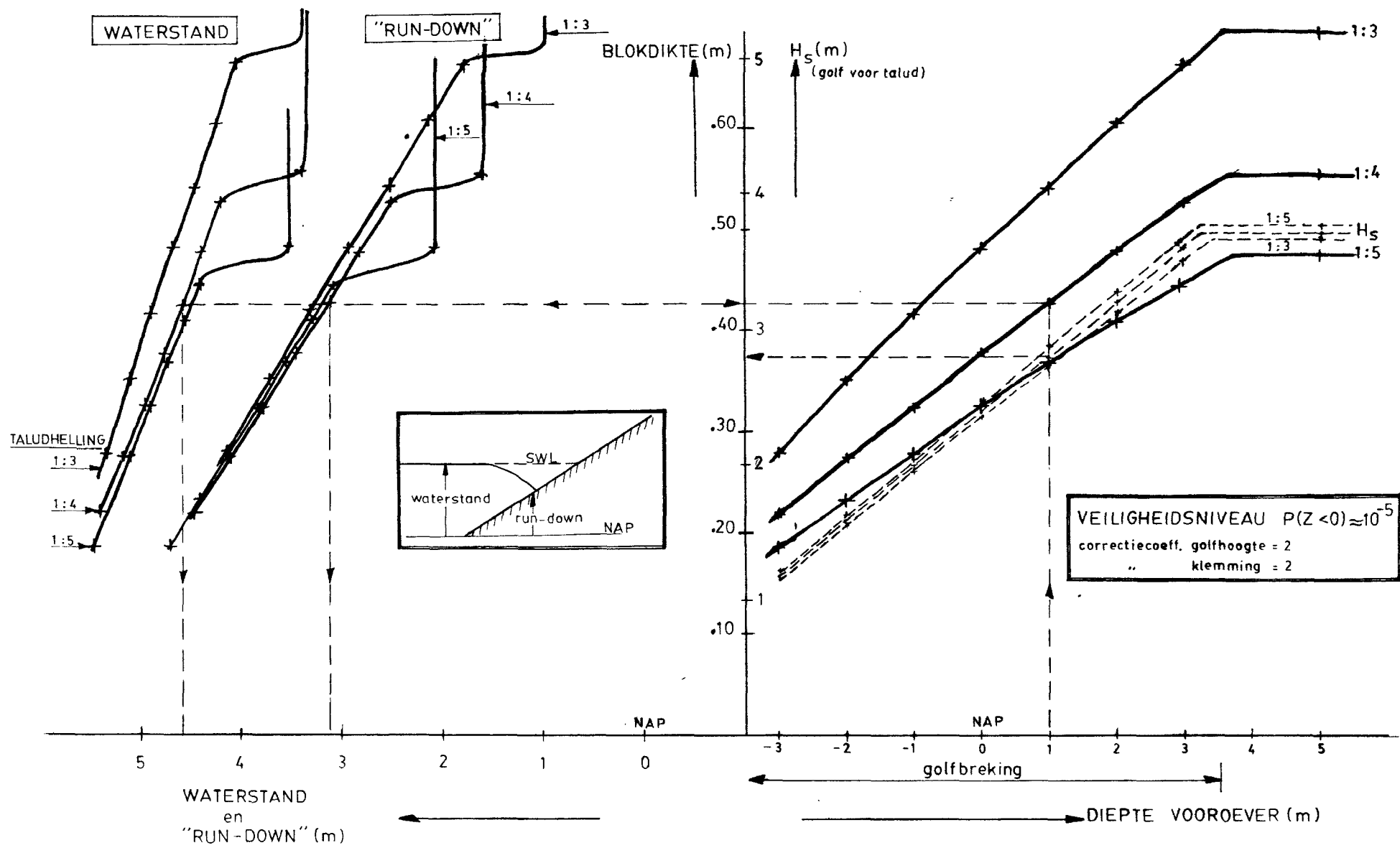
De kans van bezwijken bedraagt 10^{-5} ($P(Z < 0) \approx 10^{-5}$).

De bekleding heeft op elk niveau dezelfde sterkte.

In de figuren 8.15. en 8.16. zijn de resultaten weergegeven, waarbij de correctiecoëfficiënten voor golfhoogte en klemming, respectievelijk 1 - 5 en 2 - 2 zijn. Door een stippellijn is aangegeven hoe de grafiek moet worden afgelezen. Duidelijk komt in figuur 8.16. de invloed van het mildere golfklimaat tot uiting in de wijze van golfbreking.



figuur 8.15: Ontwerpgrafiek



figuur 8.16: Ontwerpgrafiek

8.6. Veiligheidsniveau

Teneinde de zwaarte van de bekleding op een probabilistische wijze te kunnen berekenen dient de te accepteren bezwijkkans vastgesteld te zijn.

Tussen de dagelijkse praktijk van de dijkbouw en de in het Deltarapport neergelegde ontwerpfilosofie bestaat wat de bekledingen betreft een discrepantie.

De praktijk ontwerpt veelal vanuit de ervaring, dat wil zeggen onder gebruiksomstandigheden.

Het Deltarapport gaat daarentegen uit van een ontwerpstorm.

Tussen beide methoden gaapt een vrij brede kloof.

Op lagere niveaus worden in de praktijk zo af en toe schadegevallen aangetroffen, zeg een kans van bezwijken in de grootte-orde van 10^{-2} . Laat men deze vrij grote bezwijkkans voor het gehele talud gelden dan zou dit inhouden dat de bekleding aanzienlijk minder ver naar boven doorgetrokken zou behoeven te worden dan thans gebruikelijk is. Immers de voorwaardelijke kans van optreden van een watertand op de hogere niveaus is kleiner dan 10^{-2} .

De Deltacommissie geeft echter voor de berekening van de kruinhoogte een ontwerpwaterstand met een overschrijdingskans van 10^{-4} .

Bij deze waterstand moet de dijk nog volledig als waterkering blijven functioneren.

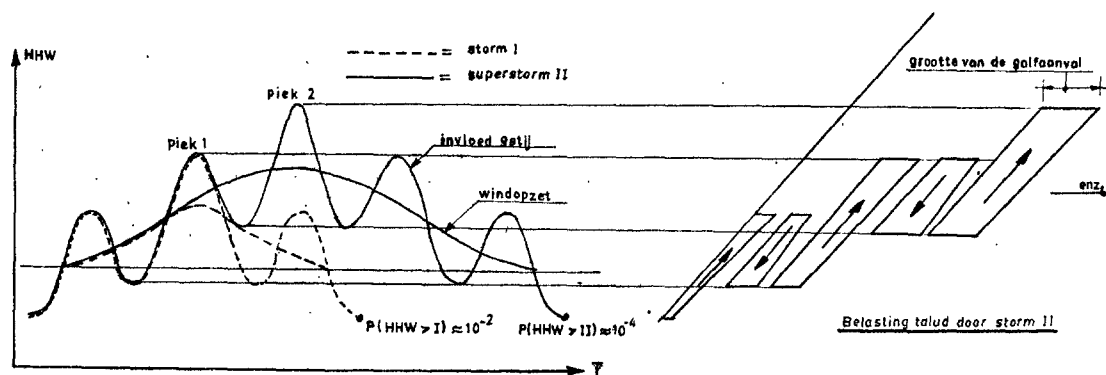
Tussen het oplichten van een blok op dit hoge niveau en het bezwijken van de dijk zit nog het mechanisme van voortschrijdende ontgronding van de fundering van de bekleding en de rest van het dijklichaam.

Het is niet bekend welke veiligheid dit extra geeft.

Uitgangspunt zal echter moeten zijn dat de bekleding bij een waterstand met een overschrijdingskans van 10^{-4} toch een zekere reserve aan sterkte dient te bezitten, dat wil zeggen $P(Z < 0 \mid h) < 1$.

De geaccepteerde bezwijkkans bij het peil van de superstorm volgens het Deltarapport komt dan in de grootte-orde van 10^{-4} à 10^{-5} te liggen.

In figuur 8.17. is als illustratie het verloop van de waterstand gegeven van twee stormen (I en II), afgezien is van faseverschuivingen tussen getij en windopzet.



figuur 8.17.: waterstanden en golfaanval

Storm II duurt langer, bereikt een hoger waterpeil en geeft in zijn maximum grotere golven dan storm I.

Aangenomen wordt dat tot piek 1 de twee stormen volkomen identiek zijn. Storm I heeft natuurlijk een grotere kans van voorkomen dan storm II. Omdat storm I na piek 1 in kracht afneemt en bij deze lage waterstand de dijk wegens de grote breedte een grote restveiligheid bezit, kan wellicht een vrij grote bezwijkkans worden geaccepteerd met het oog op mogelijke reparatie in het kader van het onderhoud van de waterkering. Deze redenering volgend komt men voor de hogere niveaus op het talud tot lagere te accepteren bezwijkkansen.

Deze redenering is echter niet juist.

Bij het optreden van storm II heeft men niet de tijd de schade bij piek 1 te herstellen. Het gevolg is dat deze storm de taludbekleding als het ware van onderen oprolt, waardoor het gevaar bestaat dat door snelle ontgronding de bekleding hoger op het talud wordt ondermijnd.

Dit kan niet worden geaccepteerd.

De dan ontstane situatie is te vergelijken met de stevig geconstrueerde bovenste verdiepingen van een gebouw rustende op zeer onveilige kolommen. De op lager niveau optredende schade zal tot gevolg hebben dat ook op hogere niveaus schade zal optreden, hoe veilig deze delen ook zijn geconstrueerd. De ketting is zo sterk als zijn zwakste schakel.

Geconcludeerd moet daarom worden dat op elk hoogteniveau dezelfde bezwijkkans in de grootte-orde van 10^{-4} à 10^{-5} aangehouden moet worden. De consequentie is wel dat in Nederland zelden of nooit schaden aan bekledingen mogen worden geconstateerd, hetgeen echter in tegenspraak is met de ervaringen in de praktijk.

Literatuur

1. Rapport Deltacommissie
Beschouwingen over stormvloeden en getijbeweging
Deel 4

2. Bruinsma, J., Graaff van de, J.
Golfhoogte - waterstandrelatie ter plaatse van de NAP - 20 m lijn
nabij Hoek van Holland ten behoeve van de leidraad Duinafslag

3. Vrijling, J.K.
Een oriënterend onderzoek naar de richtlijnen voor het ontwerp van
zeeweringen van de Deltacommissie, januari 1983
Afdeling der Civiele Techniek
Vakgroep Waterbouwkunde
Technische Hogeschool Delft

4. Hydraulics Research Station
The stability of revetment blocks under wave attack
Report IT 195, Wallingford, England 1980

5. Aalst, J. van
Golfhoogte - waterstandrelatie ter plaatse van de NAP - 20 m lijn
langs de Nederlandse kust
Deltadienst, maart 1983

6. Vrouwenvelder, A.C.W.M., Vrijling, J.K.
Collegedictaat b3 probabilistisch ontwerpen
Afdeling der Civiele Techniek
Technische Hogeschool Delft

7. CUR - VB rapport 109
Veiligheid van bouwconstructies, een probabilistische benadering

Literatuur (vervolg)

8. Rapport Deltacommissie

Beschouwingen omtrent windeffecten en waterhoogten langs de
Nederlandse kust

Deel 2

9. Boer, K. den

Taludbekledingen van gezette steen, fase 0

Hydraulische aspecten, verslag literatuurstudie, 1982

M 1795, deel II WL, CO-255780/43 LGM

Waterloopkundig Laboratorium

Laboratorium voor Grondmechanica

APPENDIX 8.1

```

10 REM   PROBAB-ADVANCED 2E MOMENT METHOD+ APPR. FULL DIS
    TRIBUTION
13 QW = .39894228:B0 = .2316419:B1 = .31938153:B2 = - .356
    56378:B3 = 1.781477937:B4 = - 1.821255978:B5 = 1.3302
    74429
16 C0 = 2.515517:C1 = .802653:C2 = .010328:D1 = 1.432788:D2
    = .189269:D3 = .001308
19 E = .0001
22 DEF FN P(X) = QW * EXP ( - .5 * X ^ 2)
25 READ N
28 DIM X(N),X1(N),A(N),M(N),S(N),AU(N),A$(N)
31 FOR I = 1 TO N: READ A$(I),M(I),S(I),AU(I):X(I) = M(I):
    NEXT
34 GOSUB 60000
37 M1 = Z
40 Q = 0
43 PRINT : PRINT
46 REM   CORRECTIE  U. MU EN SI
110 FOR I = 1 TO N
120 IF AU(I) = 0 THEN 170
125 PRINT "X("I")= "X(I)
130 ON I GOSUB 30100,30200,30300,30400,30500,30600,30700,3
    0800
135 PRINT "PF= "PF"  PD= "PD
140 GOSUB 20000
143 PRINT "BI=":BI
144 PRINT "*****"
145 PRINT "M("I")= "M(I)"    S("I")="S(I)
150 S(I) = FN P(BI) / PD
160 M(I) = X(I) - BI * S(I)
165 PRINT "M("I")= "M(I)"    S("I")="S(I)"    NA AANPASSING"

170 NEXT
200 REM   BEREKENING AFGELEIDEN Z1(I)
210 GOSUB 60000:Z1 = Z
220 FOR I = 1 TO N
230 A = X(I)
250 IF S(I) = 0 THEN DX = E: GOTO 270
260 DX = E * S(I)
270 X(I) = A + DX
280 GOSUB 60000:Z2 = Z
290 X(I) = A
300 Z1(I) = (Z2 - Z1) / DX
310 NEXT
320 S1 = 0:S2 = 0
330 FOR I = 1 TO N
340 S1 = S1 + Z1(I) * (M(I) - X(I))
350 A(I) = Z1(I) * S(I)
360 S2 = S2 + A(I) ^ 2
370 NEXT
380 S2 = SQR (S2)
390 B = (Z1 + S1) / S2
392 FOR I = 1 TO N
394 A(I) = A(I) / S2
396 NEXT
430 IF Q < > 0 THEN 500
435 REM EERSTE BETA - GEM. WAARDE
437 INPUT "WILT U DE PRINTER INSCHAKELEN (J/N)?:P$
438 IF P$ = "J" THEN PR# 1
439 PRINT : PRINT : PRINT CHR$(14)"MEAN VALUE" BENADERI
    NG": PRINT
440 B = M1 / S2: PRINT "BETA = ":B:X = B: GOSUB 10000: PRINT
    "FAALKANS = ":P: PRINT

```

```
450 GOSUB 2000
460 Q = 1: PR# 0
500 REM BEREKENING X(I)
510 F = 0
520 FOR I = 1 TO N
530 A = X(I)
540 X(I) = M(I) - A(I) * B * S(I)
550 F = F + ((A - X(I)) / X(I)) ^ 2
560 NEXT
700 GOSUB 60000: PRINT "Z = ":Z
710 IF ABS (Z) > E THEN 200
760 F = B0 - E: B0 = B
780 PRINT : PRINT "BETA = ":B
785 PRINT "FOUT= "F: PRINT
790 IF ABS (F) > E THEN 46
800 IF P# = "J" THEN PR# 1: PRINT : PRINT
802 PRINT CHR# (14)"ADVANCED" BENADERING": PRINT
804 TT = 1
805 PRINT "DEF. BETA = ":B:X = B
810 GOSUB 10000: PRINT "FAALKANS = ":P
820 PRINT : PRINT : GOSUB 2000
825 GOSUB 60000: PRINT : PRINT : PRINT "Z = ":Z
826 PRINT "TEL-Z = ":TZ
830 END
2000 PRINT "          X(I)          Z'(I)          SI(I)          PERC(
I)":
2005 IF TT = 1 THEN PRINT "          GAMMA          GAMMAKAR.":
2006 PRINT
2010 FOR I = 1 TO N:PERC = A(I) ^ 2
2020 PRINT A#(I) TAB( 10) INT (X(I) * 10000 + .5) / 10000 TAB(
20) INT (Z1(I) * 1000 + .5) / 1000 TAB( 33) INT (S(I) *
1000 + .5) / 1000 TAB( 42) INT (PERC * 10000 + .5) / 1
00:
2022 IF TT = 1 AND I < > 1 THEN PRINT TAB( 13) INT (X(I
) / M(I) * 1000 + .5) / 1000:
2024 IF TT = 1 AND (I = 2 OR I = 5) THEN PRINT TAB( 23) INT
(X(I) / (M(I) - 1.64 * S(I)) * 1000 + .5) / 1000:
2026 IF TT = 1 AND (I = 3 OR I = 4 OR I = 6 OR I = 7) THEN
PRINT TAB( 23) INT (X(I) / (M(I) + 1.64 * S(I)) * 10
00 + .5) / 1000:
2027 PRINT : NEXT
2028 KSI = TAN (X(7)) / SQR (ST):RD = .3 * KSI * HS
2030 PRINT : PRINT "HS= " INT (HS * 100 + .5) / 100: PRINT
"KSI= " INT ( TAN (X(7)) / SQR (ST) * 100 + .5) / 100
2035 PRINT "HS/(DELTA.D.COS(A))= " INT (HS / (1.4 * X(5) *
COS (X(7))) * 100 + .5) / 100
2036 PRINT "RUN-DOWN= " INT (RD * 100 + .5) / 100: PRINT
2037 PRINT "CORRECTIECOEFF. GOLFHOOGTE= "CC: PRINT "CORREC
TIECOEFF. KLEMMING= "C
2040 RETURN
10000 REM P= GAUSS(X)
10010 T = 1 / (1 + B0 * X)
10020 P = FN P(X) * (B1 * T + B2 * T ^ 2 + B3 * T ^ 3 + B4
* T ^ 4 + B5 * T ^ 5)
10030 RETURN
20000 REM BI=INVERSE GAUSS(PF)
20010 GA = 0
20015 IF PF > .5 THEN PF = 1 - PF:GA = 1
20020 T = SQR ( LOG (1 / PF ^ 2))
20030 T2 = T * T:T3 = T2 * T
20040 BI = T - (C0 + C1 * T + C2 * T2) / (1 + D1 * T + D2 *
T2 + D3 * T3)
```

```
20050 IF GA = 1 THEN BI = - BI
20060 RETURN
30100 REM VERDELING VAN X(1)
30110 TG = .33: XN = (X(1) - 1.98) / TG
30115 PR = EXP (- XN): PU = EXP (- PR)
30120 PF = 1 - PU: PD = PU * PR / TG
30130 RETURN
50000 DATA 7
50010 DATA "HHW", 3, .01, 1
50020 DATA "H/L", .0375, .006, 0
50030 DATA "CI", .1196, .025, 0
50040 DATA "SHS", 1E-3, .6, 0
50050 DATA "DI", .35, .005, 0
50060 DATA "D", 4, 0, 0
50070 DATA "ALFA", .245, .01, 0
60000 REM GOLFHOOGTE, WATERSTANDS-RELATIE
60002 IF X(1) >= 2.5 THEN HS = -.0588 * X(1) * X(1) +
1.2173 * X(1) + 2.823 + X(4)
60003 ST = X(2)
60004 REM BENEDEN GRENSPEIL
60005 IF X(1) < 2.5 THEN HS = -.2 * X(1) * X(1) + 2.3 *
X(1) + 1 + X(4)
60006 REM REDUCTIE GOLFHOOGTE
60007 CC = 1
60008 HS = HS / CC
60009 IF HS < 0 THEN HS = 0
60010 HB = .5 * (X(1) + X(6)): IF HS > HB THEN ST = ST * HB
/ HS: HS = HB
60015 IF ST < 0 THEN ST = .0001
60017 SK = TAN (X(7)) / SQR (ST)
60018 REM CORRECTIE INKLEMMING
60019 C = 3.5
60020 R = (13762 * X(5) * COS (X(7))) * C
60030 S = 9830 * HS * (X(3) * SK + .1194)
60040 Z = R - S
60050 TZ = TZ + 1: RETURN
```

*** MEAN VALUE * BENADERING**

BETA = 2.67234839
FAALKANS = 3.76616549E-03

	X(I)	Z'(I)	SI(I)	PERC(I)
HHW	3	-1584.905	.712	32.14
H/L	.0375	92328.389	6E-03	7.74
C1	.1196	-57901.001	.025	52.83
SHS	1E-03	-582.314	.6	3.08
DI	.35	46745.3	5E-03	1.38
D	4	-1081.543	0	0
ALFA	.245	-33519.745	.01	2.83

HS= 3.5
KSI= 1.68
HS/(DELTA.D.COS(A))= 7.36
RUN-DOWN= 1.77

CORRECTIECOEFF. GOLFHOOGTE= 1
CORRECTIECOEFF. KLEMMING= 3.5

*** ADVANCED * BENADERING**

DEF. BETA = 3.23978924
FAALKANS = 5.98152429E-04

	X(I)	Z'(I)	SI(I)	PERC(I)	GAMMA	GAMMAKAR.
HHW	3.1597	-2219.178	.767	35.02		
H/L	.0291	207411.448	6E-03	18.73	.776	1.052
C1	.1697	-71116.638	.025	38.23	1.419	1.057
SHS	.3797	-933.711	.6	3.8	379.721	.386
DI	.3487	46646.118	5E-03	.66	.996	1.02
D	4	-1429.52	0	0	1	1
ALFA	.2511	-54313.66	.01	3.57	1.025	.961

HS= 3.58
KSI= 2.02
HS/(DELTA.D.COS(A))= 7.57
RUN-DOWN= 2.17

CORRECTIECOEFF. GOLFHOOGTE= 1
CORRECTIECOEFF. KLEMMING= 3.5

Z = 2.28881836E-05
TEL-Z = 182

APPENDIX 8.2.

Gedeeltelijke handberekening van rekenvoorbeeld 1

a. Het model

De volgende basisvariabelen worden onderscheiden:

- X_1 = de waterstand ten opzichte van NAP
- X_2 = de golfsteilheid
- X_3 = de sterktecoëfficiënt (C_1 uit formule 8.19.)
- X_4 = de variatie in de golfhoogte
- X_5 = de dikte van de blokken
- X_6 = de diepte van de vooroever
- X_7 = de hellinghoek van het talud.

Opmerking: In dit rekenvoorbeeld vindt geen golfbreking plaats, waardoor X_6 verder niet in de berekening voorkomt.

Verder worden nog coëfficiënten toegepast, teneinde respectievelijk het golfklimaat en de klemming tussen de blokken in te kunnen stellen:

CC = coëfficiënt voor verandering van de golfhoogte

$$(H_s^* = H_s / CC)$$

C = coëfficiënt voor verandering van de klemming (zie ook formule 8.19.)

De betrouwbaarheidsfunctie Z is overeenkomstig formule (8.20.) als volgt geformuleerd:

$$Z = C (\rho_b - \rho_w) g X_5 \cos X_7 - \rho_w g H_s^* (X_3 \xi + 0,1194) \quad (\text{App. 1})$$

Volgens formule (8.7.) geldt een directe relatie tussen golfhoogte en waterstand:

$$H_s^* = (- 0,0588 X_1^2 + 1,2173 X_1 + 2,823 + X_4) / CC \quad (\text{App. 2})$$

De variabele X_4 heeft een afwijkend karakter ten opzichte van de overige basisvariabelen, het representeert alleen het onafhankelijke deel van de golfhoogte.

Verder geldt:

$$\xi = \tan X_7 / \sqrt{X_2} \quad (\text{App. 3})$$

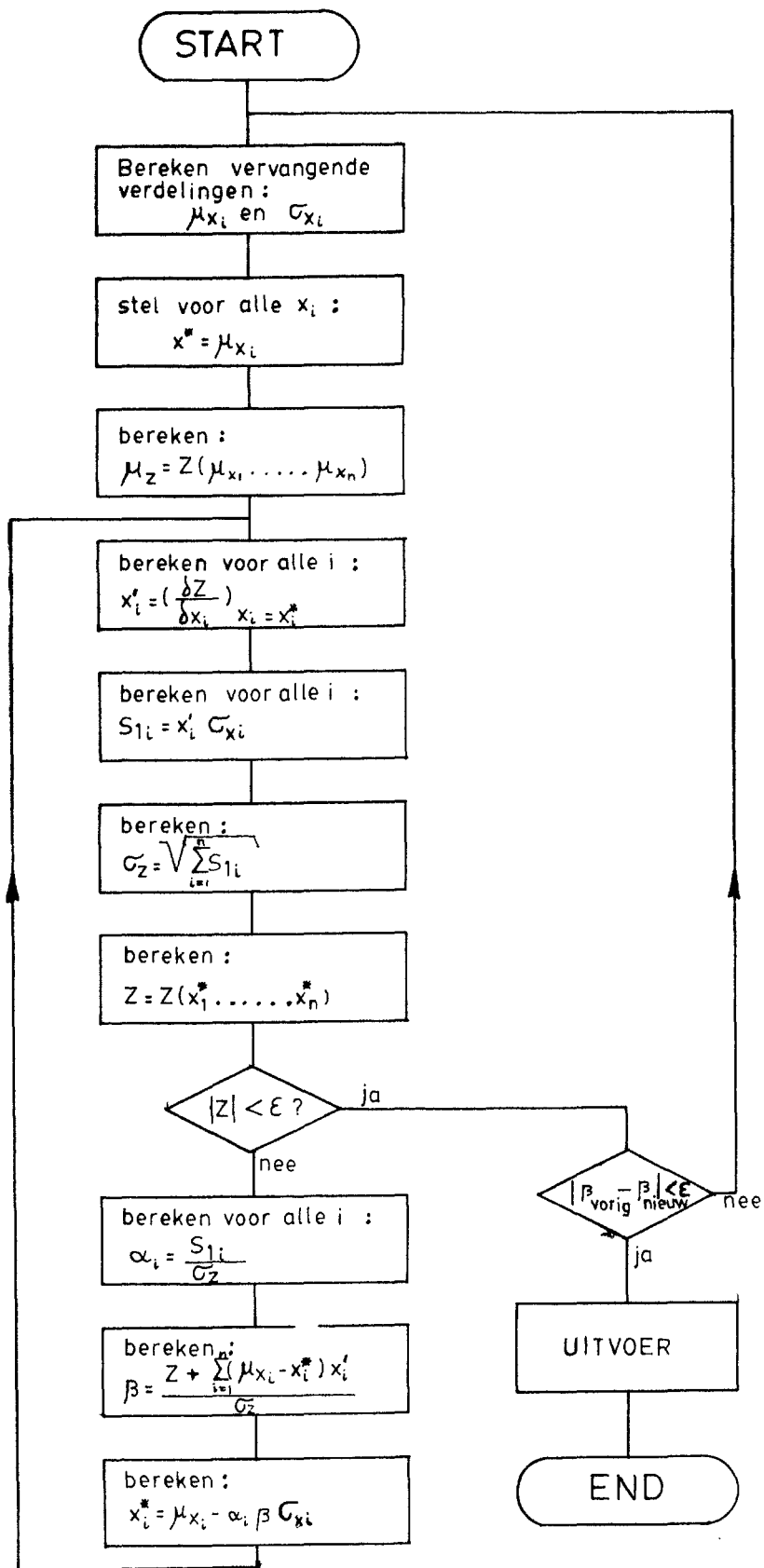
Vergelijking (App. 2) en (App. 3) in (App. 1) gesubstitueerd en voor $CC = 2,5$, $C = 1,75$, $\rho_b = 2400 \text{ kg/m}^3$ en $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ geeft:

$$Z = 24083,5 X_5 \cos X_7 - 3932 (- 0,0588 X_1^2 + 1,2173 X_1 + 2,823 + X_4) (X_3 \tan X_7 / \sqrt{X_2} + 0,1194) \quad (\text{App. 4})$$

b. De methode

Hierna vindt u een globaal stroomschema van het rekenproces.

In blok no. 1 van het stroomschema wordt aangegeven dat niet normaal verdeelde basisvariabelen (in dit geval alleen de hoogwaterstand X_1) zo goed mogelijk benaderd moeten worden door een normale verdeling, dit gebeurt als volgt:



Stroomschema rekenproces

1. Bepaal de overschrijdingskans van de ontwerpwaarde X_i^* van de basisvariabele: $P = F_E(X_i^*)$ (App. 5)
2. Met behulp van de inverse normale verdeling stelt men vast hoeveel malen de standaardafwijking het gemiddelde μ_{X_i} van de benaderde normale verdeling van de ontwerpwaarde verwijderd moet zijn:
 $\beta' = F_N^{-1}(P)$ (App. 6)
3. Uit een vergelijking van de kansdichtheden (richtingen) volgt de standaardafwijking:

$$\sigma_{X_{iN}} = \frac{f_N(\beta')}{f_E(X_i^*)} \quad (\text{App. 7})$$

waarbij $f_N(\beta')$ een eenheidsnormale verdeling bezit, dat wil zeggen gemiddelde 0 en standaardafwijking 1.

4. De waarde van het gemiddelde van de benaderde verdeling ligt nu vast volgens:

$$\mu_{X_i} = X_i^* - \beta' \sigma_{X_{iN}} \quad (\text{App. 8})$$

Een eerste benadering voor de nog onbekende gelineariseerde bezwijk-grens is:

$$Z \approx Z(X_1^* \dots X_7^*) + \sum_{i=1}^7 (X_i - X_i^*) \frac{\delta Z}{\delta X_i} = 0 \quad (\text{App. 9})$$

waarin $\frac{\delta Z}{\delta X_i}$ wordt berekend in X_i^* .

Het gemiddelde van Z is nu:

$$\mu_z = z(x_1^* \dots x_7^*) + \sum_{i=1}^7 (\mu_{x_i} - x_i^*) \frac{\delta z}{\delta x_i} \quad (\text{App. 10})$$

en

$$\sigma_z = \left\{ \sum_{i=1}^7 \left(\frac{\delta z}{\delta x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2 \right\}^{1/2} \quad (\text{App. 11})$$

Deze laatste betrekking wordt nu uitgedrukt in een lineaire functie van de standaardafwijkingen:

$$\sigma_z = \sum_{i=1}^7 \alpha_i \frac{\delta z}{\delta x_i} \sigma_{x_i} \quad (\text{App. 12})$$

waarin:

$$\alpha_i = \frac{\frac{\delta z}{\delta x_i} \sigma_{x_i}}{\left\{ \sum_{j=1}^7 \left(\frac{\delta z}{\delta x_j} \right)^2 \sigma_{x_j}^2 \right\}^{1/2}} \quad (\text{App. 13})$$

Nu wetend dat het punt x^{**} op de bezwijkgrens ligt, geldt:

$$z = z(x_1^* \dots x_7^*) = 0 \quad (\text{App. 14})$$

Nu volgt:

$$\frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{\sum_{i=1}^7 (\mu_{x_i} - x_i^*) \frac{\delta z}{\delta x_i}}{\sum_{i=1}^7 \alpha_i \frac{\delta z}{\delta x_i} \sigma_{x_i}} = \beta \quad (\text{App. 15})$$

De oplossing van deze vergelijking geeft een nieuwe schatting voor X^{**} dat gewoonlijk het ontwerppunt wordt genoemd:

$$X_i^* = \mu X_i - \alpha_i \beta \sigma X_i \quad (\text{App. 16})$$

De waarden van de potentiële afgeleiden werden echter in het oude punt bepaald.

Een herhaling van de procedure is daarom noodzakelijk totdat een stabiele waarde voor het ontwerppunt X^{**} is gevonden.

Maar in dit nieuw gevonden punt zal de betrouwbaarheidsfunctie niet langer gelijk aan nul zijn.

Dit betekent dat het nieuwe punt niet op de bezwijkgrens $Z = 0$ ligt, zoals werd aangenomen.

Deze afwijking wordt gecorrigeerd door de waarde aan te passen volgens:

$$\beta_0 = \frac{\mu Z}{\sigma Z} = \frac{Z(X^{**}) + \sum_{i=1}^7 (\mu X_i - X_i^*) \frac{\delta Z}{\delta X_i}}{\sum_{i=1}^7 \alpha_i \frac{\delta Z}{\delta X_i} \sigma X_i} \quad (\text{App. 17})$$

De gehele procedure moet worden herhaald voor deze nieuwe waarde van β . De correcte oplossing wordt dus door middel van een iteratieprocedure gevonden, zie ook het stroomschema.

c. De handberekening

Allereerst dient de niet-normale verdeling van de hoogwaterstand door een normale verdeling benaderd te worden.

De hoogwaterstand heeft bij dit rekenvoorbeeld een Gumbel-verdeling:

$$P(\underline{X}_1 > X_1) = 1 - e^{-e^{-\frac{(X_1 - 1,98)}{0,33}}} \quad (\text{App. 18})$$

1. In de eerste benadering van het ontwerppunt $x_1 = 2,7$ geldt:

$$P(\underline{X}_1 > 2,7) = 0,1067$$

2. Met behulp van de inverse normale verdeling (opzoeken in tabel 3) volgt:

$$\beta' = 1,24$$

$$3. f_N(\beta') = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-1/2 \beta'^2} = 0,1839$$

$$f_E(x_i^*) = \frac{1}{0,33} e^{-\frac{(2,7 - 1,98)}{0,33}} e^{-e^{-\frac{(2,7 - 1,98)}{0,33}}} = 0,3054$$

$$\sigma_{X_{iN}} = \frac{f_N(\beta')}{f_E(x_i^*)} = 0,602$$

$$4. \mu_{X_i} = 2,7 - 1,24 \cdot 0,602 = 1,9509$$

Voor de verdere berekening moeten de partiële afgeleiden nog worden bepaald:

$$\frac{\delta Z}{\delta x_1} = -3932 (-0,1176 x_1 + 1,2173) (x_3 \tan x_7 / \sqrt{x_2} + 0,1194)$$

$$\frac{\delta Z}{\delta x_2} = 1966 x_3 \tan x_7 x_2^{-3/2} (-0,0588 x_1^2 + 1,2171 x_1 + 2,823 + x_4)$$

$$\frac{\delta Z}{\delta x_3} = -3932 (-0,0599 x_1^2 + 1,2173 x_1 + 2,823 + x_4) (\tan x_7 / \sqrt{x_2})$$

$$\frac{\delta Z}{\delta x_4} = -3932 (x_3 \tan x_7 / \sqrt{x_2} + 0,1194)$$

$$\frac{\delta Z}{\delta X_5} = 24083,5 \cos X_7$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta Z}{\delta X_7} = & - 24083,5 X_5 \sin X_7 - 3932(- 0,0599 X_1^2 + 1,2173 X_1 + \\ & + 2,823 + X_4) \left(\frac{X_3}{\cos^2 X_7 \sqrt{X_2}} \right) \end{aligned}$$

In het computerprogramma worden deze afgeleiden op een numerieke wijze berekend.

De verdere berekening zal in tabelvorm worden uitgevoerd.

Met behulp van formule (App. 4) en de waarden van tabel 1 vinden we:

$$Z(X_i^*) = 2838,13$$

De mean-value benadering geeft dan:

$$\beta = \frac{Z(X_i^*)}{\sigma Z} = 2,82$$

Met behulp van de tabel voor de normale verdeling geeft dit een faalkans van $2,4 \cdot 10^{-3}$ (vergelijk met computeruitvoer rekenvoorbeeld 1).

Hierna wordt met behulp van formule (App. 16) een nieuw ontwerp punt berekend. De resultaten staan in de eerste kolom van tabel 2 vermeld. Gevonden wordt nu $Z(X_i^*) = 331,76$.

Bij deze iteratiestap wordt met behulp van formule (App. 17) gevonden:

$$\beta = 3,05.$$

Hierna wordt met behulp van formule (App. 16) weer een nieuw ontwerp-punt bepaald. Al verder itererend gaat $Z(X_i^*)$ naar nul.

Is dit ongeveer het geval dan wordt de niet-normale verdeling van de waterstanden opnieuw met een normale verdeling benaderd etc.

Het iteratieproces wordt zover doorgevoerd totdat stabiele eindwaarden worden bereikt, zie het stroomschema.

Eénmaal geprogrammeerd is dit een eenvoudige taak voor het rekentuig.

basis- variabele	X_i^*	μX_i	σX_i	$\frac{\delta Z}{\delta X_i}$	$\frac{\delta Z}{\delta X_i} \sigma X_i$	$(\frac{\delta Z}{\delta X_i} \sigma X_i)^2$	$\alpha_i = \frac{\delta Z}{\delta X_i} \sigma X_i / \sigma_Z$	$(\mu X_i - X_i^*) \frac{\delta Z}{\delta X_i}$
$X_1 = \text{HHW}$	2,7	1,9509	0,602	- 859,45	- 517,39	$2,6769 \cdot 10^5$	- 0,5130	643,814
$X_2 = \text{H/L}$	0,0375	0,0375	0,006	36797,09	220,78	$4,8745 \cdot 10^4$	0,2189	0
$X_3 = C_1$	0,1196	0,1196	0,025	-23075,10	- 576,88	$3,3279 \cdot 10^5$	- 0,5720	0
$X_4 = \text{SHS}$	0,001	0,001	0,6	- 955,18	- 573,11	$3,2845 \cdot 10^5$	- 0,5682	0
$X_5 = \text{DI}$	0,35	0,35	0,005	23615,79	118,08	$1,3942 \cdot 10^4$	0,1171	0
$X_7 = \text{ALFA}$	0,1974	0,1974	0,01	-16003,70	- 160,04	$2,5612 \cdot 10^4$	- 0,1587	0
					$\Sigma = \sigma_Z^2$	$1,0172 \cdot 10^6$	$\Sigma =$	643,814

Tabel 1

basis- variabele	x_i^*	μx_i	σx_i	$\frac{\delta Z}{\delta x_i}$	$\frac{\delta Z}{\delta x_i} \sigma x_i$	$(\frac{\delta Z}{\delta x_i} \sigma x_i)^2$	$\alpha_i = \frac{\frac{\delta Z}{\delta x_i} \sigma x_i}{\sigma_z}$	$(\mu x_i - x_i^*) \frac{\delta Z}{\delta x_i}$
$x_1 = \text{HHW}$	2,82	1,9509	0,602	- 1035,29	- 623,24	$3,8843 \cdot 10^5$	- 0,4806	899,774
$x_2 = \text{H/L}$	0,0338	0,0375	0,006	69826,36	418,96	$1,7553 \cdot 10^5$	0,3231	258,36
$x_3 = C_1$	0,1598	0,1196	0,025	-29538,56	- 738,46	$5,4533 \cdot 10^5$	- 0,5695	1187,45
$x_4 = \text{SHS}$	0,9603	0,001	0,6	- 1168,94	- 701,36	$4,919 \cdot 10^5$	- 0,5409	1121,36
$x_5 = \text{DI}$	0,3384	0,35	0,005	23594,44	117,97	$1,3917 \cdot 10^4$	0,0909	37,75
$x_7 = \text{ALFA}$	0,2019	0,1974	0,01	-25712,57	- 257,13	$6.6114 \cdot 10^4$	- 0,1983	114,94
					$\Sigma = \sigma_z^2$	$1,6812 \cdot 10^6$	$\Sigma =$	3619,63

Tabel 2

TABEL VOOR DE NORMALE VERDELING

$-\beta$	kans	$-\beta$	kans	$-\beta$	kans	$-\beta$	kans
0,00	$5,00 \times 10^{-1}$	2,55	$5,45 \times 10^{-3}$	5,05	$2,30 \times 10^{-7}$	7,55	$2,22 \times 10^{-14}$
0,05	$4,80 \times 10^{-1}$	2,60	$4,70 \times 10^{-3}$	5,10	$1,70 \times 10^{-7}$	7,60	$1,51 \times 10^{-14}$
0,10	$4,60 \times 10^{-1}$	2,65	$4,10 \times 10^{-3}$	5,15	$1,35 \times 10^{-7}$	7,65	$1,02 \times 10^{-14}$
0,15	$4,40 \times 10^{-1}$	2,70	$3,50 \times 10^{-3}$	5,20	$1,00 \times 10^{-7}$	7,70	$6,93 \times 10^{-15}$
0,20	$4,20 \times 10^{-1}$	2,75	$3,05 \times 10^{-3}$	5,25	$7,90 \times 10^{-8}$	7,75	$4,68 \times 10^{-15}$
0,25	$4,00 \times 10^{-1}$	2,80	$2,60 \times 10^{-3}$	5,30	$5,80 \times 10^{-8}$	7,80	$3,15 \times 10^{-15}$
0,30	$3,80 \times 10^{-1}$	2,85	$2,25 \times 10^{-3}$	5,35	$4,55 \times 10^{-8}$	7,85	$2,12 \times 10^{-15}$
0,35	$3,60 \times 10^{-1}$	2,90	$1,90 \times 10^{-3}$	5,40	$3,30 \times 10^{-8}$	7,90	$1,42 \times 10^{-15}$
0,40	$3,40 \times 10^{-1}$	2,95	$1,60 \times 10^{-3}$	5,45	$2,60 \times 10^{-8}$	7,95	$9,49 \times 10^{-16}$
0,45	$3,25 \times 10^{-1}$	3,00	$1,30 \times 10^{-3}$	5,50	$1,90 \times 10^{-8}$	8,00	$6,33 \times 10^{-16}$
0,50	$3,10 \times 10^{-1}$	3,05	$1,14 \times 10^{-3}$	5,55	$1,50 \times 10^{-8}$	8,05	$4,21 \times 10^{-16}$
0,55	$2,90 \times 10^{-1}$	3,10	$9,70 \times 10^{-4}$	5,60	$1,10 \times 10^{-8}$	8,10	$2,80 \times 10^{-16}$
0,60	$2,70 \times 10^{-1}$	3,15	$8,20 \times 10^{-4}$	5,65	$8,50 \times 10^{-9}$	8,15	$1,85 \times 10^{-16}$
0,65	$2,55 \times 10^{-1}$	3,20	$6,70 \times 10^{-4}$	5,70	$6,00 \times 10^{-9}$	8,20	$1,22 \times 10^{-16}$
0,70	$2,40 \times 10^{-1}$	3,25	$5,75 \times 10^{-4}$	5,75	$4,65 \times 10^{-9}$	8,25	$8,05 \times 10^{-17}$
0,75	$2,25 \times 10^{-1}$	3,30	$4,80 \times 10^{-4}$	5,80	$3,30 \times 10^{-9}$	8,30	$5,29 \times 10^{-17}$
0,80	$2,10 \times 10^{-1}$	3,35	$4,05 \times 10^{-4}$	5,85	$2,55 \times 10^{-9}$	8,35	$3,47 \times 10^{-17}$
0,85	$1,95 \times 10^{-1}$	3,40	$3,30 \times 10^{-4}$	5,90	$1,80 \times 10^{-9}$	8,40	$2,27 \times 10^{-17}$
0,90	$1,80 \times 10^{-1}$	3,45	$2,80 \times 10^{-4}$	5,95	$1,38 \times 10^{-9}$	8,45	$1,48 \times 10^{-17}$
0,95	$1,70 \times 10^{-1}$	3,50	$2,30 \times 10^{-4}$	6,00	$1,02 \times 10^{-9}$	8,50	$9,63 \times 10^{-18}$
1,00	$1,60 \times 10^{-1}$	3,55	$1,95 \times 10^{-4}$	6,05	$7,45 \times 10^{-10}$	8,55	$6,25 \times 10^{-18}$
1,05	$1,50 \times 10^{-1}$	3,60	$1,60 \times 10^{-4}$	6,10	$5,45 \times 10^{-10}$	8,60	$4,05 \times 10^{-18}$
1,10	$1,40 \times 10^{-1}$	3,65	$1,35 \times 10^{-4}$	6,15	$3,98 \times 10^{-10}$	8,65	$2,62 \times 10^{-18}$
1,15	$1,30 \times 10^{-1}$	3,70	$1,10 \times 10^{-4}$	6,20	$2,90 \times 10^{-10}$	8,70	$1,69 \times 10^{-18}$
1,20	$1,20 \times 10^{-1}$	3,75	$9,10 \times 10^{-5}$	6,25	$2,11 \times 10^{-10}$	8,75	$1,08 \times 10^{-18}$
1,25	$1,10 \times 10^{-1}$	3,80	$7,20 \times 10^{-5}$	6,30	$1,53 \times 10^{-10}$	8,80	$6,95 \times 10^{-19}$
1,30	$1,00 \times 10^{-1}$	3,85	$6,00 \times 10^{-5}$	6,35	$1,11 \times 10^{-10}$	8,85	$4,44 \times 10^{-19}$
1,35	$9,05 \times 10^{-2}$	3,90	$4,80 \times 10^{-5}$	6,40	$7,97 \times 10^{-11}$	8,90	$2,83 \times 10^{-19}$
1,40	$8,10 \times 10^{-2}$	3,95	$4,00 \times 10^{-5}$	6,45	$5,74 \times 10^{-11}$	8,95	$1,80 \times 10^{-19}$
1,45	$7,40 \times 10^{-2}$	4,00	$3,20 \times 10^{-5}$	6,50	$4,12 \times 10^{-11}$	9,00	$1,15 \times 10^{-19}$
1,50	$6,70 \times 10^{-2}$	4,05	$2,65 \times 10^{-5}$	6,55	$2,95 \times 10^{-11}$	9,05	$7,25 \times 10^{-20}$
1,55	$6,10 \times 10^{-2}$	4,10	$2,10 \times 10^{-5}$	6,60	$2,11 \times 10^{-11}$	9,10	$4,58 \times 10^{-20}$
1,60	$5,50 \times 10^{-2}$	4,15	$1,70 \times 10^{-5}$	6,65	$1,50 \times 10^{-11}$	9,15	$2,89 \times 10^{-20}$
1,65	$4,95 \times 10^{-2}$	4,20	$1,30 \times 10^{-5}$	6,70	$1,07 \times 10^{-11}$	9,20	$1,82 \times 10^{-20}$
1,70	$4,50 \times 10^{-2}$	4,25	$1,05 \times 10^{-5}$	6,75	$7,57 \times 10^{-12}$	9,25	$1,14 \times 10^{-20}$
1,75	$4,05 \times 10^{-2}$	4,30	$7,93 \times 10^{-6}$	6,80	$5,35 \times 10^{-12}$	9,30	$7,12 \times 10^{-21}$
1,80	$3,60 \times 10^{-2}$	4,35	$6,38 \times 10^{-6}$	6,85	$3,78 \times 10^{-12}$	9,35	$4,44 \times 10^{-21}$
1,85	$3,25 \times 10^{-2}$	4,40	$4,83 \times 10^{-6}$	6,90	$2,66 \times 10^{-12}$	9,40	$2,77 \times 10^{-21}$
1,90	$2,90 \times 10^{-2}$	4,45	$4,11 \times 10^{-6}$	6,95	$1,87 \times 10^{-12}$	9,45	$1,72 \times 10^{-21}$
1,95	$2,60 \times 10^{-2}$	4,50	$3,40 \times 10^{-6}$	7,00	$1,31 \times 10^{-12}$	9,50	$1,06 \times 10^{-21}$
2,00	$2,30 \times 10^{-2}$	4,55	$2,74 \times 10^{-6}$	7,05	$9,14 \times 10^{-13}$	9,55	$6,57 \times 10^{-22}$
2,05	$2,05 \times 10^{-2}$	4,60	$2,09 \times 10^{-6}$	7,10	$6,37 \times 10^{-13}$	9,60	$4,05 \times 10^{-22}$
2,10	$1,80 \times 10^{-2}$	4,65	$1,70 \times 10^{-6}$	7,15	$4,43 \times 10^{-13}$	9,65	$2,49 \times 10^{-22}$
2,15	$1,60 \times 10^{-2}$	4,70	$1,31 \times 10^{-6}$	7,20	$3,08 \times 10^{-13}$	9,70	$1,53 \times 10^{-22}$
2,20	$1,40 \times 10^{-2}$	4,75	$1,04 \times 10^{-6}$	7,25	$2,13 \times 10^{-13}$	9,75	$9,34 \times 10^{-23}$
2,25	$1,25 \times 10^{-2}$	4,80	$7,75 \times 10^{-7}$	7,30	$1,47 \times 10^{-13}$	9,80	$5,70 \times 10^{-23}$
2,30	$1,10 \times 10^{-2}$	4,85	$6,26 \times 10^{-7}$	7,35	$1,01 \times 10^{-13}$	9,85	$3,47 \times 10^{-23}$
2,35	$9,60 \times 10^{-3}$	4,90	$4,77 \times 10^{-7}$	7,40	$6,95 \times 10^{-14}$	9,90	$2,11 \times 10^{-23}$
2,40	$8,20 \times 10^{-3}$	4,95	$3,83 \times 10^{-7}$	7,45	$4,76 \times 10^{-14}$	9,95	$1,28 \times 10^{-23}$
2,45	$7,20 \times 10^{-3}$	5,00	$2,90 \times 10^{-7}$	7,50	$3,25 \times 10^{-14}$	10,00	$7,72 \times 10^{-24}$
2,50	$6,20 \times 10^{-3}$						

Tabel 3