

**probabilistische
gevoeligheidsanalyse
kunstwerken**

CO-370250/4
december 1996

probabilistische gevoeligheidsanalyse kunstwerken





CO-370250/4
December 1996

Opgesteld in opdracht van:
Rijkswaterstaat
Dienst Weg- en Waterbouwkunde
Postbus 5044
2600 GA Delft

Afdeling	Wiskunde & Informatica
projectleider	Dr. Ir. J.B. Sellmeijer
projectbegeleider	Dr. Ir. S.E.J. Spierenburg

GRONDMECHANICA DELFT
Stieltjesweg 2, 2628 CK Delft
Postbus 69, 2600 AB Delft

Telefoon (015) 693500
Telefax (015) 610821
Postgiro 234342
Bank MeesPierson NV
Rek.nr. 25.92.35.911

Rapport no. : CO-370250/4		Datum rapport: december 1996			
Titel en ondertitel: probabilistische gevoeligheidsanalyse kunstwerken		Afdeling: Wiskunde & Informatica			
		Project: Sijperosie			
Projectleider Dr. Ir. J.B. Sellmeijer		Projectbegeleider: Dr. Ir. S.E.J. Spierenburg			
Naam en adres klant: Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde Postbus 5044 2600 GA Delft		Referentie klant:			
		Aantal kopieën: 10			
		Type rapport: definitief			
<p>Samenvatting:</p> <p>Dit rapport is een oriënterende studie om een methode te ontwikkelen om de veiligheid van dijken en kunstwerken in kaart te brengen. Hierbij zal worden gewerkt aan de hand van een foutenboom. Wijzigingen in de geometrie of een variatie in een materiaalparameter zullen op een statistische manier worden bewerkt, waardoor de kans op bezwijken wordt vastgelegd. Aldus worden partiële veiligheidscoëfficiënten bepaald.</p> <p>De bevindingen zijn behandeld in drie aparte delen, die achter elkaar geplaatst zijn. Deel I gaat in op de statistische achtergrond en legt het begrip 'foutenboom' uit. Deel II geeft een voorzet voor een dergelijke foutenboom en geeft aan waar in de constructie dit consequenties heeft. Deel III behandelt de fragmentenmethode en geeft aan wat de mathematische consequenties zijn voor een deterministische bepaling voor één bepaalde situatie.</p>					
Commentaar:					
Sleutelwoorden: fragmentenmethode, piping, heaving; probabilistisch, foutenboom;			Distributie: DWW, GD		
Filename: DWWpp101.LWP			Aantal pagina's: 60		
Versie:	Datum:	Opgesteld door:	Paraaf:	Gecontroleerd door:	Paraaf:
1.00	96.12.01	Dr. Ir. J.B. Sellmeijer		Dr. Ir. S.E.J. Spierenburg	
2.00	96.12.13	Dr. Ir. J.B. Sellmeijer		Dr. Ir. S.E.J. Spierenburg	

Samenvatting en plan van aanpak

Door de DWW is een onderzoek geformuleerd naar de veiligheid van waterkerende constructies. Dit is 'Probabilistische gevoeligheidsanalyse heaving ontwerpregels' genoemd. Er is een projectplan onder nummer HOAT-8P-96084 voor geschreven. Hierin zijn de volgende fasen gedefinieerd:

1. Opstartfase
2. Fragmenten afleiden
3. Indirecte weerstandsbepaling van damwanden
4. Probabilistische gevoeligheidsanalyse
5. Rapportage

Het onderzoek is gestart met alleen de opstartfase. Dit is gedaan met de bedoeling om inzicht te verkrijgen in de moeilijkheidsgraad van de uit te werken routines voor de probabilistische analyse. Het zou wel eens zo kunnen zijn dat een van te voren ingeschatte inspanning verre van realistisch is. Dan dient er eerst een afweging gemaakt te worden of de inspanning nog wel gewenst is en of er goede alternatieven zijn. De werkzaamheden in de opstartfase betroffen drie onderwerpen:

1 Opstartfase:

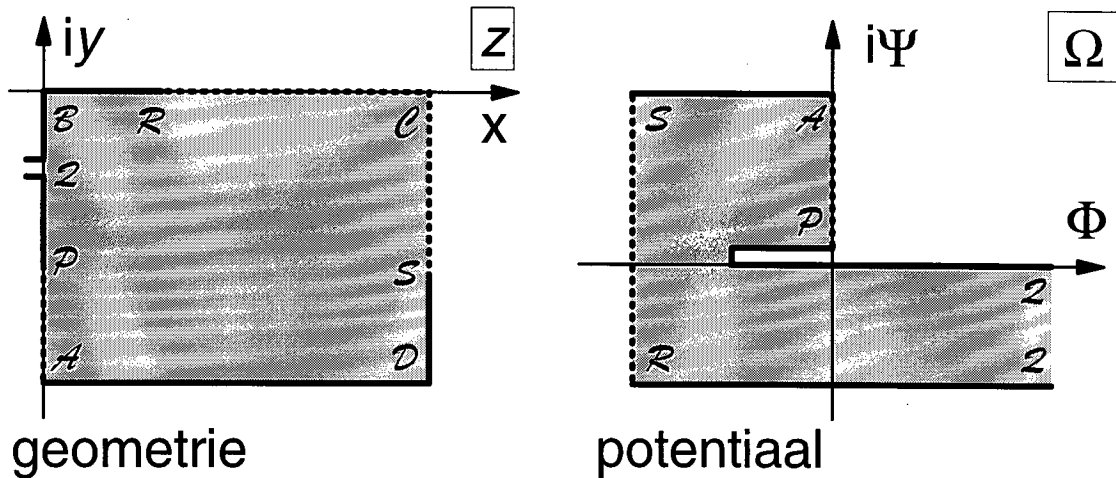
- 1.1 Toelichting van de AFDA methode en een korte beschrijving van het Form model
Dit is gedaan in Deel I van dit rapport.
- 1.2 Opstellen foutenboom voor damwanden
Dit is uitgevoerd in Deel II van dit rapport. Hierbij is de opdracht iets ruimer gesteld door ook aandacht aan piping en opdrijven te besteden.
- 1.3 Toelichting op de fragmentenmethode en beschrijving van de fragmenten, die tot op heden bepaald zijn; voorts bestudering van de aanpassingen die erop nodig zijn
Dit is behandeld in Deel III van dit rapport. Zowel de mogelijkheden van variaties op de oude fragmenten als het introduceren van nieuwe is onder de loep genomen.

De opstartfase is hiermee afgerond. Voor de uitvoering van de overblijvende fasen wordt uitgegaan van het projectplan. Daar waar nodig zijn wijzigingen overeenkomstig de inzichten, die opgedaan zijn in de opstartfase, voorgesteld.

2 Fragmenten afleiden :

2.1 Afleiden fragmenten

Het stromingsveld onder een waterkerende constructie wordt opgedeeld in een aantal fragmenten. Dit wordt zodanig gedaan dat elk fragment terug te brengen is tot één enkel basisfragment. Een basisfragment bestaat uit twee subfragmenten, waarvan er een is getekend in de figuur op de volgende bladzijde. Het andere subfragment is gespiegeld en sluit aan over de ruimte onder de damwand.



Een basisfragment bevat alle ingrediënten nodig voor de modellering van de stroming. Dit is geregeld door een juiste keuze van de punten P , Z , R en S . Bronnen mogen worden gesuperponeerd, zodat onderloopsheid ook beschreven kan worden. Een enkele bron simuleert een gat in de damwand. Voorts zijn een open en een dichte sluisvloer mogelijk; een wel of niet aansluitende damwand aan het watervoerend pakket. In de tabel zijn de belangrijkste mogelijkheden geschetst.

positie	fragment	opmerking
gesloten vloer R in C en S in D		
Z op PB	'tussen' met gat in damwand	P in B voor
Z op BR	'polder' met lek naar achterland	niet aansluitende damwand
gesloten vloer R op BC en S in C of D		
Z op PB	'kop/staart' met gat in damwand	P in B voor
	'opdrijven' met gat in damwand	niet aansluitende damwand
Z op BR	'sluis'	
spleet onder vloer R in B		
S in D	'tussen' met spleet	B in P voor
	'opdrijven' met gat in damwand	niet aansluitende damwand

Omdat in een basisfragment de damwand nooit op de rand ligt, maar binnen in het fragment, is de integriteit van de fragmentenmethode altijd gewaarborgd.

De volgende werkzaamheden zijn vereist om te komen tot de benodigde weegfuncties:

- Afbeelden van het geometrievlak en het potentiaalvlak op eenzelfde halfvlak. Het geometrievlak is een vierkant. Dit kan worden afgebeeld met behulp van een jacobijnse elliptische functie. Het potentiaalvlak heeft een iets wildere vorm. Hierin zit een snede, die horizontaal getekend is, maar ook verticaal kan lopen. In beide gevallen is de afbeelding een elliptische integraal van de derde soort. Deze functie is krachtig, maar vereist nog enige nadere studie.
- Samenstellen van twee subfragmenten tot basisfragment. Dit behelst het uitschrijven van de potentiaal op de gatwand en het integreren van de lek over de damwand. Bij de lek wordt

de invloed ervan op het stromingspatroon verwaarloosd. Dit mag, omdat de invloed gering is. Een precieze berekening vereist een zeer grote inspanning. Samenstellen van de subfragmenten geschiedt op basis van continuïteit van debiet.

- Voor het meenemen van onderloopsheid moeten nog nadere afspraken worden gemaakt. Een precieze berekening is in een stochastisch perspectief nogal tijdrovend. Bovendien ligt de juiste procedure voor precies rekenen nog niet vast. Een vereenvoudiging met een constante waarde voor het uittreedebiet naar het erosiekanaal ligt voor de hand. Als hiertoe wordt besloten, dan moeten er nog enige integralen worden uitgewerkt. Verder moet de erosieconditie worden toegepast.
- In sommige gevallen, zoals een staartfragment zonder zowel drempellengte als damwandlengte, dreigt kortsluiting. Het is dan niet zo dat het verval over het fragment nul gesteld moet worden. Er is wel degelijk een weerstand in de vorm van om de hoek stromen. Deze kan gesimuleerd worden door een hele kleine drempellengte. Ook bij een niet aansluitende damwand en spleet onder de sluisvloer is dit mogelijk. Bestudeerd moet worden welke waarde de 'drempellengte' moet hebben om rondstromen te simuleren.
- Voor het opstellen van rekenschema's zijn twee soorten stroomschema's nodig.
 - Een globaal schema, waarin de volgorde van de subfragmenten wordt aangegeven met de positionering van de punten *P*, *Z*, *R* en *S* in het potentiaalvlak. Verder de handelingen die nodig zijn om de potentiaal in een gat of de lek door een damwand vast te stellen.
 - Een lokaal schema van de volgorde van rekenhandelingen binnen een enkel subfragment. Dit behelst onder meer het uitrekenen van de elliptische functies.

2.2 Controleberekeningen

De oplossingen van de fragmenten worden getoetst met eindige elementen berekeningen.

Hiertoe worden een aantal runs gemaakt met het programma MSEEP. Dit geeft een indruk van de nauwkeurigheid van de fragmentenbenadering.

2.3 Rapportage

3 Indirecte weerstandsbeplating

3.1 Afleiden weerstandslengte

Herschrijven van de oplossingen met de fragmenten in de vorm van een weerstandslengte en formuleren van de wijze van interpretatie van een meting.

Een damwand heeft invloed op de stroming door:

- lengte
- doorlatendheid
- aansluiting met zandpakket

Het potentiaalverloop langs de damwand wordt op basis van deze drie invloeden in kaart gebracht.

3.2 Bestaande meetmethoden

Inventariseren van bestaande methoden en evalueren welke geschikt zijn voor het meten van de weerstand van een kwelscherm.

Een afwijking van een weerstand wordt gemeten door de afwijking in een stromingspatroon vast te stellen. Simpelweg een potentiaalverschil en een debiet zijn hiervoor onvoldoende. De

doorlatendheid van het zandpakket is meestal niet bekend en het afwegen van het lokale gedrag in het geheel is bewerkelijk en niet zo nauwkeurig. De meting dient dus iets extra's te hebben om een afwijking weer te geven.

3.3 Inrichting meting

Opstellen van specificaties voor metingen welke in 3.2 geschikt zijn gebleken.

3.4 Aanbevelingen voor een meting: keuze van een locatie, inrichting van de meting, duur van de meting.

Een betrouwbare meting bestaat uit het bepalen van het potentiaalverschil over de damwand. Daartoe wordt zo dicht mogelijk links en rechts op de damwand in de verticaal de potentiaal bepaald. Daar waar geen potentiaalverschil meer heerst, houdt de damwand op. Een plotselinge daling van de potentiaal duidt op een gat. Een flauwer verloop van de verticale gradiënt wijst op lekverliezen.

3.5 Rapportage

4 Probabilistische gevoeligheidsanalyse

4.1 Definiëren cases, aanpak van de analyses, vaststellen van parameters en te analyseren varianten per case

De probabilistische gevoeligheidsanalyse wordt uitgevoerd voor een aantal karakteristieke situaties voor de toepassing van een kwelscherm in een primaire waterkering. In het projectplan zijn de volgende cases gedefinieerd:

- "opdrijven": rivierdijk met afdekkende kleilagen in het achterland en een kwelscherm in de teen van het binnentalud
- "heave": rivierdijk met kwelscherm in de teen van het binnentalud
- "sluis met dichte vloer": een sluis met een dichte vloer, een buiten- en binnenhoofd en in beide hoofden kwelschermen
- "sluis met open vloer": een sluis met een open vloer, een buiten- en binnenhoofd en in beide hoofden kwelschermen

Voor het uitvoeren van de probabilistische analyses worden voor elke case de volgende parameters vastgesteld

- globale geometrie: afmetingen, waterstanden, benodigde fragmenten
- te evalueren Z-functies
- vaststellen van de statistische parameters per fragment
 - type verdelingsfuncties
 - gemiddelden
 - spreiding vastgelegd met de variatiecoëfficiënt
 - correlaties van parameters van een fragment en parameters van fragmenten onderling
- vaststellen door te rekenen alternatieven in het bijzonder de te variëren gemiddelden, bijvoorbeeld de dikte van afdeklagen, doorlatendheid, inbeddingsniveau van kwelschermen, foutenbronnen (spleetvorming, lekkage)

Voorlopig wordt op grond van het opstellen van de foutenboom de volgende wijze van analyseren en interpreteren voorgesteld:

- Een ontwerp van een kwelscherm dient een voldoende betrouwbaarheidsniveau ten aanzien van de onderkende mechanismen te garanderen. Parameterspreiding en foutenbronnen zijn min of meer gegeven grootheden. De mogelijkheid om in het ontwerp het gerealiseerde betrouwbaarheidsniveau te beïnvloeden is door middel van een keuze van de ontwerpgrontheden:
 - locatie van het scherm
 - inbeddingsniveau (heave, wel, opdrijven, stabiliteit)
 - sterkte van het scherm (veroudering, stabiliteit)
 - stijfheid van het scherm
 - In de probabilistische analyses dienen deze grootheden te worden gevarieerd. Dit levert een verband tussen inbeddingsniveau en betrouwbaarheid. Deze analyses worden uitgevoerd bij een minimale kans van optreden van de foutenbronnen (lekkage, veroudering, spleetvorming).
 - Vervolgens worden analyses uitgevoerd met schattingen van de grootte van de mogelijke foutenbronnen. Dit geeft de invloed van de fouten op het hierboven afgeleide verband tussen inbeddingsniveau en betrouwbaarheid.
 - De berekeningen rekeninghoudend met de invloed van fouten zijn conditionele analyses dat wil zeggen een analyse naar de invloed van een foutenbron gegeven de kans van optreden. Bij het doorrekenen van de foutenboom wordt uitgegaan van een schatting van de kans van optreden van een foutenboom.
 - Uit de berekeningen volgt de invloed van fouten op de faalkans. Omgekeerd kan uit de resultaten een toelaatbare kans van optreden van de fouten worden afgeleid gegeven de invloed van een foutenbron en globale eis ten aanzien van falen van een kwelscherm.
 - De combinatie van een afgeleide eis voor een foutenbron op grond van een overall eis en een inschatting van welke maatregelen in de praktijk economisch optimaal en technisch haalbaar zijn levert een optimale schatting van de kans van optreden van falen van een kwelscherm.
 - De resultaten moeten dienen als basis voor een aanbeveling aan de praktijk.
- Deze voorgestelde wijze van analyse en interpretatie dient per case te worden beoordeeld en waar nodig aangevuld.

4.2 Programmeren van de koppeling tussen FORM en de fragmentenmethode

Met de fragmentenmethode is een algemene bibliotheek van oplossingen beschikbaar.

Voorgesteld wordt per case de benodigde fragmenten te selecteren en die te koppelen in het FORM pakket. Een alternatief is het koppelen van de volledige bibliotheek.

4.3 Uitvoeren berekeningen

Uitvoeren van de berekeningen volgens de voorgestelde methode

4.4 Doorrekenen foutenboom

4.5 Interpretatie resultaten

- ##### 4.5.1 Berekenen van de relatieve bijdragen van mechanismen, parameters, foutenbronnen aan het falen van een kwelscherm

4.5.2 Ontwikkelen van een vertaling van de resultaten in een praktische methode

4.5.3 Afleiden van een ontwerpmethode

Bij het opstellen van een ontwerpmethode en het inpassen in de bestaande methodiek voor het ontwerp van een primaire waterkering zullen lengte-effecten worden meegenomen.

4.6 Evaluatie

4.6.1 Evaluatie binnen een gebruikersforum

4.6.2 Mogelijke aanvullingen

Een mogelijke aanvulling is eventueel het inschatten van 3-D effecten.

4.7 Rapportage

5 Rapportage

5.1 Opstellen algemene conclusies en aanbevelingen

5.2 Evaluatie binnen DWW, verwerken commentaar, opstellen eindrapport

DEEL I
AFDA methode
Form model

INHOUDSOPGAVE

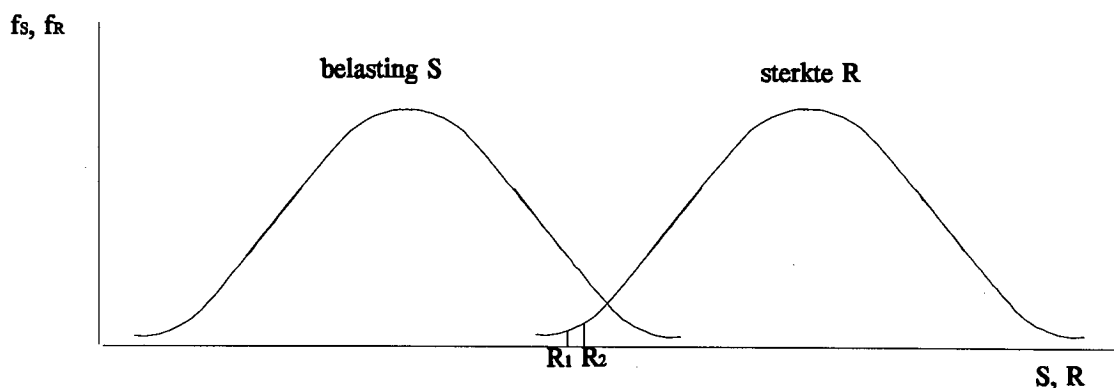
1	Inleiding	1
1.1	Niveau 2 benaderingsmethoden	3
1.2	Iteratieve bepaling van het ontwerppunt	7
1.3	Convergentieproblemen	9
	Literatuur	11

1 Inleiding

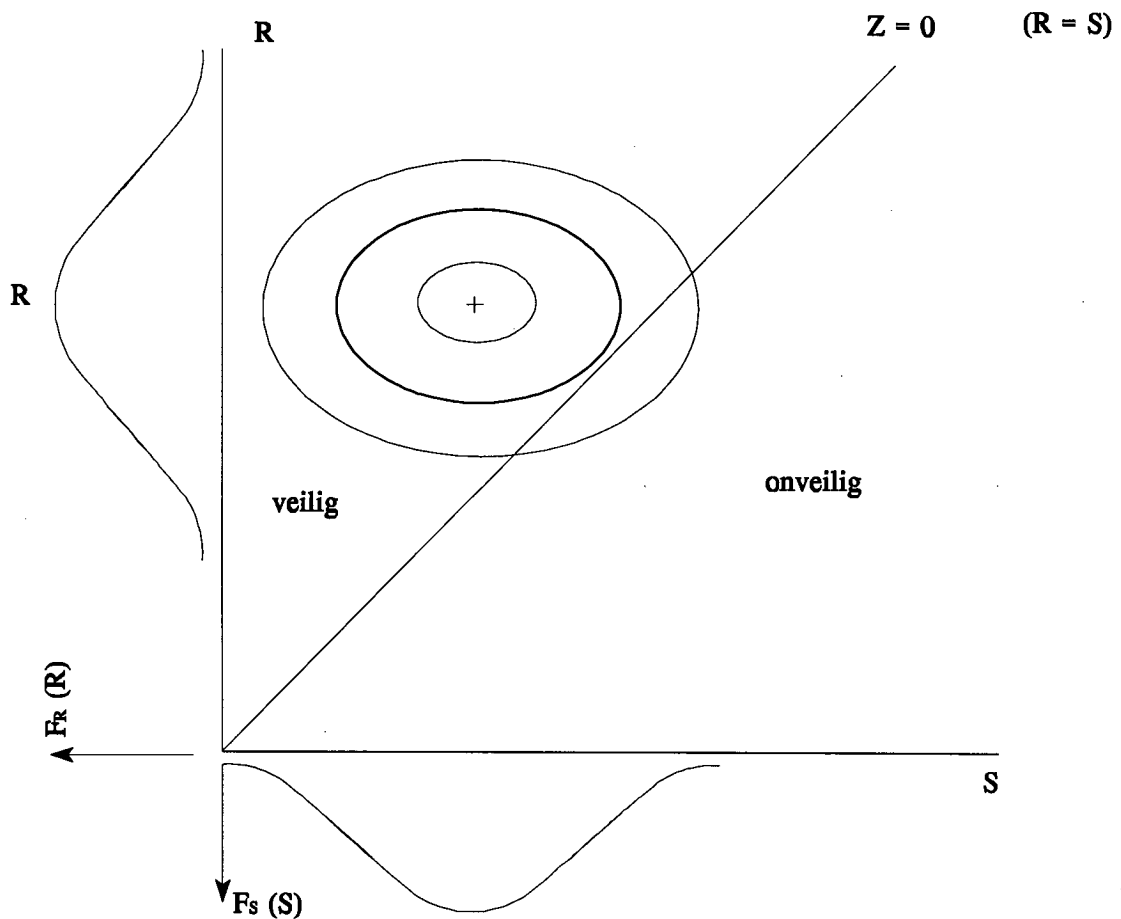
Bij het schrijven van dit hoofdstuk is literatuur [1,2,3] geraadpleegd. Grofweg kan gesteld worden dat een constructie bezwijkt indien de belasting groter wordt dan de sterkte. Dit bezwijken hoeft niet het volledig ineenstorten van een constructie te betekenen maar houdt wel in dat de constructie de functie waarvoor hij is gebouwd niet (geheel) meer kan uitoefenen. Met andere woorden de constructie faalt. Om de kans op falen te bepalen wordt gebruik gemaakt van een probabilistische veiligheidsanalyse. Voor het uitvoeren van zo'n veiligheidsanalyse wordt een Z-functie gedefinieerd. Deze Z-functie (betrouwbaarheidsfunctie genoemd) geeft het verschil tussen sterkte en belasting: $Z = R - S$ waarin R de sterkte en S de belasting voorstelt. Falen treedt op indien $Z(R,S) < 0$. $Z = 0$ is de bezwijkgrens terwijl $Z > 0$ het veilige gebied is. Indien de verdeling van R en S bekend zijn kan de faalkans bepaald worden.

Bijvoorbeeld: de kansdichtheidsfunctie van de sterkte is $f_R(r)$

de kansdichtheidsfunctie van de belasting is $f_S(s)$



Bezwijken treedt op indien de belasting groter is dan de sterkte. Indien de sterkte R_1 is, is de bezwijkkans de kans dat $S > R_1$ is. Hetzelfde geldt voor R_2 enzovoort. Om de volledige faalkans te bepalen zal de sterkte geïntegreerd moeten worden aangezien bovenstaande voor elke r opgaat. Hetzelfde voorbeeld kon ook als volgt worden weergegeven.



De gezamenlijke kansdichtheidsfunctie $f_R(r) * f_S(s)$ is als isolijnenfiguur in het plaatje getekend. De faalkans P_f is de inhoud van de gezamenlijke kansdichtheidsfunctie in het onveilige gebied ofwel

$$P_f = P(Z < 0) = \int \int_{Z < 0} f_R(r) f_S(s) dr ds$$

Voor de berekening van de faalkans worden drie niveaus onderscheiden, te weten

- niveau 3: een exacte berekening via analytische of numerieke integratie of een analyse door middel van Monte Carlo simulaties
- niveau 2: een benaderingsmethode waarbij de Z-functie wordt gelineariseerd
- niveau 1: een methode gebaseerd op partiële veiligheidsfactoren. Partiële veiligheidsfactoren zijn bepaald middels een niveau 2 of 3 methode. Dit betreft geen berekening van de faalkans maar de vertaling van analyses naar een praktische rekenregel.

De exacte methode (niveau 3) wordt erg bewerkelijk indien er sprake is van meerdere parameters. In het algemeen zal dit het geval zijn, daar zowel de sterkte R als de belasting S uit meerdere

parameters met eigen verdeling opgebouwd zal zijn.

De grenstoestand zal dan uit een meer dimensionaal vlak bestaan die de ruimte verdeelt in een gebied van veilige parametercombinaties en een gebied van parametercombinaties die dat niet zijn. De faalkans is de integraal over alle kansdichtheidsfuncties van de probleemparameters in het onveilige gebied. In dit rapport wordt nader ingegaan op niveau 2 benaderingsmethoden.

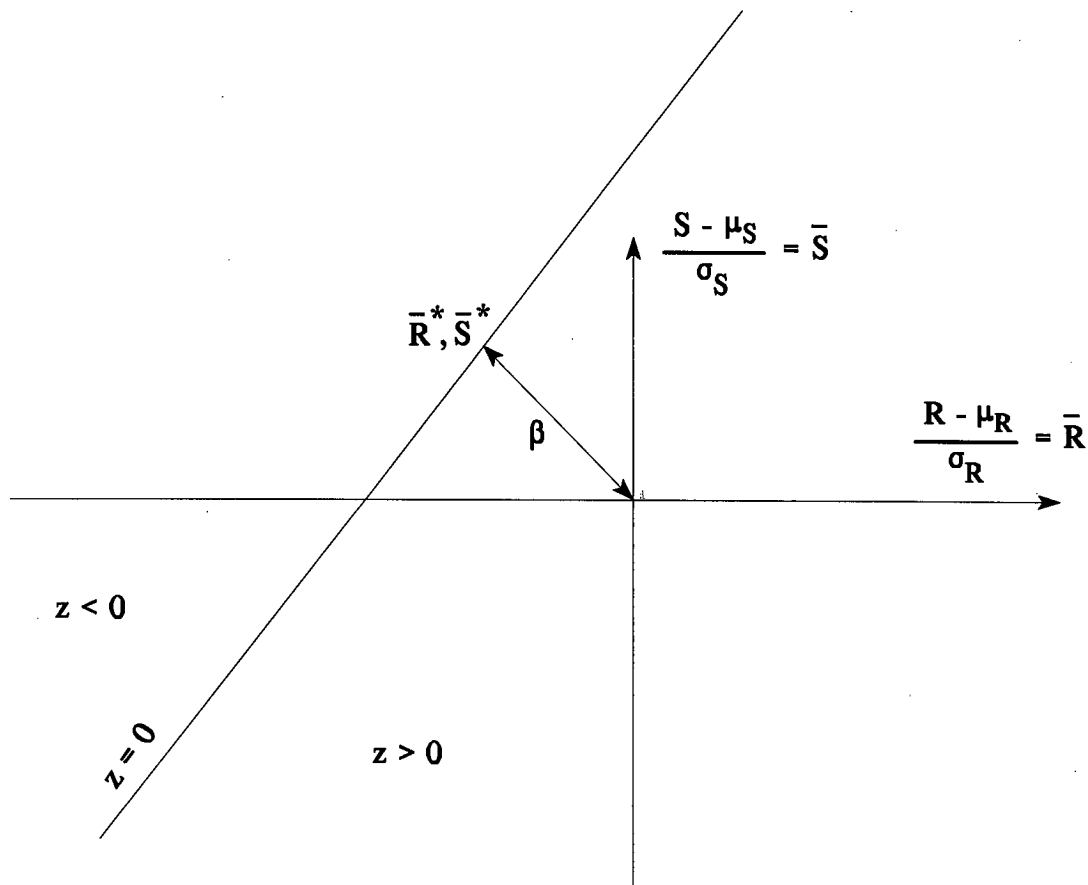
1.1 Niveau 2 benaderingsmethoden

Om tegemoet te komen aan het bezwaar van de rekenintensiteit is een benaderingsmethodiek ontwikkeld die bekend staat als "eerste orde tweede moment" benaderingen (engels: First Order Second Moment, FOSM). Ruwweg berusten die methoden erop dat de betrouwbaarheidsfunctie wordt gelineariseerd met behulp van een Taylor reeksontwikkeling tot en met de eerste orde term. Gevolg daarvan is dat de grenstoestand ook gelineariseerd wordt tot een recht hypervlak. De analyse is het eenvoudigst voor Gaussische probleemparameters. Voor probleemparameters met een niet-Gaussisch karakter is een speciale oplossingstechniek noodzakelijk. De linearisatie kent twee hoofdvarianten, namelijk linearisatie van de grenstoestandsfunctie in het "verwachtingswaardenpunt" (de mean value benadering) en linearisatie in een punt op de grens tussen veilig en onveilig gebied, in een punt waar de gezamenlijke kansdichtheid het grootst is. Dit punt wordt het ontwerppunt genoemd (design point) en de analyse een design point analyse. Hiervan zijn weer twee varianten, namelijk een waarbij het eventuele niet-Gaussische karakter wel en een waarbij dit niet genegeerd wordt. Bij de laatste worden niet-Gaussische probleemvariabelen eerst getransformeerd tot Gaussische variabelen, waardoor natuurlijk de betrouwbaarheidsfunctie en de grenstoestandsdefinitie veranderen. Deze aanpak wordt ook wel de Approximate Full Distribution Approach (AFDA) genoemd. Het blijft echter een gelineariseerde benaderingsmethode. Deze benaderingen worden aangeduid als niveau 2 benaderingen.

Als voorbeeld wordt dezelfde figuur uit het vorige hoofdstuk nogmaals getekend, maar dan zodanig dat op de assen niet meer de sterkte en belasting parameters R en S staan, maar hun

zogenaamde gestandaardiseerde waarden $\bar{R} = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R}$ en $\bar{S} = \frac{S - \mu_S}{\sigma_S}$. De grenstoestand kan weer

worden aangegeven.



Figuur 1.3 Veilige en onveilige gebieden in gestandaardiseerde parameterruimte

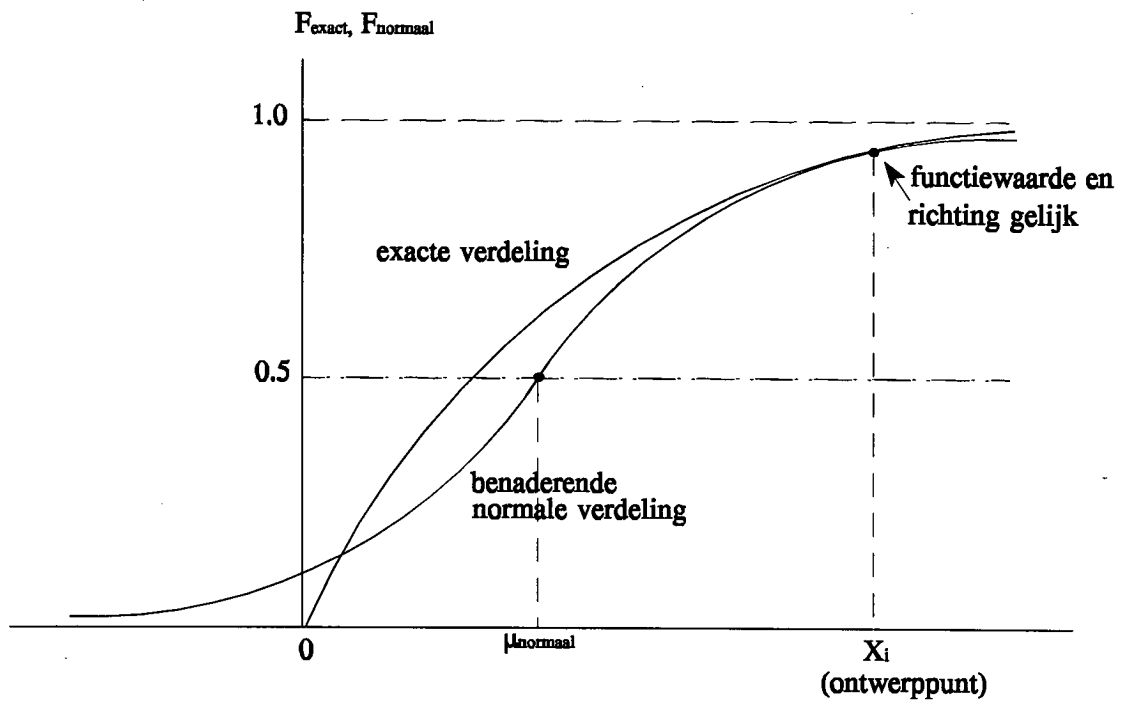
De analyse wordt uitgevoerd in de getransformeerde ruimte. De oorsprong van het assenstelsel komt overeen met het gemiddelde van de verdeling en van R en S. In deze ruimte wordt eveneens de getransformeerde Z-functie weergegeven. Als maat voor de betrouwbaarheid wordt de kortste afstand, als het nulpunt in het veilige gebied ligt, tussen de oorsprong en de grenstoestand genomen. De afstand noemen we de betrouwbaarheidsindex. Als R en S normaal verdeeld zijn kan de faalkans worden berekend:

$$P_f = \Phi(-\beta)$$

waarin Φ de standaardnormale kansverdelingsfunctie is. Als het nulpunt in het onveilige gebied ligt is de betrouwbaarheidsindex β de kortste afstand van dit nulpunt tot de grenstoestand, voorzien van een min-teken. Het punt \bar{R}^*, \bar{S}^* in Figuur 1.3 wordt het ontwerp punt genoemd. De bijbehorende R en S zijn de ontwerpwaarden van de parameters. In de analyse wordt het ontwerp punt iteratief bepaald. De analyse wordt afgebroken wanneer de ontwerp punten van opeenvolgende berekeningen met gegeven nauwkeurigheid aan elkaar gelijk zijn, zie 1.2.

De essentie van een Approximate Full Distribution Approximation methode is dat in een ont-

werppunt de exacte kansverdeling zo benaderd wordt dat in het punt geldt dat de kansverdelingsfunctie en de kansdichtheidsfunctie (dit is de afgeleide van de kansverdelingsfunctie) aan elkaar gelijk zijn. In het ontwerp punt wordt zo een gemiddelde en standaardafwijking van de benaderende normale verdeling bepaald. In Figuur 1.4 is dit schematisch weergegeven. Het stroomschema geeft de benodigde procedure schematisch weer:



Figuur 1.4

Bepaal de overschrijdingskans van de exacte verdeling in het ontwerp punt x_i^*

$$P = F_{\text{exact}}(x_i)$$



Met de inverse normale verdeling kan men bepalen hoeveel maal de standaardafwijking het ontwerp punt van μ_{normaal} verwijderd ligt

$$k = F^{-1}_{\text{normaal}}(P)$$



Uit een vergelijking van de kansdichtheid (richtingen) volgt de standaardafwijking:

$$\sigma_{\text{normaal}} = \frac{f_{\text{normaal}}(k)}{f_{\text{exact}}(x_i)}$$



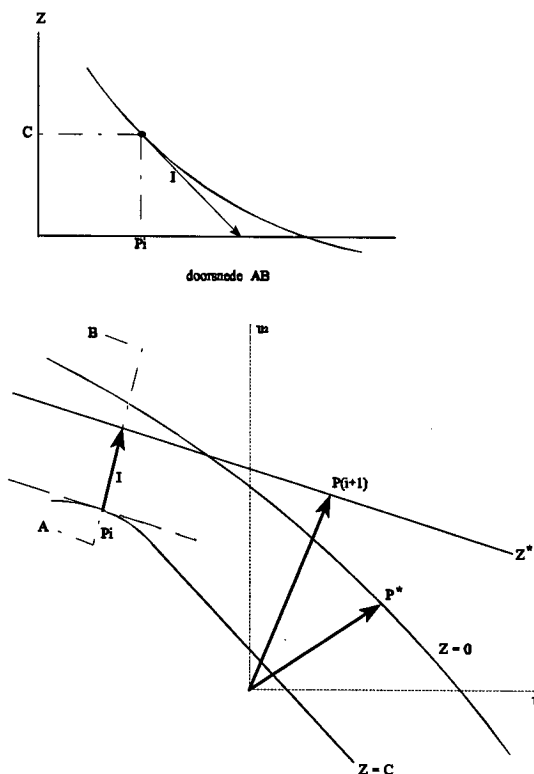
Het gemiddelde $\mu_{\text{normaal}} = x_i - k \cdot \sigma_{\text{normaal}}$

Hiermee ligt de verdeling vast. Voor elk ontwerp punt wordt de verdeling weer opnieuw bepaald: men heeft nu een z-functie opgebouwd uit normaal verdeelde variabelen.

1.2 Iteratieve bepaling van het ontwerp punt

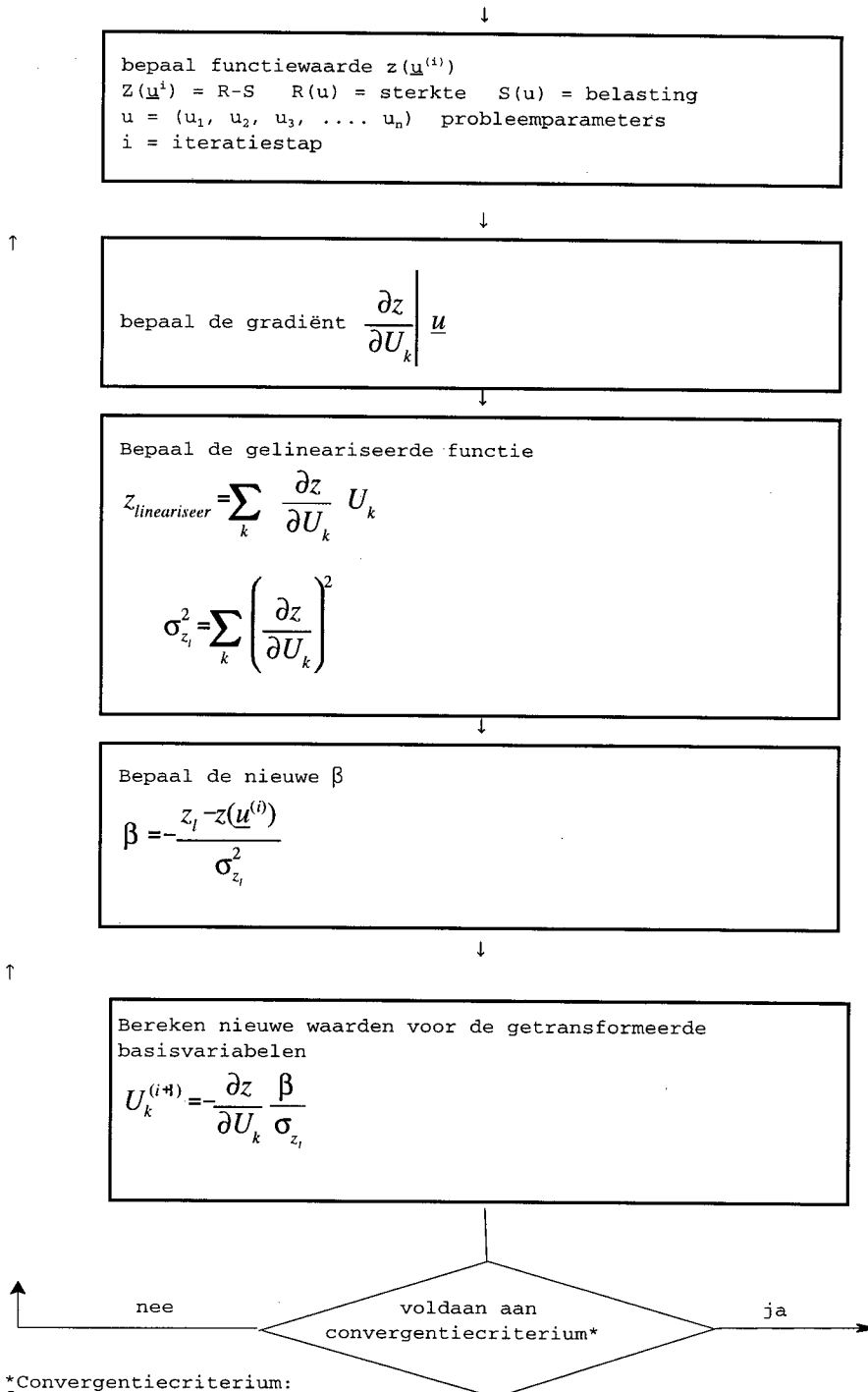
Het doel van de FORM procedure is om in de ruimte van onafhankelijke standaardnormaal verdeelde variabelen U_{ruimte} het punt op de grenstoestand ($z=0$) te vinden dat de kleinste afstand (β) tot de oorsprong heeft. Om dit te bereiken wordt eerst een ontwerp punt gekozen. Vaak zal dit de verwachtingswaarde van elke variabele zijn, maar noodzakelijk is dat niet. In de volgende figuren wordt de iteratieprocedure aanschouwelijk gemaakt.

In het ontwerp punt P_i heeft de z -functie de waarde C . Vanuit C wordt de gradiënt I bepaald. De grootte van deze gradiënt plus het gegeven dat de gelineariseerde z -functie loodrecht op de gradiënt staat geeft een nieuwe lijn z^* , het punt dat de kortste afstand tot het nulpunt heeft ($P_{(i+1)}$) wordt het nieuwe ontwerp punt, enzovoort tot P^* in de figuur gevonden is.



In het stroomschema heeft dit de volgende vorm:

↑ nieuwe iteratie



*Convergentiecriterium:

$$\begin{cases} Z < \epsilon_1 & \text{Z-functie is nul} \\ Z_j^* - A_i^* < \epsilon_2 & \text{ontwerppunt constant} \end{cases}$$

Het FORM pakket kent twee convergentiecriteria:

- de waarde van de z-functie in het ontwerppunt moet klein zijn ten opzichte van de waarde van de z-functie in het punt met gemiddelde waarden
- de verandering van de ontwerpwaarden in de laatste iteratiestap moet klein zijn.

1.3 Convergentieproblemen

Niettegenstaande dat FOSM methoden, in het bijzonder de AFDA vaak redelijk nauwkeurige benaderingen van de faalkans opleveren moet men toch uitkijken bij het gebruik ervan. De design point analyses zijn iteratief en het iteratieproces kan ontsporen. Er zijn natuurlijk een aantal trucs bedacht om in zulke gevallen het iteratieproces te sturen, zodat toch convergentie optreedt.

Convergentieproblemen worden vaak veroorzaakt door een sterk niet-lineair karakter van de betrouwbaarheidsfunctie, en ondanks de trucs kan dit betekenen dat een gelineariseerde benadering in die gevallen niet erg nauwkeurig is. Is men bij convergentieproblemen gewaarschuwd, erger is het wanneer het op te zoeken ontwerppunt niet uniek is. In het ontwerppunt is er een lokaal maximum van de kansdichtheid op het grenstoestandsoppervlak. Er zijn voorbeelden van problemen waarbij meerdere lokale maxima aanwezig zijn. De iteratieve procedure zoekt dan een van die maxima op, maar niet noodzakelijk die waarin de kansdichtheid in absolute zin het grootst is. Of zoiets aan de hand is kan worden onderzocht met behulp van uitgebreide gevoeligheidsanalyses van het rekenmodel. Soms vinden we bij "continue" variatie van de verwachtingswaarden en standaardafwijkingen van de probleemparemeters een "discontinu" verloop van de faalkans. Dit duidt op genoemd probleem. Ook hiervoor zijn wel, weer "oplossingen" te bedenken. Echter, het fenomeen duidt erop dat dit type analyse niet "foolproof" is.

Of convergentieproblemen bij de analyses heave een rol spelen is moeilijk van te voren in te schatten. Convergentieproblemen spelen vooral een rol wanneer de Z-functie een niet-lineair gedrag heeft, bijvoorbeeld bij elasto-plastisch grondgedrag, of wanneer meerdere grenstoestanden tegelijk gelden. Grondwaterstromingsberekeningen hebben in het algemeen een lineair karakter.

Het lijkt derhalve dat convergentieproblemen niet te verwachten zijn. Mogelijke bronnen van instabiel gedrag zijn:

- de invloed van de inbeddingsdiepte met name wanneer het watervoerend pakket voor een groot deel is afgesloten.
- de invloed van meerdere grenstoestanden. In de analyse wordt dit ondervangen door het uitvoeren van conditionele analyses. Bijvoorbeeld voor de situatie "gat in het scherm" worden analyses uitgevoerd met een gat in het scherm. Vervolgens wordt voor het optreden van een gat een kans van optreden geschat. Bij het doorrekenen van de foutenboom worden de resultaten van de conditionele analyse en de schatting van de kans van optreden gecombineerd.

Het verdient sterkte aanbeveling om rekenmodellen die gebaseerd zijn op FOSM methoden te controleren op:

- 1 nauwkeurigheid. Dit kan door controle uit te voeren m.b.v. Monte Carlo analyses. Die zijn veel robuuster.
- 2 niet uniciteit van het ontwerppunt. dit kan door uitgebreide gevoeligheidsanalyses uit te voeren.

Literatuur

[[1]TUD, 1984]

Vrouwenvelder, A.C.W.M. en J.K. Vrijling
Collegedictaat Probabilistisch Ontwerpen

[[2]Technische Universität München, 1979]

Fießler, B.
Berichte zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke
Heft 43 (FORM handleiding)

[[3]Calle]

Calle, E.O.F.
Handleiding PAO-cursus onderdeel GSO4

DEEL II
foutenboom

INHOUDSOPGAVE

1	Projectdefinitie	1
1.1	Inleiding	1
1.2	Probleemstelling	1
1.3	Gevolgdde werkwijze	2
1.4	Beschikbare informatie	2
2	Foutenboom kwelschermen	3
2.1	Constructies en geometrieën	3
2.2	Hoofdfuncties van een kwelscherm	4
2.3	Mogelijke faalmechanismen, oorzaken van falen en betrouwbaarheidsfuncties	5
2.3.1	Mogelijke faalmechanismen	5
2.3.2	Oorzaken van falen en betrouwbaarheidsfuncties	7
2.3.3	Globale inschatting van het belang van de onderkende mechanismen en de relatie met een traditionele ontwerpmethode	13
2.4	Foutenboom	16
2.5	Uitvoeren probabilistische analyses	17
2.5.1	Inleiding	17
2.5.2	Koppeling met het probabilistische rekenprogramma (FORM)	17
2.5.3	De betrouwbaarheidsfuncties	18
2.5.4	Het uitvoeren van de analyses	20
3	Conclusies	21
	Literatuur	23

1 Projectdefinitie

1.1 Inleiding

Dit rapport is opgesteld in het kader van Fase 1 van het project "Probabilistische gevoeligheidsanalyse heavingontwerpregels" uitgevoerd in opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van de Rijkswaterstaat. De werkzaamheden worden uitgevoerd in het kader van de TAW/B met projectnaam TAWB/GEVHEV en verplichtingennummer 3100-0178. Het voorliggende rapport betreft het onderdeel 3 van het projectplan HOAT-8P-96084 te weten 'Opstellen Foutenboom'.

Het doel van het project is om het functioneren van een kwelscherm in een primaire waterkering en de bij het ontwerp van een kwelscherm aan te houden ontwerpvoorschriften in het bijzonder de heaveregel te analyseren aan de hand van een foutenboom. De probleemstelling en de wijze van aanpak van onderdeel 3 zijn beschreven in 1.2 en 1.3. Een overzicht van de beschikbare informatie is verzameld in 1.4. De uitwerking is beschreven in hoofdstuk 2. Conclusies en aanbevelingen zijn verzameld in hoofdstuk 3.

1.2 Probleemstelling

Eén van de faalmechanismen van een hoogwaterkering is het ontstaan van zandmeevoerende wellen. Zandmeevoerende wellen ontstaan als gevolg van opbarsten gevolgd door het ontwikkelen van een pipe. Een middel om een aanvaardbaar veiligheidsniveau ten aanzien van zandmeevoerende wellen te realiseren is het aanleggen van een steunberm aan het binnentalud. Echter een nadeel van steunbermen is de benodigde ruimte en de gevolgen daarvan voor eventueel aanwezige bebouwing etc. Een alternatief voor een steunberm is het installeren van een kwelscherm vaak damwandschermen, met een zodanige lengte dat aan de benedenstroomse zijde van het kwelscherm geen heave kan optreden. Een kwelscherm kan worden ontworpen aan de hand van de heaveregel. Kwelschermen worden ook toegepast bij kunstwerken met een waterkerende functie, bijvoorbeeld sluizen. Ook in die situaties kan heave aan de benedenstroomse zijde optreden. Voor het ontwerp van een kwelscherm ten aanzien van heave is een ontwerpinstrument ontwikkeld. De grondwaterstroming wordt hierbij berekend met een benaderingsmethode, de zogenaamde fragmentenmethode, zie [Paverd 1996], [GD 1995]. De resultaten van de analyse van de grondwaterstroming met de fragmentenmethode kunnen worden gebruikt bij de controle van de heaveregel. In het kader van dit project worden voor een aantal situaties met name situaties waarin falen van het kwelscherm optreedt, speciale fragmenten ontwikkeld. De wijze waarop voor die situaties een oplossing kan worden gevonden, is onderzocht in een andere deelstudie van deze fase van het project. De resultaten van dat deelonderzoek zijn beschreven in deel III van deze rapportage.

Voor de toepassing van de methode in de praktijk is het gewenst de gevoeligheid van de heavingregels in te schatten ten aanzien van spreiding van de parameters. Bij het ontwerp en de

toetsing van primaire waterkeringen wordt een probabilistische methode toegepast. De veiligheid c.q. het betrouwbaarheidsniveau wordt uitgedrukt in de kans op falen. De heavingontwerpregels dienen te worden ingepast in deze probabilistische methodiek. De resultaten van het project kunnen leiden tot aanbevelingen ten aanzien van de keuze van de waarden van parameters bij het evalueren van het mechanisme heave.

In het projectplan HOAT-8P-96084 zijn voorlopig de volgende te evalueren onderdelen geïdentificeerd

- de invloed van zetting van de ondergrond op de stromingsweerstand van damwanden
- de invloed van onvolkomenheden (gaten en lokale lek) op de stromingsweerstand van damwanden op de betrouwbaarheid van damwanden
- de invloed van de stochastische onzekerheid van de verschillende parameters in de uiteindelijke veiligheid van de constructie (bezwijken ten gevolge van heave)

In het kader van deze deelstudie dienen alle mogelijke mechanismen te worden geïdentificeerd en systematisch ondergebracht in een foutenboom. Daarnaast dient het oorspronkelijke werkplan voor de volgende fasen HOAT-8P-96084 te worden geëvalueerd en waar nodig bijgesteld.

1.3 Gevolgde werkwijze

De gevoeligheid van de heavingregels wordt bepaald aan de hand van een foutenboom. De stapsgewijze werkwijze voor het opstellen van een foutenboom is als volgt

- inventariseren van typen constructies en geometrieën (2.1)
- inventariseren en definitie van de hoofdfuncties van een kwelscherm (2.2)
- opstellen van een lijst van foutenbronnen, oorzaken en mechanismen die leiden tot falen van een kwelscherm (2.3)
- opstellen van de voorlopige foutenboom (2.4). In een foutenboom worden de faalmechanismen systematisch geordend en wordt de systeemwerking van de constructie weergegeven.
- analyseren van de foutenboom. In de volgende fase van het project worden berekend met de fragmentenmethode uitgevoerd. In dit rapport zal worden aangegeven hoe de resultaten dienen te worden geïnterpreteerd en wordt een voorstel gedaan voor een plan van aanpak van de volgende fasen van het onderzoek (2.5).

1.4 Beschikbare informatie

Bij het opstellen van de foutenboom is gebruik gemaakt van de volgende publicaties

- rapporten met betrekking tot het ontwikkelde ontwerpinstrument [Paverd 1994], [Paverd

- 1996], [DWW 1995a], [DWW 1995b], [GD 1995], [GD 1996]
- rapporten met betrekking tot de veiligheidsfilosofie van damwandconstructies: [GD 1990], CUR-Handboek Damwandconstructies, [CUR 166]

2 Foutenboom kwelschermen

2.1 Constructies en geometrieën

Als mogelijke toepassingen van kwelschermen in primaire waterkeringen worden de volgende situaties onderscheiden [Paverd 1994]

- een kwelscherm in een standaard dijkprofiel. Hierbij wordt uitgegaan van een dijklichaam bestaande uit slecht doorlatende lagen mogelijk afgewisseld met goed doorlatende lagen, bijvoorbeeld een zandkern. De dijk is aangelegd op een semi-permeabele laag met daaronder een watervoerende pakket. Het watervoerend pakket staat in verbinding met de rivier. Een kwelscherm is ingebed in het watervoerend pakket met als doel het beperken van de kans op zandmeevoerende wellen. Het scherm kan op verschillende plaatsen in de dijk zijn geïnstalleerd. Mogelijke locaties zijn:
 - in de teen aan de binnenzijde
 - in de teen aan de buitenzijde
- één of meerdere kwelschermen ter plaatse van een kunstwerk dat een onderdeel vormt van een primaire waterkering. Het kunstwerk kan gefundeerd zijn op palen of op staal. Eén of meerdere schermen aan de binnen en buitenzijde reduceren de kwel en beperken de kans op opbarsten gevolgd door piping.

In relatie tot de wijze waarop het kwelscherm wordt geïnstalleerd bestaan de volgende uitvoerings- en constructie mogelijkheden, [Paverd 1994]

- I inbrengen door grondverdringing
 - stalen damwand door trillen, heien of spuiten
 - een bentoniet of cement-bentoniet schermwand
 - een gespoten kunststof schermwand
 - jet grouting met bentoniet of cement-bentoniet
 - een panelenwand uitgevoerd in bentoniet of cement-bentoniet
- II inbrengen door uitgraven van grond en na inbrenging weer aanvullen
 - een scherm van klei
 - slurry trench techniek

- diepwand van bentoniet of cement-bentoniet eventueel in combinatie met een folie
- een kunststoffolie
- een palenwand van bentoniet of cement

III verminderen van de doorlatendheid van de grond

- injectie van waterglas

Welke uitvoeringen toepasbaar zijn voor het installeren van een kwelscherm in of achter een primaire waterkering hangt o.a. af van de mogelijke invloed van een uitvoeringsmethode op het betrouwbaarheidsniveau van de kering. De toepasbaarheid van de verschillende technieken kan nader worden onderzocht met een aanvullend haalbaarheidsonderzoek. Ten aanzien van de mogelijke alternatieven wordt voorlopig het volgende aangehouden:

- een geheide stalen damwand is een haalbaar alternatief afgezien van mogelijke effecten van het inbrengen van de wand
- een klei-zand scherm geïnstalleerd door een slurry-trench techniek lijkt haalbaar. De vereiste doorlatendheid van de wand is een belangrijk aspect.
- een bentoniet of cement-bentoniet schermwand geïnstalleerd door uitgraven met grijpers of met behulp van een frees lijkt een haalbare methode. Ook hier is de kwaliteitsborging tijdens de uitvoering belangrijk met name de kans dat de sleuf wordt dichtgedrukt.
- een kleischerm is een uitgegraven sleuf lijkt niet haalbaar vanwege de stabiliteit van de sleuf in de uitvoeringsfase. Een gebruikelijk alternatief hiervoor in de praktijk is een kleikist.

2.2 Hoofdfuncties van een kwelscherm

Als falen van een kwelscherm wordt gedefinieerd: "niet meer vervullen van één of meerdere hoofdfuncties.

De hoofdfuncties van een kwelscherm zijn:

- het vergroten van de hydraulische weerstand van het watervoerend pakket met als doel het beperken van het uittreeverhang.
- het keren van water. Door het drukverschil tussen de boven- en benedenstroomse zijde van het scherm is er een belasting op de wand.

Nevenfuncties van een kwelscherm kunnen zijn:

- het beperken van het kweldebiet, in het bijzonder ter plaatse van een kunstwerk. De

mogelijkheden om het kweldebiet met een scherm te beperken zijn gering. Een kwel-scherm is in die situatie pas effectief bij een vrijwel volledige afsluiting van het watervoe-rend pakket.

- het keren van grond. In het algemeen is het maaiveld ter plaatse van een kwelscherm horizontaal en worden er geen belastingen door het grondmassief op de wand uitgeoefend. Het is mogelijk dat het scherm geplaatst is binnen het potentiële totale bezwijkmecha-nisme van de dijk. In dat geval wordt er een belasting op het scherm uitgeoefend. Een kwelscherm kan tevens de functie hebben van stabiliteitsscherm met als doel het realise-ren van een aanvaardbaar veiligheidsniveau van de stabiliteit van een bepaald dijkprofiel. In de laatste gevallen dient het falen van het scherm bijvoorbeeld uitgevoerd als dam-wandscherm te worden opgenomen bij het beoordelen van de totale stabiliteit.

2.3 Mogelijke faalmechanismen, oorzaken van falen en betrouwbaarheids-functies

2.3.1 Mogelijke faalmechanismen

Falen van een constructie treedt op als gevolg van mogelijke ongewenste gebeurtenissen. In de NEN 6700 voor bouwconstructies worden twee typen ongewenste gebeurtenissen onderscheiden, te weten

- IA het optreden van een uiterste grenstoestand.
- IB het optreden van te grote vervormingen.

Een uiterste grenstoestand beschrijft een mogelijk bezwijkmechanisme. Mogelijke bezwijkmecha-nismen ook wel aangeduid als faalmechanismen van een damwandconstructie zijn geïdentificeerd in het kader van het Bouwdienst/CUR-onderzoek "Veiligheid van damwandconstructies", zie [GD 1990], [CUR 166]. Het falen van een damwandconstructie is in die studie geanalyseerd aan de hand van een foutenboom. Die foutenboom is opgenomen in bijlage 1 bij dit rapport. De faalme-CHANISMEN van een damwandconstructie gelden ten dele ook voor een kwelscherm. Een aantal zijn niet van toepassing omdat ze betrekking hebben op het falen van het anker. Een kwelscherm is uitgevoerd als onverankerde wand. Specifieke faalmechanismen voor een kwelscherm zijn geïdentificeerd bij het opstellen van de fragmenten, zie deel III van deze rapportage. Uitgangspunt is dat de eisen ten aanzien van de vervormingen in de gebruikstoestand een voldoende veiligheidsniveau ten aanzien van grenstoestand IB waarborgen.

Rekeninghoudend met de indeling die in de NEN6700 wordt aangehouden zijn de mogelijke faalmechanismen van een kwelscherm:

IA: Falen van een kwelscherm als gevolg van het optreden van een uiterste grenstoestand

1 wellen

1.1 een wel in het achterland

1.2 een wel ter plaatse van een kunstwerk

wellen in combinatie met opdrijven

1.3 een wel gecombineerd met opdrijven in het achterland ingeval van een afdekkend kleipakket

1.4 een wel bovenstrooms van een kwelscherm gecombineerd met opdrijven van het afdekkend pakket

2 heave

2.1 heave ter plaatse van een kwelscherm, afhankelijk van de positie van het kwelscherm onder te verdelen in

2.1.1 heave ter plaatse van een kwelscherm in het binnentalud

2.1.2 heave ter plaatse van een kwelscherm in het buitentalud

2.1.3 heave in combinatie met opdrijven

2.2 heave te plaatse van een kunstwerk

2.2.1 heave ter plaatse van het meest binnendijks geplaatste kwelscherm

2.2.2 heave van de kolkbodern van een sluis met open kolkbodern

2.2.3 heave in combinatie met opdrijven

3 instabiliteit van de schermwand

3.1 instabiliteit van de wand door onvoldoende steundruk bij de teen

3.2 het optreden van een plastisch scharnier in de wand

3.3 overschrijden van de toelaatbare vervorming (kopverplaatsing) van de damwand
De toelaatbare vervorming wordt bepaald door de mogelijke gevolgen van het overschrijden van de toelaatbare vervorming.

4 instabiliteit ten gevolge van een totaal (Bishop) mechanisme

IB Falen van een kwelscherm door grote vervormingen waardoor niet meer aan het veiligheidsniveau wordt voldaan.

Falen van de constructie ten aanzien van dit mechanisme wordt niet getoetst. In het algemeen garanderen de eisen ten aanzien van de toelaatbare verplaatsingen (doorbuiging) in de gebruiksfase een voldoende veiligheidsniveau ten aanzien van bezwijken door te grote vervormingen.

2.3.2 Oorzaken van falen en betrouwbaarheidsfuncties

Op grond van de inventarisatie in 2.3.1. treedt falen van een kwelscherm op wanneer een uiterste grenstoestand (IA) wordt overschreden. In zo'n geval is de belasting S (solicitation) groter dan de sterkte R (resistance). Het falen is vastgelegd in de betrouwbaarheidsfunctie ook wel performance- of Z-functie. Deze functie is de formele beschrijving van het mechanisme. Bij heave bijvoorbeeld wordt de grenstoestand overschreden wanneer het optredend verhang i achter de damwand groter is dan het verhang waarbij fluidisatie optreedt.

Falen kan optreden door verschillende mogelijke oorzaken. De grootte van parameters in de Z-functie en de spreiding van de parameters vertegenwoordigen de oorzaken van falen.

Hieronder is per mechanisme aangegeven hoe de betrouwbaarheidsfunctie is gedefinieerd en wat mogelijke oorzaken van falen zijn. Dit betreft de faalmechanismen die zijn geïdentificeerd in 2.3.1.

IA Falen door het optreden van een uiterste grenstoestand

1 wellen

1.1 een wel in het achterland

Een wel in het achterland treedt op door opbarsten van het afdekkende pakket in combinatie met het ontwikkelen van een pipe. Opbarsten wordt bepaald door het uitreeverhang en het ontwikkelen van een pipe door de kritieke hoogte H_{crit} . Een algemene uitdrukking voor de betrouwbaarheidsfunctie is

$$\begin{aligned} \text{opbarsten: } Z &= 1 - \frac{i}{i_{kritiek}} \\ \text{piping: } Z &= 1 - \frac{H}{H_{crit}} \end{aligned}$$

De optredende hoogte wordt bepaald door de buitenwaterstand H , de kritieke hoogte volgt uit het piping criterium.

In het kader van het project wordt eveneens gekeken naar de ontwikkelde lengte l van de pipe. Een alternatief criterium voor het optreden van een wel, dat zal worden onderzocht, is het ontstaan van een pipe met bepaalde lengte. Een karakteristieke lengte is l_{crit} , dit is de lengte waarbij het kritieke verval optreedt. Het alternatieve criterium is een toetsing of de ontwikkelde lengte een opgegeven maat overschrijft. Rekeninghoudend met het optreden van opbarsten wordt de betrouwbaarheidsfunctie

$$\text{opbarsten: } Z = 1 - \frac{i}{i_{\text{kritiek}}}$$

$$\text{piping: } Z = 1 - \frac{l}{A \cdot l_{\text{crit}}}$$

De te toetsen lengte van de pipe is met de factor A uitgedrukt als fractie van de kritieke lengte. Als A gelijk is aan 1.0 is het criterium gelijk aan het oorspronkelijke criterium. In de analyses zal voorlopig de eerstgenoemde definitie worden gehanteerd.

Een kwelscherm in het buitentalud vermindert te kans van optreden van een wel.

1.2 een wel ter plaatse van een kunstwerk

Aan de binnenzijde van een kunstwerk kan een wel optreden. Hiervoor wordt een speciaal fragment opgesteld. Uitgangspunt is dat hier het afdekkende lagen pakket niet aanwezig is. Een wel treedt op bij het kritieke verhang over het kunstwerk. Een algemene uitdrukking voor de betrouwbaarheidsfunctie is

$$\text{piping: } Z = 1 - \frac{H}{H_{\text{crit}}}$$

Ook hier kan de lengte van de pipe getoetst worden, zie 1.1.

wellen in combinatie met opdrijven

Door waterdrukken onder een afdekkend kleipakket kan het kleipakket opdrijven. Opdrijven kan een inleidend mechanisme tot bezwijken zijn bijvoorbeeld door piping van een zandlaag.

1.3 een wel gecombineerd met opdrijven in het achterland ingeval van een afdekkend kleipakket

Door de waterdrukken onder de afdekkende kleilagen kan dit pakket opdrijven. De betrouwbaarheidsfunctie is

$$\text{opdrijven: } Z = 1 - \frac{\phi}{\phi_{\text{grens}}}$$

De kleilaag drijft op wanneer de potentiaal onder de kleilaag ϕ groter is dan de grenspotentiaal ϕ_{grens} . De grenspotentiaal hangt af van het gewicht van de afdekkende lagen. Het optreden van piping wordt beschreven door het pipingcriterium, zie 1.1. Bij piping door opdrijven treedt bezwijken op door een combinatie van mechanismen dat wil zeggen dat eerst opdrijven optreedt gevolgd door piping. Bij het doorrekenen van de foutenboom dient met deze parallelwerking rekening te worden gehouden.

- 1.4 een wel bovenstrooms van een kwelscherm gecombineerd met opdrijven van het afdekkend pakket

Bij een in het achterland geplaatst kwelscherm kan aan de bovenstroomse zijde opdrijven plaatsvinden. Dit hangt samen met de waterdruk voor het kwelscherm en het gewicht van de afdekkende lagen. Afhankelijk van de positie van het scherm betreft dit een deel van het binnentalud van de kering. Vervolgens kan bezwijken optreden door piping.

2 heave

- 2.1 heave ter plaatse van een kwelscherm

- 2.1.1 heave ter plaatse van een kwelscherm in het binnentalud

Heave treedt op wanneer het gemiddelde verhang i over de inbeddingsdiepte van de damwand aan de benedenstroomse zijde een gegeven waarde, de kritieke waarde i_{kritiek} overschrijdt. In dat geval treedt fluïdisatie van het grondmassief achter het kwelscherm op. Een algemene uitdrukking voor de betrouwbaarheidsfunctie voor dit mechanisme is

$$Z = 1 - \frac{i}{i_{\text{kritiek}}}$$

Het betrouwbaarheidsniveau wordt bepaald door de inbeddingsdiepte van het kwelscherm. Het optredend verhang i volgt uit een berekening, zie 2.5.2. De berekening van de grondwaterstroming voor de verschillende situaties met behulp van de fragmentenmethode is uitgewerkt in deel III van dit rapport. Parameters die de grootte van het verhang bepalen, zijn de geometrie en de doorlatendheid van verschillende grondlagen. Een parameter die de stroming beïnvloedt is de doorlatendheid van het watervoerend pakket. Aspecten die de gemiddelde doorlatendheid en gemeten spreiding beïnvloeden zijn

- heterogeniteit als gevolg van de sedimentaire structuur
- een gelaagde opbouw van het pakket
- het ontstaan van preferente stroombanen

Bij het uitvoeren van de analyses is de keuze van doorlatendheid belangrijk. In de fragmentenmethode wordt met een homogene doorlatendheid per fragment gerekend. Mogelijk dat de invloed van preferente stroombanen voor een deel kan worden onderzocht door het variëren van de doorlatendheid achter het kwelscherm. Indien uit de analyses blijkt dat de spreiding van de doorlatendheid een grote invloed heeft op de berekende faalkans is een nadere studie van de invloed van preferente stroombanen gewenst. Of variatie van alleen de doorlatendheid achter het scherm mogelijk is met de fragmentenmethode dient nader te worden onderzocht.

Een additionele oorzaak is het optreden van lekkage. Lekkage kan afhankelijk van de gekozen uitvoering van de wand optreden door

- kwelscherm van klei, zand-bentoniet of cement-bentoniet

- uitdrogen en scheuren ter plaatse van het maaiveld
- erosie door grondwaterstroming langs het scherm en daardoor een afname van de dikte met als gevolg een toename van het kweldebiet door de wand
- uitvoeringsfouten
 - lokaal onvoldoende steundruk van de bentoniet steunvloeistof waardoor lokaal de sleuf instort en er een lokaal lek in de schermwand ontstaat ("zandvenster")
 - fouten in de samenstelling van het (cement-)bentoniet mengsel waardoor tijdens de uitvoering lekkage naar het grondmassief optreedt resulterend in een gat in de schermwand.
- stalen damwandscherm
 - veroudering door afroesten. Afroesten en daardoor ontstaan van gaten zal voornamelijk plaatsvinden op het niveau van de grondwaterspiegel. Parameters die het betrouwbaarheidsniveau bepalen zijn de sterkte van de wand bij aanleg, omgevingsparameters (zuurstofgehalte van het grondwater, zuurgraad etc).
 - uitvoeringsfouten: uit het slot lopen van een damwandplank

Voor het analyseren van de invloed van gaten in een kwelscherm wordt een speciaal fragment ontwikkeld.

Een mogelijke oorzaak van falen is het optreden van een spleet naast het kwelscherm. Spletten naast het kwelscherm kunnen het gevolg zijn van uitvoeringsfouten of verplaatsingen van het kwelscherm ten opzichte van het grondmassief in de gebruiksfase. Het gevolg van een spleet naast het kwelscherm kan een geconcentreerde lekkage zijn die piping tot gevolg heeft, zie 4.3.

2.1.2 heave ter plaatse van een kwelscherm aan de buitenzijde

Hiervoor geldt de betrouwbaarheidsfunctie voor heave. Echter falen wordt ingeleid door het optreden van een wel ter plaatse van het uittreepunt aan de teen. Een wel ontstaat door opbarsten in combinatie met het overschrijden van het kritieke verhang ter plaatse van het uittreepunt. Vervolgens kan zich een pipe ontwikkelen. De pipe dient ontwikkeld te zijn tot aan het kwelscherm zonder dat het kritieke verhang is opgetreden. Falen treedt in zo'n situatie op door heave ter plaatse van het scherm. Het kritieke verhang ter plaatse van het uittreepunt ten aanzien van piping is vastgelegd met de kritieke hoogte H_{crit} uit de piping formule. Een algemene uitdrukking voor de betrouwbaarheidsfunctie voor dit mechanisme is

$$\text{opbarsten achterland: } Z = 1 - \frac{i}{i_{kritiek}}$$

$$\text{ontwikkelde pipe tot kwelscherm zonder piping: } l = L$$

$$\text{heave bij het kwelscherm: } Z = 1 - \frac{i}{i_{kritiek}}$$

Bij het doorrekenen van de foutenboom dient rekening te worden gehouden met de

parallel werking dat wil zeggen eerst dient opbarsten op te treden, vervolgens kan zich een pipe ontwikkelen. Daarna treedt falen op door heave bij het kwelscherm in de teen van het buitentalud. Indien van kwelscherm tot de afstand tot de locatie van opbarsten groter is dan de kritieke lengte l_{crit} treedt falen op door een wel, zie 1.1.

2.1.3 heave in combinatie met opdrijven

Opdrijven van een afdekkende pakket kan leiden tot heave bij een kwelscherm. De kans op opdrijven wordt bepaald door de verhouding van de potentiaal onder de kleilaag en de grenspotentiaal, zie 1.3. De kans van optreden van heave hangt af van de verhouding van het verhang i en het kritieke verhang $i_{kritiek}$, zie 2.1.2. Bij het berekenen van de kans op falen door heave als gevolg van opdrijven dient met de parallelwerking rekening te worden gehouden.

2.2 heave ter plaatse van een kunstwerk

2.2.1 heave ter plaatse van een kwelscherm

zie 2.1.1. Een mogelijke additionele oorzaak van falen is het ontstaan van een spleet onder het kunstwerk ingeval van een fundering op palen. Als gevolg van een spleet neemt de weerstand van het pakket af en daardoor het verhang toe.

2.2.2 heave van de kolkbodem van een sluis met open kolkbodem

zie 2.1.1

2.2.3 heave in combinatie met opdrijven, zie 2.1.3

4 instabiliteit van de schermwand

4.1 instabiliteit van de wand door grondbreuk bij de teen

De belasting door de waterdruk leidt tot grondbreuk bij de teen. De oorzaak is de gekozen damwandlengte in combinatie met de aanwezige grondsterkte en de belasting op de wand door de waterdruk. De sterkte wordt bepaald door de maximale passieve weerstand van het grondmassief. Deze weerstand hangt af van het bezwijkmechanisme. Bij een enkelvoudig verankerde damwand ligt het mechanisme vast, hierbij treedt rotatie rond het anker op. Bij een onverankerde wand ligt het mechanisme niet vast. Mogelijke bezwijkmechanismen zijn

- achterover kantelen door te weinig steundruk aan de teen
- voorover kantelen door te weinig inbeddingslengte

Het optredende mechanisme volgt uit een analyse van de schermwand, bijvoorbeeld met MSHEET. De maximale weerstand W_{max} is afhankelijk van het optredende mechanisme. De bij een bepaalde belastingssituatie en grondparameters gemobiliseerde weerstand wordt genoteerd als W_{mob} . Een algemene uitdrukking voor de betrouwbaarheidsfunctie voor dit mechanisme is

Het betrouwbaarheidsniveau wordt bepaald door het quotiënt van de gemobiliseerde weerstand en de maximale weerstand.

$$Z = 1 - \frac{W_{mob}}{W_{max}}$$

Het kerend vermogen van een cement-bentoniet wand is beperkt. Controle van de stabiliteit in de gebruiksfase vindt plaats aan de hand van een Bishop stabiliteitsanalyse of met eindige elementen berekeningen.

4.2 het optreden van een plastisch scharnier in de wand

Falen treedt op wanneer het maximaal buigend moment in de plank groter is als het plastisch moment van het gekozen profiel. Een algemene uitdrukking voor de betrouwbaarheidsfunctie voor dit mechanisme is

$$Z = 1 - \frac{M_{max}}{M_{plastisch}}$$

Het maximale buigend moment in de damwand met een bepaalde belastingssituatie wordt genoteerd met M_{max} en het draagvermogen bepaald door het plastisch moment van een gekozen profiel met $M_{plastisch}$.

4.3 overschrijden van de toelaatbare vervorming (kopverplaatsing)

Te grote vervormingen van de damwand aan de kop kunnen leiden tot een spleet tussen de damwand en het grondmassief. Geconcentreerde lek langs de damwand kan in zo'n geval mogelijk leiden tot piping. Oorzaken van een spleet tussen grondmassief en de damwand zijn

- kopverplaatsing als gevolg van de belasting tijdens hoogwater, mogelijk het effect van wisselende belastingen en de stijfheden van het grondmassief en het kwelscherm. De belasting kan ten dele worden bepaald door het bezwijkmechanisme totale stabiliteit.
- uitvoeringsfouten, bijvoorbeeld verplaatsingen tijdens het heien van een stalen damwand

Een algemene uitdrukking voor de betrouwbaarheidsfunctie voor dit mechanisme is

$$Z = 1 - \frac{u}{u_{toelaatbaar}}$$

Waarin u de berekende verplaatsing is en $u_{toelaatbaar}$ de toelaatbare verplaatsing. Dit mechanisme geldt met name voor kwelschermen die aan de binnenzijde in het achterland zijn geplaatst. De faalkans kan mogelijk worden beperkt door een speciale voorziening of door het kiezen van een profiel met een zodanige (lage) stijfheid, dat er geen aansluitproblemen ontstaan. Bij kunstwerken zullen de kwelschermen veelal verankerd zijn aan de constructie of zijn de verplaatsingen beperkt door een speciale voorziening. De stijfheid van een cement-bentoniet schermwand of van een klei-scherm is gering. De kans op aansluitproblemen met

het grondmassief is in die gevallen klein.

5 totale instabiliteit door Bishop glijcirkel

Uitgangspunt is dat ingeval van een damwand de Bishop cirkel wordt verplaatst naar de teen van de plank. Bij de beoordeling van de instabiliteit van de wand dient in zo'n geval de belasting van het grondmassief te worden meegenomen. Dit geldt ook voor kwel-schermen die zijn uitgevoerd als cement-bentoniet wand of kleischerm. Het kerend vermogen van een dergelijke wand is kleiner dan van een damwandscherm. De invloed van een dergelijke wand op de totale stabiliteit dient te worden nagegaan.

IB instabiliteit door te grote vervormingen

2.3.3 Globale inschatting van het belang van de onderkende mechanismen en de relatie met een traditionele ontwerpmethode

Bij een traditioneel ontwerp worden de uiterste grenstoestanden gecontroleerd met behulp van het resultaat van berekeningen waarin voor de parameters "karakteristieke" waarden worden gehanteerd. Bij het evalueren van de uiterste grenstoestand wordt een veiligheidsfactor in rekening gebracht. Er is geen direct verband tussen "karakteristieke" waarden van parameters en karakteristieke waarden in de zin van de NEN6700 (een waarde met een bepaalde onderschrijdingskans). Traditioneel worden conservatieve schattingen van het gemiddelde gehanteerd die mogelijk liggen tussen het gemiddelde en de karakteristieke waarde volgens de NEN.

Ten aanzien van de wijze waarop een ontwerp tot stand komt en de uit te voeren berekeningen kan het volgende worden opgemerkt.

Heave tijdens hoogwater

Uit een aantal grondwaterstromingsberekeningen bij variërende inbeddingsdiepte volgt de benodigde inbeddingsdiepte waarbij het berekende verhang over de hoogte van het kwel-scherm in een hoogwatersituatie gelijk is aan het toelaatbare kritieke verhang. Het toelaatbare verhang is gelijk aan het verhang waarbij fluidisatie achter de damwand optreedt gedeeld door een globale veiligheidsfactor. Voor het kritieke verhang wordt 0.5 aangehouden. Dit betekent een veiligheidsfactor in de orde van 2.0.

Invloed spleet onder een kunstwerk

Een mogelijke constructiewijze van een sluis gefundeerd op palen is een constructie in een open bouwput. De constructie is als volgt

- ontgraven bouwput
- heien van de paalfundering

- afdekken van de bodem van de bouwput met een zandlaag tot het niveau van de onderkant van de sluisvloer
- storten van de vloer van de sluis op de zandlaag c.q. de werkvloer

Na verharding wordt de belasting door de palen gedragen. In het grondmassief is de oorspronkelijke terreinspanning aanwezig. Spleetvorming als gevolg van klink treedt op bij een belasting op het massief groter dan de terreinspanning. Eventuele belastingen op het massief zullen ten dele door de palen worden gedragen. Echter belastingen zijn er niet en zodoende geen drijvende krachten voor klink. Een factor voor de kans op klink is de wijze waarop de bouwput na de constructiefase wordt aangevuld. Indien de aanvulling van de bouwput leidt tot een hoger spanningsniveau dan de oorspronkelijke terreinspanning is spleetvorming mogelijk.

Stabiliteit van het scherm

Gezien de situatie lijkt de belasting op een kwelscherm gering. Dit betekent dat de benodigde inbedding ten aanzien van de kwel ingeval van een damwandscherm ook zal voldoen ten aanzien van de stabiliteit. Het benodigd weerstandsmoment zal gering zijn.

Veroudering

Gaten in een damwand door veroudering (afroesten) kunnen worden voorkomen door het aanbrengen van een coating of een extra dikte.

Uitvoeringsfouten

De kans op het optreden van "uit het slot lopen van een damwandplank" hangt af van de terreinspanning en daarmee van de inbeddingsdiepte. Uit het slot lopen treedt op bij een terreinspanning groter dan 25 MPa. Voor een kwelscherm achter een dijk is de kans van optreden gering.

Door verplaatsingen tijdens het heien van een damwandscherm kunnen spleten naast de damwand ontstaan. Het gevolg hiervan is geconcentreerde lekkage langs de damwand en mogelijk lokale piping. De kwaliteitsborging tijdens de uitvoering is derhalve belangrijk. Ontstane spleten kunnen na installatie afgedicht worden.

Totale stabiliteit-vervormingen

Bij een kwelscherm dat binnen het potentiële bezwijkmechanisme van de dijk is geplaatst is een controle van de stabiliteit en de invloed van het kwelscherm noodzakelijk. Een stalen damwand dient op de belasting tijdens hoogwater te worden gedimensioneerd. De invloed van het kwelscherm uitgevoerd als cement-bentoniet of kleischerm op de totale dient te worden nagegaan. Een additioneel aspect zijn de vervormingen van een stalen damwand ten opzichte van het grondmassief rekeninghoudend met een wisselende belasting door hoogwater. Een spleet tussen de damwand en het grondmassief leidt mogelijk tot lokale lek en piping. De stijfheid van een bentoniet of kleischerm is gering en leidt daardoor niet tot aansluitproblemen met het grondmassief.

Heave in een sluis met open kolkvloer.

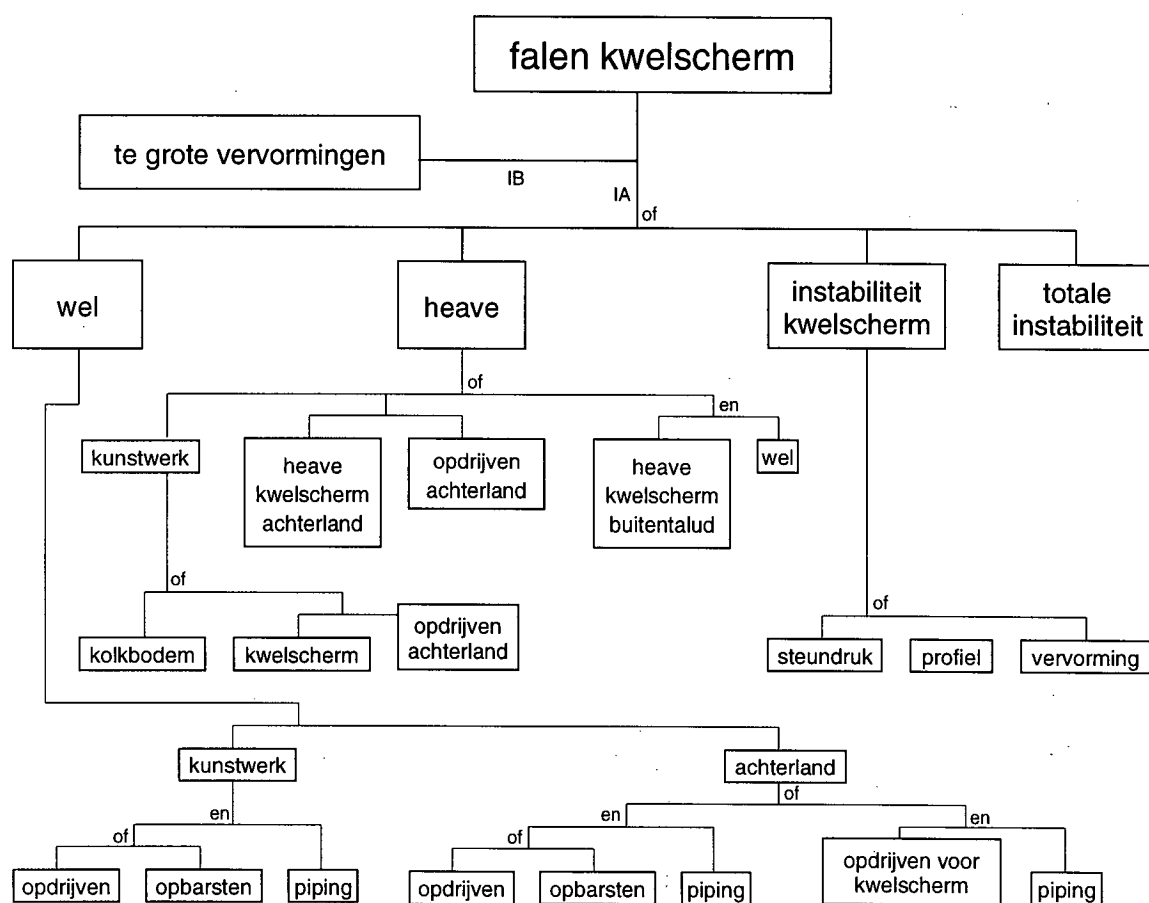
Een mogelijke uitvoering van een sluis is als volgt

- sluishoofden met deuren gefundeerd op palen
- sluiswanden bestaande uit verankerde damwandschermen. Voor de stabiliteit van de wanden zijn op de bodem stempels aangebracht.
- de vloer van de sluis is open

Door een verticaal verhang kan de vloer opbarsten. De maatgevende situatie hiervoor is tijdens droogzetten van de kolk ten behoeve van onderhoud en reparatie. De stempels verhogen de stabiliteit van de damwanden in deze fase. Opdrijven van de bodem is een ongewenste gebeurtenis aangezien de kolkvloer instabiel wordt. Een ander mogelijk effect is een belasting op de stempels door het opdrijven van de kleilaag. Bij het dimensioneren van de kwelschermen ter plaatse van de sluishoofden en wanden dient een veiligheid tegen opdrijven te worden aangehouden. Vanwege het tijdelijke karakter van deze situatie kan de veiligheid kleiner zijn dan de veiligheid tegen heave tijdens hoogwater.

2.4 Foutenboom

In een foutenboom worden de faalmechanismen geordend en de systeemwerking aangegeven. De foutenboom van een kwelscherm is weergegeven in figuur 2.1



Figuur 2.1 Foutenboom van een kwelscherm

2.5 Uitvoeren probabilistische analyses

2.5.1 Inleiding

In de volgende fasen worden probabilistische berekeningen uitgevoerd voor een aantal karakteristieke situaties voor het mechanisme Heave. De analyse van de foutenboom is gericht op het mechanisme heave. In de praktijk dient de bijdrage van de overige mechanismen voldoende klein te zijn. In deze paragraaf worden de volgende aspecten behandeld van de koppeling met het probabilistische rekenprogramma te weten

- de betrouwbaarheidsfuncties
- het uitvoeren van de analyses

2.5.2 Koppeling met het probabilistische rekenprogramma (FORM)

De probabilistische berekeningen worden uitgevoerd met het programma FORM. Bij de analyses worden het probabilistische pakket FORM en de fragmentenmethode gekoppeld. Het falen van de constructie is vastgelegd in de betrouwbaarheidsfunctie. Het resultaat van een analyse met FORM is de kans van falen ($Z < 0$) en de bijdrage van de statistische parameters aan de spreiding in de Z-functie. In FORM wordt voor de berekening van de kans op falen een benaderingsmethode toegepast, de zogenaamde tweede orde eerste moment methode. Hierin wordt het verloop van de betrouwbaarheidsfunctie gelineariseerd. De invoer van een analyse met FORM omvat

- een lijst van de stochasten. De statistische variabelen worden grootheden gekarakteriseerd
 - type statistische verdeling (bijvoorbeeld: deterministisch, standaard normaal, lognormaal, Gumbel)
 - gemiddelde,
 - de standaardafwijking
 - eventuele correlaties tussen variabelen via een correlatie matrix
- de definitie van de betrouwbaarheidsfunctie. De betrouwbaarheidsfunctie wordt in FORM geprogrammeerd in de daartoe bestemde subroutine ("GG").

In FORM wordt de Z-functie geëvalueerd met de actuele waarden van de parameters. De actuele waarden van de parameters zijn de waarden die de statistische variabelen krijgen tijdens het iteratieproces in FORM. Met die actuele waarden wordt de subroutine GG aangeroepen voor het berekenen van de Z-functie en hieruit afleiden van de partiële afgeleide van de Z-functie. Bij de koppeling dient in subroutine GG het verhang i volgens de fragmentenmethode en het kritieke verhang te worden berekend. Naast het definiëren van de invoer is het programmeren van de subroutine het belangrijkste onderdeel van de koppeling. Voor de invloed van specifieke situaties zoals een spleet onder een kunstwerk, worden speciale fragmenten ontwikkeld. Mogelijkheden voor het meenemen van opbouw van de te analyseren geometrie zijn

- het werken met stuurparameters. De opbouw van een geometrie met verschillende fragmenten is afhankelijk van de waarde van een stuurparameter.
- het maken van verschillende versies van de koppeling met een vaste opbouw van fragmenten.

Een algemene uitdrukking voor het verhang i ter plaatse van het laatste fragment is gegeven in [GD 1995]

$$I = \frac{P_N}{k} \frac{1}{d_N}$$

hierin zijn P_N en d_N grootheden die samenhangen met het laatste fragment. De lengte van het laatste damwandscherm wordt genoteerd met d_N .

2.5.3 De betrouwbaarheidsfuncties

De betrouwbaarheidsfunctie voor het optreden van een wel is als volgt gedefinieerd

$$\begin{aligned} \text{opbarsten: } Z &= 1 - \frac{i}{i_{\text{kritiek}}} \\ \text{piping: } Z &= 1 - \frac{H}{H_{\text{crit}}} \end{aligned}$$

De kans op piping is gebaseerd op de hoogwaterverdeling en de kritieke hoogte H_{crit} . In een later stadium kan de kans worden berekend met het alternatieve criterium op basis van de ontwikkelde lengte van de pipe.

De betrouwbaarheidsfunctie voor heave is als volgt gedefinieerd

$$\text{heave: } Z = 1 - \frac{i}{i_{\text{kritiek}}}$$

met hierin het optredende verhang i en het kritieke verhang. Het optredende verhang i voor een bepaalde geometrie en waarden van de parameters volgt uit een analyses met de fragmentenmethode, zie deel III. Het kritieke verhang is het verhang waarbij fluïdisatie van de grond achter de damwand optreedt. Dit volgt uit een evenwichtsbeschouwing. Voor een uniforme laag met constant opwaarts verhang is het kritieke verhang gelijk aan

$$i_{\text{kritiek}} = \frac{(1-n) \cdot (\gamma_k - \gamma_w)}{\gamma_w}$$

hierin is n de porositeit, γ_k het soortelijk gewicht van het korrelmateriaal en γ_w het soortelijk gewicht van water. Het soortelijk gewicht van de korrels en water zijn constant. De porositeit is een stochastische variabele.

Door het quotiënt i/i_{kritiek} te beschouwen is de nauwkeurigheid van de Z-functie in combinatie met

het afbreekcriterium waarbij voor de bepaling van het ontwerppunt (het punt waar $Z=0$) het iteratieproces in FORM wordt afgebroken onafhankelijk van de grootte van het verhang.

De betrouwbaarheidsfunctie voor opdrijven is

$$\text{opdrijven: } Z = 1 - \frac{\phi}{\phi_{\text{grens}}}$$

De grenspotential ϕ_{grens} is ook een stochastische grootte en wordt bepaald door de dikte van het afdekkende laag en het eigen gewicht.

$$\phi_{\text{grens}} = z_{\text{grens}} + D * \gamma_n$$

hierin is z_{grens} de locatie van de onderkant van het afdekkende pakket, D de dikte en γ_n het volume gewicht van het afdekkende pakket.

Opdrijven is een inleidend mechanisme en kan leiden tot piping of heave. Bij de analyse van de foutenboom dient met de systeemwerking rekening te worden gehouden.

Statistische parameters die de grootte van de Z -functies bepalen en worden onderzocht zijn;

- de doorlatendheid van het pakket (LNnormaal verdeeld)
- de buitenwaterstand (volgens Gumbel extreme waarden verdeling met gemiddelde en decimeringshoogte)
- de binnenwaterstand
- de positie van het scherm in de kering
- het inbeddingsniveau. In de praktijk is de mogelijke spreiding van het gerealiseerd inbeddingsniveau nihil. Een mogelijke foutenbron is scheefstand. De invloed van scheefstand op het verhang is verwaarloosbaar klein, zie [Paverd 1996]. Bij het evalueren van de betrouwbaarheid van bestaande constructies kan het inbeddingsniveau een onzekere grootte zijn.
- lekkage door de wand. Mogelijke situaties zijn:
 - een gat in de wand door;
 - afroesten van een stalen damwand resulterend in een gat ter plaatse van de freatische lijn
 - een uit het slot gelopen damwandplank: uitvoeringsfout
 - een gemiddelde lekkage over de hoogte van de wand
 - lekkage door het slot van een damwandscherm
 - lek door een kleischerm
 - lekkage door spleetvorming naast een damwand ten gevolge van uitvoeringsfouten of een te grote kopverplaatsing als gevolg van de wisselende belasting door opeenvolgende hoogwatersituaties
- ingeval van een kunstwerk is de weerstand afhankelijk van een mogelijke spleet onder het kunstwerk. Hiervoor wordt een speciaal fragment ontwikkeld.
- bij een kwelscherm dat in het buitentalud is geplaatst dient eveneens de betrouwbaarheid

ten aanzien van opbarsten en piping te worden geanalyseerd. Deze mechanismen zijn gecorreleerd. De Z-functie wordt in dat geval

$$\begin{aligned} \text{opbarsten achterland: } Z &= 1 - \frac{i}{i_{\text{kritiek}}} \\ \text{ontwikkelde pipe tot kwelscherm zonder piping: } l &= L \\ \text{heave bij het kwelscherm: } Z &= 1 - \frac{i}{i_{\text{kritiek}}} \end{aligned}$$

Falen treedt op wanneer de drie mechanismen tegelijk optreden. Bij het doorrekenen van de foutenboom dient met deze systeemwerking rekening te worden gehouden. De faalkans is in dit geval gelijk aan de kleinste van de drie mechanismen.

voor het evalueren van heave in de kolk bij een open kolkbodem is een speciaal fragment ontwikkeld.

2.5.4 Het uitvoeren van de analyses

De berekeningen worden uitgevoerd voor een aantal geometrieën. Dit zijn voor de toepassing van kwelschermen karakteristieke situaties. Deze geometrieën worden met de opdrachtgever gedefinieerd. Gegeven de geologische opbouw, een eventueel kunstwerk, de positie van het kwelscherm en de variabiliteit van grondparameters wordt het betrouwbaarheidsniveau van de constructie bepaald door het inbeddingsniveau. Daarnaast wordt het betrouwbaarheidsniveau beïnvloed door mogelijke lekkage en een eventuele spleet onder een kunstwerk. Het resultaat van een aantal analyses bij verschillend inbeddingsniveau van het kwelscherm is het (grafisch) verband tussen inbeddingsniveau en betrouwbaarheidsniveau, uitgedrukt in de betrouwbaarheidsindex β of de faalkans. Overeenkomstige verbanden kunnen worden afgeleid voor de invloed van lekkage en het ontstaan van een spleet. Voor een te ontwerpen constructie dient het inbeddingsniveau te worden bepaald. Voor een te ontwerpen constructie is onzekerheid omtrent het inbeddingsniveau nihil. Voorlopig wordt ervan uitgegaan dat de analyses worden uitgevoerd voor nieuw te ontwerpen constructies. het inbeddingsniveau is daarbij geen stochastische grootheid. Er kan voor gekozen worden om het inbeddingsniveau in principe als stochast te kunnen invoeren zodat het programma ook geschikt is voor het evalueren van bestaande constructies waarbij het gerealiseerde inbeddingsniveau niet (meer) nauwkeurig bekend is.

Uit de verschillende analyses kunnen de volgende resultaten worden afgeleid

- de invloed van onzekere grootheden op het betrouwbaarheidsniveau van een kwelscherm
- eisen ten aanzien van de spreiding door te beïnvloeden grootheden: lekkage, spleetvorming onder een kunstwerk, spleetvorming naast een damwand
- een eis omtrent het te realiseren betrouwbaarheidsniveau. Traditioneel wordt met een zeker kritiek verhang gerekend 0.5. Dit betekent een veiligheidsfactor van ongeveer 2.0. Voor het in rekening brengen van preferente stroombanen wordt in de praktijk in voorkomende gevallen een hogere veiligheidsfactor in rekening gebracht. Uit de analyses kan worden afgeleid met welk betrouwbaarheidsniveau uitgedrukt in de faalkans (of betrouwbaarheidsindex) de grootte van de traditionele veiligheidsfactor overeenkomt.

3 Conclusies

Het falen van een kwelscherm is vertaald in een foutenboom. De foutenboom is opgesteld aan de hand van mogelijke faalmechanismen en foutenbronnen. De bijdrage van de onderkende mechanismen aan het falen van een kwelscherm is ingeschat op grond van ervaring.

Bij het uitvoeren van de analyses is de keuze van doorlatendheid belangrijk. De invloed van heterogeniteit kan worden onderzocht door een keuze van het gemiddelde en de spreiding van de doorlatendheid. De invloed van preferente stroombanen kan mogelijk worden onderzocht door variatie van alleen de doorlatendheid achter de damwand. Of dit mogelijk is met behulp van de fragmentenmethode dient eerst nader te worden onderzocht.

Aanbevolen wordt in de probabilistische studie het effect van een spleet tussen een damwand en het grondmassief op de grondwaterstroming en de kans op piping te onderzoeken. Mogelijke oorzaken van een dergelijke spleet zijn:

- ontoelaatbare kopverplaatsing van de damwand
- uitvoeringsfouten

Literatuur

[CUR 166]

Damwandconstructies

Publicatie 166, CUR, Gouda, 1994

[DWW 1995a]

Helmus, E.F.M.

Handleiding "Heaving bij kunstwerken"

Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Nota: W-DWW-95-327, 1995

[DWW 1995b]

Burg, J.C. van der, M. van de Paverd

Grondwaterproblemen bij de Zuidersluis en de Kleine sluis van het sluizencomplex te IJmuiden

Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Nota W-DWW-95-354, 1995

[GD 1990]

Verzamelde rapporten van de studie "Veiligheid damwandconstructies"

Rapport Grondmechanica Delft, CO-305740, 1990

[GD 1995]

Heaving bij kunstwerken: Ontwerpmethodiek

Rapport Grondmechanica Delft, CO-356020/7, 1995

[GD 1996]

Integratie ontwerpregels Piping & Heaving

Rapport Grondmechanica Delft, CO-362570/6, 1996

[Paverd 1994]

Paverd, M. van de

Kwelschermen onder rivierdijken, Vooronderzoek

Rapport DWW-TUD, 644190, 1994

[Paverd 1996]

Paverd, M. van de

Kwelschermen onder rivierdijken, Onderzoek

Rapport DWW-TUD, 644190, 1996 herzien

BIJLAGEN

CUR-publicatie 166

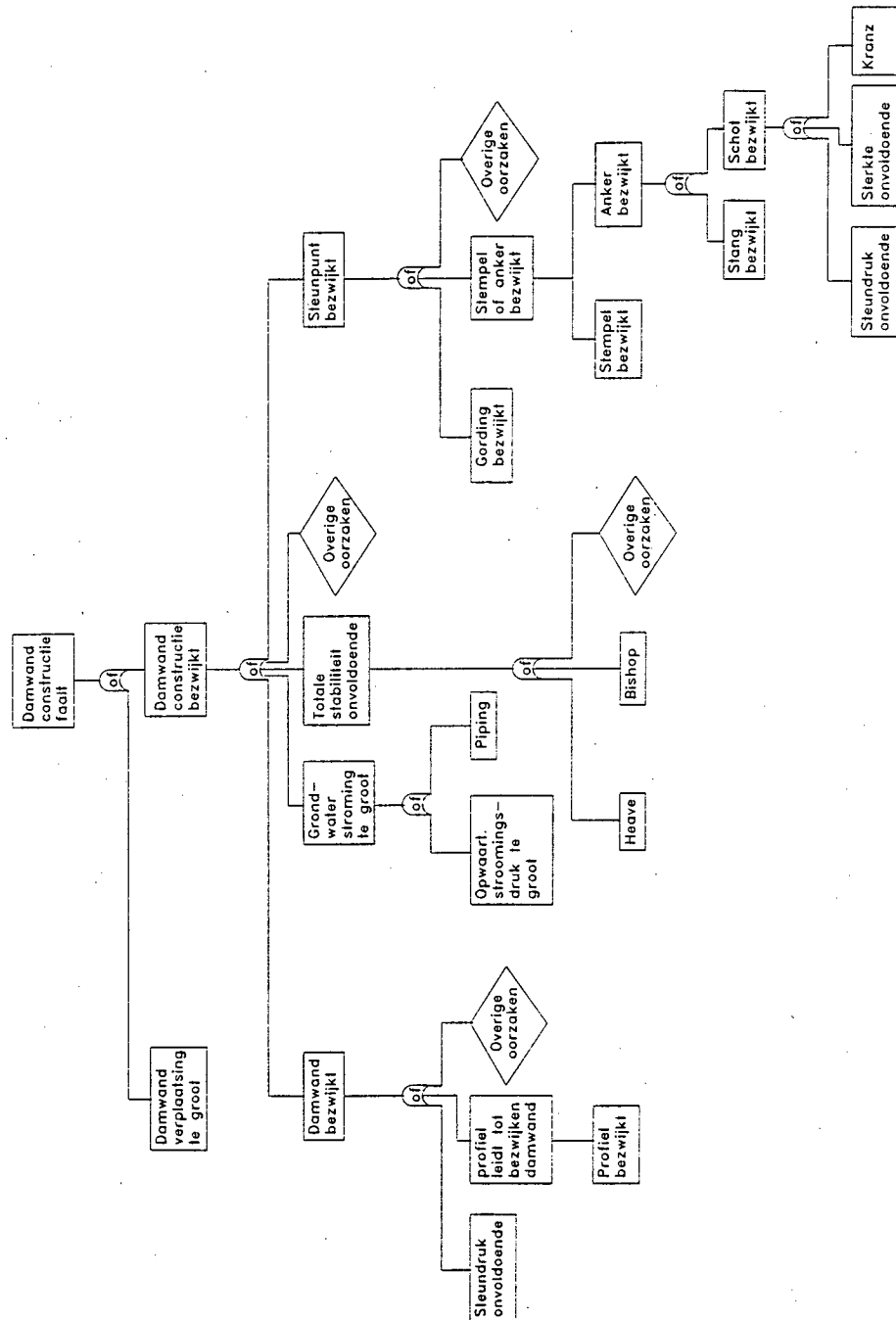


Fig. 2.13. Foutenboom voor het bezwijken van een damwandconstructie.

DEEL III
fragmenten
methode

Inhoudsopgave

Symbolenlijst	iii
1 Inleiding	1
2 Definitie fragmenten	3
2.1 Principe	3
2.2 Uitwerking	4
3 Beschrijving huidige fragmenten	5
3.1 Uiterwaardefragment	6
3.2 Kop- en Staartfragment	7
3.3 Tussenfragment	8
3.4 Achterlandfragment	9
3.5 Polderfragment	10
3.6 Sluisfragment	12
4 Nog toe te voegen fragmenten	15
4.1 Spleet onder sluisvloer	16
4.2 Lekke damwand	18
4.3 Gat in damwand	20
4.4 Universeler type fragment	21
5 Samenvatting en conclusies	23
Referenties	25

Symbolenlijst

a	[m]	: hoogte erosiekanaal
b	[m]	: korreldiameter
c	[d]	: weerstand damwand
d	[m]	: damwandlengte
h	[m]	: verval
k	[m/d]	: doorlatendheidscoëfficiënt
ℓ	[-]	: bovenstroomse erosielengte
p	[-]	: horizontale gradiënt
q	[-]	: verticale gradiënt
B	[m]	: bovenstroomse lengte
C	[-]	: coëfficiënt van Martin
D	[m]	: fragment hoogte
L	[m]	: fragment lengte
P	[m ³ /s/m]	: potentiaal
Q	[m ³ /s/m]	: debiet
W	[-]	: weegfunctie
γ	[kPa/m]	: soortelijk gewicht
ϑ	[DEG]	: beddingshoek
η	[-]	: coëfficiënt van White
κ	[-]	: intrinsieke doorlatendheid
λ	[-]	: benedenstroomse erosielengte
Λ	[-]	: leklengte

index p : deeltje
 w : water
 0 : beginwaarde

1 Inleiding

Een belangrijk aandachtspunt bij dijken en kunstwerken is de veiligheid. De constructie mag niet bezwijken vanuit zowel economisch als sociaal oogpunt. Helemaal uit te sluiten valt dit niet, omdat er altijd wel een zwakte te verzinnen is, waarmee de veiligheid in het geding komt. Het is niet de bedoeling als antwoord hierop een buitensporige maatvoering door te voeren. De kans op bezwijken moet teruggebracht worden tot een te accepteren niveau.

Hiertoe wordt er gewerkt met een foutenboom, waarin de mogelijke zwakte punten van een constructie en de onbekendheid in geometrie en grondeigenschappen worden gecategoriseerd. Via een probabilistische aanpak wordt vervolgens de kans op bezwijken berekend en afgekaderd. In de delen I en II is dit behandeld en uitgelegd.

Voor zo'n probabilistische aanpak is informatie nodig aangaande de te verwachten potentialen en debieten in de buurt van de constructie. Dit wordt behandeld in dit deel III. Mogelijke faalverschijnselen hierbij zijn: heaving, piping, kwel. Karakteristieke grootheden moeten hierbij bepaald worden zoals: uitreeverhang, kritiek verval, kerende hoogte, debiet.

Om de probabilistische analyse vlotjes te laten verlopen is er behoefte aan compacte rekenresultaten. Eindige elementen berekeningen komen hiervoor niet zo in aanmerking. Aan een flexibele analytische formule wordt de voorkeur gegeven. Het probleem is echter, dat een geometrie al gauw te ingewikkeld wordt om toegankelijk te zijn voor een analytische benadering.

Daarom is gekozen voor een aanpak via de fragmentenmethode. De geometrie wordt hierbij in mootjes gehakt, die elk apart doorgerekend kunnen worden en achter elkaar geschakeld het probleem vormen. Natuurlijk past dit niet helemaal precies en moet er een kleine afwijking worden getolereerd. In een probabilistisch proces is dit geen probleem.

Dit derde deel is als volgt opgebouwd. Eerst zal de fragmentenmethode beschreven worden in zijn algemeenheid. Vervolgens worden alle fragmenten die al in een eerder kader gespecificeerd zijn beschreven. In het kort wordt aangegeven waar ze voor dienen en wat hun bijzonderheden zijn. De analytische beschrijving wordt gepresenteerd in de vorm van een weegfunctie en er wordt een tekening van het fragment getoond.

Voor de probabilistische studie moeten variaties kunnen worden doorgerekend. Deze variaties betreffen zaken als een niet goed aansluitende sluisvloer, niet volledig waterdichte damwanden en de mogelijkheid van een gat in de damwand. De consequenties hiervan worden besproken en er worden benaderingen voorgesteld om dit te realiseren. een voorstel wordt gedaan om te komen tot een nieuwe generatie fragmenten, die veel geschikter is voor het werken met variaties.

2 Definitie fragmenten

Bij waterkerende constructies is het van belang de kwel er onder door goed in kaart te brengen. Het waterbezwaar is dan bekend en het verval kan dan zodanig begrensd worden dat erorieverschijnselen zoals heaving voorkomen kunnen worden. Voor een grillige geometrie kan hiertoe met behulp van een grondwaterstromingsprogramma een numerieke berekening gemaakt worden. In sommige gevallen echter gaat echter de voorkeur uit naar een analytische regel, waarmee snel en eenvoudig gewerkt kan worden.

Er is dan behoefte aan een handzame analytische oplossing van de stroming. Voor twee-dimensionale problemen kan een vruchtbaar gebruik gemaakt worden van de methode van complexe afbeeldingen. Hierbij wordt het verband tussen het complexe geometrievlak en het complexe potentiaalvlak gevonden door de randen van deze vlakken over elkaar heen te leggen. De methode is vrijwel universeel toepasbaar bij stationaire problemen met redelijk rechte randen. Een vrije waterspiegel is geen probleem.

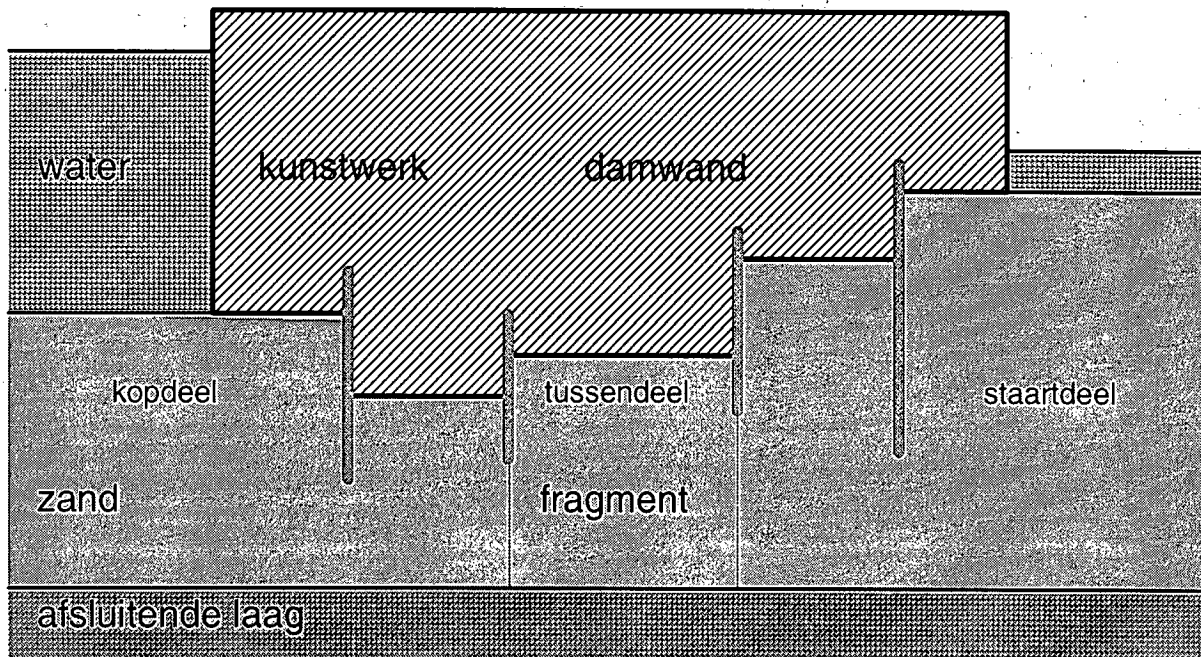
Bij kunstwerken worden meerdere kwelschermen toegepast. Hierdoor wordt de geometrie zodanig ingewikkeld van vorm, dat de mathematische beschrijving niet meer in gesloten vorm bepaald kan worden. Dit maakt de oplossing ondoorzichtig. Het is mogelijk de oplossing op te splitsen in een aantal deeloplossingen, die alle eenvoudig van vorm zijn en samengesteld de oplossing van het probleem weergeven. Hierbij wordt een geringe mate van benadering geaccepteerd.

De methode van opsplitsen van een probleem in deelgebieden wordt 'fragmentenmethode' genoemd. Door Pavlovsky is dit al in 1935 voorgesteld. In zijn verzamelde werken, Pavlovsky (1956), staat de methode beschreven. In principe wordt het watervoerende pakket in mootjes gehakt. Dit gebeurt op karakteristieke plaatsen, waar de stroming een gedwongen verloop heeft. Op de overgangen wordt gezorgd voor een continu stromingsverloop.

2.1 Principe

Kleidijken bevatten vaak een semi-permeabel voorland in de vorm van een uiterwaarde. Kunstwerken hebben dikwijls een aantal verticale kwelschermen. De afsluitende laag hoeft ook niet vlak te zijn, wat betekent dat het doorstroomde pakket niet constant van dikte is. Een simpele schematisatie van dijk of kunstwerk als rechte vloer voldoet dan niet. Om hieraan tegemoet te komen worden er compartimenten van een bepaalde dikte onderscheiden, waarin zich een bepaalde vorm van stroming afspeelt. In Figuur 2.1 is een voorbeeld gegeven voor een kunstwerk.

Het is duidelijk dat het vinden van een oplossing voor deze geometrie moeilijk is en ondoorzichtig van karakter. Daarom wordt het probleem opgedeeld. Het ligt voor de hand de fragmenten te kiezen langs de verticale damwanden. Het uitgangspunt daarbij is, dat een potentiaallijn door de voet van een damwand min of meer verticaal zal staan. Dit betekent dat de stroming in zo'n fragment redelijk goed bepaald kan worden voor nog onbekende stijghoogten ter weerszijden. Vervolgens kunnen de



Figuur 2.1: compartimentering watervoerend pakket onder kunstwerk

fragmenten aan elkaar geknoopt worden door de stijghoogten op de overgangen aan elkaar gelijk te stellen en gebruik te maken van het feit dat door elk fragment een even groot debiet stroomt.

2.2 Uitwerking

Het is duidelijk dat een grondwaterstromingsoplossing per fragment aanmerkelijk minder moeilijk is dan de uitwerking van een oplossing voor het geheel. De fragmenten in de figuur zijn rechthoekig, evenals de bijbehorende potentiaalvlakken. Hiervoor zijn standaard afbeeldingen beschikbaar, die geformuleerd zijn in zogenaamde elliptische functies. Dit zijn krachtige wiskundige relaties, die als eigenschap hebben, dat ze een rechthoek afbeelden op een halfvlak. In het afstudeerwerk van Van de Paverd (1994) en Heaving bij kunstwerken, Sellmeijer (1995), staat dit beschreven.

De oplossing van een fragment bestaat uit een relatie tussen het verval over het fragment en het doorstroomde debiet. Het quotiënt van beide wordt aangegeven als weegfactor W . Omdat het debiet constant is voor alle fragmenten is de som van alle weegfactoren gelijk aan het verval over het kunstwerk gedeeld door het debiet. In formulevorm:

$$\frac{kh}{Q} = \sum_{n=1}^N \frac{P_n - P_{n-1}}{Q} = \sum_{n=0}^N W_n \quad (2.1)$$

P is de potentiaal, het produkt van verval en doorlatendheid; Q is het debiet. De som van alle potentiaalvallen is gelijk aan het produkt van doorlatendheid k en het verval h over de constructie. Het aantal fragmenten is N . Het verval over de constructie volgt uit een sterkte eis. Dit kan een lokaal verhang zijn of het debiet.

3 Beschrijving huidige fragmenten

Er zijn in het kader van ander onderzoek al enige fragmenten beschreven. Heaving, bijvoorbeeld, is volledig in kaart gebracht. Hierbij is het uitgangspunt dat het verhang over de laatste damwand een bepaalde waarde (0.5) niet overschrijdt. In Sellmeijer (1995), 'Heaving bij Kunstwerken' is dit gerapporteerd. In Van de Paverd (1994), 'Kwelschermen onder rivierdijken (Onderzoek)' is lek door uiterwaarden beschreven.

Een aparte categorie zijn de fragmenten die sijperosie bevatten. Vanuit een uittreepunt aan de benedenstroomse zijde kan zich een erosiekanaal ontwikkelen ten gevolge van hoge stromingsdrukken. Dit verschijnsel wordt piping of onderloopsheid genoemd. In het erosiekanaal is een aparte randvoorwaarde ontwikkeld. Deze kan uitstekend meegenomen worden in een eindfragment. In Sellmeijer (1996), 'Integratie Ontwerpregels Piping & Heaving', staat dit beschreven.

Er zal nu een overzicht gegeven worden van alle relevante fragmenten. Zij worden een voor een kort genoemd bij een karakteristieke naam, een schets ervan wordt gepresenteerd en de weegfunctie gespecificeerd.

3.1 Uiterwaardefragment

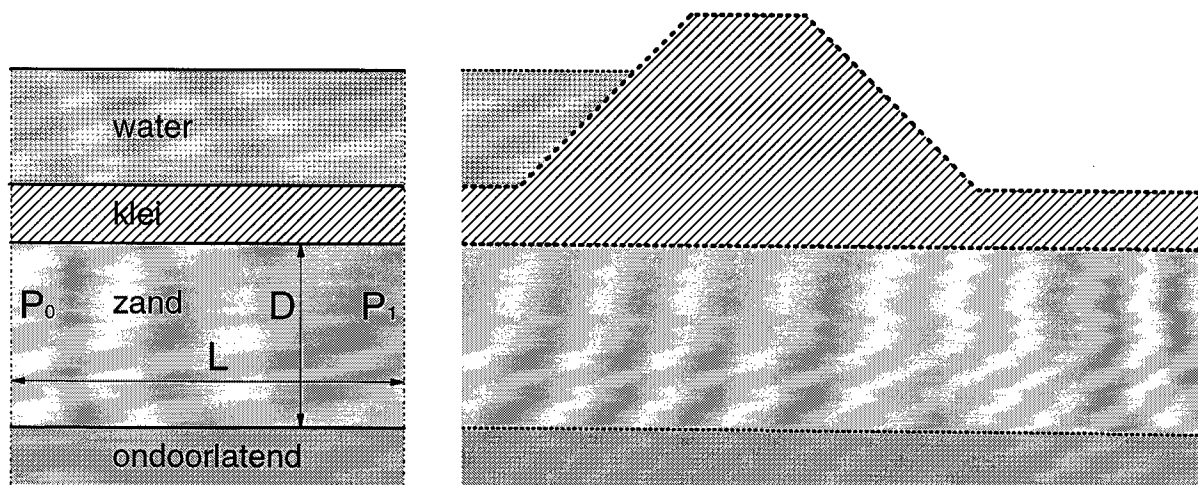
Het uiterwaarde fragment vertegenwoordigt het voorland van de dijk, dat bij hoogwater onder water staat. Een voorbeeld hiervan is de uiterwaarde bij een rivier. Het hoge water staat tot aan de dijk en heeft aan de bovenkant van de kleilaag de rivierpotentiaal, terwijl de potentiaal aan de onderzijde lager is ten gevolge van de kwel. Het gevolg is een extra voeding via lek door de kleilaag. In Figuur 3.1 is dit geschetst.

In Van de Paverd (1994), 'Kwelschermen onder rivierdijken (Onderzoek)', is hier aandacht aan besteed. Er is verondersteld dat het voorland oneindig lang is. De lek is vertegenwoordigd door de zogenaamde leklengte Λ . Deze lengte heeft over het algemeen een grote waarde, veel groter dan de werkelijke lengte van het voorland. Het is daarom realistischer te werken met een eindig voorland. De formulering is daarom aangepast.

De weegfactor voor het uiterwaardefragment luidt:

$$W = \frac{\Lambda}{D} \tanh\left(\frac{L}{\Lambda}\right) \quad (3.1)$$

Als het voorland oneindig lang is, wordt de \tanh gelijk aan 1 en wordt het resultaat van Van de Paverd verkregen. Voor hele grote leklengten wordt de \tanh gelijk aan zijn argument, wat betekent dat de lek geen enkele rol speelt.



Figuur 3.1: uiterwaardefragment

3.2 Kop- en Staartfragment

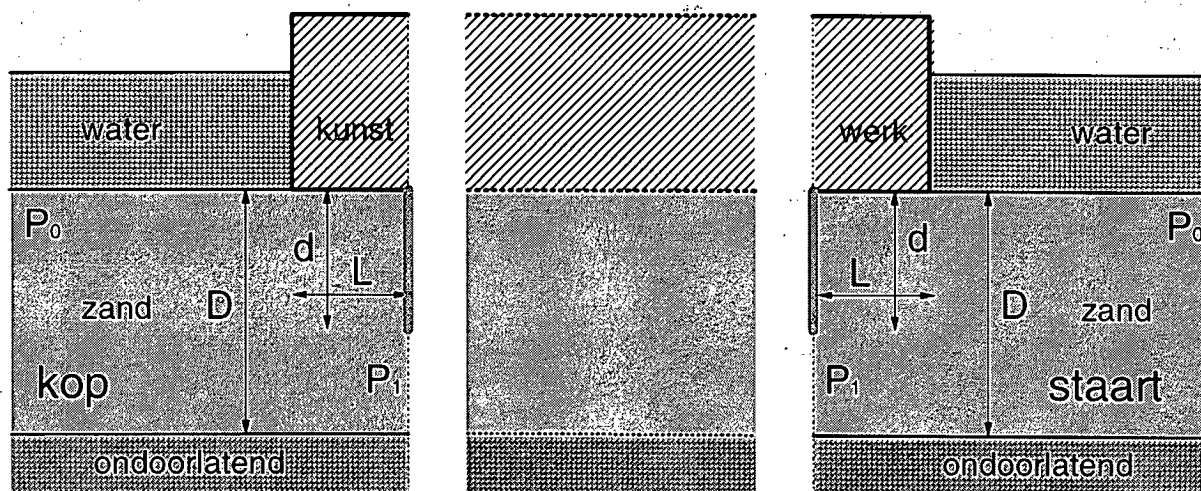
Bij kunstwerken zoals sluisen bestaat de bodem uit een betonnen vloer. Vanuit de vloer steken een aantal damwanden het zandpakket in. In Figuur 2.1 is dit weergegeven. Hierbij zijn drie typen fragmenten te onderscheiden: een kop-, tussen- en staartfragment. De eerste en laatste zijn gespiegeld en vertonen hetzelfde gedrag. In Figuur 3.2 zijn dit kop- en staartfragment gedetailleerd weergegeven.

Er is verondersteld dat voor- en achterland oneindig ver doorlopen. Dit is een redelijke veronderstelling. Kop- en staartfragment hebben elk hun eigen dimensionering. In de figuur is dit niet nader aangegeven. De mathematische formulering is voor beide identiek.

Dit soort fragmenten zijn bestudeerd in Sellmeijer (1995), 'Heaving bij Kunstwerken'. De weegfactor is van de volgende vorm:

$$W = \frac{K(1-\mu)}{K(\mu)} \quad \mu = \frac{\cos^2\left(\frac{\pi d}{2D}\right)}{\cosh^2\left(\frac{\pi L}{2D}\right)} \quad (3.2)$$

K is een zogenaamde volledige elliptische integraal van de eerste soort. De damwandlengte en de uitkragende lengte van het kunstwerk mogen elk nul zijn, maar niet tegelijkertijd. Anders treedt er kortsluiting op tussen buiten- en binnenwater.



Figuur 3.2: kop- en staartfragment

3.3 Tussenfragment

Bij kunstwerken zijn reeds de kop- en staartfragmenten behandeld. Alle elementen hiertussen worden tussenfragmenten genoemd. In Figuur 3.3 is zo'n fragment aangegeven. Elk tussenfragment heeft zijn eigen dimensies. Zij hoeven dus niet alle even hoog te zijn. De enige voorwaarde waaraan voldaan moet worden is dat de fragmenten aansluiten op de overgangen.

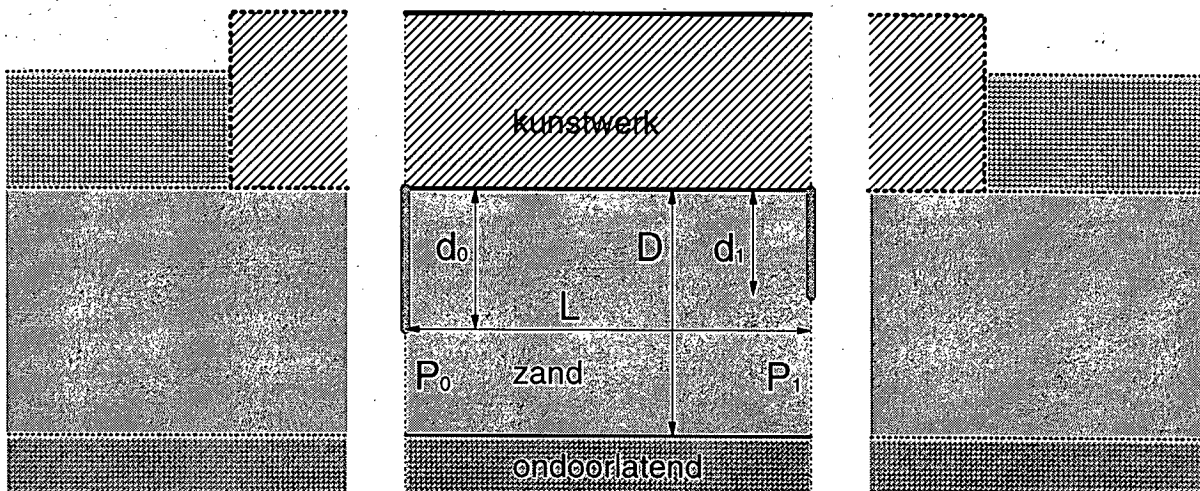
Dit soort fragmenten zijn bestudeerd in Sellmeijer (1995), 'Heaving bij Kunstwerken'. De weegfactor is van de volgende vorm:

$$W = \frac{K(1-\mu)}{K(\mu)} \tag{3.3}$$

$$\frac{L}{D} = \frac{K(1-m)}{K(m)} \quad \sqrt{\frac{\mu}{m}} = \operatorname{sn}\left\{\frac{d_0}{D}K(m)|m\right\} \operatorname{sn}\left\{\frac{d_1}{D}K(m)|m\right\}$$

Net zoals bij het kop- en staartfragment bestaat de weegfunctie uit volledige elliptische integralen van de eerste soort (K). Het argument ervan zit nu iets lastiger in elkaar. Hier spelen Jacobijnse elliptische functies een rol (sn).

Deze weegfunctie geldt voor het geval dat er een goede aansluiting is tussen watervoerend pakket en vloer van het kunstwerk. Indien daar een spleet aanwezig is, treedt er kortsluiting van de stroming op. Hierdoor verandert het karakter van de weegfunctie aanzienlijk.



Figuur 3.3: tussenfragment

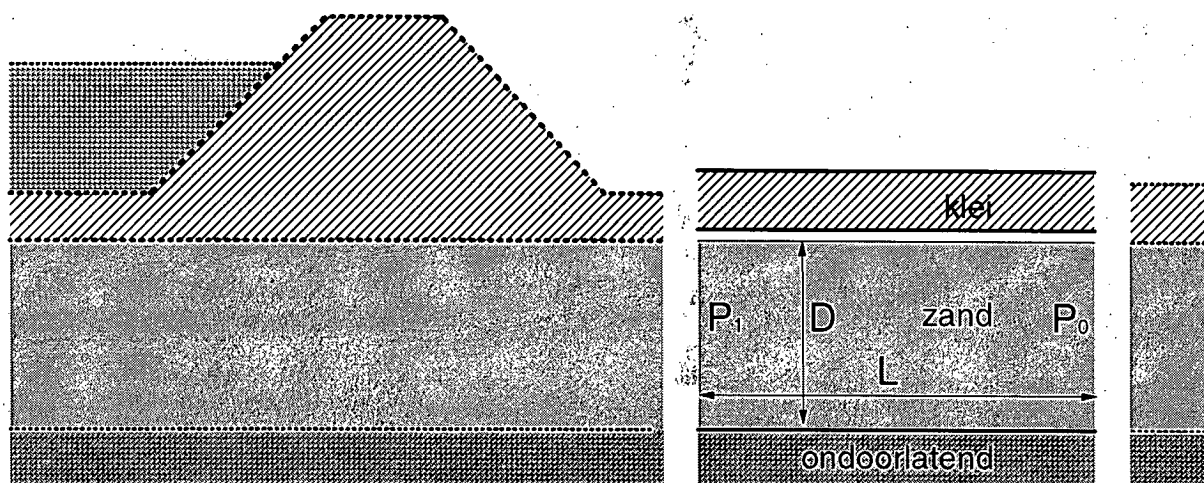
3.4 Achterlandfragment met opdrijven

Bij stroming onder dijken door drukt het grondwater tegen de onderkant van de dijk aan. Bij een verjonging van de dijk kan het dan voorkomen dat de dijk niet genoeg gewicht heeft en lokaal gaat opdrijven. In Figuur 3.4 is dit schematisch aangegeven. In Van de Paverd (1994), 'Kwelschermen onder rivierdijken (Onderzoek)', is hier aandacht aan besteed.

Daar is een oplossing aangegeven voor de dijk als geheel. Er is dus geen fragment onderscheiden, dat het verschijnsel van opdrijven incorporeert. Het heeft geen zin de vermelde formules over te nemen, daar ze niet passen in het tot nu toe gevolgde concept.

Allereerst zal er een geometrie gedefinieerd moeten worden, waarin dit opdrijven wordt opgenomen. Dit is niet zo gemakkelijk als het lijkt. De druk is gerelateerd aan het gemiddelde gewicht van de opgedreven kleilaag, maar de lengte van opdrijven ligt nog niet vast. Deze is zodanig bepaald, dat het netto debiet naar de open ruimte nul is. Immers, verder omhoog duwen sleept de naburige laag mee omhoog, net zolang totdat er een stabiele situatie ontstaat.

Dit fragment vereist nog nadere studie.



Figuur 3.4: achterlandfragment met opdrijven

3.5 Polderfragment

Aan de binnenzijde van een dijk is het afdichtende pakket dun en kan opbarsten optreden. Dit gebeurt bij voorkeur ter plaatse van een afwateringssloot. Vanuit een aldus gecreëerd uittreepunt ontwikkelt zich dan een erosiekanaal. Dit verschijnsel wordt piping of onderlooptheid genoemd. Hiervoor is een apart fragment ontwikkeld: polderfragment.

In Sellmeijer (1996), 'Integratie Ontwerpregels Piping & Heaving', is hier aandacht aan besteed. Er is verondersteld dat het achterland oneindig lang is. Verder dat er geen water wegstroomt naar het achterland. Alle debiet gaat dus door het uittreepunt in de sloot. Het erosiekanaal heeft een boven- en benedendeel. In Figuur 3.5 is een schets van de geometrie gegeven. De verticale afmeting van het erosiekanaal is voor de duidelijkheid overdreven groot getekend.

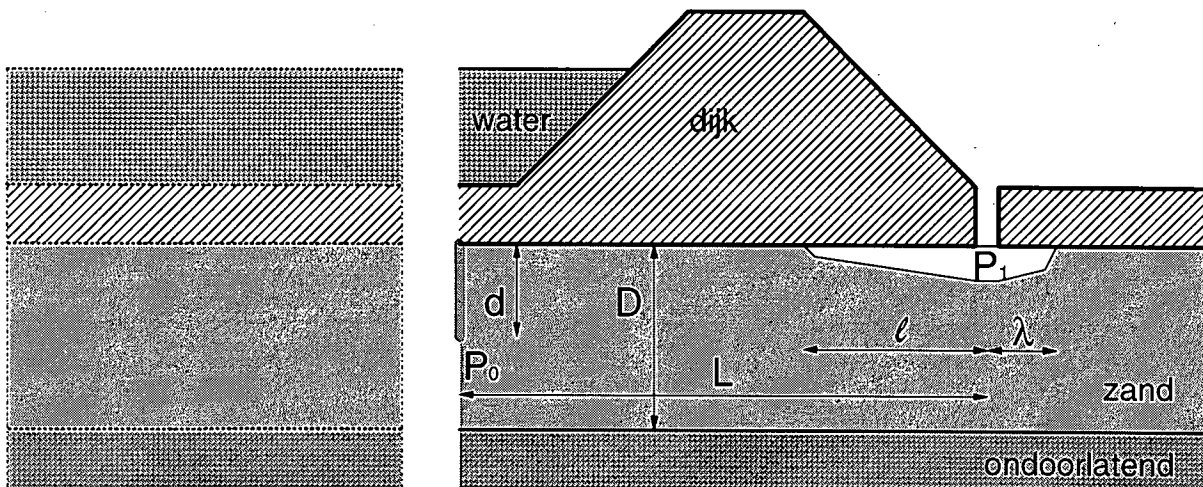
De weegfactor voor het polderfragment luidt:

$$W = \frac{\int_{L-l}^{L+\lambda} q(r) F(r, L) dr}{\int_{L-l}^{L+\lambda} q(r) dr} \quad F(r, x) = \frac{2}{\pi} \operatorname{arc} \operatorname{coth} \sqrt{\frac{\tanh^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{r}{D}\right) + \tan^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{d}{D}\right)}{\tanh^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{x}{D}\right) + \tan^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{d}{D}\right)}} \quad (3.5)$$

$$p(x) = \int_{L-l}^{L+\lambda} q(r) \frac{dF(r, x)}{dx} dr \quad Q(x) = \int_{L-l}^x q(r) dr \text{ of } \int_x^{L+\lambda} q(r) dr$$

$$C q(x) + |p(x)| \left\{ \frac{3}{\pi \eta} \frac{a(x)}{b} + 1 \right\} \cot \vartheta = \frac{\gamma_p - \gamma_w}{\gamma_w} \quad a(x) = 12 \kappa \frac{Q(x)}{p(x)}$$

Het probleem is beschreven in een nader te bepalen grootte van het verticale debiet q naar het erosiekanaal. De positie in het kanaal is aangegeven met x of r , gemeten vanaf de damwand. Elke bijdrage aan het verticale debiet heeft een invloedsfunctie op de potentiaal, aangegeven met F . Welke functie hierin moet worden gebruikt, de arctanh of de arctanh, hangt af van de grootte van het argument.



Figuur 3.5: polderfragment

Integratie van het verticale debiet levert het doorstroomdebiet op. Hierbij dient erop gelet te worden of de positie x bovenstrooms of benedenstrooms van het intredepunt ligt. Het doorstroomdebiet wordt gerekend ten opzichte van beide uiteinden. De grootte van het verticale debiet is bepaald door de erosievoorwaarde. Deze geeft aan dat de grenstoestand van rollend evenwicht niet overschreden wordt.

3.6 Sluisfragment

Een sluis bestaat in zijn meest eenvoudige vorm uit een sluisvloer, enkele kwelschermen en een open in- en uitteevlak, gevormd door de kanaalbodembodem. Vanuit het uitteevlak kan zich een erosiekanaal ontwikkelen. Ook dit is een vorm van piping of onderloopsheid. Het fragment dat hiervoor is ontwikkeld heet 'sluisfragment'.

In Sellmeijer (1996), 'Integratie Ontwerpregels Piping & Heaving', is hier aandacht aan besteed. Er is verondersteld dat het achterland oneindig lang is. Het ligt voor de hand om het fragment te begrenzen door recht onder de damwand een potentiaallijn te veronderstellen. Echter, dit leidt tot een moeizame mathematische beschrijving. Daarom is het fragment voorbij de damwand onbeperkt ver doorgetrokken. Deze geometrie leidt tot een gesloten oplossing. Ver genoeg voorbij de damwand zijn de potentiaallijnen redelijk verticaal, zodat goed aangesloten kan worden op andere fragmenten. In Figuur 3.6 is een schets van de geometrie gegeven. De verticale afmeting van het erosiekanaal is voor de duidelijkheid overdreven groot getekend.

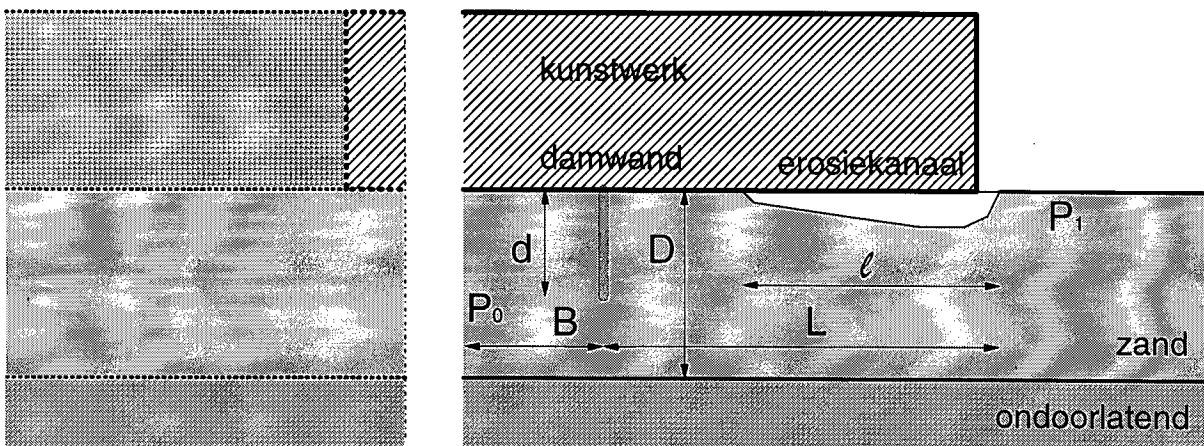
De weegfactor voor het sluisfragment luidt:

$$W = \frac{\int_{L-l}^L q(r) F(r, -B) dr}{\int_{L-l}^L q(r) dr} \quad w(x) = \left\{ \frac{\cosh\left(\frac{\pi}{2} \frac{x}{D}\right)}{\cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{x}{D}\right)} \pm \sqrt{\frac{\cosh^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{x}{D}\right)}{\cos^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{x}{D}\right)} - 1} \right\}^2$$

$$\frac{\pi}{2} F(r, x) = \frac{\operatorname{arctanh} \sqrt{1 - \frac{w(x)}{w(L)}}}{\sqrt{1 - \frac{w(r)}{w(L)}}} - \operatorname{arc} \coth \sqrt{\frac{1 - \frac{w(x)}{w(L)}}{1 - \frac{w(r)}{w(L)}}} \quad (3.6)$$

$$p(x) = \int_{L-l}^L q(r) \frac{dF(r, x)}{dx} dr \quad Q(x) = \int_{L-l}^x q(r) dr$$

$$C q(x) + |p(x)| \left\{ \frac{3}{\pi \eta} \frac{a(x)}{b} + 1 \right\} \cot \vartheta = \frac{\gamma_p - \gamma_w}{\gamma_w} \quad a(x) = 12\kappa \frac{Q(x)}{p(x)}$$



Figuur 3.6: sluisfragment

Het probleem is beschreven in een nader te bepalen grootte van het verticale debiet q naar het erosiekanaal. De positie in het kanaal is aangegeven met x of r , gemeten vanaf de damwand. Elke bijdrage aan het verticale debiet heeft een invloedsfunctie op de potentiaal, aangegeven met F . Welke functie hierin moet worden gebruikt, de $\operatorname{arctanh}$ of de $\operatorname{arctanh}$, hangt af van de grootte van het argument.

In de expressie voor $w(x)$ staat een plus/minus teken. Dit teken geeft aan dat voor een positief argument de plus gehanteerd moet worden en voor een negatief argument een min. B is een bovenstrooms te kiezen rand op enige afstand van de damwand. De erosievoorwaarde is universeel geldig bij onderloopsheid. Het is precies dezelfde als die bij het polderfragment is toegepast.

4 Nog toe te voegen fragmenten

Op dit moment zijn er zes fundamentele typen fragmenten beschreven. Hiermee wordt vrijwel het hele skala aan mogelijke stromingsproblemen gedekt. Natuurlijk zijn nog niet alle moeilijkheden overwonnen. Vooral de erosiefragmenten zijn nog niet zonder problemen hanteerbaar. Dit is een kwestie van het vinden van de juiste algoritmen en valt buiten het kader van deze studie.

Hier gaat de aandacht vooral uit naar afwijkingen in de aannamen. Deze zijn van geometrische en grondmechanische aard. De waarde van de doorlatendheid zou bijvoorbeeld te hoog of te laag kunnen worden ingeschat. Dit werkt door in de mate van veiligheid van de constructie. Om de afwijkingen in kaart te brengen wordt gewerkt met het begrip 'foutenboom'. Op basis hiervan wordt een statistische analyse uitgevoerd, waarmee de kans op bezwijken wordt vastgelegd. In de beide andere delen van dit rapport wordt hieraan aandacht besteed.

Ik dit deel wordt vast nagedacht over de consequenties die een geometrische afwijking kan hebben. Immers, het uitgangspunt van weegfuncties moet worden aangepast. Dit zou wel eens neer kunnen komen op onverwachte mathematische complicaties. Drie configuraties komen aan de orde. Een eventuele onvolkomen aansluiting van het zandpakket met de sluisvloer in het tussenfragment; niet geheel waterdichte damwanden; een gat in een damwand. Deze komen achtereenvolgens aan de orde.

4.1 Spleet onder sluisvloer

Een sluisvloer hoeft niet per definitie goed aan te sluiten op het zandpakket eronder. Bij fundatie op palen kan de grond in zijn geheel wat zetten. Bij fundatie op staal kunnen de damwanden zich wel eens gedragen als palen door hun grotere stijfheid ten opzichte van die van zand. Er is dus alle reden om aan te nemen dat er tussen vloer en zand een spleet zit.

Er is geen geleidelijke overgang tussen wel of geen spleet. Een minieme ruimte is al voldoende om in de gehele open ruimte een min of meer constante potentiaal te veroorzaken. Het water hoeft dan niet moeizaam onder hoge weerstand door het zand te stromen. Het stroomt eenvoudigweg rond de damwand, volgt dan de kortsluiting door de spleet en stroomt af rond de volgende damwand.

Dit betekent dat er een serieuze berekening uitgevoerd moet worden om de aangepaste weegfunctie vast te leggen. Dit zou wel eens een mathematisch lastige opgave kunnen zijn. Daarom wordt er hier

kort nagedacht over de complicaties. Er zal worden gekeken of de berekening uitvoerbaar is en hoeveel moeite dit kost.

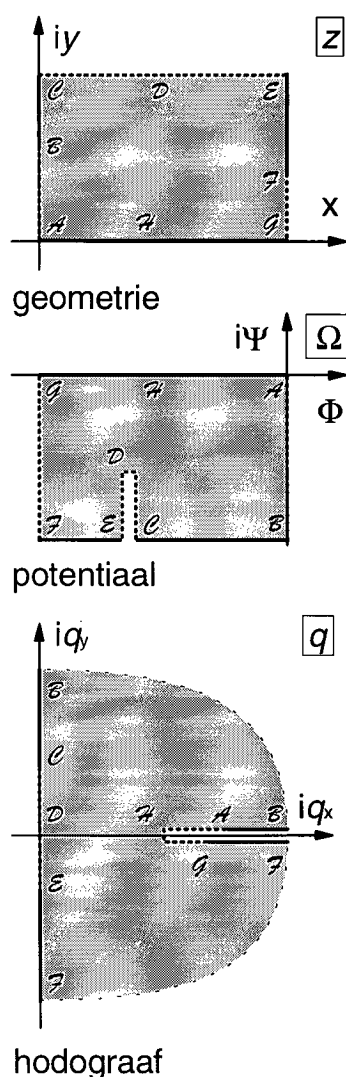
In de figuur staan diverse vlakken getekend. Dit is schematisch gedaan met het oog op het vinden van de juiste afbeeldingen voor de weegfunctie. Er zijn drie complexe vlakken aangegeven: geometrievlak, potentiaalvlak en hodograafvlak. De onderlinge afbeeldingen resulteren in een uitdrukking voor de potentiaal als functie van de geometrie. Hieruit volgt weer de weegfunctie.

De techniek van afbeelden behelst eerst het vinden van een verband tussen de diverse vlakken en een hulphalvlak. Voor het geometrievlak is dit een standaardoefening: een jacobijnse elliptische functie. Het probleem zit hem in het potentiaalvlak. Hiervoor is geen (gemakkelijke) gesloten oplossing te vinden.

Om toch verder te komen zijn er twee mogelijkheden: introductie van het hodograafvlak en het uitvoeren van een Schwarz-Christoffel transformatie. De eerste methode is elegant; de tweede praktisch van aard.

Het hodograafvlak heeft wel een relatief eenvoudige afbeelding. Een arcsinh buigt de spleet langs de reële as rond het punt \mathcal{H} open, zodat er een strip ontstaat. Een e -macht maakt hier weer een halfvlak van. Aldus ligt de relatie tussen geometrie en hodograaf vast. Hierin zitten nog wel twee graden van vrijheid. Deze volgen enerzijds uit de potentiaalval over het fragment. Dit is niet meer dan een schaalfactor. Anderzijds uit het feit dat er in de ruimte tussen vloer en sluis geen water verloren raakt. Deze grootte splitst het resultaat in twee delen en fungeert als schaalfactor van een van deze delen.

Integratie van de hodograaf leidt tot een formule voor de potentiaal. Hieruit volgen direct beide schaalfactoren door substitutie van de voorwaarden. Enigszins teleurstellend is het feit dat de integratie niet



Figuur 4.1: complexe vlakken

uitgevoerd kan worden in gesloten vorm. Natuurlijk is dat te verwachten, omdat een directe afbeelding van het potentiaalvlak dit ook niet verwezenlijkt.

Het introduceren van de hodograaf is nuttig, omdat dit inzicht geeft in de structuur van de oplossing. Het is echter niet nodig. Het potentiaalvlak kan direct uitgeschreven worden in een zogenaamde Schwarz-Christoffel transformatie. Aldus wordt dezelfde expressie verkregen als na integratie van de hodograaf. Deze aanpak gaat iets sneller.

Het blijkt dus mogelijk een uitdrukking voor de weegfunctie op te stellen. Deze is weliswaar niet in gesloten oplossing te schrijven, maar alle constanten erin kunnen expliciet worden uitgeschreven. Dit is van groot belang, omdat het werken met impliciete constanten rekenkundig vervelend is. De integraal kan met een standaard numerieke routine worden aangepakt.

4.2 Lekke damwand

Het lekken van damwanden vormt een enorme complicatie voor de fragmentenmethode. Deze methode is eigenlijk opgezet als een verlengstuk van de techniek van complex afbeelden. Hiervoor is vereist dat de stroming twee-dimensionaal is en verder bestaat uit passende randvoorwaarden zoals stroom- en potentiaallijnen, een vrije waterspiegel, een sijpeloppervlak. Een lekkende rand past hier niet goed in.

Natuurlijk kan op de damwand een bron beschouwd worden met een onbekende sterkte. Vervolgens wordt de hele damwand volgelegd met dergelijke bronnen. Superpositie van al deze bronnen leidt dan tot een integraal. De sterkte van elke individuele bron ligt dan vast via de relatie tussen potentiaalverschil en debiet. Dit is echter geen geringe opgave.

Het is echter de vraag of het nastreven van een dergelijke precisie wel nodig is. In tegenstelling tot het vorige geval is er bij lek wel een geleidelijke overgang. De doorlatendheid van een damwand kan oplopen van ondoorlatend tot een zekere mate. De bedoeling van het afschatten van de damwandlek is het uitdrukken van de mate van veiligheid in een coëfficiënt. Het is dus voldoende een goede indruk te krijgen van de lek. Dit kan op een veel eenvoudiger manier.

De standaardfragmenten zijn beschreven en leveren, behalve de gewenste weegfuncties, ook de waarden van de potentiaal op beide zijden van de damwand. Het verschil van deze waarden geeft via de doorlatendheid van de damwand direct de lek erdoor aan. Dat betekent dat een schatting van de extra lek gespecificeerd is. In formulevorm:

$$\begin{aligned} \text{rechts:} \quad \Phi &= P_n + \beta_n(z)(P_{n+1} - P_n) \\ \text{links:} \quad \Phi &= P_n + \alpha_n(z)(P_{n+1} - P_n) \end{aligned} \quad (4.1)$$

Op het vlak onder de n^{de} damwand heerst een potentiaal P_n . Dan zijn alle potentialen rechts uit te drukken in het verschil met de rechter zijde en links in het verschil met de linker zijde. De coëfficiënt hangt af van de geometrie en is aangegeven met α en β , die beide afhangen van de positie op de damwand.

Omdat het debiet onder de damwand door nu niet meer constant is, moet de weegfunctie worden aangepast. Een middeling wordt geïntroduceerd:

$$W_n = 2 \frac{P_n - P_{n-1}}{Q_n + Q_{n-1}} \quad (4.2)$$

continuïteit eist dat er eenzelfde hoeveelheid water Q_0 onder de constructie doorstroomt (onder en door de damwand):

$$Q_0 = Q_n + W_{n+1} \frac{Q_{n+1} + Q_n}{2ck} \int_0^d \beta_n(z) dz - W_n \frac{Q_n + Q_{n-1}}{2ck} \int_0^d \alpha_n(z) dz \quad (4.3)$$

De waarde van de weerstand c van de damwand is voor een ondoorlatende damwand oneindig. In het algemeen kan een kansdichtheidsfunctie gekozen worden, waarmee de kans op bezwijken kan worden bepaald.

Op deze wijze zijn alle waarden van het debiet onder de damwand door bepaald. Via formule (4.2) zijn dus ook alle potentiaalvallen bepaald. De waarde van Q_0 ligt vast door de te hanteren voorwaarde

voor de constructie. Dit kan veiligheid zijn tegen piping of heave of gewoon een maatgevend verval of debiet.

Zonder een ingewikkelde afbeelding te hoeven maken is de invloed van een eindige waarde van de weerstand van de damwand verdisconteerd. Het resultaat kan gebruikt worden bij de probabilistische analyse.

4.3 Gat in damwand

Het beschrijven van een stromingsprobleem met een gat in de damwand is een buitengewoon lastige opgave. De methode van conforme afbeeldingen is hier eigenlijk niet zo goed voor toegerust. Het probleem is dat het onderste stuk van de damwand gaat 'zweven'. Het zit nergens meer aan vast. Het gevolg is dat er zogenaamde windingspunten nodig zijn. Vanaf deze punten loopt een snede, waardoor je van het stroomgebied verder weg in het stroomgebied rond de zwevende damwand kunt komen.

Blijf je voldoende ver weg van de zwevende damwand, dat blijf je in het hodograafvlak voor verder weg. Maar kom je te dichtbij, dan moet er eerst een rondje afgelegd worden door het hodograafvlak van de zwevende damwand. Het hoeft geen betoog dat dit een uiterst gewaagde onderneming is. Alleen uit oogpunt van het vergaren van expertise en het aangaan van een uitdaging zou dit eens geprobeerd moeten worden.

Net als bij de lekke damwand is er echter een kortere weg. In de fragmenten aan beide zijden van de damwand wordt ter plaatse van het gat een bron aangebracht. Deze zijn tegengesteld van teken, omdat er continuïteit van debiet vereist is. De sterkte wordt zodanig afgeregeld, dat de potentiaal voor een representatieve gatdiameter links en rechts van de damwand aan elkaar gelijk zijn.

Ofschoon dit een stuk eenvoudiger is dan het werken met windingspunten, is de taak nog steeds verre van makkelijk. Allereerst moeten de bestaande fragmenten uitgebreid worden met bronnen. In principe kan dit, omdat, net als bij de spleet onder de sluisvloer, de te bepalen schaalfactoren voortkomen uit stagnatiepunten en dus lineair in het probleem zitten. Maar bij een fragment met spleet onder de sluisvloer en gat in de damwand is de praktische rek er wel uit. Hier worden twee van de genoemde constanten met elkaar vermenigvuldigd, zodat een kwadratische vergelijking moet worden opgelost.

Vervolgens moeten de bereikte representaties voor twee aanliggende fragmenten op elkaar worden afgestemd om aan de eis van continuïteit van potentiaal in het gat te voldoen. Dit levert een uitdrukking op voor het debiet door het gat als functie van de potentialen op de randen van beide fragmenten. Tenslotte wordt continuïteit van debiet op de fragmentovergangen geëist. Hiermee kunnen de weegfuncties bepaald worden, bestaande uit het quotiënt van potentiaalval en totaal debiet onder de constructie door.

Geconcludeerd kan worden dat de exercitie uitvoerbaar is, als er omwille van bepaalde redenen de voorkeur aan gegeven wordt. Er zijn echter in het algemeen vereenvoudigingen mogelijk, die voor dit specifieke geval de moeilijkheidsgraad drastisch terugbrengen. In de volgende paragraaf wordt hier aandacht aan besteed.

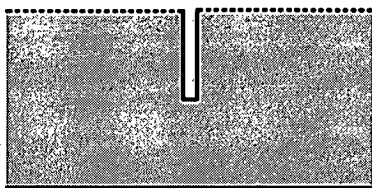
4.4 Universeler type fragment

Er zijn op dit moment mogelijke variaties onderzocht op de standaard fragmenten, zoals deze beschreven staan in hoofdstuk 3. Het is gebleken dat het mogelijk is formules op te stellen voor een probabilistische aanpak. Van harte is dit echter niet gegaan. De materie blijkt gecompliceerd en moeilijk toegankelijk. Dit komt door de ingewikkeldheid van de standaard fragmenten. De vraag kan gesteld worden of deze niet eenvoudiger kunnen.

Het uitgangspunt tot nu toe is steeds geweest fragmenten te begrenzen recht onder de damwanden. Dit ligt voor de hand, omdat daar een min of meer verticaal potentiaalvlak verwacht mag worden. Dit is een redelijke veronderstelling. Alleen bij een staartfragment sluipt er een fout in bij een erg korte damwand. Er is echter ook een minder conventionele aanpak mogelijk.

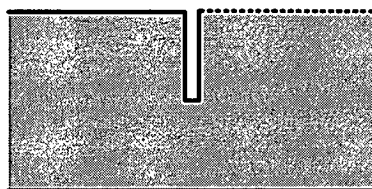
In plaats van recht onder de damwand kan ook gedacht worden aan een afsnuiting tussen de damwanden. Er wordt dan een berekening gemaakt voor één enkele damwand in een strip die zich naar alle kanten onbelemmerd uitstrekt. Omdat de potentiaallijnen op enige afstand van de damwand redelijk verticaal lopen, kan de strip links en rechts ergens worden afgesneden. Aldus ontstaan fragmenten zoals in de figuur.

Er zijn drie smaken. De bovenranden links en rechts zijn: beide potentiaallijn; potentiaal- en stroomlijn; beide stroomlijn. Met deze configuraties kunnen we bijna alles doen. Kop- Tussen- en Staartfragment; Polder- en Sluisfragment. Tussenfragment met of zonder spleet onder sluisvloer.



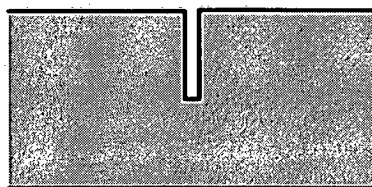
Gaten en lek door de damwanden. Alleen een vloer met verschillende niveaus is niet mogelijk. De mathematische bewerkingen zijn een orde eenvoudiger.

Het geometrievlak is af te beelden op een halfvlak. Dit is gepresenteerd in Sellmeijer (1996), 'Integratie Ontwerpregels Piping & Heaving'. In het geval van symmetrische bovenranden hoeft slechts een helft van de geometrie beschouwd te worden, wat de afbeelding sterk vereenvoudigt.



Als de bovenrand links en rechts een potentiaallijn is levert het potentiaalvlak elliptische functies op. Stroming van de ene rand naar de andere geeft een elliptische integraal van de eerste soort. Een bron op de damwand leidt tot een jacobijnse elliptische functie van de derde soort. Dit is het lastigste verband uit deze categorie.

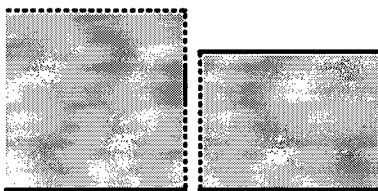
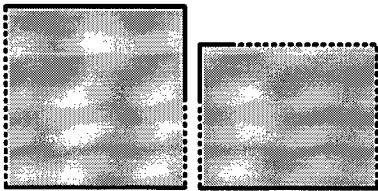
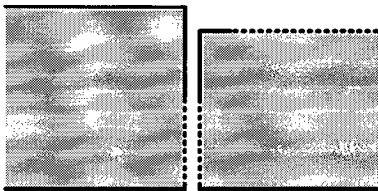
Als de randen gemengd zijn of beide stroomlijn, dan levert het potentiaalvlak hyperbolische functies op. Dit is het geval zowel bij stroming van de ene rand naar de andere als bij een bron, die willekeurig waar op een stroomlijn gesitueerd is.



Het blijkt dat de afbeeldingen over het geheel veel eenvoudiger zijn. Bovendien zijn er minder basisvormen. De invloed van lek of een gat wordt ook veel eenvoudiger, omdat deze lek geheel beschreven wordt binnen één fragment. Er is dus geen matrixdeling nodig om de weegfuncties expliciet te krijgen.

*Figuur 4.2:
elementaire fragmenten*

We kunnen zelfs nog een stap verder gaan. Fragmenten kunnen op hun beurt weer samengesteld worden uit fragmenten. Dit maakt de beschrijving weer eenvoudiger, terwijl de flexibiliteit toeneemt. In de figuur is dit toegelicht. De fragmenten van de vorige pagina zijn opgesplitst in twee subfragmenten. Hierdoor is het mogelijk toch de hoogte van het watervoerend pakket te variëren. De geometrie is hiermee volledig generiek geworden. Dat houdt in dat één enkele afbeelding voor alle deelproblemen dezelfde is.



*Figuur 4.3:
subfragmenten*

Er kan wel nog overwogen worden te werken met een open of gesloten geometrie. Het open type loopt naar alle kanten onbeperkt door, waarna deze wordt afgekapt op een geschikte plaats. Het gesloten type bevat de afkapping al in de afbeelding. Bij extreem korte fragmenten is dit zinvol. Het bovenste en middelste plaatje tonen dit principe.

In feite hebben we nu weer met een kop- of staartfragment te doen in het geval van een open type. Dit fragment gaat ietwat afwijken bij extreem korte damwanden. Dit komt door de kortsluiting van beide potentiaalranden, waardoor de stroming van verticaal naar horizontaal geheel wegvalt. Dit kan vrijwel gecorrigeerd worden door het introduceren van een klein horizontaal ondoorlatend randje. Dit wordt zo groot genomen dat er precies de rondstroomweerstand mee gesimuleerd wordt.

Ditzelfde principe kan gehanteerd worden bij een niet goed aansluitende damwand. Door een horizontale beweging kan de aansluiting met de grond verloren gaan, mits er in zand een voldoende inwaartse gradiënt aanwezig is om de spleet open te houden. De onderste figuur toont dit. In het rechter geval is een stukje van de damwand ondoorlatend gehouden om de rondstroomweerstand te simuleren.

Zoals in de figuur is aangegeven zijn alle randvoorwaarden stroom- of potentiaallijnen. Op de stroomlijnen kunnen nog bronnen voorkomen, die de invloed weergeven van een gat of de vorming van een erosiekanaal. Een bronoplossing kan

gesuperponeerd worden op de algemene oplossing zonder bron. Dit betekent dat er drie typen potentiaalafbeeldingen nodig zijn. Ten eerste een halve strip voor stroming van het open type onder een dichte vloer. Een bron in deze geometrie levert dezelfde afbeelding op. Ten tweede een elliptische integraal van de eerste soort voor stroming van het gesloten type en van het open type met een spleet onder de sluisvloer. Ten derde een elliptische integraal van de derde soort bij een bron in het vorige geval.

Zeker bij de probabilistische aanpak, die gevolgd gaat worden, zal deze generatie fragmenten leiden tot een heldere en relatief eenvoudige ontwerpformule. Relatief betekent hier dat de hoeveelheid werk die hiermee gemoeid is in het niet valt bij die nodig voor de uitbouw van de klassieke fragmenten.

5 Samenvatting en conclusies

In dit rapport is het gebruik van de fragmentenmethode toegelicht om analytisch bruikbare oplossingen op te stellen voor een probabilistisch onderzoek naar de veiligheid van waterbouwkundige constructies. Eerst is de methode beschreven. Vervolgens zijn oplossingen, die in een ander kader bepaald zijn, gecategoriseerd. Tenslotte zijn variaties op deze oplossingen, die voor een probabilistische aanpak nodig zijn onder de loep genomen.

Het is evident dat het opstellen van uitdrukkingen voor deze variaties een moeizaam karwei is. Exacte uitwerkingen in de geest van de oplossingen voor de al beschouwde fragmenten is onhaalbaar. Daarentegen is het mogelijk met enige fantasie een trend af te schatten voor de variaties. Dit leidt tot expliciet geformuleerde expressies.

Aan de orde zijn geweest:

- Spleet tussen sluisvloer en watervoerend pakket
Voor een tussenfragment met deze eigenschap kan een overzichtelijke uitdrukking worden opgesteld. In de oplossing zit een integraal, die niet in gesloten vorm bekend is. Dit is geen onoverkomelijke moeilijkheid, daar een numerieke procedure heel goed voldoet.
- Lekkende damwand
Hiervoor wordt geen aparte oplossing doorgerekend. De bestaande oplossing wordt gebruikt, waarin de potentiaal aan beide zijden van de damwand bekend is. Via een weerstandswaarde van de damwand volgt hieruit een extra lekdebiet. Dit debiet wordt ter correctie meegenomen in de weegfuncties. Aldus ligt de variatie vast.
- Gat in damwand
Het gat wordt gesimuleerd door een bron aan beide zijden van de damwand met gelijke en tegengestelde sterkte. De inpassing hiervan in de stromingsoplossing is niet eenvoudig en leidt weliswaar tot expliciete, maar ingewikkelde niet gesloten termen. Speciaal voor een combinatie met een spleet onder de sluisvloer wordt een en ander gecompliceerd. Vervolgens wordt geëist, dat de potentiaal op de gatrand van beide bronnen gelijk is. Dit levert de sterkte. Tenslotte volgen de weegfuncties uit continuïteit van debiet.

Ofschoon op deze wijze een goede probabilistische uitwerking mogelijk is, wordt toch afgeraden deze weg te bewandelen. Enerzijds hebben we ons in allerlei bochten moeten wringen om een hanteerbare mathematische representatie op te stellen. Anderzijds is het principe van fragmenten geweld aangedaan. In feite is het begrip weegfunctie uitgehold. Bij een lekkende damwand is het debiet onder de damwand door niet constant, wat is tegemoet gekomen met een gemiddelde waarde. Bij het gat heerst een andere potentiaal dan recht onder de damwand.

Er is een eenvoudiger schematisatie beschikbaar, die bovendien de integriteit van de weegfunctie niet aantast. Hierbij worden fragmenten niet begrensd door vlakken door de damwand, maar ergens halverwege. Deze hebben ongeveer dezelfde mate van nauwkeurigheid als de gebruikelijke. Voor een staartfragment hebben ze zelfs de voorkeur, omdat het klassieke fragment daar te veel gaat afwijken voor hele korte damwanden. Het nieuwe fragment rekent daar veel exacter.

Het voordeel is dat de nieuwe fragmenten veel universeler zijn. Er zijn dus minder typen nodig. Onderloopsheid of damwanden die lekken, gaten vertonen of niet goed aansluiten vertonen veel overeenkomst in mathematisch gedrag. Maar vooral is van belang dat alle informatie in het fragment zelf zit en niet van de burens hoeft te komen.

