

Geconcentreerde golfaanval

Veiligheid Oosterschelddijken

H. Verhagen

Van 1981 tot 1985 is er een onderzoek naar de veiligheid van de Oosterschelddijken verricht. De resultaten van dit onderzoek worden belicht in een reeks van artikelen, die in het vorige nummer van pt/civiele techniek werd gestart. Dit tweede artikel behandelt het deelonderzoek naar de sterkte van de glooiingen van de Oosterschelddijken onder invloed van geconcentreerde golfaanval. In dit artikel wordt naast de vaststelling van een aantal parameters, met name de vaststelling van het bezwijkmodel van een glooiing belicht.

Rijkswaterstaat
 Dienst Weg- en Waterbouwkunde Delft
 archief Asfalt in de Waterbouw

C-4 VERH 85

Het doel van het onderzoek naar geconcentreerde golfaanval spitste zich toe op twee aspecten. Het eerste aspect was het vaststellen van de belastingsparameters golfhoogte en golfsteilheid en van de sterkteparameters voor alle glooiingen langs de Oosterschelde. De parameters waterstand en stagnantieduur zijn in dit kader randvoorwaarden die bepaald worden door de te kiezen sluitingsstrategie.

Het tweede aspect was het vaststellen van het bezwijkmodel van een glooiing onder geconcentreerde golfaanval. In dit artikel zal het zwaartepunt gelegd worden op het tweede aspect.



Een typische Oosterscheldeglooiing op Noord Beveland.

In het kader van het onderzoek naar de veiligheid van de Oosterschelddijken na gereedkomen van de stormvloedkering is een deelonderzoek verricht naar de sterkte van de glooiingen van deze dijken onder invloed van geconcentreerde golfaanval. Afhankelijk van de te kiezen sluitingsstrategie voor de stormvloedkering ontstaat er op het Oosterscheldebekken een min of meer stagnant peil. Het gevolg hiervan is dat de golfaanval zich gedurende langere tijd concentreert op een smalle strook van de glooiingsconstructie. Dit verschijnsel wordt aangeduid met geconcentreerde golfaanval. De mate van deze golfaanval wordt onder andere bepaald door golfhoogte, golfsteilheid, waterstandsniveau en stagnantieduur.

De sterkteparameters voor een glooiing, belast door geconcentreerde golfaanval zijn de inklemming en het gewicht van de glooiingselementen, de doorlatendheid van de constructie en onderliggende funderingslagen en de taludhelling.

Aanpak

Om enig inzicht te krijgen in dit fenomeen zijn in eerste instantie een literatuurstudie en een onderzoek naar historische schadegevallen uitgevoerd. De grondgedachte hierbij was dat de geconditioneerde toestand die op het Oosterscheldebekken ontstaat na sluiting van de kering vergeleken kan worden met een dergelijke, permanent bestaande, situatie op het IJsselmeer, het Grevelingenmeer, of eventueel de Oostzee. De ontwerpregels en ervaringen uit deze gebieden zouden dan ook bruikbaar zijn voor de Oosterscheldeglooiingen.

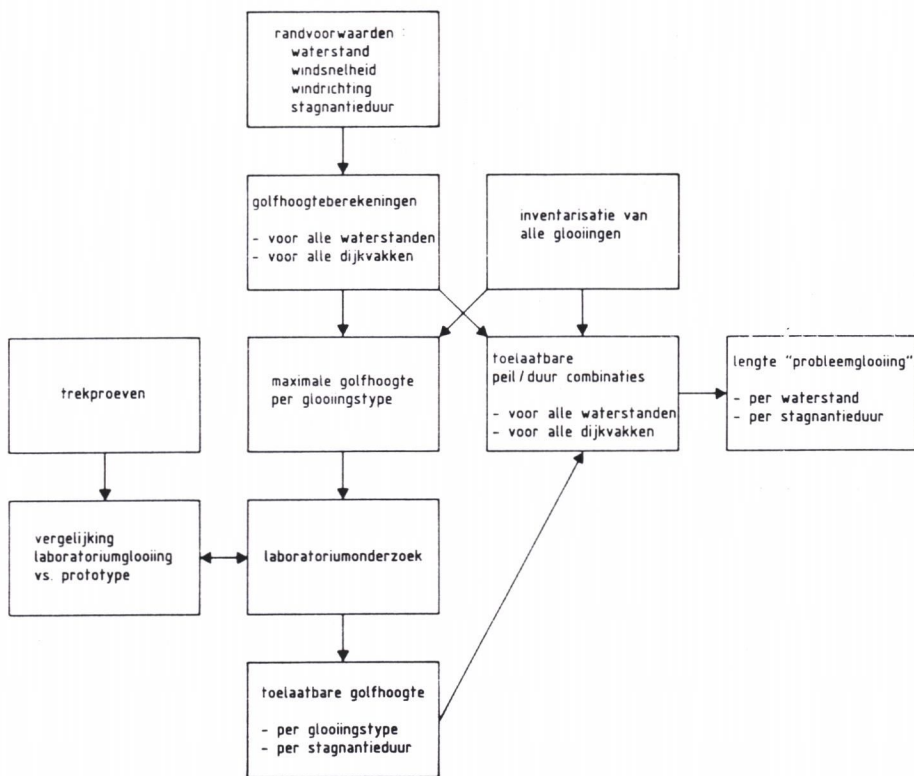
Gebleken is echter dat in genoemde gebieden de geometrie van de dijken (met name de hoogteligging van kreukelberm, maar ook de ligging van het voorland en het talud van de dijk), de gebruikte materialen en/of de belasting zo sterk afwaken van de situatie op de Oosterschelde bij gesloten kering, dat uit deze vergelijking geen conclusies konden worden getrokken. Ook bleken de gebruikte ontwerpregels voor genoemde gebieden zeer empirisch te zijn, zodat transformatie naar de situatie langs de Oosterschelde onverantwoord was.

De inventarisatie, van gedurende de afgelopen 20 jaar opgetreden schade aan de dijken langs de Oosterschelde heeft nauwelijks meer inzicht gegeven. Dit komt hoofdzakelijk omdat de aard en de oorzaak van de opgetreden schade in de meeste gevallen niet voldoende gedocumenteerd was. Bovendien was deze schade altijd ontstaan door relatief kort durende golfaanvallen van maximaal 5 uur. Op grond van deze ervaringscijfers kon geconcludeerd worden dat sluitingen van de kering gedurende 4 à 5 uur toegestaan konden worden, maar dat ten aanzien van langer durende sluitingen geen uitspraak gedaan kon worden met betrekking tot de stabiliteit van de glooiing.

Voor operationeel gebruik van de stormvloedkering was deze 4 à 5 uurgrens volledig onbruikbaar; getracht moest dus worden om ook een uitspraak te doen over stagnantieduren tussen de 5 en 30 uur.

In het recente verleden is ten behoeve van het samenstellen van de Leidraad Cementbetonnen Dijkbekledingen veel laboratoriumonderzoek verricht naar kortdurende belastingen op niet-geklemd zettingen van betonblokken. Dit onderzoek heeft echter geen gegevens opgeleverd over de parameters die relevant zijn voor de beoordeling van de sterkte van glooiingen die bestaan uit geklemd zettingen onder geconcentreerde golfaanval gedurende een lange periode. Daar uit de resultaten

De auteur ir. H.J. Verhagen is hoofd onderafdeling Kust en Oevers van de Dienst Getijdewateren van de Rijkswaterstaat.



1. Stroomschema voor de bepaling van de toelaatbare peil/duurcombinaties.

van de bureaustudies niet voldoende informatie kon worden verkregen over het effect van geconcentreerde golfaanval werd een laboratoriumonderzoek uitgevoerd. Ten behoeve van dit laboratoriumonderzoek werden op bestaande glooiingen langs de Oosterschelde trekproeven uitgevoerd. Voorts werden de diverse typen glooiingen langs de Oosterschelde geïnventariseerd en werd ter plaatse van elk type glooiing de maximale toekomstige golfhoogte berekend. Uiteindelijk zijn, met behulp van de resultaten van het laboratoriumonderzoek, de golfhoogteberekeningen en de inventarisatie, voor de diverse dijkvakken de toelaatbare peil/duur-combinaties bepaald uit het oogpunt van geconcentreerde golfaanval, figuur 1.

Laboratoriumonderzoek

In de deltagoot van het Waterloopkundig Laboratorium in De Voorst is een viertal veel voorkomende glooiingen op ware grootte nagebouwd, te weten glooiingen van basalt 25...35 cm, haringmanblokken 20 cm en twee soorten vilvoordse steen. De haringmanblokken waren gefundeerd op 80 cm mijnsteen, de natuursteenglooiingen op klei, een dubbele vlijlaag en kloppuin. De natuursteenglooiingen zijn op klassieke wijze opgebouwd en zijn vergelijkbaar met goed onderhouden glooiingen langs de Oosterschelde. De haringmanglooiing is machinaal gezet. Door middel van trekproeven is geverifieerd of model- en natuurglooiingen inderdaad vergelijkbaar zijn. Op deze trekproeven zal nog nader ingegaan worden. Uit alle typen glooiingen die langs de Oosterschelde voorkomen zijn bovengenoemde typen geselecteerd, omdat vermoed werd dat deze glooiingen misschien wel zouden kunnen bezwijken bij langdurige geconcentreerde golfaanval. Er zijn dus geen proeven gedaan op glooiingen waarvan verwacht werd dat ze heel zouden blijven (zoals ingegoten basalt) of waarvan verwacht werd dat ze zouden bezwijken (zoals muralglooiingen). Deze laatste glooiingen zullen in ieder geval aangepast moeten worden.

Na inbouw van de glooiingen werden deze eerst blootgesteld aan een lichte golfaanval, waarbij wat scherp

materiaal over de glooiing gestrooid werd. Hierdoor werd een glooiing verkregen die qua sterkte goed overeenkomt met glooiingen in de natuur. Op deze glooiingen zijn twee series proeven uitgevoerd. Eerst is een serie proeven van een half uur uitgevoerd met drukopnemers in en op de glooiing en vervolgens is overgegaan op de lange-duur-proef. De lange-duur-proeven zijn 30 uur voortgezet, tenzij eerder schade ontstond. De gebruikte golfhoogte bij de lange-duur-proeven was in principe de maximale golfhoogte die in het Oosterscheldebekken op de desbetreffende steensoort voorkomt (Basalt 1,87 m, haringman 1,50 m en vilvoordse 1,27 m). Bij de vilvoordse steen bleek 1,27 niet haalbaar, omdat de glooiing al bij veel lagere golfhoogten bezweek.

Vilvoordse steen

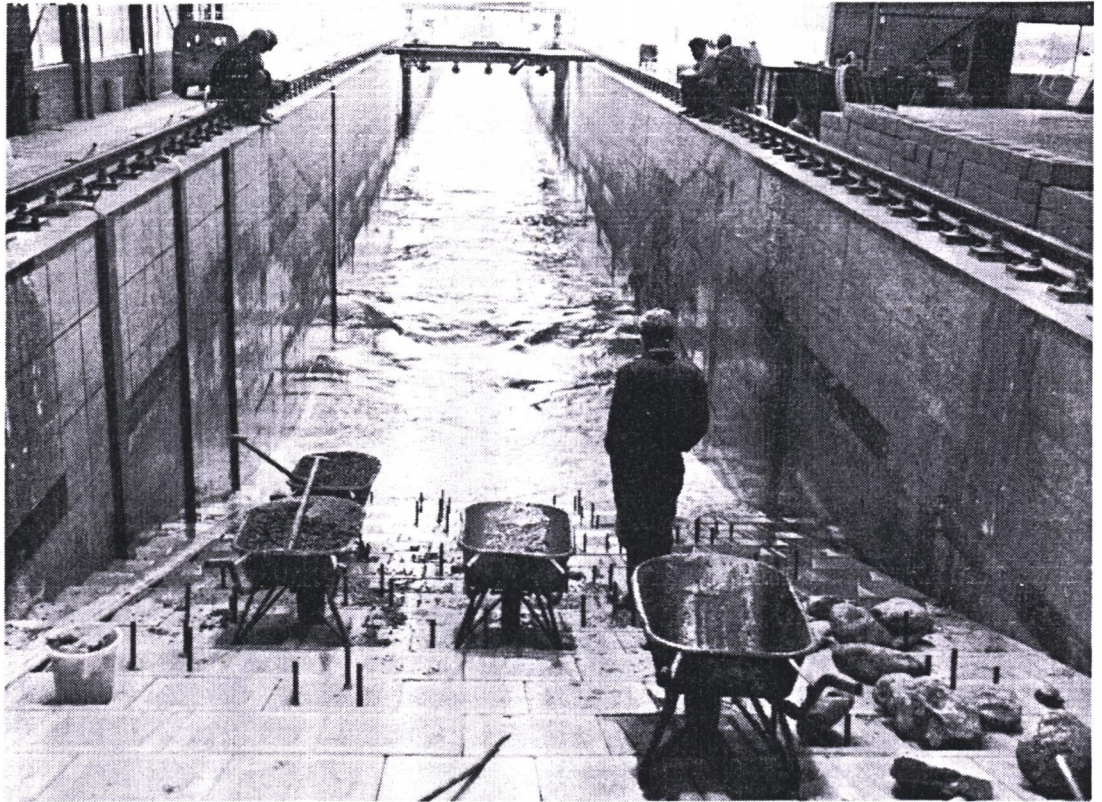
Er zijn twee soorten vilvoordse steen beproefd. De eerste glooiing bestond uit vrij ronde stenen, terwijl de tweede serie wat platter was. De stabiliteit van de vilvoordse steen met de rondere vorm bleek gering te zijn, schade trad reeds op bij golven van 50 cm en minder. De trekproeven lieten echter zien dat deze glooiing toch een redelijke treksterkte had. Ook de drukken onder de steen waren niet zodanig dat dit tot bezwijken zou moeten leiden. Een verklaring voor het optreden van schade is vermoedelijk te vinden in de ronde vorm. Tijdens de proeven gingen bepaalde stenen steeds meer boven het vlak van het talud uitsteken. Hierdoor neemt de belasting op deze steen door golfklappen en overstortend en teruglopend water toe. Dergelijke ronde stenen hebben maar weinig contactoppervlak met de omringende stenen. De golfklappen kunnen de steen wat in trilling brengen, en zodoende iets oplichten. De ruimte onder de steen wordt onmiddellijk opgevuld met materiaal uit de kloppuinlaag. Dit proces versterkt zichzelf; hoe verder de steen uit het talud steekt, hoe groter de krachten worden. Natuursteenglooiingen worden vaak onderhouden door 'stoppen'. Door de golfwerking kan enige ruimte tussen de afzonderlijke stenen ontstaan. De stenen komen hierdoor los te staan. Bij het stoppen worden stukken steen in deze ruimte geslagen. De klemwerking neemt hierdoor toe en over het algemeen neemt hierdoor de sterkte van de glooiing toe. De invloed van zo'n stopstuk strekt zich echter uit over meerdere stenen in de omgeving. Op de meeste plaatsen neemt hierdoor de klemkracht toe, maar op sommige plaatsen kan de klemkracht ook kleiner worden. Vooral glooiingen met bolle vilvoordse stenen zijn, door het beperkt aantal contactpunten met naburige stenen, gevoelig voor kleine veranderingen in de ordening van de zetting. Hierdoor kan zo'n steen minder geklemd worden of zelfs los komen te liggen. Het slaan van stopstukken hoeft dus geen versterking van de glooiing te betekenen, het kan ook een verzwakking veroorzaken.

Dit verklaart ook enigszins dat de relatief platte vilvoordse glooiing een aanmerkelijk grotere sterkte bleek te hebben. Het aantal contactpunten bij platte stenen is groter en dus is de glooiing meer samenhangend.

Bij afbraak van het model en ook bij de analyse van de resultaten van een destructieproef bleek dat met name de vlijlagen een flinke reststerkte hadden. Bij deze proef werd een deel van de toplaag verwijderd en werd doorgegolfd tot er aanzienlijke schade in het kleipakket optrad. Wel moet vermeld worden dat de stenen hiervoor onder vrij ideale omstandigheden in de klei gevlijd waren, namelijk vlak, met een verdicht kleitalud en een goed vochtgehalte. Langs de gootwand werd duidelijk erosie geconstateerd. Hiervoor kunnen de volgende oorzaken gegeven worden:

- De vlijlagen worden beëindigd tegen de gootwand; er is daar dus een doorgaande spleet aanwezig.
- De aanhechting tussen klei en de gootwand is niet

Bouw van de haringmanglooiing in de deltagoot van het Waterloopkundig Laboratorium.



optimaal. In feite is dit een zwakke plek in de water-ondoorlatende kleilaag.

– De golfbelasting direct langs de gootwand is anders. De genoemde verschijnselen komen ook in de natuur bij dijken voor. Dit is bijvoorbeeld het geval bij de overgangen tussen twee dijktafels (overgang van de ene steensoort op de andere) of bij overgangen naar constructies (bijvoorbeeld vleugelwanden van uitwateringssluizen).

De resultaten van de 'lange-duur-proeven' waren:

– voor de mindere kwaliteit vilvoordse steen

$H_s = 1,05$ m schade na 1 uur

$H_s = 0,77$ m schade na 2 à 3 uur,

– voor de betere kwaliteit vilvoordse steen

$H_s = 0,65$ m geen schade na 30 uur; vervolgens

$H_s = 0,77$ m geen schade na 20 uur; vervolgens

$H_s = 1,05$ m schade na 5 uur

$H_s = 1,05$ m schade na 10 uur

Op de interpretatie van bovengenoemde getallen zal nog nader worden ingegaan.

Haringmanblokken

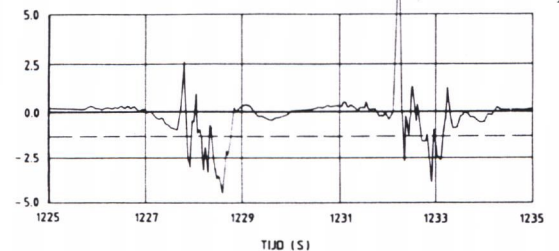
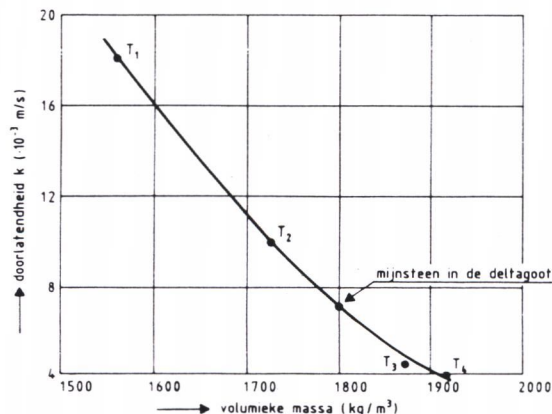
Bij de haringmanglooiingen op mijnsteen is, naast een

bestudering van het schadepatroon ook nogal wat aandacht besteed aan het gedrag van de mijnsteen. De dichtheid en de doorlatendheid van de mijnsteen zijn vastgelegd, alsmede de drukken en verhangen in het pakket mijnsteen. Het bleek dat de volumieke massa van de mijnsteen niet veranderde door de golfbelasting: 1805 kg/m^3 voor en 1803 kg/m^3 na de proeven. Voor de bepaling van de doorlatendheid zijn in een filterbak een aantal proeven gedaan bij verschillende verdichtingsgraden. Uit deze proeven kan een verband worden afgeleid tussen de volumieke massa en de doorlatendheid, figuur 2. Daar de volumieke massa van de mijnsteen in de goot bekend is, kan met behulp van deze figuur ook de doorlatendheid vastgesteld worden.

In figuur 3 is een deel van de druk- en verhangregistraties van de proef met golfhoogte $H_s = 1,50$ m weergegeven. De verhangen in de mijnsteen zijn een orde kleiner dan die over de blokken zelf. Met een stippellijn is het kritieke verhang over de blokken aangegeven. Dit is het verhang waarbij waterdruk en blokgewicht met elkaar in evenwicht zijn. Het is dus het begin van potentiële instabiliteit (van een niet-ingekeemd blok). Het blijkt dat het

2. Het verband tussen de doorlatendheid van de mijnsteen bij een haringmanglooiing en de volumieke massa als graad voor de verdichting.

3. Een deel van de verhangregistratie van een proef met mijnsteen. De stippellijn is het kritieke verhang over de blokken.



Vilvoordse steen langs de koudepolder.



Bouw van de basaltglooiing in de deltagoot.

kritieke verhang op een bepaalde plaats regelmatig voor enkele tienden van seconden overschreden wordt. De interne verhangen in de mijnsteen zijn klein, circa 0,1...0,2 onder maximale golfbelasting. Door deze kleine verhangen kan de mijnsteen intern stabiel blijven. Bij afbraak van het model zijn dan ook geen interne materiaalverplaatsingen geconstateerd. Ook is er geen zand vanuit de kern in het mijnsteenpakket binnengedrongen. Het resultaat van de lange-duur proeven was dat er bij een golfaanval van $H_s = 1,50$ m na 17 uur schade is opgetreden. De proef met een H_s van 1,35 m is na 29 uur gestopt zonder dat er schade was opgetreden.

Basalt

De basalt-proeven zijn uitgevoerd op blokken basalt 25/35, klassiek gezet op een dubbele vlijlaag en kloppuin. Het zetwerk is met veel zorg uitgevoerd om zoveel mogelijk een 'klassiek' stuk zetwerk te reproduceren. Ook deze glooiing is door middel van trekproeven vergeleken met prototype-glooiingen. De treksterkte, gemeten in de goot kwam goed overeen met de treksterkte van bestaande glooiingen en was aanmerkelijk beter dan een in prototype herzette glooiing waarop nog geen golfaanval was geweest.

De eerste lange-duur-proef is gedaan met $H_s = 1,87$ m (maximale golfhoogte in de goot bij gebruik van het Oosterschelde golfspectrum). Na 8 uur bleek er één blok losgeslagen te zijn. Er was toen nog geen verdere schade waarneembaar. Dit blok is toen, zonder extra stopwerk, teruggezet in het ontstane gat. Na 15 uur bleken er wel vervormingen te zijn opgetreden, maar er was nog geen schade-indicatie. Na 19,5 uur ontstond schade, er sloegen toen twee stenen uit het talud. Deze schade breidde zich daarna zeer snel uit. In een kwartier sloegen er nog tien stenen weg, en lagen er circa zeven los. De vlijlagen onder de basalt zijn bij deze schade

echter volledig intact gebleven.

Bij een golfbelasting met $H_s = 1,60$ m trad na 29 uur schade op. Uit het feit dat de schade zich soms wel, en soms niet snel uitbreidt moet geconcludeerd worden dat er in een beschadigde basaltglooiing een gewelfwerking kan optreden, die schade-uitbreiding tegengaat, maar dat hier niet te allen tijde op gerekend kan worden.

De rest-veiligheid (= tijd tussen bezwijken glooiing en onderlopen achterland) van een dijk met eenmaal beschadigde basaltglooiing, wordt ontleend aan de vlijlagen en de onderliggende kleilagen. Het aandeel van de vlijlagen in deze rest-veiligheid is groter dan bij een vilvoordse steenglooiing op dezelfde onderlagen, omdat bij een basaltglooiing:

- de schade aan de top laag zich aanmerkelijk minder snel uitbreidt dan bij vilvoordse steen;

- een deel van de basaltblokken door hun grote soortelijke massa (circa 3000 kg/m^3) in het gat in de glooiing blijft liggen en zo de belasting op de vlijlagen reduceert. Naast de bovengenoemde proeven op glooiingen is ook enig onderzoek gedaan naar de sterkte van een vlijlaag en naar de erosie van een kaal kleitalud. Op de vlijlaag is gegolfd met een $H_s = 0,77$ m. Na circa 1,5 uur was er een groot gat in de vlijlaag geslagen. Het gat 'verplaatste' zich naar boven tot aan een perkoenrij. In totaal ontstond er een gat van circa 1,75 m lang over de hele breedte van de goot. Daarna is nog 7 uur doorgegolfd op dit kale kleitalud.

Er was toen circa 2 cm erosie. Vervolgens is er 8 uur een golf van 1,05 m op losgelaten. Deze golf gaf op de vette kleilaag (36% kleiner dan 2 mu) 5 à 6 cm erosie en op de schrale kleilaag (20% kleiner dan 2 mu) circa 20 cm erosie. Op dat moment was de erosiesnelheid aanzienlijk. De schrale klei is vergelijkbaar met de klei zoals deze veelal onder de glooiingen van de Oosterschelde wordt aangetroffen.



Trekproeven bij de Klaas van Steelandpolder.



Trekproeven

Ter vergelijking van de in het laboratorium nagebouwde glooiingen met representatieve glooiingen (prototype) langs de Oosterschelde, alsmede om inzicht te verkrijgen in de statica van geklemde glooiingen, is een aantal elementen uit bestaande glooiingen getrokken, waarbij de daarvoor benodigde trekkrachten zijn geregistreerd, tabel 1. Het trekapparaat was afgestempeld tegen de omliggende stenen, zodat de zuivere trekkracht gemeten kon worden, zonder dat er sprake was van gewelfvorming.

Uit de trekproeven kan worden geconcludeerd dat de benodigde trekkracht een goede maat is voor het onder-

ling vergelijken van de toplaag van glooiingsconstructies. De bezwijksterkte van een glooiing kan echter niet alleen op grond van de benodigde trekkracht worden bepaald, daar hierbij ook de kwaliteit van de funderingslaag een zeer belangrijke rol speelt.

Het was opvallend dat de kracht die nodig was om één enkele steen uit de glooiing te trekken, zeer groot was. In sommige gevallen bleek de benodigde kracht vele tientallen malen het eigen gewicht van het element te bedragen. Door deze proeven kon aangetoond worden dat er bij geklemde glooiingen geen verband bestaat tussen het eigen gewicht van het glooiingselement en de kracht die nodig is om het uit de glooiing te trekken. Geconcludeerd moet dus worden dat de klemkracht een substantieel onderdeel is van de glooiingssterkte. Het dimensioneren van glooiingen uitsluitend op het eigen gewicht van de elementen geeft vermoedelijk een zeer zwaar overgedimensioneerde glooiing.

Tabel 1. Enkele resultaten van de trekproeven

	gemiddelde trekkracht (kgf)	standaard- afwijking (kgf)	aantal stenen
Haringman 20 cm			
prototype	3764	2194	30
model	3534	1983	18
Basalt 25/35			
prototype	1763	1282	30
model	1766	1207	10
Vilvoordse			
prototype I	483	197	30
prototype II	1040	476	30
model A	942	426	6
model B	294	94	8

Golfhoogteberekeningen

Met behulp van een rekenmodel zijn de toekomstige golfhoogten langs alle dijkvakken berekend voor een viertal stagnante peilen. Er is rekening gehouden met de scheefstand van het bekken. Uitgegaan is van een windsnelheid van circa 30 m/s en van de voor elk dijkvak meest ongunstige windrichting die in de situatie met gesloten kering kan optreden.

De berekeningen zijn grotendeels uitgevoerd met een diepte-afhankelijk golfgroei-model volgens Bretschneider, gekoppeld aan een refractie/brekings model voor de over vanaf de NAP - 5 m lijn.

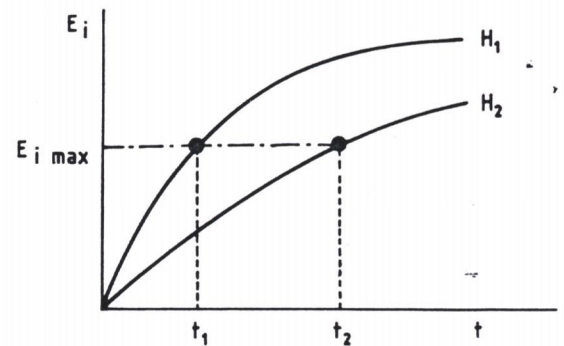
Voor het kustvak bij Wemeldinge is gebruikgemaakt van een twee-dimensionaal model, waarin zowel golfgroei, refractie als dissipatie langs golfstralen wordt uitgerekend. De berekeningen zijn gecalibreerd aan de hand van veekmerkwaarnemingen lang de dijken. Uit de bere-

4. De gebufferde energie E_i als functie van de tijd en voor de golfhoogtes H_1 en H_2 .

keningen zijn voor de diverse typen glooiingen de volgende maximale golfhoogten afgeleid:

basalt 25/35	1,85 m
haringman 20	1,50 m
vilvoordse steen	1,27 m

De 1,85 m golf komt overigens alleen voor nabij Zierikzee. De op ieder dijkvak, voor iedere waterstand berekende golfhoogtes zijn naderhand ook gebruikt bij de vaststelling van de toelaatbare peil/duur combinaties per dijkvak, figuur 1.



Probabilistisch bezwijkmodel

Uit het laboratorium-onderzoek en uit de glooiings-inventarisatie volgt een 'gemiddelde' sterkte van de glooiing. Een glooiing die tot deze 'gemiddelde' sterkte belast wordt, heeft een theoretische bezwijkkans van 50%. In de praktijk moet de toelaatbare belasting dus kleiner zijn. Veelal wordt in zo'n geval een 'karakteristieke' sterkte gebruikt; dat wil zeggen een sterkte die slechts in 5% van de gevallen overschreden wordt. (Bij betonberekeningen gebeurt dit op deze wijze). Bij glooiingsconstructies is de karakteristieke sterkte wat moeilijker te bepalen, omdat de sterkte een functie is van een aantal parameters. Bovendien is de glooiingssterkte slechts één component in de keten van bezwijken die uiteindelijk leidt tot onderlopen van delen van Zeeland.

Het is daarom gewenst om te beschikken over een rekenmethode waarmee de faalkans van een glooiing berekend kan worden als functie van een aantal parameters, die elk hun eigen kansverdeling hebben. In het artikel over het beheer van de stormvloedkering zal nader ingegaan worden op het gebruik van deze voorwaardelijke faalkansen.

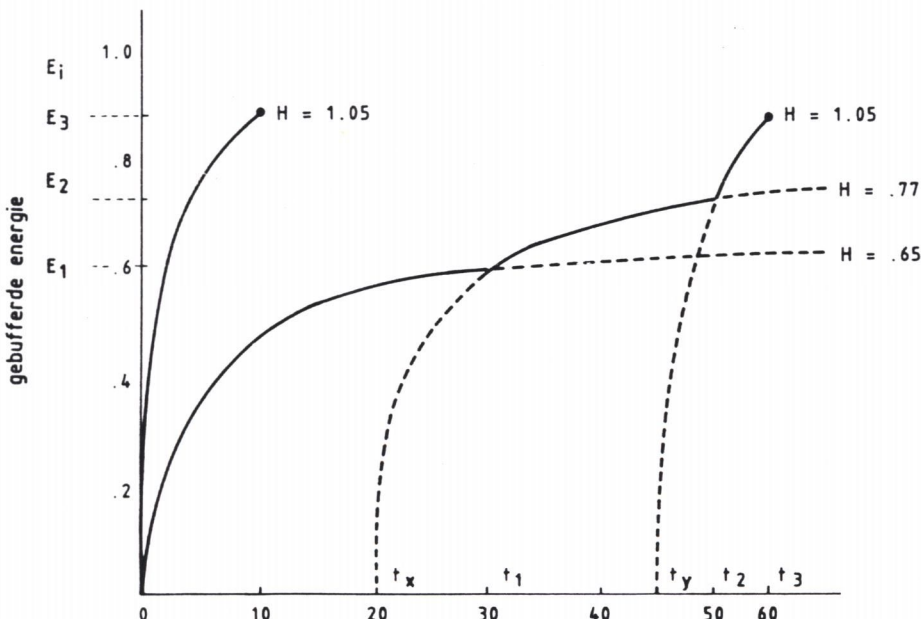
Een methode om deze faalkansen te bepalen is het toepassen van een probabilistische rekenmethode. In dit geval is gebruikgemaakt van de 'verfijnde eerste orde, tweede moment' methode (Vrouwenvelder & Vrijling, 1982). Op de wiskundige achtergrond zal hier niet ingegaan worden. Het komt er globaal op neer dat de kans op bezwijken van de glooiing berekend wordt bij een bepaalde belasting/sterkte combinatie en een gegeven standaardafwijking in de parameters die belasting c.q. sterkte bepalen.

In dit deel van het onderzoek is de belasting beschouwd als een variabele zonder standaardafwijking, omdat het doel is een conditionele faalkans te bepalen. In dit ver-

band wordt onder conditionele faalkans verstaan de kans dat een dijk bezwijkt door het betreffende bezwijkmechanisme bij een gegeven stagnante waterstand en stagnantieduur (peil-duur combinatie). Om de werkelijke kans op bezwijken van de desbetreffende dijk te bepalen, dient de conditionele faalkans vermenigvuldigd te worden met de kans dat deze peil-duur combinatie optreedt.

Het probleem is dus om met behulp van de resultaten van het laboratorium-onderzoek en uit de inventarisatie van dijkvlooiingen een conditionele faalkans voor ieder dijkvak te geven. Eerst zal ingegaan worden op het model van het bezwijkgedrag, waarna dit zal worden toegepast op de dijken langs de Oosterschelde. In de studie zijn twee benaderingen uitgewerkt om tot een rekenmodel te komen. De eerste benadering gaat uit van een glooiing met een bepaalde initiële sterkte en neemt aan dat door de golfaanval de glooiing steeds zwakker wordt tot op een gegeven moment de glooiing zo zwak is dat hij geen weerstand meer heeft. De tweede benadering gaat er vanuit dat een glooiing een bepaald incasseringsvermogen heeft. Zodra een glooiing meer te verwerken heeft gehad dan zijn incasseringsvermogen, zal bezwijken optreden. Kwantitatief geven beide methoden hetzelfde resultaat. Omdat de tweede benadering eenvoudiger aansluit bij de probabilistische rekenmethode is deze methode verder gebruikt.

5. Schadepunten bij vilvoordse steen.



Bij de methode met gegeven incasseringsvermogen wordt uitgegaan van de energiestroom door de golven naar het dijktaalud. Het talud moet deze energie dissiperen. De energie hoeft niet direct gedissipeerd te worden; er wordt een zekere buffer verondersteld. De glooiing zal bezwijken als de hoeveelheid gebufferde energie te groot is. Aangenomen wordt dat het dissiperend vermogen een kwadratische functie is van de gebufferde energie. De toename van de geïncasseerde energie in een gegeven tijdsinterval t wordt gegeven door $aH^2 \cdot t$. De hoeveelheid gedissipeerde energie $bE_i^2 \cdot t$. In deze formules is H de golfhoogte en E_i de hoeveelheid gebufferde energie.

De coëfficiënten a en b moeten nog nader bepaald worden. De toename van de hoeveelheid gebufferde energie per tijdstip wordt dus gegeven door de balansvergelijking:

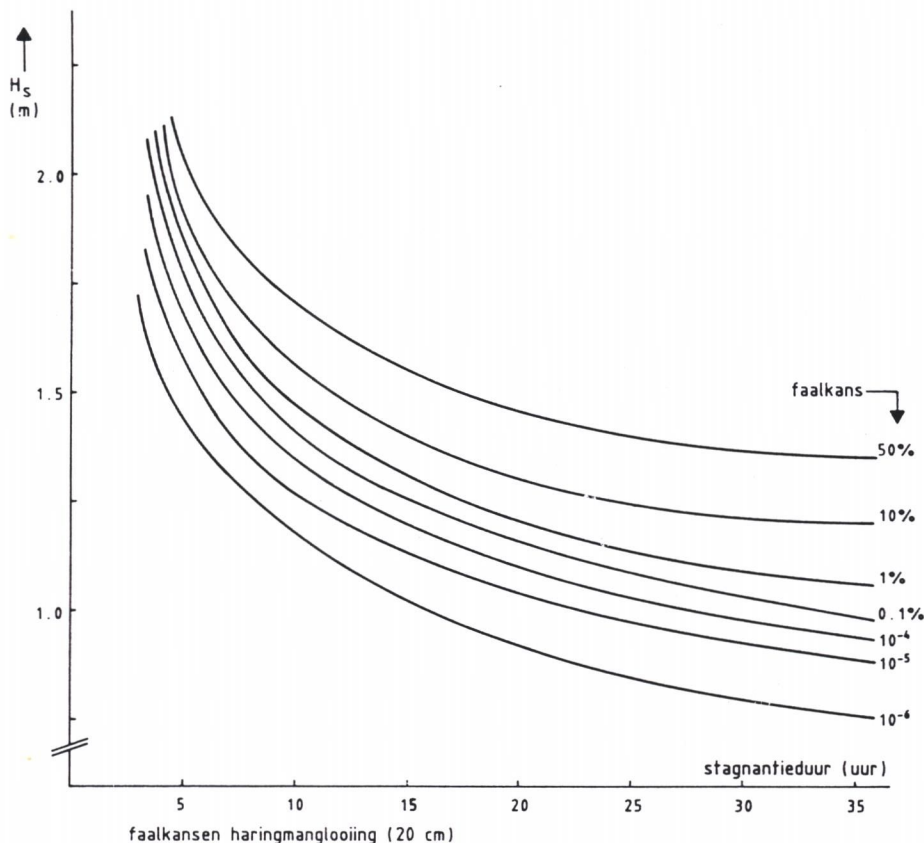
$$\Delta E_i = (aH^2 - bE_i^2) \Delta t$$

De totale gebufferde energie wordt dus op ieder moment bepaald door alle stukjes ΔE_i op te tellen:

$$E_i = \Sigma \Delta E_i$$

Tabel 2 Berekende schadepunten voor basalt

	H_1	T_1	H_2	T_2	b	$E_{i,max}$
proef 1	1,87	8	1,60	29	0,0983	2,38
proef 2	1,87	11	1,60	29	0,0348	3,82



6. De significante golfhoogte als functie van de faalkans voor een haringmanglooiing (20 cm).

De glooiing bezwijkt op het moment dat de gebufferde energie groter is dan het incasseringsvermogen, dus als $E_{i\max} - E_i < 0$

De waarde van a kan analytisch bepaald worden, en is 0,25. De waarden van b en $E_{i\max}$ kunnen dan afgeleid worden uit de resultaten van het laboratoriumonderzoek. Dit kan als er twee 'bezwijkpunten' bekend zijn. Er is een grafiek te maken van de gebufferde energie E_i als functie van de tijd voor verschillende golfhoogtes, figuur 4. Bij een golfhoogte H_1 bezwijkt de glooiing na t_1 uur; bij een golfhoogte H_2 treedt bezwijken op na t_2 uur. In beide gevallen geldt $E_i = E_{i\max}$. Er is nu een vergelijking op te stellen waaruit b iteratief opgelost kan worden. Daarna kan $E_{i\max}$ berekend worden. Voor basalt werden de schadepunten berekend als in tabel 2.

Bij de Haringmanblokken is maar één schadepunt bekend. Verder is bekend dat bij 30 uur nog geen schade opgetreden was. Het tijdstip t_2 is dus niet bekend, maar ligt voorbij de 30 uur. Aangenomen kan worden dat dit bijvoorbeeld 40 uur is. De waarde van b wordt dan 0,0377 en $E_{i\max}$ wordt 3,15. Het model is overigens niet erg gevoelig voor de aanname $t_2 = 40$ uur.

Bij de betere vilvoordse steen zijn er twee schadepunten. Eén punt ligt bij een golf van 1,05 m en 10 uur, het andere punt ligt bij 5 uur. Beide proeven hebben echter een verschillende voorgeschiedenis. De aanpak via het incasseringsvermogen maakt het mogelijk om deze verschillende voorgeschiedenis ook in de berekening te betrekken. De procedure staat grafisch weergegeven in figuur 5.

In het tweede geval wordt eerst t_1 uur gegolfd met een golf van 65 cm. Er is dan een golfenergie E_1 geïncasseerd. Daarna wordt doorgedaan met een golf van 77 cm. Er moet dus overgestapt worden op een andere kromme. De kromme van $H = 77$ cm is echter over een tijd t_x verschoven om aansluiting te krijgen. De waarde t_x kan bepaald worden doordat op een nieuwe glooiing

dezelfde incassering E_1 verkregen kan worden, door gedurende $t_1 - t_x$ uur te golven met 77 cm. Bij de verhoging tot $H = 1,05$ m kan dezelfde procedure nogmaals toegepast worden. Er kunnen dan drie niet-lineaire vergelijkingen opgesteld worden met drie onbekenden.

Uit de oplossing van deze vergelijkingen volgt $b = 0,25$ en $E_{i\max} = 0,869$.

Voor de mindere kwaliteit vilvoordse steen is het ook mogelijk om deze berekening uit te voeren. Doordat de schadepunten zo erg dicht bij elkaar liggen wordt het resultaat zeer onbetrouwbaar. Op de afleiding van b en $E_{i\max}$ van deze kwaliteit vilvoordse steen zal hier dan ook niet verder ingegaan worden.

Met behulp van probabilistische rekenmethodes en de gevonden waarden van b en $E_{i\max}$ is de faalkans van de glooiing te bepalen. In figuur 6 is het resultaat van deze berekening gegeven voor haringmanglooiingen.

Resultaten

Aan de hand van de resultaten van het laboratoriumonderzoek, de golfhoogteberekeningen en de inventarisatie van glooiingstypen is voor elk dijkvak, voor elk van de vier beschouwde peilen, de ter plaatse toelaatbare stagnantieduur vastgesteld. Geconcludeerd is dat ter plaatse van de basalt- en haringmanglooiingen, vrijwel geen problemen verwacht worden. Bij een deel van de vilvoordse glooiingen zullen wel problemen ontstaan (evenals bij de niet onderzochte muraltglooiingen). Het bleek dat geen enkele sluitingsstrategie zonder meer toegelaten kan worden bij de bestaande glooiingen, maar dat door zeer beperkte glooiingsverbeteringen er een aanzienlijke vrijheid ontstaat in de toe te laten strategieën. In het eindrapport van dit onderzoek is per dijkvak aangegeven welke glooiingstafels aangepast moeten worden om de diverse peil/duur combinaties op het bekken toe te laten.

Literatuur

1. Deelprojectgroep Provo: 'De veiligheid van de Oosterscheldedijken in relatie tot het gebruik van de stormvloedkering', Barcon-secretariaat, RWS directie Zeeland.
2. Ir.H.J.Verhagen: 'Analyse van deltagootproeven en classificatie van Oosterscheldedijken ten aanzien van geconcentreerde golfaanval', Adviesdienst Vlissingen, nota WWKZ-84.V026.
3. Ir.H.J.Verhagen: 'Trekproeven op glooiingsconstructies langs de Oosterschelde', Adviesdienst Vlissingen, nota WWKZ-84.V002.
4. Ir. A.M. Burger & ir. A.Bezuijen: 'Sterkte Oosterscheldedijken onder geconcentreerde golfaanval', Waterloopkundig Laboratorium, rapport M2036.
5. Ir.A.C.W.M.Vrouwenfelder & ir.J.K.Vrijling: 'Probabilistisch ontwerpen', Technische Hogeschool Delft, Afdeling Civiele Techniek, collegedictaat b3.