Technische Universiteit Delft

Eindrapport behorend bij het afstudeerwerk:

Noodsluiting van een dijkdoorbraak bij hoogwater

'Closure of a dike breach at flood water'



afstudeercommissie:
prof.drs.ir. J.K.Vrijling (WBK)
ir. W.F. Molenaar (WBK)
dr.ir. P.J.Visser (WBK)
dr.ir. S. van Baars (GEO)

student:
I.A.M.Joore
9412301
Civiele Techniek
Waterbouwkunde

TU Delft
Technische Universiteit Delft

Noodsluiting van een dijkdoorbraak bij hoogwater

'Closure of a dike breach at flood water'

Figuur op de kaft:
een ongestoorde rivierdijk zoals we die allemaal kennen…

afstudeercommissie:
prof.drs.ir. J.K.Vrijling (WBK)
ir. W.F. Molenaar (WBK)
dr.ir. P.J.Visser (WBK)
dr.ir. S. van Baars (GEO)

student:
I.A.M.Joore
9412301
Civiele Techniek
Waterbouwkunde

Voorwoord

Voor u ligt het eindverslag van Ivo Joore in het kader van mijn afstudeeronderwerp 'Noodsluiting van een dijkdoorbraak bij hoogwater'. In dit verslag wil ik, als afstuderend student, na 4,5 jaar college volgen en leren wat Civiele Techniek inhoudt, mijn kennis gebruiken om een bijdrage te leveren aan het onderzoeksgebied van de Nederlandse dijken. Naar deze dijken kan en moet nog veel onderzoek gedaan worden en zijn er vele punten niet voldoende bekeken. De laatste jaren is de belangstelling voor het rivierengebied door het hoge water, dat enkele jaren na elkaar optrad, weer gegroeid. Ook mijn interesse voor 'de grote bergen zand en klei' die weer een hoogwater wisten te overleven en ons beschermden, werd door deze hoge waterstanden gewekt. Want hoe kan de kracht van zoveel water toch afvloeien zonder dat de polders onderlopen? Hoe komt het dat een berg zand toch niet bezwijkt ook al staat het water tot aan de kruin?

Dit eindverslag is tot stand gekomen door de opmerkingen en adviezen van mijn begeleiders ter harte te nemen en te verwerken in mijn onderzoeksproces. In dit eindverslag heb ik eerst een vogelvlucht overzicht gegeven van de feiten en gedachten die er binnen mijn afstudeeronderwerp vallen, waarna deze zich uitkristalliseren van een oplossing voor een case-situatie tot een evaluatie voor andere hoogwater situaties.
Hierbij wil ik dan ook mijn afstudeercommissie bedanken voor de begeleiding en met name dhr. Molenaar voor het geven van nieuwe inzichten en het op mij overbrengen van zijn enthousiasme.

Ik wens de lezer van dit verslag in ieder geval alle plezier toe bij het lezen en ik hoop dat de achtergronden en conclusies van mijn afstudeeronderwerp duidelijk zullen worden.

Ivo Joore
juni 2004

Samenvatting

Vele kilometers primaire waterkeringen en dijken langs kleinere wateren beschermen grote delen van Nederland tegen overstromingen. De eeuwenoude ervaring van dijkenbouw was tot voor enkele decennia gebaseerd op het uitgangspunt: kruinhoogte iets hoger dan de hoogst bekende waterstand. De kans op een hogere waterstand was een kwestie van afwachten.
Door een sterke toename van de te beschermen belangen van de binnendijkse gebieden is de vraag naar veiligheid steeds groter geworden. Na de de hoogwaters van 1988, 1993 en 1995 bij de grote rivieren groeide het besef dat ook de veiligheid van de dijken langs de grote rivieren te wensen overliet. Een meer wetenschappelijke benadering van de kans van optreden van hoge afvoeren en het bepalen van het waterkerend vermogen van rivierdijken kwam op gang. Dit proces mondde uit in een besluit tot verhoging en verzwaring van de rivierdijken.

Dit afstudeerwerk begint dan ook met de het onderzoeken van de algemene achtergronden en geschiedenis van dijken in het algemeen en de toegepaste sluitingen bij verschillende dijken. Nadat een beeld gevormd is van het verleden worden de bezwijk- en faalmechanismen bekeken en ook uitgebreid besproken. Daarna worden de risico's en belangen die mensen en bedrijven nemen en hebben bij het wonen voor of achter dijken bekeken. Na dit algemenere gedeelte wordt er meer specifiek gericht op de rivierdijken gekeken naar verschillende bezwijkmechanismen en sluitingsvormen. Onder andere zandzakken, zandworsten, damwanden, caissons en zelfs schepen worden meegenomen als mogelijke oplossing voor een dijkdoorbraak.

Aan de hand van een case, een dijkdoorbraak in 1926 bij Zalk, wordt gezocht naar een oplossing die bij een dijkdoorbraak als noodsluiting gebruikt zou kunnen worden. Eerst worden van deze case de omgevingssituatie en alle hydraulische randvoorwaarden in kaart gebracht. Om er voor te zorgen dat de achterliggende polder nog niet vol water staat, is het belangrijk dat dit binnen afzienbare tijd gebeurt. Daarom is de keuze gemaakt dat de doorbraak binnen 6 uur gesloten moet zijn. Om een goede oplossing te vinden, worden de eerder gevonden algemene sluitingsvormen beoordeeld op een aantal criteria zoals beschikbaarheid, kosten, waterdichtheid en stabiliteit. Met deze criteria wordt een keuze gemaakt met welke sluitingsvorm in het geval van de case de sluiting het beste uitgevoerd kan worden. De noodsluiting door middel van damwanden blijkt de beste te zijn.

Vervolgens zijn er een aantal berekeningen uitgevoerd met betrekking tot de snelheden en waterdieptes die op zullen treden bij de sluiting van de bres. Aan de hand van de uitkomsten worden een aantal maatgevende situaties onderscheiden. Voorbeelden hiervan zijn de situaties waarbij aan één zijde van de gesloten damwandsluiting nog water staat of waarbij de stroming bepalend is voor het plaatsen van de laatste damwand. Door middel van sterkte- en vervormingsberekeningen wordt bekeken of de damwanden ook technisch haalbaar zullen zijn voor deze sluiting. Dit blijkt het geval en vervolgens kan de manier van uitvoeren van deze sluiting opgesteld worden. Door middel van twee trilinstallaties die vanaf pontons aan de zijkanten van de bres damwanden aanbrengen en vervolgens naar elkaar toe werken, kan de sluiting bewerkstelligd worden. Grootste probleem is de, bijna instantane, erosie rond de voet van de damwand door de optredende snelheden, waardoor een grote waterdiepte ontstaat, maar dit is afhankelijk van de soort ondergrond. In het geval van de doorbraak bij Zalk blijkt dit mee te vallen door de aanwezigheid van klei in de bodem. De damwanden die gebruikt worden zijn de grootste die in de handel zijn (Larssen 450), maar deze hebben daardoor nog een goede veiligheidsmarge. Het zwaarste AZ-profiel, een standaard damwandprofiel, blijkt namelijk net niet te voldoen.

Uit de evaluatie die daarna opgesteld wordt voor andere dijkdoorbraken, doorbraken door andere mechanismen en doorbraken bij andere dijken, volgen een aantal conclusies.
- Voor grotere dijkdoorbraken waarbij geen damwandsluiting mogelijk is, moet overgestapt worden op combiwanden of HZ-wanden.
- Er moet een model komen waarmee de optredende watersnelheden en dieptes, inclusief en in combinatie met de erosie rond de voet van de damwand, berekend kunnen worden.
- De waterschappen moeten voor al hun waterkeringen een noodplan opstellen inclusief een ontwerp voor een noodsluiting of het maken van compartimenteringen.

Inhoudsopgave

VOORWOORD 3

SAMENVATTING 4

INHOUDSOPGAVE 5

1 ALGEMENE ACHTERGROND 8

1.1 Situatieschets 8

1.2 Probleemanalyse 8

1.3 Probleemstelling 9

1.4 Doelstelling 9

2 GESCHIEDENIS VAN AFSLUITINGEN 10

2.1 Algemene aanpak 10

2.2 Herstel van rivierdijken 11

2.3 Herstel van zeedijken 12

2.4 Afsluiten van estuaria en zeearmen 13

3 DIJKEN 14

3.1 Primaire en secundaire waterkeringen 14

3.2 Zee- en meerdijken 14

3.3 Rivierdijken 14

3.4 Opbouw en grondsoorten 15

4 RISICO EN BELANGEN 16

4.1 Inleiding hoogwater in Nederland 16

4.2 Risicofilosofie en faalkansen 16

4.3 Belanghebbenden 17

4.4 Taakverdeling binnen de overheid 18

5 WAT BETEKENT 'EEN DIJK BEZWIJKT OF FAALT'? 19

5.1 Faal- en bezwijkmechanismen (algemeen) 19

5.2 Keuze bepalende faalmechanismen 26

5.3 Karakteristieke vorm 28

5.4 Bresgroei, algemeen en voor zanddijken 29

6 ALGEMENE OPLOSSINGMETHODEN 34

6.1 Oplossingen voor sluiting en transport 34

6.2 De sluitingsmogelijkheden 34

6.3 De transportmogelijkheden 40

6.4 Criteria voor een succesvolle sluiting 42

7 KEUZE VAN EEN CASE-SITUATIE 43

7.1 Mogelijke doorbraken 43

7.2 Situatieschets Zalk-case 43

7.3 Hydraulische randvoorwaarden en aannamen 50

8 OPLOSSINGSMETHODEN VOOR DE CASE-SITUATIE 52

8.1 Keuze van tijdslimiet voor sluiting 52

8.2 Sluitingsoplossingen voor de case-situatie 53

8.3 Criteria voor de sluitingsoplossingen 55

8.4 Beoordeling en definitieve keuze oplossing 56

9 DAMWANDOPLOSSING VOOR DE CASE-SITUATIE 59

9.1 Uitvoering (globaal) 59

9.2 Berekeningen van stroming en dieptes 59

9.3 Berekeningen van de damwandsluiting 65

9.4 Conclusies aan de hand van de berekeningen 71

10 UITVOERING VAN DE SLUITING BIJ ZALK 72

10.1 Kenmerken van de uitvoering 72

10.2 Het uitvoeringstijdschema 76

10.3 Uitvoeringsknelpunten 77

10.4 Overzicht sluitingsvariabelen 80

11 EVALUATIE ANDERE MECHANISMEN EN DIJKEN 82

11.1 Evaluatie andere mechanismen 82

11.2 Evaluatie andere rivier- en zeedijken 82

11.3 Algemene evaluatie: conclusies en aanbevelingen 82

LITERATUURLIJST 84

Bijlage 1. Gebruikte benamingen bij een dijkontwerp 88

Bijlage 2. Extra informatie dijkdoorbraak 1926 89

Bijlage 3. Overzichtskaart overstromingen in 1926 90

Bijlage 4. Foto's van de omgeving van Zalk 91

Bijlage 5. Waterstandsverloop van de IJssel in 1926 92

Bijlage 6. Informatie over zandworsten 95

Bijlage 7. Berekeningen benodigd zand en afmetingen zakken 97

Bijlage 8. Situatietekening voor de dijkdoorbraak in 1926 98

Bijlage 9. Situatietekening net na het afschuiven van de dijk in 1926 99

Bijlage 10. Situatietekening 3 uur na het afschuiven in 1926 100

Bijlage 11. Informatie over verschillende damwandprofielen 101

Bijlage 12. Uitwijking van verschillende profielen 102

1 Algemene achtergrond

In dit hoofdstuk zal door middel van een situatieschets een beeld worden gevormd van de situatie, waarin de oplossing en het onderzoek van dit afstudeerwerk zich afspelen (1.1). Vervolgens wordt na de probleemanalyse (1.2) ook een probleemstelling en doelstelling geformuleerd (1.3 en 1.4).

1.1 Situatieschets

3 565 kilometer primaire waterkeringen en 14 000 kilometer dijken langs kleinere wateren beschermen grote delen van Nederland tegen overstromingen. De eeuwenoude ervaring van dijkenbouw was tot voor enkele decennia gebaseerd op het uitgangspunt: kruinhoogte iets hoger dan de hoogst bekende waterstand. De kans op een hogere waterstand was een kwestie van afwachten.
Door een sterke toename van de te beschermen belangen van de binnendijkse gebieden is de vraag naar veiligheid steeds groter geworden. Na de (storm)rampen door de zee van 1906, 1916 en 1953 en de hoogwaters van 1988, 1993 en 1995 bij de grote rivieren groeide het besef dat ook de veiligheid van de dijken langs de grote rivieren te wensen overliet. Een meer wetenschappelijke benadering van de kans van optreden van hoge afvoeren en het bepalen van het waterkerend vermogen van rivierdijken kwam op gang. Dit proces mondde uit in een besluit tot verhoging en verzwaring van de rivierdijken.

De primaire waterkeringen vallen onder de Wet op de Waterkering, die beheerders (de waterschappen en Rijkswaterstaat) verplicht de veiligheid van de dijken elke vijf jaar te toetsen. Voor secundaire waterkeringen bestaan dergelijke criteria niet. De waterschappen zijn voor een uniforme methode, maar die is er nog niet. De politiek moet namelijk nog over de balans tussen de kosten en de veiligheid beslissen. De waterschappen bepalen nu allemaal zelf hoe zij hun dijken onderhouden en hoe vaak zij inspecties uitvoeren. Sommige dijken worden maar eens in de tien jaar geïnspecteerd. Bij deze inspecties letten de waterschappen vooral op de hoogte van de dijk. Vaak is er jaarlijks een kleinere controle, waarbij wordt gekeken of er gaten van muskusratten of scheuren in de dijk zitten. Waterschappen weten van veel van hun dijken zelfs niet eens van welk materiaal ze gemaakt zijn, omdat er vroeger bij de aanleg geen tekeningen zijn gemaakt. Meestal wordt pas gekeken hoe de dijk is gemaakt als hij moet worden opgehoogd of versterkt.

In 1956 werd als uitgangspunt gehanteerd dat de dijken van de Rijn en haar takken, waterstanden moeten kunnen keren behorend bij een maatgevende afvoer van de Rijn bij Lobith van 18.000 m3/s, met een kans op overschrijding van 1/3000 per jaar. In 1977 is conform het advies van de Commissie Rivierdijken deze maatgevende afvoer teruggebracht tot 16.500 m3/s; deze afvoer heeft een overschrijdingsfrequentie van 1/1250 per jaar. Na het hoge water van 1993, in onder andere de Maas, werd de commissie Boertien ingesteld om advies uit te brengen aan de minister van Verkeer & Waterstaat, over de te nemen maatregelen om een toekomstige watersnood tegen te gaan. Dit zorgde onder andere voor de verbreding van het zomerbed en verlaging van het winterbed van de Maas waardoor deze veel meer water af kan voeren. Dit zorgt voor lagere waterstanden en beperking van wateroverlast bij hoogwaters.
Na de watersnood van januari 1995 besloot de minister van Verkeer & Waterstaat versnelde maatregelen te nemen om de veiligheid van de bewoners in het stroomgebied van de Maas te waarborgen. De minister ontwierp het Deltaplan Grote Rivieren. In dit Deltaplan wordt aangegeven hoe de plannen van de commissie Boertien versneld kunnen worden uitgevoerd. Het Deltaplan Grote Rivieren stelt dat de bescherming tegen een hoogwater met een kans van één keer in de 1250 jaar, in het jaar 2006 dient te zijn bereikt.

1.2 Probleemanalyse

De afgelopen jaren zijn de dijken langs de Maas- en Rijntakken verscheidene keren door hoge waterstanden bedreigd. De dijken werden in allerijl verhoogd door middel van zandzakken ter voorkoming van afschuiving van het buitentalud en ook werden geotextielen of folies aangebracht tegen de buitentaluds tegen doorstroming/piping van de gehele dijk. Het gebruik van zandzakken is omstreden omdat niemand kan voorspellen hoe een dijk zich zal gedragen onder de extra belasting van zowel de zandzakken als de extra te keren hoeveelheid water.

Een andere grote bedreiging voor de stabiliteit van de dijken was het (overslag)debiet over de kruin van de dijk heen, waardoor het binnentalud kon gaan eroderen of zelfs bezwijken door verzadiging. Op dit moment is er voor deze situatie, waarbij door bezwijken van (een gedeelte van) het binnentalud een gat ontstaat in de top van de dijk en zodoende een bres zich kan uitslijpen in de dijk, nog geen parate oplossing. Naar de snelheid waarmee de bres ontstaat en verder uitdiept en verbreed, zijn verschillende onderzoeken gedaan. Er is echter geen concrete oplossing voor een snelle (nood)sluiting bij bresgroei. Voor de sluitingen van dijken of dammen in de zeearmen van Nederland, zoals de Deltawerken en enkele afsluitingen van estuaria, zijn wel verschillende technieken ontwikkeld, maar de vraag is of deze ook toepasbaar zijn in een kritieke en snel veranderende situatie zoals een rivierdijkdoorbraak. Want aan de meeste van deze sluitingen van zeearmen zijn maanden, zo niet jaren, van studie vooraf gegaan, terwijl bij bresgroei in de rivierdijk zo snel mogelijk gehandeld dient te worden ter voorkoming van de gevolgen voor de achterliggende gebieden. Bijkomend nadeel is dat door overmatige neerslag in de voorafgaande periode en de lange duur van het hoogwater verweking op kan treden van de niet-verharde dijkskruinen en zelfs van binnendijkse wegen. Daardoor wordt de bereikbaarheid en de begaanbaarheid met voertuigen ten behoeve van inspectie en noodreparaties gering of zelfs onmogelijk.

De Rijn- en Maastakken kunnen als voorbeeld gelden bij de ontwikkeling van een oplossing, maar dit hoeft niet het enige toepassingsgebied te zijn. Andere delen (of dijken) van Nederland zouden gebaat kunnen zijn bij een mogelijke oplossing tegen de dreiging van een dijkdoorbraak door het uitgroeien van een gat tot een bres met als gevolg inundatie. Het gebied van bijvoorbeeld de IJssel is vroeger meermalen overstroomd. Eerst door zowel stormen op de Zuiderzee als door de hoge rivierafvoeren, maar sinds de aanleg van de Afsluitdijk alleen nog door de laatst genoemde hoge afvoeren. Ook kan naar voorbeelden voor de oplossing gezocht worden bij de dijken die bijvoorbeeld boezems of kleinere waterlopen afsluiten. Misschien is een toepassing van de gevonden oplossing mogelijk ook te gebruiken bij deze dijken.

1.3 Probleemstelling

Er is geen overzicht van maatregelen die genomen kunnen worden om binnen afzienbare tijd de doorbraak en de gevolgen van bresgroei bij rivierdijken te beperken of zelfs te verhelpen.

1.4 Doelstelling

Het bedenken en uitwerken van een operationele oplossing die de gevolgen van dijkdoorbraak en bresgroei kan verminderen en leidt tot sluiting van de ontstane bres in een rivierdijk.

2 Geschiedenis van afsluitingen

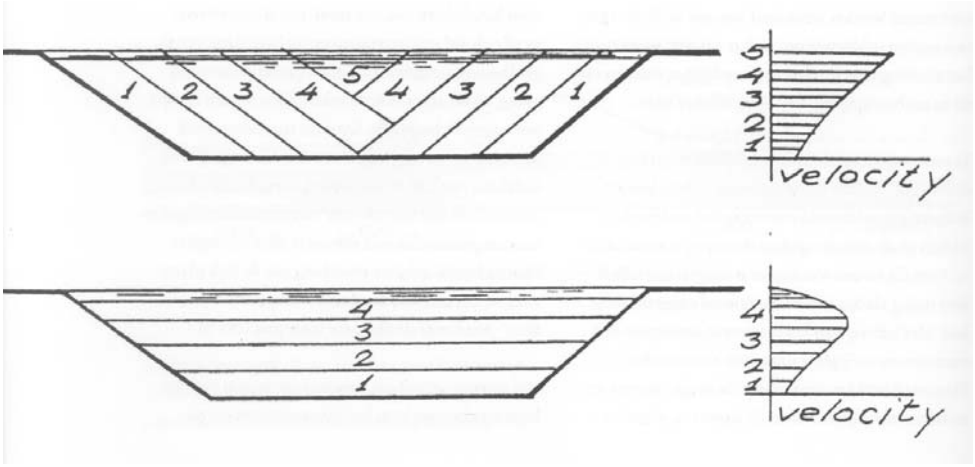
In dit hoofdstuk zal de geschiedenis van de werkwijze van afsluiten in Nederland besproken worden. In eerste instantie zoals de algemene aanpak was (2.1) en vervolgens hoe het herstel van rivierdijken (2.2), zeedijken (2.3) en afsluitingen van zeearmen (2.4) in zijn werk ging.

2.1 Algemene aanpak

Als een dijk doorgebroken was kon niet altijd gelijk begonnen worden met sluiting van de bres, omdat het materiaal en materieel niet voor handen was. Deze situatie zorgde vooral voor problemen als de polder geïnundeerd was en daardoor de aanvoer van materialen en werktuigen op een later tijdstip erg bemoeilijkt werd. Bij een relatief kleine afvoer kon met eenvoudige middelen en materialen worden volstaan. Bij de doorbraak van zeedijken, kon vooral wanneer er tijdens eb een geul weinig afvoer had of zelfs geheel droog stond, een geulafsluiting makkelijk gerealiseerd worden. Een lichte bodemverdediging met behulp van rijshout in de vorm van zinkstukken, die tijdens de hoogwaterkering werden afgezonken en verder met stenen verzwaard was, was ook bij de wat grotere geulen voldoende om bij het nauwer worden van het stroomgat de funderingsgrondslag te vormen van de in aanbouw zijnde afsluitingsdam of kade.

In eenvoudige gevallen was dit alles slechts handwerk, waarbij enkele schepen en een houten hulpsteiger voldoende waren om het zinkwerk te maken en de afsluitingsdam daarop te storten. Maar deze steiger was enkel nodig voor stroomgaten van relatief enige omvang. Met behulp van kruiwagens of smalspoor werd vervolgens in horizontale lagen een sluitdam van doorwortelde brokken grond opgeworpen, waarvan de kruin boven de waterlijn uitkwam. Het verdere dijklichaam werd gemaakt van klei of zandige klei. Bij de sluiting van grotere geulen of kreken werd eerst een rijzendam aangelegd, dit is een dam opgebouwd uit lagen van op elkaar afgezonken zinkstukken tot een hoogte van ongeveer laagwater. Op deze rijzendam werd dan tot even boven hoogwater zo snel mogelijk een sluitkade van klei aangebracht. Vervolgens werd de dijk verder afgebouwd naar hetzelfde principe als de kleinere dijken, maar werd wel als extra bescherming van de teen en de buitenglooiing kraagstukken met steenstortingen aangebracht en wat hoger een glooiing van zetsteen.

Een smalle geul kon zowel door middel vanaf een sluiting vanaf de oevers als in horizontale lagen gesloten worden. De stroomsnelheden zijn wel veel groter bij een sluiting vanaf de dijkkoppen dan bij een horizontale sluiting. Tenminste, aanvankelijk neemt bij een horizontale sluiting de stroomsnelheid wel toe, maar deze neemt ook weer af tot deze nul is geworden als de kruin boven water komt (figuur 1). De maximale snelheid wordt bereikt als de toestand van de overstortende straal die van een volkomen overlaat heeft bereikt; dan wordt de stroomsnelheid boven de kruin van de in hoogte groeiende sluitdam niet meer bepaald door het verval in het sluitgat, maar alleen door de stand van het hoogste waterpeil boven de kruin.

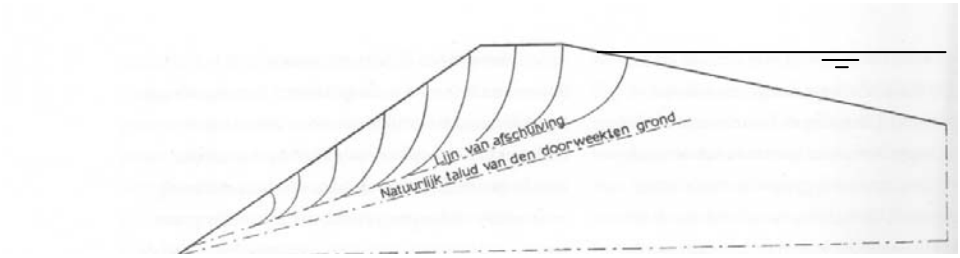


Figuur 1. Het verloop van de snelheid bij verschillende sluitingsvolgorde

De oudste dijken waren over het algemeen te laag en het profiel was vaak te licht om de zwaarste stormen te weerstaan. Dijkbreuken en overstromingen kwamen veelvuldig voor, zowel langs de Waddenkust in het noorden en de Noordzeekust in het zuidwesten als langs de Zuiderzeekusten in het centrum van het land en de estuaria van de rivieren. Ook bij dijkbreuken langs de bovenrivieren met de naastliggende vruchtbare rivierkleigebieden werd land soms langere tijd onbruikbaar, verdronk er veel vee en kwamen eveneens veel mensen om. Omdat er niet altijd direct voldoende geld en middelen waren om de breuk te dichten en de oude toestand te herstellen of te verbeteren, kreeg de natuur vaak de kans om de ontstane gaten te verdiepen en uit te breiden. Als de herstelwerkzaamheden tenslotte toch op gang kwamen dan was er een nieuwe toestand ontstaan die als uitgangspunt moest dienen.

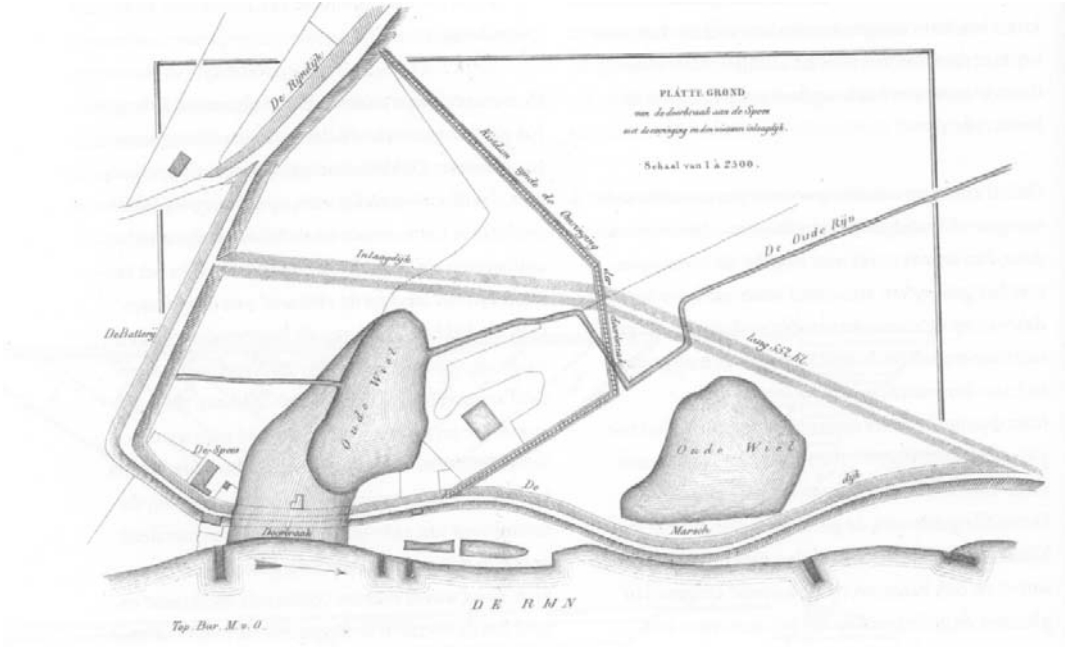
2.2 Herstel van rivierdijken

Het blijkt dat een doorbraak in een rivierdijk vaak het gevolg is van een langdurige extreem hoge waterstand, waarbij mede door een slechte drainage van het dijklichaam het water uit het vaak te steile binnentalud ging treden. Door de stromingsdruk van dit grondwater kan namelijk het talud van een dijk van zandige grond slechts in stand blijven indien de helling tot ongeveer de helft van de natuurlijke taludhelling zou worden gereduceerd (figuur 2).



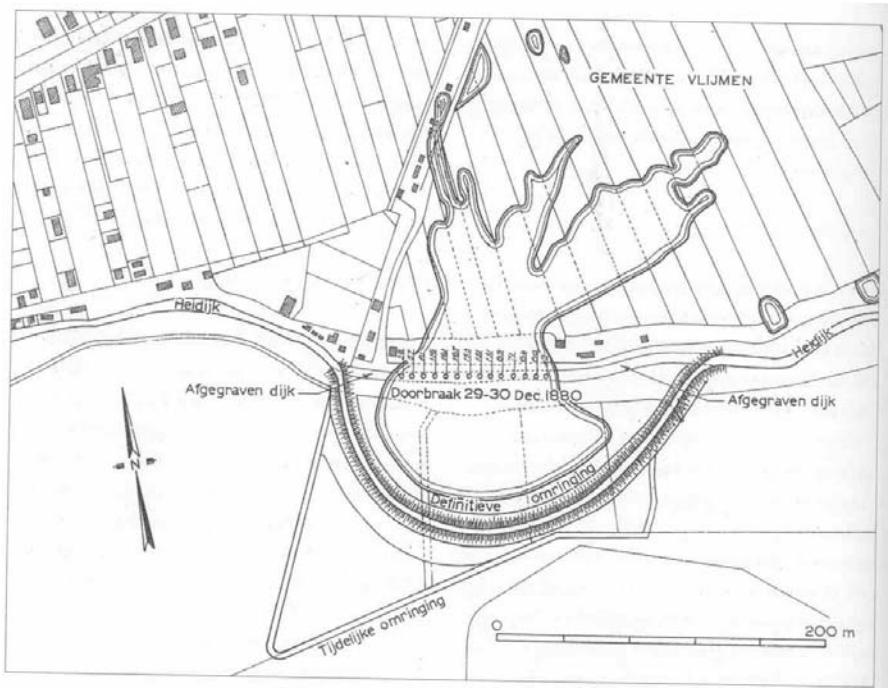
Figuur 2. Glijvlakken in een doorweekt binnenbeloop van een dijk

Met andere woorden: er trad lokaal een vloeiing van de grond aan het binnentalud op, de steun voor de bovenliggende lagen ging verloren en het hele binnentalud vloeide weg en schoof af, waarbij ook de dijkskruin verloren ging. Het extreem hoog staande rivierwater stroomde via de verlaagde kruin over de dijk, vernielde het binnentalud verder en schuurde ook een geul uit aan de binnenzijde van de dijk tot een diep gat was ontstaan. Een dergelijk gat wordt een wiel genoemd (figuur 3).



Figuur 3. ´Wielen´ ten gevolge van de doorbraak van een rivierdijk

Voor het herstel van een dergelijke dijkbreuk was er een keuze tussen twee oplossingen. Als na verloop van tijd de toestand was gestabiliseerd kon men trachten in een periode van lage rivierstanden het gat te dichten zolang er geen zijdelingse afvoer van rivierwater meer was en men voldoende stortmaterialen had. Was er echter wel een zijdelingse afvoer van enige betekenis dan was de aangewezen methode om de breuk te herstellen door een ringdijk rond het wiel te leggen (figuur 4).



Figuur 4. Herstel van de dijkbreuk door aanleg van een ringdijk rond het wiel, na de doorbraak van de Vlijmense of Heldijk bij Nieuwkuik in december 1880.

2.3 Herstel van zeedijken

De zeedijken worden ontworpen voor een langdurige hoge waterstand en een kortstondige opwaaiing met hoge korte golven op het buitentalud. Daardoor heeft het vaak met stenen beklede buitentalud een veel flauwer verloop dan bij de rivierdijken, zodat de golfenergie wordt uitgeput tijdens het oplopen tegen het talud. Het binnentalud is daarentegen tamelijk steil, omdat gedurende de hoge buitenwaterstand het gevaar van verweking (zoals bij rivierdijken) van dit binnentalud niet groot is. De zeedijkbreuken zijn dan ook bijna allemaal ontstaan door aantasting van het directe voorland, de onder water gelegen oever, de teen van de dijk of het buitentalud. Door de relatief kortdurende ongunstige omstandigheden was het vaak mogelijk de dijkbreuk zelfs te voorkomen met behulp van zandzakken of een met klei gevulde opkisting. Ook werden er wel zeilen gebruikt verzwaard met zandzakken. Deze opkistingen worden soms ook gebruikt bij een dreigende overstort over een rivierdijk. Deze overstort bij zeedijken is in de geschiedenis van de Nederlandse kust regelmatig voorgekomen. Bij een overstort is de dijkskruin te laag, waardoor bij uitzonderlijk hoge stormvloedstanden de kruin van de dijk een overlaat wordt. Door de overstortende straal wordt het binnentalud aangetast, waarna door afschuivingen tenslotte ook de dijkskruin bezwijkt en een complete breuk optreedt. Bij een dijkdoorbraak ontstaat door de eb- en vloed werking van de zee een geulenstelsel dat elke keer de polder achter de dijk zal legen en vullen. Dit is ook een groot nadeel voor het sluiten van de ontstane bres. Een enkele keer wordt getracht om bij het eerst volgende laag water een schip met grond te verzwaren en in het gat tot zinken te brengen. Voorbeeld hiervan zijn het dijkdorpje 'Oudeschip' in Groningen en de sluiting van een dijkdoorbraak in 1953. Als een directe sluiting niet mogelijk is, wordt het moeilijker om het gat zelf te dichten. Vaak wordt dan een omtrekkende beweging gemaakt waardoor men in een boog om de bres alle geulen afsluit en zo de dijk weer dichtmaakt. Als de plaatsen waar de 'omtrekkende' dijk de geul op ondiepe plaatsen snijdt, wordt dit ook wel een maaiveldsluiting genoemd (figuur 5).



Figuur 5. Maaiveldsluiting van een zeedijk na een doorbraak.

2.4 Afsluiten van estuaria en zeearmen

De Nederlandse kust is al vanaf de prehistorie talloze keren door stormvloeden doorbroken en veranderd. Het gevolg was dat op verschillende plaatsen verbrokkelde eilandengroepen, zeearmen, estuaria en een binnenzee gevormd waren. Omdat tijdens en na de eerste wereldoorlog een grote behoefte ontstond naar voedsel en de daarbij horende landbouwgronden, werd er besloten om het Zuiderzeeproject uit te voeren. Dit hield in dat eerst de centrale binnenzee, de Zuiderzee, afgedamd (1932) werd en vervolgens ingepolderd. In 1953 werd het zuidwestelijke gedeelte van Nederland getroffen door de Watersnoodramp en werd, nadat alle dijkdoorbraken, waarvan sommigen toch wel op spectaculaire wijze, gedicht waren het Deltaplan gelanceerd.

De Deltacommissie adviseerde de regering om een aantal stormvloedkeringen en afsluitingen te realiseren. Deze voorstellen beslaan een stormvloedkering bouwen in de Hollandse IJssel, afsluiten van de zeegaten Veerse Gat, Haringvliet, Brouwershavense Gat en Oosterschelde door middel van vaste dammen, afsluiten van het Volkerak en de Grevelingen, versterken van de hoogwaterkeringen en het gebied bij de Oude Maas beter te beschermen. In 1958 worden de adviezen van de Deltacommissie opgeschreven in een wet, waarna deze goedgekeurd door de Tweede Kamer. De Deltadienst wordt opgericht door Rijkswaterstaat en deze gaat zich bezighouden met de uitvoer van de Deltawet. Het plan van aanpak dat de Deltadienst opstelt, wordt het Deltaplan genoemd. Hierin staat beschreven hoe en in welke volgorde de dammen gebouwd zullen worden. Omdat het een lastige klus werd, werd begonnen met een aantal kleine dammen, zodat er lering getrokken kon worden uit deze sluitingen. Later werden ook nog andere estuaria afgesloten (bijvoorbeeld de Lauwerszee op de grens tussen Groningen en Friesland) en stuwen gebouwd in de Neder-Rijn en de Lek.

3 Dijken

In dit hoofdstuk worden de verschillende soorten dijken uiteengezet naar categorie (paragraaf 3.1), soort (paragraaf 3.2 en 3.3) en naar grondopbouw of -soort (paragraaf 3.4).

3.1 Primaire en secundaire waterkeringen

De waterkeringen in Nederland zijn te onderscheiden in primaire waterkeringen en niet-primaire waterkeringen.

De primaire waterkeringen beschermen Nederland tegen overstromingen vanuit buitenwater. Buitenwater is het water van de grote rivieren, het IJsselmeer, het Markermeer en de zee. In totaal is er bijna 3700 kilometer primaire waterkering, waarvan 264 kilometer duin, 431 kilometer zeedijk, 1433 kilometer rivierdijk en 535 kilometer meerdijk. Deze waterkeringen keren direct het buitenwater. Daarnaast is er nog ruim 1000 kilometer primaire waterkering die voor direct buitenwater kerende keringen liggen (Afsluitdijk) of niet direct buitenwater keert (bijvoorbeeld de dijk langs de oostzijde van de Noordoostpolder). Van de primaire waterkeringen is circa 90% in beheer bij de waterschappen en 10% bij het Rijk.

De secundaire waterkeringen beschermen Nederland tegen overstromingen die veroorzaakt worden uit andere watersystemen. Voorbeelden van secundaire keringen zijn boezemkaden, polderkaden en kaden langs rivieren en beken. De waterschappen beheren naast de primaire waterkeringen ruim 14.000 kilometer secundaire keringen. Deze relatief kleine keringen zijn van groot belang voor de bescherming tegen wateroverlast. In de nabije toekomst moeten normen en randvoorwaarden worden opgesteld om ook voor deze waterkeringen te kunnen beoordelen of ze voldoende hoog, sterk en stabiel zijn. Voor de primaire keringen zijn namelijk al eisen en criteria opgesteld naar aanleiding van de stormramp van 1953 door het TAW (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen), terwijl een uniforme toetsing voor de secundaire keringen nog niet bestaat.

3.2 Zee- en meerdijken

Onder de verzamelnaam 'zee- en meerdijken' worden de dijken en dammen geplaatst die zowel de zee als de meergebieden van Nederland in toom houden. De volgende typen dijken worden ingedeeld bij de zee- en meerdijken:

- zeedijken
- meerdijken
- verbindende waterkeringen: afsluitdammen
- verbindende waterkeringen: compartimenteringsdammen
- scheidingsdijken
- compartimenteringsdijken.

De zee- en meerdijken hebben als belangrijkste functie het beveiligen van het polderland op de scheiding van water en land. Een afsluitdam heeft als belangrijkste functie het verkorten van de kustlijn een veel geziene nevenfunctie is het gebruik als verbindingsroute. De compartimenteringsdammen zijn gebouwd met als functie het opdelen van binnenwateren (meren en Oosterschelde) en hebben eveneens de nevenfunctie van verbindingsroute. De scheidings- en compartimenteringsdijken hebben als functie het scheiden van twee dijkringgebieden. Het verschil tussen de scheidings- en compartimenteringsdijk zit in de ligging. De scheidingsdijk ligt tussen twee dijkringgebieden met verschillende veiligheidsnorm. De compartimenteringsdijk ligt tussen dijkringgebieden met eenzelfde veiligheidsnorm.

3.3 Rivierdijken

De grote rivieren in Nederland worden over het algemeen opgedeeld in twee gebieden. Namelijk het boven- en benedenrivierengebied. Deze termen zijn ontstaan vanuit de termen boven- en benedenstrooms, waarbij de eerste vóór het vastgelegde punt is en de tweede term voorbij dat punt is bezien vanaf de oorsprong van de rivier. Voor de Rijn en zijn takken is de scheiding van het bovenrivierengebied vastgelegd op het punt waar, bij hoge afvoeren, geen merkbare invloed meer is

van de waterstand op zee. De voor dit gebied opgestelde eisen en regels kunnen ook toegepast worden op de dijken langs de Vecht, in Overijssel en de Maas. Hierbij moet wel rekening gehouden worden met de daar geldende karakteristieken en maatgevende afvoergolven. Voor de (monding van de) Vecht is bijvoorbeeld de maatgevende afvoer 575 m3/s, met een overschrijdingsfrequentie van 1:1250 jaar.
In het benedenrivierengebied bepaalt de waterstand en de stormvloeden op zee gedeeltelijk of geheel de ontwerpwaterstanden. Andere verschillen tussen het beneden- en bovenrivierengebied zijn de verschillende overschrijdingsfuncties van de ontwerpwaterstanden, de verschillen in richting en sterkte van de windsnelheid en de ontwikkeling van de waterspanningen in de dijken door verschillen in de was en val van de rivierstand en de geologische opbouw van de ondergrond.
De hierboven behandelde dijken zijn allemaal primaire waterkeringen, waarvoor verschillende regels en eisen zijn ontwikkeld. Voor de secundaire waterkeringen zijn geen leidraden beschikbaar en de waterschappen hebben veelal een andere manier van beheren en inspecteren.

3.4 Opbouw en grondsoorten

Door de grote variatie in opbouw is het gedrag van de ondergrond van de dijken niet altijd even goed voorspelbaar. Hierdoor kunnen grote risico's ontstaan. Dit geldt vooral in gebieden met een slappe ondergrond, zoals in grote delen van West-Nederland. Bovendien zijn niet van alle dijken kaarten en achtergrondinformatie beschikbaar over de ondergrond of zelfs de opbouw van de dijk. Bij de primaire waterkeringen is over het algemeen goed bekend hoe de dijk opgebouwd wordt, maar toch zijn in de ondergrond grote verschillen te vinden, onder andere door eerdere ontgravingen of vegetatie. Slechtere grondcondities, zwaardere belastingen, diepere ontgravingen in de nabijheid en scherpere eisen aan de omgevingsbeïnvloeding vragen om steeds meer onderzoek naar de stabiliteit en sterkte van de dijken.
Als voorbeeld kunnen de veendijken aangehaald worden. Een kwart van de secundaire dijken in Nederland bestaat uit veen. In totaal telt ons land ongeveer 3500 kilometer veendijk. Deze dijken zijn dan echter nog niet allemaal gelijk. Veen is namelijk bijna altijd 'verontreinigd' met zand en klei. Juist de aanwezigheid van zware klei is belangrijk voor het gewicht en de vochtopname van een veendijk. Terwijl bij een grondopbouw met een kleilaag onder de dijk, deze laag ook weer kan fungeren als glijvlak voor het afschuiven van deze dijk.
De belangrijkste grondstoffen voor de opbouw van een dijk zijn zand en klei. Het standaard ontwerp van een dijk is een kern van zand met daarover heen een (dikke) kleilaag. Dit alles wordt vaak nog voorzien van een beschermende laag in de vorm van stenen, vegetatie of asfalt. Naarmate de dijken lager worden is het om praktische (uitvoeringstechnische) redenen niet meer mogelijk meer dan één materiaal per dwarsprofiel te gebruiken. In die gevallen vindt de uitvoering plaats in enkel klei.

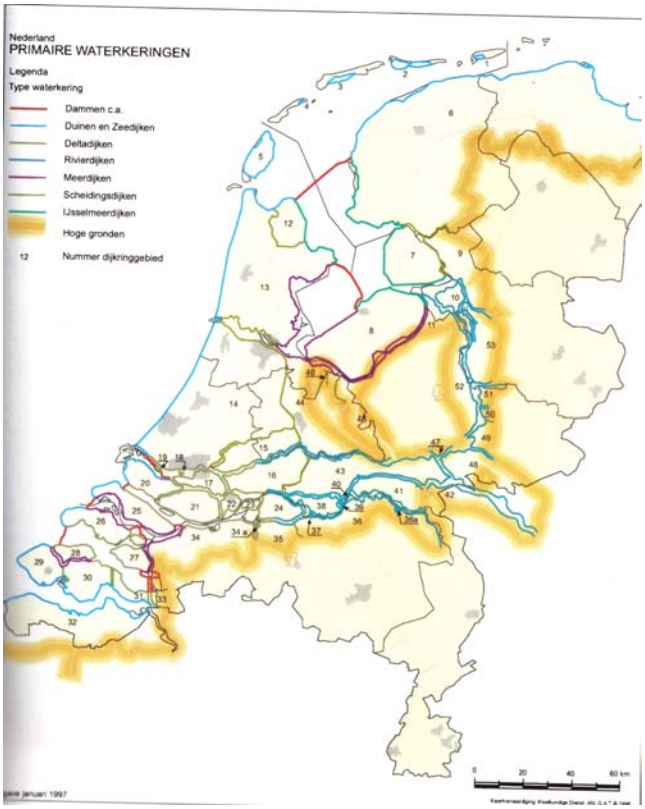
4 Risico en belangen

In dit hoofdstuk wordt begonnen met een algemene inleiding (paragraaf 4.1) en de risicofilosofie van de Nederlandse overheid over de dijkdoorbraken en hoogwaters (paragraaf 4.2). Verder zullen ook een aantal directe belanghebbenden besproken worden (paragraaf 4.3).

4.1 Inleiding hoogwater in Nederland

Hoge waterstanden die de lage delen van ons land bedreigen kunnen twee oorzaken hebben. Ten eerste stormen die de waterstand op zee en op meren omhoog stuwen. Ten tweede neerslag en smeltwater die de afvoer van rivieren doet toenemen. Er is een duidelijk verschil tussen de waterstandverhogingen op de rivier en de zee. Op de rivier is de waterstandverhoging groter en langduriger dan op zee. Een ander belangrijk verschil is de grootte van de golfaanval. De hoge waterstand op zee wordt altijd veroorzaakt door een storm met de daarbij behorende zware golfaanvallen. Dit levert niet alleen een extra belasting op voor het buitentalud, maar ook voor het binnentalud in het geval van golfoverslag. Langs de rivieren is de directe bedreiging veel minder heftig, maar houdt wel langer aan waardoor de dijken kunnen verweken of bezwijken door uitspoeling van grond.

De Nederlandse dijken worden opgedeeld in verschillende categorieën en plaatsen. Zo wordt er een onderscheid gemaakt in zee-, meer- en ringdijken (hoofdstuk 3). Een onderscheid naar plaats is bijvoorbeeld het verschil tussen het beneden- en bovenrivierengebied of de gebieden rond het IJsselmeer.



Dijkringgebied	Overschrijdingskans (gemiddeld per jaar)
1 t/m 4	1:2000
5 t/m 8	1:4000
9	1:1250
10 en 11	1:2000
12	1:4000
13 en 14	1:10.000
15 en 16	1:2000
17	1:4000
18 en 19	1:10.000
20	1:4000
21 t/m 24	1:2000
25 t/m 33	1:4000
34 t/m 35	1:2000
36 t/m 53	1:1250

Figuur 6. Primaire waterkeringen en (in de tabel) de overschrijdingskans per dijkringgebied

4.2 Risicofilosofie en faalkansen

Bij de veiligheidsbenadering is het risico, dat bij het betreffende probleem hoort, te definiëren als de kans dat iets optreedt maal de kosten die gemaakt worden. De maat voor het risico is daarbij uit te

drukken in bijvoorbeeld het gemiddelde verlies van geld of mensenlevens per jaar. De keuze voor een bepaald risico, en dus ook het accepteren daarvan, draait in feite om maatschappelijke kosten en baten.

De Nederlandse overheid heeft verschillende risiconiveau's opgesteld voor elk van de dijkringgebieden. Deze risiconiveau's worden uitgedrukt in de gemiddelde kans dat een dijk faalt (figuur 6). Een aantal waarden zijn bijvoorbeeld 1:1250, 1:2000 etc. etc. Deze overschrijdingskansen per gebied hangen af van de aard van de bedreiging en van de belangrijkheid van de kenmerken van het dijkringgebied. Zo zijn de gevolgen van een overstroming door rivierwater anders dan door zeewater. Een ander verschil is de aankondiging van hoog water op lange of korte termijn. Een kleine polder zal sneller vollopen dan een grote, waardoor de mensen minder tijd hebben om te vluchten wat dus meer slachtoffers oplevert. In een diepe polder zal meer schade optreden dan in een ondiepe. In een dijkringgebied, waar veel mensen wonen en veel industrie gevestigd is, zal de schade aanzienlijk hoger zijn dan in een polder die dun bevolkt en weinig bebouwd is.

De beveiliging van Nederland tegen hoog water zal altijd aandacht blijven vragen. Daarvoor zijn verschillende redenen. Ten eerste hebben we te maken met de wisselende natuurverschijnselen, namelijk stijging van de zeespiegel, sedimentatie in de rivieren, bodemdaling van het land en natuurlijk de aantasting van de keringen door de 'tand des tijds'. Ten tweede kunnen de componenten van de kosten-baten afweging veranderen, zoals de offers van aanleg of instandhouding van de waterkering en de gevolgen van een dijkdoorbraak. Ten derde kan de maatschappelijke mening over de waardering van de kosten en baten veranderen, mede door het optreden van wateroverlast en watersnood.
Niet alleen tussen twee ringdijkgebieden, maar ook bij de waterkeringen binnen één ringdijkgebied, kunnen de kosten en baten van verbetering van een waterkering verschillen. De kosten zullen bijvoorbeeld anders zijn voor een stedelijk gebied dan voor een landelijk gebied. Ook kan de grootte van de bedreiging een rol spelen, bijvoorbeeld inundatie door het niet sluiten van een duiker met beperkte doorstroom of door een (grote) dijkdoorbraak. Toch zijn deze verschillende eisen wel degelijk gebaseerd op dezelfde beginselen van veiligheid. De veiligheid van alle delen van het dijkringgebied en de kwaliteit van de delen van de ringdijk moeten dan ook samen bekeken worden. Soms is er door middel van secundaire waterkeringen een polder opgedeeld in kleinere compartimenten. Voordeel hierbij is dat de overstroming maar beperkt blijft tot een klein gebied. Het nadeel is echter dat een dergelijk gebiedje ook sneller volloopt, waardoor de veiligheid afneemt.

4.3 Belanghebbenden

De directe belanghebbenden bij mogelijke overlast, die ook gebruik of aanspraak maken op het gebied rondom de dijken zijn particulieren, landbouwbedrijven, industrie, instellingen, stichtingen, overheid en nutsbedrijven.

- Onder de particulieren worden de mensen verstaan die rondom de dijk wonen of werken en daardoor verschillende belangen hebben. Zij kunnen bijvoorbeeld tegen een verbreding van de dijk zijn vanwege de landschappelijke aspecten, maar ook omdat ze een dijkhuis bewonen.
- De landbouwbedrijven hebben vooral belang bij het behouden van hun landerijen in de uiterwaarden. Ze zijn bijvoorbeeld tegen het verlagen of verhogen van de uiterwaarden waardoor de vruchtbare klei en de jaarlijkse inundatie niet meer gebruikt kunnen worden voor het bedrijf. Ook het teruggeven van de uiterwaarden aan de rivier, zodat er meer ruimte ontstaat voor de rivier, stuit bij hen op veel verzet.
- De industrie heeft zich ook in de kleirijke uiterwaarden gevestigd, omdat de uiterwaarden een grondstof leveren voor de producten of omdat zij grote stukken grond kunnen gebruiken voor massaproductie. Het is niet moeilijk voor te stellen, dat als de rivier vaker buiten zijn oevers zal treden deze de faciliteiten vaker onder water zal zetten.
- De (zorg)instellingen zijn vooral betrokken bij de opvang van de getroffenen als de rivier buiten zijn oevers treedt. Vooral bij een dijkdoorbraak van de winterdijk zullen zij veel werk hebben.
- Er zijn verschillende stichtingen, die elk een andere opvatting hebben wat betreft het gebruik van de uiterwaarden en de gebieden rondom de dijken, omdat de een voor een vrije natuur is terwijl de andere juist de (historische) kenmerken van een gebied wil bewaren.

- De overheid streeft natuurlijk naar de optimalisatie van het kleinste risico van overstroming tegen de minste kosten. De overheid draait namelijk op voor de kosten van de verbetering of verandering aan de dijken, maar ook voor de kosten van een eventuele doorbraak.
- De nutsbedrijven beheren en bezitten kabels en leidingen, die ook het gebied rondom de dijken kruisen. Als er veel veranderd in dit gebied zullen ook veel aansluitingen en leidingen opnieuw aangelegd moeten worden.

4.4 Taakverdeling binnen de overheid

Waterschappen

Waterschappen zijn verantwoordelijk voor de aanleg, beheer en onderhoud van primaire en secundaire waterkeringen die een dijkringgebied omsluiten. Van de primaire waterkeringen is circa 90% in beheer bij de waterschappen en 10% bij het Rijk. Waterschappen worden bestuurd door een gekozen vertegenwoordiging van ingelanden: de belanghebbenden in het beschermde gebied. De waterschappen hebben de bevoegdheid de zogenaamde 'keur' uit te vaardigen die nodig is om de waterkerende functie veilig te stellen. Het beheer en onderhoud wordt voornamelijk gefinancierd door de belastingheffing van de 'ingelanden'. De lopende dijkversterkingen gaan echter de draagkracht van de meeste waterschappen te boven en wordt daarom (grotendeels) gesubsidieerd door het rijk. Sinds 1993 is de aanlegsubsidie voor de rivierdijkversterkingen overgeheveld naar het provinciefonds. Er is echter nog steeds een discussie gaande over de financiering van het integraal waterkeringbeheer. Het aantal waterschappen is teruggebracht van ongeveer 2500 in 1950 naar minder dan 70, omdat er steeds grotere bestuurlijke en technische capaciteiten van de waterschappen geëist worden.

Provincie

De provincies houden toezicht op de waterschappen. De Wet op de Waterkering onderscheidt twee specifieke zaken voor de provincie, namelijk het bewaken van de technische kwaliteit van het beheer en het toezien op een goede afstemming tussen gemeentelijk en waterschapsbeleid. De taakstelling van de waterschappen wordt door de provincie vastgelegd in de waterschapsregelementen. Ook de plannen van de rivierdijkversterkingen en de in de Wet op de Waterkeringen voorgeschreven vijfjaarlijkse rapportage van de waterkeringsbeheerder over de waterstaatkundige toestand van de primaire waterkeringen moeten worden voorgelegd aan de Gedeputeerde Staten. De toezichthoudende functie omvat ook de rijkswaterkeringen in de provincie. Verder behoort de normstelling van boezemkaden en tweede waterkeringen tot de taken van de provincie.

Rijk

Het rijk heeft een viertal verantwoordelijkheden ten aanzien van de waterstaat:
- het verzorgen van de wetgeving
- het oppertoezicht op het waterschapbestel
- het toezicht op de aanleg van dijken door waterschappen
- het beheer van primaire waterkeringen die verschillende dijkringgebieden beschermen en de duinkust van de Waddeneilanden
- het beheer van grote wateren en rivieren.

Met betrekking tot de zandige kust heeft het rijk een grote rol, omdat zij verantwoordelijk is voor de handhaving van de ligging van de kustlijn, die een randvoorwaarde vormt voor de veiligheid van duinen en zeedijken. Het rivierbeheer moet er onder andere voor zorgen dat er geen ongewenste weerstanden in het rivierbed ontstaan en dat het van bovenstroomse gebieden afkomende water goed kan worden afgevoerd. Het oppertoezicht komt tot uiting in het vijfjaarlijkse verslag van de Gedeputeerde Staten aan de minister van Verkeer en Waterstaat over alle ringdijkgebieden in hun provincie.

Gemeente

Op het gebied van ruimtelijke ordening stelt de gemeente bestemmingsplannen op waarin de waterkeringen ingepast moeten zijn of worden. Waar waterschappen, gelet op hun functionele bestuurstaken, zijn gericht op de beveiliging tegen overstromingen, daar richten de gemeenten zich op andere functies van waterkeringen. Daarnaast draagt de gemeente verantwoordelijkheden bij een eventuele overstroming, zoals het opstellen van een rampenplan, het handhaven van de openbare orde en veiligheid en de zorg voor de volksgezondheid.

5 Wat betekent 'een dijk bezwijkt of faalt'?

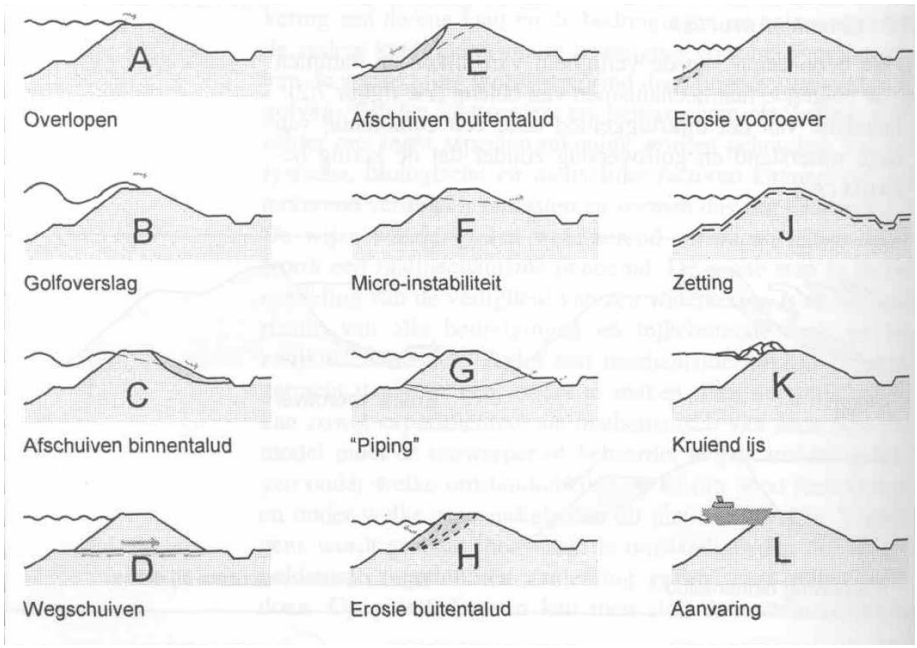
In paragraaf 5.1 worden de faal- en bezwijkmechanismen opgesomd die van belang zijn voor een dijk. Waarna gedetailleerder uiteengezet wordt hoe het mechanisme werkt, wat het gevolg of gevaar is, hoe bezwijken optreedt en wat vroeger en tegenwoordig als oplossing werd gebruikt. In de daaropvolgende paragraaf (5.2) wordt bekeken welke mechanismen bepalend zijn voor rivierdijken. En er wordt bekeken wat de mechanismen voor gevolgen hebben. Gevolgen die tot bezwijken zullen leiden. De bezwijkvormen van de dijk naar aanleiding van de bepalende mechanismen en de karakteristieke vorm van de bres wordt besproken in paragraaf 5.3. In de laatste paragraaf wordt het proces van bresgroei in het algemeen en specifiek voor zanddijken uiteen gezet.

5.1 Faal- en bezwijkmechanismen (algemeen)

Voor het onderscheid tussen een faal- en een bezwijkmechanisme is het belangrijk te weten wat deze termen inhouden.

- Een **faal**mechanisme houdt in dat als de dijk niet meer aan zijn waterkerende functie voldoet, hij gefaald heeft. Dus zodra er water in de polder komt via/langs/onder/door de dijk dan **faalt** de dijk.
- Een **bezwijk**mechanisme houdt in dat de dijk aangetast wordt of geheel verdwijnt. De dijk **bezwijkt** als hij 'verdwijnt' en dus het water door een bres vrij de polder in stroomt.

Om voor het zoeken naar een oplossing, die aan de doelstelling beantwoordt, niet te snel een te klein onderzoeksgebied af te bakenen wordt in deze paragraaf een overzicht gemaakt welke bezwijk- en faalmechanismen bekeken zullen worden om te komen tot een goede oplossing die in zoveel mogelijk verschillende gevallen gebruikt kan worden, zodat er een breed toepassingsgebied in de praktijk is. De 12 bezwijk- en faalmechanismen die in de literatuur genoemd worden zijn te vinden in figuur 7.



Figuur 7. De faalmechanismen

De verschillende mechanismen worden hieronder in het kort opgesomd en vervolgens verder besproken zodat duidelijk is wat de mechanismen inhouden.

A. Inundatie van het dijkringgebied door een combinatie van een hoge waterstand (en golfoverslag) zonder dat de kering bezwijkt
B. Erosie van het binnentalud door (de kracht van) het over de waterkering heen stromende water door een combinatie van hoge waterstand en golfoverslag

C. Instabiliteit (afschuiven) van het binnentalud, hetzij door infiltratie van het overstromende water bij een combinatie van hoge waterstand en golfoverslag, hetzij door waterdruk tegen de kering en verhoogde waterspanning in de ondergrond
D. Wegschuiven van de waterkering door waterdruk tegen de kering en verhoogde waterspanning in de ondergrond of door een gewichtsverlaging van het grondlichaam
E. Afschuiven van het buitentalud bij snelle daling van de buitenwaterstand na hoogwater of afschuiven van het buitentalud ten gevolge van verzadiging tijdens hoogwater
F. Micro-instabiliteit van het binnen- (of buiten-) talud door uittredend kwelwater door het grondlichaam. Is analoog aan faalmechanisme C, maar treedt op bij lagere waterstanden
G. Piping als gevolg van kwelstroming door de ondergrond waarbij onder en achter de dijk erosie ontstaat als grond meegevoerd wordt (zand meevoerende wellen)
H. Erosie van het buitentalud door stroming of golfbeweging
I. Bezwijken van de vooroever door vloeien of afschuiven
J. Grootschalige vervorming van het grondlichaam door zettingen of klink
K. Mechanische bedreiging van het grondlichaam door (kruiend) ijs
L. Mechanische bedreiging van een aanvaring door scheepvaart.

A. Overlopen

Het falen van een dijk is natuurlijk niet alleen van toepassing als de dijk bezwijkt en zodoende geen water keert en het achterliggende land onderloopt. Een dijk faalt in feite al als de polder die hij beschermt overstroomd, of de dijk er nu nog wel of niet staat. Dat is dus eigenlijk het geval bij het overlopen van een dijk (figuur 8). De dijk zelf bezwijkt niet maar wordt overstroomd en dus raken de achterliggende landerijen geïnundeerd. Dit kan komen doordat de waterstand hoger is dan waar de dijk voor is ontworpen en dus de waterstand boven de kruin komt te staan. Een andere mogelijkheid is, dat de dijk lager is geworden en dat daardoor de optredende waterstand hoger is dan de kruin. In het verleden zijn bij verschillende rivierdijken overstromingen geweest doordat de hoogte van de dijk niet toereikend was. Voor het zakken van de kruin van de dijk zijn verschillende oorzaken te bedenken, zoals zettingen, piping, bezwijken van een talud of afgravingen. Voor het tegenoverstelde geval van een hogere waterstand dan verwacht, zijn de mogelijke oorzaken, de globale stijging van de waterspiegel, aanpassingen in beddingen, overmatige regenval, verkeerde parameters bij oorspronkelijke berekeningen of te weinig data voor goede schatting van de ontwerpwaterstand. Het overlopen van de dijk kan ook andere mechanismen tot gevolg hebben, waardoor de dijk geheel zal bezwijken. Deze mechanismen zijn erosie en instabiliteit van het binnentalud.



Figuur 8. Een dijk die overstroomt doordat de waterstand hoger is dan de kruin van de dijk.

In de loop der jaren zijn er allerlei oplossingen bedacht zoals zandzakken, BigBags en kleikisten voor (tijdelijk) extra hoogte of moderne technieken zoals de DutchDam (figuur 9). Het gevaar bij deze oplossingen is de macro-instabiliteit van de dijk door de extra belasting van zowel het water als van de ophoging. Een andere oplossing is het bedekken van de kruin en binnentalud met een waterdichtfolie of geomembraam, dat voorkomt dat er instabiliteit of erosie van het binnentalud optreedt, waardoor de dijk zou verzwakken. Hierbij is de begaanbaarheid van de dijk groter dan bij plaatsing van een tijdelijke ophoging.



Figuur 9. Het ontwerp en werking van de DutchDam

B. Golfoverslag

Een dijk heeft een continue golfaanval te verduren. Deze golven worden opgewekt door bijvoorbeeld de wind of voorbijvarende boten. Aan zee kunnen door een storm de golven nog eens extra krachtig worden. Bij een combinatie van hoogwater en golven kan overslag optreden. Dit is natuurlijk wel op voorwaarde dat de hoogte van de kruin van de dijk, hoger is dan de optredende waterstand, maar te laag voor het keren van de golven. Bij het ontwerp van de dijk worden verschillende criteria gebruikt over de hoeveelheid water die een per seconde per strekkende meter dijk over het talud mag stromen. Deze criteria zijn onder andere afhankelijk van de opbouw van de dijk en de soort en kwaliteit van de bekleding. De precieze criteria en onderverdelingen staan in 'Leidraad Zee- en Meerdijken'.
De gevolgen van deze golfoverslag zijn onder andere aantasting van het binnentalud door erosie, verweking van het binnentalud en daardoor een minder goede bereikbaarheid van de dijk voor inspectie, onderhoud of reparatie. De gevaren voor het binnentalud kunnen zelfs zulke ernstige vormen aannemen dat de dijk bezwijkt bijvoorbeeld door vloeiing of afschuiving van het binnentalud.

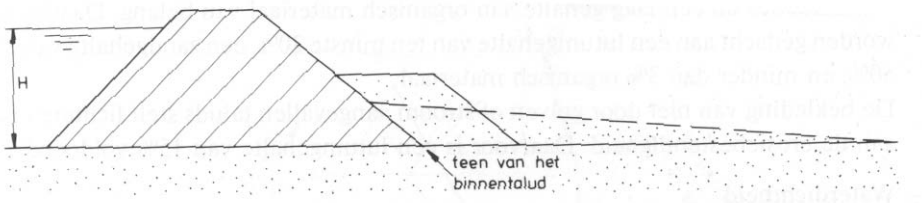
De toegepaste oplossingen voor het overslaan zijn gelijk aan de oplossingen die gebruikt worden voor het overlopen van de dijk (mechanisme A). Ook wordt ter bescherming van het binnentalud vaak drainage toegepast of het talud afgedekt of verstevigd.

C. Afschuiven binnentalud

Aan de volgende aspecten moet bij dit mechanisme aandacht geschonken worden:
- de kwaliteit van de kleibekleding en de grasmat op de kruin en het binnentalud
- de constructie van een weg op de kruin
- discontinuïteiten, zoals de overgang van het wegdek naar de grasmat, palen van afrasteringen, karrensporen, veepaden en molshopen.

Het binnentalud is het talud aan de 'landzijde' van de dijk. Deze helling kan instabiel worden door verschillende oorzaken. Als de voorgaande twee mechanismen optreden (A en B), waardoor veel water over de dijk heen komt en het water het binnentalud infiltreert, kan door de verhoogde waterstand een hogere druk ontstaan in de dijk waardoor afschuiven optreedt door de combinatie met de verweking van de grond. Ook kan door een combinatie van waterdruk tegen de dijk en een verhoogde waterspanning in de ondergrond instabiliteit optreden. In feite hoeft het afschuiven van het talud nog niet te betekenen dat de dijk bezwijkt. Pas als de afschuiving tot aan de kruin reikt en dus de hoogte van de dijk gaat verlagen, zal de dijk gaan bezwijken, mits natuurlijk de waterstand hoger is dan de verlaging van de kruin.

Oplossingen voor het voorkomen van de afschuiving van het binnentalud zijn toepassen van drainage in het binnentalud (tegen de verweking & snellere infiltratie/afvloei) of het aanbrengen van een steunberm (tegen afschuiving, figuur 10)



Figuur 10. Steunberm (korte en brede mogelijkheid)

D. Wegschuiven

Het wegschuiven van de kering heeft enkele overeenkomsten met de zojuist behandelde afschuiving (mechanisme C). De belangrijkste overeenkomst is de oorzaak. Door de waterdruk tegen de dijk en de verhoogde waterspanningen in de ondergrond, krijgt de dijk de kans in zijn geheel weg te schuiven. Dit is dan ook gelijk het grote verschil. Bij dit mechanisme (D) gaat het over het wegschuiven van de kering in zijn geheel en niet over het afschuiven van elke keer een kleiner gedeelte totdat uiteindelijk de gehele kering zal bezwijken. Het verticale (eigen) gewicht van de dijk en de opbouw van de ondergrond is uitermate belangrijk voor dit mechanisme. In augustus 2003 is bijvoorbeeld een boezemdijk bij het dorpje Wilnis afgeschoven volgens dit principe doordat het veen waaruit de dijk opgebouwd was, opgedroogd was en dus lichter was geworden. Hierdoor schoof een deel van de dijk in zijn geheel plotseling over een meter of vijftig weg (figuur 11).

Als oplossing zijn er verschillende insteken. Droogt de dijk bijvoorbeeld uit dan kan nat maken genoeg zijn alhoewel dit geen definitieve oplossing is. De meest simpele oplossing is een steunberm of ophoging storten achter of op de dijk, zodat het gewicht toeneemt, nadeel hiervan is dat er een sterkere zakking op kan treden in veengebieden. De nieuwe toplaag kan eveneens zorgen voor een reductie van de uitdroging, mits de juiste materialen hiervoor worden gebruikt. De ondergrond en opbouw van de dijk veranderen is een van de meest gecompliceerde oplossingen. Er wordt onderzoek gedaan om met een surfactant (een milieuvriendelijke zeepoplossing) het vocht in de dijk vast te houden of te herstellen.



Figuur 11. De dijkdoorbraak bij Wilnis door het wegschuiven van de dijk.

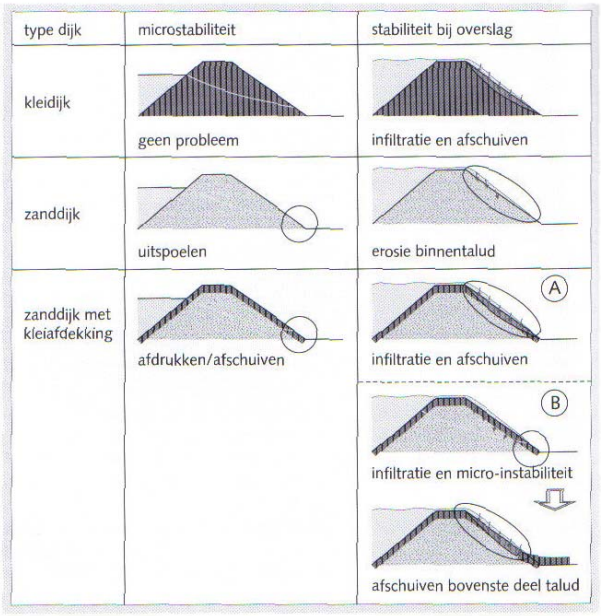
E. Afschuiven buitentalud

Het afschuiven van het binnentalud wordt voornamelijk veroorzaakt door het (snel) zakken van de waterstand, maar kan ook tijdens het hoogwater optreden. Tijdens een hoogwater raakt de dijk verzadigd met water. Als de waterstand hierna snel gaat zakken kan het water in de dijk niet snel genoeg afvloeien en zodoende wordt de waterspanning in het buitentalud te hoog en schuift deze af. Dat het talud afschuift wil nog niet zeggen dat er een overstroming plaats zal vinden van de achterliggende polder, ten eerste blijft over het algemeen een gedeelte van de kruin staan en wordt de bovenzijde van de dijk dus enkel smaller. Als dit mechanisme optreedt als het water zakt, staat het water niet meer tot aan de kruin van de dijk en zal dus ook minder gevaarlijk zijn voor het resterende gedeelte van de kering. Vindt een afschuiving plaats bij hoog water dan is er meer gevaar.

De oplossing moet gezocht worden in goede drainage of een afdekkende laag van het buitentalud die niet te ondoorlatend is waardoor de waterdruk onder de bekleding op kan lopen. Na elk hoogwater op de rivieren, zoals in 1983, 1993 en 1995, zal er op verscheidene plekken herstelwerk gedaan moet worden door kleine afschuivingen en schades aan het buitentalud. Zie bijvoorbeeld 'Water tegen de dijk; de toestand van de rivierdijken tijdens de hoge Rijnafvoer van maart 1983'.

F. Micro instabiliteit

Bij microstabiliteit treedt een vergelijkbaar effect op als bij faalmechanisme C, het afschuiven van het binnentalud. Alleen het waarom is geheel anders. Bij het afschuiven van het binnentalud bij faalmechanisme C is er sprake van een verzadigde grond door overslaand of overstromend water. Bij micro(in)stabiliteit wordt de verzadiging echter veroorzaakt vanuit het binnenste van de dijk door een hoge freatische lijn. Dit wil dus zeggen dat door de hoge waterstand aan de buitenzijde van de dijk en een lage waterstand, polderpeil, aan de binnenzijde van de dijk het grondwater in de voet van de dijk uittreedt aan de kant van het binnentalud. In 'Leidraad Zee- en Meerdijken' wordt het volgende figuur (figuur 12) gebruikt om de verschillen tussen de twee mechanismen iets meer te verduidelijken.
Het verschil van de microstabiliteit ten opzichte van de macrostabiliteit zit in het niveau waarop er gekeken wordt naar het evenwicht. Bij microstabiliteit wordt tot op korrelniveau bekeken of de spanningen niet te hoog worden, waardoor de dijk (lokaal) beschadigd kan raken.



Figuur 12. Verschillen tussen de faalmechanismen Microstabiliteit en Stabiliteit bij overslag (uit 'Leidraad Zee- en Meerdijken', 1999)

De twee optredende mechanismen van microstabiliteit zijn het opdrukken of afschuiven van het binnentalud door de waterdrukken in de kern van de dijk of het uitspoelen van gronddeeltjes uit het binnentalud door uittredend grondwater. Zoals uit figuur 12 blijkt, treedt het eerste mechanisme op als er een zanddijk is met een minder doorlatende laag van bijvoorbeeld klei en treedt het tweede mechanisme voor al op bij dijken die grotendeels van hetzelfde doorlatende materiaal gemaakt zijn, zoals zanddijken.
De gevolgen voor de dijk door deze mechanismen hoeven niet gelijk tot een gevaarlijke situatie te leiden, maar kunnen in extreme gevallen wel leiden tot falen. Het meegevoerde materiaal zal in de nabijheid worden afgezet en het mechanisme beperkt zich vaak tot de onderste zone van het binnentalud. Een afgedrukte toplaag moet eveneens gerepareerd worden, maar zal niet direct leiden tot het bezwijken van de dijk.

Voor dit mechanisme kunnen dezelfde oplossingen gebruikt worden als bij piping, maar de vraag is of dit de stroming op zal heffen. Meer effect heeft het om op plaatsen waar het verwacht wordt of eerder opgetreden is, verbeteringen aan te brengen. Hierbij kan gedacht worden aan drainage (waarbij wel opgepast moet worden geen piping te veroorzaken) of een binnendijks gelegen verzwaring. Verder kan door het aanpassen van het polderpeil de freatische lijn aangepast worden, maar dit is geen goede oplossing voor een langere periode.

G. Piping

Bij hoge buitenwaterstanden treedt een zeer bekend verschijnsel op: er ontstaan kwellen achter de dijk. Deze kwellen ontstaan doordat water zijn weg onder de dijk door vindt, naar het lager gelegen

land erachter. De aandrijvende kracht is de hoge waterstand en dus hoge waterdrukken aan de buitenzijde van de dijk. De kwellen vinden meestal hun weg door de beter doorlaatbare lagen onder de dijk, welke bij het ontwerp en aanleg niet helemaal onderzocht konden worden. De kwellen worden pas echt gevaarlijk als ze zand en materialen uit de dijk mee gaan voeren. Hierbij kan een dijk zo ondermijnd raken dat hij gaat inzakken, waardoor falen en een dijkdoorbraak op kan treden. Piping is onder andere afhankelijk van de kwelweglengte, doorlatendheid en de dikte van het watervoerend pakket. Hoe dunner dit grondpakket is, des te kleiner is het risico dat piping op zal treden.

Piping of kwel kan worden tegengegaan tijdens een hoogwater door tegendruk op te bouwen door middel van een omringing of opkuiling (figuur 13a en b). Ook kan de wel met een zanddicht geotextiel afgedekt worden en vervolgens geballast worden met puin of zandzakken. Een derde mogelijkheid, die eveneens voorkomt dat er een nieuwe 'pipe' ontstaat, is het aanleggen van een kwelberm. Preventieve oplossingen zijn het verbeteren van de niet-water-doorlatende kern of ondergrond en het vergroten van de kwellengte door bijvoorbeeld kwelschermen. Ook kan er klei ingegraven worden in het voorland voor het verlengen van de kwellengte.





Figuur 13a. Een opborrelende wel bijvoorbeeld ten gevolge van piping
Figuur 13b. Een opgekuilde wel met een karakteristieke krater door meegespoelde gronddeeltjes

H. Erosie buitentalud

Aan de buitenzijde van de dijk kan ook een bezwijkmechanisme optreden in de vorm van erosie van het buitentalud. Deze erosie treedt op als gevolg van stroming en golfbewegingen. Bij zeedijken heeft de golfaanval een grotere invloed dan bij rivierdijken, bij deze dijken is de stroming van groter belang. Bij erosie aan het buitentalud gaat het om kleinere gedeelten die aangetast worden dan bij afschuiving van het buitentalud, zoals omschreven bij mechanisme E. Bij afschuiving zal in één 'klap' een groter gedeelte van de dijk wegschuiven, waardoor als het ware een hap uit de dijk is genomen. Dit kan ook gezien worden bij erosie van het buitentalud, maar na een veel langere tijd, omdat de erosie langzaam en op bepaalde plaatsen in de dijk slijt. Als niet opgetreden wordt tegen de erosie én de eroderende werking van het water houdt langere tijd aan, dan kan het gevaar optreden dat de dijk zal bezwijken. Dit komt echter zelden voor, omdat na elk hoogwater de dijken geïnspecteerd worden. Het buitentalud kan beschermd worden door een bekleding, maar deze kan ook aangetast worden door herhaalde erosie. Daarom is het van groot belang om regelmatig de bekleding te controleren en te onderhouden. Vooral bij dijken met grasbekleding is een goede grasmat van cruciaal belang voor de weerstand tegen erosie.

Zoals al vermeld werd, zijn de oplossingen te vinden in een goede bekleding en mocht deze aangetast worden door erosie deze dan zo snel mogelijk te herstellen of af te dekken gedurende het hoogwater (figuur 14).



Figuur 14. Een aangetaste dijkbekleding

i. Bezwijken vooroever

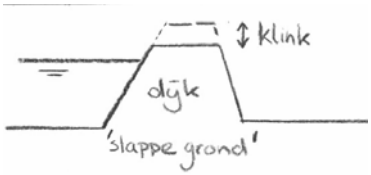
De vooroever, het gedeelte van het buitentalud onder de waterlijn (bijlage 1), kan door zettingsvloeiing bezwijken. Het bezwijken van de vooroever kan leiden tot het afschuiven van het buitentalud en vervolgens tot het bezwijken van de gehele dijk. Zettingsvloeiing is een mechanisme waarbij een met water verzadigde massa zand zeer grote verplaatsingen ondergaat als gevolge van verweking. De verzadigde massa vloeit als het ware weg. Een zettingsvloeiing is geen afschuiven. Een zettingsvloeiing ontstaat namelijk door de wateroverspanning in de grond dus door verweking, terwijl een afschuiving het gevolg is van overschrijding van de schuifweerstand van de grond. Een afschuiving kan optreden door de versteiling van het onderwatertalud door erosie, het aanbrengen van een ophoging of bovenbelasting, trillen of de wisselende golfbelastingen tijdens een (zware) storm of van een voorbijvarend schip. Een afschuiving kan weer wel een zettingsvloeiing initiëren. Sonderingen en boringen kunnen tijdens de ontwerpfase duidelijkheid scheppen over de mogelijkheden voor dit mechanisme. Fijn zand is zettingsvloeiinggevoeliger dan grover zand, omdat grover zand een betere doorlatendheid heeft waardoor minder snel een hogere wateroverspanning zal krijgen.

De erosie aan de vooroever van de dijken zal voor de volledigheid meegenomen worden als mogelijk bezwijkmechanisme voor de gehele rivierdijk, maar eigenlijk gaat er weinig gevaar van uit. De erosie kan namelijk wel leiden tot een afschuiving van het buitentalud, maar deze erosie treedt bijna niet op bij de rivierdijken door het ontbreken van een lange vooroever. Bij zeedijken wordt de vooroever regelmatig gecontroleerd, waardoor het gevaar van dit mechanisme gereduceerd en vrijwel uitgesloten kan worden. Belangrijk is wel dat als de dijk verzadigd is met water trillingen die door scheepsmotoren opgewekt worden mogelijk kunnen leiden tot verweking. Daarom is het weer vrijgeven van de scheepvaart direct na de hoogwaterpiek mogelijk gevaarlijk voor de veiligheid van de verzadigde dijken.

Vooral in de ontwerpfase kan de zettingsvloeiing voorkomen worden door grover zand te gebruiken en goed bodemonderzoek toe te passen. Mocht het mechanisme toch optreden dan moet het buitentalud gestabiliseerd worden en daarna een nieuwe vooroever geconstrueerd worden.

J. Zettingen of klink

In dit verslag zal er voornamelijk gekeken worden naar de verticale vervormingen van de dijk (figuur 15), alhoewel er ook in horizontale richting zettingen op kunnen treden. Deze zijn vooral van belang bij de dijken die opgebouwd zijn uit klei- en veen pakketten zoals in het benedenrivierengebied. De horizontale zettingen zijn vooral van belang als er gekeken wordt naar de bebouwing en leidingen in en om de dijk.
Het gevaarlijkste aan de zettingen is niet alleen de mogelijkheid die ontstaat voor het optreden van golfoverslag, maar vooral ook voor de overloop van water. Bij de berekening van de zettingen moet op een aantal punten de zetting worden berekend en de grootste daarvan toegepast worden in de berekening van de dijkhoogte. Er mag dus niet over een dijkvak een gemiddelde waarde aangenomen worden, want de dijk moet natuurlijk overal het water kunnen keren.
De opbouw en ondergrond van de dijk is van belang. Niet alleen het eigen gewicht van de gebruikte materialen, maar ook de eigenschappen met betrekking tot klink en zettingsgevoeligheid. Een dijk die opgebouwd is uit klei zal andere (algemene) zettingsverschijnselen hebben dan een zanddijk.



Figuur 15. Verticale zetting of klink

De belangrijkste oplossing voor zettingen is ophoging. Dit kan met verschillende materialen bereikt worden. Het kan tijdelijk gedaan worden door middel van bijvoorbeeld zandzakken of kleikisten, maar op de lange termijn zal toch de dijk aangevuld moeten worden met nieuwe materialen en bekleding. Als preventieve oplossing is het natuurlijk al van belang dat er in de ontwerpfase door middel van sonderingen en boringen al een goed beeld is gevormd van de samenstelling en eigenschappen van de ondergrond.

K. Kruiend ijs
In de winter kunnen de op het water drijvende ijsschotsen tegen de dijk gaan schuren en zelfs ophopen. Deze extra belasting, die hierbij uitgeoefend wordt op de dijk, levert gevaar op voor de bekleding van de dijk. Hier zal erosie plaatsvinden en deze 'gaten' moeten zo snel mogelijk na het verdwijnen van het ijs weer hersteld worden. Als namelijk andere faalmechanismen optreden, die eerder optreden door de erosie aan de bekleding, ontstaat er gevaar voor het achterliggende land, omdat deze mogelijk wel kunnen leiden tot bezwijken van de dijk. De dijk zal echter niet bezwijken door de ijsgang. Een in de dijk aanwezig kunstwerk of overgang kan wel bezwijken door de grotere belasting, tenzij bij het ontwerp rekening gehouden is met deze extra belasting.

De ophoping voorkomen van ijsschotsen tegen en op de dijk en bij een overgangsconstructie of kunstwerk is de belangrijkste oplossing bij dit mechanisme. Mocht er ondanks de voorzorgsmaatregelen toch schade ontstaan dan moet die zo snel mogelijk hersteld worden. Hierbij kunnen ook tijdelijke herstelmaatregelen toegepast worden als het waterniveau nog te hoog is.

L. Aanvaring
Een schip dat uit het roer loopt of onbestuurbaar is kan op de dijk botsen. Dit zal meestal in een buitenbocht gebeuren, maar een dijk zal altijd bestand moeten zijn tegen een dergelijke botsing. De bekleding zal zeker te lijden hebben onder deze aanval, maar gevreesd hoeft niet te worden voor de stabiliteit van de dijk. Het enige gevaar voor het bezwijken van de dijk is dat er een ander faalmechanisme optreedt omdat de schade van de aanvaring nog niet gerepareerd is. Omdat door de ontstane schade een mechanisme versnelt tot bezwijken van de dijk kan leiden.

De overgangsconstructies en kunstwerken in de dijk zijn echter wel een gevaar, ondanks dat er in de ontwerpfase rekening is gehouden met de mogelijkheid tot aanvaring. Vaak is er in de loop van tijd schaalvergroting ontstaan van de schepen en zodoende voldoet het ontwerp van de constructie misschien niet helemaal meer aan de hedendaagse eisen. Het gevaar voor het bezwijken van de dijkring ten gevolge van een aanvaring is dan ook afhankelijk van de veiligheid van de in de dijk aanwezige (overgangs)constructies.

De belangrijkste oplossing is het verstevigen van de (verouderde) kunstwerken en overgangs-constructies en het aanbrengen van remmingswerken. Schade aan de dijk moet zo snel mogelijk gerepareerd worden na een aanvaring, zodat andere mechanismen niet versneld plaats kunnen vinden en mogelijk tot bezwijken kunnen lijden.

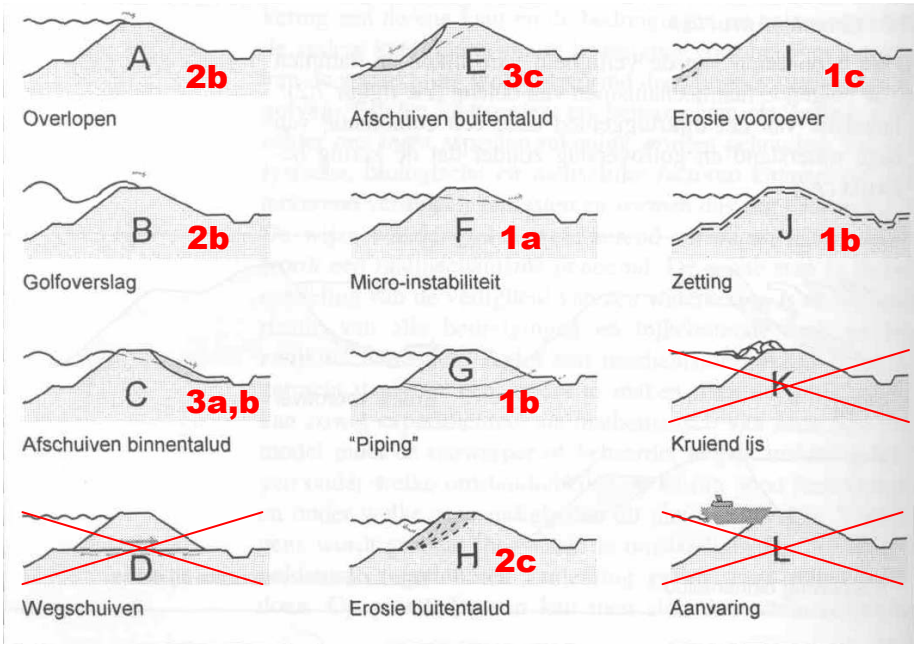
5.2 Keuze bepalende faalmechanismen
Voor de bepaling van de faalmechanismen die het meest voorkomen of het grootste gevaar opleveren, kan gekeken worden naar onder andere de literatuur over dit onderwerp, maar ook door middel van wat eenvoudige redenatie kunnen een aantal mechanismen uitgesloten worden. Dit betekent natuurlijk niet dat die mechanismen niet op kunnen treden, maar er kan van uitgegaan worden dat de dijken zo sterk ontworpen zijn dat de betreffende mechanismen niet op zullen treden of zo een klein gevolg hebben dat er geen bezwijken optreedt.

In figuur 16 is onder andere duidelijk te zien welke mechanismen afvallen om verder meegenomen te worden in het zoeken naar een (zo breed mogelijk) toepasbare oplossing. De cijfers in de figuur geven de volgorde van oorzaak en gevolg weer die bij de mechanismen onderling een rol zou kunnen spelen. In figuur 17 is beter te zien wat de versterkende effecten, ofwel oorzaak en gevolg, van de mechanismen zijn.

Niet meenemen van wegschuiven in het zoeken naar een oplossing:
Zoals in de beschrijving van de verschillende mechanismen al verduidelijkt werd, is er voor de meeste dijken geen gevaar voor wegschuiven, omdat het eigen gewicht voldoende groot is om er voor te zorgen dat de dijk niet in zijn geheel wegschuift. Er zijn echter wel uitzonderingen op deze regel in de vorm van veendijken, maar deze zijn in dit stadium niet relevant omdat deze dijken niet toegepast worden bij 'grotere' rivieren maar bij kleinere waterlopen en boezems. Het soortelijke gewicht van droog veen is namelijk bijna gelijk aan dat van water, waardoor deze geen weerstand kan bieden aan

de waterdruk. Later in dit afstuderen wordt er teruggekeken of de gevonden oplossing gebruikt kan worden voor dit mechanisme.

Niet meenemen van kruiend ijs en aanvaring:
De aanvaring door een schip op een dijk komt over alsof je met een kiezeltje een dikke ruit in wilt gooien. Het gevaar schuilt hem dan niet in het onmiddellijk doorsteken van de dijk door een schip, maar eerder in de beschadiging die hij aan kan richten als hij er tegen aan vaart. Zoiets als de ster in de ruit door het steentje, hier kan nu misschien water doorheen sijpelen of in combinatie met een hogere waterdruk breken. Omdat bij hoogwater de scheepvaart verboden is, zal een aanvaring door een schip nooit op kruinhoogte zijn, waardoor een verdere uitslijping op kan treden. Hierdoor wordt dit mechanisme dan ook minder gevaarlijk en redelijk ongevaarlijk met betrekking tot een dijkdoorbraak door middel van een bres. Een mogelijk gevaar met een schip bij hoogwater treedt op als een schip los zou breken terwijl hij afgemeerd was en daarna de dijk beschadigt.
Het kruiende ijs kan natuurlijk wel bij hoogwater optreden, hoewel dit niet helemaal te verwachten is omdat het rivierwater bestaat uit een samenstelling van smeltwater en regenwater wat dus inhoudt dat de temperatuur hoger dan het nulpunt ligt. Maar omdat dit bij de grote rivieren ook verder stroomopwaarts kan gebeuren, terwijl hier de temperaturen nog laag zijn, moet deze mogelijkheid niet als geheel onmogelijk beschouwd worden. Er wordt echter van uitgegaan dat het kruiende ijs geen grote schade aan de dijk kan veroorzaken die direct leidt tot een doorbraak, zolang er geen ongeregeldheden in de dijk zitten. Vooral kunstwerken en hun aansluiting met de dijk lopen gevaar om door het kruiende ijs beschadigd te raken of ergere schade op te lopen. Voor de dijk zal enkel de bekleding schade oplopen.



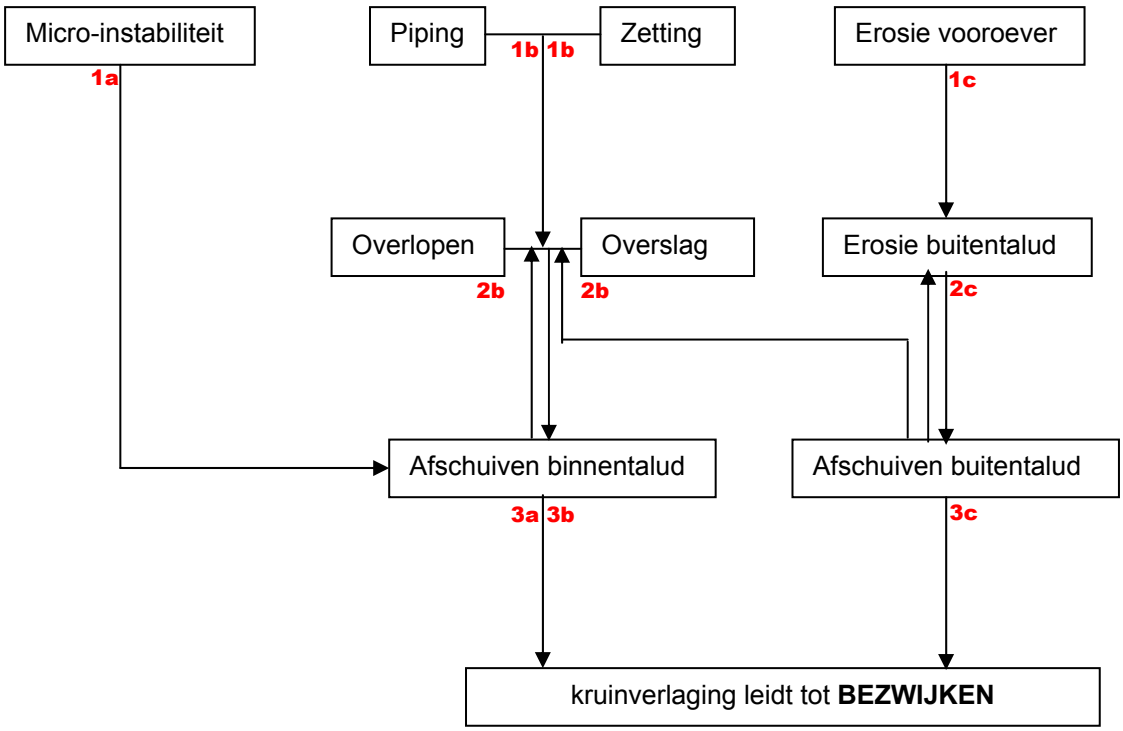
Figuur 16. Overzicht van de gekozen mechanismen en hun verbanden

Mechanismen die wel meegenomen worden
De meest voorkomende en dus belangrijkste mechanismen zijn volgens de literatuur overlopen, golfoverslag, zetting en piping. Met als gevolg dat de meest voorkomende bezwijkmechanismen afschuiven of opdrijven van het binnentalud en microinstabiliteit zijn. Soms kunnen mechanismen die optreden bij het buitentalud, zoals erosie aan en afschuiven van het talud, een inleidende rol spelen voor een sneller bezwijken van de dijk. Omdat andere mechanismen eerder of groter op kunnen treden door de veranderde dijkvorm. Het bezwijken van een dijk is natuurlijk wel afhankelijk van het verlagen van de dijkkruin. Als het buitentalud namelijk afschuift, kan het resterende gedeelte van de dijk nog bestand zijn tegen het water en niet bezwijken of falen.

Door de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen worden als belangrijkste oorzaken voor het bezwijken van een Nederlandse waterkering aangeduid:

- overlopen en overslag (mechanismen 2b in figuur 17).
- sterkte en stabiliteit (mechanismen 1a, 3a en 1c, 2c, 3c)
- betrouwbaarheid van afsluitmiddelen (kunstwerken en aansluitingen met dijklichamen).

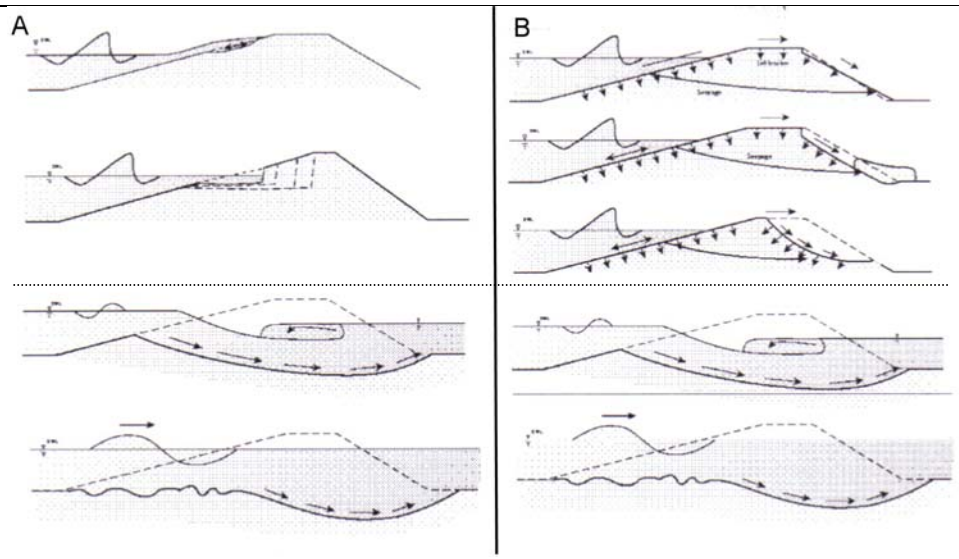
In figuur 17 zijn de belangrijkste onderlinge verbanden aangegeven om aan te tonen welke mogelijkheden er zijn om tot een dijkdoorbraak te komen. Belangrijk is om te zien dat verschillende oorzaken ook tot gevolg kunnen hebben dat andere manieren van doorbreken optreden. Afschuiving van het buitentalud kan tot gevolg hebben dat er golfoverslag plaatsvindt, wat op zijn beurt weer het afschuiven van het binnentalud kan initiëren. Dit afschuiven levert weer een verlaging van (een gedeelte) van de kruin op waardoor het water in plaats van over te slaan, zelfs over de dijkkruin gaat stromen. En dit alles leidt dan tot bezwijken van de dijk. Voor de duidelijkheid is het wel belangrijk om in de gaten te houden dat de mechanismen die nu als oorzaak aangevoerd worden op zich zelf ook **faal**mechanismen zijn. Dit wil niet perse zeggen dat de dijk bezweken is als zij optreden, maar dat de dijk bij bijvoorbeeld een hoogwater niet meer aan zijn waterkerende functie voldoet. Wat dus wel falen van zijn eigenlijke functie betekent (paragraaf 5.1).



Figuur 17. De verschillende faalmechanismen en hoe ze elkaar kunnen beïnvloeden

5.3 Karakteristieke vorm

Zoals blijkt uit voorgaande paragraaf zijn er 2 bepalende mechanismen, die leiden tot bezwijken, maar de initiële bres is uniek omdat deze door allerlei combinaties van mechanismen mogelijk is. Als er echter na enige tijd wordt gekeken naar doorgestroomde rivier- of zeedijkdoorbraken worden wel meerdere overeenkomsten gevonden (figuur 18 onder de stippellijn). Zo zal er in de bres nog een gedeelte van de dijk staan en hier over heen stroomt het water de polder in. Door de uitschurende werking verbreedt en verdiept het gat zich, tenzij er een stevigere laag onder de dijk zit of er een teenbescherming voor de dijk is.



Figuur 18. Verloop van een dijkdoorbraak volgens Oumeraci et al. (2001)
A: bezwijken door afslag buitentalud B: bezwijken door afschuiven binnentalud en overslag

In de onderzoeken die zijn gedaan naar de dijkdoorbraken wordt vaak het bresgroeiproces opgedeeld in meerdere stadia. Helaas is er nog geen eenduidig oordeel over hoeveel dat er zijn, of hoe lang deze fasen duren, maar gelukkig zijn er wel duidelijke overeenkomsten tussen veel van deze onderzoeken. De verschillen worden mede veroorzaakt door de verschillen in de opbouw van de dijklichamen in Nederland.

5.4 Bresgroei, algemeen en voor zanddijken

De grootte van een dijkdoorbraak, de snelheid waarmee een bres groter wordt en de ontwikkeling van het debiet is afhankelijk van de volgende parameters:
- de geometrie van de doorsnede van de dijk (hoogte, breedte, hellingen)
- de structuur van de dijk (materiaal, bescherming, fundering)
- het poldergebied achter de dijk (hoogteligging, grondsoort, indeling)
- de hydraulische randvoorwaarden (waterhoogtes, golven).

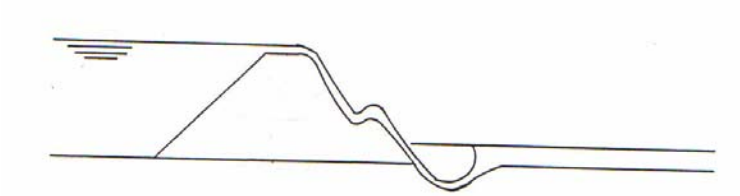
Stroming door de bres

Als het water over de dijk begint te stromen zal in eerste instantie een gedeelte nog infiltreren in de dijk, maar naarmate het erosieproces vordert zal de bres steeds meer in grootte toenemen. Als de bres blijft groeien en de bovenstroomse (rivier) waterstand neemt niet af, zal het debiet door de bres toenemen. Het water stroomt dan over het binnentalud de polder in.
In het begin is deze stroming over het binnentalud superkritisch en zal aan de teen van de dijk door het ontstaan van een ontgrondingskuil overgaan in subkritische stroming. Bij de overgang van de super- naar subkritische stroming ontstaat een watersprong.
Na verloop van tijd zal de polder zover met water gevuld zijn, dat de waterstand in de polder de instroom door de bres gaat beïnvloeden. Dit kan door het stijgen van het waterpeil in polder, maar ook door de daling van de bodem van de bres. De stroming gaat nu over een onvolkomen overlaat en de watersprong zal verdwijnen.

Het verloop van de boven- en benedenstroomse waterstanden en de waterstand in de polder is van groot belang voor het totale proces. Onderstaande voorbeelden geven een beeld hiervan:
- bij een doorbraak van een rivierdijk kan het waterpeil in de rivier ten gevolge van het debiet door de bres dalen. Hierdoor wordt ook weer de snelheid van het water dat door de bres stroomt lager en dus de erosiecapaciteit.
- bij een doorbraak van een dijk waarachter een kleine polder ligt, zal de waterstand in de polder snel stijgen. Het waterstandsverschil neemt dan af en dus ook de snelheid van het, door de bres, stromende water. Het stroomgat zal ook beperkter van grootte zijn.

Diepte van de bres

Het water stroomt door een initiële bres over de kruin, daarna stroomt het over het talud en neemt sediment mee. Er ontstaat een geul. Het water stroomt naar beneden en ondergaat daarbij een versnelling. De transportcapaciteit van het water neemt toe met de snelheid van de stroming. Aan de teen van de dijk kan dus meer getransporteerd worden dan hoger op het talud van de dijk. Het talud zal hierdoor steiler worden. De geul zal zich verder in het talud slijpen en de zijkanten van de geul blijven zeer steil. Vaak zal er een trapvormig profiel ontstaan op het talud, omdat er mengselsprongen optreden tijdens het erosieproces, omdat de dijk uit verschillende materialen is opgebouwd en dus niet overal even snel zal eroderen (figuur 19).



Figuur 19. Schematische voorstelling van het trapvormig profiel en de ontgrondingskuil

Als het talud zover is teruggeschreden dat het bovenstroomse talud is bereikt dan daalt de kruin en neemt de overstromende hoogte en daarmee het instromende debiet toe. De kruin daalt snel ter plaats van de bres. Het erosieproces gaat door op het bovenstroomse, rivierzijde, talud van de ontgrondingskuil.

De ontgrondingskuil

De stroming over het binnentalud komt onder een hoek in op de ondergrond ter plaatse van de teen van de dijk. Hierdoor oefent de stroming een kracht uit op de bodem ter plaatse van de teen. Deze kracht zorgt voor erosie. Als er een watersprong tegen de dijk ontstaat, veroorzaakt de inkomende superkritische stroming grote turbulentie aan de teen. Deze turbulentie wervelt sediment van de ondergrond op en de stroming neemt het sediment mee. Niet ver, want door de driedimensionale uitstroming neemt de snelheid van de stroming snel af en zal het sediment snel bezinken. Hierdoor ontstaat dan ook aanzanding rond de ontgrondingskuil.
Als er een sloot aan de binnenzijde van de dijk is aan de teen van de dijk, dan kan door de daar aanwezige vegetatie en afvoer van water het begin van de ontgrondingskuil tijdelijk worden uitgesteld of vertraagd. Maar als deze sloot minder goed onderhouden is of een slechte vegetatie heeft en de hoeveelheid water dat over de dijk stroomt groot genoeg is, zal deze een grotere initiële ontgrondingskuil veroorzaken.

Doordat de benedenstroomse waterstand stijgt, zal het instromende water steeds meer geremd worden en neemt de turbulentie aan de teen van de dijk af en wordt er minder sediment opgeworpen. Hierdoor neemt de erosie van de kuil af. Bij een dieper wordende ontgrondingskuil wordt het ook moeilijker voor de uitstromende, subkritische, stroming om het sediment te transporteren.
Wordt de overlaat steeds meer onvolkomen dan zal ook de stroming meer en meer horizontaal worden. Hierdoor zal de stroming over de kuil heengaan en ontstaat er een neer in de kuil met eventueel aanzanding tot gevolg.

De breedte van de bres

Het erosieproces begint ter plaatse van de initiële bres en breidt zich daarna uit in twee richtingen. Hierdoor is de bres in het midden het verst gevorderd en dit veroorzaakt een ronde overlaatvorm die verschillende vormen aan kan nemen. Afhankelijk van de snelheden van eroderen in de breedte en in de bovenstroomse richting krijgt de bres eclips of ovale vorm.

Het erosieproces in de breedte richting is een discontinu proces. Dit wil zeggen dat niet in een constant tempo de taluds terugwijken, want de stroming, die langs het zijtalud loopt, neemt zand op waardoor het talud steiler wordt totdat deze instabiel wordt en afschuift. Het afgeschoven gedeelte komt aan de voet van het talud terecht en wordt eerst door de stroming afgevoerd, waarna het proces opnieuw begint. Vooral in het eerste begin treedt lange tijd geen instorting op, dit is waarschijnlijk te

verklaren doordat het talud eerst nog steiler zal worden voor het instabiel wordt en de verplaatsing van het aangrijpingspunt van de stroming.

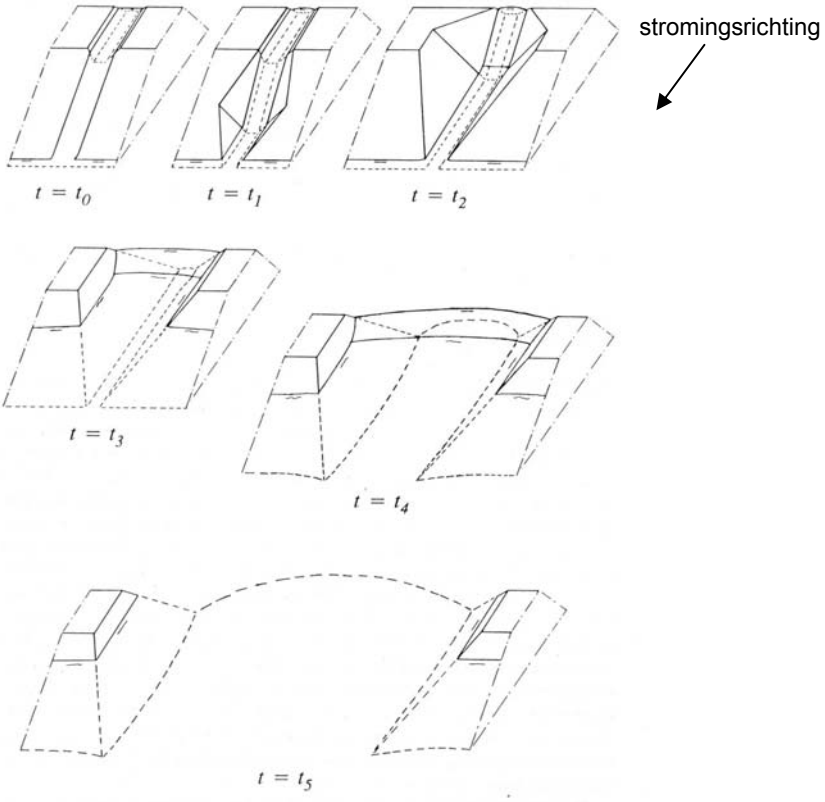
Bij de andere (stroom)richting van het erosieproces verplaatst de kruin zich snel in bovenstroomse richting tijdens het begin van het proces. Dit wil zeggen in de richting van het dijklichaam. Hiermee verandert ook de positie van de stroming langs het zijtalud. De insnijding van het zijtalud verplaatst zich meer en meer in bovenstroomse richting. Het gevolg is dat de bres in het begin aan de benedenstroomse (polder-)kant het breedst is en later, als de kruin gedaald is, aan de bovenstroomse kant.

Bresgroei bij zanddijken

Voor zanddijken kan het onderzoek van Visser (1998) als basis voor de stadia van bezwijken gebruikt worden. Aan de hand van deze stadia kan dan bij de case-situatie een tijdraam opgesteld worden wanneer het nog zin heeft om het gat proberen te dichten en wanneer er beter gewacht kan worden tot het einde van het dijkdoorbraakproces. In het proces van een zanddijkdoorbraak die begint door een bres aan de kruin van de dijk en daarna door erosie van het binnentalud bezwijkt, wordt onderscheid gemaakt in 5 verschillende stadia. Hieronder volgt een korte uiteenzetting van de karakteristieken van de stadia (figuur 20).

- Stadium 1 begint op tijdstip t_0, dit is het moment waarop de helling aan de binnenzijde van de dijk erodeert door overslaand of overstromend water en dus steiler wordt. De helling krijgt een kritieke waarde die bepalend is voor een zandhelling. Dit stadium eindigt op tijdstip t_1, als deze kritieke hellingshoek bereikt wordt.
- Zoals de term kritieke waarde al aangeeft, 'deinst de helling terug' met deze waarde als deze overschreden wordt. Dit is dus het begin van het tweede stadium dat duurt van t_1 tot t_2. Dit wil zeggen dat de dijk alsmaar dunner en dunner wordt, omdat het binnentalud zich in zijn geheel in de richting van de rivier verplaatst. Op tijdstip t_2 verdwijnt het dijklichaam en neemt de doorstroom door het gat toe.
- In het derde stadium treedt er een verlaging van de top van de dijk op door erosie van de zijhellingen van het gat met een constante hoek. Deze hellingshoek is de kritieke waarde voor de helling van de zijkanten van het ontstane stroomgat. Stadium 3 eindigt op t_3 als de breuk geheel uitgespoeld is tot aan de basis van de dijk op polderniveau.
- In stadium 4 is de stroming door de opening kritisch. De opening groeit in de breedte met helling met de kritieke waarde. De verticale groei van het gat wordt bepaald door de ondergrond van de dijk. Op tijdstip t_4, dit is wanneer de stroming verandert van kritisch naar subkritisch, eindigt stadium 4. Door middel van de waarde van het Froude getal wordt bepaald wanneer t_4 optreedt. Bij kritische stroming geldt Fr=1, voor subkritische stroming geldt Fr<1, waarbij geldt $Fr = u / (g \cdot d)^{1/2}$.
- In het vijfde stadium blijft het gat in de breedte toenemen, dankzij de subkritische stroming. Op t_5 stopt de erosie van de bres, omdat de stroomsnelheden te klein worden. De helling van de zijkanten van de bres is nog steeds gelijk aan de kritieke waarde. Op t_6 stopt de stroming door het gat omdat aan beide zijden een gelijke waterstand heerst.

De belangrijkste gevolgtrekking is dan ook dat in stadia 1,2 en 3 het initiële gat zichzelf verder in de dijk slijpt. In stadia 4 en 5 stroomt de grootste hoeveelheid water door de ontstane bres heen.



Figuur 20. De stadia van een zanddijkdoorbraak volgens Visser (1998).

De hoeveelheid water die door de bres stroomt is van belang voor de snelheid waarmee de polder achter de dijk volstroomt. Het zogenaamde inundatiedebiet wordt bepaald door de afmetingen van de bres en de waterstanden aan weerszijden van het gat. Als overlaat kan de rand van de ontgrondingskuil aangehouden worden. De overlaatdrempel ligt op de hoogte van de oorspronkelijke bodem. De diepte van de ontgrondingskuil is daardoor niet van belang. De breedte van de overlaat komt overeen met de lengte van de rand van de ontgrondingskuil. Deze rand heeft de lengte van een halve cirkelboog met als diameter de breedte van de bres in de doorgebroken waterkering (figuur 21). Dit komt overeen met een Type B doorbraak zoals onderscheiden wordt in het onderzoek van Visser (1998). Het debiet door de bres kan worden berekend met behulp van de overlaat formules voor volkomen en onvolkomen overlaten. Een onvolkomen overlaat houdt in dat de benedenstroomse waterstand, dus aan de polderzijde, invloed heeft op het debiet. Bij een volkomen overlaat ondervindt de stroming door de bres hier geen hinder van en 'schiet' het water door de opening.

Volkomen overlaat ($H_p < {}^2/_3\ H_r$)

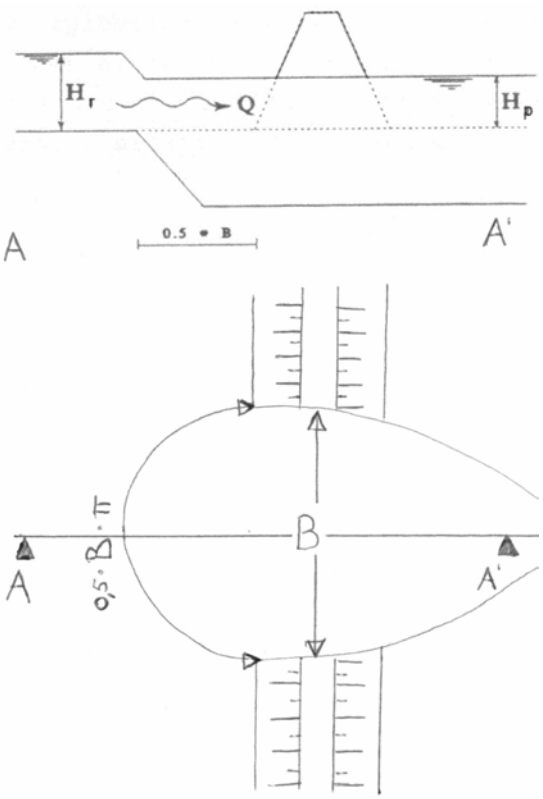
$$Q = \frac{2}{3}\left(\frac{1}{2}\pi B\right) H_r^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{2}{3}g}$$

Onvolkomen overlaat ($H_p > {}^2/_3\ H_r$)

$$Q = \left(\frac{1}{2}\pi B\right) H_p \sqrt{2g\left(H_r - H_p\right)}$$

waarbij

Q	[m^3/s]	inundatiedebiet
B	[m]	breedte van de bres
H_r	[m]	waterhoogte van de rivier
H_p	[m]	waterhoogte in de polder
g	[m/s^2]	zwaartekracht (= 9,81 m/s^2)



Figuur 21. Debiet en overlaat ter plaatse van de middendoorsnede van de ontgrondingskuil

Er moet bij deze benadering wel rekening gehouden worden met de breedte van de rivier. De straal van de cirkelvormige ontgrondingskuil kan namelijk niet breder worden dan de rivier breed is. Anders zou de ontgrondingskuil ook de dijk aan de andere zijde wegschuren. Dus als de breedte van de bres te groot wordt moet in de hierboven genoemde formules de term $\frac{1}{2}\pi$ weggelaten worden, omdat dan de breedte B bepalend is voor de lengte van de rand van de ontgrondingskuil.

Voor de diepte en grootte van de ontgrondingskuil wordt gerekend met de empirische benadering $B_s = 7 \cdot H_k$. Waarbij B_s voor de breedte van het stroomgat staat en H_k voor de diepte van de ontgrondingskuil. Er worden ook verhoudingswaarden van 10 gevonden, maar daar is dan sprake geweest van een snellere breedteontwikkeling door verhinderde diepteontwikkeling door een stevigere laag in de ondergrond of een teenbescherming.

6 Algemene oplossingmethoden

In dit hoofdstuk zullen verschillende oplossingsmethoden opgesomd worden voor de sluiting van een doorbraak en hoe deze getransporteerd moeten worden naar de plaats van het gat. Eerst wordt een overzicht gegeven van de verschillende oplossingen (paragraaf 6.1), waarna deze in de daaropvolgende paragraaf besproken worden. In paragraaf 6.3 wordt bekeken met welke transportmogelijkheden dit bereikt kan worden.

6.1 Oplossingen voor sluiting en transport

Om alle oplossingsmethoden overzichtelijk te kunnen vergelijken zal er in eerste instantie geen onderverdeling komen naar het soort materiaal zoals grind of zand, maar naar de sluitingsmethoden en vormen. Zo kan een grote zak bijvoorbeeld gevuld worden met zand, steen of grind. Ook zijn hier nog varianten op te verzinnen met materialen die in de buurt van een doorbraak in ruime mate beschikbaar zijn, bijvoorbeeld (zwaar) afval. Er wordt vanuit gegaan dat alle alternatieven technisch mogelijk zijn.

Als grondstoffen voor de verschillende oplossingen kan gedacht worden aan de volgende stoffen:
- zand
- klei
- beton
- water
- folie
- polymeren
- grind
- steen
- afval
- staal
- hout

Deze kunnen in verschillende vormen (en met een verschillende 'inhoud') worden onderverdeeld:
- worsten (zand, water)
- zakken (zand, grind, klei, steen, afval, polymeren)
- blokken (beton, steen)
- gabions (beton, steen, grind)
- caissons (beton, staal, hout)
- schepen (staal, hout)
- damwanden (beton, staal, hout)
- palen (beton, staal, hout)
- opklapbare delen (beton, staal, hout)
- matten of lappen (folie, hout)
- losse materialen (zand, klei, grind)

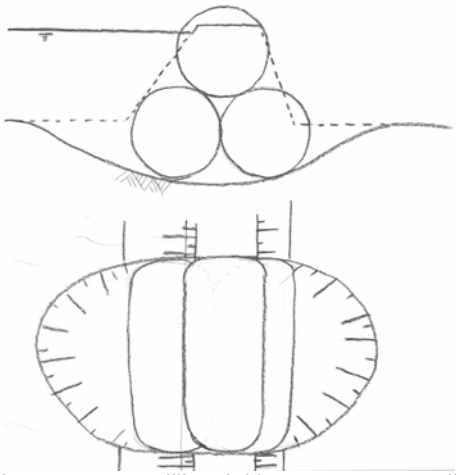
De verschillende sluitingsoplossingen moeten natuurlijk ook nog in het gat geplaatst kunnen worden. Dit kan natuurlijk op verschillende manieren voor elke oplossing, maar voor een algemene toepassing wordt gedacht aan de volgende hulpmiddelen:
- kabelbaan
- hijskraan
- helikopter
- persleiding
- mensen
- vrachtwagen
- shovel
- transportband
- dumpschip
- ponton

6.2 De sluitingsmogelijkheden

worsten (zand, water)

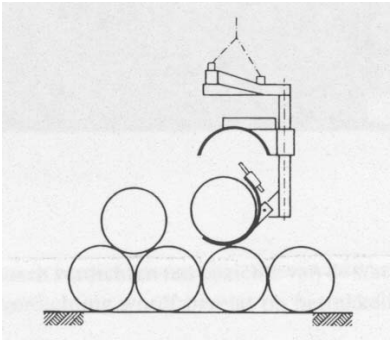
De eerste mogelijkheid die wordt besproken als middel om de stroming te blokkeren zijn worstvormige omhulsels die gevuld met een zwaarder materiaal bijvoorbeeld zand of water (bijlage 6). De worsten moeten gevuld worden met een zwaarder materiaal of heel stevig verankerd worden, omdat ze op zouden drijven. In sommige balgstuwen wordt er bijvoorbeeld gebruik gemaakt van lucht, maar deze stuwen zijn dan ook permanent verankerd in de grond en gefundeerd op sterke palen. Voor een enkele worst geldt dat hij kan gaan rollen, maar ook als er meerdere worsten op elkaar gebruikt worden kan de stapeling instabiel worden. Hoe ver de worsten gevuld moeten worden is van belang

voor het hoogteverlies en de flexibiliteit. Het hoogteverlies bij zandworsten is al gauw 20% bij een vullingsgraad van 90%, wat als zeer goed aangemerkt wordt. Dit hoogteverlies wordt alleen maar groter als de worst slechter gevuld wordt. Haaks op het zo goed mogelijk vullen van de worsten staat de eis dat de worsten de bodem moeten volgen om er voor te zorgen dat er geen water tussen de worsten en de bodem door zal gaan. Om de worst flexibeler te maken moet deze echter minder goed gevuld worden. Wat dus meer hoogteverlies inhoudt. Waarschijnlijk zal door de zandige ondergrond onder de worst door een stroming ontstaan te vergelijken met piping, waardoor er als er geen maatregelen worden genomen water de polder in zal sijpelen en na langere tijd zelfs stromen. De afsluitende worst moet waterdicht zijn om als waterkering te dienen, waardoor al het water van het vulmengsel via de uitstroomtuit de worst zal moeten verlaten (bijlage 6). De afmetingen van de worsten kan oplopen tot een lengte van 60 meter en een hoogte van 6 meter. Er zijn ook andere afmetingen mogelijk. In figuur 22 is een schematische stapeling te zien van een drietal zandworsten om een bres af te sluiten. Er moet opgemerkt worden dat in de praktijk de zandworsten minder rond zijn door de lagere vullingsgraad zoals hierboven besproken werd.



Figuur 22. Voorbeeld van een mogelijke sluiting met een stapeling van zandworsten

Belangrijk bij deze grote afmetingen is wel dat er voldoende bescherming is, omdat als er een gaatje ontstaat in het doek, deze makkelijker kan leiden tot bezwijken van de waterkering dan bij een stapeling van meerdere kleinere worsten. Voor de uitstroming van zand uit kleinere gaten te voorkomen kunnen eventueel andere vullingen toegevoegd worden zoals cement. Vooral op de naden kunnen gaten ontstaan als deze genaaid zijn. Een oplossing hiervoor is het lassen van de naden, maar dit is duurder en ingewikkelder. Als de zandworsten vaker ingezet moeten worden, moeten de folies die gebruikt worden als omhulsel van de worst beschermd worden tegen de invloeden van het weer en UV-straling, als hij opgeslagen wordt of niet gebruikt wordt.



Figuur 23. Plaatsing van de zandworsten in een stapeling (bron: 'CUR152')

Voor het vullen en transport van een grote zandworst is speciaal materiaal nodig om er zeker van te zijn dat een hoge vullingsgraad wordt behaald en de worst zonder te scheuren op de juiste plaats in de bres wordt geplaatst (figuur 23).

zakken (zand, grind, klei, steen, afval, polymeren)
Er zijn verschillende soorten van zakken die gebruikt kunnen worden voor de sluiting van de bres. Als eerste de standaard zandzakken, zoals we die allemaal kennen van foto's en tv beelden bij hoogwater en daarnaast de BigBags die ook recentelijk te zien waren bij de versteviging van de dijk bij Stein. Ook zijn er nog verschillende tussenvormen mogelijk, zowel in grootte als in vulmateriaal. Belangrijkste hierbij is dat de zakken sterk genoeg zijn om het materiaal vast te houden. Bij het vullen met afval moet er bijvoorbeeld opgelet worden dat er scherpe punten de zak niet kunnen beschadigen.



Figuur 24. Bigbags die gebruikt werden bij Heerlen in 1995.

Om ervoor te zorgen dat de enkele zakken stabiel blijven liggen en niet wegspoelen moeten er een aantal berekeningen uitgevoerd worden. De onderlinge stabiliteit van de stapeling moet echter ook in de gaten gehouden worden. Bij het stapelen van de BigBags kan wel goed het bodemprofiel gevolgd worden door de flexibiliteit van de zakken in combinatie met de vervormingen die ze kunnen ondergaan (figuur 24). De stapeling is echter niet waterdicht. Er zal dus door middel van een folie of hoeveelheden klei getracht moeten worden de waterdichtheid van de kering te verkrijgen. Bij het gebruik van een folie kan gelijk het gevaar van piping worden aangepakt.

blokken (beton, steen)
De blokken die gebruikt worden voor een sluiting kunnen gemaakt worden van beton of van steen. In Nederland zal waarschijnlijk vanwege de beschikbaarheid gekozen worden voor beton. Omdat deze blokken van te voren gemaakt worden, zullen zij ergens opgeslagen moeten worden. Omdat de blokken niet precies geplaatst kunnen worden in de bres door de oneffen bodem en de sterke stroming, is het erg moeilijk om een waterdichte stapeling te maken (figuur 25).



Figuur 25. Stapeling van blokken in een bres.

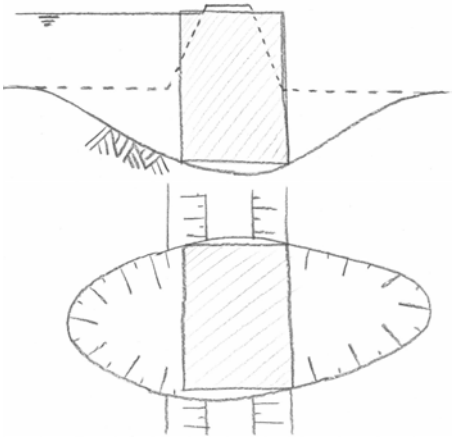
Door middel van een folie of los materiaal (bijvoorbeeld klei) moet geprobeerd worden de waterdichtheid van de waterkering te verkrijgen. Ook kunnen deze gebruikt worden om de optredende piping op te vangen. De aansluiting met de zijkanten van de bres, de 'koppen' van de dijk, is ook moeilijk door de vorm van de blokken. In de gaten, die tussen de bodem of zijkanten van de bres en de blokken ontstaan, zullen grote stroomsnelheden zich ontwikkelen, waardoor er uitspoeling optreedt. Dit kan leiden tot instabiliteit van de stapeling, maar door de los gestorte stapeling zal deze telkens een nieuwe stabiele vorm aannemen.

gabions (beton, steen, grind)
Gabions zijn stalen draadframes met daarin zwaardere vulmaterialen (figuur 26). De grootte van de ruiten in de frames zijn afhankelijk van de grootte van de vulmaterialen. Meestal worden daar stenen en grind voor gebruikt.


Figuur 26. Het in-situ maken van gabions op het droge.

Als het stroomgat een mooi vierkant was geweest, waarin de gabions gestapeld konden worden, waren ze een goede optie geweest, omdat er dan later alleen nog maar een manier gevonden hoefde te worden om de gaten te dichten, terwijl de kern van de kering sterk zou zijn. Maar omdat de aansluitingen met de bodem en de zijkanten van de bres veel grilliger zijn, is hier geen sprake van. De gabions kunnen hierdoor niet meer stabiel gestapeld worden. De uitschuring door de gaten van de gabion was geen probleem geweest, omdat deze gevuld is met stevige vulmaterialen, maar de uitschuring onder de gabionstapeling kan wel leiden tot instabiliteit. De duurzaamheid van de stalen frames is natuurlijk gewaarborgd gedurende de sluiting van de bres, maar na een langere tijd zullen deze oxideren en bezwijken als er een dijk om en overheen is gebouwd. Dit zou misschien kunnen leiden tot verzwakking van de dijk, hoewel de stenen goed ingepakt zijn door de omliggende grond van de dijk. De gabions leiden waarschijnlijk wel tot de vorming van een kwelweg. Verder is het de vraag of er genoeg gabions beschikbaar zijn om in het stroomgat te plaatsen.

caissons (beton, staal, hout)
Caissons kunnen van verschillende materialen en afmetingen gemaakt worden en zowel prefab als in-situ gemaakt worden. Hierdoor lijken de mogelijkheden onbeperkt en lijken caissons de beste mogelijkheid voor de sluiting van het stroomgat. Maar niets is minder waar, er blijken vele nadelen aan deze manier van sluiten te kleven. Als de ondergrond niet vlak is, sluiten de caissons niet goed aan op de ondergrond en op elkaar. Hierbij kan de stabiliteit van de caisson ook in het geding komen, onder andere als er uitschuring optreedt (figuur 27).


Figuur 27. Plaatsing van een caisson.

Een vlakke ondergrond kan wel bereikt worden voor de caissons door het toepassen van matten, maar onder deze matten zal ook erosie en stroomgaten optreden. Voor het construeren ter plekke moet wel ruimte zijn en ook de mogelijkheid om de caissons naar de plaats van doorbraak te transporteren (figuur 28).



Figuur 28. De sluiting van de Brouwersdam door middel van caissons

schepen (staal, hout)

Een andere vorm van een prefab vorm die in de dijkbres gestort kan worden, zijn schepen. Bij een aantal doorbraken van de watersnoodramp van 1953 zijn schepen ingezet om de ontstane gaten te dichten. Omdat in Nederland veel schepen beschikbaar zijn, wordt vaak gekeken of bij een doorbraak weer van deze vaartuigen gebruik gemaakt kan worden. De sluitingen van de doorbraken in Zeeland vonden echter plaats onder uitzonderlijke omstandigheden. Zo bestond bijvoorbeeld de bodem van de bres uit klei en deze zorgde voor een nagenoeg vlakke bodem waarop de schepen aan de grond gezet konden worden. Nog steeds wordt er vanuit gegaan dat er ook veel geluk in plaats van wijsheid meegespeeld heeft bij deze vorm van sluiten. Mochten er schepen ingezet worden dan zal in ieder geval gezocht moeten worden naar oplossingen voor de optredende kwel en stroming door de overgebleven openingen. De stroomsnelheden in deze openingen kunnen hoog op lopen waardoor het storten van losse grond, zoals klei of zand niet voldoende zijn.

damwanden (staal, beton, hout)

Damwanden kunnen van verschillende materialen gemaakt worden, maar in het geval van een sluiting kan het beste gekozen worden voor staal of beton in plaats van hout. De sterkte en stevigheid van staal en beton is veel beter te controleren tijdens het fabricageproces. Verder zijn er veel mogelijke soorten en maten dankzij de verschillende manieren van bouwen waar ze voor ingezet worden. Doordat de stalen damwanden vaak hergebruikt worden zijn er ook veel in voorraad (figuur 29).



Figuur 29. Opslag van damwanden

Het grootste voordeel van de damwanden is de aansluiting met de ondergrond. Of eigenlijk het waterdicht zijn doordat ze in de ondergrond staan en dus piping voorkomen. De vorm van de bres is niet van zo heel groot belang, mits de damwanden de waterdiepte en dus de waterdruk aankunnen.

palen (beton, staal, hout)

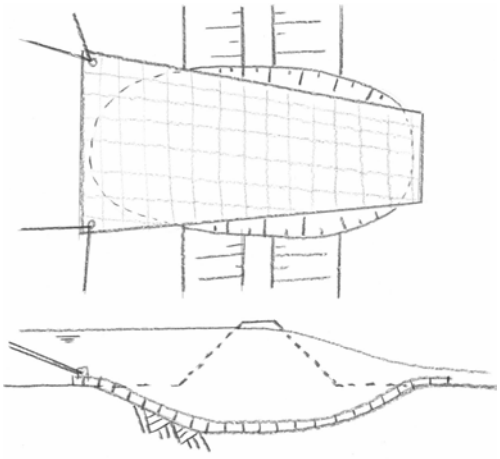
Niet alleen damwanden kunnen gebruikt worden als sluiting, maar ook palenrijen. Het gaat hierbij niet alleen om massieve betonnen en houten palen, maar ook bijvoorbeeld om stalen holle buispalen. De palen zijn natuurlijk stijver en steviger dan de damwanden, maar sluiten helaas minder goed aan op elkaar en veroorzaken meer krachten en trillingen bij het inheien. Voor de onderlinge aansluitingen kan bekeken worden of damwanden gebruikt kunnen worden, waardoor een combiwand ontstaat (figuur 30).



Figuur 30. Een combiwand.

opklapbare constructies (beton, staal, hout)
Tegenwoordig worden door middel van nieuwe technieken zoals de DutchDam (figuur 9) opklapbare constructies ontwikkeld. Als deze constructies na de doorbraak in het gat geïnstalleerd kunnen worden en dan opgeklapt kunnen worden, kunnen ze dienst doen als sluiting van de bres. Voor de sluiting van het stroomgat moeten er wel genoeg voorradig zijn. Het eerste probleem is de stabiliteit van de ondergrond. Als de bodem van de bres niet mooi glad en verweekt is, zal de bodemplaat van het opklapbaar mechanisme moeite hebben om stabiel te blijven. Door de oneffenheden ontstaat ook een aansluitingsprobleem tussen de delen onderling. Ook de aansluiting met de zijkanten is moeilijk. Verder is het vervangen van een deel dat al geplaatst is, maar dat niet overeind wil komen, erg lastig. Er wordt wel vanuit gegaan dat de opklapbare constructies de optredende stroomsnelheden aan kunnen. Een voordeel van de opklapbare delen is dat ze tot verschillende hoogtes kunnen komen en dus variabel zijn in hun inzet bij andere doorbraken.

matten of lappen (folie, hout)
Door matten te stapelen kan ook een sluiting van een stroomgat bereikt worden. Tevens kunnen zij dienen als stabiele ondergrond voor de andere sluitingsmogelijkheden mits ze flexibel genoeg zijn om de oneffenheden in de ondergrond op te vangen. Matten worden gemaakt in verschillende afmetingen. Belangrijk is dat ze waterdicht zijn, omdat er anders stroming ontstaat door de matten. Meestal vindt er extra erosie plaats aan het einde van de mat en het is dan ook van belang dat de mat ver genoeg uitstrekt. Het nadeel van het leggen van de matten is de manier waarop ze aaneengesloten op de ondergrond moeten komen te liggen terwijl er een sterke stroming door het stroomgat staat. Om er voor te zorgen dat de matten niet wegspoelt door de sterke stroming kan het verankerd worden met rijshout of in driehoek vorm (met de punt door de bres heen) in het gat geplaatst worden (figuur 31). Om de matten op de grond te houden en niet gaan 'zweven' in de stroming kan er gekozen worden voor een mat van zwaar materiaal. Grootste nadeel van deze methode is het verslepen en drijvend transporteren. Er kan ook gekozen worden om de matten na het in een bres varen te verzwaren met andere materialen, zoals stortsteen of een caisson. Bij grote doorbraken zal er tevens gekeken moeten worden naar de aansluiting van twee naast elkaar gelegen matten.



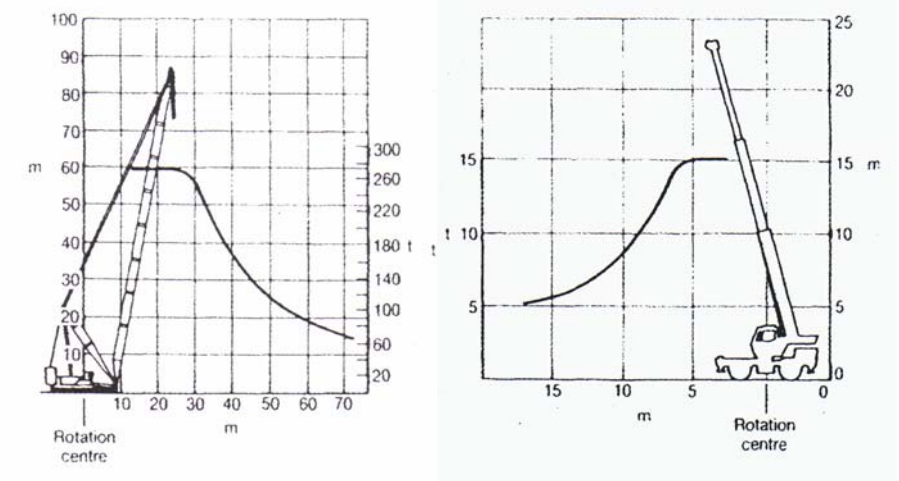
Figuur 31. Een mat die in een bres wordt aangebracht (verzwaring niet getekend)

losse materialen (zand, klei, grind)
Bij stroomsnelheden boven de 2 m/s heeft het geen zin om met losse materialen te werken, omdat deze gelijk door het water afgevoerd worden. De losse materialen kunnen op verschillende manieren in de doorbraak aangebracht worden. De makkelijkste manier is het in het gat storten van een lading door een schip of door middel van een pijpleiding. Dit kan met grote hoeveelheden gebeuren en vereist geen grote precisie. Als er met een grotere precisie een sluiting van een doorbraak nodig is, kan door middel van een pijpleiding tot net boven de bodem van de bres gestort worden. Vanaf de koppen van de doorbraak kan mogelijk ook een horizontale sluiting bewerkstelligd worden, maar dit is afhankelijk van de sterkte van de verweekte grond van de dijken.

6.3 De transportmogelijkheden

kabelbaan
Met de kabelbaan kunnen de zakken of blokken in het stroomgat gegooid worden. Voor de kabelbaan is in ruimtelijke zin onder andere nodig: een opslag voor de te vervoeren materialen, een optilplaats voor het hefmechanisme, meerdere plaatsen waar de pilaren moeten staan en een keerpunt. De pilaren kunnen op drijvende pontons gezet worden die daarna afgezonken worden als fundering. Nadeel is dat de kabelbaan daardoor niet precies boven het stroomgat langsloopt. De pilaren op de kruin van de dijk installeren is geen mogelijkheid, omdat de dijk meestal al verweekt is en er al kleikisten op staan voor extra hoogte. Omdat de opslagplaats en dus de plaats waar de materialen opgetild worden op redelijke afstand liggen, wordt de kabelbaan ook nog eens erg lang. De optilplaats en het hefmechanisme moeten het hoge tempo aankunnen, om in ieder geval voordat de polder helemaal onder water staat de bres te sluiten. De tijd die nodig is om dit systeem operationeel te krijgen is ook erg groot in vergelijking met de andere systemen.

hijskraan
Met de hijskraan kunnen verschillende sluitingsalternatieven in het stroomgat neergezet worden, bijvoorbeeld de zakken, worsten, blokken, gabions, opklapbare constructies. Ook kunnen de damwanden en palen geheid worden door kranen vanaf een ponton. De kranen kunnen niet vanaf de kopeinden van de dijk gebruikt worden, omdat deze verweekt is en al volstaat met kleikisten. In figuur 32 is te zien van zowel een grote kraan als van een kleinere mobiele kraan hoe ver hij met een bepaald gewicht kan reiken. Soms kan de kraan nog meer heffen door zijn last onder water te houden tijdens het tillen.



Figuur 32. De capaciteit van een grote (links) en een kleine (rechts) mobiele kraan.

Een voordeel is dat dit soort kranen ruim voorradig is omdat ze door elk bouwbedrijf gebruikt worden en ook snel ter plekke kunnen zijn door de mobiliteit. Om met deze kranen op en bij de dijk, aan de andere kant van de rivier, te komen zijn wel rijplaten nodig.

helikopter
Met een helikopter kunnen bijna alle sluitingsmethode vervoerd worden naar de plaats van de doorbraak. Voor het daadwerkelijk sluiten kan hij enkel de worsten, zakken, caissons toepassen. Dit zal echter niet met een grote precisie gebeuren. In Nederland zijn 13 Chinook helikopters met de mogelijkheid om 10.000 liter water (10 ton) te tillen en 17 Cougar helikopters met een draagvermogen van 2.500 liter water (2,5 ton). Een BigBag van 1m^3 en een soortelijk gewicht van nat zand van 2000 kg/m^3 weegt 2 ton. Al deze helikopters zijn in bezit van de Nederlandse Luchtmacht, maar zijn niet allemaal in Nederland. Veel van de helikopters zijn in het buitenland op vredesmissie of op oefening. Als een helikopter ingezet zou worden dan moet er een goede laadplaats zijn en ook de mogelijkheid hem bij te tanken. Als er met meerdere helikopters tegelijk gevlogen moet worden, levert dit extra risico's op. Dit is namelijk erg gevaarlijk op een klein gebied en het vereist de nodige planning. De kosten van de inzet van de helikopters zijn erg hoog.

persleiding
Met behulp van persleidingen kan los materiaal, zoals zand, in de worsten worden geleid. Het heeft geen zin om een persleiding naar het stroomgat aan te leggen, omdat het losse materiaal gelijk weggespoeld wordt door de hoge stroomsnelheden in de bres. Alleen als er lagere stroomsnelheden dan 2 m/s in het stroomgat optreden kan er met los materiaal gewerkt worden in een bres. De inzet van persleidingen is waarschijnlijk niet rendabel, omdat het zand ergens anders vandaan gehaald moet worden, vervolgens vermengd met water wordt om het naar de eindebestemming te transporteren, alwaar het in een sluitingsvorm gestort moet worden. Het zand moet bij een rivierdijkdoorbraak door hoogwater vanuit andere gebieden aangevoerd worden, omdat baggeren in de rivier niet mogelijk is vanwege de hoge waterstand. Door de combinatie van de vaarbewegingen en de hoge waterstand zouden dan andere gebieden ook in gevaar gebracht worden. Een ander probleem treedt op als de druk wegvalt of de doorgang geblokkeerd raakt, omdat het dan lang duurt voor het systeem weer operationeel is.

mensen
Vele handen maken licht werk, maar soms kan een object ook te zwaar zijn. Voor zandzakken kan er nog gebruik gemaakt worden van mensen, maar voor grotere zakken of caissons zijn machines een vereiste. De bestuurders van deze machines zijn natuurlijk wel essentiële mensen. Voor het vullen van zandzakken zijn meer als genoeg vrijwilligers te vinden, maar voor het opruimen vaak een stuk minder.

vrachtwagen
Met vrachtwagens kunnen grote hoeveelheden materiaal aangevoerd worden zoals het zand om de zandzakken te vullen. Voor het vervoer van de pontons, rijplaten, damwanden en misschien wel caissons zijn ze ook zeer geschikt. Belangrijkste is dat er een goede begaanbare route is waardoor ze gemakkelijk bij de losplaats kunnen komen.

shovel
Met shovels kan een berg zand vervoerd of verschoven worden binnen de opslag of rijplaten verlegd worden. Een shovel is niet uitgerust om grote hoeveelheden zand, zoals een vrachtwagen, te vervoeren. Het belangrijkste voordeel is dat de shovel de route begaanbaar maakt en houdt voor ander materieel.

transportband
Met de transportband kunnen verschillende (middelgrote) sluitingsalternatieven verplaatst worden. Zo kan hij aan het einde bijvoorbeeld de stenen storten in het stroomgat. Afhankelijk van de grootte van de transportband kunnen ook BigBags vervoerd worden. De lengte van de transportband is een belangrijke factor voor effectiviteit van deze manier van transporteren. Als hij namelijk vanaf de andere zijde van de rivier de materialen kan vervoeren naar de plaats waar ze gestort worden heeft hij veel meer capaciteit dan als er eerst materiaal, aangevoerd via pontons, door middel van kranen op de band gestort moet worden. Alleen is de constructie en fundering van een dergelijke lange transportband erg lastig en duur.

dumpschip
Met een dumpschip kunnen verschillende sluitingsalternatieven vervoerd worden naar het stroomgat. Zo kan in het ruim bijvoorbeeld een zandworst worden gemaakt (bijlage 6) of stenen worden gestort. Het grootste nadeel is dat het schip niet te hard kan en mag varen, vanwege de hoge waterstand. Het schip moet natuurlijk al wel in de buurt zijn, omdat het anders eerst andere gebieden in gevaar brengt door over de rivier naar de plaats van bestemming te varen. Soms moet er ook opgepast worden dat de trillingen van de motor van het schip niet tot bezwijken van de verzadigde dijken leidt. Het dumpschip is eveneens erg gevoelig voor de zuigende stroming voor het stroomgat in het geval dat hij zijn lading precies in het stroomgat wil dumpen. Bij de sluiting van enkele stroomgaten van 1953 zijn ook schepen gebruikt om het gat te dichten. Dit is echter niet aan te raden omdat er een grote kans is dat het fout gaat.

ponton
Met behulp van pontons kunnen de materialen van de ene zijde van de rivier naar de andere, waar de doorbraak is, worden getransporteerd. Ook kan er materieel zoals kranen op geplaatst worden, waardoor deze kranen materiaal kunnen aanbrengen in de bres, zodat de bres gesloten kan worden. De pontons kunnen het best zelf aandrijvend zijn, omdat ze dan zonder de hulp van een duwboot over de rivier kunnen varen. Waarbij natuurlijk weer de kanttekening van rustig varen en geen grote trillingen opwekken moet worden geplaatst. Pontons kunnen meestal gemakkelijk aan elkaar worden gekoppeld. Belangrijk is dan ook om een afmeerponton te fixeren bij de bres en vanaf een dergelijk ponton te werken aan de sluiting. De pontons met materiaal kunnen daar gemakkelijk aanleggen zonder bang te zijn veel hinder van de stroming te ondervinden. Voor het fixeren van een ponton kunnen ankers gebruikt worden, maar dit is in verband met de verweking van de ondergrond en de uitschuring door de hogere stroomsnelheden bij een dijkdoorbraak niet aan te raden. Eerder moet er gebruikgemaakt worden van een aantal ankerlijnen welke vastzitten aan vaste punten. Ook kan een ponton door middel van spudpalen vastgezet worden.

6.4 Criteria voor een succesvolle sluiting

De belangrijkste criteria voor een succesvolle sluiting zijn natuurlijk de ***waterdichtheid*** van de oplossing en de ***stabiliteit*** tijdens en na het aanbrengen. De gebruikte materialen voor de sluiting moeten in ruime mate ***beschikbaar*** zijn en niet teveel ***bewerkingen*** eisen om een snelle noodsluiting te voltooien. In tijden van nood is de ***kostprijs*** niet het belangrijkste criterium, maar de economische waarde van een polder moet wel hoog genoeg zijn. De laatste twee criteria hebben te maken met de ***definitieve functie*** van de noodsluiting en de ***opslag*** van de oplossing in tijden van laag water en ruimtebeslag tijdens de uitvoeringsfase. In paragraaf 8.3 worden de criteria verder toegelicht in verband met de case situatie waarop ze van toepassing zullen zijn.

7 Keuze van een case-situatie

In dit hoofdstuk zal een case gekozen en daarna uiteengezet worden. In paragraaf 7.1 worden een aantal doorbraken bekeken die gebruikt kunnen worden als case voor het ontwikkelen van een oplossing voor de sluiting van een dijkdoorbraak. Van de gekozen doorbraak wordt een situatieschets en een beschrijving van de omstandigheden gegeven in paragraaf 7.2. In paragraaf 7.3 worden de hydraulische randvoorwaarden en aannamen samengevat en opgesomd.

7.1 Mogelijke doorbraken

In de literatuur zijn verschillende doorbraken te vinden. Dit is ook niet verwonderlijk als je na gaat dat Nederland al eeuwen een strijd met de zee en de rivieren levert over de grens van land en water. Verschillende doorbraken zijn uitermate goed gedocumenteerd en daar is dan ook veel onderzoek naar gedaan. Een voorbeeld hiervan is natuurlijk de ramp van 1953 met later de Deltawerken.
Omdat er een grotere reële kans bestaat dat een rivierdijk zal bezwijken, wordt er gezocht naar een case van een rivierdoorbraak die model kan staan om een oplossing te vinden. Waarom is die kans op bezwijken van een rivierdijk reëler? Omdat de afgelopen tien jaar verscheidene keren een hoogwater tot kritieke waarden heeft geleid in het rivierengebied.
De oplossing die gevonden wordt voor de case-doorbraak wordt later geëvalueerd als toe te passen oplossing bij andere doorbraken. Hierbij kan gekeken worden naar zowel rivier- als zeedijkdoorbraken.

In de literatuur worden de volgende rivierdijkdoorbraken genoemd, die mogelijk als case gebruikt zouden kunnen worden.

- doorbraak bij Nieuwkuyk in 1880: de Bergse Maas brak door na het optreden van een wel
- doorbraken Maasdijk 1925: de rechter Maasdijk brak op verscheidene plaatsen door overslaande (hoog)water
- doorbraak bij Dalfsen in 1926: de Vechtdijk bezweek, maar door de kleine polder erachter bleef het ontstane gat maar klein
- doorbraak bij Zalk in 1926: door een hoogwatergolf op de IJssel brak de dijk

De keuze is gevallen op de doorbraak bij Zalk. Omdat bij de andere doorbraken te weinig of te onduidelijke gegevens beschikbaar waren na literatuuronderzoek of omdat er meerdere doorbraken waren die elkaar beïnvloeden. Van de doorbraak bij Zalk worden duidelijke gegevens gevonden van het verloop van het debiet en van de optredende maximale waterstandsverschillen en snelheden in de bres. Verder heeft het Waterschap Groot Salland en het gemeentearchief van Kampen, die de oude archieven van het waterschap beheert, nog aanvullende informatie geleverd, waardoor er meer inzicht in de historie van de dijk is. Uit de verslagen van de andere doorbraken kan wel geleerd worden hoe vroeger aan een noodsluiting werd gewerkt. Namelijk met zeil, grindzakken en rails. Verder werd ook vaak rijshout, riet en ijzeren draad gebruikt.

De hoge waterstanden in de Maas van 1988, 1993 en 1995 hebben niet geleid tot een doorbraak van een dijk, maar deze leveren wel veel informatie over de begaanbaarheid en geven een visualisatie van de mogelijk optredende, werkzaamheden bemoeilijkende, effecten. Voorbeelden hiervan zijn verweking van de dijk, optreden van kwellen en afkalving van het dijklichaam. Tijdens het hoogwater van 1995 werd trouwens melding gemaakt van een zandmeevoerende wel bij Zalk die door middel van filterdoek, drainagemateriaal en zandzakken onder controle is gehouden.

7.2 Situatieschets Zalk-case

Omgeving en geschiedenis

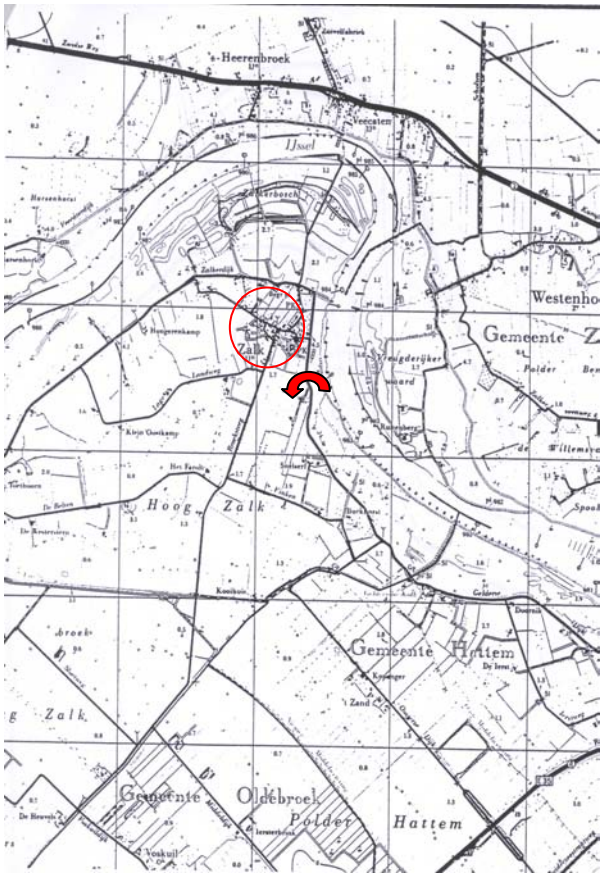
Zalk is een plaatsje aan de IJssel tussen Kampen en Zwolle. Het ligt precies in een bocht van de rivier, zoals te zien is in figuur 33. In 1213 wordt het eerst melding gemaakt van het dorpje Zalk, toen nog genaamd Santlicke. Zalk is een dorpje dat zijn bestaan te danken heeft aan de IJssel. Deze rivier, toendertijd nog uitstromend in de Zuiderzee, was een verbinding tussen verschillende steden en de 'zee' en werd daardoor een belangrijke handelsroute. Omdat de rivier bij Zalk een bocht maakte was er een doorwaadbare plaats. Dit was dan ook één van de redenen om hier een stad te beginnen. In 1224 wordt voor het eerst melding gemaakt van een roofridderslot bij deze oversteekplaats. Het

kasteel 'De Buckhorst' trok meer nieuwe dorpelingen aan, maar in 1840 werd het kasteel na een ruzie tussen de erfgenamen gesloopt. Zalk was toen echter al groot genoeg om te blijven bestaan zonder de bescherming van een slot.
Dat Zalk niet uitgroeide tot een grotere stad is te wijten aan de invloed van Kampen en Zwolle. Deze Hanze steden werden dankzij hun havens en verdedigingswerken van veel groter belang voor de handelaren dan het kleinere, relatief onbeschermde Zalk. Tot 1937 vormde Zalk samen met Veecaten, aan de overkant van de IJssel, een gemeente en werden de plaatsen verbonden met een voetveer.



Figuur 33. Locatie van Zalk

De doorbraak
In 1926 trad de hoogste afvoer ooit op in de Rijn, namelijk 12.600 m^3/s. Op 8 januari was er als gevolg van deze hoogwater golf een doorbraak net ten zuiden van Zalk. In figuur 34 is te zien waar de dijk doorbrak. Ook zijn er enkele foto's van de doorbraak en het daaropvolgende bezoek van Koningin Wilhelmina aan het overstroomde gebied. Eén van deze foto's is weergegeven in figuur 35.



Figuur 34. Kaart van 1974 met daarin Zalk en de plaats waar in 1926 de dijk doorbrak



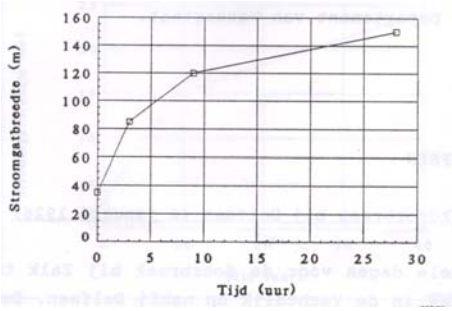
Figuur 35. De dijk nadat deze doorgebroken was. Het water komt tot aan de onderste takken van de bomen.

Hoe konden de dijken breken? Stroomde het water over de dijk heen? Wat veroorzaakte het falen van deze waterkering? Om een antwoord te krijgen op deze vragen moet er vooral gekeken worden naar het verslag van de hoofdingenieur van de toenmalige Rijkswaterstaat die ter plaatse was om de situatie te beoordelen. Ook is er later een rapport verschenen over de 'overstromingen en hoge waterstanden in de IJssel in de winter van 1925 en 1926', waarvan het relevante gedeelte opgenomen is in bijlage 2. Als conclusie over het bezwijken van de dijk is het volgende geschreven:

> 'Men zou namelijk uit het verslag kunnen afleiden, dat de ontoereikende hoogte de onmiddellijke oorzaak van de doorbraak is geweest. Niets is echter minder waar dan dat. De dijk ter plaatse reikte namelijk 0,40 tot 0,50 meter boven buitenwaterstand en had een breeden en hoogen binnenberm. Zwak was de dijk aldaar dus uit hoofde van zijn afmetingen in geen geval en de zwakte is derhalve niet als oorzaak aan te merken. Deze moet uitsluitend worden gezocht in de aanwezige buitenkolk […].'
>
> 'De oorzaak van de dijkdoorbraak te Zalk op 8 januari 1926 zou als volgt kunnen worden samengevat: De aanwezigheid van de vrij diepe kolk vlak voor de dijk heeft het ontstaan van een wel in belangrijke mate in de hand gewerkt.
> Deze kolk was slecht bekleed waardoor het water gemakkelijk in het dijklichaam en ondergrond kon treden.
> Tijdens een hoogwaterperiode, is door de toen aanhoudende waterdruk aan de binnenzijde een wel ontstaan. Of dit tijdens het hoogwater van 1926 of tijdens een eerder hoogwater is gebeurd, is niet bekend.
> De waterstand van de IJssel was rond 8 januari 1926 zo hoog dat de wel, na in eerste instantie alleen water te hebben afgevoerd, toen ook zand opgaf. Door de aanhoudende afvoer van zand vanuit de ondergrond is de dijk uiteindelijk in elkaar gezakt en bezweken.'

Uit deze conclusie van het rapport uit 1926 blijkt dat de dijk 'aangevallen' werd door piping waarna vervolgens het gehele dijklichaam is verzakt in een oude kolk voor de dijk en dat door de stroming het gat steeds groter is geworden. Het verloop in de tijd van de bresgrootte is geschetst in figuur 36.
Er was sprake van een 'relatief diepe' kolk ter plaatse van de doorbraak. Deze kolk was bij een eerdere doorbraak ontstaan. Vroeger was het dempen van een kolk als deze, die bij een dijkdoorbraak was ontstaan, niet mogelijk en paste men daarom een andere methode toe. Men legde een ringdijk aan om de kolk heen en deze werd aangesloten op de bestaande dijken (figuur 4). Uit de vele doorbraken op plaatsen waar de dijken al eerder doorgebroken waren blijkt dat dit niet altijd even veilig gedaan werd, omdat vele ringdijken te dicht op de rand van de kolk werden gebouwd. Ook werd de 'wand' van de kolk niet bekleed waardoor bij een hoge waterstand het water gemakkelijk door de ondergrond naar de lager gelegen gebieden achter de dijk doorsijpelde. Dit ging in eerste instantie om alleen water, maar als het langer of vaker voorkwam, werd dit een zandmeevoerende wel. Deze wel zorgde voor een langzame ondermijning van de ringdijk, die op den duur dan ook verzakte en

overspoeld werd. Dit is ook wat er gebeurde in 1926 bij Zalk. De ringdijk schoof onderuit, nadat hij eerst ondermijnd was door piping en verzakt was door overslaand water. Dit onderuit schuiven verklaart de grootte van de initiële bres van 35 meter, zoals in figuur 36 te zien is. Deze initiële grootte geeft ook een indicatie voor de diepte van de oude kolk. Door middel van de empirische benadering uit paragraaf 5.4 wordt gevonden dat de diepte van deze kolk ongeveer 6 meter moet zijn geweest.

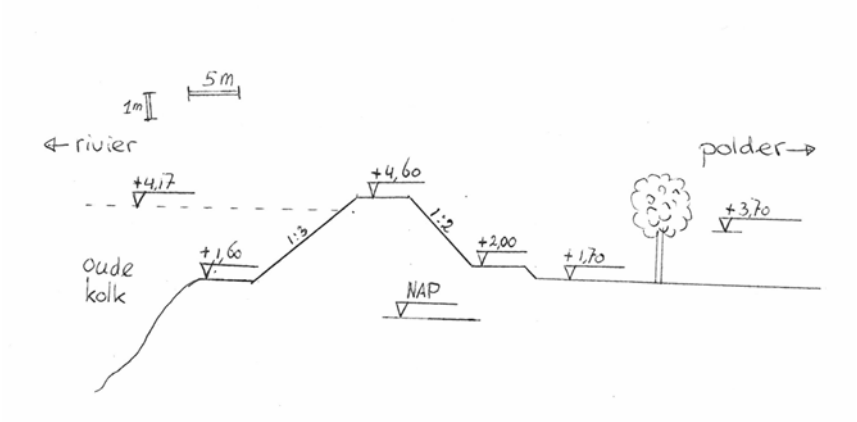


Figuur 36. Het verloop in de tijd van de bresgrootte ten tijde van de doorbraak op 8 januari 1926

Afmetingen en opbouw

Over de afmetingen en opbouw van de dijk vóór de doorbraak op 8 januari 1926 werd maar weinig opgeschreven. Er wordt eenmaal een vermoeden uitgesproken dat de dijk opgebouwd is uit zand met daarop een kleibekleding. Maar uit het verslag van de herstelwerkzaamheden na de doorbraak kan wel een idee opgemaakt worden hoe de opbouw geweest is, omdat in het verslag van de ambtenaar van de Provinciale Waterstaat staat dat de nieuwe afmetingen ongeveer gelijk zijn aan de oude dijk (figuur 37). Maar met de uitzondering dat bij de aanleg van de nieuwe dijk de kolk voor de dijk nu wel volgestort werd met zand. Het voor rivierdijken toch redelijk flauwe talud van 3 op 1 geeft echter wel aan dat men rekening hield met de aanwezigheid van kolken net voor de dijk.

> 'Zodra de waterstand het toeliet, begon men de kolk vóór de dijk vol te persen met uit de rivier gebaggerd zand en een noodwaterkering te maken vóór de doorgebroken dijk, waarna de definitieve dijk nagenoeg geheel uit klei enigszins binnenwaarts van de oude is gelegd. Deze dijk heeft een kruinbreedte van 5 meter, een hoogte van NAP +4,60 meter, een buitenbeloop van 3 op 1 en een binnenbeloop van 2 op 1 met een binnenberm van 5 meter breedte op NAP +2 meter.'

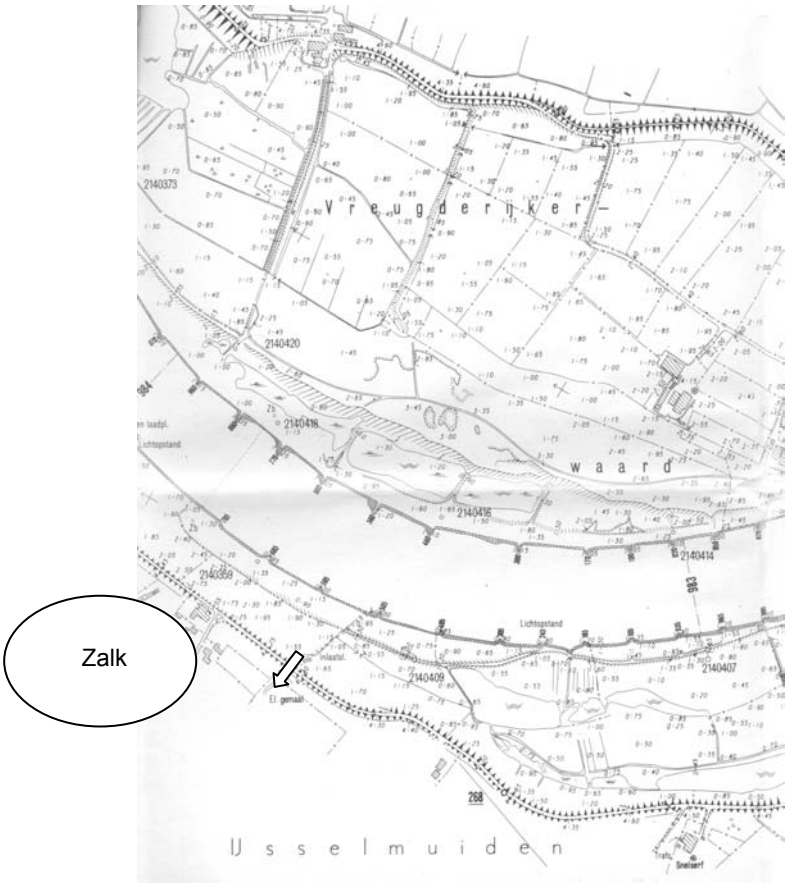


Figuur 37. De opbouw van de dijk (links: de IJssel. rechts: de polder).

De IJssel en uiterwaarden

De IJssel is een meanderende rivier die al eeuwenlang andere beddingen en debieten heeft gehad. Bij elke overstroming werd vruchtbare klei op de ondergelopen gebieden afgezet, en zodoende gingen mensen het gebied bewonen om voedsel te kunnen verbouwen. De Romeinen hebben de rivier ook nog gebruikt als doorvoer voor schepen naar Friesland via de Zuiderzee. Doordat de Zuiderzee nog niet afgesloten was door middel van de Afsluitdijk overstroomde de driehoek met Zwolle en Elburg

onderin en Kampen bovenin regelmatig. Door al deze overstromingen werden alle gebouwen en dorpen op terpen (verhogingen) gebouwd. De overstromingen zorgden dus niet voor grote schade. Na de sluiting van de Zuiderzee met de Afsluitdijk, waardoor het IJsselmeer ontstond, werden ten noorden van Kampen nog verschillende extra gebieden ingepolderd.
De IJssel is een rivier met een smal zomerbed en een breed winterbed. De uiterwaarden, de gebieden tussen de zomer- en winterdijken worden gebruikt voor veeteelt en industrie. Op de volgende figuur (figuur 38) is duidelijk te zien waar de dijken lopen en de uiterwaarden dus eindigen. De dikke lijnen zijn de hoge winterdijken langs de rivier. In de bochten rond en ten noorden van Zalk werd en wordt een groot gebied als uiterwaarden gebruikt. In bijlage 4 staan een aantal overzichtsfoto's van het gebied rond Zalk.



Figuur 38. De IJssel met zijn uiterwaarden en dijken (donkere rij pijltjes) in 1983.
De doorbraak in 1926 was ter hoogte van de pijl.

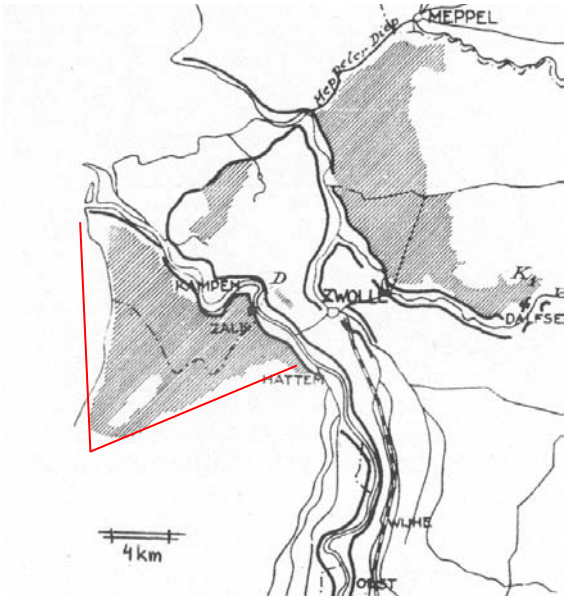
Grondsoorten

Het gebied van de IJssel wordt een mengelgrondenlandschap genoemd. Dit verwijst naar de bovenste grondlaag die opgebouwd is uit zand, klei en mest, die gemengd zijn door het omploegen van de grond door boeren en dieren zoals mollen en wormen. De grond heeft een diepbruine tot roodbruine kleur. Onder deze bovenlaag wordt zandige grond gevonden. Dit is de originele grondsoort van de hoger gelegen delen van dit gebied, maar omdat deze niet zo vruchtbaar waren als de lagere rivierkleigebieden werd er klei gebruikt als bemesting van de hogere gelegen gebieden. Met als gevolg het ontstaan van de mengelgronden. Door de regelmatige overstromingen van de polder door de Zuiderzee is er ook silt in de bodem te vinden. De dijken die langs de IJssel werden gemaakt, werden voornamelijk op de hogere gebieden aangelegd omdat dan minder materiaal nodig was. De ondergrond van de dijken bestond dus uit een zandgrond vermengd met klei en silt. De dijken zelf werden of geconstrueerd uit (onzuiver) zand met een klei toplaag of geheel uit klei.

De gevolgen van de overstroming

Tegenwoordig voert de IJssel ongeveer 1/9^{e} deel van het debiet van de Rijn af. Dit komt neer op een debiet tussen de 1800 en 2000 m^3/s. Op 8 januari 1926 was de waterstand op de IJssel bij Katerveer

(Zwolle) op zijn hoogst, namelijk NAP +4,17 m (bijlage 5). Dit was de hoogste waterstand ooit aldaar. Op veel plaatsen waren dan de dijken dan ook opgekist om extra hoogte te creëren. Bij Zalk was dat echter niet nodig, omdat daar de waterstand pas 0,4 á 0,5 meter onder de kruin stond.
Alhoewel er grote schade ontstond aan de landerijen omdat een redelijk groot gebied overstroomde, namelijk het 'driehoekig' gebied met de lijn Zwolle en Elburg als basis en de Zuiderzee als punt, vonden er niet veel persoonlijke ongelukken plaats, omdat de steden en huizen door de regelmatige overstroming van de Zuiderzee over de 'Drontherbedijking' op terpen en veilige hoogtes gebouwd waren. De Drontherbedijking heet tegenwoordig Drontermeerdijk en beslaat de linkerzijde van de in 1926 overstroomde driehoek (figuur 39). Elburg lag toen nog aan de Zuiderzee in plaats van aan het Drontermeer.



Figuur 39. De 'driehoek' die overstroomde in 1926 (de zwarte stip rechtsboven 'Zalk' is de plaats van doorbraak). In bijlage 3 zijn alle overstromingen langs de IJssel in 1926 te zien.

Het overstroomde gebied beslaat ongeveer 100 km^2 wat gelijk is aan $100 \cdot 10^6$ m^2. Door gebruik te maken van de formules uit paragraaf 5.4 voor de berekening van het inundatiedebiet, wordt gevonden dat na ongeveer 60 uur de polder 'vol' is (tabel 1).

Tabel 1. Berekening van het debiet en waterstanden in de polder

	8 januari			'9' januari		10 januari			
	t=0	t=3	t=9	t= 28	t=30	t=40	t=48	t=54	t=60
B	35	85	120	150	160	162	165	168	170
H_r	2,57	2,57	2,5	2,2	2,2	2,13	2,06	2	1,95
H_p	0,00	0,04	0,24	0,80	0,86	1,18	1,42	1,65	1,86
$Q_{volkomen}$	386,2	937,9	808,7	834,5	890,1	858,6			
ΔH_p	0,04	0,20	0,55	0,06	0,32	0,25			
$Q_{onvolkomen}$						824,8	830,5	723,6	413,6
ΔH_p						0,24	0,24	0,21	n.v.t.
u	3,35	3,32	3,14	2,47	2,42	2,04	1,68	1,23	0,62

Hierbij is

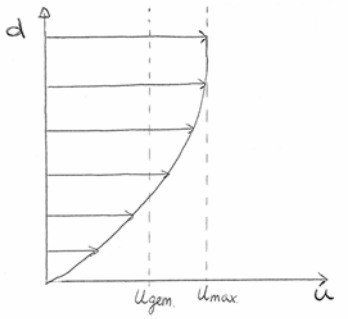
B	[m]	de breedte in de bres
u	[m/s]	de gemiddelde snelheid in de bres
H_r	[m]	de waterhoogte in de rivier ten opzichte van het originele polderniveau
H_p	[m]	de waterhoogte in de polder ten opzichte van het originele polderniveau
$Q_{volkomen}$	[m^3/s]	het debiet in de bres bij een volkomen overlaat
$Q_{onvolkomen}$	[m^3/s]	het debiet in de bres bij een onvolkomen overlaat
ΔH_p	[m]	de toename van de polderwaterstand in die tijdsperiode

Er kunnen echter nog enkele opmerkingen bij deze berekening gemaakt worden.

- Ten eerste werd de stroomsnelheid en het debiet in de bres hoger geschat door de ooggetuigen dan uit de berekening (tabel 1) blijkt.
- Ten tweede wordt de berekening uitgevoerd met een waterhoogte in de polder (H_p) ten opzichte van de achter de dijk aanwezige bodemhoogte van NAP +1,60 m, hoewel de polder in de richting van het westen afloopt naar lagere bodemniveau's. Ten westen van Zalk en van Kampen is de bodem van de polder lager gelegen (respectievelijk NAP +0,6 m en NAP -0,2 m) dan in de gebieden langs de IJsseldijk (gemiddeld NAP +1,50 m). In Elburg in het zuidwestelijke punt van de overstroomde driehoek is het bodemniveau het laagst, namelijk NAP -0,5 m. De uiterwaarden rond de plaats van de doorbraak liggen tussen een hoogte van NAP +0,60 m en NAP +1,50 m.
- Ten derde lijkt er een strijdigheid met de conclusie die getrokken werd in paragraaf 5.4 over de grootte van het debiet in de latere stadia van het doorbreken van een zanddijk. Daarbij werd namelijk gesteld dat het debiet in de laatste fasen van doorbreken het grootst zouden zijn door onder andere de grotere bresbreedte.
- Als laatste kanttekening een opmerking over de beperkte breedte van de IJssel. Dit is namelijk de 'smalste' rivier met een breedte van 50 á 60 meter.

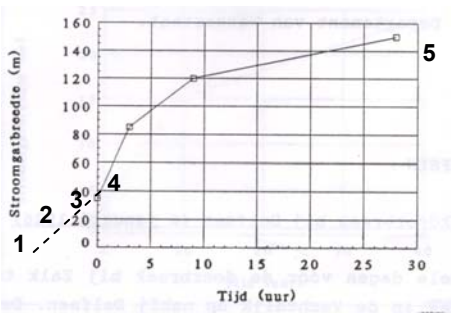
De antwoorden op deze kanttekeningen zijn:

- De ooggetuigen hebben geschat, maar deze waarden zijn voor de snelheid iets aan de hoge kant. Dit komt doordat de snelheid niet lineair verloopt met de diepte. De, berekende, gemiddelde waarde is dan ook lager dan de, geschatte, maximale waarde voor de snelheid (figuur 40).



Figuur 40. Verloop snelheidsprofiel over de diepte

  De schatting van het debiet door de ooggetuigen is echter veel lager dan uit de berekeningen blijkt. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat de ooggetuigen niet de ontgrondingskuil kunnen zien en zodoende het profiel verkeerd ingeschat hebben.
- Er gaat een langere tijd overheen voordat de hele polder onder water staat dan berekend is in tabel 1, omdat er meer lager gelegen gebieden zijn. Geschat wordt dat op t=72 uur (11 januari) de polder geheel volstond. Dit wordt gefundeerd op figuur 35. Hierop is te zien dat het water tot aan de onderste takken van de bomen komt, die ongeveer op een meter of 2 hangen, welke waarde overeenkomt met de laatste waarden in tabel 1. Deze foto is gemaakt bij het staatsbezoek van Koningin Wilhelmina aan het rampgebied drie dagen na de doorbraak.
- Omdat de eerste drie stadia niet in de tabel staan, want deze vinden plaats voor t=0 uur (figuur 41), ontstaat er een vertekend beeld over de opbouw van het debiet. In de tabel blijken alleen stadia 4 (rond t=0 uur) en 5 (circa t=44 uur) voor te komen.



Figuur 41. Verloop van de stroomgatbreedte en de stadia van doorbraak (paragraaf 5.4).

- De invloed van de beperkte breedte van de IJssel en zijn uiterwaarden heeft als gevolg dat de rand van de ontgrondingskuil niet verder uitgroeit als een halve cirkel met als diameter de breedte van de bres. Dit effect is meegenomen in de berekening.

7.3 Hydraulische randvoorwaarden en aannamen

Van de doorbraak was het volgende bekend of werd aangenomen:

Stroomsnelheid
door ooggetuigen (maximaal) 4 m/s
door berekening (gemiddeld) 3,35 m/s.

Debiet
gemiddeld in de eerste 10 uur door ooggetuigen 400 m^3/s
uit berekening volgt [in m^3/s]

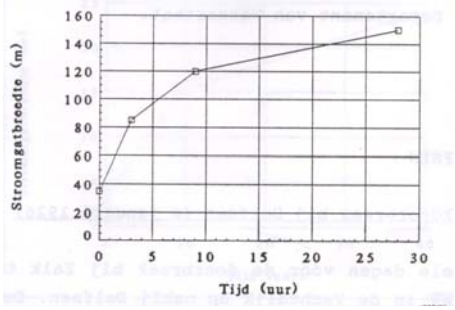
(uit Tabel 1)	t = 0 uur	t=3	t=9	t= 28	t=30	t=40	t=48	t=54	t=60
$Q_{volkomen}$	386,2	937,9	808,7	834,5	890,1	858,6			
$Q_{onvolkomen}$						824,8	830,5	723,6	413,6

Waterstanden
In bijlage 5 is het verloop van de waterstanden te zien.
Maximale waterstand NAP +4,17 m ten tijde van de doorbraak.
Maximaal verval 2,57 meter

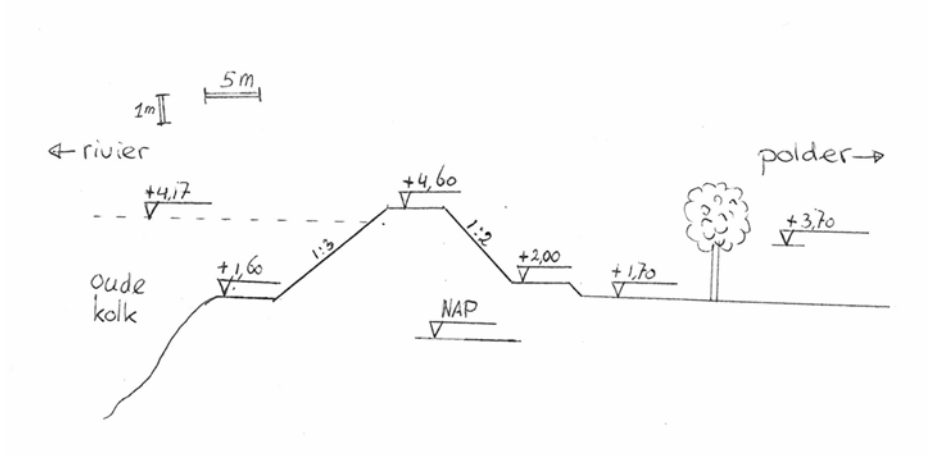
Bresbreedte

(uit Tabel 1)	8 januari			'9' januari		10 januari			
	t = 0 uur	*t=3*	*t=9*	*t= 28*	t=30	t=40	t=48	t=54	t=60
B [m]	*35*	*85*	*120*	*150*	160	162	165	168	170

(herhaling figuur 36)



Dijkprofiel bij Zalk (herhaling figuur 37)



Grondsoorten

bovenlaag (50 cm)	mengsel van zand, klei, silt en mest
daaronder	mengsel van zand, klei en silt

Opbouw dijk

mengsel van zand, klei en silt.

Oppervlakte polder

geschatte grootte (1974) 100 km^2

Polderniveau

(gemiddeld) langs de IJsseldijken	NAP +1,50 m
ten westen van Zalk	NAP +0,60 m
ter hoogte van Elburg	NAP -0,50 m
ten westen van Kampen	NAP -0,20 m

Uiterwaardenniveau

gemiddeld	tussen NAP +0,60 m en NAP +1,50 m
ter plaatse van doorbraak	NAP +1,60 m

met daarvoor een kolk met een diepte van ongeveer 6 meter en een breedte van ongeveer 40 meter.

8 Oplossingsmethoden voor de case-situatie

In paragraaf 8.1 wordt vastgesteld binnen welke tijdspanne de sluiting van de bres bij Zalk plaats moet vinden. Daarna worden de verschillende sluitingsmethoden besproken voor de case-situatie (paragraaf 8.2). Als basis worden hierbij de algemene oplossingsmethoden uit hoofdstuk 6 gebruikt. In paragraaf 8.3 worden de criteria waaraan de oplossing van de case moet voldoen toegelicht en worden de beoordelingen toegewezen. In paragraaf 8.4 worden de verschillen tussen de oplossingen uiteengezet. Evenals waarom er gekozen wordt voor de sluitingsmethode met damwanden.

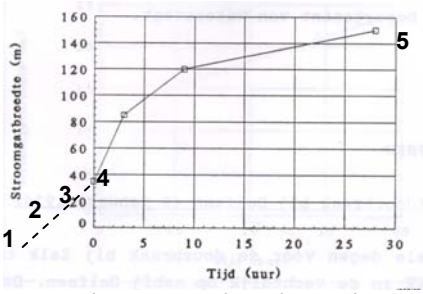
8.1 Keuze van tijdslimiet voor sluiting

Langzame sluiting variant

Om tot een goede keuze te komen in de volgende paragraaf welk alternatief het beste is, moet er natuurlijk wel bepaald zijn binnen welke tijdslimiet de oplossing moet werken. Als er namelijk gewacht kan worden met sluiten tot de hele polder onder water staat, dan zijn natuurlijk losse materialen verreweg het goedkoopst omdat deze in ruime mate aanwezig zijn in Nederland. Omdat als de polder vol is de stroomsnelheden in het gat bijna nihil zijn, kan er met los materiaal gewerkt worden en gaat men geen dure caissons of andere constructies in de bres aanbrengen.

Snelle sluiting variant

Naast de stroomsnelheid is ook de breedte van het gat van groot belang. Als namelijk de breedte beperkt wordt, zal ook de hoeveelheid water dat de polder instroomt verminderen. En zodoende de wateroverlast. De belangrijkste stadia, waarbij het grootste debiet door de bres stroomt, waren stadia 4 en 5 van een zanddijkdoorbraak. Stadium 4 begint als de bres tot aan het niveau van de teen van de dijk raakt en vervolgens zich gaat verbreden en verdiepen. Dit gebeurt in het geval van de doorbraak bij Zalk (figuur 42) op ongeveer t = 0 uur, omdat dan de dijk onderuitzakt in de diepe kolk en zodoende een bres in de dijk ontstaat van circa 35 meter.



Figuur 42. Verloop van de stroomgatbreedte en de verschillende stadia.

Doordat de breedte en diepte van de bres zich snel ontwikkelt in de eerste uren na de doorbraak moet deze zo snel mogelijk beperkt worden. Het liefst nog tijdens de grootste breedte ontwikkeling. Er moet dus al begonnen worden met deze breedte beperkende werkzaamheden binnen de eerste 3 uren. Dit houdt in dat, om er voor te zorgen dat het gat zich daardoor niet verdiept naar een zeer grote diepte, binnen 6 uur een sluiting bereikt moet worden. Een te diepe kolk ter plaatse van de bres zou namelijk de sluiting door de zeer plaatselijke vervormingen zeer moeilijk maken voor alternatieven met een vlakke ondergrond zoals caissons en opklapbare constructies.

Zoals uit tabel 2 (volgende bladzijde) volgt, zou de sluiting van de bres in 6 uur ook inhouden dat er niet te grote schade aan de landerijen zal ontstaan. De hoeveelheid water, die inhoudt dat er ongeveer een laag van 15 centimeter op het land staat, zal door de grond worden opgenomen en via de normale afvoerkanalen de polder verlaten. Een laag water van 24 centimeter zoals te zien is bij t = 9 uur zou al veel meer schade en moeilijkheden opleveren. Mede doordat meer water haar weg zal vinden naar het lager gelegen gedeelte van de polder.

Tabel 2. Het debiet en waterstanden in de polder

	8 januari			'9' januari
	t=0	t=3	t=9	t= 28
B	35	85	120	150
H_r	2,57	2,57	2,5	2,2
H_p	0,00	0,04	0,24	0,80
$Q_{volkomen}$	386,2	937,9	808,7	834,5
ΔH_p	0,04	0,20	0,55	0,06
u	3,35	3,32	3,14	2,47

Hierbij is

B	[m]	de breedte in de bres
u	[m/s]	de gemiddelde snelheid in de bres
H_r	[m]	de waterhoogte in de rivier ten opzichte van het originele polderniveau
H_p	[m]	de waterhoogte in de polder ten opzichte van het originele polderniveau
$Q_{volkomen}$	[m^3/s]	het debiet in de bres bij een volkomen overlaat
ΔH_p	[m]	de toename van de polderwaterstand in die tijdsperiode

8.2 Sluitingsoplossingen voor de case-situatie

In navolging van paragraaf 6.2 waar de algemene oplossingsmethoden voor een bres werden besproken, wordt voor de verschillende sluitingsmogelijkheden bij de case-situatie een beschrijving gegeven van hoe de sluiting plaats zou kunnen vinden.

worsten (zand, water)

Voor de sluiting kan het beste gebruik gemaakt worden van zandworsten omdat deze stabieler zijn dan de worsten die gevuld worden met water. Grootste nadeel is de grote hoeveelheid zand die nodig is om de worsten te vullen. Ook de eerder besproken vullingsgraad moet zo hoog mogelijk zijn, omdat er anders te veel hoogte verlies optreedt. De bres kan niet in een keer gesloten worden, omdat de worsten in grootte beperkt zijn tot 6 meter hoogte en 60 meter lengte. Er zal dus met een stapeling gewerkt moeten worden van kleinere worsten. Dit betekent dat vooral de aansluitingen van de worsten onderling, de aansluiting met de bres en de stabiliteit van de stapeling grote aandacht verdient.

zakken (zand, grind, klei, steen, afval, polymeren)

Aan de hand van een aantal berekeningen (bijlage 7) blijkt dat de te gebruiken zakken een gewicht moeten hebben van minimaal 200 kilogram als er uitgegaan wordt van een gemiddelde snelheid van 4 m/s in de bres. Gevolg is dat voor sluiting in de bres de zandzakken afvallen, maar de BigBags nog zouden voldoen. Verder zijn aan de hand van een aantal andere aannames over onder andere de diepte en het tijdsbestek ook de aantallen berekend die nodig zijn voor een sluiting in en achter de bres. Hieruit blijkt dat het eigenlijk onmogelijk is om met zakken of BigBags de sluiting voor elkaar te krijgen, omdat er teveel zakken in een relatief korte tijd gevuld moeten worden. Ook de inzet van machines om de zakken te vullen zal niet voldoende zijn.

blokken (beton, steen)

Omdat deze blokken van te voren gemaakt worden, zullen zij ergens opgeslagen moeten worden. Als de blokken in de bres moeten blijven liggen, geldt hetzelfde gewicht van 200 kilogram zoals bij de zakken. Omdat steen en beton een groter soortelijk gewicht hebben, zijn vierkante blokken met ribben van 0,43 meter al groot genoeg. Omdat de blokken niet precies geplaatst kunnen worden in de bres door de oneffen bodem en de sterke stroming, is het erg moeilijk om een waterdichte stapeling te maken. In de gaten, die tussen de bodem of zijkanten van de bres en de blokken ontstaan, zullen grote stroomsnelheden zich ontwikkelen, waardoor er uitspoeling optreedt ondanks dat er veel klei aanwezig is in de ondergrond. Deze uitspoeling kan leiden tot instabiliteit van de stapeling, maar door de los gestorte stapeling zal deze telkens een nieuwe stabiele vorm aannemen. Door middel van klei of folie zal getracht moeten worden om de stapeling waterdicht te krijgen en piping onder de stapeling door te voorkomen.

gabions (beton, steen, grind)
Gabions kunnen wel toegepast worden als er sprake is van een vlak gedeelte of rechte aansluitingen met de ondergrond. De maaiveldsluiting van figuur 5 is daar een goed voorbeeld van. De grootste nadelen voor de gabions in het geval van de case zijn de aantallen en de waterdoorlatendheid. Er zijn teveel gabions nodig die nog gemaakt moeten worden. De waterdoorlatendheid van de stapeling moet verholpen worden voor het verkrijgen van de sluiting, maar ook om er voor te zorgen dat de definitieve dijk geen kwelweg door zijn kern (van gabions) heeft. Verder is er geen sprake van een waterstand die gezakt is en dus zullen ze in stromend water geplaatst moeten worden, waardoor er uitschuring zal optreden. Die erosie zal ervoor zorgen dat de stapeling instabiel wordt.

caissons (beton, staal, hout)
Omdat de ondergrond niet vlak is, sluiten de caissons niet goed aan op de ondergrond en op elkaar. Hierbij kan de stabiliteit van de caisson ook in het geding komen, onder andere als er uitschuring optreedt. Een vlakke ondergrond kan wel bereikt worden voor de caissons door het toepassen van matten, maar onder deze matten zal ook uitschuring optreden door de vorm van de ontgrondingskuil. Dit zal er uiteindelijk voor zorgen dat de caissons niet meer stabiel staan. Omdat alle doorbraken verschillende afmetingen en vormen hebben, kan er niet gewerkt worden met een prefab caisson constructie. Voor het construeren ter plekke moet ruimte beschikbaar zijn en ook de mogelijkheid om de caissons naar de plaats van doorbraak te transporteren. Hierbij moet wel rekening worden gehouden dat de dijken moeilijk begaanbaar zijn en het water hoog staat. De aansluiting van de caisson met de zijkanten van de bres is ook verre van ideaal (figuur 27).

schepen (staal, hout)
Aangezien bij de doorbraak bij Zalk geen sprake is van de voorwaarden van een vlakke bodem en beschikbaarheid van schepen die groot en sterk genoeg zijn, zal deze sluitingsvorm waarschijnlijk niet gebruikt worden. Er moeten in ieder geval maatregelen genomen worden om de resterende gaten en kieren tussen de schepen onderling en de bodem te dichten na het afzinken van de schepen, zodat de sluiting waterdicht en stabiel wordt.

damwanden (staal, beton, hout)
De damwanden kunnen goed aangesloten worden op de ongelijke zijkanten en bodem van het stroomgat, omdat de eerste in de dijk worden geslagen en de damwanden door de bodem heen geslagen worden. Dit is gelijk ter voorkoming van piping. Het slaan van de damwanden in de stroming moet onderzocht worden, maar doordat de damwanden in het slot zitten en gelijk door het water in de bodem worden geslagen zal dit waarschijnlijk weinig problemen opleveren. De vraag is echter of de krachten die door het water op de geslagen damwanden worden uitgeoefend ook door de damwanden aan de verzadigde (onder)grond kunnen worden overgebracht. Ten gevolge van de waterdruk kan, als de damwanden niet stijf genoeg zijn of niet geschoord worden, er uitbuiging ontstaan. Niet alleen in het horizontale vlak, waardoor de damwanden met zijn allen een kom-vorm aan gaan nemen, waarbij gaten tussen de damwanden ontstaan, maar ook in het verticale vlak, waar ze door kunnen buigen en uit hun sponningen lopen. Door deze openingen kan het water in de polder stromen. Het zijn dan misschien geen grote gaten, maar de snelheid van het water zal wel groot zijn door de hoge waterdruk. Mogelijk kan er na het voltooien van de damwandenrij door het toepassen van een folie aan de hoogwater zijde, tegen de damwanden aan, deze doorstroom gestopt worden. Dit zal ook nodig zijn als vanaf twee kanten de damwanden worden geslagen en de middelste niet precies er tussen in past. Verder moet er bij het aanbrengen van de damwanden opgepast worden dat de dijk niet verder bezwijkt door de trillingen van het inheien of intrillen van de damwanden. Het voordeel is echter dat de eerste damwanden in de dijk zelf zijn geslagen en daardoor extra stevigheid geven aan de kop van de dijk.

palen (beton, staal, hout)
De palen zijn stijver en steviger dan de damwanden, maar veroorzaken meer krachten en trillingen bij het inheien. Dit kan tot gevaarlijke situaties leiden als de dijk nog niet versterkt is. Het voordeel van de palen is net zoals bij de damwanden dat ze altijd goed aansluiten met de ondergrond en de ongelijke zijkanten van de bres, omdat ze er door heen worden geslagen. Een ander voordeel van de palen ten opzichte van de damwanden is de kleinere uitwijking door de hogere stijfheid. Dit gaat wel ten koste van de bewerkelijkheid.

opklapbare constructies (beton, staal, hout)
Omdat de bodem van de bres niet mooi glad is en verweekt is, zal de bodemplaat van het opklapbaar mechanisme moeite hebben om stabiel te blijven. Door de oneffenheden ontstaat ook een aansluitingsprobleem tussen de delen onderling. Ook de aansluiting met de zijkanten van de bres is moeilijk. Verder is het vervangen van een deel dat al geplaatst is, maar dat niet overeind wil komen, erg lastig. Ook moet de constructie bestand zijn tegen de krachten die er op uitgeoefend worden door de optredende stroomsnelheden.

matten of lappen (folie, hout)
De matten moeten de oneffenheden in de ondergrond opvangen en kunnen volgen. Belangrijk is dat ze waterdicht zijn, omdat er anders stroming ontstaat door de matten. Er vindt extra erosie plaats aan het einde van de mat en het is dan ook van belang dat de mat ver genoeg uitstrekt aan de polderzijde. Om er voor te zorgen dat de matten niet wegspoelen door de sterke stroming kan het als driehoek vorm (met de punt door de bres heen) in het gat geplaatst worden (figuur 31). Om de matten op de grond te houden en niet gaan 'zweven' in de stroming kan er gekozen worden voor een mat van zwaar materiaal. Maar omdat de mat drijvend getransporteerd moet worden, zal er gekozen worden om de matten na het in een bres varen te verzwaren met andere materialen, zoals stortsteen. Andere matten kunnen daardoor echter slecht aansluiten op de vorige mat. Bij de doorbraak bij Zalk kan een mat gemaakt worden over de volledige breedte van de bres, anders zouden ook nog de aansluitingen met naast elkaar gelegen matten bekeken moeten worden.

losse materialen (zand, klei, grind)
Omdat in het stroomgat een snelheid optreedt die veel hoger is als de grenswaarde van 2 m/s valt deze oplossing al gelijk af. Voor de volledigheid zal hij echter wel meegenomen worden bij de beoordeling.

8.3 Criteria voor de sluitingsoplossingen

Voor de keuze van een oplossing voor de snelle sluiting van de dijkdoorbraak bij Zalk, moet er gekeken worden naar een aantal criteria (paragraaf 6.4).
- kosten
- stabiliteit
- waterdichtheid
- bewerkelijkheid
- aanwezigheid / beschikbaarheid
- definitief / opruimen
- opslag (van te voren en tijdens gebruik)

kosten
Vanuit economisch oogpunt moet er gekeken worden of de inzet van speciale constructies of grote machines wel opweegt tegen de verliezen die geleden worden door het gebied onder te laten lopen. In het geval van deze case is het inderdaad zo dat er niet veel mensen gevaar liepen, omdat bijna alle steden en boerderijen op terpen waren gebouwd, maar de schade aan de landerijen en de veestapel was wel groot. De duurste oplossingen krijgen de slechtste beoordeling, waarbij duur staat voor de combinatie van de kosten voor de sluitingsoplossing en de kosten van het ondergelopen gebied.

stabiliteit
Het is zeer belangrijk dat een aangebracht deel van de constructie van de sluiting niet instabiel wordt, waardoor de ravage alleen maar groter wordt. Verder moet de totale afsluiting stabiel blijven en niet ook de kolk inzakken of verzakken door piping in de ondergrond. Er moet dus een stabiele constructie aangelegd worden die niet bezwijkt door de optredende erosie.

waterdichtheid
De sluiting moet waterdicht zijn, want anders heeft het geen zin om de bres te sluiten. De aansluitingen van de constructies onderling en die met de bodem en de zijkanten van de bres zijn de belangrijkste plaatsen waar de afsluiting kan lekken. Bij dit criteria wordt de invloed van piping, een vorm van niet waterdichtheid van de waterkering, ook meegenomen.

bewerkelijk
Als er bij de constructie veel bewerkingen nodig zijn voor het aangebracht kan worden, gaat het ten koste van de snelheid van sluiten van de bres. Ook moeten er niet veel tussenstations zijn, omdat dan de kans, dat er iets misgaat, groter wordt. Ook de bewerkelijkheid van plaatsing of aanbrengen wordt beoordeeld door middel van dit criterium.

aanwezigheid / beschikbaarheid
De oplossing die gekozen wordt, moet natuurlijk wel binnen de gestelde tijd aangebracht kunnen worden (paragraaf 8.1). Dit vereist dat de grondstoffen en het materieel beschikbaar zijn of snel aangevoerd of aangemaakt kunnen worden. Het gemakkelijkst is natuurlijk als het al in de directe omgeving aanwezig is.

definitief / opruimen
Als de sluiting resulteert in een waterkering die definitief is en niet opgeruimd hoeft te worden, heeft dit grote voordelen. Mede omdat veel mensen behulpzaam zijn bij het aanbrengen van een oplossing, maar niet bij het opruimen. Als de sluiting gebruikt kan worden als stabiele en sterke kern van de waterkering scheelt dit later ook in de kosten voor het voltooien van een nieuwe waterkering.

opslag
Voor verschillende alternatieven is opslag nodig van de materialen voor het geval ze gebruikt gaan worden of is er een opslag nodig in de buurt van de doorbraak waar ze snel opgeladen kunnen worden. Voorbeelden zijn stenen in een kabelbaan of zandzakken die gevuld moeten worden met zand. Het beste is natuurlijk dat deze ruimte maar beperkt is, omdat er meestal niet zo veel plaats is en zeker niet dicht bij de dijk.

De sluitingsmethoden zullen voor de criteria beoordeeld worden van zeer goed (++) tot zeer slecht (--). In tabel 3 is de beoordeling weergegeven en in paragraaf 8.4 worden de verschillen tussen de oplossingen toegelicht. Evenals de keuze voor de sluitingsmethode met damwanden.

Tabel 3. De beoordeling van de alternatieven op de criteria

	kosten	stabiliteit	waterdicht	bewerkelijk	beschikbaar/ aanwezig	definitief / opruimen	opslag
worsten	-	-	+	-	-	-	-
zakken	+	-	+	--	±	-	--
blokken	-	+	--	-	--	+	--
gabions	--	±	--	--	--	±	--
caissons	-	±	-	+	-	++	-
schepen	±	±	-	++	++	--	++
damwanden	+	+	+	±	+	++	++
palen	-	+	±	-	+	++	++
opklap. deel	--	-	-	--	--	-	+
matten	--	++	--	--	--	±	--
losse grond	--	-	(+)	+	±	++	-

8.4 Beoordeling en definitieve keuze oplossing

kosten
De slechtste beoordeling gaat naar de oplossingen waarbij de doorstroom van water tijdens en na de 'sluiting' zorgt voor (extra) economische schade in de polder in verhouding tot de andere sluitingen. Losse grond is bijvoorbeeld goedkoop, maar het duurt heel lang voordat een sluiting bewerkstelligd is. Bijkomend nadeel is het losse zand dat in de polder gespoeld is en dat na de sluiting opgeruimd moet worden, tenzij de getroffen boeren er genoegen mee nemen. Het aanbrengen van zandworsten is kostbaar door de worsten zelf, maar als ze eenmaal waterdicht aangebracht zijn, is de doorstroom verholpen. Bij caissons spelen eveneens de kosten van de caissons zelf mee, maar ook de doorstroom van water in de polder door de moeilijke aansluiting met de bodem. Schepen scoren gemiddeld omdat zij wel vergoed moeten worden, maar een redelijk goedkope oplossing zijn. Helaas

is de doorstroom als ze niet goed aansluiten op de bres moeilijk te beperken. De schepen zijn waarschijnlijk wel snel aan te voeren waardoor er weinig water de polder ingestroomd is als begonnen wordt met de sluiting. Damwanden en zakken zijn de best scorende oplossingen voor dit criterium. Damwanden zijn overal voorradig en dus snel aan te voeren, waardoor er weinig water in de polder is gekomen. Ook treedt er geen piping of doorstroom als de bres gesloten is. De zakken zijn snel te vullen dankzij de bereidbaarheid van omstanders om te helpen. Meestal zijn er al redelijk veel van deze zakken en het benodigde zand aanwezig in een door hoog water bedreigd gebied. De zakkenstapeling moet wel een waterdicht folie bevatten omdat anders de doorstroom van water mogelijk blijft.

stabiliteit
De minst scorende oplossingen zijn de zakken en worsten, omdat deze onderling instabiel worden als ze niet goed gestapeld worden. De opklapbare constructies zijn instabiel door de ongelijklopende bodem en ondervinden daarvan last bij het onderling aansluiten. De losse grond scoort ook slecht omdat deze in sterke stroming meegevoerd wordt. Als een dijklichaam gevormd is, kan de grond wel weerstand bieden aan de hoge waterstand. Schepen, gabions en caissons zijn erg gevoelig voor instabiliteit ter plaatse van de aansluiting met de bodem, omdat de grond door de openingen onder de oplossing weg kan eroderen. Een losse stapeling van blokken heeft hier ook last van, maar deze stapeling neemt hierbij elke keer een nieuw stabiel evenwicht aan. De damwanden en palen zijn stabiel als ze in de grond zijn geslagen. Het meest stabiel is een stapeling van matten omdat deze over een groter oppervlakte gespreid worden, waardoor ze niet af kunnen glijden.

waterdichtheid
Zoals te verwachten worden de blokken, gabions en matten het slechtst beoordeeld wat betreft de waterdichtheid. De caissons en schepen volgen omdat de niet vlakke bodem van de bres voor veel doorstroom zorgt. De palen worden als gemiddeld beschouwd omdat deze geen last hebben van onderloopsheid, maar afhankelijk zijn van de gebruikte aansluitingen tussen de palen. De opklapbare delen hebben last van doorstroom tussen de aansluitingen en piping en scoren daarom minder. Worsten en zakken hebben, als de stapeling goed wordt uitgevoerd in combinatie met een waterdicht folie, geen last van water dat door de stapel stroomt en worden daarom beter beoordeeld. De damwanden hebben geen last van onderloopsheid of doorstroom, als ze aaneengesloten geplaatst worden. Door deze laatste voorwaarde krijgen ze niet de hoogste beoordeling van ++. De beoordeling van de losse grond staat tussen haakjes omdat pas gesproken kan worden bij deze oplossing over waterdichtheid als er een sluiting tot stand is gekomen, want de losse grond wordt tijdens het storten in de bres grotendeels weggespoeld. Ook is de waterdichtheid afhankelijk van de gebruikte grondsoort of mengsel van soorten.

bewerkelijkheid
De slechtst scorende oplossingen zijn het bewerkelijkst doordat er veel handwerk en aanpassingen nodig zijn om tot het resultaat te komen. Ook wordt bekeken of de oplossing eenvoudig geplaatst kan worden of aanvullende maatregelen vereist. De worsten scoren iets beter dan de zakken omdat het benodigde aantal veel lager is. Maar het vullen van de worsten blijft bewerkelijk waardoor ze niet hoger beoordeeld worden. De blokken scoren een min omdat ze veel bewerkingen moeten ondergaan voordat ze in de bres gestort kunnen worden. Ze moeten aangevoerd, overgeladen en gestort worden, waarbij ze dus verscheidene keren opgepakt en neergezet zijn. De palen worden ook op deze wijze beoordeeld, maar de damwanden scoren iets beter, omdat hier geen extra werkzaamheden nodig zijn om de sluiting waterdicht te maken. De plaatsing in de stroming moet onderzocht worden, maar hoeft geen problemen op te leveren. De caissons worden met een + gewaardeerd omdat ze in het gat gevaren worden en daarna enkel nog voor piping beschermd moeten worden. De schepen zijn het minst bewerkelijk omdat deze zelfstandig naar het gat varen en daar afgezonken worden. Enige voorwaarde is hierbij wel dat ze goed aansluiten op de bodem en zijkanten van de bres.

aanwezigheid / beschikbaarheid
De blokken en gabions scoren zeer slecht op dit onderdeel, omdat ze nog aangevoerd en geproduceerd moeten worden. Een ander nadeel is dat de blokken nog getransporteerd moeten worden naar de plaats van de doorbraak, als ze prefab gemaakt en opgeslagen zijn. De opklapbare constructies zijn eigenlijk te duur om te verstoffen op een opslag totdat ze een keer ingezet kunnen

worden bij een doorbraak en zullen daarom niet meteen in grote aantallen beschikbaar zijn. De matten zijn lastig om te vervoeren als ze prefab gemaakt worden en zullen dus ter plaatse gefabriceerd moeten worden, zeker als hier natuurlijke materialen voor gebruikt worden. De worsten scoren iets beter omdat de kunststoffen voor de omhulling meer voorradig zijn en enkel ter plaatse gelast of genaaid hoeven te worden. Ook zijn pompen en persleidingen voor het vullen van de worsten beschikbaar. Omdat bij een dreigend hoog water de zandzakken en grond al naar een gebied worden getransporteerd, zijn deze in ruime mate aanwezig. Voor een sluiting van een bres zijn er echter veel meer nodig. Omdat in elke regio van Nederland wel een aantal grondbedrijven gevestigd zijn, scoren de damwanden en palen goed qua beschikbaarheid. De schepen scoren natuurlijk het beste omdat bij een rivier altijd genoeg schepen te vinden zijn.

definitief / opruimen
De schepen scoren het slechts wat betreft het opruimen, omdat zij een milieuverontreiniging met zich mee brengen en niet in de nieuwe dijk opgenomen kunnen worden. De opklapbare delen kunnen ook niet in de nieuwe dijk opgenomen worden omdat de constructies daarvoor veel te complex en niet ontwikkeld zijn. De zakken en worsten kunnen niet in de definitieve dijk blijven zitten, omdat de stapeling niet stabiel genoeg is om voor het garanderen van de sterkte van de nieuwe dijk. Er kan ook een milieuverontreiniging ontstaan door de kunststof omhulsels. De gabions kunnen in de definitieve dijk opgenomen worden als er een oplossing voor de waterdichtheid wordt gevonden. De stalen frames kunnen echter slecht voor het milieu zijn als zij gaan oxideren. De matten kunnen gebruikt worden in de nieuwe dijk, maar zijn misschien niet zo stevig omdat, als er natuurlijke materialen zijn gebruikt, deze kunnen verduren. Caissons, damwanden, palen en losse grond kunnen allen opgenomen worden in de nieuwe dijk. De damwanden en palen hebben als voordeel dat ze zowel als waterdichte kern als maatregel tegen piping dienst doen. Nadeel kan zijn dat het staal gaat oxideren, maar dit zal niet zo ernstig zijn als bij de gabions. Losse grond heeft als grootste voordeel dat enkel de vorm en buitenzijde nog maar aangepast hoeven worden. Helaas moet waarschijnlijk de grond die in de polder gespoeld is tijdens de sluiting opgeruimd worden, tenzij de boeren het niet erg vinden.

opslag
De matten scoren slecht wat betreft het ruimtebeslag omdat deze veel ruimte innemen bij de fabricage ter plaatse. Het vullen van de zandzakken neemt ook veel plaats in, zeker als gekeken wordt naar de aantallen die nodig zijn (bijlage 7). De blokken en gabions nemen veel plaats in voor de opslag voordat ze naar de dijkbres vervoerd kunnen worden. Als ze prefab gemaakt en opgeslagen worden, nemen ze ook veel ruimte in. Caissons en worsten nemen minder ruimte in omdat ze grotere afmetingen en kleiner aantal hebben, maar desalniettemin nemen ze een redelijk grote ruimte in als ze aangevoerd zijn en naar het gat getransporteerd moeten worden. Omdat er veel losse grond nodig is voor de sluiting van de dijkbres is de opslagruimte ook relatief groot. De opklapbare delen nemen veel minder ruimte in omdat ze in ingeklapte vorm op een kleine oppervlakte geplaatst kunnen worden. De damwanden en palen nemen weinig ruimte in omdat deze bij de verschillende bedrijven zelf opgeslagen liggen en bij aankomst bij de dijkbres gelijk op een ponton geladen kunnen worden voor toepassing bij de sluiting. De schepen scoren natuurlijk zeer goed op dit criterium, omdat deze geen enkele vorm van opslag vergen.

keuze van de oplossing
De conclusie, die uit tabel 3 en de besprekingen van de sluitingsvormen, getrokken kan worden is dat een sluiting met damwanden het best scorende alternatief is voor de sluiting van de case doorbraak bij Zalk. Vooral de beschikbaarheid, de definitieve functie en de waterdichtheid zijn de beste kwaliteiten van de damwand. De meeste andere alternatieven hebben een groot nadeel waardoor ze minder aantrekkelijk zijn.
In het volgende hoofdstuk zal de damwand verder uitgewerkt worden in de vorm van een berekening van de benodigde sterkte en stijfheid. Verder zal de uitvoering en planning van de sluiting verder uitgediept worden in hoofdstuk 10.

9 Damwandoplossing voor de case-situatie

Eerst wordt in dit hoofdstuk een algemene beschrijving gegeven van de manier waarop de sluiting van de dijkdoorbraak zal plaatsvinden (paragraaf 10.1). De berekeningen voor de stroming en waterdiepte, paragraaf 10.2, zullen geschieden aan de hand van de maatgevende situaties die ontstaan bij de sluiting. De krachtenberekening en vervormingsberekeningen (paragraaf 10.3) geven een overzicht of de oplossing technisch haalbaar is. In paragraaf 10.4 worden de belangrijkste uitkomsten van de berekeningen weergegeven.

9.1 Uitvoering (globaal)

Om een indruk te krijgen hoe de uitvoering van de damwandsluiting in zijn werk zal gaan en zodoende een aantal maatgevende situaties te herkennen voor de berekening van de waterdieptes en snelheden, wordt hieronder een summier overzicht gegeven van de verschillende stappen in het uitvoeringsproces. In het volgende hoofdstuk zal een gedetailleerdere uitvoeringsbeschrijving besproken worden.

In chronologische volgorde zal het volgende moeten gebeuren om tot een succesvolle sluiting te komen van de doorbraak bij Zalk. Op t=0 uur schuift de dijk onderuit in de diepe kolk die ervoor ligt. De dijk verdwijnt over een lengte van 35 meter tot bijna aan polderniveau. De doorbraak is een feit. Omdat al voor het daadwerkelijk doorbreken van de dijk de waterschappen in hoogste staat van paraatheid waren, kan verwacht worden dat binnen afzienbare tijd de eerste contacten voor het mobiliseren van materieel, materiaal en personeel op gang komen.
Het benodigde materieel omvat bijvoorbeeld pontons, kranen, shovels en vrachtwagens. Als materiaal zijn bijvoorbeeld rijplaten, damwandplanken, lieren en ankertouwen nodig. Zodra deze materialen en het materieel aangevoerd zijn aan de andere zijde van de rivier, worden de pontons in gereedheid gebracht. Op twee verschillende pontons worden kranen of heistellingen gereden.

Om er voor te zorgen dat de pontons niet meegevoerd worden door de stroming als de heistellingen bezig zijn met de damwandsluiting van de bres, worden er verankeringen in de uiterwaarden geslagen. Ankerpontons worden in de juiste positie naast de bres gemanoeuvreerd, nadat ze door middel van ankerlijnen aan de ankerbuispalen zijn bevestigd. De pontons met daarop de heistellingen worden aan deze ankerpontons bevestigd, zodat de eerste damwanden bij de kopeinden in de dijk worden geslagen. Dit hoeft niet tegelijkertijd aan beide kanten te gebeuren. Met deze eerste damwanden worden de kopeinden beschermd, zodat de breedteontwikkeling van de bres gestopt wordt.

Afhankelijk van de snelheid waarmee de damwanden geslagen kunnen worden, wordt de breedte teruggebracht en het gat gesloten door de damwandconstructie. Belangrijk hierbij is dat dit redelijk snel gebeurd, omdat de erosie van de bodem een steeds grotere inheidiepte vereist. De damwanden kunnen door middel van pontons aangevoerd worden vanaf de werkplaats aan de andere zijde van de rivier. Door deze pontons af te meren aan de verankerde pontons of aan de pontons met daarop de kraan of heistelling kan er continu doorgewerkt worden.

Omdat van beide zijden van het gat naar het midden wordt gewerkt moet er een oplossing gevonden worden voor het plaatsen van de laatste damwand in het midden. Maar dit zal verder besproken worden in hoofdstuk 10, omdat in de volgende paragrafen eerst berekend zal worden of de damwandsluiting technisch wel haalbaar is aan de hand van verschillende maatgevende situaties. In het volgende hoofdstuk zal gekeken worden of de sluiting technisch uitvoerbaar is en welke moeilijkheden daarbij overwonnen moeten worden.

9.2 Berekeningen van stroming en dieptes

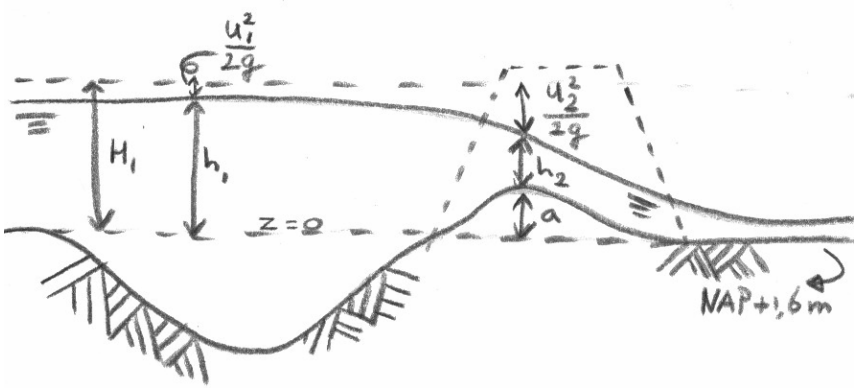
In deze paragraaf wordt de berekening aan de damwand gemaakt aan de hand van verschillende maatgevende situaties die optreden bij de sluiting van de ontstane bres bij de dijkdoorbraak in 1926 bij Zalk. Eerst zal worden uitgelegd waar en hoe de maatgevende situaties ontstaan.

overzichten van de situaties

Zoals al eerder beschreven is in dit rapport is de dijk bij Zalk hoger dan de hoogwater stand van de IJssel, maar bezwijkt de dijk door een combinatie van piping en een oude kolk die onderaan de dijk aan de rivierzijde in de uiterwaarden ligt. In bijlage 8 tot en met 10 wordt het profiel van de dijk op de verschillende tijdstippen weergegeven. Namelijk achtereenvolgens:

- de beginsituatie, waarbij de dijk nog niet bezweken is (NAP +4,60 m)
- het moment van afschuiven (NAP +3 m)
- de situatie na ongeveer 3 uur (NAP -3 m)

De beginsituatie is al uitvoerig behandeld in het voorgaande gedeelte van het rapport (hoofdstuk 4) en zal daarom verder niet toegelicht worden. Het moment van afschuiven is echter nog niet zo uitgebreid behandeld en daarmee wordt dus begonnen met deze situatie.
De dijk bezwijkt volgens de, in hoofdstuk 4 genoemde, citaten van de aanwezige technici doordat door piping zand meegevoerd werd onder de dijk vandaan en de dijk verzakte, waarna een afschuiving van de dijk plaatsvond door en in de oude kolk die al voor de dijk lag. De dijk is echter niet gelijk helemaal tot polderniveau verdwenen, maar is wel verlaagd waardoor het water er overheen stroomt (figuur 43).



Figuur 43. De dijk vlak na de afschuiving.

Om een idee te hebben hoeveel de dijk verlaagd is, wat van belang is voor de hoeveelheid water die de polder instroomt en voor hoe snel het restant van de dijk weg erodeert, wordt een berekening uitgevoerd. Voor deze situatie gelden de volgende evenwichtsvergelijkingen (formules 1 en 2). Deze vergelijkingen zijn van toepassing op de ontstane situatie van een volkomen overlaat. Ten eerste is de hoeveelheid energie links (rivierzijde) en de energie boven de afgeschoven dijk gelijk aan elkaar.

$$h_1 + \frac{u_1^2}{2g} = h_2 + a + \frac{u_2^2}{2g} \qquad (1)$$

waarbij

h_1	[m]	de waterhoogte bij doorsnede 1 (ten opzichte van het z=0 niveau)
u_1	[$^m/_s$]	de watersnelheid bij doorsnede 1
h_2	[m]	de waterhoogte bij doorsnede 2 (ten opzichte van de bovenzijde van de drempel)
u_2	[$^m/_s$]	de watersnelheid bij doorsnede 2
a	[m]	de hoogte van de drempel (= restant van de dijk) bij doorsnede 2
g	[m/s^2]	de zwaartekrachtversnelling (= 9,81 m/s^2).

Ten tweede geldt dat de hoeveelheid water die door beide doorsneden stroomt gelijk is aan elkaar.

$$Q_1 = Q_2 \qquad (2)$$

waarbij

Q_1	[m^3/s]	het debiet dat door doorsnede 1 stroomt
Q_2	[m^3/s]	het debiet dat door doorsnede 2 stroomt

In dit geval is echter de breedte in beide doorsneden gelijk door de keuze van de begrenzing, waardoor de formule herschreven kan worden.

$$q_1 = q_2 \qquad (3)$$

waarbij
q_1 [m^3/s/m] het debiet dat per eenheid van breedte door doorsnede 1 stroomt
q_2 [m^3/s/m] het debiet dat per eenheid van breedte door doorsnede 2 stroomt

In het begin heeft de waterstand in de polder geen invloed op de waterstand boven de drempel, die gevormd wordt door de verzakte dijk. De waterhoogte boven de drempel bereikt dan een grenswaarde die alleen maar afhangt van de waterstand aan de zijde van de rivier. De grenswaarde kan berekend worden met de volgende formule.

$$d_2 = d_g = \tfrac{2}{3} \cdot (H_2 - a) \qquad (4)$$

waarbij
d_2 [m] de waterdiepte bij doorsnede 2 boven de drempel
d_g [m] de grensdiepte
H_2 [m] de energiehoogte ter plaatse van doorsnede 2 (is gelijk aan formule 1)
a [m] de hoogte van de drempel (= restant van de dijk) bij doorsnede 2

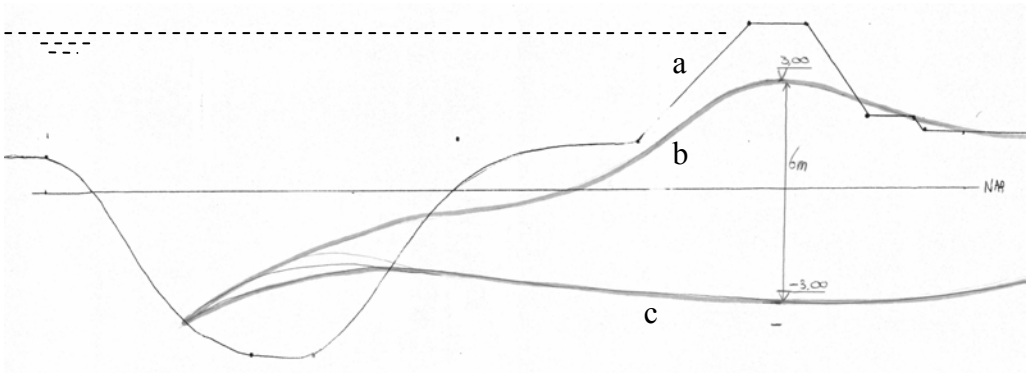
Deze formules leiden tot de volgende waarden (tabel 4) voor de snelheden en waterstanden in de doorsneden bij variabele waarden van de drempelhoogte, a. De hoogtepeilen zijn allemaal ten opzichte van het polderniveau (NAP +1,60 m).

Tabel 4. Evenwichtssituaties bij verschillende waarden voor de drempelhoogte a (t.o.v. het polderniveau)

a	0	0,3	0,5	1,0	1,5	2,0
h_1	2,57	2,57	2,57	2,57	2,57	2,57
u_1	5,02	2,98	2,42	1,44	0,77	0,29
h_2	2,57	1,82	1,58	1,12	0,73	0,38
u_2	5,02	4,22	3,94	3,31	2,68	1,94
q	12,90	7,65	6,21	3,70	1,97	0,74

Aan de hand van de debieten die bekend zijn van de ooggetuigen verslagen en eerdere berekeningen blijkt dat de verzakking eerst een drempel van 1 meter hoog veroorzaakt, maar dat de drempel snel afneemt. Dit betekent dat na een korte tijd de waarden in de linker kolom van tabel 4 bereikt worden.

Op t=3 uur heeft de ontgrondingskuil een diepte van NAP -3,0 meter bereikt op de plaats waar de dijk verzakte. In figuur 44 is te zien hoe het originele dijkprofiel verzakte en vervolgens uitslijt.



Figuur 44. Drie profielen van de dijkdoorbraak. a) origineel profiel. b) direct na verzakking. c) op t=3 uur.

In de figuur is het waterpeil gestippeld afgebeeld om de figuur overzichtelijk te houden. De waterstand op de rivier is NAP +4,17 m terwijl de kruin van de ongeschonden dijk op NAP +4,60 m ligt.

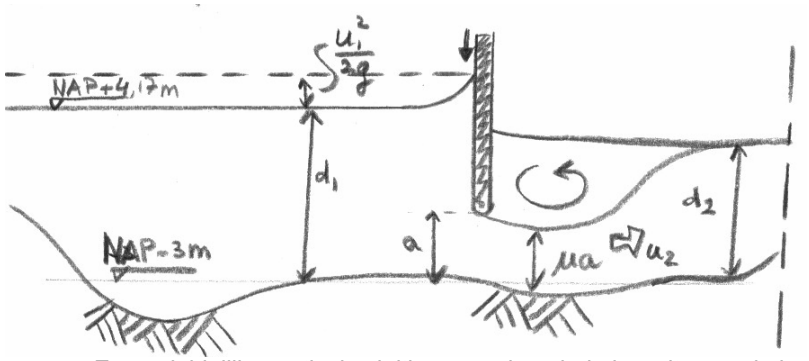
snelheid bij horizontale sluiting
Om een beeld te vormen van de snelheden die ontstaan als een geleidelijke sluiting bewerkstelligd wordt over de gehele breedte van de bres op t = 3 uur kunnen de volgende formules gebruikt worden. Dit is een theoretische situatie, omdat de totale breedte 85 meter bedraagt, waardoor de bres niet in een keer gesloten kan worden.

De energiehoogte in doorsnede 1 is gelijk aan de energiehoogte in doorsnede 2. In figuur 45 worden de verschillende delen waaruit deze energiehoogte opgebouwd is weergegeven.

$$d_1 + \frac{u_1^2}{2g} = d_2 + \frac{u_2^2}{2g} \tag{5}$$

waarbij

d_1	[m]	de waterhoogte bij doorsnede 1 (ten opzichte van het z=0 niveau)
u_1	[$^m/_s$]	de watersnelheid bij doorsnede 1
d_2	[m]	de waterhoogte bij doorsnede 2 (ten opzichte van z=0)
u_2	[$^m/_s$]	de watersnelheid bij doorsnede 2
g	[m/s^2]	de zwaartekrachtversnelling (= 9,81 m/s^2).



Figuur 45. Een geleidelijke verticale sluiting over de gehele breedte van de bres.

De hoeveelheid water die door het steeds kleiner wordende gat stroomt, is gelijk aan de hoeveelheid water die aangevoerd wordt vanuit doorsnede 1. Hierbij is aangenomen dat de breedte in beide doorsneden gelijk is.

$$u_1 \cdot d_1 = u_2 \cdot \mu \cdot a_s \tag{6}$$

waarbij

d_1	[m]	de waterhoogte bij doorsnede 1 (ten opzichte van het z=0 niveau)
u_1	[$^m/_s$]	de watersnelheid bij doorsnede 1
a	[m]	de afstand tussen de bodem en de onderzijde van het sluitingsmiddel
u_2	[$^m/_s$]	de watersnelheid bij doorsnede 2
μ	[-]	contractiecoëfficiënt (≈ 0,65).

De gegeven waarden zijn: d_1 = 7,17 meter, Q_1 = 400 m3/s en B = 85 meter. Met een gelijkblijvende hoeveelheid water die aan komt stromen, Q, en een steeds kleiner wordende opening, a, worden de volgende waarden gevonden (tabel 5).

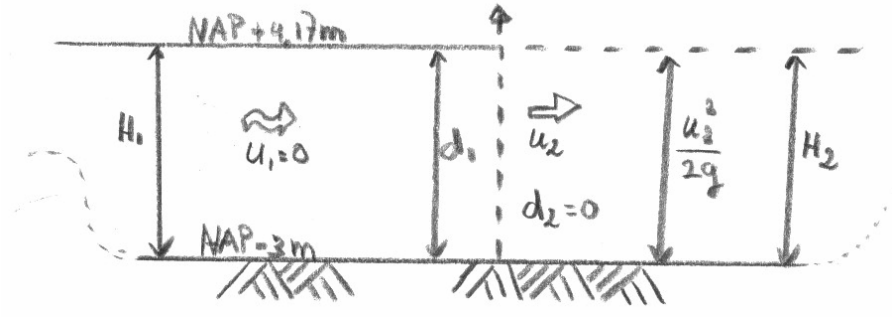
Tabel 5. Toename van de snelheid bij een verticale sluiting bij gelijkblijvende Q.

a	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	0,8	0,7	0,6
μ·a	1,95	1,63	1,30	0,98	0,65	0,52	0,46	0,40
d_2	6,89	6,76	6,52	6,00	4,52	3,02	1,74	0
u_2	2,41	2,90	3,62	4,83	7,24	9,05	10,34	11,87

Omdat de opening na een verkleining tot 0,7 meter te klein is om hetzelfde debiet, Q, te handhaven zijn de berekende waarden voor een kleinere opening niet meer representatief, omdat d_2 naar 0 gaat, terwijl dit eigenlijk niet optreedt.

maximaal mogelijke snelheid

Om de gevonden waarden te vergelijken met de situatie van een horizontale sluiting zoals toegepast wordt bij de dijkdoorbraak in Zalk wordt als eerste de situatie bekeken wanneer de maximale snelheid optreedt in de situatie van t=3 uur. Deze snelheid wordt gevonden als een wand, die het water tegenhoudt, plotseling wordt weggetrokken (figuur 46).



Figuur 46. De situatie bij maximaal verval bij een ontgronding van t=3 uur.

Voor die situatie geldt het volgende evenwicht.

$$d_1 + \frac{u_1^2}{2g} = d_2 + \frac{u_2^2}{2g} \tag{7}$$

waarbij

d_1	[m]	de waterhoogte bij doorsnede 1 (ten opzichte van NAP - 3,00 m)
u_1	[$^m/_s$]	de watersnelheid bij doorsnede 1 (= 0 m/s)
d_2	[m]	de waterhoogte bij doorsnede 2 (≈ 0 meter)
u_2	[$^m/_s$]	de watersnelheid bij doorsnede 2
g	[m/s^2]	de zwaartekrachtversnelling (= 9,81 m/s^2).

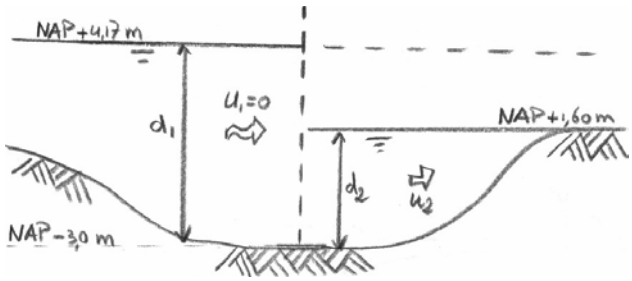
Met het invullen van de nulwaarden voor u_1 en d_2 krijgen we de formule voor de maximale snelheid.

$$u_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot d_1} \tag{8}$$

De maximale waarde die hieruit volgt door invulling van d_1= 7,17 meter, namelijk de hoogwater stand tot de bodem op NAP -3,00 m, is 11,86 m/s. Deze waarde blijkt overeen te komen met de gevonden maximale waarde voor de snelheid in tabel 5, waarbij gekeken werd naar een verticale sluiting. Dit komt omdat in beide gevallen d_2 gelijk aan nul is.

realistische maximale snelheid

Deze zeer simpel gestileerde situatie om de maximale waarde voor de snelheid te vinden zal nu wat realistischer voorgesteld worden naar de bestaande situatie op t = 3 uur (figuur 47). In plaats van een vlakke bodem en in doorsnede 2 geen waterdiepte, wordt nu rekening gehouden met de ontgrondingskuil en water in deze kuil, ook ter plaatse van doorsnede 2.

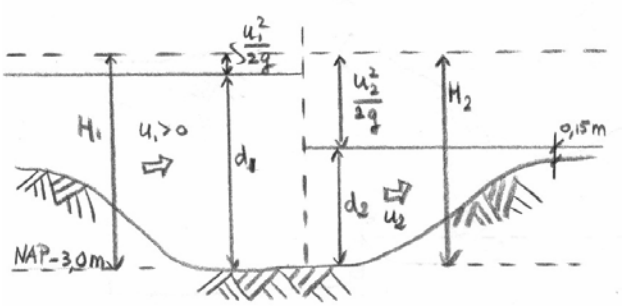


Figuur 47. De situatie op t=3 uur met ontgrondingskuil en hoog water.

De berekening van u_2, de snelheid in doorsnede 2, gebeurt aan de hand van dezelfde evenwichtsformule als bij de vorige situatie (formule 7). Nu wordt er echter geen nulwaarde ingevuld voor d_2 maar een waarde van 4,60 meter, ofwel de diepte van de ontgrondingskuil tot het polderniveau. Een kleine aanpassing aan formule 8 geeft de correcte formule voor u_2.

$$u_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot (d_1 - d_2)} \tag{9}$$

Hieruit volgt, na het invullen van de waarden voor d_1 en d_2, dat een snelheid van 7,1 m/s ter plaatse van doorsnede 2 optreedt. Ondanks dat deze situatie al veel realistischer was dan situatie zonder water in de ontgrondingskuil ter plaatse van doorsnede 2, kunnen er nog enkele aanpassingen gedaan worden, waardoor de berekening een nog realistischer beeld geeft. De eerste aanpassing heeft te maken met u_1. Tot nu toe werd aangenomen dat de snelheid in doorsnede 1 nul was, omdat het voorgesteld werd als een bassin waarbij plotseling een wand weggehaald wordt. In de situatie van de doorbraak is er echter geen sprake van stilstaand water in een bassin en daarom is u_1 groter dan nul in tegenstelling tot de vorige berekeningen. Een tweede aanname zit in de waarde voor d_2, de waterdiepte aan de kant van de polder in doorsnede 2. Tot nu toe werd er van uitgegaan dat er geen water in de polder stond, maar in werkelijkheid stroomt er al 3 uur lang water uit de rivier de polder in. Er wordt daarom aangenomen dat er een laag van 15 centimeter water achter de doorbraak staat, waardoor voor de waterdiepte d_2 een waarde van 4,75 meter gevonden wordt ten opzichte van de bodem van de ontgrondingskuil. Deze kuil is uitgeschuurd tot een diepte van 4,60 meter onder het originele polderniveau (figuur 48). Door middel van de evenwichtsformules 3 en 5 worden de volgende waarden voor de snelheden van het water in de beide doorsneden gevonden: u_1 = 6,09 m/s en u_2 = 9,20 m/s.

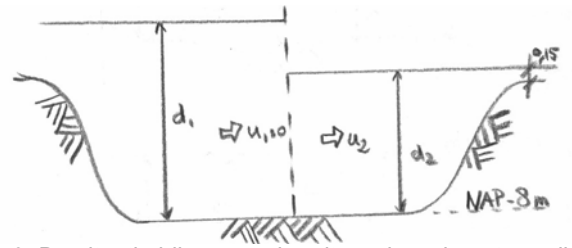


Figuur 48. De meest realistische situatie voor u_1 en u_2 bij een ontgrondingskuil tot NAP -3,00 m.

De nu gevonden waarde voor u_2 is hoger dan bij de vorige situatie omdat, ondanks de afname van het verval, de hogere waarde voor u_1 een grotere invloed heeft.

maximale snelheid bij maximale uitschuring

Als laatste situatie wordt bekeken het geval waarbij door het steeds kleiner worden van de bres door de horizontale sluiting de bodem van de ontgrondingskuil uitgeschuurd is tot een grotere diepte, namelijk tot NAP -8,00 m. Dit heeft als gevolg dat de waarde van d_1, de afstand van het hoogwater peil tot aan de bodem van de ontgrondingskuil, 12,20 meter wordt. De waarde van d_2 wordt 9,75 meter. Dit is de diepte van de ontgrondingskuil en de 15 centimeter water die in de polder staat (figuur 49).



Figuur 49. De situatie bij een verder uitgeschuurde ontgrondingskuil.

Om de maximale snelheid te schatten die in dit geval op zal treden wordt aangenomen dat de watersnelheid in doorsnede 1, u_1, nul is. Bij de berekeningen met een ondiepere ontgrondingskuil is gebleken dat deze berekening de maximale waarde oplevert. Met formule 9 en met de waarden 12,17 en 9,75 voor respectievelijk d_1 en d_2 wordt voor u_2 een waarde gevonden van 6,89 m/s. Deze maximale snelheid is dus lager dan de waarde die gevonden werd bij een ondiepere ontgrondingskuil. Voor de berekeningen over de krachtswerking en waterdrukken is het van belang om met de diepere ontgrondingskuil te rekenen, omdat hier de grootste waterdrukken optreden. Voor berekeningen waarbij de snelheden van het water van belang zijn kan beter met de gevonden waarden van de ondiepe kuil gerekend worden, omdat deze het meest realistisch geacht worden voor de horizontale sluiting.

9.3 Berekeningen van de damwandsluiting

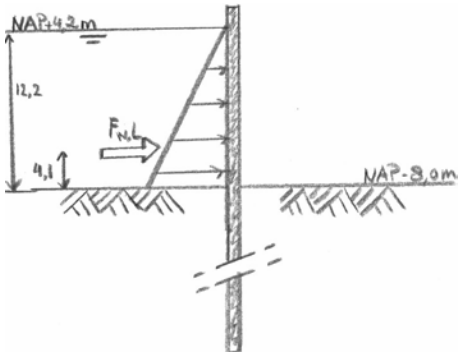
Voor de berekening van de damwandsluiting zijn een aantal maatgevende situaties te onderscheiden. In deze situaties zijn de belastingen het grootst of het meest uitzonderlijk tijdens de uitvoering van de sluiting of na het voltooien van de sluiting. Naar aanleiding van de berekeningen van de watersnelheden bij de sluiting zijn een viertal situaties naar voren gekomen die maatgevend zullen zijn.

1. Na het voltooien van de sluiting is de bodem bij de laatste damwanden uitgeschuurd tot NAP -8,0 m. De waterstand aan de rivierzijde is echter nog steeds op het hoogwater niveau van NAP +4,2 m. Aan de polderzijde is de ontgrondingskuil leeg komen te staan en er staat geen water meer tegen de damwand aan deze zijde.
2. Om een beeld te vormen van de capaciteiten van de damwanden wordt bekeken of een losstaande damwand midden in de stroming bezwijkt of niet op t = 3 uur. De ontgrondingskuil is in deze situatie verdiept tot NAP -3,0 m en de optredende snelheid rond de paal is 6,09 m/s.
3. Bij het slaan van de damwand wordt het gat waardoor het water heen kan stromen steeds kleiner en komen er sleepkrachten op de naastgelegen damwanden te staan door het langsstromende water. Om een inschatting te maken over de kracht die hierbij spelen wordt bekeken wat de sleepkracht zal zijn bij een ontgrondingskuil tot NAP -3,0 m, een hoogwaterstand van NAP +4,2 m en een snelheid van 6,09 m/s.
4. Na het voltooien van de sluiting zal er in de ontgrondingskuil aan de rivierzijde een waterstand zijn van NAP +4,2 m en aan de polderzijde een waterstand van NAP +1,75 m. Dit is de hoogte van het water in de polder. In deze situatie blijft de ontgrondingskuil aan de polderzijde vol water staan.

Hieronder zijn de verschillende situaties uitgewerkt en uitgerekend.

situatie 1: hoogwater en een lege kuil

Zoals hierboven al vermeld werd, is in deze situatie de kuil verdiept tot NAP -8,0 m (figuur 50). Dit komt voornamelijk doordat rond elke nieuwe damwand die geslagen wordt erosie optreedt die ervoor zorgt dat de paal die er naast wordt geslagen een stukje lager de bodem in gaat dan de vorige. Dit is echter wel afhankelijk van de opbouw van de ondergrond. Desondanks zorgt dit ervoor dat bovenop de eigenlijke diepgang van de ontgrondingskuil na 3 uur, namelijk NAP -3,0 m, er rekening gehouden moet worden met een veel diepere kuil bij het slaan van de laatste damwand. Deze diepere kuil is voor de berekening van de grootste krachten die op de damwanden komen te staan door waterdrukken maatgevend.



Figuur 50. Schematische weergave van situatie 1.

De rivierwaterstand is nog steeds op hoog water niveau, NAP +4,20 m, en aan de polderzijde is al het water weggestroomd of weggepompt. Het grondwater wordt bij deze situatie weggelaten. Normaal gesproken zou er door de grondwaterstand in de polder water in de ontgrondingskuil staan.

De kracht, per eenheid van breedte, die door de waterdruk aan de rivierzijde op een meter damwand wordt uitgeoefend is gelijk aan $F_{w,L}$.

$$F_{w,L} = \tfrac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot d^2 \qquad (10)$$

waarbij

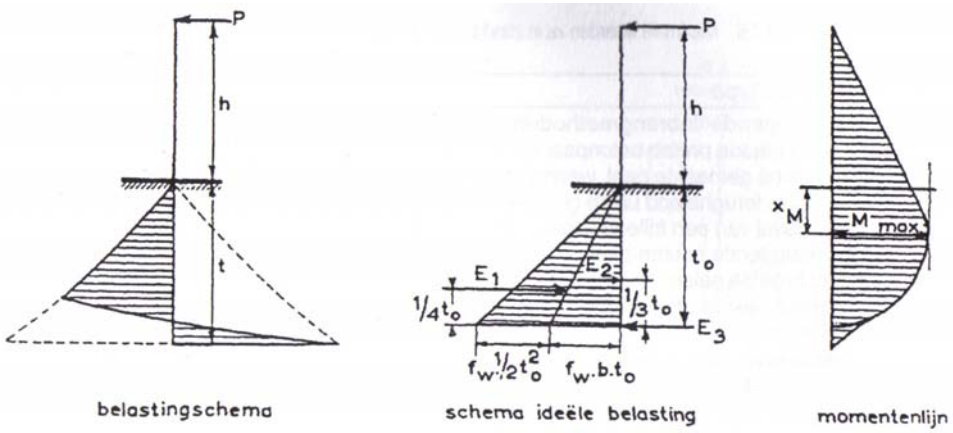
ρ	[kg/m^3]	de soortelijke dichtheid van water (≈ 1000 kg/m^3)
g	[m/s^2]	de zwaartekrachtversnelling (= 9,81 m/s^2)
d	[m]	de waterdiepte ter plaatse van uit te rekenen waterdruk of kracht.

Als voor d de afstand tussen bodem en waterniveau wordt ingevuld, 12,20 meter, dan volgt uit de formule voor $F_{w,L}$ een waarde van 730 kN per meter wand.
Deze kracht moet opgenomen worden door de constructie en dit kan berekend worden met de volgende formule (methode van Blum, figuur 51), waarbij P de toelaatbare kracht is.

$$P = \gamma' \cdot K_p \cdot \left(\frac{t_0^3}{24}\right) \cdot \left(\frac{t_0 + 4 \cdot b}{t_0 + h}\right) \tag{11}$$

waarbij

γ'	[kN/m^3]	effectief volume gewicht van de grond (gewicht onder water) (≈10 kN/m^3)
Kp	[-]	passieve gronddrukcoëfficiënt (= 3)
t_0	[m]	diepteligging van het momentennulpunt van de ideële belasting
b	[m]	breedte van de paal/damwandplank (≈ 1,1 m)
h	[m]	afstand tussen de bodem en de hoogte waar de toelaatbare kracht P aangrijpt.



Figuur 51. Methode van Blum (uit: 'Constructieve Waterbouwkunde', 2000)

Omdat de kracht van het water, $F_{w,L}$, in dit geval de toelaatbare kracht, P, is, wordt voor h de afstand genomen tussen waar deze kracht aangrijpt tot de bodem, ofwel $^1/_3$ maal 12,20 meter wat neerkomt op 4,1 meter. Als al de waarden ingevuld zijn, wordt voor t_0 een waarde gevonden van circa 8 meter. Omdat de inheidiepte, t, gelijk is aan 1,2 maal t_0 wordt deze 10 meter. De hele damwand moet dus langer zijn dan 22,2 meter, want hij zit 10 meter in de grond en hij steekt 12,20 meter erboven uit.

Om te bepalen waar het grootste buigend moment in de paal optreedt, kan de volgende formule gebruikt worden.

$$x_M^2 \cdot \left(x_M + 3 \cdot b\right) = \frac{t_0^3}{4} \cdot \left(\frac{t_0 + 4 \cdot b}{t_0 + h}\right) \tag{12}$$

waarbij

x_M	[m]	diepteligging van het maximale moment
b	[m]	breedte van de paal/wand
t_0	[m]	diepteligging van het momentennulpunt van de ideële belasting
h	[m]	afstand tussen de bodem en de hoogte waar de toelaatbare kracht P aangrijpt.

De diepteligging, x_M, kan nu berekend worden door de eerder gevonden waarden in te vullen, zoals t_0 = 8 meter, b = 1,1 meter en h = 4,1 meter. Voor de diepteligging, x_M, wordt de waarde 4,3 meter gevonden. Dit is dus gelijk aan NAP -12,30 m.

Het maximale buigend moment dat in de paal op zal treden is te berekenen met de volgende formule.

$$M = P \cdot \left(h + x_M\right) - \gamma' \cdot K_p \cdot \left(\frac{b \cdot x_M^3}{6} + \frac{x_M^4}{24}\right) \tag{13}$$

Door de eerder uitgerekende waarden voor de variabelen in te vullen wordt voor het maximale moment een waarde gevonden van 5360 kNm. De stalen damwanden hebben een minimale vloeigrens van 360 N/mm^2 (= σ) waardoor voor het benodigde weerstandsmoment, W_n, een waarde gevonden wordt van $15 \cdot 10^6$ mm^3 (= 14 900 cm^3), want voor deze berekening geldt:

$$W_n = \frac{M}{\sigma} \tag{14}$$

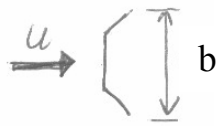
Uit de literatuur blijkt dat er geen damwand bestaat die dit aan kan (bijlage 11). Hieruit kan geconcludeerd worden dat onder geen beding de ontgrondingskuil achter de gesloten damwand leeggepompt moet worden voordat er verstevigende maatregelen zijn genomen als er een ontgrondingskuil tot NAP -8,0 m is ontstaan.

situatie 2: sleepkracht op een losstaande damwand
Voor de sleepkracht op een losse paal (figuur 52) kan de volgende formule gebruikt worden.

$$F_D = \tfrac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2 \cdot C_D \cdot A \tag{15}$$

waarbij

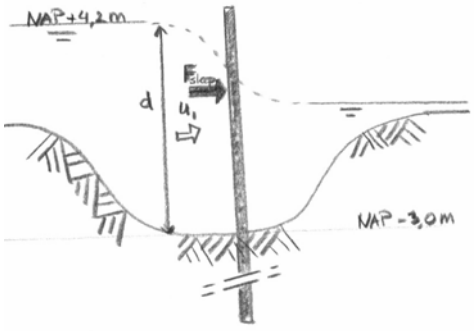
ρ	[kg/m^3]	de soortelijke dichtheid van water (≈ 1000 kg/m^3)
u	[m/s]	de snelheid van het water
C_D	[-]	sleepcoëfficiënt (= 2 voor wanden haaks op de stroming)
A	[m^2]	oppervlakte van de paal



Figuur 52. Losse damwand met stroming haaks op profiel.

Voor de oppervlakte wordt in dit geval, omdat het om een enkele losse damwand gaat een profiel Larssen 450 uitgekozen met een breedte, b, van 1,4 meter en een lengte van 7,17 meter. Dit komt overeen met de hoge waterstand van NAP +4,17 m en de bodem van de ontgrondingskuil op NAP -3,0 m. De snelheid van het water op de plaats waar de damwand geslagen wordt, is 6,09 m/s zoals eerder berekend is. De door het water uitgeoefende sleepkracht wordt met deze waarden 377 kN.

Omdat aan beide zijden van de wand de waterstand gelijk is, zullen de krachten die door de waterdruk op de wand worden uitgeoefend elkaar opheffen voor de berekening van de toelaatbare kracht (figuur 53). Deze toelaatbare kracht, P, is daardoor gelijk aan de sleepkracht en met behulp van formule 11 kan nu t_0 berekend worden. Waarbij nu voor de breedte van de damwand, b, dezelfde waarde van 1,4 meter wordt ingevuld en voor het aangrijpingspunt een waarde van 4,78 meter. Deze afstand is gelijk aan $^2/_3$ van de waterdiepte aan de rivierzijde, door de gekromde vorm van het snelheidsprofiel (figuur 40). Voor t_0 wordt een waarde gevonden van 6,5 meter en dat betekent dat de inheidiepte, t, gelijk is aan 7,8 meter. De minimale totale lengte van de damwand komt daarmee op 15 meter, omdat er 7,8 meter onder de grond zit en 7,20 meter boven de grond uitsteekt om het hoogwater te keren.



Figuur 53. Schematische weergave van maatgevende situatie 2.

Door middel van formule 12 en de waarden b = 1,14 meter, h = 4,78 meter en t_0 = 6,54 meter, wordt nu de diepteligging van het maximale moment berekend. Deze blijkt op 3,1 meter onder de bodem van de ontgrondingskuil op te treden. Het maximale moment is 2645 kNm (formule 13).
Aan de hand van formule 14 wordt het benodigde weerstandsmoment berekend. Het benodigde weerstandsmoment is 7348 cm^3 per damwandplank. Het zwaarste damwand profiel (Larssen 450 met asymmetrische sloten; figuur 54) heeft een weerstandsmoment van 10620 cm^3 per damwand, waardoor het gekozen profiel zou voldoen.



Figuur 54. Een Larssen 450 damwandprofiel (bron: www.nedeximpo.nl)

Door middel van de volgende formule kan dan de uitwijking, δ, berekend worden.

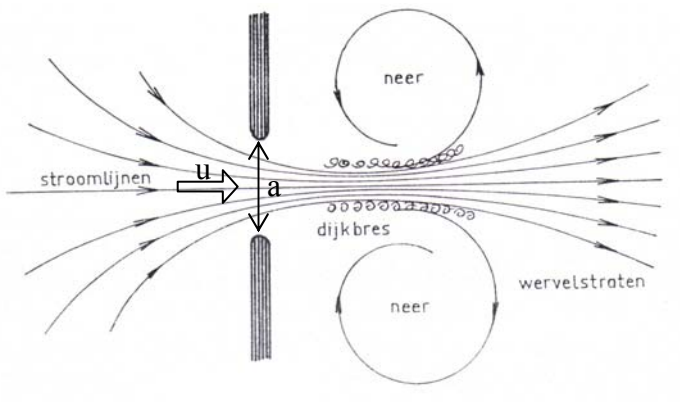
$$\delta = \frac{P(h + 0,65 \cdot t)^3}{3 \cdot E \cdot I} \tag{16}$$

waarbij

P	[kN]	toelaatbare kracht
h	[m]	aangrijpingspunt van de toelaatbare kracht t.o.v. de bodem
t	[m]	de inheidiepte
E	[N/mm^2]	de elasticiteitsmodulus van staal (= $20 \cdot 10^4$ N/mm^2)
I	[mm^4]	traagheidsmoment.

De uitwijking van de losstaande damwand in de stroming zou voor dit profiel gelijk zijn geweest aan 15 centimeter, want het traagheidsmoment bedraagt 407383 cm^4 per damwand. Deze uitwijking treedt op ter hoogte van het aangrijpingspunt van de toelaatbare kracht, op 4,7 meter van de bodem.

situatie 3: kracht door stroming door stroomgat
Als het gat in de dijk gesloten wordt door aan beide zijden te beginnen met damwanden te slaan, zal het water door een steeds kleiner wordend gat de polder instromen (figuur 55).



Figuur 55. De stroming door een opening.

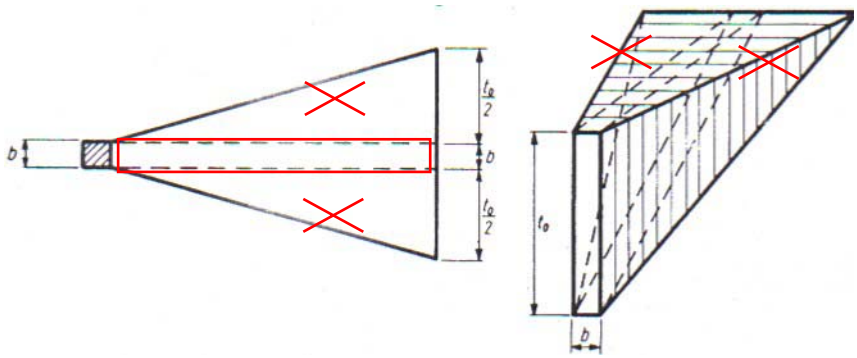
Het water dat zich op deze manier een weg baant naar de polder oefent een kracht uit op de andere damwanden. Om een indruk te krijgen van de krachten die op de damwand komen te staan door de sleepkracht, F_s, van het langsstromende water wordt gerekend met de volgende formule.

$$F_s = a \cdot \rho \cdot u_1^2 \cdot d_1 \tag{17}$$

waarbij

a	[m]	breedte van de opening
ρ	[kg/m^3]	de soortelijke dichtheid van water (≈ 1000 kg/m^3)
u_1	[$^m/_s$]	de watersnelheid in de opening
d_1	[m]	de waterdiepte voor de opening.

Voor de breedte van de opening wordt 1 meter aangenomen, omdat de berekening per meter damwand uitgevoerd wordt. De snelheid door het gat bedraagt 6,09 m/s. De bodem van de ontgrondingskuil reikt tot NAP -3,0 m op t = 3 uur. De waterdiepte, d_1, is daardoor 7,17 meter, omdat de waterstand op de rivier NAP +4,17 m is. De resulterende trekkracht, die door het langsstromende water veroorzaakt wordt, wordt met deze waarden 266 kN. Deze kracht is gelijk aan de toelaatbare kracht, P, die aangrijpt op $^2/_3$ van de diepte d_1.



Figuur 56. De weerstand van de grond recht achter de damwand bij de aangepaste Blum-methode.

De weerstand van de grond wordt nu niet vergroot door de 'zijwaartse wiggen' achter de enkele damwand zoals bij een losse damwand, maar alleen de grond recht achter de enkele damwand mag meegerekend worden (figuur 56). Dit geldt omdat er sprake is van een damwandenrij, die de krachten op moeten nemen en niet meer van een enkele paal. Er moet dus een andere formule dan formule 11 gebruikt worden voor de berekening van t_0 en de inheidiepte, t.

$$P = \gamma' \cdot K_p \cdot \left(\frac{t_0^3}{6 \cdot (h + t_0)} \right) \tag{18}$$

Met h = 4,78 meter en formule 18 wordt de waarde van t_0 gelijk aan 9 meter en dus de inheidiepte, t, gelijk aan 10,8 meter. Voor de berekening van de diepte waarop het maximale moment optreedt, x_M, geldt de volgende formule.

$$x_M = \sqrt{\frac{t_0^3}{3 \cdot (h + t_0)}} \tag{19}$$

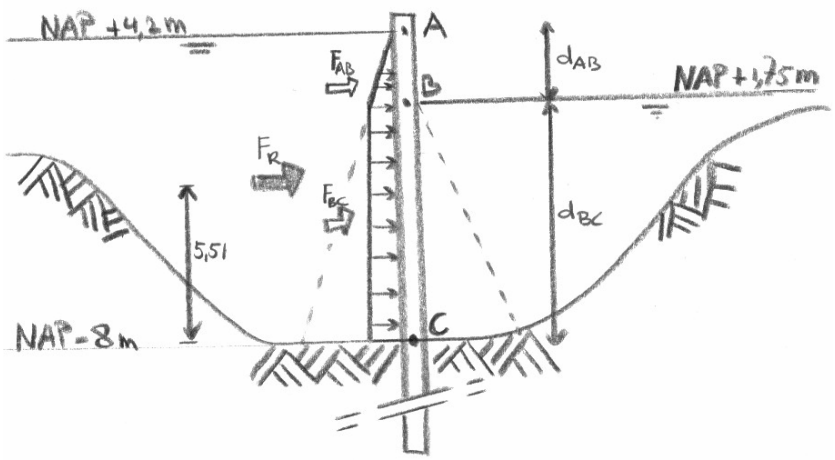
Met behulp van formule 19 wordt nu x_M berekend, dit is de diepte ten opzichte van de bodem van de ontgrondingskuil waar het maximale moment optreedt. Het maximale moment treedt 4,21 meter onder de bodem van de kuil op dus op NAP -5,99 m. Het maximale moment is 2018 kNm (formule 20).

$$M = P \cdot (h + x_M) - \gamma' \cdot K_p \cdot \left(\frac{b \cdot x_M^3}{6} \right) \tag{20}$$

Door toepassing van formule 14 kan nu berekend worden dat een weerstandsmoment van 5606 cm^3 nodig is. Een Larssen 450 profiel (figuur 54) heeft een weerstandsmoment per meter damwand van 7500 cm^3. Deze voldoet dus aan het benodigde moment.
De uitwijking (formule 16) bij toepassing van dit profiel met een traagheidsmoment van 287700 cm^4 per meter damwand is 0,25 meter op de plaats waar de stromingskracht aangrijpt op de damwand.

situatie 4: gesloten wand met water aan beide zijden

Deze situatie is de meest realistische situatie te noemen, omdat deze zeker optreedt in deze vorm na sluiting van de bres. De eerste situatie waarbij maar aan 1 kant van de damwand water staat, zal waarschijnlijk niet voorkomen, omdat er al 3 uur water de polder instroomt en in de ontgrondingskuil en in de polder nog steeds water zal staan. In figuur 57 is de situatie uitgetekend.



Figuur 57. De waterstanden en resulterende waterdrukken bij situatie 4.

De waterstanden aan beide zijden geven een waterdruk tegen de gesloten damwand. De waterstand in de polder is lager als de rivierwaterstand en dus zal er een resulterende kracht op de damwand werken van de zijde van de rivier. Door middel van de volgende formules kunnen de krachten per meter damwand aan de rivierzijde berekend worden.

$$F_{AB} = \tfrac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot d_{AB}^2 \tag{21}$$

en

$$F_{BC} = p_B \cdot d_{BC} = \rho \cdot g \cdot d_{AB} \cdot d_{BC} \tag{22}$$

waarbij

ρ	[kg/m^3]	de soortelijke dichtheid van water (≈ 1000 kg/m^3)
g	[m/s^2]	de zwaartekrachtversnelling (= 9,81 m/s^2)
d_{AB}	[m]	de waterdiepte tussen A en B (figuur 57)
d_{BC}	[m]	de waterdiepte tussen B en C (figuur 57)
p_B	[kPa]	waterdruk in B

De waterdiepte tussen A en B is het verschil tussen het hoogwater peil en de waterstand in de polder en bedraagt 2,45 meter. De waterdiepte tussen B en C is gelijk aan de diepte van de ontgrondingskuil en een waterstand van NAP +1,75 m in de polder en bedraagt 9,75 meter. De kracht F_{AB} is 29 kN per meter damwand en de kracht F_{BC} is 234 kN per meter damwand. De resultante kracht F_R van deze waterdrukken is gelijk aan de som van deze twee krachten. Het aangrijpingspunt van deze resulterende kracht wordt berekend door het momentenevenwicht om punt A te nemen. Voor kracht F_{AB} is de arm gelijk aan een derde van de hoogte d_{AB}. Voor kracht F_{BC} is de arm gelijk aan de som van d_{AB} plus de helft van d_{BC}. Met behulp van het momentenevenwicht blijkt dat de resulterende kracht, F_R, op 5,51 meter van de bodem op de damwand aangrijpt. Door de resulterende kracht, die gelijk is aan de toelaatbare kracht, en door h = 5,51 meter in te vullen in formule 18, wordt voor t_0 een waarde gevonden van 9,2 meter. Dit betekent dat de inheidiepte, t, gelijk is aan 11 meter en de totale lengte van de damwand minimaal 23,2 meter bedraagt.
De diepte waarop het maximale moment aangrijpt (formule 19) is bij een breedte van 1 meter gelijk aan 4,2 meter onder de bodem van de ontgrondingskuil. Het maximale moment zelf is, met behulp van formule 20, gelijk aan 2191 kNm. Door gebruik te maken van formule 14 blijkt het benodigde weerstandsmoment per meter damwand 6086 cm^3 te zijn. Een profiel dat voldoet is het al eerder genoemde Larssen 450 (figuur 54), want dat profiel heeft een weerstandsmoment van 7500 cm^3 per meter wand. Ook wat betreft de uitwijking blijkt dit profiel te voldoen, want op de plaats waar de resultante kracht aangrijpt is de uitwijking gelijk aan 31 centimeter (formule 16).

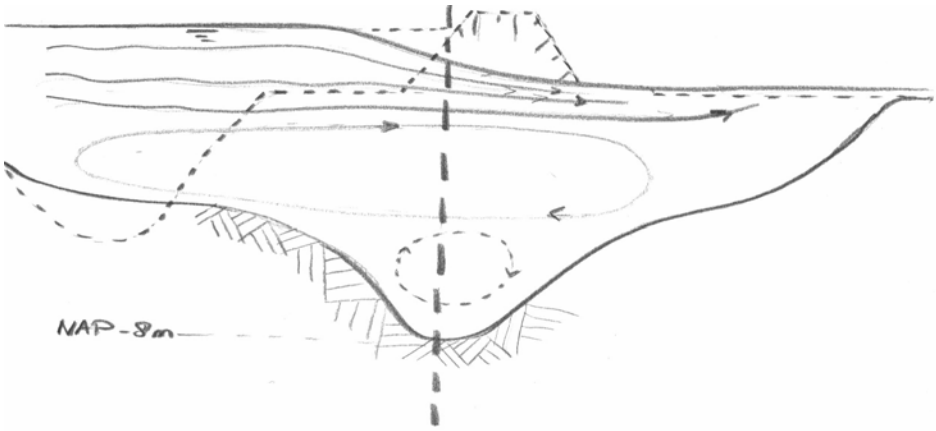
9.4 Conclusies aan de hand van de berekeningen

Situatie 3 en 4 zijn waarschijnlijk de enige 2 maatgevende situaties van de 4 die op zullen treden, maar de andere twee zijn nodig om te kijken wat de grenzen en mogelijkheden zijn van de damwand. Er kan ten eerste geconcludeerd worden dat de ontgrondingskuil achter de damwand niet leeg gepompt mag worden (situatie 1), hoewel dit door het grondwater waarschijnlijk onmogelijk zal zijn. Ten tweede wordt geconcludeerd dat de damwanden niet los van elkaar in het water geplaatst moeten worden (situatie 2). Hoewel de losse damwand in dat geval wel stand zal houden, maar een grote uitwijking zal ondergaan. Voor de krachtsafdracht na het voltooien van de sluiting (situatie 4) blijkt dat een damwand profiel Larssen 450 geschikt is. Maar ook het zwaarste AZ-profiel voldoet bijna, maar door de aangenomen plaatselijke uitschuring tot NAP -8 m is de kracht net te groot. Vooral de aanname van de plaatselijke ontgrondingdiepte die ontstaat bij de laatste damwand is van groot belang voor de benodigde sterkte en verwachte stabiliteit van de gehele damwand. De berekening van de snelheden (paragraaf 9.2 en situatie 2 en 3) die optreden zijn gedaan in de meest ongunstige situatie. Het verval tussen de hoogwaterstand op de rivier en de waterstand in de ontgrondingskuil bepaalt de maximale snelheid, die op zal treden bij deze sluiting. Voor het slagen van de sluiting zijn vooral de diepte en watersnelheid tijdens de uitvoering bepalend. Zoals al eerder opgemerkt werd, is het daarom van groot belang dat er snel begonnen wordt met de sluiting.

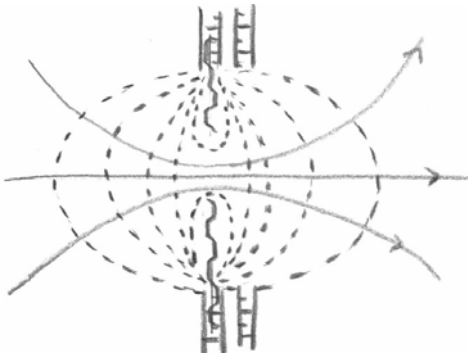
Het ontwerp

De damwandplank krijgt een totale lengte van 23,5 meter, waarvan 11 meter ondergronds zit en 12,5 meter bovengronds. De hoge waterstand op de rivier zal door het boven de grond uitstekende gedeelte tegengehouden worden.
Het profiel dat bij de optredende maatgevende situaties voldeed was het Larssen 450 profiel (figuur 54). In bijlage 11 zijn de afmetingen, het weerstandsmoment en het traagheidsmoment te vinden.

De diepte van NAP -8 meter is de maximale waarde voor de ontgronding, want deze wordt naar verloop van tijd gelimiteerd door de verminderde stroming in de ontgrondingskuil (figuur 58). De ontgrondingskuil ontwikkelt zich dan ook in een smalle diepe strook langs de voet van de damwanden (figuur 59).



Figuur 58. De watersnelheden en neren bij een diepe ontgrondingskuil.



Figuur 59. De dieptelijnen bij de sluiting.

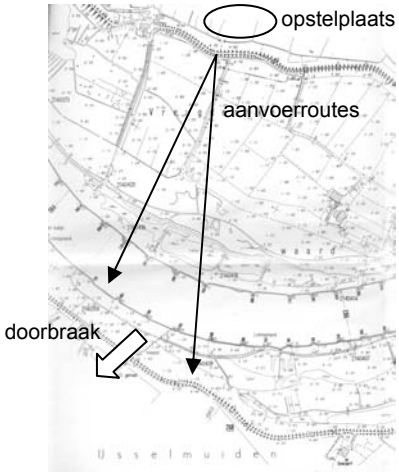
10 Uitvoering van de sluiting bij Zalk

Als vervolg op paragraaf 9.1, waar al een beknopte beschrijving van de uitvoering te vinden was, wordt in dit hoofdstuk de gehele uitvoering uitgewerkt. Er wordt een tijdsplanning (paragraaf 10.2) gegeven, maar ook oplossingen voor verschillende moeilijkheden die tijdens de sluiting aan de orde zullen zijn (paragraaf 10.3). Eerst worden echter in paragraaf 10.1 een aantal kenmerkende eigenschappen van de damwandsluiting toegelicht. In de tweede paragraaf zal een gedetailleerd overzicht worden gegeven van de verschillende handelingen die nodig zijn voor het voltooien van de sluiting en een tijdsplanning. Een afweging hoe een aantal knelpunten bij de sluiting opgelost kunnen worden wordt gegeven in paragraaf 10.3. In paragraaf 10.4 is een schema opgenomen voor de verschillende posities van onder andere de damwanden en de daarbij optredende variabelen zoals de uitwijking, de watersnelheid en de diepte.

10.1 Kenmerken van de uitvoering

aanvoer en distributie van materieel en materiaal

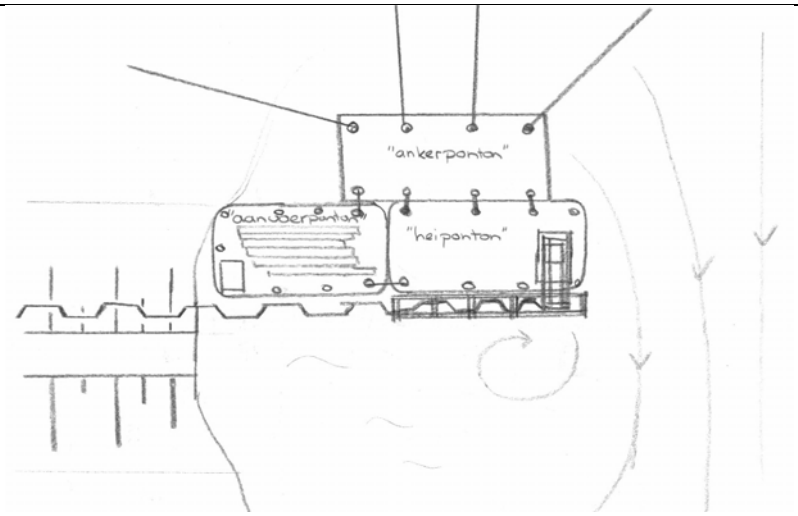
De hele sluitingsoperatie wordt vanaf de andere zijde van de rivier opgezet (figuur 60). Aan deze zijde van de rivier is de dijk nog niet doorgebroken en hoeft niet gevreesd te worden dat het water dat door de bres stroomt het materiaal en materieel zal beschadigen of buiten gebruik zal stellen, zoals aan de zijde van Zalk. De aanvoerwegen aan deze zijde van de rivier zullen namelijk niet meer open zijn na verloop van tijd door de hoeveelheid water die de polder instroomt. Ook zal door de breedtegroei van de bres een aanvoerplaats vlakbij de doorbraak gevaar lopen. De overkant van de rivier is dus de veiligste en makkelijkst te bereiken plaats voor het aanvoeren en opslaan van het materiaal, materieel en personeel. Het is ook de kortste afstand waardoor de aanvoer van nieuw materiaal, mocht er iets vervangen moeten worden, snel kan gebeuren.



Figuur 60. Overzichtstekening voor aanvoer van materieel en materiaal.

vastzetten en gebruik van de pontons

Omdat de dijken aan de zijde van de doorbraak helemaal verweekt zijn en niet gebruikt kunnen worden om het materieel op te stellen, zal er gebruik gemaakt moeten worden van pontons om bij de bres te komen. Het vastzetten van deze pontons door middel van ankers is niet mogelijk omdat de bodem niet genoeg weerstand biedt. Er kan wel gewerkt worden met ankerlijnen. De ankerlijnen hebben vaste punten nodig om aan vast gemaakt te worden, hierbij kan gedacht worden aan buispalen die speciaal voor dat doel in de uiterwaarden worden geslagen. Door een ponton vast te maken aan deze ankerlijnen ontstaat een ankerponton, waaraan het ponton met de heistelling kan aanmeren evenals het ponton dat nieuwe materialen aanvoert (figuur 61).



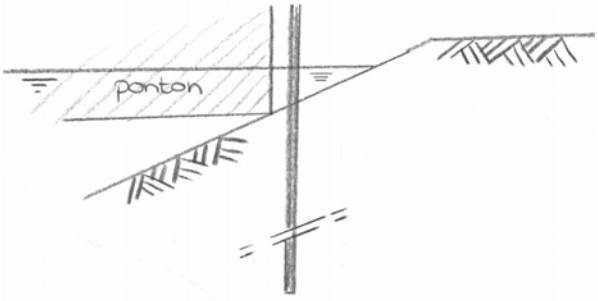
Figuur 61. De koppeling van de pontons bij de bres.

Voor het oversteken van de rivier kan het beste gebruik gemaakt worden van een hulpschip of van een ponton met eigen voortstuwing. In figuur 62 is een voorbeeld van een hulpschip te zien terwijl deze ook de heistelling aan boord heeft.



Figuur 62. Een werkschip met ponton en heistelling (bron: www.vsf.nl).

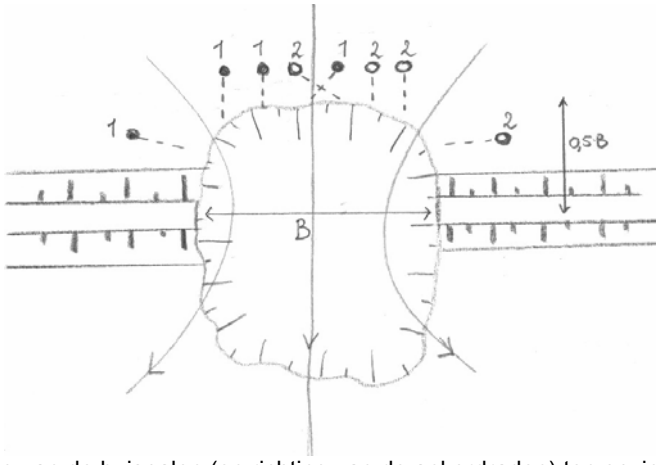
In figuur 62 is te zien dat de heistelling tot ver aan de rand van de pontons kan komen om te heien zonder dat de pontons instabiel worden. De pontons hebben een groot genoeg draagvermogen om deze zware kranen en damwanden te dragen. Ze hebben echter een diepgang van een meter waardoor de damwanden niet precies aan de top van de doorgebroken dijk geslagen kunnen worden. Dit wordt door de flauwe helling, 1:3, van het dijktalud bij de doorbraak bij Zalk nog eens versterkt. De damwanden worden dus op enige afstand van de kruin in het dijklichaam geheid (figuur 63) en vervolgens wordt in de richting van de bres verder gewerkt tot dat de beide heistellingen elkaar bereiken. Omdat door de hoge waterstand het water achter de damwanden langs nog een doorgang kan vinden, moet aan de kopeinden achter de damwanden een sluiting gemaakt worden voor deze zijwaartse instroom. Dit kan al bereikt worden door een stapel zandzakken hier achter te stapelen. Door een waterdicht folie in deze stapel te integreren wordt bereikt dat er geen water meer achter de damwanden om de polder instroomt.



Figuur 63. Het slaan van de damwanden ten opzichte van de top van de dijk.

de positie en grootte van de verankeringsbuispalen

De buispalen worden gebruikt als verankering en moeten de krachten op het ponton op kunnen nemen. Deze krachten zijn de stromingsdruk op het ponton en de krachten om de damwand terug recht te trekken. De buispalen worden in de uiterwaarden geslagen. Er moet geprobeerd worden om ze buiten de invloed van de stroming te zetten die optreedt door de bres heen. Door middel van spudpalen kan het ponton met de heistelling dan ongestoord de palen in de grond slaan. Ondanks de lage stroomsnelheden moet er wel rekening gehouden worden met de ontgronding aan de voet van de buispaal. Het beste kan er gebruik gemaakt worden van 4 palen. Twee palen voor de afdracht van de krachten die in de richting van de bres optreden en twee palen om in de breedterichting van de bres de krachten op te vangen (figuur 64). Deze palen kunnen dan ook gebruikt worden om het heiponton ten opzichte van de bres te manoeuvreren.

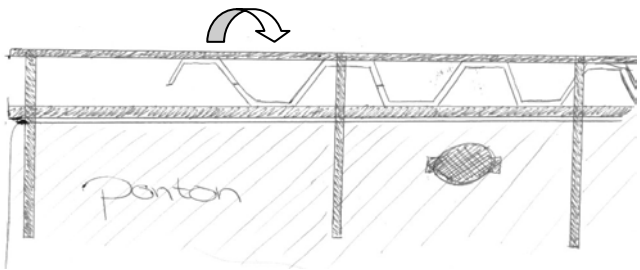


Figuur 64. De plaatsing van de buispalen (en richting van de ankerdraden) ten opzichte van de doorbraak.

Aan de hand van een voorraadlijst van een aantal verhuurders blijkt dat een veel voorradig profiel een buispaal met een diameter van 1420 millimeter en een wanddikte van 19 millimeter. Uit berekening blijkt dat de palen 11 meter in de grond geslagen moeten worden, als ze de stromingsdruk op het ponton en ongeveer 10 meter damwand recht trekken aan moeten kunnen. De uitwijking van de buispalen zal dan ongeveer 16 centimeter zijn. De palen zijn minimaal 16 meter lang, omdat de krachten op 5 meter van de bodem, die op NAP ligt, aangrijpen. De buispalen worden op een minimale afstand van 0,5·B van de bres gezet, waarbij B de breedte van de bres is, omdat daar de invloed van de ontgrondingskuil en stroomsnelheden verminderd is. In het geval van de doorbraak bij Zalk houdt dat een minimale afstand van ongeveer 40 meter in.

het inheien van de damwanden

De damwanden moeten in de bres natuurlijk eerst door het water heen voordat ze in de grond geslagen worden. In paragraaf 10.3 is dit verder uitgewerkt, maar hier zal alvast een korte beschrijving gegeven worden. Doordat de damwanden aan één kant al in het slot zitten van de even daarvoor geslagen damwand heeft hij hier al steun van. De Larssen sloten staan bekend als zeer goed sluitend en ze geven veel stevigheid waardoor niet verwacht wordt dat de damwanden uit de sponningen zullen lopen bij het intrillen. Over de damwanden heen zal een geleidewerk vastgemaakt worden dat over de lengte van het ponton de damwanden zal ondersteunen zodat de nieuw te slaan damwand gelijk aansluit aan de vorige. Ook wordt een draaiing van de damwand, doordat één kant 'los' in de stroming is, voorkomen door dit frame (figuur 65).



Figuur 65. Het frame dat voorkomt dat de damwanden draaien door de stroming.

Doordat de damwanden in één klap door het water heen geslagen worden en dus gelijk in de bodem staan, is er geen verdere ondersteuning nodig. Een ander probleem dat ontstaat bij de voet van de damwanden is de, bijna instantane, erosie. Door opwerveling worden grondkorrels van de bodem meegevoerd en zodoende ontstaat er een ontgrondingskuil. Deze ontgrondingskuil is niet zo groot als hij zou zijn als er sprake zou zijn van een losse damwand in plaats van een damwandenrij. Voor de veiligheid is echter een diepte van NAP -8 m aangenomen als de laatste damwand wordt geslagen en uit de berekeningen blijkt dat de damwand dan nog stabiel genoeg is. De diepte van de plaatselijke ontgrondingskuil zou ook anders kunnen zijn als de twee damwanden niet precies in het midden elkaar zouden ontmoeten, maar meer naar een van de zijkanten van de bres. Dit betekent echter wel dat één van de zijkanten langere tijd blootstaat aan de stroomsnelheden in het gat, waardoor de ontgrondingsdiepte toch nog rond de NAP -8 m is. Terwijl aan de andere zijde veel meer damwanden geslagen moeten worden waardoor de ontgrondingskuil daar mogelijk ook dieper is dan bij het eindigen in het midden. De kosten van de damwanden blijken veel uit te maken tussen de leveranciers onderling, maar ten opzichte van de kosten van het niet sluiten van de bres, stelt dat niets voor.

waterdichtheid

Om de damwandenrij waterdicht te maken moet gekeken worden naar de twee belangrijkste plekken waar lekken op zouden kunnen treden. De eerste plaats en tevens het grootste lek (als hij optreedt) is het probleem dat de laatste damwand niet precies past. Dit zou namelijk betekenen dat er een gat in het midden van de damwandenrij zou zijn van een aantal meter breed. Zou de laatste damwand helaas niet passen, dan moet er een oplossing worden gezocht (paragraaf 10.3).
De tweede plaats waar lekken op kunnen treden zijn de sloten van de damwanden. Ondanks dat de Larssen sloten bekend staan als goede sluitingen kan er een damwand uit zijn slot lopen. Er moet op dat moment dan besloten worden of de damwand dan beter getrokken kan worden (figuur 66) en opnieuw geplaatst moet worden of dat de opening zo klein zal zijn dat het water er enkel doorheen zal 'sijpelen'. Deze gaten tussen de sloten kunnen later na het voltooien van de sluiting gedicht worden ook als zij onder de grond zitten. Verschillende funderingsbedrijven hebben zich gespecialiseerd in het monitoren of een damwand uit zijn slot loopt en het herstel daarvan.



Figuur 66. Het trekken van een damwand vanaf een ponton (bron: www.vsf.nl)

veiligheid tijdens de uitvoering

De veiligheid kan tijdens de uitvoering op twee manieren worden opgevat. In eerste instantie moet natuurlijk het varen op rivier en het gebruik van de dijk aan de andere zijde van de rivier niet leiden tot een dijkdoorbraak aan die zijde. Door gebruik te maken van rijplanken en verstevigingen kan dit echter voorkomen worden. Het tweede geval van onveiligheid ontstaat bij het werken op de pontons. Het materieel moet goed vastgezet worden aan de pontons. Deze zijn stabiel en kunnen niet omslaan, terwijl bij het gebruik van een losstaande kraan meer kans op het omvallen van de kraan is. Het personeel dat aan het werk is op de pontons loopt geen groot gevaar maar voorzichtigheid blijft wel geboden. Als iemand in het water valt, zal hij waarschijnlijk aan de kant kunnen komen omdat de watersnelheden rond de pontons niet zo heel hoog zijn. Valt die persoon echter aan de voorkant van de pontons in het snelstromende water dat door de bres stroomt dan moet hij niet tegen de

damwanden aan geslagen worden, omdat dan zijn kansen snel afnemen. Als hij door het gat heen is zonder in aanraking met de damwanden te zijn geweest, kan hij vrij snel op eigen kracht terug naar hogere delen lopen, want de waterstand verderop in de polder is laag. Op t=3 uur staat er bijvoorbeeld pas 15 centmeter water. Een ander gevaar voor het personeel is het vallen van een damwand als deze opgetild wordt om geslagen te worden. Dit gevaar is niet anders dan bij het trillen van damwanden in den droge en kan voorkomen worden door een goede controle op het vastmaken van de damwand bij het opheffen.

10.2 Het uitvoeringstijdschema

In de beschrijving van de doorbraak bij Zalk door de hoofdingenieur, die persoonlijk aanwezig was op het moment van doorbreken, blijkt dat in 1926 al vrij snel de hulp op gang kwam, ondanks dat er toen nog geen mobiele telefoons en dergelijke bestonden. Voor het sluiten van het gat hadden ze echter geen andere oplossing dan wachten. Tegenwoordig kunnen de eerste contacten veel sneller gelegd worden, door onder andere de mobiele telefoons, maar ook door de verbeterde noodplannen. Ten tijde van een hoogwater zijn de dijkgraven en waterschappen in de hoogste staat van paraatheid en ze zullen dan ook binnen een half uur de eerste contacten hebben gemaakt voor de aanvang van de sluiting. (t=30 minuten)

Omdat de rijplaten, shovels en een aantal kleine mobiele kranen in elk gebied in grote aantallen aanwezig zijn, kunnen deze binnen een uur aan het werk zijn om een ruimte in te richten aan de andere zijde van de rivier ten opzichte van de doorbraak voor de aanvoer en opslag van al het materiaal en materieel (figuur 60). (t= 60 minuten) Ook de dijk aan deze zijde van de IJssel is verzadigd met water en moet beschermd worden door middel van rijplaten. Door vlakbij een oprit van de normale dijkweg de opstelplaats te maken kan het materiaal gemakkelijk op de dijk gebracht worden. Zodra de pontons ter plaatse zijn, worden deze te water gelaten. (t = 90 minuten) De pontons zijn met de heistellingen de belangrijkste schakel in het geheel en deze zullen dus als eerste gemobiliseerd moeten worden. Mogelijkerwijs kan al besloten zijn om deze paraat te laten staan op het moment dat voorspeld wordt dat er een hoogwater op zal treden en dus een gevaar voor een dijkdoorbraak ontstaat.

Zodra de pontons te water zijn gelaten worden de heistellingen op de pontons gereden. Hiervoor kunnen waarschijnlijk gewoon rijplaten gebruikt worden, omdat de dijk in dit geval hoger is dan de waterstand op de rivier. Als dit niet zo is, moet er gekeken worden of de heistellingen door middel van een (grote) kraan op de pontons getild moeten worden. De heistelling die als eerste gereed is, zal alvast naar de overkant gevaren worden, nadat eerst een aantal buispalen op het ponton zijn geladen. (t = 120 minuten) Op deze wijze kan de heistelling alvast beginnen met het heien van de eerste ankerbuispalen terwijl de tweede heistelling op een ander ponton wordt gereden en bevestigd.

De ankerbuispalen worden in de ondiepe uiterwaarden geslagen op een afstand van de bres, waar de stroomsnelheid niet te groot is omdat ten eerste de ponton door de bres gesleurd zou worden. Ten tweede moet de erosie aan de voet van de ankerpaal niet te groot worden, waardoor deze instabiel zou kunnen worden. Op een afstand van een half maal de breedte van de bres kunnen de palen geslagen worden, omdat hier de invloed van de bres klein zal zijn. Voor het stabiel en op zijn plaats houden van de heiponton tijdens het slaan van de ankerbuispaal kunnen spudpalen gebruikt worden. Er wordt vanuit gegaan dat er 4 buispalen geslagen moeten worden door elk van de heistellingen. Hier wordt ongeveer drie kwartier over gedaan. (t = 165 minuten) Na het slaan van de eerste buispalen kan het ankerponton vastgemaakt worden aan de ankerlijnen en de buispalen. Na het verbinden van de laatste ankerlijnen kan het ankerponton gelijk richting de zijkant van de bres worden gemanoeuvreerd. De ponton met heistelling wordt vastgemaakt aan dit ankerponton en een aanvoerponton voert de benodigde damwanden aan vanaf de overkant waar de opslag is. (t = 180 minuten = 3 uur)

Omdat de eerste damwanden in het kopeind van de dijk worden geslagen hoeven deze nog niet zo lang te zijn als de damwanden die als allerlaatste straks geplaatst zullen worden in het midden van de bres. Deze damwanden worden vrij snel in de dijk getrild door hun kortere lengte. Achter deze eerste damwanden wordt een stapeling van zandzakken gemaakt die het water tegen moet houden die achter de damwanden om zou stromen (figuur 63). Er wordt vanuit gegaan dat er voor ongeveer 10 meter aan damwand in de kopeinden geslagen moet worden. (t = 200 minuten) Bovenop dit begin

wordt het frame gelegd dat er voor moet zorgen dat het heien makkelijker zal gaan. Dit geleideframe zorgt er namelijk voor dat de damwand niet zal roteren terwijl hij in de kraan hangt om in de grond getrild te worden en het frame maakt het tevens mogelijk om de plank makkelijk in het slot te zetten van de vorige damwandplank. (t = 210 minuten) Dit frame steunt in principe op de damwanden maar kan ook gebruikt worden om het ponton te koppelen met een punt aan de 'dijkzijde', omdat tot nu toe enkel de ankerbuispalen voor de verplaatsing gebruikt werden.

Als de damwand voorbij de zijkanten van de bres steekt zal voor het eerst de stroming invloed gaan hebben op het heien. Belangrijkste invloeden zijn de erosie aan de teen van de damwand en de mogelijke beweging die de damwand gaat maken door de belasting van het water. Omdat de erosie aan de teen van de damwand naarmate de sluiting vordert toeneemt, kan er eventueel in het begin nog gewerkt worden met andere lichtere profielen damwanden, maar naarmate het midden wordt genaderd en dus het diepste punt van de bres, moet het zwaarste en langste profiel gebruikt worden (paragraaf 9.3). De draaiing van de damwand wordt behandeld in paragraaf 10.3 bij de knelpunten van de sluiting.
Langzaamaan zal de damwandenrij zich vanaf beide zijden naar het midden van de bres bewegen. De heistellingen staat vast op hun pontons en deze zullen door middel van het veranderen van de positie van het ankerponton ten opzichte van de bres elke keer een nieuwe damwandplank in de rij slaan. Dit proces van ponton verplaatsen, frame verleggen, nieuwe damwand in de stelling hijsen, damwand in slot zetten en intrillen kost natuurlijk meer tijd dan normaal bij het heien van een damwand op het droge. Normaal wordt er 25 meter damwand geslagen in 1 uur. In het geval van deze sluiting zal er gemiddeld echter 10 meter damwand per uur geslagen worden per heistelling. Een heistelling moet de helft van de breedte van de bres afleggen en dat komt neer op ongeveer 40 meter en dus 4 uur. Omdat er bij de voorbereiding al 3,5 uur nodig was, wordt de tijdslimiet van 6 uur niet gehaald. Maar dit wil niet zeggen dat de sluiting mislukt is. Omdat de breedte van de bres kleiner wordt gedurende het sluiten, is ook de instroom kleiner, terwijl de tijdslimiet gesteld werd door de wateroverlast door een bres die 6 uur lang ongestoord water doorliet. Dus als de laatste damwand geslagen wordt in de laatste opening op een later tijdstip dan eigenlijk als limiet was gesteld, blijkt dit voor minder overlast gezorgd te hebben. Het criterium voor het vastzetten van de kopeinden van de dijken en daarmee het beperken van de breedtegroei van de bres is van veel groter belang. De laatste damwand blijkt echter wel een van de knelpunten te zijn voor de sluiting en zal in de volgende paragraaf behandeld worden.

Als een damwand wordt misgeslagen, kan dit worden gesignaleerd door slotverklikkers te gebruiken. Al is het volgens de brancheorganisatie bijna onmogelijk dat een slot kapot gaat. Zou het echter toch optreden dan zal de damwand getrokken moeten worden en een nieuwe damwand ingeheid worden. Dit zou natuurlijk wel extra vertraging opleveren. Een ander probleem zou kunnen zijn dat de damwand wel in het slot zit, maar dat er water doorheen sijpelt. Deze gaten kunnen op verschillende wijze gedicht worden, bijvoorbeeld door het injecteren van een verdichtingsmiddel.

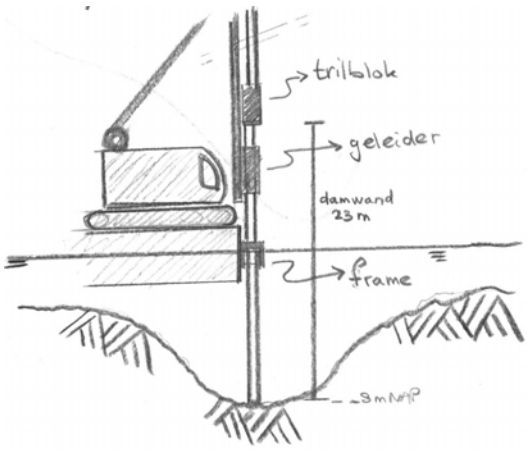
Nadat de sluiting voltooid is kan de damwand opgenomen worden in de definitieve dijk. Er kan al gelijk begonnen met werkzaamheden als het nog hoogwater is, maar waarschijnlijk is het verstandiger om te wachten tot het hoogwater afneemt en eerst goed bepaald kan worden wat de schade is. Het nieuwe profiel zal aangevuld moeten worden tot het juiste profiel van de originele dijk, maar eerst moet natuurlijk de ontgrondingskuil en de voor de dijk gelegen kolk gedempt worden. Dit kan gebeuren met zand dat aangevoerd wordt, maar misschien kan er nog voor een deel gebruik gemaakt worden van het zand dat door de doorbraak de polder ingestroomd is. Waarschijnlijk zal dit echter vervuild zijn of zo verspreid zijn dat dit niet meer bruikbaar is. Het dijkprofiel zal vanaf de zijkanten van de voormalige bres aangevuld worden naar het midden toe. Zodoende ontstaat er een goede aansluiting met het ongeschonden deel van de dijk. Als laatste wordt de dijkbekleding en de aansluiting met de damwanden aangebracht. Ondertussen kan de rotzooi en wateroverlast in de polder en uiterwaarden opgeruimd worden.

10.3 Uitvoeringsknelpunten

Er zijn drie knelpunten bij de uitvoering die verder uitgewerkt zullen worden en dat zijn
- de bewegingsvrijheid van de damwand tijdens het heien
- de doorbuiging van de bovenzijde van de damwand tijdens het heien
- de sluiting van de laatste opening.

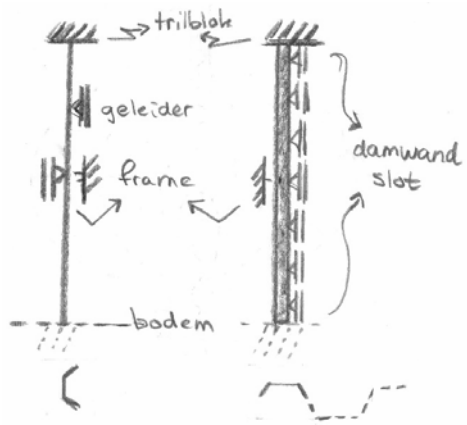
De bewegingsvrijheid van de damwand

De damwandplank moet door het water heen geslagen worden voordat hij in de grond komt en stabiel zal staan (figuur 67). Het zou kunnen zijn dat de damwand in dat ogenblik zou kunnen vervormen of verdraaien ten opzichte van de damwandenrij en dus verkeerd in de ondergrond zou komen te staan. Waardoor de volgende damwand niet zou passen.



Figuur 67. De damwand en de plaatsen waar hij 'vast' zit.

Zoals in figuur 67 te zien is, wordt de damwand ingeklemd in het heiblok. Het geleideframe zorgt ervoor dat de damwand niet verdraait ter hoogte van het ponton en tevens wordt hij aan de zijkant vastgehouden door het slot van de damwand ernaast (figuur 68).



Figuur 68. Schematisatie van de plaatsen waar de damwand 'vast'zit.

De vervorming die bekeken moet worden is opgebouwd uit twee delen. Ten eerste de vervorming door buiging. De stroming die langs de damwand gaat, oefent een kracht uit op de damwand en zal proberen deze te buigen. Door het grote traagheidsmoment van een Larssen 450 profiel blijkt deze buiging echter maar zeer klein te zijn. Zelfs als de stromingskracht, die optreedt over de gehele lengte van de damwand, geconcentreerd aan zou grijpen in het onderste punt van de damwand blijkt er maar een vervorming van 11 mm te zijn.
Het tweede gedeelte van de vervorming ontstaat door de rotatieruimte in het Larssen slot. Volgens de normen die gesteld worden bij deze damwanden zou er ongeveer 3° verdraaiing op kunnen treden. Dit zou betekenen dat bij een breedte van 708 mm (Larssen 450 profiel) de uitwijking aan de losse zijde 37 mm zou zijn. Maar dit treedt door de werveling van het water om het profiel niet steeds naar dezelfde zijde op. De damwand zal door de werveling zowel de ene kant als de andere kant opdraaien gedurende het aanbrengen en daarbij ook aangezet worden door de 'inklemming' van het heiblok en het frame. Dit heeft tot gevolg dat er gemiddeld een rechte damwandenrij geslagen wordt. Er ontstaat dus geen boog in de sluiting.

Doorbuiging aan de bovenzijde van de damwand tijdens het heien

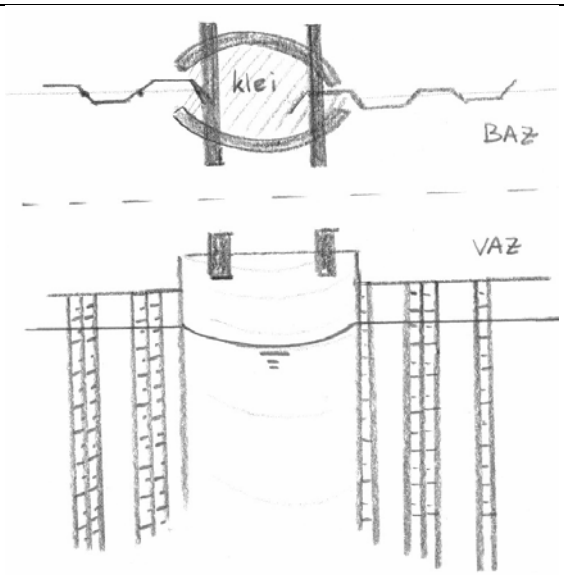
Uit de berekening in hoofdstuk 9 blijkt dat de damwand zal gaan doorbuigen door de waterdruk. Omdat de damwanden niet in de sloten geslagen kunnen worden als de damwand wegbuigt van het ponton zijn er verschillende mogelijkheden om te voorkomen dat er een te grote doorbuiging optreedt.

- extra versteviging aan de achterzijde van de damwandenrij door een schoorpaal er schuin achter te slaan.
- een ander steviger profiel gebruiken waardoor de doorbuiging minder groot is.
- de bovenzijde van de damwandenrij aan het ponton bevestigen en dan naar het ponton toe trekken om er voor te zorgen dat de bovenzijde recht is en de damwand in het slot geplaatst kan worden.

De versteviging door middel van schoorpalen is erg lastig omdat de damwanden eerst geslagen worden en doorbuigen voordat de schuine schoorpalen erachter geslagen worden. Ook moeten de schoorpalen aan de damwanden bevestigd moeten worden. Deze oplossing valt dan ook af.
Een profiel dat gebruikt kan worden voor de sluiting waarbij de doorbuiging zeer beperkt zal blijven is een HZ C1 of een HZ C23 profiel. Dit is geen damwand profiel meer, maar een HZ-profiel, waarbij H-profielen rechtstreeks naast elkaar worden ingeheid. Doordat deze een zeer hoge weerstand hebben, treedt er maar een doorbuiging op van 6 centimeter. Nadeel is echter dat ze niet standaard leverbaar zijn, waardoor het langer duurt voor ze gebruikt kunnen worden, maar ze zouden bijvoorbeeld wel prefab speciaal voor noodsluitingen gemaakt kunnen worden. De weerstand tegen verdraaiing is ook groter, maar door de H vorm zal ook de stroming meer grip op het profiel hebben. Door de langere levertijd valt deze oplossing voor deze case af.
Door een tiental meter van de damwandenrij naar het ponton toe te trekken, kan de nieuwe damwand in het slot worden gebracht en verder geheid worden. Uit berekening blijkt dat er een kracht met de grootte van ongeveer 150 kN per meter damwand nodig is om vervorming door de waterdruk op te heffen. Verwacht wordt dat deze tegenkracht in realiteit lager zal zijn, omdat alleen de bovenzijde van de damwanden recht hoeft te zijn en niet de gehele vervorming ongedaan gemaakt moet worden. Doordat er al een geleideframe gebruikt wordt, kan dit frame gebruikt worden om het laatste gedeelte van de damwanden recht te trekken. Ook zorgt deze oplossing ervoor dat het ponton statisch bepaald wordt en dus plaatsvast zal zijn. De extra kracht die dit rechttrekken van de damwanden op de ankerbuispalen uitoefent, kan door deze palen opgenomen worden. Ook de ankerlijnen kunnen deze extra belasting aan.

sluiting van de laatste opening

Als van beide zijden de damwanden geslagen worden, komen ze elkaar in het midden van de bres tegen. Het slaan van een damwand die precies past in de opening is waarschijnlijk niet mogelijk. Anders zou er nog met behulp van een pasplank de sluiting compleet gemaakt kunnen worden. Een pasplank is een damwand waarbij de breedte aangepast wordt. Grootste nadeel hiervan is dat dit in de fabriek moet gebeuren.
Een damwand voor het gat slaan, waardoor deze aansluit tegen de damwanden aan de zijkanten en zo alles afdicht lijkt in eerste instantie een zeer goede oplossing. Maar doordat niet zeker is dat de twee damwanden aan weerszijden niet gespiegeld staan of op een lijn liggen, valt deze optie af.
Ook het inheien van een buispaal in het midden valt af. Deze zou wel passen en aansluiten op de damwanden als ze niet mooi op een lijn liggen, maar door de grotere stijfheid zal hij niet de buiging van de damwanden volgen, waardoor er gaten ontstaan.
De beste oplossing blijkt het slaan van twee halve buispalen te zijn, aan elke zijde van de damwanden een. Door deze met elkaar te verbinden en te vullen met klei, ontstaat er een dichte sluiting (figuur 69). De verschillende buiging van de halve buispalen en de damwanden is dan niet erg, omdat ze overal contact maken hetzij rechtstreeks hetzij door de ertussen geperste klei. Eventueel kunnen de halve buispalen naar elkaar toe getrokken worden om een grotere druk en betere aansluitingen te krijgen tussen de klei en de damwanden.



Figuur 69. De sluiting van het laatste gat door twee met elkaar verbonden halve buispalen gevuld met klei.

10.4 Overzicht sluitingsvariabelen

In dit schema (tabel 7) zijn de volgende variabelen opgenomen die een rol spelen bij de sluiting met een Larssen 450 profiel (situatie 1 tot en met 5) en een verankeringsbuispaal (situatie 0).

- positie
- uitwijking
- watersnelheid
- ontgrondingsdiepte
- lengte van de damwand

Tabel 7. Overzicht van verschillende sluitingsvariabelen gedurende de sluiting.

	positie	uitwijking	watersnelheid	diepte	totale lengte
0	uiterwaarden	16 cm	0 - 1 m/s	NAP +0 m	17 m
1	in de dijk	0	0 m/s	(NAP +3,3 m)	15 m
2	net buiten de dijk	0	4 m/s	NAP -3 m	15 m
		↓	↓	↓	↓
		11 cm	↓	NAP -5 m	18,4 m
3	verder gevorderd	↓	↓	↓	↓
		22 cm	6,1 m/s	NAP -7 m	21,6m
		↓	↓	↓	↓
4	voorlaatste damwanden	25 cm	6,9 m/s	NAP -8 m	23,5 m
5	gesloten damwandenrij	31 cm	0 m/s	NAP -8 m	23,5 m

Situatie 0

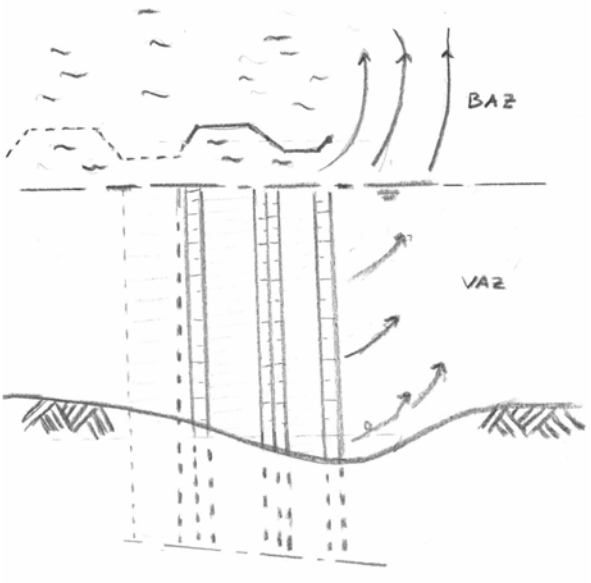
De buispalen worden in de uiterwaarden geslagen en op voldoende afstand van de bres om een lage stroomsnelheid door middel van spudpalen het hoofd te kunnen bieden. Er zal zich aan de voet van de ankerbuispalen een ontgrondingskuil vormen, die zich verdiept tot NAP niveau. Doordat de kracht van het water op het ponton en de kracht die nodig is om een gedeelte damwandenrij rechter te trekken, via de ankerlijnen door de buispalen overgebracht moeten worden naar de ondergrond ontstaat een uitwijking van 16 centimeter. De buispalen hebben een totale lengte van 17 meter, waarvan minimaal 5 meter boven de grond uitsteekt.

Situatie 1

De damwand wordt in de dijk geslagen om er voor te zorgen dat de breedtegroei van de bres beperkt wordt. De uitwijking en watersnelheid zijn gelijk aan nul. De lengte van de damwanden kan beperkt worden, maar aan te raden is om in ieder geval dezelfde profielen en lengte aan te houden als gebruikt zullen worden juist in de bres naast het kopeinde van de dijk.

Situatie 2 tot en met 4

De damwand komt nu net buiten de dijk uit in de stroming en wordt daarna verder geslagen naar het midden van de bres. De uitwijking gaat van nul naar ongeveer 25 centimeter door de stroming door de laatste openingen. De snelheid van het water ontwikkelt zich van de ongestoorde situatie van 4 m/s naar ongeveer 7 m/s. De diepte van de bres gaat van NAP -3 meter naar NAP -8 meter door de ontgronding aan de voet van de damwand (figuur 70).



Figuur 70. Erosie aan de voet van de damwand.

Voor de lengte van de damwand kan langzaam een grotere maat worden gepakt. Omdat in het begin, net naast de dijk de diepte maar NAP -3 m is, is hier nog niet de grootste lengte nodig (bijlage 12). Het lengteprofiel ontwikkeld zich van 15 meter naar 23,5 meter. De damwanden met een lengte van 23,5 meter zitten 11 meter in de grond.

Situatie 5

Doordat de damwandenrij nu gesloten is, is de snelheid natuurlijk nul geworden. De uitwijking is gelijk aan 31 cm voor de damwanden. En deze zitten 11 meter in de grond en er is een ontgrondingskuil met een bodemniveau van NAP -8 meter. Na de voltooiing van de sluiting kan begonnen worden met het dempen van deze ontgrondingskuil en het opnemen van de damwanden in de nieuwe definitieve dijk.

11 Evaluatie andere mechanismen en dijken

In dit hoofdstuk staat de evaluatie van de toepassing van damwanden bij het optreden van andere bezwijk- en faalmechanismen (paragraaf 11.1), bij andere rivieren en de zee (paragraaf 11.2). In paragraaf 11.3 worden een aantal algemene conclusies gegeven die van toepassing zijn bij een (nood)sluiting.

11.1 Evaluatie andere mechanismen

In paragraaf 5.3 werd geconcludeerd dat het ontstaan van een bres telkens anders is en dit heeft ook zijn weerslag op de toepassing van damwanden als noodsluiting bij andere faal- en bezwijkmechanismen. Een damwand zal niet geslagen worden als er bijvoorbeeld golfoverslag of overlopen optreedt, maar pas toegepast worden als er een bres ontstaat die zich verdiept en een gat in de dijk slijpt. Voor het optreden van de inleidende faalmechanismen moeten de oplossingen gebruikt worden zoals die uiteen zijn gezet in paragraaf 5.1. Omdat vantevoren al bekend is, door de inleidende bezwijkmechanisme(n), waar de dijk verzwakt raakt en mogelijk gaat bezwijken, moet er preventief een oplossing worden toegepast. In een dergelijk geval kan niet gewacht worden tot het daadwerkelijk bezwijken plaats vindt. De vraag is dus of een noodsluiting nodig is.
Als een dijk in zijn geheel afschuift (mechanisme D) gebeurt dit meestal zonder waarschuwing en zal het te lang duren voor de noodsluiting met damwanden gemobiliseerd is en het materieel ter plekke is. Tijdens de uitvoering kunnen in werkelijkheid verschillende handelingen fout gaan in vergelijking tot de uitgewerkte (ideale) situatie waardoor de sluiting mislukt.

11.2 Evaluatie andere rivier- en zeedijken

Belangrijkste vraag bij deze evaluatie is of de noodsluiting door middel van damwanden nu bij elke dijk en onder alle omstandigheden toe te passen is. De methode is technisch toepasbaar als er genoeg water staat, geen grote golfslag optreedt, de ondergrond niet te slap is en er damwanden beschikbaar zijn die sterk genoeg zijn om weerstand te bieden aan de optredende krachten. De grote vraag is echter of de damwanden ingezet moeten worden omdat er grote onzekerheden zijn in de randvoorwaarden en omstandigheden bij elke dijkdoorbraak. De ideale situatie zoals geschetst in dit rapport zal waarschijnlijk niet optreden, omdat niet alle gegevens beschikbaar zijn tijdens de doorbraak, waardoor de sluiting onmogelijk wordt.

Verder zijn de waterdieptes, het verval en de snelheden bij de andere (grotere) Nederlandse rivieren zo veel groter dan de waarden die optraden bij de case situatie, dat de enkele damwanden hier niet zullen voldoen. Voor zeedijkdoorbraken komt hier nog eens de telkens kerende stroming, de golfslag, de grotere invloed van de wind en natuurlijk de effecten van het zoute water bij. Dit zout heeft geen weerslag op de sterkte van de damwanden bij het aanbrengen. Maar bij het gebruiken van de damwanden in de definitieve dijk, zoals ook de bedoeling was bij de case, kan dit leiden tot milieuverontreiniging en sterkteverlies door corrosie.

11.3 Algemene evaluatie: conclusie en aanbevelingen

conclusie

Gesteld kan worden dat door de grote onzekerheden in de randvoorwaarden, tijdsplanning en uitvoering de noodsluiting geen oplossing is voor een dijkdoorbraak. De noodsluiting zou enkel toegepast kunnen worden als op voorhand al bekend is waar de zwakke plek in de dijk zit en alle beschikbare materialen en materieel al aangevoerd zijn. In deze situatie kan echter een preventieve maatregel ter voorkoming van de doorbraak beter worden toegepast dan af te wachten tot de dijk bezwijkt alvorens de doorbraak weer proberen te sluiten.

De noodsluiting met damwanden blijkt voor een plotselinge, onverwachte doorbraak ook niet toepasbaar. Het tijdsbestek waarbinnen de noodsluiting door middel van het toepassen van damwanden plaats kan vinden is gebaseerd op de meest ideale situatie waarbij niets misgaat. In de praktijk zal echter blijken dat dit niet haalbaar is.

Door de dijkverzwaringen, dijkverhogingen en verbredingen van het rivierbed, die de laatste jaren toegepast zijn op het rivierengebied, zullen de hoogwaters de komende jaren minder overlast veroorzaken dan afgelopen jaren. Dit houdt echter niet in dat men kan stoppen met plannen maken of onderzoek doen naar mogelijke doorbraken. De onveilige situaties zoals vroeger voorkwamen met als voorbeeld de Zalk-case, waarbij de dijk iets hoger werd gemaakt dan de hoogste bekende waterstand, zullen echter niet meer voorkomen. Ook is de kwaliteit van de werkzaamheden aan dijken verbeterd door het gebruik van moderne materialen en materieel.

aanbevelingen

Voor elke dijk moet door het waterschap of het Rijk een noodplan opgesteld worden wat er moet gebeuren als dat gedeelte van de dijk beschadigd wordt of doorbreekt. Voor de dijken langs de grote rivieren is dit al gedaan, maar het is van groot belang dat waterschappen dit ook doen voor boezemkades en kleine keringen. Het beste zou zijn als er in dit stadium al gekeken wordt naar de mogelijkheden van preventieve noodmaatregelen of zelfs een noodsluiting bij een doorbraak. Dit houdt in dat er onderzoek moet worden gedaan naar onder andere de ondergrond en de opbouw van de dijk en de beschikbaarheid van materiaal en materieel.

Door middel van secundaire waterkeringen (compartimenteringsdijken) moet de polders opgedeeld worden in kleinere compartimenten. Voordeel hierbij is dat de overstroming misschien maar beperkt blijft tot een klein gebied. De vertraging die ontstaat doordat het eerste gedeelte al het water opvangt geeft de mensen in het hele gebied meer tijd om te evacueren. Het nadeel is dat in het compartiment dat als eerste gevuld wordt, de veiligheid afneemt voor de mensen die daar zijn.

Literatuurlijst

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de in dit verslag gebruikte boeken en dictaten. Ook de boeken die wel gelezen zijn, maar waar niet uit geciteerd wordt, worden hier vernoemd, omdat ze mede bijgedragen hebben aan de beeldvorming van het probleem en de ideeën voor mogelijke oplossingen. Daarna worden verschillende artikelen weergegeven en als laatste de gebruikte websites.

boeken en dictaten

Agema, J.F. et all., (1982). *Waterkeringen*, dictaat bij het vak f11, Technische Hogeschool Delft, Afdeling der Civiele Techniek, vakgroep Waterbouwkunde, Delft, 4e druk 1986.

Battjes, J.A., (1991). *Vloeistofmechanica, handleiding college b71*. Delft, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek.

Battjes, J.A., (2000). *Vloeistofmechanica, collegehandleiding Ctme2100*. Delft, Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, sectie Vloeistofmechanica.

Bouwdienst Rijkswaterstaat, Provincie Overijssel, Stuurgroep Ramspol, (1995). *Projectnota/MER keersluis Ramspol*, Provincie Overijssel, Zwolle.

Buter, A., (1978). *De Groene Vallei, stad en land aan de IJssel*. Den Haag, Voorhoeve.

Centrum voor Onderzoek Waterkeringen, opgesteld door P. van Dam, herzien en aangevuld door J.A. Beijersbergen (1981). *Dijkdoorbraak Zalk 8 januari 1926*. S-80.056.

Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving (CUR), Nederlandse Geotextielorganisatie, Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouw (DWW), (1993). *Sand Closures*, Balkema, Rotterdam, ISBN 90.5410.143.1.

Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving (CUR), Nederlandse Geotextielorganisatie, Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouw (DWW), (1996). *Geokunstoffen en rivierdijkverbeteringen*, CUR, Gouda, ISBN 90.376.0072.7

Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving (CUR)162, (2002). *Construeren met grond, grondconstructies op en in weinig draagkrachtige en sterk samendrukbare ondergrond*. College Ctco5331 (II), Grondconstructies en Grondkerende constructies, Delft, Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, Waterbouwkunde, sectie Geotechniek.

D'Angremond, K en van Roode, F.C., (2001). *Breakwaters & Closure dams, Engineering the interface of soil & water 2*. Delft, Delft University Press, ISBN 90-407-2127-0.

Dekker, J. en Janse, E., (1993). *Toetsing uitgangspunten Rivierdijkversterkingen. Deelrapport 3: Constructief ontwerp*, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Den Haag.

Den Adel, H., Van, M.A., Provoost, Y.M., (1995). *Veiliger de winter in?, Beoordeling van de rivierdijken voor het winterseizoen 1995-1996*. Delft, Grondmechanica Delft in opdracht van Dienst Weg- en Waterbouw, W-DWW-95-352 en CO-362970/15.

Departement van waterstaat, (1926). *Verslag van het voorgevallene tijdens het Hooge opperwater op de Nederlandsche rivieren in den winter van 1925 op 1926.* 's-Gravenhage, Algemeene Landsdrukkerij.

De Rijke, W.G., et al. (i.o.v. TAW, Werkgroep A, belasting en bekleding), (1992). O*vergangsconstructies in dijkbekledingen: bundeling van huidige kennis*, RWS/DWW/TAW-A2.

Dieteren, J.M.L. en Pottinga, P.H., (1988). *Stroomgatontwikkeling tijdens dijkdoorbraak*, TU Delft, Faculty of Civil Engineering and Geosciences.

Gottschalk, M.K., (1977). *Stormvloeden en rivieroverstromingen in Nederland. Dl. 3. De periode 1600-1700*. Assen, van Gorcum.

Hoekman, W., (1959). *Kampen, stad aan de IJssel*. Kampen, J.H. Kok.

Huis in 't Veld, J.C., (1987). *The Closure of tidal basins: closing of estuaries, tidal inlets and dike breaches*, Delft University Press, Delft, ISBN 90.6275.287.X

Huitema, T., (1947). *Dijken langs zee, rivieren en kanalen: kaden om polders, droogmakerijen enz.; samenstelling-aanleg-onderhoud*, Kosmos, Amsterdam.

Jansen, P.Ph., van Bendegom, L., van den Berg, J., (1994). *Principles of River Engineering; the non-tidal alluvial river*, DUM, Delft, ISBN 90.6562.146.6

Kruitwagen, P.J. (i.o.v. RWS, Dienst Binnenwateren/RIZA), (1988). *Stoomgatontwikkeling en inundatiedebiet*, RWS, DBW/RIZA, Lelystad.

Kuijper, H.K.T., et al., (2000). *Constructieve Waterbouwkunde (CTwa3330)*. Delft, Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, sectie Waterbouwkunde.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Commissie Watersnood Maas, Commissie Boertien II, (1994). *Onderzoek watersnood Maas. Deelrapport 1. Wateroverlast december 1993*, Waterloopkundig Laboratorium, Emmeloord, ISBN 90-8023-142-8.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Commissie Watersnood Maas, Commissie Boertien II, (1994). *Onderzoek watersnood Maas. Deelrapport 12. Selectie van maatregelen*, Waterloopkundig Laboratorium, Emmeloord, ISBN 90-8023-142-8.

Osinga, J., (1997). *De grens in de Maas. Een onderzoek naar de grens en Nederlands-Belgische regelingen inzake de rivier de Maas*, Universiteit Maastricht, Maastricht, http://www.ssc.unimaas.nl/wetenschapswinkel/osinga.htm

Oumeraci, H., et al., (2001). *Probabilistic design tools for vertical breakwaters*, Balkema, Lisse, ISBN 90.5809.248.8

Rijkswaterstaat Meetkundige Dienst (1984). *Rivierenkaart 423 gedeelte IJssel*. Schaal 1:5000, km 980.7 – 987.4.

Stamhuis, E. (i.o.v. Ministerie van Verkeer en Waterstaat), (1997). *Afsluitingstechnieken in de Nederlandse Delta ; een overzicht van de ontwikkeling van deze techniek*, Walburg Pers, Zutphen, ISBN 90.5730.176.8

Stichting Toegepast Onderzoek WAterbeheer (STOWA), (1999). *Beheersplan Waterkeringen*. Hageman Fulfilment, Zwijndrecht, ISBN 90.5773.077.4

Stichting Toegepast Onderzoek WAterbeheer (STOWA), (2002). *Quick-scan niet-primaire keringen, Tussen zwemvliezen en droge voeten; Over het grote belang van kleine keringen*. Hageman Fulfilment, Zwijndrecht, ISBN 90.5773.189.4

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), (1985). *Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken. Dl. 1. Bovenrivierengebied*, Staatsuitgeverij, Den Haag, ISBN 90.120.5169.X

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), (1988). *Water tegen de dijk; de toestand van de rivierdijken tijdens de hoge Rijnafvoer van maart 1983*, Waltman, Delft, ISBN 90.376.0002.6

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), (1990). *Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken. Dl. 2. Benedenivierengebied*, Waltman, Delft, ISBN 90.212.3168.9

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), (1993). *Grondslagen voor waterkeren*, Balkema, Rotterdam, ISBN 90.369.3735.3

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), (1999). *Leidraad zee- en meerdijken: Basisrapport*, TAW, Delft.

Van de Velde, P.A., (1978). *Polders en waterkeringen, college f3, gedeelte waterkeringen*. Delft,Technische Hogeschool Delft, afdeling der Civiele Techniek.

Van 't Hof, J. (in opdracht van CUR), (1991). *Kunstmatig in water opgebouwde zandlichamen*, CUR, Gouda, ISBN 90.376.0019.0.

Van Weele, A.F., (1999). *Moderne Funderingstechnieken*. Delft, Waltman, ISBN 90-212-3085-2.

Verruijt, A., (1999). *Grondmechanica*. Delft, Delft University Press i.o.v. VSSD, ISBN 90-407-1857-1.

Verspuy, C., (1987). *Vloeistofmechanica, handleiding college b73, Lange Golven, deel 1.* Delft, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek.

Verspuy, C., (1989). *Vloeistofmechanica, Studievragen en vraagstukken bij college b70.* Delft, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek.

Visser, P.J. en van Zwieten, K., (1984). *Denkend aan Holland ; eindrapport Interuniversitaire Studiegroep Planologie (ISP) - Dijkverbetering Dl.1*, Technische Hogeschool Delft, Delft.

Visser, P.J., (1998). *Breach growth in sand-dikes*, TU Delft, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, ISBN 90.9012.279.6

Vriend, H.J., et all., (1998). *Rivierwaterbouwkunde, CTwa3340*. Delft, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek.

Wagemans, L.A.G., (1998). *Infomap Algemene Constructieleer*. Delft, Technische Universiteit Delft, Facultiet Civiele Techniek en Geowetenschappen, sectie Algemene Constuctieleer.

artikelen

Dik, J., (2003). *De dijk die netjes opschoof*, Het waterschap, p.16-18, 18 september 2003.

Leenes, J., (2003). *Controle dijken blijkt urgent*, Het waterschap, p.24-25, 18 september 2003.

Van der Veen, R., (2003). *Planten als fabriekjes*, Delft Integraal, nr.4, p.25-26.

websites (niet alfabetisch)

Wikipedia http://nl.wikipedia.org/wiki/
website (vrije encyclopedie) met informatie over de IJssel.

Spanbeton. http://www.spanbeton.nl/damwanden.html
website over betonnen damwanden.

Woud Wormer BV. http://www.woud.nl/
website over stalen damwanden, pontons en materialen.

Van Splunder Funderingstechniek http://www.vsf.nl
website over funderingstechnieken en damwanden

Dawson Construction Plant Ltd. http://www.dcpuk.com/
website over damwanden en hulpmiddelen.

Van 't Hek http://www.vanthek.nl
website van aannemingsbedrijf van 't Hek

Deltaplan 1953-2003 http://www.delta2003.nl
website over de geschiedenis en ontwikkelingen van de Deltawerken.

Yellow River ; China http://www.cis.umassed.edu/~gleung
website over overstromingen en topografie van de Yellow River in China.

Kennisbank Waterbouw http://www.kennisbank-waterbouw.nl
portal voor internet bronnen over de waterbouw

Hydraulic Engineering Portal idem
http://www.waterbouw.tudelft.nl/public/kennisbank/portal/portal.htm

Waterland.net http://www.waterland.net
algemene website over alles dat met water te maken heeft.

Waterpagina http://water.pagina.nl
startpagina met veel links over het onderwerp 'water'.

Kerendtij.nl http://www.kerendtij.nl
website voor innovatieve plannen m.b.t. water en leven.

Delft Cluster http://www.delftcluster.nl/nl/publicaties
website met onderzoeken die gedaan zijn.

Universiteitskrant Delta http://www.delta.tudelft.nl
website waar artikelen te vinden zijn uit de 'Delta'.

Vitens http://www.vitens.nl
website van waterbedrijf 'Vitens'.

Schuttevaer http://www.schuttevaer.nl
website van gelijkgenaamd scheepvaartmagazine.

Landwerk http://www.landwerk.nl
website van tijdschrift voor de inrichting van landelijk gebied.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directie IJsselmeergebied
http://www.rdij.nl/rdij/projecten

Projectbureau Zeeweringen http://www.zeeweringen.nl
website over de Zeeuwse projecten voor de zeeweringen.

Unie van Waterschappen http://www.uvw.nl
website van de Unie van Waterschappen.

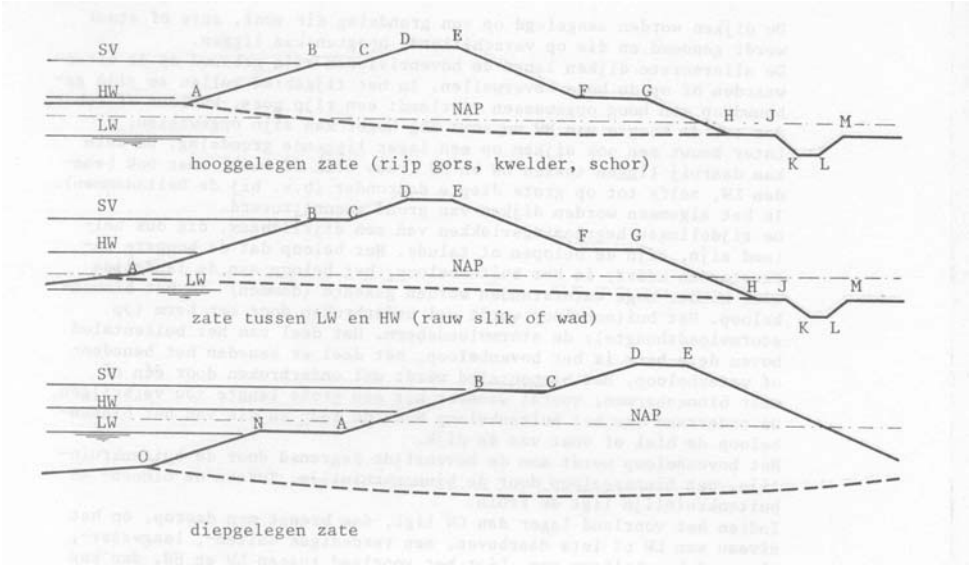
American Society of Civil Enigineering http://www.pubs.asce.org
website van de Amerikaanse genie.

Bijlage 1.

Benamingen die gebruikt worden bij het ontwerp van een dijk

Benamingen

De dijken worden aangelegd op een grondslag, die zool, zate of staal wordt genoemd en die op verschillende hoogten kan liggen. De allereerste dijken langs de bovenrivieren zijn gebouwd op uiterwaarden of op de hoge oeverwallen. In het tijgebied werden ze gebouwd op een hoog opgewassen voorland: een rijp gors, kwelder of schor, dat tot de hoogte van HW en soms nog hoger was opgewassen. Later bouwde men ook dijken op lager liggende grondslag. De zate kan daarbij liggen tussen LW en HW, maar ook beneden LW. In het algemeen worden dijken van grond geconstrueerd.
De zijdelingse begrenzingsvlakken van een dijklichaam, die dus hellend zijn, zijn de belopen of taluds. Het beloop dat de hoogste waterstanden keert, is het buitenbeloop (AB, CD en NO in figuur 9), het beloop aan de landzijde waar minder hoge waterstanden worden gekeerd is het binnenbeloop (EF en GH). Het buitenbeloop wordt wel onderbroken door een berm (op stormvloedhoogte); deze heet dan ook de stromvloedsberm (BC). Het deel van het buitentalud boven deze berm is het bovenbeloop (CD), het deel eronder het beneden- of waterbeloop (AB). Ligt het buitenbeloop nog onder de LW hoogte dan wordt dit onderzeesbeloop genoemd (NO). Het binnentalud wordt wel onderbroken door één of meer binnenbermen (FG en HJ), vooral wanneer het een grote lengte moet hebben en dus de gehele dijk een grote breedte. De onderrand van het buitenbeloop heet de teen (A) en die van de binnenbeloop de hiel of voet van de dijk (H). Soms wordt ook nog aan de voet van de dijk een sloot aangelgd voor het afvoeren van overtollige water achter de dijk (JKLM).
Het bovenbeloop wordt aan de bovenzijde begrensd door de buitenkruinlijn (D), het binnenbeloop door de binnenkruinlijn (E). Tussen de binnen- en buitenkruinlijn ligt de kruin (DE).
Indien het voorland lager dan LW ligt, dan brengt men daarop, op het niveau van LW of iets daarboven, een verdedigende buiten-, laagwater-, -plas- of kreukelberm aan (NA). Ligt het voorland tussen LW en HW dan kan men volstaan met een verdediging over enige afstand op het voorland voor de teen.



Profielen van dijken op zaten van verschillende hoogten

Voor wat betreft de hoogte van de dijk zijn van belang:
- de dijktafelhoogte = ontwerppeil + waakhoogte
- de aanleghoogte = dijktafelhoogte + overhoogte

De hier gedefinieerde aanleghoogte behoeft niet de hoogte te zijn, waarop de dijk ook werkelijk wordt aangelegd. Men kan bijvoorbeeld in het geval dat (grote) zettingen worden verwacht, besluiten om de dijk lager te maken (maar wel hoger dan de dijktafelhoogte) en later één (of meer) dijkverhogingen uit te voeren. De werkelijk aanwezige kruinhoogte dient steeds tussen de dijktafelhoogte (minimum) en de aanleghoogte in te liggen.

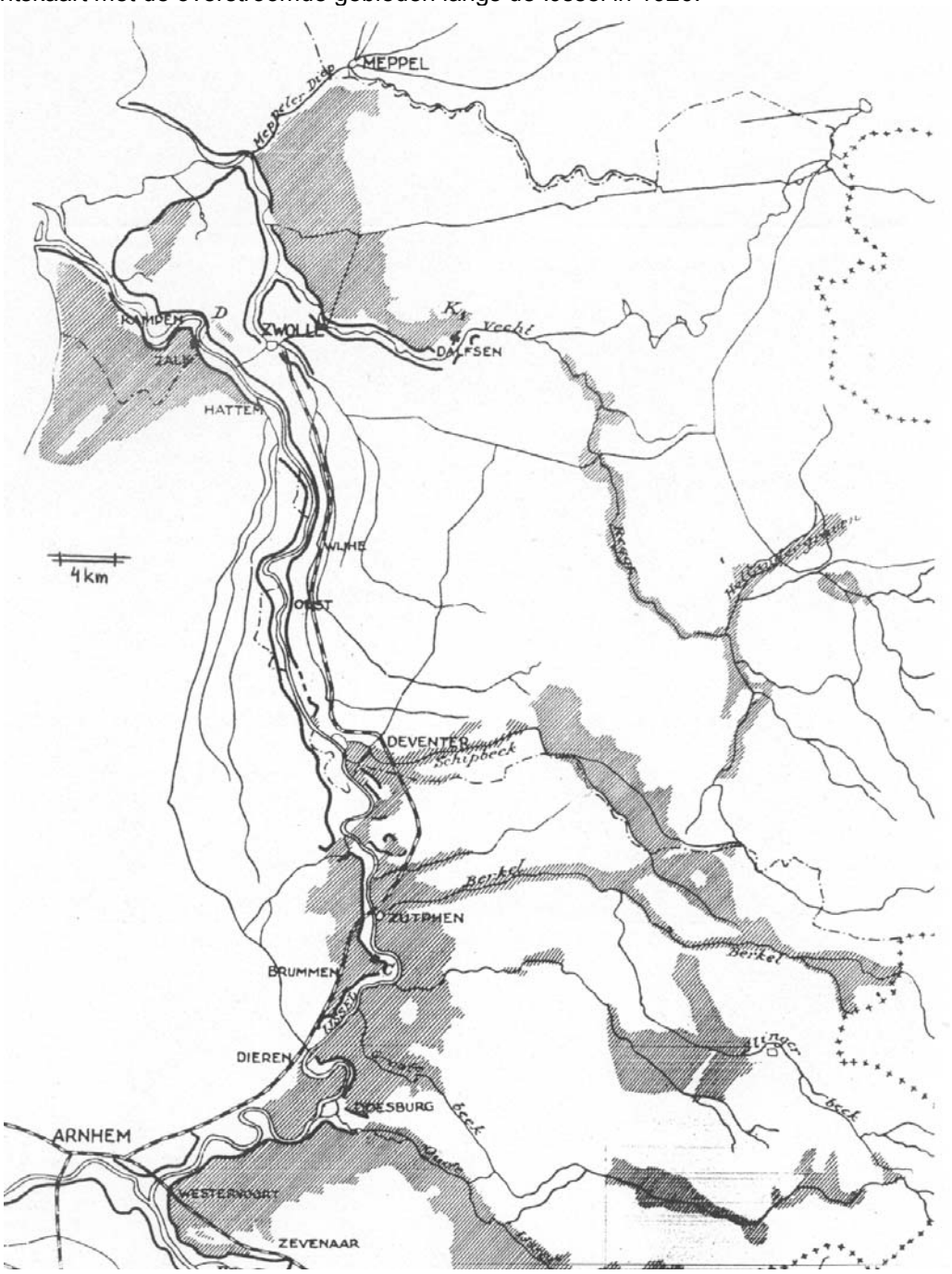
Bijlage 2.

Extra achtergrond informatie uit 'Verslag van het voorgevallene tijdens het Hooge opperwater op de Nederlandsche rivieren in den Winter van 1925 op 1926'

'*5 januari* […] De Brummensche bandijk aan den linkeroever van den IJssel brak door bij Reuvensweerd. Daags te voren was men begonnen met opkisten van de kruin met planken, steunende tegen paalrijen, waarachter een aanvulling met zoden. Bij het stijgen van het rivierwater, dat ter plaatse tot boven de kruin wies en tegen de bekisting stond, zal vermoedelijk door het papperig worden van het zandige dijkslichaam eenig water een uitweg gevonden hebben onder de beplanking. Dit was oorzaak dat de dijk in korten tijd wegstroomde. De dijk is over een lengte van 70 m geheel weggespoeld en in den zandbodem is een schelpvormig gat gestroomd, met een oppervlakte van 1 ha en 2 m diep.
Na de doorbraak van den Brummenschen bandijk en de inundatie van den Voorsterkleipolder was de Rijksweg Brummen-Voorst waterkeering geworden. Tengevolge van dit feit moest op den berm van dien weg een lichte kade worden aangebracht over 200 m lengte bij km 23^6, over 120 m lengte bij 25^3 en doorlopend van Zutphen tot nabij het station Voorst.
[…]
Het beloop van den binnenberm van den rechter IJsseldijk beneden Herculo schoof over een lengte van 20 m in de Tellenberger kolk op dezelfde plaats waar zich in 1920 een dergelijke afzakking voordeed. Door aanstorting met zakken zand werd verdere afkalving tegengegaan.
[…]
***8 januari* […] De linker IJsseldijk, op ongeveer 350 m boven het dorp Zalk, bezweek bij een waterstand van NAP +4,17 m , aan de peilschaal te Katerveer, welke 0,11 m hoger was dan de hoogste bekende rivierstand. De dijk, die onder voortdurend toezicht stond was zwak en reikte op sommige plaatsen niet veel hooger dan de rivierstand, zoodat hij was opgekist. In de uiterwaard was een vrij diepe kolk vóór de doorbraak.**
Het overstroomde gebied is het ongeveer driehoekig terrein begrensd door de den IJsseldijk van het Katerveer naar zee, de Zuiderzeebedijking van Ketelmond tot Elburg en den Rijksweg Elburg-Katerveer.
Ofschoon groote schade ontstond, is deze doorbraak niet te beschouwen als een ramp met verstrekkende gevolgen voor de bewoners, behoudens die van het dorp Zalk, omdat het gebied bij hooge vloeden meermalen wordt overstroomd door het water, dat van de Zuiderzee over de Drontherbedijking binnenvloeit. De inundatie is dan natuurlijk, vooral in de omgeving van Zalk en Hattem, van minder betekenis, doordat de zich in het gebied bevindende woningen in het algemeen op terpen zijn gebouwd.
Zoodra de waterstand het toeliet, begin men de kolk vóór den dijk vol te persen met uit de rivier gebaggerd zand en een noodwaterkering te maken vóór den doorgebroken dijk, waarna de definitieve dijk nagenoeg geheel van klei enigszins binnenwaarts van den ouden gelegd is. Deze dijk heeft een kruinsbreedte van 5 m, een hoogte van NAP +4,60 m, een buitenbeloop van 3 op 1 en een binnenbeloop van 2 op 1 met een binnenberm van 5 m breedte op NAP +2 meter.'

Bijlage 3.

Overzichtskaart met de overstroomde gebieden langs de IJssel in 1926.

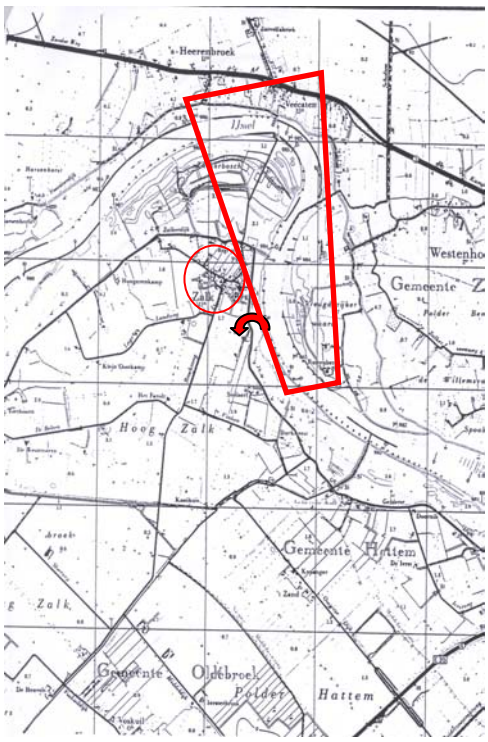


Bijlage 4.

foto's van de omgeving van de dijkdoorbraak



a. de bocht in de IJssel bij Zalk
b. overzicht waar deze foto is gemaakt ->





de Zalkerdijk

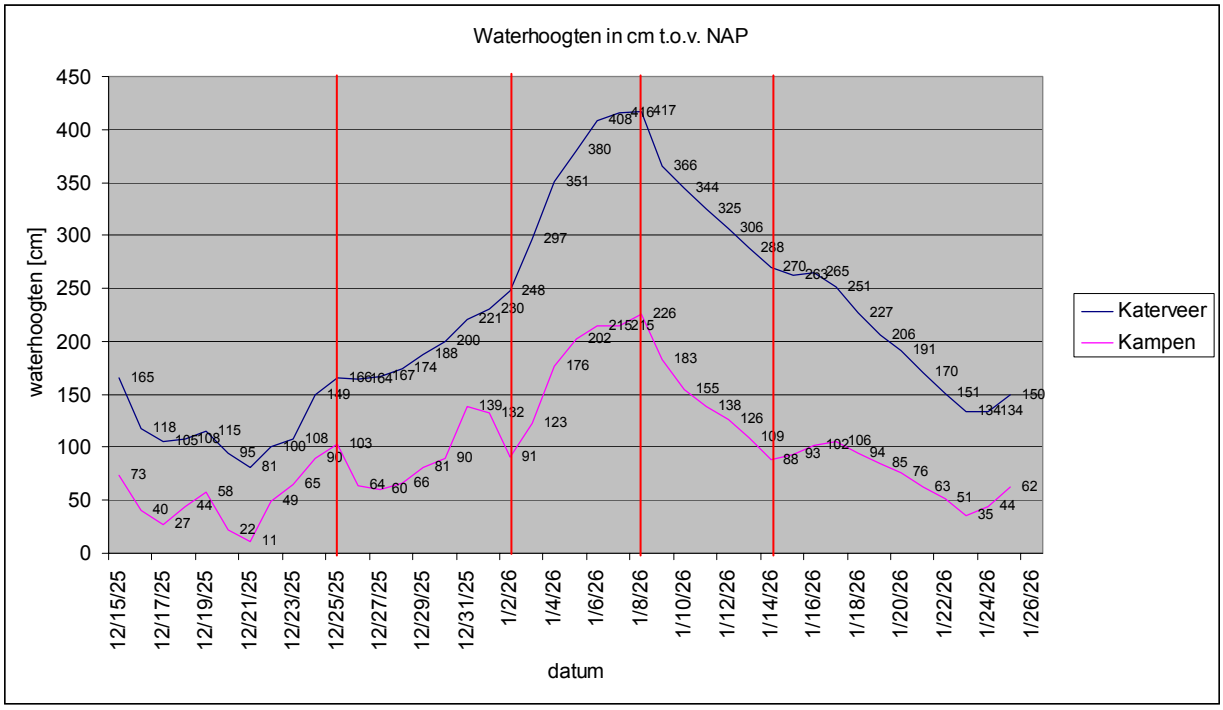


de uiterwaarden

Bijlage 5.

Waterstandsverloop op de IJssel (meetpunten Katerveer en Kampen) tussen 15 december 1925 en 25 januari 1926.

Hoogste stand bij Katerveer: 8 januari 1926 om 3 uur in de ochtend: NAP +419 cm
Hoogste stand bij Kampen: 8 januari 1926 om 9.30 uur in de ochtend: NAP +227 cm



waterstandsverloop in de IJssel bij Katerveer (ten zuiden van Zalk) en Kampen (ten noorden).

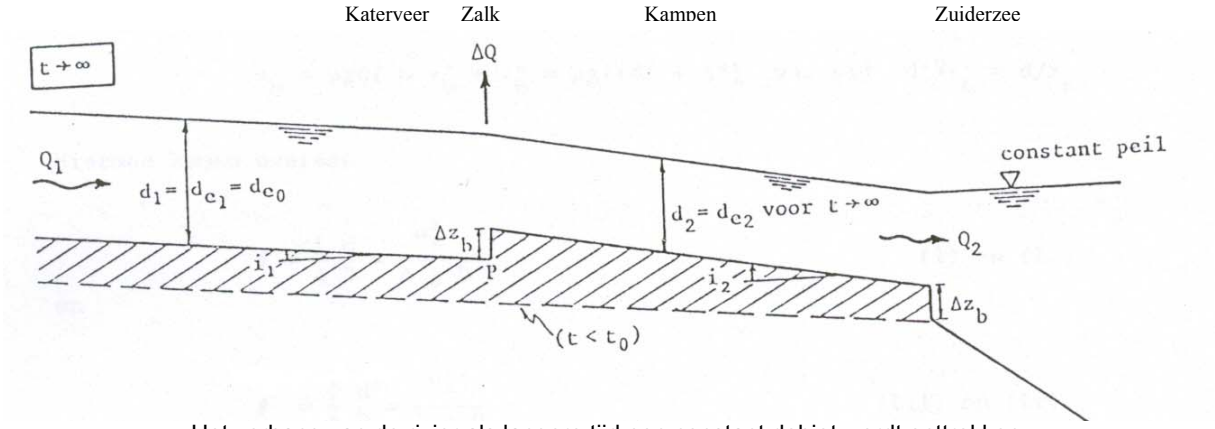
Bij de eerste verticale lijn (25 december 1925) stromen de uiterwaarden vol, dat wil zeggen dat de zomerdijken te laag waren voor het opkomende water van de IJssel (figuur: zomerdijken en winterdijken). Nadat rond 30 december in eerste instantie de eerste uiterwaarden al volledig deel uitmaken van de rivier, waardoor de afvoer (en dus de waterstanden) weer gelijk lopen, gaan andere uiterwaarden vollopen en maakt de onderste lijn van de grafiek (Kampen) weer een duik ten opzichte van de bovenste (Katerveer). Bij de tweede verticale lijn (2 januari 1926) maken alle uiterwaarden deel uit van de rivier en heeft de IJssel zijn maximale breedte (winterbed) in gebruik.

Bij de derde verticale lijn (8 januari 1926) vind de doorbraak plaats. De verwachting is dat dan de waterstand van de grafiek ten noorden van Zalk (de onderste in de grafiek) steiler af zou nemen dan de bovenste lijn van de grafiek (Katerveer, ten zuiden van Zalk). Omdat er een debiet, een grote hoeveelheid water, in de afstand ertussen de polder instroomt. Maar omdat beide meetpunten ongeveer even ver van de doorbraak afliggen en omdat ook bovenstrooms de verhanglijnen van het water van de IJssel verlaagd worden, lijkt het net alsof ze gelijkertijd afnemen zonder dat er een doorbraak plaatsvindt (zie onderstaande berekening voor het bewijs).

Na de vierde verticale lijn is te zien dat de waterstand bij Kampen stijgt terwijl de aanvoer bij Katerveer eigenlijk constant blijft. Dit komt doordat een gedeelte van het water dat in de polder is gestroomd weer eruit stroomt. Dit gebeurt bijvoorbeeld door de afwateringskanalen waarlangs normaal de regen wordt afgevoerd uit de polder.
Het is niet aannemelijk dat door het gat in de dijk het water terugstroomt, omdat ten westen van Zalk en van Kampen de bodem van de polder lager gelegen is (respectievelijk NAP +0,6 m en NAP -0,2 m) dan in de gebieden langs de IJsseldijk (gemiddeld NAP +1,50 m). In Elburg in het zuidwestelijke punt van de overstroomde driehoek is het bodemniveau het laagst, namelijk NAP -0,5 m. De instroom door

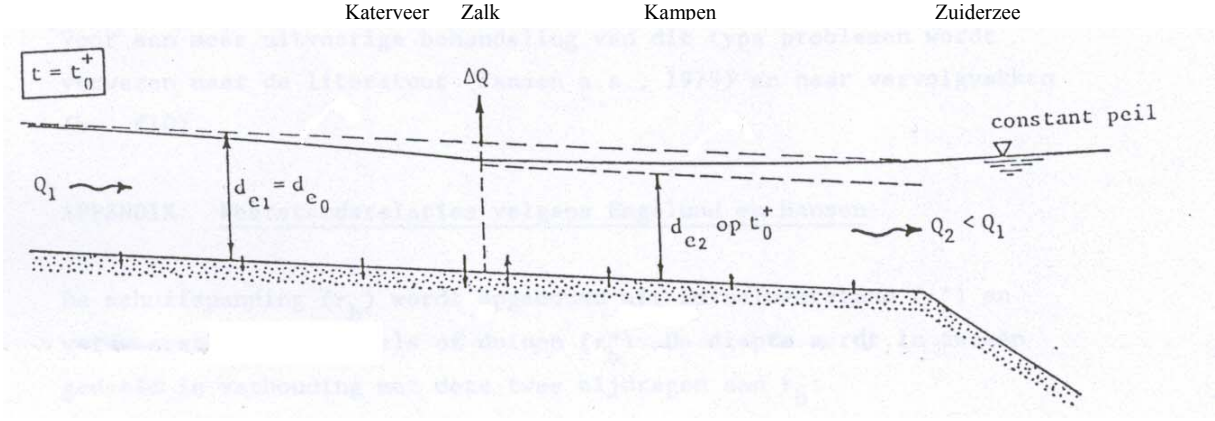
de doorbraak stopt op het moment dat de uiterwaarden droogvallen. De uiterwaarden voor de plaats van de doorbraak liggen tussen een hoogte van NAP +0,60 m en NAP +1,30 m.
De getij-invloeden van de Zuiderzee op de waterstand bij Kampen zijn te verwaarlozen, omdat ten eerste door de hoogwater golf deze een overheersende rol speelt in de rivier. Ten tweede is het getij dat in de Zuiderzee optrad maar laag en er was geen sprake van storm of windopzet op de Zuiderzee. Als laatste en derde punt moet nog aangevoerd worden dat de IJssel ten tijde van de doorbraak nog in een delta uitvloeide bij de monding van deze rivier in de Zuiderzee. Ook waren er verschillende gebieden voor de kust die soms droog vielen en soms overstroomden. Deze gebieden zorgden ook voor een getij- of golfreductie vanaf de Zuiderzee.

Berekening verhanglijnen:
De berekening van de verhanglijnen vind plaats direct na de doorbraak, omdat ten eerste de situatie net na de doorbraak bekend is in de vorm van de waterstanden, maar ook omdat de doorbraak maar van korte duur is. Als namelijk na 2 of 3 dagen de polder vol is gelopen zal het debiet door de bres niet meer toenemen en zelfs naar 0 gaan, waardoor de beginsituatie ofwel de situatie voordat de dijk doorbrak optreden. De bodem van de rivier heeft dus geen tijd genoeg om zich aan te passen aan de nieuwe situatie. De figuur hieronder laat zien wat de situatie zou worden als er langere tijd een doorbraak met constant debiet zou zijn.



Het verhang van de rivier als langere tijd een constant debiet wordt onttrokken.

Het verloop van de verhanglijnen net na de doorbraak is hieronder in de figuur te zien. Duidelijk is te zien dat zowel boven- als benedenstrooms de waterstand verlaagd wordt. De meetpunten Katerveer en Kampen liggen niet op gelijke afstand van de doorbraak. Terwijl de afstand Katerveer-Zalk gelijk is aan ongeveer 3 kilometer, is de afstand Zalk-Kampen gelijk aan 7 kilometer. Kampen ligt precies tussen Zalk en de Zuiderzee in.



De verhanglijnen net na de verstoring door de doorbraak.

Omdat alle rekenmethoden uitgaan van de evenwichtssituatie, oftewel de rivier heeft de tijd om zich aan te passen aan de nieuwe situatie, kan er geen precieze berekening gegeven worden over de

waterspiegeldaling bij Katerveer of Kampen. Duidelijk is echter wel dat het verloop van de waterstanden veel boller zou hebben afgenomen dan de steile piek die nu te zien is in de grafiek, want er kan geconcludeerd worden dat zowel bij Kampen als bij Katerveer de waterstand verlaagd is. Omdat beneden- en bovenstrooms verschillende vormen optreden aan het oppervlakte van het water en omdat Kampen verder dan Katerveer van Zalk afligt, blijkt dat de verlagingen van de waterstanden in deze meetpunten ongeveer gelijk zijn. Of in ieder geval een zo weinig verschillen dat de lijnen die de waterstanden in de grafiek weergeven bijna evenwijdig aan elkaar blijven afnemen.

Bijlage 6.

Extra informatie over zandworsten opgenomen uit 'CUR152'

'Inleiding

Onder een zandworst wordt verstaan een langwerpige zak gevuld met zand. Zandworsten worden gebruikt bij de bouw van constructies, zoals kademuren, golfbrekers, perskaden enz. en worden vooral toegepast in gebieden waar zand goedkoop en steen erg duur is. Zandworsten worden ook gebruikt voor de bouw van kaden onder water om zandverlies bij het storten te voorkomen.
Zandworsten kunnen bescheiden van afmetingen zijn, zoals bij jute zandzakken, maar kunnen bij gebruik van kunststof afmetingen hebben tot 6 m dik met lengten tot 60 m. In deze bijlage is uitgegaan van de grotere afmetingen in verband met de sluiting van het gat bij dijkdoorbraak.
In de volgende paragrafen zijn de specifieke problemen van het fabriceren en plaatsen van zandworsten beschreven.

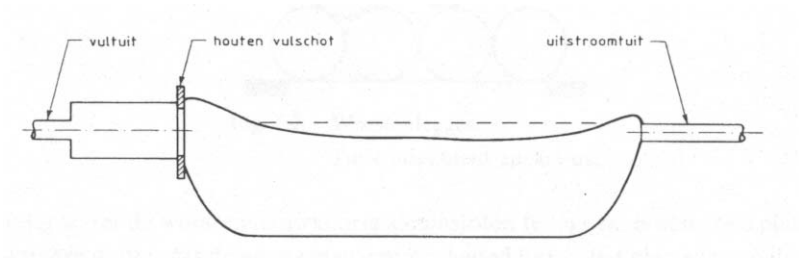
Fabricage van zandworsten

Doek en naadkeuze:

Het doek moet voldoende sterk en zanddicht zijn en zo goed mogelijk bestand zijn tegen beschadigingen en UV-straling. In aanmerking komen 'weefsels' van polypropeen, polyetheen, nylon en polyester. Vooral de eerste twee materialen zijn het best bestand tegen beschadigingen en UV-straling. De naainaden kunnen een probleem vormen, omdat deze meestal zwakker zijn dan het doek zelf. De lasnaden vereisen een grote investering in apparatuur, maar zijn doorgaans tenminste zo sterk als het doek zelf.

Vullen:

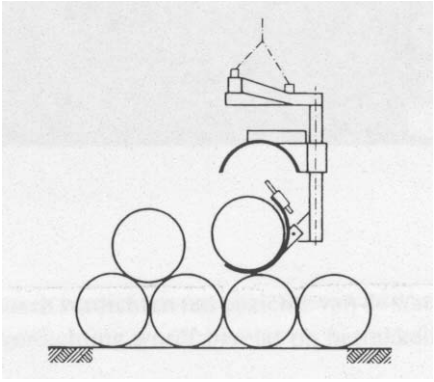
Het vullen van de worsten kan volgens figuur C1 geschieden. De in- en uitstroomtuiten moeten zo hoog mogelijk worden geplaatst om een goede zandvulling in respectievelijk de kop en het einde van de worst te verkrijgen. De vorming van een erosiekuil in de kop van de worst, die ook op kan treden bij minimale stroomsnelheid, kan worden voorkomen door deze erosiekuil voor de worst te doen optreden. Deze situatie wordt verkregen door het toepassen van een verbrede vulmond. De stroomsnelheid van het instromend mengsel moet goed kunnen worden geregeld en wel zodanig dat eerst de worst achterin (met iets hogere snelheid dan de minimale snelheid) wordt gevuld. Door de snelheid gelijkmatig te verminderen tot de minimale snelheid heeft vervolgens steeds vulling naar voren plaats.



Vullen van zandworsten

Het transportwater verlaat de zandworst door de uitstroomtuit en via het doek, afhankelijk van de dorlatendheid hiervan. Indien de doorlatendheid van het doek te groot is, bestaat het gevaar dat al het water door het doek uitgetreden is, voordat het zand achterin de zandworst aangekomen is. Het vullen wordt dan bemoeilijkt. Indien het mengsel veel slib bevat, kan dit leiden tot ondoorlatendheid van het doek. Het vullen kan plaatshebben op een vlakke ondergrond, waarbij voorzieningen dienen te worden getroffen voor de ondersteuning van de in- en uitstroomopening (zie fig. C1). Het vullen kan ook plaats hebben zowel in het droge als in de natte, in een speciaal plaatsingstoestel of in het beun van een (splijt)hoppervaartuig. In dit laatste geval wordt, voorafgaand aan het vullen, het doek in het beun gelegd. Na het vullen worden de losse zijden van het doek over het zand heen dichtgevouwen en afgesloten. Bij een goed vulproces kan een vullingsgraad van circa 90 % worden gehaald, waarbij een afplatting (verschil tussen breedte en hoogte) van circa 20% ontstaat. Bij het vullen ontstaan op de naainaad grotere maaswijdten dan elders in het doek, waardoor zand kan uittreden. Na het vullen zijn in de zandworst poriëngehalten gemeten van 30 tot 50 %.

Plaatsen van zandworsten
De wijze van plaatsen van zandworsten is afhankelijk van de gestelde eisen met betrekking tot de plaatsingsnauwkeurigheid. Indien hier geen bijzondere eisen aan worden gesteld, kunnen de zandworsten vanaf het dek van een stortschip of vanuit het beun van een splijthopper worden gestort. Indien wel een grote mate van plaatsingsnauwkeurigheid is vereist, wordt doorgaans gebruik gemaakt van een hijskraan om de zandworst te plaatsen. Ter ondersteuning van de zandworst tijdens het plaatsen is een zogenoemd plaatsingsframe noodzakelijk.
Er zijn verscheidene soorten plaatsingsframes die variëren van een evenaarbalk, waaraan de zandworst is opgehangen door middel van banden, tot schalen, waarin de zandworst ligt. Het lossen vlak boven of op de bodem heeft plaats door het lostrekken van de ophangbanden, het openen van de ondersteuning of het kantelen van de ondersteuning. Een voorbeeld van een plaatsingsframe is gegeven in onderstaande figuur.



Plaatsing van de zandworsten

Eigenschappen van zandworsten
Inwendige (in)stabiliteit
Onder invloed van golven en stroom kan het zand in de worst zich verplaatsen. De mate van stabiliteit is afhankelijk van de vullingsgraad. Een hoge vullingsgraad betekent een grote stabiliteit.

Flexibiliteit
Wanneer de zandworst(en) op een ongelijkmatige bodem moet(en) worden geplaatst, is flexibiliteit vereist om beschadiging van de zandworst(en) te voorkomen. Een lage vullingsgraad geeft een grote flexibiliteit.

Wrijving
Afhankelijk van het materiaal bedraagt de wrijvingscoëfficiënt tussen de worsten 0,40 a 0,65.

Zetting
Bij stapelingen die niet aan grote zettingen onderhevig mogen zijn, is het noodzakelijk verdichting toe te passen. Hiervoor staan twee mogelijkheden ter beschikking, namelijk:
- dynamisch verdichten;
- statisch verdichten.
Het voordeel van dynamisch verdichten ten opzichte van de statische methode is, dat in korte tijd de gewenste verdichting wordt bereikt op betrekkelijk eenvoudige wijze.

Bescherming van zandworsten
Er zijn drie vormen van bescherming van de zandworsten tegen beschadiging, namelijk:
- uitwendige bescherming van de worsten met een buffer van staal, hout of beton
- voorkomen van het uitlopen van zand als gevolg van beschadiging van het doek, wat bijvoorbeeld kan worden bereikt door toevoeging van 10% cement aan het zand of door asfaltstabilisatie
- uitwendige bescherming van de worsten met een afdeklaag, bijvoorbeeld met bitumen.

Bijlage 7.

- Berekening aantal zandzakken bij sluiting in de bres:
aannamen voor een globale berekening (sluiting op tijdstip t = 6uur) :

- bodemniveau in de bres is gelijk aan NAP
- waterniveau van de rivier is gelijk aan NAP +4,17 meter
- sluiting moet reiken tot minimaal NAP +4,30 meter
- lengte van de bres is ongeveer 100 meter
- breedte van de originele dijk is ongeveer 25 meter

Het volume dat weggeslagen is, is gelijk aan de breedte van de dijk maal de lengte van de bres maal de benodigde hoogte. $V_{originele\ dijk} = 25 * 100 * 4{,}30 = 10.750\ m^3$

De breedte van de stapeling van de zandzakken, waarbij aan beide zijden een helling van 1:2 gehaald wordt, is 4,30 * 2 * 2 = 17,2 meter.
Het volume van de zandzakken stapeling is dus $V_{zandzakken} = 17{,}2 * 100 * 4{,}30 = 7400\ m^3$. Dit is ook het minimale volume aan zand dat aangevoerd moet worden om de zandzakken te vullen. Deze hoeveelheid zand kan door middel van vrachtwagens aangevoerd worden. Dit zou betekenen dat voor 7400 m^3 en een soortelijk gewicht van nat zand van 2000 kg/m^3 dat een totaal tonnage van 14.800 ton nodig is. Bij een standaard vrachtwagen van 10 ton zijn dus 1.480 ritten nodig. Voor speciale vrachtwagens van 25 ton zijn 592 ritten nodig. De 10 ton vrachtwagens zouden dan 4 per minuut moeten aankomen en de 25 ton vrachtwagens 1,6 per minuut.

Bij een omsluiting van de nieuwe bres door een stapeling van zandzakken is wel een grotere lengte nodig, maar zou de hoogtebesparing wel eens kunnen leiden tot een beter alternatief, omdat het polderniveau gelijk is aan NAP +1,70 meter. Uit een globale berekening blijkt echter dat hiervoor een grotere hoeveelheid zandzakken nodig is, maar wel een beter alternatief is als blijkt dat de zandzakken in de bres door de stroomsnelheden niet toepasbaar zijn, omdat de stroomsnelheden bij deze omsluiting lager zullen zijn.

Het volume van een zandzak is gelijk aan $V_{zandzak} = 0{,}5 * 0{,}5 * 0{,}2 = 0{,}05\ m^3$.
Voor het sluiten door middel van een zandzakken stapeling in de bres met aan beide zijden een helling van 1:2 zijn dus 7400 / 0.05 = 148.000 zandzakken.
Als deze in 6 uur tijd gelegd moeten worden, betekent dit dat er per minuut 410 zandzakken gelegd moeten worden en dus ook gevuld moeten worden.

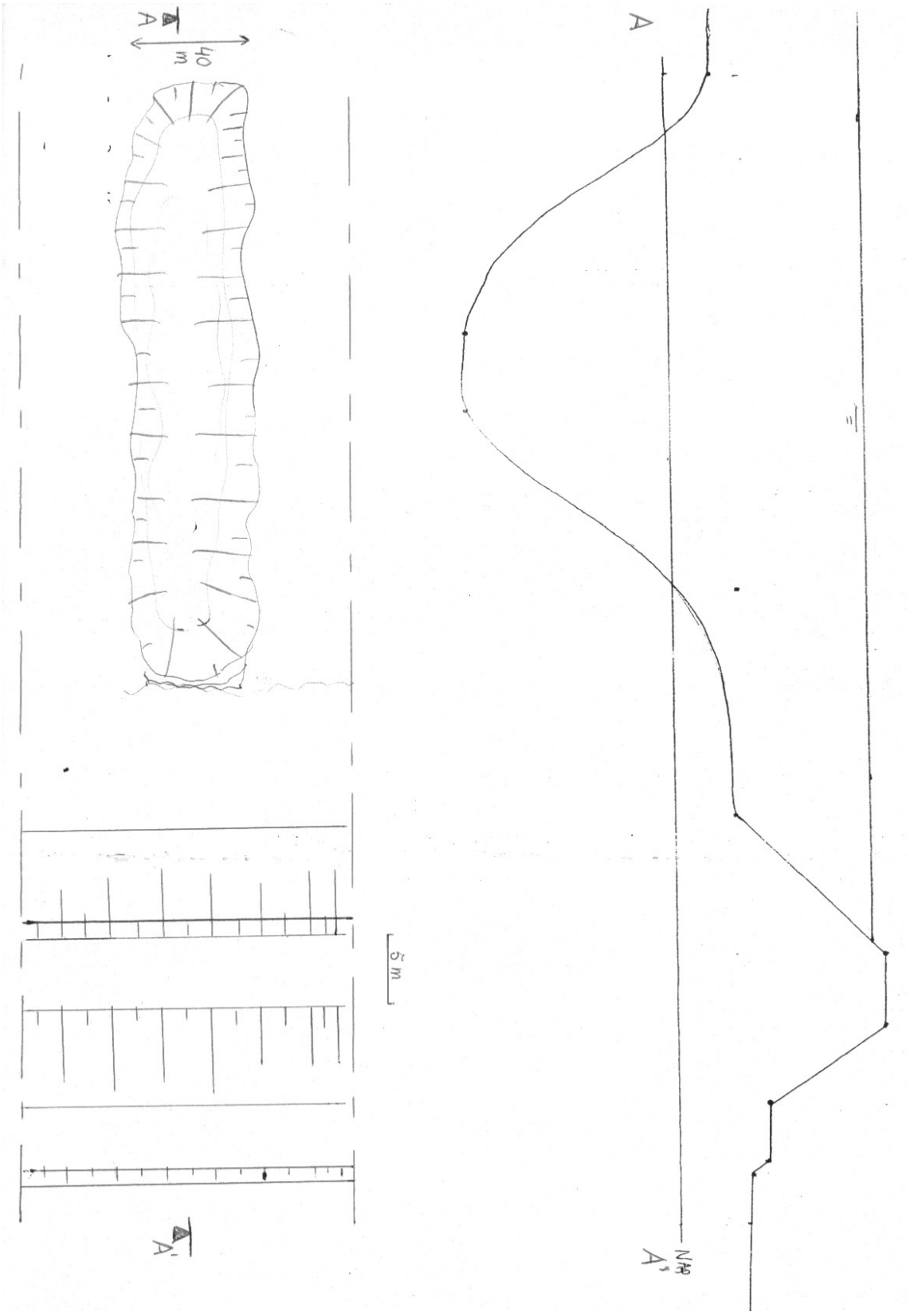
- Berekening aantal BigBags bij sluiting in de bres:
Het benodigde volume is (zie hierboven) $V_{bigbags} = V_{zandzakken} = 7400\ m^3$. Het volume van een BigBag is gelijk aan $V_{bigbag} = 1\ m^3$. Hieruit volgt dat er dus 7400 BigBags nodig zijn voor een sluiting van de bres in 6 uur. Dit houdt in dat er gemiddeld 20 BigBags per minuut gelegd moet worden.

- Berekening gewicht zandzakken bij sluiting in de bres:
Door middel van de grafiek en formules van Izbash is berekend dat een gewicht van 200 kilogram in de bres blijft liggen bij een stroomsnelheid van 4 m/s.
Voor zand met een nat soortelijk gewicht van 2000 kg/m^3 geeft dit een minimaal volume van $V_{min} = 200 / 2000 = 0{,}1\ m^3$.
Dit houdt in dat een zandzak niet voldoet, maar een BigBag wel.

- Afmetingen steenblokken bij sluiting in de bres:
Voor steen met een soortelijk gewicht van 2600 kg/m^3 resulteert dit in een minimaal volume van $V_{min} = 200 / 2600 = 0{,}08\ m^3$.
Dit houdt in dat een vierkant blok steen met ribben van 0,43 meter voldoet.

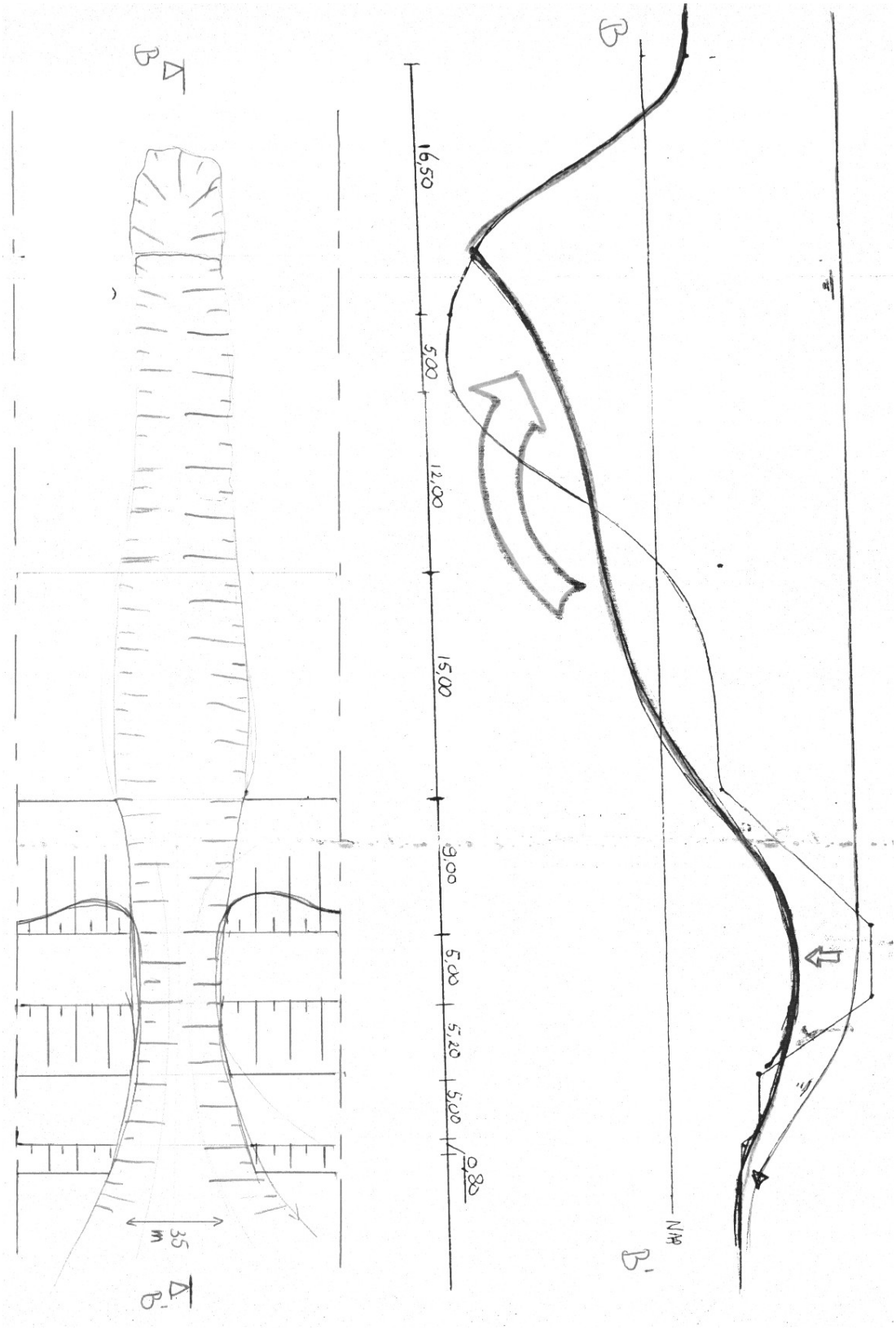
Bijlage 8.

beginsituatie: hoog water tegen de dijk en de oude kolk voor de dijk.



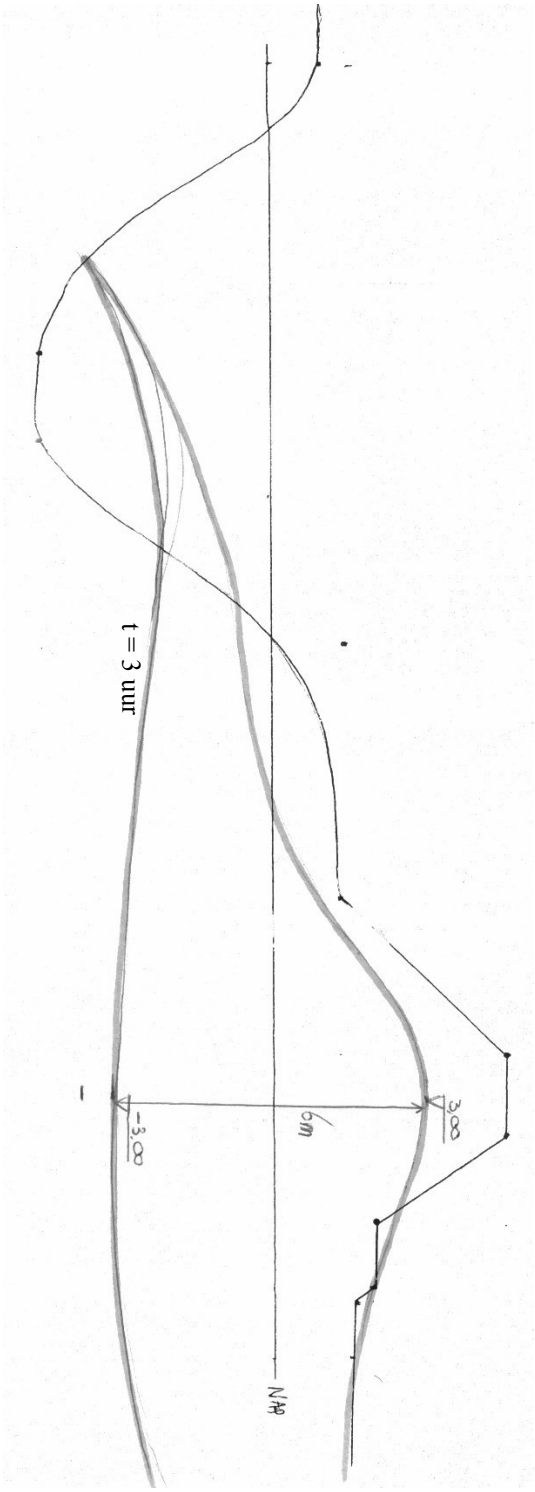
Bijlage 9.

situatie op t>0: de dijk is net afgeschoven over een breedte van 35 meter.



Bijlage 10.

situatie op t=3: de dijk is verder geërodeerd.
In het bovenaanzicht is nu enkel een verschil met de vorige situatie (bijlage 9) te zien in de breedte van de bres in de dijk. Deze is verbreed. De ontgrondingskuil voor en achter de dijk heeft zich wat uitgebreid.



Bijlage 11.

overzicht van een aantal damwandprofielen (met omlijnd het gekozen profiel Larssen 450)

Bijzondere kenmerken	Profiel systeem		Afmetingen				Gewicht		Omtrek	traag-heids-moment	weer-stands-moment
			b	h	t	s				I	W
	Hoesch	Larssen	mm	mm	mm	mm	N/m plank	N/m^2 wand	mm/m wand	$10^4 mm^4/m$ wand	$10^3 mm^3/m$ wand
Hoog weerstandsvermogen		20	500	220	7	6	395	790	2500	6600	600
		21	500	220	8,2	8	475	950	2500	7700	700
	95		525	190	8	8	499	950	2380	7130	750
	116		525	250	9,3	9	609	1160	2580	15000	1200
		22	500	340	10	9	610	1220	2800	21250	1250
	134		525	300	10	9,5	704	1340	2750	25500	1700
	155		525	300	12,3	9,8	814	1550	2810	30000	2000
		23	500	420	11,5	10	775	1550	3150	42000	2000
		24	500	420	15,6	10	879	1750	3150	52500	2500
	175		525	340	14	10	919	1750	2950	44200	2600
	215		525	340	18,8	12	1130	2150	2980	53550	3150
Grote wanddikte		31	450	150	9,5	9,5	450	1000	2300	3450	460
		32	450	250	10,5	10,5	548	1220	2500	10600	850
	122		525	190	11	10,7	641	1220	2380	8930	940
		III	400	247	14,2	9,2	620	1550	2850	16670	1350
Asymmetrische sloten		42	500	210	10	10	610	1220	2450	8930	850
		43	500	410	12	12	775	1550	2750	31780	1550
		420	708	750	10	10	610	1730	3450	146300	3900
		430	708	750	12	12	775	2200	3900	225000	6000
		450	708	770	14	14	995	2810	4050	287700	7500

Bijlage 12.

De uitwijking van verschillende profielen bij toenemende dieptes.
De profielbenamingen komen overeen met de door ARBED gebruikte standaard profielaanduidingen.

Larssen 450

kuil	kracht [kN]	t [m]	totaal L [m]	W nodig [cm3]	delta [mm]	aangrijpen m t.o.v. B
- 3m NAP	143,6	7,8	15,0	2031	44	3
-4m NAP	167,6	8,5	16,7	2679	72	3,5
-5m NAP	191,7	9,2	18,4	3409	111	4
-6m NAP	215,7	9,8	20,0	4220	162	4,5
-7m NAP	239,7	10,4	21,6	5113	228	5
-8m NAP	263,8	11,0	23,2	6086	311	5,5
				7500 cm3	287 700 cm4	

HZ-profiel

HZ 975 D - 12 / AZ 26

kuil	kracht [kN]	t [m]	totaal L [m]	W nodig [cm3]	delta [mm]	aangrijpen m t.o.v. B
- 3m NAP	143,6	7,8	15,0	2031	29	3
-4m NAP	167,6	8,5	16,7	2679	47	3,5
-5m NAP	191,7	9,2	18,4	3409	72	4
-6m NAP	215,7	9,8	20,0	4220	105	4,5
-7m NAP	239,7	10,4	21,6	5113	147	5
-8m NAP	263,8	11,0	23,2	6086	201	5,5
				8125 cm3	444 580 cm4	

HZ 975 D - 24 / AZ 26

kuil	kracht [kN]	t [m]	totaal L [m]	W nodig [cm3]	delta [mm]	aangrijpen m t.o.v. B
- 3m NAP	143,6	7,8	15,0	2031	19	3
-4m NAP	167,6	8,5	16,7	2679	30	3,5
-5m NAP	191,7	9,2	18,4	3409	46	4
-6m NAP	215,7	9,8	20,0	4220	68	4,5
-7m NAP	239,7	10,4	21,6	5113	96	5
-8m NAP	263,8	11,0	23,2	6086	131	5,5
				13 155 cm3	684 370 cm4	

HZ C1

kuil	kracht [kN]	t [m]	totaal L [m]	W nodig [cm3]	delta [mm]	aangrijpen m t.o.v. B
- 3m NAP	143,6	7,8	15,0	2031	9	3
-4m NAP	167,6	8,5	16,7	2679	14	3,5
-5m NAP	191,7	9,2	18,4	3409	22	4
-6m NAP	215,7	9,8	20,0	4220	32	4,5
-7m NAP	239,7	10,4	21,6	5113	46	5
-8m NAP	263,8	11,0	23,2	6086	62	5,5
				27 305 cm3	1433 870 cm4	

HZ C 23

kuil	kracht [kN]	t [m]	totaal L [m]	W nodig [cm3]	delta [mm]	aangrijpen m t.o.v. B
- 3m NAP	143,6	7,8	15,0	2031	8	3
-4m NAP	167,6	8,5	16,7	2679	14	3,5
-5m NAP	191,7	9,2	18,4	3409	21	4
-6m NAP	215,7	9,8	20,0	4220	31	4,5
-7m NAP	239,7	10,4	21,6	5113	44	5
-8m NAP	263,8	11,0	23,2	6086	60	5,5
				29 460 cm3	1499 030 cm4	