

Verwekingsvloeiing in zand

ir. M.B. de Groot, ir. T.P. Stoutjesdijk,
ir. P. Meijers en ir. T. Schweckendiek,
GeoDelft

SAMENVATTING

Zettingsvloeiingen zijn bekend van plaatvallen in de Ooster- en Westerschelde, waarbij de randen van zandplaten over tientallen meters terugschrijden en van oevervallen, waarbij dijken in de diepte kunnen verdwijnen. Er kunnen twee vormen van zettingsvloeiing optreden: 'verwekingsvloeiing' en 'bresvloeiing'. De eerste fase van een verwekingsvloeiing betreft verweking onder constante belasting. De fysische achtergrond hiervan en de voorwaarden hiervoor worden toegelicht en er wordt een overzicht gegeven van methoden uit de adviespraktijk, waarbij wordt ingegaan op de beperkte nauwkeurigheid van voorspellingen. Verdere kennisontwikkeling is noodzakelijk om tot methoden en rekenmodellen te komen die breed toepasbaar zijn.

INLEIDING

Een onderwater zandtalud kan soms schijnbaar spontaan instabiel worden, waarna het zand uitvloeit om pas bij een zeer flauwe helling te sedimenteren. Gewoonlijk wordt dit met 'zettingsvloeiing' betiteld. Hieronder zal betoogd worden dat het bij een zettingsvloeiing kan gaan om een 'verwekingsvloeiing', 'een bresvloeiing' of een combinatie van beide. Voorbeelden van zettingsvloeiingen zijn plaatvallen in de Ooster- en Westerschelde, waarbij de randen van zandplaten over tientallen meters terugschrijden, en oevervallen, waarbij dijken in de diepte kunnen verdwijnen (figuur 1). Bij de toetsing van dijken langs rivieren en zeearmen wordt dit mechanisme meegenomen. Bij stormvloedkeringen, uitwateringssluizen, brugpijlers en andere stroomvernauwingen ontstaan ontgrondingskuilen. Vaak moet daar een bodembescherming worden aangelegd om

te voorkomen dat de kuil zo diep en dat de kuilhelling zo steil wordt, dat een zettingsvloeiing ontstaat en de constructie in de kuil wegzakt. Ook bij zandwinning of bij het baggeren van havenbekkens ontstaat soms een vloeiing. Tenslotte zijn onder water aangelegde zandlichamen gevoelig voor dit soort taludinstabiliteiten.

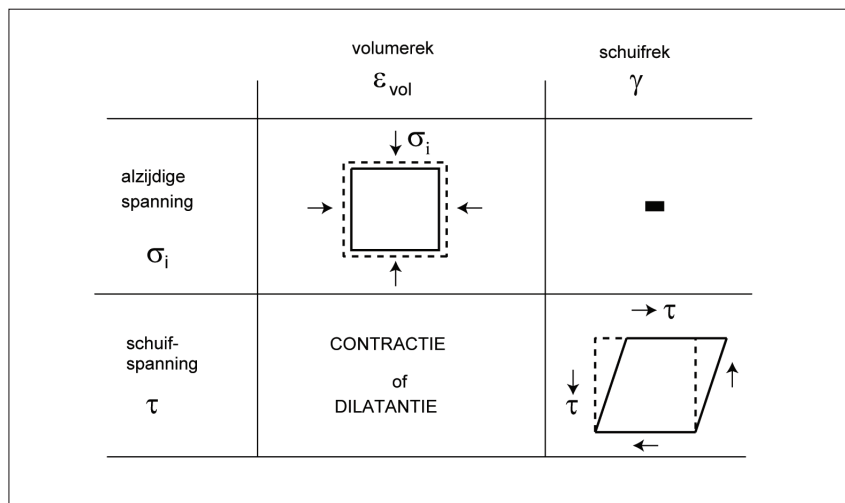
Twee processen kunnen worden aangewezen als oorzaak van een dergelijke sterke taludverflauwing. Het eerste is het plotseling ontstaan van een grote wateroverspanning in een groot deel van het zandlichaam, waardoor de korrelspanning sterk afneemt en het zand vervolgens als een soort viskeuze vloeistof gaat vloeien: een 'verwekingsvloeiing'. Het tweede treedt alleen aan het oppervlak van het talud op. Het betreft een combinatie van een bres,

naar boven voortplant, en een turbulent zand-watermengsel dat langs het talud naar beneden stroomt en erosie veroorzaakt: een 'bresvloeiing'. De vloeiing die na verweking optreedt, kan nog al eens 'ontaarden' in een bresvloeiing. Evenzo zijn er taludinstabiliteiten die beginnen als bresvloeiing, maar overgaan in een verwekingsvloeiing.

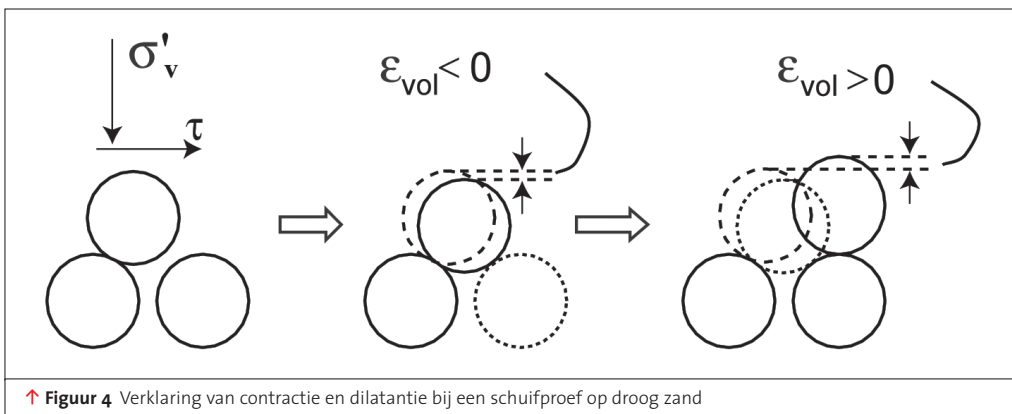
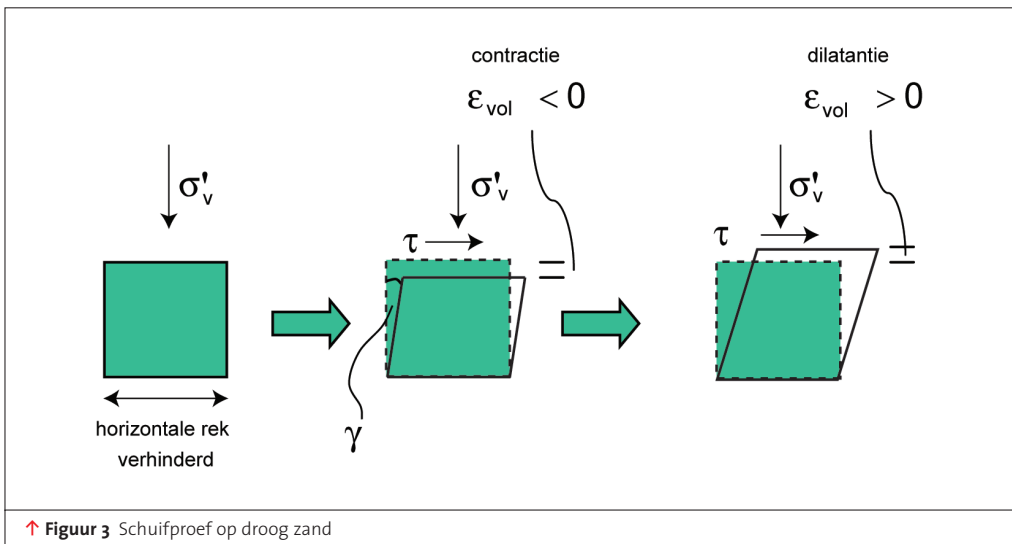
In dit artikel wordt aandacht gevraagd voor de eerste soort vloeiing en dan met name de eerste fase ervan: verweking onder praktisch constante belasting. Daarvan zal de fysische achtergrond beschreven worden. Eerst zal het gedrag van het korrelskelet van zand worden beschreven. Met kennis van dit gedrag wordt vervolgens het gedrag van verzadigd zand onder ongedraineerde condities beschreven. Verder worden de condities waarbij een verwekingsvloeiing kan optreden samengevat en



↑ **Figuur 1** Inbessing met schade aan de dijk bij een oeverval



↑ **Figuur 2** Belangrijkste relaties tussen spanning en vervorming



wordt een kort overzicht van de huidige adviespraktijk gepresenteerd.

Een volgend artikel zal gewijd worden aan mengvormen van verwekingsvloeiing en bresvloeiing en aan zuivere bresvloeiingen. Ook zal verweking van zand onder cyclische belasting in een volgend artikel besproken worden.

SPANNING-VERVORMINGSGEDRAG VAN HET KORRELSKELET

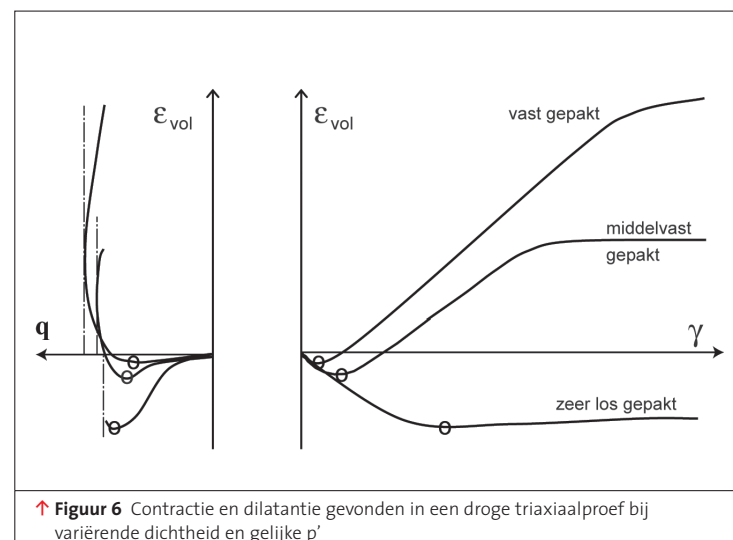
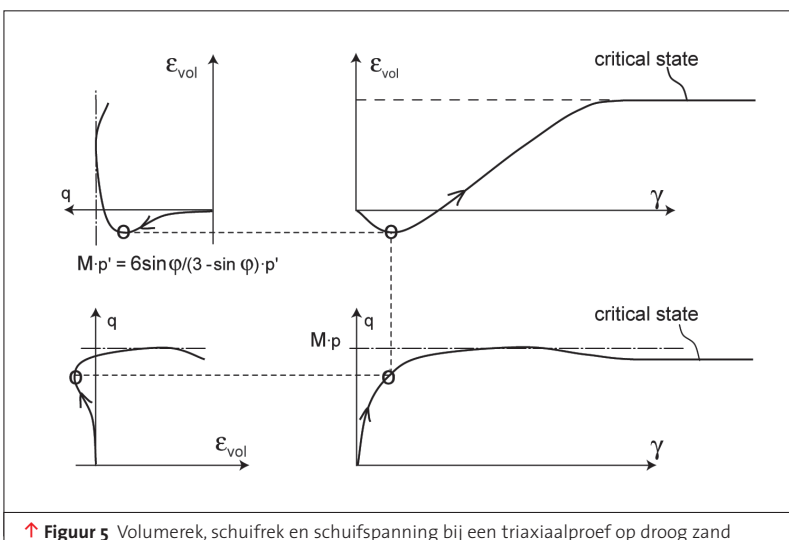
Verweking treedt met name op als het zand verzadigd is met water en ongedraineerd belast wordt. Om de oorzaak te begrijpen, moet men echter kennis hebben van de relatie tussen de spanningsverandering en de vervorming van het korrel skelet. En deze kan het beste bestu-

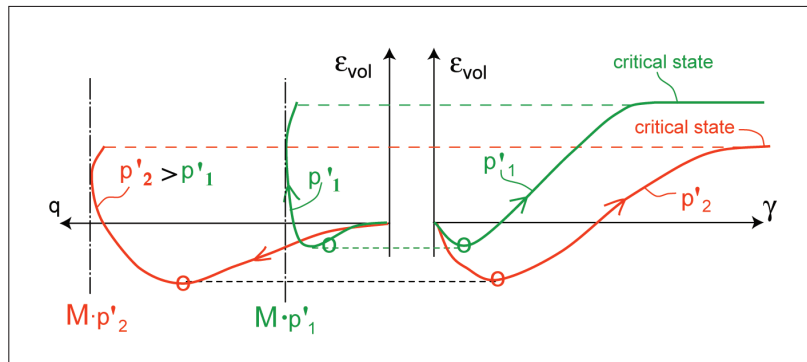
deerd worden met proeven op droog zand of gedraineerde proeven op met water verzadigd zand. De relatie kan ingedeeld worden overeenkomstig *figuur 2*. Van groot belang zijn de links onder aangegeven contractie en dilatantie. Die zijn geïllustreerd in *figuur 3* aan de hand van een schuifproef op droog zand met constante verticale spanning σ_v en geleidelijk toenemende schuifrek. De rek in horizontale richting wordt verhinderd; de rek in verticale richting ϵ_v blijft echter mogelijk. In dit geval is de verticale rek dus gelijk aan de volumerek $\epsilon_{vol} = \epsilon_v$.

Beschouwen we de ontwikkeling van de volumerek, dan zien we eerst contractie (volume verkleining) optreden en daarna dilatantie (volume vergroting). Voor een verklaring wordt naar *figuur 4* verwezen. Tijdens de eerste, nog kleine schuifrek vindt menige korrel een naburige holte om in weg te zakken. Het volume neemt af. Na een bepaalde schuifrek zijn alle holtes opgevuld en moeten de korrels juist over elkaar heen 'kruipen' om verdere schuifvorming mogelijk te maken. Hierbij neemt het volume weer toe. Soortgelijke verschijnselen treden op in een triaxiaalproef.

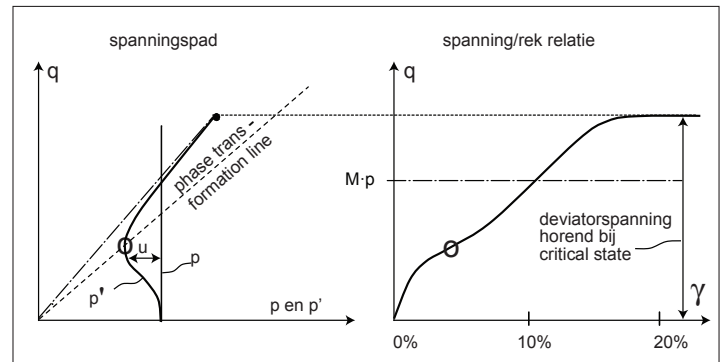
In *figuur 5* zijn de resultaten weergegeven van een droge of gedraineerde triaxiaalproef na het aanbrengen van een alzijdige spanning p , die verder constant gehouden wordt. Na veel schuifrek komt er een einde aan de dilatantie, zoals aangegeven rechtsboven in de figuur. De eindsituatie is de 'critical state' of 'steady state', waarbij de schuifrek blijft toenemen, terwijl alle andere parameters (volume, deviatorspanning, normaalspanning) constant blijven.

Belangrijk is het punt waarop de maximale contractie wordt bereikt. Dit wordt het 'phase





↑ **Figuur 7** Contractie en dilatantie gevonden in een droge triaxiaalproef bij variërend spanningsniveau en gelijke dichtheid



↑ **Figuur 8** Verloop van de schuifrek, schuifspanning, korrelnormalspanning en waterspanning bij een ongedraineerde triaxiaalproef

transformation' punt genoemd [de Groot et al. 2006]. Het wordt in de figuren in dit artikel steeds aangeduid met een rondje (O). De schuifrek is daar nog beperkt, maar de deviatorspanning ligt al dicht bij het maximum.

Contractie en dilatantie worden in sterke mate beïnvloed door de dichtheid van het zand (figuur 6) en het spanningsniveau (figuur 7).

WATEROVERSPANNING IN ONGEDRAINEERD VERZADIGD ZAND

We beschouwen nu dezelfde triaxiaalproef, maar dan uitgevoerd op een met water verzadigd zandmonster, waarbij drainage wordt verhinderd na het aanbrengen van de gemiddelde spanning. De gemiddelde grondspanning p wordt weer constant gehouden. Bij een dergelijke proef kan het volume praktisch niet veranderen. In plaats van volumeverkleining wordt wateroverspanning u gegenereerd. Dit leidt tot een afname van de gemiddelde korrelspanning p' . Men kan stellen dat het korrelskelet tegelijk twee soorten volumerek ondergaat, namelijk contractie door schuifvorming (linksonder in figuur 2) en decompressie door een afname van de gemiddelde korrelspanning (linksboven in figuur 2), waarbij de som van beide vormen van volumerek juist nul is.

Het verloop van de ongedraineerde triaxiaalproef wordt weergegeven in figuur 8. Het verschil in p en p' is de wateroverspanning u . In het linker deel is te zien dat u eerst toeneemt tot het 'phase transformation' punt en vervolgens weer afneemt en zelfs negatief kan worden. De gemiddelde korrelspanning p' vertoont het tegengestelde verloop. Bij doorgaande schuifvorming wordt uiteindelijk de critical state bereikt.

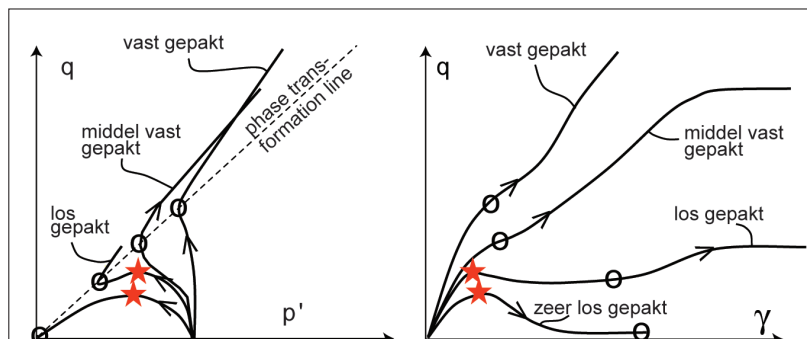
De dichtheid heeft een grote invloed (figuur 9). Een bijzonder fenomeen treedt op bij een losse pakking van het zand. Dan bereikt de deviatorspanning bij relatief geringe schuifrek eerst een tussenmaximum, zoals met een ster aangeduid in de figuren 9, 10 en 12. De dichtheid waarbij dit tussenmaximum net niet meer optreedt, wordt 'natte kritieke dichtheid' genoemd [Lindenberg & Koning 1981]. Het woord 'kritiek' heeft in deze uitdrukking een heel andere betekenis dan 'critical' in 'critical state'. Van belang is op te merken dat de natte kritieke dichtheid toeneemt met de gemiddelde grondspanning p . Dit is uit figuur 10 af te lezen, waar aangegeven is dat een bepaalde dichtheid bij een lage p boven de kritieke waarde kan liggen, terwijl hij bij een hoge p er onder ligt.

Na het bereiken van het tussenmaximum daalt

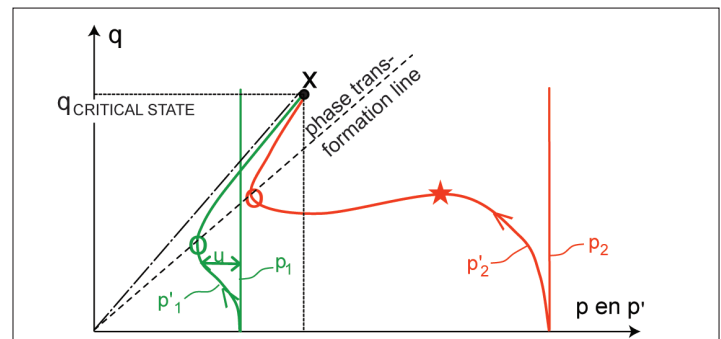
de deviatorspanning tot een minimum vlak voor het 'phase transformation' punt. Rond dat minimum treedt zeer veel schuifrek op. Daarom wordt het wel de 'quasi steady state' genoemd [McRoberts & Sladen 1992]. Tegelijk treedt de maximale wateroverspanning op. Bij zeer losgepakt zand kan die bijna 100 % van de gemiddelde grondspanning zijn. Dan is het monster praktisch verweekt. Bij iets vastere pakking is dat percentage kleiner en kan van 'gedeeltelijke verweking' gesproken worden.

Zoals afgelezen kan worden uit figuur 9, heeft de dichtheid ook een zeer sterke invloed op de critical state deviatorspanning. In figuur 10 is aangegeven dat, onafhankelijk van de beginspanning, dezelfde critical state spanningen worden bereikt als de dichtheid hetzelfde is. De effecten van de voorgeschiedenis – verloop van de spanningen; hoe de betreffende dichtheid tot stand is gekomen – zijn dan uitgewist.

Zo ontstaat voor elke zandsoort een unieke relatie tussen enerzijds de dichtheid of het poriëngetal e , anderzijds de critical state waarden van q en p' . Deze relatie wordt 'critical state line' of 'steady state line' genoemd. Hij is in figuur 11 weergegeven, samen met het spanningsverloop van figuur 10. Het verschil tussen het poriëngetal van in-situ zand en het critical



↑ **Figuur 9** Spanningspaden bij een ongedraineerde triaxiaalproef als functie van de dichtheid. De natte kritieke dichtheid ligt hier in tussen los gepakt en middel vast gepakt



↑ **Figuur 10** Spanningspaden bij een ongedraineerde triaxiaalproef als functie van de initiële gemiddelde grondspanning bij gelijke dichtheid

state poriëngetal bij dezelfde spanning p' wordt 'state parameter' genoemd [Been & Jefferies 1985]. Hoe groter de state parameter, des te gevoeliger is het zand voor verweking, zie ook [Mathijssen e.a. 2007]. Als de gemiddelde korrelspanning hoog is (p_2) en de state parameter daardoor positief, zal de korrelspanning bij ongedraineerd zand moeten afnemen om de critical state te bereiken, hetgeen toename van de waterspanning impliceert. Bij lage korrelspanning en dezelfde dichtheid geldt het omgekeerde (p_1).

Bij het gebruik van de critical state line als referentie dient men zich te realiseren dat het begin van verweking juist optreedt bij de geringe schuifvervorming die karakteristiek is voor het tussenmaximum, en sterk medebepaald wordt door de voorgeschiedenis. Bij het bereiken van de critical state lijn is het zand deze voorgeschiedenis 'vergeten'.

METASTABILITEIT

Het belang van het 'tussenmaximum' wordt duidelijk als men de proef niet vervormingsgestuurd doet, maar spanningsgestuurd: de deviatorspanning wordt geleidelijk opgevoerd (figuur 12). Zodra het maximum in punt A bereikt wordt, kan het monster in eerste instantie geen nieuw evenwicht vinden en schiet het in een fractie van een seconde door naar punt B. De gemiddelde korrelspanning p' neemt daarbij af van de waarde in punt A naar de waarde in punt B. Omdat de gemiddelde grondspanning p gelijk blijft, neemt de wateroverspanning in dezelfde fractie van een seconde met dezelfde waarde toe. Er treedt daarbij zeer veel schuifrek op. Kortom er treedt een instabiliteit op, al vindt het monster vaak een nieuw evenwicht na flinke vervorming.

Punt A (de ster) kan worden beschouwd als het punt van 'metastabiliteit', de situatie van een

dubbeltje op zijn kant. Als het monster in dat punt is aanbeland, zal een zeer kleine verstoring voldoende zijn om die instabiliteit teweeg te brengen. Dit punt wordt ook wel aangeduid met de term 'collapse' [Sladen et al. 1985], 'instability' [Molenkamp 1989, Lade 1992] of 'yield' [Olson & Stark 2003].

Behalve een homogeen zandmonster kan ook een heel zandlichaam metastabiel zijn. Waarschijnlijk is dat het geval bij een talud vlak voordat daar een verwekingsvloeiing optreedt (figuur 13), zoals blijkt uit grootschalige proeven [Bezuijen & Mastbergen 1988]. Daarbij kunnen de volgende fasen onderscheiden worden:

- I. Geleidelijke verandering van de spanningen als gevolg van erosie, aanzanding of anderszins zodanig dat het talud metastabiel wordt.
- II. Sterke toename van de wateroverspanning in een groot deel van het talud ingeleid door een plotselinge kleine wijziging van de belasting (trilling, plotselinge waterspiegeldaling, afbrokkelen kleilaagje, insteken zuigbuis in talud, ...). Daarbij kleine schuifvervormingen met herverdeling van de spanningen tussen zandelementen met verschillende verwekinggevoeligheid. Tijdsduur: orde fractie van seconde.
- III. Afstroming van overspannen water met verdere herverdeling van spanningen, verweking van bovenliggend zand, verdichting diepe lagen en wegvloeien van verwekte zandelementen. Tijdsduur: orde minuten.
- IV. Eventueel: ontstaan metastabiliteit in ander deel talud met verdere ontwikkeling vloeiing.

VOORWAARDEN VOOR VERWEKINGSVLOEIING

De voorwaarden voor metastabiliteit in een zandlichaam kunnen als volgt worden samengevat:

1. zandlichaam, verzadigd met water
2. voldoende grote zone van losgepakt, niet gecementeerd zand
3. gemiddelde korrelspanning en deviatorspanning in het zand, beide voldoende hoog
4. het zand kan vervormen en wegvloeien zonder dat de deviatorspanning sterk afneemt ('spanningsgestuurd')

Verweking in het metastabiele zandlichaam vereist bovendien:

5. een plotselinge (kleine) verandering van de belasting als inleiding.

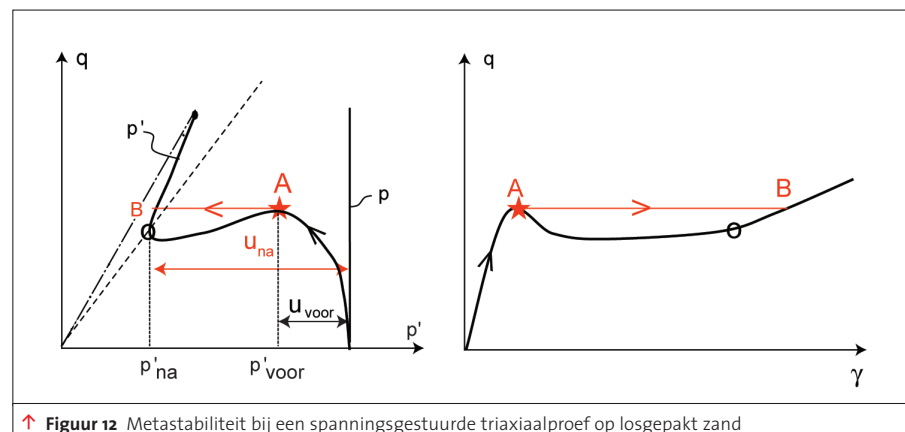
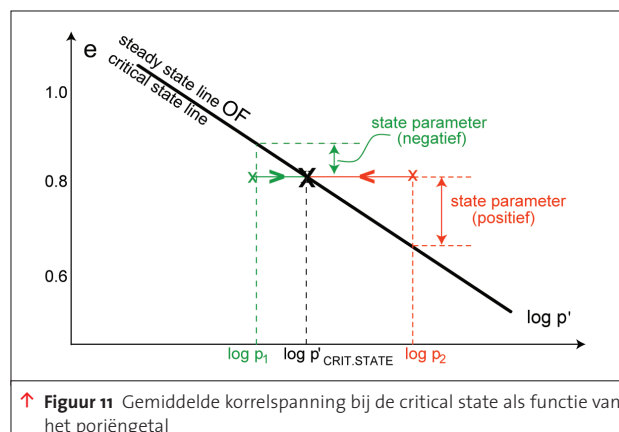
Bij een talud wordt aan de 3^e voorwaarde voldaan als het talud voldoende hoog en steil is. Wat 'voldoende' is, moet steeds in combinatie met de tweede voorwaarde bekeken worden. Praktische richtlijnen zijn bijvoorbeeld te vinden in [CUR C130, 2007]. Aan de vierde voorwaarde wordt bij een talud altijd voldaan. Bij een horizontaal terrein zonder bovenbelasting echter zal een kleine schuifvervorming doorgaans leiden tot een toename van de K_0 en een afname van de deviatorspanning. Toch zijn er omstandigheden denkbaar waarbij dit niet het geval is, bijvoorbeeld aan een tunnelboorfront of bij een zandlichaam omringd door slappe klei/veen [de Groot et al. 2005].

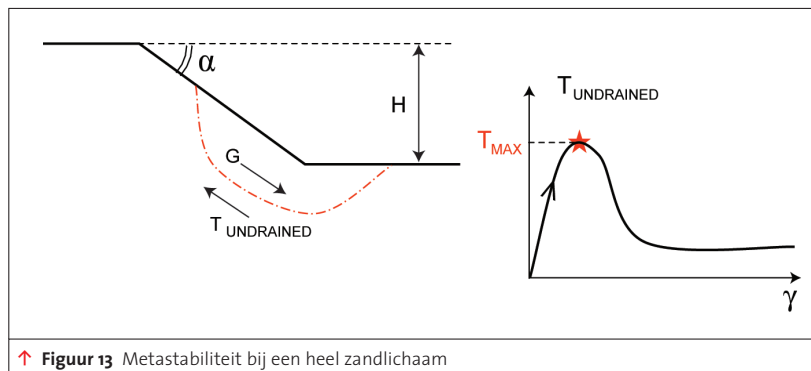
Andere in de literatuur genoemde factoren, zoals korrelgrootte, korrelvorm en geologische herkomst (zie Rooduijn & Zwang 2006), mogen niet als harde voorwaarden worden beschouwd. De korrelgrootte en de daarmee samenhangende drainagecapaciteit zijn niet van invloed op het ontstaan van deze vorm van verweking; wel op het uitvloeien (fases III en IV).

ADVIESPRAKTIJK

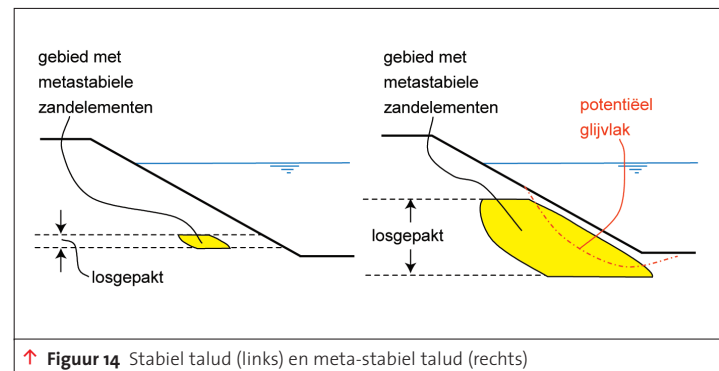
Bepaling in-situ dichtheid

Voor een advies over de kans op verweking van zand onder constante belasting is in ieder geval





↑ **Figuur 13** Metastabiliteit bij een heel zandlichaam



↑ **Figuur 14** Stabiel talud (links) en meta-stabiel talud (rechts)

terreinonderzoek nodig gericht op het vaststellen van de laagopbouw en de dichtheid van iedere zandlaag. Het bepalen van de (relatieve) dichtheid in-situ is slechts met een beperkte nauwkeurigheid mogelijk en is daarmee een belangrijke bron van onzekerheid. Nadere bespreking valt echter buiten het bestek van dit artikel.

Bepaling verwekinggevoeligheid van zand

Een groot deel van de literatuur betreft resultaten van laboratoriumonderzoek naar de verwekinggevoeligheid van zand als functie van de relatieve dichtheid en het spanningniveau. Hierbij kunnen een paar opmerkingen worden geplaatst:

- Het betreft bijna alleen resultaten van triaxiaalproeven, hoewel de praktijkomstandigheden bijna altijd min of meer een vlakke vervormingstoestand zijn en rotatie van de hoofdspansingen niet gemodelleerd wordt: een bron van onzekerheid
- Ongedraineerde triaxiaalproeven bij verschillende dichtheden en verschillende consolidatiespanningen zijn geschikt voor de bepaling van de natte kritieke dichtheid, de korrelspanningen bij het punt van metastabiliteit en die bij quasi steady state en critical state. Meestal wordt isotroop geconsolideerd en wordt de rest van de proef volledig ongedraineerd gedaan. Dichter bij de natuurlijke omstandigheden is het consolideren volgens een K_0 pad en pas daarna ongedraineerd belasten.
- Bepaling van de critical state door middel van triaxiaalproeven is slechts met beperkte nauwkeurigheid mogelijk, omdat de grond in het monster niet homogeen vervormt zodra de schuifvervorming sterk wordt.
- In Nederland is veel ervaring gebaseerd op de toepassing van droge 'kritieke dichtheidsproeven'. Dat zijn triaxiaalproeven waarmee de drie in *figuur 2* aangegeven componenten van de relatie tussen span-

ning en vervorming apart worden geanalyseerd. Het voordeel is dat ze beter inzicht geven in die componenten dan ongedraineerde proeven. De resultaten worden gebruikt om het ongedraineerde gedrag te voorspellen [Lindenberg & Koning 1981; de Groot & Stoutjesdijk 1997]. De nauwkeurigheid van die voorspelling blijkt soms beperkt, mogelijk als gevolg van een verschillend spanningspad bij deze twee typen proeven.

TALUDGEOMETRIE EN BEPALING SPANNINGSVERDELING

De spanningsverdeling in het zandpakket voorafgaand aan eventuele verweking is essentieel voor de bepaling of het talud meta-stabiel kan zijn. Taludhelling en taludhoogte hebben daar een grote invloed op. De verticale spanningen volgen uit het verticale evenwicht. Maar de onzekerheid over de horizontale grondspanningen en de schuifspanningen is groot. Bovenaan een talud zijn de spanningen heel anders dan onderaan. Veel hangt af van de spanningsgeschiedenis. Daarover is vaak weinig bekend. In de literatuur over de adviespraktijk wordt merkwaardig genoeg bijna geen aandacht besteed aan de wezenlijke vraag welke schuifspanningen waar in het talud aanwezig zijn.

Ook de spanningsverdeling, ofwel het evenwicht, na het ontstaan van eventuele wateroverspanning in een aantal zandelementen is essentieel voor de vraag of het zandpakket als geheel metastabiel kan zijn (*figuur 14*).

Integratie en interpretatie

Er bestaan weinig methodes waarbij in-situ dichtheid, verwekinggevoeligheid en spanningsverdeling geïntegreerd worden in een analyse om antwoord te geven op de vraag of een verwekingsvloeiing kan optreden. Met het computerprogramma SLIQ2D kan wel zo'n

geïntegreerde analyse worden uitgevoerd [Stoutjesdijk et al. 1998 en Stoutjesdijk & de Groot 1994b]. Daar is in Nederland veel ervaring mee. Een aantal grote vloeiingen in Zeeland zijn er succesvol mee geanalyseerd [Stoutjesdijk & de Groot 1994a]. De invoer wordt thans afgeleid uit de resultaten van droge kritieke dichtheidsproeven, als functie van de dichtheid van de verschillende zandlagen en de taludgeometrie. De uitvoer van de analyse is de omvang van het metastabiele gebied binnen het zandlichaam. Het model houdt rekening met de inhomogene spanningsverdeling binnen een talud. De methode wordt thans zo ontwikkeld dat deze verdeling kan worden afgeleid uit eindige elementen berekeningen met een geavanceerd constitutief grondmodel en waarbij de stabiliteit na verweking wordt afgeleid door de sterktereductie in te voeren op basis van het ongedraineerde spanningspad; vergelijk *figuur 12*. Tevens wordt gewerkt aan een uitbreiding om de invoer ook uit ongedraineerde triaxiaalproeven af te kunnen leiden. Tenslotte zijn er plannen om verwekings- en bresmodellering aan elkaar te koppelen teneinde de interactie met bressen te kunnen kwantificeren.

Een geïntegreerde analyse kan ook worden uitgevoerd met het geavanceerde eindige elementen programma MONICA, gebaseerd op het door Molenkamp ontwikkelde constitutieve model MONOT [Hicks & Boughrarou 1998].

Een elegant geïntegreerd model betreft het model van Olson & Stark [2003]. Zij gaan echter uit van twee onbewezen optimistische veronderstellingen. De eerste luidt dat er al voor het optreden van metastabiliteit spanningsherverdeling plaatsvindt over het gehele potentiële glijvlak. De tweede luidt dat van de schuifspanning alleen de component in het potentiële glijvlak van belang is.

Een recente ontwikkeling, tenslotte, is het state

parameter model van Hydronamic gebaseerd op het werk van Been & Jefferies [Jager 2006].

CONCLUSIES

Bij zettingsvloeiingen kan onderscheid gemaakt worden tussen 'brevloeiingen' en 'verwekingsvloeiingen', al naar gelang het dominante mechanisme. De eerste fase van een verwekingsvloeiing bestaat uit verweking van zand onder praktisch constante belasting. Dat fenomeen kan verklaard worden uit het gedrag van zand bij ongedraineerde afschuiving. Het kan plaatsvinden in een verzadigd zandlichaam dat metastabiel is als gevolg van de losse pakking van het zand en spanningen zoals ze voorkomen in taluds met tamelijk steile helling en tamelijk grote hoogte. Een trilling of andere plotselinge, maar eventueel zeer kleine belastingverandering kan het proces inleiden.

Het antwoord op de vraag of in een bepaald geval een vloeiing kan optreden vereist kennis van de in-situ dichtheid van het zand, de verwekinggevoeligheid ervan als functie van dichtheid en spanning, alsmede kennis van de spanningsverdeling in de toestand voor verweking. Er zijn weinig methodes waarmee recht gedaan wordt aan al deze parameters. De op dit moment beschikbare methodes vereisen de nodige kennis en ervaring, zodat in veel gevallen specialistisch advies noodzakelijk is. Doorontwikkeling van kennis is nodig om tot te komen tot methoden en rekenmodellen die voor de brede adviespraktijk toepasbaar zijn.

LITERATUUR

- [1] Been, K. & Jefferies, M.G. (1985). A state parameter for sands. *Geotechnique* 35 - 2, pp 99-112
- [2] 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
- [3] CUR C130 (2007). Oeverstabiliteit bij zandwinputten. Aanbeveling in voorbereiding.
- [4] De Groot, M.B., Bolton, M.D., Foray, P., Meijers, P., Palmer, A.C., Sandven, R., Sawicki, A., Teh, T.C. (2006). "Physics of liquefaction phenomena around marine structures." *J. Waterway Port Coastal & Ocean Engineering*, 132-4, pp 227-243
- [5] Groot, M.B. de & Stoutjesdijk, T.P. (1997). Undrained stress path of loose sand predicted from dry tests. *Canadian Geotechnical Journal* 34, pp 131-138
- [6] Groot, M.B. de, Korff, M. & Pachen, H.M.A. (2005). Liquefaction flow slide at horizontal ground. *Proc. 16th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. ICSMFE, Osaka*. Millpress, Rotterdam, Vol. 4, pp 2503-2506
- [7] Hicks, M.A. & Boughrarou, R. (1998). Finite element analysis of the Nerlerk underwater berm failures. *Géotechnique* 48 - 2, pp 169-185
- [8] Jager, R.R. de (2006). *Afstudeerverslag TUD* (nog niet publiek).
- [9] Lade, P.V. (1992). Static instability and liquefaction of loose fine sandy slopes. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE 118 - 1, pp 51-71
- [10] Lindenberg, J. & Koning, H.L. (1981). Critical density of sand. *Géotechnique* 31, No 2, 231-245
- [11] Mathijssen, F.A.J.M., Hooiveld, B.J., de Jager, R.R. & Molenkamp, F. (2007). Ingezonden brief met commentaar op Rooduijn en Zwang 'Aanleg van een baggerspeciedepot in het Hollandsch Diep te Moerdijk'. *Geotechniek* 11-1, pp 26 - 27
- [12] McRoberts, E.C. & Sladen, J.A. (1992). Observations on static and cyclic sand-liquefaction methodologies. *Canadian Geotechnical Journal* 29, pp 650-665.
- [13] Molenkamp F. (1989). Liquefaction as an instability. Report of Int. Soc. Soil Mech. Found. Eng. ISSMFE technical committee on Mechanics of Granular Materials, to 12th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. ICSMFE, Rio de Janeiro, 157-163.
- [14] Olson, S.M. & Stark, T.D. (2003). Yield Strength Ratio and Liquefaction Analysis of Slopes and Embankments. *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE 129-8, pp 727-737
- [15] Rooduijn, M.P. & Zwang, L.W.A. (2006). Aanleg van een baggerspeciedepot in het Hollandsch Diep te Moerdijk. *Geotechniek* 10-3, pp 48 - 53
- [16] Sladen, J.A., D'Hollander, R.D. & Krahn, J. (1985). The liquefaction of sands, a collapse surface approach. *Canadian Geotechnical Journal* 22, pp 564-578.
- [17] Stoutjesdijk, T.P. & Groot, M.B. de (1994a). Verificatie SLIQ2D aan de Zeeuwse praktijk. *GeoDelft*, CO-341940/21, ca. 200 pp.
- [18] Stoutjesdijk, T.P. & Groot, M.B. de (1994b). Handboek zettingsvloeiing. *GeoDelft*, CO-353260/10, 104 pp.
- [19] Stoutjesdijk, T.P., Groot, M.B. de & Lindenberg, J. (1998). Flow slide prediction method: influence of slope geometry. *Canadian Geotechnical Journal*, 35, pp 34 –54.

Reacties op dit artikel kunnen tot 1 januari 2008 naar de uitgever worden gestuurd