

Bezwijksterkte van grond in stabiliteitsanalyses voor waterkeringen

Ing. T.A. van Duinen
GeoDelft

Ir. E.O.F. Calle
GeoDelft

SAMENVATTING

Bij analyses van de taludstabiliteit van waterkeringen wordt in de huidige adviespraktijk onvoldoende onderscheid gemaakt tussen echt bezwijken en eisen voor vervorming. De huidige werkwijze staat eigenlijk voor het met een kleine kans overschrijden van een niet nader gespecificeerde kleine vervorming. Met een nieuw gestart onderzoek wordt beoogd de werkelijke sterkte van waterkeringen zichtbaar te maken. Daarbij zal worden uitgegaan van de bezwijksterkte van grond. Deze kennisontwikkeling leidt tot de mogelijkheid om scherper te toetsen en daarmee dijkverbetering verantwoord uit te stellen. De gevolgde werkwijze van het onderzoek zal worden vastgelegd in een volgende versie van het Voorschrift Toetsen op Veiligheid.

INLEIDING

In opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat is GeoDelft gestart met een onderzoek naar een verbeterde modellering en beoordeling van de taludstabiliteit van waterkeringen. Hiervoor is op verzoek van het toenmalige Hoogheemraadschap van de Alblasserwaard en de Vijfheerenlanden (nu Waterschap Rivierenland) een onderzoeksvoorstel opgesteld. Aanleiding hiervoor was het feit dat de Lekdijk tussen Nieuw-Lekkerland en Groot-Ammers over grote delen niet kan worden goedgekeurd bij de Toetsing op Veiligheid¹. Het toetsaspect macrostabiliteit binnenwaarts bij opdrijven is hiervan de oorzaak. Op advies van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde is ook het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier bij het onderzoek betrokken. Dit in ver-

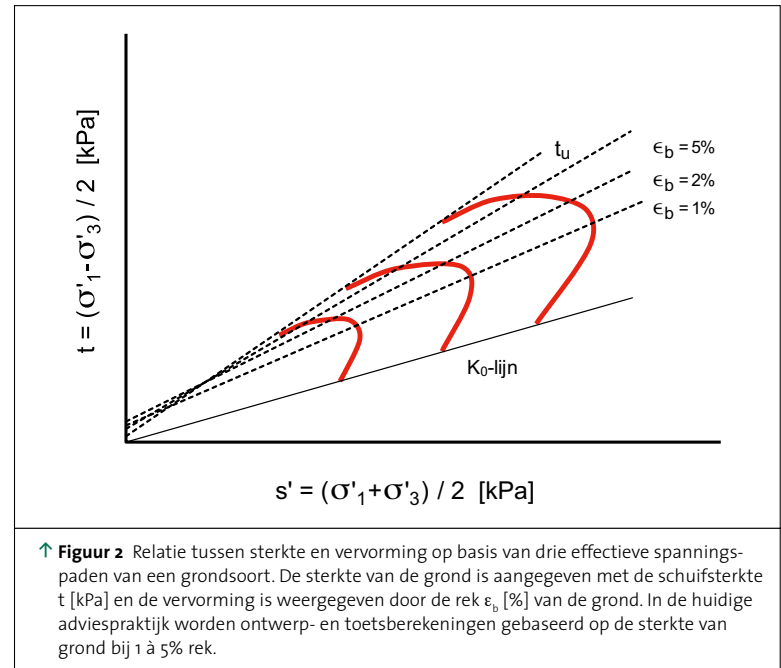
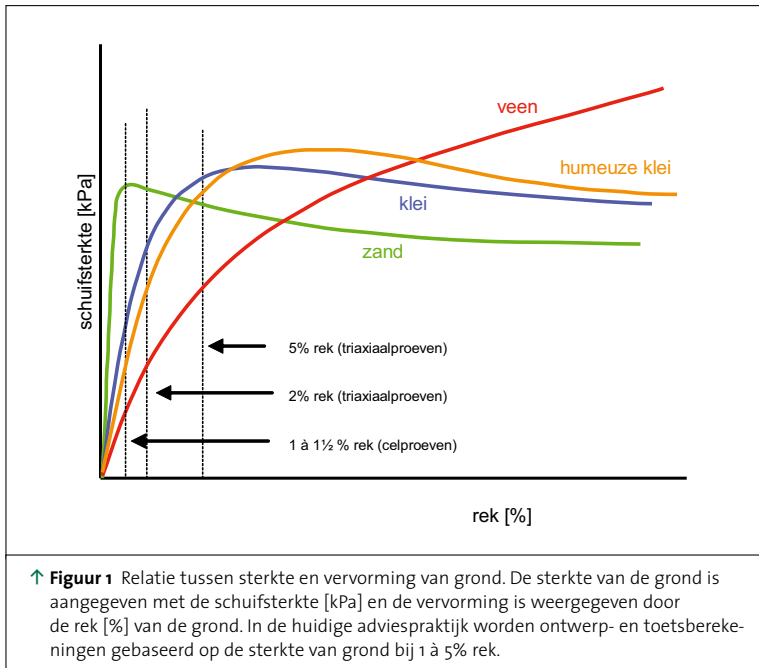
band met de Markermeerdijk die over grote delen eveneens niet kan worden goedgekeurd bij de Toetsing op Veiligheid. Ook hier is het toetsaspect macrostabiliteit binnenwaarts de oorzaak. Het onderzoek wordt uitgevoerd in het kader van het project Sterkte & Belastingen Waterkeringen van Rijkswaterstaat, dat als doelstelling heeft het invullen van de belangrijkste kennisleemtes ten behoeve van de toetsing van primaire waterkeringen. Het onderzoek wordt begeleid door een klankbordgroep met vertegenwoordigers van Waterschap Rivierenland, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, Provincie Zuid-Holland en de Werkgroep Techniek van het Expertise Netwerk Waterkeringen (ENW).

De doelstelling van het onderzoek is de ontwikkeling en de validatie van een nieuwe toetsmethodiek voor de taludstabiliteit van waterkeringen. In de huidige adviespraktijk wordt onvoldoende onderscheid gemaakt tussen echt bezwijken van waterkeringen en de eisen voor vervorming van waterkeringen. Met andere woorden: er wordt onvoldoende onderscheid gemaakt tussen het aspect veiligheid en de aspecten bruikbaarheid en beheer en onderhoud. Dit laatste is zeker van belang bij het ontwerpen van dijken of dijkverbeteringen, maar speelt in beginsel geen rol bij het toetsen op veiligheid. Door deze werkwijze wordt de werkelijke sterkte van waterkeringen niet in rekening gebracht. Met

het inmiddels gestarte onderzoek wordt beoogd de werkelijke sterkte van waterkeringen zichtbaar te maken. Om dit doel te bereiken wordt een uitgebreid grondonderzoek uitgevoerd, zowel in het veld als in het laboratorium. Daarbij wordt veel aandacht besteed aan de stijfheid van de grond. Op basis van de resultaten van het grondonderzoek zullen stabiliteitsanalyses worden uitgevoerd, onder andere met Eindige Elementen Modellen. In het onderzoek zal ook gebruik worden gemaakt van internationale kennis. De kennisontwikkeling leidt tot de mogelijkheid om scherper te toetsen en daarmee dijkverbetering verantwoord uit te stellen. Uitgaande van stijgende toetspeilen (waterstanden) zal dijkverbetering op enig moment in de toekomst alsnog noodzakelijk zijn. Na het uitvoeren van het onderzoek zullen de gevolgde werkwijze en de resultaten van het onderzoek worden vastgelegd in een nieuwe methodiek voor het uitvoeren van een geavanceerde toetsing. Deze methodiek kan in een volgende versie van het Voorschrift Toetsen op Veiligheid worden opgenomen.

In dit artikel wordt ingegaan op de visie op de vigerende veiligheidsbenadering voor waterkeringen die ten grondslag ligt aan het onderzoek naar de nieuwe toetsmethodiek voor taludstabiliteit. In volgende artikelen zal worden ingegaan op diverse onderdelen van het onderzoek, zoals het veld- en laboratoriumonderzoek en de uit te voeren analyses.

¹ Waterkeringbeheerders dienen volgens de Wet op de waterkering iedere vijf jaar de waterstaatkundige veiligheid van de primaire waterkeringen te beoordelen. De Minister van Verkeer en Waterstaat stelt een Voorschrift Toetsen op Veiligheid beschikbaar op basis waarvan de waterkeringen dienen te worden getoetst. Dit voorschrift geeft criteria waaraan de primaire waterkeringen dienen te voldoen. Het voorschrift geeft ook aan volgens welke methoden de beoordeling moet worden uitgevoerd. Bij de beoordeling van de diverse faalmechanismen wordt achtereenvolgens een globale, gedetailleerde en geavanceerde toetsing doorlopen totdat een definitief oordeel kan worden gegeven.



VIGERENDE VEILIGHEIDSBENADERING

Artikel 3 eerste lid van de Wet op de waterkering (21 december 1995) is de wettelijke basis voor het beoordelen van de veiligheidsstatus van primaire waterkeringen. De Wet luidt daar als volgt:

Op de bij deze wet behorende bijlage II en bijlage IIA is voor elk dijkkringgebied de veiligheidsnorm aangegeven als gemiddelde overschrijdingskans - per jaar - van de hoogste hoogwaterstand waarop de tot directe kering van het buitenwater bestemde primaire waterkering moet zijn berekend, mede gelet op overige het waterkerend vermogen bepalende factoren.

Uit deze wetstekst en de bijbehorende bijlagen kan worden afgeleid bij welke gemiddelde overschrijdingskans per jaar met de bijbehorende hoogwaterstand het waterkerend vermogen van een waterkering nog gegarandeerd moet zijn. Bij de berekening van een waterkering op de voorgeschreven hoogwaterstand moeten ook overige het waterkerend vermogen bepalende factoren in beschouwing worden genomen. Volgens het Voorschrift Toetsen op Veiligheid [DWW, 2004] gaat het om factoren, zoals: lagere waterstanden, golven, stromingen, slingeringen in de waterstand, stormduur, sterkte-eigenschappen van kering en ondergrond, bodemdaling en getijhoogwaterstijging.

Het is duidelijk dat het in de Wet alleen om veiligheid en waterkerend vermogen gaat. Het

doel van de Wet is de veiligheid tegen overstromen te waarborgen. De wijze waarop een waterkering de wettelijk vastgestelde hoogwaterstand veilig moet keren (bruikbaarheid) wordt niet voorgeschreven. Er worden ook geen eisen gesteld in verband met beheer en onderhoud.

In het Voorschrift Toetsen op Veiligheid [DWW, 2004] (als technische uitwerking van de Wet op de waterkering) wordt ingegaan op de belangrijkste verschillen tussen toetsen en ontwerpen van waterkeringen. Een van de verschillen die worden genoemd is:

Doordat toetsen op veiligheid uitsluitend is gericht op de waterkerende functie van de waterkering, mag er binnen de periode waarop de toetsing betrekking heeft, 'van alles' mis gaan met de kering, zolang dit maar niet binnen een periode van hoogwater kan leiden tot bresvorming en/of overstroming onder maatgevende of minder extreme omstandigheden.

Ook uit dit citaat blijkt duidelijk dat bij veiligheid alleen eisen worden gesteld aan het waterkerend vermogen. Er worden geen eisen gesteld aan bruikbaarheid. Er worden ook geen eisen gesteld in verband met beheer en onderhoud. Het gaat bij de toetsing om de aanwezige veiligheid tegen echt bezwijken van waterkeringen. Waterkeringen moeten voldoende hoogte en sterkte hebben om hoge buitenwaterstanden te keren. Bij de sterkte-eis worden geen nadere

eisen gesteld aan de vervorming van waterkeringen. Bij het keren van een hoge buitenwaterstand (toetspeil) mag dus ook grotere vervorming optreden. Voorwaarde hierbij is wel dat geen ontoelaatbare overslag optreedt.

HUIDIGE ADVIESPRAKTIJK

Toetsen versus ontwerpen

Hoewel bij het toetsen van bestaande waterkeringen formeel alleen het veiligheidsaspect wordt getoetst, waarbij geen eisen worden gesteld aan de vervorming, is vanwege de werkwijze in de adviespraktijk de vervorming van de waterkering toch mede bepalend voor het resultaat van de toetsing. Evenals bij het ontwerpen van dijken of dijkverbeteringen wordt in de adviespraktijk bij het toetsen van bestaande waterkeringen de vervorming van de waterkering indirect in de beoordeling meegenomen. De regelgeving in de leidraden van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW) ten aanzien van de wijze waarop de sterkte van grond moet worden vastgesteld, is namelijk gelijk voor ontwerpberekeningen en voor de toetsing van bestaande waterkeringen.

Rekenmodellen en parameterkeuze

De standaard-rekenmodellen (volgens de theorie van Bishop of Spencer) voor het rekenen aan de macrostabiliteit van taluds zijn sterkteberekeningen. Daarmee wordt geen inzicht verkregen in de vervorming van een waterkering onder invloed van het eigen gewicht van het dijklichaam of hoge buitenwaterstanden. Het

ontstaan van ongewenste vervorming van een waterkering wordt in de huidige adviespraktijk voorkomen door voor de sterkte van de grond niet de maximale sterkte (bezwijksterkte) in de berekeningen in te voeren, maar een lagere sterkte. De maximale sterkte van grond wordt immers pas gemobiliseerd bij grotere vervorming (rek) van de grond. In *figuur 1 en 2* is de relatie tussen de sterkte en de vervorming (rek) van grond schematisch aangegeven. In *figuur 1* is de relatie tussen sterkte en rekniveau aangegeven voor verschillende grondsoorten. In *figuur 2* is de relatie aangegeven tussen sterkte en rekniveau voor drie effectieve spanningspanden van een grondsoort. De keuze voor het rekniveau in *figuur 1 en 2* bepaalt de schuifsterkte die in de stabiliteitsberekeningen zal worden ingevoerd. Door deze werkwijze is niet duidelijk welke vervorming bij een dijkverbeteringsontwerp of een toetsing verwacht moet worden, maar er wordt van uitgegaan dat de vervorming voldoende klein zal zijn.

Criteria en veiligheidsfactoren

Bij het afleiden van de partiële veiligheidsfactoren van de TAW-leidraden is ervan uitgegaan dat de vereiste evenwichtsfactoren behoren bij echt bezwijken van waterkeringen (begin van falen: afschuiving binnentalud met kans op inundatie). Daarbij is het gebruik van celproeven altijd het uitgangspunt geweest. Wanneer een op bovenstaande wijze berekende evenwichtsfactor van een stabiliteitsberekening juist voldoet aan de vereiste evenwichtsfactor betekent dit in tegenstelling tot het uitgangspunt van de TAW-leidraden niet dat de vereiste veiligheid tegen echt bezwijken ook maar net is gerealiseerd. Om ontoelaatbare vervorming te voorkomen, is in de berekening immers niet de maximale sterkte (bezwijksterkte) van de grond ingevoerd. De huidige werkwijze staat daarom eigenlijk voor het met een kleine kans overschrijden van een niet nader gespecificeerde kleine vervorming. De TAW-leidraden geven overigens wel de mogelijkheid om met bezwijksterkte te ontwerpen (op basis van triaxiaalproeven). Hiervoor worden iets hogere partiële veiligheidsfactoren gegeven. De veiligheidsbenadering voor het rekenen met bezwijksterkte is echter nooit goed uitgewerkt.

CRITERIA VOOR STERKTE EN VOOR VERVORMING

Bezwijken

De kern van het onderzoek naar een verbeterde modellering en beoordeling van de taludstabiliteit van waterkeringen is het expliciet

maken van zowel de sterkte als de vervorming van waterkeringen. Eventueel aanwezige reserves in de sterkte van waterkeringen die inherent zijn aan de in de adviespraktijk gebruikelijke werkwijze om voor de sterkte van de grond niet de maximale sterkte (bezwijksterkte) in de berekeningen in te voeren, maar een lagere sterkte, kunnen met het onderzoek zichtbaar worden gemaakt. Daarmee verhoogt het onderzoek niet alleen het inzicht in het gedrag van waterkeringen bij hoge buitenwaterstanden, maar levert ook winst op bij de beoordeling van de sterkte van waterkeringen.

Bezwijken van waterkeringen moet worden gekoppeld aan de toelaatbare overstromingskansen (overschrijdingsfrequentie van de maatgevende waterstand). Wanneer grotere vervorming optreedt bij bestaande waterkeringen en deze hoge kosten voor beheer en onderhoud veroorzaakt, mag dit op zichzelf geen reden zijn om bestaande waterkeringen af te keuren bij de toetsing. Bij het toetsen van bestaande waterkeringen speelt alleen bezwijken (waterstaatkundige toestand) een rol. De kans van voorkomen van vervorming en schade van waterkeringen moet worden gekoppeld aan een economische optimalisatie van beheer en onderhoud. Overigens zou deze benadering bij het ontwerpen van een dijk of een dijkverbetering er toe kunnen leiden dat bij een vervormingsgevoelige dijk en ondergrond het onderhoudscriterium maatgevend is boven het veiligheids criterium.

Overstromingskansen en overstromingsrisico's

Een dergelijke aanpak sluit aan bij een op overstromingskansen en overstromingsrisico's gebaseerde veiligheidsfilosofie (Marsroute, Veiligheid Nederland in Kaart). Bij een op overstromingskansen en overstromingsrisico's gebaseerde veiligheidsfilosofie is het zaak onderscheid te maken tussen echt bezwijken van waterkeringen en de hieruit voortvloeiende kans op overstroming en daarnaast het optreden van vervorming in verband met hieruit voortvloeiende kosten van schade en onderhoud. Wel moet een maximum worden gesteld aan de verticale vervorming van de buitenkruinlijn. De verticale vervorming van de buitenkruinlijn is ook een veiligheidsaspect, omdat een te groot overslagdebiet niet toelaatbaar is.

Grenstoelstanden

Ook de geotechnische norm (NEN 6740) maakt onderscheid tussen eisen voor sterkte en eisen

voor vervorming. NEN 6740 kent de uiterste grenstoestand (grenstoestand 1) en de bruikbaarheidsgrenstoestand (grenstoestand 2).

In de uiterste grenstoestand 1A wordt getoetst of de combinatie van een optredende (maatgevende) belasting en de beschikbare sterkte juist niet leiden tot het (begin van) falen van de constructie. Bij binnenwaartse macro-instabiliteit bij een waterkering is dit het ontwikkelen van een glijvlak in het grondlichaam leidend tot inundatie. Daarnaast kan falen ook zijn een te grote vervorming van de constructie. Door te grote vervorming van de kruin van waterkeringen kan overslag optreden. Deze vorm van falen is de uiterste grenstoestand 1B. Bij het ontwerpen of het toetsen van een constructie kan de sterkte maatgevend zijn (grenstoestand 1A), of de vervorming kan maatgevend zijn (grenstoestand 1B).

In de bruikbaarheidsgrenstoestand (grenstoestand 2) wordt getoetst of vervorming van de constructie juist niet leidt tot verlies aan bruikbaarheid, schade en hoge onderhoudskosten. Deze grenstoestand is niet van belang voor het toetsen van waterkeringen, maar alleen voor het ontwerpen en onderhouden van een waterkering.

Aan grenstoestand 1 is een hoger betrouwbaarheidsniveau gekoppeld dan aan grenstoestand 2. Voor echt bezwijken zal dus doorgaans een lagere kans van voorkomen worden geaccepteerd dan voor schade en onderhoud. Een en ander is weergegeven in *figuur 3*.

VEILIGHEIDSBENADERING

De veiligheidsbenadering van het onderzoek naar een verbeterde modellering en beoordeling van de taludstabiliteit van waterkeringen wijkt niet principieel af van de huidige bij de toetsing in gebruik zijnde veiligheidsbenadering. De huidige bij de toetsing in gebruik zijnde veiligheidsbenadering wordt in het onderzoek gepreciseerd.

Eis voor sterkte

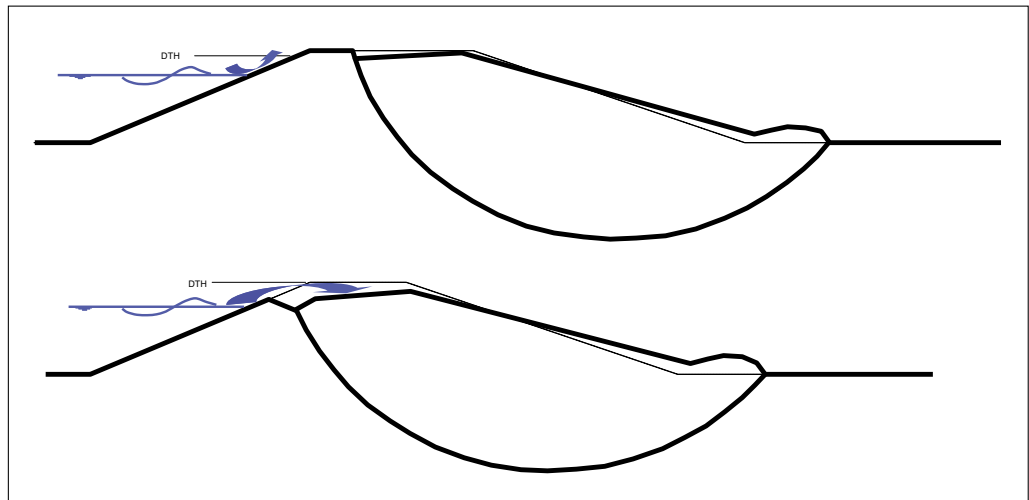
De veiligheidseis voor de sterkte van waterkeringen (grenstoestand 1A) zal in het onderzoek worden gerelateerd aan de overschrijdingsfrequentie van de maatgevende waterstand volgens de Wet op de Waterkering. Op basis van deze overschrijdingsfrequentie kunnen betrouwbaarheidsindices en (partiële) veiligheidsfactoren worden afgeleid voor de beoordeling van het toetsaspect macrostabiliteit binnenwaarts. Bij

de huidige bij de toetsing in gebruik zijnde veiligheidsbenadering wordt het vereiste veiligheidsniveau ook op deze wijze in de berekeningen verdisconteerd.

Anders dan in de huidige adviespraktijk zal in het onderzoek worden uitgegaan van de maximale sterkte (bezwijksterkte) van de grond. In het onderzoek kan met de maximale sterkte van de grond worden gerekend, omdat de berekeningen onder andere zullen worden uitgevoerd met een Eindige Elementen Model, waarmee het werkelijke grondgedrag beter kan worden beschreven dan met traditionele rekenmodellen. Hierbij zal dan ook de nodige aandacht worden gegeven aan de stijfheid van de grond. Overigens kan hierbij worden opgemerkt dat in het onderzoek ook rekening zal worden gehouden met het effect van waterspanningsgeneratie tijdens het bezwijkproces van grond [Den Haan, 2006].

Eis voor vervorming

Naast een veiligheidseis voor de sterkte van waterkeringen zal in het onderzoek een eis voor de vervorming van waterkeringen worden gehanteerd (grenstoestand 1B). De kruinhoogte mag namelijk niet zodanig vervormen dat de waterkering faalt door een te groot overslagdebiet. De vervorming van de kruin van de waterkering is vaak ook van belang voor de bereikbaarheid bij calamiteiten. De maximaal toelaatbare vervorming bedraagt daarom meestal maximaal enkele decimeters. In situaties waar de actuele kruinhoogte van de waterkering hoger is dan de dijktafelhoogte (DTH; theoretische

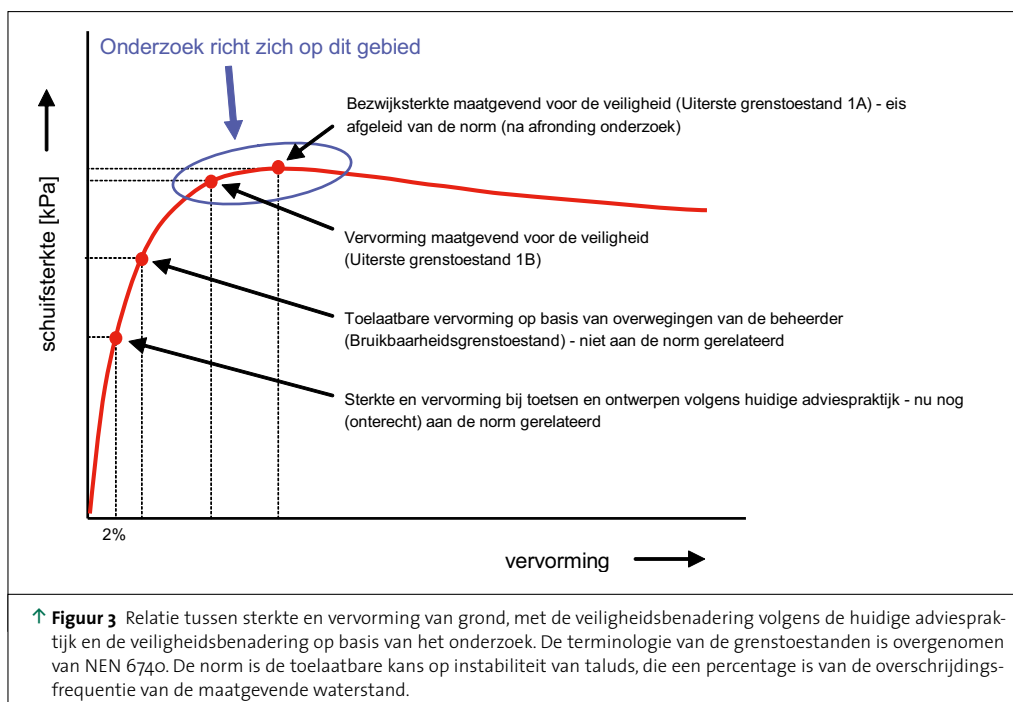


↑ **Figuur 4** Bij een brede dijk met enige overhoogte en een instabiliteit waarbij de buitenkruinlijn intact blijft, treedt geen overslag op (boven). Bij een smallere dijk zonder overhoogte en een instabiliteit waarbij de buitenkruinlijn niet intact blijft, bestaat het gevaar van een te groot overslagdebiet (onder).

benodigde kruinhoogte) kan relatief veel vervorming van de kruinhoogte worden toegestaan. Daarnaast speelt een rol dat bij het oprijfmechanisme de grootste vervormingen optreden ter plaatse van de zogenaamde drukstaaf achter de waterkering en ter plaatse van het binnentalud van de waterkering. In dat geval is de vervormingseis voor de buitenkruinlijn van de waterkering waarschijnlijk niet maatgevend voor de veiligheid. In sommige situaties kan de verticale vervorming van de buitenkruinlijn wel te groot worden, bijvoorbeeld bij een waterkering met een smalle kruin. Het criterium voor de maximaal toelaat-

bare vervorming is dus locatie-afhankelijk. Bij een lage kruin of een smalle kruin kan de vervormingseis maatgevend zijn voor de veiligheid. In *figuur 4* is een en ander toegelicht. In vervolgartikelen zal nader op het vervormingscriterium worden ingegaan.

Wat de acceptatie van (grote) vervorming tijdens een hoge buitenwaterstand betreft, zou de situatie zich kunnen voordoen dat een waterkering rationeel gezien voldoende marge heeft, terwijl de calamiteitenorganisatie deze vervorming (met het oog op het veiligheidsgevoel bij het publiek) op dat moment niet toelaatbaar acht. In een calamiteitsituatie kan grote, maar toelaatbare vervorming van een waterkering leiden tot het nemen van noodmaatregelen. Dit punt zal aandacht krijgen in het onderzoek.



↑ **Figuur 3** Relatie tussen sterkte en vervorming van grond, met de veiligheidsbenadering volgens de huidige adviespraktijk en de veiligheidsbenadering op basis van het onderzoek. De terminologie van de grenstoestanden is overgenomen van NEN 6740. De norm is de toelaatbare kans op instabiliteit van taluds, die een percentage is van de overschrijdingsfrequentie van de maatgevende waterstand.

REFERENTIES

- [1] [DWW, 2004] Voorschrift Toetsen op Veiligheid. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. januari 2004.
- [2] [Den Haan, 2006] Ongedraineerde Stabiliteitsanalyse. E.J. Den Haan. Geotechniek, juli 2006, 32-37.

Reacties op dit artikel kunnen tot 1 oktober 2007 naar de uitgever worden gestuurd