

LV 1497

M 1881

waterloopkundig laboratorium

laboratorium voor grondmechanica

rijkswaterstaat deltadienst

centrum voor onderzoek waterkeringen



informatiedag steenzettingen

20 oktober 1982



waterloopkundig laboratorium



laboratorium voor grondmechanica




rijkswaterstaat deltadienst

centrum voor onderzoek waterkeringen

informatiedag steenzettingen

20 oktober 1982

	bibliotheek postbus 177 - 2600 MH Delft waterloopkundig laboratorium/WL
BB	0005905
WL	M1881
EX	WL/Delft Hydraulics

c 102222



Voorwoord

Het onderhavige verslag is samengesteld ter gelegenheid van de "Informatiedag Steenzettingen" georganiseerd door het Centrum voor Onderzoek Waterkeringen. Deze dag werd op 20 oktober 1982 gehouden in het Waterloopkundig Laboratorium te Delft. Op deze dag zijn een viertal lezingen gepresenteerd. In de eerste lezing werd door ir. K.W. Pilarczyk van Rijkswaterstaat, Deltadienst een overzicht gegeven van het onderzoek naar taludbekledingen van gezette steen. De tweede lezing werd gehouden door ir. J. van der Weide van het Waterloopkundig Laboratorium en behandelde de bezwijkmechanismen. In de derde en vierde lezing werd door ir. A.M. Burger van het Waterloopkundig Laboratorium en ir. C.J. Kenter van het Laboratorium voor Grondmechanica een overzicht gegeven van de belangrijkste hydraulische en grondmechanische aspecten. Tenslotte werden enkele praktijkervaringen behandeld door ir. J.J.W. Seyffert van het Centrum voor Onderzoek Waterkeringen.

De belangrijkste elementen van de eerste lezing zijn gepubliceerd in het verslag "Taludbekleding van gezette steen, fase 0. Algemene beschrijving van de opzet van het onderzoek" dat in juli 1982 is verschenen bij het Waterloopkundig Laboratorium en dat volledig is opgenomen in dit verslag.

Van de overige lezingen zijn in dit verslag samenvattingen opgenomen.

INHOUD

VOORWOORD

I Taludbekleding van gezette steen, fase 0.

Algemene beschrijving van de opzet van het onderzoek.

	blz.
1. <u>Inleiding</u>	1
1.1 Probleemstelling.....	1
1.2 Doel van het onderzoek.....	2
2. <u>Opzet van het onderzoek</u>	4
2.1 Algemeen.....	4
2.2 Vooronderzoek.....	4
2.3 Grootschalig onderzoek Oesterdam.....	5
2.4 Evaluatie.....	5
2.5 Modelproeven ten behoeve van fundamenteel onderzoek.....	6
2.6 Eindevaluatie.....	7
2.7 Ontwerprichtlijnen.....	7

FIGUREN

BIJLAGEN

II Samenvatting van de lezing van ir. J. van der Weide

III Samenvatting van de lezing van ir. A.M. Burger

IV Samenvatting van de lezing van ir. C.J. Kenter

V Samenvatting van de lezing van ir. J.J.W. Seijffert

TALUDBEKLEDING VAN GEZETTE STEEN

Algemene beschrijving van de opzet van het onderzoek

1. Inleiding

1.1 Probleemstelling

Taludbekledingen van gezette steen vormen zowel wat betreft sterkte en veiligheid als bouwkosten van de dijk een zeer belangrijk onderdeel van zeedijken. Bij de aanleg en versterking van zeedijken kunnen de kosten van de bekleding oplopen tot enkele tientallen procenten van het totaal, waarbij de totale kosten van de nog volgens de Deltawet uit te voeren versterking van zeedijken geraamd worden op ruim $f 1,5 \times 10^9$. Voor de constructie van de taludbekledingen worden om diverse redenen zowel gesloten bekledingen (zoals asfaltbeton) als bekledingen van gezette steen toegepast.

Wat betreft de veiligheid luidt de opdracht vanuit de Deltacommissie en de Deltawet om een dijk te bouwen die nog volledige zekerheid biedt tijdens een stormvloed die wat betreft waterstand en golfaanval ver uitgaat buiten het ervaringsgebied.

Er bestaan echter nog geen regels voor het ontwerpen van taludbekledingen van gezette steen. Welke aanval van golven en stroom een gegeven glooiingsconstructie kan weerstaan is niet bekend.

De noodzaak tot onderzoek in verband met reductie van onderhoudskosten is minder duidelijk. Weliswaar zijn de laatste 25 jaar de kosten van typische stormschaden aan taludbekledingen betrekkelijk gering, maar daar staat tegenover dat er wel regelmatig vrij kostbaar preventief onderhoud wordt gepleegd in de vorm van het herzetten en vernieuwen van taludbekledingen, die visueel achteruitgaan. (Vertonen van verzakkingen, verlies van goede samenhang.)

Uit de schademeldingen blijkt overigens wel dat het hierbij niet alleen om steenzettingen van verouderde typen of mindere kwaliteit gaat, maar ook om typen zoals die veelvuldig in nieuwe bekledingen worden toegepast, zoals de gladde vierkante betonblokken, en dat de schade is ontstaan bij omstandigheden die minder zwaar zijn dan de maatgevende omstandigheden.

Voor de aanpak van het onderzoek staan verschillende wegen open, zoals:

- a. evaluatie van ervaringen uit de praktijk;
- b. gericht onderzoek aan bestaande bekledingen of met behulp van proefvakken op zeedijken;

- c. berekeningen en wiskundige modellen;
- d. fysische modelproeven, meestal op verkleinde schaal.

Methode a is uitgevoerd, maar blijkt veel te weinig bruikbare gegevens op te leveren.

Methode b wordt wat betreft de inspanning voor het maken van de opstelling en de instrumentatie minstens zo gecompliceerd geacht als het maken van laboratoriumopstellingen, terwijl de optredende hydraulische randvoorwaarden niet voldoen aan de vereisten van veel soorten onderzoek. Deze aanpak is misschien nog wel bruikbaar bij een laatste toetsing van ontwerpregels, maar niet voor het ontwikkelen ervan.

Methoden c en d bieden daarom het meeste perspectief om binnen afzienbare tijd ontwerprichtlijnen te kunnen opstellen.

In dit verslag is in hoofdlijnen aangegeven op welke wijze een zodanig onderzoek kan worden opgezet. Het onderzoek is in fasen ingedeeld; iedere fase zal worden afgerond met een evaluatie, waarbij wordt nagegaan in hoeverre de, op dat moment beschikbare kennis kan worden benut voor praktische ontwerpdoeleinden.

Dit verslag is opgesteld door ir. K. den Boer van het Waterloopkundig Laboratorium en ir. C.J. Kenter van het Laboratorium voor Grondmechanica, in nauw overleg met de Begeleidingsgroep Steenzettingen, verder bestaande uit:

- ir. K.W. Pilarczyk, Rijkswaterstaat, Deltadienst, Hoofdafdeling Waterloopkunde;
- ing. J.C. van der Burg, Rijkswaterstaat, Deltadienst, Hoofdafdeling Waterloopkunde;
- ir. L. Batterink, Rijkswaterstaat, Deltadienst, Waterbouwkundige Werken Oost;
- ir. J.J.W. Seijffert, Centrum Onderzoek Waterkeringen;
- ir. G.N. Wolsink, Technische Hogeschool Delft;
- ir. J. v.d. Weide, Waterloopkundig Laboratorium.
- ir. A.J.G.M. van Roermond, Rijkswaterstaat, Deltadienst, Hoofdafdeling Waterloopkunde;
- ir. A. Bezuyen, Laboratorium voor Grondmechanica

Dit verslag zal worden gevolgd door een aantal vervolgerslagen, waarin de resultaten van de diverse fasen van het onderzoek zullen worden samengevat.

1.2 Doel van het onderzoek

Uitgaande van de in hoofdstuk 1.1 geschetste probleemstelling, kan het doel van het onderzoek als volgt worden geformuleerd:

Op lange termijn:

- komen tot kwantitatieve ontwerpcriteria voor steenzettingen in het algemeen, gebaseerd op betere kennis van de wetmatigheden en hiervoor afgeleide rekenmodellen, eventueel ondersteund door modelonderzoek.

Op korte termijn:

- komen tot een veilige ontwerpformule voor een aantal geschematiseerde constructies, gebaseerd op gecompileerde ervaring uit model en prototype, aangevuld met eenvoudige berekeningen.
- komen tot richtlijnen voor opzet van modelonderzoek ten behoeve van het kwantitatief ontwerp van meer gecompliceerde constructies met losse steenzettingen inclusief de ondergrond.

2. Opzet van het onderzoek

2.1 Algemeen

In het voorgestelde onderzoekprogramma zijn drie hoofdlijnen te onderkennen, te weten:

- modelonderzoek
- berekeningen
- natuurmetingen.

Globaal kan worden gesteld dat modelonderzoek dient, om de voor het bezwijken relevante fysische processen te onderkennen en om deze zo goed mogelijk te relateren aan duidelijk gedefiniëerde, meetbare externe parameters.

De berekeningen hebben tot doel de waargenomen fysische verschijnselen in formulevorm te beschrijven, zodat met behulp hiervan naar andere, niet gemeten, externe parameters kan worden geëxtrapoleerd.

Aangezien bij dat proces een voortdurende wisselwerking tussen model en berekeningen nodig is, zal modelonderzoek intermitterend worden uitgevoerd, waarbij enerzijds de resultaten van modelproeven een input vormen voor de berekeningen, doch anderzijds de modelproeven worden afgestemd op verkregen rekenresultaten.

Natuurmetingen zijn nodig om de relevantie van de gevonden voorlopige of definitieve ontwerprelaties te verifiëren. Indien te grote afwijkingen worden geconstateerd tussen de optredende schadecondities in natuur en de, op grond van het onderzoek voorspelde omstandigheden, dan levert dit een extra signaal voor een nadere evaluatie van de gehanteerde modellen.

De onderzoekstrategie die zal worden gevolgd is schematisch op figuur 1 aangegeven in de vorm van een blokschema, waarin de diverse fasen van het onderzoek en de onderlinge relaties nader zijn aangegeven. Deze fasen worden hierna kort toegelicht.

2.2 Vooronderzoek

Fase 0 : Deze fase omvat een compilatie van bestaande gegevens, afkomstig uit modelonderzoek, berekeningen of natuurwaarnemingen. Hierbij wordt in sterke mate voortgebouwd op het onderzoek dat in het verleden in het Waterloopkundig Laboratorium is verricht naar de stabiliteit van steenzettingen. Daarnaast worden ook de ervaringen meegenomen die bij het Laboratorium voor

Grondmechanica aanwezig zijn, met name ten aanzien van stroming door poreuze media en het effect van dynamische belastingen op grond.

Dit alles heeft geleid tot een globale bezwijkboom voor een steenzetting onder golfaanval, die op figuur 2 is weergegeven. Aangezien in alle bezwijkmechanismen de waterdruk aan de onderzijde van de steen een belangrijke grootte is, zal een rekenmodel worden opgezet waarmee deze waarde kan worden gerelateerd aan meetbare externe parameters.

Daarnaast wordt aandacht geschonken aan het belang van de dynamische aspecten van de belasting, met name wat betreft de ondergrond.

Beide modellen vormen een aanzet voor latere kwalitatieve berekeningen en leveren in dit stadium de mogelijkheid om, bij de schematisatie van grootschalig onderzoek de gevoeligheid van een aantal factoren te schatten.

2.3 Grootschalig onderzoek Oesterdam

Fase 1 omvat voornamelijk grootschalig project-gericht onderzoek ten behoeve van de dimensionering van de Oesterdam. Dit onderzoek is in principe gericht op een korte termijn doelstelling - een directe relatie tussen de stabiliteit van de steenzetting en de externe parameters. Doordat echter het onderzoek is uitgebreid met een meting van water en gronddrukken op een aantal blokken, kan ook informatie worden verkregen over een aantal factoren die in de bezwijkboom van figuur 2 zijn aangegeven. Deze gegevens dienen als input voor een meer gedetailleerde evenwichtsbeschouwing van het blok, welke de grondslag moet vormen van een kwantitatieve benadering van de steenstabiliteit. Doordat in een eerder stadium ook onderzoek is uitgevoerd op kleinere schaal, kan vergelijking van beide onderzoeken gegevens opleveren voor de schaalgevoeligheid van de geconstateerde schade.

2.4 Evaluatie

Fase 2. Deze fase is bedoeld om de gegevens, verkregen uit eerder onderzoek te analyseren en eerder opgestelde hypothesen daaraan te toetsen. Op grond hiervan zal de bezwijkboom worden aangepast en zullen de reeds ontwikkelde rekenmodellen worden getoetst en aangepast. Daarnaast zullen nieuwe rekenmodellen worden opgesteld om de diverse factoren, die van belang zijn voor bezwijken, te kwantificeren.

Verder zal in deze fase aandacht worden geschonken aan die aspecten die in de voorlopige schematisatie van de constructie nog niet in beschouwing zijn ge-

nomen. Dit omvat o.a. de wrijving tussen geklemde blokken, invloed van discontinuïteiten in de bekleding, drie-dimensionale effecten in het golfbeeld en het schademechnisme en de eigenschappen van, met name, kleiachtige, ondergrond bij langdurige belasting.

Tot slot zullen, deels op grond van globale gevoeligheidsberekeningen, deels door vergelijking van proeven op diverse schalen, de toepasbaarheidsgrenzen van kleinschalig onderzoek worden afgetast.

Ten aanzien van de korte termijn doelstelling mag worden verwacht dat aan het eind van deze fase de eerste doelstelling, - een veilige ontwerpformule voor een aantal geschematiseerde constructies -, kan worden gerealiseerd.

Ook de tweede doelstelling, het opstellen van richtlijnen voor modelonderzoek ten behoeve van meer gecompliceerde situaties, zal waarschijnlijk realiseerbaar zijn.

Ten aanzien van de lange termijn doelstelling mag worden verwacht dat een inventarisatie en evaluatie van, voor bezwijken relevante, processen heeft plaatsgevonden, zodat een herziene bezwijkboom kan worden opgesteld die verder in het vervolgonderzoek kan worden getoetst.

Vervolgens moeten de parameters worden gekozen waarbij deze toetsing dient plaats te vinden, alsmede de schaal waarop dit dient te geschieden.

Het zal duidelijk zijn dat parallel aan de ontwikkeling van bezwijkhypothese de meettechnische mogelijkheden voor het toetsen van deze hypothesen evenzo dienen te worden ontwikkeld, c.q. dienen te worden aangepast.

Verder zal aandacht moeten worden besteed aan de mate van nauwkeurigheid waarmee de verschillende processen kunnen worden gereproduceerd, c.q. kunnen worden gemeten.

Een en ander dient uit te monden in aanbevelingen voor verder uit te voeren experimenteel onderzoek. Dit kan zowel kleinschalig als grootschalig, of beide zijn; beide opties zijn in het blokschema opgenomen.

2.5 Modelproeven ten behoeve van fundamenteel onderzoek

Fase 3. Dit onderzoek zal worden uitgevoerd indien mag worden verwacht dat een aantal relevante processen ook op kleine schaal kunnen worden gemeten. In het algemeen zal echter, als voorbereiding op het grootschalig onderzoek, een serie proeven worden uitgevoerd om de randvoorwaarden voor het

grootschalig onderzoek te selecteren.

Fase 4. Ervaringen met het uitgevoerde onderzoek voor de Oesterdam hebben uitgewezen dat onderzoek op deze schaal goed bruikbare informatie levert zowel voor een directe beoordeling van de optredende schade als voor het meten van, voor de schade verantwoordelijke, processen. De verwachting lijkt dan ook gewettigd dat de opgestelde bezwijkhypothesen op betrouwbare wijze in dit onderzoek kunnen worden getoetst. Een voorlopig proevenprogramma, weergegeven op bijlage 1, dient als basis van de voorbereiding zowel voor het klein- als het grootschalig onderzoek. Aanpassingen op grond van het resultaat van eerdere fasen is uiteraard mogelijk.

Fase 5. Verwacht moet worden dat de resultaten van de voorgaande fasen, voor eenvoudige constructies, voldoende informatie leveren voor het opstellen van ontwerp-richtlijnen.

Voor meer gecompliceerde ontwerpen, waarbij ingeklemde blokken worden toegepast of waarbij bermen en andere discontinuïteiten in het profiel zijn aangebracht, is de informatie wellicht nog onvoldoende. Daarom is in het onderzoeksplan een tweede serie grootschalige proeven opgenomen om deze invloeden te bestuderen en zo mogelijk in de opgestelde rekenmethodieken te verwerken.

2.6 Eindevaluatie

Fase 6. Deze fase omvat de eindevaluatie van de voorafgaande proeven waarbij als resultaat mag worden verwacht dat de korte termijn doelstelling is gerealiseerd, - een ontwerpmethodiek voor eenvoudige geschematiseerde gevallen.

De realisatie van de lange termijn doelstelling, - een universele ontwerpprocedure die ook voor meer gecompliceerde gevallen bruikbaar is -, vraagt meer tijd. Deze activiteit is daarom in een aparte fase ondergebracht.

2.7 Ontwerprichtlijnen

Fase 7. In deze fase dient een algemene richtlijn voor het ontwerp te worden opgesteld. Hierbij zal met name terugkoppeling naar de natuurwaarnemingen nodig zijn om na te gaan in hoeverre de modelschematisaties een goede benadering zijn van de werkelijkheid.

Afwijking in het golfbeeld (de invloed van richtings spreiding en kam lengte)

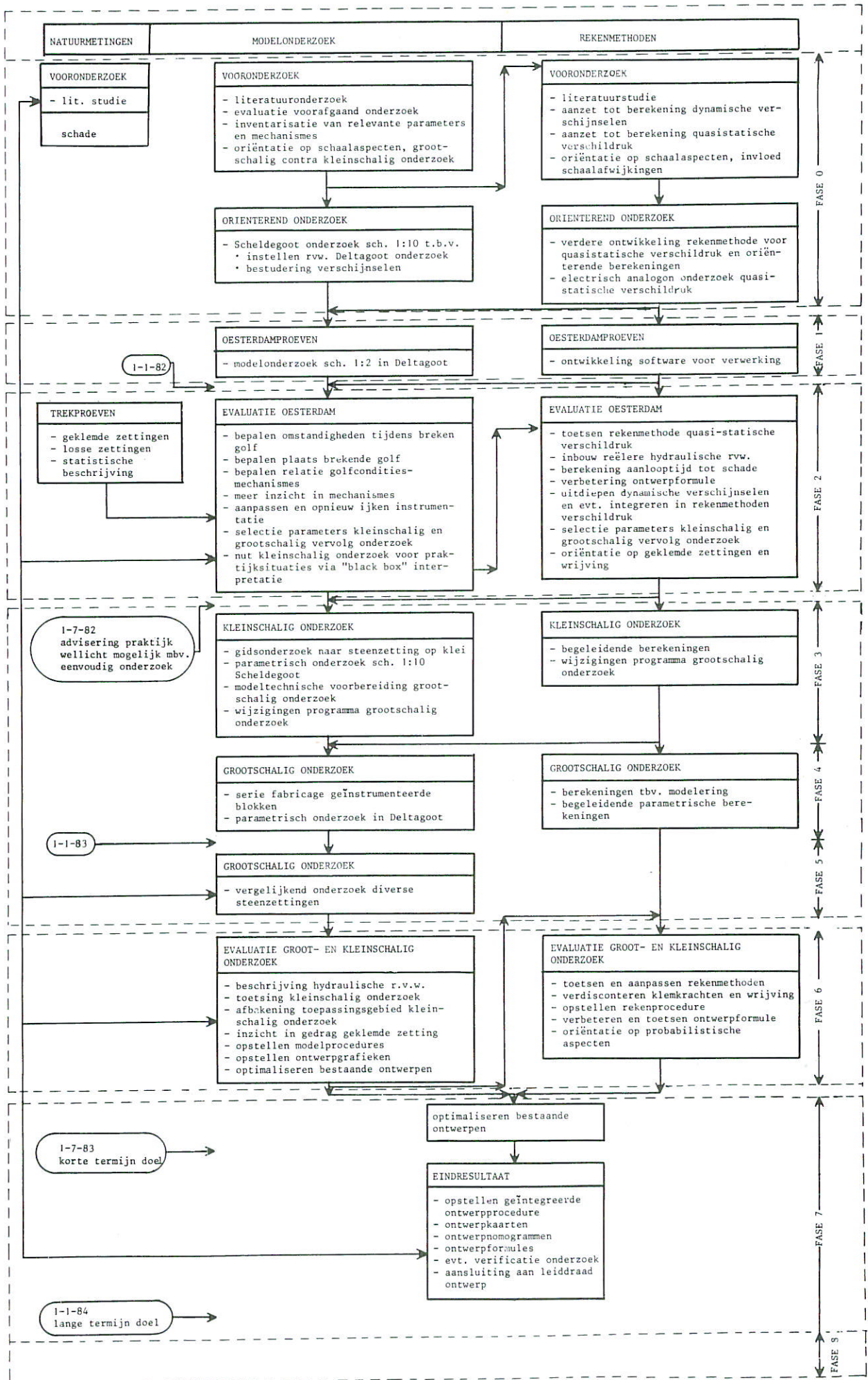
moeten worden verwerkt. Daarnaast moet aan de duur van de golfbelasting en het gevaar van bezwijken bij lagere, maar meer frequent voorkomende, stormen aandacht worden besteed.

Ook de schematisatie van de constructie moet worden geëvalueerd. Een constructie in de natuur vertoont een spreiding in eigenschappen als gevolg van variaties in uitvoering. Vaak zijn deze eigenschappen tijdsafhankelijk, waardoor de constructie in sterkte af- of soms toeneemt met de tijd.

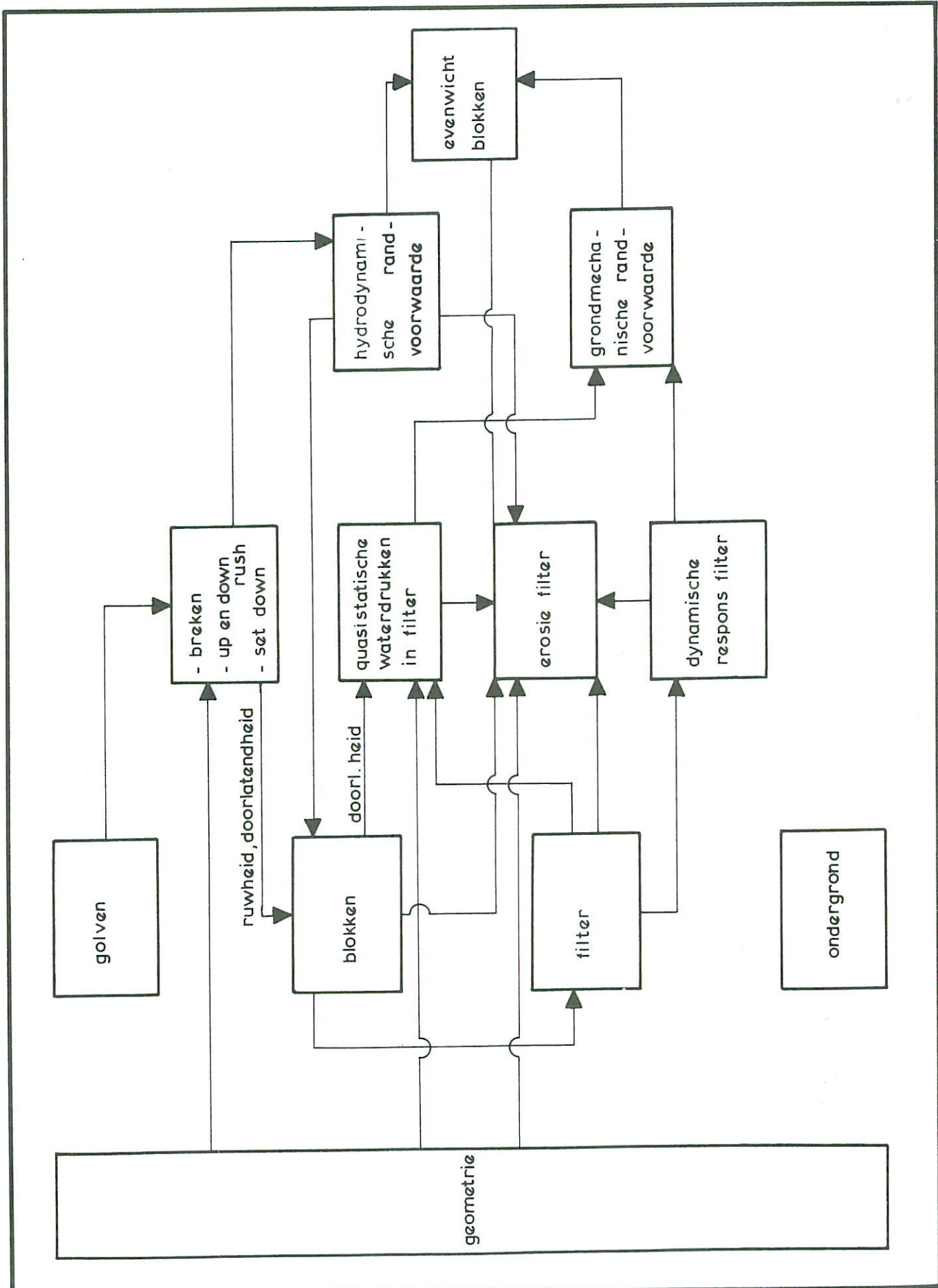
De keuze van de levensduur, die voor het ontwerp wordt aangehouden, en de bepaling van de tijdens die periode optredende ontwerpomstandigheden, vraagt nadere studie.

Met name in deze fase kan een goed rekenmodel, waarin de gevoeligheid van de verschillende factoren kan worden gekwantificeerd, van veel nut blijken te zijn.

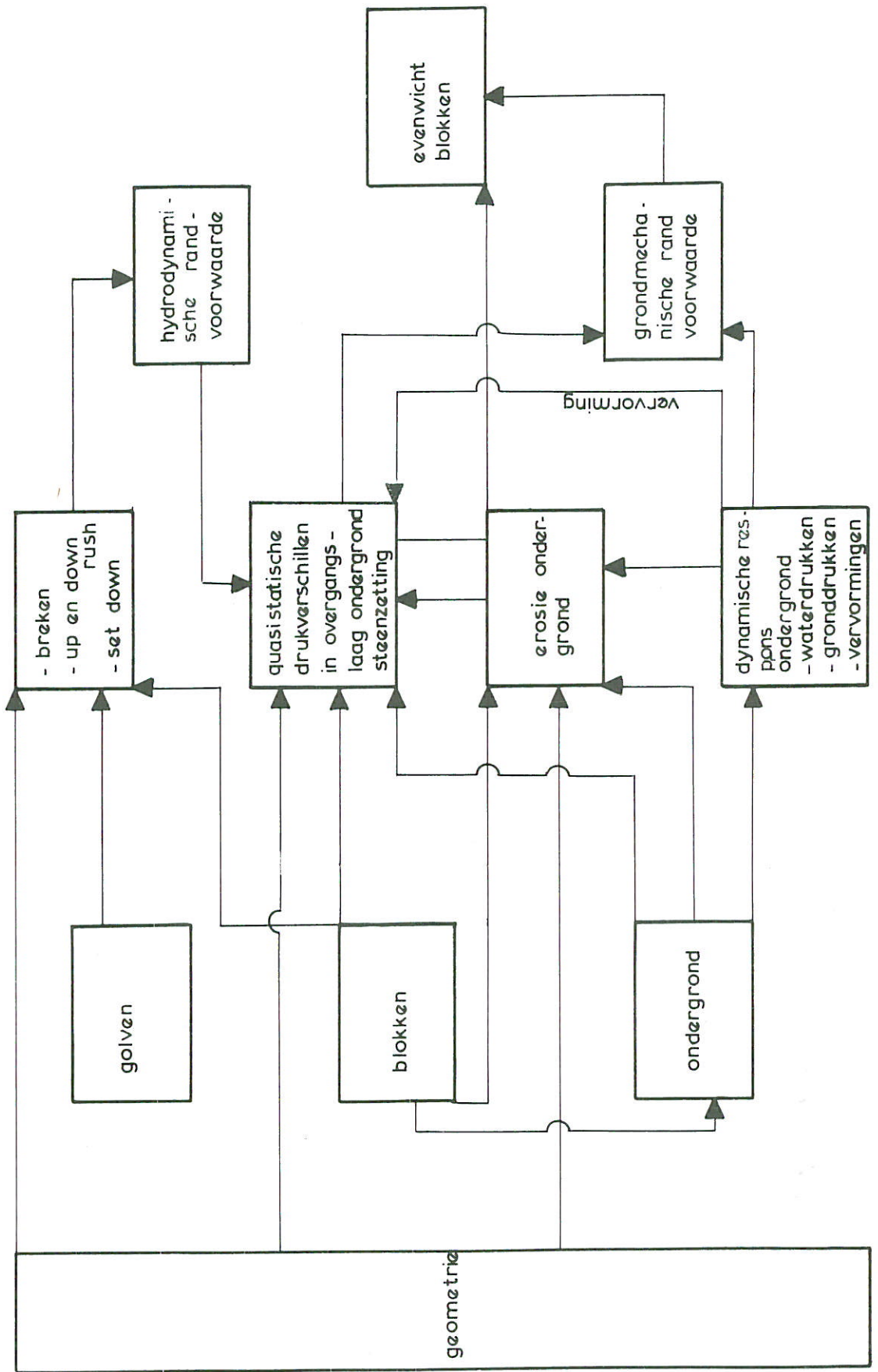
FUNDAMENTEEL ONDERZOEK STABILITEIT STEENZETTINGEN



Figuur 1



FILTER



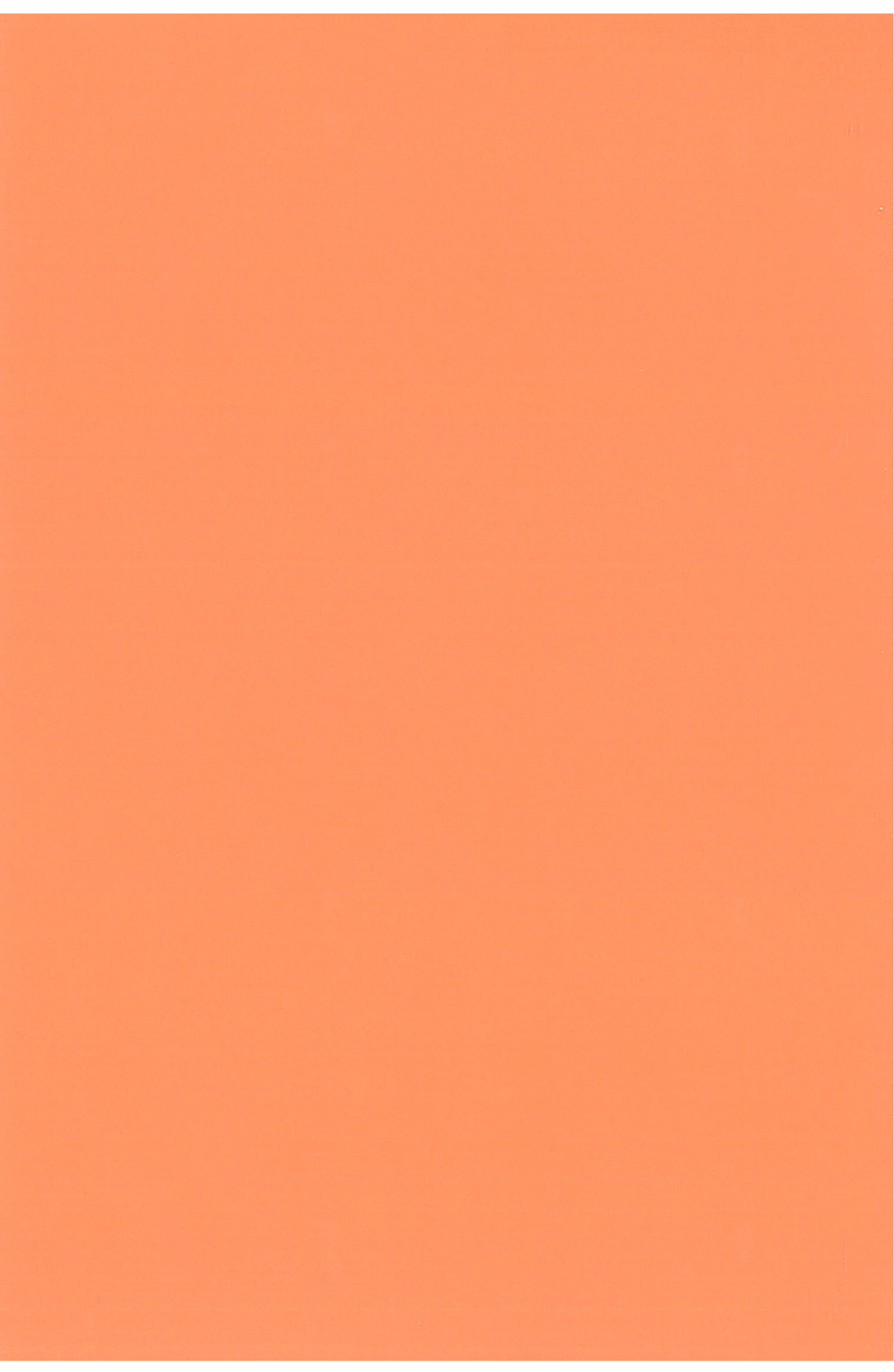
KLEI

	gezette steen			filterlaag					talud
	dikte	afmetingen/vorm	massa-dichtheid	doorlatendheid	doorlatendheid	doorlatendheid	dikte	materiaal	
1	s	s	s	s	s	s	s	grind	1:3/1:4
2	V ₁	s	s	s	s	s	s	"	"
3	s	V ₁	s	s	s	s	s	"	"
4	s	s	V ₁	s	s	s	s	"	"
5	s	s	s	V ₁	s	s	s	"	"
6	s	s	s	s	V ₁	s	s	"	"
7	s	s	s	s	V ₂	s	s	"	"
8	s	s	s	s	s	s	V ₁	"	"
9	s	s	s	V ₂	s	s	s	"	"
10	s	s	s	V ₃	s	s	s	"	"
11	s	s	s	s	s	s	s	klei	"
12	s	V ₁	s	s	s	s	s	"	"
13	s	s	V ₁	s	s	s	s	"	"
14	s	s	s	s	s	s	s	grind	1:6
15	V ₁	s	s	s	s	s	s	"	"
16	s	s	s	s	s	V ₁	s	"	"
17	s	s	s	V ₁	s	s	s	"	"
18	s	s	s	s	s	s	s	klei	"
19	V ₁	s	s	s	s	s	s	"	"
20	s	V ₂	s	s	s	s	s	grind	"

(V₂="interlocking)

s = standaard

V₁ = variant 1



SAMENVATTING VAN DE LEZING DOOR IR. J. VAN DER WEIDE (WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM) GEHOUDEN OP DE INFORMATIEDAG "STEENZETTINGEN" OP 20 OKTOBER 1982 TE DELFT.

Schade mechanismen

1. Inleiding

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 bezwijking als gevolg van gematigde maar frequent voorkomende belasting. Het eerste type is met name van belang voor de bekleding, het tweede type voor de onderlaag, en daardoor in indirecte zin voor de bekleding.

In deze bijdrage wordt voornamelijk uitgegaan van het eerste bezwijkmechanisme, breuk t.g.v. een hoge belasting.

Evenals bij traditionele bouwconstructies dient de ontwerper van een dijks bekleding zich af te vragen

- Wat is mijn maatgevende belasting of belasting combinatie. Hij heeft daarbij de keuze tussen golfklappen, stroomkrachten t.g.v. oplopende golven, opdrijvende krachten t.g.v. overdruk.
- Direct daaraan gekoppeld is de vraag - Waar is de belasting het grootst en hoe is hij in plaats en tijd verdeeld.

Het antwoord op deze vragen is deels intuïtief deels door "trial en error" door vorige generaties dijkbouwers gegeven. De sterkte van de constructie werd bepaald aan de hand van ervaring, tot nu toe werden geen pogingen gedaan belasting op onderdelen of op de gehele constructies te relateren aan sterkte. Deze kopping is het doel van het onderzoek waarover in deze bijdragen wordt gerapporteerd.

Meer in detail dienen t.a.v. de sterkte de volgende vragen te worden opgelost.

- Waaraan ontleent de constructie zijn sterkte om de optredende belasting te weerstaan
- Hoe dient deze sterkte in de plaats te worden verdeeld.

Beide elementen - Belasting en sterkte zullen in de volgende hoofdstukken nader worden behandeld.

2. Belasting

Golven die op een talud lopen worden teruggekaatst of gebroken. Een maat voor het optreden van één van deze twee toestanden in de parameter ξ , de taludhelling gedeeld door de wortel uit de golfsteilheid. Voor $\xi > 3$ treedt terugkaatsing op voor kleinere waarde van ξ breekt de golf.

Bij een zuivere terugkaatsing stroomt het water het talud op en af, de belasting is dus een variërende sleepkracht die het grootst is rond de waterpiegel. Door de snelheid treedt ook een zuigkracht op, ook deze is het grootst daar waar de snelheid het grootst is, dus rond de stil water lijn. Verder zal, door instroming en fase verschil tussen water beweging op en onder de bekleding overdruk kunnen ontstaan. Dit leidt tot een opdrijvende kracht, die veelal het grootst is ter plaatse van het golfdal. Bij een brekende golf treedt naast golfklappen een interactie op tussen terugstromend water en inkomende golf. Dit leidt tot dynamische belastingen. Afhankelijk van de taludhelling treden klappen op een nat of een droog talud op. In het laatste geval is het effect het grootst. De klappen treden in het algemeen op rond de waterlijn of iets lager.

3. Sterkte

3.1 Individuele steen

Sterkte wordt hier bij gedefinieerd als de weerstand die de steen heeft tegen verplaatsing. De som van uitwendige belastingen en reactie krachten moet dus nul zijn voor grensstabiliteit.

Bij een losse steen op een stortsteen talud is het gewicht van de steen en de wrijving met het talud bepalend voor de stabiliteit. In het kritieke gebied rond de waterlijn moeten deze voldoende zijn om weerstand te bieden aan sleep en zuigkrachten. Deze evenwichts beschouwing, voor het eerst gegeven door Irribarren, is later gevolgd door andere meer empirische relaties. Bij een blok in een gezette glooiing kunnen, langs het talud gerichte belastingen op naastliggende stenen worden overgedragen. Bepalend is nu weerstand tegen oplichten en in mindere mate tegen kantelen. Deze weerstand ontleent het blok aan zijn eigen gewicht, eventueel verhoogd met wrijvings krachten t.g.v. naast liggende blokken.

Deze weerstand moet het grootste zijn ter plaatse van het golfdal. Aangezien de diepte van het golfdal door terugkaatsing wordt beïnvloed is de diepte waar schade moet worden verwacht afhankelijk van taludhelling en golfparameters. Gebleken is dat deze diepte voor taluds in de orde van 1:2 à 1:3, goed kan worden gerelateerd aan de ξ waarde. Is nu de overdruk t.o.v. dit punt bekend dan kan een evenwichtsbeschouwing worden opgesteld.

Voor grote waarden van ξ (nagenoeg horizontale waterspiegel) is deze overdruk rekenderwijs te bepalen. Deze methode wordt uitgebreid tot andere meer realistische ξ waarden. Empirisch is de relatie tussen steengewichte, en golfhoogte ($\frac{H}{\Delta D}$) voor waarden van ξ tussen 1 en 3 voor een talud van 1:3 vastgesteld.

De invloed van de golfklap (dynamische belasting) is nog in studie.

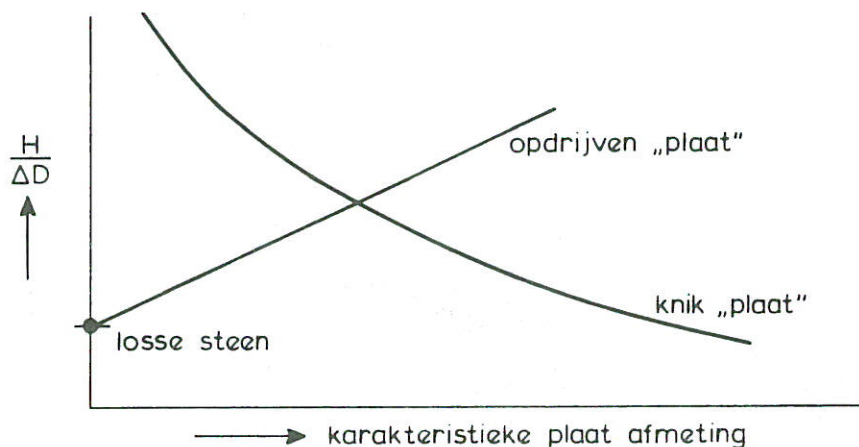
3.2 Glooiing als geheel

Wanneer de wrijvingskrachten tussen de stenen onderling groot zijn, dan is niet de individuele steen maar de glooiing als totaal bepalend voor de stabiliteit. Dit is met name het geval bij sterk geklemde zettingen.

Horizontale en verticale reactie krachten worden nu door de glooiing in zijn geheel opgenomen. De evenwichtsbeschouwing t.a.v. opdrijven dient nu niet op de enkele steen maar op een gehele plaat te worden betrokken. Het meewerkende gewicht neemt sterk toe met de plaat afmeting, terwijl de opwaartse druk in het gebied rond het golfdal geconcentreerd blijft. Het gevolg is een toenemende stabiliteit bij toenemende plaat afmeting.

Klemkracht en waterdruk belasten de plaat echter met een excentrische drukkracht. Dit leidt tot gevaar voor knik of verbrijzeling van beton t.g.v. te hoge drukspanning. De weerstand tegen deze twee mechanismen neemt sterk af bij toenemende plaat afmeting.

Uitgedrukt in kritieke $\frac{H}{\Delta D}$ waarden levert dit schematisch het volgende beeld.



De constructie heeft zijn maximale sterkte daar waar de twee lijnen elkaar snijden. Uitgaande van een model voor het berekenen van de waterspanning, kunnen de krommen nader worden bepaald voor gegeven talud geometrieën. Op deze wijze is de kritieke sterkte te bepalen.

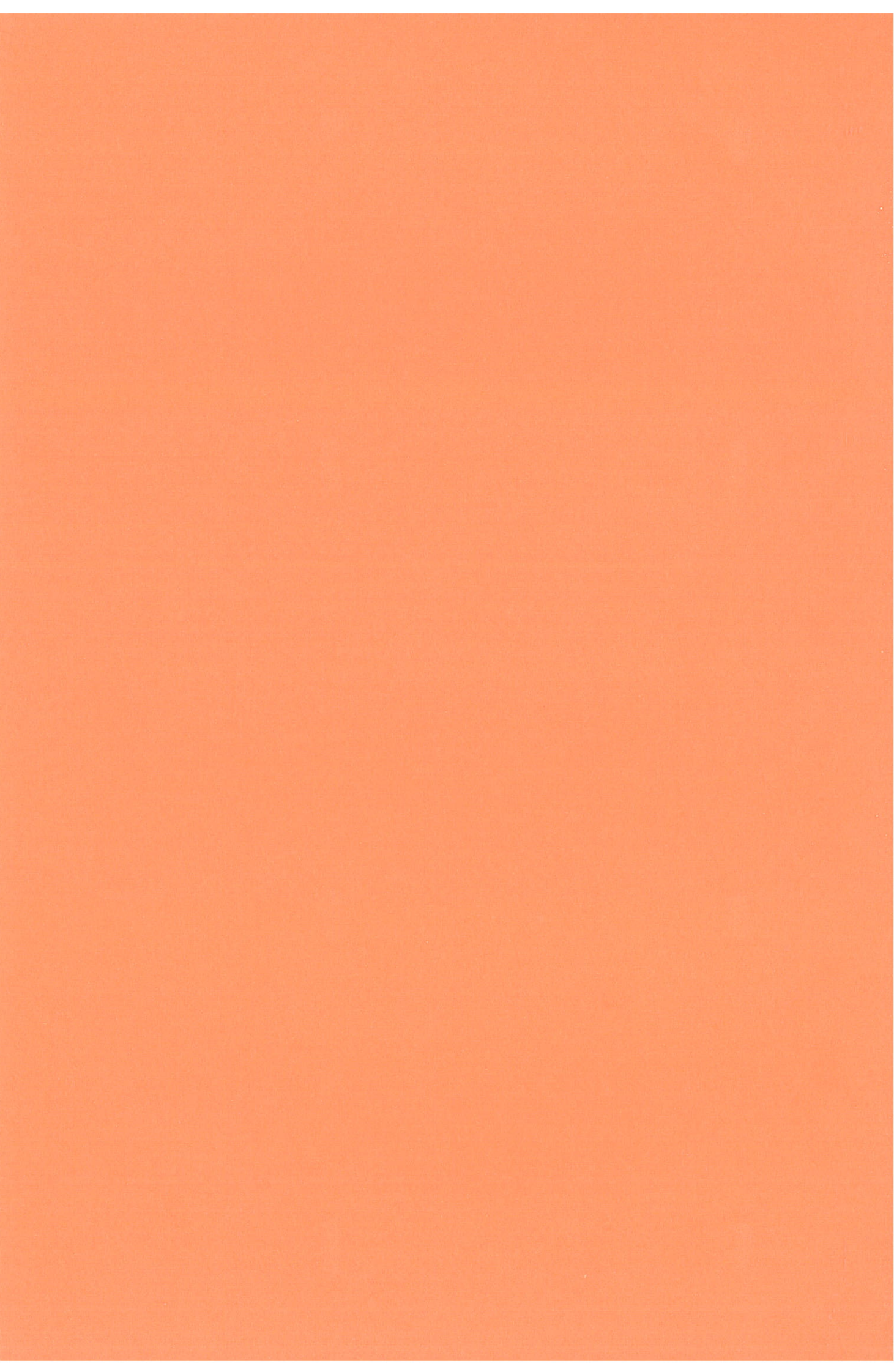
3.3 Filter

Het is denkbaar dat de toelaatbare golfhoogten voor de steenzetting, in het filter grote druk variaties opwekt. Hierdoor zou materiaal kunnen uitspoelen waardoor op langere termijn de steenzetting kan worden ondermijnd. Wanneer de kritieke waarde voor de steenzetting is bepaald, dient bij deze waarde de stabiliteit van andere delen van de constructie verder te worden geanalyseerd.

3.4 Discontinuïteiten

Overgang in constructie eigenschappen of verstoringen t.g.v. palen, trappen, betonplanken, leveren verstoringen in het krachterspel en hebben invloed op de sterkte.

T.o.v. een continue glooiing zal dit in het algemeen tot een reductie van de toelaatbare $\frac{H}{\Delta D}$ leiden. Dit punt vraagt eveneens nadere studie.



Voorwoord

Het verloop van het onderzoek naar de stabiliteit van steenzettingen wordt gekenmerkt door een geleidelijke verschuiving van de bestudering van de uitwendige, zichtbare, aspecten van de randvoorwaarden en de respons van de steenzetting hierop, naar een diepgaander bestudering van de verschillende mechanismen die de stabiliteit van de constructie, en dijklichaam, kunnen bedreigen. Deze verschuiving heeft geleidelijk plaatsgevonden, zodat de verschillende wijzen van benadering ook naast elkaar zijn vóórgekomen, en vóórkomen. Voor de duidelijkheid is het echter gewenst scheidingen aan te brengen. Hierbij worden de volgende fasen onderkend die in het navolgende zullen worden toegelicht:

- 1 gesloten Black-box benadering.
- 2 geopende Black-box benadering
- 3 Grijs-doos benadering
- 4 Glazen-doos benadering.

1. Black-box benadering

Voor het ontwerp van dijken is men erin geïnteresseerd hoe zwaar een steenzetting moet zijn om de ontwerp (golf-) condities te kunnen weerstaan. De werkwijze die moet leiden tot een aanvaardbaar ontwerp is geschetst in figuur 1.

Al spoedig werd duidelijk dat het verzwaren van de constructie alleen een wel erg primitief middel was om aan de ontwerp eisen te kunnen voldoen. Het bleek dat veel meer aspecten dan alleen het steengewicht voor de stabiliteit van een constructie van belang waren; zoals de taludhelling, de doorlatendheid van de zetting en de doorlatendheid van de onderlaag. Ook golfperiode, en golfsteilheid bleken van belang te zijn. Logisch gevolg was dat er systematisch onderzoek werd uitgevoerd waarbij een aantal van de onderkende ontwerpaspecten systematisch werden gevariëerd. Met de behoefte om meer te weten te komen over de factoren die het optreden van schade beïnvloeden wordt de black box een beetje geopend.

2. Geopende black-box benadering

Deze fase wordt gekenmerkt door een bestudering van de variaties van de uitwendige zichtbare respons van de constructie op de variaties in de constructieve en hydraulische randvoorwaarden. De aandacht was gericht op zaken als golfoploop, rundown, plaats van schade als functie van de golfperiode, de golfsteilheid, de taludhelling en de doorlatendheid van de zetting en de ondergrond. Tevens ontstaat de behoefte om "in de constructie te kruipen". Het besef groeit dat een steen slechts uit een zetting zal worden gelicht als er gedurende een bepaalde tijd onder de steen een grotere druk aanwezig is dan erboven. Na analyse van metingen van de drukken boven en onder een steen worden 3 verschillende schademechanismen gesignaleerd:

- quasistatische verschildrukken
- dynamische verschildrukken
- verschildrukken t.g.v. de fase verschuiving.

Deze ontwikkelingen vergroten het inzicht in de werking van de constructie zodanig dat een begin gemaakt kan worden met een benadering van de stabiliteitsaspecten met als tussenstap de berekening van de drukken in de constructie. Hierdoor wordt de black-box een beetje minder zwart.

3. Grijze-doos benadering

Dit is de fase waarin het onderzoek zich op dit moment bevindt. De steenzetting wordt nu beschouwd in samenhang met de overige delen van de constructie. Door het Laboratorium voor Grondmechanica wordt een rekenmodel ontwikkeld waarmee de drukken binnen in de constructie kunnen worden bepaald als functie van de belasting aan de buitenzijde.

De eerder gesignaleerde schade mechanismen worden heroverwogen en gedeeltelijk aangepast aan de nieuwe inzichten. Nu wordt ook onderkend dat het optreden van een bepaald schade mechanisme afhankelijk is van de combinatie van hydraulische randvoorwaarden en constructie parameters. Dit opent de mogelijkheid om door middel van wijzigingen in de constructie doelgericht een bepaald schade-mechanisme te elimineren waardoor de schade-golfhoogte kan worden verhoogd.

Op de werking van de verschillende schade mechanismen wordt nog teruggekomen.

4. Glazen-doos benadering

Het uiteindelijke doel van het Fundamentele onderzoek naar de stabiliteit van steenzettingen is om te komen tot een goede beschrijving van de hydraulische randvoorwaarden waarmee de respons van de constructie kan worden berekend, zodat recht wordt gedaan aan alle onderkende schade mechanismen.

Dit is een streven voor de toekomst. Op de wijze waarop dit streven zal worden verwezenlijkt wordt door ir. J. van der Weide in zijn lezing ingegaan.

Na deze schets van de opzet en de doelstelling van het onderzoek wordt nog meer diepgaand ingegaan op de huidige stand van het onderzoek: "de Grijze-doos benadering".

De jongste inzichten met betrekking tot steenzetting zijn gevormd tijdens de analyse van de meetresultaten van een grootschalig modelonderzoek voor het ontwerp van de Oesterdam, in de Deltagoot van het laboratorium de Voorst. De instrumentatie van dit model was zodanig opgezet dat een gedetailleerde analyse mogelijk was van de drukken aan de boven en onderzijde van het talud (figuur 2). Voor de analyse van de optredende schade mechanismen is voornamelijk gebruik gemaakt van proeven met regelmatige golven.

De volgende schade mechanismen werden onderkend.

- quasi-statische en quasi-stationaire verschildrukken.

De golfcondities zullen zodanig moeten zijn dat de ene golf zich terugtrekt tot beneden het stilwater niveau op het tijdstip dat de volgende golf nadert. Dit wordt bepaald door de golfsteilheid en de taludsteilheid en in mindere mate door de ruwheid. Of, en zo ja in welke mate er dan ook werkelijk quasi-statische of quasi-stationaire verschildrukken optreden is afhankelijk van de constructie, zoals in de figuren 3 en 4 is geïllustreerd. De invloed van de relatieve doorlatendheid van de zetting en van de taludhelling op de grootte van de overdrukken wordt in deze figuren toegelicht.

Echter, de initiële druktoestand van een steen in een zetting is 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 namelijk een steen in een zetting t.g.v. een initiële overdruk iets wordt opgelicht zal er onder die steen iets moeten toestromen om de holle ruimte op te vullen (figuur 5). Dit toestromen van water uit het filter zal slechts plaatsvinden t.g.v.

een druk-verhang. De grootte van het verhang dat nodig is om in een bepaalde tijd een bepaalde hoeveelheid water te laten toestromen 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 dus een groter deel van de overdruk aan de onderzijde van de steen verbruikt voor het toestromen van water. Behalve de relatieve doorlatendheid van het filter speelt dus ook de absolute doorlatendheid een grote rol in de stabiliteit van de zetting.

- Vóórlopen van de waterdruk onder de steen

Afhankelijk van de golfsteilheid zal de maximale quasi-stationaire overdruk nog kunnen worden verhoogd doordat op de nadering van de volgende golf de druk aan de onderzijde van de steenzetting eerder zal gaan toenemen dan de druk aan de bovenzijde. Aan de onderzijde van de zetting, in het met water verzadigde filter kan een druk-verhoging zichzelf vrijwel instantaan voortplanten, aan de bovenzijde van het talud verplaatst het golffront zich echter slechts met de voortplantingssnelheid van een golf op ondiep water.

- Golfklappen op het talud

Afhankelijk van de golfsteilheid en de taludsteilheid 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 (figuur 7). Indien zo'n drukstoot een steen van de zetting treft die aan de bovenzijde droog is kan deze steen in beweging 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 er in zeer korte tijd (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 schade mechanisme kan dus slechts optreden binnen zeer nauwe grenzen van combinaties van randvoorwaarden en constructieparameters. Alleen het optreden van een golfklap is dus niet voldoende om dit mechanisme als veroorzaker van geconstateerde schade te beschouwen.

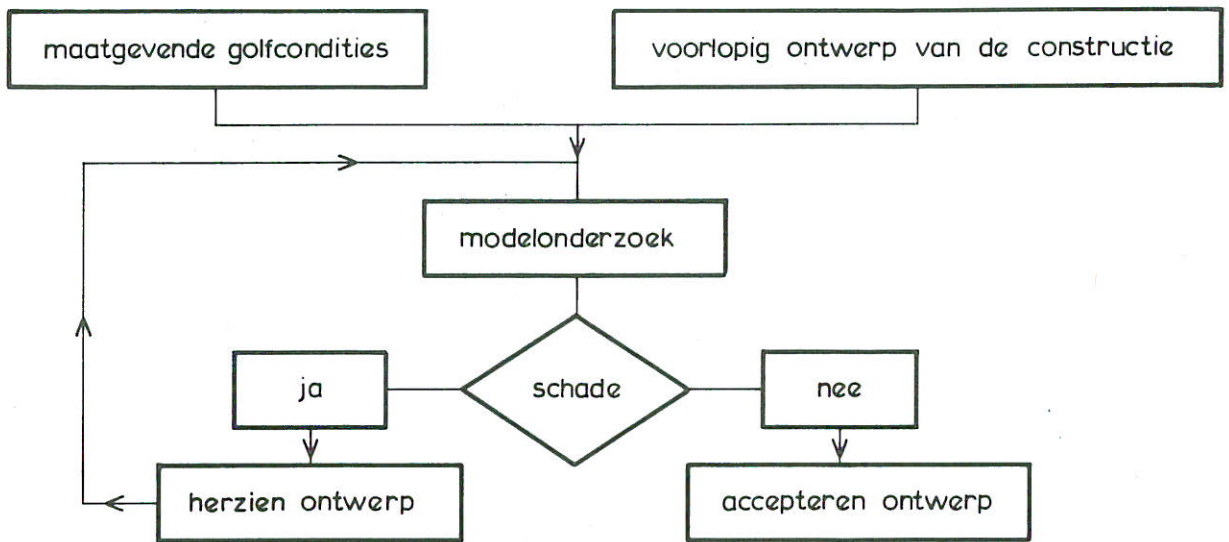
- Drukverlaging direct achter een brekende golf

In kleinschalig modelonderzoek is een schademechanisme waargenomen waarbij direct na het passeren voor het front van een brekende golf stenen uit de zetting worden gelicht. In grootschalig modelonderzoek zijn ook sterke

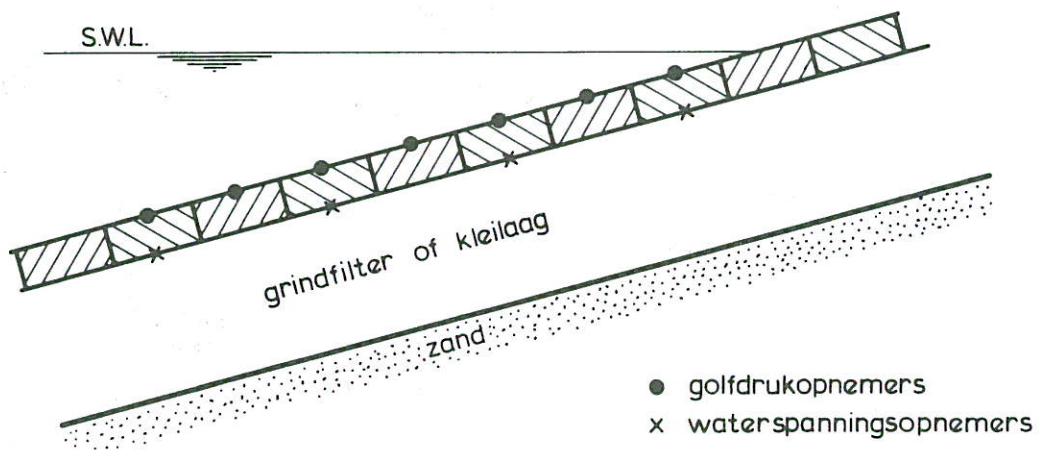
drukverlagingen gemeten na het passeren van een golffront. De oorsprong van dit mechanisme is nog niet duidelijk, hoewel er wel reeds enige suggesties voor zijn gedaan. De indruk bestaat dat het mechanisme vooral optreedt bij steile golven.

De meest in het oog lopende schade mechanismen zijn in het bovenstaande wat nader onder de loep genomen. Afhankelijke van de constructie en de randvoorwaarden kan zelfs het minst belangrijke schademechanisme tot bezwijken leiden juist, indien de constructie zodanig is ontworpen dat de meer belangrijke schademechanismen geen vat meer op de constructie hebben.

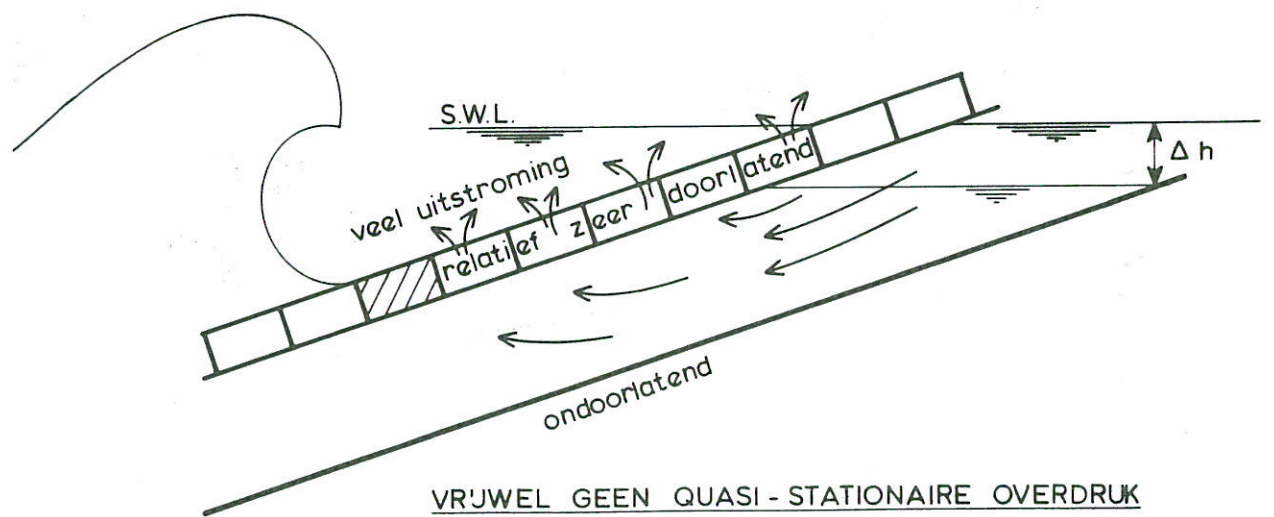
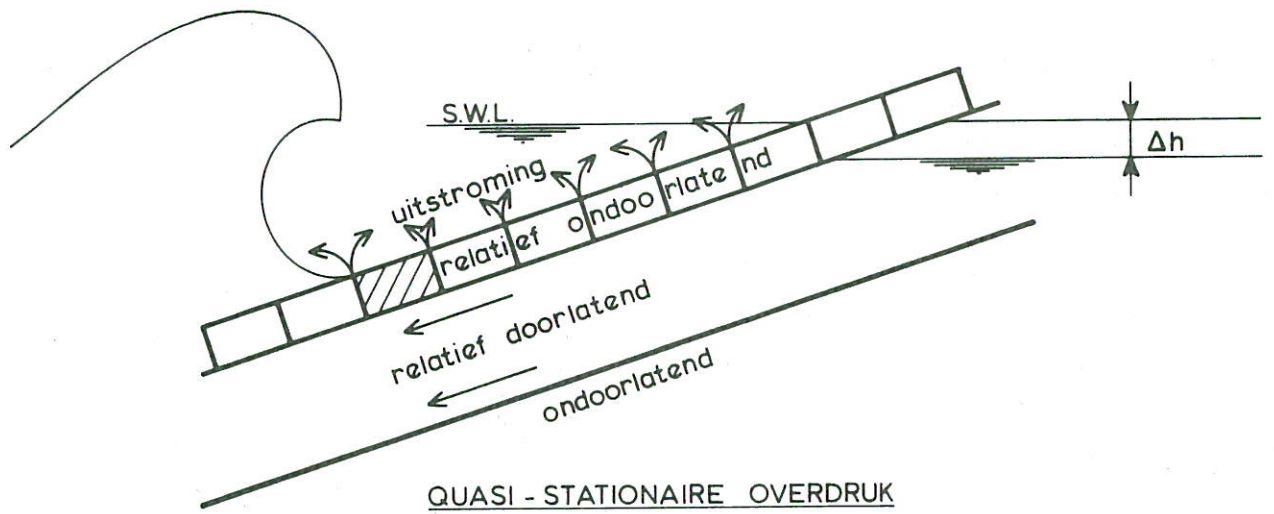
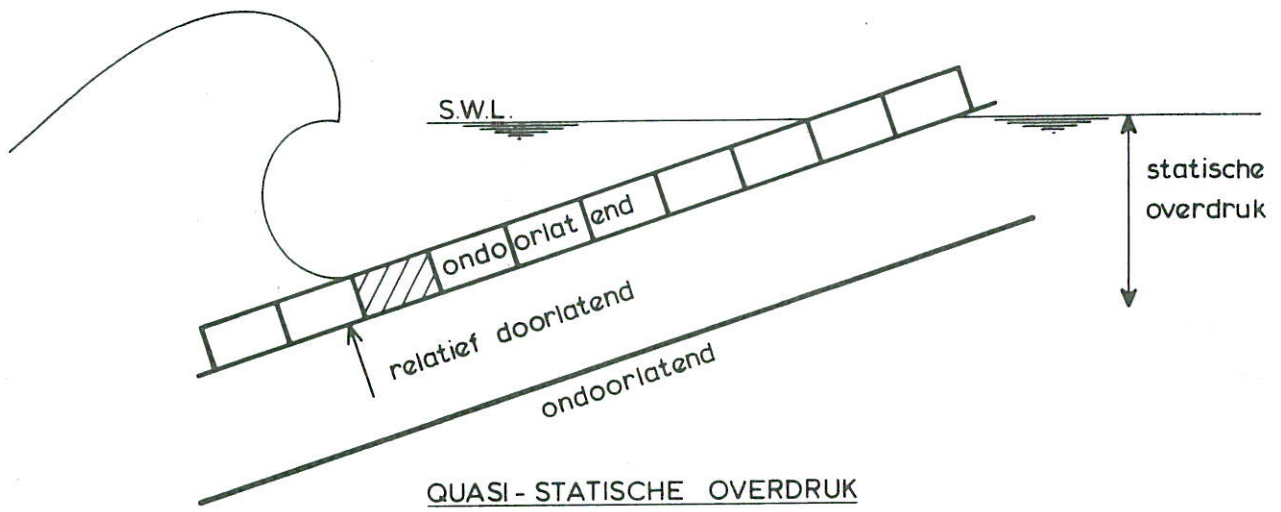
Het bovenstaande is goeddeels gebaseerd op de resultaten van modelonderzoek. De aansluiting met de praktijk is nog onderwerp van studie. Wat zal bijvoorbeeld het effect zijn van de onregelmatigheid in de golfbelasting? In hoeverre is het reëel om een doorlatende zetting te ontwerpen indien de schadezone volledig is doorgroeid met gras en andere planten? Wat is de invloed van bermen en inhomogeniteiten in een talud? Wat is de invloed van 3-dimensionale effecten in het golfbeeld? In hoeverre staan uitvoeringstechnische aspecten een optimaal ontwerp in de weg? Deze en andere vragen zullen moeten worden beantwoord om te komen tot constructies die de vereiste veiligheid bieden zonder dat ze onnodig zwaar en duur zijn.



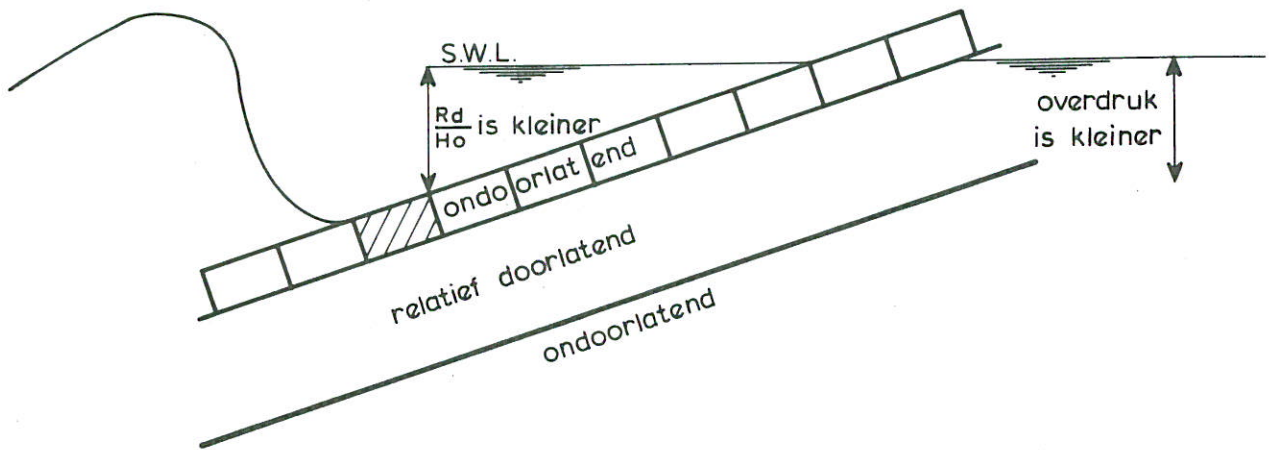
FIGUUR 1 BLACK-BOX BENADERING



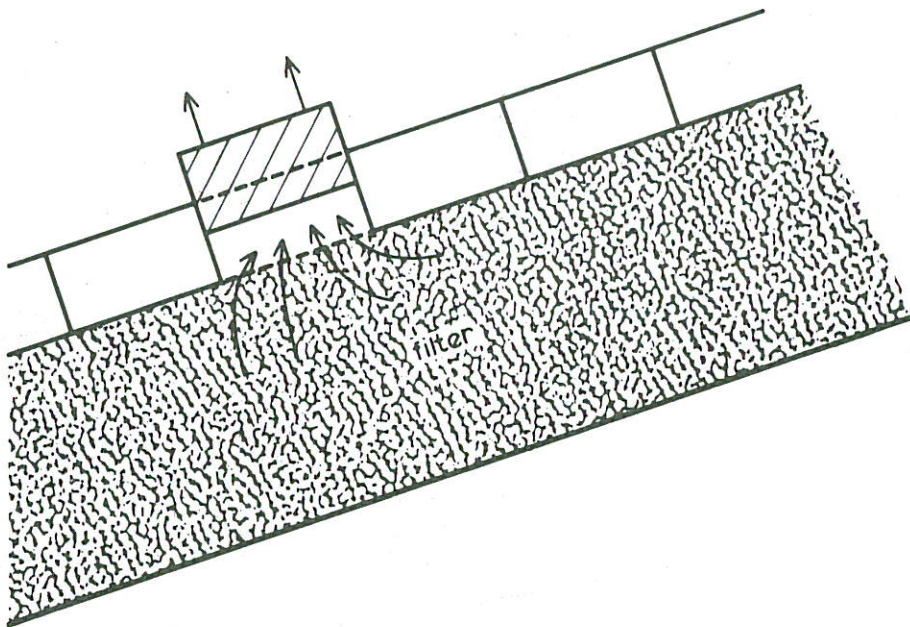
FIGUUR 2 SCHEMA INSTRUMENTATIE



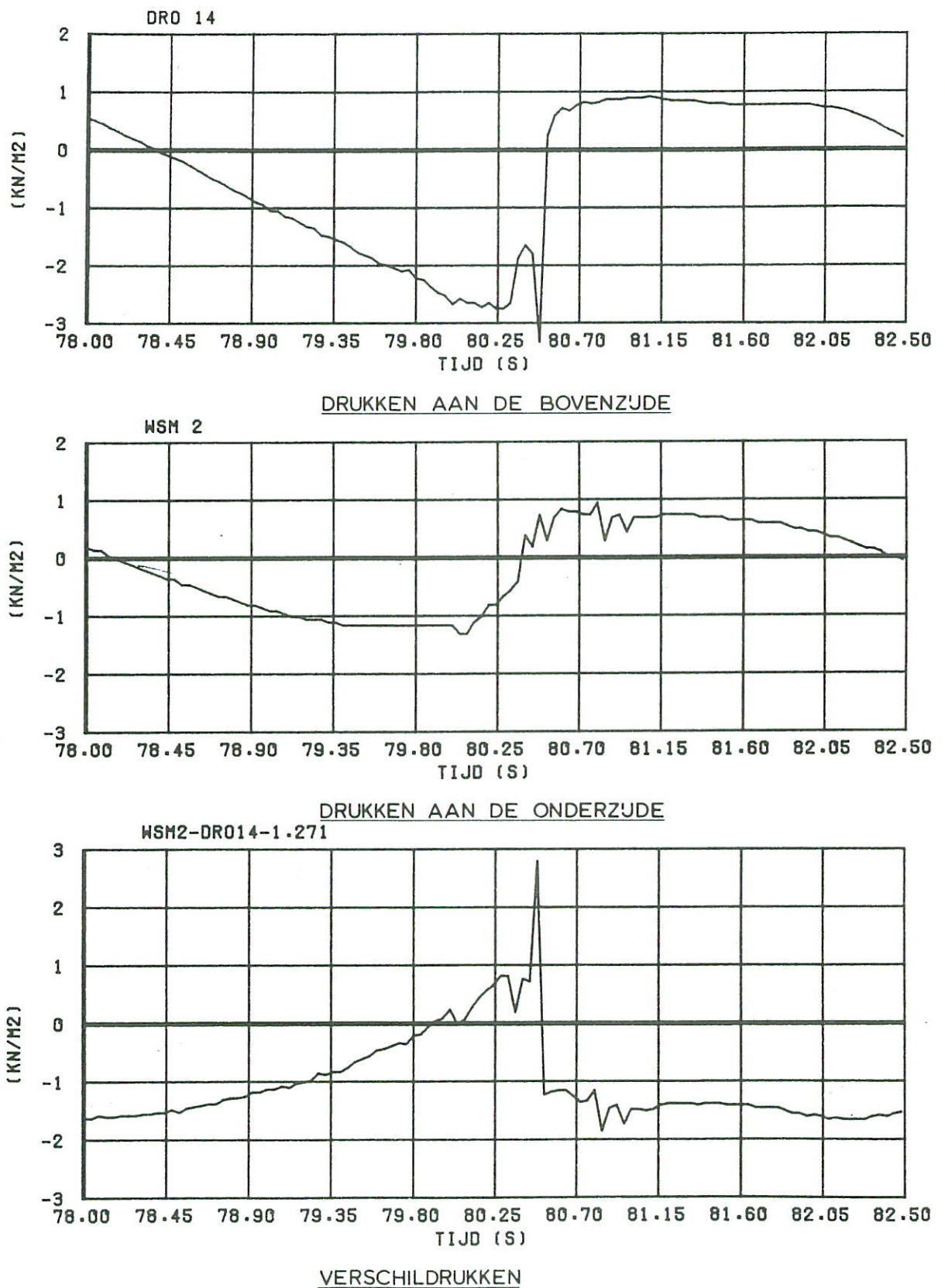
FIGUUR 3 MECHANISME, QUASI STATIONAIRE VERSCHILDRUKKEN



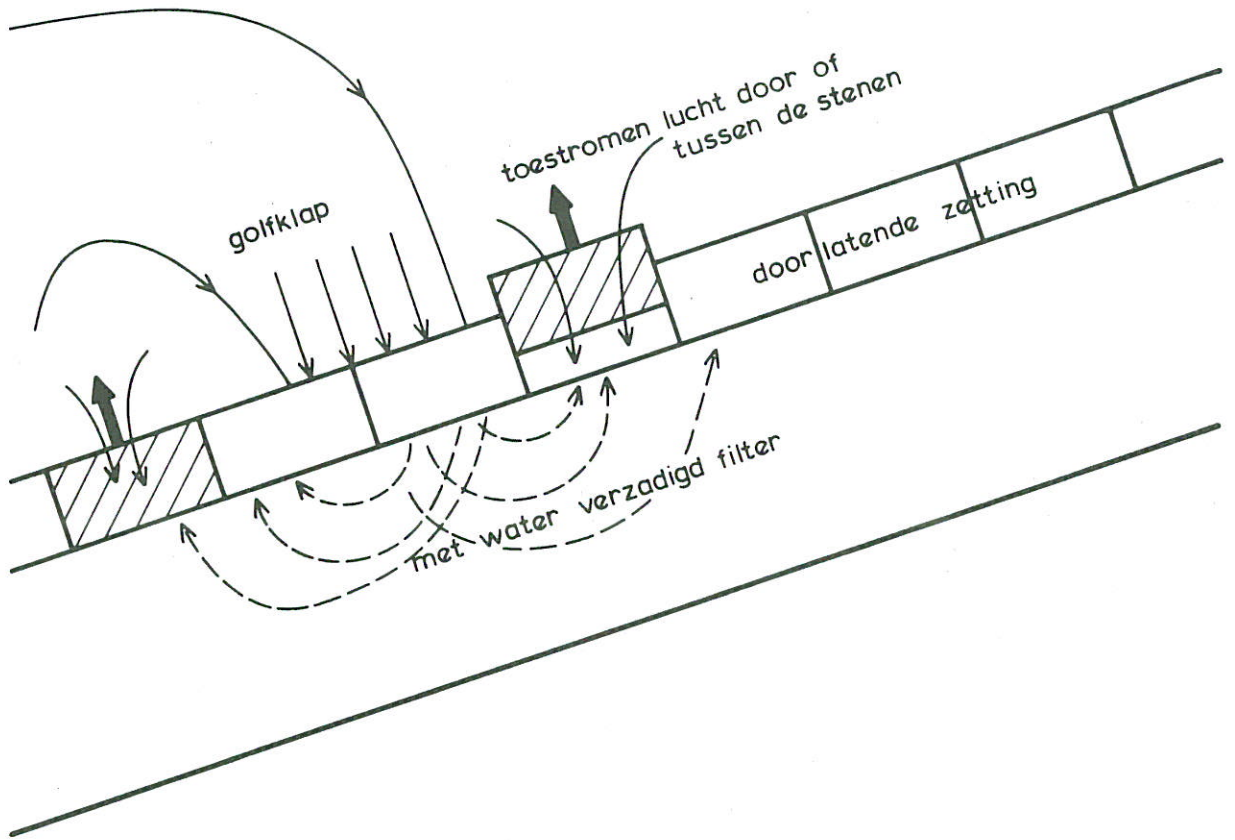
FIGUUR 4 INVLOED TALUDSTEILHEID



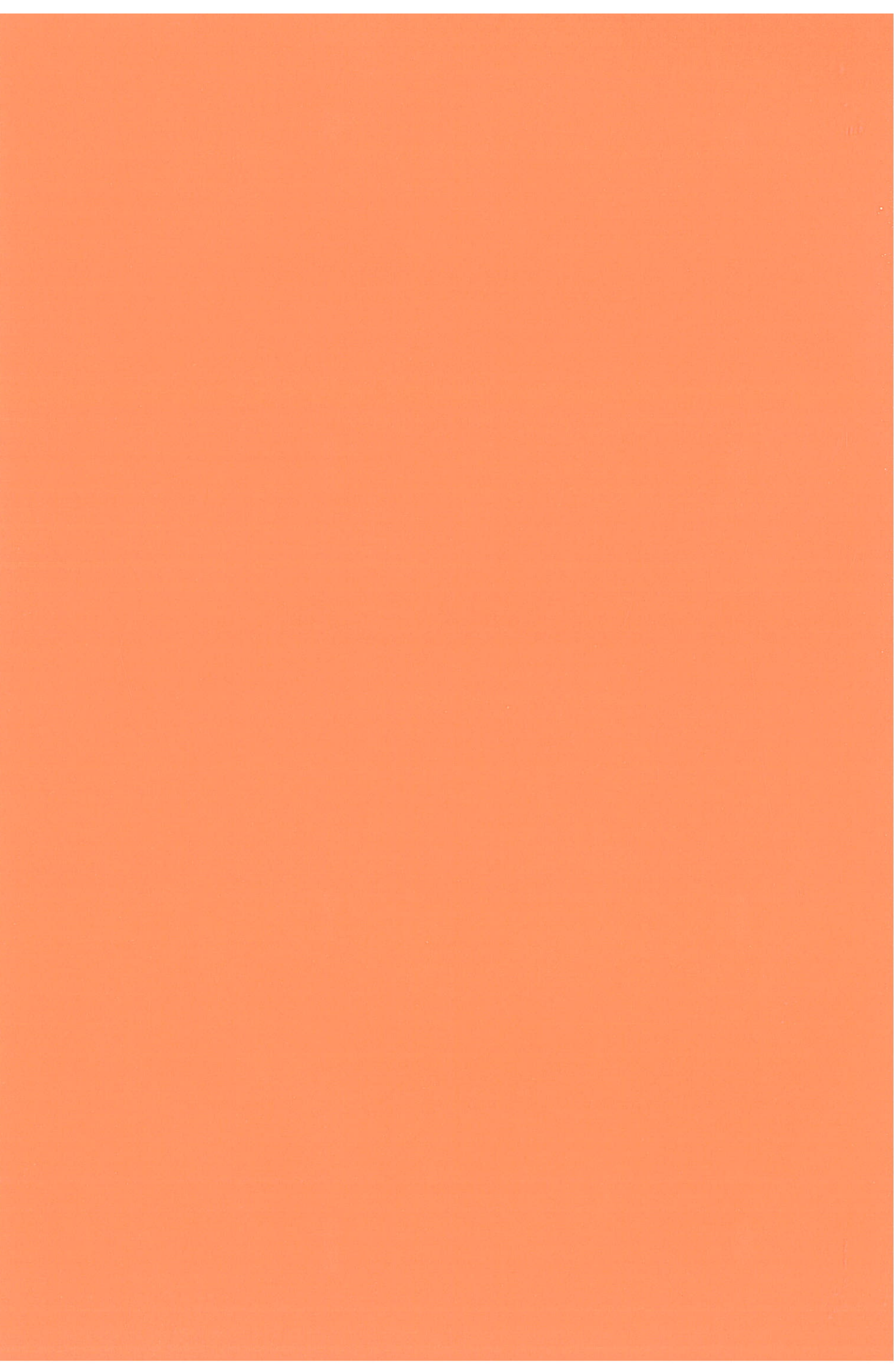
FIGUUR 5 TOESTROMEN WATER ONDER BLOK



FIGUUR 6 DRUKKEN OP TALUD TEN PLAATSE VAN SCHADE



FIGUUR 7 MECHANISME, GOLFKLAP OP HET TALUD



SAMENVATTING VAN DE LEZING DOOR IR. C.J. KENTER VAN HET LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA GEHOUDEN OP DE INFORMATIEDAG "STEENZETTINGEN" OP 20 OKTOBER 1982 TE DELFT.

Grondmechanische aspecten van de stabiliteit van steenzettingen

1. Inleiding

Een steenzetting wordt belast door drukken vanuit het vrije water en door drukken vanuit de ondergrond. Deze gecombineerde belasting die zowel quasi-statisch als dynamisch kan zijn zal tot schade leiden, indien de sterkte van de steenzetting onvoldoende is. Deze sterkte wordt onder meer bepaald door het gewicht van de blokken, de onderlinge wrijving, het onderlinge verband (al dan niet "interlocking") en de klemkrachten tussen de blokken. Vooral door klemkrachten kan de sterkte van de steenzetting zeer groot worden. Het is in dat geval mogelijk dat andere onderdelen van de constructie maatgevend worden. Veelal is dit de filterlaag of kleiondergrond, waar onder invloed van de heersende belastingen erosie gaat optreden. In tegenstelling tot directe schade aan de steenzetting zijn dit lange duur effecten. De hier beschreven grondmechanische aspecten betreffen zowel de belastingen op de zetting vanuit de ondergrond als de genoemde erosieverschijnselen.

2. Quasi-statische belasting vanuit de ondergrond

In het algemeen zal de wisseling van de waterstand in de filterlaag en de ondergrond veel geringer zijn dan de beweging van het vrije water buiten de steenzetting. Dit houdt in, dat bij het teruglopen van de golf op het talud de phreatische lijn in het filter ver achter blijft. Bij de meeste in Nederland voorkomende dijkconstructies en golfomstandigheden, bevindt de phreatische lijn in het filter zich nog vrijwel in de middenstand als de golf zich in het set down punt bevindt. Als gevolg hiervan zal de steenzetting ter plaatse van het set down punt grote waterdrukken vanuit het filter kunnen ondervinden. Deze drukken zijn echter, behalve bij zeer ondoorlatende zettingen, bij lange na niet gelijk aan het waterstandsverschil tussen binnen en buiten. In het algemeen zijn deze drukken in het filter op een tamelijk gecompliceerde wijze

afhankelijk van de golfdrukken op de zetting, het talud, en de weerstand die het water ondervindt bij stroming door de zetting ten opzichte van de weerstand bij stroming door de filterlaag.

Een tweede component van de quasi-statische druk is het gevolg van het grotere natte oppervlak bij instromen ten opzichte van uitstromen. Na verloop van een aantal golven zal hierdoor een zekere verhoging van de druk en de phreatische lijn in het filter optreden. Dit integrerende effect wordt nog versterkt door de richting van de spleten tussen de blokken.

Een derde component van de quasi-statische druk is afkomstig van de aanrollende golf. De invloed van de aanrollende golf breidt zich via de spleten in de zetting uit naar het filter c.q. de ondergrond. Deze golfdrukvoortplanting onder de zetting gaat in het algemeen sneller dan de oploop van de golf boven de zetting. Als gevolg hiervan ondervinden enkele stenen voor het golf front uit een hoge druk vanuit het filter, terwijl de waterdruk vanuit het buitenwater nog vrijwel nihil is.

Uit het tot nu toe verrichte onderzoek is gebleken dat de quasi-statische druk vanuit filter c.q. ondergrond voor zeer belangrijk gedeelte verantwoordelijk is voor het optreden van schade. Met name de bovengenoemde eerste en derde component ervan zijn belangrijk. Deze kunnen een flink gedeelte (b.v. enige m^2) van de steenzetting instabiel maken. Ten gevolge van de eerste component drijven de stenen als het ware op een laag overspannen water, terwijl de derde component de stenen ter plaatse van de aanrollende golf uit de zetting beweegt. Deze beweging plant zich langs het talud omhoog voort met de loop-snelheid van de golf. (z.g. "pianola-effect"). Dit verschijnsel is goed waarneembaar in de film, die van het Oesterdam onderzoek is gemaakt. Het is ook goed te zien door de Oesterdam metingen van de waterspanningen in het filter (zie doorzichtige bijlage 1) te leggen op die van de golfdrukken op de zetting (zie bijlage 2).

Deze bijlagen bevatten als het ware een aantal filmbeeldjes van de belastings-situatie op de zetting, genomen met een tussentijd van 0,4 s.

Een steen kan alleen uit de zetting worden gedrukt, indien voldoende water de steen volgt. Is het b.v. door een relatief ondoorlatende ondergrond of door een korte duur van de belasting niet mogelijk voldoende water aan te voeren, dan zal de druk onder de steen snel afnemen en zal de beweging stoppen. Dit "zuignap-effect" is de reden dat een steenzetting op goed aansluitende, liefst wat vette klei zo voortreffelijk functioneert. Het is tevens de reden dat het effect van een dynamische, dus zeer kort durend verschijnsel als een golfklap zoveel geringer is dan oorspronkelijk wel werd verondersteld.

Omdat de quasi-statische drukken een zo belangrijk verschijnsel werden geacht is er zowel via interpretatie van modelonderzoek als ook via rekenkundig onderzoek veel aandacht aan besteed. Door Sellmeyer en Bezuyen is een rekenmethode en computerprogramma ontwikkeld waarmee de quasi-statische drukken kunnen worden berekend voor een tamelijk willekeurig dijkprofiel en willekeurige hydraulische randvoorwaarden. De steenzetting wordt reëel weergegeven als een afwisseling van blokken en spleten. De doorlatendheid van zowel de spleten als de filterlaag mogen een functie zijn van het locale verhang, waardoor ook turbulente en overgangsstroming kan worden geschematiseerd. Het programma rekent zowel de drukken als de hoogte van de phreatische lijn in het filter uit als functie van plaats en tijd. Hierbij wordt rekening gehouden met alle drie hierboven genoemde componenten van de quasi-statische druk.

Uit berekeningen tot nu toe bleek verder het volgende:

- a De kans op schade wordt kleiner naarmate:
 - de steenzetting doorlatender is
 - het filter minder doorlatend is of dunner (of zelfs geheel afwezig)
- b De verhoging van de phreatische lijn boven zijn oorspronkelijke middenstand door golfaanval is groter naarmate de zetting doorlatender; in dat geval is de verhoging van de druk echter kleiner.
- c Een belangrijk kental bij de bepaling van de quasi-statische drukken bleek de lek lengte λ te zijn, die als volgt is gedefiniëerd:

$$\lambda = \sin \alpha \sqrt{\left(\frac{b d k}{k'}\right)}$$

waarin:

- α = taludhelling
- b = dikte van de filterlaag
- d = dikte van de steenzetting
- k' = doorlatendheid van de steenzetting
- k = doorlatendheid van het filter.

In bijlage 4 is een ontwerpgrafiek gegeven, die is afgeleid uit de oorspronkelijke analytische variant van de rekenmethode. De grafiek geldt voor een horizontale buiten waterstand die sinusvormig variëert.

Uit narekening van de schaal 1:2 Deltagoot proeven tb.v. de Oesterdam met de latere numerieke versie bleek dat de berekende drukken goed overeenkwamen met de gemeten drukken (zie bijlage 3). Dit gold niet alleen de grootte, maar ook fase verschillen en diverse details in het drukverloop. Bovendien werd

het rekenprogramma getoetst aan electricisch analogon onderzoek m.b.v. het Deltadienst model ELNAG. Ook hier was de overeenkomst goed. Dit rekenprogramma lijkt een belangrijk hulpmiddel te kunnen worden bij de beoordeling van dijk-ontwerpen.

3. Dynamische belasting vanuit de ondergrond

De dynamische belasting op een steenzetting wordt veroorzaakt door de klap van de brekende golf. Deze klap zal zich onder de zetting voortplanten. Hierdoor worden naastliggende stenen van onder af belast en zal een begin van bewegen kunnen optreden. Zoals hierboven al opgemerkt is zal dit in het algemeen geen doorgaande beweging tot gevolg hebben. De tijd van het verschijnen is te kort om voldoende water aan te voeren om de steen te volgen. Slechts bij een zeer doorlatende ondergrond b.v. bij de aanwezigheid van piping kanaaltjes of een laag overspannen water zal dit wel mogelijk zijn. Momenteel bestaat daarom de indruk dat de dynamische drukken van ondergeschikte betekenis zijn bij het optreden van schade.

Wellicht zijn de dynamische drukken nog enigszins van belang bij het optreden van erosie in de ondergrond en het mobiliseren van klemspanningen in een met grind afgestrooide zetting.

Er is met behulp van berekeningen op diverse wijzen getracht bovenstaande indrukken te onderbouwen. Er is gerekend naar de uitdemping van de klap, de uitwijking aan het oppervlak en de impuls die nodig is een steen uit een droge zetting te lichten.

Verder zijn voor het Oesterdamonderzoek in de Deltagoot geïnstumenteerde blokken ontwikkeld waarmee tot frequenties van 200 Hz de golfdruk, de water-spanning en grondspanning in het filter en de versnelling kan worden gemeten (zie bijlage 3 en foto 1). Er is een rekenmodel ontwikkeld waarmee deze meetwaarden met elkaar in verband kunnen worden gebracht en waarmee de kwaliteit van de meting kan worden gecontroleerd.

De evaluatie is op dit punt nog niet afgerond, maar de bevindingen tot nu toe bevestigen de bestaande ideeën.

4. Erosie van filter en ondergrond

Erosie aan filter en ondergrond wordt als schademechanisme in het algemeen slechts zichtbaar bij relatief sterke steenzettingen waar geen directe schade optreedt. Dit is bijvoorbeeld het geval bij sterk geklemde zettingen of zettingen op een goed aansluitende ondergrond van klei.

Als schademechanisme wordt het ook vaak waargenomen bij oeverbeschermingen van scheepvaartkanalen, waar de belasting in het algemeen zodanig laag is, dat directe schade aan de zetting niet optreedt. Van belang voor het optreden van erosie zijn de belasting op de constructie en de sterkte van de constructie. De belasting bestaat in dit geval uit de in het filter en de ondergrond optredende verhangen. De sterkte van de constructie wordt in dit geval meestal beschreven door de kritieke verhangen van de lagen en laagovergangen. Onder "kritiek verhang" wordt verstaan: Het verhang waarbij nog net geen beweging van deeltjes optreedt.

Over de aard van de erosie is nog weinig bekend en dan in het algemeen nog uit parallellen met oeverbeschermingen van scheepvaartkanalen. Veelal is erosie het gevolg van een onjuiste dimensionering van de constructie, d.w.z. van onvoldoend ver doorgevoerde filterlagen of geotextielen. Erosie bij klei kan het 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. Als gevolg van erosie kan het talud sterk vervormen en kunnen grote gaten ontstaan waarin een deel van de steenzetting wegzakt. Ook kan de constructie al in een eerder stadium bezwijken doordat een sterk doorlatende zone onder de zetting ontstaat. Zoals onder 2 is opgemerkt is dit zeer nadelig voor de stabiliteit. Met name bij zettingen direct op klei is een dergelijke vorm van bezwijken mogelijk.

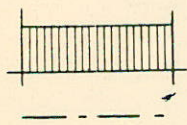
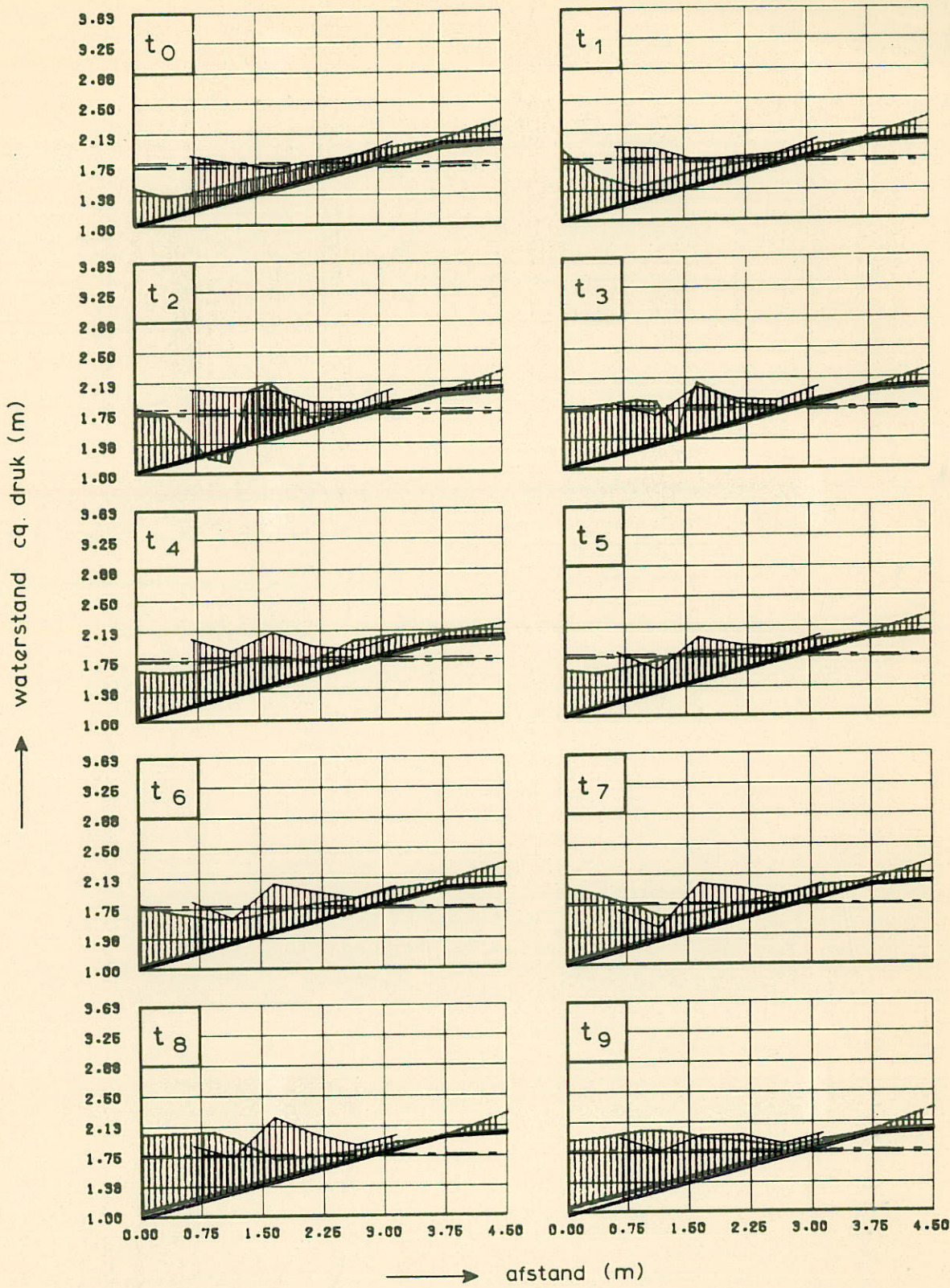
Bij geklemde zettingen of zettingen met een sterke interlocking tussen de blokken kan een deel van de zetting onder invloed van de grote quasi-statische drukken wat worden opgelicht zonder dat een individuele steen uit de zetting wordt gedrukt. Tijdens golfoploop valt dit deel van de zetting dan weer naar beneden. Als gevolg hiervan worden betrekkelijk grote hoeveelheden water onder de zetting heen en weer geperst. Bij niet stroombestendig filtermateriaal kan hierdoor aanzienlijke stroomerosie optreden.

Het ligt in de bedoeling om in de komende fase van het onderzoek meer aandacht aan de diverse aspecten van erosie te geven.

5. Conclusies

Het onderzoek tot nu toe heeft voor wat betreft de grondmechanische aspecten tot de volgende conclusies geleid:

- 1 De quasi-statische drukken vanuit filter en ondergrond veroorzaken voor een belangrijk deel de directe schade aan een steenzetting.
- 2 Deze quasi-statische drukken lijken goed berekend te kunnen worden met behulp van het hiertoe door Sellmeyer en Bezuyen ontwikkelde computerprogramma, mits de golfdrukken bekend zijn.
- 3 De kans op schade wordt kleiner naarmate:
 - de steenzetting doorlatender is
 - het filter minder doorlatend of dunner isToepassing van een grove laag onder de steenzetting kan daarom in veel gevallen, tenzij beslist noodzakelijk voor uitvullen, beter worden vermeden.
- 4 De lek lengte λ (gedefinieerd in 2) lijkt een belangrijke stabiliteitsparameter voor steenzettingen te zijn.
- 5 De dynamische effecten ten gevolge van golfklappen lijken van veel minder belang te zijn dan oorspronkelijk wel werd verondersteld.
- 6 Bij zeer sterke steenzettingen, zoals geklemde zettingen of zettingen op een goed aansluitende ondergrond van klei worden lange duur effecten, zoals piping en andere erosieverschijnselen, maatgevend.



drukverloop
 stilwater niveau

Drukverloop onder het talud
 begintijd : 1508:000
 Δt : 0:000

T 50

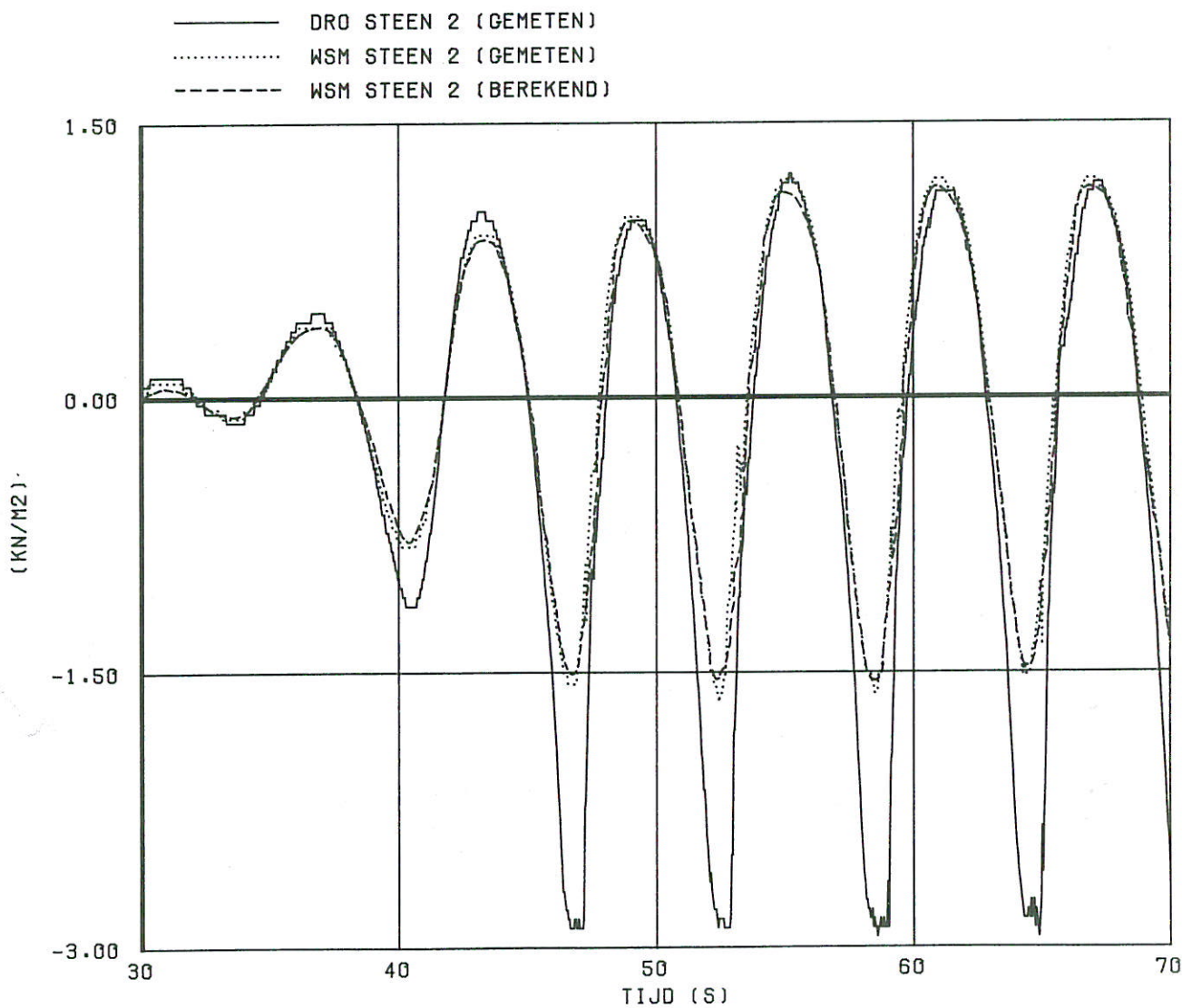
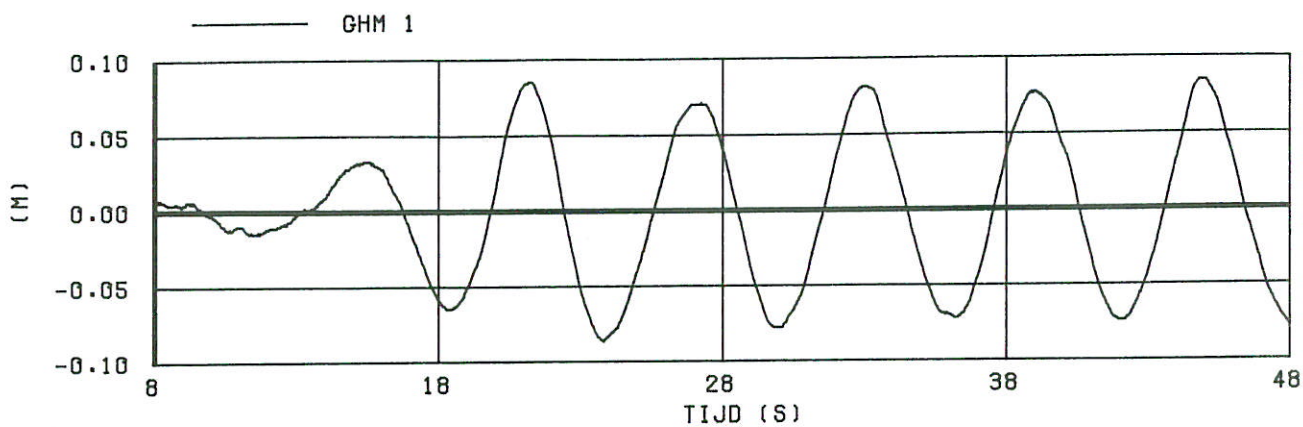
SCHAAL
 11:75

SERIE C311

WATERLOOFGUNDIG LABORATORIUM
 LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA

M 71955

bijlage 2



DELTAGOOT ONDERZOEK OESTERDAM
 VGL. GEMETEN EN BEREKEND W.S. IN FILTER

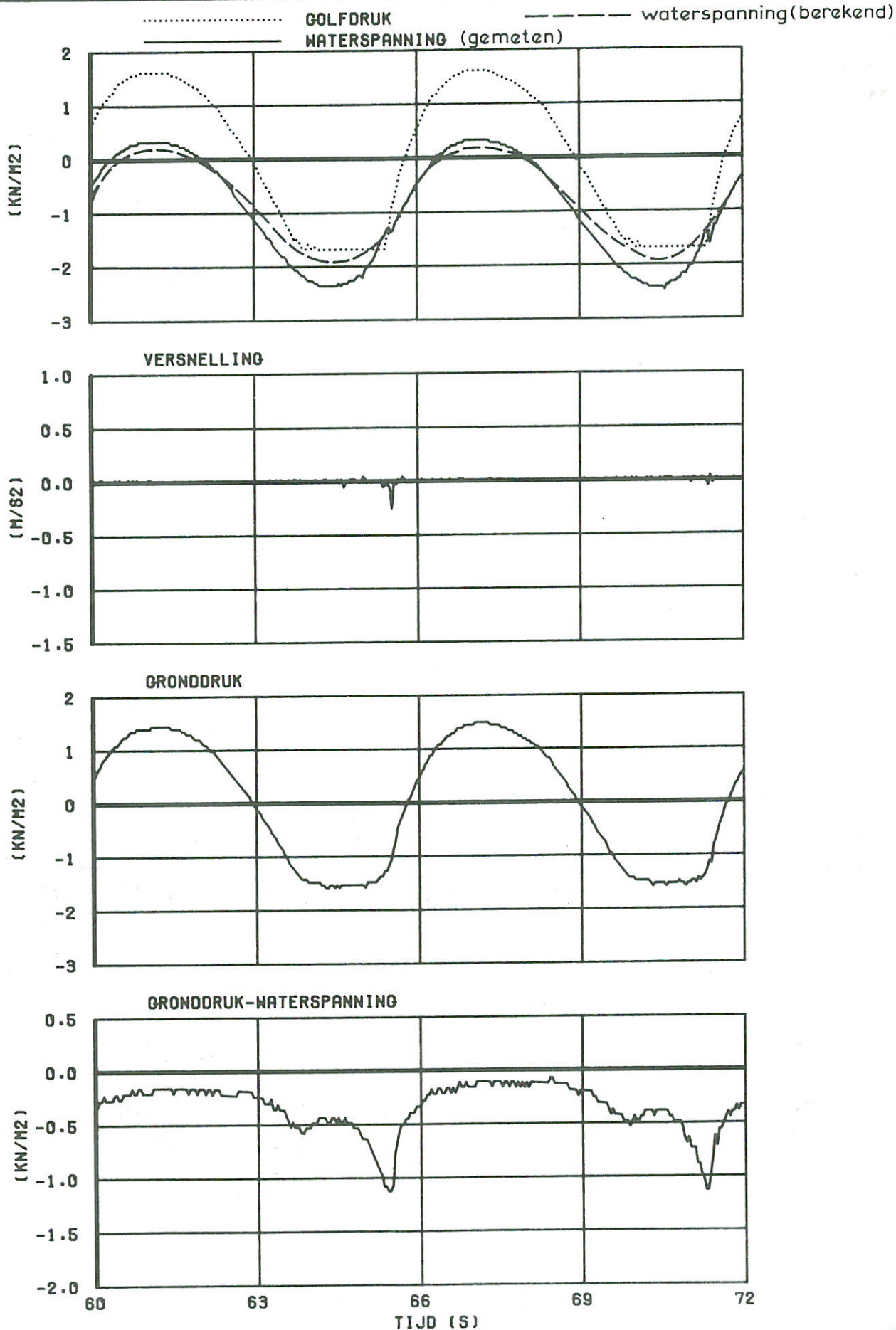
T44

STEEN 2

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM
 LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA

M1881

bijlage 3



FUNDAMENTEEL ONDERZOEK
 STEENZETTINGEN. DELTAGOOT

T44

STEEN 1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM
 LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA

M1881

bijlage 3

LEGENDA :

A = golfhoogte (top - dal)

d = dikte steenzetting

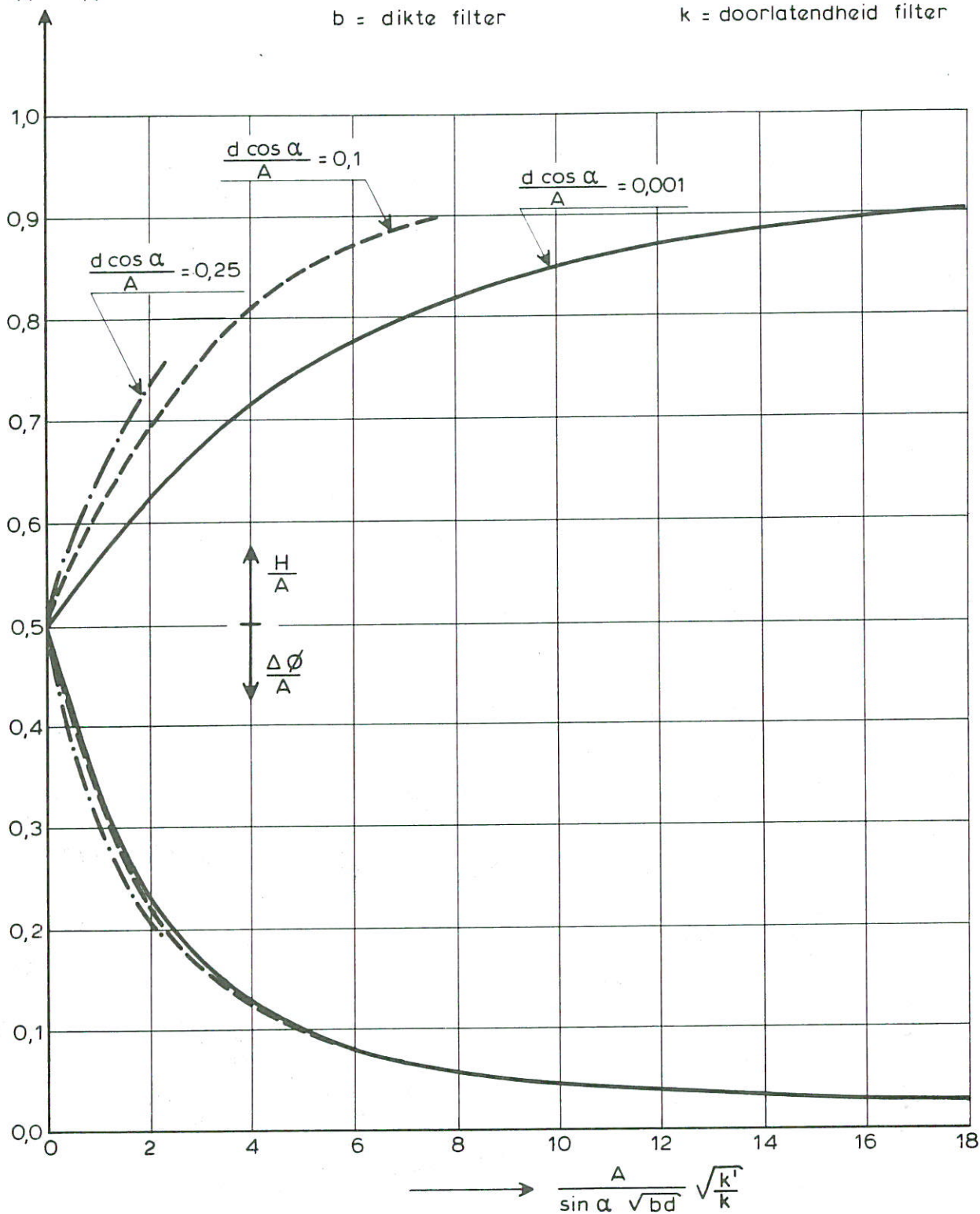
α = taludhoek

k' = doorlatendheid steenzetting

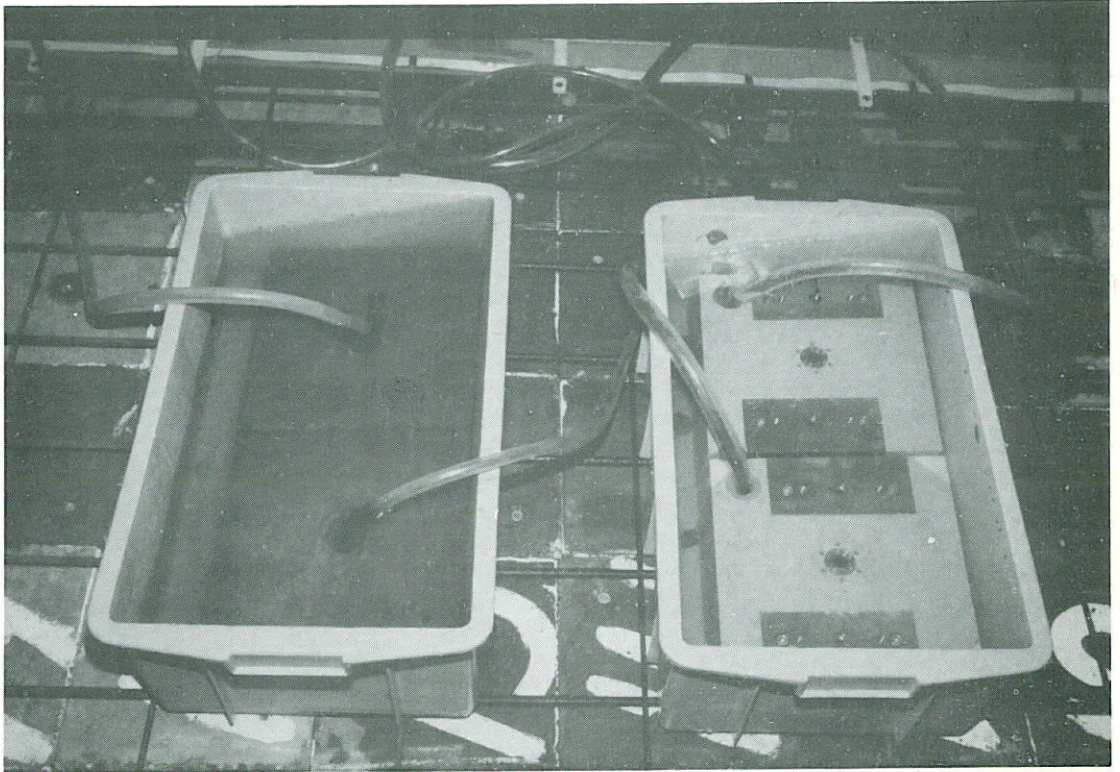
b = dikte filter

k = doorlatendheid filter

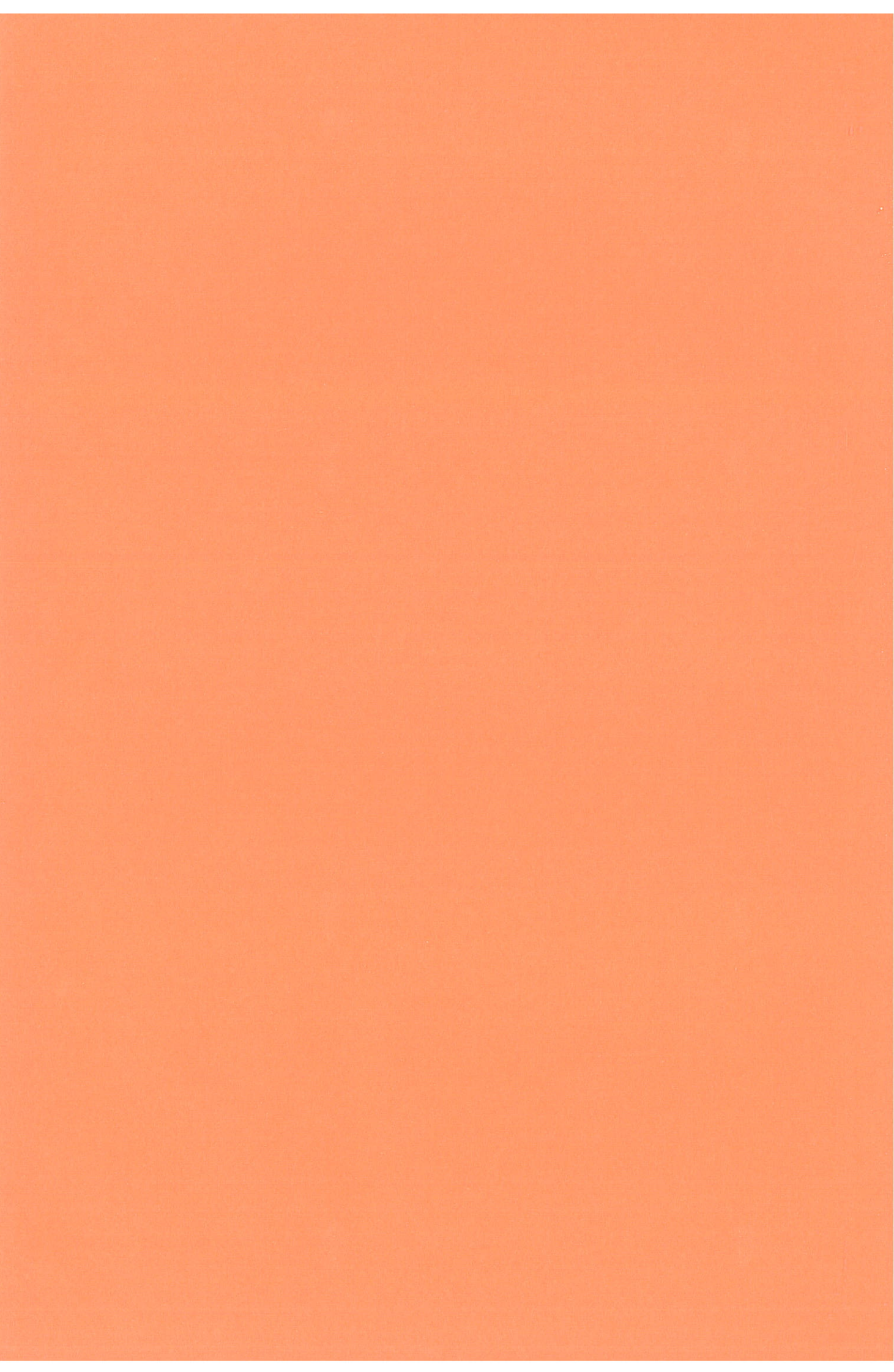
$\frac{H}{A}$; $\frac{\Delta\phi}{A}$



VERHOOGING VAN FREATISCHE LIJN IN FILTER (H/A)
 EN DRUK ONDER DE STEENZETTING ($\Delta\phi/A$) BIJ
 SINUSVORMIGE GOLF MET HOOGTE A



1 Geïnstrumenteerde blokken en betonblokken met waterspanningsopnemers



Praktijkervaringen in het steenzettingonderzoek

1. De mogelijkheden van praktijkonderzoek.

In het steenzettingonderzoek ligt het accent tot nu toe op onderzoek door middel van fysische modellen en berekeningen. Deze brengen beide de noodzaak met zich mee om de in werkelijkheid optredende verschijnselen te schematiseren. Het is bijvoorbeeld nog niet goed mogelijk om taludbekledingen te onderzoeken met scheve golfinval of met een realistisch 3-dimensionale golfaanval (met korte golfkammen). Daardoor zal er steeds een zekere mate van onzekerheid bestaan over de vertaling van de onderzoeksresultaten naar de praktijksituatie.

Een als vanzelfsprekend opkomende vraag is waarom de vragen over de stabiliteit van de taludbekledingen van gezette steen niet opgelost kunnen worden door:

- a. Het bundelen van inzicht en ervaring bij praktijkmensen en het systematisch registreren en statistisch bewerken van praktijkervaringen, eventueel aangevuld met
- b. Gericht onderzoek aan proefvakken, al of niet speciaal daarvoor aangelegd.

Even vooruitlopend op de conclusie kan gesteld worden dat een zekere mate van praktijkonderzoek onontbeerlijk is.

Er zijn in het verleden reeds diverse pogingen gedaan en ze zullen voortgezet moeten worden. Over de resultaten tot nu toe valt ook wel iets te vermelden, maar het lijkt goed om eerst kort aan te geven wat de beperkingen van dit soort onderzoek zijn.

Een eerste moeilijkheid bij het gebruik van praktijkervaringen wordt veroorzaakt door de grote verscheidenheid aan glooiingsconstructies. Het is niet alleen de (reeds grote) variatie in soorten zetsteen, maar het zijn ook de fundering ervan, de taludvorm waarin de steen wordt toegepast (helling, berm), de situatie van het dijkvak (voorlandsituatie, oriëntatie t.o.v. het noorden, strijklengte i.v.m. golfaanval) en de onderhoudstoestand die sterk variëren en waardoor het aantal mogelijke variaties haast onbeperkt is.

De beheerder die een bepaalde constructie een jaar of 10 in onderhoud heeft zal vrij goed weten wat deze onder verschillende omstandigheden waard is. Het is echter zeer moeilijk om deze ervaring over te

dragen naar een ander dijkvak. Deze ervaring schiet ook tekort als de vraag gesteld wordt of een constructie voldoet onder de ontwerpomstandigheden die door de Deltacommissie zijn gedefinieerd, omdat die te ver buiten het ervaringsgebied liggen. Ervaren dijkbeheerders zullen nog wel tot op zekere hoogte in staat zijn om een afwijkende constructie te kunnen beoordelen, maar dit gebeurt veelal zeer intuïtief. Het is dan ook niet doenlijk andere dan kwalitatieve aanwijzingen op schrift te stellen.

Een tweede moeilijkheid doet zich voor als opgetreden schades worden geïnventariseerd. Er zijn, ten gevolge van de goede zorg van de dijkbeheerders, geen vakken aan te wijzen waar met enige regelmaat schade optreedt. De plaats van een schadegeval is dus willekeurig, en de condities van de bekleding en de randvoorwaarden op het schade-tijdstip moeten dus altijd achteraf worden vastgelegd. Voor een goede interpretatie van schade is het toch wel wenselijk dat er stenen uit het talud zijn gelicht. Het wordt dan echter erg moeilijk om de conditie van de bekleding vóór de schade vast te stellen, terwijl met name de golfhoogte alleen maar bij benadering door berekening aan de hand van waterstand en wind geschat kan worden.

Wil men dit verbeteren dan moet men vooraf een groot aantal proefvakken uitkiezen, de taludbekledingen gedetailleerd beschrijven en een golfmeter installeren, en deze gedurende meerdere winters operationeel houden. De trefkans van een schadegeval blijft dan echter nog klein en het is twijfelachtig of de grote kosten voor met name het operationeel houden van een groot aantal golfmeters wel gerechtvaardigd zijn. Bovendien is men geheel aan het toeval overgeleverd voor wat betreft de waterstand en de golfcondities die de natuur biedt op het moment van schade.

Op grond van door het inmiddels verrichte onderzoek verkregen inzicht in de verschijnselen die zich bij het optreden van schade voordoen wordt het mogelijk om nieuwe vragen te formuleren die wellicht wel door praktijkonderzoek beantwoord kunnen worden.

Het zijn veelal detailvragen die kunnen worden beantwoord zonder dat er schade hoeft op te treden. Enige voorbeelden hiervan zijn:

1. Eventuele uitdroging en scheurvorming van klei onder blokken die koud op de klei zijn gezet.

2. Het dichtgroeien van spleten tussen blokken. (Zo wordt er gezocht naar een mogelijkheid om de doorlatendheid van een blokkenglooiing op een bestaand talud te meten).
3. Het uitvoeren van trekproeven om de onderlinge samenhang van de blokken vast te stellen.
4. Het is denkbaar dat op niet te lange termijn het inzicht in de samenhang tussen waterdrukken en het ontstaan van schade zover is toegenomen dat het zinvol wordt om door middel van drukmetingen in en op de bekleding modelresultaten te toetsen zonder dat de bekleding tot bezwijken wordt belast.

Tenslotte is er nog een (al vrij oude) gedachte om op een geëxposeerde plaats proefvakken aan te leggen van taludbekledingen, die zo licht zijn ontworpen dat er een goede kans op schade is. Als plaats daarvoor is b.v. wel gedacht aan de Waddenzeezijde van de Afsluitdijk. Er moet dan echter wel een oplossing gevonden worden voor het risico dat het onderliggende dijklichaam zal beschadigen. Dit kan b.v. door op het bestaande talud eerst een extra laag grond aan te brengen als basis voor het proeftalud. Men is dan meteen geheel vrij in het aanbrengen van berm en vooroeverconstructies. Ook in deze opzet is het mogelijke aantal variaties in constructietype en optredende randvoorwaarden (waterstand en golven) zeer beperkt, terwijl de kosten hoog zijn. Als toetsing van het resultaat van het onderzoek, wanneer dit in een afrondingsfase komt te verkeren, is een dergelijke proef nog steeds denkbaar.

2. Geïnterpreteerde schades

Door het COW zijn over de periode van ± 1972 tot heden de schades aan taludbekledingen van gezette steen op Nederlandse zeedijken geïnterpreteerd. In totaal zijn ongeveer 25 schade-meldingen ontvangen, soms van schade op méér dan één plaats of van méér dan één type bekleding. Ze zijn ontstaan tijdens 14 verschillende stormen. De schades van een aantal oudere typen bekleding, zoals de Vilvoordse steen, waren bijzonder moeilijk te interpreteren omdat de toestand van glooiingen van deze steen zo variabel is. Geïnterpreteerd zijn alleen de schades aan haringmanblokken en aan basaltglooiingen. Ongeveer de helft van deze schades was niet te interpreteren omdat essentiële gegevens ontbraken zoals taludvorm en blokafmetingen, maar meestal omdat de golftoestand niet te reconstrueren was.

Voor een goede interpretatie moeten de volgende elementen goed beschreven zijn:

1. de talud-opbouw en het voorland; d.w.z. een nauwkeurig dwarsprofiel met bekledingsoort, -dikte, funderingslagen, en de ligging van het voorland tot enige honderden meters buiten de teen van de dijk.
2. de randvoorwaarden betreffende waterstand en golfhoogte en -richting. Deze laatste kunnen soms afgeleid worden uit windgegevens en/of veebrandwaarnemingen. Indien de golf niet gemeten is, is een dergelijke schatting alleen goed mogelijk bij op de wind gelegen dijkvakken.
3. het schade-beeld waarbij vooral van belang zijn de hoogte waarop deze is ontstaan en het tijdstip, omdat daaruit de waterstand op dat moment is te bepalen.

De vier wel te interpreteren schades aan vierkante betonblokken $0,50 \times 0,50 \times 0,20 \text{ m}^3$ bevonden zich op taluds 1:3 à 1:4.

Volgens de globale schatting achteraf varieerden de golfhoogten tussen $H_s = 1 \text{ à } 1,5 \text{ m}$ ($H_s =$ significante golfhoogte), terwijl de hoek van inval meest scheef was, tot $45^\circ \text{ à } 60^\circ$ toe.

Indien men met deze gegevens de factor $H_s/(\Delta.D)$ berekent dan volgen hieruit waarden van $H_s/(\Delta.D) = 3,8 \text{ à } 5,6$.

De zes interpreteerbare schades aan basaltzettingen zijn opgetreden op Noord-Beveland (basalt 20/30, talud 1:3,5, twee stormen), de Nieuw-Neuzenpolder (basalt 30/40, talud 1:3), en de Afsluitdijk (basalt 30/40, talud 1:3, drie stormen).

Bij schatting van achtereenvolgens de golfhoogte en de waarde $H_s/(\Delta.D)$ vindt men:

	H_s	$H_s/(\Delta.D)$	
Afsluitdijk	1,1 à 1,3 m	2,0 à 2,4	$\Delta = \frac{\rho_{\text{steen}} - \rho_{\text{water}}}{\rho_{\text{water}}}$
Noord-Beveland	1,2 à 1,4 m	3,3 à 3,8	
Nieuw Neuzenpolder	1,0 à 1,3 m	1,8 à 2,4	D = dikte van de steen

Deze waarden van $H_s/(\Delta.D)$ zijn uitgezet in de figuur waarin de modelresultaten voor onregelmatige golven en doorlatende fundering zijn samengevat (zie figuur 1). De waarde ξ , die in deze figuur op de horizontale as is uitgezet, is geschat op grond van de aanname dat de golfsteilheid H_s/L_0 meestal varieert tussen 0,045 en 0,065. Daarbij is $\xi = \text{tg } \alpha / \sqrt{H_s/L_0}$, waarin $\text{tg } \alpha$ = taludhelling en $L_0 = gT^2/(2\pi)$, waarin T de golfperiode is.

Het blijkt dat de waarde van $H/(\Delta D)$ voor betonblokken hoog is t.o.v. de waarden uit modelproeven, en die voor basaltzuilen 30/40 laag. (De Oesterdam in aanleg is buiten beschouwing gelaten omdat hier waarschijnlijk andere factoren dan alleen de golfwerking de stabiliteit ongunstig hebben beïnvloed).

De waarde die aan deze uitkomsten mag worden toegekend is echter gering vanwege de gebrekkige beschrijving van de toestand van de taludbekleding en van de randvoorwaarden.

Tevens dient men te bedenken dat het zeer waarschijnlijk is dat schades selectief optreden op steenzettingen die relatief het zwakst zijn. Waardoor die zwakte veroorzaakt wordt is achteraf meestal niet te achterhalen. Om dit euvel te ontgaan zou men het onderzoek, zoals reeds eerder vermeld, moeten uitvoeren met een groot aantal vooraf geselecteerde proefvakken.

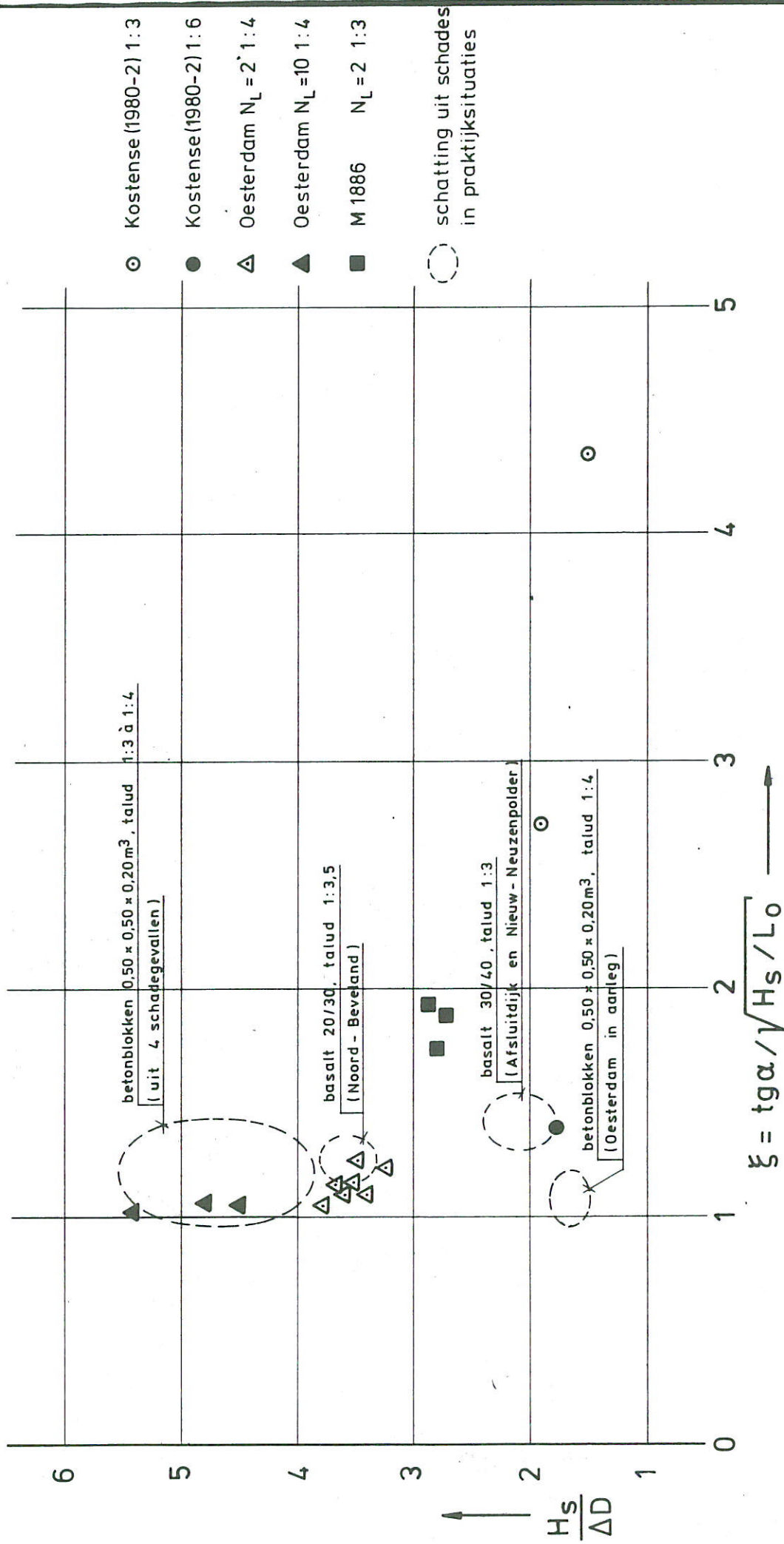
Op grond van de tot nu toe geïnterpreteerde schades kan gesteld worden dat deze geen reden geven om aan de uitkomsten van de modelonderzoeken te gaan twifelen. De geschatte waarden voor de parameter $H_s/(\Delta.D)$ bestrijken het zelfde (brede) gebied als de uitkomsten van diverse modelproeven.

De indruk bestaat dat het voortzetten van de schadeinventarisatie nog tot bruikbare resultaten kan leiden, mits het lukt de nodige gegevens wat meer doelgericht te verzamelen. Met name door het vastleggen van belangrijke gegevens zo kort mogelijk na het ontstaan van


de schade. Vanuit het COW zal daarom getracht worden elk gemeld schade-geval zo kort mogelijk na het ontstaan te bezoeken.

3. Conclusies

1. Naarmate het steenzettingonderzoek vordert zal de behoefte aan praktijkonderzoek groter worden.
2. De tot nu toe geïnventariseerde schades van talusbekledingen van gezette steen zijn moeilijk interpreteerbaar. Voorzover ze dat wel zijn geven ze geen reden om aan de resultaten van het modelonderzoek te twifelen.
3. De schade-inventarisatie moet wat meer doelgericht worden voortgezet.
4. Er zijn diverse praktijk-onderzoeken denkbaar zonder dat gewacht hoeft te worden op het optreden van schade.
5. Het volgen van een groot aantal geselecteerde proefvakken is vooralsnog niet haalbaar door de grote aantallen noodzakelijke golfmetingen.
6. Het onderzoek aan speciaal aangelegde proefvakken kan zinvol zijn in een eind stadium van het steenzettingonderzoek.



- Kostense (1980-2) 1:3
- Kostense (1980-2) 1:6
- △ Oesterdam $N_L = 2$ 1:4
- ▲ Oesterdam $N_L = 10$ 1:4
- M 1886 $N_L = 2$ 1:3
- schatting uit schades in praktijksituaties

 Centrum voor Onderzoek Waterkeringen	vergelijking van geschatte resultaten uit schade-inventarisaties met resultaten uit modelproeven <small>$H_s/\Delta D$; onregelmatige golven; doorlatende funderingslaag</small>				get	gew	gez	Schaal	figuur 1
	 <small>11/10/12</small>				-	-	-	-	-

waterloopkundig laboratorium postbus 177 2600 MH delft
laboratorium voor grondmechanica postbus 69 2600 AB delft
rijkswaterstaat deltadienst postbus 20904 2500 EX den haag
centrum voor onderzoek waterkeringen postbus 20907 2500 EX den haag

