

Opdrachtgever:

WL | Delft Hydraulics

## Oeverstabiliteit in zandwinputten

DC 04 43 11

Rekenmodel HMBreach

Report

oktober 2007

**WL | delft hydraulics**

Opdrachtgever:

WL | Delft Hydraulics

Oeverstabiliteit in zandwinputten

DC 04 43 11

Rekenmodel HMBreach

Dick R. Mastbergen

Report

oktober 2007

## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding en kaderstelling .....</b>	<b>1</b>
1.1	Achtergrond .....	1
1.2	Oeverstabiliteit zandwinputten, CUR C130 .....	2
1.3	Delft Cluster WP 04 43 11 Oeverstabiliteit bij verdieping waterbodemb .....	4
1.3.1	Onderzoekskader .....	4
1.3.2	Activiteiten .....	5
1.3.3	Nieuw te ontwikkelen kennis .....	6
1.4	Inpassing in Delft 3D .....	7
1.5	Werking oorspronkelijke FORTRAN rekenmodel HMBres en gewenste verbeteringen .....	8
1.6	Verdere verbeteringen HMBreach .....	9
<b>2</b>	<b>Bressen als mechanisme voor taludinstabiliteit .....</b>	<b>11</b>
2.1	Het verschijnsel oevertal .....	11
2.2	Het zandzuigproces .....	12
2.3	Taludontwikkeling bij beheerst bressen .....	14
2.4	Bresvloeiing .....	15
2.5	Abstract: Breaching as an instability in subaqueous dredged sand slopes .....	17
<b>3</b>	<b>Rekenmodel HMBreach .....</b>	<b>17</b>
3.1	Doel rekenmodel .....	17
3.2	Mogelijkheden en beperkingen model .....	18
3.3	Wiskundige beschrijving .....	19
3.3.1	Stelsel vergelijkingen voor zand-watermengselstroming .....	19
3.3.2	Bovenrandvoorwaarden .....	21

3.3.3	Erosiefunctie .....	22
3.3.4	Zandverlies en interne wrijving.....	26
3.3.5	Entrainment (aanzuiging).....	26
<b>4</b>	<b>Documentatie .....</b>	<b>27</b>
<b>5</b>	<b>Gebruikershandleiding HMBreach.....</b>	<b>28</b>
5.1	Menu's.....	28
5.2	Tabbladen .....	28
5.2.1	Input.....	28
5.2.2	Constants.....	29
5.2.3	Charts.....	31
5.2.4	Output.....	32
<b>6</b>	<b>Voorbeeld .....</b>	<b>33</b>
6.1	Gevoeligheidsanalyse.....	33
6.2	Zandwinput.....	36
6.3	Turbidity currents.....	36
<b>7</b>	<b>Symbolenlijst .....</b>	<b>37</b>
<b>8</b>	<b>Referenties .....</b>	<b>39</b>

# I Inleiding en kaderstelling

## I.1 Achtergrond

Dit rapport is geschreven ten behoeve van de rapportage Speurwerk WL | Delft Hydraulics Z4141.20. Dit betreft het flankerend speurwerk voor Delft Cluster WP 04 43 11 (Z3999.20) waarvoor in 2007 de rapportage zal worden opgeleverd.

In het verleden is in het kader van het onderzoek Storten van zand voor RWS Deltadienst en CSB Combinatie Speurwerk baggertechniek en het onderzoek snijden, zuigen, bressen, jetten en sleepzuigen kortom het Baggeronderzoek van WL | Delft Hydraulics in de jaren '70 tot '90 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 een rekenmodel 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 oeverinscheringen te wijten zijn aan een onbeheerst bresproces. 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 C130 die is opgesteld in samenwerking met vergunningverleners, zandwinners en consultants en met GeoDelft (Z3483, Z3404).

Daarnaast is in kader van Delft Cluster een verder onderzoek gestart, WP 04 43 11, waarbij WL | Delft Hydraulics het rekenprogramma HMBreach verder zal ontwikkelen en aan de participanten beschikbaar stellen. 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 door R. Brinkman.



Foto 1 Bresgroeiproef 't Zwin, 1994

## 1.2 Oeverstabiliteit 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 ir-bureau's.

Om het ruimtebeslag van zandwinningen 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 bevordert.

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 moeten worden door adviescommissie met code C130..



Foto 2 Zevenhuizerplas





Foto 3 Winzuiger Hollands Diep

## **1.3 Delft Cluster WP 04 43 | I Oeverstabiliteit bij verdieping waterbodem**

### **1.3.1 Onderzoekskader**

In de “Blik op de toekomst” van de CUR commissie C130 is gesteld dat kennisontwikkeling in de komende jaren zich zou moeten richten op de volgende doeleinden:

- 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
- 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 kan bereikt worden 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 WL | Delft Hydraulics en GeoDelft.

Op het “Mini-symposium” van 15 februari 2006 is besloten dat dit de meest kansrijke methode is om gezien budget en tijd op korte termijn resultaten te bereiken.

In het kader van Delft Cluster is reeds in een gezamenlijk rapport opgesteld in 2003 aangeduid hoe deze numerieke modellering zou kunnen worden verwezenlijkt.

In het huidige Delft Cluster is een koppeling en integratie van de rekenmodellen voorzien. Op een gefaseerde wijze zal dit numerieke model worden opgeleverd en uitgebreid tot een model dat gevalideerd is en geschikt is voor gebruik in de adviespraktijk door de participanten in het Delft Cluster onderzoek.

Voor de validatie van het rekenmodel zal in eerste instantie een veldmeting worden opgezet om de taludvorming in een praktijksituatie bij een zandwinning te meten (zie voorstel).



### 1.3.2 Activiteiten

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

Met een gefaseerde aanpak worden ook tussenprodukten verkregen waarmee de participanten desgewenst zelf kunnen rekenen.

Om te kunnen beginnen dient de huidige programmatuur aangepast en onder Windows te worden geherprogrammeerd. Hiervoor wordt voorgesteld in C#.net te ontwikkelen waarmee gemakkelijk kan worden aangesloten op moderne software omgeving. De in-en uitvoer wordt eenvoudig gehouden via databestanden waarmee de gebruiker grafieken kan genereren. De software wordt getest en 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 MSLIQ 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.

- Aanpassen Bresmodel tot een Windows versie (HMBreach)
- Programmeren Invoermodule voor geotechnische data (i.s.m. GeoDelft)
- Programmeren Uitvoermodule met grafieken en tabellen
- Schrijven documentatie en handleiding

Verdere activiteiten bestaan uit bijdrage Minisymposium, werkgroepbijeenkomsten en publicatie.



Foto 4 Zandwinput Haerst te Zwolle

### 1.3.3 Nieuw te ontwikkelen kennis

Dit work package 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

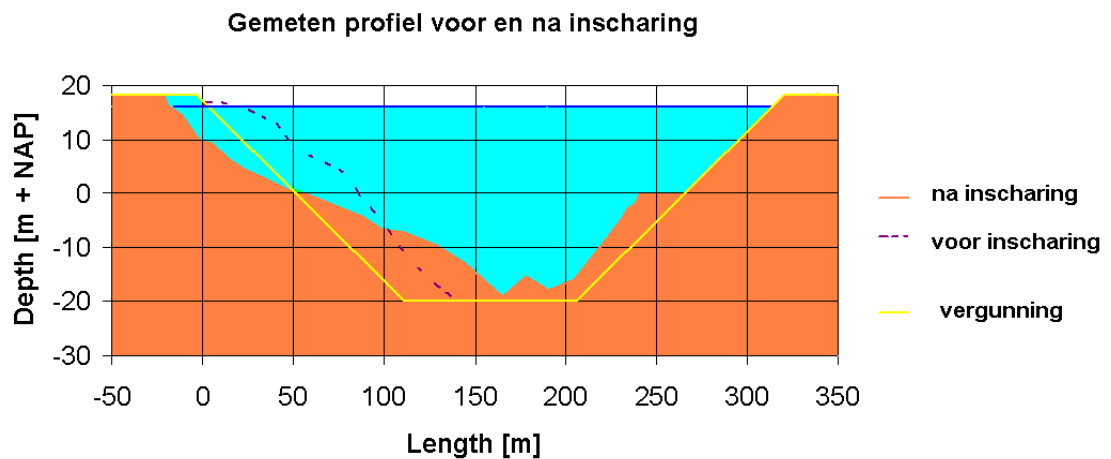
Dit deel van het work package combineert modellen voor bresgroei en zettingsvloeiing tot één praktisch bruikbaar softwareproduct.

- Wetenschappelijk vernieuwend is de ontwikkeling van een betrekkelijk eenvoudig model om het probleem van de kwantificering van de interactie te reduceren volgens de wijze die uiteengezet is in DC1-321-10. (onderdeel C)
- Meer fundamenteel is de ontwikkeling van een eindige-elementenmodel, eveneens gericht op dit probleem (onderdeel D).
- Beide modelleringen behoeven verificatie aan de hand van metingen in zandwinputten. Er wordt op dit moment overleg gepleegd met een zandwinner om in 2005 of 2006 extra metingen te doen in een geëxploiteerde zandwinput. Deze metingen worden gebruikt voor hindcasts met de te ontwikkelen modellen<sup>1</sup>. (onderdeel E, hieronder genoemd). De metingen worden uitgevoerd in een gebied van orde 100 m x 100 m rond de zuigmond op het moment dat de zuiger een talud maakt in losgepakt zand. Vóór dat moment moeten de zandeigenschappen zijn vastgesteld aan de hand van boringen en

sonderingen. Een belangrijk deel van de metingen tijdens de baggeractiviteiten bestaan uit zeer frequente peilingen waardoor de ontwikkeling van de taludvorm (breshoogte en vorm) in drie dimensies gevolgd kan worden. Verder worden alle baggerprocesparameters, zoals mengseldebiet en concentratie continu geregistreerd. Tenslotte zal gepoogd moeten worden grondwaterspanningen te meten in de buurt van de zuigmond om na te gaan in hoeverre verweking optreedt.

- 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 toezichthouders. 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.



Figuur 1 Gemeten oeveringscharing zandwinput Ankerplas, Kloosterhaar, 1998

## 1.4 Inpassing in Delft 3D

Het is wenselijk om in DELFT 3d de mogelijkheid in te bouwen

- 1) dichtheidsstromingen lang een talud te kunnen berekenen in een 2- of meerlagen modellering door storten, lozen van slib of vloeistoffen, erosie van zand (bressen) of verweking van taluds (zettingsvloeiing)
- 2) een zanderosiemodel als bodemrandvoorwaarde geschikt voor snelle erosieprocessen zoals bresgroei in dijken, ontgrondingen en baggerprocessen zoals winzuigen ,storten, rainbowen

Voorstel is om in DELFT 3D (horizontaal gelaagd dus 2DH) de zandwatermengselstroom als 2-lagen dichtheidsstroommodel te beschrijven en het erosiemodel in te bouwen als bodemrandvoorwaarde.

1. Haalbaarheidsonderzoek, aanpassing basisvergelijkingen in DELFT 3D (formulering continuïteit en dichtheidstermen, Boussinesque loslaten, herschrijven in Bélanger vorm met  $dh/dx$ , numerieke stabiliteit
2. Randvoorwaarden management: super/subkritisch boven/benedenstrooms
3. Niet stationair: frontverschijnselen
4. Vergelijking met eerdere formuleringen, testberekeningen

## 5. Toepassing zandwinput, rainbowen, turbidity current

### **1.5 Werking oorspronkelijke FORTRAN rekenmodel HMBres en gewenste verbeteringen**

HMBres is een Fortran programma voor het berekenen van een dichtheidsstroming met erosie van zandtaluds bij baggeren. Het werkt met handmatige scherminvoer en het levert twee uitvoerbestanden voor verdere verwerking tot plotjes e.d. in Excell. zie Handleiding BAGT 454, WL | Delft Hydraulics, 1990 (vertrouwelijk).

Om de invoer te vereenvoudigen is een batch bestand gemaakt dat de invoer leest uit een invoerbestand ipv de handmatige scherminvoer.

Het model HMBRES/HMTURB is een 1D rekenmodel dat de stroming van een zand-watermengsel langs een helling onder water beschrijft. Het is afgeleid van het voor RWS Deltadienst ontwikkelde model ZSTORT (WL rapport Z299, 1989, publicatie Winterwerp/Mastbergen, 1992).

Het rekenmodel is in Fortran gecodeerd (1990), de invoer wordt interactief via beeldscherm gegeven. De invoer bestaat uit horizontale gelaagdheid van zandgrond (laagdikte, korrel diameter, porositeit).

Met HMBRES wordt gegeven een zuigsnelheid en zuigdiepte de hellingopbouw berekend waarbij sprake is van een stationaire evenwichtssituatie bij winzuigen (tbv baggerspeurwerk BAGT 454).

Het model wordt momenteel 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). zie Mastbergen/Van den Berg, comm. Leo van Rijn.

Een variant is toegepast voor jetten. (tbv baggerspeurwerk BAGT 503).

Het erosiemodel is ook toegepast voor bresgroei in dijken. (Verheij)

#### **HMBres.for**

FORTTRAN code huidige model voor evenwichtshelling

#### **Tmbres1.dat**

Uitvoerbestand voor controle en resultaten

### **Tmbres2.prn**

Uitvoerbestand voor verdere verwerking. Voor het maken van grafieken wordt dit bestand ingelezen in Excel. zie voorbeeld tmbres2hbr.xls

### **HMBres.bat**

Batch bestand om automatische inlezing van het scherm te bewerkstelligen.

### **Invoer.dat**

Invoerbestand voor automatische batch inlezing.

### **HMTurb.for**

FORTTRAN code variant HMBres model voor turbidity currents. werkt analoog maar vereist invoer van een hellingshoek per laag en slaat iteratieslag voor evenwichtshelling over.

### **Rekenmodel HM Breach / HM Turb**

Voorlopige rapportage. hierin staat de inhoudelijke beschrijving van het rekenmodel.

De invoer bestaat uit de geotechnische gegevens van het zandtalud, geschematiseerd tot horizontale lagen met bepaalde eigenschappen. Deze gegevens komen uit boringen. Zie voorbeeldbestand Boring B03.xls. Hieruit is het invoerbestand InvoerHbr.xls uit afgeleid en vervolgens weer Invoer.dat.

Het in- en uitvoerproces verloopt dus erg omslachtig en moet verbeterd worden. De eigenlijke code dient te worden herschreven vanwege de confidentialiteit van het huidige model HMBres en het bijbehorende rapport BAGT 454, maar niet de inhoud, en een aantal kleine inhoudelijke aanpassingen in de formuleringen.

De voorbeeldbestanden kunnen dienen als testcase om een nieuwe versie van het rekenmodel te verifiëren. Inhoudelijke aanpassingen in de formuleringen worden pas doorgevoerd als deze test goed verloopt.

## **1.6 Verdere verbeteringen HMBreach**

Status (april 2006):

- Inhoudelijk gecontroleerd
- Getest, geeft zelfde output als HMBres dus OK

Nog gewenste aanpassingen:

1. Layout
2. inhoud
3. Functionaliteit

Ad 1 Layout

In code / in- / uitvoerfiles

- namespace en waar elders HMBres vervangen door MBreach
- Slope vervangen door hydraulic gradient (= verhang)
- Bij in / output en constants schermen eenheden vermelden

- Bij inputscherm toevoegen kolommen: aantal iteratieslagen/ rekenlussen, aantal rekenpunten en hellingshoek (= j, n, alfa schermuitvoer in HMBres) (alleen voor laatste slag waarbij evenwicht is bereikt)

Bij outputscherm ook laagnummer vermelden (is al gedaan)

#### Ad 2 inhoud

- Keuzeoptie voor erosieformulering variant 1 of 2 in constants scherm aanvinken
- Idem keuzeoptie voor variabelen sigma, S1 en S2 in DV stelsel variant 1 of 2 in constants scherm aanvinken
- Toevoegen V entr = 0 voor Fri <= 1.01
- Toevoegen fysische constanten in input scherm: D15, dit ipv permeability (user)
- Indien user dit niet opgeeft wordt D15 berekend uit D50, Wel permeability (computed) blijven vermelden
- Toevoegen fysische constanten in constants scherm:
  - Default D50/D15 = 1.75 ipv 1.25 staat in code
  - Default dnk / k0 = 1/17 (= 0.0588)
  - Default a (1-n0) = 1.0

#### Ad 3 Functionaliteit

- Ook indien geen evenwicht bereikt wel uitvoer wegschrijven! Bij invoer wordt al vermeld evenwicht wel/niet bereikt. Klopt nu z = som ingevoerde laagdiktes?
- Bij uitvoeren berekening (Ctrl R) automatisch save / updaten bestand
- Genereren van standaard charts
  - z als functie van x,
  - snelheid u,
  - laagdikte h (flow depth)
  - v-erosie en vsedimentatie,
  - Froude Fri
  - Concentratie c
- Uitvoerfile aanmaken geschikt voor inlezen in Excell. OF: Cut/paste gaat vaak mis (applicatie loopt vast bij Ctrl C-Ctrl V, not responding).
- Versie MTurb aanmaken idem MBreach, maar hoek opgeven per laag, geen iteratie nodig (j =1)

Schrijven Manual en Documentatie (achtergrond rapport)





Foto 5 Zandwinning Haarrijnseplas Oost, 2005

## 2 Bressen als mechanisme voor taludinstabiliteit

### 2.1 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 en 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.

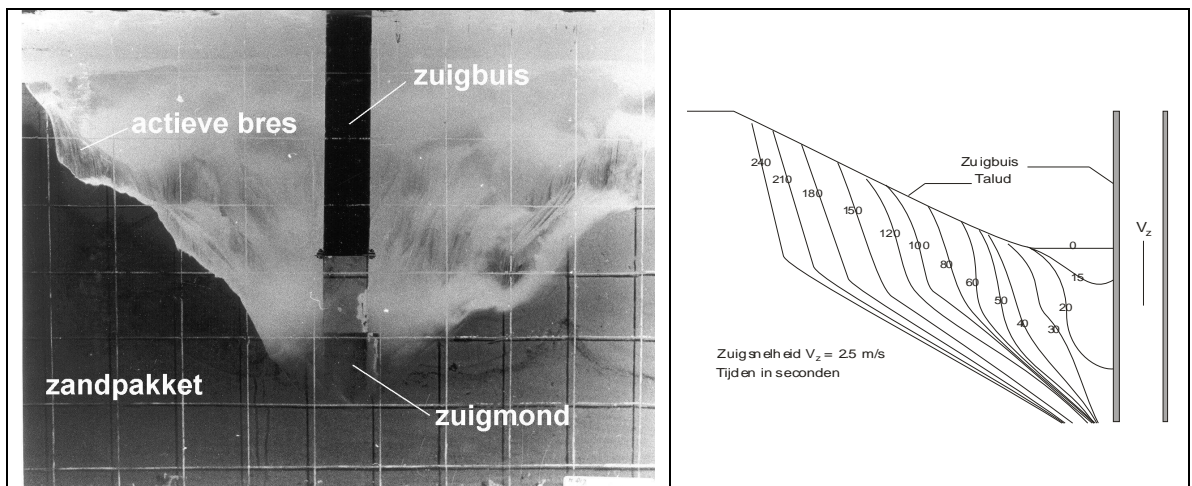
Uit: Joe Speedboot (2005) van Tommy Wieringa .



## 2.2 Het zandzuigproces

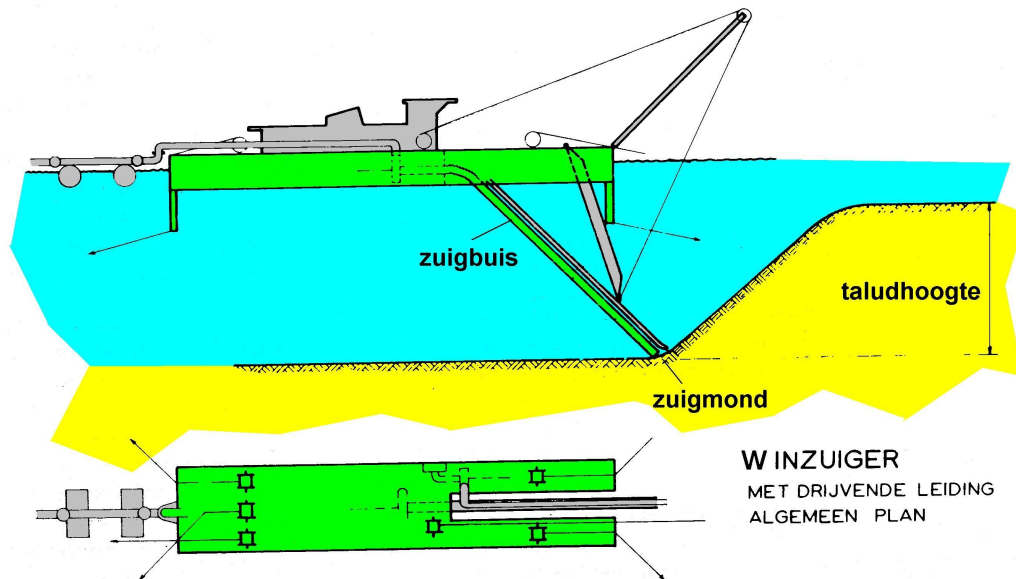
Het grootste deel van het baggeren vindt plaats door middel van winzuigen. Om te begrijpen hoe het talud van de zandwinput zich onder invloed van het winzuigen ontwikkelt, is inzicht in het zandzuigproces van belang. Fig. 2.5 laat dit proces in laboratoriumopstelling duidelijk zien. Om het proces op 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 2.5*  
*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 wegloupt, 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 2.6*

*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).

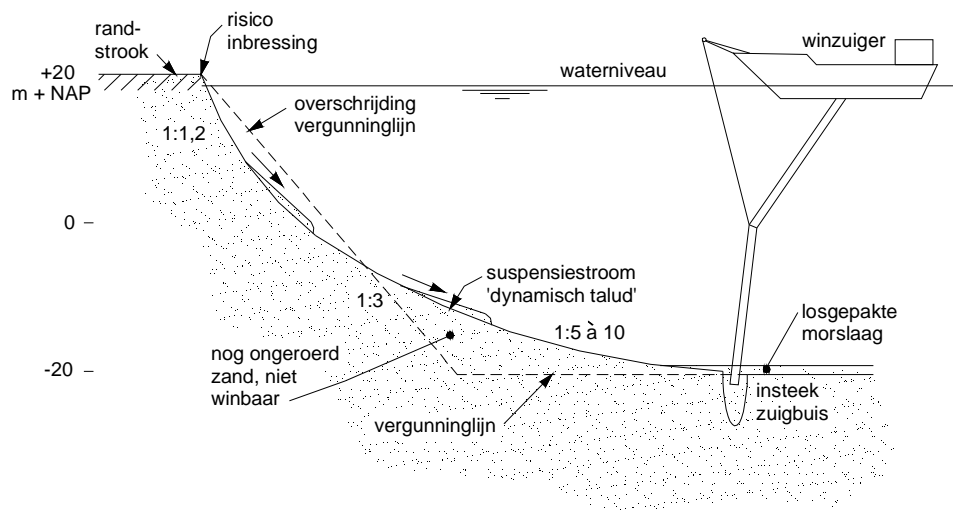
## 2.3 Taludontwikkeling bij beheerst bressen

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  $90^\circ$  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.  $32^\circ$  (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 6.4*  
*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, toegespitst advies gebruikmakend van een rekenmodel.

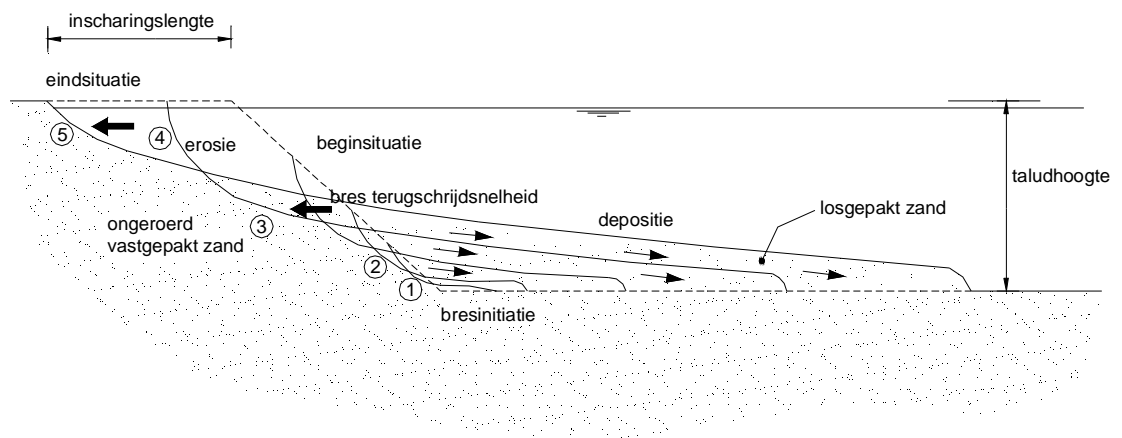
De verschillende niveau's worden in de volgende paragrafen uitgewerkt en samengevat in 6.4. Eerst wordt nog nader ingegaan op de voorwaarden bij de uitvoering die dienen te worden vastgelegd in een werkplan en tijdens de uitvoering te worden gecontroleerd door middel van monitoring.

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.

## 2.4 Bresvloeiing

### 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).



*Figuur 3.3*

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

### 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 oeverinschaling 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.

### **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 locale 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.

### **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.

### **Procestijd + afmetingen**

Een bresvloeiing is een oppervlakteproces, dat zich afspeelt binnen een tijdsbestek van enkele uren tot ongeveer een etmaal bij massale gebeurtenissen. De terugschrijdsnelheid (“wallejtessnelheid”) 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.

### **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.

## **2.5 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.

## **3 Rekenmodel HMBreach**

### **3.1 Doel rekenmodel**

Met het rekenmodel HMBreach kan de taludontwikkeling berekend worden die bij winzuigen gegeven de bodemopbouw (boringen) zal ontstaan mits de verhaalsnelheid en

daarom 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 2007 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.

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

## 3.2 Mogelijkheden en beperkingen model

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.



### 3.3 Wiskundige beschrijving

#### 3.3.1 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 richting  $s$  langs het zandbed met een helling  $\alpha$  ten opzichte van het horizontale vlak:

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

(2) de continuïteit van het water:

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

(3) de continuïteit van het zand:

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

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:

**Variant 1 (nieuwe versie)**

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

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

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

(S<sub>2</sub> vertegenwoordigt het zandverlies bij stromende bovenlaag, deze wordt hier verder op 0 gesteld).

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

**Variant 2 (oude versie)**

$$\sigma = \frac{\Delta(1-n-c)}{1+\Delta c}$$

$$S_1 = \sigma \left( \frac{1}{2} + F \right) + 2F$$

$$S_3 = \varepsilon \left( \frac{1}{2} + F \right) - 2F$$

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

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  $F = Fr_i^2$  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:

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

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

### 3.3.2 Bovenrandvoorwaarden

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:

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

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

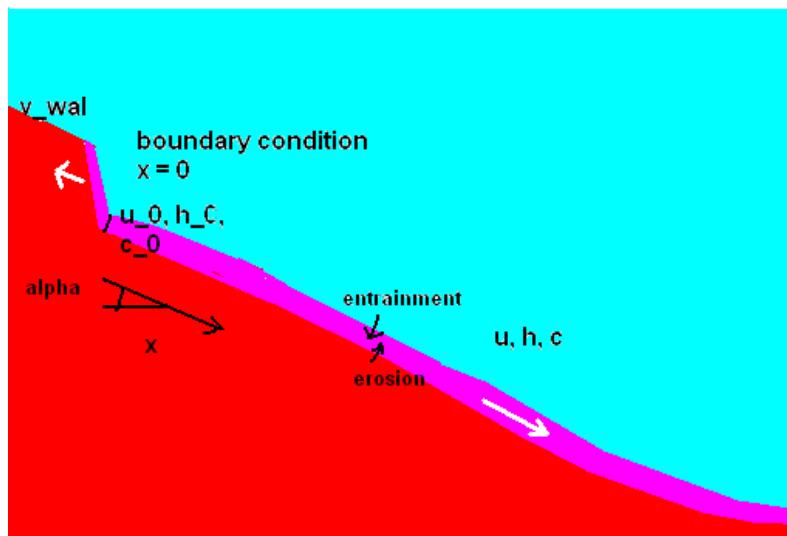


Fig. 4 bovenstroomse randvoorwaarden terugschrijdende bres

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).  $u_0 > \text{ongeveer } 0,1 - 0,3 \text{ m/s}$

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  $90^\circ$ ) 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.

### 3.3.3 Erosiefunctie

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:

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

### ***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 maximumerosieflux luidt:

$$\Phi_{\max} = 0,033 \frac{(1 - n_0 - c)}{c}$$

zie Z46.02, 1986

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:

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

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 zie Richardson&Zaki : 3-5)

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

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

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:

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

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  $D_{15}$ ), Porositeit  $n_0$  en temperatuur water (temp  $T$ ) volgens:

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

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:

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

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

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:

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

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

### 3.3.4 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  $rk_2 = 0$

### 3.3.5 Entrainment (aanzuiging)

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

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

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

afleiding zie M/vdB 2003, M 1984, 1988

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

software C# .net

## 5 Gebruikershandleiding HMBreach

### 5.1 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.

### 5.2 Tabbladen

Input Output Charts Constants

#### 5.2.1 Input

Tabel 5.1 Bovenrandvoorwaarden:

General			
Thickness Top (m)	Froude (-)	Concentration (-)	Velocity (mm/s)
0.5	2	12%	1

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

Op basis van boorstaten laagverdeling opstellen met per laag dikte, korreldiameter etc/ invoeren in inputscherm

Tabel 5.2 Invoer eigenschappen zandlagen

Layer	Thickness (m)	Porosity (%)	Diameter (mu)	Hyd. Gradient (-)	Permeability (mm/s)	User D15?	D15 (mu)
Layer 1	0.85	40	261	0	0.212199		0

## 5.2.2 Constants

Tabel 5.3 Constants

<b>Defaults</b>	
Model	
DVformulering	Variant2
erosieFormulering	Variant2
Model	Breach
<b>Numerical Constants</b>	
alfa_reset	False / True
alfa0	75
na	15
<b>Physical Constants</b>	
a_1_n_0	1
Aeros	0.012
Beros	1.3
d50d15	1.75
dnk_k0	0.0588
f0	0.1
fki	0.333
g	9.81236
phi	32
rhos	2650
rhow	1000
rk3	0.0015
temp	15

Waarin default maar naar wens aan te passen:

$$\text{dnk\_k0} = 1/17 \text{ ofwel } 0.0588 \text{ volgens } \frac{\Delta n}{k_\ell} = \frac{1}{17k_0}$$

$$\text{a\_1\_n\_0} = 1 \text{ volgens } a = \frac{1}{1-n_0}$$

$$\text{d50d15} = 1.75 \text{ volgens } d_{15} = \frac{d_{50}}{1.75}$$

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

Tabel 5.4 Model Breach

Layer	Equilibrium	Iterations (-)	Calc. points (-)	Alpha (grd)
Layer 1	v	10	178	37.2070
Layer 2				
Layer 40				

Indien evenwicht bereikt wordt Equilibrium aangevinkt. Is dit niet het geval dan verdient het aanbeveling de invoerwaarden te controleren of aan te passen, dan wel de laag te splitsen in dunnere sublagen of de resultaten te accepteren.

In het geval van dikkere kleilagen moet de gebruiker zich realiseren dat feitelijk geen evenwicht mogelijk is. Door aanpassing van de werkwijze bijv. het verwijderen van de kleilaag nadat al het zand tot de betreffende laag is weggezogen, ontstaat een nieuwe situatie die met aangepaste randvoorwaarden doorgerekend dient te worden onder handhaving van een berm.

Tabel 5.5 Model Turb

Layer	Calc. points (-)	Alpha (grd)
Layer 1	203	32.0000
Layer 2		
Layer 40		

Voor de versie Turb worden geen evenwichtsiteraties uitgevoerd maar wordt uitgegaan van de door de gebruiker opgegeven laaghoek Alpha.

### 5.2.3 Charts

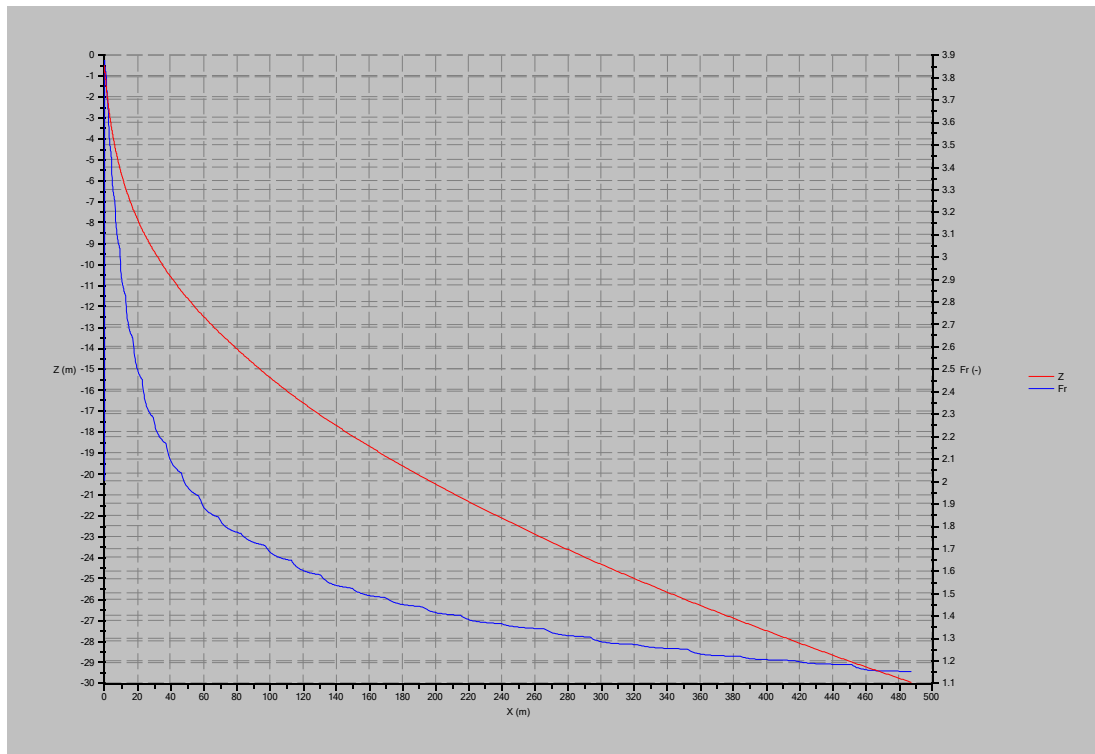


Fig 1 standaard testgeval  
200 mu zand

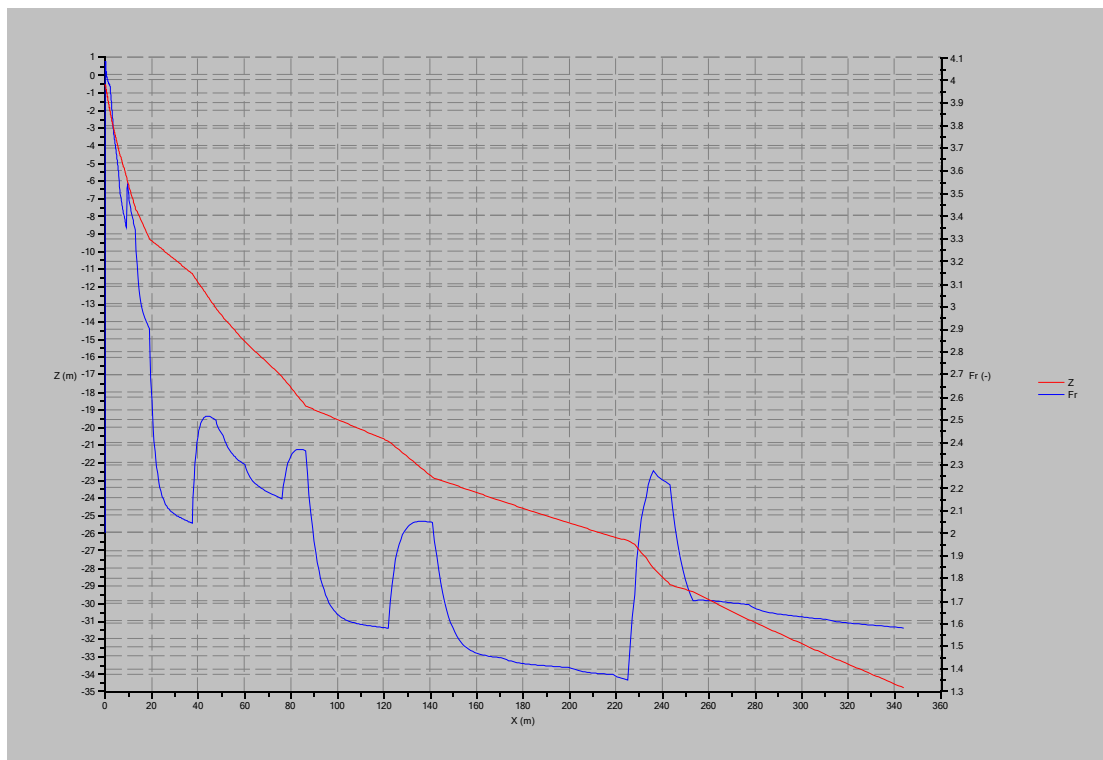


Fig 2 berekend talud en Froude getal

## 5.2.4 Output

Tabel 5.5 Output

layer	index	x (m)	z (m)	zw (m)	h (m)	u (m/s)	c (-)	Fr (-)	veros (m/s)	q (m <sup>2</sup> /s)	sz (kg/sm)	vsed (m/s)	ventr (m/s)
1	1	0.00e+00	-5.0e-01	-4.9e-01	9.91e-01	2.51e-01	1.20e-01	2.00e+00	6.11e-04	2.500-03	7.95e-01	4.18e-03	1.51e-03
	2												
	3												
	4												

Layer geeft aan welke laag het betreft (zie input)

Index welk rekenpunt (punt van de verhanglijn) in deze laag

## 6 Voorbeeld

### 6.1 Gevoeligheidsanalyse

Gevoeligheid voor korreldiameter

Invloed erosiefunctie : var 1 / 2, constants Aeros, Beros,

Zand eigenschappen: korreldiameter, porositeit, phi, dnk/k0, a/1-n0

Stroming: f0, fki, rk3

Hangt af van stroomregime: hoge-snelheids of lage snelheidserosie

Bij lage snelheid cq grof zand: Thetacr (= B) van belang, drempelwaarde

Bij hoge snelheid cq fijn zand: doorlatendheid en pakking

Gevoeligheid voor f0

Gevoeligheid voor translatiesnelheid

Totale taludhoogte/ diepte put

Stoorlagen

Bermen

Invloed var1 of 2 van DV's maakt niet zo veel verschil: Stelsel DV correct = var 1

Constanten invoerparameters

BAGT 454, 1990

Parameter	waarde
erosieformulering	Variant2
DV formulering	Variant2
A	0.012
B	1.3
f_0	0.1
φ	32°



Constanten invoerparameters  
BAGT 559, 1996, 2006

<b>Parameter</b>	<b>waarde</b>
erosieformulering	Variant1
DV formulering	Variant1
A	0.018
B	1.3
f_0	0.05
$\varphi$	32°

Model  
Breach / Turb

Turbidity current : gevoelig voor kritische helling / taludhoogte bij gegeven zandsort 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.

Werkt als “trigger”.

Testgeval zandwinput met  $d_{50} = 200$   $\mu$ m 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
DV formulering	Variant1	gering
<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
dnk_k0	0.0588	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

## 6.2 Zandwinput



foto 7 Zandwin- en recreatieplas Cattenbroek met Potterskade (Woerden) (Z3860).

- praktijksituatie
- boorstaten
- berekening

## 6.3 Turbidity currents

Scripps  
Congo

## 7 Symbolenlijst

$\alpha$	= bed slope angle ( $^{\circ}$ )
$c$	= 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)

- $v_e$  = 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

Aanbeveling 130 – Zandwinputten en taludinscharing’, CUR-commissie C130  
Blik op de toekomst

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

GeoDelft, *Handboek Zettingsvloeiingen*, CO-353260/10; en

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-watmengselstromingen; 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.

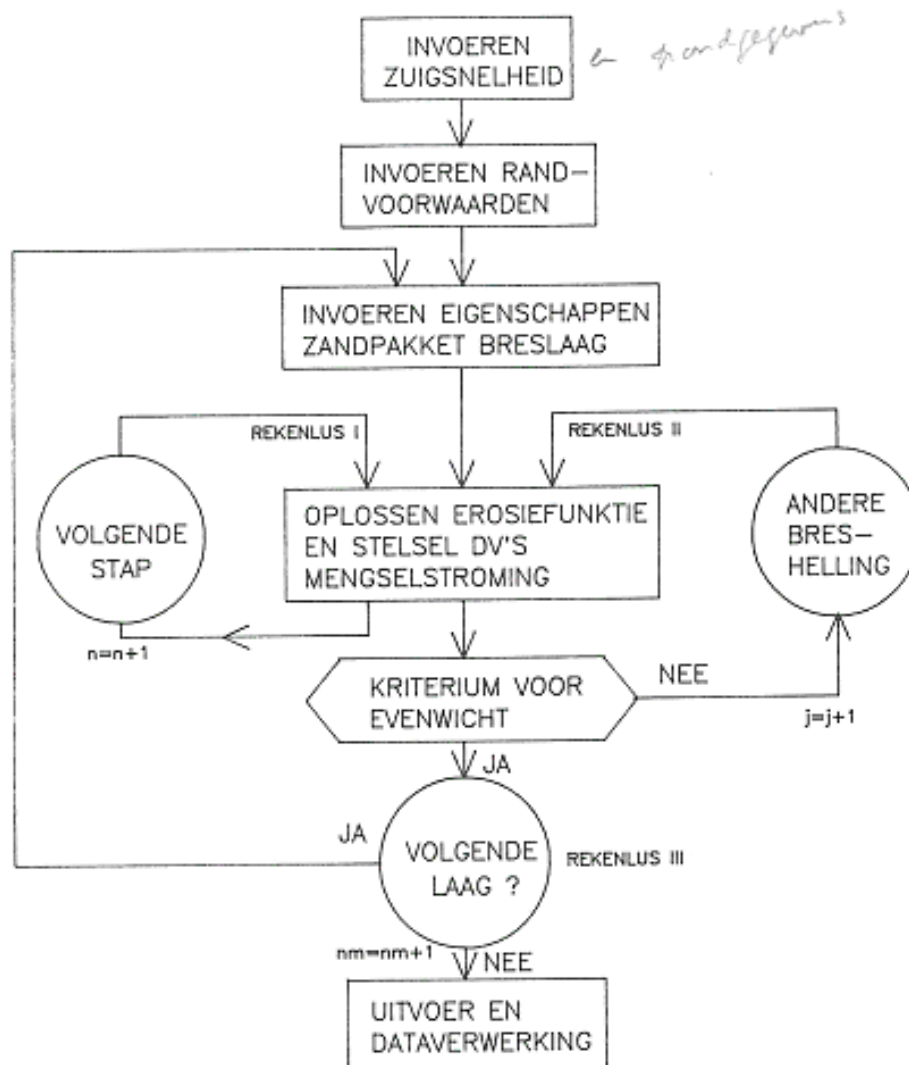


Fig 1 Rekenschema HMBres / HMBreach