

BB 88.27



GRONDMECHANICA
DELFT



BB

nummers

Golfoverslag bij dijken en de
mogelijke gevolgen bij over-
slagdebieten tot 10 s/m^3

Stieltjesweg 2
Postbus 69, 2600 AB Delft
Telefoon 015-693500
Telex 38234 soil nl
Telefax 015-610821

Postgiro 234342
Bank Mees en Hope NV
Reknr. 25.92.35.911
K.v.K. S 145040 Delft



**GRONDMECHANICA
DELFT**

Golfoverslag bij dijken en de mogelijke gevolgen
bij overslagdebieten tot 10 l/s/m'

Opgesteld in opdracht van Rijkswaterstaat
Dienst Weg- en Waterbouwkunde

CO-301050/7
november 1988

Grondmechanica Delft
Afdeling Waterbouwkundige Constructies
Projectleider : ir. J. Lindenberg
Projectbegeleider : ir. W.J. Heijnen
Afdelingshoofd : ir. P. Lubking



Golfoverslag bij dijken en de mogelijke gevolgen bij overslagdebieten tot 10 l/s/m'.

INHOUD

	blz.
<u>Samenvatting en conclusies</u>A t/m F	
1. <u>Inleiding</u>	1
2. <u>Schade aan binnentaluds tijdens de stormramp '1953</u>	2
2.1 <u>Omvang en typen beschadigingen</u>	2
2.2 <u>Gangbare verklaring voor beschadigingen aan binnentaluds in 1953</u>	4
3. <u>Karakteristieken golfoverslag bij overslagdebieten van 0,1 l/s/m', 1 l/s/m' en 10 l/s/m'</u>	7
4. <u>Analyse van bezwijkmechanismen</u>	16
4.1 <u>Schade aan binnentalud als gevolg van overtrekkend water</u>	16
4.2 <u>Schade aan binnentalud veroorzaakt door penetrerend water</u> ...	20

REFERENTIES



Samenvatting en Conclusies

1. In opdracht van Rijkswaterstaat is een oriënterende studie uitgevoerd naar de effecten voor het binnentalud van een dijk bij gemiddelde overslagdebieten van 0,1 l/s/m', 1 l/s/m' en 10 l/s/m'. Er werd uitgegaan van golfcondities welke in het Benedenrivierengebied kunnen optreden. Tijdens de studie werd speciale aandacht besteed aan de eventuele effecten van golfoverslag bij de combinatie parallellelijk/bestaande dijk.

2. De ervaringen met beschadigingen aan en afschuiven van binnentaluds van dijken stammen grotendeels uit de stormnacht van 1 februari 1953. Deze ervaringen zijn beschreven in hoofdstuk 2 en kunnen als volgt worden samengevat.
 - In vele dijkvakken waar belangrijke schade aan de binnentaluds is opgetreden moet de gemiddelde hoeveelheid overslag enkele tientallen liters per seconde per meter dijk tot zelfs aanzienlijk meer zijn geweest. De totale transportcapaciteit tijdens de storm is bij deze dijkvakken zeer groot geweest.
 - Binnentaludbeschadigingen zijn op grote schaal opgetreden. Karakteristieke kenmerken zijn een langsscheur bovenin het binnentalud en afschuivingen in het talud.
Er kan vanuit worden gegaan dat de afschuivingen in het algemeen met de langsscheur zijn begonnen.
 - Uit de waargenomen beschadigingen is de indruk verkregen dat erosie van de met gras beklede toplaag niet of slechts sporadisch de oorzaak is geweest van schade van betekenis.

3. Een grondmechanische evaluatie heeft tot de conclusie geleid dat de scheurvorming en afschuiving in het binnentalud het gevolg moet zijn geweest van een zich in de bovenlaag ingesteld potentiaalbeeld met stroomlijnen evenwijdig aan het binnenbeloop (hoofdstuk 2). Dit potentiaalbeeld ontstaat na volledige verzadiging door penetratie van water in de relatief doorlatende toplaag. Dit mechanisme in combinatie met de in het algemeen steile taluds (gemiddeld 1:1,5 tot 1:1,75) heeft met grote waarschijnlijkheid tot stabiliteitsverlies geleid.



4. De vergelijking, opgenomen in hoofdstuk 2, toont aan dat evenwichtsverlies bij gegeven bezwijkparameters van de grond zal optreden indien de dikte van de laag waarin het evenwijdige stroombeeld aanwezig is groter is dan een kritieke waarde. De kritieke laagdikte neemt toe bij afnemende taludhelling. Bij taludhellingen van 1:2,5 of flauwer zal evenwichtverlies niet of hoogstens zeer lokaal kunnen optreden.
5. In hoofdstuk 3 worden de overslagkarakteristieken beschreven behorend bij gemiddelde overslagdebieten van 0,1 l/s/m', 1 l/s/m' en 10 l/s/m'. Hierbij is gebruik gemaakt van de resultaten van golfoverslagproeven ten behoeve van de Afsluitdijk uitgevoerd in het Waterloopkundig Laboratorium (modelproeven 1:15).
Onder andere werd bij deze proeven informatie omtrent laagdiktes overstromend water en stroomsnelheden langs het binnentalud verkregen. Door terugschaling van de proefresultaten naar condities representatief voor de omstandigheden langs de Benedenrivieren werden relevante overslagkarakteristieken afgeleid.
6. De meest extreme condities welke in hoofdstuk 3 zijn beschouwd zijn $H_s = 1,15$ m, $\bar{T} = 4$ s, waakhogte $z = 1,33$ m en gemiddeld overslagdebiet 10 l/s/m' dijk.
De volgende overslagkarakteristieken werden afgeleid:
- overslagpercentage $p = 32\%$.
 - de reële tijd t dat er water stroomt over het talud is ongeveer 10% van de totale tijd
 - maximale stroomsnelheid langs het binnentalud $v_{\max} = 8,9$ m/s.
 - snelheid die in 5% van de tijd t wordt overschreden $v_{5\%} = 6,1$ m/s.
 - laagdikte van de waterstroom die in 5% van de tijd t wordt overschreden $d_{5\%} = 0,10$ m.
 - $v_{5\%}$ en $d_{5\%}$ worden slechts gedurende $1,8 \times 0,10 \times 0,05 \times 3600 = 32$ sec per uur overschreden.
 - de tijdsduur waarbij de stroomsnelheid groter is dan 2 m/s bedraagt ruwweg 5 min/uur.



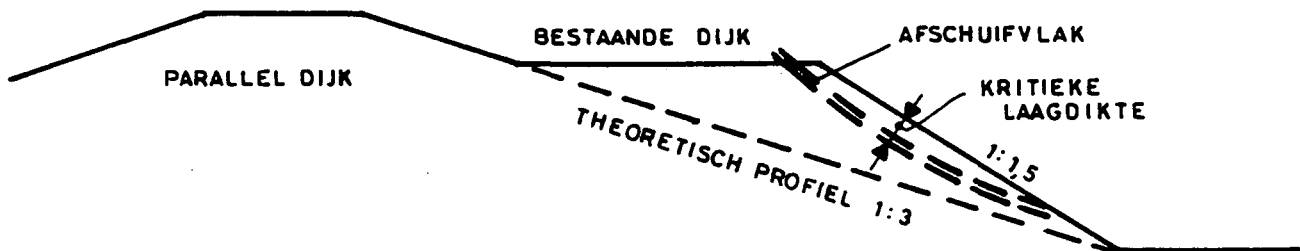
7. Deze karakteristieken zijn van toepassing voor een binnentalud 1:2,5. Er zijn geen bijzondere redenen te verwachten dat bij gelijke golfcondities en gemiddeld overslagdebiet grote verschillen zullen optreden bij afwijkende taludhellingen. Dat wil zeggen bij taluds iets flauwer dan 1:2,5 zullen de stroomsnelheden slechts weinig lager zijn dan de onder punt 6 genoemde snelheden.
8. In hoofdstuk 4 zijn de mogelijke bezwijkmechanismen bij een binnentalud beschouwd in relatie tot een overslagdebiet van 10 l/s/m'. 2 Typen bezwijkmechanismen zijn beoordeeld namelijk mechanismen die het gevolg zijn van overtrekkend water en mechanismen die het gevolg zijn van penetrerend water. Met het eerste type wordt erosie van de toplaag van het talud bedoeld, het 2^e mechanisme heeft betrekking op het hiervoor onder 3. en 4. beschreven verschijnsel van scheurvorming en afschuiving in het binnentalud.
9. De mate van erosie a.g.v. overtrekkend water hangt behalve van de grondeigenschappen af van de combinatie stroomsnelheid en tijdsduur. In hoofdstuk 4.1 wordt ingegaan op 2 soorten experimenten waarbij informatie wordt verkregen over de omvang van erosie als functie van deze belastingsgrootheden.

Deze experimenten zijn proeven met stromend water over al dan niet met grasbektele grondmonsters uitgevoerd in een gesloten goot in het Waterloopkundig Laboratorium en proeven in het centrifuge-erosie apparaat van Grondmechanica Delft.
10. Beschouwing van beide soorten experimenten en de erbij verkregen resultaten in relatie tot de bij een gemiddeld debiet van 10 l/s/m' behorende overslag karakteristieken leidt tot de volgende conclusies.
 - In het algemeen is de in de proeven aangebrachte stromingsbelasting van langere duur dan hetgeen maximaal op een binnentalud moet worden verwacht.
 - In de proeven werd een maximale snelheid van 4,5 à 6 m/s ingesteld. Deze snelheid werd aanzienlijk langer aangehouden dan de tijd waarover ze bij een binnentalud tijdens golfoverslag zal optreden.



- De hoge snelheden tussen 6 en 8,9 m/s werden in de proeven niet bereikt. Omdat deze hoge snelheden tijdens golfoverslag gesommeerd over de gehele stormduur (aangenomen op 5 uur) slechts 1,5 minuut optreden is het onwaarschijnlijk dat het totale erosiebeeld er significant door zal worden beïnvloed.
 - Bij redelijk tot goed samenhangende kleigrond geven de proefresultaten aan dat de omvang van erosiediepte gemiddeld maximaal enkele centimeters zal zijn.
 - Dit betekent dat indien de toplaag van het binnentalud uit deze redelijk tot goede grond bestaat ook bij taludhellingen steiler dan 1:2,5 een gemiddeld overslagdebiet van 10 l/s/m' toegelaten kan worden uit hoofde van het aspect erosie.
11. Voor de aan klei ten behoeve van dijkbekleding te stellen eisen wordt verwezen naar de in [9] (hoofdstuk 10.4) opgenomen zand-lutum-silt driehoek. De samenstelling van de klei in het binnentalud moet, indien een overslaghoeveelheid van meer dan 0,1 l/s/m' (~ 2% golfoploop) wordt verwacht, voldoen aan het in deze driehoek aangegeven gebied voor buitentaludbekleding.
12. Als gevolg van volledige verzadiging van de relatief doorlatende bovenlaag kan stabiliteitsverlies in het binnentalud optreden bij hellingen steiler dan 1:2,5 indien de laagdikte, waarin het stroomlijnenpatroon evenwijdig aan het talud is, groter is dan de kritieke laagdikte (zie hoofdstuk 4.2).
13. Een gemiddeld overslagdebiet van 0,1 l/s/m' kan reeds een voldoende wateraanbod leveren voor volledige waterverzadiging van de toplaag. Ook tijdens zeer extreme regenval wordt daarvoor voldoende water aangeboden. Dit betekent dat volledige verzadiging niet kan worden voorkomen door verhoging van de dijkkrui en beperking van de hoeveelheid overslag.
14. In gevallen waar niet wordt voldaan aan de taludeis 1:2,5 à 1:3 en waar de laagopbouw in het talud van dien aard is dat het genoemde potentiaalbeeld kan optreden in een bovenlaag dikker dan de kritieke laagdikte, dient rekening gehouden te worden met evenwichtsverlies en afschuiving in het binnentalud.

15. Dit mechanisme zou zich kunnen voordoen op locaties waar een parallel dijck wordt gebouwd tegen de bestaande oude dijck. Afschuiving kan hier plaatsvinden in het relatief steile binnentalud van de oude dijck dat zich evenwel geheel buiten het theoretische profiel bevindt. Het is van belang te weten of het theoretische profiel van de nieuwe dijck kan worden aangetast door de afschuiving zelf dan wel door transport van materiaal door het overtrekkend water gedurende de storm.
16. Doorsnijding van het theoretisch profiel van de parallel dijck door het primaire afschuifvlak kan met behulp van glijvlakberekeningen met de werkelijke gegevens van de laagopbouw en grondeigenschappen worden vastgesteld. Hierbij kan rekening gehouden worden met het gebruik van het binnentalud (met gras begroeid of onbegroeid). Zelfs bij ongunstige omstandigheden met betrekking tot deze toestand is het onwaarschijnlijk dat het afschuifvlak het theoretisch profiel zal snijden (zie figuur).



17. Uitgaande van een totale stormduur van 5 uur met een reductiefactor van 0,8 ten opzichte van het maximale gemiddelde overslagdebiet van 10 l/s/m' is de totale hoeveelheid overslaand water 144 m³/m'. Voor het afschatten van het maximale grondtransport is gebruik gemaakt van enerzijds de onder punt 6 vermelde overslagkarakteristieken (stroomsnelheden, laagdiktes en tijdsduur) en anderzijds zandtransport formules afgeleid voor hoge snelheden en hoge transporten in het kader van de studies voor een Pomp Accumulatie Centrale (zie hoofdstuk 4.2). Omdat de oude dijken in de meeste gevallen grotendeels uit klei of kleiachtig materiaal bestaan leidt toepassing van de zandtransportformule tot een bovengrens voor de omvang van het door de overtrekkende stroom te verplaatsen hoeveelheid grond.



18. Met een conservatieve toepassing van deze transportformule wordt een maximale, door de overslagstroom te transporteren, hoeveelheid grond van 24 m^3 per strekkend meter dijk berekend. Dit kan als een bovengrens worden beschouwd. Alleen daar waar obstakels in het dijktaalud aanwezig zijn kunnen lokaal grotere hoeveelheden worden meegenomen en is nader onderzoek vereist

19. Zelfs met dit conservatieve resultaat van 24 m^3 grond per strekkende meter dijk valt niet te verwachten dat het theoretische profiel zodanig wordt aangetast dat daardoor de waterkering in gevaar komt.



1. Inleiding

In opdracht van Rijkswaterstaat is een oriënterende studie uitgevoerd naar de mogelijke gevolgen van golfoverslag op de stabiliteit van een binnentalud van een dijk. Aandacht is besteed aan zowel de microstabiliteit van het taludoppervlak (erosie) als aan de stabiliteit tegen afschuiven.

De opzet van de studie is in een gesprek tussen ir. P.W. Roest van Rijkswaterstaat, Directie Gelderland en ir. W.J. Heijnen en ir. J. Lindenberg (beiden Grondmechanica Delft) overeengekomen. Hierbij is besloten om overslagdebieten van 0,1 l/s/m', 1 l/s/m' en 10 l/s/m' in beschouwing te nemen. De studie is erop gericht geweest een bovengrens te geven voor de mogelijke gevolgen bij deze debieten, in eerste instantie voor het ontwerp van dijken langs het Benedenrivieren gebied in het algemeen. Meer specifiek is de problematiek toegespitst op de dijkversterking door middel van een zogenaamde parallel dijk zoals bijv. in de Alblasserwaard wordt overwogen op plaatsen waar bebouwing op de dijk aanwezig is.

Het motief om de hogere overslagdebieten in beschouwing te nemen is vooral gelegen in de relatief beperkte omvang van de belasting die volgt uit een eerste globale analyse van een overslagdebiet van 10 l/s/m'. 10 l/s/m', of te wel 0,01 m³/s/m', betekent 36 m³ water per strekkende meter per uur storm. Verdeeld over de tijd komt dit debiet, bij aanname van een stroomsnelheid van 1 m/s overeen met een gemiddelde waterlaagdikte van slechts 0,01 m.

Ondanks het feit dat 10 l/sm' een gemiddelde is en er gedurende korte tijd aanzienlijk grotere laagdikten en stroomsnelheden mogelijk zijn, werd de mogelijkheid dat onaanvaarbare schade zou kunnen ontstaan, in het algemeen zeer klein geacht. Vandaar dat een diepgaander analyse nuttig werd geacht.

In hoofdstuk 2 worden de ervaringen met binnentaludbeschadigingen, opgetreden tijdens de stormnacht van 1 februari 1953 samengevat. Gesteld kan worden dat deze ervaringen na 1953 in sterke mate het ontwerp van dijken in Nederland hebben beïnvloed (waakhoogte en binnenbeloop).

In hoofdstuk 3 wordt ingegaan op de overslagkarakteristieken. Met name wordt aandacht geschonken aan de te verwachten stroomsnelheden langs het binnentalud en stroomlaagdikten als functie van het overslagdebiet. In hoofdstuk 4 worden de mogelijke schademechanismen nader beoordeeld in het licht van de bij een overslagdebiet van 10 l/s/m' behorende overslagkarakteristieken.

De samenvatting en conclusies van de studie zijn voorin het verslag opgenomen.



2. Schade aan binnentaluds tijdens de stormramp 1953

2.1 Omvang en typen beschadigingen

De ervaringen met het bezwijken van binnentaluds van dijken als gevolg van golfoverslag stammen grotendeels uit de stormnacht van 1 februari 1953. Deze ervaringen welke uitvoerig zijn beschreven in [1] beperken zich tot de indertijd in Zuid-West Nederland aanwezige dijken. De belangrijkste feiten waren:

- De totale lengte aan beschadigde binnentaluds (niet dijkdoorbraken) bedroeg ca. 140 km. Hiervan werd 88 km als licht beschadigd en 52 km als zwaar beschadigd aangemerkt.
- Bij zeer veel dijkvakken was tijdens de stormnacht sprake van slechts een beperkte waakhogte. Aan de lijzijde van de eilanden in het rampgebied was de waakhogte vaak nihil, aan de loefzijde meestal een tot twee meter. Er kon een globale correlatie worden gelegd tussen de dijkhoogte en de omvang van de dijkbeschadigingen.
- De taludhelling van de beschadigde binnentaluds varieerde tussen 1:1 en 1:2, overheersend tussen 1:1,5 en 1:1,75.
- Met betrekking tot de samenstelling en opbouw van de dijk zijn veel dijkvakken als kleidijken te classificeren.

Kwantitatieve gegevens over golfhoogten en hoeveelheden golfoverslag zijn zeer schaars en worden in [1] niet vermeld. Gebaseerd op de stormcondities tijdens de stormnacht van 1953 en de slechts beperkt aanwezige waakhogte moet de in veel dijkvakken opgetreden overslag op enkele tientallen liters gemiddeld per seconde per meter dijk lengte worden geschat.

Op een aantal plaatsen zullen gedurende de meest extreme uren evenwel nog grotere debieten over de dijken gestroomd zijn.

In hoofdstuk 3.1.4 van [1] worden de verschillende typen waargenomen beschadigingen aan het binnentalud gerangschikt.

De lichtste vorm van beschadiging is de langsscheur in de nabijheid van de binnenkruinlijn. De lengte van de scheur varieerde van één tot vele meters, de breedte van ca. 1 centimeter tot ruim 1 decimeter.



De binnenrand van de scheur lag steeds lager dan de bovenrand zodat geconcludeerd kan worden dat er sprake was van (een begin van) een verzakking. Overal werd slecht één langsscheur waargenomen.

De diepte van de scheuren was veelal aanzienlijk, in vele gevallen 1 à 2 meter. Het eerste deel verliep vrijwel verticaal, eronder werd afbuiging naar de binnenzijde vermoed. In het algemeen werd deze vorm van lichte beschadiging waargenomen in dijkdoorsneden waarin geen verdere beschadigingen werden geconstateerd. De grasmat vertoonde meestal geen aantasting.

De volgende type beschadiging is de plaatselijke afschuiving van het binnentalud met een vaak schelpvormig afschuifvlak. De nagenoeg verticale bovenbegrenzing was steeds boven het midden van het binnentalud tot soms in de kruin gelocaliseerd. De onderbegrenzing had een lichte helling tot horizontaal of bezat in enkele gevallen een tegenhelling. De plaats van de onderbegrenzing lag steeds in het binnentalud zelf, vrijwel nooit in of voor de teen van de dijk.

Vaak werd een ongebroken en ongescheurde grasmat waargenomen op de afgeschoven dijkspecie.

Behalve de twee genoemde type van beschadiging werden allerlei overgangsvormen gevonden. Deze tussenvormen ondersteunen de opvatting dat de afschuivingen in het algemeen met de langsscheur zullen zijn begonnen.

De verdergaande beschadigingstypen die in [1] zijn beschreven worden in deze notitie niet in detail vermeld omdat in het algemeen kan worden verondersteld dat grotere beschadigingen en doorbraken door beide voorgaande typen zijn ingeleid.

Een aantal aspecten hebben een rol gespeeld onder andere:

- het tijdstip waarop de afschuiving in het binnentalud heeft plaatsgevonden
- de hoeveelheid golfoverslag
- de hoedanigheid van de dijkspecie.

Afgezien van het feit dat deze 3 aspecten duidelijk aan elkaar verwant waren, is van overwegend belang dat het golfoverslagdebiet bij veel dijkvakken hoog moet zijn geweest. Ook de opgetreden stroomsnelheden in het overtrekkende water moeten zeer extreem zijn geweest.

Dit betekent dat de transportcapaciteit gedurende de meest extreme uren in de stormnacht voldoende was om, nadat de afschuiving had plaatsgevonden, de afgeschoven specie op te ruimen en de dijk van binnenuit te ondermijnen.



Tot slot worden nog de volgende beschadigingskarakteristieken uit [1] overgenomen:

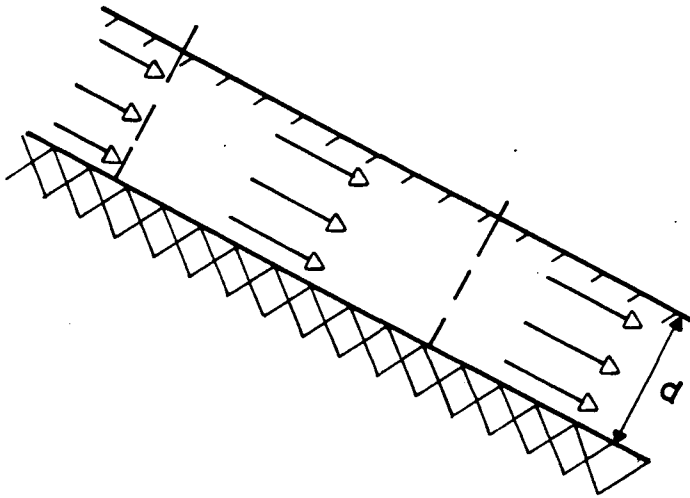
- Uit de geconstateerde beschadigingen aan de binnentaluds werd de indruk gewekt dat een goede grasmat gedurende vrij lange tijd bestand is tegen aantasting door overstromend water.
Geconcludeerd werd dat bezwijken van de dijk ingeleid door aantasting van het binnentalud als gevolg van erosie van de topklaag niet of slechts sporadisch is opgetreden.
- Obstakels in het binnentalud (bomen, palen e.d.) hebben waarschijnlijk de aantasting van de grasmat bevorderd.

2.2 Gangbare verklaring voor beschadigingen aan binnentaluds in 1953

Uit het voorgaande moge duidelijk zijn dat het verschijnsel van afschuiven van de binnentaluds als gevolg van wateroverslag en ingeleid door langscheuren in het bovenste deel van het talud als een karakteristiek en overheersend bezwijkmechanisme tijdens de stormramp van 1953 is beschouwd.

Na de stormramp is getracht een verklaring te geven voor dit type van bezwijken. De verklaring welke in [1] en [2] is beschreven luidt als volgt: Het overslaande water penetreert gedeeltelijk in het oppervlak van het binnentalud. Omdat de bovenlaag als gevolg van afwisselend uitdrogen en verzadigen, beworteling van gras en dierlijke activiteiten veelal een min of meer kruimelige structuur zal bezitten, zal deze bovenlaag doorlatender zijn dan de grond dieper in het talud.

Het gepenetreerde water zal daarom, nadat het de bovenlaag volledig heeft verzadigd, de neiging hebben af te stromen in een richting evenwijdig aan het binnenbeloop. De hiermee gepaard gaande stromingsdruk verlaagt de stabiliteit van de topklaag en kan met name bij de steile belopen van de binnentaluds, bezwijken ten gevolge hebben gehad.



Figuur 1 Grondwaterstroming in toplaag, evenwijdig aan taludhelling.

Een grensevenwichtbeschouwing levert de volgende formule (zie [1]):

$$\frac{c}{d \cdot \gamma_w \cos \alpha} = \frac{\gamma_g}{\gamma_w} \operatorname{tg} \alpha - \left(\frac{\gamma_g}{\gamma_w} - 1 \right) \operatorname{tg} \phi \quad (1)$$

ϕ = hoek van inwendige wrijving van de grond

c = cohesie

γ_g = nat volumegewicht grond

γ_w = volumegewicht water

d = dikte beschouwde toplaag met stroming evenwijdig aan binnenbeloop

α = hellingshoek binnentalud

De formule (1) geldt voor een oneindig lang talud hetgeen tot conservatieve uitkomsten leidt.

met $\phi = 30^\circ$, $\gamma_g = 17 \text{ kN/m}^3$ en $c = 2 \text{ kN/m}^3$ resulteert de dikte d als functie van de taludhelling α waarbij afschuiven kan optreden, dat wil zeggen dikten groter dan d zijn instabiel. Als voorbeeld:

bij een talud 1:2 treedt stabiliteitsverlies op indien $d \geq 0,5 \text{ m}$, bij een talud 1:3 indien $d \geq 1,3 \text{ m}$.



Nogmaals: voorwaarde voor dit bezwijken is dat de bovenlaag over de beschouwde dikte volledig is verzadigd en dat eronder een minder doorlatende laag aanwezig is. Indien sprake is van een doorlatende onderlaag bijvoorbeeld een zandkern afgedekt met een kleilaag van beperkte dikte dan zal de grondwaterstroming evenwijdig aan het talud niet optreden.

Uit de waarnemingen van de binnentalud beschadigingen is duidelijk dat afschuiven niet altijd een plotseling optredend verschijnsel is. Het wordt voorafgegaan door scheurvorming in de buurt van de binnenkruinlijn en verzakking van de binnenbegrenzing van de scheur. Het optreden van de scheurvorming is waarschijnlijk een logische voorbode voor bezwijken omdat de hiervoor beschreven neiging tot afschuiven alleen in het talud aanwezig is en niet of minder in de kruin. Het begin van scheurvorming zal dan het gevolg zijn van de neiging tot grotere deformaties in het binnentalud kort voor het volledige bezwijken.



3. Karakteristieken golfoverslag bij overslagdebieten van 0,1 l/s/m', 1 l/s/m' en 10 l/s/m'

De belangrijkste karakteristieken van golfoverslag in relatie tot het ontstaan van beschadiging aan het binnentalud zijn:

- het overslagdebiet
- de tijdsduur van overslag
- de stroomsnelheid langs het talud als functie van de tijd.

Het gemiddelde overslagdebiet kan worden uitgedrukt in de golfkarakteristieken, de helling van de (buiten) talud en de waakhoogte van de dijk zijnde het niveauverschil tussen dijkkruin en gemiddelde waterstand. In deze notitie wordt uitgegaan van de in bijlage 10 van [3] gegeven relaties, zie figuur 2. Ten opzichte van [3] is een lijn tussen de gemiddelde en maximale schatting toegevoegd. In formulevorm voor het gemiddelde overslagdebiet \bar{q} .

$$\bar{q} = \frac{0,1 \cdot \bar{H} \cdot L_o}{\bar{T} (\cot\alpha)^{1/2}} \cdot 10^{\frac{-5 z \cot\alpha}{6\sqrt{HL_o} - z \cot\alpha}} \quad (2)$$

en voor de waakhoogte z

$$z = \frac{-6 \sqrt{\bar{H} \cdot L_o} \log \left(\frac{\bar{q} \cdot \bar{T} \cdot \sqrt{\cot\alpha}}{0,1 \cdot \bar{H} \cdot L_o} \right)}{5 \cot\alpha \left\{ 1 - 1/5 \log \left(\frac{\bar{q} \cdot \bar{T} \cdot \sqrt{\cot\alpha}}{0,1 \cdot \bar{H} \cdot L_o} \right) \right\}} \quad (3)$$

z = kruinhoogte boven stil water niveau

\bar{H} = gemiddelde golfhoogte

\bar{T} = gemiddelde golfperiode

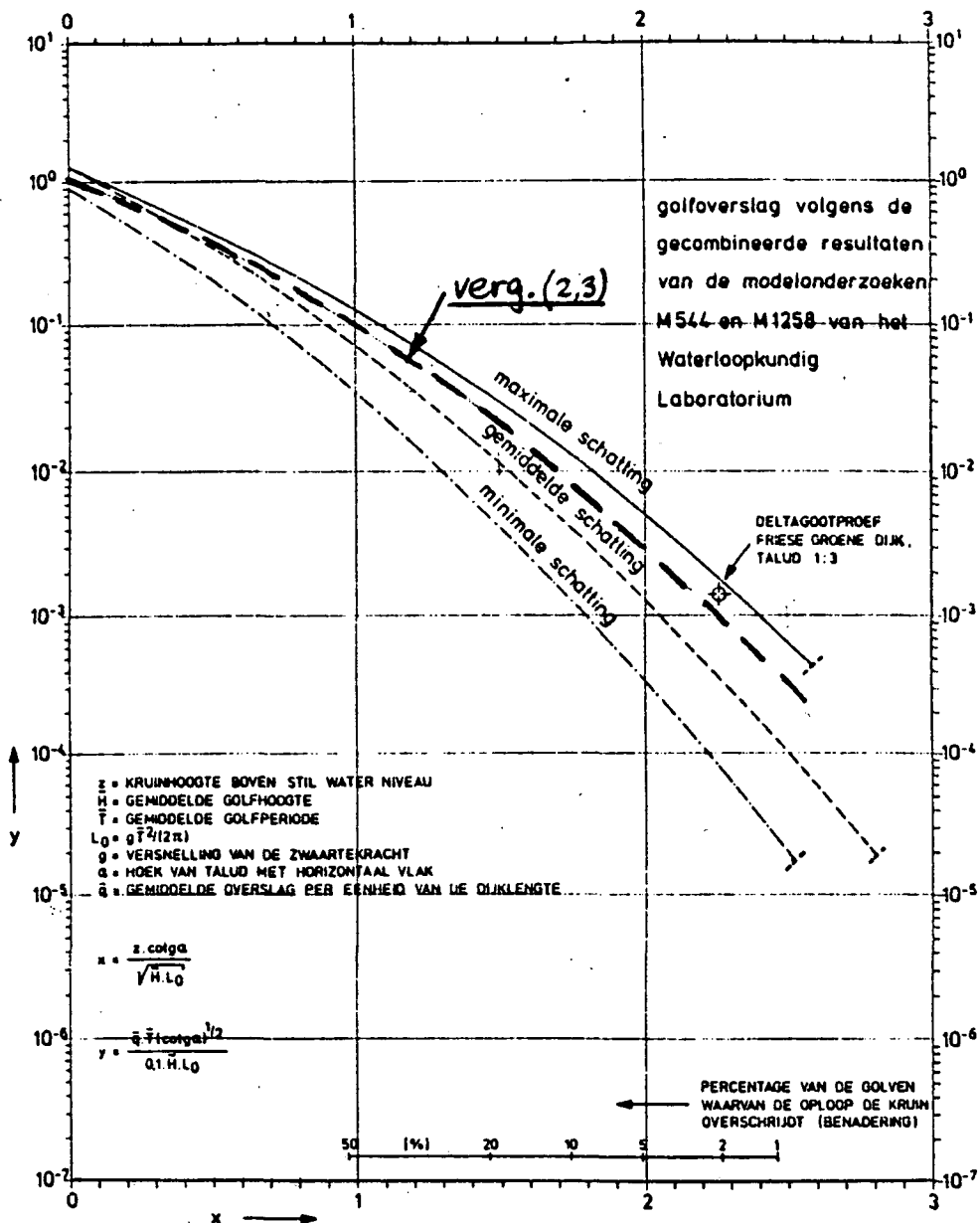
L_o = $g \bar{T}^2 / (2\pi)$

g = versnelling van de zwaartekracht

α = hoek van talud met horizontaal vlak

\bar{q} = gemiddelde overslag per eenheid van de dijk lengte

Als voorbeeld worden enkele benodigde waakhoogten gegeven om het overslagdebiet te beperken tot respectievelijk 0,1 l/s/m', 1 l/s/m' en 10 l/s/m'.



Figuur 2 Golfverslag volgens de gecombineerde resultaten van de modelonderzoek M544 en M1258 van het Waterloopkundig Laboratorium (uit [3]).



Er worden 3 combinaties van golfparameters verondersteld.

$\bar{T} = 3,0 \text{ s}$	$\bar{T} = 3,5 \text{ s}$	$\bar{T} = 4,0 \text{ s}$
$L_o = 14,3 \text{ m}$	$L_o = 20 \text{ m}$	$L_o = 25 \text{ m}$
$\bar{H} = 0,35 \text{ m}$	$\bar{H} = 0,5 \text{ m}$	$\bar{H} = 0,7 \text{ m}$
$(H_s \sim 0,6 \text{ m})$	$(H_s \sim 0,8 \text{ m})$	$(H_s \sim 1,15 \text{ m})$

De ingevoerde buitentaludhelling bedraagt 1:3 en 1:4. Deze condities worden representatief verondersteld voor locaties langs de Benedenrivieren.

Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat de golfsteilheid bij de bovengenoemde combinaties in het algemeen iets minder is dan die behorend bij de ontwerpcondities voor veel plaatsen in het Benedenrivieren gebied. Dit heeft tot gevolg dat de in de onderstaande tabel opgenomen waakhoogten, behorend bij de 3 gekozen overslagdebieten, iets hoger zullen zijn dan de vereiste waakhoogte in veel locaties bij identieke golfhoogte.

	waakhoogte z					
	$\bar{H} = 0,35 \text{ m}/\bar{T} = 3,0 \text{ s}$		$\bar{H} = 0,5 \text{ m}/\bar{T} = 3,5 \text{ s}$		$\bar{H} = 0,7 \text{ m}/\bar{T} = 4,0 \text{ s}$	
	$\cot\alpha = 3$	$\cot\alpha = 4$	$\cot\alpha = 3$	$\cot\alpha = 4$	$\cot\alpha = 3$	$\cot\alpha = 4$
$q = 0,1 \text{ l/s/m'}$	$z = 1,67 \text{ m}$ $p = 2\%$	$z = 1,24 \text{ m}$ $p = 2,4\%$	$z = 2,48 \text{ m}$ $p = 1,5\%$	$z = 1,84 \text{ m}$ $p = 1,6\%$	$z = 3,39 \text{ m}$ $p = 1,2\%$	$z = 2,51 \text{ m}$ $p = 1,4\%$
$q = 1,0 \text{ l/s/m'}$	$z = 1,27 \text{ m}$ $p = 11\%$	$z = 0,93 \text{ m}$ $p = 12\%$	$z = 1,94 \text{ m}$ $p = 7,5\%$	$z = 1,43 \text{ m}$ $p = 8\%$	$z = 2,72 \text{ m}$ $p = 5,5\%$	$z = 2,00 \text{ m}$ $p = 6\%$
$q = 10 \text{ l/s/m'}$	$z = 0,74 \text{ m}$ $p = 48\%$	$z = 0,52 \text{ m}$ $p = 52\%$	$z = 1,24 \text{ m}$ $p = 35\%$	$z = 0,89 \text{ m}$ $p = 38\%$	$z = 1,83 \text{ m}$ $p = 30\%$	$z = 1,33 \text{ m}$ $p = 32\%$

In de tabel is tevens het overslag percentage p vermeld zijnde het percentage van het aantal golven waarbij overslag optreedt. Het discontinue karakter van overslag komt sterker naar voren indien het percentage van de tijd wordt beschouwd dat er water langs het binnentalud stroomt. Overslag tijdens één golf treedt immers alleen op gedurende een periode die korter en vaak aanzienlijk korter is dan de betreffende golfperiode.



Het betekent dat golfoverslag in feite een schoksgewijs gebeuren is. Gedurende korte perioden, dat wil zeggen minder dan de halve golfperiode, stroomt er water over de kruin afgewisseld met perioden zonder wateraanvoer. Bovendien is, vanwege de onregelmatigheid van de golven, elke waterstoot weer anders. Bij zeer extreme golven is er relatief veel wateraanvoer gedurende een vrij lange periode (maximaal ruwweg de helft van de piekperiode). Deze afzonderlijke maximale overslag kan worden gekenmerkt door een relatief hoge stroomsnelheid en grote dikte van de waterlaag. Bij de meeste overige golven met overslag is sprake van een aanzienlijk lagere snelheid, laagdikte en tijdsduur.

Om inzicht te krijgen in het discontinue verloop van stroomsnelheid en laagdikte als functie van de tijd tijdens een storm wordt gebruik gemaakt van de resultaten van een door het Waterloopkundig Laboratorium uitgevoerd modelonderzoek in relatie tot golfoverslag bij de Afsluitdijk ([4]).

Het betreft schaalproeven 1:15. Rond de voor de Afsluitdijk geldende ontwerp-karakteristieken werden de gevoeligheid van overslag bij variaties in met name de golfhoogte/-periode en de waakhoogte onderzocht. De ontwerpcondities waren als volgt:

$$H_s = 2,30 \text{ m}$$

$$\bar{T} = 5,5 \text{ s}$$

$$z = 2,4 \text{ m}$$

$$\text{buitentalud } \cot\alpha = 4$$

$$\text{binnentalud } \cot\alpha = 2,5$$

In totaal zijn 18 proeven uitgevoerd waarbij behalve de gebruikelijke overslag karakteristieken ook de tijd dat er water langs het talud stroomt en de laagdikte water op diverse plaatsen langs het binnentalud gemeten.

Uit de aankomsttijden van de laagdiktes op de opeenvolgende plaatsen werd vervolgens de stroomsnelheid afgeleid.

De bij de proeven met het Jonswap golfspectrum gemeten gemiddelde hoeveelheden overslag per tijdseenheid liggen, indien geplot in figuur 2, ongeveer op de lijn volgens vergelijking (2, 3). In de proefopstelling bestond het binnentalud uit een laag afgestreeken mortel.



Er werd geen gedetailleerde aandacht besteed aan schaling van de ruwheid van een grasbeloop. Het motief was dat verondersteld werd dat een grasbeloop relatief glad is waardoor de ruwheid slechts een kleine rol zou spelen met name bij de hogere snelheden en grotere laagdiktes overstromend water.

Uit vergelijking van de uit de proeven afgeleide snelheidstoenames langs het binnentalud en de snelheidstoename die volgt uit "vrije val" (geen wrijving) blijkt dat er in de proeven waarschijnlijk wel een relevante ruwheidsinvloed is geweest. Dit heeft tot gevolg dat het van belang is om te weten of de ruwheid goed is weergegeven. Op deze vraag kan geen definitief antwoord worden gegeven.

Wel kan het volgende worden gesteld.

Indien de ruwheid in de schaalproeven voor de Afsluitdijk goed zou zijn geschaald dat wil zeggen de uit het model gevonden snelheden zijn relevant voor de Afsluitdijk, dan heeft terugschaling van de resultaten naar condities voor de Benedenrivieren volgens Froude (zie hierna) tot gevolg dat te hoge snelheden zullen resulteren.

In het kader van het Afsluitdijk onderzoek is, uitgaande van het waterstandtijd verloop tijdens de ontwerpstorm op de Waddenzee de overslagbelasting langs het binnentalud geanalyseerd in de vorm van stroomsnelheden gekoppeld aan de tijdsduur waarover deze snelheden optreden of worden overschreden ([5]).

De resulterende snelheid/tijdsduur combinaties zijn hierna weergegeven. De stroomsnelheden hebben betrekking op een niveau dat 3 m lager ligt dan de kruin.

Stroomsnelheid	tijdsduur tijdens ontwerpstorm Afsluitdijk
$v > 2 \text{ m/s}$	34 minuten
$v > 4,5 \text{ m/s}$	26 minuten
$v = 4,5 \text{ à } 6 \text{ m/s}$	13 minuten
$v = 6 \text{ à } 8 \text{ m/s}$	9 minuten
$v = 8 \text{ à } 10 \text{ m/s}$	3,5 minuten
$v = 10 \text{ à } 12 \text{ m/s}$	0,5 minuut
$v > 12 \text{ m/s}$	0,1 minuut



Het binnentalud wordt tijdens de ontwerpstorm in totaal gedurende 34 minuten onderworpen aan een overtrekkende stroom met gemiddelde snelheid groter dan 2 m/s.

Stroomsnelheden groter dan 6 m/s treden gedurende 13 minuten op en groter dan 10 m/s gedurende 0,6 minuut. Ook voor de laagdikte van de overtrekkende stroom en voor het momentane overslag debiet kunnen dergelijke verdelingen uit de proefresultaten worden afgeleid.

De voornoemde modelproefresultaten kunnen worden teruggeschaald (Froudeschaal) naar geometrisch gelijkvormige omstandigheden langs de Benedenrivieren (o.a. gelijke taludhellingen, buiten 1:4 en binnen 1:2,5). Uitgegaan wordt van de eerder genoemde golfhoogten $H_S = 0,6$ m, $H_S = 0,8$ m en $H_S = 1,15$ m. Uit deze bewerking volgt voor de onderscheiden gevallen.

$$\underline{H_S = 0,8 \text{ m}, \bar{T} = 3,5 \text{ s}, z = 0,89 \text{ m}}$$

overslagpercentage $p = 35\%$

gemiddeld overslagdebiet $q = 10 \text{ l/s/m'}$

percentage tijd dat er water langs binnentalud stroomt = $t = 12\%$

"maximale" stroomsnelheid binnentalud $v_{\max} = 7,3 \text{ m/s}$

5% waarde snelheid binnentalud $v_{5\%} = 5,1 \text{ m/s}$

5% waarde laagdikte binnentalud $d_{5\%} = 0,09 \text{ m}$

(5% waarde betekent dat de snelheid gedurende ongeveer $1,8 \times 0,05 \times 0,12 \times 3600 = 40$ sec per uur wordt overschreden).

$$\underline{H_S = 0,8 \text{ m}, \bar{T} = 3,5 \text{ s}, z = 1,43 \text{ m}}$$

$p = 8\%$

$q = 1 \text{ l/s/m'}$

$t = 2,5\%$

$v_{\max} = 7,3 \text{ m/s}$

$v_{5\%} = 5,0 \text{ m/s}$ → gedurende $1,8 \times 0,025 \times 0,05 \times 3600 = 8$ sec per uur

$d_{5\%} = 0,05 \text{ m}$



$$\underline{H_s = 1,15, \bar{T} = 4,0 \text{ s}, z = 1,33 \text{ m}}$$

$$p = 32\%$$

$$q = 10 \text{ l/s/m'}$$

$$t = 10\%$$

$$v_{\max} = 8,9 \text{ m/s}$$

$$v_{5\%} = 6,1 \text{ m/s} \quad \rightarrow \quad \text{gedurende } 1,8 \times 0,10 \times 0,05 \times 3600 = 32 \text{ sec per uur}$$

$$d_{5\%} = 0,10 \text{ m}$$

$$\underline{H_s = 1,15 \text{ m}, \bar{T} = 4,0 \text{ s}, z = 2,00 \text{ m}}$$

$$p = 6\%$$

$$q = 1 \text{ l/s/m'}$$

$$t = 2\%$$

$$v_{\max} = 8,5 \text{ m/s}$$

$$v_{5\%} = 6,0 \text{ m/s} \quad \rightarrow \quad \text{gedurende } 1,8 \times 0,02 \times 0,05 \times 3600 = 6,5 \text{ sec per uur}$$

$$d_{5\%} = 0,07 \text{ m}$$

$$\underline{H_s = 0,6 \text{ m}, \bar{T} = 3,0 \text{ s}, z = 0,52 \text{ m}}$$

$$p = 52\%$$

$$q = 10 \text{ l/s/m'}$$

$$t = 18\%$$

$$v_{\max} = 5,6 \text{ m/s}$$

$$v_{5\%} = 4,2 \text{ m/s} \quad \rightarrow \quad \text{gedurende } 1,8 \times 0,18 \times 0,05 \times 3600 = 60 \text{ sec per uur}$$

$$d_{5\%} = 0,06 \text{ m}$$

$$\underline{H_s = 0,6 \text{ m}, \bar{T} = 3,0 \text{ s}, z = 0,93 \text{ m}}$$

$$p = 12\%$$

$$q = 1 \text{ l/s/m'}$$

$$t = 3,0\%$$

$$v_{\max} = 5,6 \text{ m/s}$$

$$v_{5\%} = 4,0 \text{ m/s} \quad \rightarrow \quad \text{gedurende } 1,8 \times 0,03 \times 0,05 \times 3600 = 10 \text{ sec per uur}$$

$$d_{5\%} = 0,04 \text{ m}$$



Omdat de golfverslagproeven voor de Afsluitdijk vrij hoge overlagdebieten opleverden was het niet mogelijk om een indruk te krijgen van snelheden en laagdiktes als functie van de tijd bij een laag overlagdebiet van 0,1 l/s/m'. Vertaling van de proefresultaten naar een buitentaludhelling 1:3 is eveneens niet mogelijk. Er zijn geen bijzondere redenen te verwachten dat bij gelijke golfparameters en overlagdebiet grote verschillen zullen optreden ten opzichte van het buitentalud 1:4.

Uit de proefresultaten kan worden afgeleid dat 50% van de totale overslaghoeveelheid optreedt binnen 0,5 tot 2% van de belastingduur. Bovendien volgt ruwweg dat de tijdsduur waarbij de stroomsnelheid groter dan 2 m/s is 0,5 min per uur bedraagt bij een overslag debiet van 1 l/s/m' en maximaal 5 min per uur bij een overslagdebiet van 10 l/s/m'.

Nogmaals zij er op gewezen dat voornoemde karakteristieken van de overslag uit terugschaling van de proeven ten behoeve van de Afsluitdijk zijn verkregen. Hierbij was een inschatting van een aantal getallen nodig. Indien zou blijken dat de geschatte mate van erosie langs het binnentalud zich in een nauwe marge van veiligheid bevindt dan zal aanvullend onderzoek nodig kunnen zijn.

Tot wordt nog ingegaan op de belastingsduur voor wateroverslag.

Onderscheid kan worden gemaakt in gevallen waarbij de extreme waterstand alleen wordt bepaald door een hoge rivierafvoer en in gevallen waarbij tevens getijinvloed en stormopzet een rol speelt. Kenmerkend verschil tussen een hoge rivierafvoer en het getijeffect is dat de karakteristieke periode waarover de hoge waterstand aanhoudt bij een hoge rivierafvoer langer is, in de orde van een halve tot twee dagen ten opzichte van enkele uren bij getij.



De duur van het extreme deel in een storm bedraagt één tot enkele uren dat wil zeggen de "ontwerpgolfhoogte" treedt slechts gedurende een beperkte tijd op. Van belang is daarom te weten hoe het overslagdebiet afneemt bij dalende golfhoogte en gelijke buitenwaterstand (gelijke waakhoogte). Als voorbeeld wordt aan het hiervoor genoemde "ontwerpgeval" met $\bar{q} = 10 \text{ l/s/m'}$, $\bar{H} = 0,7 \text{ m}$, ($H_S = 1,15 \text{ m}$), $\bar{T} = 4 \text{ s}$, $z = 1,33 \text{ m}$ een aantal berekende overslagdebieten bij lagere golfhoogten toegevoegd.

$\bar{H} = 0,7 \text{ m}$	$\bar{H} = 0,65 \text{ m}$	$\bar{H} = 0,6 \text{ m}$	$\bar{H} = 0,55 \text{ m}$	$\bar{H} = 0,5 \text{ m}$
$H_S = 1,15 \text{ m}$	$H_S = 1,06 \text{ m}$	$H_S = 0,98 \text{ m}$	$H_S = 0,89 \text{ m}$	$H_S = 0,80 \text{ m}$
$\bar{T} = 4 \text{ s}$	$\bar{T} = 3,875 \text{ s}$	$\bar{T} = 3,75 \text{ s}$	$\bar{T} = 3,625 \text{ s}$	$\bar{T} = 3,5 \text{ s}$
$z = 1,33 \text{ m}$	$z = 1,33 \text{ m}$	$z = 1,33 \text{ m}$	$z = 1,33 \text{ m}$	$z = 1,33 \text{ m}$
$\bar{q} = 10 \text{ l/s/m'}$	$\bar{q} = 6,9 \text{ l/s/m'}$	$\bar{q} = 4,6 \text{ l/s/m'}$	$\bar{q} = 3,0 \text{ l/s/m'}$	$\bar{q} = 1,6 \text{ l/s/m'}$

Hierna wordt uitgegaan van de volgende belastingsduren:

2 uur met volledig extreme overslagwaarden

5 uur met 80% van het maximale overslagdebiet, bijvoorbeeld $\bar{q} = 10 \text{ l/s/m'}$ betekent na 5 uur $Q = 5 \times 3600 \times 0,8 \times 10 \times 10^{-3} = 144 \text{ m}^3$ water per m'



4. Analyse van bezwijkmechanismen

Bij de analyse van de bezwijkmechanismen van een binnentalud worden alleen verschijnselen beoordeeld die een direct gevolg zijn van golfoverslag dat wil zeggen verschijnselen die worden veroorzaakt door overtrekkend water of door water dat vanaf het binnenbeloop penetreert. Er wordt vanuit gegaan dat processen die eveneens veroorzaakt kunnen worden door de ontwerpcondities (hoge waterstand en golven) doch die vanuit het buitentalud of het voorland voor de dijk werken geen rol spelen. Voorbeeld: penetrerend water in het buitentalud in combinatie met een slechte afvoercapaciteit ter plaatse van binnenteen of -berm kan verzadiging van de dijk kern opleveren en een extra waterdruk tegen de bekleding van het binnentalud. Tesaamen met de aan overslag gerelateerde verschijnselen zou bezwijken het gevolg kunnen zijn.

Het betekent dat in een totaalontwerp zeker ook aandacht moet worden geschonken aan het mogelijke effect van gecombineerde verschijnselen.

De discussie met betrekking tot de bezwijkmechanismen is gericht op de mogelijke effecten bij overslagdebieten van 0,1 l/s/m', 1 l/s/m' en 10 l/s/m'. In het vorige hoofdstuk is aangegeven welke waakhoogten in relatie tot de golfbelastingcondities bij deze drie debieten ongeveer dienen te worden toegepast. Duidelijk zal zijn dat daaraan een deterministische procedure ten grondslag ligt dat wil zeggen eventuele variaties en onzekerheden zijn in de genoemde waakhoogten niet verdisconteerd.

4.1 Schade aan binnentalud als gevolg van overtrekkend water

Bij schade als gevolg van overtrekkend water wordt in de allereerste plaats aan erosie van de toplaag gedacht.

Grondmechanisch stabiliteitsverlies of afschuiven beneden een zekere diepte onder het oppervlak als gevolg van een door de overtrekkende stroom veroorzaakte schuifspanningsbelasting aan het oppervlak kan in de meeste gevallen worden uitgesloten. Alleen bij lichte, schrale klei en hoge stroomsnelheden van ca. 10 m/s is deze schuifspanning van belang. Het betekent dat erosie in principe als een verschijnsel moet worden opgevat dat zich in een nauwe scheidingszone tussen overtrekkend water en dijkbekleding afspeelt. Dit geldt met name voor vlakke taluds zonder belangrijke oneffenheden. Indien er sprake is van kuilen of obstakels in het oppervlak dan treden tevens meer of minder



turbulente stromingsdrukken op die gepaard gaan met veel grotere krachten dan die volgen uit de schuifspanningsbelasting. Onder andere heeft dit tot gevolg dat de intensiteit van erosie een exponentieel verloop in de tijd te zien kan geven op plaatsen waar de erosieweerstand relatief laag is.

In de beginfase zullen op deze zwakke plaatsen geleidelijk verdiepingen kunnen ontstaan als gevolg van het eroderen van gronddeeltjes en kleinere brokjes. Indien deze verdiepingen grotere vormen aannemen zullen in een latere fase ook grotere samenhangende brokken kunnen worden losgewoeld en verplaatst. Als zwakke plaatsen dienen in het algemeen die gedeelten in een talud te worden aangemerkt waar de grasmat ontbreekt of waar sprake is van een rulle weinig samenhangende grondstructuur.

De overheersende vraag is nu of het in een binnentalud met het oog op de te verwachten erosiebelasting zover zou kunnen komen dat de schade een beduidende kans op falen van de waterkering inhoudt. Kenmerkend voor de in hoofdstuk 3 vermelde erosiebelasting in relatie tot golfkarakteristieken en overslagdebiet is dat er relatief hoge stroomsnelheden gedurende slechts zeer korte tijd zullen optreden.

Dit in tegenstelling tot de omstandigheden welke in het algemeen in erosie experimenten is toegepast.

Dit betekent dat de beschikbare informatie over de mate van erosie als functie van de belasting betrekking heeft op stroomsnelheden kleiner dan de genoemde maximaal te verwachten snelheden doch bij aanzienlijk langere belastingsduur.



Hier wordt naar twee soorten erosie experimenten gerefereerd.

- Erosieproeven op monsters uit het binnentalud van de Afsluitdijk. [6]
De proeven werden uitgevoerd door het Waterloopkundig Laboratorium in een kleine stroomgoot. De maximale stroomsnelheid bij de proeven bedroeg 4,6 m/s. In totaliteit werd gedurende 2 tot 12 uur gestroomd met een snelheid groter dan 2 m/s. De maximale snelheid werd minimaal 1 uur lang gehandhaafd. De proeven werden uitgevoerd op de graszijde van de monsters als ook op de onderzijde zonder gras.

De gemiddelde aantastingsdiepte na de proeven bedroeg maximaal ca. 1,5 cm. Lokaal werd in één monster een maximale erosiediepte van 4 cm geconstateerd. In het algemeen was de gemiddelde erosiediepte niet meer dan enkele mm tot 10 mm.

- In Grondmechanica Delft zijn de afgelopen jaren een groot aantal erosieproeven op kleimonsters uitgevoerd in het centrifuge-erosieapparaat. Hierbij wordt een stilstaand cilindrisch kleimonster langs de omtrek belast door stromend water. De waterstroming wordt veroorzaakt door de celwand welke om het monster is geplaatst en voorzien is van schoepen, met een bepaald toerental te roteren [7].

Uit het gemeten moment wordt de schuifspanning welke per eenheid van oppervlak op het monster werkt, afgeleid. Hoewel de stroomsnelheid niet direct wordt gemeten, kan worden aangenomen dat de stroomsnelheid bij maximaal toerental van het apparaat tussen 5 en 8 m/s is.

In de meeste gevallen wordt tijdens het eerste uur van de proef het toerental van de celwand geleidelijk opgevoerd tot een zekere waarde (bijv. 600 toeren/minuut).

Daarna wordt dit toerental 1 uur gehandhaafd. Vervolgens weer geleidelijk verhoogd naar een volgende waarde en gedurende 1 uur constant gehouden. Het betekent dat ook bij deze erosieproef de belasting relatief lang wordt gehandhaafd.

Het resultaat van de proef wordt gepresenteerd in de vorm van het verloop het percentage gewichtafname van het monster als functie van de tijd of als functie van de toegevoerde energie (schuifspanning x monsteroppervlak x tijd).

In het centrifuge erosie apparaat worden cilindrische monsters beproefd. De beschermende invloed van een grasmat wordt dus niet meegenomen.



In het geval dat hoge toerentallen zijn toegepast en/of minder resistente monsters zijn beproefd, bedraagt het percentage gewichtsafname aan het eind van de proef regelmatig 20 tot 40%.

De wijze van presentatie suggereert daarmee een aanzienlijk erosieeffect bij klei indien onderworpen aan hoge stroomsnelheden.

In relatie tot stromend water over een binnentalud moet echter worden bedacht dat bij centrifuge erosie proeven een onevenredig hoge verhouding van belast oppervlak en monstervolume optreedt. Indien het cilindrisch monster met doorsnede 6,6 cm uitgelegd wordt verondersteld in een plat vlak dan is sprake van een representatieve dikte van het monster van 1,65 cm bij identieke grootte van aan waterstroming onderhevig oppervlak. Een gewichtsafnamen van 40% komt dan overeen met een gemiddelde erosiedikte van slechts 0,7 cm. Dit betekent dat een percentage gewicht afname tot 50% in de proef zeker nog niet verontrustend behoeft te zijn voor samenhangende afdekkingen van 0,40 m dik of dikker, indien die 50% gewichtsafname eerst bij hoge belasting en lange belastingsduur is opgetreden.

Zeer globaal betekent het voorgaande tevens dat er zeker overeenkomsten zijn in de mate van belasten als ook in het resultaat (orde van grootte van erosieomvang) bij de centrifuge-erosie proef en de hiervoor genoemde stroomgootproef.

In het algemeen kan worden gesteld dat tijdens de erosieproeven snelheden tot orde 4 à 6 m/s worden toegepast welke gedurende minimaal 1 uur worden gehandhaafd. De erosie diepte bij samenhangende grond bedraagt gemiddeld maximaal 1 tot 2 cm. Plaatselijk kunnen ook diepere putjes ontstaan.

Proeven op minder samenhangende grond (lutumgehalte < 20%, hoog percentage > 60 μ m) uitgevoerd in het centrifuge apparaat geven vaak een aanzienlijk grotere gevoeligheid voor erosie te zien hetgeen bevestigt dat de samenstelling van de toplaag van groot belang is in het erosieproces.

In hoofdstuk 3 werd de op een binnentalud te verwachten erosiebelasting beschreven. In het extreme geval is deze belasting als volgt te karakteriseren:

($H_s = 1,15$ m, gemiddeld overslagdebiet 10 l/s/m')

- $v_{max} = 8,9$ m/s
- $v_{5\%} = 6,1$ m/s gedurende 32 s per uur golfbelasting
- $v = 2$ m/s gedurende 5 min per uur.



De maximale snelheid $v_{\max} = 8,9$ m/s treedt slechts zeer kortdurend op (hoogstens enkele seconden). Indien van een stormduur van 5 uur wordt uitgegaan dan wordt de snelheid $v = 6,1$ m/s in totaal gedurende slechts 1,5 minuut overschreden. Gesommeerd treden stroomsnelheden $v \geq 2$ m/s gedurende 25 min op.

Vergelijken we deze maximale belasting met de eerder genoemde belastingen tijdens de erosie proeven dan kan de conclusie getrokken worden dat de totale belastingsenergie bij de proeven hoger is geweest dan hetgeen op een binnentalud bij een overslagdebiet van 10 l/s/m' maximaal moet worden verwacht. Een onzekerheid leveren de hoge snelheden tussen 6,1 m/s en de maximale snelheid $v_{\max} = 8,9$ m/s. Omdat deze snelheden gesommeerd over de geheel storm slechts 1,5 minuut optreden is het onwaarschijnlijk dat hierdoor het resulterende erosiebeeld sterk zal worden beïnvloedt.

Dit betekent dat de bij de proeven gevonden mate van erosie bij goed samenhange grond, zijnde gemiddeld maximaal 1 à 2 cm naar alle waarschijnlijkheid niet zal worden overschreden.

Indien de toplaag van het binnentalud uit goed samenhange klei bestaat, is er dus vanuit het oogpunt van oppervlakte erosie geen reden om overslagdebieten van 1 l/s/m' tot 10 l/s/m' te vermijden. Aandacht voor de kleisamenstelling is ten zeerste vereist omdat de omvang van erosie hiervan sterk afhankelijk is. In dit verband wordt hier volstaan met de verwijzing naar de in [9, (hoofdstuk 10.4)] opgenomen zand-lutum-silt driehoek. Bij een ontwerpdebiet van meer dan dat behorend bij 2% golfoploop (ongeveer 0,1 l/s/m') dient voor de samenstelling van de klei in het binnentalud het in deze driehoek aangegeven gebied voor buitentaludbekleding aangehouden te worden.

4.2 Schade aan binnentalud veroorzaakt door penetrerend water

Het bezwijkmechanisme van een binnentalud dat veroorzaakt wordt door penetrerend water is in hoofdstuk 2 beschreven. Als gevolg van indringing van water in het talud treedt volledige verzadiging van de bovenlaag op en stelt zich een potentiaalbeeld in deze laag in dat gepaard gaat met grondwaterstroming evenwijdig aan de taludhelling. Evenwichtsverlies en afschuiving zal kunnen optreden indien de laagdikte waarin de parallelstroming optreedt groter is dan de kritieke laagdikte. De kritieke laagdikte is een functie van de



taludhelling en de grondeigenschappen.

De relatie hiervoor is zodanig dat het optreden van bezwijken in een talud met een helling flauwer dan 1:2,5 en bestaande uit een cohesieve top laag als vrijwel niet mogelijk moet worden beschouwd.

Dit geldt met name indien de dijk opgebouwd is uit een zandlichaam afgedekt met een kleilaag van 0,8 m of minder. De grootte van het gemiddelde overslagdebiet speelt hierbij geen rol.

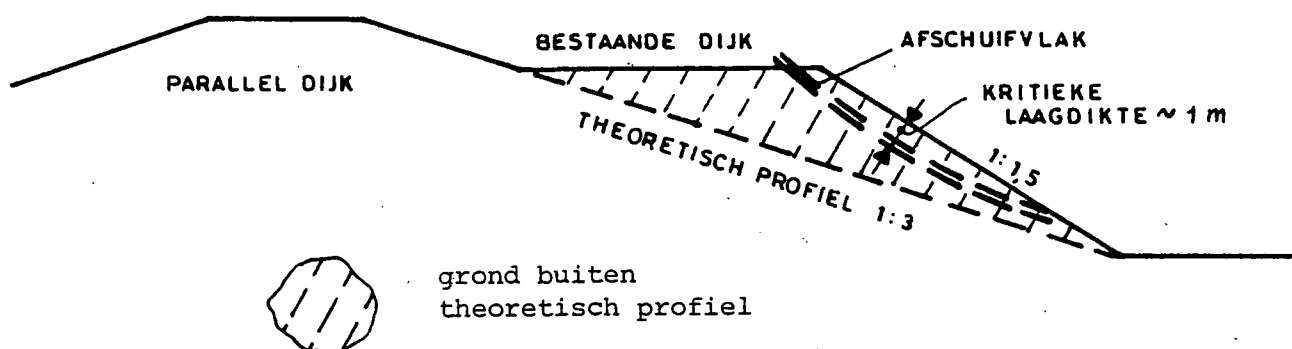
Voor het zich instellen van het potentiaalbeeld met stroomlijnen evenwijdig aan het binnenbeloop kan de grootte van het overslagdebiet wel van belang zijn. Het aanbod van water moet voldoende zijn om de bovenlaag van het talud te verzadigen. Veronderstellende dat de bovenlaag wordt begrensd door een ondoorlatende basis is voor een laagdikte van 0,8 m ruwweg een hoeveelheid water tussen 0,1 en 0,25 m³ per m² vereist. Bij een stormduur van 5 uur en een taludlengte van 10 m wordt hieraan reeds ongeveer voldaan met een gemiddeld overslagdebiet van 0,1 l/s/m'. Omdat ook zeer intensieve regenval al gepaard gaat met voldoende wateraanbod (een regenhoeveelheid tussen 100 en 250 mm per etmaal is de afgelopen 50 jaar meermalen opgetreden in Nederland) kan hier worden gesteld dat volledige verzadiging van de bovenlaag van een talud niet kan worden voorkomen door verhoging van de dijk kruin en beperking van de hoeveelheid overslag.

Afschuiven van taluds kan daarmee alleen worden voorkomen door toepassing van de eerder genoemde flauwere taluds en/of door een goede laagopbouw en samenstelling van de top laag.

De hoeveelheid golfoverslag zal alleen een rol kunnen spelen in het geval niet aan de eis voor de taludhelling kan worden voldaan. Dit zal in het algemeen kunnen plaatsvinden in locaties waar een extra hoeveelheid grond aanwezig is buiten een theoretisch dijkprofiel dat wel aan de gestelde taludeis voldoet. Als voorbeeld wordt een paralleldijk beschouwd die tegen een bestaande lagere dijk wordt gebouwd. De vraag is nu of een overslagdebiet van gemiddeld 1 tot 10 l/s/m' hier kan worden geaccepteerd.

Aantasting van het theoretisch profiel tijdens de storm zou in principe kunnen gebeuren door de afschuiving zelf dan wel na de afschuiving door transport van materiaal door het langstreckend water. Doorsnijding van het theoretisch profiel van de paralleldijk door het primaire afschuifvlak kan met behulp van

glijvlakberekeningen worden vastgesteld. Hierbij kan rekening gehouden worden met de werkelijke laagopbouw en grondeigenschappen en met het feit of het binnentalud met gras begroeid of onbegroeid is. Zelfs bij ongunstige omstandigheden met betrekking tot deze toestand is het onwaarschijnlijk dat het afschuifvlak (dat zich op een kritieke laagdikte van ongeveer 1 m onder het oppervlak bevindt) het theoretisch profiel zal snijden. De zekerheid hieromtrent kan eventueel nog worden verhoogd door de teen van de paralleldijk iets te verschuiven in de rivierrichting en daarmee niet te laten samenvallen met de teen van de oude dijk.



Veronderstellende dat afschuiving optreedt in het steile talud van de extra grondmoot buiten het theoretisch profiel, is het van belang te weten hoeveel grond er meegenomen kan worden door de totale hoeveelheid overslaand water.

Deze hoeveelheid zal hoogstens gelijk mogen zijn aan het grondsurplus zijnde ca. $25 \text{ m}^3/\text{m}^1$.

In dat geval zal het theoretische profiel van de hoofdkering niet worden aangetast. Een gemiddeld overslagdebiet van 1 l/s/m^1 en een stormduur van 5 uur levert een totale hoeveelheid overslaand water van $14,4 \text{ m}^3/\text{m}^1$, onvoldoende om $25 \text{ m}^3/\text{m}$ grond te transporteren. Bij een gemiddeld overslagdebiet van 10 l/s/m^1 stroomt in totaal 144 m^3 water per m^1 over de dijk.

Voor het schatten van de totale hoeveelheid grond die door het overslaand water kan worden getransporteerd is gebruik gemaakt van de resultaten verkregen bij een deelstudie voor een Pomp Accumulatie Centrale uitgevoerd in de TU delft [8]. Hierbij is gebruik gemaakt van de methode Bagnold om het ervaringsgebied voor opname en transport van zand bij snelheden tot 2 m/s te extrapoleren naar snelheden van 20 à 30 m/s. De vergelijking voor het zandtransport luidt:

$$s = s_b + s_s = \left[\frac{eb}{\text{tg}\phi - \text{tg}\alpha} \cos\alpha + \frac{0,01 x}{a \cos \alpha} \right] w$$

waarin:

- s = totaaltransport
- s_b = bodemtransport
- s_s = suspensietransport
- e_b = efficiency factor voor bodemtransport $e_b = 0,11$ à $0,15$
- ϕ = interne wrijvingshoek van het materiaal
- α = taludhellingshoek
- x = afstand langs het talud
- a = stroomlaagdikte
- w = verbruikte energie per eenheid van tijd en breedte
- $w = \rho_w \frac{g}{C^2} v^3$
- ρ_w = dichtheid water
- g = versnelling zwaartekracht
- C = Chézy coëfficiënt
- v = stroomsnelheid (diepte gemiddeld)

Hieruit blijkt dat de grootte van het bodemtransport voornamelijk van de hellingshoek van het talud afhangt. De term voor het suspensietransport geeft aan dat dit type transport een zekere afstand x nodig heeft om tot ontwikkeling te komen.



Voor de afschatting zijn de volgende parameters gebruikt.

- $\text{tg } \alpha = 0,5$ (1:2). Uitgaande van een beloop 1:1½ is 1:2 als het gemiddelde representatieve talud beschouwd in het proces van opruimen van de extra grondmoot
- $e_b = 0,15$
- $\text{tg } \phi = 0,7$ ($\phi = 35^\circ$)
- $x = 6$ m
- $c = 35 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$

Voor de combinatie stroomsnelheid en laagdikte zijn de volgende "gemiddelden" beoordeeld (behorend bij 30% overschrijding)

$H_s = 1,15$ m $q = 10$ l/s/m' tijd $t = 10\%$		$H_s = 0,60$ m $q = 10$ l/s/m' tijd $t = 18\%$	
"maximale" snelheid	snelheid bovanaan talud	"maximale" snelheid	snelheid bovanaan talud
$v_{30\%} = 4$ m/s $a_{30\%} = 0,08$ m $Q_{\text{zand}} = 6,1$ m³/uur	$v_{30\%} = 3$ m/s $a_{30\%} = 0,107$ m $Q_{\text{zand}} = 2,2$ m³/uur	$v_{30\%} = 3$ m/s $a_{30\%} = 0,062$ m $Q_{\text{zand}} = 5,0$ m³/uur	$v_{30\%} = 2,5$ m/s $a_{30\%} = 0,074$ m $Q_{\text{zand}} = 2,7$ m³/uur
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> totaal tijdens storm 5 uur 24 m³ zand </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> totaal tijdens storm 5 uur 9 m³ zand </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> totaal tijdens storm 5 uur 20 m³ zand </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> totaal tijdens storm 5 uur 11 m³ zand </div>

Bij de berekeningen is verondersteld dat de afschuiving al is opgetreden op het moment dat de golfoverslag begint. In werkelijkheid zal in het begin veel minder transport optreden. Bij de afschatting is er vanuit gegaan dat de grond uit zand bestaat. De oude dijken bestaan voornamelijk uit kleiige gronden die veel minder gemakkelijk te transporteren zijn. Bovendien is de stroming stationnair verondersteld. In werkelijkheid is er bij golfoverslag sprake van stootsgewijze watertoevoer met een periodeduur van 1 à 2 s.



Dit betekent dat steeds opnieuw weer grond moet worden opgenomen en versneld wat zeker gepaard gaat met energieverlies ten opzichte van het stationaire geval. In de berekening is een continue stroom verondersteld met een totale duur van 7,2 respectievelijk 13 minuten, waarbij het proces maar één keer in gang behoeft te worden gezet.

Door introductie van $x = 6$ m is de uitkomst voor het zandtransport voor één plaats langs het talud van toepassing. Stroomt het water over veel grotere afstand over erodeerbaar materiaal dan kan zich een groter transport instellen. Daarentegen treedt de genoemde "maximale" snelheid eerst op lager niveau op wat inhoudt dat het maximaal berekende transport pas zal kunnen optreden in de buurt van de teen van het binnentalud.

In het algemeen rest nog de opmerking dat hiervoor gegeven afschatting een extrapolatie van het ervaringsgebied inhoudt. Onder andere bestaat er onzekerheid over de maatgevende waarde voor de Chézy coëfficiënt voor dit type toepassingen. Het betekent dat de uit de transportformule resulterende getallen voor het totale zandtransport met de nodige voorzichtigheid moeten worden beoordeeld.

Omdat evenwel de transportformule op een conservatieve wijze is toegepast, het belastingsgeval pessimistisch is geschematiseerd en de oude dijken grotendeels of geheel uit cohesieve grond bestaan, kan de resulterende maximale hoeveelheid te transporteren grond van $24 \text{ m}^3/\text{m}^1$ dijk als een bovengrens worden opgevat.

In de analyse is de dijk als een twee-dimensionale constructie beschouwd. Er is geen aandacht besteed aan het concentratieeffect ter plaatse van obstakels in het binnentalud. Als obstakels, zoals dijkwoningen, aanwezig zijn dan dient onderzocht te worden of lokale erosie aantasting van het theoretisch profiel kan opleveren. Met name is dit vereist indien de fundering van deze woningen tot in het theoretisch profiel reikt.



REFERENTIES

1. Verslag van de stormvloed van 1953
Samengesteld door de Rijkswaterstaat en het Koninklijk Nederlands
Meteorologisch Instituut
Staatsdrukkerij- en Uitgeverijbedrijf, 's Gravenhage, 1961.
2. Rapport Deltacommissie
Staatsdrukkerij- en Uitgeverijbedrijf, 's Gravenhage, 1960
3. Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken
Deel 1 - Bovenrivierengebied
Technische Adviescommissie voor de waterkeringen
4. Golfoverslag Afsluitdijk
Verslag Modelonderzoek
Waterloopkundig Laboratorium, H24, mei 1987
5. Stabiliteitsonderzoek Afsluitdijk
Grondmechanica Delft, CO-287540/27, juni 1987
6. Golfaanval Afsluitdijk
Verslag Modelonderzoek
Waterloopkundig Laboratorium M872, 1968
7. Proefvak Euroklei te Hoek van Holland
Grondmechanica Delft, CO 260670/168, augustus 1986
8. Ontwikkeling stroomgat en debiet bij dijkdoorbraak
Deelstudie voor een Pomp Accumulatie Centrale
TU Delft, Faculteit Civiele Techniek, Vakgroep Waterbouwkunde,
Rapport nr. 8-86, november 1986
9. Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken
Deel 2 - Benedenrivierengebied (concept)
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, november 1988

Stieltjesweg 2
Postbus 69, 2600 AB Delft
Telefoon 015-693500
Telex 38234 soil nl
Telefax 015-610821

