

**Definitief**

# Oeverstabiliteit bij verdieping waterbodems

Opdrachtgever:

Delft Cluster

Rekenmodel HMBreach

Rapport

september 2009



Opdrachtgever:

Delft Cluster

## Oeverstabiliteit bij verdieping waterbodems

Rekenmodel HMBreach

Dick R. Mastbergen

Rapport

september 2009

## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding en kaderstelling .....</b>	<b>3</b>
1.1	Kaderstelling en Achtergrond .....	3
1.2	Oeverstabiliteit bij zandwinputten, CUR C130 .....	4
1.3	Delft Cluster WP 04 43 11 Oeverstabiliteit bij verdieping waterbodem .....	5
1.3.1	Onderzoekskader .....	5
1.3.2	Activiteiten .....	6
1.3.3	Nieuw te ontwikkelen kennis .....	8
<b>2</b>	<b>Bressen als mechanisme voor taludinstabiliteit .....</b>	<b>10</b>
2.1	Abstract: Breaching as an instability in subaqueous dredged sand slopes .....	10
2.2	Het verschijnsel oeverval .....	11
2.3	Het zandzuigproces .....	12
2.4	Taludontwikkeling bij beheerst bressen .....	14
2.5	Bresvloeiing .....	15
2.5.1	Definitie .....	15
2.5.2	Mechanismenbeschrijving .....	16
2.5.3	Initiatie .....	17
2.5.4	Invloedsfactoren .....	17
2.5.5	Procestijd en afmetingen .....	17
2.5.6	Specifieke punten voor zandwinning .....	17
<b>3</b>	<b>Rekenmodel HMBreach .....</b>	<b>18</b>
3.1	Description computational model .....	18
3.2	Doel rekenmodel .....	19
3.3	Ontwikkeling rekenmodel .....	19
3.4	Mogelijkheden en beperkingen model .....	20
3.5	Stelsel vergelijkingen voor zand-watermengselstroming .....	20
3.6	Beginvoorwaarden .....	22
3.7	Uitbreiding met invloed breedte .....	24
3.7.1	Update software HMBreach .....	24
3.7.2	Model equations .....	25
3.8	Erosiefunctie .....	26
3.8.1	Netto erosiesnelheid .....	26
3.8.2	Sedimentatiesnelheid .....	28
3.8.3	Walsnelheid, doorlatendheid en valsnelheid .....	28

3.8.4	Benaderende oplossingen erosiefunctie.....	29
3.8.5	Dilatantie.....	30
3.9	Zandverlies en interne wrijving.....	30
3.10	Entrainment (aanzuiging).....	30
<b>4</b>	<b>Documentatie.....</b>	<b>31</b>
4.1	Archivering.....	31
4.2	Oplevering.....	31
<b>5</b>	<b>Gebruikershandleiding HMBreach.....</b>	<b>32</b>
5.1	Installatie procedure.....	32
5.2	Menu's.....	32
5.3	Tabbladen.....	32
5.3.1	Input.....	32
5.3.2	Output.....	33
5.3.3	Charts.....	34
5.3.4	Constants.....	34
<b>6</b>	<b>Berekeningen.....</b>	<b>37</b>
6.1	Rekenvoorbeeld.....	37
6.2	Gevoeligheidsanalyse.....	37
<b>7</b>	<b>Symbolenlijst.....</b>	<b>40</b>
<b>8</b>	<b>Referenties.....</b>	<b>42</b>

## **Bijlagen**

Bijlage 1	Rekenschema HMBreach
Bijlage 2	Delft Cluster Work Package plan 04 43 11

# 1 Inleiding en kaderstelling

## 1.1 Kaderstelling en Achtergrond

Dit rapport betreft de eindrapportage van Delft Cluster project WP 04 43 11, Stabiliteit Oevers bij verdieping Waterbodem, in Ontwikkeling Wetlands, dat vier jaar heeft gelopen en thans is afgerond met budgetten in het kader van BSIK en eigen “matching” speurwerk van Deltares.

In het verleden is in het kader van het onderzoek Storten van Zand voor RWS Deltadienst en CSB Combinatie Speurwerk Baggertechniek in de jaren '70 tot '90 bij Deltares veel kennis en ervaring opgedaan op het gebied van zand-watermengsel stromingen en erosieprocessen in zand en slib. Deze kennis is verder ontwikkeld en toegepast op het gebied van baggeren, turbidity currents in submarine canyons en stabiliteit onderwaterhellingen van zandwinputten. Kenmerkend is het terugschrijdend erosieproces langs een zandtalud, bressen genoemd, dat een zandwatermengselstroom als dichtheidsstroom voedt. Hiervoor is het rekenmodel HMBreach ontwikkeld. Aanverwante vakgebieden zijn oever- en bankerosie, terugschrijdende erosie (head-cut erosion) en specifiek voor waterkeringen, bresgroei bij dijkdoorbraak en stabiliteit vooroevers.

Op het gebied van oeverstabiliteit zandwinputten is in 2001 door WL | Delft Hydraulics een studie voor de Provincie Overijssel uitgevoerd (Z3014) waaruit naar voren kwam dat veel opgetreden oeverinscharingen te wijten zijn aan een onbeheerst bresproces, zie bijv. foto 1. Tot voor kort was bij onderwatertaluds alleen een analyse op gevoeligheid voor zettingsvloeiing gebruikelijk. Dit heeft geresulteerd in een beleidsnotitie van de Provincie Overijssel waarin specifieke analyse van de taludhellingen en de werkwijze tijdens het zandzuigen wordt aanbevolen, gebruik makend van het rekenmodel van WL | Delft Hydraulics.

In het rapport van WL | Delft Hydraulics werd voorgesteld een landelijke aanbeveling op te stellen voor ontwerp en beheer van oevers van zandwinputten. Dit heeft geresulteerd in de CUR aanbeveling 113 die is opgesteld in samenwerking met vergunningverleners, zandwinners en consultants, GeoDelft en WL | Delft Hydraulics, 2008.

Daarnaast is in kader van Delft Cluster een verder onderzoek gestart, WP 04 43 11, waarbij Deltares het rekenprogramma HMBreach heeft ontwikkeld en aan de participanten beschikbaar gesteld. Dit rapport vormt achtergrond, documentatie en handleiding van het rekenmodel HMBreach. Het rekenmodel, evenals dit rapport is opgesteld door Dick R. Mastbergen, de software in C# is verder ontwikkeld bij WL | Delft Hydraulics en Deltares door Rob Brinkman en Anouar Manders.



Foto 1 Oeverinscharing zandwinput Hooijdijk, 2008

## 1.2 Oeverstabiliteit bij zandwinputten, CUR C130

De CUR commissie C130 vormt een praktisch samenwerkingsverband waarin de huidige kennis wordt vastgelegd in richtlijnen. Behalve de Provincie Overijssel en WL | Delft Hydraulics nemen hieraan deel de andere provincies (IPO), RWS, zandwinners en ingenieursbureau's.

Om het ruimtebeslag van zandwoningen te beperken wordt gestreefd naar zo steil mogelijke taluds en wordt de laatste jaren tot op steeds grotere diepte uit zandwinputten gewonnen. Deze ontwikkeling heeft in de afgelopen jaren op enkele locaties geleid tot een toename van het aantal taludinstabiliteiten met schade aan de omgeving. De toegenomen aandacht voor dit risico in het kader van het verlenen van ontgrondingsvergunningen heeft tot nu toe niet geleid tot een voldoende terugdringing van het aantal onaanvaardbaar grote inbressingen. Daarnaast is de vraag gerechtvaardigd of de taludhellingen niet steiler hadden kunnen zijn daar waar zich geen taludinstabiliteiten hebben voorgedaan.

Om de risico's van instabiliteiten te beperken zijn in de provincie Overijssel de vergunningseisen in 1997 aangescherpt. Desondanks is sindsdien wederom een aantal inbressingen opgetreden.

In opdracht van de provincie Overijssel heeft WL | Delft Hydraulics in 2000 (Z3014) een onderzoek uitgevoerd inzake de opgetreden inbressingen en vervolgens zijn de vergunningsvoorschriften aangepast. Aanbevolen is toen om te pogen een landelijk geldende richtlijn op te stellen voor de exploitatie van zandwinputten met het oog op het voorkomen van taludinstabiliteiten.

Met behulp van de richtlijn moeten partijen op een rationele en doelmatige wijze tot een veilig en optimaal vergunningstalud kunnen komen. Het gaat daarbij enerzijds om het in opdracht van aanvrager uit te voeren onafhankelijk onderzoek en anderzijds om de in de

vergunning op te nemen voorschriften. De eisen worden dan in principe standaard voor alle dieptewinningen in Nederland, zodat de rechtsgelijkheid voor de zandwinnende bedrijven wordt bevorderd.

Het is essentieel dat er voldoende draagvlak voor de landelijke richtlijn gecreëerd wordt. Mede daarom kan de richtlijn het best verschijnen als richtlijn van de CUR. Het formuleren van de richtlijn zal gedaan worden door een adviescommissie met code C130. Inmiddels is de CUR Aanbeveling 113, Oeverstabiliteit bij zandwinputten, augustus 2008, verschenen.



Foto 2 Zandwinning Zevenhuizerplas

## 1.3 Delft Cluster WP 04 43 11 Oeverstabiliteit bij verdieping waterbodem

### 1.3.1 Onderzoekskader

De begeleidingscommissie DC –WP 04 43 11 bestaat uit:

- prof. ir W.J. Vlasblom (voorzitter)
- ir J.P. Koenis (CUR)
- ir M.B. de Groot (GeoDelft / Deltares) (secretaris)
- ir D.R. Mastbergen (WL|Delft Hydraulics / Deltares)
- ir M. van der Ruyt (GeoDelft / Deltares)
- prof dr ir C. van Rhee (Van Oord / TU Delft)
- ir A.H. Nooy van der Kolff (Boskalis)
- prof dr ir F. Molenkamp (TU Delft)
- ir R.R. de Jager (Boskalis / TU Delft)



De klankbordgroep DC –WP 04 43 11 bestaat uit

- ir S.J. Bennema (provincie Overijssel)
- ir M.T. van der Meer (Fugro)
- ir Joh.G.S. Pennekamp (Deltares)
- ir J.J. Tiemersma (Cubic square)
- ir B. Couperus (Wiertsema & Partners BV)

In de “Blik op de toekomst” van de CUR Aanbeveling 113 is gesteld dat kennisontwikkeling in de komende jaren zich zou moeten richten op de volgende doeleinden:

1. verbetering van de kwantificering van de invloed van baggermaterieel en baggermethode op de taludvorming, dus ook op de inscharing, als functie van de grondopbouw, waardoor onzekerheden omtrent het winproces worden teruggedrongen,
2. reductie van de onzekerheid over de vraag of een eenmaal gevormd steil talud in vastgepakt zand stabiel is onder alle omstandigheden of dat onbeheerste bresvorming ook kan ontstaan door natuurlijke oorzaken.

Dit wordt bereikt door een verdere ontwikkeling en integratie van de geotechnische deelmodellen voor verweking van GeoDelft en de hydraulisch-morfologische modellen voor bresvorming van WL | Delft Hydraulics. Deze rekenmodellen worden thans reeds toegepast voor de adviespraktijk door Deltares.

Op het “Mini-symposium” van 15 februari 2006 is besloten dat dit de meest kansrijke methode is om gezien budget en tijd resultaten te bereiken. Op het vervolgsymposium van 26 november 2008 zijn de resultaten gepresenteerd, toegepast op een tweetal grote praktijkprojecten, het Baggerdepot Hollandsch Diep en de oever van de bodembescherming Stormvloedkering Oosterschelde, Roompot, zie ook rapportage Stuurboord, Deltares, 2008.

Het work package WP 04 43 11 Oeverstabiliteit bij verdieping waterbodems van het DC-project 04 40 Ontwikkeling wetlands heeft betrekking op de waterbodemstabiliteit bij zandwinning en baggeren. In het kader van het r&d project *Normstelling vertroebeling t.g.v. baggeren* brengt WL | Delft Hydraulics hier specifieke kennis en rekenmodellen in op het gebied van zand-watermengselstromingen en bressen. Voor het werkplan in algemene zin wordt verwezen naar Delft Cluster Workpackage plan 04-43 11. Zie Bijlage 1.

### 1.3.2 Activiteiten

Beoogd wordt het bresmodel te integreren en te koppelen met de geotechnische modellen zoals SLIQ2D en MSTAB. Zodoende kan ook het effect van verweking en afschuiving van bepaalde lagen in rekening worden gebracht. Dit wordt dan als een instantie taludverandering in het model gebracht waarna het model weer quasi-stationair de aanpassing van het talud kan berekenen.

Om te kunnen beginnen is de oorspronkelijke aangepast en onder Windows geherprogrammeerd. Hiervoor is voorgesteld in C#.Net te ontwikkelen waarmee gemakkelijk kan worden aangesloten op een moderne software omgeving. De in- en uitvoer zijn eenvoudig gehouden via databestanden en de gebruiker kan grafieken genereren. De software is getest en wordt overgedragen aan de commissieleden. Hiermee kunnen op een eenduidige wijze de geotechnische gegevens uit boringen en evt. sonderingen van een bepaald toepassingsgebied ingevoerd worden.



Voor het bresmodel zijn benodigd:

- laagdikte (lagen van orde 1-2 m dikte vanaf maaiveld)
- grondsoort: klei, zand, veen
- voor zand korreldiameter D50, D15
- porositeit (of pakking, watergehalte, dichtheid)
- percentage fines < 63  $\mu$
- (grond-)watertemperatuur
- doorlatendheid (evt. uit bovenstaande te berekenen)

Na validatie van het rekenmodel in de praktijk (B) kan in de volgende fase worden overgegaan op waar nodig aanpassing en uitbreiding van het model (C) en integratie met geotechnische software (D). Met een geotechnische invoermodule kunnen vervolgens bijv. zowel het bresmodel als SLIQ2D en/ of MSTAB gevoed worden. De uitvoer van het ene model moet dan geschikt zijn voor de invoer van het andere. Daarmee zijn de modellen geïntegreerd en kunnen er voor praktijksituaties berekeningen worden uitgevoerd. Hierin liggen mogelijkheden voor een koppeling van de verschillende modellen, waaruit ook de inscharingslengte kan worden berekend.

Fase A.

1. Aanpassen Bresmodel tot een Windows versie (HMBreach)
2. Programmeren Invoermodule voor geotechnische data
3. Programmeren Uitvoermodule met grafieken en tabellen
4. Schrijven documentatie en handleiding

Gerealiseerd zijn thans en in dit rapport gedocumenteerd Fase A onderdelen 1, 3 en 4 beschreven. Voor onderdeel 2 is een aanzet gedaan tezamen met de nieuwe Windowsversie voor SLIQ2D. Verdere activiteiten hebben bestaan uit bijdrage aan het Minisymposium, werkgroep-bijeenkomsten en publicaties (Geotechniek).



Foto 3 Zandwinput Haerst te Zwolle

### 1.3.3 Nieuw te ontwikkelen kennis

Dit workpackage sluit direct aan op de twee gesignaleerde problemen rond de toepassing van rekenmodellen, nodig voor het tevredenstellend vaststellen van stabiliteitsgrenzen van taluds en diepe putten.

1. Bepaling van grondparameters.

Codificering van de manier waarop binnen Nederland grondparameters voor bodemverdiepingen moet worden bepaald. (Onderdeel A)

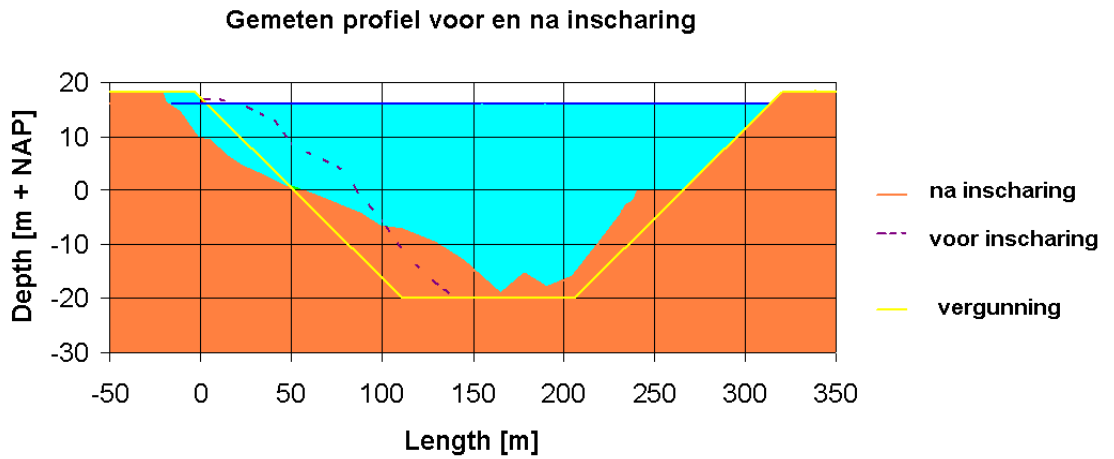
2. Kwantificering interactie hydrodynamisch-morfologische en geotechnische fenomenen.

- Dit deel van het work package combineert modellen voor bresgroei en zettingsvloeiing tot één praktisch bruikbaar softwareproduct..
- Zolang er niet meer duidelijkheid is m.b.t. deze kwantificering zorgt dit work package ervoor dat de huidige adviespraktijk informatie verkrijgt over hoe met deze interactie om te gaan. Het gaat hier om kennisoverdracht van WL en GD naar zandwinners, ingenieursbureau's en toezichhouders. Deze kennisoverdracht vindt plaats in de CUR-commissie C130 (onderdeel A).

Met dit product – codificatie van grondparameters en gekwantificeerde interactie - kunnen stabiele profielen van waterbodems voor wetlands worden ontworpen, bijvoorbeeld in het IJsselmeer.

De status van het onderzoek is thans, dat in 2009 een STW onderzoek bij TU Delft wordt gestart dat mede zal worden begeleid door Deltares, op het gebied van verwekingsvloeiing, namelijk "Flow slides of submerged slopes composed of loose sands". Voor de eigen ontwikkeling van Deltares en RWS is november 2008 een plan ingediend in het

Kerndomein Waterbouw voor Strategisch Onderzoek 2009 met als titel Ontwikkeling geïntegreerd model voor Bres- en Verwekingsvloeiing. Als vervolgonderzoek staan voorop validatie en integratie van het hydrodynamische rekenmodel met geotechnische invoer, verwekingsvloeiing en afschuiving.



Figuur 1 Gemeten oeveringscharing zandwinput Ankerplas, Kloosterhaar, 1998 (Minisymposium, 2006)

## 2 Bressen als mechanisme voor taludinstabiliteit

### 2.1 Abstract: Breaching as an instability in subaqueous dredged sand slopes

In the Netherlands important quantities of sand for civil works and industry is mined by means of dredging from land located sites. These sites ultimately have a water depth of 45 m or more and slopes of generally about 1:4.

To optimize the quantities of sand to be produced in relation to the required land area it is important to design the slopes and depth to be dredged carefully. After all, the interests and safety of local residents and the future arrangement of the lake borders for recreation purposes have to be safeguarded. However, in recent years, more and more slope instabilities have occurred during sand dredging, although sufficient geotechnical investigations and stability analysis were carried out. The risks of liquefaction and flow slides were considered. However, even in densely packed coarse sand that exclude the possibility of liquefaction flow slides, these slope instabilities occurred.

Recently it has been recognized that initiated by the dredger under certain conditions an erosive sand-water mixture density flow can be generated, finally resulting in a gradually developing slope failure. The slope failure initiation, which we call the breach, retrogrades upslope with a velocity that is related to the permeability of the sand. This explains the relatively long time of at least several hours in which the subaqueous slope failure manifests itself.

Field examples with photo's and bottom contour and profiles of several slope failures in subaqueous sand mining locations in The Netherlands will be presented as well as the results of a computational model of the slope development. Better understanding of the process now has been applied on improvement of working methods with the dredger and regulations for the concession limits and process monitoring during the dredging operation.



Foto 4 Zandwinning Haarrijnseplas Oost, 2005

## 2.2 Het verschijnsel oeverval

Het Gat van Betlehem. Rond het zandgat staan overal borden met GEVAARLIJK TERREIN – OEVERVAL MOGELIJK. Op één zo'n paal zit een beul van een kraai, een gemeen monster dat klinkt als een oude schuurdeur. Oeverval is wat er twee jaar geleden gebeurde, op een nacht in de herfst, toen de weg naar het veer opeens weg was. Gewoon verdwenen. Bleek dat de zandzuigers van Betlehem Asphalt veel te lang op één plaats hadden gezogen, waardoor dat gat zichzelf was gaan vullen met het zand rondom. Dat gebeurt nu eenmaal als je een diep gat graaft, dan begint het zand rondom te rollen als het ware, naar het diepste punt toe. Zandhonger heet dat. Maar het Gat van Betlehem was zo diep dat het te weinig zand had om zichzelf te vullen, waardoor alles in de omgeving aan het schuiven raakte, want het moest ergens vandaan komen. Een heel stuk van de oever en de Lange Nek is zo het water in gegleden, en een stel bomen erachteraan. Dan sta je raar te kijken, als je daar 's morgens langskomt en er is geen weg meer. De gas- en electriciteitsleidingen lagen los, lantaarnpalen lagen omver. Maar nu is het veilig zeggen ze, ze zuigen niet meer zo lang op één plek. Voor wie het gelooft.

Uit: Joe Speedboot (2005) van Tommy Wieringa.



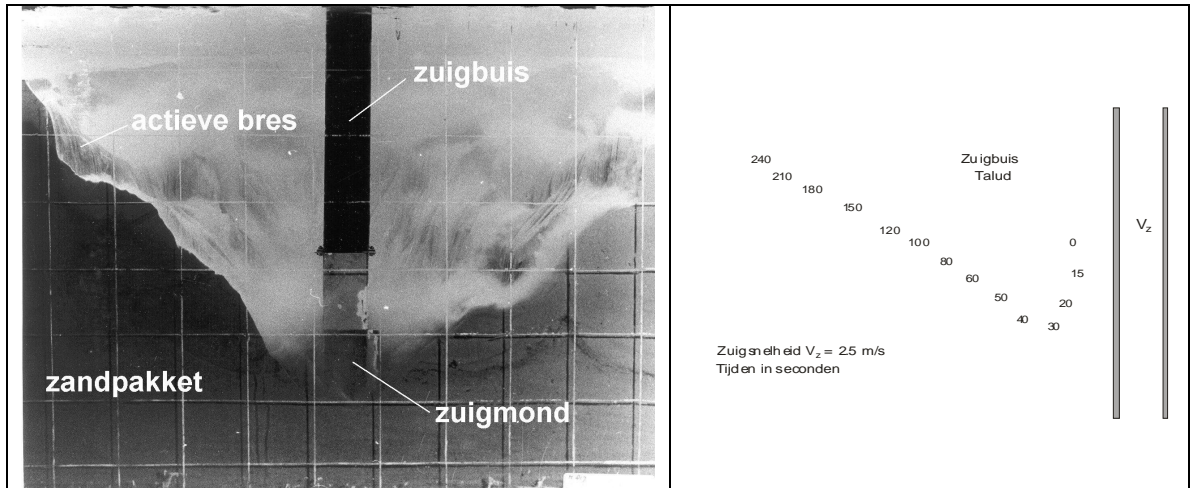
Foto 5 Winzuiger Hollandsch Diep

## 2.3 Het zandzuigproces

Het grootste deel van het baggeren vindt plaats door middel van winzuigen. Om te begrijpen hoe het talud van de zandwinput zich onder invloed van het winzuigen ontwikkelt, is inzicht in het zandzuigproces van belang. Fig. 2.5 laat dit proces in laboratoriumopstelling duidelijk zien. Om het proces op gang te brengen wordt de zuigbuis aan de voet van het talud eerst een zekere diepte (circa 2 tot 15 m) in het zand ingestoken. Door het al zuigend insteken van de zuigbuis wordt een actieve bres gevormd, die vervolgens langs het talud omhoogloopt en zand aanlevert (bressen). Het zand stroomt als een zand-water mengselstroom langs de helling naar de zuigbuis toe en neemt daarbij steeds meer zand op. Hierbij wordt een bepaald hellingverloop ontwikkeld.

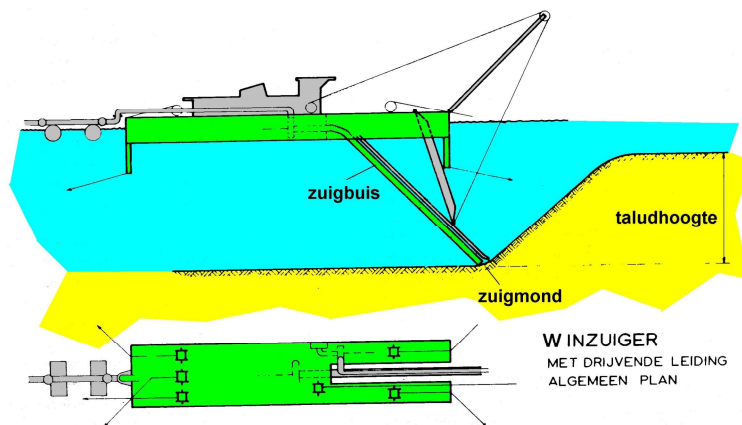
Kenmerkend voor het zandwinproces is, dat er onderscheid gemaakt moet worden tussen 'putproductie', dat wil zeggen de hoeveelheid zand die per tijdseenheid langs de helling naar beneden stroomt en 'zuigerproductie' dat wil zeggen de hoeveelheid zand die per tijdseenheid door de zuiger wordt opgezogen. Putproductie en zuigerproductie moeten in de praktijk zorgvuldig op elkaar afgestemd worden, zodat de putproductie niet veel groter wordt dan de zuigerproductie (zie 8.2.2). Is dit namelijk wel het geval, dan kan een onbeheerste bres ontstaan.





*Figuur 2*  
 Model zuigproef in zand (linkerfiguur) en schematische voorstelling van het bresproces (rechts).

De aard van het zandzuigproces is voor het eerst onderkend door Prof. De Koning [4], zie Fig. 2.6. De optredende processen bij het zuigen van zand zijn sindsdien uitgebreid onderzocht in een samenwerkingsverband van baggeraannemers en Rijkswaterstaat bij WL | Delft Hydraulics en GeoDelft. Er is onder meer laboratoriumonderzoek uitgevoerd waaruit blijkt, dat het bresproces gekenmerkt wordt door de snelheid waarmee de bres wegloopt, de walsnelheid (zie ook Fig. 2.5, waarin de curven de brespositie weergeven op de aangegeven tijdstippen; hieruit is de walsnelheid af te leiden door de verplaatsing te delen door de tijdperiode). Deze walsnelheid is een functie van de samenstelling en pakking van het zand en niet van de zuigparameters. De walsnelheid is ongeveer gelijk aan 25x de doorlatendheid van het oorspronkelijke zandpakket (dus orde enkele mm/s ofwel enkele meters per uur).



*Figuur 3*  
 Schematische weergave van het proces van een natte zandwinning met een winzuiger (horizontale en verticale afmetingen zijn niet op dezelfde schaal).

Een verstoring van het zandoppervlak, zoals een lokale versteiling, loopt langs het talud zolang het zand kan wegstromen en niet opnieuw bezinkt: dit wordt “nabressen” genoemd. Dit verklaart waarom een verstoring soms pas na enige tijd aan de oevers waarneembaar is en niet direct gerelateerd is aan de baggeractiviteit op dat moment. Het bressen, dus ook het nabressen is een taludoppervlakte-verschijnsel: alleen langs het taludoppervlak komt zand in



beweging en verandert de pakking van het zandpakket. Dit in tegenstelling tot een afschuiving of verwekingsvloeiing in losgepakt zand (zie verder 3).

Het bressen wordt op gang gehouden door het wegzuigen van het toestromende zand. Door de keuze van de plaats en diepte van insteken en het beheersen van de verticale en horizontale insteeksnelheid c.q. de positie van de winzuiger ten opzichte van het talud, kan dit bresproces bij homogeen, vastgepakt zand, goed beheerst worden. Gebeurt dit echter op een ongecontroleerde manier of onder onvoorziene omstandigheden, dan kan dit leiden tot een oeverinscharing (zie 3).

Vergroting van de zandproductie vereist een grotere voortgangsnelheid van de zuiger (evenwijdig aan de oever of loodrecht daarop) of een hogere bres. Een verhoging van de bres geeft een verhoogd risico op een ongewenste inscharing. Tevens zal een groot deel van het talud flauwer worden.

In grover zand wordt de taludhelling gemiddeld steiler, maar bij de randen minder steil. Bij fijn zand kan de helling aan de rand juist steiler worden, maar zal deze bij de teen en ook gemiddeld flauwer zijn.

Aan de steile bovenrand van het talud, die zich vaak deels boven het grondwater bevindt, zal het zand niet alleen door erosie, maar ook in de vorm van afkalvende schollen vrijkomen. Daarbij neemt het risico op inbressing toe, omdat een grote afkalvende schol een extra hoge actieve bres kan doen ontstaan. Na het staken van de zuigactiviteit blijven actieve bressen zand naleveren (orde enkele uren).

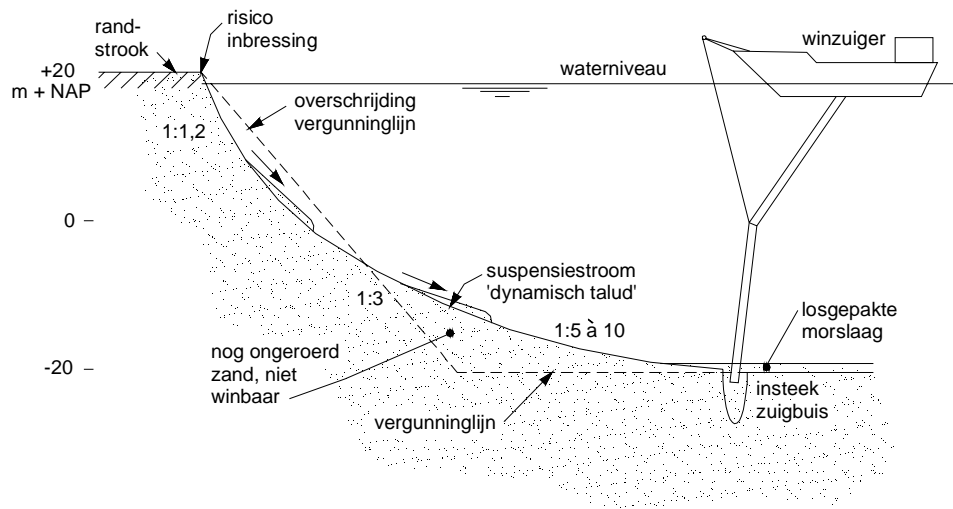
## 2.4 Taludontwikkeling bij beheerst bressen

In deze paragraaf zal worden aangegeven hoe de taludontwikkeling bij een zandwinning kan worden voorspeld op een eenvoudige dan wel geavanceerde manier en hoe een oeverinscharing kan worden voorkomen door het handhaven van een beheerst bresproces.

Om zand te kunnen winnen moet het zand kunnen toestromen naar een dieper punt, dat wordt gevormd door het lokaal diep insteken van de zuigbuis, zie Fig. 6.4. Zo wordt een actieve bres gevormd van maximaal 0,5 tot 1 m hoogte die als een taludverstoring omhoog beweegt en wel 90° steilheid kan bereiken t.g.v. wateronderspanningen in het zand (zie 2.4.3). Het zand moet wel weg kunnen stromen anders stopt de bres bijv. op een flauw talud. Het vrijkomende zand vormt een suspensiestroming welke verder versneld omlaag stroomt en het talud uitschuurt.

Bij de bovenrand kan de helling maximaal de natuurlijke taludhelling van het zand van ca. 32° (1:1,6) bereiken. Nog steilere gedeelten zullen nabressen. Hier bestaat een reëel risico dat door afschuiving een oeverinscharing ontstaat, nadat lokaal een zeer steile helling is ontwikkeld (steiler dan bijv. 1:2) door het bresproces. De taludontwikkeling kan dan ook gepaard gaan met tijdelijke en plaatselijke onregelmatigheden, zoals het afschuiven van schollen zand en het terugschrijden van zeer steile actieve bressen. Naar de teen toe zal de helling steeds flauwer worden.

Op basis van boringen, bodemopbouw, aanwezigheid van stoorlagen en daarnaast de keuze van geschikt materieel met afgestemde productiecapaciteit en verhaalsnelheid, kan de te verwachten taludontwikkeling bij beheerst bressen worden voorspeld als functie van de taludhoogte en de zuigdiepte. De gemiddelde helling van het talud zal afnemen bij steeds dieper zuigen.



*Figuur 4*  
*Schematische weergave taludontwikkeling in zandwinput t.g.v. zuigen (vertrokken schaal).*

De te verwachten taludontwikkeling voor een bepaald praktijkproject kan op verschillende niveau's van ontwerpdetailering worden vastgesteld. Op analoge wijze als in 6.1 en 6.2 is aangegeven hoe de stabiliteit van het talud kan worden bepaald:

- eenvoudig;
- gedetailleerd, houdt rekening met specifiek grondgesteldheid en uitvoeringseisen;
- geavanceerd, toespitst advies gebruikmakend van een rekenmodel.

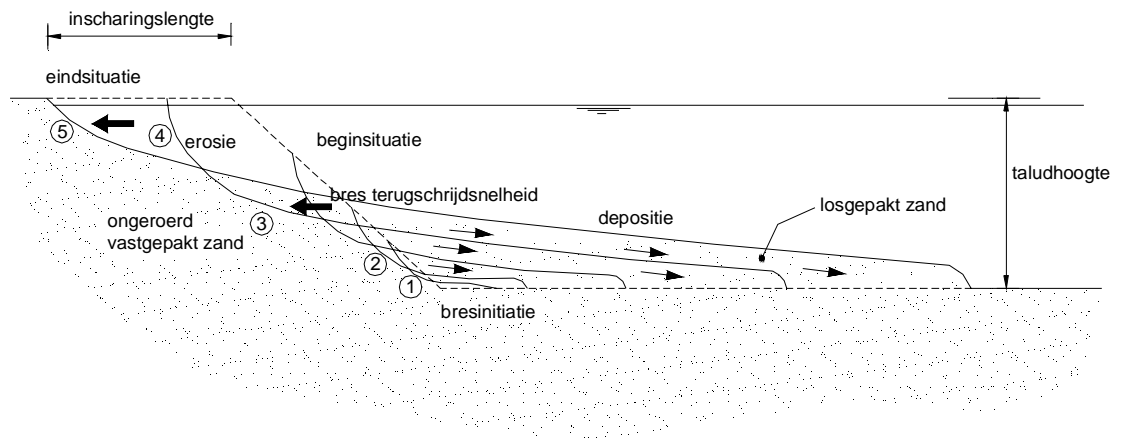
De verschillende niveau's worden in de volgende paragrafen uitgewerkt en samengevat in 6.4. Eerst wordt nog nader ingegaan op de voorwaarden bij de uitvoering die dienen te worden vastgelegd in een werkplan en tijdens de uitvoering te worden gecontroleerd door middel van monitoring.

De vastgestelde taludlijn kan vervolgens als vergunninglijn worden beschouwd, d.w.z. als de uiterste grens tot waar met de zuigmond het zand beroerd mag worden, te controleren met meetinstrumenten (zie 8), het zogenaamde "Theoretisch profiel". Bij grotere zuigdiepte wordt de helling gemiddeld flauwer en is het noodzakelijk meer afstand tot de oever te bewaren.

## 2.5 Brevloeiing

### 2.5.1 Definitie

Een bresvloeiing in een onderwater taludhelling is een gestaag terugschrijdend erosieproces dat, evenals een verwekingsvloeiing en een afschuiving, resulteert in een oever- of taludaantasting met een zekere inscharingslengte (zie Fig. 3.3). In tegenstelling tot een verwekingsvloeiing en afschuiving vindt het erosieproces uitsluitend plaats aan het oppervlak, verloopt het zeer geleidelijk en bovendien is dit proces ook mogelijk in vastgepakt, niet-verwekingsgevoelig zand.



*Figuur 5*  
*Oeverinscharing door bresvloeiing. Het proces verloopt in chronologische volgorde van (1) tot (5).*

## 2.5.2 Mechanismenbeschrijving

Bressen als mechanisme bij het zuigen van zand is al in 2 besproken. Bij zandwinnen is meestal sprake van beheerst bressen. De mate van nabressen (het naleveren van zand door actieve bressen nadat de zuigmond al gepasseerd is) wordt namelijk volledig gestuurd door de operatie van de zuigbuis van het baggerwerktuig, waarmee de bresvorming geïnitieerd wordt en is door een ervaren zuigbaas met adequate meetapparatuur ook in de hand te houden. Bij *bresvloeiing* echter kan de bresvorming ook door een andere oorzaak (bijv. lokale afschuiving in een aanwezige stoorlaag of erosie door het storten van grond op het talud of verwekingsvloeiing in een losgepakte (mors)laag) geïnitieerd worden. Het vrijkomende zand stroomt vervolgens naar dieper gelegen delen van de zandwinput, zonder dat de zuiger op dat moment actief is. Ook kan het zijn dat de door de zuiger geïnitieerde bres sterker groeit dan voorzien door de zuigbaas, bijvoorbeeld doordat de grondslag anders is dan voorzien.

Kenmerkend voor *bresvloeiing* is het zichzelf versterkende proces van groei van de hoogte van de bres. Naarmate de bres hoger en steiler wordt neemt het debiet van het vrijkomende zand toe. Bij toename van dat debiet neemt de erosie van de ondergrond aan de teen van de bres toe, waardoor de bres in hoogte maar ook in breedte groeit.

De actieve bres kan doorgaan zolang het geërodeerde materiaal kan wegstromen naar een dieper gelegen deel van de winput of opgezogen wordt. Wordt het materiaal niet opgezogen, dan zal het als een suspensiestroom stroomafwaarts sedimenteren. Als gevolg daarvan ontwikkelt zich een flauwe helling, waardoor het bresproces uiteindelijk zal uitsterven.

Het bresvloeiingsproces is een vorm van oppervlakte-erosie, waardoor het talud wordt uitgesleten en niet als geheel bezwijkt zoals het geval is bij een afschuiving of verwekingsvloeiing.

Voorwaarden voor het ontwikkelen van een oeverinscharing door bresvorming in een winput zijn dus:

- verstoring ergens (aan de teen of middenin) in het talud (door baggeren, of lokale afschuiving van een stoorlaag of vloeiing in een losgepakte (mors)laag), het te diep insteken van de zuigbuis of andere werkzaamheden op het talud, bijvoorbeeld zandaanvulling;

- het afgebreste materiaal moet in de vorm van een suspensiestroom kunnen afstromen naar dieper gelegen delen van de put en daar bezinken of worden opgezogen.
- Geen evenwicht tussen putproductie en zuigerproductie.

### 2.5.3 Initiatie

Er is een zekere aanleiding nodig, anders gebeurt er niets in een potentieel wel risicovolle situatie. Een ongewenste bres wordt meestal geïnitieerd door een lokale discontinuïteit, bijv. ter plaatse van de insteek van de zuigbuis bij het winzuigen. Een kleine verwekingsvloeiing of afschuiving kan ook dienen als inleidend mechanisme voor een bresvloeiing. In de natuur, in rivierbanken of getijdengeulen kan ook lokale erosie door stroming een initiërend mechanisme zijn. Een bresvloeiing kan overigens ook in losgepakt zand voorkomen (bij grote schuifvervorming) als er niet al eerder een vloeiing is opgetreden.

De initiatie moet wel voldoende zijn om een mengselstroming op gang te brengen. De hoogte van de veroorzaakte actieve bres door het insteken van de zuigbuis of lokale afschuiving moet minimaal 1 meter bedragen.

### 2.5.4 Invloedsfactoren

Taludhelling: als het talud voldoende flauw is zal er, afhankelijk van de zandsoort, bij een taludverstoring geen zich versterkende zand-watermengselstroming ontstaan.

Taludhoogte: hetzelfde geldt als de taludhoogte beperkt is, waardoor de stroming onvoldoende kan versnellen.

Materieel en werkwijze. Belangrijk zijn behalve het type materieel, afmetingen en de capaciteit, de diepte waarop de zuigmond staat ten opzichte van het zand, de richting waarin gewerkt wordt en de verhaalsnelheid.

### 2.5.5 Procestijd en afmetingen

Een bresvloeiing is een oppervlakteproces, dat zich afspeelt binnen een tijdsbestek van enkele uren tot ongeveer een etmaal bij massale gebeurtenissen. De terugschrijdsnelheid ("wallejessnelheid") is van de orde van enkele mm/s, een inscharing van bijv. 30 m duurt dus enkele uren. De hoeveelheid grond, die in beweging komt, is over het algemeen zeer massaal. In tegenstelling tot een verwekingsvloeiing komt bresvloeiing ook voor in vastgepakt, grof zand.

### 2.5.6 Specifieke punten voor zandwinning

Wanneer door de zuigactiviteit steile hellingen achterblijven, hoeven deze niet direct te bezwijken of na te bressen. In vastgepakt zand kan er door het zuigen een wateronderspanning zijn ontstaan. Door toename van de waterspanning, kan het talud in een later stadium toch bezwijken.

## 3 Rekenmodel HMBreach

### 3.1 Description computational model

The applied model for the turbidity current HMBreach is a 1DH 2-layer model for stationary non-uniform depth averaged flow. It was developed at WL | Delft Hydraulics for dredging applications and validated with flume tests. The slope development and stability during sand suction (“breaching”) in specific sand layers from a bore hole is predicted. The model was applied to turbidity currents in submarine canyons (Scripps Canyon) in collaboration with University of Utrecht. Ref. [Mastbergen & Van Den Berg, 2003]

The model describes the supercritical erosive 2-layer turbidity flow over a sand bed with prescribed properties from bore holes for example, for densimetric Froude numbers between 1 and 2.8. Subcritical steady uniform turbidity flow may occur on flat downslope areas with no more erosion and entrainment, but is not described with the model. An intermediate mixing layer is defined generating internal friction and entrainment of ambient water. On extremely steep slopes Froude numbers will be too high and the intermediate layer will become unstable, complete mixing of the sublayer will result.

The required upper boundary is defined by a slowly retrograding “breach”: a local small and steep slope irregularity, gradually retrograding upslope generating a small but steady sandflow that may transform into an erosive and turbulent sand-water density flow.

Actually the model is quasi-stationary taking into account the regression velocity that is defined by the sand properties. The erosion is described as a sediment flux at the bed with a semi-empirical model as a function of bed shear stress, slope and sand properties. This model was calibrated with experiments in a tilting flume with fine 120  $\mu$ m sand resulting in erosion velocities measured perpendicular to the bed up to 5 mm/s with flow velocities up to 2.5 m/s, Ref. [Winterwerp et al, 1992]. The model is derived for high volumetric sediment concentrations taking into account the effect of density differences on the momentum equation (no Boussinesq approximation applied).

Non-steady effects such as TC head and tail development are not described, nor vertical development or development in width, curves etc.

For the input for the initial conditions is taken a breach of 1 m height with retrogression velocity 1 mm/s and an initial Froude number = 2 and sand volumetric concentration = 12%. With these numbers the initial velocity, flow depth and sand transport rate per unit width are defined. The influence of the upper boundary condition is minimal as long as it is sufficient to produce an initial supercritical suspended sand flow. If the flow is capable of erosion, given sediment properties, slope and height, flow acceleration will result and erosion will increase. If not the flow will extinct, so a threshold value for TC initiation is required.

A semi – empirical Erosion model / formula is applied see [Winterwerp et al, 1992] and the improved and more general version see [Mastbergen and Van den Berg, 2003] with permeability /  $d_{15}$  that defines the net bed erosion velocity  $V_{erosion}$ . This expression includes hindered erosion and hindered settling effects and are validated with flume measurements in

anti-dunes and in dredging experiments for sand grain size 100 – 200  $\mu\text{m}$  occurring only during short time. The maximum erosion rate is restricted due to high volumetric concentration with a supplemental empirical formula see [Winterwerp et al, 1992]. The critical value for erosion and the power are different, so computations were performed with both erosion model options.

## 3.2 Doel rekenmodel

Met het rekenmodel HMBreach kan de taludontwikkeling berekend worden die bij winzuigen gegeven de bodemopbouw (boringen) zal ontstaan mits de verhaalsnelheid en daarmee de zuigcapaciteit wordt aangepast aan de putproductie. Dit talud is stabiel voor bresvloeiing. Door op bepaalde niveaus bermen en een bepaalde vaste zuigdiepte aan te houden kan de taludvorming nog verder worden gedetailleerd en geoptimaliseerd.

In 2008 na een testfase zal overdracht van het model aan de gebruikers plaatsvinden (participanten Delft Cluster, leden CUR C130, ingenieursbureaus, zandwinners en aannemers). Daartoe is de software herschreven in C+ op Windows basis en uitgebreid.

In een later stadium zal in kader Delft Cluster integratie plaatsvinden met geotechnische modellering (SLIQ2D) en zullen predictieberekeningen worden uitgevoerd voor monitoringsprojecten (zoals Hollandsch Diep baggerspeciedepot).

## 3.3 Ontwikkeling rekenmodel

Het rekenmodel van WL | Delft Hydraulics is oorspronkelijk opgesteld in het kader van het baggeronderzoek en het storten van zand. De software en rapportage zijn vertrouwelijk. Dit model is bedoeld om de taludontwikkeling bij winzuigen door erosie van een zand-watermengsel in een bepaalde horizontaal gelaagde zandgrond te voorspellen. Het gaat uit van boorstaten en zeefdiagrammen. Een variant is door WL | Delft Hydraulics later ontwikkeld voor het beschrijven van turbidity currents op zandtaluds.

Het model is 1-dimensionaal d.w.z. werkt per eenheid van breedte. In werkelijkheid zal de stroming 2-dimensionaal zijn en over een bepaalde, waarschijnlijk niet constante breedte over het talud naar de zuigmond stromen. Verder is het model (quasi)-stationair d.w.z. momentane gebeurtenissen worden niet berekend alleen stationaire of langzaam veranderende situaties (d.w.z. over meerdere minuten). Het model is gevalideerd onder laboratorium-omstandigheden (taludhoogte tot maximaal 2 m), in de praktijk zijn wel taluds gemeten en vergeleken met het model maar niet de daadwerkelijke ontwikkeling.

Het model beschrijft alleen het bresproces en houdt geen rekening met afschuivingen of verweking en gaat dus uit van voldoende vastgepakt zand.

Met het bresmodel kan in twee verschillende modi worden gerekend:

1. Uitgaande van een stationair zuigproces (BREACH): diepte waarop gezogen wordt en (gemiddelde) verplaatsingssnelheid van de zuigbuis loodrecht op of parallel aan de oever (daarbij aangenomen dat het zand-watermengsel over een beperkte breedte maar rondom de zuigbuis toestroomt) wordt de resulterende evenwichtstaludvorm berekend
2. Uitgaande van een bestaande taludvorm wordt berekend of een bepaalde verstoring (bijv. een verweking in een losgepakte laag van beperkte dikte) al dan niet leidt tot een bres met erosieve zand-watermengselstroom en dus een taludverflauwing en mogelijk een oeverinscharing (TURB). Deze verstoring hoeft niet noodzakelijkerwijs door het winzuigproces veroorzaakt te worden (bijv. verweking, afschuiving kleilaag etc.). Door

aanpassing van het talud en herhaalde berekeningen kan het verloop van het proces in de tijd gesimuleerd worden.

Turbidity current : gevoelig voor kritische helling / taludhoogte bij gegeven zandsoort waarvoor juist wel / niet acceleratie ontstaat, dus uitdemping of ontwikkeling van een zichzelf versterkende turbidity current met mogelijk taludinscharing (bresvloeiing)  
Met deze versie kan een bestaand talud of ontwerp bijv. met bermen nagerekend worden op gevoeligheid voor bresvloeiing.

### 3.4 Mogelijkheden en beperkingen model

Met HMBReach wordt gegeven een zuignelheid en zuigdiepte de hellingopbouw berekend waarbij sprake is van een stationaire evenwichtssituatie bij winzuigen (t.b.v. baggerspeurwerk BAGT 454). Het model wordt toegepast om de stabiliteit van oevers van zandwinputten te berekenen.

Met HMTURB wordt gegeven een bepaalde taludopbouw berekend of en met welke stroomsnelheden zich een zand-watermengselstroom zal ontwikkelen, gegeven een bepaald initiele verstoring op het talud (bres).

Toegepast om turbidity currents in zandige canyons te berekenen (zie Mastbergen/Van den Berg), maar ook zanddeposities (storten van zand onder water met sleeppopperzuigers of pijpleidingen voor mine tailings, depots).

Van belang zijn:

1. erosiemodel, waarin doorlatendheid een rol speelt
2. sedimentatie
3. entrainment
4. hoge concentraties
5. superkritisch karakter van de stroming
6. stroomopwaarts bewegend bovenrandvoorwaarde (bressen)

Het stelsel DV's is afgeleid op basis van het stelsel voor bovenwater zand-watermengsel stromingen (ZSTORT). Het erosiemodel is ook toegepast voor bresgroei in dijken.

### 3.5 Stelsel vergelijkingen voor zand-watermengselstroming

De stroming van de onderlaag in het 1D tweelagensysteem wordt gemodelleerd met de volgende 3 vergelijkingen:

(1) de impulsvergelijking, gedefinieerd in de rchiting  $s$  langs het zandbed met een helling  $\alpha$  ten opzichte van het horizontale vlak:

$$\rho_m \varepsilon g h \cos \alpha \frac{dh}{ds} - \sin \alpha \left[ \frac{1}{2} g \cos \alpha h^2 \frac{d\rho_m}{ds} + \frac{d(\rho_m q u)}{ds} \right] + b \tau_0 + \tau_i q = 0$$

(2) de continuïteit van het water:



$$\frac{d}{ds} \left[ q(1-\bar{c}) \right] = n_0 v_e + v_{entr}$$

(3) de continuïteit van het zand:

$$\frac{d}{ds} \left[ qc \right] = (1-n_o) v_e - v_{sl}$$

waarin de bodemwrijving:

$$\tau_0 = \frac{f_0}{8} \rho_m u^2$$

en de wrijving in de interne sublaag, tussen de dichtheidsstroming en het bovenliggende water:

$$\tau_i = \frac{f_i}{8} \rho_m u^2$$

De dichtheid van het zand-watermengsel is:

$$\rho_m = \rho_w (1 + \Delta c)$$

waarin het relatieve dichtheidsverschil tussen zandkorrels en water:

$$\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$$

Het relatieve dichtheidsverschil tussen de suspensiestroming en het bovenliggende water is

gedefinieerd als:

$$\varepsilon = \frac{\rho_m - \rho_w}{\rho_m} = \frac{\Delta c}{1 + \Delta c}$$

Uit deze 3 vergelijkingen kunnen de gradiënten van h, u en c analytisch worden opgelost:

(1) de concentratie c:

$$\frac{dc}{ds} = \frac{c}{h} \left[ \frac{v_e (1-n-c)}{u} - \frac{v_{sl} (1-c)}{u} - \frac{v_{entr}}{u} \right]$$

(2) de mengsellaagdikte h:

$$\frac{dh}{ds} = \frac{I - AF - \frac{v_e}{u} S_1 + \frac{v_{sl}}{u} S_2 + \frac{v_{entr}}{u} S_3}{1 - F}$$

analoog aan de Bélanger vergelijking voor verhanglijnen in rivieren, waarin:

$$S_1 = \frac{(1-n_0-c)}{c} \left( \frac{1}{2} + \varepsilon F \right) + 2F$$

$$S_2 = \frac{(1-c)}{c} \left( \frac{1}{2} + \varepsilon F \right) + 2F$$

$$S_3 = \frac{1}{2} + \varepsilon F - 2F$$

( $S_2$  vertegenwoordigt het zandverlies bij stromende bovenlaag, deze wordt hier verder op 0 gesteld).

$$I = \text{helling tan } \alpha = -dz_b/ds$$

verder:

$$A = \frac{f_0 + f_i}{8} \text{ totale wrijving}$$

(3) de stroomsnelheid u:

$$\frac{du}{ds} = \frac{u}{h} \left( \frac{v_e}{u} - \frac{v_{sl}}{u} + \frac{v_{entr}}{u} - \frac{dh}{ds} \right)$$

Hierin is het kwadraat van het interne Froudegetal  $F = Fr_1^2$  gedefinieerd als:

$$F = \frac{u^2}{\varepsilon gh \cos \alpha}$$

Merk op dat stationaire uniforme ofwel evenwichtsstroming ( $dh/ds = 0$ ) vereist dat  $v_e$ ,  $v_{sl}$  en

$v_{entr} = 0$  zodat  $I = AF$  wat resulteert in:

$$u = \sqrt[3]{\varepsilon g q \sin \alpha \frac{8}{(f_0 + f_i)}}$$

Bij verwaarloosbare wrijving volgt uit (1) de Bernoulli vergelijking met  $dz_b/ds = \tan \alpha$

### 3.6 Beginvoorwaarden

Het model is stationair er is dus geen randvoorwaarde voor de tijd. Als beginvoorwaarde gelden bovenstrooms:

Uit  $Fr_{i0}$ ,  $dbr_0$ ,  $c_0$  en  $v_z = ..$  volgt:

het initieel specifiek zandtransport in kg/sm:

$$sz_0 = \rho_s v_z (1 - n_0) dbr_0$$

het initieel specifiek debiet in m<sup>3</sup>/sm:

$$q_0 = \frac{sz_0}{\rho_s c_0}$$

het initiële dichtheidsverschil:

$$\varepsilon_0 = \frac{\Delta c_0}{1 + \Delta c_0}$$

en de initiële mengselstroomsnelheid in m/s:

$$u_0 = \sqrt[3]{Fr_0^2 \varepsilon_0 g q_0}$$

( $F = Fr_1^2$ ) index voor  $x = 0$ , bovenrandvoorwaarde.

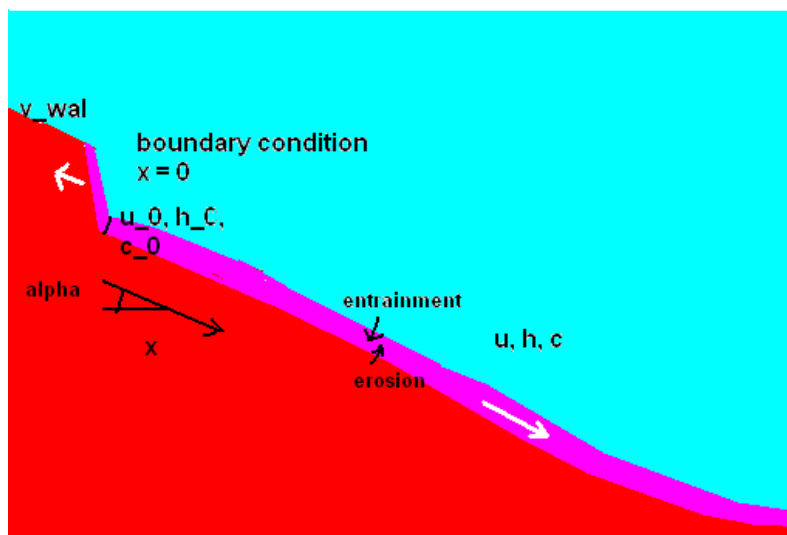


Fig. 6 bovenstroomse randvoorwaarden terugschrijdende bres

Het blijkt dat deze beginvoorwaarden slechts weinig invloed hebben op de berekeningsresultaten, de stroming past zich snel (binnen een afstand van slechts enkele malen de mengsellaagdikte) aan. Meestal kan voor  $F_0$  een waarde 2 en  $c_0$  een waarde tussen 12 en 30% aangenomen worden (concentratie in het van de bres lopende zand-watermengsel). Breshoogte tussen 0,1 en 1 m. Wel belangrijk is dat de stroming superkritisch is (anders is een bovenstroomse randvoorwaarde niet relevant) dus  $Fr_0 > 1$  en dat de beginsnelheid voldoende is om het erosieproces op gang te brengen (dus initiële breslaagdikte voldoende dik).  $u_0 >$  ongeveer 0,1 -0,3 m/s

In het geval van winzuigen wordt de zuigsnelheid  $v_z$  opgelegd (1 tot enkele mm/s). Er kan zich dan een bijbehorend evenwichtstalud instellen (BREACH). Een te hoge of te lage snelheid zal, afhankelijk van de zandsoort en de zuigdiepte echter niet altijd een evenwichtssituatie opleveren. Een te hoge snelheid levert een te steil talud (tot 90°) dat in grondmechanische zin zal bezwijken. Bij een te lage snelheid zal de sedimentatie overheersen.

Bij een natuurlijk proces (bestaande helling, geen zuiger) kan een initiële verstoring ( $> \varphi$ ) met tenminste de walletjessnelheid langs het talud omhooglopen (TURB). Dus  $v_z = 25k_0$

Als de erosie benedenstrooms zeer heftig is (dus steil talud) dan kan door afschuiven van schollen de bresterugschrijdingssnelheid groter worden. Op een te flauw talud zal de stroming onvoldoende versnellen, waardoor het vrijkomende zand niet wordt afgevoerd en dempt het bresverschijnsel vanzelf uit. Dit volgt uit de berekeningen.

## 3.7 Uitbreiding met invloed breedte

### 3.7.1 Update software HMBreach

De volgende werkzaamheden aan het computermodel zijn eind 2008 uitgevoerd als afronding van het project:

1. invoeren breedte-invloed. De DV en oplossingen daarvan zijn al uitgewerkt en getest in een spreadsheetvorm. Dit zouden we in het model willen programmeren. Dat betekent een extra variabele die in het input scherm wordt opgegeven per laag net als de andere invoer als extra kolom. De breedte kan onder invloed van het dichtheidsverschil vrijelijk in de breedte uitbreiden (free-fanning) of een van te voren opgelegde breedte aannemen.
2. mogelijkheid aanpassen invoervariabele delta n in erosiefunctie. Dit betekent een extra invoervariabele in het default-scherm cq een berekening van delta n op basis van de bestaande invoervariabele porositeit per laag
3. een aantal extra standaardgrafieken toevoegen
5. installatie bestand met korte handleiding aanmaken op CD waarmee het model op een willkeurige pc geïnstalleerd kan worden.

Ad 1. Inbrengen breedte-afhankelijkheid (quasi 2D)

Het huidige 1D stationair model HMBreach lost op een stelsel van 3 DV's voor de grootheden:

- snelheid  $U$
- laagdikte  $H$
- concentratie  $C$

De DV's zijn uitgeschreven in de vorm  $dc/ds = \dots$   $dh/ds = \dots$  en  $du/ds = \dots$  en worden opgelost door eenvoudige expliciete voorwaartse integratie en met een bovenstroomse randvoorwaarde (superkritische stroming  $Fr > 1$ ).

Door meenemen van de breedte  $b$  wordt een term  $db/ds$  toegevoegd aan de DV's.  $b$  wordt niet voorspeld maar als randvoorwaarde opgegeven. (bij sterke verwijding geldt free-fanning voorwaarde voor  $db/ds$ ).

In de invoertabel wordt een kolom toegevoegd met breedte gegevens per laag. Hieruit wordt  $db/ds$  afgeleid en dit wordt in de DV's in rekening gebracht.

### 3.7.2 Model equations

4 eq. to be solved with variables u, h, b and c.

Extension of 1DH model

1. Momentum equation:

$$\frac{d(\rho_m Qu)}{ds} = -\frac{d\left(\frac{1}{2}(\rho_m - \rho_w)gbh^2\right)}{ds} + (\rho_m - \rho_w)g \sin \beta bh - \frac{f_0 + f_i}{8} \rho_m u^2 b$$

with bed and internal friction shear stress  $\tau = \frac{f_0 + f_i}{8} \rho_m u^2$  and  $f_i = 0.33f_0$

Momentum term, the left hand side of the Momentum equation reads:

$$\frac{d(\rho_m Qu)}{ds} = 2\rho_m ubh \frac{du}{ds} + \rho_m u^2 b \frac{dh}{ds} + \rho_m u^2 h \frac{db}{ds} + u^2 bh \frac{d\rho_m}{ds}$$

Pressure term, the first term at the right hand side of the Momentum Eq. reads:

$$\frac{d\left(\frac{1}{2}(\rho_m - \rho_w)gbh^2\right)}{ds} = \frac{1}{2}(\rho_m - \rho_w)g \left( h^2 \frac{db}{ds} + 2bh \frac{dh}{ds} \right) + \frac{1}{2}gbh^2 \frac{d\rho_m}{ds}$$

Note: considering  $d\rho/ds$  means that the effect of density gradient on momentum is taken into account and the Boussinesq approximation is not applied as usually done.

Mixture density  $\rho_m = \rho_w (1 + \Delta c)$

with relative sediment density difference  $\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$

$$\frac{d\rho_m}{ds} = \rho_w \Delta \frac{dc}{ds}$$

2. Continuity of water equation:

$$\frac{dQ(1-c)}{ds} = (n_0 v_{erosie} + v_{entr})b$$

3. Continuity of sediment equation

$$\frac{dQc}{ds} = (1-n_0)v_{erosie}b$$

Substitution results in the following equations for the gradients of u, c and h

$$\frac{dc}{ds} = (1-n_0-c) \frac{v_{erosie}}{uh} - c \frac{v_{entr}}{uh}$$

$$\frac{du}{ds} = \left( \frac{v_{erosie}}{u} + \frac{v_{entr}}{u} - \frac{dh}{ds} \right) \frac{u}{h} - \frac{db}{ds} \frac{u}{b}$$

$$(1 - Fr^2) \frac{dh}{ds} = -S_1 \frac{v_{erosie}}{u} + S_3 \frac{v_{entr}}{u} + S_2 \frac{db}{ds} + \sin \beta - \frac{f_0 + f_i}{8} Fr^2$$

with :

$$\text{densiometric Froude number } Fr = \frac{u}{\sqrt{\varepsilon gh}}$$

$$\text{with relative density flow difference } \varepsilon = \frac{\rho_m - \rho_w}{\rho_m} = \frac{\Delta c}{1 + \Delta c}$$

$$S_1 = 2Fr^2 + \left(\frac{1}{2} + \varepsilon Fr^2\right) \left(\frac{1 - n_0 - c}{c}\right)$$

$$S_2 = \left(-\frac{1}{2} + Fr^2\right) \frac{h}{b}$$

$$S_3 = -2Fr^2 + \frac{1}{2} + \varepsilon Fr^2$$

4. Fanning gravity currents (optional):

$$\frac{db}{ds} = \frac{2\sqrt{2\varepsilon gh}}{u}$$

or  $b = b(s)$  by geometry.

The 4 equations can be solved with a simple straight forward solution scheme, that is stable and accurate for  $Fr > 1$  and for instance a 0.5 m step length.

## 3.8 Erosiefunctie

### 3.8.1 Netto erosiesnelheid

De netto erosiesnelheid (retrogressiesnelheid)  $v_e$  (in m/s) gericht loodrecht op het zandbed volgt uit een continuïteitsbeschouwing van het zandbed:

$$v_e = \frac{E - S \cos \alpha}{(1 - n_0) \rho_s} = \frac{\Phi}{(1 - n_0)} v_s - v_{sed} \cos \alpha$$

waarin de dimensieloze erosieflux gedefinieerd is als:

$$\Phi = \frac{E}{\rho_s \sqrt{\Delta g D_{50}}}$$

met  $E$  de erosieflux in  $\text{kg}/\text{sm}^2$ .

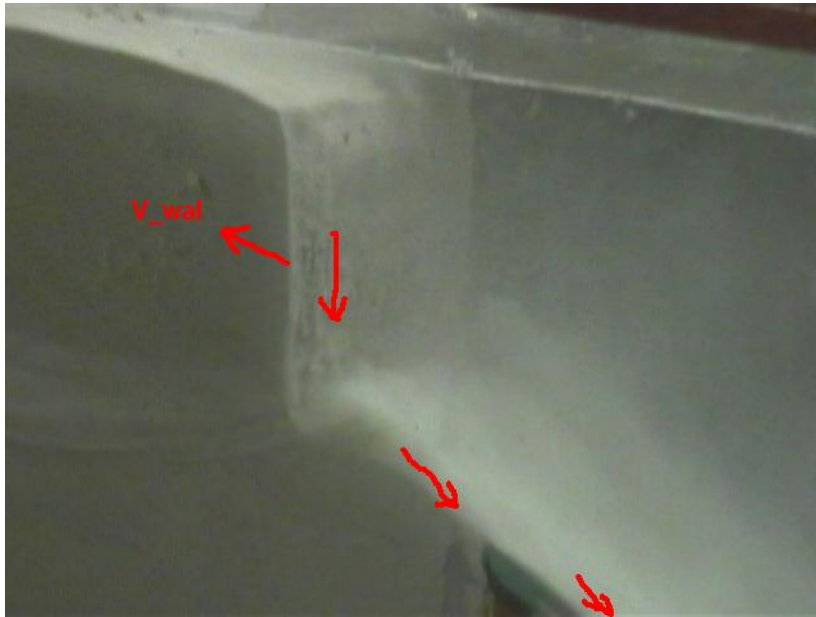


Foto 6 Modelproef bressen talud in fijn zand

**Variant 1 (nieuwe versie)**

De volgende algemene uitdrukking voor de erosieflux ( $\Phi \geq 0$ ) wordt toegepast:

$$\Phi = A(\theta - B)^m D_*^n$$

Uit literatuur en metingen is afgeleid:

$$m = 1.5, n = 0.3, A = 0.018 \text{ with } B = \theta_{cr} = 0.06 \text{ and } f_0 = 0.1. \varphi = 32^\circ$$

Er geldt:

$$\Phi = 0 \text{ for } \theta \leq \theta_{cr} = B \text{ of } B_{eros}$$

**Variant 2 (oude versie)**

De volgende algemene uitdrukking voor de erosieflux ( $\Phi \geq 0$ ) wordt toegepast:

$$\Phi = A(\sqrt{\theta} - B) D_*^{0.3}$$

Uit literatuur en metingen is afgeleid:

$$A = 0.012, B = 1.3. \text{ with } f_0 = 0.1. \varphi = 29^\circ$$

De maximum erosieflux luidt:

$$\Phi_{\max} = 0,033 \frac{(1 - n_0 - c)}{c} \text{ zie Z46.02, 1986}$$



### 3.8.2 Sedimentatiesnelheid

De sedimentatieflux (in kg/sm<sup>2</sup>) volgt uit:

$$S = \rho_s (1 - n_0) v_{sed}$$

De Shields snelheid is gedefinieerd als:

$$v_s = \sqrt{\Delta g D_{50}}$$

De dimensieloze zandkorrelparameter  $D^*$  is gedefinieerd als:

$$D_* = D_{50} \sqrt[3]{\frac{\Delta g}{\nu^2}}$$

De Shields bodemschuifspanningsparameter is gedefinieerd als:

$$\theta = \frac{\tau_0}{\rho_w \Delta g D_{50}} = \frac{f_0}{8} (1 + \Delta c) \left( \frac{u}{v_s} \right)^2$$

De sedimentatiesnelheid (ophoogsnelheid) van het zandbed in m/s is gemodelleerd als:

$$v_{sed} = \frac{w_0 c (1 - c)^4}{1 - n_0}$$

(*evt. in plaats van macht 4 een waarde tussen 3-5, zie Richardson&Zaki, 1954*)

Substitutie levert een tweede-gradsvergelijking waaruit de netto erosiesnelheid kan worden opgelost:

$$\Phi = \frac{E}{\rho_s \sqrt{\Delta g D_{50}}} \frac{\sin(\varphi - \alpha)}{\sin(\varphi)} \left( 1 - \frac{v_e}{v_{wal}} \right) = A(\theta - \theta_{cr})^m D_*^n$$

### 3.8.3 Walsnelheid, doorlatendheid en valsnelheid

De uitdrukking voor de walsnelheid bij bressen luidt:

$$v_{wal} = \frac{i + (1 - n_0) \Delta \frac{\sin(\varphi - \alpha)}{\sin \varphi}}{\Delta n / k_t}$$

waarin de relatieve porositeittoename is gedefinieerd als:

$$\Delta n = \frac{n_\ell - n_0}{1 - n_\ell}$$

Hieruit volgt voor een rechte hoek en een dilatantie van 4% ongeveer  $v_{wal} = 25 k_0$ .

De doorlatendheid  $k_0$  (ongeroerd in situ met index 0 of losgemaakt met index 1) wordt berekend op basis van  $D_{15}$  (korreldiameter fijne fractie  $D_{15}$ ), ongeroerde porositeit  $n_0$  en temperatuur water (temp T) volgens:

$$k_0 = \frac{g D_{15}^2}{160\nu} \frac{n_0^3}{(1-n_0)^2}$$

waarin de kinematische viscositeit voor water:

$$\nu = \frac{40}{20+T} 10^{-6}$$

met T de temperatuur (temp) in °C.

De valsnelheid van het zand bedraagt:

$$w_0 = \frac{1}{18} \frac{\Delta g D_{50}^2}{\nu} \text{ voor } D \leq 100 \mu\text{m}$$

$$w_0 = \frac{10\nu}{D_{50}} \left[ \sqrt{1 + \frac{\Delta g D_{50}^3}{100\nu^2}} - 1 \right] \text{ voor } 100 < D < 1000 \mu\text{m}$$

### 3.8.4 Benaderende oplossingen erosiefunctie

Invullen van de uitdrukking voor de netto erosie snelheid en verwaarlozing van de sedimentatiesnelheid resulteert in:

$$\frac{v_e}{v_s} \left( 1 - \frac{v_e}{v_{wal}} \right) = \frac{A(\theta - \theta_{cr})^m D_*^n}{(1-n_0) \frac{\sin(\varphi - \alpha)}{\sin(\varphi)}}$$

Op een steile terugschrijdende bres ( $\alpha = 90^\circ$ ) zonder stroming ( $\theta = 0$ ), impliceert deze uitdrukking dat de erosiesnelheid dan gelijk is aan de walsnelheid.

Voor lage stroomsnelheid en een relatief goed doorlatend zandpakket in grovere zanden geldt  $v_e/v_{wal} \ll 1$  en kan daarom worden verwaarloosd ( $=0$ ). De oplossing luidt dan:

$$v_e = \frac{A(\theta - \theta_{cr})^m D_*^n}{(1-n_0) \frac{\sin(\varphi - \alpha)}{\sin(\varphi)}} v_s$$

waarin de erosiesnelheid dus niet gehinderd wordt. Voor hoge stroomsnelheid en in een zandpakket met lage doorlatendheid spelen echter dilatantie-effecten een rol en wordt de erosiesnelheid beperkt. In de uiterste situatie dat de term  $v_e / v_{wal} \gg 1$ , kan het getal 1 in de term tussen haken worden verwaarloosd, wat resulteert in een wortel-oplossing:

$$v_e = \sqrt{\frac{-A(\theta - \theta_{cr})^m D_*^n}{(1-n_0) \sin(\varphi - \alpha)}} v_s v_{wal} = \sqrt{\frac{A(\theta - \theta_{cr})^m D_*^n k_c \sqrt{\Delta^3 g D_{50}}}{\Delta n}}$$

met constanten  $m = 1.5$ ,  $f_0 = 0.1$ ,  $\theta_{cr} = 0.06$ ,  $A = 0.018$ .

### 3.8.5 Dilatantie

Voor de term  $\Delta n / k_1$  werd in HMBres de uitdrukking  $1 / (17 k_0) = 0.0588 / k_0$  gebruikt, min of meer karakteristiek voor redelijk vastgepakt fijn zand. Om ook de invloed in minder vast gepakt zand op de erosie te kunnen voorspellen is de  $\Delta n$ , de dilatantie, in de nieuwe versie van HMBreach variabel gemaakt. De porositeit in losgemaakte toestand wordt dan berekend volgens:

$$n_l = \frac{n_0 + \Delta n}{1 + \Delta n}$$

en de bijbehorende waarden van de doorlatendheid (ongeveer 1.5x groter) wordt berekend, zie paragraaf 3.8.3.

## 3.9 Zandverlies en interne wrijving

$$v_{sl} = rk_2 f_i u c$$

$$f_i = f k_i f_0,$$

$$f k_i = 0.333$$

$$rk_2 = 0.125$$

indien geen dwarsstroming in bovenlaag  $rk_2 = 0$

wordt hier op 0 gesteld.

## 3.10 Entrainment (aanzuiging)

$$v_{ent} = rk_3 u Fr_i^2 - k_0 i,$$

$$rk_3 = 0,0015 \text{ voor } Fr_i > 1$$

$$rk_3 = 0 \text{ voor } Fr_i \leq 1 \text{ geen entrainment in subkritische stroming!}$$

Voor de afleiding zie [Mastbergen, vd Berg, 2003]. In het algemeen is er geen sprake van een poriënwaterstroming ten gevolge van een extern verhang dus  $i = 0$ . Voor stabiel gelaagde superkritische stroming geldt dus  $1 < Fr_{i,1} < 2.8$ .

## 4 Documentatie

### 4.1 Archivering

De source code van HMBreach is geplaatst in de volgende repository:  
<https://repos.deltares.nl/repos/delftgeosystems/delftgeosystems/trunk/sources/HMBreach>  
en is als volgt ingedeeld:

- Files (een aantal voorbeeld input bestanden)
- HMBreach.Setup (voor installer configuratie bestand samen met de installer)
- HMBreach (source code van HMBreach)

De source code is geschreven in c# Microsoft Visual Studio 2008. Voor grafieken wordt gebruik gemaakt van de ComponentOne .Net componenten. De installer en de licentie is te vinden op R:\Internet Upgrades\ComponentOne.

### 4.2 Oplevering

Bij dit rapport behoort een installatie-CD. Het gebruik wordt in het volgende hoofdstuk beschreven. Ook een PDF versie van dit rapport staat op deze CD.

## 5 Gebruikershandleiding HMBreach

### 5.1 Installatie procedure

De software is getest op Windows XP Service Pack 2.

- Installatie .Net framework 3.5  
Op de CD staat in de directory Installers de executable “dotnetfx35setup.exe” waarmee u .Net framework 3.5 kunt installeren.
- Installatie HMBreach  
Op de CD staat in de directory Installers de executable “HMBreach.Setup.msi” waarmee u HMBreach kunt installeren.  
Tijdens het installeren kunt u de lokatie van de bestanden opgeven en wordt een shortcut op uw desktop geplaatst waarmee u HMBreach kunt openen.

In de directory “Voorbeeld input bestand” van de installatie CD kunt u een voorbeeld van een input bestand vinden waarmee een eerste berekening uitgevoerd kan worden.

### 5.2 Menu's

File Edit Run

Met File kunnen HMBreach bestanden (met extensie .mbr) geopend of bewaard worden of kan een nieuw bestand worden aangemaakt.

Met Insert / Delete in het Edit menu kunnen lagen ingevoegd of verwijderd worden in de Input tabblad.

Met Run wordt de berekening uitgevoerd.

### 5.3 Tabbladen

Input Output Charts Constants

#### 5.3.1 Input

Tabel 5.1 Bovenrandvoorwaarden:

	Thickness Top (m)	Froude (-)	Concentration (%)	Retrogression velocity (mm/s)	Flowwidth0 (m)
General	0	2	12	0.5	1

Retrogression Velocity = stationaire terugschreidsnelheid van het talud in stationaire evenwichtssituatie (bij winzuigen gelijk aan gemiddelde verhaalsnelheid).

Bijvoorbeeld op basis van boorstaten wordt een laagverdeling opgesteld met per laag dikte, en zandeienschappen, zoals korreldiameter en porositeit die worden ingevoerd in het inputscherm.

Ook kan een bestaande input file worden ingelezen.

Tabel 5.2 Invoer eigenschappen zandlagen

	Thickness (m)	FlowWidth	Porosity (%)	D50 (mu)	Permeability (mm/s)	Vwal (mm/s)	User D15?	D15 (mu)	Equilibrium	Iterations (-)	Calc. points (-)	Alpha (grd)
Layer 1	1	1	40	200	0.124601	4.9352E+000	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	10	352	34.8633
Layer 2	1	1	40	200	0.124601	6.3162E+000	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	10	37	34.1824
Layer 3	1	1	40	200	0.124601	6.3162E+000	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	13	21	32.5300
Layer 4	1	1	40	200	0.124601	6.3162E+000	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	12	15	29.5756
Layer 5	1	1	40	200	0.124601	6.3162E+000	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	11	13	26.1675
Layer 6	1	1	40	200	0.124601	6.3162E+000	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	10	12	22.7943
Layer 7	1	1	40	200	0.124601	6.3162E+000	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	10	11	19.8560
Layer 8	1	1	40	200	0.124601	6.3162E+000	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	9	11	17.2189
Layer 9	1	1	40	200	0.124601	6.3162E+000	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	8	12	14.7975
Layer 10	1	1	40	200	0.124601	6.3162E+000	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	5	12	12.9478
Layer 11	1	1	40	200	0.124601	6.3162E+000	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	5	12	11.3293
Layer 12	1	1	40	200	0.124601	6.3162E+000	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	9	13	10.0017
Layer 13	1	1	40	200	0.124601	6.3162E+000	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	8	14	8.9077
Layer 14	1	1	40	200	0.124601	6.3162E+000	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	8	14	7.3334
Layer 15	1	1	40	200	0.124601	6.3162E+000	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	7	14	7.1897
Layer 16	1	1	40	200	0.124601	6.3162E+000	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	7	15	6.5157
Layer 17	1	1	40	200	0.124601	6.3162E+000	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	8	15	6.0066
Layer 18	1	1	40	200	0.124601	6.3162E+000	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	6	15	5.6312
Layer 19	1	1	40	200	0.124601	6.3162E+000	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	7	16	5.1033
Layer 20	1	1	40	200	0.124601	6.3162E+000	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	6	16	4.7843
Layer 21	1	1	40	200	0.124601	6.3162E+000	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	6	17	4.4853
Layer 22	1	1	40	200	0.124601	6.3162E+000	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	6	17	4.2050
Layer 23	1	1	40	200	0.124601	6.3162E+000	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	6	17	3.9422
Layer 24	1	1	40	200	0.124601	6.3162E+000	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	7	17	3.8190
Layer 25	1	1	40	200	0.124601	6.3162E+000	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	6	18	3.5803
Layer 26	1	1	40	200	0.124601	6.3162E+000	<input type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>	6	18	3.3565

Indien de optie “User D15?” per laag geselecteerd wordt, dan wordt aan de hand van de opgegeven korrelgrootte D15 de permeabiliteit berekend. Zoniet dan wordt dit default gedaan op basis van de D50.

Let op: De walsnelheid Vwal samen met de Permeabiliteit zijn output variabelen die per laag worden weergegeven.

### 5.3.2 Output

Tabel 5.3 Resultaten per zandlaag

	Index	X (m)	Z (m)	Zw (m)	H (m)	U (m/s)	C (-)	Fr (-)	VEros (m/s)	Q (m³/s)	SZ (kg/s)	VSed (m/s)	VENr (m/s)	b (m)
	1	0.0000E+000	-5.0000E-001	-4.9396E-001	6.2536E-003	1.9988E-001	1.2000E-001	2.0000E+000	2.9070E-004	1.2500E-003	3.9750E-001	2.8187E-003	1.1993E-003	1.0000E+000
	2	4.0708E-003	-5.0284E-001	-4.9980E-001	5.3100E-003	2.3123E-001	1.1998E-001	2.4919E+000	2.9070E-004	1.2278E-003	3.9039E-001	2.8189E-003	2.1537E-003	1.0000E+000
	3	8.1415E-003	-5.0567E-001	-5.0289E-001	4.8639E-003	2.5294E-001	1.1995E-001	2.8529E+000	2.9070E-004	1.2303E-003	3.8960E-001	2.8133E-003	3.0879E-003	1.0000E+000
	4	1.2212E-002	-5.0851E-001	-5.0587E-001	4.6154E-003	2.6931E-001	1.1898E-001	3.1283E+000	2.9070E-004	1.2430E-003	3.9057E-001	2.8033E-003	3.9533E-003	1.0000E+000
	5	1.6283E-002	-5.1134E-001	-5.0879E-001	4.4761E-003	2.8200E-001	1.1727E-001	3.3419E+000	2.9070E-004	1.2622E-003	3.9224E-001	2.7898E-003	4.7242E-003	1.0000E+000
	6	2.0354E-002	-5.1418E-001	-5.1166E-001	4.4067E-003	2.9193E-001	1.1584E-001	3.5072E+000	2.9070E-004	1.2864E-003	3.9422E-001	2.7705E-003	5.3863E-003	1.0000E+000
	7	2.4425E-002	-5.1702E-001	-5.1451E-001	4.3653E-003	2.9973E-001	1.1379E-001	3.6344E+000	2.9070E-004	1.3144E-003	3.9632E-001	2.7489E-003	5.9387E-003	1.0000E+000
	8	2.8495E-002	-5.1985E-001	-5.1734E-001	4.2983E-003	3.0589E-001	1.1178E-001	3.7317E+000	2.9070E-004	1.3454E-003	3.9847E-001	2.7249E-003	6.3895E-003	1.0000E+000
	9	3.2565E-002	-5.2269E-001	-5.2015E-001	4.4263E-003	3.1079E-001	1.0985E-001	3.8055E+000	2.9070E-004	1.3787E-003	4.0064E-001	2.6989E-003	6.7517E-003	1.0000E+000
	10	3.6637E-002	-5.2552E-001	-5.2298E-001	4.4527E-003	3.1471E-001	1.0790E-001	3.8617E+000	2.9070E-004	1.4139E-003	4.0279E-001	2.6716E-003	7.0399E-003	1.0000E+000
	11	4.0708E-002	-5.2836E-001	-5.2579E-001	4.5628E-003	3.1789E-001	1.0595E-001	3.9041E+000	2.9070E-004	1.4509E-003	4.0494E-001	2.6495E-003	7.2679E-003	1.0000E+000
	12	4.4779E-002	-5.3120E-001	-5.2854E-001	4.6433E-003	3.2051E-001	1.0322E-001	3.9360E+000	2.9070E-004	1.4882E-003	4.0708E-001	2.6149E-003	7.4461E-003	1.0000E+000
	13	4.8849E-002	-5.3403E-001	-5.3133E-001	4.7315E-003	3.2269E-001	1.0114E-001	3.9601E+000	2.9070E-004	1.5268E-003	4.0921E-001	2.5860E-003	7.5907E-003	1.0000E+000
	14	5.2920E-002	-5.3687E-001	-5.3411E-001	4.8256E-003	3.2454E-001	9.9117E-002	3.9781E+000	2.9070E-004	1.5661E-003	4.1134E-001	2.5571E-003	7.7038E-003	1.0000E+000
	15	5.6991E-002	-5.3970E-001	-5.3696E-001	4.9241E-003	3.2613E-001	9.7199E-002	3.9916E+000	2.9070E-004	1.6059E-003	4.1347E-001	2.5289E-003	7.7942E-003	1.0000E+000
	16	6.1062E-002	-5.4254E-001	-5.3967E-001	5.0260E-003	3.2753E-001	9.5271E-002	4.0016E+000	2.9070E-004	1.6461E-003	4.1560E-001	2.5001E-003	7.8669E-003	1.0000E+000
	17	6.5132E-002	-5.4537E-001	-5.4244E-001	5.1304E-003	3.2877E-001	9.3459E-002	4.0089E+000	2.9070E-004	1.6867E-003	4.1773E-001	2.4722E-003	7.9258E-003	1.0000E+000
	18	6.9203E-002	-5.4821E-001	-5.4522E-001	5.2369E-003	3.2990E-001	9.1709E-002	4.0143E+000	2.9070E-004	1.7276E-003	4.1986E-001	2.4448E-003	7.9741E-003	1.0000E+000
	19	7.3274E-002	-5.5105E-001	-5.4799E-001	5.3448E-003	3.3093E-001	9.0033E-002	4.0180E+000	2.9070E-004	1.7687E-003	4.2200E-001	2.4179E-003	8.0141E-003	1.0000E+000
	20	7.7345E-002	-5.5388E-001	-5.5077E-001	5.4538E-003	3.3189E-001	8.8425E-002	4.0206E+000	2.9070E-004	1.8100E-003	4.2414E-001	2.3915E-003	8.0477E-003	1.0000E+000
	21	8.1415E-002	-5.5672E-001	-5.5354E-001	5.5637E-003	3.3278E-001	8.6883E-002	4.0223E+000	2.9070E-004	1.8515E-003	4.2629E-001	2.3657E-003	8.0762E-003	1.0000E+000
	22	8.5486E-002	-5.5955E-001	-5.5631E-001	5.6742E-003	3.3363E-001	8.5403E-002	4.0233E+000	2.9070E-004	1.8931E-003	4.2844E-001	2.3406E-003	8.1007E-003	1.0000E+000
	23	8.9557E-002	-5.6239E-001	-5.5908E-001	5.7852E-003	3.3445E-001	8.3981E-002	4.0237E+000	2.9070E-004	1.9348E-003	4.3060E-001	2.3199E-003	8.1221E-003	1.0000E+000
Layer 1	24	9.3628E-002	-5.6523E-001	-5.6186E-001	5.8965E-003	3.3522E-001	8.2617E-002	4.0237E+000	2.9070E-004	1.9767E-003	4.3276E-001	2.2919E-003	8.1410E-003	1.0000E+000

Per laag worden per stap de deulitkomsten weergegeven. In het inputscherm wordt aangegeven of voor de betreffende laag een evenwichtshelling is gevonden (Model Breach). Het stopcriterium voor de iteraties wordt bereikt indien de bres in evenwicht is of het maximum aantal iteraties is bereikt.

De parameters worden toegelicht in hoofdstuk 7 “Symbolenlijst”.

### 5.3.3 Charts

In de chart kunnen de volgende uitvoerresultaten worden weergegeven (via keuze menu plot):

- $b(z)$  ofwel de fit functie voor de breedte
- Graphs als functies van X voor Z, U, H, VEros, Vsed, Fr, C, B, Q, SZ, ZW, Ventr

Initieel wordt de fit functie  $B(z)$  weergegeven.

Met behulp van de Linker en Rechter optie is het mogelijk om twee verschillende variabelen in een grafiek weer te geven. Zie onderstaande figuur als voorbeeld met berekend talud (Z) en stroomsnelheid (U).



De grafiek kan in bitmap formaat worden opgeslagen door op de knop rechtsonder “Save Picture As” te drukken.

### 5.3.4 Constants

- Chart  
Met behulp van de optie ChartColor kan de achtergrond kleur van de grafiek worden aangepast. Met ChartTitle kan de titel opgegeven worden en ChartTitleSize de grootte van die titel.
- FlowWidth parameters voor de iteratieve fit algoritme voor de breedte:
  - o FlowWidthFitIterations geeft aan hoeveel iteraties er maximaal gebruikt mogen worden voor het convergeren naar het eindresultaat



Tabel 5.3 Constants

<b>Chart</b>	
ChartColor	<input type="checkbox"/> White
ChartTitle	HMBreach
ChartTitleSize	20
<b>FlowWidth</b>	
FlowWidthFilterations	1000
FlowWidthFitType	POLY4
FlowWidthType	b_constant
<b>Model</b>	
ErosieFormulering	Variant2
Model	Breach
<b>Numerical constants</b>	
alfa_reset	False
alfa0	75
na	15
<b>Physical constants</b>	
a_1_p0	1
Aeros	0.012
Beros	1.3
d50d15	1.75
dn	0.04
f0	0.1
fki	0.333
g	9.81236
i	0
phi	32
rhos	2650
rhow	1000
rk3	0.0015
temp	15

De fit functie beschikt over de volgende algoritmen (FlowWidthFitType)

- Straight Line
- Poly2
- Poly3
- Poly4
- Exp
- Power
- Log
- RodBard
- Gamma variatie

Voor zowel Turb als Breach levert de algoritme Poly4 de beste resultaten.

FlowWidthType:

- B-Constant  
 Constante breedte (1 dimensionaal)
- B-Fit  
 Als je deze aanklinkt dan kun je b per laag invoeren. Voor elke iteratie wordt de waarde van b verfijnt door gebruik te maken van de fit functie.
- B-Calc  
 Voor een vrije spreiding onder invloed van de zwaartekracht (ook wel de free fanning flow genoemd) wordt de breedte van de stroming berekend (zie hoofdstuk 5).

- Model

- Erosieformulering. 2 varianten, zie hoofdstuk 3.8.
- Model. 2 mogelijkheden, zie hoofdstuk 3.3:
- Breach

Indien evenwicht bij een bepaalde laag is bereikt wordt Equilibrium aangevinkt. Is dit niet het geval dan verdient het aanbeveling de invoerwaarden te controleren of aan te passen (bijv. snelheid), dan wel de laag te splitsen in dunnere sublagen of de resultaten te accepteren. Echter in sommige gevallen is er feitelijk geen evenwicht mogelijk.

- Turb  
Voor de versie Turb worden geen evenwichtsiteraties uitgevoerd maar wordt uitgegaan van de door de gebruiker opgegeven laaghoek Alpha. Hiermee kan de stroming op een bestaande helling gemodelleerd worden.
- Numerical constants
  - alfa\_reset: False/true :wel/niet terugzetten van laaghoek bij evenwichtsiteraties
  - alfa\_0 :laaghoek waarmee de evenwichtsiteratie begint.
  - na: maximum aantal iteraties per laag.
- Physical constants
  - constanten in de vergelijkingen en in het erosiemodel.
  - factor  $a_{1-n_0} = 1$  dan geldt  $a = 1/(1-n_0)$  zie paragraaf 3.8.3
  - dn, dilatantie zie paragraaf 3.8.3, 3.8.5
  - factor  $d_{50d15} = 1.75$  dan geldt  $d_{15} = d_{50}/1.75$
  - Zie verder hoofdstuk 3, 6 en 7.

Weergave berekeningsresultaten per laag in Inputscherm. Deze zijn niet door de gebruiker in te stellen maar worden na berekening door het programma ingevuld.

## 6 Berekeningen

### 6.1 Rekenvoorbeeld

In het meegeleverde invoerbestand default.mbr zijn de invoergegevens opgenomen als voorbeeld een zandwinput met een homogeen vastgepakt fijn zand met  $d_{50} = 200 \mu$  (default.mbr) over 30 m diepte. Zie ook paragraaf 5.3.3.

### 6.2 Gevoeligheidsanalyse

Onderzocht is de gevoeligheid voor de volgende fysische constanten:

- korreldiameter
- Invloed erosiefunctie : variant 1 / 2, constants Aeros, Beros,
- Zandeigenschappen: korreldiameter, porositeit,  $\phi$ ,  $dnk/k_0$ ,  $a/1-n_0$
- Stroming:  $f_0$ ,  $f_{ki}$ ,  $rk_3$

De gevoeligheid voor het erosiemodel hangt af van het stroomregime: hoge-snelheids of lage snelheidserosie.

- Bij lage snelheid cq grof zand:  $\Theta_{acr}$  (= B) van belang, drempelwaarde
- Bij hoge snelheid cq fijn zand: doorlatendheid en pakking

Gevoeligheid voor  $f_0$

Gevoeligheid voor translatiesnelheid

Totale taludhoogte/ diepte put

Tabel 6.1 Constanten invoerparameters Erosiemodel Variant 2  
(gevalideerd BAGT 517, 1993)

Parameter	waarde
erosieformulering	Variant2
A	0.012
B	1.3
$f_0$	0.1
$\phi$	32°

Tabel 6.2 Constanten invoerparameters Variant 1  
 (verbeterd maar nog niet gevalideerd, 2003)

Parameter	waarde
erosieformulering	Variant1
A	0.018
B	1.3
f_0	0.05
$\varphi$	32°

### Model

#### Breach / Turb

Breach berekent de evenwichtsvorm die resulteert in een steeds flauwer wordend talud.

Turb: gevoelig voor kritische helling / taludhoogte bij gegeven zandsoort waarvoor juist wel of juist niet acceleratie ontstaat, dus uitdemping of ontwikkeling van een zichzelf versterkende suspensiestroming (turbidity current) met een mogelijke taludinschering (bresvloeiing).

Met deze versie kan een bestaand talud of ontwerp bijv. met bermen nagerekend worden op gevoeligheid voor bresvloeiing. Een initiële beperkte taludverstoring werkt dan als “trigger” van een bresvloeiing indien het talud voldoende steil en hoog is en het zand voldoende erosiegevoelig.

In tabel 6.3 zijn de resultaten van een gevoeligheidsanalyse samengevat voor het in de vorige pragraaf geven voorbeeld een zandwininput met homogeen zand. Gekeken is naar de invloed op de berekende stroomsnelheid en de evenwichtstaludhelling als functie van de diepte.

De invloed van de invoer, de numerieke constanten en de fysieke constanten is weergegeven in de derde kolom bij een default waarde zoals gegeven in de tweede kolom. Vooral de gevoeligheid voor de parameters in het erosiemodel is sterk. De resultaten moeten dan ook integraal geverifieerd worden in praktijkomstandigheden, dit is tot nog toe alleen gedaan voor laboratoriumschaal (Baggergoot). De waarden volgens tabel 6.1 geven in het algemeen wel realistische waarden voor de praktijk, maar andere combinaties zijn ook mogelijk.

Tabel 6.3 Gevoeligheidsanalyse. Testgeval zandwinput met  $d_{50} = 200 \mu$  (default.mbr) homogeen vastgepakt zand over 30 m diepte

Parameter	waarde	invloed
<b>Input</b>		
Fr0	2	gering
c0	12%	gering
dbr0	0,5 m	gering
v_z	1 mm/s	sterk
<b>Constants</b>		
alfa_reset	False / True	gering
alfa0	75	gering
Na	15	gering
erosieformulering	Variant1	sterk
<b>Physical constants</b>		
a_1_n_0	1	gering
Aeros	0.012	sterk / gering bij hoge / lage stroomsnelheden
Beros	1.3	sterk / gering bij lage / hoge stroomsnelheden
d50d15	1.75	sterk
dn	0.04	sterk
f0	0.1	sterk
fki	0.333	sterk
g	9.81236	sterk
phi	32	gering
rhos	2650	sterk
rhow	1000	sterk
rk3	0.0015	sterk
Temp	15	sterk

## 7 Symbolenlijst

$\alpha$	= bed slope angle ( $^{\circ}$ )
$b$	= flow width (m)
$c$	= depth averaged sand volume concentration (-),
$\Delta$	= relative density of particles (-)
$\varepsilon$	= relative density difference between density flow and ambient water (-)
$f_0$	= Darcy-Weisbach friction coefficient of sand bed (-)
$f_i$	= idem friction coefficient of internal boundary layer (-)
$Fr_i$	= internal Froude number (-)
$F$	= Froude number (squared) (-)
$g$	= gravity acceleration ( $m/s^2$ )
$h$	= flow depth or thickness (m)
$i$	= hydraulic gradient (+ or -)
$n_0, n$	= porosity of the sand bed (-)
$q$	= specific flow rate = $u h$ ( $m^2/s$ )
$u, \bar{u}$	= flow velocity (averaged over flow layer thickness) (m/s),
$\rho_m$	= density of the sand-water mixture ( $kg/m^3$ ),
$\rho_w$	= density of the water ( $kg/m^3$ ),
$\rho_s$	= density of particles ( $kg/m^3$ ),
$s$	= downstream distance along the bed (m),
$\tau_0$	= bed shear stress (Pa)
$\tau_i$	= shear stress in the internal boundary layer (Pa)

$u$	= flow velocity (m/s)
$v_e$	= net sand bed erosion velocity perpendicular to bed (m/s),
$v_{entr}$	= ambient water entrainment velocity (m/s),
$x$	= horizontal distance (m)
$z$	= distance to the bed (m)
$\Phi$	= dimensionless pick-up rate or erosion velocity
$E$	= sediment pick-up rate perpendicular to the bed (kg/sm <sup>2</sup> ),
$D^*$	= dimensionless grainsize parameter,
$A$	= coefficient (about 0.018),
$m$	= shear stress power in erosion function ( $m= 1.5$ ),
$n$	= grain size power in erosion function ( $n = 0.3$ ),
$D_{50}$	= median grainsize (m),
$\nu$	= kinematic viscosity of the sea water (m <sup>2</sup> /s),
$\Theta_{cr}$	= critical Shields bed shear stress (value depending on grainsize)
$\Theta$	= bed shear stress or particle mobility parameter (-)
$\tau_0$	= bed shear stress (Pa),
$v_s$	= (by definition) Shields-velocity for sand grains (m/s),
$n_0$	= undisturbed (in situ) volume porosity of the sand bed (-)
$D_{15}$	= 15 <sup>th</sup> percentile of the cumulative bed material grainsize distribution (m).
$\Delta n$	= porosity increase of the sand bed from undisturbed to loose conditions,
$n_l$	= porosity of the loose sand bed and after dilation
$k_l$	= permeability of the loose sand bed (m/s).
$w_0$	= fall velocity of single sand particle (m/s).

## 8 Referenties

CUR Aanbeveling 113 – Oeverstabiliteit bij Zandwinputten, CUR Bouw & Infra, Gouda, augustus 2008

Scour hole slope instability in sandy soil, M.B. de Groot and D.R Mastbergen, Proc. of the 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Scour and Erosion, 2006, Amsterdam

Mastbergen, D.R. en M.B. de Groot, Numerieke modellering taludvorming bij zandwinning, Delft Cluster rapport, DC1-321-10, juni 2003

“Mini-symposium” 15 februari 2006 bij GeoDelft, Modelling of Bank Failure due to Breaching, Dick R. Mastbergen

“Discussiebijeenkomst stand van zaken Zettingsvloeiingsonderzoek”, Deltares, 26 november 2008

Baggerdepot Hollandsch Diep, Globale beoordeling ontwerp, Deltares, in opdracht van RWS Bouwdienst, 427540-0027, 2008

Zettingsvloeiing bij ontgrondingskuil Oosterscheldekering, Deltares, in opdracht van RWS Bouwdienst, 427540-0029, 2008

GeoDelft, Handboek Zettingsvloeiingen, CO-353260/10;

T.P. Stoutjesdijk, M.B. de Groot & J. Lindenberg, Flow slide prediction method: influence of slope geometry, Canadian Geotechnical Journal, 35, 1998, blz.34–54;

J.H. van den Berg, A. van Gelder & D.R. Mastbergen, The importance of breaching as a mechanism of subaqueous slope failure in fine sand, Sedimentology 49, 2002. blz. 81-95).

Cruden, D.M. and Varnes, D.J. (1996). Landslide types and processes in “Landslides – Investigation and Mitigation”, Transportation Research Board Special Report No. 247, (A.T. Turner and R.L. Schuster editors). National Academy Press, Washington DC, 36-75.

Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M., and Hutchinson, J.N., 2001. Review of the classification of landslides of the flow type. Environmental and Engineering Geoscience, VII:221-238.

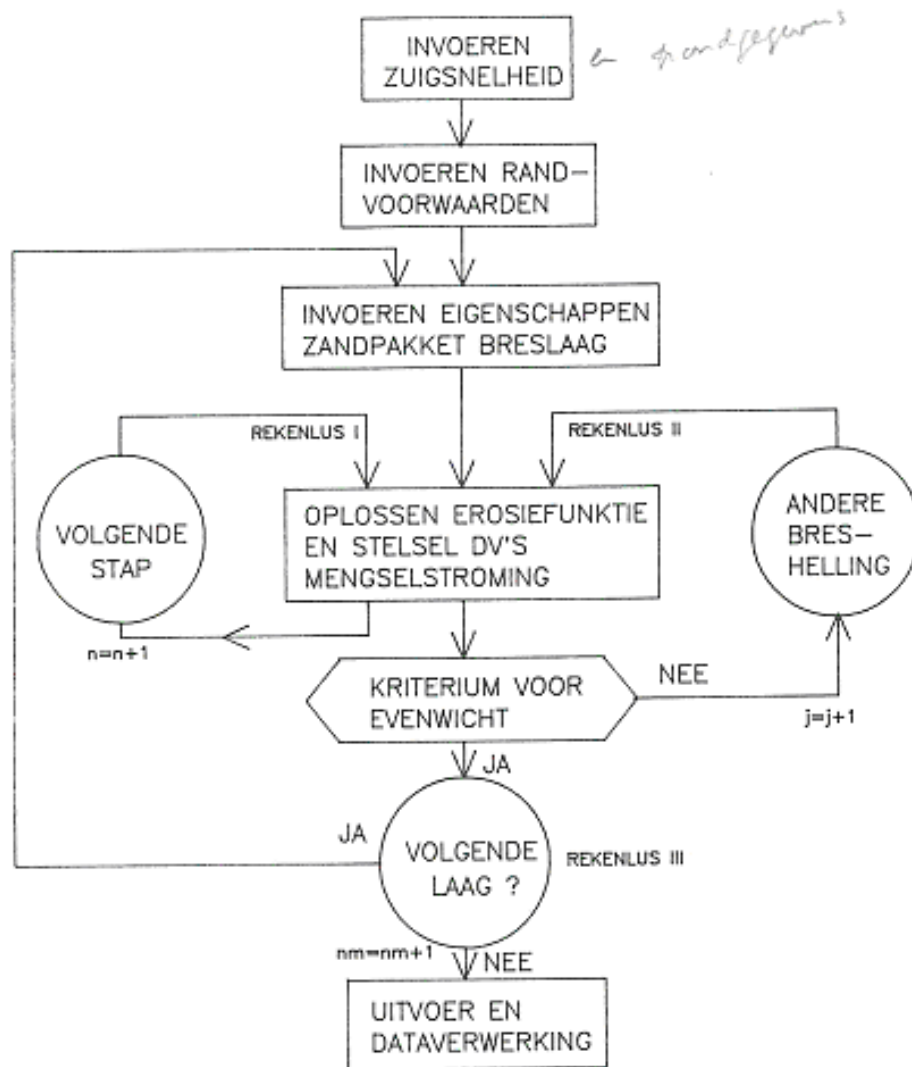
Winterwerp, J.C., Bakker, W.T., Mastbergen, D.R. and Van Rossum, H. (1992) Hyperconcentrated sand-water mixture flows over erodible bed. J. Hydraul. Eng., 118, 1508-1525

Mastbergen, D.R. and Van den Berg, J.H., Breaching in fine sands and the subsequent generation of sustained turbidity currents in submarine canyons, Sedimentology, 2003

Numerieke modellering taludvorming bij zandwinning, Delft Cluster, DC1-321-10, D.R. Mastbergen, M.B. de Groot, 2003



- Het gedrag van zand-watermengselstromingen boven water; experimenteel vervolgonderzoek, WL|Delft Hydraulics, Z46-02, D.R. Mastbergen, 1987
- Zand-watermengselstromingen; het storten van zand onder water, WL|Delft Hydraulics, Z216, D.R. Mastbergen, 1988
- Zand-watermengselstromingen; het storten van zand onder water (middelgrof zand), WL|Delft Hydraulics, Z261, D.R. Mastbergen, 1989
- Zand-watermengselstromingen; wiskundig model terrasvormig stort, WL|Delft Hydraulics, Z299, D.R. Mastbergen, 1989
- Bresproeven tijdens het zuigen van zand, WL|Delft Hydraulics, BAGT 415, C. van Rhee, 1988
- Bresproeven tijdens het zuigen van zand, II, WL|Delft Hydraulics, BAGT 434, C. van Rhee, 1989
- Theorie hoge-snelheidsrosie, WL|Delft Hydraulics, BAGT 451, C. van Rhee, 1990
- Nadere analyse Hoge-snelheidsrosie, WL|Delft Hydraulics, BAGT 466, div. auteurs, 1990
- Hydraulisch model HMBres, WL|Delft Hydraulics, BAGT 454, D.R. Mastbergen, 1990 (confidential)
- SANDPIT, European Community Research 5th Framework Programme, Paper AL, Sand transport along pit slopes due to turbidity currents, L. van Rijn et al, 2005
- Provincie Overijssel, Beperking van risico's op stabiliteitsverlies van taluds bij diepe zandwinningen in Overijssel, notitie Provincie Overijssel, Zwolle, 1997.
- Provincie Overijssel, Beleidsnotitie taludinstabiliteit en veiligheid diepe zandwinningen in Overijssel, Provincie Overijssel, Zwolle, 2001.
- CUR-rapport/report 152, Kunstmatig onder water gestorte zandlichamen / Artificial sand fills in water, CUR, Gouda, 1992
- Mastbergen, D.R., Taludstabiliteit en veiligheid bij diepe zandwinningen in Overijssel, WL|Delft Hydraulics in opdracht van Provincie Overijssel, Z3014, 2001
- Koning, J. de, Neue Erkenntnisse beim Gewinnen und Transport von Sand im Spülproject Venserpolder, V.D.I. Tagung "Bauen im Ausland", Hamburg, 1-9, 1970.
- Van Rhee, C., en A. Bezuijen, Influence of seepage on stability of sandy slope, J. Geotechnical Eng., 11/8, 1992.
- Verwekingsvloeiing in zand, Geotechniek, oktober 2007, blz. 54 – 59.
- Bresvloeiing in zand, Geotechniek, juni 2009



Bijlage 1 Rekenschema HMBres / HMBreach