



ir. M.B. de Groot
Deltares



ir. M.B. van der Ruyt
Deltares



ir. D.R. Mastbergen
Deltares



dr. G.A. van den Ham
Deltares

Samenvatting

Bij een zettingsvloeiing in een onderwater talud van zand kan het gaan, al naar gelang het fysisch proces, om een verwekingsvloeiing, een bresvloeiing of een combinatie van beide. In dit artikel wordt de fysische achtergrond beschreven van een bresvloeiing, een vloeiing die geheel bepaald wordt door een terugschrijdend erosieproces langs het taludoppervlak, het bresproces. Dat proces kan 'ontaarden' in een bresvloeiing. De belangrijkste kenmerken van bresvloeiingen worden besproken samen met de belangrijkste voorwaarden voor het ontstaan van een dergelijke vloeiing. Ook worden enige typische vormen van bresvloeiingen geschetst.

Bresvloeiing in zand

Inleiding

Een onderwater zandtalud kan soms schijnbaar spontaan of tijdens baggeren zo instabiel worden dat het zand uitvloeit om pas bij een zeer flauwe helling te sedimenteren. In het algemeen wordt dit als een 'zettingsvloeiing' betiteld. Het kan daarbij gaan om een 'verwekingsvloeiing', 'een bresvloeiing' of een combinatie van beide. Verwekingsvloeiing is besproken in een eerder artikel in Geotechniek [de Groot e.a. 2007]. In dit artikel zal aandacht besteed worden aan de fysische achtergronden van een bresvloeiing.

Bij het baggeren van een talud in zand wordt het talud vaak instabiel gemaakt met behulp van het bresproces: er wordt een 'bres' (een lokale taludversteiling) geïnitieerd, die zich geleidelijk langs het oppervlak van het zandmassief omhoog verplaatst, waarbij het vrijkomende zand-watermengsel omlaag stroomt en opgezogen wordt. Meestal vindt dit op een beheerste manier plaats.

Onder bepaalde omstandigheden kan het bresproces echter niet meer beheerst worden. Dat is voor het eerst onderkend door van Rhee en Bezuijen [1998]. De stroming langs het talud neemt dan steeds meer zand mee naar de teen en bovenaan het talud kan een oeverinscharing optreden. Ook als men vervolgens ophoudt met baggeren zal het bresproces niet direct stoppen en zal het talud zich pas onder een hele flauwe helling stabiliseren. Dan kan van een bresvloeiing gesproken worden.

Bresvloeiingen treden ook in de natuur op. De bres wordt dan geïnitieerd bijvoorbeeld door een lokale afschuiving of door een lokale versteiling als gevolg van erosie. Mogelijk zijn veel van de zettingsvloeiingen die zijn waargenomen in de Zeeuwse getijgeulen in de 19e en begin 20e eeuw bresvloeiingen of combinaties van bresvloeiingen en verwekingsvloeiingen. De 'turbidity currents' die op de zeebodem zijn waargenomen aan de randen van het continentale plat, zijn vermoedelijk ook bresvloeiingen [van den Berg e.a. 2002; Mastbergen & van den Berg 2003]. Hetzelfde geldt wellicht ook voor recente taludinstabiliteiten in de

ontgrondingskuilen van de Oosterscheldekering [De Groot & Mastbergen, 2006].

Het mechanisme van een bresvloeiing volgt uit het mechanisme van het bresproces. Dat proces speelt zich af aan het oppervlak van een onderwater zandtalud. Daarbij maken zandkorrels zich los uit het zandmassief ofwel verliest een zandlaagje aan het oppervlak zijn stabiliteit, erosie. Dat gebeurt onder invloed van de zwaartekracht en de stroming van zand en water over het taludoppervlak.

Voor het begrip van het bresproces wordt in dit artikel eerst aandacht besteed aan die krachten. Daarna volgt een beschouwing over de voortplanting van de 'bres', gevolgd door een beschouwing over de stroming van het zand-watermengsel langs een onderwater talud. Vervolgens wordt uiteengezet hoe de interactie tussen bressen en stroming van zand langs het talud kan leiden tot een beheerst bresproces bij baggeren, maar ook tot een bresvloeiing. Tot besluit worden de belangrijkste kenmerken van bresvloeiingen besproken samen met de belangrijkste voorwaarden voor het ontstaan van een dergelijke vloeiing. Ook worden enige typische vormen van bresvloeiingen geschetst.

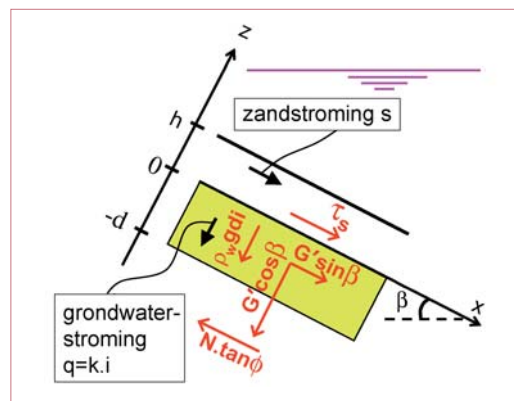
Een volgend artikel zal gewijd worden aan de verklaring van waargenomen zettingsvloeiingen met behulp van de theoretische kennis over verweken en bressen, alsmede aan de mogelijk-

heden en beperkingen van de thans beschikbare rekenmodellen.

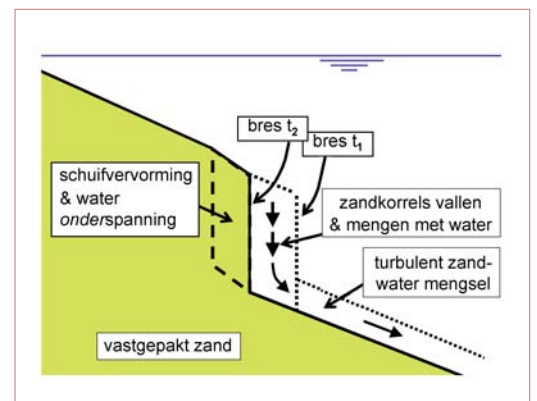
Stabiliteit van een zandlaagje aan het taludoppervlak

Het bresproces is uitgebreid beschreven in [Breusers 1978]. Bij het bresproces verliezen zandkorrels aan het taludoppervlak hun stabiliteit. Vaak gaat het om zeer veel korrels tegelijk. De snelheid waarmee het oppervlak terugschrijdt bedraagt de dikte van orde 1 tot 100 korrels per seconde. Het zijn eerder zandlaagjes dan individuele korrels die hun stabiliteit verliezen. Daarom wordt hier de stabiliteit van een zandlaagje beschouwd.

Stabiliteit en stabiliteitsverlies worden sterk beïnvloed door de stroming van zand en/of een zand-watermengsel langs het taludoppervlak



Figuur 1 Krachten op een laagje zand aan het talud in aanwezigheid van zandstroming over het talud en grondwaterstroming.



Figuur 2 Voortplanting bres langs talud omhoog.

en door grondwaterstroming onder invloed van dilatantie (toename van het poriëngehalte van zand bij schuifvervorming). Het debiet van de grondwaterstroming loodrecht het talud in wordt hier aangeduid met $q = k \cdot i$, waarbij k de doorlatendheid is en i het verhang loodrecht op het talud. De stabiliteit van een laagje zand aan het taludoppervlak met dikte d kan daardoor beschreven worden aan de hand van de volgende 5 krachten of componenten van krachten (figuur 1):

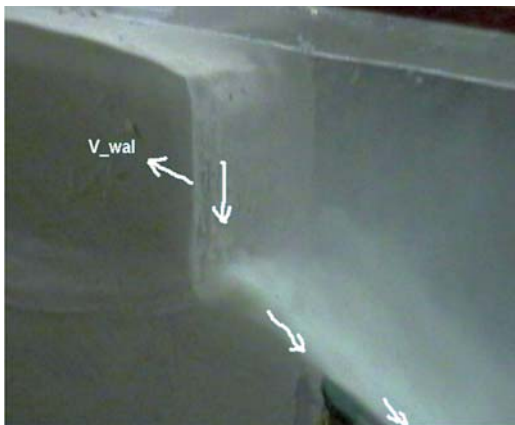
1. Schuifkracht die de stroming op het talud oppervlak uitoefent, τ_s
2. Stromingskracht van het water dat het talud in stroomt, $\rho_w g \cdot d \cdot i$.
3. Zwaartekrachtscomponent $G' \cos \beta = (1-n)(\rho_s - \rho_w) g d \cdot \cos \beta$
4. Zwaartekrachtscomponent $G' \sin \beta = (1-n)(\rho_s - \rho_w) g d \cdot \sin \beta$
5. Wrijvingskracht $N \cdot \tan \varphi$ met normaalkracht $N = G' \cos \beta + \rho_w g \cdot d \cdot i$

De krachten zijn hier uitgedrukt per eenheid van oppervlak (spanning). De symbolen hebben de volgende betekenis:

- d dikte van het beschouwde zandlaagje [m]
- g versnelling van de zwaartekracht [m/s^2]
- i inwaarts verhang loodrecht op het talud [-]
- k doorlatendheid van het zand [m/s]
- n poriëngehalte [-]
- q inwaarts debiet per eenheid van oppervlak loodrecht op het talud [m/s]
- β taludhelling [rad of graden]
- ρ_s dichtheid zandkorrels [kg/m^3]
- ρ_w dichtheid water [kg/m^3]
- φ hoek van interne wrijving van het zand en/of rusthoek [rad of graden].

Bresvoorplanting

We beschouwen een talud van zand, waarvan de sterkte volledig bepaald wordt door de interne



Figuur 3 Modelproef van bres met walsnelheid in fijn zand

wrijvingshoek φ . Als daar door baggerwerkzaamheden of door een afschuiving een bres ontstaat, dat wil zeggen een taludgedeelte met helling $\beta_{BRES} > \varphi$, dan zal dat gedeelte niet stabiel zijn. Toch treedt bij vastgepakt zand of middel-vastgepakt zand niet direct een (nieuwe) afschuiving op die resulteert in een flauwere taludhelling. In plaats daarvan schuiven er steeds dunne laagjes zand langs het oppervlak van de bres naar beneden, regenen zandkorrels van dat oppervlak af en plant het steile taludgedeelte zich voort langs het talud naar boven, zonder dat de helling van het taludgedeelte significant verandert. Dat is het gevolg van de negatieve waterspanning die veroorzaakt wordt door de dilatantie van het zandpakket bij de schuifvervorming op weg naar instabiliteit. Er moet water het talud instromen alvorens de korrels los kunnen komen uit het zandpakket. Dit proces is schematisch weergegeven in figuur 2 voor een verticale bres in de situatie dat er geen zandstroming bovenaan de bres aanwezig is.

De snelheid waarmee een verticale bres (of 'wal') zich verplaatst in de richting van het zandmassief, dus de snelheid van terugschrijdende erosie van het bresproces, wordt de 'walsnelheid' v_{WAL} genoemd (figuur 3). Deze kan bij benadering berekend worden door combinatie van de continuïteitsvergelijking voor het (grond)water en de evenwichtsvergelijking voor een laagje zand aan het oppervlak. Het evenwicht wordt in dit geval bepaald door slechts 3 van de 5 bovengenoemde krachten: $\tau_s \approx 0$ en $\cos \beta = 0$.

Als het poriëngehalte van het zand n_0 bedraagt en als dat gehalte tengevolge van de dilatantie moet toenemen van n_0 tot n_1 alvorens doorgaande afschuiving kan plaatsvinden, dan is de hoeveelheid water q die het (verticale) bresoppervlak instroomt per eenheid van oppervlak en per

eenheid van tijd ongeveer:

$$q = \Delta n \cdot v_{WAL} = \frac{(n_1 - n_0)}{(1 - n_1)} \cdot v_{WAL} \quad (1)$$

Dat debiet vereist een inwaarts verhang $i = q/k_1$, waarin k_1 de doorlatendheid is van het zandlaagje aan het oppervlak, die veelal iets hoger is dan die van het ongestoorde zand. De stroming drukt het buitenste zandlaagje met dikte d tegen het zandmassief aan met een kracht per eenheid van oppervlak van $\rho_w g \cdot d \cdot i = \rho_w g \cdot d \cdot q/k_1$. Die kracht zorgt juist voor evenwicht van dat verticale laagje als geldt:

$$\rho_w g \cdot d \cdot q/k_1 = (1 - n_0)(\rho_s - \rho_w) g \cdot d / \tan \varphi \quad (2)$$

Combinatie van (1) en (2) leidt tot:

$$v_{WAL} = k_1 \cdot \frac{1 - n_0}{\Delta n} \cdot \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \cdot \cot \alpha n \varphi \quad (3)$$

waarin $\Delta n = (n_1 - n_0)/(1 - n_1)$.

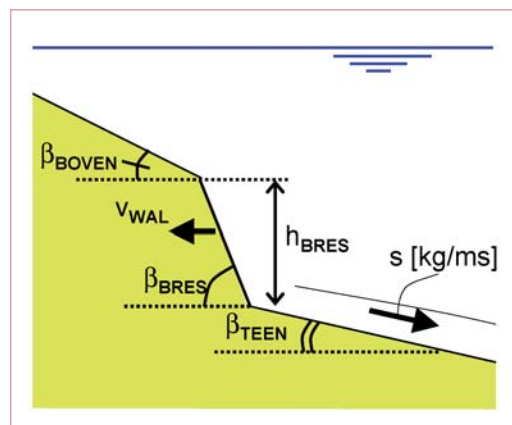
Als de bres of wal niet zuiver verticaal staat, maar onder een helling β_{BRES} (figuur 4) dan is af te leiden dat geldt, mits $90^\circ > \beta_{BRES} > \varphi$:

$$v_{WAL} = k_1 \cdot \frac{1 - n_0}{\Delta n} \cdot \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \cdot \frac{\sin(\beta_{BRES} - \varphi)}{\sin \varphi} \quad (4)$$

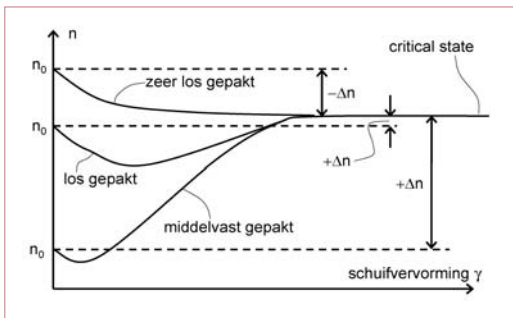
Uit formule (4) volgt ondermeer:

- walsnelheid neemt toe met de doorlatendheid, dus met de grofheid van het zand en met een lossere pakking van het zand;
- orde-grootte van de walsnelheid is ongeveer 25x de doorlatendheid van het ongestoorde zand k_0 , dat is 1 tot enkele mm/s voor de meeste zandsoorten;
- de walsnelheid neemt af naarmate de helling van de bres β_{BRES} flauwer is en wordt nul als $\beta_{BRES} = \varphi$;
- de walsnelheid neemt toe naarmate Δn , dus de dilatantie kleiner wordt, dus naarmate het zand losser gepakt is (naast de toename van k die daardoor veroorzaakt wordt); de walsnelheid zou zelfs oneindig groot worden als $\Delta n = 0$; nu geldt dat losgepakt zand bij afschuiving in eerste instantie contractant is, maar meestal bij verdere afschuiving toch weer dilateert, zeker bij de extreem lage korrelnormaalspanning die aan het oppervlak heerst, zodat Δn dan toch nog positief is, zij het klein (figuur 5); waarschijnlijk geldt $\Delta n \approx 0$ alleen voor zéér losgepakt zand; de formule suggereert dat dan onmiddellijk instabiliteit optreedt: kan het daarbij gaan om een lokale verwekingsvloeiing?

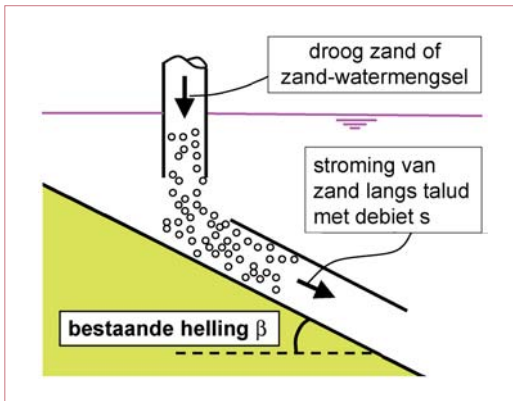
Verder volgt de hoeveelheid zand die per eenheid van tijd aan de teen van de bres terecht



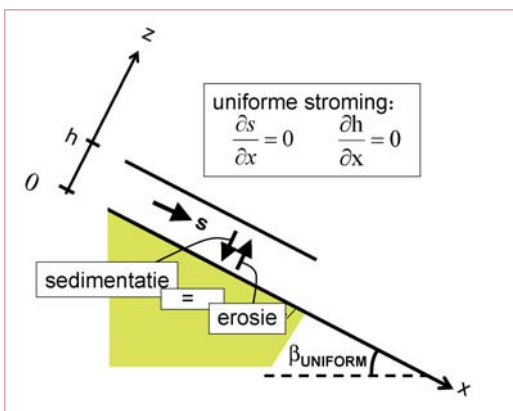
Figuur 4 Karakteristieken van bres of wal.



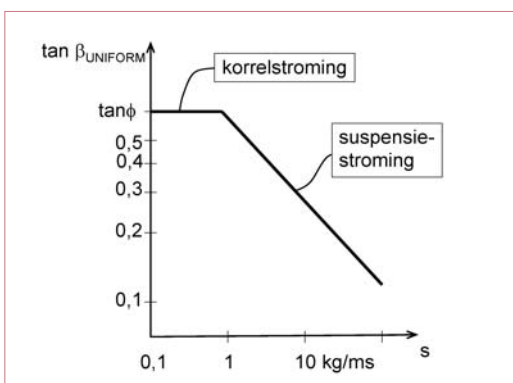
Figuur 5 Grootte van Δn als functie van pakkingsdichtheid.



Figuur 6 Storten van zand in water op bestaand zandtalud.



Figuur 7 Uniforme stroming van zand langs talud naar beneden.



Figuur 8 Taludhelling in evenwicht met uniforme zandstroming voor $D_{50} = 200 \mu\text{m}$

komt, s_{TEEN} [kg/sm]:

$$s_{\text{TEEN}} = h_{\text{BRES}} \cdot (1 - n_0) \rho_s \cdot v_{\text{WAL}} \quad (5)$$

waarin h_{BRES} de hoogte van de bres is.

Dat zand gaat verder stromen over het talud aan de teen van de bres, meestal als zand-watermengsel. Afhankelijk van de grootte van s_{TEEN} en de helling van het bestaande talud aan de teen β_{TEEN} zullen daar verschillende effecten optreden. Dit wordt in de volgende paragrafen verder toegelicht.

Stroming van zand-watermengsels onder water

Die effecten kunnen het best begrepen worden door gedachte-experimenten uit te voeren als geschetst in *figuur 6*, waarbij droog zand of een zand-watermengsel met een constant zanddebiet s in stilstaand water op een bestaand talud van hetzelfde soort zand gestort wordt. De resulterende stroming en de interactie van het zand-watermengsel met talud en stilstaand water worden sterk bepaald door een aantal hydraulisch-morfologische fenomenen. Hier zullen slechts enige belangrijke resultaten worden weergegeven

UNIFORME STROMING

Bij een bepaalde combinatie van zandtransport s en taludhelling β treedt dan een uniforme stroming van zand langs dat talud op. Met uniforme stroming wordt bedoeld dat het debiet van het zand niet verandert in de tijd (stationair) en niet verandert langs het talud. Ook laagdikte, stroomsnelheid en dergelijke veranderen niet langs het talud. Overigens kan het zijn dat er wel sedimentatie optreedt, maar die is dan gelijk aan de erosie, zodat de netto sedimentatie juist nul is (*figuur 7*).

De taludhelling waarbij uniforme stroming optreedt, hier aangeduid met β_{UNIFORM} , is een functie van het zanddebiet s [Mastbergen e.a., 1988]. De functie is voor één korreldiameter weergegeven in *figuur 8*. Daar is aangegeven dat er twee regimes zijn te onderkennen, afhankelijk van de mate waarin meer of minder water mee stroomt met de zandkorrels:

1. korrelstroming,
2. suspensiestroming.

KORRELSTROMING

Korrelstroming (*figuur 9*) treedt op als het om een geringe hoeveelheid zandkorrels gaat, dus als het korreldebiet s klein is. Elke korrel rolt en stuitert min of meer onafhankelijk van de andere korrels over het taludoppervlak en brengt daar-

bij weinig water in beweging. Feitelijk gaat het hier dus niet om een mengsel van zand en water.

Bij een korrelstroming geldt $\beta_{\text{UNIFORM}} = \varphi$, zodat de bewegende korrels nog juist in beweging blijven en het bovenste zandlaagje van niet-bewegende korrels nog net niet in beweging komt.

Immers, beschouwt men de krachten op het bovenste zandlaagje van niet-bewegende korrels, dan kan men stellen dat er geen water het talud instroomt, zodat die stromingskracht nul is en dat de schuifkracht die de stroming van die weinige korrels op het taludoppervlak uitoefent, τ_s , verwaarloosbaar is. Beschouwt men de krachten op de bewegende korrels, dan kan men stellen dat er een krachtenevenwicht is loodrecht op het talud tussen de korrels en het onderliggende talud, waarbij het onderwater gewicht van de bewegende korrels volledig gedragen wordt door de korrel-korrel interactie, ofwel de korrelspanning.

SUSPENSIESTROMING

Bij grotere zanddebieten beïnvloeden de korrels elkaar en nemen het water dat tussen de korrels zit mee. Het zand-watermengsel wordt een turbulente suspensiestroming. Het stromend zand-watermengsel gedraagt zich nu ten gevolge van de hogere dichtheid ten opzichte van het bovenliggende (stilstaande) water als een turbulente dichtheidsstroming: een turbulente twee-lagen systeem. Het zand-watermengsel stroomt daarbij langs het talud naar beneden, zonder de rest van het water significant te beïnvloeden. *Zie figuur 10*. De fenomenen die in het mengsel optreden en op het grensvlak met het talud zijn bestudeerd met grootschalige experimenten en hydraulisch-morfologische modellen [Mastbergen et al 1988; Bezuijen & Mastbergen 1988].

Het mengsel is turbulent, zodat er binnen de laag voortdurend menging plaats vindt. Een kluitje van korrels met water ertussen dat zich op het ene moment vlakbij het talud bevindt, zal op een volgend moment vlakbij de grens met het stilstaande water terecht komen. Binnen dat kluitje bewegen de korrels onder invloed van de zwaartekracht naar beneden en stroomt het water tussen de korrels door naar boven. Maar door de kleine afstand tussen de korrels is de stromingsweerstand groot waardoor dat transport, vooral bij fijn zand, relatief gering is (effect van 'hindered settling'). In het mengsel is de concentratie korrels dicht bij het talud iets groter dan aan het grensvlak met het stilstaande water. Zo ontstaat een dynamisch evenwicht in

de richting loodrecht op het talud: het transport van korrels richting talud onder invloed van de zwaartekracht is gelijk aan het gemiddelde transport richting het grensvlak met het stilstaande water door turbulente menging (turbulente diffusie).

Het krachtenevenwicht van de bewegende korrels wijkt sterk af van dat bij de korrelstroming. Binnen het turbulente mengsel worden de korrels bijna volledig gedragen door het water: 'suspensie transport'. Er heerst een (meetbare) wateroverspanning, terwijl de korrelspanning praktisch nul is.

Beschouwt men de krachten op het bovenste zandlaagje van niet-bewegende korrels, dan kan men stellen dat er bij uniforme stroming geen netto erosie optreedt, dus ook geen water het talud instroomt onder invloed van dilatantie, zodat slechts 4 van de 5 bovengenoemde krachten van belang zijn. Vooral de schuifkracht die de stroming op het taludoppervlak uitoefent, τ_s , is van belang. Die kracht is groter naarmate het zanddebiet groter is en naarmate de taludhelling steiler is. Bij een uniforme stroming is er juist evenwicht. Dat impliceert dat de taludhelling flauwer moet worden als het zanddebiet toeneemt. Uit experimenten [Mastbergen et al 1988; CUR 1991, formule 21] is de volgende relatie afgeleid.

$$\tan \beta_{\text{UNIFORM}} = 0,0032 \cdot \frac{D_{50}}{s_{0,4}} \quad (6)$$

waarin D_{50} in μm en s in kg/sm . De zo gevonden evenwichtshelling als functie van het zanddebiet s is geschetst in figuur 8 voor een korrel diameter van $D_{50} = 200\mu\text{m}$.

De situatie is in werkelijkheid iets gecompliceerder dan hier geschetst, omdat er ook op het grensvlak tussen suspensiestroming en het stilstaande water daar direct boven enige uitwisseling van korrels en water plaatsvindt. Die heeft echter een relatief geringe invloed.

NIET-UNIFORME STROMING

Tot hier zijn de gedachte-experimenten als aangeduid in figuur 6, beperkt tot die welke resultaten in uniforme stroming. Maar als zand gestort wordt op een bestaand talud (helling β) met een zo klein zanddebiet dat $\beta_{\text{UNIFORM}} > \beta$, treedt er netto sedimentatie op en nemen zanddebiet en stroomsnelheid van het mengsel langs het talud naar beneden af. Hetzelfde geldt voor de schuifspanning τ_s die het mengsel op het bestaande talud uitoefent. Dat heeft tot gevolg dat β_{UNIFORM} toeneemt met de diepte, waardoor het verschil met de bestaande helling nog groter

wordt en de afname van zanddebiet en andere grootheden nog sterker. Zo kan het gebeuren dat al het gestorte zand op korte afstand van het stortpunt sedimenteert.

Is het zanddebiet daarentegen groter, dan zal juist netto erosie optreden. Dan nemen zanddebiet, stroomsnelheid en schuifspanning τ_s langs het talud toe, wordt β_{UNIFORM} steeds kleiner en groeien de erosiesnelheid en de andere grootheden explosief, tenminste tot waar de helling β flauwer wordt. Die explosieve groei is vaak kenmerkend voor bresvloeiingen.

Het is goed zich te realiseren dat netto erosie impliceert dat het top laagje van zandkorrels aan het oppervlak, al schuivend in de stroomrichting langs het oppervlak, los komt van dat oppervlak. Het proces verschilt niet wezenlijk van dat bij een verticale bres. Bij (matig) vastgepakt, dus dilatant zand moet daartoe eerst water het talud in stromen om het poriëngehalte voldoende te laten toenemen om het korrel-korrel contact op te heffen. Dat waterdebiet is recht evenredig met de erosiesnelheid. Dat geldt ook voor de stromingskracht waarmee dat water het talud in stroomt ($\rho_w g \cdot d \cdot i$). Een kwantificering van dit effect is gegeven in [Mastbergen & van den Berg 2003].

Er ontstaat geen explosieve, doch een beheerste toename van die grootheden als de helling β gaande langs het talud naar beneden steeds in voldoende mate flauwer wordt. Bij een bepaalde, holle taludvorm kan er zelfs een situatie ontstaan waarbij de stroming op elk gedeelte van het talud bijna uniform is.

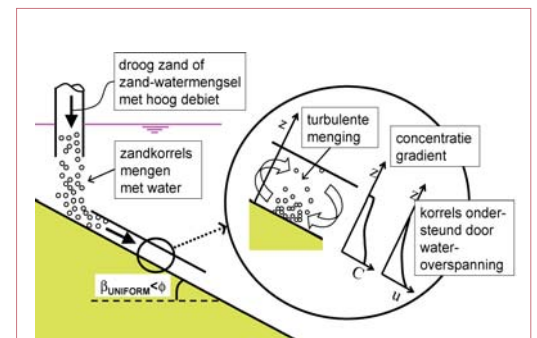
Dit is zeer relevant voor het baggerproces dat bij zandwinning veel wordt toegepast. Dat is in figuur 11 geïllustreerd voor een talud in homogeen zand. De winzuiger zuigt zand op aan de teen van het talud en het talud plant zich met constante lage snelheid voort naar achteren zonder van vorm te veranderen. Er is dus overal enige erosie. Het zandtransport neemt geleidelijk toe van nul bovenaan tot de maximale waarde bij de zuigmond. Bovenaan is het zanddebiet zo klein dat er korrelstroming optreedt en de taludhelling gelijk is aan die van het natuurlijk talud. Op een stukje talud ergens halverwege is sprake van een suspensiestroom. Daar kan de lokale taludhelling benaderd worden met de waarde volgens formule (6), als ook geschetst in figuur 8.

Interactie van bres en suspensiestroming

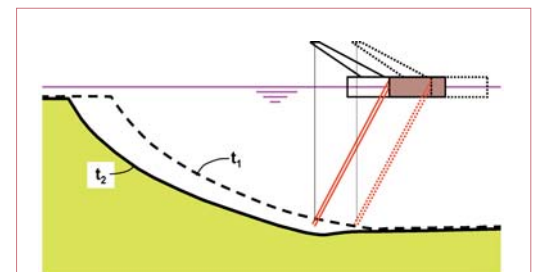
Het is van belang op te merken dat de holle vorm van het talud van figuur 11 min of meer vanzelf



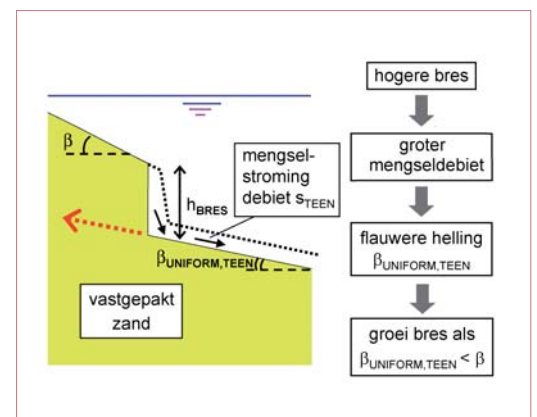
Figuur 9 Korrelstroming.



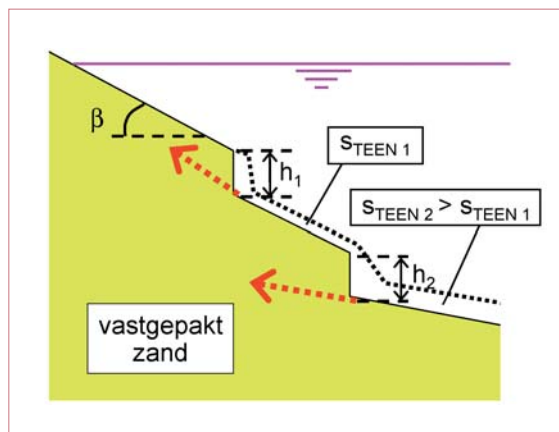
Figuur 10 Zand-watmengsel als suspensiestroming.



Figuur 11 Beheerste voortplanting van talud.

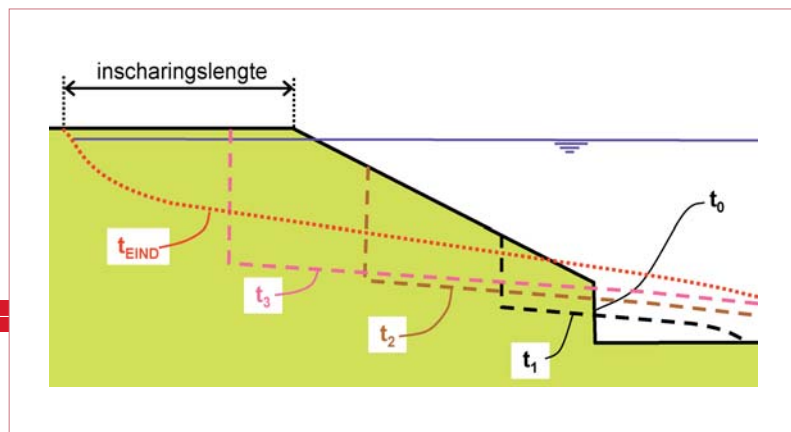


Figuur 12 Onbeheerste voortplanting van bres langs talud omhoog.

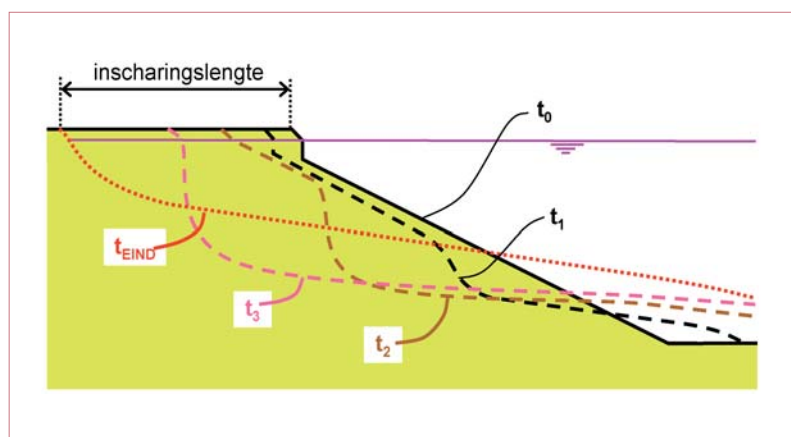


Figuur 13
Onbeheerste
voortplanting
van twee kleine
bressen

Figuur 14
Type bresvloeiing
door hoge bres
aan teen.



Figuur 15 Oeverinscharing door bresvloeiing in zandwinning 2008.



Figuur 16 Type bresvloeiing door verstoring bovenin talud.

ontstaat als aan de teen gezogen wordt, maar ook dat daar flinke tijd voor nodig is, gewoonlijk minstens enige uren. Voor de zuigpraktijk betekent dat ook dat de hoeveelheid zand die in het begin van het talud afstroomt beperkt is. Wil men toch meteen veel zand opzuigen, dan moet de zuigpijp diep de bodem ingestoken worden, ontstaat een hoge bres en begint een zand-water mengsel met een flink debiet te stromen aan de teen van die bres.

Hoe de interactie tussen bres en suspensiestroming dan precies verloopt is niet bekend. Maar wel kan gesteld worden dat de suspensiestroming zorgt voor een verandering van het talud beneden de teen van de bres op de manier die hierboven is aangegeven. Tegelijk verandert ook het talud boven die teen als gevolg van de voortplanting naar boven van de bres. Voor de hoek waaronder de teen van de bres zich verplaatst in de richting van het zandlichaam, kan worden aangenomen dat deze overeenkomt met die van een uniforme stroming volgens formule (6) op basis van het zanddebiet s_{STEEN} volgens formule (5). Die hoek wordt hier aangeduid met $\beta_{\text{UNIFORM,TEEN}}$ (figuur 12).

Nu zijn er drie mogelijkheden [van Rhee & Bezuijen 1988]. Als voor de taludhelling β geldt $\beta = \beta_{\text{UNIFORM,TEEN}}$, dan blijft de breshoogte constant en verplaatst zich langzaam langs het talud naar boven tot aan de waterlijn. Als $\beta < \beta_{\text{UNIFORM,TEEN}}$, dan wordt de breshoogte kleiner en daarmee ook het zanddebiet aan de teen s_{STEEN} . Bijgevolg wordt $\beta_{\text{UNIFORM,TEEN}}$ nog weer iets groter en neemt de breshoogte af tot hij geheel verdwenen is en het bresproces 'uitsterft'.

Met $\beta > \beta_{\text{UNIFORM,TEEN}}$ daarentegen, groeit de bres in hoogte en neemt die groei ook steeds meer toe (figuur 12). Er treedt een bresvloeiing op, vaak resulterend in een grote oeverinscharing. Als dit tijdens het baggerproces gebeurt spreekt men wel van 'onbeheerste bresgroei'. Kenmerkend is dat het proces langzaam verloopt maar niet te stuiten is. Zodra het bresproces op gang gebracht is, wordt het nauwelijks meer beïnvloed door het stoppen van het baggeren.

Twee kleine bressen met een hoogte gelijk aan de helft van één grote kunnen ongeveer hetzelfde effect hebben als de grote bres. Zie figuur 13. Het zanddebiet aan de teen van de onderste

bres is de som van het debiet dat ontstaat bij beide bressen en het eventueel daartussenin geërodeerde talud. Het kan zijn dat de bovenste bres steeds kleiner wordt en op een gegeven moment uitsterft, terwijl de onderste steeds groeit en na een bepaalde tijd voor een bresvloeiing zorgt.

Er is nog een verschil: de onderste bres ondervindt ook enige invloed van de langstreckende suspensiestroming, zodat de destabiliserende kracht groter is en bijgevolg v_{WAL} ook iets groter dan bij de bovenste bres: de onderste bres haalt de bovenste in. Dat geldt althans als er geen verschil in taludhelling β_{BRES} is en geen verschil in zandeigenschappen.

In de figuren 12, 13 en 14 is een scherp onderscheid gemaakt tussen verticale bressen en taludgedeeltes die veel flauwer zijn. De hier geschetste beschrijving is feitelijk een versimpeling van het proces. De besproken effecten spelen ook bij de meer algemene situatie van een willekeurige taludvorm op een bepaald moment, mits ergens een taludgedeelte aanwezig is met taludhelling steiler dan het natuurlijk talud en/of een suspensiestroming op andere manier op gang

gekomen is. Men kan stellen dat op elke taludgedeelte elk van de 5 bovengenoemde krachten van belang zijn en resulteren in een bepaalde erosiesnelheid. Net als in het voorbeeld van de twee onder elkaar gelegen bressen (figuur 13) kan het zijn dat de erosiesnelheid van een lager gelegen taludgedeelte groter is dan dat van een hoger gelegen taludgedeelte, waardoor versteiling optreedt en het talud nog minder stabiel wordt.

In het kader van Delft Cluster is bij Deltares een eenvoudig rekenmodel ontwikkeld (HMBreach) waarbij, gerekend langs het talud vanaf een initiële bres, de ontwikkeling van de stroomsnelheid, erosie en zandtransport worden berekend voor een stationaire niet-uniforme dichtheidsstroming. Hiermee kan onderzocht worden bij welke taludvorm en diepte beheerst bressen mogelijk is, zoals aangegeven in figuur 11, en wanneer een zelfversterkende suspensiestroom kan optreden met het risico op een bresvloeiing.

De invloed van horizontale gelaagdheid wordt in het model meegenomen. Het is echter nog niet duidelijk hoe losgepakt zand ($\Delta n \approx 0$) gemodelleerd moet worden. Dit rekenmodel kan, ondanks zijn beperkingen, worden toegepast voor het ontwerp van veilige oevers voor zandwinputten. Het laat duidelijk zien dat, wil men een bresvloeiing wil voorkomen, de gemiddelde taludhelling flauwer gekozen moet worden naarmate het talud hoger wordt, de baggercapaciteit groter en het zand fijner. Zie [CUR 2008], [Delft Cluster 2003] en [Delft Cluster 2009].

Kenmerken van bresvloeiingen

EXTREME TYPES

Uit het bovenstaande kunnen twee extreme types bresvloeiing worden afgeleid. In de praktijk zullen waarschijnlijk allerlei andere vormen optreden. Bij het ene extreme type (figuur 14) wordt het proces op gang gebracht door een bres aan de teen van het talud die hoog genoeg is om het proces zoals geschetst in figuur 12 op gang te brengen. De hoge bres kan gemaakt zijn door een baggeraar die te snel zijn zandproductie op gang wilde brengen, maar kan ook het resultaat zijn van een locale afschuiving of een locale verwekingsvloeiing. De vloeiing waarvan de resulterende inscharing op de foto van figuur 15 zichtbaar is kon op deze manier verklaard worden.

Bij het andere extreme type (figuur 16) wordt het proces op gang gebracht door een verstoring bovenaan het talud. Bij die verstoring kan het

eveneens gaan om een gebaggerde bres of een locale taludinstabiliteit. Maar het kan ook gaan om grond die op het talud gestort wordt. In ieder geval moet een suspensiestroming op gang gebracht zijn met een voldoende groot debiet om op het bestaande talud te versnellen en netto erosie te veroorzaken. Verder moet het talud hoog genoeg zijn om de suspensiestroming de gelegenheid te geven explosief te groeien voordat hij weer vertraagt doordat hij de horizontale bodem bereikt. Bij explosieve groei zal het talud onderaan zodanig geërodeerd worden dat het lokaal ook significant versteilt tot een helling steiler dan het natuurlijk talud ofwel een locale bres. Die situatie is aangegeven met t_1 in figuur 16. De rest van het proces (t_2 tot t_{EIND}) is ongeveer gelijk aan dat bij het eerste extreme type.

VOORWAARDEN

De kans op een bresvloeiing wordt vergroot naarmate:

- het talud steiler is (of een grilliger van vorm met lokaal steile delen);
- het talud hoger (dieper) is;
- de initiële verstoring (bres; initiële zand-debiet) groter is;
- de bodemopbouw ongunstiger.

Bij laatstgenoemde voorwaarde kan gedacht worden aan de volgende factoren:

- **Losgepakt zand.** Daarbij is de maximale dilatante volumetoename Δn heel klein, waardoor de walsnelheid v_{WAL} groot is (formule 4) en dus ook het zanddebiet onderaan de steile taludgedeeltes. De invloed kan op dit moment echter nog niet gekwantificeerd worden.
- **Fijn zand.** Naarmate het zand fijner is, is de doorlatendheid k kleiner, is de walsnelheid kleiner (formule 4), is het initiële zanddebiet bijgevolg ook kleiner (formule 5) en zal er aanvankelijk minder bruto erosie optreden. Maar de bruto sedimentatie is ook kleiner, zodat het zand veel langer in suspensie blijft en waardoor de waarde van β_{UNIFORM} toch kleiner is (formule 6) en de gevoeligheid voor bresvloeiing groter.
- Onregelmatige bodemopbouw met veel stoorlagen (bijvoorbeeld kleilagen), waardoor steile taludgedeeltes gemakkelijk kunnen ontstaan.

Een ongunstige bodemopbouw is, anders dan bij verwekingsvloeiingen geen keiharde voorwaarde. Ook bij een homogeen zandmassief met vastgepakt, grof zand kunnen bresvloeiingen optreden. Dit is incidenteel waargenomen bij zandwinputten [CUR, 2008].

KARAKTERISTIEKE UITINGEN

Fenomenologisch zijn er twee belangrijke verschillen tussen de in dit artikel behandelde bresvloeiing en de in een vorig artikel [de Groot e.a. 2007] beschreven verwekingsvloeiing:

- In tegenstelling tot verwekingsvloeiingen vindt de taludontwikkeling alleen plaats aan het oppervlak.
- Een bresvloeiing duurt vele uren; dat is veel langer dan een verwekingsvloeiing.

Literatuur

- Berg, J.H. van den, Gelder, A. van & Mastbergen, D.R. (2002). *The importance of breaching as a mechanism of subaqueous slope failure in fine sand*. *Sedimentology* 49, pp 81 - 95.
- Bezuijen, A. & Mastbergen, D.R. (1988). *On the construction of sand-fill dams - part 2: soil mechanical aspects*. *Modelling Soil-Water - Structure Interactions*, P. Kolkman et al(eds), Balkema, Rotterdam, pp 363 - 371.
- Breusers, H.N.C. (1978). *Hydraulic excavation in sand*, in: *Modern dredging: development in techniques to achieve optimum project realisation*, Proceedings of the international course, 5-10 June 1977, Post Graduate Courses in Civil Engineering, The Hague. ca. 400 pp. + fig., tab.
- CUR (1991). *Kunstmatig in water opgebouwde zandlichamen*. CUR rapport 152. CUR, Gouda, ISBN 90376 00190, ongeveer 300 pp.
- CUR (2008). *Oeverstabiliteit bij zandwinputten*. CUR-Aanbeveling 113. CUR Bouw en Infra, Gouda, ongeveer 140 pp.
- Delft Cluster (2003). *Numerieke modellering taludvorming bij zandwinning*. DC1-321-10.
- Delft Cluster (2009). *Oeverstabiliteit bij Zandwinputten*, Rekenmodel HMBreach, DC1-321-10.
- Groot, M.B. de, Stoutjesdijk, T.P., Meijers, P., Schweckendiek, T. (2007). *Verwekingsvloeiing in zand*. *Geotechniek*, oktober 2007, pp 54 - 59.
- Groot, M.B. de & Mastbergen, D.R. (2006). *Scour hole slope instability in sandy soil*. *Proc. of the 3rd Int. Conf. on Scour and Erosion ICSE, CURNET*, Gouda, pp 126 - 127.
- Mastbergen, D.R., Winterwerp, J.C. and Bezuijen, A. (1988). *On the construction of sand-fill dams - part 1: hydraulic aspects*, *Modelling Soil-Water-Structure Interactions*, P. Kolkman et al(eds), Balkema, Rotterdam, pp 353 - 362.
- Mastbergen, D.R. & Berg, J.H. van den (2003). *Breaching in fine sands and the generation of sustained turbidity currents in submarine canyons*. *Sedimentology*, Nr 50, pp 635 - 637.
- Rhee, C. van & Bezuijen, A. (1998). *The breaching of sand investigated in large-scale model tests*. *Proc. Int. Conf. Coastal Engineering (ASCE)*, Vol. 3, pp 2509 - 2519. ■