

Het pipingproces in stripvorm



Het pipingproces in stripvorm

ing. H.T.J. De Bruijn

1207304-000

Titel

Het pipingproces in stripvorm

OpdrachtgeverRijkswaterstaat Water,
Verkeer en Leefomgeving
Locatie Lelystad**Project**

1207304-000

Kenmerk

1207304-000-GEO-0007

Pagina's




26

Trefwoorden

Piping

Samenvatting

Het pipingproces wordt beschreven in een vorm van stripverhaal en geïllustreerd met foto's. Het proces is beschreven vanaf het begin van opdrijven tot aan het bezwijken van de dijk als gevolg van piping. Het proces is per fase beschreven.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	apr. 2013	ing. H.T.J. De Bruijn		ir. V.M.van Beek		ir. L. Voogt	

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
2 Beschrijving van het proces	3

1 Inleiding

'Op 8 januari 1926 werd om omstreeks half acht een klein welletje door de dijkwacht in de buurt van Zalk ontdekt dat schoon water leverde. Aan de buitenzijde van de dijk was een diepe, slecht beklede kolk aanwezig. Ondanks het feit dat de wel weinig voorstelde werd door een gezelschap van ambtenaren van waterstaat en waterschap besloten de plek met grind af te dekken. Nauwelijks had het gezelschap de plek verlaten of de achtergebleven dijkwacht kwam aanhollen met de mededeling dat de dijk bezweek. Toen het gezelschap zich omdraaide zagen zij een manshoge modderfontein op de plek van de waargenomen wel'

Dit ooggetuigenverslag uit Zalk beschrijft een van de weinige gedocumenteerde dijkdoorbraken uit de Nederlandse geschiedenis ten gevolge van het faalmechanisme 'piping'. Hoewel er in de afgelopen decennia gelukkig geen doorbraken ten gevolge van dit mechanisme zijn geweest, worden er tijdens een hoogwater toch veel tekenen van dit mechanisme waargenomen.



Gevolgen dijkdoorbraak in Zalk

Wat is piping nu precies?

Piping is een van de mechanismen waardoor dijken kunnen falen. Andere faalmechanismen zijn, overloop en overslag (door onvoldoende hoogte), macro-stabiliteit, micro-stabiliteit en zettingsvloeiing.

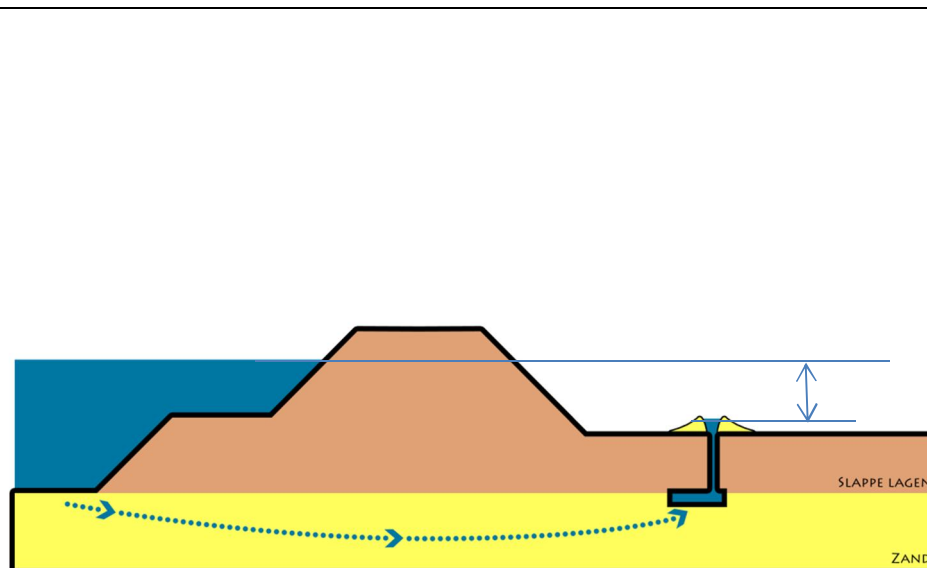
Piping is een vorm van erosie waarbij, als gevolg van waterstroming in een zandlaag onder de dijk door, zand vanaf de binnenzijde van de dijk uitspoelt waardoor er zich onder de dijk een kanaal, 'een pipe', vormt richting de buitenzijde van de dijk. Piping begint als kleinschalige erosie van zand en eindigt in grootschalig zandtransport met als gevolg bezwijken van de waterkering.

Voorliggende notitie geeft een beschrijving van het proces van begin tot aan bezwijken.

Wanneer kan piping optreden?

De randvoorwaarden die aanwezig moeten zijn om piping te doen optreden zijn de volgende.

1. Er moet een waterstandsverschil, verval genoemd, aanwezig zijn tussen rivier en polder, zodat in de watervoerende zandlaag een drukverschil ontstaat tussen de buitenzijde van de dijk en de polderzijde van de dijk.
2. Piping kan alleen optreden in loskorrelige -, watervoerende lagen (zand). Erosieprocessen van loskomende klei- of veendeeltjes in bijvoorbeeld open scheuren worden geen piping genoemd maar vallen onder andere vormen van "interne erosie".
3. Piping kan alleen optreden in een situatie waar de erosiegevoelige zandlaag ter plaatse van de dijk wordt afgedekt door een samenhangend pakket, zoals een klei- of veenlaag, waarin een 'lek' aanwezig is, waardoor water en zand kunnen worden afgevoerd. (er moet een uitrede punt aanwezig zijn)



Eenvoudige voorstelling van Piping. De drie randvoorwaarden zijn hier aanwezig

- Waterstandsverschil
- Zandlaag onder de dijk
- Afgedekt door een waterondoorlatende laag, met een 'lek' waar water en zand weg kunnen

2 Beschrijving van het proces

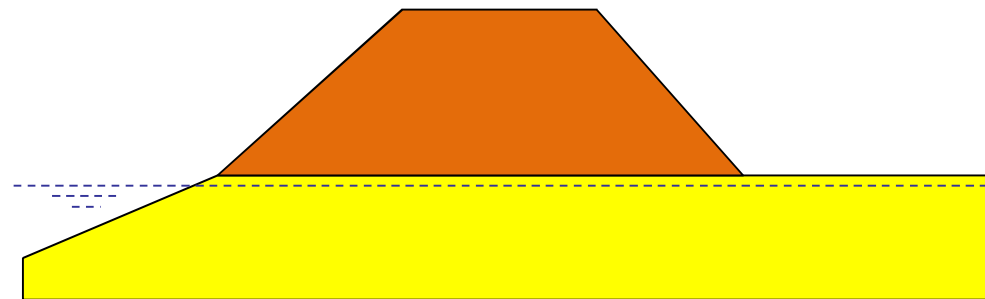
In de loop van de jaren zijn veel onderzoeken geweest naar het fenomeen Piping. Veel van deze onderzoeken bestaan uit modelproeven op verschillende schaalniveaus. Hierbij is enerzijds het pipingproces gevolgd en onderzocht en anderzijds zijn hiermee rekenregels gevalideerd. Zoals is opgemerkt zijn er een aantal randvoorwaarden nodig om piping mogelijk te maken. Het begin van het proces zal dan ook bestaan uit het beschrijven van de huidige situatie. Vervolgens zal met het stijgen van de buitenwaterstand worden aangegeven hoe het proces van piping verloopt. Het verhaal wordt ondersteund met voorbeelden en foto's van de signalen die dan worden aangetroffen.

Stap 0: de bestaande situatie

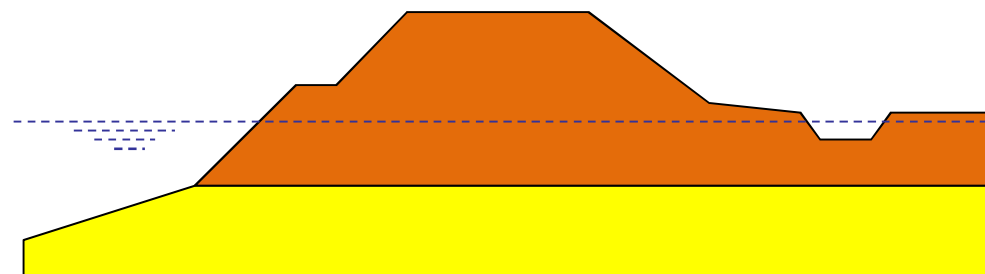
Hiervoor wordt een eerste onderscheid gemaakt in twee situaties. De eerste situatie is een situatie typisch voor het bovenrivieren gebied in het oosten van het land waarbij een hoofdzakelijk uit klei opgebouwde dijk ligt op een zandige ondergrond waarbij het zand aan het binnendijkse maaiveld direct aan het oppervlak aanwezig is.

De tweede situatie betreft een op klei/veenlagen gelegen dijk. Deze dijk ligt niet direct op het vaste zand zodat onder het binnendijks maaiveld eerst nog een pakket van slecht doorlatende cohesieve lagen aanwezig is.

Wanneer het waterpeil aan beide zijde gelijk is, is er geen drukverschil tussen de buitenzijde (rivier) van de dijk en de binnenzijde (polderzijde) van de dijk aanwezig. Hierdoor is er geen aandrijvende of slepende waterkracht op de zandkorrels aanwezig. De "sterkte" is groter dan de "belasting".



Situatie met zand direct onder het binnendijks maaiveld



Situatie met een kleilaag op het binnendijks maaiveld

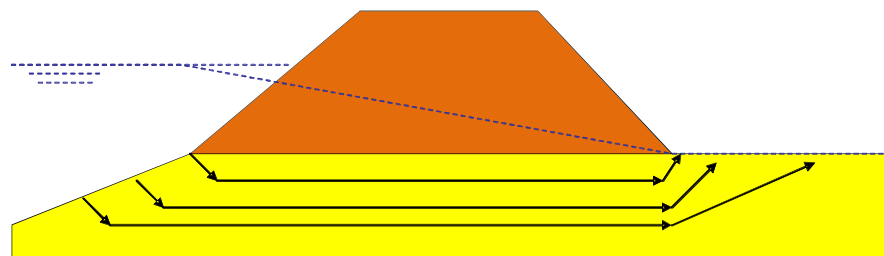
Stap 1: de buitenwaterstand stijgt.

Wanneer de buitenwaterstand gaat stijgen, ontstaat er een waterdrukverschil over de dijk. Door het waterstandsverschil gaat er water stromen van buitenwater naar polder.

Of dit veel of weinig is, hangt onder andere af van de insnijding van de rivier in de zandlaag (bv insnijding in schoon zand of in met slib afgedekt zand).

Op afbeelding hiernaast is een directe verbinding tussen buitenwater en zandlaag te zien, vlak voor de dijk. Dit is echter niet altijd het geval. Vaak is er een afdekkende laag aanwezig aan de buitenzijde van de dijk. Dit wordt voorland genoemd. Dit voorland kan enigszins waterdoorlatend zijn, maar is niet zo doorlatend als zand. Ook kan er een locale zwakke plek in het voorland zijn. Water komt dan zowel van boven via het voorland als via de doorsnijding met het buitenwater naar binnen.

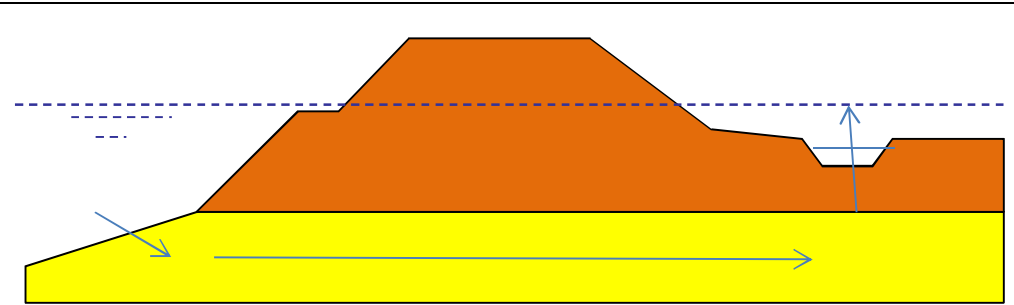
Door de beginnende waterstroming gaat fijn materiaal opwarrelen aan de polderzijde. De foto hiernaast toont een vroeg stadium van een wel waarbij alleen stof zichtbaar is. Een dergelijke wel lijkt een beetje op een wolkje melk in de koffie



Bij een situatie waarbij de dijk niet direct op het zand ligt komt deze kwelstroom minder duidelijk op gang en is een groter waterstandsverschil nodig om signalen te kunnen zien die duiden op een (begin) fase van piping. Het water kan immers niet zo makkelijk uittreden, door de aanwezigheid van de slecht doorlatende deklaag.

In dit geval is onder de binnenteen van de dijk een water overdruk in het goed waterdoorlatende zand aanwezig als gevolg van de hoge rivierwaterstand. Deze hogere waterdruk leidt, tot een wateroverdruk ten opzichte van het polderpeil zodat er een verticaal waterdrukverschil over de slecht doorlatende deklaag ontstaat. Hierdoor treedt eveneens een toename van de kwel op waardoor ook signalen zichtbaar worden in het veld. Op de foto hiernaast is goed zichtbaar dat de sloot als gevolg van een toenemende kwelstroom troebel wordt. Slibresten (organisch materiaal) komen los van de bodem en gaan drijven. Het slootwater is bruingrijs gekleurd wat komt doordat de kleideeltjes op de bodem van de sloot die bij een situatie zonder kwelstroom op de bodem in ruste zijn, in suspensie komt en het water kleuren.

De foto is genomen bij een locatie waarbij er een afdekkend samenhangend pakket op de watervoerende zandlaag aanwezig is. In deze situatie kan piping nog niet optreden omdat er geen pad is, waardoor het zand afgevoerd kan worden. Er moet dus een plaats zijn waar een verbinding tussen de zandlaag en het oppervlakte aanwezig is, waar zandkorrels eventueel uit het zandpakket omhoog kunnen worden gedrukt en op het maaiveld kunnen worden afgezet (de eerste fase van piping). Een plek waar water er zand naar het maaiveld afgevoerd kan worden, wordt het uittredepunt genoemd.



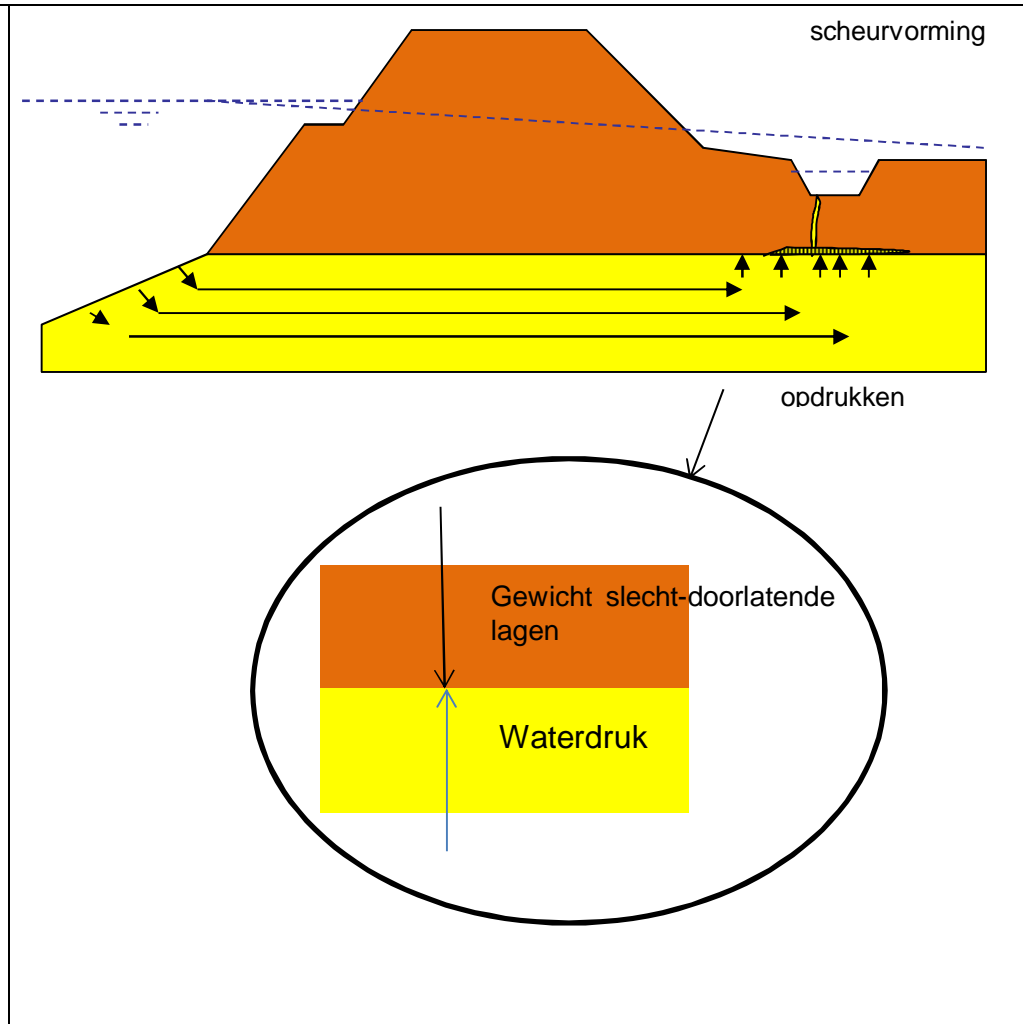
Wanneer de waterdruk in het zand hoger wordt en groter wordt dan het gewicht van het pakket slecht waterdoorlatende lagen kan dit pakket als

het ware gaan drijven (de wet van Archimedes). Hoe hoog deze waterdruk kan worden laat de foto hiernaast zien. Deze foto is genomen nabij Vianen tijdens het Hoge water van februari 1995. In het binnendijks maaiveld waren voor het hoogwater peilbuizen geplaatst die ongeveer 0,5 m boven maaiveld waren afgewerkt. Bij een normaal rivierpeil stond het water in deze peilbuis ongeveer 0,6 m onder de bovenkant van de peilbuis. Toen de meetploeg de waterdruk in de peilbuis wilde gaan aflezen draaiden ze de dop van de buis af. Het water liep toen over de rand heen waarop ze besloten om er nog een meter buis bij op te draaien. Ook na eerste keer oplengen van de peilbuis liep het water nog over de rand heen, zodat ze nog een keer moesten oplengen. Uiteindelijk bleek dat, nadat de buis met ruim 3,5 m was opgelengd het water steeg tot circa 0,4 m onder de bovenkant van de peilbuis. De hoge rivierwaterstand had tot een wateroverdruk ten opzichte van de normale situatie geleid tot ruim 3,5 m!



Als gevolg van deze overdruk kan het pakket van slechtdoorlatende, samenhangende lagen scheuren of opbarsten. Hierbij komt er een scheur in het pakket van afdekkende lagen zodat er een uittredepunt ontstaat. Op het moment dat deze scheur is ontstaan hoeft niet direct piping op te treden. Het water moet immers voldoende opwaartse kracht kunnen leveren om de zandkorrels vanuit het zandpakket verticaal omhoog te kunnen stuwten over de dikte van het slecht doorlatende pakket. Als de scheur een kleine afmeting heeft, dan stroomt al het water uit het zandpakket naar dit punt, omdat dit de weg van de minste weerstand is. De stroming is dan al snel groot genoeg om zandkorrels mee omhoog te brengen.

In dit geval is er wel al sprake van in beweging zijnde zandkorrels in de vorm van in de wel "kokend" zand. Het zand "danst" in de wel op het omhoog wellende water, alleen is de opwaartse druk nog onvoldoende hoog om het zand over de rand van de wel te gooien en op maaiveld af te zetten. Het water uit de wel komt dan wel over de rand heen. Deze situatie is schematische hiernaast weergegeven. Het proces van verticaal omhoog stromend zand wordt Heave genoemd.



Wanneer het water nog onvoldoende kracht heeft om korrels mee te voeren, kan er sprake zijn van een watervoerende wel. Een wel waarin het water als het ware over de rand "kookt" is zichtbaar op foto hiernaast. Goed zichtbaar is de iets roestbruine vlokkige substantie naast de wel. Dit signaal is vooral in de beginfase van de welvorming goed zichtbaar en wordt veroorzaakt door oxidatie van verschillende mineralen, die in het zuurstofarme grondwater aanwezig zijn. Opgemerkt wordt dat de intensiteit van de wel op deze foto hoog is. In het begin-stadium van het proces zal dit minder zijn.

Soms is er van nature al een zwakke plek aanwezig in de slecht doorlatende deklaag, bijv. omdat er in het verleden een boring uitgevoerd is, die niet goed afgedicht is of door boomwortels. Op deze manier kan er op grote afstand van de dijk een wel ontstaan, waaruit water en soms ook zand wordt afgevoerd. De weg van de minste weerstand is dan niet altijd de kortste weg van buitenwater naar polder. Deze (zandmeevoerende) wellen hoeven dan niet altijd tot piping te leiden.



Stap 2: de buitenwaterstand stijgt verder en pipes ontstaan

Wanneer de buitenwaterstand verder stijgt, zullen zandmeevoerende wellen ontstaan. De weerstand die het zand kan geven om niet in transport te komen (de sterkte) is minder groot dan de kracht die het water op het zand uitvoert (belasting).

In de situatie waarbij het zand aan het oppervlakte ligt worden er zandkraters zichtbaar. Op foto hiernaast is duidelijk zichtbaar het "koken" van het zand in de wel en de krater vorm die door het, over de rand heen geworpen zand, achterlaat.

Deze kraters kunnen na verloop van tijd behoorlijk groeien zoals de foto in het volgende kader laat zien. Deze foto van het Waterschap Rivierenland is genomen bij Fort Vuren bij een hoge waterstand op de Merwede in januari- februari 2011. Hier is een met zandzakken opgekiste zandmeevoerende wel te zien met een krater diameter van ruim 1 m





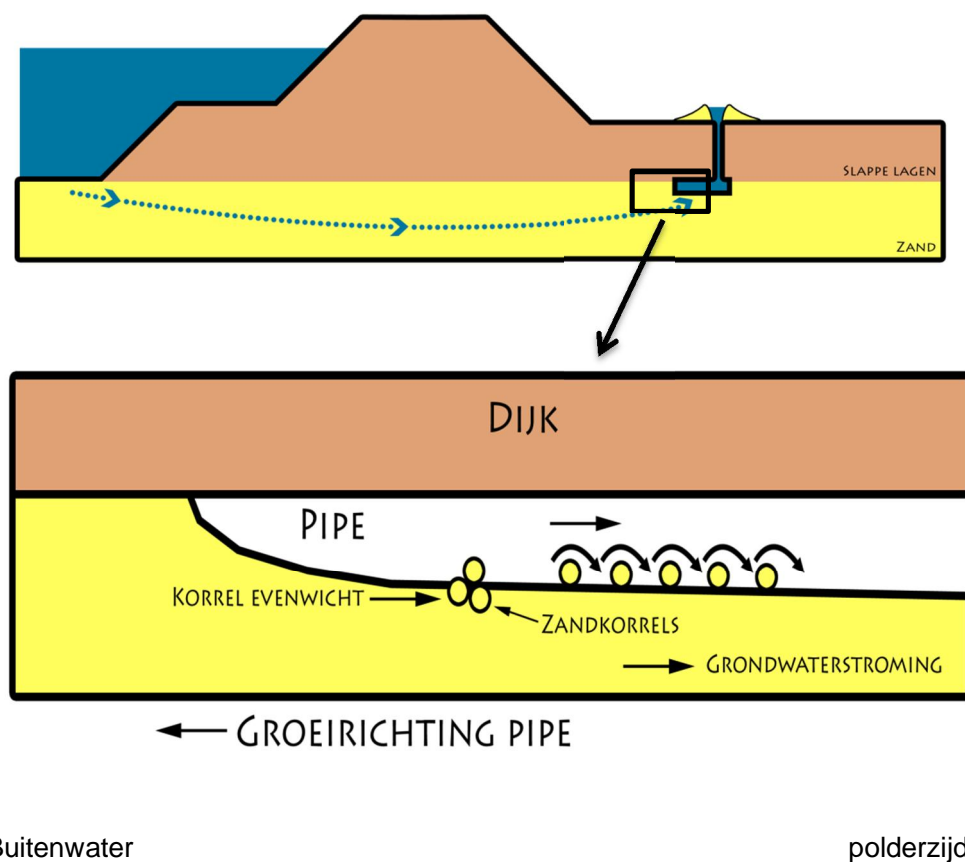
Zandmeevoerende wellen treden veelal op de zelfde locaties op. Een goed dijkbeheerder weet waar hij bij een hoogwater situatie zandmeevoerende wellen kan vinden. Hij kan dan maatregelen treffen om de zandafvoer te laten afnemen. Een veel toegepaste maatregel is het 'opkisten' van de wel. Bij deze methode wordt een ring van zandzakken om de wel heen geplaatst, zodat het waterpeil ter plaatse van de wel hoger is. Het waterstandsverschil tussen buitenwater en wel wordt daarmee verkleind, zodanig dat de kracht van het water de korrels niet meer kan afvoeren.

Veel van deze wellen vallen samen met reeds aanwezige perforaties van het afdekkende pakket zoals al eerder is genoemd bij de zwakke plekken. Denk hierbij aan oude grondonderzoekslocaties die niet goed zijn afgedekt, maar ook aan bomen die met hun wortels tot in het zand groeien, afsterven en dan holle ruimte achterlaten waardoor er een uittrede punt ontstaat (foto hiernaast van WSRL, hoogwater jan 2011)



In deze fase komen in het zandpakket de eerste zandkorrels in transport en begint de vorming van een pipingkanaal. Een pipingkanaal is een zeer ondiepe holle ruimte aan de bovenkant van het zandpakket. De dijk of de samenhangende deklaag vormt het dak van het kanaal. In principe zijn hier twee verschillende deelaspecten aan de orde. In eerste instantie moet het zand losgemaakt worden uit het korrelpakket of -skelet waarin het zit. Wanneer de eerste korrels uit het pakket zijn gedrukt en er een heel klein kanaaltje is ontstaan, ontstaat een proces van het rollen van korrels in een min of meer open kanaal. In de figuur hiernaast is dit weergegeven.

Vanaf deze fase maakt het voor het proces niet meer zoveel uit of er een kleiafdekking op het zand aanwezig is of niet. Vanaf het moment dat het kanaal terug gaat groeien naar het buitenwater (daar waar het water vanuit de rivier het zandpakket instroomt) spreken we over "piping".



Of het zandtransport na beginnen door kan blijven gaan, hangt af van het

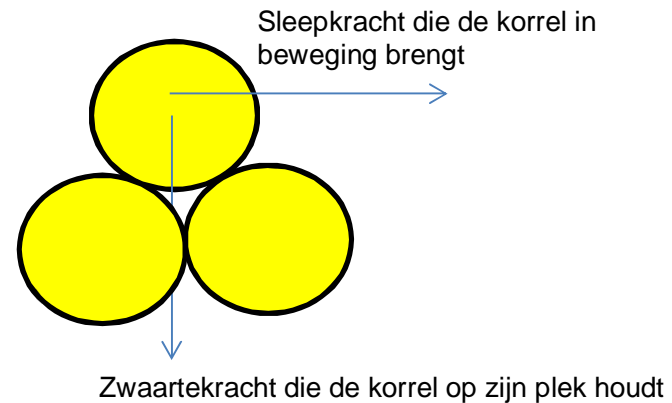
korrelevenwicht van de korrels op de bodem van de pipe. Als de korrels niet in evenwicht zijn, zal de pipe steeds langer worden.

Deze korrels worden door hun gewicht op de plek gehouden, maar wanneer er water door de pipe stroomt, wordt er een sleepkracht op de korrel uitgeoefend. Hoe groter de korrel, hoe groter de kracht die de korrel op zijn plek houdt en des te groter de sleepkracht van het water moet zijn om de korrel in beweging te brengen.

Deze sleepkracht wordt bepaald door de stroming van water in de pipe. Deze waterstroom wordt gevoed door de waterstroom in het zandpakket. Hoe doorlatender het zand, hoe makkelijker het water erdoor heen stroomt en hoe groter dus de sleepkracht op de zandkorrels. Uiteraard hoe groter het waterstandsverschil, hoe groter de sleepkracht.

De afmetingen van het zandpakket (kwelweglengte, de afstand tussen intrede en uittrede punt en de dikte van de zandlaag) hebben ook invloed op de sleepkracht, evenals de heterogeniteit van de ondergrond. Als er onder de zandlaag zeer doorlatende grindlagen aanwezig zijn, zal er veel meer water afgevoerd worden door de pipe en kunnen korrels eerder in beweging komen.

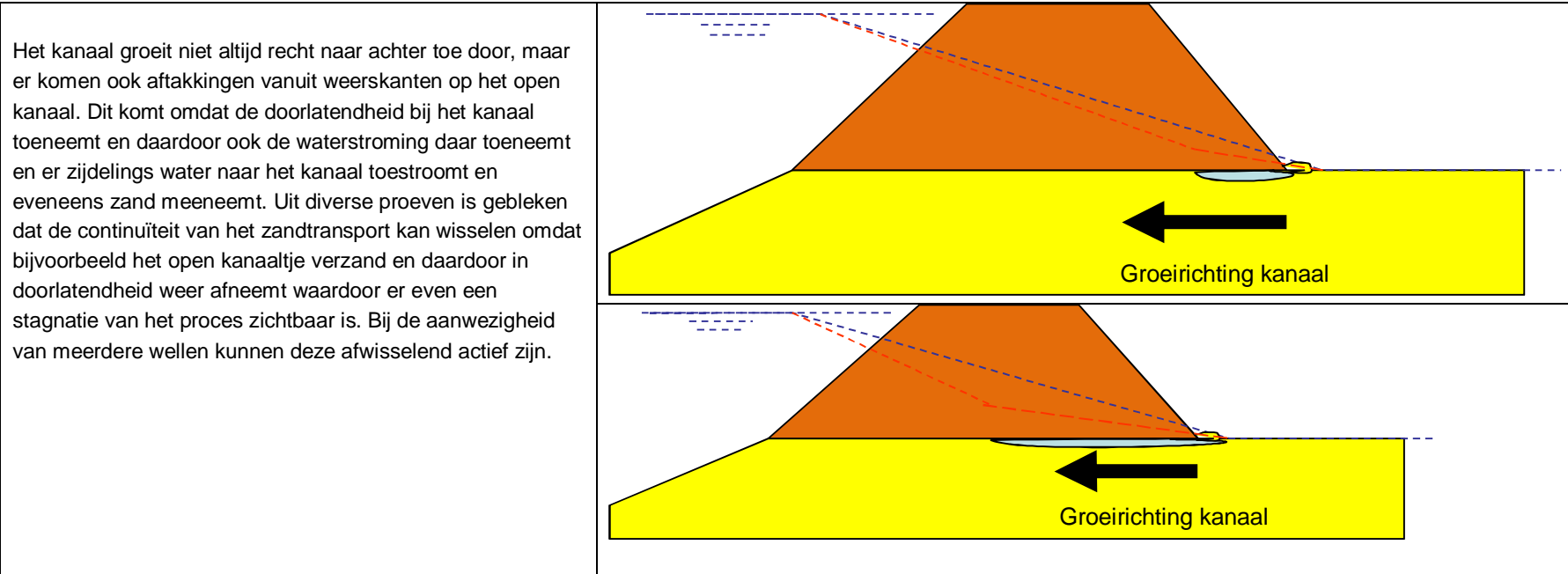
Deze drie processen: het krachtenevenwicht op de korrel, de stroming door de pipe en de grondwaterstroming worden gecombineerd in het model van Sellmeijer. In dit model wordt het maximale waterstandsverschil berekend waarbij de korrels in de pipe nog juist in evenwicht zijn. Dit wordt het kritieke verval genoemd. Boven het kritieke verval zal de pipe-groei niet meer stoppen.



Vanaf het binnendijks maaiveld lijkt het erop dat er ter plaatse van de zandmeevoerende wel maar één kanaaltje terug groeit richting het intrede punt. Dit is echter niet altijd het geval. Onder de dijk zijn veelal meerdere vertakkingen van dit ene hoofdkanaaltje aanwezig. Uit de vele modelproeven, maar ook uit metingen gedaan bij proeven op ware grootte (schaal 1:1) volgt dat het kanaaltje zich onder de dijk vertakt. De vorm waarin dit vertakt is wisselend. Het kan een boomwortel structuur zijn met hoofdvertakkingen die weer zijvertakkingen hebben, het kan ook in de vorm van een dennenboom naar achter toe groeien waarbij op het hoofdkanaal telkens verschillende kanaaltjes uitkomen. De kanaaltjes zelf zijn zeer klein van afmetingen, gedacht moet worden aan hooguit enkele tientallen zandkorrels dik. Uitgaande van een gemiddelde zandkorrelgrootte van 0,2 mm betekent dit dat een kanaaltje met een diepte van 2 tot 10 mm al groot te noemen is. De breedte van het kanaal is erg afhankelijk van de grootte van het systeem (kwelweglengte en verval en uitstroomopening etc).



Bovenaanzicht van vertakkende pipe-ontwikkeling in een kleine-schaalproef.



Zoals al opgemerkt zal het kanaaltje, wanneer het kritiek verval eenmaal bereikt is, bij gelijkblijvende waterstand niet meer stoppen. Dit geldt in theorie en model zeker, in de praktijk kan dit anders zijn. Zo kan het zijn dat als gevolg van het zichzelf opkisten van de wel (zie foto), piping net in evenwicht komt doordat de wel het zand niet meer over de rand krijgt. Wanneer de rand van de krater echter om wat voor een reden instort en lager wordt gaat het proces weer verder. Op de foto hiernaast is de krater goed zichtbaar en krijgt de wel in deze fase van het proces het zand niet over de rand heen. Als gevolg van waterstroming in de sloot, of een toenemende stijghoogte kan de kraterrand doorbreken en het proces weer verder gaan.

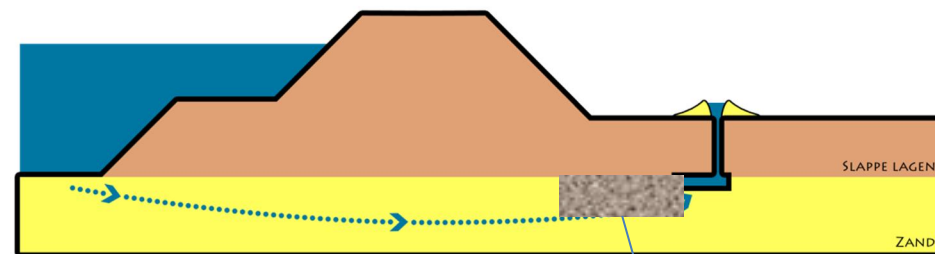
Als een wel ontstaat op een lokale zwakke plek in de deklaag, zal er al bij een lage waterstand zand meegenomen worden, omdat alle stroming naar dit uittredepunt gaat. Dit hoeft niet te betekenen dat het kritiek verval al bereikt is. Bij een locatie waar de uitstroming van water meer gespreid is, zoals bij de situatie zonder deklaag, is zandafzetting op het maaiveld een serieuze waarschuwing voor het benaderen van het kritiek verval.



Andere redenen dat het kanaal wanneer zichtbaar toch niet doorgroeit naar het intrede punt kunnen worden verklaard op basis van obstakels in het zand of heterogeniteit. De zandondergrond waarin piping ontstaat met name bij de grote rivieren is relatief heterogeen als het gaat om korrelgrootte van het zand. Veelal heeft de rivier in het verleden een veranderend vlechtend of meanderend patroon gevolgd als gevolg van sedimentatie en erosie. Deze processen en veranderende stroomsnelheden van de rivier hebben er veelal toe geleid dat er wisselend fijne zanden en grove zanden zijn gesedimenteerd die voor heterogeniteit zorgen in alle richtingen. Hierdoor zal het terug groeien van de kanaaltjes in dit soort heterogene systemen anders zijn dan in meer model of laboratorium cases.

Zo is het zeer goed denkbaar dat wanneer het kanaaltje terug groeit tegen meer grovere zandlagen komt. Deze grovere zandlagen hebben een hogere erosieweerstand en kunnen ervoor zorgen dat het kanaal niet verder naar achter door groeit. Het kanaal zal dan benedenstrooms van deze grovere zandlagen doorgroeien. Uit proeven volgt dat het kanaal dan bijvoorbeeld evenwijdig aan de grove zandlaag verder groeit en dat er meer vertakkingen van het kanaal benedenstrooms ontstaan. Hierdoor blijft visueel overigens nog steeds een zandmeevoerende wel bij de teen zichtbaar, alleen is het terug groeien van het kanaal gestopt. Dit is moeilijk te beoordelen op basis van visuele waarnemingen. Hoe het proces van het teruggroeien van een kanaal in een heterogeen systeem exact werkt is een van de onderzoeksvragen binnen het programma Sterkte en Belastingen Waterkeringen.

In de praktijk speelt overigens ook de tijdsduur van het



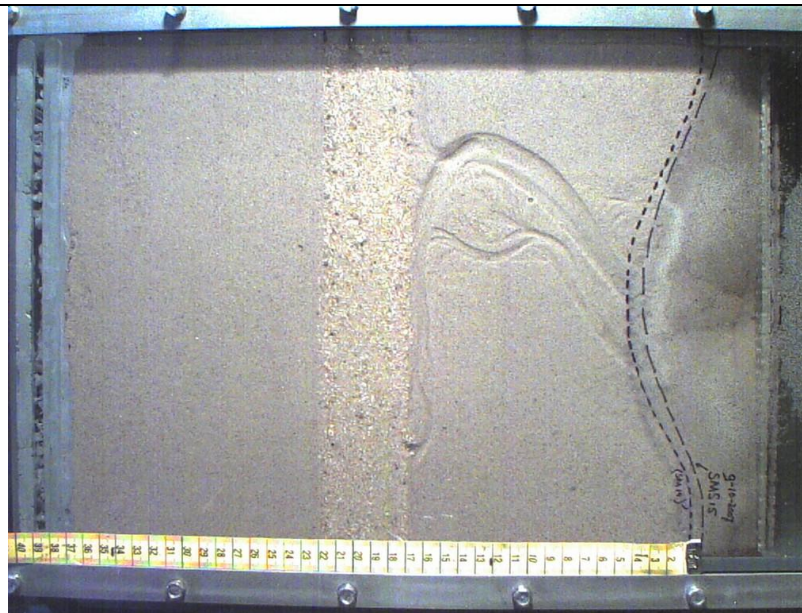
Grindlaag, pipe wordt niet langer

hoogwater een rol in het al dan niet doorgroeien van pipingkanaal.

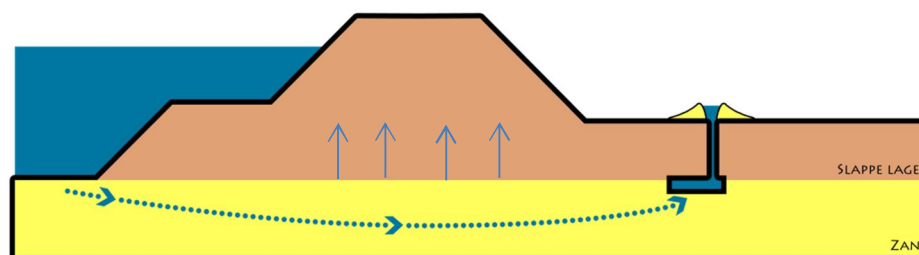
De tijdsduur om de kanalen te laten groeien is vermoedelijk bij grote kwelweglengte lang en de duur van het hoogwater bij sommige belastingsituaties kort, waardoor het kanaaltje niet de tijd krijgt om zich volledig te ontwikkelen gedurende het hoogwater.

Het is dan ook de vraag of kanalen herstellen na het afnemen van de buitenwaterstand. Dit is eveneens een van de witte vlekken in de huidige kennis van het proces wat onderwerp is van onderzoek.

Tenslotte kan er water lekken naar het dijklichaam, waardoor de toestroming naar het kanaal beperkt wordt. Dit is ook een tijdsafhankelijk effect, waardoor de belasting kleiner is dan je zou verwachten op basis van het waterstandsverschil.



Bovenaanzicht in een kleine-schaalproef: Het kanaal ontwikkelt zich parallel aan een grovere laag



Lek van water naar het dijklichaam

Proefondervindelijk wordt momenteel aangehouden dat een zandmeevoerende wel met substantieel zandtransport gerelateerd aan piping geen evenwichtssituatie meer vindt en bij gelijkblijvende omstandigheden zal doorgroeien.

Dit wil niet zeggen dat elke zandmeevoerende wel duidt op piping. Wanneer de buitenwaterstand stijgt, of er vanwege andere redenen een waterdruk in het zand aanwezig is die aanzienlijk hoger is dan polderpeil kunnen ook zandmeevoerende wellen zichtbaar zijn die niet worden veroorzaakt door piping. Ook door puur verticaal gerichte grondwaterstroming kan zand worden getransporteerd. Voorbeelden hiervan zijn bijvoorbeeld te vinden in de Horstermeer polder nabij Nederhorst Den Berg. In deze polder komen op locaties waar het afdekkende pakket dun is zandmeevoerende wellen voor die niet worden veroorzaakt door een grote waterdruk als gevolg van hoge buitenwaterstand, maar in dat geval door een voortdurende kwelstroom door het diepe zand vanuit de omliggende hogere gronden. Deze wellen zijn puur verticaal gericht en leiden niet tot terugschrijdende erosie.

Op de foto hiernaast is een voorbeeld weergegeven van een wel die daar is aangetroffen en permanent aanwezig is en door verticale kwel in stand wordt gehouden.



Niet iedere zandmeevoerende wel is dus een gevaar voor de dijk. Wellen die heel ver van de dijk ontstaan, vormen een kleiner gevaar dan wellen die heel dicht bij de dijk ontstaan. Er is dan een grotere kans dat de zandmeevoerende wel door een andere reden is ontstaan. Ook is het pad dat de pipe moet afleggen naar het buitenwater erg groot. Het kan zijn dat de zandlaag niet helemaal doorloopt naar de rivier of dat het vormen van de pipe zoveel tijd kost dat dit binnen de tijd van een hoogwater niet mogelijk is.

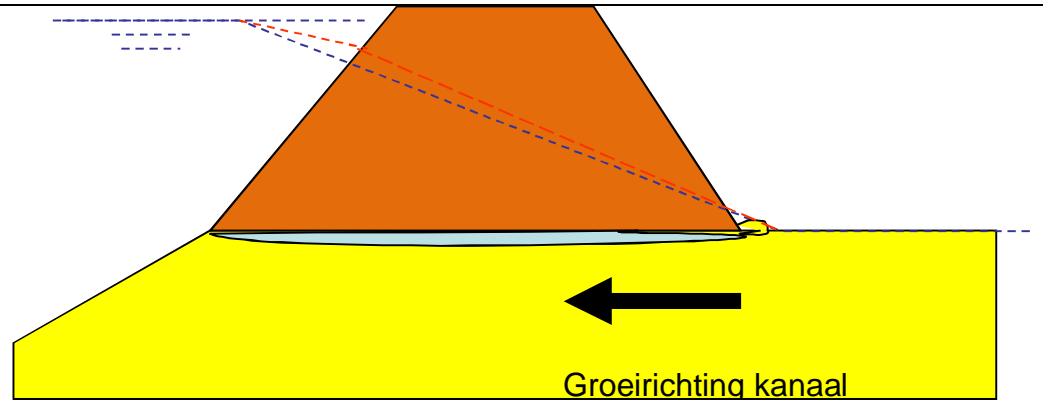
Overigens geeft een controle van de watergangenschouw van de kwelsloot in het najaar ook een goede indicatie of en hoeveel zandmeevoerende wellen aanwezig zijn. Wanneer bij het schouwen veel zand wordt "opgebaggerd" is het een teken dat de sloot elk jaar ver ondiept als gevolg van zandafzetting. Dit kan worden veroorzaakt door zandtransport (piping). (foto WSRL)



Stap 3 Kanaal groeit terug tot aan intrede punt

Gegeven een constante hoge buitenwaterstand zal het kanaaltje naar verloop van tijd een doorgaande verbinding gaan vormen onder de dijk. Het kanaal is dan terug gegroeid naar het intrede punt, wat tevens het einde van het feitelijke pipingproces is. Vanaf dat moment is er als het ware een open buis onder de dijk aanwezig die een veel hogere doorlatendheid heeft dan het zand erom heen. Hierdoor zal er veel water toe gaan stromen wat weer tot erosie van het kanaal leidt. Dit proces noemen we het "ruimen". Deze fase van het bezwijkproces heeft een groeirichting vanaf het intrede punt naar het uittrede punt.

Over de tijdsduur en de voortgang van dit deel van het bezwijkproces is nog niet zo heel erg veel bekend. De ervaring die hiermee is opgedaan bij het uitvoeren van proeven geeft hierin enig inzicht.



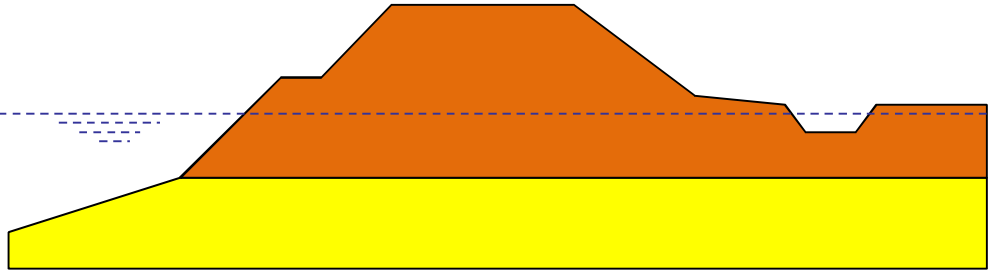
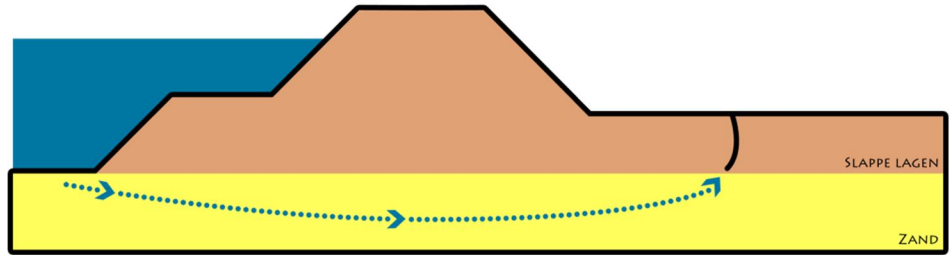
Uit de uitgevoerde proeven volgt dat tijdens het ruimproces de hoeveelheid afgezet zand per tijdseenheid bij het uittredepunt niet toeneemt. De verklaring hiervoor is dat doordat de stroming vanaf het intredepunt sterk toeneemt, de pipe daar sterk erodeert. Het pipingkanaal, dat maar enkele millimeters diep is, kan deze hoeveelheid zand niet afvoeren en verstopt. Terugschrijdende erosie moet opnieuw optreden, om de pipe te ontstoppen. Na ontstopping kan het ruimen weer plaatsvinden, waardoor opnieuw verstopping optreedt. Dit proces van verruimen en ontstoppen zorgt er geleidelijk voor dat van de rivierzijde naar de polderzijde een verruimde pipe ontstaat. Zodra de pipe geheel verruimd is, neemt het kweldebiet en het zandtransport pas echt significant toe, waarna bezwijken in korte tijd plaats kan vinden. In sommige proeven werd het bezwijken echter gevolgd door verzakking van de dijk, waardoor het bezwijken werd vertraagd. In de foto hiernaast worden al klei-deeltjes meegevoerd vanaf de onderzijde van de wel

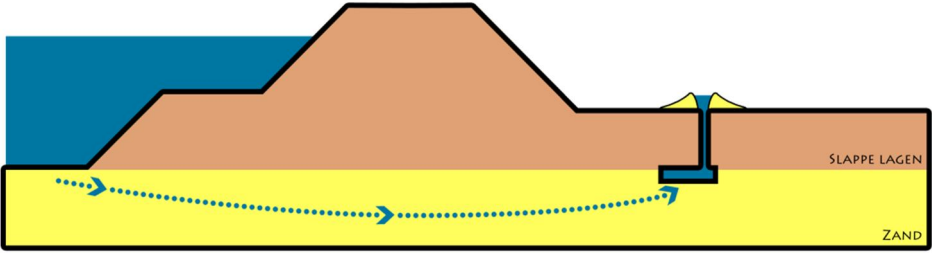
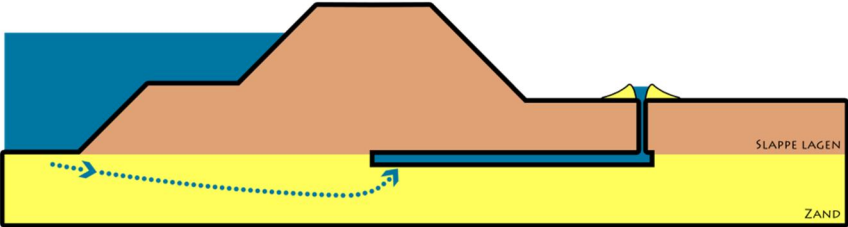
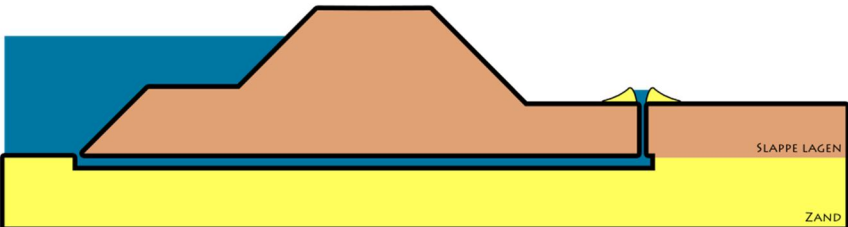


Tijdens het bezwijkproces ontstond er tijdens full-scale proeven als het ware een wolk van water die omhoog kwam en klei van de onderkant van de dijk en zand uit de kanalen meevoert. In deze fase maakte de wel een geluid van ruisend water en kan het zand en kleimengsel worden gezien als een modder fontein zoals omschreven door de dijk inspecteur te Zalk (zie eerste bladzijde). Dit heeft geresulteerd in een erosie gat van ruim 1,5 m diep onder de gehele dijk door. Dit gat heeft de dijk uiteindelijk volledig ondermijnd. De kruin van de dijk zakte in en het water liep over de kruin heen, waardoor de waterstand in het bassin (buitenwaterstand) snel daalde. Hierdoor stabiliseerde het bezwijkproces, zie foto hiernaast. De op deze foto aangegeven inzakking ligt recht boven het pipingkanaal.



3 Samenvattend

<p>Stap 0:</p> <p>Geen waterstandsverschil Er is geen grondwaterstroming.</p> <p>Geen signalen zichtbaar.</p>	
<p>Stap 1:</p> <p>Buitenwaterstand stijgt Verval over de dijk neemt toe Waterdruk in de zandlaag neemt toe. Binnendijks maaveld drijft/barst op.</p> <p>Signalen: Welvorming, troebele kwel sloten</p>	

<p>Stap 2b:</p> <p>Buitenwaterstand stijgt verder Pipes ontstaan</p> <p>Signalen: Wellen voeren zand mee.</p>	
<p>Stap 2b:</p> <p>Buitenwaterstand bereikt kritiek verval Pipes groeien terug naar het intrede punt. Terugschrijdend erosieproces Pipes groeien in lengte van polder naar buitenwater toe</p> <p>Signalen: Zandmeevoerende wellen</p>	
<p>Stap 3:</p> <p>Buitenwaterstand blijft constant of wordt hoger Pipes bereiken intredepunt. Einde van het terugschrijdend proces. De "open pipes" worden nu door erosie als gevolg van waterstroming door de pipe groter gemaakt.</p> <p>Signalen: Zandmeevoerende wellen</p>	

Deltares

1207304-000-GEO-0007, 15 april 2013, definitief

Stap 4:

Buitenwaterstand blijft constant of wordt hoger
dijk faalt door verder eroderen pipes.

Signalen: Extreme waterstroming onder dijk door,
modderfontein
dijk zakt (deels) in.

