

# Fenomenologische beschrijving

Faalmechanismen WBI





# Fenomenologische beschrijving

Faalmechanismen WBI

Robert 't Hart

11200574-007



**Titel**

Fenomenologische beschrijving

**Opdrachtgever**

 Rijswaterstaat Water,  
Verkeer en Leefomgeving

**Project**

11200574-007

**Kenmerk**

 11200574-007-GEO-0005- 145  
ga

**Pagina's**
**Trefwoorden**






Faalmechanismen, bezwijken, Primaire waterkering, Fenomenologische beschrijving

**Samenvatting**

Dit achtergronddocument voor ontwerp en beoordeling van primaire waterkeringen geeft een fenomenologische beschrijving van de belangrijkste faalmechanismen die de overstromingskansen bepalen. Per faalmechanisme wordt het totale faaltraject van initiatie tot falen van de waterkering beschreven.

**Summary**

This report describes the major failure mechanisms to consider in design or assessment of the primary water defences. For each mechanism the chain of events from initiation to the final failure of the water defence is described.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
C1	jun. 2015	Huub De Bruijn		Han Knoeff		Leo Voogt	
		Goaitske de Vries					
D1	dec.2015	R. 't Hart		Han Knoeff		Leo Voogt	
D2	febr.2016	R. 't Hart		Han Knoeff		Leo Voogt	
D3	febr.2016	R. 't Hart		Han Knoeff		Leo Voogt	
D4	febr.2016	R. 't Hart		Han Knoeff		Leo Voogt	
C2	mrt.2018	R. 't Hart		Han Knoeff		Leo Voogt	
C3	mei 2018	R. 't Hart		Han Knoeff		Leo Voogt	

**Status**

definitief



## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1	Algemeen	1
1.2	Doelgroep	1
1.3	Leeswijzer	1
1.4	Definities	2
1.5	Totstandkoming	5
<b>2</b>	<b>Binnenwaartse macro-instabiliteit</b>	<b>7</b>
2.1	Globale beschrijving van binnenwaartse macro-instabiliteit	7
2.2	Gedetailleerde beschrijving binnenwaartse macro-instabiliteit	8
2.2.1	Inleiding	8
2.2.2	Initiatie	8
2.2.3	Scheurvorming	9
2.2.4	Afschuiving	10
2.2.5	Mogelijke vervolgmecanismen na een afschuiving	10
2.2.6	Tweede afschuiving	11
2.2.7	Micro-instabiliteit	11
2.2.8	Overslag of overloop	12
2.2.9	Mogelijk verloop van het faaltraject na een afschuiving	12
2.2.10	Opdrijven	15
2.3	Overzicht van het faaltraject binnenwaartse macro-instabiliteit	16
<b>3</b>	<b>Buitenwaartse macro-instabiliteit</b>	<b>19</b>
3.1	Globale beschrijving van buitenwaartse macro-instabiliteit	19
3.2	Gedetailleerde beschrijving buitenwaartse macro-instabiliteit	20
3.3	Overzicht van het faaltraject buitenwaartse macro-instabiliteit	22
<b>4</b>	<b>Piping</b>	<b>25</b>
4.1	Globale beschrijving van piping	25
4.2	Gedetailleerde beschrijving van het faaltraject piping tot op niveau van de deelmechanismen	27
4.2.1	Belasting	27
4.2.2	Sterkte	29
4.2.3	Het traject van initiatie tot dijcfalen	30
4.2.4	De te beoordelen deelmechanismen	42
4.2.5	Resterende sterkte	42
4.3	Overzicht van het faaltraject piping	42
<b>5</b>	<b>Micro-instabiliteit</b>	<b>45</b>
5.1	Globale beschrijving van micro-instabiliteit	45
5.2	Faaltrajectbeschrijving micro-instabiliteit	46
5.3	Falen door combinaties van mechanismen	49
5.4	Overzicht van het faaltraject micro-instabiliteit	50
<b>6</b>	<b>Instabiliteit asfaltbekleding</b>	<b>51</b>
6.1	Inleiding	51
6.2	Veroudering materiaal bekledingslaag	51

6.3	Bezwijken ten gevolge van belastingen	52
6.3.1	Overschrijden van de vermoeiingssterkte door golfklappen	52
6.3.2	Bezwijken op dwarskracht door golfklappen	53
6.3.3	Bezwijken van de ondergrond door golfbelastingen	54
6.4	Bezwijken ten gevolge van wateroverdrukken	55
6.5	Materiaaltransport van onder de bekleding	57
6.6	Erosie bekledingsoppervlak	57
6.7	Resterende sterkte	58
6.8	Overzicht van het faaltraject door bezwijken van de asfaltbekleding	59
6.8.1	Inleiding	59
6.8.2	Traject van initiatie tot falen ten gevolge van golfklappen	59
6.8.3	Gebeurtenissen tot dijkfalen ten gevolge van opdrukken door wateroverdruk	60
<b>7</b>	<b>Stabiliteit bekleding gras</b>	<b>63</b>
7.1	Inleiding	63
7.2	Erosie grasbekleding op buitentalud	63
7.2.1	Inleiding en afbakening	63
7.2.2	Fenomenologische procesbeschrijving van erosie buitentalud	64
7.2.3	Overzicht van het faaltraject erosie grasbekleding op buitentalud	68
7.3	Afschuiven grasbekleding buitentalud	69
7.3.1	Inleiding en afbakening	69
7.3.2	Fenomenologische procesbeschrijving van afschuiven buitentalud	70
7.3.3	Overzicht van het faaltraject afschuiven grasbekleding op buitentalud	73
7.4	Erosie grasbekleding op kruin en binnentalud	73
7.4.1	Fenomenologische procesbeschrijving van erosie kruin en binnentalud	73
7.4.2	Overzicht van het faaltraject erosie grasbekleding op kruin en binnentalud	75
7.5	Afschuiven grasbekleding binnentalud	75
7.5.1	Inleiding en afbakening	75
7.5.2	Fenomenologische procesbeschrijving van afschuiven binnentalud	76
7.5.3	Overzicht van het faaltraject afschuiven van grasbekleding op binnentalud	79
<b>8</b>	<b>Stabiliteit bekleding steenzetting</b>	<b>81</b>
8.1	Inleiding	81
8.2	Toplaaginstabiliteit onder golfaanval	83
8.3	Toplaaginstabiliteit door stroming langs de dijk	86
8.4	Lokale afschuiving door golfbelasting	86
8.5	Materiaaltransport vanuit de ondergrond	87
8.6	Materiaaltransport vanuit de granulaire laag	89
8.7	Erosie van de onderlagen	89
8.8	Overzicht van het faaltraject door bezwijken van de steenzetting	89
8.8.1	Inleiding	89
8.8.2	Falen als gevolg van instabiliteit van de toplaag	90
8.8.3	Falen als gevolg van overige mechanismen	92
<b>9</b>	<b>Duinafslag</b>	<b>95</b>
9.1	Fenomenologische procesbeschrijving	95
9.2	Resterende sterkte faalmechanisme duinafslag	97
9.3	Overzicht van het faaltraject duinafslag	97
<b>10</b>	<b>Kunstwerken</b>	<b>101</b>
10.1	Falen waterkering door overslag en/of overloop van het kunstwerk	101



10.1.1	Fenomenologische beschrijving op hoofdlijnen	101
10.1.2	Gedetailleerde beschrijving van het faaltraject	101
10.1.3	Onderscheiden deelmechanismen bij falen door overslag/overloop van kunstwerk	103
10.1.4	Resterende sterkte	104
10.1.5	Overzicht van het faaltraject overslag/overloop bij kunstwerken	105
10.2	Falen waterkering door niet sluiten keermiddelen van het kunstwerk	105
10.2.1	Beschrijving op hoofdlijnen	106
10.2.2	Gedetailleerde beschrijving van het faaltraject	106
10.2.3	Onderscheiden deelmechanismen bij falen door niet sluiten van kunstwerk	111
10.2.4	Resterende sterkte	112
10.2.5	Overzicht van het faaltraject niet sluiten bij kunstwerken	113
10.3	Falen waterkering door achter- of onderloopsheid van het kunstwerk	113
10.3.1	Fenomenologische beschrijving op hoofdlijnen	113
10.3.2	Gedetailleerde beschrijving van het faaltraject	114
10.3.3	Onderscheiden deelmechanismen bij falen door achter- of onderloopsheid van het kunstwerk	117
10.3.4	Resterende sterkte	118
10.3.5	Overzicht van het faaltraject piping bij kunstwerken	119
10.4	Falen waterkering door gebrek aan sterkte van het kunstwerk	120
10.4.1	Fenomenologische beschrijving	120
10.4.2	Schematisch overzicht van het faaltraject	129
<b>11</b>	<b>Voorland</b>	<b>133</b>
11.1	Inleiding	133
11.2	Erosie voorland door golfafslag	135
11.2.1	Fenomenologische procesbeschrijving erosie voorland	135
11.2.2	Overzicht van het faaltraject erosie voorland	136
11.3	Afschuiving voorland	136
11.3.1	Fenomenologische procesbeschrijving afschuiving voorland	136
11.3.2	Overzicht van het faaltraject afschuiving voorland	137
11.4	Zettingsvloeiing	138
11.4.1	Fenomenologische procesbeschrijving zettingsvloeiing	138
11.4.2	Overzicht van het faaltraject zettingsvloeiing	141
<b>12</b>	<b>Literatuur</b>	<b>143</b>
	<b>Bijlage(n)</b>	
<b>A</b>	<b>Afkortingen</b>	<b>A-1</b>



# 1 Inleiding

## 1.1 Algemeen

Dit document betreft de fenomenologische beschrijving van de belangrijkste faalmechanismen voor (primaire) waterkeringen. Het is in eerste instantie geschreven als achtergrondrapport bij het WBI2017. Dit rapport heeft als doel inzicht te geven in de belangrijkste mechanismen die de waterkerende functie van waterkeringen kunnen aantasten. Deze inzichten kunnen evenzeer behulpzaam zijn als achtergrondkennis bij inspecties, het uitvoeren van de zorgplicht en het ontwerpen. Daarom is dit rapport in 2018 aangepast, ontdaan van de specifiek op de beoordeling toegesneden passages.

Dit document geeft een beschrijving van de binnen de diverse faalmechanismen vallende processen en hun visuele kenmerken, opeenvolgend optredend bij een toenemende belasting. Daarbij wordt duidelijk gemaakt wat voor de verschillende faalmechanismen normaliter wordt aangemerkt als falen volgens de gedetailleerde toets in de wettelijke beoordeling (de faaldefinitie) danwel volgens de ontwerpberekening (rekenkundig falen). Doordat het totale proces tot daadwerkelijk falen van de waterkering inzichtelijk is gemaakt voor de verschillende faalmechanismen, wordt duidelijk welke processen van het faaltraject worden meegenomen in de ontwerpberekening danwel de gedetailleerde toets in het WBI. En welke processen *niet* worden meegewogen bij de beoordeling van het faalmechanisme: de processen *na* het rekenkundig falen tot aan het moment waarop de waterkering daadwerkelijk faalt.

## 1.2 Doelgroep

Dit document is geschreven om meer detail te geven voor een deskundig gebruiker die slechts globaal bekend is met de (deel)mechanismen en modellen.

## 1.3 Leeswijzer

Het stelsel van waterkeringen in Nederland bestaat uit duinen, dijken en (waterkerende) kunstwerken. Daarnaast spelen (haven)dammen en voorlanden soms een essentiële rol voor de achterliggende waterkering.

Het verlies van de waterkerende functie kan op verschillende manieren plaatsvinden. Voor dijken zijn de beschouwde bezwijkmechanismen: piping, micro-instabiliteit, macro-instabiliteit, zettingsvloeiingen, overloop en overslag en erosie buitentalud na bezwijken van de bekleding. De waterkerende functie van duinen wordt vooral door afslag bedreigd, terwijl kunstwerken, dammen en voorlanden soms weer specifieke mechanismen kennen.

In deze rapportage worden faalmechanisme-beschrijvingen gegeven, het gehele faaltraject vanaf het eerste mechanisme tot de uiteindelijke doorbraak.

In deze rapportage is telkens een hoofdstuk gereserveerd per mechanisme of (onder)deel van de waterkering dat bij ontwerp of wettelijke beoordeling moet worden beschouwd. Daarbij is dezelfde volgorde aangehouden als in *WBI 2017 Bijlage III Sterkte en veiligheid*.

Dit achtergrondrapport geeft een opsomming van de belangrijkste faalmechanismen die de waterkerende functie van de waterkering bedreigen. Deze spelen alle een rol voor de beoordeling (WBI 2017). Maar deze mechanismen zullen ook voor een ontwerp moeten worden beoordeeld, al kunnen daarbij andere criteria en/of andere momenten van rekenkundig falen worden gehanteerd.

De literatuur betreffende de faalmechanismen is, op volgorde van de eerste aanroep opgenomen in het laatste hoofdstuk (12).

#### 1.4 Definities

In deze rapportage is een aantal begrippen gebruikt die vrij essentieel zijn voor de beschrijving van de faalmechanismen. In deze paragraaf wordt een aantal van deze begrippen nader toegelicht door ze in relatie tot elkaar te plaatsen. Er wordt ingegaan op:

- *Bezwijken en falen.*
- Het *faaltraject* met de onderdelen *processen* en *stadia*.
- *Faaldefinitie* en *rekenkundig falen*, *sterkte*, *reststerkte* en *resterende sterkte*.
- Ten slotte op *Initiële*, *vervolg-*, *primaire*, *directe* en *indirecte mechanismen*.

Voor een summiere definitie van alle overige begrippen wordt verwezen naar de begrippenlijst opgenomen in Appendix B van Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage I Procedure.

##### *Bezwijken en falen*

Bezwijken is het verlies van evenwicht (bijvoorbeeld afschuiven) en/of het verlies van samenhang in materiaal (bijvoorbeeld verweken of scheuren) en/of het optreden van ontoelaatbaar grote vervormingen. Bij bezwijken overtreffen spanningen ten gevolge van de belastingen de sterkte van het (dijk)materiaal.

Falen is het niet vervullen van de primaire functie(s). Een waterkering faalt als er een onacceptabele hoeveelheid water de kering passeert, bijvoorbeeld doordat een bres in de dijk is ontstaan. Er kan echter ook sprake zijn van het falen van een onderdeel van de waterkering. Een dijkbekleding, die als primaire taak heeft het dijklichaam tegen erosie te beschermen, faalt als er een zodanig gat in de bekleding aanwezig is dat stroming en/of golven het dijklichaam substantieel kunnen aantasten. Het falen van een onderdeel van de kering betekent echter nog niet dat de waterkering als geheel faalt. In geval van de falende dijkbekleding kan het dijklichaam voldoende erosiesterkte bezitten om het restant van de storm te doorstaan.

Falen van een onderdeel kan echter ook samengaan met falen van de kering als geheel. Als een keermiddel van een sluis bezwijkt en daarmee zijn kerende functie niet meer kan vervullen, zal dit mogelijk tot een dusdanig groot debiet naar het achterland opleveren dat daarmee ook moet worden gesteld dat het falen van het keermiddel samengaat met het falen van de waterkering als geheel.

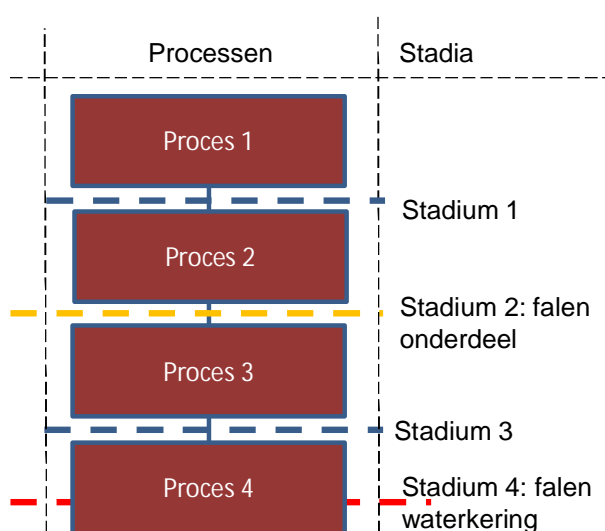
Falen van de waterkering houdt dus in dat de waterkerende functie niet wordt vervuld op het ogenblik dat daar aanspraak op wordt gemaakt. Met andere woorden: de aanwezige capaciteit om water te keren wordt overschreden door de benodigde capaciteit om water te keren.

Veelal zal eerst bezwijken van een onderdeel van de waterkering optreden, het initiële mechanisme, alvorens na het optreden van één of meer vervolgmecanismen uiteindelijk de waterkering als geheel faalt, oftewel het achterland onderloopt. Overigens gaat bezwijken van een onderdeel of het geheel van de kering niet per se vooraf aan falen van de kering: als een waterkerend kunstwerk te laag is, kan het overstromend debiet naar het achterland dusdanige vormen aannemen dat er toch sprake is van falen als waterkering. Bezwijken (van een onderdeel) van de kering is dus geen noodzakelijk stadium wat voorafgaat aan falen.

*Faaltraject, processen en stadia*

Het faaltraject is de reeks van gebeurtenissen van het eerste mechanisme tot uiteindelijk de doorbraak van de waterkering, het falen van de waterkering. Binnen de faaltrajecten zoals die in deze rapportage worden behandeld, wordt onderscheid gemaakt tussen processen en stadia, zie Figuur 1.1. Aan een proces in het faaltraject kan een tijdsduur worden toegekend. Voorbeelden van processen uit een faaltraject zijn:

- Eroderen van een kleilaag door stroming of golven.
- Oplopen van de freatische lijn in een dijklichaam.
- Groei van een pipe onder de dijk door.



Figuur 1.1 Beschrijfswijze van het traject tot falen van de waterkering voor een ontwerp of toets

Een stadium is altijd verbonden met een specifiek tijdstip. De stadia, waaronder de kritische momenten, worden bereikt als het voorafgaande proces leidt tot het overschrijden van een grenswaarde. Voorbeelden zijn:

- Moment waarop het eerste gat in de kleilaag ontstaat: aanvang erosie zandlichaam.
- Moment waarop de freatische lijn het niveau bereikt waarbij het binnentalud afschuift.
- Moment waarop het opwaarts verhang in de wel de waarde bereikt waarbij heave optreedt.

Het laatste stadium, het falen van de waterkering, is in deze rapportage telkens ingetekend ergens gedurende het laatste benoemde proces, de bresgroei. Verondersteld wordt dat er enige mate van bresgroei moet optreden voordat er sprake is van een overstroming: de situatie dat er dusdanig veel water in het gebied achter de kering komt te staan dat er dodelijke slachtoffers vallen of substantiële economische schade ontstaat.

Veelal geldt voor de processen en de stadia dat de tijdsduur danwel het tijdstip minder nauwkeurig kan worden bepaald naarmate het proces of stadium verder naar het einde van het faaltraject ligt. De onzekerheid wordt later in het faaltraject steeds groter, veelal omdat

alleen de eerst optredende processen goed zijn onderzocht en dus (nauwkeurig) kunnen worden gekwantificeerd.

Een begrip wat zowel betrekking kan hebben op een proces als op een stadium betreft een *deelmechanisme*. Een deelmechanisme is een onderscheiden deel van het faaltraject van eerste schade aan of vervorming van de waterkering tot falen van de waterkering. Het is een begrip dat soms wat verwarrend kan zijn, bijvoorbeeld als het betrekking heeft op bezwijken zonder dat dit meteen leidt tot falen van (een onderdeel van) de kering. Daarom wordt in de beschrijvingen soms gekozen voor het woord mechanisme of voor een specifiekere aanduiding zoals bijvoorbeeld *bezwijkmechanisme*: een deelmechanisme waarbij (een onderdeel van de) waterkering bezwijkt.

#### *Rekenkundig falen en faaldefinitie, sterkte, reststerkte en resterende sterkte*

Rekenkundig falen is het moment waarop volgens de rekenmodellen de waterkering faalt. De keuze van het gebruikte rekenmodel en de daarin gehanteerde parameters bepalen het moment van rekenkundig falen. Voor de gedetailleerde toets van het WBI-2017 is voor elk toetsspoor het rekenmodel voorgeschreven en voor dat specifieke geval wordt het rekenkundig falen benoemd door de zogenaamde faaldefinitie. Voor een ontwerp, maar ook voor een *toets op maat* waarbij de faaldefinitie wordt bijgesteld wordt het moment van falen dus niet aangeduid als faaldefinitie, maar met het hyperoniem *rekenkundig falen*.

De grens tussen die wordt gegeven door het rekenkundig falen scheidt de sterkte van wat in deze rapportage wordt aangeduid als de resterende sterkte. De reststerkte is daarmee, zie appendix B van WBI2017 Bijlage I, de resterende sterkte die bij de gedetailleerde toets wordt verwaarloosd.

Het begrip *sterkte* wordt in dit document gebruikt voor de weerstand die de waterkering biedt in het deel van het faaltraject tot aan het moment van rekenkundig falen. Het begrip *resterende sterkte* wordt in dit document gebruikt voor de weerstand die de waterkering nog biedt na het moment van rekenkundig falen tot aan het moment van daadwerkelijk falen. De *resterende sterkte* bij de gedetailleerde toets van de beoordeling (WBI2017), waarbij het rekenkundig falen wordt beschreven door de faaldefinitie, wordt in deze rapportage *reststerkte* genoemd.

De wijze waarop de begrippen *reststerkte* en *resterende sterkte* in dit rapport worden gebruikt, wijkt af van het gebruik in eerdere onderzoeksrapporten. Daar werd het woord *reststerkte* meestal gebruikt voor de weerstand die de kering nog biedt nadat een eerste bezwijkmechanisme is opgetreden. Denk daarbij aan een steenzetting waarvan de toplaag bezwijkt doordat een eerste steen uit de zetting komt. De bekleding, die normaliter bestaat uit een toplaag en verschillende onderlagen, biedt dan nog de nodige weerstand: de onderlagen moeten eerst eroderen voordat het dijklichaam direct bloot staat aan erosie. In het rekenmodel dat wordt gebruikt voor de gedetailleerde toets wordt de erosie-weerstand van die onderlagen tegenwoordig ook gekwantificeerd en deze erosie-weerstand valt volgens de faaldefinitie voor steenzettingen danook binnen de sterkte van de bekleding.

#### *Initiële, vervolg-, primaire, directe en indirecte mechanismen*

Het *initiële* mechanisme is het deelmechanisme dat als eerste optreedt, danwel tot schade aan de waterkering leidt. Voordat de waterkering faalt, moet er veelal nog meer gebeuren. Deelmechanismen die na het initiële mechanisme optreden, worden *vervolgmechanismen*

genoemd. De deelmechanismen tot aan de faaldefinitie, worden aangeduid als primaire mechanismen.

Daarnaast wordt nog onderscheid gemaakt tussen *directe* en *indirecte* mechanismen. Voor de directe mechanismen geldt dat zij optreden bij hoogwater. Door de hoge waterstand tegen de kering is de situatie na het optreden van het betreffende mechanisme altijd direct kritiek.

De indirecte mechanismen treden veelal op *na* een (extreem) hoogwater, soms zelf juist bij een extreem laagwater. In hoeverre de schade die een indirect mechanisme veroorzaakt kritiek is, is afhankelijk van de omvang van de schade, danwel of na het optreden van het mechanisme snel weer een hoge waterstand optreedt.

Het voorbeeld van een indirect mechanisme waarvoor een uitgesproken lage waterstand is vereist, is de zettingsvloeiing. Aangezien de lage waterstand niet is gekoppeld aan een storm, is het snel optreden van een vervolgmecanisme dat de waterkering kan laten falen niet waarschijnlijk. Dit geldt onder de aanname dat de vloeiing het dijklichaam zelf niet heeft aangetast. Als de zettingsvloeiing echter zo omvangrijk is dat het dijklichaam substantieel lager is geworden, dan kan dat in een getijdegebied alsnog een kritieke situatie opleveren.

Een afschuiving van de bekleding op het buitentalud is een typerend voorbeeld van een indirect mechanisme dat wel hoogwater gekoppeld is. Een dergelijk mechanisme treedt op *na* een extreem hoog water en vergt niet veel tijd. Voor zover dat mechanisme plaatsvindt bij een waterkering in het bovenrivierengebied, is het hoogst onwaarschijnlijk dat de snelle daling na de hoogwatergolf die het mechanisme activeerde, binnen korte tijd wordt gevolgd door een tweede hoogwatergolf. Voor waterkeringen die sterk onder invloed van het getij staan, zal na bezwijken een volgend hoogwater niet lang op zich laten wachten. In hoeverre tijdens één en dezelfde storm afschuiven en herbelasten van het beschadigde buitentalud door golven kan optreden, zal sterk van de situatie afhangen. Dit vereist echter een gedegen analyse van de specifieke situatie. Iets wat thuis hoort in de *toets op maat*. Daarom wordt voor keringen die door getij worden belast de buitenwaartse afschuiving van de bekleding op het buitentalud behandeld als betrof het een direct mechanisme. Mocht die aanpak tot onthouding van het oordeel Voldoet leiden, dan kan altijd in de *toets op maat* worden beoordeeld of de faalkans voldoende wordt gereduceerd als wel rekening wordt gehouden met het feit dat het mechanisme niet optreedt als de kering door een extreem hoogwater wordt belast.

## 1.5 Totstandkoming

Dit document is tot stand gekomen op basis van deelrapportages geschreven door specialisten op het gebied van de verschillende mechanismen. Deze deelrapportages zijn gereviseerd door Rijkswaterstaat-WVL, waarna van deze deelrapportages een consistent achtergrondrapport is gemaakt.

Inhoudelijke bijdragen zijn geleverd door:

J.E.J. Blinde	U. Förster
B. van Bree	R. 't Hart (eindredactie)
J. Bredeveld	A. van Hoven
H.T.J. De Bruin	G.A. van den Ham
M. Boers	M. Klein Breteler
J.K. van Deen	D. Pereboom
R.C.M. Delhez	H.A. Schelfhout
T.A. van Duinen	B.G.H.M. Wichman

De projectleiding bij Deltares was in handen van G. de Vries/A. de Leeuw.

Van de zijde van RWS is inbreng geleverd door:

Arnoud Casteleijn	Quirijn Lodder
Marcel Bottema	Koos Saathof
Bianca Hardeman	Robert Slomp
Jan Jaap Heerema	Wout de Vries
Astrid Labrujere	

De projectleiding bij RWS-WVL was in handen van R. Slomp/A. Bizzarri. Marieke Hazelhoff heeft in 2018 deze laatste versie begeleid vanuit Rijkswaterstaat.

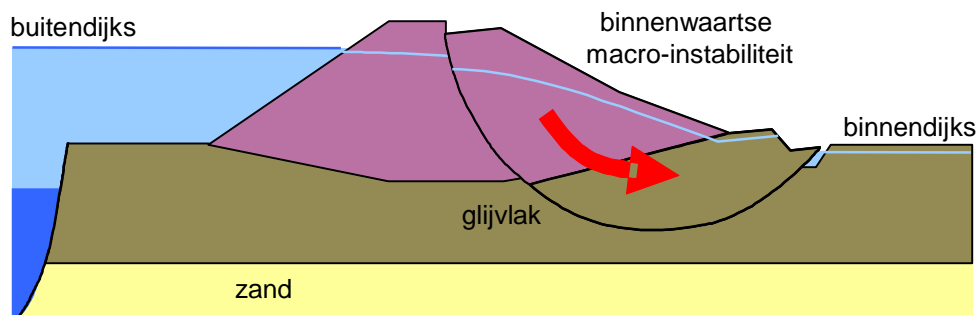
Eind 2017, begin 2018 is deze rapportage redactioneel bewerkt zodat deze als bouwsteen kan worden gebruikt binnen de herstructurering van Leidraden en Technische Rapporten.



## 2 Binnenwaartse macro-instabiliteit

### 2.1 Globale beschrijving van binnenwaartse macro-instabiliteit

De kans op een binnenwaartse afschuiving van een dijklichaam moet worden beschouwd bij het ontwerpen of beoordelen van de waterkerende capaciteit van een dijk. Het faalmechanisme wordt aangeduid als binnenwaartse macro-instabiliteit.



Figuur 2.1 Macro-instabiliteit van het binnentalud

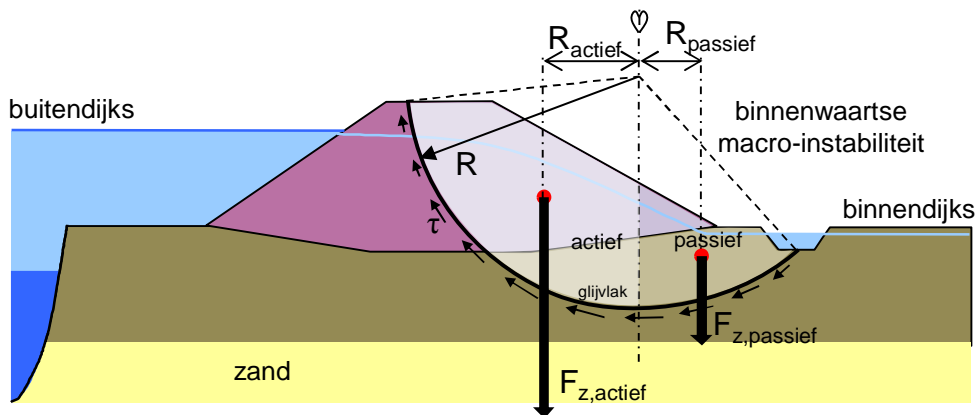
Er is sprake van macro-instabiliteit als grote delen van een grondmassief afschuiven langs rechte of gebogen diepe schuifvlakken. Ondiepe afschuivingen (schuifvlak tot ca. 1 m beneden maaiveld) betreffen de stabiliteitsbeoordeling van bekledingen en/of micro-instabiliteit.

Zoals de naam van het mechanisme macro-instabiliteit al aangeeft, is de oorzaak van de afschuiving een verlies van evenwicht van een grondmassa. Als in een glijvlakanalyse een cirkelvormig schuifvlak wordt verondersteld, dan draait dit evenwicht om een aandrijvend moment en een tegenwerkend moment. Het aandrijvend moment bestaat uit het gewicht maal de arm van het grondlichaam links van het middelpunt van de glijcirkel. Het tegenwerkend moment bestaat uit het gewicht maal de arm van het grondlichaam rechts van het middelpunt en de schuifkrachten langs de glijcirkel maal de straal van de glijcirkel. Dit is weergegeven in Figuur 2.2. Als door het toenemen van de waterspanningen in de ondergrond, de capaciteit om schuifspanningen op te nemen kleiner wordt, kan het evenwicht verloren gaan. Hoge waterspanningen in de dijk kunnen ontstaan door een hoge buitenwaterstand, door hevige neerslag of door deformatie. Verder kan het evenwicht van een dijklichaam worden verstoord door toename van het aandrijvende moment, bijvoorbeeld door verkeer op de dijk, of door afname van het tegenwerkende moment, bijvoorbeeld door het aanleggen van een teensloot.

In deze faalmechanismebesrijving wordt alleen gekeken naar het verlies van evenwicht van een binnentalud als gevolg van de maatgevende buitenwaterstand. Deze situatie kan immers leiden tot een overstrooming van de dijk en is zodoende een gevaar voor de achterliggende polder. Bij het ontwerp van een dijk verdienen ook andere voor de stabiliteit maatgevende situaties aandacht. Te denken valt aan de situatie tijdens aanleg van de dijk(verzwarende), maar ook aan de invloed van extreme regenval of juist extreme droogte.

Bij extreme droogte van het achterland kan de weerstand die het achterland kan leveren, worden gereduceerd. Het lijkt overigens uitgesloten dat deze belastingssituatie zal optreden in combinatie met een extreem hoogwater.

Extreme regenval leidt over het algemeen tot een hogere freatische lijn in de dijk en als die zware neerslag wordt gevolgd door hoogwater kan dat een maatgevende situatie zijn.



Figuur 2.2 Evenwichtsbeschouwing bij macro-(in)stabiliteit van het binnentalud

Macro-instabiliteit bij waterkerende constructies heeft veel overeenkomsten met macro-instabiliteit bij groene dijken. Op de overeenkomsten en verschillen wordt in dit rapport niet ingegaan.

De volgende paragraaf geeft een fenomenologische procesbeschrijving van het gehele faaltraject dat start met het initieel mechanisme binnenwaartse macro-instabiliteit. In paragraaf 2.3 is een overzicht van het faaltraject gegeven.

Voor het opstellen van deze faalmechanismebeschrjving zijn grote delen van de tekst overgenomen uit het rapport Dijkdoorbraakprocessen [1]. Dit rapport is opgesteld door E.O.F. Calle in het kader van het Delft Cluster project Faalmechanismen en Sterkte van Waterkeringen (basisproject 2) van het Delft Cluster thema Risico's van Overstromingen.

## 2.2 Gedetailleerde beschrijving binnenwaartse macro-instabiliteit

### 2.2.1 Inleiding

In deze paragraaf is een fenomenologische beschrijving van het faaltraject tot op het niveau van de deelmechanismen gegeven. Hierbij wordt ingegaan op het verloop van het proces, stapsgewijs bij toenemende belasting en afnemende sterkte vanuit een dagelijkse situatie naar een maatgevende situatie en hoe dit visueel waarneembaar is. De volgende onderdelen komen aan de orde:

- Wat bepaalt de belasting en wat de sterkte?
- Hoe groeit het mechanisme vanaf de initiatiefase tot aan falen van de dijk?
- Welke verschillende (deel)mechanismen zijn hierin te onderscheiden?
- Welke mechanismen en processen worden nu uiteindelijk beoordeeld?
- Bijdrage van resterende sterkte aan het faaltraject.

### 2.2.2 Initiatie

Bij macro-instabiliteit bij dijken is niet zozeer sprake van een toename van de belasting door hoogwater, maar vooral van een afname van de mobiliseerbare schuifsterkte van de grond door hoogwater. Het hoogwater veroorzaakt een toename van grondwaterspanningen en daarmee een afname van de effectieve spanningen. Het gewicht van het dijklichaam op de ondergrond (het aandrijvend moment) is de feitelijke belasting bij macro-instabiliteit. De grootte van deze belasting verandert nauwelijks door hoogwater. Een beperkte toename van

het gewicht van het dijklichaam kan optreden doordat een deel van het dijklichaam dat eerder onverzadigd was tijdens hoogwater, verzadigd raakt.

Het freatisch vlak in de dijk en de stijghoogte in de ondergrond zullen tijdens hoogwater stijgen als gevolg van infiltratie via het buitentalud van de dijk en infiltratie via de ondergrond vanuit een aanwezige watervoerende tussenzandlaag of een dieper gelegen watervoerend zandpakket. Deze processen zorgen voor het verhogen van de waterspanningen in de dijk en de ondergrond. Deze verhoging van het freatisch vlak, de stijghoogte en de waterspanningen veroorzaken een afname van de mobiliseerbare schuifsterkte van de grond in en onder de dijk.

Bij een stijging van de buitenwaterstand zullen het freatisch vlak en de stijghoogte in de zandlagen volgen. Hoe snel het freatisch vlak en de stijghoogte zich kunnen aanpassen aan de verhoogde buitenwaterstand, hangt af van het materiaal van het dijklichaam (zand zal sneller aanpassen dan klei) en van het materiaal en de dikte van het slappe lagen pakket tussen het dijklichaam en de zandlaag. Daarnaast heeft de aanwezigheid van voorland, de afstand van de dijk tot aan het buitenwater, eventueel recent baggeren in de rivier of graven in de uiterwaard, een effect op het freatisch vlak en de stijghoogte in de zandlagen.

Door een verhoging van het freatisch vlak en de stijghoogte, en dus een verhoging van de waterspanningen, zullen tegelijkertijd de effectieve spanningen en de schuifsterkte in de dijk en de ondergrond afnemen. De stabiliteit van het dijklichaam zal als gevolg hiervan ook afnemen. In de ondergrond ontstaat een zone waar de schuifsterkte wordt overschreden (de zogenaamde plastische zone) waarover een moot grond kan vervormen en uiteindelijk afschuiven.

Het freatisch vlak kan tevens verhoogd worden door neerslag. Overigens is de infiltratie via een grasbekleding door significante golfoverslag in het algemeen veel groter dan door extreme neerslag.

### 2.2.3 Scheurvorming

Wanneer de buitenwaterstand toeneemt en de waterspanningen in de dijk en de ondergrond ook toenemen, kan de sterkte van de dijk ontoereikend zijn. De sterkte van de dijk wordt gevormd door de schuifsterkte die de grond in de dijk en in de ondergrond kan mobiliseren. Wanneer de schuifsterkte van de grond onvoldoende wordt, zal een instabiliteit optreden. Wanneer de mobiliseerbare schuifsterkte nog juist voldoende is om afschuiven te voorkomen, kunnen wel vervorming en scheurvorming optreden.

Een beginnende instabiliteit manifesteert zich met deformaties die pas prominent zichtbaar worden als er scheuren optreden in het buitentalud, de kruin of het binnentalud van de dijk. Deze scheuren geven het intredepunt van het zich ontwikkelende schuifvlak aan. Grote scheuren evenwijdig aan de kruin duiden op de ontwikkeling van een mogelijk afschuifvlak. Overigens duiden niet alle scheuren op een beginnende afschuiving. Ook (extreme) droogte kan tot scheuren in kleilagen op de dijk leiden. Het gaat dan om kleine geïsoleerde scheuren die ontstaan door uitdrogen van de toplaag. Bij primaire waterkeringen, die nooit zijn opgebouwd uit veen, leiden deze scheuren niet tot een afschuiving. Voor veenkaden kan het echter wel een inleidend stadium naar falen zijn.

Het ontstaan van een scheur in de aanloop naar een afschuiving, hangt af van de materiaaleigenschappen van de toplaag. Aangenomen wordt dat in zandige gronden (bovenrivierengebied) de vervormingen voordat een afschuiving optreedt gering zijn, zodat de scheurvorming in eerste instantie beperkt blijft. In kruipgevoelige gronden (benedenrivierengebied) kunnen zeer grote verplaatsingen plaatsvinden voordat een afschuiving optreedt. De scheurvorming is daar dus veel prominenter voordat de

daadwerkelijke afschuiving optreedt. De tijd tussen het ontstaan van een scheur en de volledige afschuiving zal bij een zandige dijk waarschijnlijk korter zijn dan bij een kleiige dijk. Scheuren ontstaan tijdens hoogwater op de rivieren regelmatig. (Gerepareerde) scheuren in het wegdek evenwijdig aan de kruin kunnen voorbeelden zijn van scheuren die niet tot een afschuiving hebben geleid. Dergelijke scheuren kunnen echter ook ontstaan door ongelijke zetting van de dijk. Ook tijdens de hoogwaters van 1980, 1993 en 1995 zijn verschillende scheuren in de kruin aangetroffen. Door het treffen van noodmaatregelen kon verder bezwijken en het falen van de dijk worden voorkomen. Dat een scheur niet altijd tot een afschuiving leidt, kan worden geconcludeerd uit het feit dat na de genoemde hoogwaters wel scheuren, maar nauwelijks afschuivingen zijn aangetroffen. Indien er geen noodmaatregelen genomen zouden zijn, hadden wellicht meer afschuivingen plaatsgevonden.

#### 2.2.4 Afschuiving

Bij een daadwerkelijke afschuiving daalt het maaiveld van de dijk aan de landzijde van de scheur. Op een gegeven moment schuift de moot grond af totdat een nieuwe evenwichtssituatie is ontstaan. Het binnendijkse maaiveld kan hierbij omhoog worden gedrukt. Dit is echter niet noodzakelijk. De vervorming in de dijk (actieve zone van een schuifvlak) is vaak groter dan de vervorming binnendijks (passieve zone van het schuifvlak). Een afschuiving kan zich binnen enkele uren tot enkele dagen voltrekken. Daarbij gaat het afschuiven eerst een aantal uren snel en vervolgens steeds langzamer. In de praktijk komt het niet altijd zover. Zodra de eerste scheuren zich in de dijk hebben gemanifesteerd, worden vaak maatregelen getroffen.

Na het optreden van een afschuiving wordt een nieuwe evenwichtssituatie bereikt. Aan de bovenzijde van het talud is de bekleding verdwenen en is het kernmateriaal zichtbaar. Dit staat in eerste instantie onder een bijna verticaal talud. Vervolgmechanismen kunnen verdere schade aan een dijk veroorzaken. Voor de beschrijvingen van de vervolgmechanismen wordt vaak aangenomen dat de afschuivende grondmoot een evenwicht hervindt wanneer het aanvankelijke hoogteverschil tussen de kruinhoogte en het oorspronkelijk maaiveld is gehalveerd. In werkelijkheid schuift de moot grond minder ver af omdat er altijd een weerstandbiedende kracht in het schuifvlak overblijft. Bij opgetreden afschuivingen bleek de afschuifhoogte meestal maximaal 1 à 2 m te bedragen.

Door het optreden van een afschuiving kan sprake zijn van het falen van de waterkerende functie van een dijk. Dit is het geval wanneer de omvang van de afschuiving zo groot is dat de kruin van de dijk over de volle breedte is gedaald of weggeschoven en water in het achterliggende gebied kan stromen (een voorbeeld hiervan is de kaderverschuiving bij Wilnis). In dat geval kan na de afschuiving de ontstane kruinverlaging of het gat in de dijk heel snel uitgroeien tot een bres. Vaak zal het optreden van een afschuiving geen verzakking van de volledige kruin tot gevolg hebben. Een deel van de breedte van de kruin blijft vaak intact. In dat geval is na een afschuiving nog geen sprake van het falen van de waterkerende functie van de dijk. In de praktijk blijkt dat afschuivingen veelal niet leiden tot het verzakken van de volledige breedte van de kruin van de dijk (o.a. afschuivingen bij Streefkerk en Bergambacht). Wanneer na een afschuiving een deel van de kruin van de dijk intact blijft, kan de waterkering alleen falen wanneer na de afschuiving vervolgmechanismen optreden.

Rekenkundig falen bij het mechanisme binnenwaartse macro-instabiliteit wordt normaliter gekoppeld aan het verlies van evenwicht: de grootschalige afschuiving van het binnentalud van de dijk. De beoordeling betreft dan dus de kans van optreden van een binnenwaartse afschuiving van het dijktalud.

#### 2.2.5 Mogelijke vervolgmechanismen na een afschuiving

Na een afschuiving van een dijktalud kunnen vervolgmechanismen optreden. De belangrijkste vervolgmechanismen zijn:

- Schade door 'tweede' afschuiving.
- Schade door micro-instabiliteit (bij een zandkern).
- Schade door overslag.

De mogelijke vervolgmecanismen, die kunnen optreden nadat een afschuiving is ontstaan, worden normaliter niet beoordeeld bij het ontwerp of de wettelijke beoordeling volgens het toetspoot Macrostabieleit. De mogelijke vervolgmecanismen bepalen dus de eventueel aanwezige resterende sterkte van een dijk.

Overigens zijn er weinig praktijkgevallen bekend waarvoor vervolgmecanismen zijn beschreven. Als wordt afgezien van tekortschieten van de vastlegging van schadegevallen, kan dit betekenen dat:

- De dijk direct na een afschuiving faalt. Aangezien er wel afschuivingen worden waargenomen die niet tot falen van de waterkering hebben geleid, valt dit alternatief af.
- De dijk bijna nooit doorbreekt door binnenwaartse macro-instabiliteit als het intredepunt in het binnentalud of de kruin ligt. Er ontstaat na een eerste afschuiving bijna altijd een nieuwe evenwichtssituatie zonder dat de dijk faalt.
- De hoogwatergolf duurt niet lang genoeg om vervolgmecanismen te initiëren.
- Na het optreden van een scheur of eerste afschuiving worden altijd voldoende maatregelen getroffen zodat vervolgmecanismen niet meer optreden. Dit betekent dat in gevallen waarbij scheuren en eerste afschuivingen niet worden opgemerkt dijkdoorbraken ten gevolge van macro-instabiliteit kunnen optreden.

#### 2.2.6 Tweede afschuiving

Bij gelijkblijvende waterspanningen in de dijk is het niet waarschijnlijk dat een 'grote' vervolgaafschuiving optreedt. Er is immers door de eerste afschuiving een nieuw evenwicht bij de aanwezige spanningen opgetreden. Kleine afschuivingen van het steile talud boven in de kruin van de dijk kunnen wel optreden. Het materiaal schuift af, waarschijnlijk onder een natuurlijk talud.

Als de waterspanningen in de dijk verder toenemen, neemt de kans op een vervolgaafschuiving toe. Afhankelijk van de plaats van het intredepunt van de vervolgaafschuiving wordt de kruinhoogte door een tweede afschuiving aangetast. Indien de kruinhoogte door vervolgaafschuiving(en) zodanig is verlaagd dat water over de dijk stroomt, veroorzaakt overslaand water verdere schade aan de dijk.

#### 2.2.7 Micro-instabiliteit

Indien de dijk een zanddijk betreft en het freatisch vlak zodanig hoog ligt dat water na de afschuiving uit de dijk kan treden, kan micro-instabiliteit verdere schade aan de dijk veroorzaken. Na de voorafgaande afschuiving is een deel van het talud afgeschoven, waardoor de zandkorrels uit de kern van de dijk gemakkelijk kunnen afschuiven. Indien micro-instabiliteit optreedt, kan de mogelijkheid van een kruinverlaging worden bepaald door het restprofiel te vergelijken met het minimaal benodigde profiel.

Een dergelijke hoogte van het freatisch vlak (minder dan 2 m onder de kruin) treedt alleen op bij een langdurige hoge buitenwaterstand. Waarschijnlijk veroorzaakt overslag bij zo een hoge waterstand eerder schade aan de dijk dan micro-instabiliteit. Beide mechanismen kunnen elkaar natuurlijk wel versterken.

Indien de kruinhoogte van een kleidijk na het optreden van een afschuiving niet is aangetast, er geen tweede afschuiving plaatsvindt en er geen overslag optreedt, zal het faaltraject

waarschijnlijk stoppen. Micro-instabiliteit speelt bij een kleidijk immers een te verwaarlozen rol.

## 2.2.8 Overslag of overloop

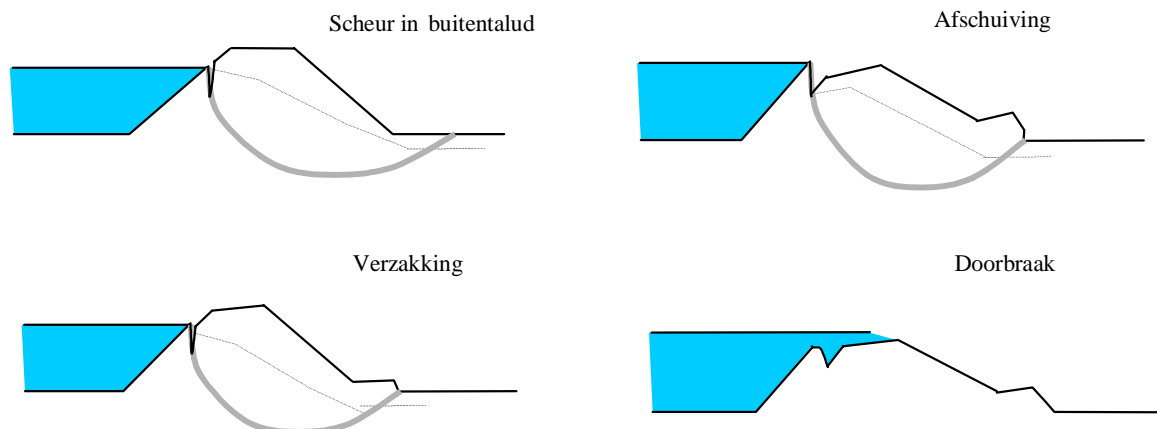
Na een afschuiving is de bekleding gedeeltelijk van de dijk afgeschoven. Indien overslag of overloop optreedt, heeft het overslaande water vrij spel met het kernmateriaal. Indien het kernmateriaal uit zand bestaat, is weinig water nodig om de dijk verder aan te tasten. Erosie van een kleikern zal, alhoewel minder, ook snel optreden.

## 2.2.9 Mogelijk verloop van het faaltraject na een afschuiving

De locatie van het intredepunt van een afschuiving, in het buitentalud, in de kruin of in het binnentalud, is van groot belang voor het verdere verloop van het faaltraject van de dijk, nadat een afschuiving is opgetreden.

### *Schuifvlak door buitentalud*

Zo zal een binnenwaartse afschuiving waarbij het schuifvlak het buitentalud van de dijk snijdt, resulteren in een verlaging van de kruin, zie Figuur 2.3. Als het restprofiel lager wordt dan de buitendijkse waterstand, treedt inundatie van het achterland op. De functie van de dijk, het keren van water, is aangetast. Het gat zal snel groter worden als gevolg van erosie door het stromende water.



Figuur 2.3 Mogelijk faaltraject bij intredepunt schuifvlak in het buitentalud

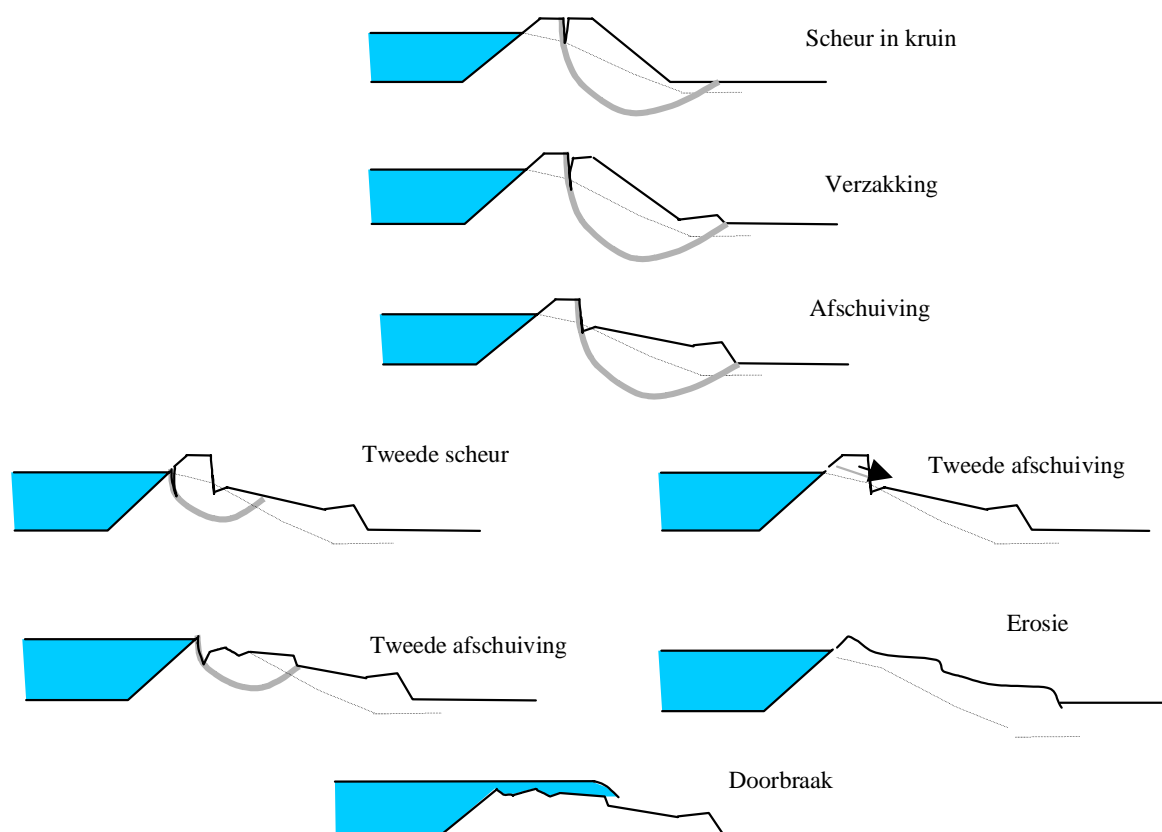
Er treedt geen directe inundatie van het achterliggende land op als het restprofiel voldoende hoog blijft om water te keren. Wel kan het resterende dijkprofiel dusdanig klein zijn dat het in zijn geheel wordt weggedrukt door de waterdruk aan de buitenzijde van het dijklichaam. Door het stromende water zal het gat verder worden geërodeerd. Als het resterende dijklichaam voldoende groot is om niet weggedrukt te worden, kunnen als vervolgmechanismen oppervlakte erosie door overslag, micro-instabiliteit of een tweede afschuiving optreden. Bij overslag slaat water over de kruin van de dijk en erodeert zo het binnentalud van de dijk. Aangenomen moet worden dat door de eerste afschuiving de erosiebestendigheid van het binnentalud lokaal sterk verminderd. Hierdoor zal het erosieproces relatief snel kunnen plaatsvinden.

Dit geldt vooral voor een dijk met een zandkern; door een gebrek aan taludbekleding kunnen de cohesieloze zandkorrels gemakkelijk worden weggespoeld. Bij micro-instabiliteit wordt grond uitgespoeld door kwel uit het binnentalud. Ook hier geldt dat een dijk met een zandkern kwetsbaarder is dan een kleidijk. Het optreden van bovengenoemde vervolgmechanismen is

in de praktijk niet waargenomen. De beschreven mechanismen in deze alinea zijn daarom theoretische aannamen.

#### *Schuifvlak door kruin*

Als het intredepunt van het schuifvlak in de kruin van de dijk ligt, dan blijft een zodanig deel van het dijklichaam intact dat de dijkhoogte niet wordt aangetast. Er is sprake van bezwijken van het dijklichaam zonder dat de waterkering faalt. Door eventuele vervolgmecanismen kan de dijk wel doorbreken, zie Figuur 2.4. Als vervolgmecanismen kunnen erosie door overslag, micro-instabiliteit en tweede, kleinere afschuivingen optreden. Bij overslag wordt het gehavende binnentalud van de dijk verder geërodeerd door water dat over de kruin van de dijk slaat. Het binnentalud kan ook worden geërodeerd door water dat door de dijk sijpelt en op het binnentalud aan het oppervlak komt. Hierbij kan grond uit het dijklichaam worden weggespoeld: micro-instabiliteit. En als laatste kunnen tweede, kleinere afschuivingen plaatsvinden. Het restprofiel dat ontstaat na het optreden van de eerste afschuiving is niet zondermeer stabiel te noemen. Bij het intredepunt is een steil talud ontstaan dat langs een recht of een gebogen schuifvlak voor een tweede keer kan afschuiven. Als bij de tweede afschuiving de kruin dusdanig wordt verlaagd dat de buitenwaterstand hoger ligt, dan zal het achterland onderlopen. Het stromende water zal het dijklichaam verder eroderen, er treedt bresgroei op. Als het resterende dijkprofiel hoger is dan de buitenwaterstand dan kunnen de vervolgmecanismen oppervlakte erosie door overslag en micro-instabiliteit optreden.

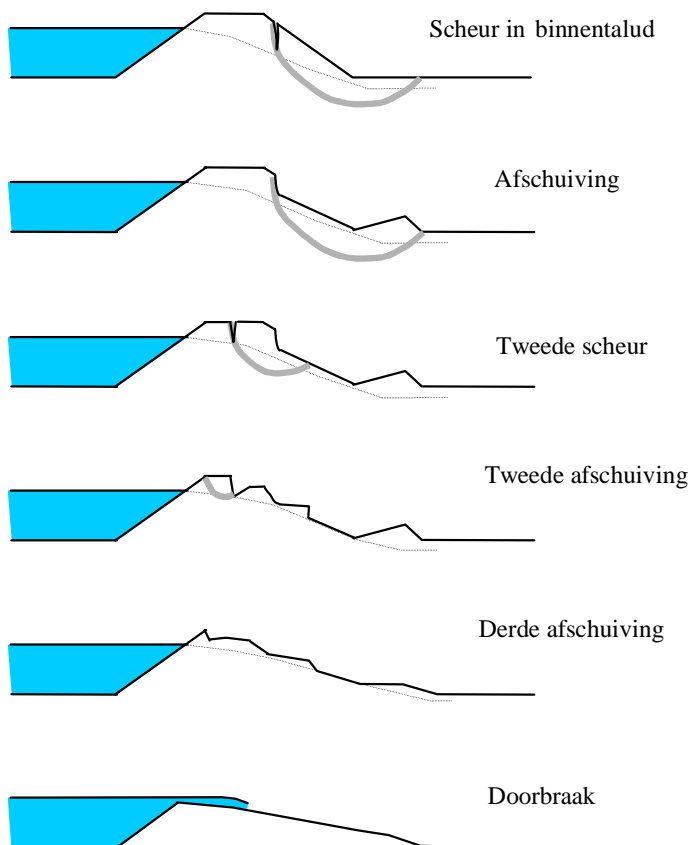


Figuur 2.4 Mogelijk faaltraject bij intredepunt schuifvlak in de kruin

#### *Schuifvlak door binnentalud*

Als het intredepunt van het schuifvlak in het binnentalud van de dijk ligt, dan blijft een groot gedeelte van het dijklichaam intact, zodanig dat de dijkhoogte niet wordt aangetast. De dijk faalt nog niet. Wel kunnen de vervolgmecanismen zodanig zijn dat alsnog falen optreedt.

De vervolgmecanismen die kunnen optreden zijn: micro-instabiliteit, oppervlakte erosie van het binnentalud door overslag en tweede afschuivingen, zie Figuur 2.5. Het resterende dijklichaam wordt langzaam aangetast totdat de dijk doorbreekt en bresgroei optreedt. De situatie wordt, na het optreden van een eerste afschuiving, niet ongunstiger voor het mechanisme piping zolang het schuifvlak zodanig ondiep is dat het scheidingsvlak tussen cohesieve deklaag en zand niet wordt verstoord. Een schuifvlak dat dit scheidingsvlak wel raakt of doorsnijdt, kan het mechanisme piping mogelijk door de fase van opbarsten helpen.



Figuur 2.5 Mogelijk faaltraject bij intredepunt schuifvlak in het binnentalud

### Over het intredepunt van het primaire schuifvlak

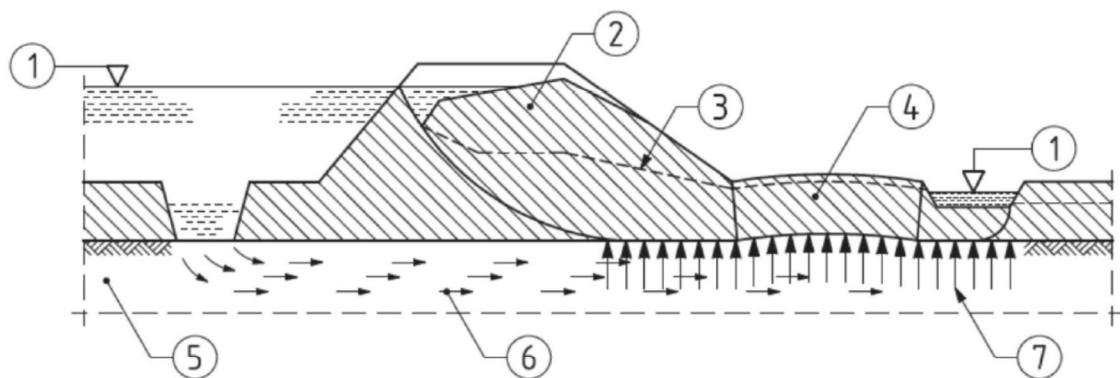
De plaats van het intredepunt hangt af van de geometrie van de dijk, van de waterspanningsopbouw en de dikte van het slappe lagen pakket. Op basis van ervaring kan het volgende worden afgeleid. Bij een dun slappe lagen pakket zal het schuifvlak niet zo diep gaan en is de kans groot dat deze daardoor in de kruin of het binnentalud begint. Bij een intredepunt in het buitentalud zijn namelijk de schuifspanningen langs het schuifvlak en het tegenwerkende moment in verhouding groter geworden ten opzichte van het aandrijvende moment. Bij een dik slappe lagen pakket spelen de waterspanningen aan de onderzijde van het slappe lagenpakket een belangrijke rol. Als ten gevolge van de hoogwatergolf de waterspanningen alleen in de dijk worden verhoogd, worden de maximaal opneembare schuifspanningen alleen in de bovenzijde kleiner. Het schuifvlak zal relatief ondiep worden en waarschijnlijk in het binnentalud of de kruin insnijden. Als de waterspanningen ook aan de onderzijde van het slappe lagen pakket worden verhoogd, doordat de stijghoogte in de daaronder gelegen zandlaag stijgt met de hoogwatergolf, daalt de schuifsterkte onderin het slappe lagen pakket. Het intredepunt van het schuifvlak zal zich verplaatsen naar de buitenzijde van de dijk.



In Nederland volgt uit de adviespraktijk en opgetreden schadegevallen dat de kans op een binnenwaartse afschuiving met een intredepunt in de kruin of in het binnentalud van de dijk groter is dan de kans op een afschuiving met een intredepunt in het buitentalud. Voordat een afschuiving optreedt met een intredepunt in het buitentalud zal het talud dus waarschijnlijk al zijn afgeschoven met een intredepunt in de kruin of in het binnentalud. Uit de praktijksituaties blijkt dat er vaak nog voldoende tijd is om maatregelen te treffen nadat een eerste afschuiving heeft plaatsgevonden.

### 2.2.10 Opdrijven

Bij opdrijven is sprake van een afschuiving over een gedeeltelijk recht en een gedeeltelijk gebogen schuifvlak. Deze situatie kan zich voor doen in een gebied waar zich in de ondergrond een zandlaag (of het pleistocene pakket) bevindt in of onder een pakket van slappe lagen. Zulke ondergronden zijn voornamelijk te vinden in het westen van Nederland. De zandlagen staan veelal rechtstreeks in contact met rivieren en de stijghoogte is dus afhankelijk van de waterstand in de rivieren. Bij een hoge waterstand kan de waterdruk in de zandlaag dusdanig hoog worden dat de daarop rustende slecht doorlatende deklaag wordt opgedrukt. De schuifweerstand tussen de zandlaag en de deklaag wordt verminderd.



- 1 Vrij waterniveau
- 2 Dijklichaam
- 3 Waterstand in de dijk
- 4 Grondmoot, die horizontaal en door de opwaartse waterdruk wordt belast ("drukstaaf")
- 5 Diepe zandlaag
- 6 Grondwaterstroming
- 7 Opwaartse waterdruk onder de deklaag

Figuur 2.6 Schuifvlak bij opdrijven van het achterland

Uit observaties van bezwijkgevallen (bijvoorbeeld Streefkerk-Midden) en eindige elementen berekeningen wordt aangenomen dat bij opdrijven een wat afwijkend bezwijkmechanisme kan optreden [2]. Bij laag water, voordat er sprake is van opdrijven, is de situatie nog stabiel. Maar de schuifweerstand is over een groot deel van de actieve zone al gemobiliseerd. In de passieve zone is nog geen of nauwelijks sprake van enige plasticiteit. De kracht die de potentieel afschuivende grondmoot op de passieve zone uitoefent, wordt door schuifspanningen naar het zandpakket afgedragen.

Bij hoge buitenwaterstanden stijgt de waterspanning in het zandpakket. Daardoor daalt de korrelspanning op het grensvlak van deklaag en het zand: de maximaal mobiliseerbare schuifweerstand op dit grensvlak neemt af. Als de waterspanning in de zandlaag zodanig oploopt dat de deklaag opdrijft, gaat de schuifweerstand zelfs volledig verloren. Hierdoor kan

de kracht afkomstig van de potentieel afschuivende grondmoot niet (of slechts in beperkte mate) worden overgedragen via schuifspanningen op het zand. De krachten moeten zich herverdelen, rekening houdend met de nieuwe randvoorwaarden voor het evenwicht.

Volgens de schematisatie gebeurt het volgende. Eerst wordt aan de actieve zijde alle resterende schuifweerstand aangesproken. Hierbij treden nog slechts relatief kleine vervormingen op. Zodra de potentieel afschuivende grondmoot in de actieve zone geen evenwicht meer kan vinden, wordt de passieve zone belast met een horizontale kracht. Maar als de deklaag in de passieve zone is opgedreven, dan kan deze de kracht niet op het zand overbrengen. De opgedreven deklaag moet als drukstaaf fungeren. Een drukstaaf die de horizontale kracht naar een meer polderwaarts gelegen gebied, buiten de opdrijfzone, overdraagt. De kracht in de drukstaaf leidt ertoe dat de drukstaaf vervormt. Doordat deze vervormingen over een aanzienlijke lengte optreden, leidt dat tot dusdanig grote verplaatsingen van de binnentoe van de dijk dat er in de actieve zone van de dijk sprake is van een afschuiving.

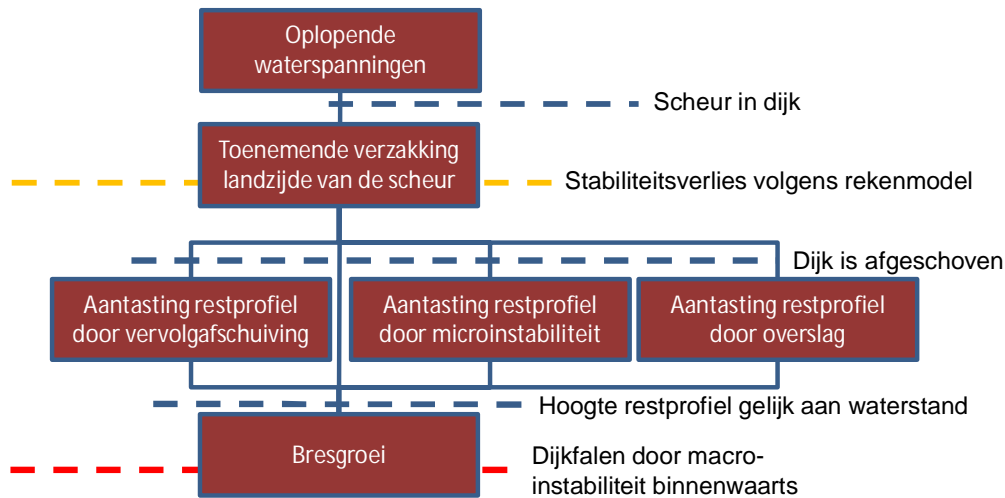
Bij oplopende waterspanningen onder de dijk kan de dijk dus afschuiven doordat er geen krachtenevenwicht heerst of door te grote vervormingen in het achterland. In het eerste geval ontstaat een volledig doorlopende glijvlak naar het maaiveld achter de dijk, waarbij met een berekening het evenwicht langs dit glijvlak kan worden gecontroleerd. In het tweede geval loopt het glijvlak dood in het scheidingsvlak van dek- en zandlaag, alleen de actieve zone is bezweken.

Verlies van binnenwaartse macrostabiliteit door opdrijven is een bijzonder initiërend mechanisme van binnenwaartse macro-instabiliteit. Ook hier ontstaat eerst een scheur. Het intredepunt van de afschuiving kan zowel in de kruin als op het binnen- en buitentalud liggen. Dezelfde (vervolg) mechanismen als in het voorgaande zijn vermeld, kunnen hierna optreden.

### **2.3 Overzicht van het faaltraject binnenwaartse macro-instabiliteit**

In deze paragraaf wordt een schematisch overzicht gegeven van de opeenvolging van mechanismen die leiden tot daadwerkelijk falen geïnitieerd door het mechanisme binnenwaartse macro-instabiliteit. Daarbij wordt aangegeven tot op welke gebeurtenis of (deel) mechanisme in deze reeks van gebeurtenissen de gebruikelijke stabiliteitsbeoordeling is gebaseerd. Met andere woorden: wat is als rekenkundig falen gedefinieerd en welke vervolgprocessen kunnen leiden tot een doorbraak.

In Figuur 2.7 is falen als gevolg van het mechanisme binnenwaartse macro-instabiliteit verder uitgewerkt.



Figuur 2.7 Gebeurtenissen leidend tot falen van de dijk na binnenwaartse macro-instabiliteit, waarbij verschillende vervolgmechanismen mogelijk zijn

De volgende fasen kunnen bij het faaltraject van een dijk worden onderscheiden, zie Figuur 2.7:

- Verhoging grondwaterspanningen. De waterspanningen in de dijk stijgen door infiltratie via het buitentalud (door hoge buitenwaterstand, golfoploop en/of neerslag), door infiltratie via kruin of binnentalud (door golfoverslag en/of neerslag) en/of infiltratie vanuit zandlagen in de ondergrond.
- Ontstaan van een scheur. Door de toegenomen waterspanningen in de ondergrond nemen de effectieve spanningen af. Scheuren geven het intredepunt aan van een schuifvlak waarlangs een grondmoot wil afschuiven.
- Toenemende verzakking. Aan de landzijde van de scheur verzakt de dijk steeds verder: de dijk is aan het afschuiven, tot er een nieuwe evenwichtssituatie wordt bereikt. Gebruikelijk is om dit mechanisme rekenkundig te beoordelen aan de hand van een evenwichtsbeschouwing. Een afschuiving kan tot direct falen van de waterkering leiden als de kruin afschuift tot onder het niveau van de buitenwaterstand. Maar meestal zullen vervolgmechanismen nodig zijn om na een afschuiving te komen tot falen van de waterkering.
- De dijk is afgeschoven. Een gedeelte van het grondmassief is verplaatst en weer tot stilstand gekomen.
- Eventueel vervolgmechanisme (overslag, micro-instabiliteit of tweede afschuiving). Als de waterkering niet direct faalt door de afschuiving kunnen vervolgmechanismen optreden waardoor het dijklichaam alsnog faalt.
- Kruinverlaging tot de buitenwaterstand. Als de kruin ten gevolge van vervolgmechanismen is verlaagd tot het niveau van de buitenwaterstand start de bresgroeifase.

Het optreden en de snelheid van het bezwijken door macro-instabiliteit hangt van een aantal factoren af. De belangrijkste zijn de dijkgeometrie, de waterspanningen en de opbouw van de ondergrond.

Het verloop van de waterspanningen in een dijk wordt sterk bepaald door de wijze waarop de buitenwaterstand verloopt in de tijd en de duur van de hoogwatergolf. De tijdsduur dient vergeleken te worden met de reactietijd van het geohydrologische systeem waar de dijk

onderdeel van uit maakt. De belangrijkste componenten van dit systeem zijn de intredeweerstanden ter plaatse van de rivierbodem, doorlatendheden van onder de dijk gelegen grondlagen, het (grond)waterpeil aan de binnenzijde, de stijghoogten in de diepe zandlagen en de materiaaleigenschappen van de dijk zelf [3].

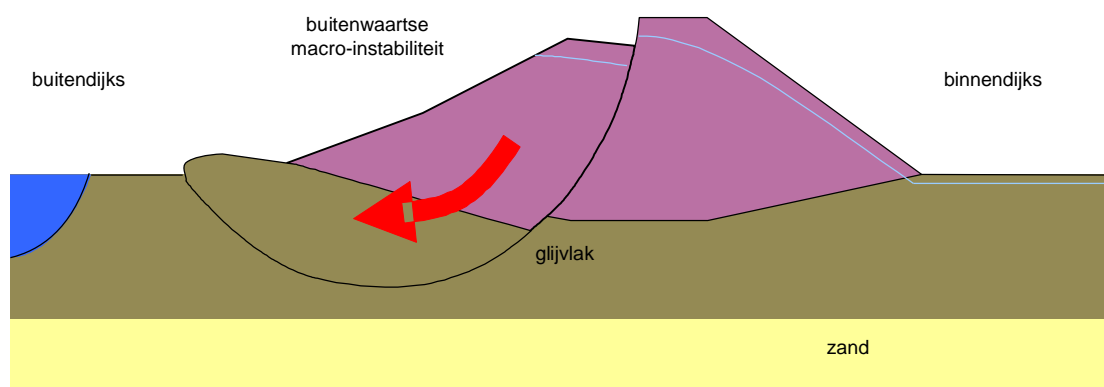
De dikte van het slappe lagen pakket is niet alleen van belang voor de waterspanningsopbouw in de dijk maar speelt ook een rol bij het opdrijven van het achterland. Daarnaast bepaalt de ondergrond mede de grootte van de afschuifvlak en het intredepunt van het schuifvlak.

Verder zijn natuurlijk de geometrie en dijkopbouw van belang. Bij een flauw binnentalud en / of een binnenberm wordt de kans op instabiliteit kleiner.

### 3 Buitenwaartse macro-instabiliteit

#### 3.1 Globale beschrijving van buitenwaartse macro-instabiliteit

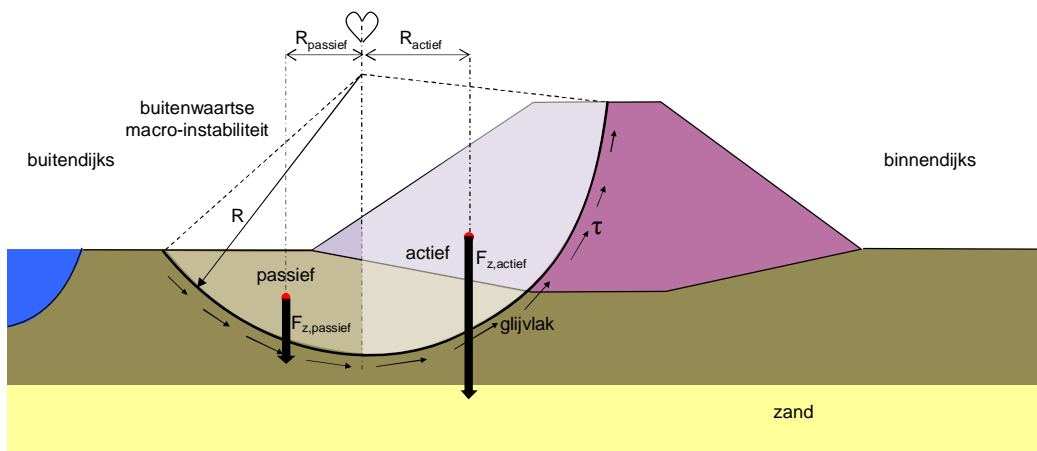
Bij de beoordeling van de macrostabiliteit van dijken gaat in de regel de meeste aandacht uit naar het mechanisme met de binnenwaartse afschuiving: binnenwaartse macro-instabiliteit. Bij binnenwaartse macro-instabiliteit treedt afschuiven op van grote delen van de dijk aan de landzijde. Maar daarnaast kan onder specifieke omstandigheden ook macro-instabiliteit optreden aan de rivier- of zeezijde van de dijk: buitenwaartse macro-instabiliteit, het onderwerp van dit hoofdstuk. Omdat dit mechanisme in algemeen optreedt na een hoogwatersituatie of na hevige regenval die los staat van een hoogwatersituatie, is hier geen sprake van maatgevende omstandigheden en is de waterkerende functie van de dijk niet direct in gevaar. Buitenwaartse macro-instabiliteit kan dan ook worden opgevat als een indirect mechanisme.



Figuur 3.1 Macro-instabiliteit van het buitentalud

Er is sprake van macro-instabiliteit als grote delen van een grondmassief afschuiven langs rechte of gebogen schuifvlakken, zie Figuur 3.1. De oorzaak van macro-instabiliteit is een verlies van evenwicht van een grondmassa. Als in een glijvlakanalyse een cirkelvormig schuifvlak wordt verondersteld, dan draait dit evenwicht om een aandrijvend moment en een tegenwerkend moment. Het aandrijvend moment bestaat uit het gewicht maal de arm van het grondlichaam rechts van het middelpunt van de glijcirkel. Het tegenwerkend moment bestaat uit het gewicht maal de arm van het grondlichaam links van het middelpunt en de schuifkrachten langs de glijcirkel maal de straal van de glijcirkel. Dit is weergegeven in Figuur 3.2.

Als door het toenemen van de waterspanningen in de ondergrond, de capaciteit om schuifspanningen op te nemen kleiner wordt, kan het evenwicht verloren gaan. Hoge waterspanningen in de dijk en in het voorland kunnen ontstaan door een hoge buitenwaterstand, door hevige neerslag of door deformatie. Verder kan het evenwicht van een dijklichaam worden verstoord door toename van het aandrijvende moment, bijvoorbeeld door verkeer op de dijk en door een (snel) vallende buitenwaterstand. Door het snel vallen van de buitenwaterstand valt de waterdruk tegen het talud en op het voorland weg terwijl de waterspanningen in de slappe lagen zich niet zo snel kunnen aanpassen met lage effectieve spanningen tot gevolg.



Figuur 3.2 Evenwichtsbeschouwing bij macro-(in)stabiliteit buitentalud

Voor het opstellen van deze faalmechanismebeschrijving zijn delen van de tekst overgenomen uit het rapport Dijkdoorbraakprocessen [1].

### 3.2 Gedetailleerde beschrijving buitenwaartse macro-instabiliteit

Het mechanisme buitenwaartse macro-instabiliteit lijkt in veel opzichten op het mechanisme binnenwaartse macro-instabiliteit. De mechanismebeschrijving voor een buitenwaartse afschuiving komt dus sterk overeen met de beschrijving voor een binnenwaartse afschuiving (hoofdstuk 2). Deze tekst beperkt zich tot de specifieke verschijnselen bij buitenwaartse afschuiving.

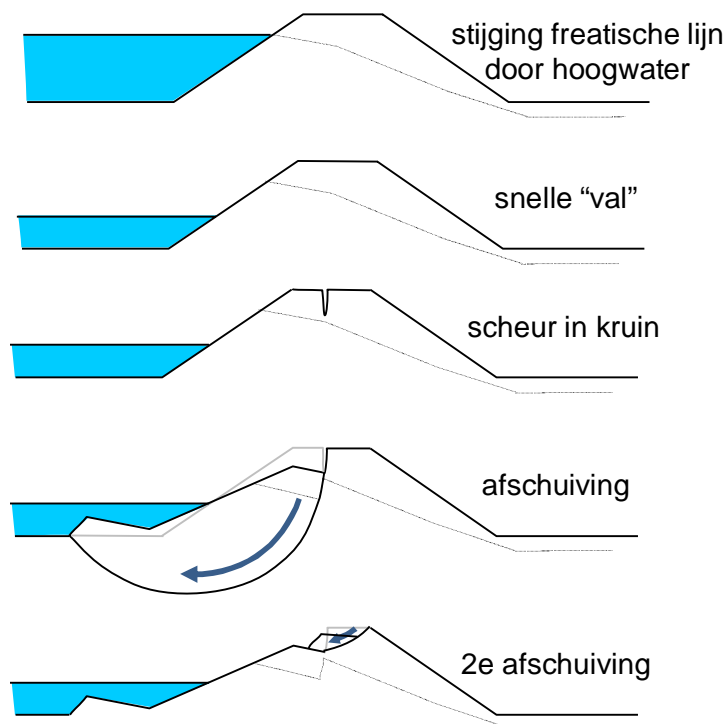
Tijdens een hoogwatergolf zal de freatische lijn in de waterkering stijgen als gevolg van infiltratie via het buitentalud en infiltratie via de ondergrond vanuit aanwezige tussenzandlagen (of het pleistocene zandpakket). Een andere mogelijkheid is dat de freatische lijn stijgt door hevige neerslag. In de praktijk wordt aangenomen dat er geen relatie bestaat tussen het optreden van een hoogwatergolf en het optreden van hevige neerslag, deze twee situaties worden apart beoordeeld. Door toenemende waterspanningen zal de schuifsterkte van de ondergrond afnemen. Hierdoor neemt de stabiliteit van de dijk af. Meestal is de buitenwaartse macro-stabiliteit tijdens een hoogwatergolf niet in direct gevaar; het hoge water tegen de buitenzijde van de dijk levert immers een tegenwerkend moment waardoor het evenwicht veelal bewaard blijft. De stabiliteit van het buitentalud komt pas in gevaar als er een zogenaamde 'snelle val' optreedt van de buitenwaterstand. Dit wil zeggen dat de buitenwaterstand dusdanig snel daalt dat de freatische lijn in de dijk niet voldoende tijd heeft om te volgen. De criteria voor 'snelle val' zijn locatie-afhankelijk (bovenrivieren, benedenrivieren, IJssel/Vecht delta) en zijn uitgewerkt in het TR Ontwerpbelastingen Rivierengebied [6]. De schuifsterkte van de verzadigde ondergrond is relatief laag terwijl de stabiliserende werking van het hoge buitenwater verdwenen is. Ook draagt het relatief hoge gewicht van de verzadigde grond in het dijklichaam bij aan het aandrijvend moment. Het gevolg is dat het buitentalud kan afschuiven langs een gebogen of een recht glijvlak.

Een afschuiving van het buitentalud kan veel schade opleveren, maar is meestal niet direct gevaarlijk voor de waterkerende functie; het hoogwater is immers voorbij of niet aan de orde. Bijna altijd zal er enige tijd zijn om de schade te herstellen voordat zich een (nieuwe) hoogwatergolf zal voordoen [4].

Een buitenwaartse afschuiving kenmerkt zich door het ontstaan van scheuren in het buitentalud, in de kruin of in het binnentalud van de dijk. Vervolgens zal het maaiveld aan de buitendijkse zijde van de scheur verzakken, waarna de eigenlijke afschuiving plaatsvindt.

De locatie van het intredepunt van de glijcirkel is bepalend voor het verdere verloop van het faaltraject van de dijk. Bij een afschuiving met het intredepunt in de kruin of in het buitentalud van de dijk is een deel van het dijklichaam nog intact. Er treedt geen directe inundatie van het achterland op. Eventuele vervolgmecanismen die kunnen optreden zijn: erosie buitentalud en het optreden van vervolg afschuivingen. Na een buitenwaartse afschuiving is de beschermende talusbekleding beschadigd. De kwetsbare dijkkern kan nu worden aangetast door het water dat aan de buitenzijde tegen de dijk staat. Vooral bij een zanddijk, waarvan de kern uit zand met weinig cohesie bestaat, kan erosie van het restprofiel door golven relatief gemakkelijk plaatsvinden als de waterstand weer hoog wordt.

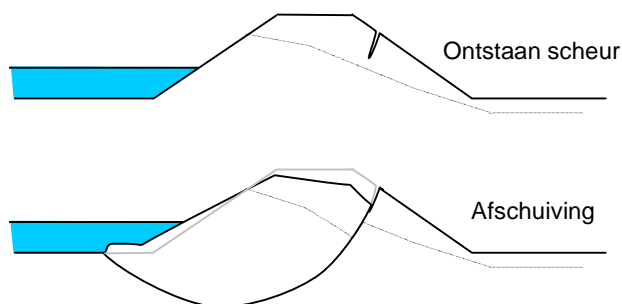
Na het optreden van de eerste afschuiving ontstaat bij het intredepunt van de glijcirkel een steil talud dat voor de tweede keer kan afschuiven. De kans op het optreden van een tweede afschuiving is bij een buitenwaartse afschuiving kleiner dan bij de binnenwaartse afschuiving. Bij een binnenwaartse afschuiving ligt het restprofiel aan de rivierzijde en is ten gevolge van het hoogwater voor een groot deel verzadigd. De schuifsterkte is dus laag en als gevolg hiervan is de kans op een tweede afschuiving hoog. Bij een buitenwaartse afschuiving ligt het resterende dijklichaam aan de landzijde en is meestal onverzadigd. De schuifsterkte is hoger en de kans op een afschuiving kleiner.



Figuur 3.3 Buitenwaartse afschuiving met intredepunt in de kruin

Als het intredepunt in het binnentalud ligt, zie Figuur 3.4, dan zal bij een afschuiving de kruin van de dijk lager worden. De kans dat het intredepunt zich in het binnentalud bevindt is echter

zeer klein. De reden hiervoor is dat het tegenwerkende moment en de schuifspanningen langs het relatief lange glijvlak in verhouding groot zijn ten opzichte van het aandrijvende moment. Voordat zich een glijcirkel kan ontwikkelen met een intredepunt in het binnentalud heeft waarschijnlijk al een afschuiving plaatsgevonden met een intredepunt in de kruin of in het buitentalud van de dijk.



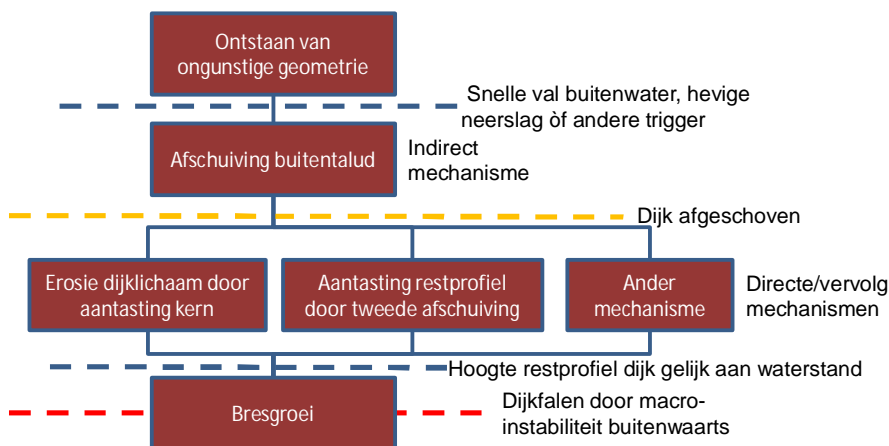
Figuur 3.4 Buitenwaartse afschuiving met intredepunt in het binnentalud

Als de kruin van de dijk lager wordt en het restprofiel lager is dan de eventueel weer opkomende buitenwaterstand zal overloop plaatsvinden. Vervolgens zal door erosie als gevolg van het stromende water het gat in de dijk groter worden (bresgroei) en inundatie van het achterland plaatsvinden.

Is de hoogte van het restprofiel voldoende om de buitenwaterstand te keren dan zal er geen inundatie optreden van het achterland. Wel kan het restprofiel door erosie van het buitentalud verder worden aangetast.

### 3.3 Overzicht van het faaltraject buitenwaartse macro-instabiliteit

De fenomenologische beschrijving van het mechanisme buitenwaartse macro-instabiliteit, dat uiteindelijk kan leiden tot een overstroming, is in Figuur 3.5 schematisch weergegeven. Het inleidend mechanisme voor de afschuiving kan zijn een verhoogd fretatisch vlak door neerslag of na een snelle val van de buitenwaterstand. Omdat deze triggers niet positief gecorreleerd zijn aan het optreden van een hoge waterstand is hier sprake van een indirect mechanisme dat niet onmiddellijk tot falen van de waterkering leidt.



Figuur 3.5 Gebeurtenissen leidend tot falen van de dijk door buitenwaartse macro-instabiliteit



De volgende fasen in het faaltraject van een dijk geïnitieerd door buitenwaartse macro-instabiliteit kunnen worden onderscheiden:

- Verhogen waterspanningen. De waterspanningen in de dijk kunnen tijdens een hoogwatergolf stijgen door infiltratie via het buitentalud en infiltratie vanuit zandlagen in de ondergrond (incl. pleistocene pakket). Een andere mogelijkheid is dat de waterspanningen stijgen door hevige neerslag.
- Verlaging van de buitenwaterstand. Bij een snelle daling van de buitenwaterstand na een hoogwatergolf zal de freatische lijn niet direct kunnen volgen. De waterspanningen blijven in eerste instantie hoog, met lage schuifsterktes als gevolg.
- Ontstaan van een scheur: In de kruin, het binnentalud of het buitentalud van de dijk ontstaat een scheur. Deze scheur geeft het intredepunt van een afschuiving aan die ontstaat als gevolg van de verlaagde schuifsterkte en het verdwijnen van de stabiliserende werking van de hoge buitenwaterstand.
- Verzakken van het maaiveld aan de buitendijkse zijde van de scheur. Dit proces verloopt in eerste instantie langzaam.
- Afschuiving van het buitentalud. Een gedeelte van het grondmassief schuift af. De eigenlijke afschuiving vindt plaats.
- Eventuele vervolgmecanismen (erosie buitentalud, tweede afschuiving). Als de waterkering niet heeft gefaald kunnen vervolgmecanismen optreden waardoor het dijklichaam alsnog faalt.
- Kruinverlaging tot de buitenwaterstand. Als de kruin ten gevolge van vervolgmecanismen is verlaagd tot het niveau van de buitenwaterstand, start de bresgroefase.

De factoren die van belang zijn bij het optreden en de snelheid van een afschuiving van het buitentalud komen grotendeels overeen met de factoren die zijn genoemd bij het optreden van een afschuiving van het binnentalud. De belangrijkste factoren zijn de dijkgeometrie, de waterspanningen en de opbouw van de ondergrond.

De macro-instabiliteit van het buitentalud is tevens afhankelijk van de aanwezigheid van voorland. Een voorland levert namelijk een extra tegenwerkend moment bij een eventueel evenwichtsverlies.

Een ontwerpmaatregel om buitenwaartse macro-instabiliteit te voorkomen is het toepassen van een buitendijkse berm. In het geval van een schaaldijk zal het niet meevallen om zo'n buitendijkse berm aan te brengen.



## 4 Piping

### 4.1 Globale beschrijving van piping

Een dijk heeft als belangrijkste functie het keren van water. Deze waterkerende functie kan verloren gaan als gevolg van het faalmechanisme piping.

Dit is één van de faalmechanismen die worden veroorzaakt door de stroming van water door de ondergrond ten gevolge van het waterstandsverschil tussen buitenwater enerzijds en maaiveldhoogte danwel polderpeil binnendijs.

Als het stromende grondwater binnendijs het maaiveld bereikt, is er sprake van kwelwater. Deze kwelstroming kan tot erosie van gronddeeltjes leiden. De erosie die optreedt in geval van kwelstroming door een doorlatend binnentalud, betreft het mechanisme micro-instabiliteit, zie hoofdstuk 5.

Als de erosie van gronddeeltjes als gevolg van kwelstroming niet aan het oppervlak, maar daaronder plaatsvindt, dan wordt dit *interne erosie* genoemd. Het proces van interne erosie resulteert uiteindelijk in een reductie van de grondstabiliteit met ernstige consequenties voor de veiligheid van het achter de waterkering liggende gebied.

Interne erosie manifesteert zich in verschillende verschijningsvormen. Internationaal wordt onderscheid gemaakt in vier vormen: erosie door scheuren in cohesief materiaal, *terugschrijdende erosie*, contact-erosie en suffosie. De term *piping* wordt internationaal toegepast voor al deze vormen van erosie, maar in Nederland wordt met de term piping vrijwel altijd terugschrijdende erosie bedoeld.

Terugschrijdende erosie is een vorm van interne erosie, waarbij gronddeeltjes als gevolg van een geconcentreerde kwelstroming in een zandlaag onder de dijk vanaf de binnenzijde van de dijk worden meegevoerd en uitgespoeld. Hierdoor vormt zich onder de dijk een open kanaal ('pipe') in omgekeerde stromingsrichting van het water in de richting van de buitenzijde van de dijk. De gevormde pipes zijn slechts enkele (tientallen) zandkorrels diep en ontstaan in de top van het zandpakket, waarbij de bovenliggende cohesieve laag een 'dak' voor de pipe vormt.

Bij suffosie wordt alleen de fijnere fractie tussen de grovere fractie weggespoeld waarbij de grovere fractie het korrel skelet in stand houdt. Suffosie kan alleen optreden in zand met een sterk niet-uniforme korrelverdeling, zodat het mogelijk is dat kleine korrels door het skelet van de grove korrels heen bewegen. Het Nederlandse zand is relatief fijnkorrelig en uniform. De mediane korreldiameter ( $d_{50}$ ) varieert tussen de 150 en 350  $\mu\text{m}$ . De uniformiteit ( $d_{60}/d_{10}$ ) ligt tussen de 1,5 en 3. Dit betekent dat suffosie in Nederland vrijwel geen rol speelt.

Contact-erosie kan optreden wanneer een zeer grove laag (zoals grind) in contact is met een fijne laag (zoals zand of silt). Door de sterke stroming door de grove laag kan het fijne materiaal meegenomen worden en afgevoerd door het grove materiaal. Deze vorm van erosie speelt voor de Nederlandse waterkeringen geen rol.

Erosie ten gevolge van waterstroming door scheuren in cohesief materiaal wordt in Nederland niet als apart faalmechanisme beschouwd. In algemene zin valt deze vorm van erosie onder de noemer micro-instabiliteit, hoewel dit faalmechanisme een bredere definitie heeft. Onder micro-instabiliteit wordt een lokale instabiliteit van het binnentalud onder invloed van waterstroming en waterdrukken vanuit de kern van de dijk verstaan. Het water is door de

dijk gestroomd en stroomt van binnen naar buiten. Deze lokale instabiliteit van het binnentalud kan vervolgens leiden tot nieuwe instabiliteiten en ten slotte tot het aantasten van de kruin van de dijk en de waterkerende functie.

In navolgende tekst wordt een beschrijving gegeven van faalmechanisme terugschrijdende interne erosie. Zoals in Nederland gebruikelijk is, wordt ook in deze rapportage de terugschrijdende interne erosie aangeduid als piping. En daarmee wordt dan het totaal van deelprocessen aangeduid, van opbarsten, via heave tot de terugschrijdende interne erosie zelf.

Niet bij alle dijken speelt piping een rol. Piping kan alleen optreden in situaties waar de erosiegevoelige en watervoerende laag ter plaatse van de dijk wordt afgedekt door een relatief dun pakket van samendrukbare lagen van klei of veen, de zogenaamde deklaag. In deze deklaag moet een opening (uittredepunt) aanwezig zijn, waardoor water en zand kunnen worden afgevoerd. Bovendien moet de zandlaag in contact staan met het buitenwater (zee, rivier, meer of watergang) en moet er een waterstandsverschil, verval genoemd, tussen buitenwater en polder aanwezig zijn, zodat in de watervoerende laag grondwater onder de dijk door stroomt. Het materiaal van de dijk kern en de bekleding zijn voor het optreden van piping niet van belang, zolang deze niet direct in contact staan met de erosiegevoelige zandlaag. Als er geen deklaag aanwezig is en de dijk zich direct op een erosiegevoelige laag bevindt, is het dijk kernmateriaal wel van belang. Piping kan dan optreden als het dijk kernmateriaal van klei is. Zanddijken zijn niet gevoelig voor piping.

Piping begint met de erosie van enkele zandkorrels, maar kan groeien tot transport van grote zandhoeveelheden en kan uiteindelijk leiden tot falen van de dijk. Het faaltraject bestaat daarbij uit een reeks van deelmechanismen: opbarsten, welvorming en pipe-vorming, vergroten van de pipe en inzakken van de dijk.

### *Opbarsten*

Voordat een pipe überhaupt kan ontstaan, moet eerst de cohesieve deklaag opbarsten, waardoor een open verbinding van de watervoerende zandlaag naar het maaiveld toe, het zogenaamde uittredepunt<sup>1</sup>, kan ontstaan. Wanneer de buitenwaterstand hoger wordt, nemen ook de waterspanningen in de zandlaag toe. Als deze waterspanningen aan de binnenzijde van de dijk groter worden dan het gewicht van de afdekkende laag, zal deze eerst gaan opdrijven. Ook een cohesieve deklaag heeft een bepaalde verticale doorlatendheid, maar deze is zeer veel kleiner dan die van de watervoerende laag. Door het opdrijven kunnen scheurtjes of gaten in de afdekkende laag ontstaan waardoorheen water naar het oppervlak kan stromen, het zogenaamde uittredepunt heeft zich gevormd. Deze open verbinding is een voorwaarde voor het optreden van erosie.

In geval van een kleidijk op een zandondergrond is opbarsten niet nodig, het uittredepunt is de binnentoe van de kleidijk (aannemende dat er geen berm aanwezig is).

### *Welvorming en pipe-vorming*

De toestroom van water naar het opbarstkanaal zorgt voor hoge stroomsnelheden nabij het uittredepunt. Door de uit de zandlaag optredende kwelstroming worden zanddeeltjes vanuit deze laag naar het maaiveld getransporteerd. Het opbarstkanaal wordt opgevuld met een zand-water mengsel.

---

<sup>1</sup> Naast 'uittredepunt', wat in dit document wordt gebruikt, is ook het synoniem 'uittreepunt' gangbaar.

Er zijn nu twee mogelijkheden. Ten eerste kan de stroomsnelheid door de verhoogde weerstand in het opbarstkanaal zodanig afnemen dat het erosieproces stopt. Er ontstaat een wel die schoon water levert. Een tweede mogelijkheid is dat een zandmeevoerende wel ontstaat, waarbij zand door de wel vanuit de zandlaag naar het maaiveld stroomt. Hiervoor moet aan het heave-criterium worden voldaan, wat betekent dat de verticale grondwaterstroming in de richting van het uittredepunt als gevolg van het verticale verhang (d.i. het waterdrukverschil over de deklaagdikte) zo groot is dat de effectieve spanningen in de grond tot nul worden gereduceerd en de zandkorrels uit de watervoerende laag naar de uittredepunt omhoog worden getransporteerd. Pas als het zand omhoog wordt gespoeld kan zich ook een erosiekanaal onder de deklaag en de dijk vormen. Bij voldoende groot verval (waterstandsverschil) over de kering zullen de erosiekanaaltjes blijven groeien. Er ontstaan steeds meer pipingkanalen en er verdwijnen ook kanalen door verstoppingen, de kanalen zullen meanderen. In het algemeen worden ze steeds langer. Na verloop van tijd kan een zandmeevoerende wel schoon water leveren doordat de evenwichtslengte bij het betreffende verval is bereikt of dat het kanaal dicht zandt. Een andere mogelijkheid is dat een kanaal aansluiting heeft gevonden bij een ander pipingkanaal. Bij voldoende verval groeien de pipingkanalen naar elkaar toe en er ontstaat één kanaal die in lengte blijft toenemen. Het kanaal groeit dan verder in de richting van het buitenwater. Een eenmaal opgetreden wel komt bij een volgend hoogwater vaak weer terug.

#### *Vergroting van het pipingkanaal en bezwijken van het dijklichaam*

Op het moment dat het pipingkanaal halverwege de wel en het buitenwater is, is de groei niet meer te stoppen. Als het kanaal het intredepunt van het water heeft bereikt, is een open verbinding tussen buitenwater en wel ontstaan en treedt dus kortsluiting op, zodat de stroomsnelheid en erosie in het kanaal kan toenemen. Het kanaaltje verbreedt en verdiept zich dan in de richting van het uittredepunt, dus naar de binnendijkse kant. Als gevolg hiervan zal de dijk langzaam worden onderspoeld en ontstaan holle ruimten onder de kering. Na verloop van tijd storten deze ruimten in en treedt verzakking van de kruin op, het dijklichaam bezwijkt. Indien de buitenwaterstand daardoor hoger wordt dan de kruinhoogte treedt overloop en daarmee bresgroei op: de waterkering faalt.

In de volgende paragrafen wordt ieder deelmechanisme in detail toegelicht. Hieruit volgen ook de locatie-specifieke factoren die van belang zijn voor het optreden van piping: zoals de stijghoogte in het diepe zand, het maaiveldniveau, en de dikte van zowel het afdekkende slappe lagenpakket als het daaronder gelegen zandpakket. Daarnaast speelt de aanwezigheid van tussenzandlaagjes een cruciale rol en is de breedte van het dijklichaam, lees afstand tussen in- en uittredepunt, van groot belang.

## **4.2 Gedetailleerde beschrijving van het faaltraject piping tot op niveau van de deelmechanismen**

In de volgende paragrafen wordt beschreven hoe het faaltraject bij toenemende belasting en afnemende sterkte, stapsgewijs vanuit een dagelijkse situatie naar een maatgevende situatie, verloopt, welke (deel)mechanismen hierin te onderscheiden zijn en hoe dit proces visueel waar te nemen is. Hiertoe worden eerst de componenten belasting en sterkte toegelicht.

### 4.2.1 Belasting

Piping is een verschijnsel dat kan optreden bij hoge waterstanden van het buitenwater (rivier, kanaal, boezem, meer of zee), waarbij het verval (d.i. het verschil tussen buitenwaterstand en binnenwaterstand ofwel het verschil tussen buitenwaterstand en maaiveldhoogte c.q. polderpeil) zo groot is dat zandtransport als gevolg van terugschrijdende erosie onder een

cohesieve deklaag plaats gaat vinden en een open kanaal ontstaat. Als gevolg van terugschrijdende erosie treden zandmeevoerende wellen op.

Een eerste voorwaarde voor piping is kwelstroming onder de dijk door naar het oppervlak. Het kwelwater treedt aan de binnendijkse kant uit, direct bij de dijkteen, in een sloot of in het achterland.

Het debiet dat onder de dijk door stroomt, is afhankelijk van de dikte en de doorlatendheid van de watervoerende zandlagen en het verhang dat over de dijk heen staat. De afvoer van grondwater door het cohesieve pakket hangt af van de verticale doorlatendheid van de deklaag zelf. Bij een opgebarsten deklaag zal het water via de scheuren naar boven dringen omdat hier de minste weerstand aanwezig is.

Bij het fenomeen piping is onderscheid te maken tussen stationaire (d.i. permanent, dus onafhankelijk van de tijd, aanwezige) en instationaire (in de tijd veranderlijke) belasting. De belasting, d.i. de aandrijvende kracht die het erosieproces op gang houdt, is namelijk niet onmiddellijk aanwezig, maar moet zich eerst binnen een bepaalde tijd opbouwen en dan ook langere tijd aanwezig blijven om het pipingproces volledig te laten ontwikkelen.

Bij zeedijken wordt tijdens stormcondities de buitenwaterstand in het algemeen bepaald door de getijbeweging en de stormopzet. De getijamplitude varieert van springtij tot doottij. Bovenop het getij moet nog de invloed van de storm opgeteld worden: de stormopzet. Het verloop in de tijd van de stormopzet kan van storm tot storm sterk verschillen. Een korte storm met een opzet gedurende enkele uren zal slechts één hoogwater beïnvloeden en dus één extreme piek in de waterstand tot gevolg hebben. Een storm van enkele dagen zal meerdere pieken veroorzaken, die echter niet allemaal even hoog hoeven te zijn. Er is geen relatie tussen de duur van de opzet en de hoogte van de opzet.

Het waterstandsverloop is bepalend voor de belastingduur. Dit verloop wordt door de waterstandsverlooptlijnen beschreven. Als de tijdsduur die nodig is om het volledige pipingproces tot aan daadwerkelijk falen van de kering te doorlopen groter is dan de belastingduur, dan zal de dijk niet falen. Door de variërende waterstand kan een dijk gedurende een storm meerdere periodes worden belast.

Bij rivierdijken treedt in het algemeen één langdurig hoogwater op met een slechts weinig variërende waterstand. Het waterpeil stijgt langzaam tot aan de piekwaarde en bouwt zich dan langzaam weer af. De hele hoogwatergolf kan ongeveer twee weken duren.

In het benedenrivierengebied wordt de waterstand deels bepaald door de rivierafvoer en deels bepaald door de waterstand op zee, waardoor de invloed van het getij enigszins merkbaar is en bovendien een kort durende waterstandsverhoging door een storm kan optreden.

In essentie wordt de aandrijvende belasting gevormd door het waterstandsverschil over de kering en de tijdsduur waarover dit waterstandsverschil aanwezig is. Als gevolg van deze aandrijvende belasting veranderen de waterspanningen in en onder de dijk, de vervallen over de verschillende constructieonderdelen, danwel de gradiënten in de waterspanningen vormen uiteindelijk de belasting die de verschillende deelmechanismen laten optreden:

- Het verval over de deklaag achter de dijk laat deze opbarsten.
- De gradiënt in de wel maakt of er heave optreedt.
- De gradiënt bij het front van de pipe, zorgt ervoor dat de pipe groeit.

De belasting in en onder de dijk kan door bepaalde processen ook weer worden verlaagd ten opzichte van het niveau dat dan men op basis van het aanwezige waterstandsverschil zou verwachten. Zo kan de waterdruk minder hoog worden door elastische berging van water in het korrelskelet van het watervoerende pakket, door freatische berging in de nog onverzadigde zones van de dijk kern of door zwel van het dijk materiaal.

In geval van freatische berging lekt het water door het slappe lagenpakket naar het dijklichaam, waardoor de toestroming naar het pipingkanaal beperkt wordt. Dit zijn steeds tijdsafhankelijk effecten waardoor de aandrijvende belasting tijdelijk kleiner wordt.

#### 4.2.2 Sterkte

De sterkte wordt bepaald door de weerstand die de componenten in de opeenvolgende deelprocessen opbarsten, heave en terugschrijdende erosie kunnen bieden. Bij de sterkte van een waterkering wordt onderscheid gemaakt tussen de sterkte volgens de definitie van het rekenkundig falen en de daarna nog voorhanden resterende sterkte. Pas als er ook geen resterende sterkte meer aanwezig is, zal de waterkering daadwerkelijk falen. De nog voorhanden resterende sterkte, veelal gekwantificeerd met de tijd tot daadwerkelijk falen, is vaak niet eenduidig te kwantificeren. De resterende sterkte wordt daarom bij het faalmechanisme piping veelal niet in rekening gebracht.

De weerstand tegen opbarsten hangt af van het gewicht van de deklaag. De deklaag kan meer druk hebben als het gewicht groter is. Opbarsten van de deklaag als gevolg van een oplopende stijghoogte in het watervoerende pakket zal minder snel optreden bij een zwaardere deklaag.

De weerstand tegen terugschrijdende erosie hangt af van de doorlatendheid van het totale watervoerende pakket en de korreldiameter  $d_{70}$  van de pipinggevoelige zandlaag direct onder de deklaag. Fijnere zandsoorten, dus zand met een kleine  $d_{70}$ , zijn gevoeliger voor piping dan grovere. Bij een grotere doorlatendheid van het watervoerende pakket kan water sneller naar de pipe toe stromen waardoor het transportproces sneller op gang komt en het water meer kracht op de te transporten zandkorrels kan uitoefenen. Bij aanwezigheid van grove zandbanen die dwars op de baan van de pipe liggen, kan het doorgroeien van de pipe worden belemmerd of zelfs tot stilstand komen.

Zoals in de vorige paragraaf beschreven is het aanwezige drukverschil als gevolg van het waterstandsverschil tussen buitenwater en sloot- c.q. polderpeil de aandrijvende kracht bij het pipingproces. Dit waterstandsverschil zorgt voor een drukgradiënt onder het slappe lagenpakket. Een hoge gradiënt bevordert het pipingproces. Om van drukverschil naar gradiënt te komen moet worden gedeeld door een lengtemaat. De lengtemaat van de verschillende constructiedelen is dus een primaire sterktecomponent. Zo levert de breedte van de dijk, gemeten tussen buiten- en binnenteen, de eerste orde benadering van de gradiënt over de kering. Uitgaande van het verval over de deklaag, levert de dikte van de deklaag de sterkte: des te groter de dikte des te geringer het verhang in de wel.

Naast deze primaire sterktecomponenten zijn er nog secundaire sterkte-componenten, die overigens zeer aanzienlijk kunnen zijn. Zo zal als er buitendijks sprake is van een slecht doorlatende deklaag, het (theoretische) intredepunt niet bij de teen van de dijk liggen, maar een stuk uit deze teen op het voorland. De intredeweerstand (infiltratieweerstand) door de deklaag in het voorland maakt dat de gradiënt onder de dijk lager is dan op basis van het waterstandsverschil over de kering en de breedte van de dijk mag worden verwacht. Bij een vooroever zonder evidente deklaag kan ook een sliblaagje al een drukval en dus een verschuiving van het intredepunt veroorzaken. Bovendien kan er drukverlies ontstaan door

afstroming van grondwater naar de dijk toe, bijvoorbeeld als gevolg van berging van water in de onverzadigde zones van de dijk of door lekkage door de deklaag in het achterland heen.

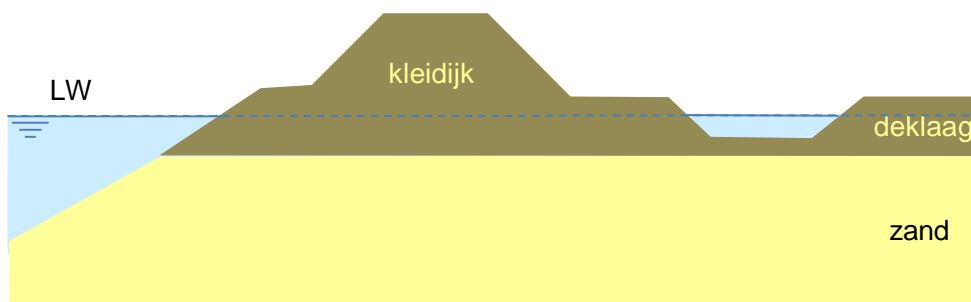
De tijdsduur om de pipingkanalen te laten groeien kan ook worden beschouwd als sterktecomponent. Deze tijdsduur is bij grote kwelweglengtes vermoedelijk lang (meerdere dagen tot weken). In de IJkdijkproef duurde het ruim een week totdat een doorgaande pipe was ontstaan. Hoe breder de dijk, hoe langer het duurt voordat de pipe volledig ontwikkeld is. Bij sommige belastingsituaties is de duur van het hoogwater relatief kort, waardoor het kanaaltje niet de tijd krijgt zich gedurende het hoogwater volledig te ontwikkelen. Alhoewel voorafgaande hoogwaters weleens zijn genoemd als reden voor dijkfalen toegeschreven aan piping [7], is het onduidelijk of kanalen intact blijven na het afnemen van de buitenwaterstand of dat zij na verloop van tijd instorten en bij optreden van een nieuwe hoogwatersituatie weer helemaal opnieuw moeten worden gevormd. Als nooit piping is opgetreden bij een dijktraject, dan kan voor dijken waarvoor de belastingduur beperkt is (zeedijken), onder bepaalde voorwaarden worden aangenomen dat piping niet leidt tot falen van de dijk.

#### 4.2.3 Het traject van initiatie tot dijkfalen

##### 4.2.3.1 Stap 0: de uitgangssituatie situatie

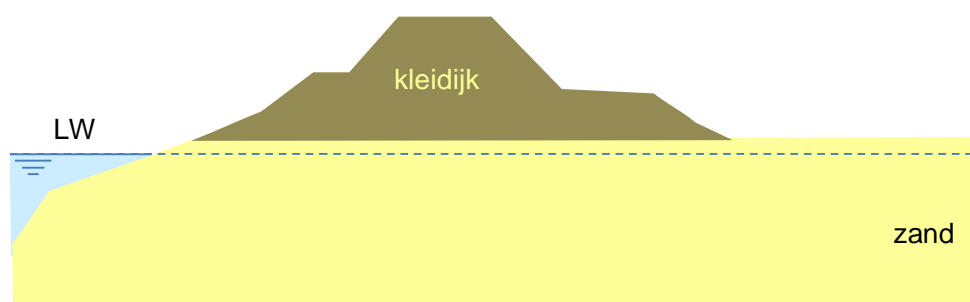
Hierbij wordt een eerste onderscheid gemaakt in twee situaties. De ene situatie betreft een op klei- of veenlagen gelegen dijk: deze dijk ligt dus niet direct op het vaste zand. Onder het binnendijkse maaiveld is nog een pakket van slecht doorlatende slappe grondlagen (klei of veen) aanwezig. De andere situatie is typisch voor het bovenrivierengebied in het oosten van Nederland: een hoofdzakelijk uit klei opgebouwde dijk ligt op een zandige ondergrond, waarbij het zand aan het binnendijkse maaiveld direct tot aan het oppervlak reikt en er dus geen cohesieve deklaag aanwezig is.

Wanneer het waterpeil aan beide zijden van de dijk gelijk is, treedt geen drukverschil tussen buitenzijde (rivier, meer of zee) en binnenzijde (polderzijde) op, waardoor ook geen aandrijvende kracht van het water op de zandkorrels aanwezig is.



Figuur 4.1 Situatie met slappe deklaag op het binnendijkse maaiveld. Geen waterstandsverschil tussen buiten- en binnenwater aanwezig en dus geen grondwaterstroming

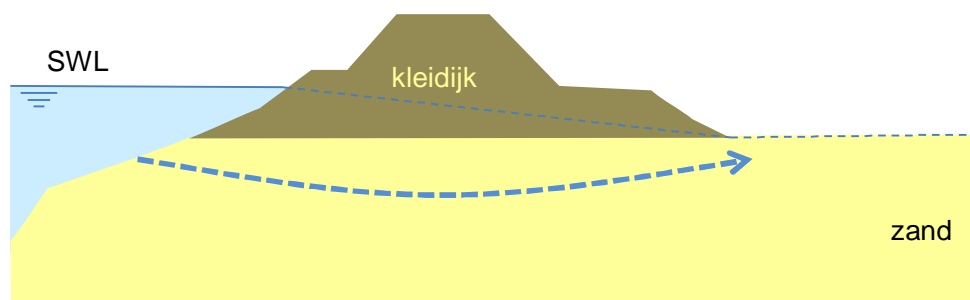




Figuur 4.2 Situatie met zand direct onder het binnendijkse maaiveld

#### 4.2.3.2 Stap 1: de buitenwaterstand stijgt

De zandlaag staat veelal rechtstreeks in contact met het buitenwater en de stijghoogte is dus afhankelijk van de waterstand in het buitenwater. Wanneer de buitenwaterstand gaat stijgen, ontstaat er een waterdrukverschil over de dijk. Als gevolg van dit waterstandsverschil gaat er buitenwater via de watervoerende zandlagen onder de dijk naar de polder stromen. De intensiteit van deze waterstroming hangt onder andere af van de insnijding van de rivier in de zandlaag (bijvoorbeeld insnijding in schoon zand of in met slib afgedekt zand). Vaak is er een afdekkende laag, het zogenaamde voorland, aan de buitenzijde van de dijk aanwezig. Dit voorland is niet zo doorlatend als zand, maar er kunnen ook lokale zwakke plekken in het voorland aanwezig zijn, waardoor water zowel van boven via het voorland als via de insnijding met het buitenwater in het watervoerende pakket kan indringen. Door de beginnende kwelstroming naar de polderzijde toe gaat fijn materiaal opwarrelen op die plekken aan de polderzijde, waar geen deklaag aanwezig is.



Figuur 4.3 Stroming als gevolg van waterstandsverschil door stijgend buitenwater



*Figuur 4.4 Zandspoortje bij afwezigheid van deklaag*

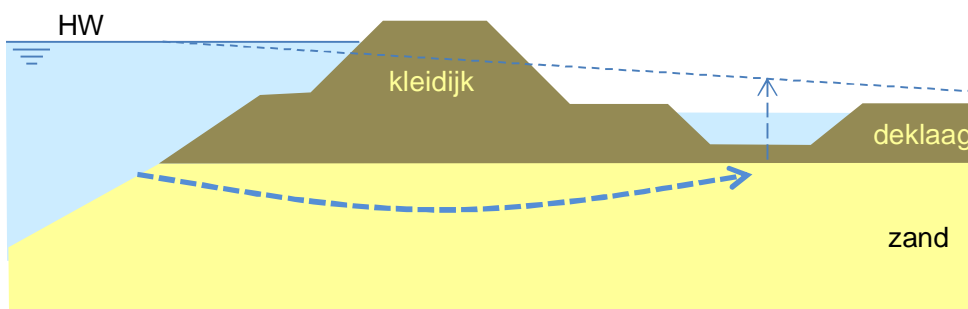
Bij een situatie waarbij de dijk niet direct op het zand ligt, maar op een doorgaande klei- of veenlaag, komt deze kwelstroom vanwege de slechte doorlatendheid van de deklaag minder snel en duidelijk op gang en is een groter waterstandsverschil nodig om de eerste signalen te kunnen zien die duiden op een beginfase van piping. Het kwelwater kan als gevolg van de aanwezigheid van de slecht doorlatende deklaag nauwelijks uittreden. In dit geval bouwt zich als gevolg van de hoge buitenwaterstand onder de binnenteeën van de dijk een wateroverdruk in het watervoerende pakket op.

De stijghoogte in de watervoerende zandlaag is – als gevolg van de weerstand die de grondwaterstroming ondervindt – doorgaans lager dan de buitenwaterstand zelf, maar kan wel hoger zijn dan de freatische grondwaterspiegel in de deklaag en ook hoger dan maaiveld. Deze hogere waterdruk in het watervoerende pakket leidt tot een wateroverdruk ten opzichte van de binnendijkse grondwaterstand zodat er een verticaal waterdrukverschil over de slecht doorlatende deklaag ontstaat. Hierdoor treedt een toename van kwel op waardoor bij een relatief doorlatende deklaag ook signalen zichtbaar worden in het veld, zoals slibresten die in kwel sloten van de bodem loskomen en opdrijven of verkleuringen van het slotwater als gevolg van in suspensie komende kleideeltjes.



Figuur 4.5 Matige kwel op grasland

In het geval dat er een afdekkende samenhangende deklaag op de watervoerende zandlaag aanwezig is kan piping alleen optreden als er een pad aanwezig is, waardoor het zand naar de bovenkant van de deklaag, het uittredepunt, kan worden afgevoerd. Er moet dus eerst een open verbinding tussen zandlaag en oppervlakte aanwezig zijn, waar de zandkorrels uit het zandpakket omhoog kunnen worden getransporteerd en op het maaiveld kunnen worden afgezet.

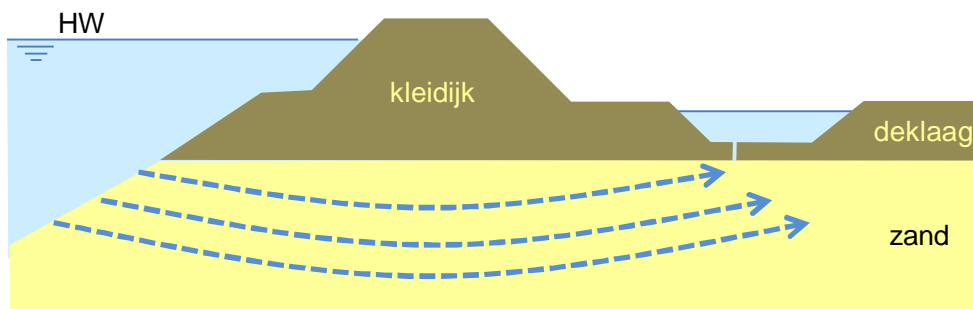


Figuur 4.6 Stijgende buitenwaterstand veroorzaakt verval over dijk waardoor de stijghoogte onder in zandlaag en daarmee de waterdruk onder het slappe lagenpakket toeneemt, waardoor de deklaag langzaam wordt opgedrukt

#### 4.2.3.3 Stap 2: opbarsten van de deklaag

Bij een hoge waterstand kan de waterdruk in de zandlaag dusdanig hoog worden dat het daarop rustende slappe lagen pakket wordt opgedrukt. De waterdruk in het watervoerende pakket wordt dan groter dan het gewicht van het slappe lagen pakket. Dit fenomeen wordt opdrijven genoemd. In de praktijk is opdrijven soms, maar lang niet altijd, waarneembaar door zwakke golfbewegingen van het maaiveld bij betreden. Bij opdrijven is de schuifweerstand tussen de zandlaag en het slappe lagenpakket nihil.

Als gevolg van deze wateroverdruk kan het pakket van slecht doorlatende, samenhangende lagen scheuren en opbarsten. Hierbij groeit een scheur in het pakket van de afdekkende lagen door tot het watervoerende pakket zodat er een uittredepunt voor het zandtransport ontstaat. Bij de controle op opbarsten als voorstadium van piping wordt geen expliciet verschil gemaakt tussen opdrijven en opbarsten. Bij piping kan al één scheur voldoende zijn om een zandmeevoerende wel te vormen en daarmee het faalmechanisme in werking te zetten. Het ontstaan van scheuren na opdrijven hangt dan ook af van de eigenschappen van de afdekkende laag, zoals dikte en elasticiteit.



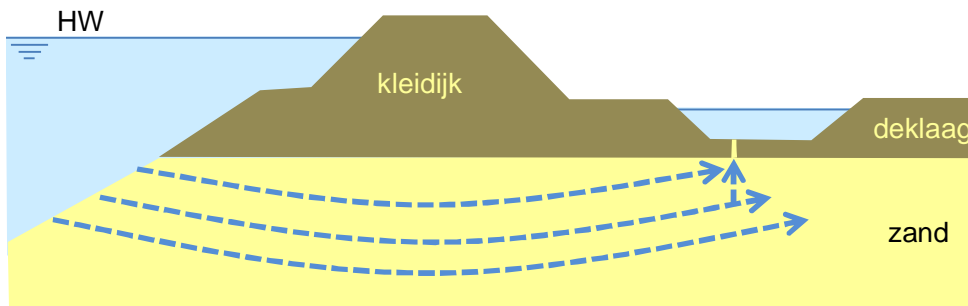
Figuur 4.7 Binnendijks maaiveld drijft als gevolg van de grote waterdruk in het watervoerende pakket op. De locatie met het geringste deklaaggewicht (hier de slootbodem) scheurt en barst als eerste op

#### 4.2.3.4 Stap 3: Heave

Op het moment dat deze scheur is ontstaan hoeft niet direct piping op te treden. Het water moet eerst voldoende opwaartse kracht kunnen leveren om de zandkorrels vanuit het zandpakket verticaal over de dikte van het slecht doorlatende zandpakket omhoog te kunnen stuwen. Het water stroomt uit het zandpakket naar dit punt, omdat dit de weg van de minste weerstand vormt. Op het moment van opbarsten is een hoge waterdruk onder het opbarstpunt aanwezig. De stijghoogte van het grondwater is groter dan onder hydrostatische omstandigheden. Na het opbarsten kan het water wegstromen, zodat de druk in het zandpakket ter plaatse van het uittredepunt bijna gelijk wordt aan die van het polderwater. Een groot deel van het water dat door het zandpakket stroomt, wordt nu afgevoerd via het opbarstkanaal. De stroomlijnen in het zandpakket concentreren zich nabij het uittredepunt, met andere woorden de stroomsnelheid ter plaatse van het uittredepunt is hoog. De snelheid kan zo hoog zijn dat de waterstroming het gewicht van het zand overschrijdt: het zand bevindt zich dan in een zogenaamde gefluïdiseerde toestand (drijfzand) en gedraagt zich als een zware vloeistof. Deze zware vloeistof wordt afgevoerd door het opbarstkanaal. Bovenaan het opbarstkanaal is sprake van in beweging zijnde zandkorrels in de vorm van in de wel "kokend" zand.

Het zand wordt als gevolg van de hoge gradiënt (waterdrukverschil over opengescheurde deklaagdikte) door het omhoog wellende water naar boven gestuwd en zakt ter plaatse van het maaiveld weer terug naar de pipe als gevolg van de afname in stroming bij het verlaten van de pipe. Het zand lijkt als het ware te 'koken'. De druk van het omhoog wellende water is nog onvoldoende hoog om het zand over de rand van de wel te transporteren en op maaiveld af te zetten. Het water uit de wel komt dan wel over de rand heen en er is sprake van een watervoerende wel.

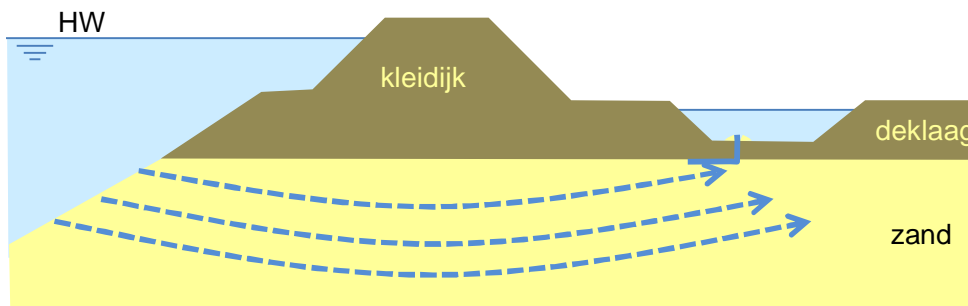
Het proces van omhoog stromend zand wordt heave genoemd.



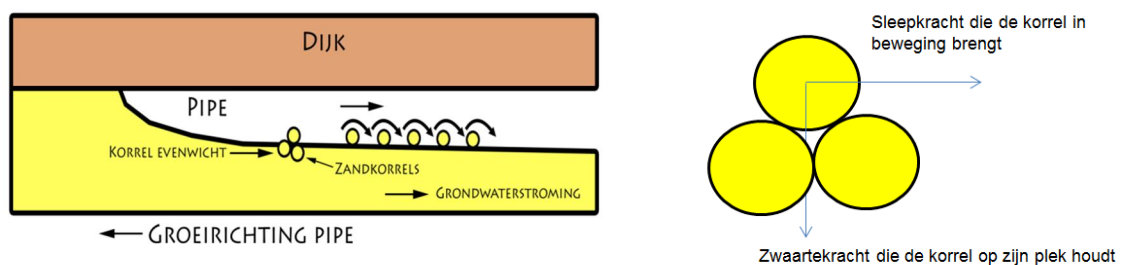
Figuur 4.8 Heave

#### 4.2.3.5 Stap 4: de buitenwaterstand stijgt verder en pipes ontstaan

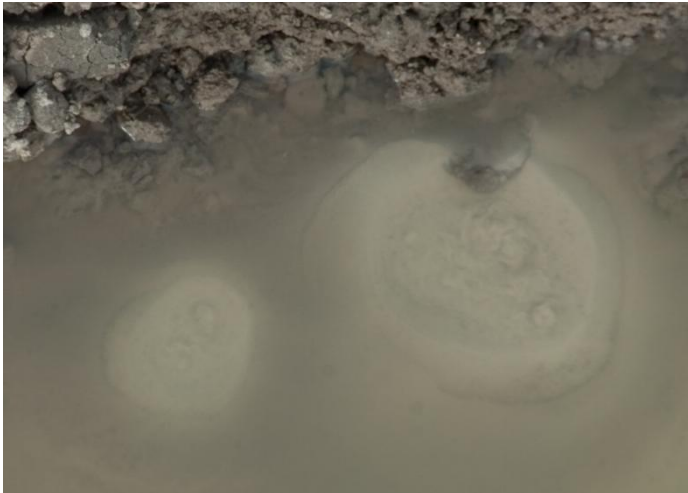
Wanneer de buitenwaterstand verder stijgt, wordt het zand over de rand van de wel gegooid en zet zich op het maaiveld af en er ontstaan zandmeevoerende wellen. In deze fase begint de vorming van een pipingkanaal. Een pipingkanaal is een zeer ondiepe holle ruimte (meerdere korreldiameters diep) aan de bovenkant van het zandpakket. De breedte van het pipingkanaal kan van geval tot geval veel verschillen. In het algemeen neemt de breedte van het pipingkanaal met de lengte toe en kan bij grote dijken wel eens meerdere centimeters zijn. Bovendien gaat de pipe bij grotere dijken ook lateraal migreren. De dijk of de samenhangende deklaag vormt het dak van het kanaal, dat als gevolg van cohesie en boogwerking stabiel blijft.



Figuur 4.9 Beginnende pipevorming door terugschrijvende erosie, zandmeevoerende wellen worden zichtbaar



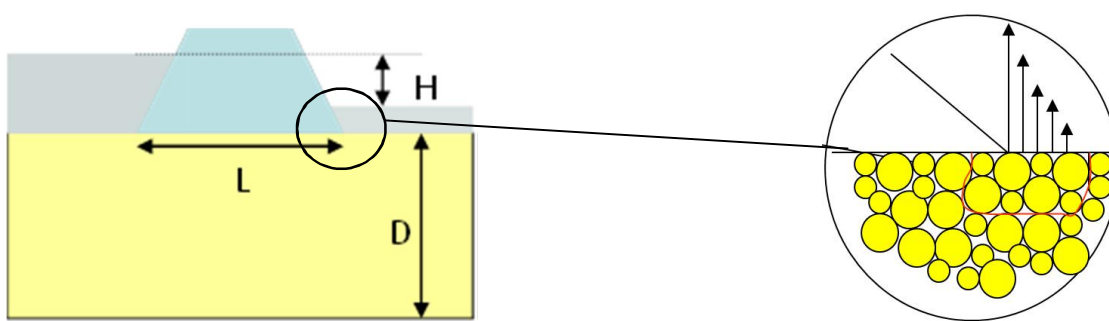
Figuur 4.10 Korrelevenwicht c.q. transport van zandkorrels in pipe



Figuur 4.11 Zandmeevoerende wellen

In principe zijn hier twee verschillende deelaspecten aan de orde. We maken hierbij onderscheid tussen initiatie en progressie: het starten van een pipe en het doorgroeien van een pipe.

Het kanaaltje moet zich eerst in een intact zandpakket kunnen ontwikkelen: het zand moet uit het korrelskelet worden losgemaakt. Bij de situatie waarbij een deklaag aanwezig is, zal dit vrijwel direct volgen op het proces van opbarsten, omdat de stroomsnelheid in het zandpakket hoog is nabij de scheur. Wanneer er geen deklaag aanwezig is, en er dus ook geen sprake is van opbarsten, is de initiatie van de pipe de eerste stap. Het zand moet lokaal gefluïdiseerd worden om pipe-vorming te faciliteren. Hiervoor moet eerst bij de uittredepunt een groep zandkorrels omhoog worden getild. Deze groep korrels moet hiervoor aan de heave gradiënt onderhevig zijn.



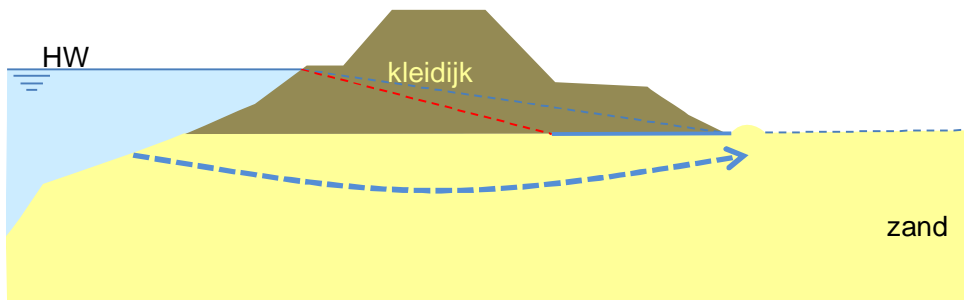
Figuur 4.12 Schematisering van de uittredepunt bij afwezigheid deklaag

Als zich door dit initiatieproces dan een kanaaltje heeft kunnen vormen, kan dit kanaaltje in evenwicht komen: de pipe groeit niet verder bij het aanwezige verval. Om te begrijpen hoe dit komt, kijken we naar de processen die een rol spelen bij het doorgroeien van een pipe.

Het doorgroeien van een kanaaltje wordt bepaald door twee processen: primaire en secundaire erosie. Primaire erosie beschrijft het erosie proces aan het front van het kanaaltje, dus het groeiproces in lengte, secundaire erosie beschrijft het proces van verbreding en verdieping van het bestaande kanaaltje.

Een kanaaltje kan langer worden als de korrels aan het front van de pipe loskomen. Dit kan optreden wanneer de gradiënt voor het front van de pipe zo groot is dat fluidisatie optreedt. Nabij het uittredepunt door een deklaag zijn de gradiënten altijd hoog, omdat het water van alle kanten naar dit punt stroomt. Is er aanvankelijk een radiale stroming naar een enkel punt, als een of meerdere kanaaltjes zich ontwikkelen uitgaande van het opbarstkanaal, dan ontwikkelt de stroming zich meer richting uniforme stroming waarbij de gradiënten wat lager zijn. Hierdoor kan het kanaaltje stoppen met groeien.

Het kanaal zelf heeft echter ook invloed op de stroming nabij het front. Het kanaal werkt in principe als een drain (Figuur 4.13). Naarmate de pipe langer wordt, neemt geleidelijk de gemiddelde gradiënt over het resterende zandpakket toe. Als de pipe de kritieke lengte voorbij is, kan de pipe door de steeds toenemende gradiënt nabij het front niet meer stoppen met groeien. Secundaire erosie bepaalt de doorsnede van de pipe en daarmee de drainagecapaciteit van de pipe. Hoe sterker de pipe het zand draineert, des te lager de drukval in de pipe en des te hoger de stroomsnelheid aan de kop van de pipe.



Figuur 4.13 Drukval naar de pipe (rode gestippelde lijn). Drukval in de pipe is gering(er)

Op dit moment wordt alleen secundaire erosie beschouwd in de modellering van het proces. Hierbij wordt de veronderstelling gemaakt dat de pipe niet in lengte kan groeien wanneer de korrels op de bodem van de pipe in evenwicht zijn.

Of het zandtransport op de bodem van de pipe door kan blijven gaan, hangt van het korrelgewicht van de korrels af. De korrels worden door hun eigen gewicht op hun plek gehouden. Wanneer water door de pipe stroomt, wordt er een sleepkracht op de korrel uitgeoefend. Hoe groter de korrel hoe groter de kracht die de korrel op zijn plek houdt en des te groter de sleepkracht van het water moet zijn om de korrel in beweging te brengen. Deze sleepkracht wordt bepaald door de stroming van het water in de pipe. De waterstroom in de pipe wordt gevoed door de waterstroom in het zandpakket. Hoe doorlatender het zand, hoe makkelijker het water erdoor heen stroomt en hoe groter dus de sleepkracht op de korrels. De grootte van de sleepkracht neemt uiteraard ook met toenemend waterstandsverschil toe. De afmetingen van het zandpakket (de dikte van de zandlaag en de afstand tussen intrede- en uittredepunt (kwelweglengte)) hebben ook invloed op de sleepkracht evenals de heterogeniteit van de ondergrond. Als er bijvoorbeeld onder de zandlaag een zeer doorlatende grindlaag aanwezig is, zal hierdoor veel water worden aangevoerd naar de pipe. De pipe moet dit water afvoeren en de belasting op de korrels is dan groter.

De veronderstelling is dat, zolang het korrelgewicht van de korrels niet in evenwicht is met de sleepkracht die de korrels in beweging brengt, de pipe steeds langer zal worden. Vanaf het binnendijkse maaiveld lijkt het erop dat er ter plaatse van de zandmeevoerende wel maar één kanaaltje terug groeit richting het intredepunt. Dit is echter niet het geval. Onder de dijk zijn veelal meerdere vertakkingen van dit ene hoofdkanaaltje aanwezig. De vorm waarin het hoofdkanaaltje vertakt, is wisselend. De kanaaltjes zelf zijn zeer klein van afmetingen, hooguit

enkele tientallen zandkorrels dik. De breedte van het kanaal is sterk afhankelijk van de grootte van het systeem (zoals kwelweglengte, verval en uitstroomopening).

Het kanaal groeit niet altijd recht van de polder naar het buitenwater, het kanaal vertakt zich ook in zijwaartse richtingen. De continuïteit van het zandtransport kan wisselen omdat bijvoorbeeld het open kanaaltje verzandt en daardoor in doorlatendheid weer afneemt. Hierdoor kan het zandtransportproces even stagneren. Bij aanwezigheid van meerdere wellen kunnen deze afwisselend actief zijn.

Het kritieke verval is gedefinieerd als het verval waarboven de pipe-vorming niet stopt bij gelijkblijvende belasting. Het bereiken van het kritieke verval wordt bij ontwerp en toetsing meestal aangemerkt als rekenkundig falen.

In de praktijk kan het voorkomen dat het proces net in evenwicht komt, doordat de wel het zand niet meer over de rand van de zandkrater kan transporteren. De zandmeevoerende wel kist zich – bij wijze van spreken - zelf op. De rand van de zandkrater wordt hoger, waardoor ook het waterpeil in de krater omhoog gaat. Hierdoor neemt het verval tussen buitenwater en kraterpeil af, en het terugschrijdende erosieproces komt tot stilstand. Wanneer de rand van de zandkrater echter om wat voor een reden instort en lager wordt, zakt ook weer het waterpeil in de krater en gaat het erosieproces weer door.

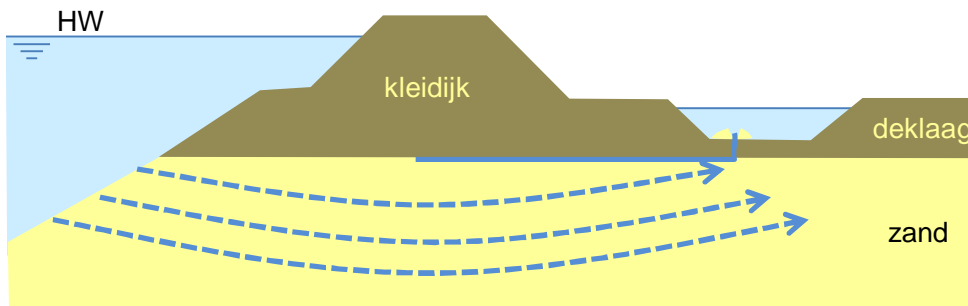
Als een wel op een lokale zwakke plek in de deklaag ontstaat, kan er al bij een relatief lage waterstand zand meegenomen worden, omdat alle stroming naar dit uittredepunt gaat en geconcentreerd uittreedt en zandkorrels meevoert. Dit hoeft niet te betekenen dat het kritiek verval al bereikt is. Bij een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

Andere redenen dat het kanaal, hoewel zichtbaar, toch niet doorgroeit naar het intredepunt zijn obstakels in het zand of heterogeniteit. Vooral bij de grote rivieren is de zandondergrond waarin piping optreedt relatief heterogeen wat betreft de korrelgrootte van het zand.

Veelal had de rivier in het verleden een veranderend vlechtend of meanderend patroon als gevolg van sedimentatie en erosie. Deze processen en veranderende stroomsnelheden van de rivier hebben er toe geleid dat er afwisselend fijne en grove zanden zijn gesedimenteerd die voor heterogeniteit in alle richtingen zorgen. Hierdoor zal het terug groeien van de kanaaltjes in dit soort heterogene systemen anders verlopen dan in meer modelmatige omstandigheden. Het is goed denkbaar dat het kanaaltje bij het teruggroeien grovere zandbanen tegenkomt. Deze grovere zandbanen hebben een hogere erosieweerstand en kunnen ervoor zorgen dat het kanaal niet verder naar de bovenstroomse kant doorgroeit. Het kanaal groeit dan bijvoorbeeld evenwijdig aan de grove zandbaan verder en er ontstaan meer vertakkingen van het kanaal benedenstrooms. Hierdoor blijft visueel nog steeds een zandmeevoerende wel bij het uittredepunt zichtbaar, alleen is het terug groeien van het kanaal gestopt. Deze situatie is op basis van visuele waarnemingen dus niet te onderscheiden.

In de progressiefase treedt geen evenwichtssituatie meer op zodat de pipe bij gelijkblijvende belasting zal doorgroeien.

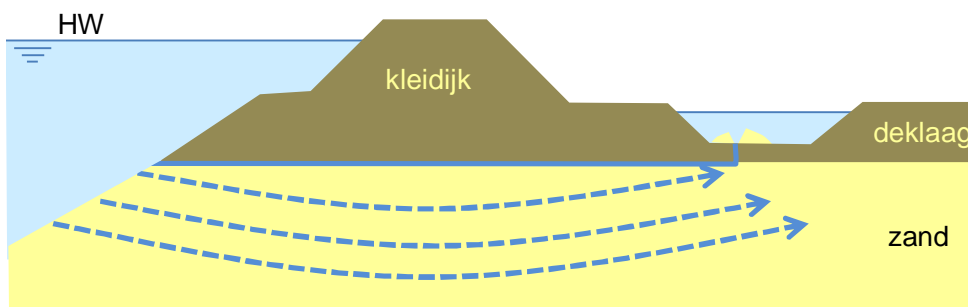




Figuur 4.14 Buitenwaterstand bereikt kritiek verval, pipe groeit terug naar intredepunt

#### 4.2.3.6 Stap 5: kanaal groeit terug tot aan intredepunt

Als het erosieproces, gegeven een constante hoge buitenwaterstand, doorgaat (progressieve erosie) zal het pipingkanaal uiteindelijk het intredepunt bereiken. Hierdoor ontstaat na verloop van tijd een doorgaande verbinding onder de dijk en komt hydraulische kortsluiting met het buitenwater tot stand. Het kanaal is dan terug gegroeid naar het intredepunt, wat tevens het einde van het feitelijke proces van terugschrijdende erosie is.



Figuur 4.15 Pipe bereikt intredepunt. Einde van het terugschrijdende erosieproces.

#### 4.2.3.7 Stap 6: ruimproces naar de uittredepunt toe

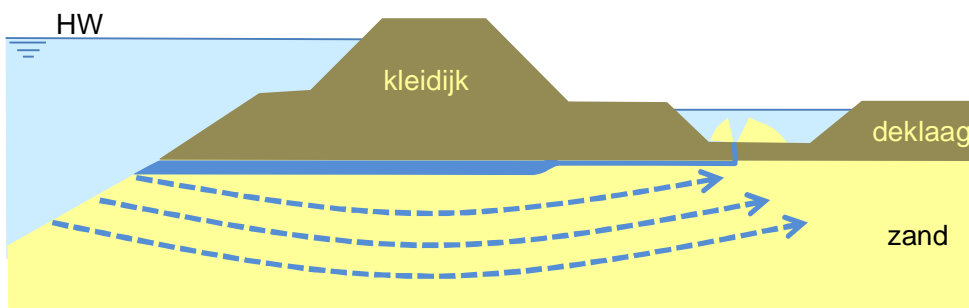
Zodra het kanaaltje de bovenstroomse kant heeft bereikt verbreedt en verdiept het kanaaltje zich geleidelijk van de bovenstroomse zijde naar de benedenstroomse zijde. Dit proces noemen we het "ruimen".

Tijdens het ruimproces neemt de hoeveelheid afgezet zand per tijdseenheid bij het uittredepunt niet toe. De verklaring hiervoor is dat de open verbinding tussen buiten- en polderwater voor een grote toename van de stroming door de pipe zorgt en hiermee direct veel erosie aan de bovenstroomse kant van de pipe veroorzaakt. Omdat de tijdens het terugschrijdende erosieproces gevormde kleine pipes maar enkele millimeters diep zijn kunnen ze de bij het ruimproces optredende grote hoeveelheid geërodeerd zand niet afvoeren en raken de pipes verder onder de dijk verstopt, waardoor het ruimproces langer kan duren. Hierdoor is het debiet en de hoeveelheid uittredend zand tijdens het ruimproces aan grote fluctuaties onderhevig. De verstopping wordt vanaf de benedenstroomse zijde door terugschrijdende erosie geleidelijk weer ongedaan gemaakt, waarna opnieuw veel erosie kan optreden.

Na ontstopping kan het ruimen weer plaatsvinden, waardoor opnieuw verstopping optreedt. Dit proces van verruimen, verstopping en ontstoppen zorgt er geleidelijk voor dat van de rivierzijde naar de polderzijde een verruimde pipe ontstaat. Over de tijdsduur en de voortgang

van dit deel van het bezwijkproces is nog niet veel bekend. De ervaring die hiermee is opgedaan bij het uitvoeren van proeven geeft hierin enig inzicht. Uit experimenteel onderzoek aan een kunstmatig aangelegde testdijk (IJKdijk) met een homogene watervoerende zandlaag volgt dat het kanaal bij constant verval langzaam in benedenstroomse richting groeit. De snelheid waarmee de kanaaltjes groeien is afhankelijk van het verval. In de IJKdijkproef duurde dit meer dan 24 uur. Dit proces zou sneller kunnen verlopen als het kritieke verval ruim wordt overschreden.

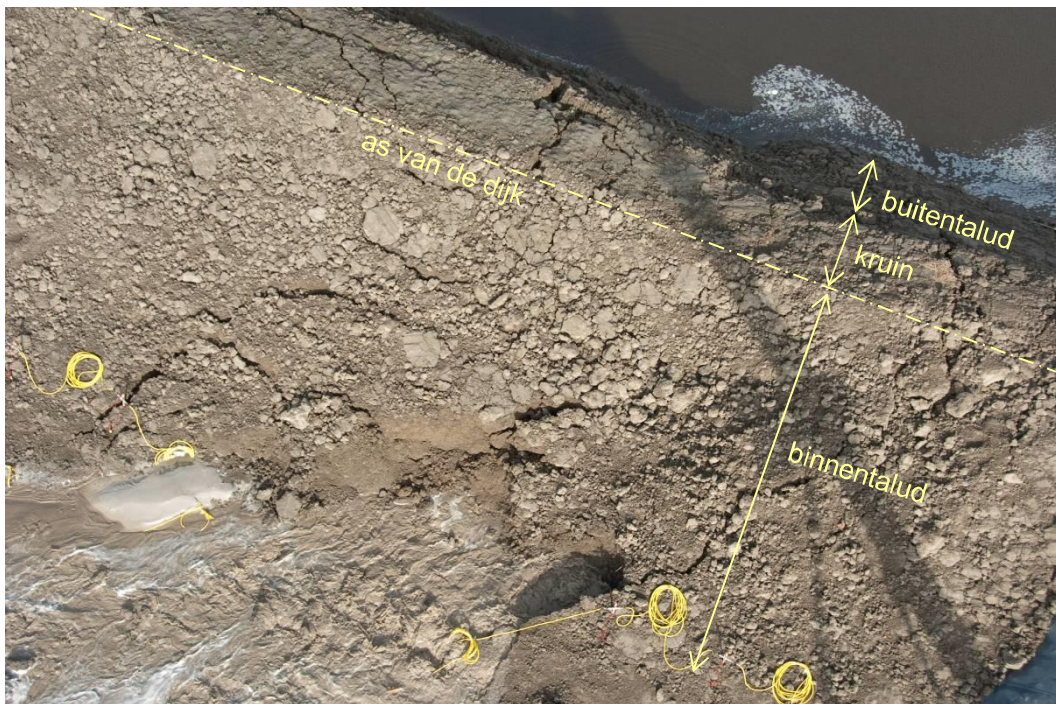
Zodra de pipe geheel verruimd is, neemt het kweldebiet en het zandtransport fors toe, waarna falen in korte tijd plaats kan vinden. In sommige proeven werd het ruimen van de pipe echter gevolgd door verzakking van de dijk, waardoor het falen werd vertraagd.



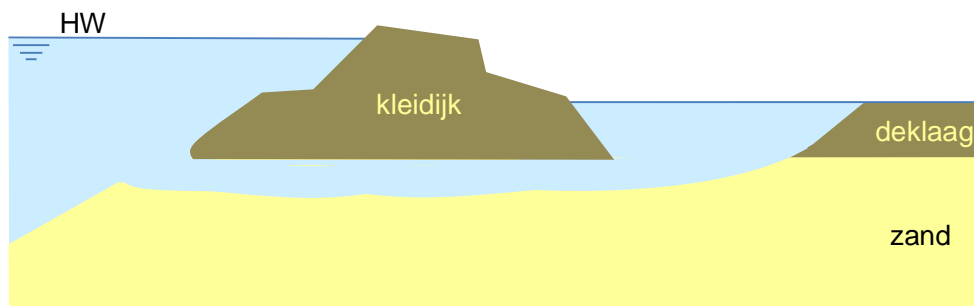
Figuur 4.16 Ruimen (verbreding en verdieping van de pipe) vanaf de bovenstroomse zijde (het intredepunt)

#### 4.2.3.8 Stap 7: bezwijkproces

Zodra het ruimproces de benedenstroomse kant, dus het uittredepunt, heeft bereikt, resulteert dit in een forse toename van zandtransport en debiet. Tijdens het bezwijkproces ontstaat een fontein van water die naast zand ook klei van de onderkant van de dijk meevoert. In deze fase stroomt het water met groot geweld door het geruimde kanaal. De wel maakt dan een geluid van ruisend water en kan het zand- en kleimengsel worden gezien als een modderfontein. Dit resulteert in een groot erosie gat onder de gehele dijk door waardoor de dijk uiteindelijk volledig wordt ondermijnd. In de IJKdijkproeven was dit gat ruim 1,5 m diep. Er treden dan grote scheuren in de dijk op en de dijk zakt aan de bovenstroomse, dus buitendijkse zijde in. Een kruinverlaging treedt op nadat dusdanig grote holle ruimten onder de dijk zijn ontstaan waardoor de dijk instort. De dijk zal niet bij kleine holle ruimten instorten. De kruinverlaging zal daarom aanzienlijk zijn. Indien overslag en overloop optreedt, zal de dijk snel falen. Het instorten van de holle ruimten heeft vermoedelijk de opbouw van de dijk aangetast. Scheuren en afschuifvlakken zijn door de gehele dijk ontstaan wat het erosieproces door overslag versnelt. Dit leidt uiteindelijk tot verlies van het waterkerende vermogen van de waterkering met bresvorming tot gevolg.



Figuur 4.17 Modderfontein aan het einde van het ruimproces, grootschalige pipingproef



Figuur 4.18 Falen van de ondergrond van de dijk



Figuur 4.19 Dijkdoorbraak

#### 4.2.4 De te beoordelen deelmechanismen

Voor het beoordelen van de piping bij een dijk worden drie deelmechanismen (de hierboven beschreven stappen 2, 3 en 4) onderscheiden:

- Opbarsten.
- Heave.
- Terugschrijdende erosie.

Als één van deze deelmechanismen niet optreedt, dan vormt het faalmechanisme piping geen significante bedreiging. Pas als alle drie de processen worden doorlopen, is de waterveiligheid in het geding.

#### 4.2.5 Resterende sterkte

Resterende sterkte is de restcapaciteit van de dijk om de waterkerende functie te vervullen na optreden van rekenkundig falen. Bij het faalmechanisme piping is er sprake van resterende sterkte na het moment van overschrijden van het kritieke verval. Dit is het verval, waarbij het proces van terugschrijdende erosie niet meer tot stilstand komt.

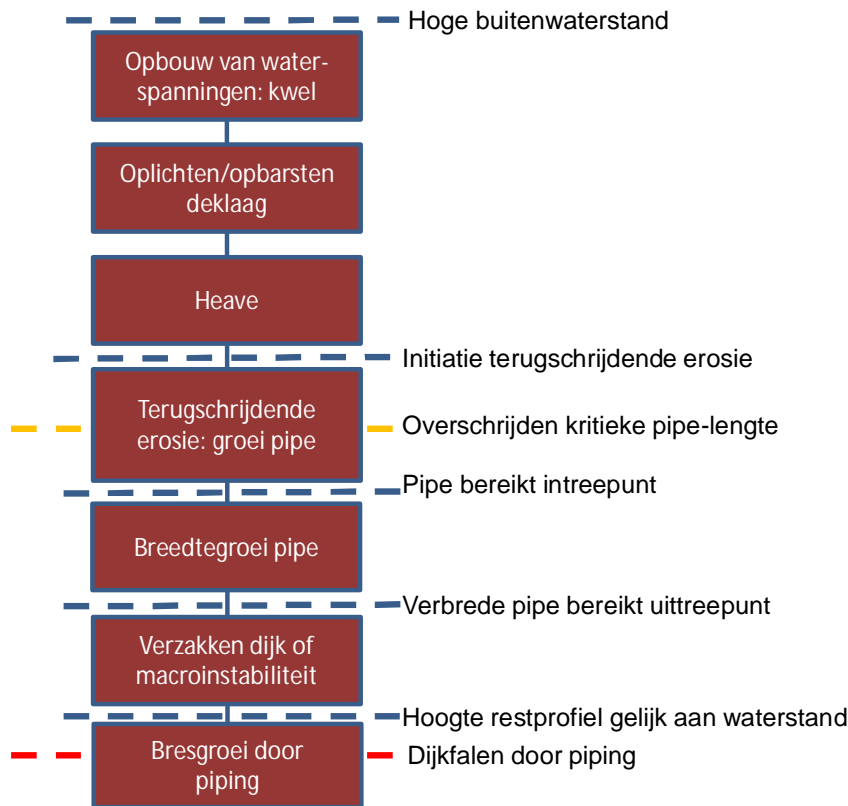
De resterende sterkte van de dijk na overschrijden van het kritieke verval is afhankelijk van de grondeigenschappen onder de dijk. De resterende sterkte is moeilijk te kwantificeren. Zo faalde de testdijk gelegen op fijn zand vrij snel, terwijl in de testdijk op grof zand na het ruimen een verzakking optrad, waardoor het daadwerkelijk falen vertraagd werd. In verschillende opgetreden dijkdoorbraken en kijkproeven is een snel erosieproces geconstateerd na het ontstaan van een doorgaande pipe. Het totale doorbraakproces duurde in de IJkdijkproeven (kwelweglengte 15 m) circa 20 minuten. Bij dijken op ware grootte zal dit proces nog meer tijd nodig hebben. De duur van het erosieproces (maximaal enkele uren) is dan echter al snel korter dan de duur van het hoogwater (meerdere uren).

### 4.3 Overzicht van het faaltraject piping

In onderstaande Figuur 4.20 is een schematisch overzicht gegeven van de primaire mechanismen en de overige deelprocessen binnen het traject leidend tot dijkfalen als gevolg van piping.

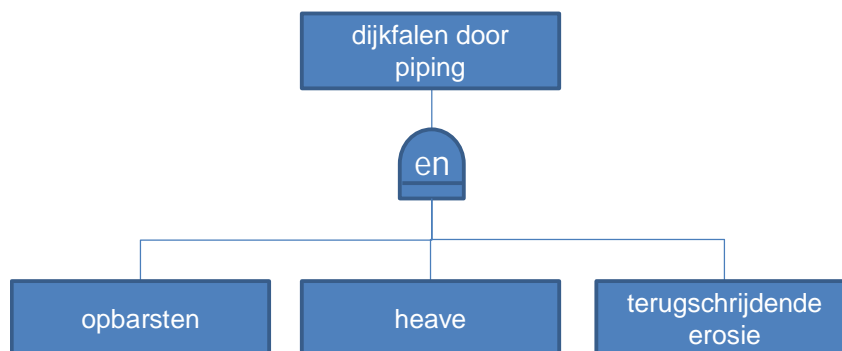
Binnen deze reeks processen is onderscheid te maken tussen de primaire (bezwijk)mechanismen tot overschrijden van de kritieke pipe-lengte (rekenkundig falen) en de resterende sterkte-deelprocessen tot aan falen van de waterkering.

Falen van de waterkering houdt in dat de waterkerende functie niet meer kan worden vervuld. Bezwijken wordt gedefinieerd als breuk, vormverandering, verlies van samenhang of schade aan (onderdelen) van de dijk, als gevolg van belastingen of belastingeffecten die de sterkte overtreffen, waardoor de capaciteit om water te keren nadelig kan worden beïnvloed. De grens van bezwijken is in geval van piping lastig aan te geven. In geval van een ondoorlatende deklaag in het achterland is opbarsten in feite een eerste vorm van bezwijken. Ontbreekt de deklaag in het achterland dan kan de vorming van een zandmeevoerende wel als begin van bezwijken worden aangemerkt. Een sequentie van verschillende (deel)mechanismen en processen (faaltraject) moet na bezwijken nog optreden voordat een waterkering daadwerkelijk faalt. De waterkering faalt pas als zij de waterkerende functie niet kan vervullen.



Figuur 4.20 Gebeurtenissen leidend tot falen van de dijk als gevolg van piping

Binnen het primaire deel van het faaltraject zijn drie deelmechanismen te onderscheiden: opbarsten, heave en terugschrijvende erosie. Als één deelmechanisme een voldoende kleine kans van optreden heeft, kan het gehele faalmechanisme met voldoende betrouwbaarheid worden uitgesloten en kan de dijk dus ten aanzien van het faalmechanisme piping goedgekeurd worden. Figuur 4.21 toont deze samenhang in een foutenboom.



Figuur 4.21 Foutenboom voor situatie met een deklaag achter de dijk

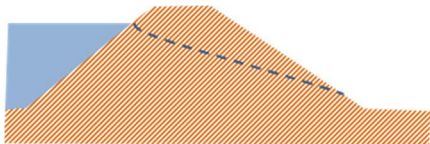
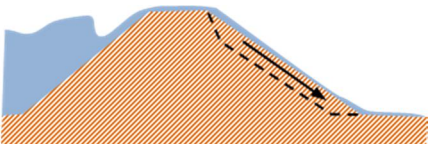
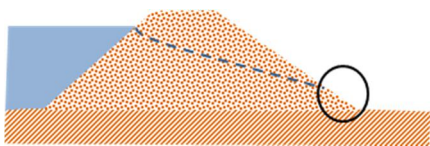
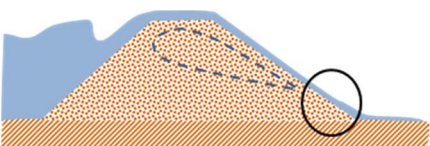
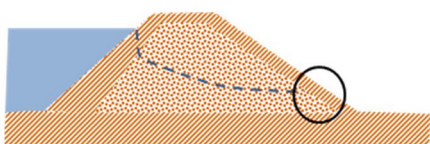
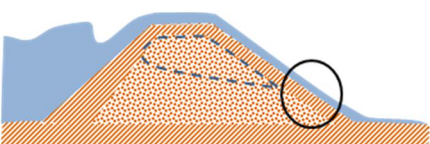


## 5 Micro-instabiliteit

### 5.1 Globale beschrijving van micro-instabiliteit

Micro-instabiliteit betreft het verlies van stabiliteit van grondlagen met zeer beperkte dikte aan het oppervlak van het binnentalud onder invloed van grondwater dat door het grondlichaam stroomt. Bij micro-instabiliteit komt de bedreiging van binnen: eventuele problemen worden veroorzaakt door een hoge freatische lijn in het grondlichaam. Bij micro-instabiliteit door stromend grondwater kan worden gedacht aan het uitspoelen van materiaal uit de kern van de dijk. Ook kan bij micro-instabiliteit worden gedacht aan instabiliteit van de toplaag door een hoge freatische lijn in de dijk. Als het binnentalud wordt beschermd door een ondoorlatende kleilaag kan deze door het grote potentiaalverschil over deze toplaag worden afgedrukt van de dijk. In Figuur 5.1 zijn de genoemde verschijnselen weergegeven.

Micro-instabiliteit wordt wel eens verward met of gelijk gesteld aan instabiliteit door infiltratie en erosie door overslag. Ook dat proces speelt zich immers op het binnentalud af. Het verschil tussen beide is dat bij micro-instabiliteit water door de dijk is gestroomd en van binnen naar buiten sijpelt, terwijl bij infiltratie na overslag het water van buiten naar binnen infiltreert. Naast infiltratie zal een deel van het overslagwater via het binnentalud afstromen. Hierdoor kan erosie van het al dan niet verzadigde binnentalud optreden. Overigens zal bij golfoverslag naast infiltratie door overslaande golven ook water door de dijk sijpelen, zoals bij microstabiliteit van belang is. In Figuur 5.1 zijn de mechanismen van micro-instabiliteit en instabiliteit door infiltratie en erosie bij overslag weergegeven.

Mechanisme	micro-instabiliteit	afschuiven grasbekleding binnentalud bij overslag
Type dijk		
kleidijk	 geen probleem	 infiltratie en afschuiven
zanddijk	 uitspoelen	 infiltratie en uitspoelen
zanddijk met kleibekleding	 afdrukken of afschuiven en/of uitspoelen	 infiltratie en afdrukken of afschuiven en/of uitspoelen

Figuur 5.1 Schematische weergave verschillen tussen micro-instabiliteit en afschuiven grasbekleding binnentalud bij golfoverslag

Indien er sprake is van een significante hoeveelheid golfoverslag, dan zal het mechanisme 'afschuiven grasbekleding binnentalud' maatgevend worden boven het mechanisme 'micro-instabiliteit'. Indien er echter geen significante overslag is, dan is het mechanisme 'micro-instabiliteit' maatgevend boven 'afschuiven grasbekleding binnentalud'.

Voor de grenswaarde van significante overslag wordt uitgegaan van 0,1 l/s/m. Indien de overslag groter is dan deze grenswaarde dan hoeft er niet naar microstabiliteit te worden gekeken.

## 5.2 Faaltrajectbeschrijving micro-instabiliteit

Als gevolg van een hoge buitenwaterstand stijgen de waterspanningen in de dijk. Het waterspanningsverloop is sterk afhankelijk van de opbouw van de dijk. Bij slecht doorlatende buitenbekledingen kan water moeilijk de dijk indringen waardoor de stijging van de freatische lijn als gevolg van een hogere buitenwaterstand beperkt blijft. Onder een slecht doorlatende laag wordt een asfaltbekleding of een voldoende dikke en dichte kleilaag verstaan. Zelfs een goed verdichtte kleilaag zal na aanleg, onder invloed van bodemstructuur vormende processen, doorlatend worden. Alleen als de kleilaag dikker is dan orde één meter, dan zal een goed verdichtte kleilaag ook als een slecht doorlatende laag kunnen worden beschouwd.

Naast de buitenbekleding is het kernmateriaal van invloed op het waterspanningsverloop. Het is een groot verschil of de dijk uit klei of zand bestaat. Bij kleidijken zullen problemen met de microstabiliteit minder snel voorkomen. Dit komt doordat de oppervlakte lagen van kleidijken meer gestructureerd en beter doorlatend zijn dan de kern waardoor geen overdrukken in het binnentalud kunnen ontstaan.

Bij een doorlatende buitenbekleding en een kern van zand kan de freatische lijn in de dijk oplopen. Er ontstaat een verhanglijn in de dijk die al dan niet op het binnentalud uittreedt. De verhanglijn is onder andere afhankelijk van de duur van de hoogwatergolf.

De grondwaterstroming ter plaatse van het binnentalud is bepalend voor het al of niet optreden van micro-instabiliteit. De volgende stromingspatronen kunnen worden onderscheiden:

- Stroming loodrecht op het talud. Dit doet zich voor bij zandige taluds onder water.
- Horizontale uitstroming van water. Dit kan zich voordoen bij zandige taluds boven water en vormt de grootste bedreiging ten aanzien van uitspoelen van zanddeeltjes.
- Stroming evenwijdig aan het talud. Dit type stroming zal zelden optreden, omdat dit betekent dat de toplaag meer doorlatend is dan de kern. Bij stabiliteit bij overslag treedt dit type stroming wel op.
- Opbouw van waterdrukken onder een afdekkende kleilaag. Dit kan zich voordoen bij een zandkern met een afdekkende kleilaag aan de binnenzijde, zowel onder als boven water.

Voor een dijk met een zandkern onderscheidt [10] de volgende situaties waarin wel of juist geen micro-instabiliteit kan optreden:

- Het binnentalud is zeer flauw: hiervoor wordt momenteel een talud van 1V:5H gehanteerd als kritische grens. De onderbouwing van deze grens is niet heel duidelijk [11], maar lijkt op zich geen overdreven optimistische aanname. Bij dergelijk flauwe taluds zal het mechanisme micro-instabiliteit geen veiligheidsprobleem opleveren.



- Onder het binnentalud of in de binnenteen is een drainageconstructie aanwezig. In de leidraden wordt gesteld dat indien de werking van de drainage goed is, het mechanisme micro-instabiliteit geen probleem oplevert.
- Het binnentalud bestaat uit een afdekkende kleilaag overgroeid met gras. Hier kan de situatie optreden dat de afdekkende kleilaag minder doorlatend is dan de kern, waardoor overdrukken nabij de binnenteen ontstaan. In deze omstandigheid kan de kleilaag worden opgedrukt (de waterdruk wordt groter dan het gewicht van de afdekkende kleilaag) of de laag kan afschuiven over de zandkern. Een combinatie van deze beide fenomenen is ook mogelijk. Eveneens kan het fenomeen optreden dat door bestaande scheuren of gaten in de kleilaag, of scheuren die ontstaan door opdrukken en of afschuiven, zand van onder de kleilaag wegspoelt. Bij dit type dijk moet op afdrukken en afschuiven van het binnentalud worden gecontroleerd.
- Het binnentalud bestaat uit zandig materiaal, normaal gesproken overgroeid met gras. De invloed van het gras wordt meestal genegeerd. In sommige beschouwingen is sprake van 'schijnbare cohesie' die het gras kan leveren. Meestal gaat het echter in eerste instantie om de stabiliteit op het niveau van een enkele korrel op het binnentalud. Of uitspoelen en erosie van zandkorrels op het binnentalud voor kan komen, dient te worden gecontroleerd.

Uit het bovenstaande kan worden afgeleid dat de volgende vormen van micro-instabiliteit kunnen optreden:

A Bij een zanddijk met afdekkende kleilaag op het binnentalud:

- 1 Afschuiven van (een deel van) het binnentalud door waterdruk onder de afdekkende kleilaag.
- 2 Opdrukken van de afdekkende kleilaag op het binnentalud door waterdruk onder de kleilaag.
- 3 Combinatie van afdrukken en afschuiven door waterdruk onder de afdekkende kleilaag.
- 4 Uitspoelen van zand door scheuren en gaten in de afdekkende kleilaag. Deze scheuren en gaten bestonden al of zijn het gevolg van het opdrukken en of afschuiven van de kleilaag.

B Bij een zanddijk met zandige toplaag boven water:

- 1 Afschuiven bij horizontaal uittredend grondwater.
- 2 Uitspoelen van zand bij horizontaal uittredend grondwater.

C Bij een zanddijk met zandige toplaag onder water:

- 1 Afschuiving bij stroming loodrecht op het talud.
- 2 Uitspoelen van zand bij stroming loodrecht op het talud.

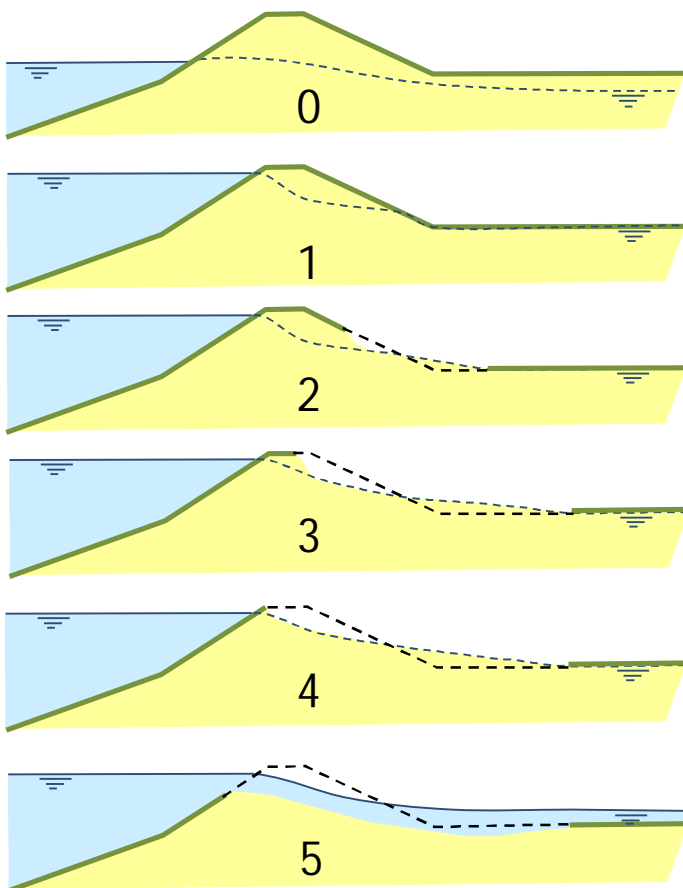
Geval C, zandtaluds onder water betreffen bijvoorbeeld dijken met binnendijks gelegen wielen en strangen. Deze kunnen relatief diep zijn en een zandtalud onder water hebben, waarbij onder extreme omstandigheden het kritische uittrede verhang wordt overschreden. Omdat dit zich onder water afspeelt kan het pas laat worden opgemerkt [9].

Indien een primair mechanisme van micro-instabiliteit is opgetreden ontstaat er een gat in het binnentalud van de dijk. Bij aanhoudende hoge freatische lijn in het dijklichaam zullen steeds meer korrels afstromen en afschuivingen plaats vinden waardoor het gat groter wordt. Tot zover is micro-instabiliteit ook daadwerkelijk waargenomen bij dijken.

Verondersteld wordt dat na verloop van tijd het binnentalud en eventueel de kruin door het gat wordt ondermijnd en afschuift (bijzakt) onder een helling van het natuurlijk talud tot een nieuwe evenwichtsituatie wordt bereikt.

Als de kruinhoogte daarbij lager wordt en water over de dijk kan stromen treedt bresvorming op. Waarschijnlijk is de kruinhoogte na het 'bijzakken' nog niet veranderd. Indien het binnentalud na een eerste afschuiving voldoende steil en de freatische lijn in het dijklichaam voldoende hoog is om korrels uit te spoelen of afschuivingen te veroorzaken zal het erosieproces van micro-instabiliteit verder gaan. Dit proces van uitspoelen van korrels en afschuivingen tot bijzakken van het talud zal zich blijven herhalen totdat de geometrie van de dijk zo is vervormd dat er geen uitspoelen van korrels meer kan optreden of de kruin van de dijk zo laag wordt dat overslag of een dijkdoorbraak gevolgd door bresgroei optreedt.

Het faaltraject van micro-instabiliteit tot dijkdoorbraak is schematisch weergegeven in Figuur 5.2.



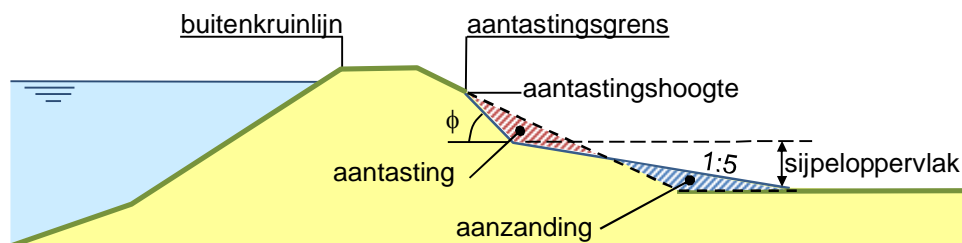
Figuur 5.2 Schetsmatige weergave van het traject tot falen van de dijk als gevolg van micro-instabiliteit

Fasen leidend tot falen van de dijk als gevolg van micro-instabiliteit:

- 0 Dagelijkse omstandigheden.
- 1 Verhoging freatisch vlak in de dijk als gevolg van hoogwater. Hoge waterspanning bij de binnenteen van de dijk.
- 2 Ontstaan van micro-instabiliteit bij de teen van de dijk en aantasting van het binnentalud.
- 3 Verdergaand erosieproces en nazakken van het materiaal boven het sijpelpunt.
- 4 Kruinhoogte wordt aangetast, toename van golfoverslag, waardoor erosie door golfoverslag een toenemende rol gaat spelen.
- 5 Bresgroei door overloop: de dijk faalt.

Van belang om op te merken is dat het doorlopen van de stappen 1 tot 4 een behoorlijke tijd kan vergen [8]. Vooralsnog zijn er geen methoden beschikbaar om deze tijdsafhankelijkheid in rekening brengen.

Het is ook denkbaar dat de kruin(hoogte) niet wordt aangetast, zie Figuur 5.3. De aantasting aan het dijkprofiel die theoretisch kan optreden, wordt bepaald door het hoogste punt van het sijpelloppervlak. Onder dat punt ligt het sijpelloppervlak onder een helling van ca. 1:5. Daarboven wordt de aantasting begrensd door de helling van het kernmateriaal: het natuurlijk talud. Als de dijkgeometrie zodanig is dat de aantasting in evenwicht komt met de aanzanding voordat de kruin wordt verlaagd, dan zal microstabiliteit niet leiden tot falen van de dijk.



Figuur 5.3 Evenwicht tussen aanzanding bij de teen en aantasting van het oorspronkelijk profiel bepaalt de aantastingsgrens

Opgemerkt wordt dat andere vormen van micro-instabiliteit kunnen optreden als gevolg van ongunstige elementen in de dijk, zoals holten veroorzaakt door afgestorven boomwortels, graverij van fauna, oude puinfunderingen van wegen die later zijn overlaagd en die verbinding maken met het buitenwater. Deze aspecten zijn niet meegenomen in de bovengenoemde beschrijving van het mechanisme.

### 5.3 Falen door combinaties van mechanismen

Na het optreden van een afschuiving als gevolg van micro-instabiliteit ontstaat een nieuwe evenwichtssituatie. De kans dat bij deze nieuwe evenwichtssituatie een kruinverlaging optreedt, is klein. Een kruinverlaging van een dijk door micro-instabiliteit is althans nooit waargenomen. Het proces van initiële instabiliteit tot een restprofiel waarbij de kruinhoogte is aangetast kan behoorlijk langdurig zijn. Wel is het binnentalud aangetast. Dit betekent dat de kans van optreden van andere mechanismen kan worden beïnvloedt.

Als door micro-instabiliteit de geometrie van de dijk verandert, kan dit effect hebben op de binnenwaartse macrostabiliteit.

Het optreden van micro-instabiliteit heeft geen nadelige invloed op piping. En er bestaat geen relatie tussen micro-instabiliteit en zettingsvloeiing.

Anderzijds kunnen ook andere mechanismen de kans op micro-instabiliteit beïnvloeden. Indien het buitentalud is beschadigd door erosie of afschuivingen, dan kan water gemakkelijker de dijk instromen en micro-instabiliteit veroorzaken.

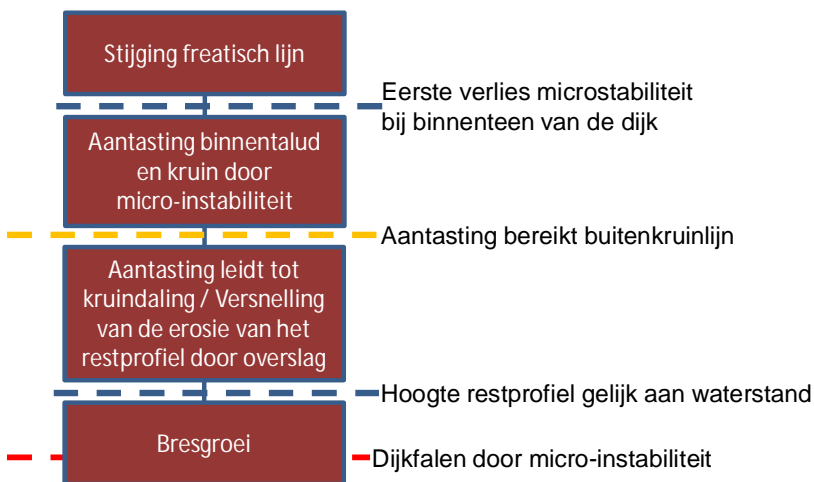
De combinatie van golfloop en -overslag enerzijds en micro-instabiliteit anderzijds is, zoals uitgelegd in paragraaf 5.1, een wat lastige, omdat daarbij vergelijkbare processen onder verschillende mechanismen worden gerangschikt.

Omdat het zanddijken zijn die beschadigd worden door micro-instabiliteit, en zand zeer gemakkelijk wordt meegevoerd door overslaand water zal de combinatie van micro-instabiliteit en golfoverslag zeer snel tot falen van de dijk kunnen leiden.

In principe beïnvloedt golfloop en -overslag het mechanisme micro-instabiliteit negatief. Als gevolg van golfloop en -overslag zal water door het buitentalud, de kruin en het binnentalud naar de ondergrond infiltreren, zodat het freatisch vlak in de dijk sneller zal stijgen. Bij geringe overslag wordt dit aspect gecontroleerd bij het spoor microstabiliteit, bij grotere overslaghoeveelheden ligt de beoordeling bij het spoor afschuiven (gras)bekleding op het binnentalud, zie paragraaf 7.5.

## 5.4 Overzicht van het faaltraject micro-instabiliteit

Aannemende dat afgezien van erosie door overslag en bresgroei er geen andere vervolgmecanismen optreden, geeft Figuur 5.4 de opvolgende gebeurtenissen leidend tot falen van de dijk weer.



Figuur 5.4 Gebeurtenissen leidend tot falen van de dijk geïnitieerd door micro-instabiliteit

## 6 Instabiliteit asfaltbekleding

### 6.1 Inleiding

De asfaltdijkbekleding heeft als primaire taak het dijklichaam te beschermen tegen erosie. Het asfalt is meestal gelegen op een zandlichaam, soms op een onderlaag van klei, keileem, zandasfalt of breed gegradeerd granulair materiaal. Een asfaltbekleding is altijd aangelegd in combinatie met andere bekledingstypen zoals dikwijls een steenzetting lager op het talud en een grasbekleding hoger op het talud. Overgangsconstructies, naar bijvoorbeeld een ondergelegen steenbekleding, vormen een potentieel risico, vooral ten aanzien van het uitspoelen van het onderliggende materiaal als er openingen aanwezig zijn of in de loop van de tijd kunnen ontstaan.

Bezwijkmechanismen van asfaltbekledingen zijn fysische verschijnselen waarbij de bekleding onder stormcondities een ontoelaatbare vervorming ondergaat zodat de samenhang van de bekleding verloren gaat. Dit kan ertoe leiden dat de asfaltbekleding geen bescherming meer biedt tegen erosie van het dijklichaam.

Twee belastingsituaties tijdens storm zijn het belangrijkste. In de eerste plaats is er de belasting gevormd door de telkens op het talud brekende golven. Deze herhaalde stootbelasting geeft aanleiding tot herhaalde deformatie, waardoor vermoeingsverschijnselen optreden en het asfalt uiteindelijk kan bezwijken. De tweede belangrijke belastingssituatie kan optreden na een hoge waterstand. Als de asfaltbekleding (of de eventuele onderlaag) ondoorlatend is, kan de bekleding bij een dalende buitenwaterstand worden opgedrukt als gevolg van een hoge freatische lijn in de dijk.

De kwaliteit van de constructie is onderhevig aan veroudering en dit heeft invloed op de parameters die de sterkte van de bekleding bepalen. Het gaat daarbij zowel om veranderingen van de materiaaleigenschappen van het asfalt als om uitspoeling van de onderlaag, doordat er door veroudering openingen in de bekleding ontstaan. De navolgende paragrafen beschrijven achtereenvolgens de aan veroudering gerelateerde mechanismen, de mechanismen waarvoor de sterkte normaliter wordt gecontroleerd en de resterende sterkte.

### 6.2 Veroudering materiaal bekledingslaag

Het materiaal asfalt is gevoelig voor veroudering. In de loop van de tijd wordt onder invloed van zonlicht en zuurstof het bitumen harder. Daardoor wordt het asfalt brosser en daardoor scheurgevoeliger. Thermische spanningen door temperatuurverschillen kunnen leiden tot scheuren en openstaande naden in de bekleding. Een grotere laagdikte verkleint de kans op doorgaande scheuren.

Aantasting van het materiaal kan ook optreden door bepaalde soorten begroeiing (zoals riet of houtvormende gewassen) die het materiaal opdrukken danwel doorwortelen. Vooral voor waterbouwasfaltbeton (WAB) is doorworteling ongunstig. Bij open steenasfalt (OSA) is een bepaald type begroeiing dikwijls juist de bedoeling maar ook daar dient de integriteit van de bekleding wel bewaakt te worden, dat wil zeggen er moet op gelet worden dat er geen begroeiing optreedt die houtvormend is danwel die sterke wortelstokken (Riet) vormt.

Verder kan asfalt (WAB en OSA) aangetast raken door stripping. Daarbij gaat in de loop van de tijd de hechting tussen het bitumen en de stenen in het asfaltmengsel verloren. Indringend vocht verbreekt de hechting zodat individuele stenen losraken. Dit reduceert de sterkte van het asfalt en leidt op den duur tot aantasting van het oppervlak, er verdwijnen stenen uit het

oppervlak. Soms ontstaan er ook kuilen in het asfaltoppervlak ten gevolge van het uiteenvallen van lokaal slecht asfalt over een deel van de dikte.

Voor de sterkte van WAB is een verouderingsformule ontwikkeld die de sterkteafname –die optreedt ten gevolge van de indringing van water– als functie van de tijd beschrijft met de holle ruimte als parameter [13]. Aantasting van het oppervlak kan uiteindelijk leiden tot het eroderen (dus verdwijnen) van het bovenste deel van de asfaltlaag. Het dunnere restant zal minder sterkte hebben. Een teruglopende sterkte zal zich bij open steenasfalt (OSA) veelal openbaren door erosie van het bekledingsoppervlak, zie paragraaf 6.6.

De stijfheid van de asfaltbekleding verandert ook ten gevolge van veroudering. Na verloop van tijd gaat deze ruimtelijk veel meer spreiding vertonen, met een hogere stijfheid voor goed maar hard geworden asfalt en een lagere stijfheid voor aangetast asfalt.

Bij vol en zat gepenetreerde breuksteen is de mortel dusdanig bitumenrijk en dicht dat verouderingsprocessen geen noemenswaardige rol spelen. Het mengsel is verder zodanig plastisch dat zettingsverschillen in de ondergrond zonder scheurvorming kunnen worden opgevangen.

### 6.3 Bezwijken ten gevolge van belastingen

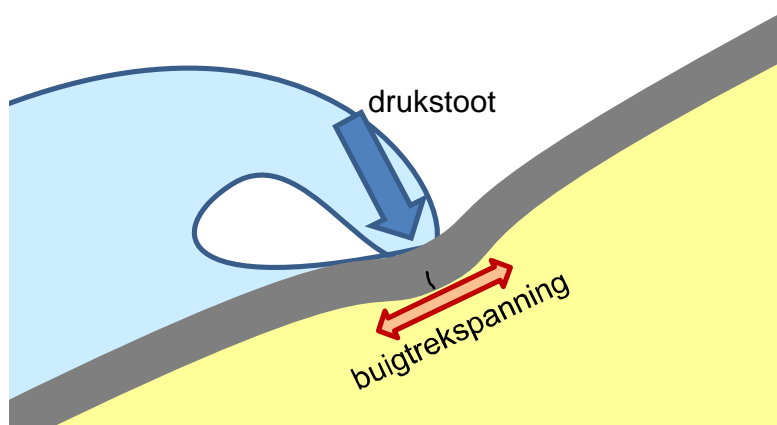
Een asfaltbekleding moet een aaneengesloten geheel blijven vormen om weerstand te bieden aan de optredende hydraulische belastingen, teneinde erosie van de ondergrond te voorkomen. Een golf die het talud treft, veroorzaakt een drukstoot op de bekleding. De bekleding moet hiertegen voldoende weerstand bieden en mag niet bezwijken onder de (herhaalde) golfbelasting. In de volgende sub-paragrafen worden de volgende bezwijkmechanismen behandeld:

- Bezwijken op buiging, door overschrijden van de vermoeiingssterkte door golfklappen.
- Bezwijken op dwarskracht door golfklappen.
- Bezwijken van de ondergrond door golfbelastingen.

#### 6.3.1 Overschrijden van de vermoeiingssterkte door golfklappen

Bij een maatgevende storm wordt het asfalt gedurende enige tijd (enkele uren tot een dag) belast door herhaalde golfklappen (brekende golven). Deze geven aanleiding tot herhaalde deformatie en dientengevolge trekspanningen aan de onderzijde van de bekleding, zie Figuur 6.1. Deze herhaalde trekspanningen leiden bij een te zwakke bekleding tot vermoeiing van het asfalt, zodat er trekscheuren aan de onderzijde van het asfalt ontstaan: de bekleding bezwijkt.

Volgens het gangbare rekenmodel wordt het moment waarop de scheuren vanaf de onderzijde door de bekleding gaan groeien aangemerkt als falen van de bekleding.



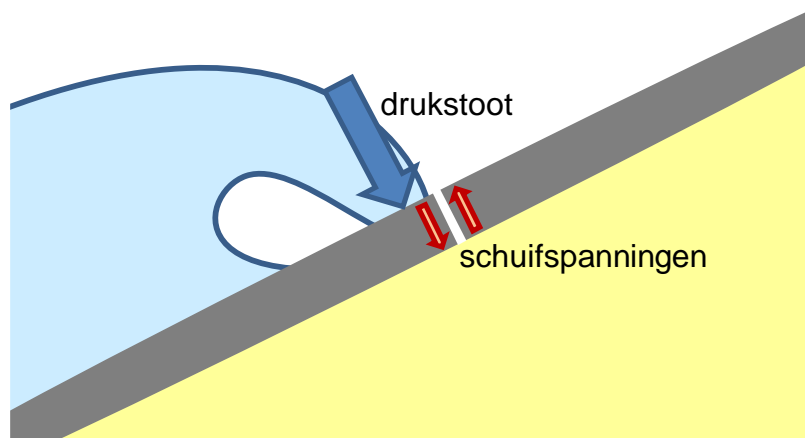
Figuur 6.1 Mechanisme overschrijden van de buigtreksterkte door golfklappen

Bij aanhoudende belasting kan het asfalt zodanig deformeren dat deze scheuren doorgroeien naar de bovenzijde van het asfalt. Het laatste stuk van de asfaltdoorsnede, de trekzone, zal waarschijnlijk doorscheuren als gevolg van dwarskracht. Er ontstaat een doorgaande scheur die als gevolg van een beperkte afschuiving of simpelweg temperatuursvervormingen open kan gaan staan. Hierdoor komt het zandlichaam (of de onderlaag indien aanwezig) gedeeltelijk bloot te liggen. Er treedt dan uitspoeling op, waarbij in het geval van een zandonderlaag het asfalt snel wordt ondermijnd. Als gevolg van deze ondermijning zal het asfalt instorten, waardoor er grotere gaten in de bekleding ontstaan en het asfalt nauwelijks meer bescherming biedt tegen erosie door de golven. Het zandlichaam zal bij een normale (smalle) dijk snel (d.w.z. binnen één winterstorm) eroderen.

In het geval van een onderlaag (klei, keileem, zandasfalt, breed gegradeerd granulair materiaal) kan de resterende sterkte aanzienlijk zijn. De uitspoeling door een scheur of gat zal aanzienlijk trager verlopen; het ontstaan van een bres vraagt een aanzienlijk langere belastingduur.

### 6.3.2 Bezwijken op dwarskracht door golfklappen

Als een (geconcentreerde) belasting op een asfaltbekleding wordt uitgeoefend, zullen direct naast de belasting schuifspanningen in de bekleding ontstaan ten gevolge van de optredende dwarskrachten. Deze schuifspanningen mogen de kritische schuifsterkte van de bekleding niet overschrijden.



Figuur 6.2 Mechanisme afschuiving door golfklappen

Als een asfaltbekleding met een geringe laagdikte wordt aangelegd ( $d < 10$  cm), kan dit mechanisme optreden. In de Nederlandse praktijk van de primaire waterkeringen is dit mechanisme bij belasting door golven nooit maatgevend omdat een asfaltbekleding op zand altijd met een laagdikte van ten minste 15 cm wordt aangelegd. Als er echter ook zware onderhoudsvoertuigen op de dijk kunnen komen, dan zal de wiellast al snel de maatgevende dwarskracht opleveren.

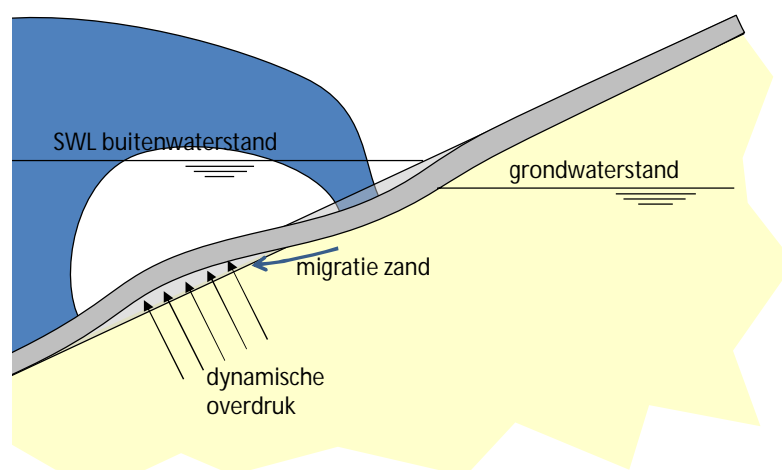
### 6.3.3 Bezwijken van de ondergrond door golfbelastingen

Over bezwijken van de ondergrond door golfbelastingen is relatief weinig bekend. Dit mechanisme zou kunnen optreden bij extreem zware golfaanval, d.w.z. bij significante golfhoogte van ongeveer 3 meter of meer, of in geval van een hoge grondwaterstand onder de bekleding. Als het draagvermogen van de ondergrond tekort schiet treden grote vervormingen van de ondergrond op waarbij ook de asfaltbekleding bezwijkt. Mechanismen die mogelijk kunnen optreden zijn:

- *Verweken van de ondergrond door golfaanval.* Verweking van de ondergrond ontstaat als een (plotselinge) belastingsverhoging op een verzadigde grond leidt tot een situatie waarbij het korrelskelet de optredende spanningen niet meer kan dragen. Daardoor vervormt deze en neemt een dichtere pakking aan. Hierdoor wordt de belasting volledig gedragen door het poriënwater en levert de ondergrond geen schuifweerstand meer. Daardoor treden er grote vervormingen in de ondergrond op die kunnen leiden tot het bezwijken van de bekleding. Voorwaarde voor het ontstaan van verweking is dat de ondergrond met water is verzadigd. Daarnaast neemt de kans op verweking toe naarmate de verdichtingsgraad van het zand lager is en naarmate de golfbelasting hoger is.
- *Afschuiven van de bekleding.* Golfaanval op de bekleding in combinatie met waterdruk onder de bekleding kan er toe leiden dat de asfaltbekleding onder zijn eigen gewicht wegschuift richting de teen van de dijk. Als de bekleding aan de onderzijde ondersteund wordt door een voldoende sterke teenconstructie of lager op het talud gelegen steenzetting die niet afschuift of faalt, dan is er geen afschuiven van de asfaltbekleding langs het talud mogelijk. De rekenregel voor de beoordeling op wateroverdrukken (par. 6.4) gaat ervan uit dat een afschuiving van de toplaag langs het talud niet mogelijk is.
- *Vorming van een S-profiel.* Door langdurige golfaanval in dezelfde zone kan er vervorming van de ondergrond optreden die leidt tot een S-profiel. Doordat de bekleding niet alleen inverteert onder golfaanval maar ook enigszins opbolt hoger en lager op het



- talud, kan afstromend grondwater gronddeeltjes onder de bekleding verplaatsen. Als dit proces zich maar lang genoeg herhaalt, zal een S-profiel ontstaan, zie Figuur 6.3. Te grote vervorming leidt tot bezwijken van de bekleding.
- *Bezwijken van de ondergrond.* Als de spanningen die een golfbelasting veroorzaakt te hoog zijn, kan dit leiden tot bezwijken van de ondergrond. Overschrijding van de kritische schuifspanning leidt dan dus tot plastische (blijvende) deformatie in de ondergrond. Tot op zekere hoogte kan een asfaltbekleding vervormingen volgen, maar te grote vervorming leidt tot bezwijken van de bekleding.



Figuur 6.3 Vorming S-profiel door combinatie van ontlasten door golfterugtrekking en belasten door golfklap

De mechanismen genoemd in deze sub-paragraaf zijn uitgesloten door de toepassingsvoorwaarden voor het rekenmodel voor golfklappen. Wanneer significante golfhoogten van meer dan 3 m kunnen optreden, of bij een grondwaterstand achter de asfaltbekleding, dient aandacht aan deze mechanismen te worden besteed.

#### 6.4 Bezwijken ten gevolge van wateroverdrukken

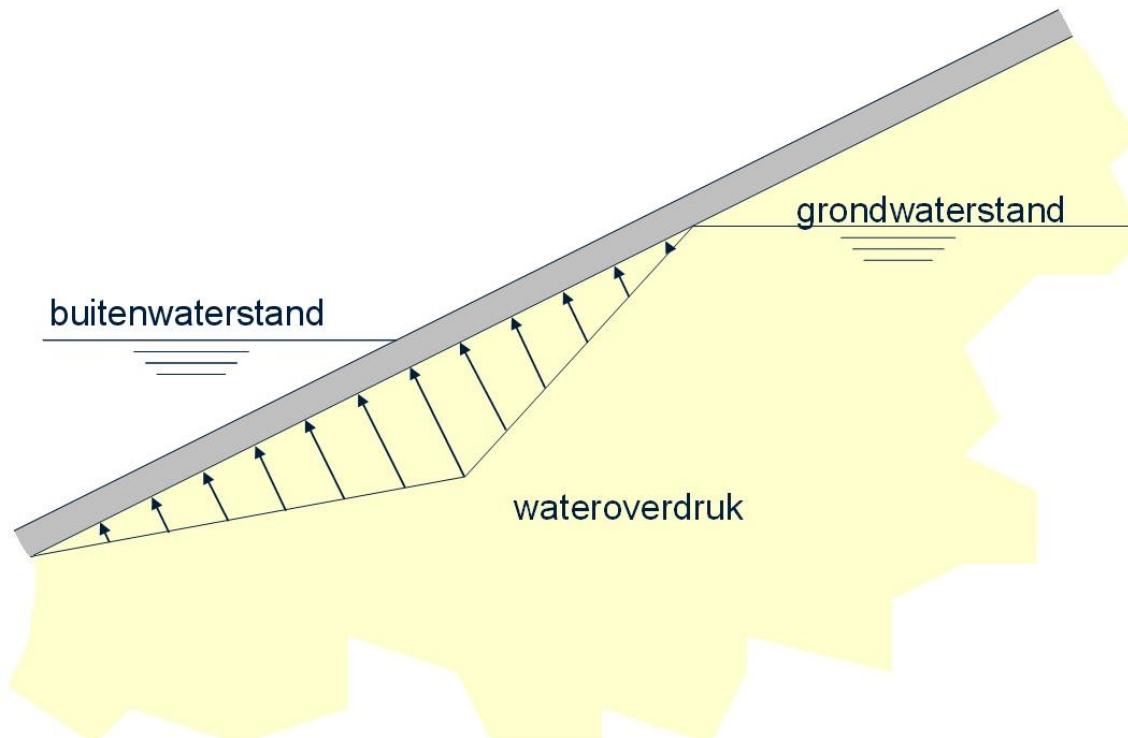
Bij niet-doorlatende dijkbekledingen kunnen wateroverdrukken onder de bekleding ontstaan. Bij niet-doorlatende asfaltbekledingen gaat het vooral om waterbouw-asfaltbeton en vol en zat gepenetreerde breuksteenbekledingen.

Een bekleding van open steenasfalt is altijd zodanig doorlatend dat statische overdrukken onder deze asfaltlaag nooit een probleem mogen opleveren. Echter als de open steenasfaltbekleding op een onderlaag van klei is aangelegd, dan is het denkbaar dat door de geringe doorlatendheid van de kleilaag de combinatie van toplaag en onderlaag ook kan opdrijven. Voor een dergelijke constructie zal echter al vrij snel blijken dat het totale pakket voldoende massa heeft.

Bij het optreden van een hoge buitenwaterstand zal de freatische lijn in het dijklichaam stijgen door het grote stijghoogteverschil tussen de buitenwaterstand en de grondwaterstand in het dijklichaam. Een extreme waterstand kan worden gevolgd door een snelle val van de buitenwaterstand. De grondwaterstand volgt vertraagd, waardoor de bekleding wordt belast door een opwaartse wateroverdruk, zie Figuur 6.4. Het gaat bij dit mechanisme dus om de statische wateroverdruk die wordt veroorzaakt door het niveauverschil tussen de grondwaterstand onder de bekleding en de stilwaterlijn die de belasting levert op de bekleding.

Voor bekledingen van waterbouw-asfaltbeton en gepenetreerde breuksteen aangelegd op een zanddijk wordt verondersteld dat de dynamische belasting door golfterugtrekking geen

invloed heeft, omdat de trage toestroming van water over de lange lekweg verhindert dat oplichten gedurende een tijdsduur van de golfterugtrekking plaatsvindt.



Figuur 6.4 Mechanisme wateroverdruk onder de bekleding

Wanneer de opwaartse druk van het water groter is dan de component loodrecht op het talud van het eigen gewicht van de bekleding per  $m^2$ , zal de bekleding plaatselijk worden opgelicht. In de ruimte die tussen de bekleding en de ondergrond ontstaat, zal zich vervolgens materiaal ophopen dat wordt verplaatst door het grondwater dat onder de bekleding naar beneden wegstroomt. Hierdoor kan de bekleding niet meer naar zijn oorspronkelijke positie terugkeren. Aangezien de maximale wateroverdruk optreedt om en nabij de buitenwaterstand, zal het oplichten plaatsvinden in de zone waar ook golfklappen inslaan. Alhoewel dit proces nooit is gemodelleerd, mag worden verwacht dat de deformaties die optreden als gevolg van de golfbelasting op de opgelichte asfaltbekleding veel groter zijn dan wanneer de bekleding nog door een zandbed wordt ondersteund.

Evenals bij falen als gevolg van golfklappen kan bij doorgaande belasting het asfalt zodanig deformeren dat zich scheuren ontwikkelen over de gehele dikte van de asfaltbekleding. Hierdoor komt het zandlichaam (of de onderlaag indien aanwezig) gedeeltelijk bloot te liggen. Indien de waterstand daarna weer hoger wordt, kan er uitspoeling optreden, waarbij in het geval van een zandonderlaag het asfalt snel wordt ondermijnd. Als gevolg van deze ondermijning zal het asfalt instorten, waardoor er grotere gaten in de bekleding ontstaan en het asfalt nauwelijks meer bescherming biedt tegen erosie door de golven. Het zandlichaam zal bij een normale (smalle) dijk snel (d.w.z. binnen één winterstorm) eroderen. In het geval van een onderlaag (klei, keileem, zandasfalt, breed gegradeerd granulair materiaal) is er nog sprake van meer resterende sterkte.

## 6.5 Materiaaltransport van onder de bekleding

De asfaltbekleding moet voorkomen dat materiaal uit het dijklichaam kan uitspoelen. Tijdens de gebruiksfase van een asfaltbekleding kunnen door verschillende oorzaken schades optreden die kunnen leiden tot materiaaltransport vanuit de ondergrond. De oorzaken kunnen zijn:

- Veroudering van het materiaal zoals in paragraaf 6.2 is behandeld in combinatie met temperatuurspanningen/-vervormingen.
- Bijzondere belastingen die scheuren of gaten in de bekleding veroorzaken, zoals scheepsaanvaringen, kruiend ijs en te zwaar onderhoudsmaterieel op de dijk.
- Het open gaan staan van overgangs- of aansluitingsconstructies ten gevolge van constructiefouten, door zetting van het dijklichaam of door grondmechanische instabiliteit.

Materiaaltransport treedt op als de schade aan de bekleding (scheuren, gaten) zo groot is dat er ondergrondmateriaal door heen kan worden getransporteerd en als er een mechanisme aanwezig is dat zorgt voor transport van het materiaal. Dit betekent dat een scheur of een openstaande naad over de volledige bekledingsdikte doorgaand moet zijn en enige scheurwijdte moet hebben.

Ook zonder golfaanval kan er onder dagelijkse omstandigheden soms al sprake zijn van enig materiaaltransport. Als er een hoge grondwaterstand in het dijklichaam aanwezig is, kan het uitstromende grondwater het ondergrondmateriaal transporteren. Ook bodembewoners (mieren, muizen en mollen) kunnen voor materiaaltransport onder dagelijkse omstandigheden zorgen.

De genoemde schades treden op tijdens de gebruiksfase onder reguliere omstandigheden. Dit betekent dat een beheerder doorgaans voldoende tijd heeft om optredende schade te herstellen.

Daarnaast zijn er twee mechanismen specifiek van toepassing voor een vooroeverbescherming. Dit betreft het opdrukken van de vooroeverbescherming door golfbeweging en ontgronding van de deels beschermde vooroever. Deze twee mechanismen kunnen invloed hebben op de stabiliteit van het bovengelegen talud met bekleding en staan beschreven in de Handreiking Dijkbekledingen, Deel 3 Asfaltbekledingen [12]: hoofdstuk 12 'Faalmechanismen asfaltbekledingen'.

## 6.6 Erosie bekledingsoppervlak

Het mechanisme 'erosie bekledingsoppervlak' is vooral van toepassing op open steenasfalt (OSA). Waterbouwasfaltbeton en vol en zat gepenetreerde breuksteen zijn duurzamer en vertonen door het dichte mengsel veel meer samenhang.

Individuele stenen kunnen uit een bekleding van open steenasfalt losraken doordat deze worden belast door bijvoorbeeld drijvend vuil, rollende stenen uit een ondergelegen steenbestorting of doordat achtergebleven water bij opvriezen stenen uit de bekleding drukt. Deze erosie kan beginnen voordat er sprake is van de maatgevende omstandigheden. Als de laagdikte door erosie te ver is afgenomen, zal de bekleding onvoldoende sterkte bezitten om de maatgevende golfbelastingen, zie paragraaf 6.3, te weerstaan.

De sterkte van de asfaltmestiek, die de stenen bij open steenasfalt omhult en aan elkaar hecht, bepaalt de weerstand tegen erosie. Een grotere dikte van de omhulling verhoogt de weerstand tegen erosie.

De weerstand van open steenasfalt tegen erosie vermindert door de inwerking van zuurstof en water. Door oxidatie wordt het bitumen brosser. Hierdoor neemt weliswaar de sterkte toe, maar de weerstand tegen vervormen neemt af en bij belasting zullen er eerder individuele stenen uit de bekleding verdwijnen.

Water kan op de lange termijn de hechting tussen het bitumen en de steen aantasten waardoor de sterkte vermindert (stripping). Daarom is het van belang dat er een combinatie van steen en bitumen wordt gekozen die een goede affiniteit met elkaar hebben om een optimale, duurzame hechting tussen steen en bitumen te realiseren.

Of er sprake is van steenverlies door stripping of door veroudering kan worden bepaald aan de hand van het aangetaste oppervlak. In het eerste geval toont het oppervlak de afdruk van de verdwenen steen, in het tweede geval is sprake van breuk van de mortel.

Erosie van open steenasfalt treedt bij bekledingen gelegen in de getijzone op tijdens de gebruiksfase. Dit betekent dat een beheerder in die gevallen doorgaans voldoende tijd heeft om optredende schade te herstellen.

## 6.7 Resterende sterkte

Als de asfaltbekleding door golfklappen begint te scheuren, beschermt de bekleding de ondergrond nog steeds tegen erosie: de bekleding bezwijkt, maar faalt nog niet werkelijk. Voordat van falen van de asfaltbekleding sprake is, moeten nog enige processen worden doorlopen. De scheur die onderin de bekleding ontstaat, moet doorscheuren naar het oppervlak en zal open moeten gaan staan alvorens er sprake kan zijn van enig zandverlies.

Als zich eenmaal een geopende scheur in de bekleding bevindt en de schadeplek wordt belast door golven en de bekleding ligt direct op de zandkern, dan zal de bekleding binnen een uur waarschijnlijk dusdanig worden ondermijnd dat de bekleding instort. Er ontstaat dan een aanzienlijk gat waardoor het zandlichaam feitelijk niet meer (afdoende) wordt beschermd tegen erosie: de bekleding faalt.

Vervolgens gaat grootschalige erosie van het dijklichaam optreden. Bedacht moet worden dat tijdens de fase waarin de erosie van het dijklichaam optreedt, het dijklichaam deels ook niet beschermd is tegen infiltratie. Daardoor kan de freatische lijn in de dijk sneller stijgen dan wanneer er nog geen sprake is van infiltratie via de beschadigde taludgedeeltes. Hierdoor kunnen ook andere vervolgmecanismen (bijvoorbeeld een afschuiving binnenwaarts) het resterende dijklichaam verder aantasten.

Behalve door bezwijken van de bekleding zelf kan een asfaltbekleding op het buitentalud ook beschadigd worden door andere mechanismen: buitenwaartse macro-instabiliteit, golfafslag voorland, afschuiven voorland en/of een zettingsvloeiing. Als er een grootschalige afschuiving of vloeiing optreedt waarbij ook een deel van het buitentalud wordt beschadigd, dan zal de bekleding en de eventuele onderlaag zodanig beschadigd raken dat de bekleding niet meer in staat is het dijklichaam effectief te beschermen tegen erosie. Een dergelijk mechanisme beschadigt de bekleding dan meteen zodanig dat de bekleding faalt.

## 6.8 Overzicht van het faaltraject door bezwijken van de asfaltbekleding

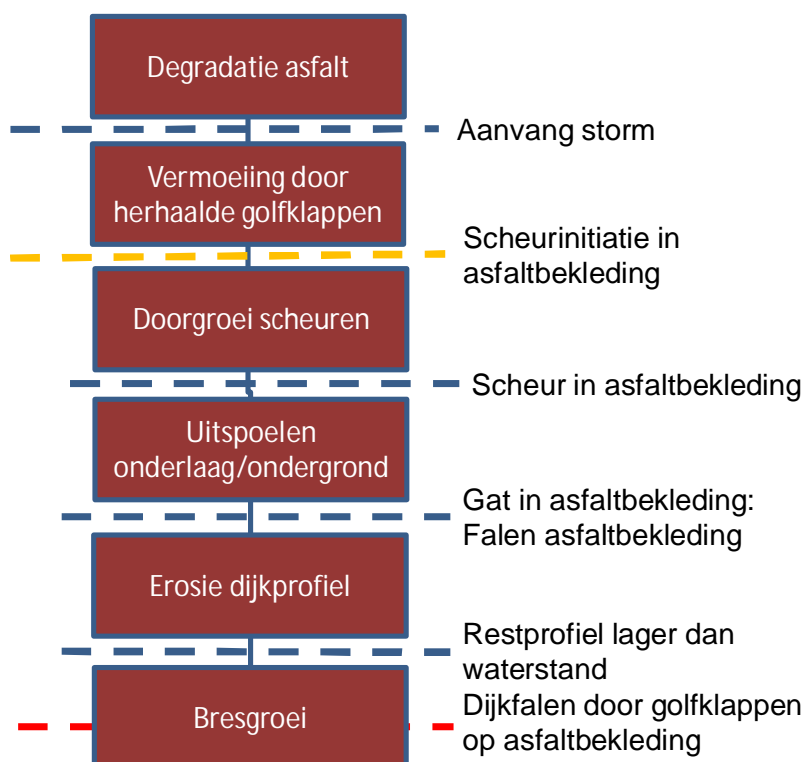
### 6.8.1 Inleiding

In de volgende twee sub-paragrafen zijn de processen leidend tot falen van de waterkering als gevolg van het bezwijken van de asfaltbekleding in een schema gevat. Het gaat daarbij om de processen waarmee in een beoordeling rekening kan worden gehouden.

Bijzondere belastingen zoals schade door begroeiing, aanvaring en ijsgang zijn niet opgenomen, omdat die belastinggevallen niet per se hoogwater-gerelateerd zijn. Dit betekent dat een beheerder bij schade door die belastingen doorgaans voldoende tijd heeft om de schade te herstellen.

Om het schema niet te overladen, zijn de faalmechanismen bezwijken ten gevolge van golfklappen en bezwijken ten gevolge van wateroverdruk, apart behandeld. Onderin de schema's tonen zij vergelijkbare stadia en processen.

### 6.8.2 Traject van initiatie tot falen ten gevolge van golfklappen



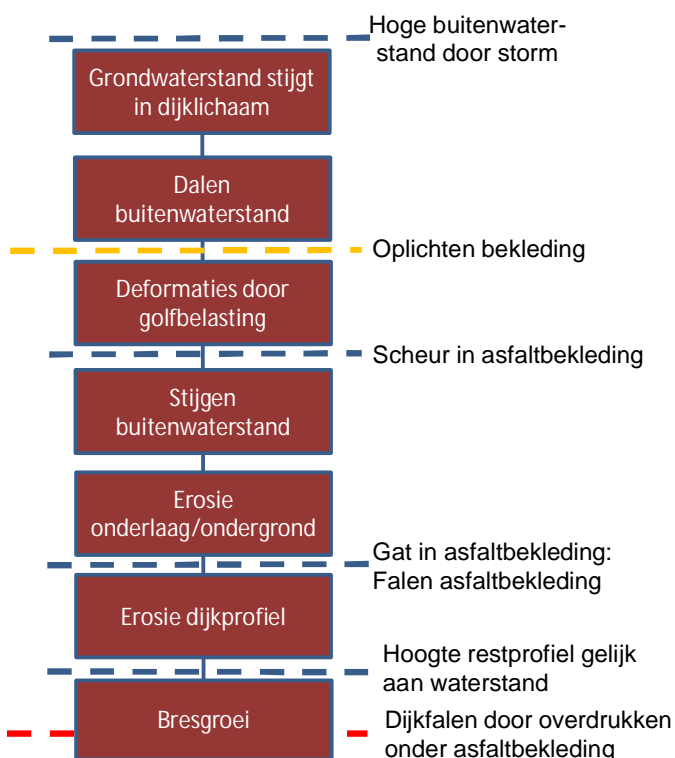
Figuur 6.5 Traject leidend tot falen van de dijk ten gevolge van golfklappen

De belasting op de bekleding bestaat uit de golfhoogte, golfperiode, stormduur en waterstandsverloop. De weerstand tegen golfklappen wordt bepaald door de laagdikte, breuksterkte en vermoeiingseigenschappen, stijfheid van de bekleding en beddingsconstante van de ondergrond. De invloeden van de relevante parameters op het bezwijkmechanisme zijn de volgende:

- **Golfhoogte.** De significante golfhoogte bepaalt de grootte van de drukstoot die op de bekleding wordt uitgeoefend. Hogere golven leiden tot grotere drukstoten.

- **Golfperiode.** Een kortere gemiddelde golfperiode leidt tot meer golfklappen tijdens een storm en leidt per belastingduur dus tot een iets hogere vermoeiingsschade aan het asfalt.
- **Stormduur.** Een langere stormduur leidt tot meer golfklappen tijdens een storm en levert dus een grotere vermoeiingsschade aan het asfalt.
- **Waterstandsverloop.** Het waterstandsverloop bepaalt de mate waarin de belasting over verschillende zones van de bekleding worden gespreid. Een grotere spreiding resulteert in een wat lagere vermoeiingsschade.
- **Laagdikte.** Een grotere laagdikte zorgt voor lagere buigspanningen in het asfalt en dus voor een grotere weerstand tegen golfklappen.
- **Breuksterkte.** Een hogere breuksterkte betekent dat de maximaal toelaatbare spanningen in het asfalt hoger zijn en leidt dus tot een grotere weerstand tegen golfklappen.
- **Stijfheid.** Een hogere stijfheid van de bekleding zorgt voor hogere spanningen in het asfalt en leidt tot een kleinere weerstand tegen golfklappen.
- **Beddingsconstante.** Een hogere beddingsconstante van de ondergrond zorgt voor een geringere doorbuiging van de asfaltbekleding en dus lagere spanningen in het asfalt.
- **vermoeiingsparameters.** Deze parameters beschrijven de vermoeiingssterkte van het asfalt. Dit zijn empirische fit-parameters die niet meteen een fysische betekenis hebben.

### 6.8.3 Gebeurtenissen tot dijkfalen ten gevolge van opdrukken door wateroverdruk



Figuur 6.6 Traject leidend tot falen van de dijk ten gevolge van opdrukken

De belasting voor de situatie die bij het rekenkundig falen wordt beoordeeld, bestaat uit het verschil tussen de grondwaterstand en de buitenwaterstand. Dit verschil wordt beïnvloed door de maximale buitenwaterstand, de snelheid waarmee de buitenwaterstand daalt na optreden van het hoogwater en de doorlatendheid van de ondergrond. Ook de afstrommogelijkheden

naar het achterland, de openheid van de teenconstructie en de ligging van de onderzijde van de gesloten bekleding beïnvloeden de maximaal optredende wateroverdruk onder de bekleding. De weerstand tegen de optredende wateroverdruk wordt geleverd door de laagdikte en de dichtheid van de bekleding.

De invloeden van de relevante parameters op het mechanisme zijn de volgende:

- *Maximale buitenwaterstand.* Een hogere maximale buitenwaterstand leidt tot een groter stijghoogteverschil tussen buitenwaterstand en grondwaterstand waardoor het grondlichaam zich sneller en tot hoger zal vullen met water.
- *Val van de buitenwaterstand.* Een snellere val van de buitenwaterstand zorgt voor een groter verschil tussen de grondwaterstand en de buitenwaterstand en dus voor een hogere wateroverdruk onder de bekleding.
- *Doorlatendheid ondergrond.* Bij een kortdurende maatgevende periode zoals een storm op zee leidt een lagere doorlatendheid van de ondergrond tot een geringere wateroverdruk onder de bekleding omdat de freatische lijn in het grondlichaam minder hoog zal komen. Bij een langer durende maatgevende periode zoals een hoogwatergolf in het rivierengebied kan deze situatie anders zijn. Omdat hier nauwelijks tot geen gesloten bekledingen op zand voorkomen, wordt hier niet nader op ingegaan.
- *Niveau onderrand van gesloten bekleding.* Een laag niveau van de onderrand van de gesloten bekleding maakt dat de wateroverdruk bij een vallende buitenwaterstand hoog oploopt, gegeven een hoog opgelopen grondwaterstand.
- *Laagdikte.* Een grotere laagdikte vergroot het gewicht van de bekleding en biedt dus een grotere weerstand tegen de optredende wateroverdruk.
- *Dichtheid bekleding.* Een hogere dichtheid van de bekleding vergroot het gewicht van de bekleding en biedt dus een grotere weerstand tegen de optredende wateroverdruk.
- *Taludhelling.* De *taludhelling* heeft een beperkte invloed op de weerstand tegen de optredende wateroverdruk: hoe steiler de helling, hoe minder weerstand.

De relevante belastingen in het resterende sterkte-deel van het faaltraject zijn het waterstandsverloop en de golven. Die bepalen of en hoe lang het door opdrukken beschadigde taluddeel wordt belast.





## 7 Stabiliteit bekleding gras

### 7.1 Inleiding

Grasbekledingen kunnen op de dijk zowel op het buitentalud, op de kruin, als op het binnentalud aanwezig zijn. Afhankelijk van de hoogteligging van de bekleding ten opzichte van de waterstanden die kunnen optreden krijgt de bekleding verschillende belastingen te verwerken. Op het buitentalud, even onder de waterlijn wordt de bekleding belast door golfklappen; op het buitentalud boven de waterlijn is er sprake van golfoploop die de bekleding belast. Als de dijk niet al te hoog is, worden kruin en binnentalud belast door golfoverslag. Voor al deze belastingen die leiden tot erosie, geldt dat discontinuïteiten in de bekleding tot lokaal hogere belastingen en dus grotere erosie leiden.

Andere storm gerelateerd belastinggevallen die schade aan grasbekledingen kunnen opleveren, zijn (ook) gerelateerd aan een relatief hoge grondwaterstand. Door hoogwater stijgt de grondwaterspiegel in de dijk en dat kan zodanig zijn dat het binnentalud als gevolg van uittredend grondwater instabiel wordt. Dit mechanisme, micro-instabiliteit wordt beschreven in hoofdstuk 5. Is er sprake van veel golfoverslag, dan zal er veel water via het binnentalud infiltreren. Dat kan leiden tot afschuiven van het binnentalud. Bij een hoge grondwaterstand in de dijk in combinatie met golfsterugtrekking kan de grasbekleding van het buitentalud instabiel worden.

Voor grasbekledingen zijn er vier faalmechanismen onderscheiden die in dit hoofdstuk worden behandeld:

- Erosie buitentalud (golfklap- en golfoploopzone).
- Afschuiven buitentalud.
- Erosie kruin en binnentalud.
- Afschuiven binnentalud.

De volgende vier paragrafen gaan in op deze mechanismen.

### 7.2 Erosie grasbekleding op buitentalud

#### 7.2.1 Inleiding en afbakening

Erosie van de grasbekleding op het buitentalud treedt op als gevolg van twee belastingtypes: de golfklap- en de golfoploop-belasting. Ook stroming langs de dijk kan tot enige erosie leiden, maar hieraan wordt in deze rapportage geen aandacht besteed.

De grondlaag tot ca. 20 cm onder maaiveld levert de belangrijkste sterkte tegen erosie. Deze laag bevat in elk geval de graszode, maar ook nog een stukje kleilaag onder de zode waar nog veel wortels in zitten en waar wortels nog een grote positieve bijdrage leveren aan de erosiebestendigheid van de grond. De kleilaag onder deze toplaag levert ook nog een bijdrage aan de erosie-sterkte, maar wordt voor dit mechanisme niet gerekend tot de grasbekleding.

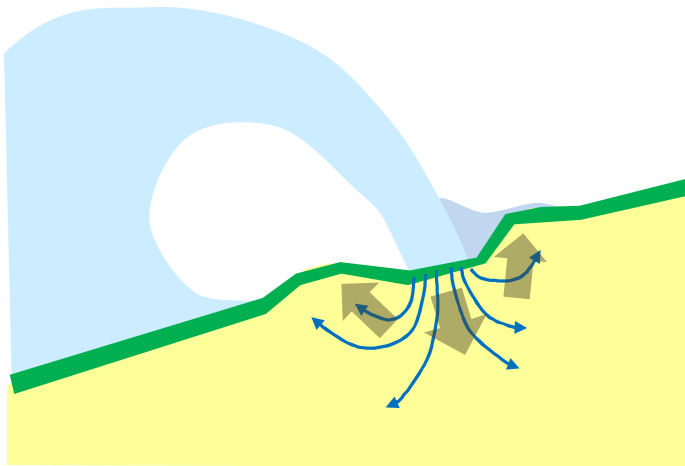
De golfklapbelasting treedt op rond, maar vooral onder de waterlijn. Grofweg ligt de belasting in de zone tussen een kwart significante golfhoogte boven het waterpeil en een significante golfhoogte onder het waterpeil. Het zwaartepunt van de klappen ligt een halve significante golfhoogte onder het waterpeil.

Met het verloop van het waterpeil gedurende een hoogwatergolf of stormopzet varieert dus ook de plek waar de golfklappen optreden. Golfloop treedt op in de zone boven het waterpeil, tot de hoogte die door de oplopende golftong wordt bereikt. Ook deze zone varieert dus met de waterstand en de golfcondities.

## 7.2.2 Fenomenologische procesbeschrijving van erosie buitentalud

### 7.2.2.1 Erosie door golfklappen

Een golfklap door een brekende golf op het talud geeft een kortdurende lokale hoge waterdruk op het talud. Deze drukpuls dringt door in de zode en de onderliggende dijk en veroorzaakt hier drukgradiënten die de zode kunnen beschadigen en delen ervan verwijderen uit de grasbekleding. Tijdens het optreden van de piekdruk wordt de zode naar binnen, zijwaarts en naar buiten gedrukt, zie Figuur 7.1 (overgenomen uit [17]). Net na het wegvallen van de druk door de golfklap, kan er een situatie ontstaan waarbij in en onder de zode nog even een overdruk aanwezig is, waardoor een buitenwaarts gerichte drukgradiënt ontstaat die de zode naar buiten drukt. Bij grote golfklappen wordt grond plastisch en treden irreversibele vervormingen op. Dit alles gebeurt in heel korte tijd, in een fractie van de golfperiode.

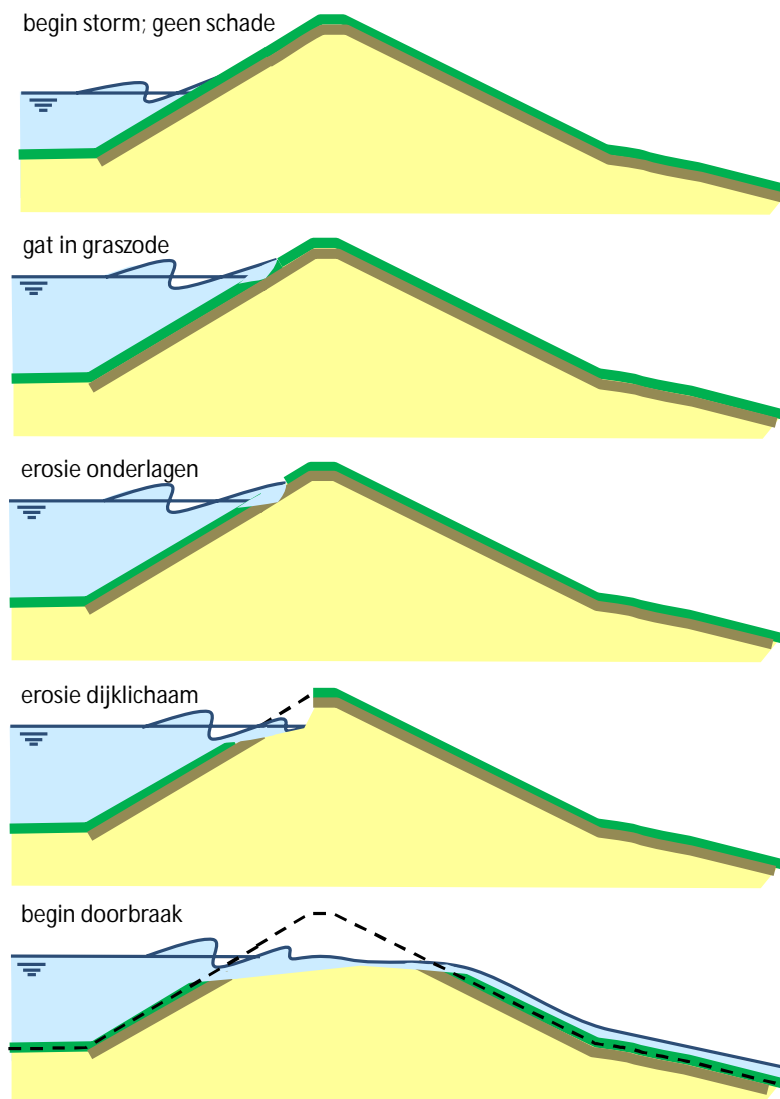


Figuur 7.1 Schetsmatige weergave van een golfklap op het talud, de grondwaterstroming (dunne blauwe peilen) en grondverplaatsing (dikke bruine peilen)

Een dicht gewoven wortelnet van een graszode heeft een grote sterkte en veerkracht. Uit golfgoetproeven en ervaringen tijdens hoogwater in het verleden is gebleken dat de dichtheid van het wortelnet een veel belangrijker factor is in de erosiebestendigheid van de grasbekleding dan de erosiebestendigheid van de grond [16]. Een gesloten zode met een gesloten wortelnet op een weinig erosiebestendige schrale grond zal een golfklapbelasting veel langer kunnen weerstaan dan een open zode met een minder dicht wortelnet in combinatie met een erosiebestendige grond. Een dicht wortelnet houdt de grond in de zode op een effectieve manier vast. Echter, onder herhaalde belastingen van golfklappen kan het wortelnet uiteindelijk toch scheuren en eroderen. Dit is het eerste deelmechanisme dat wordt onderscheiden bij het falen als gevolg van erosie van de grasbekleding. Zowel de golfhoogte als de tijdsduur van de golfklapbelasting zijn hierbij van belang.

Na het ontstaan van een gat in de graszode wordt de dijk aangesproken op erosie-sterkte, het tweede deelmechanisme dat wordt onderscheiden bij het falen als gevolg van erosie van de grasbekleding. De losse klei vlak onder de zode zal snel eroderen. Het gaat om de laag

van maaiveld tot circa 0,3 m diepte die bestaat uit een relatief losse stapeling van aggregaten, waar het wortelnet van de graszode afwezig is, of in elk geval niet meer zo effectief is als in de bovenste circa 0,2 m. De direct naast het gat gelegen zode wordt ondermijnd, doordat de losse grond van onder de zode kan wegspoelen. De randen van het ontstane gat in de zode kunnen ook aanleiding zijn voor een concentratie van de belasting. Bij verder gaande erosie van de klei onder de graszode ontstaat een flauw talud (terras) net onder de waterlijn en een steile wand bij de insteek van de erosiekuil, zie Figuur 7.2. Naar dit proces van erosie van de onderlagen, is veel onderzoek gedaan, mede door middel van grote golfgootproeven. In klei gaat dit proces uiteraard veel langzamer dan in zand. Als er zand aanwezig is, dan ligt het voor de hand om de erosie-sterkte te verwaarlozen. Voor klei wordt wel onderscheid gemaakt tussen de laag tot 0,5 m onder het taludoppervlak en klei die dieper zit. Aannemende dat de dijk een zandkern heeft met daarop een kleilaag met grasbekleding, kan falen van de grasbekleding ten gevolge van erosie door golfklappen worden gedefinieerd als het moment waarop de kleilaag lokaal tot een diepte van 0,5 m is weggeërodeerd (faalcriterium).



Figuur 7.2 Schetsmatige weergave faaltraject veroorzaakt door erosie grasbekleding door golfklappen

Als erosie leidt tot een resterend dijprofiel dat lager is dan de waterstand, dan overstroomt het achterland en faalt de dijk. Verlaging van het profiel beneden de waterstand kan optreden als gevolg van doorgaande erosie. Het is echter ook mogelijk dat gedurende het erosieproces, wanneer nog maar een deel van het dijklichaam is aangetast door erosie, er een ander mechanisme optreedt. Door het steeds smaller wordende profiel kan het binnentalud van de dijk eerder instabiel worden door toename van de waterspanningen in de dijk (micro- of macro-instabiliteit) of door overslaande golven (stabiliteit bekleding bij golfoverslag).

#### 7.2.2.2 Erosie door golfoploop

De belasting die erosie van de grasbekleding kan veroorzaken bestaat in geval van de oploopzone uit stroming door golfoploop en golfneerloop. De voor golfklappen karakteristieke waterdruk-puls blijft bij golfoploop achterwege.

Een met gras bekleed talud dat wordt blootgesteld aan golven zal als eerste falen in de golfklapzone, want de golfklapbelasting is maatgevend boven de golfoploopbelasting. In veel gevallen zal in de zone in het dijprofiel waar zware golfklappen worden verwacht een harde bekleding liggen en zal alleen het bovenste deel van het talud zijn bekleed met gras. Er zijn veel gevallen waarbij het gras boven de harde bekleding alleen door golfoploop en neerloop wordt belast. Opgemerkt wordt dat in dergelijke gevallen altijd sprake is van een overgang van een harde bekleding naar een grasbekleding. Deze overgang is een zwakke plek, omdat het de sterkte van het gras hier wat lager is en omdat de belasting door oneffenheid op de overgang en/of ruwheidsverschillen, juist wat hoger is.

De stroming van de oplopende en neergaande golftong is turbulent, waardoor de graszode wordt onderworpen aan een snel wisselende waterdruk. De drukwisselingen planten zich gedempt en vertraagd door in de zode en de hieronder liggende grondlagen. Hierdoor en door de ruimtelijke variabiliteit van de wisselende druk over het talud, wordt de zode blootgesteld aan binnen- en buitenwaarts gerichte drukgradiënten. De drukgradiënten met een buitenwaartse richtingscomponent kunnen op den duur stukken zode uit de grasbekleding trekken. De grootte van de belasting is afhankelijk van de laagdikte en snelheid van de golftong en van de turbulentie-intensiteit. Deze parameters zijn weer afhankelijk van de golfhoogte en van de hoogteligging van de te beoordelen graszode ten opzichte van de stilwaterlijn. Ook de stormduur, of eigenlijk de tijd dat een te beoordelen grasbekleding zich in de golfoploopzone bevindt, is van belang.

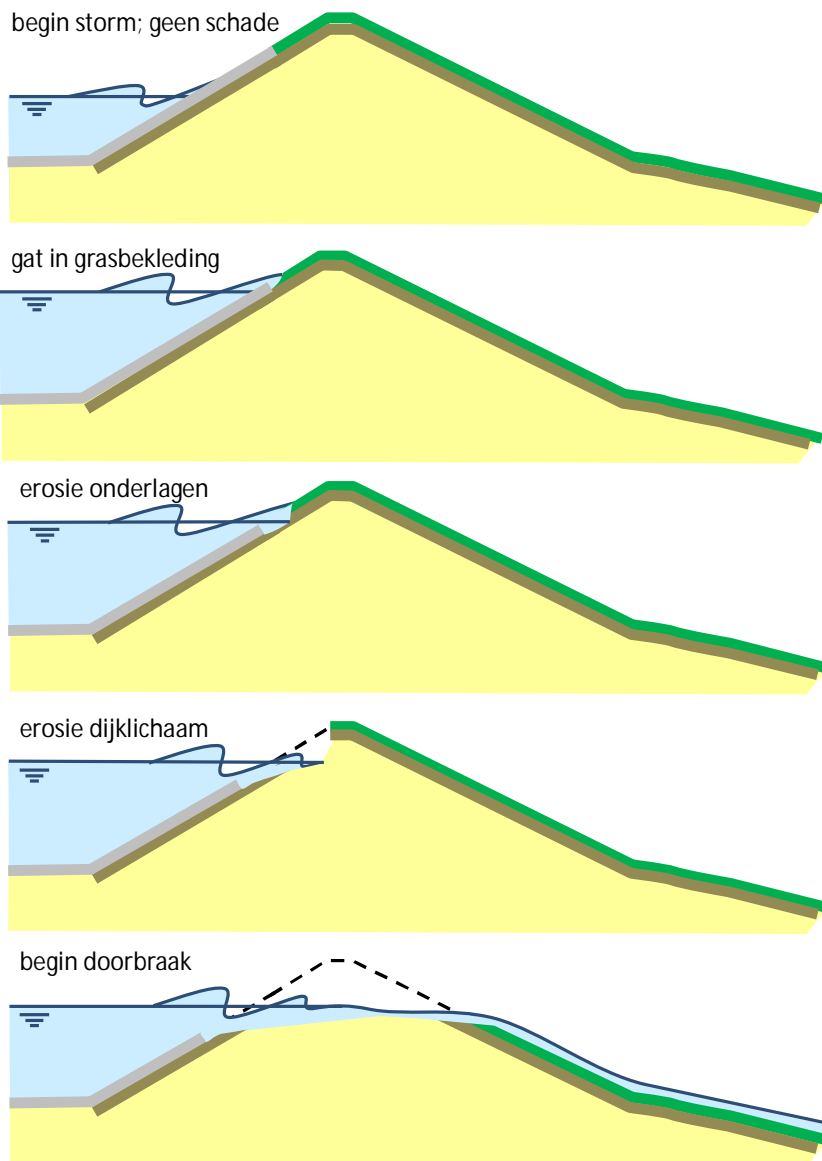
Uit drukmetingen bij golfoploopproeven nabij Colijnsplaat in Zeeland blijkt dat vooral bij golfoploop de graszode wordt belast met een snel wisselende druk. De amplitude van de drukwisselingen bij de neerloop zijn aanzienlijk kleiner. Ook de frontsnelheid van de oplopende golftong is aanzienlijk hoger dan de stroomsnelheid van de golfneerloop. Hieruit is afgeleid dat het vooral de golfoploop is die zorgt voor erosie en in veel mindere mate de golfneerloop. Tevens is geconstateerd dat vanaf de stilwaterlijn de golftong met min of meer constante frontsnelheid het talud op loopt tot circa 75% van de uiteindelijk te bereiken oploophoogte. In de laatste 25% neemt de snelheid af tot stilstand, waarna de stroming langzaam weer versnelt in neerwaartse richting.

Net als bij erosie door golfklappen wordt de weerstand tegen erosie bij golfoploop hoofdzakelijk verzorgd door het wortelnet van de graszode. Hoe dichter dat wortelnet hoe beter de zode bestand is tegen erosie. De erosiebestendigheid van de grond is minder belangrijk. Voor het verkrijgen van een dicht gewoven wortelnet is een goed beheer

noodzakelijk. Hierover is in de literatuur veel informatie te vinden, waarbij wordt opgemerkt dat het beheer moet zijn gericht op het verkrijgen van een dicht wortelnet.

Falen van de grasbekleding ten gevolge van erosie door golfoploop wordt gedefinieerd als het moment waarop de sterk doorworstelde toplaag met een dikte van circa 0,2 m lokaal wordt doorbroken en de erosie van de onderlaag begint (faalcriterium).

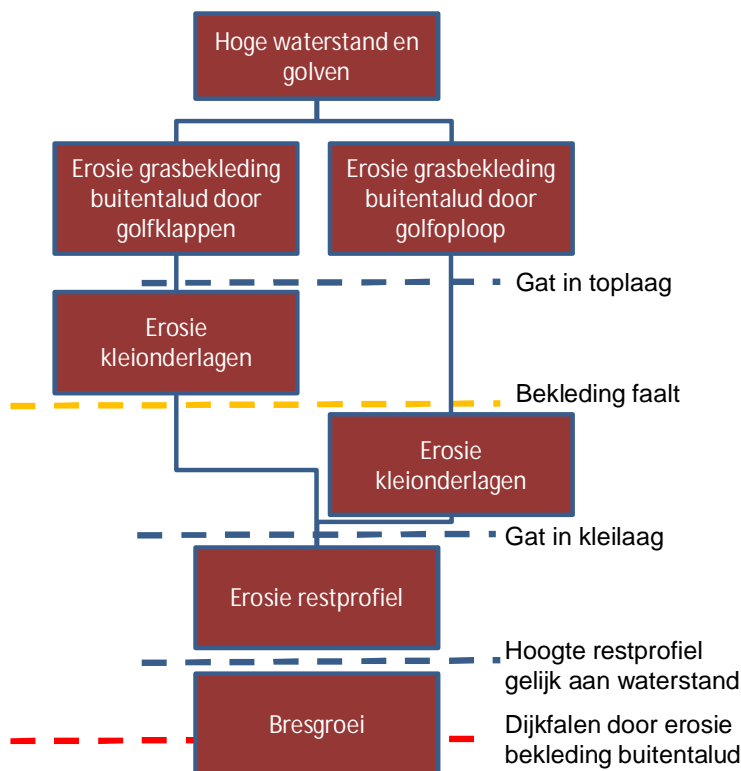
Na het falen van de grasbekleding kan de erosie van de onderlagen en de dijk kern uiteindelijk leiden tot kruindaling en uiteindelijk tot falen van de dijk. Dit is de resterende sterkte van de dijk na falen van de grasbekleding. Dit proces verloopt vergelijkbaar met dat bij falen van de grasbekleding door golfklappen (paragraaf 7.2.2.1), met dien verstande dat falen hoger op het talud zal plaatsvinden, waar het profiel smaller is, maar waar de belasting kleiner is. Er is weinig bekend over de resterende sterkte na falen van de graszode in de golfoploopzone. Het kan zijn dat een schade die optreedt ter plaatse van de overgang tussen de harde bekleding en de grasbekleding, eerst de harde bekleding zal ondermijnen tot het stil waterniveau, waarna eenzelfde terrasvormige erosiekuil ontstaat als na falen van het gras door golfklappen, zie Figuur 7.3. Als dit niet gebeurt, dan is het onbekend hoe snel de erosie kan voortschrijden.



Figuur 7.3 Schetsmatige weergave faaltraject veroorzaakt door erosie van de grasbekleding door golfoploop

## 7.2.3 Overzicht van het faaltraject erosie grasbekleding op buitentalud

Het traject dat leidt tot falen van de waterkering als gevolg van falen van de grasbekleding op het buitentalud als gevolg van golfklappen of golfoploop staat in Figuur 7.4. De linker tak in deze figuur heeft betrekking op een grasbekleding in de golfklapzone, de rechtertak betreft een grasbekleding in de golfoploopzone.



Figuur 7.4 Gebeurtenissen leidend tot falen dijk als gevolg van erosie van de grasbekleding op het buitentalud

### 7.3 Afschuiven grasbekleding buitentalud

#### 7.3.1 Inleiding en afbakening

Voor het mechanisme afschuiven wordt tot de grasbekleding gerekend het gras inclusief de kleilaag die op de ondergrond van zand ligt. Het mechanisme betreft stabiliteitsverlies van het geheel van graszode en kleilaag. De zandlaag zal in het algemeen de zandkern van een dijk zijn. Het is echter ook mogelijk dat sprake is van een plaatselijk aanwezige zandlaag of zandinsluiting onder de kleilaag (bijvoorbeeld een zogenaamde zandscheg). In geval de grasbekleding direct op een kleikern ligt, kan er geen afschuiving van de bekleding optreden.

De faalmechanismebesrijving is deels ontleend aan [15]. Deze studie is uitgevoerd met een steenzetting op een kleilaag op zand, maar het resultaat is evengoed toepasbaar voor een graszode op een kleilaag.

Hoewel we spreken van 'afschuiven', zou stabiliteitsverlies een betere benaming zijn. De kleilaag kan als gevolg van een te groot drukverschil over de kleilaag opdrukken, afschuiven of een combinatie van beide mechanismen vertonen.

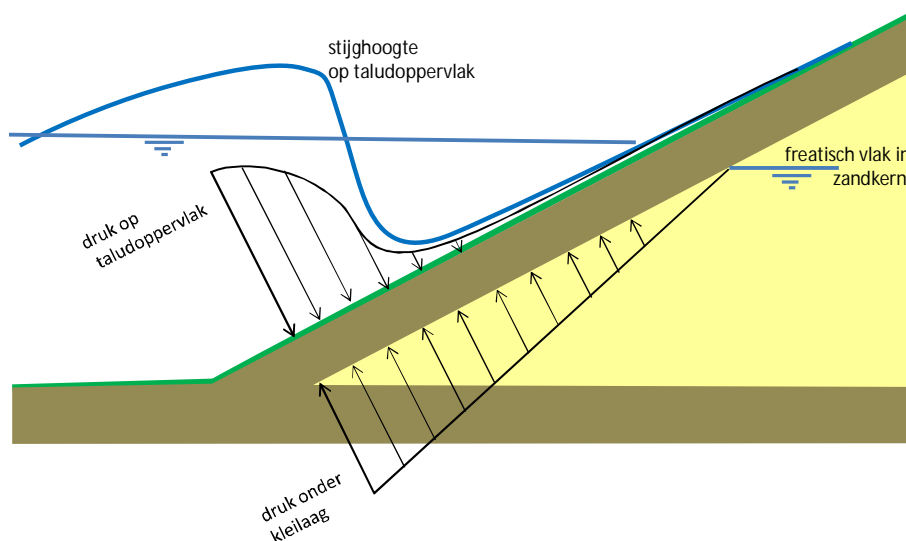
Dit mechanisme gaat niet om de gevolgen van golfklappen op de gras- en kleibekleding. Golfklappen zouden door een cyclische belasting van het onderliggende zand ook voor tijdelijke en gedeeltelijke verweking van het zand kunnen zorgen, waardoor de kleilaag plaatselijk de steun van het zand verliest en als gevolg daarvan vervormt. Aangenomen wordt dat dit effect voor gangbaar aanwezige kleilaagdiktes geen rol van betekenis speelt.

Ook plaatselijke vervormingen van de kleilaag zelf als gevolg van golfklappen maken geen onderdeel uit van het hier beschreven mechanisme.

Er is een gelijkenis van het mechanisme met het mechanisme buitenwaartse macro-instabiliteit. De belasting bij de beoordeling van de buitenwaartse macrostabiliteit bestaat uit een val van hoogwater, en het achterblijven van hoge waterspanningen in de dijk. Het effect van golven wordt bij het mechanisme buitenwaartse macro-instabiliteit niet meegenomen. De karakteristieke tijd waarbinnen het mechanismen kan optreden is in de orde van een etmaal tot dagen, waarbij relatief diepe glijvlakken kunnen optreden. Bij het mechanisme afschuiven buitentalud is dit anders. De belastingsituatie is gekoppeld aan een hoogwatersituatie en niet aan een situatie met een lage buitenwaterstand na hoogwater. Bij het mechanisme afschuiven buitentalud wordt alleen de stabiliteit van de kleibekleding beschouwd (relatief ondiepe glijvlakken). De belasting is afhankelijk van de mate van golfreugtrekking. De karakteristieke tijd is in de orde van seconden.

### 7.3.2 Fenomenologische procesbeschrijving van afschuiven buitentalud

Tijdens extreme omstandigheden, bij een hoge waterstand en hoge golven, kan een voor de stabiliteit van de bekleding op het buitentalud ongunstige situatie optreden. Als het freatisch vlak in het zand onder de klei hoog is, dan is ook de druk onder de kleilaag hoog. Echter op het moment van golfneerloop, vlak voordat er een volgende golf op het talud klappt, is de druk op het talud juist laag. Hierdoor ontstaat over een deel van de kleilaag een ongunstig buitenwaarts gericht verval. Op het punt van maximale golfneerloop is het drukverschil over de kleilaag het grootst, zie Figuur 7.5. Hier zal de effectieve spanning op het grensvlak tussen de kleilaag en het zand het meest afnemen of zelfs helemaal verloren gaan, wat kan leiden tot stabiliteitsverlies van de kleilaag.



Figuur 7.5 Gemodelleerde weergave kritische situatie voor de stabiliteit van de kleibekleding bij golfneerloop

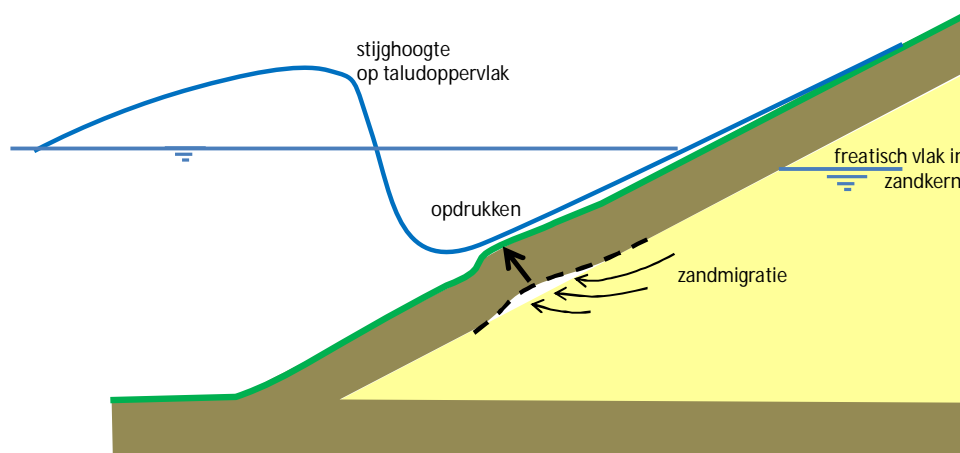
Voor het optreden van een ongunstig verval over de kleilaag is het van belang dat in het zand onder de kleilaag een relatief hoog freatisch vlak aanwezig is, in elk geval hoger dan het punt van maximale golfneerloop. Dit is denkbaar als de bekleding, of in elk geval een deel van de bekleding, relatief doorlatend is en er tijdens een hoogwater makkelijk water in het zand dringt. Hierbij wordt opgemerkt dat ook in de golfoploopzone water in de dijk kan infiltreren, waardoor het freatisch vlak stijgt. Ook indien het onderliggende zandlichaam klein is, bijvoorbeeld in het geval van een zandscheg, dan zal het freatisch vlak hierin snel kunnen oplopen.



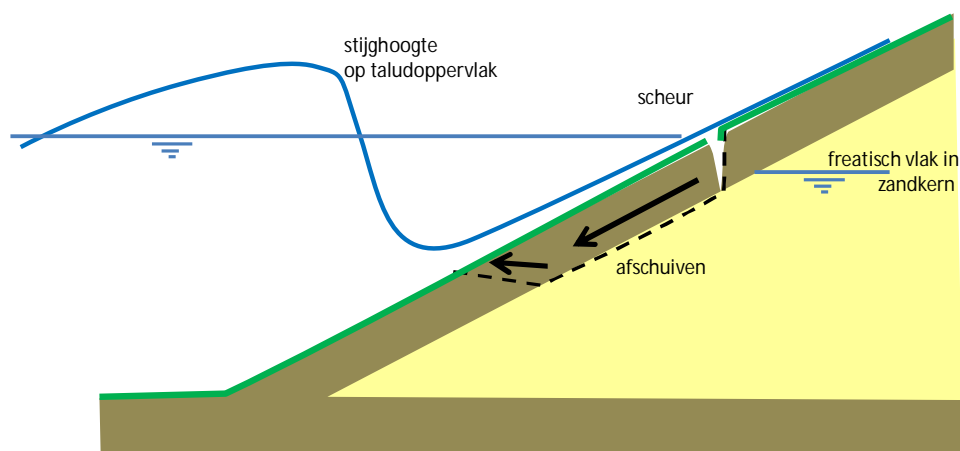
Een hoog freatisch vlak in de dijk kan ook optreden indien er onder dagelijkse omstandigheden onvoldoende drainage van de zandkern mogelijk is in combinatie met een langdurige regenperiode. Dit kan dan leiden tot stabiliteitsproblemen van de kleilaag en/ of het uitspoelen van zand, of wel micro-instabiliteit. Het zal echter alleen tot een veiligheidsprobleem kunnen leiden als dit gelijktijdig optreedt met een extreem hoogwater in combinatie met hoge golven.

Een tweede factor van belang voor een ongunstig verval is de golfneerloop. Bij grote golven is het verschil tussen de buitenwaterstand en het punt tot waar de golf zich terugtrekt het grootst. Hoe groter de golfhoogte hoe ongunstiger dit is.

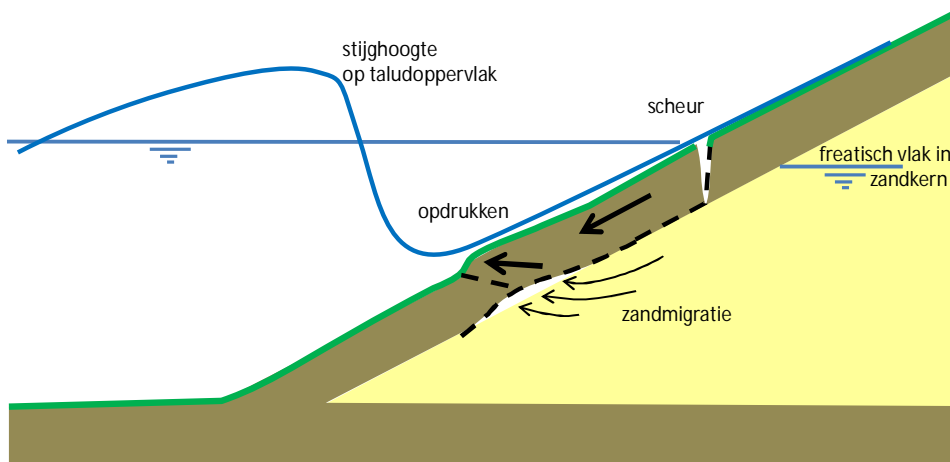
Het ongunstige verval over een deel van de kleilaag kan leiden tot opdrukken van de kleilaag (Figuur 7.6), tot afschuiven van de kleilaag (Figuur 7.7) of tot een combinatie van beide mechanismen (Figuur 7.8). Welk van de mechanismen maatgevend is, hangt af van de specifieke situatie, zoals van de sterkte van de kleilaag, de dikte en het gewicht van de kleilaag, de drukverdeling over de kleilaag en de taludhelling.



Figuur 7.6 Opdrukken van de kleilaag als de druk onder de kleilaag plaatselijk hoger is dan de druk boven de kleilaag plus de gewichtscomponent van de kleilaag loodrecht op het talud



Figuur 7.7 Afschuiven van de kleilaag. Hierbij hoeft geen opdrukken op te treden



Figuur 7.8 Combinatie van opdrukken en afschuiven

Voor het opdrukken van de kleilaag, zie Figuur 7.6, is het nodig dat de druk onder de kleilaag minimaal gelijk is aan gewichtsc component van de kleilaag loodrecht op het talud plus de eventueel nog aanwezige waterdruk op het talud. In een grootschalige Deltagoot proef is waargenomen dat een 1,4 keer hogere druk niet heeft geleid tot falen door opdrukken [14]. Dit kan mogelijk worden verklaard doordat het opdrukken slechts plaatselijk optreedt; de drukverdeling over de kleilaag boven en onder het punt van maximale golf terugtrekking is gunstiger. Daarbij heeft een kleilaag mogelijk enige sterkte tegen doorbuiging door enerzijds boogwerking in de klei en aanvullend hierop, specifiek voor grasbekledingen, een treksterkte bovenin de kleilaag door de wortels in de zode.

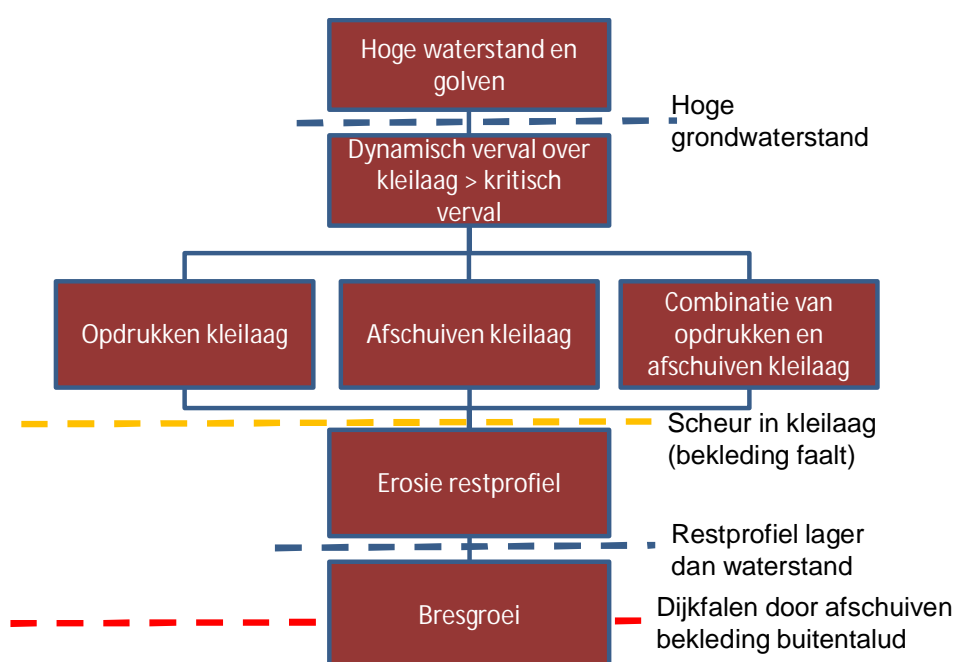
Bij het regelmatig onder golfwerking enigszins opdrukken van de kleilaag kan de ontstane holte tussen de kleilaag en de zandkern worden opgevuld door migratie van zand. Dit leidt tot irreversibele kleine vervormingen van de kleilaag. Dit hoeft niet tot het falen van de bekleding te leiden, tenzij de vervormingen zodanig worden dat de klei en de graszode breken. Dit zou een geleidelijk proces kunnen zijn, veroorzaakt door opeenvolgende grote golven die telkens voor een klein beetje extra deformatie zorgen.

Wordt de druk te hoog dan wordt verondersteld dat de kleilaag opbarst: de klei met de graszode breekt. Dit kan gepaard gaan met het plotseling uitspoelen van zand. Bovendien zal de erosiebestendigheid van de bekleding, graszode en klei, zijn aangetast. Golven zullen eerst de restanten van de kleilaag en vervolgens het onderliggende zand eroderen. Uiteindelijk kan dit leiden tot een zodanig erosie dat kruindaling, bresvorming en overstrooming van het achterland optreedt.

Ook zonder opdrukken van de kleilaag kan de bekleding falen door afschuiven van een deel van de kleilaag optreden, zie Figuur 7.7. Bij steile taludhellingen kan de schuifsterkte op het vlak tussen de kleilaag en de zandkern al grotendeels zijn gemobiliseerd, enkel door het gewicht van de kleilaag. Een ongunstige verandering van het verval over de kleilaag kan daarop leiden tot het afschuiven van de kleilaag. De kleilaag zal min of meer evenwijdig aan het talud afschuiven. Onderaan, waarschijnlijk nabij het laagste punt van de terugtrekkende golf, zal de grondmoot uitbreken. Bovenaan zal een scheur ontstaan. Na het gedeeltelijk afschuiven van de kleilaag is het proces tot aan overstrooming van het achterland zoals hierboven bij opdrukken omschreven.

Een derde, gecombineerde, mogelijkheid van falen van de bekleding is het opdrukken en opbarsten van de kleilaag, aansluitend gevolgd door het afschuiven van de bovenliggende kleilaag, zie Figuur 7.8. Door het opbarsten verliest de bovenliggende grond zijn steun. Het opdrukken en opbarsten helpt als het ware het uitbreken van het stukje glijvlak onderaan de afschuivende kleilaag. Het vervolgproces tot aan eventueel overstromen van het achterland verloopt ook hier zoals boven beschreven.

- 7.3.3 Overzicht van het faaltraject afschuiven grasbekleding op buitentalud  
 Het traject dat leidt tot falen van de dijk als gevolg van instabiliteit van de grasbekleding op het binnentalud als gevolg van golfoverslag staat in Figuur 7.9.



Figuur 7.9 Gebeurtenissen leidend tot falen van de dijk als gevolg van afschuiven van de grasbekleding op het buitentalud

## 7.4 Erosie grasbekleding op kruin en binnentalud

### 7.4.1 Fenomenologische procesbeschrijving van erosie kruin en binnentalud

Bij golfoverslag slaan de hoogste golven over de kruin van de dijk. De over de dijk slaande golven geven telkens gedurende enkele seconden een hoge stroomsnelheid op de kruin en het binnentalud. Deze turbulente stroming stelt de grasbekleding bloot aan een sterk wisselende waterdruk waardoor de grasbekleding kan eroderen.

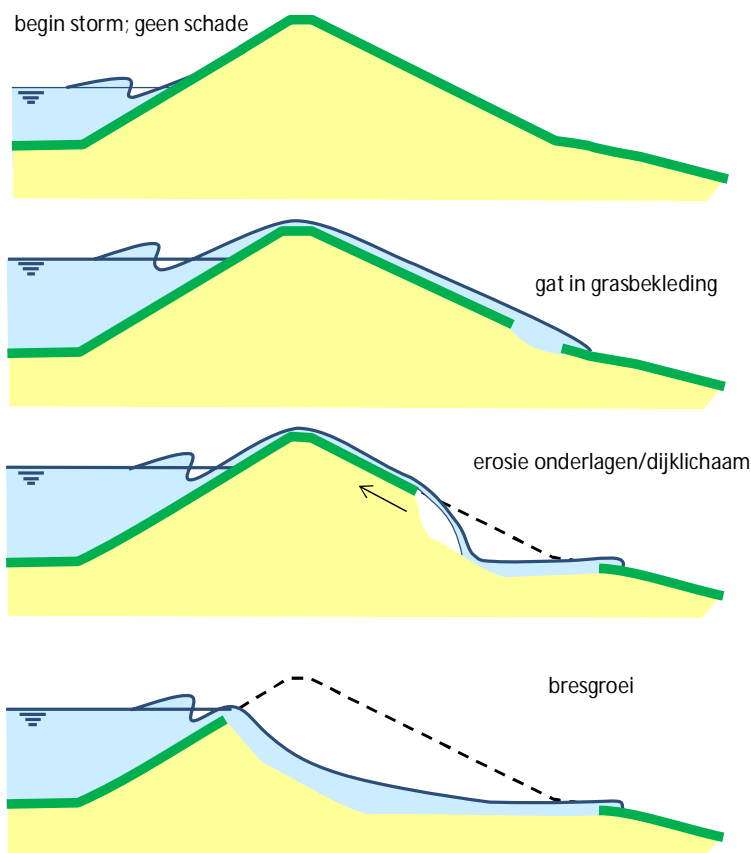
De sterkte van de grasbekleding concentreert zich in de toplaag van circa 20 cm dikte. Deze toplaag bestaat uit de graszode van 5 à 10 cm dikte en de hieronder gelegen zone waar de wortels nog een grote invloed hebben op de erosiebestendigheid van de grond. Uit grootschalige golfoverslagproeven is gebleken dat een graszode met een dicht wortelnet zeer effectief is in het vasthouden van grond in deze stroming. Het geleidelijk wegspoelen van gronddeeltjes uit de zode gebeurt wel, blijkt niet maatgevend voor de sterkte van de bekleding.

Uit waarnemingen bij grootschalige golfoverslagproeven blijkt dat het proces van een eerste schade tot falen van de grasbekleding op verschillende manieren kan verlopen. Een eerste schade kan worden veroorzaakt doordat een grote overslaande golf een stukje van de zode

meeneemt, maar een eerste schade kan ook al aanwezig zijn in de vorm van een kleine beschadiging, bijvoorbeeld een rijspoor of iets dergelijks. Het moment van optreden van de eerste schade is zeer afhankelijk van toevallige variaties in de sterkte van de zode op kleine schaal. Na een eerste schade stroopte de zode als gevolg van golfoverslag van het talud af, vaak zonder dat er een snelle verdieping van de schade optrad. Op den duur echter verdiepte de schade en werd de toplaag van circa 20 cm doorbroken. Daarna is waargenomen dat de erosie ineens een stuk sneller ging. De tijd tussen de eerste schade en het doorbreken van de toplaag, was zeer variabel. Vaak duurde het lang (orde uren), een enkele keer echter ook kort (orde minuten).

Voor het mechanisme erosie van kruin en binnentalud is falen van de grasbekleding gedefinieerd door het moment dat de sterk doorwortelde toplaag met een dikte van circa 0,2 m lokaal wordt doorbroken en de erosie van de onderlaag begint (faalcriterium).

Na het falen van de grasbekleding, zal het onderliggende materiaal verder eroderen. Een erosiekuil kan verder verdiepen en zich stroomopwaarts uitbreiden, wat uiteindelijk kan leiden tot een profiel dat lager is dan de buitenwaterstand en bresvorming, zie Figuur 7.10. Het is afhankelijk van het onderliggende materiaal en de plek waar de grasbekleding faalt hoelang dit proces in beslag neemt en of dit nog voldoende resterende sterkte heeft om bresvorming te voorkomen. Bij de gebruikelijke rekenmethoden wordt de resterende sterkte na falen van de grasbekleding op het binnentalud niet in rekening gebracht.



Figuur 7.10 Schetsmatige weergave van het faaltraject door erosie van de grasbekleding door golfoverslag

De belasting, golfoverslag, wordt gekarakteriseerd door het gemiddeld overslagdebiet in  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$  of  $\text{l}/\text{s}/\text{m}$ . Het maakt echter een groot verschil of het golfoverslagdebiet een gevolg is van een relatief hoge waterstand en lage golven of een relatief lage waterstand en hoge golven. In het eerste geval zullen relatief veel golven over de dijk slaan, maar slechts kleine volumes met een lage snelheid. In het tweede geval gaat het om weinig overslagvolumes, maar wel heel grote, met een hoge stroomsnelheid. Dit laatste geeft een veel grotere belasting op de grasbekleding.

Overgangen in een grasbekleding zijn vaak de zwakste plek. Kleine objecten, zoals paaltjes of kleine schades, leveren geen significante aantasting van de erosiebestendigheid. Echter scherpe knikken in een talud, grotere objecten zoals bomen of bebouwing en overgangen tussen gras en bijvoorbeeld een weg, kunnen wel aanzienlijk zwakker zijn. De sterkte van de graszode kan rondom een overgang lager zijn, bijvoorbeeld omdat het gras niet vastgroeit aan een object. Maar de belasting kan ook groter zijn doordat de drukgradiënten op het talud groter zijn rondom een overgang.

Het beheer van de grasbekleding rondom objecten is vaak lastig uitvoerbaar, maar juist van groot belang voor de erosiebestendigheid van de grasbekleding. Uit waarneming bij grootschalige proeven bleken grote verschillen in erosie bij overgangen en objecten. Nette overgangen, een dichte zode tot tegen de overgang, bleken logischerwijs vele malen sterker dan kale plekken langs een overgang.

#### 7.4.2 Overzicht van het faaltraject erosie grasbekleding op kruin en binnentalud

Het traject dat leidt tot falen van de dijk, als gevolg van erosie van de grasbekleding op de kruin of het binnentalud als gevolg van golfoverslag staat in het onderstaande Figuur 7.11.



Figuur 7.11 Gebeurtenissen leidend tot falen van de dijk door erosie van de grasbekleding op kruin of binnentalud

## 7.5 Afschuiven grasbekleding binnentalud

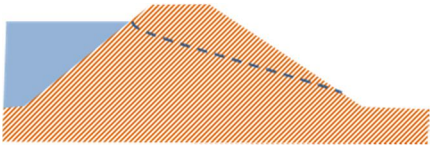
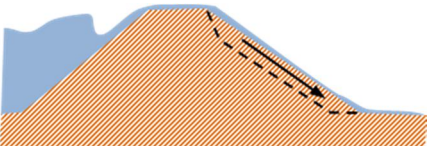
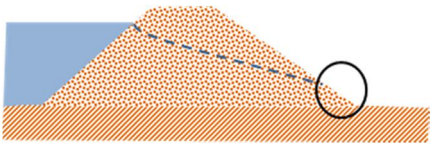
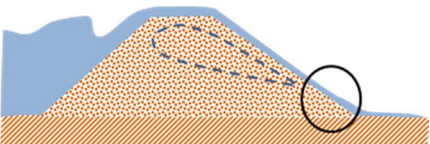
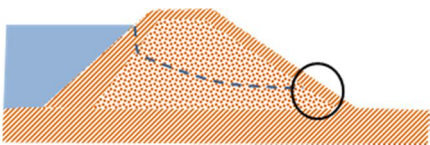
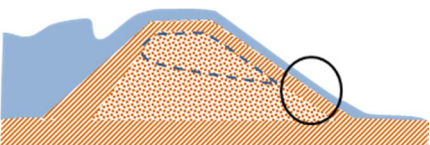
### 7.5.1 Inleiding en afbakening

Hoewel 'afschuiven' de alom geaccepteerde benaming voor dit faalmechanisme is, zou stabiliteitverlies een betere benaming zijn. De bekleding kan als gevolg van een te groot drukverschil over de bekleding opdrukken, afschuiven of een combinatie van beide mechanismen vertonen. Ook kan zand uitspoelen als gevolg van een buitenwaarts gerichte gradiënt veroorzaakt door uittredend water.

Ook is in sommige gevallen geen sprake van een grasbekleding. Het mechanisme treedt ook op bij kleibekledingen op het binnentalud zonder gras. En zelfs zandtaluds onder water kunnen erdoor bezwijken als er sprake is van een significante hoeveelheid golfoverslag.

Het mechanisme afschuiven van de grasbekleding, de graszode plus de eventuele kleilaag, bij golfoverslag is nauw verwant met het mechanisme micro-instabiliteit, hoofdstuk 5. Grote delen van de onderstaande tekst komen dan ook overeen met passages uit hoofdstuk 5. Bij micro-instabiliteit worden problemen veroorzaakt door water dat door de dijk sijpelt. Er hoeft geen golfoverslag te zijn. Bij het mechanisme afschuiven binnentalud worden problemen veroorzaakt door water dat door de dijk sijpelt *en* door golfoverslag. De bron van de belasting kan een andere zijn bij deze mechanismen, maar de stabiliteitsproblemen zijn hetzelfde. Bij een significante golfoverslag ( $> 0,1$  l/s/m) wordt verondersteld dat het mechanisme afschuiven binnentalud maatgevend is, terwijl zonder significante golfoverslag het mechanisme micro-instabiliteit maatgevend is.

De verschillen (en overeenkomsten) worden geïllustreerd door Figuur 7.12.

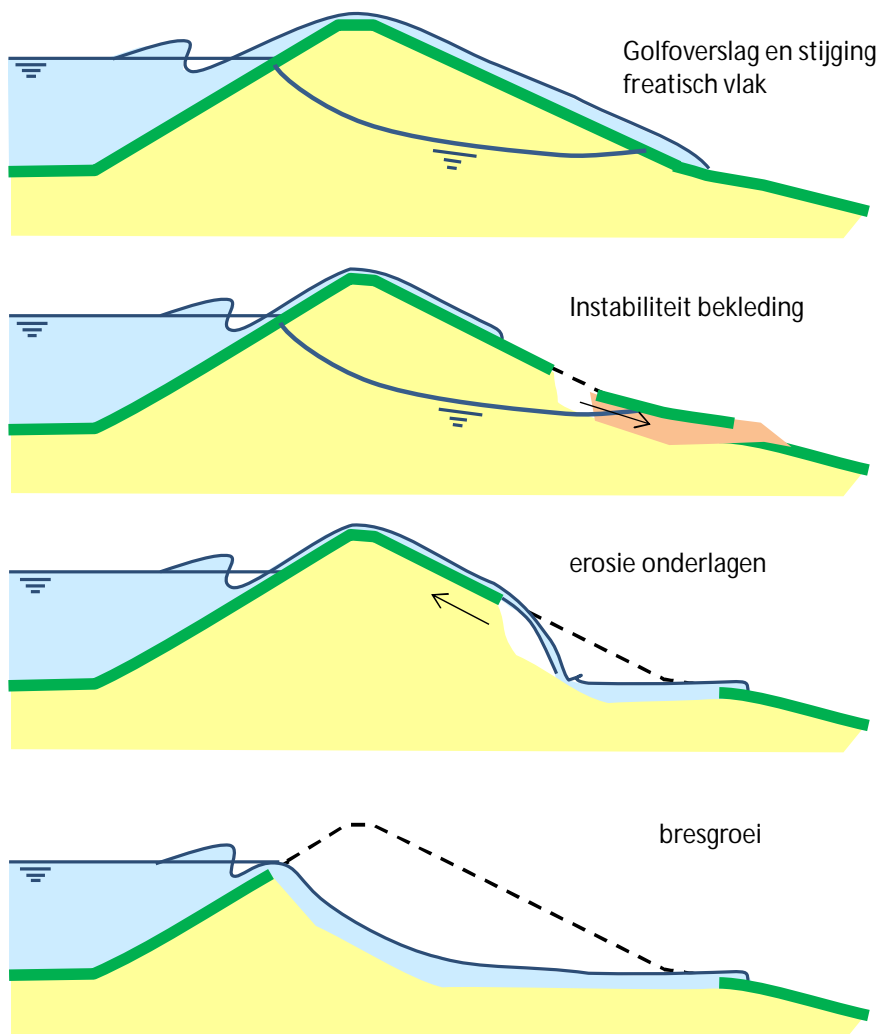
Mechanisme	micro-instabiliteit	afschuiven grasbekleding binnentalud bij overslag
Type dijk		
kleidijk	 geen probleem	 infiltratie en afschuiven
zanddijk	 uitspoelen	 infiltratie en uitspoelen
zanddijk met kleibekleding	 afdrukken of afschuiven en/of uitspoelen	 infiltratie en afdrukken of afschuiven en/of uitspoelen

Figuur 7.12 Schematische weergave verschillen tussen micro-instabiliteit en afschuiven grasbekleding binnentalud bij golfoverslag

## 7.5.2 Fenomenologische procesbeschrijving van afschuiven binnentalud

Als gevolg van een hoge buitenwaterstand in combinatie met infiltratie van water door golfoverslag stijgen de waterspanningen in de dijk.

Door de toename van de waterspanning onder het binnentalud kan hier instabiliteit van de grasbekleding optreden en/ of kan zand uitspoelen leidend tot bezwijken van de grasbekleding. Verdere erosie van het kernmateriaal leidt tot terugschrijdende erosie en kan vervolgens leiden tot bresvorming, zie Figuur 7.13.



Figuur 7.13 Schetsmatige weergave doorbraakproces na instabiliteit van de grasbekleding op het binnentalud

De mate waarin de waterspanningen in de dijk oplopen is afhankelijk van het waterstandsverloop en de duur en hoeveelheid golfoverslag. Dijken die worden aangevallen door stormopzet, al dan niet in getijdewater, worden relatief kort bloot gesteld aan een hoge buitenwaterstand, terwijl dijken in het bovenrivierengebied juist langdurig aan een hoge buitenwaterstand worden blootgesteld. Hoeveel van het over de dijk slaande water infiltreert in de dijk is naast de doorlatendheid van de bekleding ook afhankelijk van de intensiteit van de golfoverslag. Bij een bepaald gemiddeld overslagdebiet, veroorzaakt door een kleine golfhoogte bij een relatief hoge waterstand, slaan veel kleine volumes over de dijk die het talud continu nat houden, waardoor er continu water infiltreert. Bij hetzelfde gemiddelde overslagdebiet, veroorzaakt door hoge golven bij een relatief lage waterstand, slaan er weinig, maar heel grote volumes over de dijk. Als de tijd tussen de overslaande volumes groot wordt, zal het talud tijdelijk droog staan en is er tijdelijk geen infiltratie [16].

De ontwikkeling van waterspanningen bij hoogwater is naast de genoemde hydraulische belastingen ook afhankelijk van de dijkgeometrie, de opbouw van de dijk en de bekleding en de onderliggende grondlagen en de doorlatendheid hiervan.

Bij **kleidijken** is in het algemeen de kern relatief ondoorlatend en de bovenste laag doorlatend als gevolg van de vorming van bodemstructuur. Bodemstructuur vormende processen hebben vooral invloed tot circa één meter onder het maaiveld. In deze zone zijn de wisselingen in vochtgehalte, temperatuur (vorst) en de activiteit van flora en fauna het meest intensief. Bij infiltratie door golfoverslag zal de laag met ontwikkelde bodemstructuur snel verzadigen. Het water zal nauwelijks in de relatief ondoorlatende kern doordringen en afstromen door de grondlaag met bodemstructuur, parallel aan het talud. De hierbij optredende waterspanning is ongunstig voor de stabiliteit, waardoor deze grondlaag parallel aan het talud kan afschuiven. Dit mechanisme is in de praktijk vaak waargenomen bij steile taluds in combinatie met golfoverslag. De afschuiving wordt bijna altijd voorafgegaan aan het vormen van een langs-scheur in de kruin of bovenaan het talud, waardoor er nog meer water in de laag met bodemstructuur infiltreert. Onderaan het talud kan de teen eventueel nog steun geven, maar als deze te gering is, dan schuift de hele grondlaag parallel aan het talud af. De bloot komende kern kan vervolgens verder eroderen wat uiteindelijk kan leiden tot een daling van de profielhoogte onder de waterstand gevolgd door bresvorming en overstroming van het achterland.

Uitgaande van een dijk met een **zandkern**, al dan niet met een kleibekleding, zijn er de volgende mogelijkheden:

- Het binnentalud is zeer flauw. Bij dergelijk flauwe taluds zal stabiliteit van de bekleding geen veiligheidsprobleem zijn.
- Onder het binnentalud of in de binnenteen is een drainageconstructie aanwezig. In het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies [18] wordt gesteld dat indien de werking van de drainage goed is er geen stabiliteitsproblemen optreden.
- Het binnentalud bestaat uit een afdekkende kleilaag overgroeid met gras. Hier kan de situatie optreden dat de afdekkende kleilaag minder doorlatend is dan de kern, waardoor overdrukken nabij de binnenteen ontstaan. In deze omstandigheid kan de kleilaag worden opgedrukt (de waterdruk wordt groter dan het gewicht van de afdekkende kleilaag) of de laag kan afschuiven over de zandkern. Een combinatie van deze beide fenomenen is ook mogelijk. Eveneens kan het fenomeen optreden dat door bestaande scheuren of gaten in de kleilaag of scheuren die ontstaan door opdrukken en of afschuiven zand van onder de kleilaag wegspoelt.
- Het binnentalud bestaat uit zandig materiaal, normaal gesproken overgroeid met gras. De invloed van het gras wordt meestal genegeerd. In sommige beschouwingen is sprake van 'schijnbare cohesie' die het gras kan leveren.

Naast de geometrie-elementen bij dijken met een zandkern is ook de grondwaterstroming van belang. De volgende stromingspatronen kunnen worden onderscheiden:

- Stroming loodrecht op het talud. Dit doet zich voor bij zandige taluds onder water.
- Horizontale uitstroming van water. Dit kan zich voordoen bij zandige taluds boven water en vormt de grootste bedreiging ten aanzien van uitspoelen van zanddeeltjes.
- Opbouw van waterdrukken onder een afdekkende kleilaag. Dit kan zich voordoen bij een zandkern met een afdekkende kleilaag aan de binnenzijde, zowel onder als boven water.



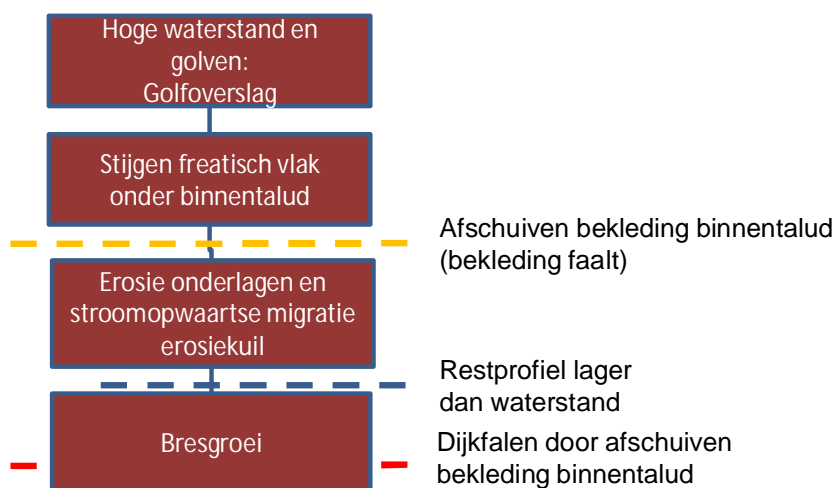
Uit het bovenstaande kan worden afgeleid dat de volgende vormen van instabiliteit kunnen optreden:

- A Bij een zanddijk met afdekkende kleilaag op het binnentalud:
- 1 Afschuiven van (een deel van) het binnentalud door waterdruk onder de kleilaag.
  - 2 Opdrukken van de kleilaag op het binnentalud door waterdruk onder de kleilaag.
  - 3 Combinatie van afdrukken en afschuiven door waterdruk onder de kleilaag.
- B Bij een zanddijk met zandige toplaag boven water:
- 1 Afschuiven bij horizontaal uittredend grondwater.
  - 2 Uitspoelen bij horizontaal uittredend grondwater.
- C Bij een zanddijk met zandige toplaag onder water:
- 1 Afschuiving bij stroming loodrecht op het talud.
  - 2 Uitspoeling bij stroming loodrecht op het talud.

Geval C, zandtaluds onder water betreffen bijvoorbeeld dijken met binnendijs gelegen wielen en strangen. Deze kunnen relatief diep zijn en een zandtalud onder water hebben, waarbij onder extreme omstandigheden het kritische uittrede verhang wordt overschreden. Omdat dit zich onder water afspeelt kan het pas laat worden opgemerkt [9].

Indien een primair mechanisme van instabiliteit van de bekleding op het binnentalud is opgetreden ontstaat er een gat in het binnentalud van de dijk. Dit is het mechanisme dat wordt beoordeeld. Erosie van de zandkern kan vervolgens leiden tot een afname van de dijkhoogte tot onder het waterpeil, gevolgd door bresvorming en overstroming van het achterland. Aan deze vervolprocessen wordt normaliter niet meer gerekend.

- 7.5.3 Overzicht van het faaltraject afschuiven van grasbekleding op binnentalud  
Het proces dat leidt tot falen van de dijk als gevolg van instabiliteit van de grasbekleding op het binnentalud als gevolg van golfoverslag staat in Figuur 7.14.



Figuur 7.14 Gebeurtenissen leidend tot falen van de dijk door afschuiven van de bekleding op het binnentalud



## 8 Stabiliteit bekleding steenzetting

### 8.1 Inleiding

Een steenzetting zoals die op waterkeringen wordt toegepast bestaat gewoonlijk uit een aantal lagen die de ondergrond op een afdoende wijze dienen te beschermen tegen erosie. Bij de meest gebruikelijke steenzettingen zijn die lagen de volgende, zie Figuur 8.1:

- een toplaag van gezette stenen. Die stenen kunnen strak tegen elkaar aanliggen (vierkante betonblokken), maar ook bestaan uit zuilvormige elementen waarbij de openingen tussen de zuilen ingewassen zijn met granulaire materiaal.
- een granulaire laag, veelal is dit slechts een uitvullaag om oneffenheden in de ondergrond te vereffenen, maar het kan ook deel uitmaken van het filter bedoeld om uitspoelen van eronder gelegen lagen te voorkomen.
- een geotextiel ook wel aangeduid als filterdoek.
- een onderlaag, veelal bestaande uit klei, maar ook breed gegradeerde granulaire materialen zijn wel gebruikt (bijvoorbeeld mijnsteen).

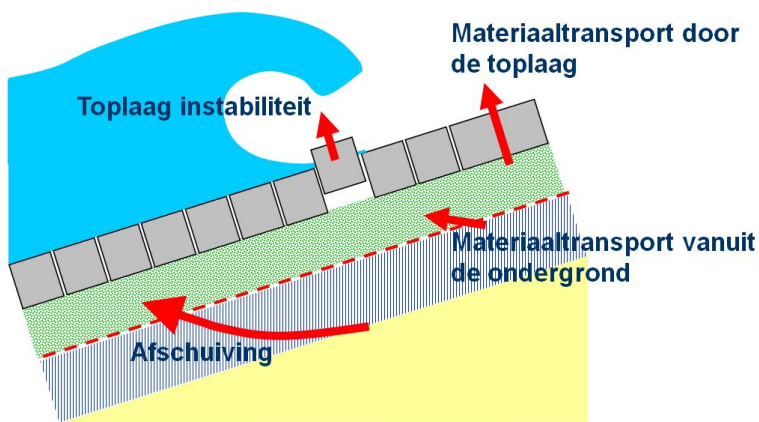


Figuur 8.1 Aanleg van een steenzetting waarbij verschillende lagen zichtbaar zijn

Er zijn zes initiële bezwijkmechanismen die leiden tot het bezwijken van de toplaag van een steenzetting, zie Figuur 8.2:

- 1 Toplaaginstabiliteit onder golfaanval (een zetsteen wordt uit de steenzetting gelicht als gevolg van brekende golven op het talud).
- 2 Toplaaginstabiliteit door langsstroming (een zetsteen wordt uit de steenzetting gelicht als gevolg van sterke stroming langs de dijk).
- 3 Afschuiving (als gevolg van brekende golven op het talud ontstaat er een vervorming van de ondergrond waardoor er een S-profiel ontstaat en het verband in de steenzetting verloren gaat).

- 4 Materiaaltransport vanuit de ondergrond (de waterbeweging in het filter is zodanig dat het onderliggende zand of klei gaat eroderen en uitspoelt, waardoor de toplaag verzakt en zijn samenhang verliest).
- 5 Materiaaltransport vanuit de granulaire laag (de korrels van het filter spoelen uit door de gaten in de toplaag, waardoor de toplaag verzakt en zijn samenhang verliest).
- 6 Bezwijken van de overgangs-, teen- of aansluitingsconstructie (de overgang is in slechte staat waardoor de ondergrond of het filter kan uitspoelen). Het signaleren van problemen met de overgangs-, teen- of aansluitingsconstructie wordt verondersteld deel uit te maken van beheer en onderhoud en wordt daarom hier niet behandeld.

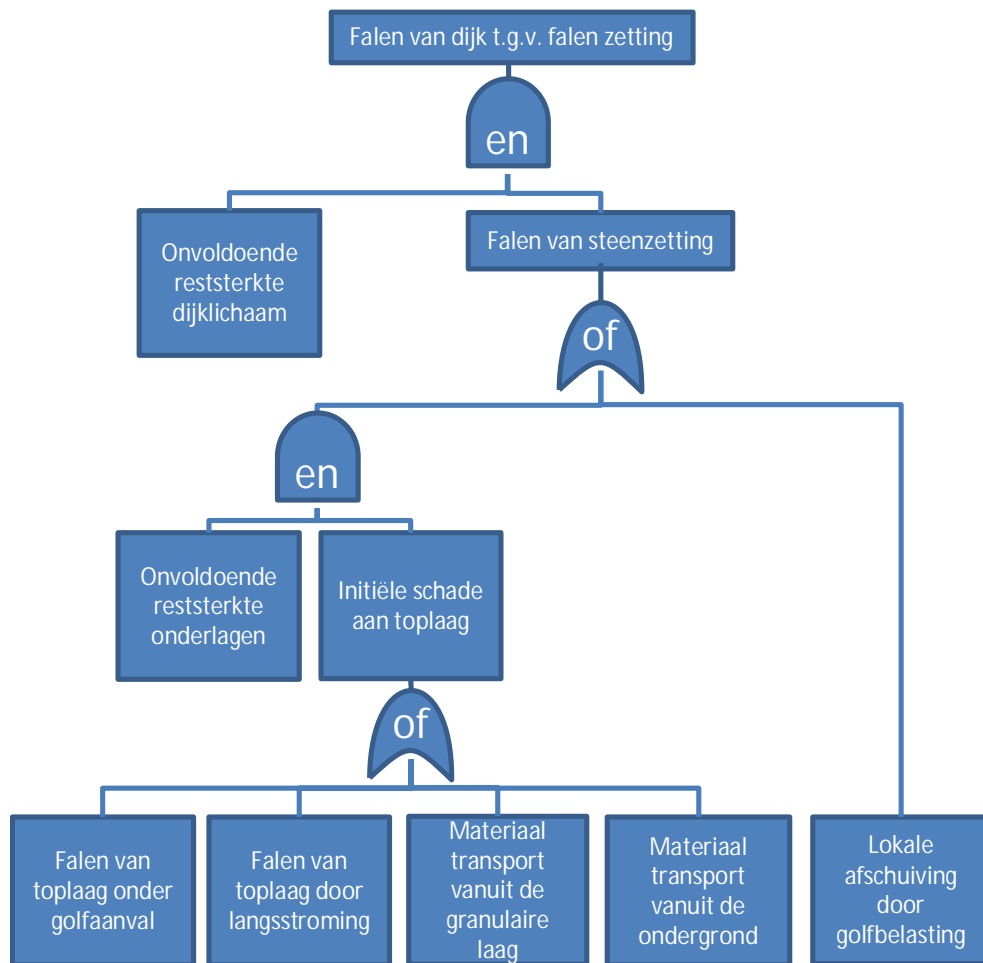


Figuur 8.2 Enkele bezwijkmechanismen van steenzettingen

Na het bezwijken van de toplaag leveren de onderlagen nog enige sterkte (Erosie van de onderlagen), alvorens de bekleding faalt. Die sterkte van de onderlagen wordt bij het mechanisme afschuiving niet in rekening gebracht, omdat er veiligheidshalve van uitgegaan wordt dat afschuiving leidt tot een scheur door top en onderlagen samen. Daardoor ontstaat direct contact van de golven met de ondergrond van zand. Al deze mechanismen zijn opgenomen in de foutenboom gegeven in Figuur 8.3.

De sterkte die ontleent wordt aan de erosie van de onderlagen wordt bij steenzettingen soms al aangeduid als reststerkte. Met de sterkte wordt dan uitsluitend de weerstand volgens het mechanisme waarbij de toplaag schade oploopt bedoeld. In deze rapportage wordt het begrip resterende sterkte gehanteerd voor de weerstand die niet gekwantificeerd is.

In de volgende paragrafen wordt ingegaan op de initiële bezwijkmechanismen 1 t/m 5.



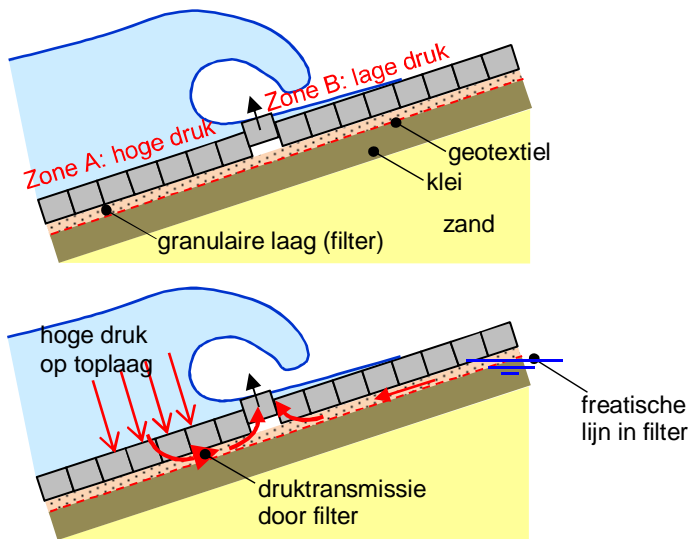
Figuur 8.3 Foutenboom falen waterkering als gevolg van bezwijken steenzetting

## 8.2 Toplaaginstabiliteit onder golfaanval

Brekende golven op een taludbekleding van gezette steen geven een zware belasting, vooral net onder de waterlijn. Op het moment waarop de golf zich maximaal heeft teruggetrokken (golfnederloop) is er sprake van een muur van water op het talud, zie Figuur 8.4, met in zone A een hoge druk op het talud en in zone B een lage druk.

De hoge druk op het talud wordt doorgegeven aan de granulaire laag (filter) onder de toplaag en komt ook onder de toplaag in zone A. Tegelijkertijd is er sprake van een verhoogde freatische lijn in het filter vanwaar water door het filter naar beneden en naar buiten stroomt. Waar zone A op zone B aansluit ontstaat er daardoor een opwaarts drukverschil over de toplaag die de neiging heeft om zetstenen uit de bekleding te drukken.

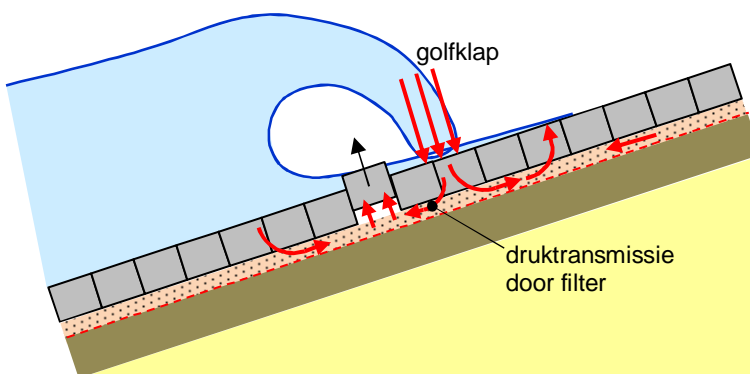
Deze situatie houdt in elke golf ca. 0,2 à 0,7 s aan en dat kan voldoende zijn om de zetstenen stukje bij beetje uit de toplaag te drukken, of ineens helemaal tijdens een grote golf.



Figuur 8.4 Golfnederloop leidt tot drukverschil over toplaag

Dit mechanisme treedt op bij steenzettingen met een relatief kleine doorlatendheid van de toplaag en grote doorlatendheid van het filter, zoals rechthoekige betonblokken met smalle spleten. Moderne steenzettingen hebben een zodanig grote doorlatendheid dat het moment van de golfklap maatgevend wordt. Dat moment is getekend in Figuur 8.5.

De golfklap geeft een kortdurende (ca. 0,1 à 0,3 s) zeer hoge druk op het talud. Deze hoge druk is slechts in een smalle strook op het talud aanwezig en wordt via het filter doorgegeven aan de zones ernaast, waar een opwaarts drukverschil ontstaat. Daar kunnen zetstenen uit de bekleding gedrukt worden. Het principe van deze belasting is verder hetzelfde als die tijdens de golfnederloop.



Figuur 8.5 Druktransmissie vanaf golfklap door het filter, leidend tot een opwaarts stijghoogteverschil

De mate waarin bovenstaande processen leiden tot een drukverschil over de toplaag is afhankelijk van de doorlatendheid van toplaag en de onderliggende granulaire laag. Als het filter relatief doorlatend is en de toplaag is relatief ondoorlatend, dan is dat ongunstig voor de stabiliteit van steenzetting, want dan wordt bij dezelfde golfcondities het drukverschil over de

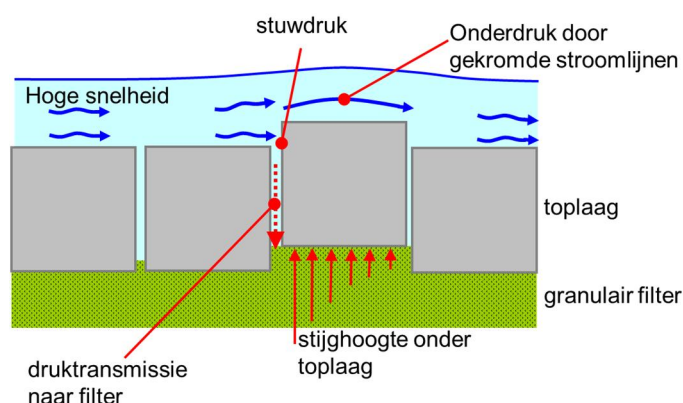
toplaag groot. De verhouding in doorlatendheden, gecombineerd met de dikte van top- en granulaire laag, wordt gekarakteriseerd door de zogenaamde lek lengte.

Een goed ontworpen steenzetting heeft een lage doorlatendheid van het filter, waardoor de druktransmissie wordt verminderd, en een hoge doorlatendheid van de toplaag. Dat laatste zorgt ervoor dat de verhoogde druk onder de toplaag gemakkelijk weg kan vloeien. De lek lengte van een dergelijke constructie is relatief kort.

Omdat de lek lengte afhankelijk is van constructie-eigenschappen, kan dit aspect ook bij de sterkte gerekend worden. Maar aangezien het drukverschil doorgaans meer gerelateerd wordt aan de belasting, is het hier behandeld.

Boven de waterlijn is de belasting van de steenzetting veel minder dan er net onder. De grootte van de belasting wordt steeds minder naarmate we verder boven de stilwaterlijn komen en is gereduceerd tot nul ter hoogte van het golfoplooppniveau.

De belasting wordt veroorzaakt door verdwaalde zwakke golfklappen, het drukfront van het golfoplooppunt en hoge stroomsnelheden. Ook hier speelt de lek lengte een rol ten aanzien van de grootte van de drukverschillen over de toplaag.



Figuur 8.6 Extra drukverschil op havendammen door hoge stroomsnelheden

Op de kruin en het binnentalud van havendammen is er nog een extra belasting als de steenzetting niet mooi vlak is gezet. Uitstekende stenen kunnen leiden tot een verhoogde verschildruk over de toplaag, zie Figuur 8.6. De hoge stroomsnelheid botst tegen de uitstekende steen en dat leidt tot een plaatselijke hoge stuwdruk. Deze wordt doorgegeven naar het filter onder de toplaag. Tegelijk gaat het water over de uitstekende zetsteen met gekromde stroomlijnen. Dat geeft een zuiging (verlaagde druk) boven de zetsteen.

Statische verschildruk door een hogere freatische lijn onder de toplaag dan de buitenwaterstand levert zelden een belangrijke belasting op. Dit kan alleen spelen bij een ingegoten steenzetting die waterdicht is ingegoten tot en met een waterdichte teenconstructie. Dit komt vrijwel niet voor.

De sterkte van de steenzetting wordt bepaald door het eigen gewicht van de toplaag per vierkante meter en de interactie tussen de zetstenen. Voor het eigen gewicht per  $m^2$  geldt dat de open ruimte tussen de zetstenen niet meetelt, ook al zijn ze gevuld met steenslag, en gaat het dus primair om de toplaagdikte en dichtheid van het materiaal waar de zetstenen van gemaakt zijn.

De interactie tussen de stenen kan aanwezig zijn door:

- Wrijving tussen losse zetstenen.
- Klemming (door normaalkracht in het vlak van de zetting, verder versterkt bij vervorming van het taludoppervlak).
- Interlocking, bijvoorbeeld door een hol-en-dol verbinding tussen de zetstenen (messing en groef).
- Kabels door de blokken of een verbinding via het onderliggende geotextiel bij blokkenmatten.
- Asfaltmastiek of beton in de spleten tussen de zetstenen.

Klemming is in moderne steenzettingen een belangrijk aspect van de sterkte. Het speelt bij steenzettingen met inwasmateriaal in de spleten, zodat de afzonderlijke zetstenen goed contact met elkaar maken. Door de bovenliggende rijen ontstaat er een normaalkracht in het vlak van de steenzetting die zorgt dat de zetstenen stijf tegen elkaar gedrukt worden. Hierdoor kan de steenzetting zowel dwarskrachten als buigende momenten opnemen. Zodra de steenzetting als gevolg van verschildrukken iets wordt opgelicht, zorgt de interactie tussen de zetstenen ervoor dat de normaalkracht toeneemt en daardoor ook de klemming toeneemt.

Voor steenzettingen bestaande uit rechthoekige betonblokken zonder inwasmateriaal mag niet op klemming worden gerekend. In een dergelijke steenzetting zit een paar procent van de zetstenen volledig los tussen de andere zetstenen en kunnen individuele blokken dus uit de steenzetting gelicht worden door de verschildrukken.

### 8.3 Toplaaginstabiliteit door stroming langs de dijk

In bijzondere gevallen kan het zijn dat de golfbelasting slechts zeer gering is, terwijl er wel een sterke stroming langs de dijk mogelijk is. In zo een geval kan de stromingsbelasting maatgevend zijn. Dit kan het geval zijn bij bijvoorbeeld een schaaldijk langs een rivier.

De stroming langs de dijk zal vooral kunnen leiden tot schade op plaatsen waar de steenzetting niet volledig vlak is gezet (uitstekende stenen, zie Figuur 8.6), ter plaatse van overgangsconstructies, aansluitingen of knikken in het talud.

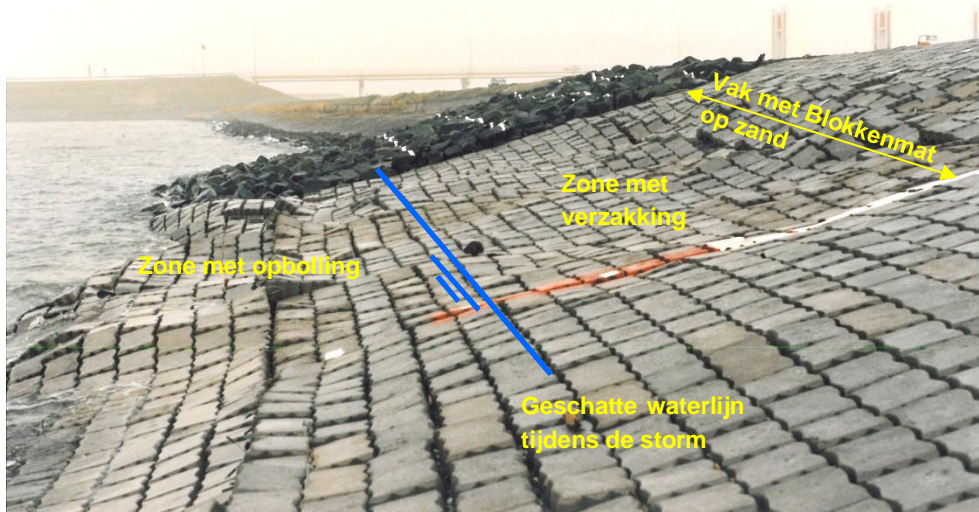
Een sterke stroming langs de dijk kan op dergelijke bijzondere locaties een stijghoogteverschil opleveren dat kan leiden tot schade.

### 8.4 Lokale afschuiving door golfbelasting

Golfbelasting kan niet alleen leiden tot bezwijken van de steenzetting, maar in bijzondere omstandigheden ook tot bezwijken van de ondergrond onder die steenzetting, zie Figuur 8.7.

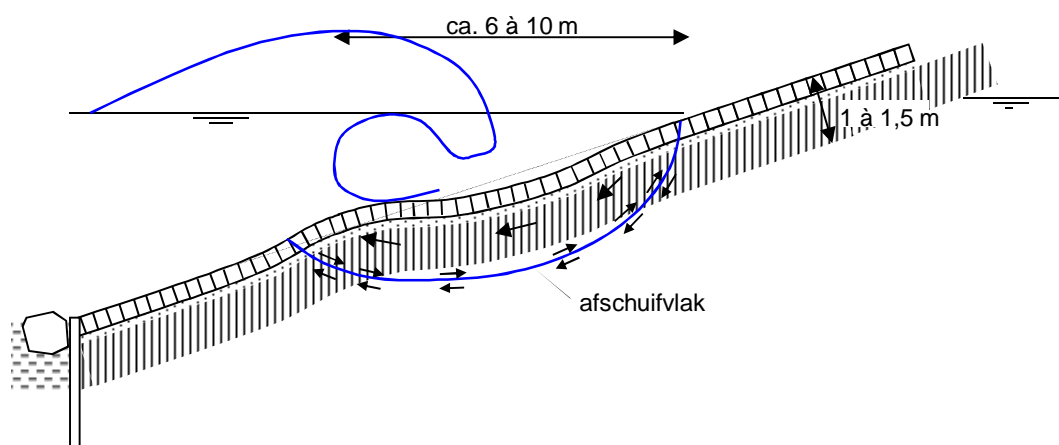
De golfbelasting zorgt voor een wisselde waterdruk in het zand onder de steenzetting. Dit is vooral mogelijk als er geen kleilaag aanwezig is of als de kleilaag relatief dun is. De wisselende druk in het zand zorgt in elke grote golf voor een tijdelijke stroming uit het zandlichaam, dat daardoor plaatselijk even kan verweken. Zo kan in elke grote golf het talud een beetje vervormen totdat een S-profiel ontstaat zoals geschetst in Figuur 8.8.





Figuur 8.7 Afschuiving bij proefvak bij Lelystad met blokkenmatten op zand (met tevens migratie van zand onder de mat naar beneden als gevolg van matbewegingen)

De waterdrukken in combinatie met de golfaanval kunnen leiden tot opdrijven van de bekleding en verweking van het zand. Hierdoor kan het zand zich gaan verplaatsen, wat leidt tot vervorming van de bekleding. Elke grote golf kan wat extra vervorming opleveren, waardoor na verloop van tijd een S-profiel (zoals geschetst in Figuur 8.8) of een andere taluddeformatie ontstaat, met als ultiem gevolg dat de toplaag zijn samenhang verliest.

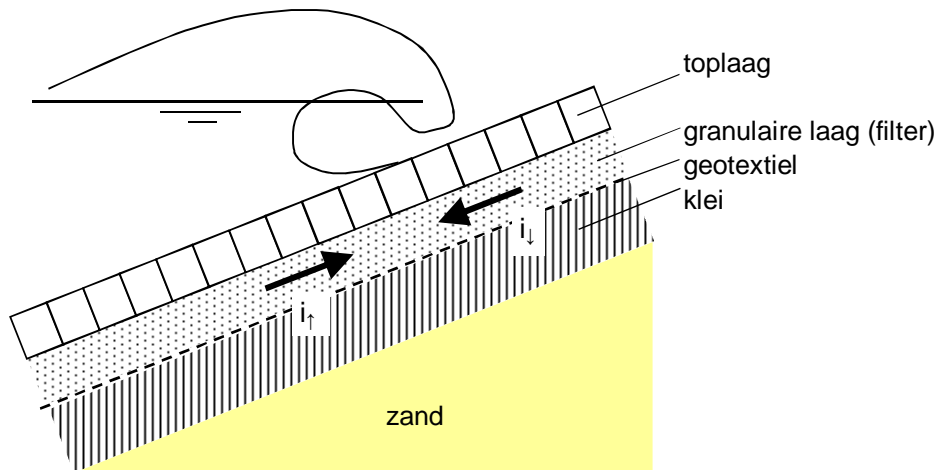


Figuur 8.8 Gemodelleerde weergave van de vervorming tot een S-profiel

### 8.5 Materiaaltransport vanuit de ondergrond

De ondergrond onder de steenzetting wordt doorgaans beschermd door een geotextiel. Dit zorgt ervoor dat de klei of het zand eronder niet door de waterbeweging gaat uitspoelen. Het uitspoelen kan leiden tot ontoelaatbare vervormingen waardoor de toplaag van gezette steen zijn samenhang verliest.

Vroeger werden in plaats van een geotextiel vaak vlijlagen op de klei gebruikt (minstens een dubbele laag) of een granulaire filter op zand. Het principe van het faalmechanisme is dan echter hetzelfde.



Figuur 8.9 Verhang langs het grensvlak (omhoog en omlaag gericht)

De belasting wordt veroorzaakt door de golven die een waterbeweging op het klei- of zandoppervlak veroorzaken. De sterkte is gerelateerd aan de verhouding tussen de korrels van het zand (of klei) en de openingen in het geotextiel (of vlijlagen of granulaire filter).

De belasting van het grensvlak tussen het filter en de ondergrond wordt gekarakteriseerd met het verhang waarbij de korrels van de onderliggende laag worden opgepikt en door de stroming in het filter worden afgevoerd. Dit wordt het kritieke verhang genoemd ( $i_{cr}$ ). Het gaat hierbij steeds om het verhang evenwijdig aan de topplage. De  $i_{cr}$  is groter bij een (evenwijdig aan het talud) omhoog gerichte stroming in het filter dan bij een omlaag gerichte stroming langs het grensvlak, zie Figuur 8.9. Er wordt daarom onderscheid gemaakt tussen:

- Het kritiek verhang bij een omhoog gerichte stroming:  $i_{\uparrow cr}$ .
- Het kritiek verhang bij een omlaag gerichte stroming:  $i_{\downarrow cr}$ .

De belasting is ook verschillend:

- De belasting bij stroming langs het grensvlak omhoog:  $i_{\uparrow}$ .
- De belasting bij stroming langs het grensvlak omlaag:  $i_{\downarrow}$ .

De sterkte wordt beïnvloed door het al dan niet aanwezig zijn van een geotextiel. Als er een geotextiel is, dan is de  $O_{90}$  (karakteristieke openingen in het geotextiel) de meest bepalende factor. Als er geen geotextiel is, dan wordt de sterkte bepaald door de verhouding tussen de korrelgrootte van de ondergrond en in het erboven liggende filter.

Als de belasting de sterkte overtreft, zal de ondergrond gaan uitspoelen. Dat leidt uiteindelijk tot het verzakken van de steenzetting, waardoor deze uit het verband raakt.

## 8.6 Materiaaltransport vanuit de granulaire laag

Zoals bij de toplaagstabiliteit (paragraaf 8.2) is uitgelegd, is het goed voor de stabiliteit bij golfaanval om de toplaag doorlatend te maken door middel van spleten en gaten. De openingen in de toplaag mogen echter niet te groot worden, omdat dan uitspoeling van granulair materiaal uit de uitvullaag of filterlaag kan optreden.

De golven zorgen voor een waterbeweging op de toplaag en een stroming van water door de toplaag naar buiten tijdens golfneerloop. Dit kan ertoe leiden dat granulair materiaal uit de uitvullaag of filterlaag gaat uitspoelen, tenzij de geometrie van de openingen zodanig is dat dit niet gebeurt. Dit laatste is afhankelijk van de breedte en diepte van de gaten en spleten in verhouding tot de korrelgrootte van het onderliggende materiaal. Ook kan goed vastzittend inwasmateriaal ertoe bijdragen dat er niets uitspoelt.

## 8.7 Erosie van de onderlagen

Als de toplaag van de bekleding, de feitelijke steenzetting, is bezweken, dan ontstaat er een erosieproces dat uiteindelijk kan leiden tot het falen van de dijk. Het erosieproces wat betrekking heeft op de onderlagen van de bekleding, de granulaire laag, het geotextiel en de eventuele kleilaag, wordt aangeduid met 'Erosie van de onderlagen'. Dit is nader omschreven in paragraaf 8.8.2.

## 8.8 Overzicht van het faaltraject door bezwijken van de steenzetting

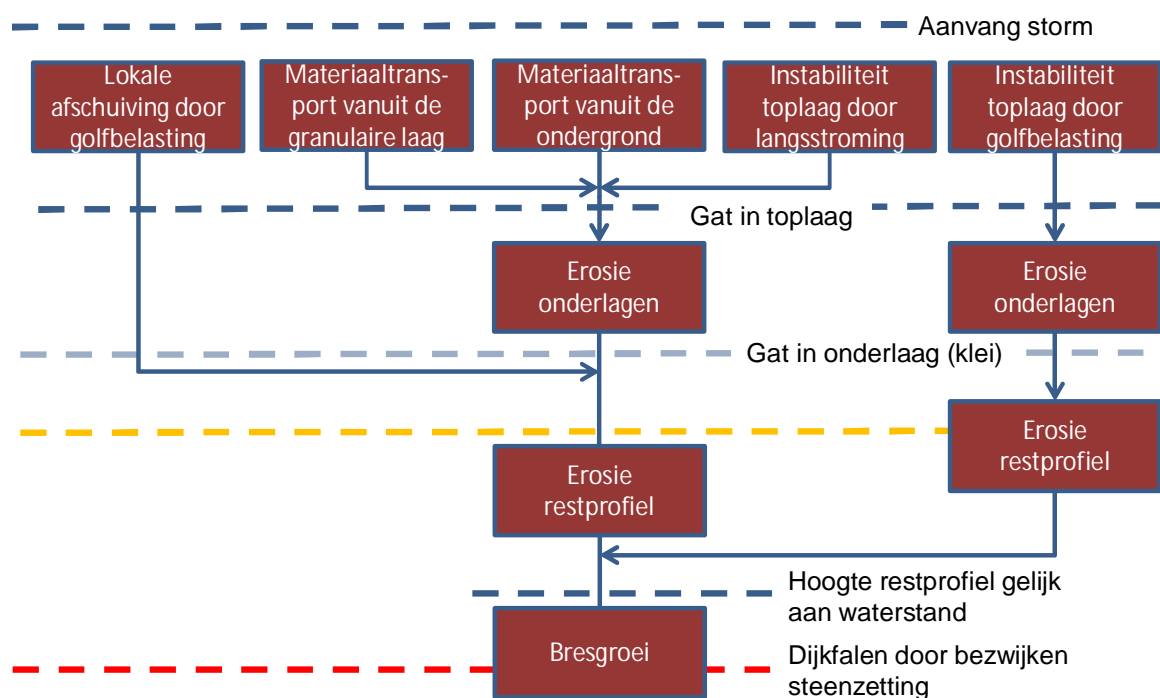
### 8.8.1 Inleiding

De steenzetting faalt als zij zodanig beschadigd is dat de zandkern niet meer wordt beschermd tegen de hydraulische belasting door golven of stroming. Dit falen kan veroorzaakt worden door verschillende mechanismen, zoals in de voorafgaande paragrafen omschreven. Al deze mechanismen zijn ook terug te vinden in de foutenboom van Figuur 8.3.

In de opeenvolging van de gebeurtenissen die tot falen van de bekleding leiden, zie Figuur 8.10, is te zien dat alleen het instabiel worden van de toplaag nog niet voldoende is om de bekleding te laten falen. Daarvoor moet bij de meeste bezwijkmechanismen ook nog erosie van de onderlagen optreden. De bekleding faalt immers pas als de zandkern van de dijk bloot komt te liggen.

Nadat de steenzetting met alle onderlagen (plaatselijk) zijn weggeërodeerd, vangt de erosie van de dijk aan. Als ook de zandkern zodanig is weggeërodeerd dat de resulterende kruinhoogte tot onder de actuele waterstand is gezakt, is er sprake van een dijkdoorbraak. Dan pas faalt de dijk.

Behalve door bezwijken van de bekleding zelf kan de bekleding op het buitentalud ook beschadigd worden door andere mechanismen: macro-instabiliteit buitenwaarts, golfafslag voorland, afschuiven voorland en/of een zettingsvloeiing. Als er een grootschalige afschuiving of vloeiing optreedt waarbij ook een deel van het buitentalud wordt beschadigd, dan zal de onderlaag van de zetting ook beschadigd raken. Een dergelijk mechanisme beschadigt de bekleding dan meteen zodanig de steenzetting faalt: hij beschermt het dijklichaam niet meer (afdoende) tegen erosie.



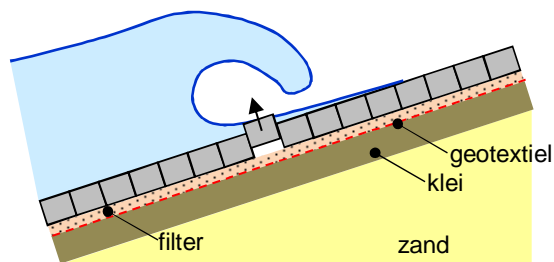
Figuur 8.10 Gebeurtenissen leidend tot falen van de dijk door bezwijken van de steenzetting

## 8.8.2 Falen als gevolg van instabiliteit van de toplaag

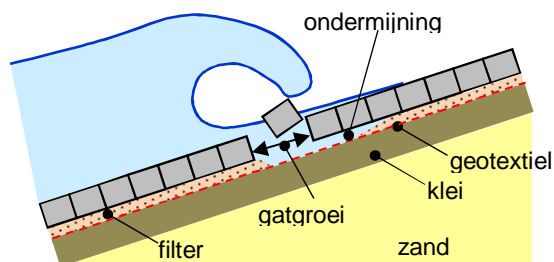
Veelal is het mechanisme “toplaaginstabiliteit onder golfaanval” bepalend voor de sterkte van de bekleding. Daarom is dat initiële bezwijkmechanisme als uitgangspunt gekozen voor deze beschrijving.

Het mechanisme betreft het uitgelicht raken van één of meer stenen uit de steenzetting. Als er zo'n schade is ontstaan aan de steenzetting, faalt de bekledingsconstructie in feite nog niet. De bekledingsconstructie bestaat namelijk doorgaans uit een toplaag van gezette steen, een dunne uitvullaag of filterlaag van steenslag, een geotextiel en een kleilaag. Soms is de kleilaag vervangen door een dikke laag mijnsteen of hydraulische slak. Dit geheel is aangebracht om de kern van de dijk, die doorgaans uit zand bestaat, te beschermen. Als er schade is ontstaan aan de toplaag van gezette steen, wordt de weerstand van de onderlagen aangesproken: de erosie van de onderlagen vangt aan. Deze weerstand is de tijdsduur vanaf het ontstaan van de initiële schade (een of meer stenen worden door de golven uit de steenzetting geslagen) totdat de golven de zandkern bereiken. Pas als de zandkern bereikt wordt, faalt de bekledingsconstructie.

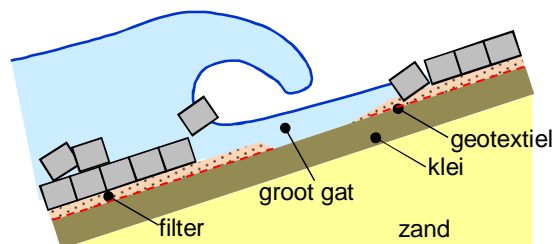
De eerste stadia van het groeien van de schade aan de bekleding zijn geschetst in Figuur 8.11.



a. Een steen wordt door de golven uit de bekleding geslagen



b. Het filter spoelt door het gat uit en/of het gat groeit



c. Er is een groot gat ontstaan, (onder meer) door het instorten van de ondermijnde toplaag

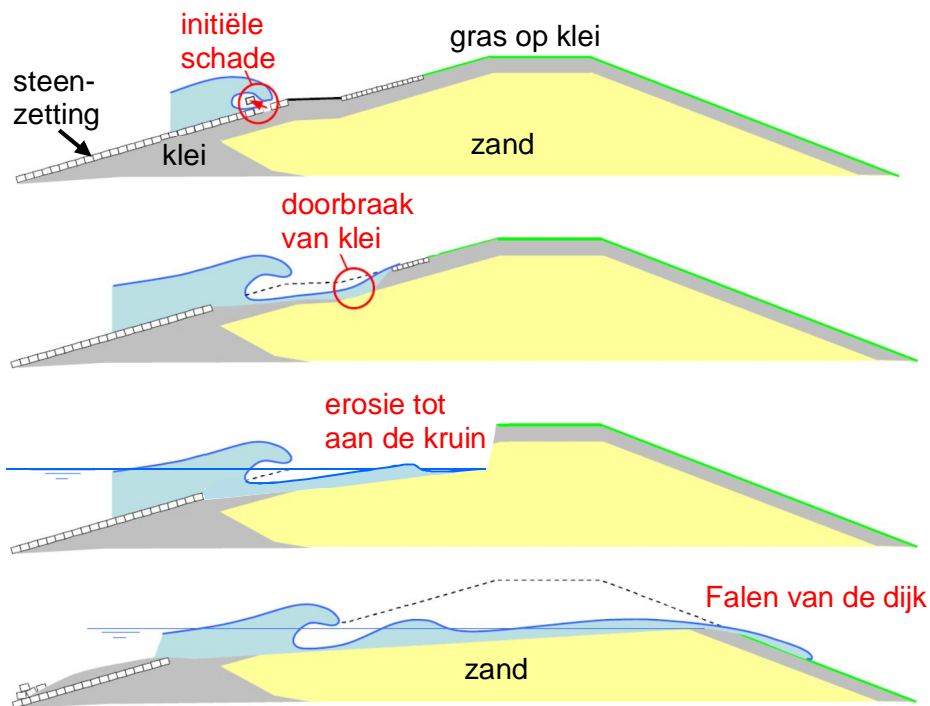
Figuur 8.11 Ontwikkeling van schade aan de steenzetting: van toplaag tot geotextiel

Voor veel geklemde steenzettingen blijkt het proces van het ondermijnen van de steenzetting door het uitspoelen van het filter door het gat in de toplaag een cruciale factor te zijn voor de totale sterkte van de bekleding, zie Figuur 8.11b. Onder sommige omstandigheden spoelt het filtermateriaal niet uit en kan de steenzetting nog heel lang na het ontstaan van de initiële schade standhouden.

Na het wegspoelen van de resten van de toplaag, het filter en het geotextiel (indien aanwezig) zal bij de meeste dijken de verdere erosie beperkt worden door een kleilaag. De samenhang in de kleilaag maakt dat deze niet zo snel door de golfbelasting erodeert en daardoor een belangrijke bijdrage levert aan de totale sterkte.

In Figuur 8.12 zijn verschillende stadia gegeven tot het doorbreken van de dijk. Nadat de kleilaag is weggeërodeerd door de golven, zal de erosie vervolgens de zandkern aantasten. In feite graven de golven in horizontale richting door de dijk, waarbij er een steeds langer flauw erosieterras vlak onder de waterlijn ontstaat, en een steile klif op de waterlijn.

Naarmate het volume van de dijk groter is, zal de erosie-weerstand van de zandkern groter zijn. Sommige dijken zijn breder dan strikt noodzakelijk voor het keren van water, bijvoorbeeld omdat er een weg op de kruin ligt of er een opgespoten industrieterrein achter ligt. Dergelijke dijken bieden daarom een grote tot zeer grote erosie-weerstand.



Figuur 8.12 Verschillende stadia van erosie van de dijk tot de dijkdoorbraak

Alleen als de duur van de hydraulische belasting tijdens de extreme omstandigheden (superstorm) langer is dan de erosieduur, zal de erosie tot een dijkdoorbraak leiden. Anderzijds kan de erosieduur voldoende zijn om een doorbraak te voorkomen, ondanks dat de steenzetting reeds is bezweken. Daarmee is de erosieduur een belangrijke factor als het gaat om de faalkans van de dijk (kans dat de dijk doorbreekt en er water doorheen gaat stromen richting het achterland).

Het is echter ook mogelijk dat gedurende het erosieproces, wanneer nog maar een deel van het dijklichaam is aangetast door erosie, er een ander mechanisme optreedt. Door het steeds smaller wordende profiel kan het binnentalud van de dijk eerder instabiel worden door toename van de waterspanningen in de dijk (micro- of macro-instabiliteit) of door overslaande golven (stabiliteit bekleding op het binnentalud bij golfoverslag).

### 8.8.3 Falen als gevolg van overige mechanismen

De overige mechanismen die leiden tot bezwijken van de toplaag als gevolg van golfbelastingen zijn:

- Materiaaltransport vanuit de ondergrond (de waterbeweging in het filter is zodanig dat het onderliggende zand of klei gaat eroderen en uitspoelt, waardoor de toplaag verzakt en zijn samenhang verliest).
- Materiaaltransport vanuit de granulaire laag (de korrels van het filter spoelen uit door de gaten in de toplaag, waardoor de toplaag verzakt en zijn samenhang verliest).

Deze mechanismen zijn inleidende mechanismen die na enige tijd leiden tot een gat in de toplaag. Daardoor is de in paragraaf 8.8.2 gegeven procesbeschrijving ook van toepassing op deze mechanismen.

Als grote golfbelasting leidt tot een lokale afschuiving in de golfaanvalzone moet worden aangenomen dat dit vrij snel zal leiden tot het bloot komen van de zandondergrond. Dit wordt beoordeeld als een gevaarlijke situatie, omdat de golfbelasting dan direct op de zandkern inwerkt en voortgaande erosie veroorzaakt. Daarom is een paar decennia geleden besloten om geen weerstand van de onderlagen in rekening te brengen bij dit mechanisme. In feite wordt daarmee gezegd dat het optreden van het mechanisme volgens de rekenmethode hetzelfde is als het doorbreken van de dijk.

In werkelijkheid zal er toch geruime tijd overheen gaan voordat de afschuiving zich voltrokken heeft, omdat er vele golven nodig zijn om een behoorlijke vervorming te veroorzaken. Verder zal daarna een aanzienlijke erosie van het dijklichaam moet optreden voordat er sprake is van een doorbraak, zoals geschetst in Figuur 8.12. In werkelijkheid is er dus wel resterende sterkte, terwijl dat in de berekening niet wordt meegeteld. De rekenmethode is op dit aspect dus conservatief.

Bezwijken van de toplaag als gevolg van langsstroming is een mechanisme waarbij het bezwijken wordt veroorzaakt door een andere belasting dan bij de andere mechanismen. Niet de erosie door golven, maar de erosie door stroming zal tot falen van de waterkering moeten leiden. Dat maakt dat de schadeontwikkeling mogelijk ook anders zal verlopen, al kunnen dezelfde items als bij de andere mechanismen worden onderscheiden, zie de foutenboom in Figuur 8.3.



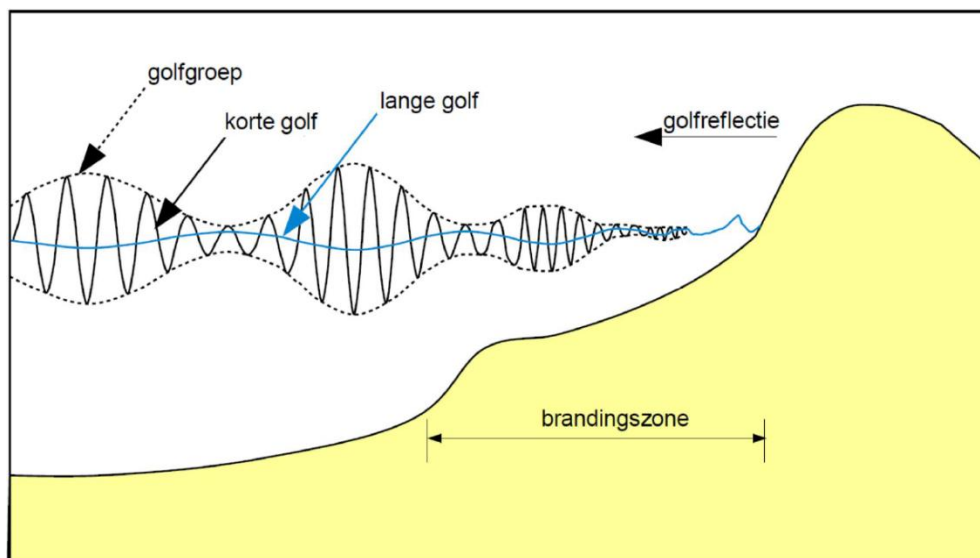


## 9 Duinafslag

### 9.1 Fenomenologische procesbeschrijving

Het faalmechanisme duinafslag treedt op bij de primaire duinwaterkeringen langs de Noordzeekust. Tijdens zware stormen op het Noordzeebekken treedt er waterstandopzet door wind op. In combinatie met het getij leidt dit tot een hoge waterstand: het stormvloedpeil. Deze stormen zijn ook verantwoordelijk voor de groei van (wind)golven die worden beschreven met een golfhoogte en een golfperiode. Stormvloedpeil, golfhoogte en golfperiode vormen daarom de hydraulische belastingen voor duinafslag.

Wanneer windgolven de ondiepe kust naderen, breken er veel golven. De hoeveelheid golfbreking wordt bepaald door de lokale waterdiepte. Bij de golfbreking gaat een deel van de golfenergie verloren, waardoor de golfhoogte lager wordt. Maar door de golfbreking ontstaan ook zogenaamde lange golven met een periode gelijk aan 5 – 10 keer de golfperiode van de gebroken windgolven, zie Figuur 9.1. Deze lange golven breken pas veel later en zijn daarom in staat om het duinfront gemakkelijker te belasten dan de gebroken windgolven.

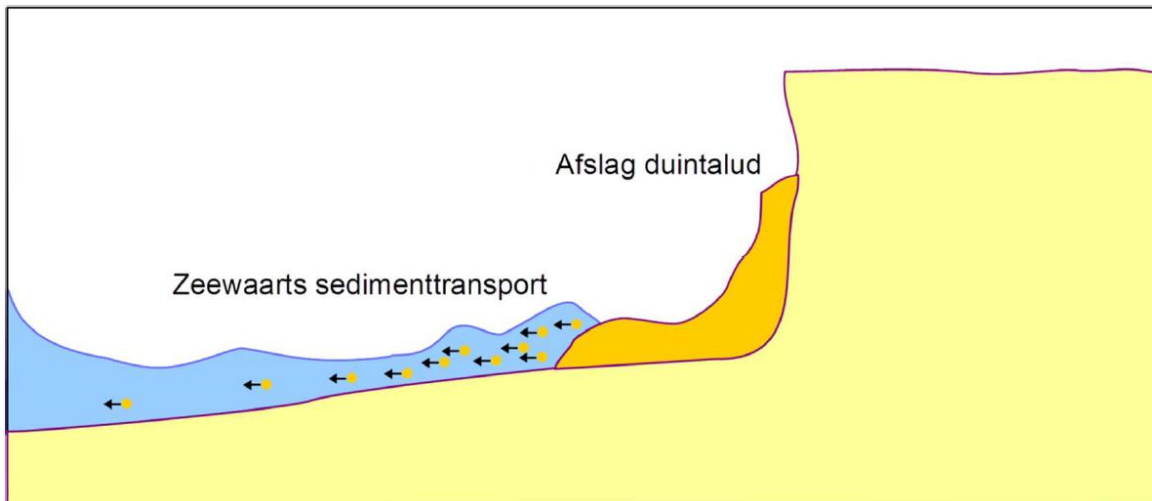


Figuur 9.1 Belasting van een duin door windgolven en lange golven

De sterkte van een duinwaterkering is gelegen in de vorm en het volume zand dat in een duinwaterkering aanwezig is. Dat laat zich beschrijven met een dwarsprofiel, loodrecht op de kustlijn. Daarnaast is de korrel diameter van het zand van belang, waarbij een grotere korrel diameter voor minder duinafslag zorgt.

Onder invloed van golven, stromingen en wind hebben duinwaterkeringen een dynamisch karakter. Ook onder normale omstandigheden vindt er transport van zand plaats waardoor op de ene locatie zand erodeert en op een andere locatie aanzanding optreedt. Om structurele erosie tegen te gaan waardoor uiteindelijk duinwaterkeringen zouden kunnen falen, voert het Rijk sinds 1990 een kusthandhavingprogramma uit voor het overgrote deel van de Noordzeekust. Zonder deze maatregelen zou op sommige plaatsen veel zand van het strand en het duin verdwijnen waardoor de sterkte van de duinwaterkering wordt aangetast.

Tijdens stormen wordt de waterstand verhoogd waardoor golven boven de duinvoet kunnen komen en er afslag van het duinfront kan optreden. Als gevolg van windopzet, golfopzet en golfoploop is deze waterstand hoger dan de waterstand die op dat moment op zee wordt gemeten.

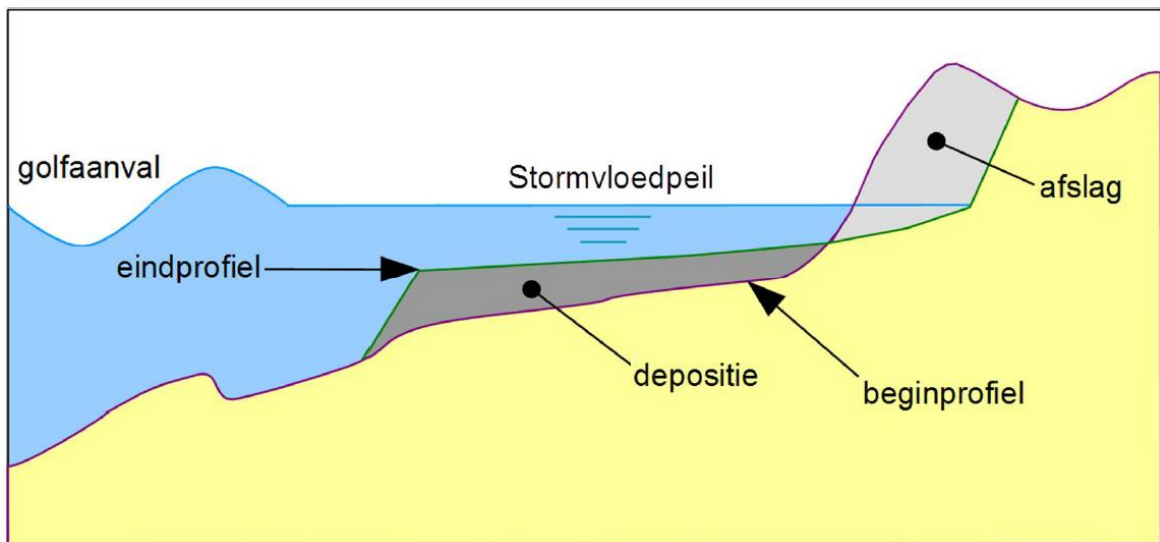


Figuur 9.2 Duinerosieproces door afslag en zeewaarts transport

Als door stormopzet de golven een duin gaan belasten, wordt het duinfront aan de onderkant uitgehold. Als gevolg hiervan wordt het duintalud steiler, totdat er een instabiele situatie optreedt en er opeens een hoeveelheid zand naar beneden stort. Door golfbeweging en retourstroom wordt dit zand zeewaarts afgevoerd, totdat er opnieuw uitholling van het duintalud optreedt en het proces zich herhaalt, zie Figuur 9.2.

Aannemende dat er geen netto zandtransport plaatsvindt langs de kust, zal het zand dat afslaat op het strand komen te liggen. Daardoor krijgen windgolven na verloop van tijd steeds minder de mogelijkheid het duinfront te bereiken. Het afslagproces gaat dan nog door omdat lange golven nog steeds in staat zijn om het duinfront te bereiken, zie Figuur 9.1. Het afslagprofiel verflauwt vervolgens verder en daardoor neemt ook de belasting door de lange golven af. Als de hydraulische condities voor de kust (waterstand en golven) maar lang genoeg stationair blijven, zal er (vrijwel) geen afslag meer plaatsvinden: de evenwichtssituatie is bereikt, zie Figuur 9.3. Deze evenwichtssituatie kan alleen worden bereikt als de duinwaterkering voldoende sterk is. De duinwaterkering kan in de praktijk ook voldoende sterk blijken als de duur van de storm onvoldoende lang is om een doorbraak van het duin te veroorzaken: de afslag in de eindsituatie na de storm is kleiner dan het zandvolume van het duin.

Wanneer een duinwaterkering onvoldoende sterk is, kan het afslagproces doorgaan tot de achterzijde van het duin en treedt er een doorbraak op. Het is ook mogelijk dat het duin dusdanig is verlaagd dat de golven over het duinmassief heenslaan. In dat geval treedt er ook erosie op aan de achterzijde van het duin en kan er versneld een doorbraak ontstaan. Dit heeft tot gevolg dat er een overstroming van het achtergelegen land optreedt. Indien er na de storm een bres aanwezig blijft, kan deze door de getijwerking verder uitschuren totdat er uiteindelijk een zeegat ontstaat.



Figuur 9.3 Duinprofiel voor en na een storm

Op een aantal locaties langs de kust zijn zwakke duintrajecten versterkt met een achterliggende dijk, met een duinvoetverdediging of met een strandmuur. Er zijn ook locaties waarbij een zwakke dijk is versterkt met een voorliggend zandmassief. In toenemende mate wordt deze variant ook toegepast in andere wateren dan de Noordzee. Deze typen waterkeringen worden ook wel hybride constructies genoemd. Een doorbraak van een hybride kering treedt op bij een combinatie van een aantal deelmechanismen zoals duinafslag, bezwijken van de bekleding, macro-instabiliteit en overslag.

Bij aansluitingsconstructies en NWO's kan er sprake zijn van extra afslag, waardoor er eerder sprake kan zijn van een doorbraak.

In deze beschrijving is aangenomen dat er tijdens storm geen significant netto zandtransport uit het beschouwde dijkvak optreedt. Alleen dan kan worden verondersteld dat de depositie op de vooroever gelijk is aan de afslag.

Er is vrijwel altijd sprake van zandtransport langs de kust, maar voor de beoordeling van een specifieke kustvak is het van belang of de instroom van zand door dat zandtransport langs de kust gelijk is aan de uitstroom van zand. In- en uitstroom zullen voor een uniforme rechte kustlijn elkaar in evenwicht houden. Maar bijvoorbeeld als de kust gekromd is of er zijn obstakels zoals havendammen die het langstransport onderbreken, dan zal de afslag groter zijn als er minder zand instroomt dan uitstroomt. Er zal in dat geval zelfs op de lange duur geen evenwichtssituatie kunnen ontstaan omdat er immers een netto uitstroom van zand plaatsvindt.

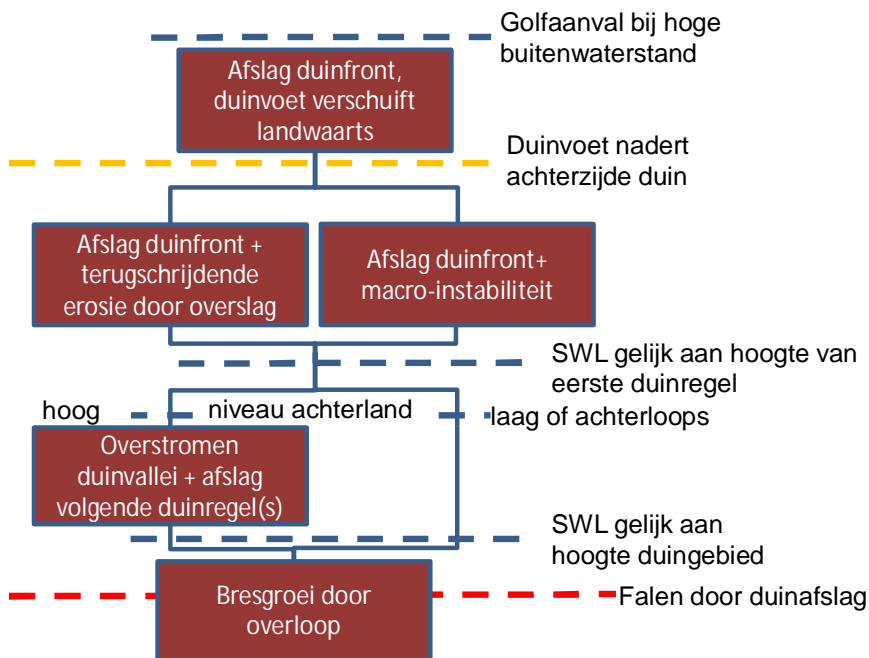
## 9.2 Resterende sterkte faalmechanisme duinafslag

Duinen zijn ontstaan door natuurlijke processen zoals water en wind. In Nederland zijn veel situaties waarbij de duinen veel meer sterkte bezitten om overslag en doorbraak te weerstaan dan dat nodig is volgens de wettelijke norm. Het verschil tussen de aanwezige sterkte en het gewenste veiligheidsniveau kan als resterende sterkte worden gedefinieerd.

## 9.3 Overzicht van het faaltraject duinafslag

Figuur 9.4 geeft schematisch de gebeurtenissen weer die optreden totdat een duinwaterkering faalt. In deze figuur is uitgegaan van de aanname dat voor het rekenkundig

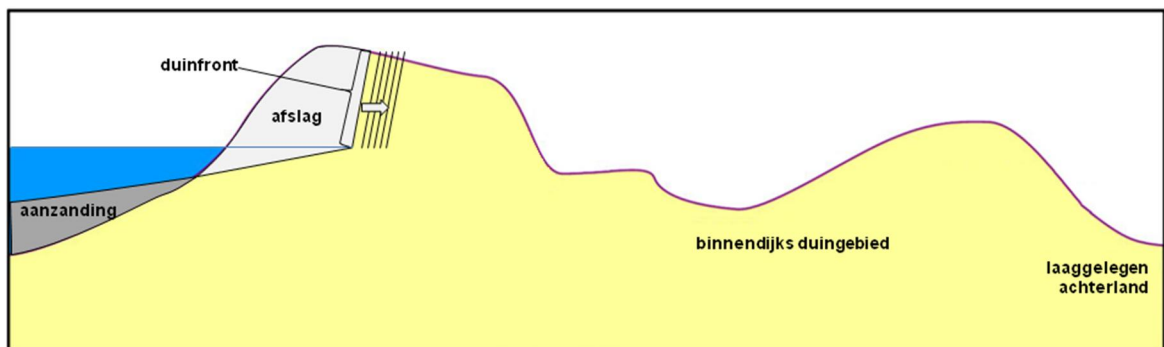
falen wordt geëist dat de combinatie van maatgevende afslag en het grensprofiel past binnen het waterstaatswerk zoals dat is vastgelegd in de legger. De veiligheid wordt beoordeeld op basis van het primair mechanisme. Als het rekenkundig falen wordt overschreden, dan kunnen er verschillende gebeurtenissen optreden. Deze worden weergegeven in het gedeelte onder de gele lijn.



Figuur 9.4 Gebeurtenissen leidend tot falen van de waterkering door duinafslag

In onderstaande toelichting worden de achtereenvolgende gebeurtenissen die optreden tot het moment van daadwerkelijk falen van de waterkering beschreven. Deze beschrijving gaat uit van een steeds verdergaande schadeontwikkeling, dus een aanhoudende belasting, tot eventueel een evenwichtssituatie wordt bereikt. In werkelijkheid kan gedurende vrijwel elk genoemd proces de afslag stoppen, omdat de storm gaat liggen, waardoor de buitenwaterstand zakt en de golven lager worden. In de in dat geval bereikte eindsituatie is de afslag dan nog minder dan bij een evenwichtssituatie die hoort bij de hydraulische belastingen gedurende de top van de storm.

- Afslag duinfront. Tijdens een zware storm treedt er duinafslag op aan de eerste duinregel waardoor de duinvoet steeds verder landwaarts verschuift, zie Figuur 9.5, tot uiteindelijk een evenwichtssituatie wordt bereikt, of tot het volgende stadium wordt bereikt.



Figuur 9.5 Landwaartse verschuiving van het duinfront richting achterkant van het duin

- Duinvoet nadert de achterkant duin. Als de stormomstandigheden zwaar genoeg zijn in vergelijking met de sterkte van het duin, zal als gevolg van de afslag de duinvoet het duinfront de achterkant van het duin bereiken.
- Wanneer het restant van het duin relatief laag is, kan het gebeuren dat golven over het duin heenslaan waardoor de achterzijde van het talud bezwijkt.
- Een andere mogelijkheid is dat het restant van het duin zo smal wordt dat de stabiliteit van het zandlichaam in het geding komt: Er is sprake van macro-instabiliteit.
- Wanneer het restant van het duin is bezweken stroomt het laaggelegen terrein achter het duin vol. In het meest ongunstige geval stroomt water naar het laaggelegen achterland.
- Het kan ook zijn dat een laaggelegen duinvallei achter het bezweken duin ligt. Wanneer deze duinvallei in verbinding staat met het laaggelegen achterland stroomt water alsnog het achterland in.
- In het meest gunstige geval zorgt het volgende duin achter het bezweken duin voor de extra veiligheid. Ook dit duin zal gaan eroderen.
- Bresgroei door overloop. Als achter het aangetaste duin een laag achterland ligt of als dit lage achterland door achterloopsheid bereikbaar is, zal overloop een snel groeiende bres opleveren en leiden tot overstrooming van het achterland. Omdat de bresgroei in zand snel verloopt zal de duinwaterkering snel na het begin van de bresgroei daadwerkelijk falen.



## 10 Kunstwerken

Voor kunstwerken worden vier faalmechanismen onderscheiden die elk in een afzonderlijke paragraaf worden behandeld:

- Falen waterkering door overslag/overloop van het kunstwerk.
- Falen waterkering door niet sluiten keermiddelen van het kunstwerk.
- Falen waterkering door achter- of onderloopsheid van het kunstwerk.
- Falen waterkering door gebrek aan sterkte van het kunstwerk:

Anders dan bij dijken en duinen wordt er bij de beoordeling van een kunstwerk ook gerekend aan de consequenties voor het achterland van het water dat het kunstwerk passeert door overslag, overloop of via niet-gesloten keermiddelen. De consequenties voor het achterland zijn afhankelijk van de bergingscapaciteit van het achter het kunstwerk gelegen watersysteem of polder. Gemakshalve wordt in de volgende paragrafen die bergingscapaciteit ook benoemd als sterktecomponent van het kunstwerk.

### 10.1 Falen waterkering door overslag en/of overloop van het kunstwerk

#### 10.1.1 Fenomenologische beschrijving op hoofdlijnen

Falen als gevolg van tekort aan *hoogte* vindt plaats indien er door golfoverslag en/of overloop zoveel water over het hoogwaterkerend kunstwerk (gesloten keermiddelen) of aansluitconstructie gaat, dat het faalcriterium (overstromingsgevolgen) wordt overschreden. Dit kan enerzijds optreden bij een standzeker kunstwerk, waar door overschrijding van het bergend vermogen aan de binnenzijde van het kunstwerk significante gevolgen ontstaan. Het kunstwerk faalt dan zonder te bezwijken.

Anderzijds kan de bodembescherming aan de binnenzijde van het kunstwerk bezwijken, waarna erosie van de ondergrond optreedt en een ontgrondingskuil ontstaat. Hierdoor kan het kunstwerk als geheel zijn stabiliteit verliezen, met als gevolg een bres in de waterkering.

Het faalmechanisme *overslag en overloop* kan zowel bij punt- als langsconstructies een rol spelen. In het laatste geval gaat het om zowel vaste als demontabele keringen die over grotere lengten aanwezig zijn.

#### 10.1.2 Gedetailleerde beschrijving van het faaltraject

##### *Belasting*

De belasting op het kunstwerk wordt gevormd door een combinatie van waterstand en golfhoogte. Bij toenemende waterstand en/of toenemende golfhoogte gaat er in eerste instantie door golfoverslag steeds meer water over het kunstwerk. Zolang de buitenwaterstand lager is dan de kerende hoogte van het kunstwerk is sprake van een overslagsituatie. Dat wordt anders als de waterstand verder stijgt en hoger wordt dan de kerende hoogte van het kunstwerk. Er is dan sprake van overloop, waarbij de belasting bestaat uit een overstortende straal in combinatie met overslaande golven over het kunstwerk.

##### *Sterkte*

De sterkte van het kunstwerk omvat de volgende aspecten: de kerende hoogte en breedte van het kunstwerk; de constructieve sterkte van het kunstwerk en het kombergend vermogen

van het achterland. De sterkte van het kunstwerk zelf dient altijd in de beschouwing te worden betrokken, het kombergend vermogen van het achterland alleen als de situatie daar aanleiding toe geeft.

In het kader van dit faalmechanisme kan voor wat betreft de sterkte van het kunstwerk zelf ook nog worden gedacht aan de mate waarin de keermiddelen bestand zijn tegen overslaand en overlopend water. Bij zeer grote overslag-/overloopdebieten kunnen namelijk dynamische trillingen optreden, die kunnen leiden tot het bezwijken van de keermiddelen. Het ligt echter meer voor de hand om dit als belastingssituatie te beschouwen bij *falen waterkering door gebrek aan sterkte van het kunstwerk*.

De sterkte van de bodembescherming achter het kunstwerk is voor dit faalmechanisme een item dat moet worden beschouwd. Deze bodembescherming wordt in toenemende mate belast naarmate het overslag-/overloopdebiet toeneemt.

Het kombergend vermogen van het achterland is relevant omdat het inkomende debiet als gevolg van overslag en/of overloop niet mag leiden tot significante gevolgen in het achterland. Hiervan is bijvoorbeeld sprake als achterliggende regionale keringen bezwijken, waarna het watersysteem leegloopt in het achterliggende gebied. Voor het bezwijkproces van de achterliggende regionale keringen als gevolg van toenemende binnenwaterstanden wordt verwezen naar de beschrijvingen van het faaltraject voor dijken in de voorgaande hoofdstukken van dit document.

Op welk moment gevolgen wel of niet significant zijn, is in enige mate subjectief. Voor komberging bij kunstwerken wordt binnen het Wettelijk beoordelingsinstrumentarium (WBI) de volgende definitie van 'significante gevolgen' gehanteerd: meer dan 10 miljoen euro schade en/of ten minste 1 slachtoffer. In de schematiseringshandleidingen van de verschillende toetssporen bij kunstwerken [20], [21], [22] en [23] worden praktische aanwijzingen gegeven hoe hiermee om te gaan.

### *Het proces van initiatie tot falen*

Het debiet dat via golfoverslag en/of overloop over het kunstwerk stroomt, neemt toe bij toenemende waterstanden en/of golfhoogten. Dit inkomende debiet moet via het kunstwerk worden afgevoerd naar het binnendijkse watersysteem. De bodembescherming achter het kunstwerk is nagenoeg altijd het kritieke onderdeel op de weg van keermiddel naar het achterliggend watersysteem. Bij toenemende overslag-/overloopdebieten neemt de stroomsnelheid boven de bodembescherming toe. Dit leidt tot schade aan de bodembescherming als de kritieke stroomsnelheid van de bodembescherming wordt overschreden. In de praktijk is dit veelal het begin van een geleidelijk erosieproces, waarbij bij toenemende stroomsnelheid steeds grotere schade aan de bodembescherming ontstaat en uiteindelijk de ondergrond onder de bodembescherming bloot komt te liggen. In dat geval faalt de bodembescherming en kan transport van bodemmateriaal uit de ondergrond onder de bodembescherming plaatsvinden. Dit leidt tot ontgrondingskuilen direct achter het kunstwerk. Deze ontgrondingskuilen worden groter en dieper naarmate de ondergrond langer belast wordt door de stroming als gevolg van het overslag-/overloopdebiet. Uiteindelijk kunnen deze ontgrondingskuilen dermate groot en diep worden dat dit leidt tot overall instabiliteit en hiermee bezwijken van het kunstwerk.

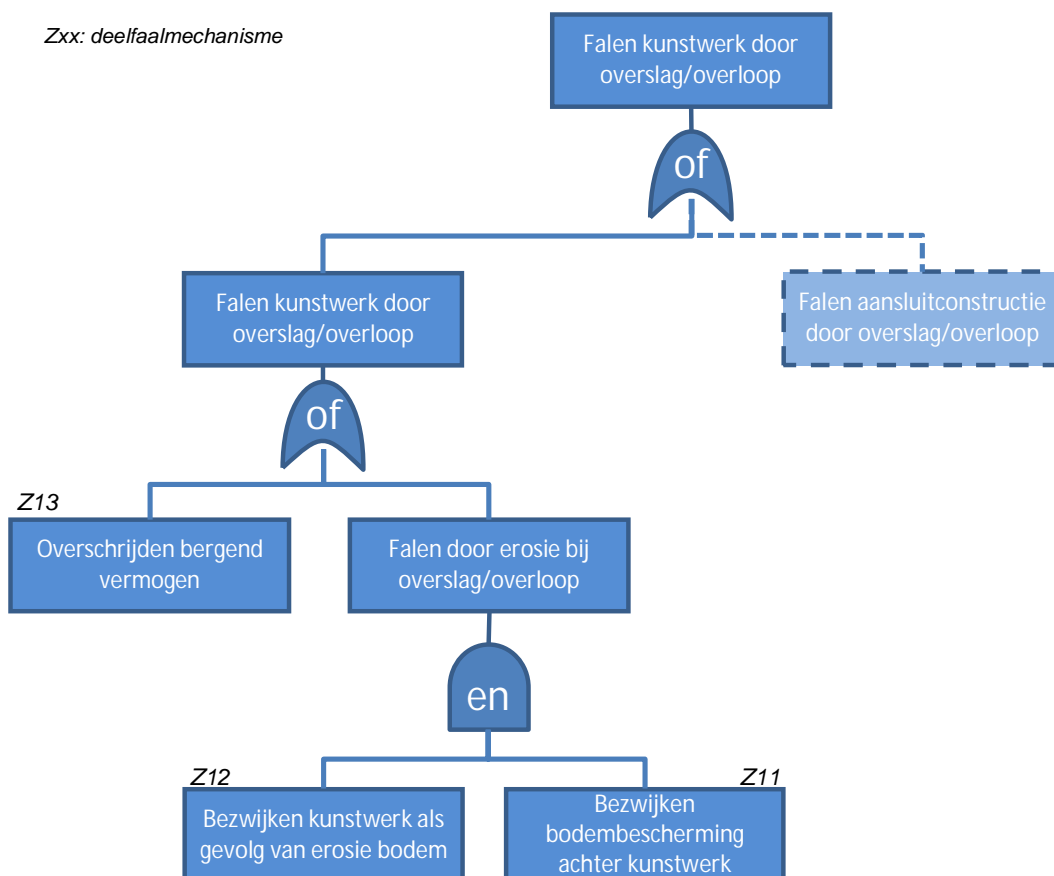


Ook als het kunstwerk zelf niet bezwijkt, moet het overslag-/overloopdebiet na passage van het kunstwerk in het achterliggende gebied veilig kunnen worden geborgen. Als het inkomend debiet groter is dan het kombergend vermogen, leidt dit tot significante overstromingsgevolgen. Dan is eveneens sprake van falen van het kunstwerk. Overschrijding van het kombergend vermogen leidt direct tot significante gevolgen als bijvoorbeeld de waterstand in het binnendijkse watersysteem zover stijgt dat regionale keringen bezwijken, waarna het binnendijkse watersysteem leegloopt in het achterliggende gebied. Hierbij dient het wel te gaan om een watersysteem van enige omvang. Bij sommige constructietypes (bijvoorbeeld coupures) is geen sprake van een achterliggend binnenwatersysteem. Bij deze constructies moet op andere gronden een inschatting worden gemaakt van het overslag-/overloopdebiet dat nog net niet leidt tot significante gevolgen aan de binnenkant van de kering. In de schematiseringshandleidingen van de verschillende toetsporen bij kunstwerken worden hiertoe praktische aanwijzingen gegeven.

10.1.3 Onderscheiden deelmechanismen bij falen door overslag/overloop van kunstwerk  
De volgende deelmechanismen worden onderscheiden in de foutenboom die wordt gehanteerd voor de beoordeling, zie Figuur 10.9:

- $Z_{11}$  Bezwijken bodembescherming
- $Z_{12}$  Bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem
- $Z_{13}$  Overschrijden bergend vermogen

Zxx: deelfaalmecanisme



Figuur 10.1 Foutenboom falen waterkering als gevolg van overslag/overloop van het kunstwerk

In deze foutenboom is ook een tak *Falen aansluitconstructie door overslag / overloop* weergegeven. Deze tak is niet nader geconcretiseerd. Bredeveld en van Bree [24] gaan dieper in op de problematiek van aansluitconstructies. Verondersteld wordt dat eventuele gebreken aan de aansluitconstructie worden onderkend en hersteld in het dagelijks beheer.

#### 10.1.4 Resterende sterkte

Bij het faalmechanisme *overslag en overloop* kan worden gesteld dat sprake is van resterende sterkte na het moment van bezwijken van de bodembescherming. Deze resterende sterkte zit opgesloten in het deelmechanisme  $Z_{12}$  *Bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem*. Middels dit mechanisme kan de kans worden meegenomen dat het kunstwerk als geheel bezwijkt (onderuit gaat) door erosie van de ondergrond nadat bezwijken van de bodembescherming heeft plaatsgevonden.

Voordat er een bres optreedt nadat het kunstwerk als geheel bezweken is na het bezwijken van de bodembescherming moet een aantal vervolprocessen optreden:

- Erosie van de onbeschermd bodem als gevolg van de stroomsnelheden. Dit proces leidt uiteindelijk tot steeds diepere ontgrondingskuilen.
- Vervolgens moet een afschuiving optreden aan de rand van deze ontgrondingskuil, waarvan de inscharing het kunstwerk moet bereiken.
- Door het steeds verder wegvallen van passieve gronddruk aan de binnenzijde, door het uitspoelen van gronddeeltjes onder de binnenzijde van het kunstwerk, zal het kunstwerk steeds verder vervormen danwel verplaatsen (kantelen, verschuiven).
- Uiteindelijk bezwijkt het kunstwerk als gevolg van kantelen en/of verschuiven van het geheel of het opeenvolgend bezwijken van onderdelen van de constructie: het kunstwerk faalt.

De resterende sterkte van het kunstwerk na bezwijken van de bodembescherming is dus afhankelijk van een groot aantal factoren. De belangrijkste zijn:

- Erosiebestendigheid van de bodem onder de bodembescherming  
De vorming van een ontgrondingskuil gaat in zandige grond veel sneller dan in cohesieve grond (klei).
- Fundatie van het kunstwerk.  
Een kunstwerk dat op palen staat zal minder snel (deels) bezwijken dan een kunstwerk dat op staal gefundeerd is.
- Geometrie van het kunstwerk.  
Een kort kunstwerk (waarbij de lengte wordt gemeten loodrecht op de dijk) zal sneller kantelen of afschuiven dan een lang kunstwerk.

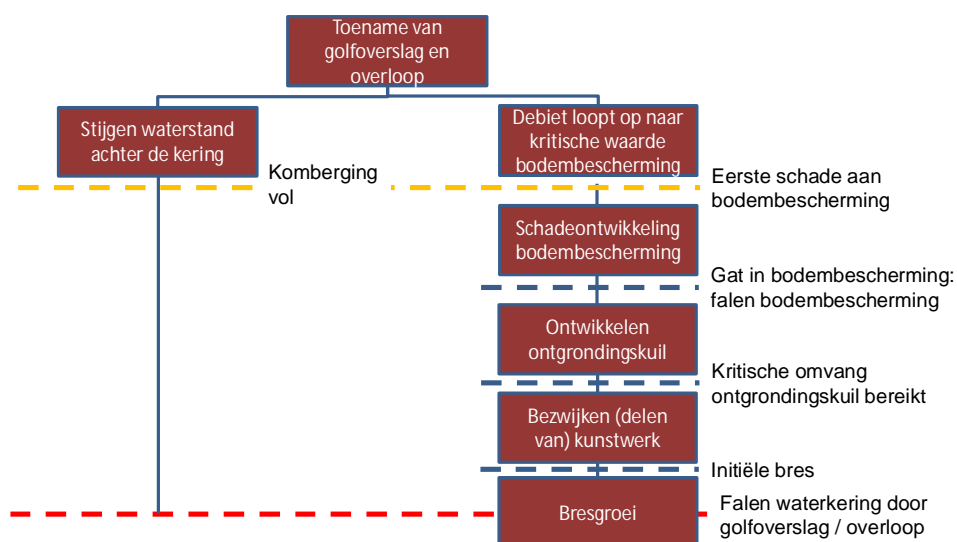
Nadat de bodembescherming is bezweken moet er dus nog het nodige gebeuren voordat het kunstwerk als geheel bezwijkt. Helaas is het zeer lastig de resterende sterkte te kwantificeren en uit te drukken in een concrete kans op bezwijken van het kunstwerk als geheel nadat bezwijken van de bodembescherming is opgetreden. Concrete aanwijzingen hiervoor ontbreken, waardoor in de praktijk deze resterende sterkte normaliter niet wordt meegenomen en de kans op bezwijken van de bodembescherming de kans op falen door erosie als geheel bepaalt. Het moge duidelijk zijn dat er een aanzienlijke mate van resterende sterkte aanwezig is.

Na overschrijding van het kombergend vermogen is er geen sprake van resterende sterkte. Er zijn immers geen resterende deelprocessen die nog gekwantificeerd kunnen worden.

Bij het mechanisme overschrijding van het kombergend vermogen is geen sprake van bezwijken van het kunstwerk, met bresgroei tot gevolg. In theorie zouden situaties voor kunnen komen waarbij overschrijding van het kombergend vermogen alsnog leidt tot bezwijken van het kunstwerk. Dit zou bijvoorbeeld kunnen gebeuren als door het bezwijken van een regionale kering instantaan een dusdanig verval over het kunstwerk ontstaat, dat de keermiddelen bezwijken of de waterdiepte zo klein wordt dat de kritieke stroomsnelheid voor de bodembescherming wordt overschreden. In de praktijk komen deze situaties echter niet of nauwelijks voor.

#### 10.1.5 Overzicht van het faaltraject overslag/overloop bij kunstwerken

In Figuur 10.2 is een schematisch overzicht van het proces van falen van het kunstwerk als gevolg van overslag en/of overloop gegeven.



Figuur 10.2 Gebeurtenissen leidend tot falen van de waterkering door overslag en/of overloop van het kunstwerk

## 10.2 Falen waterkering door niet sluiten keermiddelen van het kunstwerk

In dit hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van het faalmechanisme *niet sluiten* van hoogwaterkerende kunstwerken. Deze beschrijving is grotendeels geënt op hetgeen hierover staat beschreven in de Leidraad Kunstwerken [25].

Het faalmechanisme *niet sluiten* kan zowel bij hoogwaterkerende punt-<sup>2</sup> als langsconstructies een rol spelen. In het laatstgenoemde geval gaat het om demontabele keringen die over grote lengten aanwezig zijn. De methode in de Leidraad Kunstwerken is niet op dergelijke constructies ingericht, maar geeft wel handvatten voor een eerste verkenning hiervan. In deze paragraaf vindt de uitwerking voor de puntconstructies plaats. Voor demontabele keringen is, ten behoeve van de Wettelijke beoordeling, een apart document opgesteld voor de *betrouwbaarheid sluiting* [26].

De verwachting is dat de Leidraad Kunstwerken in de komende jaren (deels) wordt herschreven. In de nieuwe leidraad wordt de overstromingskansbenadering opgenomen, wat

<sup>2</sup> onder puntconstructies worden kunstwerken verstaan die in de richting van de as van de waterkering een dusdanig beperkte lengte hebben dat een eventueel lengte-effect verwaarloosbaar is;

tot aanpassingen van de toelaatbare faalkansruimte leidt, en wellicht ook het faalcriterium zal betreffen. De basisfilosofie omtrent het faalmechanisme niet sluiten verandert naar alle waarschijnlijkheid niet.

#### 10.2.1 Beschrijving op hoofdlijnen

De categorie kunstwerken in waterkeringen die in moeten worden beoordeeld op mechanisme niet sluiten, worden aangelegd met als doel om water, mensen, voer- en vaartuigen en/of goederen een waterkering te laten passeren. In feite is dat de primaire functie van deze kunstwerken. Om dit passeren mogelijk te maken zijn in de kunstwerken openingen aanwezig, die de waterkerende functie van de kering ondermijnen. Dit wordt ondervangen door deze openingen afsluitbaar te maken door middel van één of meerdere keermiddelen. Hiermee wordt de functie van waterkeren bij deze kunstwerken gerealiseerd.

De aanwezigheid van afsluitbare openingen in een waterkering brengt met zich mee dat er een kans is dat deze openingen niet zijn afgesloten op momenten dat dit vanuit het oogpunt van waterveiligheid wordt verlangd. Het faalmechanisme *niet sluiten* heeft betrekking op het bepalen van deze kans.

Bij het sluiten van de keermiddelen is er altijd een kans dat deze sluiting mislukt. Wanneer dit gebeurt, en op dat moment doet zich een waterstand aan de buitenzijde van de waterkering voor die dusdanig hoog is dat er ongewenst water door de openingen van buiten naar binnen stroomt, dan ontstaat een kans op falen van de waterkering.

Daadwerkelijk falen als gevolg van *niet sluiten* treedt op indien:

- De hoeveelheid instromend water per tijdseenheid door het niet-gesloten kunstwerk een bepaald kritiek debiet overschrijdt of;
- De totale hoeveelheid instromend water een bepaald kritiek volume overschrijdt waarbij er substantiële (overstromings)gevolgen aan de binnenzijde van de waterkering optreden.

De grondslag voor het kritieke debiet of het kritieke instromende volume is afhankelijk van specifieke sterkte-eigenschappen van een kunstwerk en de kenmerken van het achterliggende watersysteem. Bij dit laatste wordt gedoeld op het vermogen van het achterliggende watersysteem om een bepaalde hoeveelheid instromend water te bergen (komberging) zonder dat dit tot grote gevolgen leidt. Bij de sterkte-eigenschappen gaat het vooral om de sterkte van de binnendijks aanwezige bodembescherming. Indien deze bodembescherming de optredende stroomsnelheden niet kan weerstaan – op dit moment wordt de kritieke stroomsnelheid overschreden – ontstaat erosie van de bodembescherming. Dit kan leiden tot ontgrondingen, en daarmee uiteindelijk tot instabiliteit van het kunstwerk als geheel. Tussen het overschrijden van het kritieke debiet en het geheel bezwijken van het kunstwerk bevindt zich nog een bepaalde resterende sterkte. Deze kan in de bepaling van de faalkans (bezwijkkans) worden meegenomen.

#### 10.2.2 Gedetailleerde beschrijving van het faaltraject

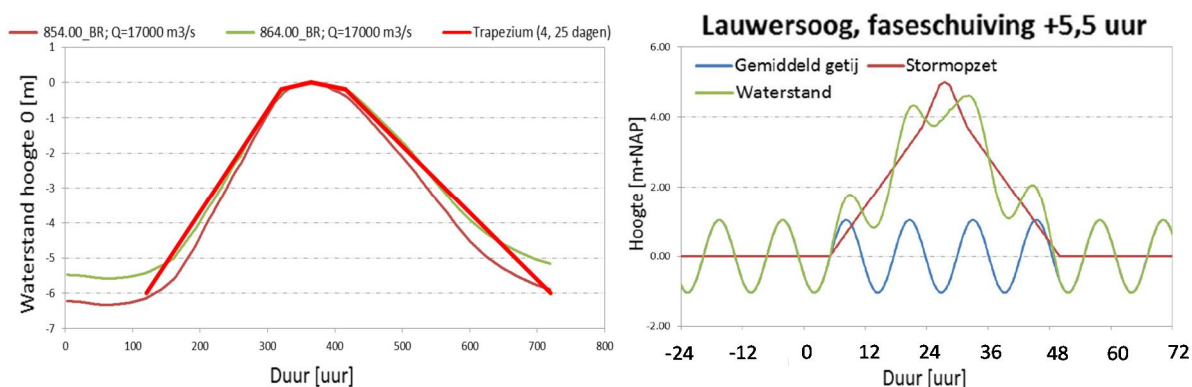
##### *Belasting*

De belasting van het systeem bestaat uit water dat door het niet-hoogwaterkerend-gesloten kunstwerk naar binnen stroomt. Dit vindt plaats op het moment dat de buitenwaterstand

hoger is dan de drempel van het niet-hoogwaterkerend-gesloten kunstwerk of de binnenwaterstand achter het kunstwerk. Het instromende water vormt de belasting op het achterliggende watersysteem (komberging) en de bodembescherming (erosie) aan de binnenzijde van het kunstwerk.

De hydraulische belasting wordt beschreven met het watersysteem-afhankelijke verloop van de buitenwaterstand en de golven. Deze belasting bepaalt in een gegeven situatie mede de totale hoeveelheid instromend water. Eigenschappen van het kunstwerk, zoals afmetingen van de doorstroomopeningen en de hoogte van de drempel van het niet-gesloten kunstwerk, zijn ook van invloed op het instromende volume.

Het verloop van een hoogwater is afhankelijk van het watersysteem waartegen het kunstwerk bescherming biedt. Zo is het verloop van een hoogwatergolf in het bovenrivierengebied anders dan dat van een hoogwatergolf langs de kust. In Figuur 10.3 is voor zowel een deel van het bovenrivierengebied als een kustlocatie een geschematiseerd verloop van een hoogwatergolf weergegeven. Deze grafieken zijn afkomstig uit studies om te komen tot een standaard voor waterstandsverlooptlijnen [28], [27]. Het maakt duidelijk dat, afhankelijk van de locatie, er een groot verschil kan zijn in de tijdsduur dat een hoogwater zich voordoet.



Figuur 10.3 Geschematiseerd waterstandsverloop voor een tweetal locaties, links: Bovenrijn; rechts Lauwersoog

De afmetingen van de doorstroomopening(en) en hoogteligging van de drempel van het niet-hoogwaterkerend-gesloten kunstwerk zijn van invloed op het instromende debiet dat bij een bepaalde waterstand optreedt. Hiermee bepalen deze factoren, samen met de buitenwaterstand, de belastingen op het kunstwerk en de bijbehorende komberging. In de basis zijn er drie situaties mogelijk:

1. *Verticale wand of hoge drempel (bijvoorbeeld coupure)*  
In dit geval is bij het niet-hoogwaterkerend-gesloten zijn van het kunstwerk een element in het kunstwerk aanwezig, dat zorgt voor een drempel waar het water via golfoverslag en/of overloop overheen moet stromen. 'Hoge' heeft hier betrekking op het feit dat de hoeveelheid instromend water geen invloed ondervindt van eventueel aanwezig binnenwater.
2. *Lage drempel (bijvoorbeeld keersluis)*  
Hierbij is bij het niet-hoogwaterkerend-gesloten zijn van het kunstwerk direct contact tussen buiten- en binnenwater, waardoor het debiet aan instromend water beïnvloed wordt door de binnenwaterstand.

### 3. *Verdronken koker*

Water stroomt bij het niet-hoogwaterkerend-gesloten zijn van het kunstwerk via een buis of koker naar binnen, waarbij er direct contact is tussen binnen- en buitenwater en waarbij de constructie geheel onder water ligt. In tegenstelling tot de lage drempel zijn de afmetingen van de doorstroomopening hierbij fysiek beperkt.

#### *Sterkte*

De sterkte van het kunstwerk bestaat in feite uit de betrouwbaarheid van het sluitingsproces van de keermiddelen in combinatie met de volgende drie componenten: de afmetingen van het niet-gesloten kunstwerk, de sterkte van het kunstwerk zelf en het kombergend vermogen van het achterland. De sterkte van het kunstwerk zelf, tot uiting gebracht in de sterkte van de binnendijs aanwezig bodembescherming, dient altijd in de beschouwing te worden betrokken, het kombergend vermogen van het achterland alleen als de situatie daar aanleiding toe geeft.

De sterkte van de binnendijs aanwezig bodembescherming is veelal maatgevend ten opzichte van het kombergend vermogen. De bodembescherming wordt in toenemende mate belast naarmate het instromend debiet toeneemt.

De betrouwbaarheid van het sluitingsproces van de keermiddelen in een kunstwerk gegeven een sluitvraag kan in een kans op falen van het sluiten gegeven hoogwater worden uitgedrukt. Hierbij zijn de volgende gegevens van belang:

- a. Procedure en technische uitvoering sluiting hoogwaterkerende keermiddelen.
  - b. Het (dagelijks) gebruik van het kunstwerk (i.e. hoogwaterkerende keermiddelen).
  - c. Mogelijkheden om een falende sluiting te herstellen.
- ad a. Het aantal en type (inclusief aandrijving) hoogwaterkerende keermiddelen is primair van belang bij het sluitproces. Er zijn keermiddelen die uit zichzelf sluiten onder invloed van de zwaartekracht (terugslagkleppen), maar er zijn ook keermiddelen die met de hand geplaatst moeten worden (schotbalken). Kunstwerken worden daarnaast ook vaak uitgerust met meerdere hoogwaterkerende keermiddelen ten einde een bepaalde betrouwbaarheid van sluiting na te streven.

Naast de fysieke uitvoering van het sluiten van de keermiddelen, is het ook van belang dat de procedure omtrent het sluiten goed is georganiseerd. Alarmering, mobilisatie en bediening zijn hierbij van wezenlijk belang.

Om de faalkans van het sluiten van de hoogwaterkerende keermiddelen in te schatten zijn in de Leidraad Kunstwerken twee hulpmiddelen voor handen.

Voor hoogwaterkerende keermiddelen die niet vanuit hun primaire functie worden gesloten zijn er vier scoretabellen aanwezig, op basis waarvan (door het beantwoorden van specifieke vragen) een faalkans van sluiting kan worden bepaald:

- Tabel B3.2 (voor falen hoogwateralarmeringssysteem).
- Tabel B3.3 (voor falen mobilisatie).
- Tabel B3.4 (voor falen bediening).
- Tabel B3.5 (voor falen bedrijfsvoering als gevolg van een technische storing).

Verder is er voor hoogwaterkerende keermiddelen die vanuit hun primaire functie meerdere keren per jaar gesloten worden een zestal tabellen met standaard faalkansen voor verschillende soorten componenten en rubrieken aanwezig:

- Tabel B3.7 (elektrische/elektronische componenten).
- Tabel B3.8 (elektromechanische componenten).
- Tabel B3.9 (hydraulische, mechanische en pneumatische componenten).
- Tabel B3.10 (operationele belemmeringen).
- Tabel B3.11 (menselijk falen).
- Tabel B3.12 (enkele geïntegreerde systemen).

Deze standaard faalkansen zijn afgeleid uit specifieke literatuur met betrekking tot faalfrequenties.

ad b. Het (dagelijks) gebruik van hoogwaterkerende keermiddelen vanuit een andere functie dan waterkeren is van invloed op de kans, dat een kunstwerk niet-hoogwaterkerend-gesloten staat op het moment dat een hoogwatergolf zich voordoet. Daarnaast heeft het ook invloed op de kans dat het sluiten succesvol plaatsvindt. Met het sluiten van de keermiddelen wordt immers (vanuit de andere functie) routine met het fysieke sluitingsproces opgedaan. In beginsel worden er dan ook vier verschillende hoofdtypen kunstwerken in relatie tot dagelijks gebruik onderscheiden:

A. *Altijd hoogwaterkerend-gesloten kunstwerken*

De keermiddelen in dit type kunstwerken zijn zo geconfigureerd, dat (behoudens een calamiteit) de primaire functie kan worden vervuld met instandhouding van de hoogwaterkerende functie.

B. *Op aanvraag te openen kunstwerken*

De keermiddelen in dit type kunstwerken zijn in beginsel altijd hoogwaterkerend-gesloten en worden alleen op aanvraag geopend om zijn primaire functie uit te oefenen. Na afloop hiervan wordt het kunstwerk weer hoogwaterkerend-gesloten.

C. *Bij hoogwater te sluiten kunstwerken*

De keermiddelen in dit type kunstwerken staan (vanuit de primaire functie) altijd open en worden bij een naderend hoogwater gesloten.

D. *Bij calamiteit te sluiten kunstwerken*

Sluiting van de keermiddelen in dit type kunstwerken is alleen benodigd als zich een calamiteit voordoet waardoor het waterkerend vermogen wordt aangetast.

Het is evident dat een altijd hoogwaterkerend-gesloten kunstwerk (i.e. type A) bij het beschouwen van falen door *niet sluiten* anders benaderd wordt dan een kunstwerk dat in beginsel geopend staat (i.e. type C of type D).

N.B. 1) Er zijn ook nog kunstwerken waarvan de keermiddelen een bepaald deel van het jaar standaard gesloten staan, omdat de primaire functie gekoppeld is aan een bepaalde tijdsperiode in jaar. Een voorbeeld hiervan is een keersluis voor een recreantenhaven, die alleen in de zomer geopend staat.

2) Er zijn ook kunstwerken waarvan de keermiddelen, in verband met hun primaire functie (waterbeheer), pas hoogwaterkerend sluiten bij een bepaalde buitenwaterstand (bijvoorbeeld in- en uitwateringssluis). Bij dit specifieke type kan tijdens de opbouw van de hoogwatergolf het debiet door het nog niet-gesloten kunstwerk toenemen.

ad c. Indien het sluiten van een keermiddel faalt, dan is het in sommige situaties nog mogelijk om dit te herstellen. Dan wordt bedoeld op situaties waarin er al water door het geopende kunstwerk naar binnenstroomt (hetgeen dus sowieso tot een waterbezwaar als gevolg van *niet sluiten* leidt), maar dit vóór het herstel nog niet tot problemen in het achterland leidt. In feite gaat dit dus over een reductie van het waterbezwaar als gevolg van *niet sluiten*. Dit is afhankelijk van de beschikbare tijd tussen het tijdstip van sluiten en het tijdstip dat er daadwerkelijk zoveel water door het geopende kunstwerk stroomt, dat een (alternatieve) sluiting niet meer mogelijk is. Daarnaast zijn de oorzaak van het falen en de afmetingen en bereikbaarheid van de te sluiten doorstroomopening(en) van belang.

In feite kan een beschikbare tijdsperiode na een falende sluiting gebruikt worden voor twee opties, te weten:

1. Herstellen van de opgetreden fout(en) bij het sluitproces. Een voorbeeld hiervan is een schuif die niet gesloten kan worden doordat er een obstakel aanwezig is. Als dit obstakel bereikbaar is, dan kan het met bijvoorbeeld een kraan op een vrachtwagen worden verwijderd, zodat de schuif alsnog kan worden gesloten.
2. Toepassen van een alternatief keermiddel. Een voorbeeld hiervan is het toepassen van big bags als de schotbalken van een coupure niet meer blijken te passen.

Het kombergend vermogen is het totale volume aan instromend water dat aan de binnenzijde van de waterkering kan worden geborgen zonder dat dit tot substantiële problemen leidt. Basis voor dit volume vormt het kritieke binnenpeil en het oppervlak waarover komberging plaats mag vinden. De daadwerkelijk aanwezige komberging is onder andere afhankelijk van:

- De aanvoer van water vanuit het achterland.
- De aanwezigheid van meerdere kunstwerken die op hetzelfde binnenwater uitkomen.
- De aanwezigheid van gemalen die eventueel instromend water ook weer (gedeeltelijk) terug kunnen pompen.
- Het peilregime van de binnenwaterstand dat voorafgaande een hoogwater wordt uitgevoerd, zoals het afmalen naar een lager peil.

Bij de bepaling van het kombergend vermogen speelt de Open Keerhoogte (OKH) een rol. In het geval van een lage drempel van het kunstwerk geeft de Open Keerhoogte aan welke waterstand aan de binnenzijde vanuit het systeem maximaal toelaatbaar is. Dit is bijvoorbeeld de kerende hoogte van de achterliggende kaden. Bij een hoge drempel (bijvoorbeeld de drempelhoogte van een coupure in stedelijk gebied) kan dit de kerende hoogte van deze drempel zijn. De OKH wordt bepaald door de fysiek aanwezige elementen en niet door instromende debieten.

Als het kombergend vermogen bekend is, dan kan deze met het verloop van de buitenwaterstand, gegevens van de constructie en de binnenwaterstand naar een kritieke buitenwaterstand worden teruggerekend. Deze kritieke buitenwaterstand, die correspondeert met het kritieke instromende volume gedurende een hoogwatergolf, wordt aangeduid met de term Open Keerpeil (OKP). De overschrijdingsfrequentie van het OKP is gelijk aan de vanuit waterveiligheid benodigde sluitfrequentie van het kunstwerk.



De relatie tussen de OKH en het OKP is gelegen in het toelaten van instromende debieten, waardoor in het geval van een beoordeling het OKP bijna altijd groter is dan het OKH. Alleen in gevallen, waarbij bijvoorbeeld grote buistoten kunnen zorgen voor een verhoging van de waterstand, kan het OKP lager zijn dan de OKH. Dit omdat buistoten niet verdisconteerd zijn in de hydraulische belastingen.

Een kombergend vermogen is meestal alleen aanwezig in het geval het kunstwerk een binnendijs water verbindt met het buitenwater, zoals dat het geval is bij sluizen, gemalen en inlaat- en uitwateringsduikers. Bij een coupure zal instromend water vaak snel ontoelaatbare overlast veroorzaken, bijvoorbeeld omdat de riolering overbelast raakt.

#### *Het traject van initiatie tot falen*

Het faalmechanisme *niet sluiten* is alleen van belang op het moment dat een kunstwerk niet-hoogwaterkerend-gesloten is als een hoogwater zich voordoet (initiatiefase). Dat is het geval als tijdens de opbouw van hoogwater één van de onderdelen van de procedure en technische uitvoering van het sluitingsproces van de keermiddelen faalt: het hoogwateralarmerings-systeem, de mobilisatie, de bediening of de bedrijfsvoering. Daarnaast dient ook nog het herstel van een falende sluiting mislukken. Onder die condities neemt de hoeveelheid instromend water (per tijdseenheid) door het niet-gesloten kunstwerk toe bij toenemende waterstanden en/of golfhoogten. Dit inkomende debiet moet via het kunstwerk worden afgevoerd naar het binnendijkse watersysteem.

Bij een toenemend instroomdebiet neemt de stroomsnelheid boven de bodembescherming toe. Indien de kritieke stroomsnelheid (behorende bij het kritieke debiet) van de bodembescherming wordt overschreden, leidt dit tot het falen van de bodembescherming. In de praktijk zal dit een geleidelijk proces zijn, waarbij bij toenemende stroomsnelheid steeds grotere schade aan de bodembescherming ontstaat en uiteindelijk de ondergrond onder de bodembescherming bloot komt te liggen. In dat laatste geval wordt de bodembescherming als bezweken beschouwd en kan transport van bodemmateriaal uit de ondergrond onder de bodembescherming plaatsvinden. Dit leidt tot ontgrondingskuilen direct achter het kunstwerk. Deze ontgrondingskuilen worden groter en dieper naarmate de ondergrond langer belast wordt door de stroming als gevolg van het instromende debiet. Uiteindelijk kunnen deze ontgrondingskuilen dermate groot en diep worden, dat dit leidt tot overall instabiliteit en hiermee bezwijken van het kunstwerk.

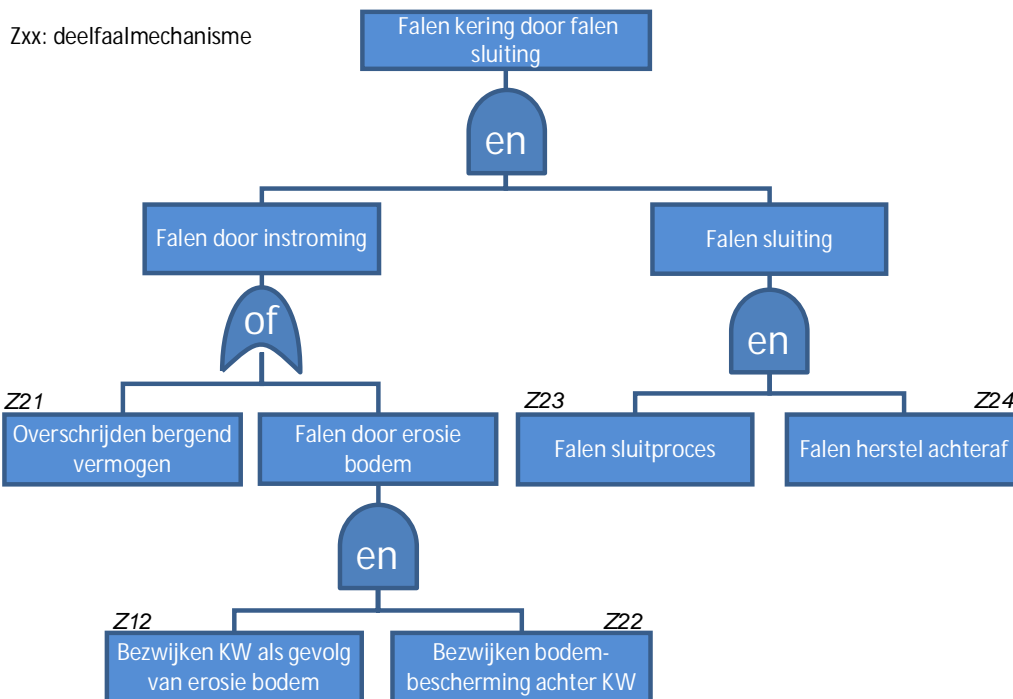
Het instromende debiet als gevolg van *niet sluiten* van het kunstwerk mag ook niet leiden tot significante gevolgen in het achterland. Hiervan is sprake als achterliggende regionale keringen bezwijken, waarna het watersysteem leegloopt in het achterliggende gebied, of er kortsluiting ontstaat tussen achterliggend gebied en buitenwater. In theorie zou daarna instantaan een dusdanig verval over het kunstwerk kunnen ontstaan, dat de keermiddelen bezwijken of de waterdiepte zo klein wordt dat de kritieke stroomsnelheid voor de bodembescherming wordt overschreden. Waardoor achter het kunstwerk ontgroning plaats kan vinden, dat uiteindelijk tot bresgroei leidt.

#### 10.2.3 Onderscheiden deelmechanismen bij falen door niet sluiten van kunstwerk

Zoals uit de voorgaande paragraaf kan worden afgeleid, worden voor het faalmechanisme niet sluiten de volgende deelmechanismen onderscheiden, zie de foutenboom in Figuur 10.4:

- Z<sub>23</sub> Falen van het sluitproces van de (hoog)waterkerende keermiddelen, waardoor het kunstwerk niet gesloten is als een hoogwater zich voordoet.
- Z<sub>24</sub> Falen van het herstel van een falend sluitingsproces.

- Z<sub>22</sub> Bezijken van de binnendijs aanwezige bodembescherming als gevolg van het instromende water door het niet-gesloten kunstwerk.
- Z<sub>12</sub> Bezijken van het kunstwerk als geheel (onderuit gaan) gegeven het feit dat de bodembescherming is bezweken. Het betreft o.a. het eroderen van de onbeschermd bodem, het ontstaan van ontgrondingskuilen en de resterende sterkte van het kunstwerk (na bezijken van de bodem).
- Z<sub>21</sub> Falen van het kunstwerk als gevolg van het overschrijden van het waterbergend vermogen in het achterland, doordat er door het niet-gesloten kunstwerk teveel water het achterland instroomt gedurende een hoogwatergolf.



Figuur 10.4 Foutenboom falen waterkering als gevolg van niet sluiten kunstwerk

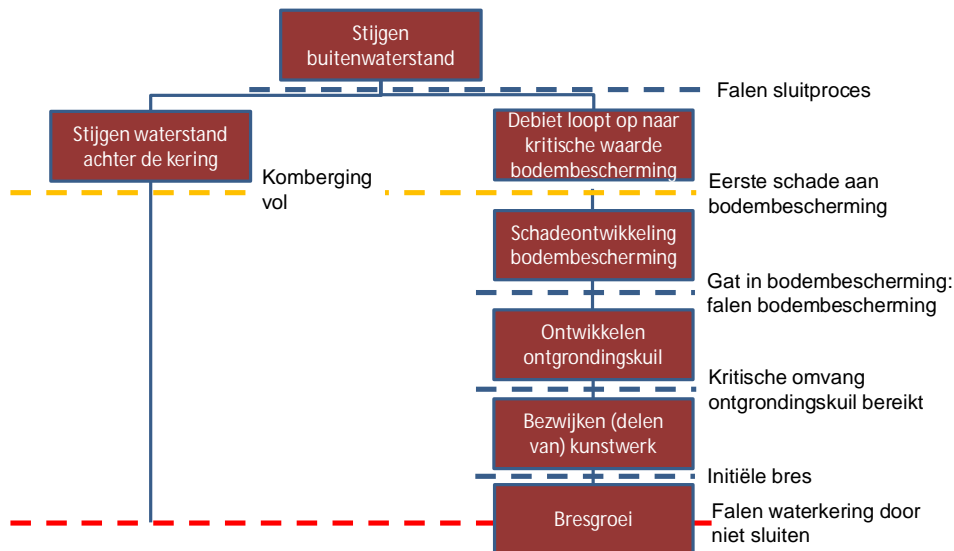
## 10.2.4 Resterende sterkte

Bij het faalmechanisme *niet sluiten* is sprake van resterende sterkte na het moment van bezijken van de bodembescherming als het resterende deel van de sterkte niet kan worden gekwantificeerd. Deze resterende sterkte zit opgesloten in het deelmechanisme *bezijken kunstwerk als geheel* (Z<sub>12</sub>). Dit deelmechanisme betreft de kans dat het kunstwerk als geheel bezwijkt (onderuit gaat) door erosie van de ondergrond nadat bezijken van de bodembescherming heeft plaatsgevonden.

Alhoewel de hydraulische belasting wellicht een net iets andere is, is dit proces analoog aan de situatie bij het falen van een kunstwerk door overslag/overloop. Voor de beschrijving van de resterende sterkte wordt daarom verwezen naar paragraaf 10.1.4.

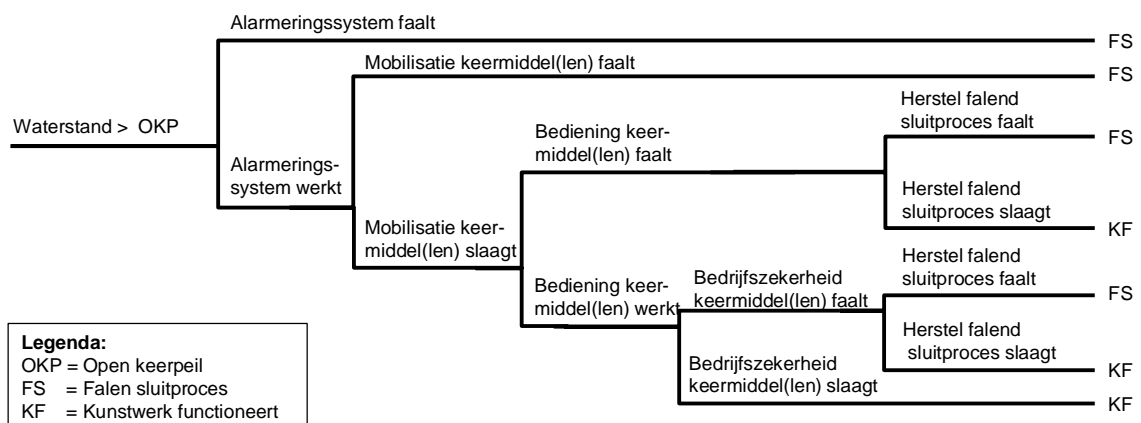
### 10.2.5 Overzicht van het faaltraject niet sluiten bij kunstwerken

In Figuur 10.5 is een schematisch overzicht gegeven van het traject dat leidt tot falen van het kunstwerk als gevolg van niet sluiten van de hoogwaterkerende keermiddelen voorafgaand aan een hoogwater.



Figuur 10.5 Gebeurtenissen leidend tot falen van de waterkering door niet sluiten van het kunstwerk

Opgemerkt moet worden dat wat in deze figuur is aangeduid als het stadium *Falen sluitproces* in feite een versimpelde weergave is van een reeks van mogelijke gebeurtenissen die is weergegeven in de gebeurtenissenboom in Figuur 10.6.



Figuur 10.6 Gebeurtenissenboom m.b.t. sluitproces

## 10.3 Falen waterkering door achter- of onderloopsheid van het kunstwerk

### 10.3.1 Fenomenologische beschrijving op hoofdlijnen

Falen door achter- of onderloopsheid van het kunstwerk wordt ook wel aangeduid als falen door *piping* bij het kunstwerk. Dit mechanisme manifesteert zich als het uitspoelen van gronddeeltjes ten gevolge van een geconcentreerde kwelstroom, waardoor holle ruimten ontstaan onder (onderloopsheid) of naast (achterloopsheid) een kunstwerk. Het erosieproces

hoeft niet altijd tot falen te leiden. Het kan weer stoppen als het waterstandsverschil niet groot genoeg is of niet lang genoeg aanhoudt om de erosie op gang te houden. Als het proces niet stopt, ontstaat een proces van terugschrijdende erosie waarbij deze holle ruimten uitgroeien tot een doorgaand kanaal onder het kunstwerk. Het erosieproces gaat dan ongecontroleerd verder en de erosie van gronddeeltjes onder en/of naast het kunstwerk neemt sterk toe. Uiteindelijk kan het kunstwerk als geheel hierdoor instabiel worden en bezwijken, met als gevolg een bres in de waterkering.

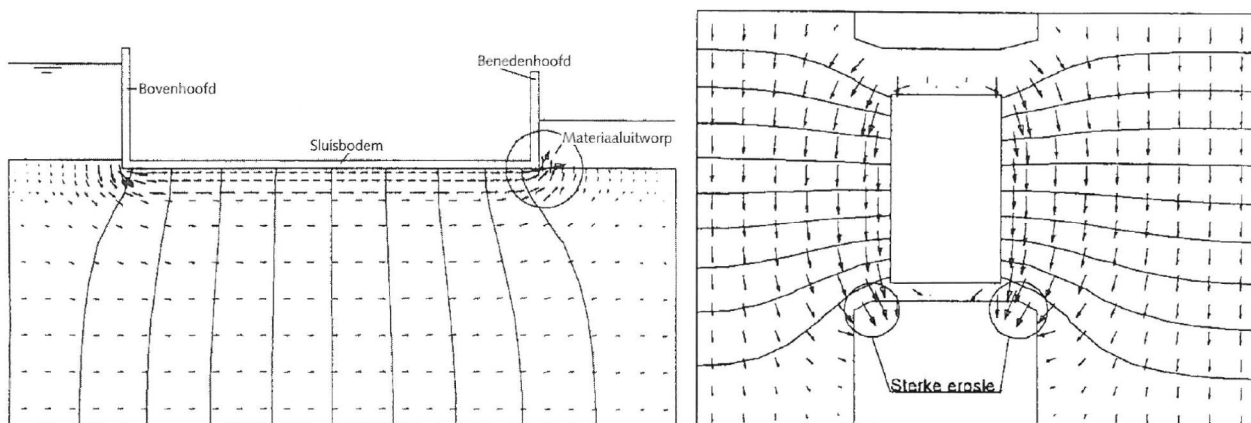
In Nederland wordt de term 'piping' als synoniem voor terugschrijdende erosie gebruikt, omdat vooral dat pipingmechanisme voor Nederland van belang is. Onder de noemer piping vallen internationaal echter verschillende vormen van interne erosie. De twee belangrijkste mechanismen zijn terugschrijdende erosie en suffosie. Suffosie is het fenomeen dat alleen de fijnere fractie tussen de grovere fractie wordt weggespoeld en waarbij (althans in eerste instantie) het korrel skelet in stand blijft. Suffosie kan alleen optreden in zand met een sterk niet-uniforme korrelverdeling. Het Nederlandse zand is relatief fijnkorrelig en uniform. Dit betekent dat suffosie in Nederland vrijwel geen rol speelt en alleen terugschrijdende erosie relevant is. In hoofdstuk 4 van [29] wordt hier nader op ingegaan.

Piping kan niet optreden als uitspoeling van gronddeeltjes niet mogelijk is als gevolg van een goed functionerend filter aan de benedenstroomse zijde van het kunstwerk.

### 10.3.2 Gedetailleerde beschrijving van het faaltraject

#### *Belasting*

De belasting op het kunstwerk wordt gevormd door het verval over het kunstwerk, zijnde het verschil tussen de buitenwaterstand en de waterstand aan de binnenzijde van het kunstwerk. Bij toenemend verval neemt de grondwaterstroming onder het kunstwerk toe. Dit leidt tot een geconcentreerde grondwaterstroming onder en/of naast het kunstwerk. In het voorbeeld van een sluis in Figuur 10.7 is links te zien dat het water vlak onder de bodem van het kunstwerk sneller zal stromen (langere pijlen) dan dieper in de ondergrond. Ter hoogte van het benedenhoofd komt het water weer aan de oppervlakte en is er sprake van concentratie van grondwaterstroming. Hier is het gevaar voor erosie dus het grootst en begint het pipingproces. In Figuur 10.7 rechts is een bovenaanzicht van hetzelfde kunstwerk getekend. Vlak naast het kunstwerk treedt een concentratie aan stroomlijnen op, waar erosieproblemen zich voor kunnen doen.



Figuur 10.7 Links: onderloopsheid bij een kunstwerk; schematisatie langsdoorsnede. Rechts: Achterloopsheid bij een kunstwerk; schematisatie bovenaanzicht. Beide figuren zijn ontleend aan [30]

*Sterkte*

De sterkte van het kunstwerk met betrekking tot piping bestaat uit twee componenten: de lengte van de kwelwegen onder en/of naast het kunstwerk en de eigenschappen van de ondergrond waarop het kunstwerk gefundeerd is. Beide dragen bij aan de weerstand die de grondwaterstroming onder en naast het kunstwerk ondervindt.

De component van de kwelweglengte is direct gerelateerd aan het kunstwerk zelf en wordt gevormd door de mate waarin de kwelstroom wordt geforceerd een langere route af te leggen door de ondergrond (kwelweg). Dit wordt bepaald door de geometrie en funderingswijze van het kunstwerk. De hoofdafmetingen van het kunstwerk worden doorgaans bepaald door de functie; met behulp van kwelschermen onder- en naast het kunstwerk kan de kwelweg vervolgens verlengd worden. De fundatiewijze bepaalt of het deel van de kwelweg dat onder de constructie zit ook bijdraagt aan de weerstand die de grondwaterstroming onder en naast het kunstwerk ondervindt. Bij kunstwerken die op staal zijn gefundeerd is dit wel het geval. Bij kunstwerken die op palen zijn gefundeerd kan het voorkomen dat de ondergrond wel zakt en het kunstwerk niet. Hierdoor ontstaat een spleet tussen kunstwerk en ondergrond, waardoor de weerstand over dit deel van de kwelweg sterk afneemt.

Dit deel van de kwelweg draagt dan niet bij aan de weerstand die de grondwaterstroming onder en naast het kunstwerk ondervindt.

De weerstand die de grondwaterstroming onder en naast het kunstwerk ondervindt is ook sterk afhankelijk van het materiaal waaruit de ondergrond bestaat. In cohesieve, slecht doorlatende grondlagen is de grondwaterstroming zeer klein. Daarnaast zorgt de onderlinge samenhang ervoor dat er geen gronddeeltjes uitspoelen. Cohesieve, slecht doorlatende grondlagen zijn daarom niet gevoelig voor piping. In niet-cohesieve, goed doorlatende grondlagen (zand) is de grondwaterstroming veel groter. Daarnaast is er geen onderlinge samenhang tussen de deeltjes, zodat gronddeeltjes makkelijk door de grondwaterstroming kunnen worden meegevoerd.

De mate waarin niet-cohesieve grondlagen gevoelig zijn voor piping hangt af van de korreldiameter. Hierin spelen twee tegengestelde effecten een rol. De weerstand van de individuele korrel tegen uitspoelen neemt toe als de korrelgrootte toeneemt. De doorlatendheid van de ondergrond, en hiermee de grondwaterstroming, neemt echter ook toe bij toenemende korreldiameter. Het eerste (weerstandbiedende) effect is echter sterker, waardoor fijnkorrelige materialen gevoeliger zijn voor piping dan grofkorrelige.

*Het traject van initiatie tot falen*

De grondwaterstroming onder en/of naast het kunstwerk neemt recht evenredig toe als bij stijgende buitenwaterstanden het verval over het kunstwerk toeneemt. Ter plaatse van het uittredepunt van de geconcentreerde grondwaterstroming, zie Figuur 10.7, neemt het debiet en hiermee de stroomsnelheid van het uittredende grondwater toe. In eerste instantie gaat het om 'schoon' grondwater en worden geen gronddeeltjes meegenomen. Wanneer de grondwaterstroming krachtig genoeg is dan worden de volgende processen in gang gezet, zie Figuur 10.8:

- Erosie van de zandlaag  
Bij kunstwerken met een benedenstrooms kwelscherm ontstaat een situatie waarbij het zand tussen de onderzijde van het kwelscherm en het uittredepunt zich in gefluidiseerde toestand bevindt (heave, zie plaatje linksboven in Figuur 10.8). Individuele zandkorrels worden meegevoerd en rondom de uitstroomopening van de wel afgezet. Dit wordt welvorming genoemd, zie plaatje rechtsboven in Figuur 10.8. In de zandlaag ontstaat

hierdoor een holle ruimte ter plaatse van het uittredpunt, die zich later bovenin de zandlaag direct onder het kunstwerk in vorm van kanaaltjes (pipes) in bovenstroomse richting (richting buitenwater) uitbreidt. Dit wordt terugschrijdende erosie genoemd en is schematisch weergegeven het derde plaatje van Figuur 10.8.

- Het ontstaan van doorgaande pipes

Bij voldoende groot verval over het kunstwerk blijven de erosiekanaaltjes groeien, tot ze het buitenwater bereiken. Er is dan een open verbinding tussen buitenwater en uittredpunt ontstaan, waardoor het kunstwerk onderloops is geworden. Het mechanisme onderloopsheid of piping is daarmee een feit.

Volgens het model van Sellmeijer heeft de kanaalvorming in eerste instantie een reducerende werking op het erosieproces, doordat stromingsgradiënten afnemen zodat (bij gelijk blijvende buitenwaterstand) de terugschrijdende erosie tot stilstand komt. Wanneer het verval over de kering echter groot is, zal de terugschrijdende erosie zich zover doorzetten, dat het erosieproces niet gereduceerd wordt, maar juist versterkt. Het verval, waarbij het proces van terugschrijdende erosie nog net stopt, wordt het kritieke verval genoemd. In de IJkdijkproeven is echter waargenomen dat als eenmaal een zandmeevoerende wel is ontstaan, het pipingproces niet meer tot stilstand komt. Bij gelijkblijvend verval stopt het zandtransport niet meer en de lengte van het kanaal blijft toenemen. Er ontstaat dus geen evenwichtssituatie. Dit lijkt in tegenspraak met de theorie van Sellmeijer.

- Verbreden van het doorgaande kanaal in benedenstroomse richting

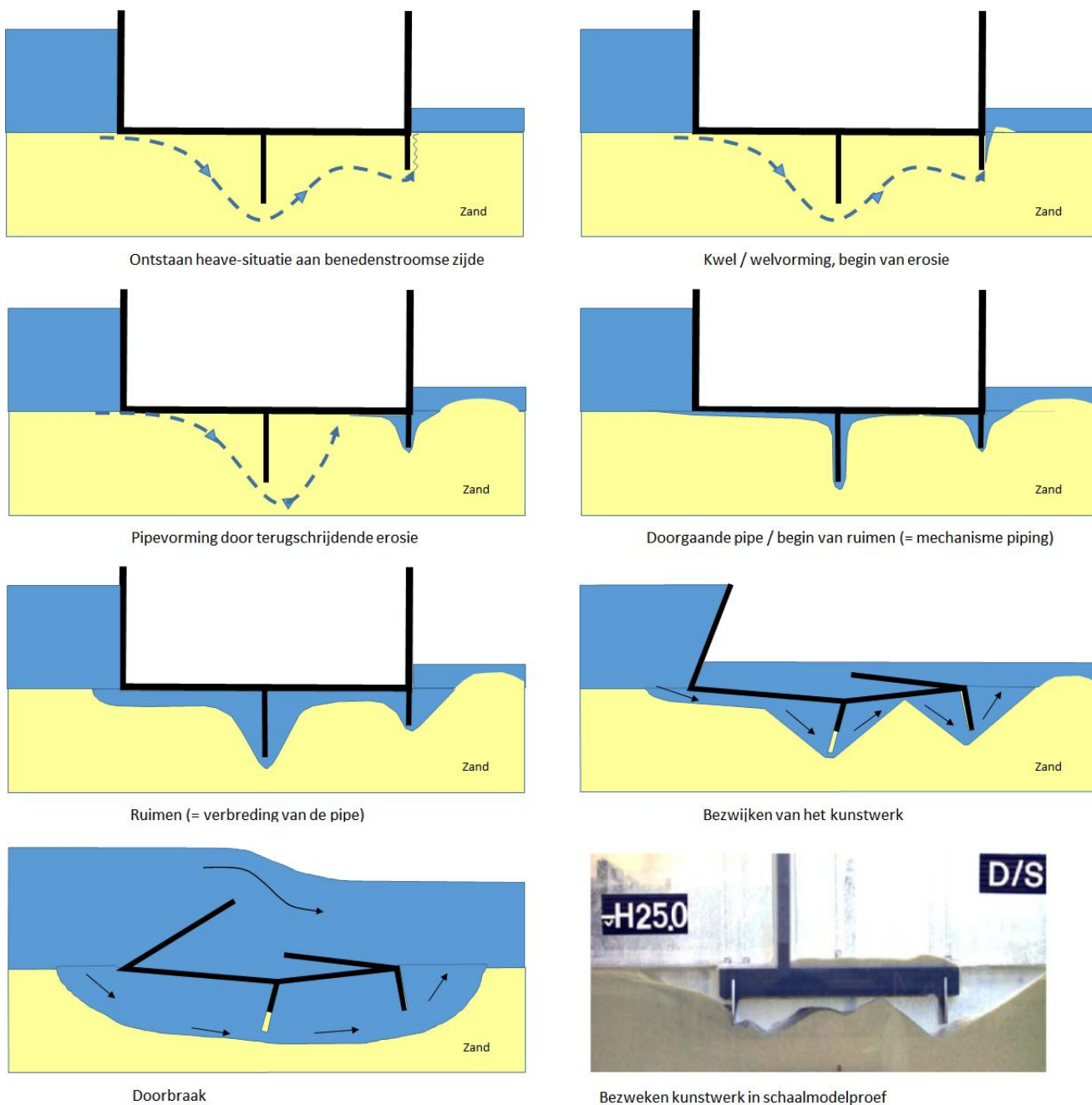
Zodra het kanaaltje contact maakt met het water aan de bovenstroomse zijde van het kunstwerk (buitenzijde) treedt het ruimproces op. Onder 'ruimen' wordt het proces verstaan waarbij het kanaaltje door een drukgolf, die met de stroom meeloopt, vanaf de bovenstroomse naar de benedenstroomse kant versneld verder gaat eroderen. Deze drukgolf ontstaat als gevolg van het verdwijnen van het laatste stukje weerstand aan de bovenstroomse zijde van het kunstwerk.

- Bezwijken van het kunstwerk

Uiteindelijk leidt dit proces, naar wordt aangenomen, tot holle ruimten onder het kunstwerk die zo groot zijn dat verzakking en breuk, en dus bezwijken, van het kunstwerk optreedt. Daardoor ontstaat een bres in de waterkering ter plaatse van het kunstwerk: de kering faalt.

In Figuur 10.8 is dit proces gevisualiseerd voor het ontstaan van een doorgaande pipe onder het kunstwerk (onderloopsheid). Indien sprake is van pipevorming naast het kunstwerk op het grensvlak met een cohesieve laag (achterloopsheid) is het verloop van het pipingproces analoog aan het verloop van het pipingproces bij dijken. In hoofdstuk 4 wordt het pipingproces voor dijken in meer detail beschreven.

Bovenstaande beschrijving is gebaseerd op een kunstwerk dat zich in een zandige laag bevindt. Indien het kunstwerk is opgenomen in een ondoorlatend pakket, dan kan piping optreden vanuit de hieronder gelegen watervoerende zandlagen. Dit faaltraject is in principe hetzelfde als piping onder een dijk.



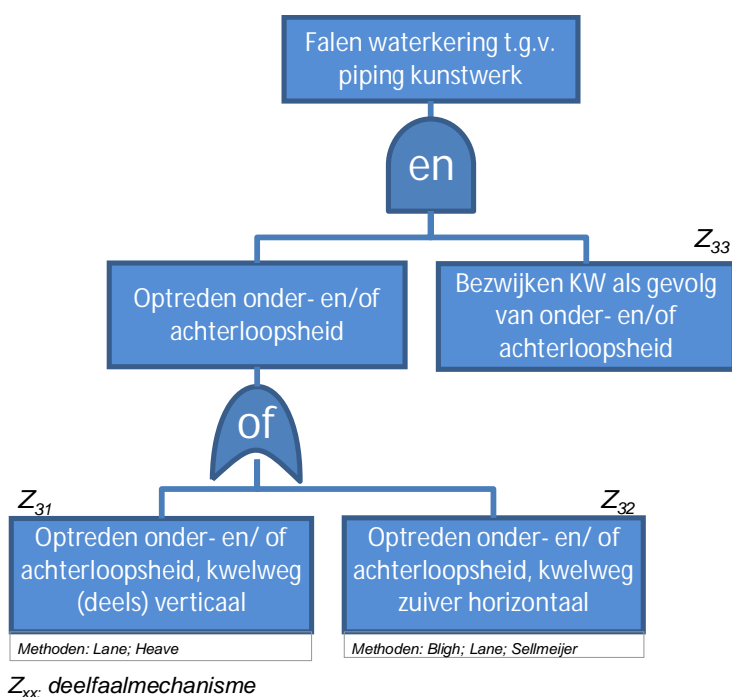
Figuur 10.8 Verschillende fasen bij het ontstaan van piping bij een in Nederland veel voorkomende situatie van de ondergrondopbouw bij een kunstwerk. Rechtsonder een foto van een bezweken kunstwerk in een schaalmodelproef [31]

10.3.3 Onderscheiden deelmechanismen bij falen door achter- of onderloopsheid van het kunstwerk  
De volgende deelmechanismen worden onderscheiden in de foutenboom die het falen van de kering beschrijft, zie Figuur 10.9:

- Z<sub>31</sub> Optreden onder- en/ of achterloopsheid, kwelweg (deels) verticaal.
- Z<sub>32</sub> Optreden onder- en/ of achterloopsheid, kwelweg zuiver horizontaal.
- Z<sub>33</sub> Bezijden kunstwerk als gevolg van onder- en/of achterloopsheid.

De begrippen *onderloopsheid* en *achterloopsheid* roepen soms verwarring op. Onder *achterloopsheid* wordt verstaan de vorming van kanaaltjes of holle ruimten aan de zijkant van een kunstwerk als gevolg van het uitspoelen van grond. De maatgevende kwelweg is meestal zuiver horizontaal gericht (een kwelstroom langs het kunstwerk op het grensvlak van een cohesieve laag), maar kan ook verticale componenten bevatten (denk aan een uittrede onder een binnendijks scherm). Tot voor kort werd achterloopsheid echter vaak 1 op 1 gekoppeld aan het model van Bligh, dus aan situaties met een zuiver horizontale kwelweg.

*Onderloopsheid* betreft het ontstaan van holle ruimten onder een kunstwerk als gevolg van een geconcentreerde kwelstroom waarbij gronddeeltjes worden meegevoerd. Hierbij loopt de kwelstroom onder het kunstwerk door op het grensvlak van constructie en zand. Onder een kunstwerk zijn doorgaans kwelschermen aanwezig, waardoor de kwelstroom ook verticale componenten omvat. Dit hoeft echter niet altijd het geval te zijn. Denk aan lange duikers en leidingen waarbij geen kwelschermen aanwezig zijn. Tot voor kort werd onderloopsheid echter vaak 1 op 1 gekoppeld aan het model van Lane en/of heave, dus aan situaties met een (deels) verticale kwelweg.



Figuur 10.9 Foutenboom falen waterkering als gevolg van piping bij kunstwerk

### 10.3.4 Resterende sterkte

Bij het faalmechanisme *achter- of onderloopsheid van het kunstwerk* is sprake van resterende sterkte na het moment van overschrijden van het kritieke verval. Dit is het verval, waarbij het proces van terugschrijdende erosie nog net stopt.

Voordat het kunstwerk als geheel bezwijkt na het overschrijden van het kritieke verval moet een aantal vervolprocessen zijn beslag krijgen. Allereerst moet een doorgaande pipe worden gevormd onder of naast het kunstwerk.

Uit experimenteel onderzoek bij dijken volgt dat het kanaal bij constant verval langzaam in bovenstroomse richting groeit. De snelheid waarmee kanaaltjes groeien is afhankelijk van het



verval. Zodra het kanaaltje dat vanaf de benedenstroomse zijde stroomopwaarts is gegroeid en contact maakt met het water aan de bovenstroomse zijde van de dijk (buitenzijde, tijdsduur meerdere dagen in de IJkdijkproef), treedt het ruimproces op. Het mechanisme *piping* is daarmee een feit. Nadat het kanaal de bovenstroomse zijde heeft bereikt, kost het bij constant verval nog geruime tijd (meer dan 24 uur in de IJkdijkproef) voordat het geruimde kanaal de benedenstroomse zijde bereikt. Dit proces zou sneller kunnen verlopen als het kritieke verval ruim wordt overschreden.

Zodra het ruimproces de benedenstroomse zijde heeft bereikt, resulteert dit in een forse toename van zandtransport en debiet. In geval van achterloopsheid zal naast zand ook klei meespoelen en vormt zich een zogenaamde modderfontein. Water stroomt met groot geweld door het geruimde kanaal. Wat dan gebeurt, is slecht te voorspellen omdat schaal- en praktijkproeven bij kunstwerken ontbreken. In geval van achterloopsheid zal het proces vergelijkbaar zijn met dat bij dijken. Bij dijken treden in de dijk grote scheuren op en de dijk zakt in aan de bovenstroomse zijde. Dit leidt uiteindelijk tot verlies van het waterkerende vermogen van de waterkering met bresvorming tot gevolg. Bij onderloopsheid van het kunstwerk moet als gevolg van erosie van grond onder en langs het kunstwerk de overall-stabiliteit van het kunstwerk onvoldoende worden, waarna kantelen of afschuiven van het hele kunstwerk optreedt. Ook kan een proces in gang worden gezet waarbij successievelijk delen van het kunstwerk constructief bezwijken, met het falen van de kering als uiteindelijk gevolg. Tevens kan het zo zijn dat het kunstwerk wel blijft staan, maar de aansluitende dijk inzakt als gevolg van het erosieproces en uiteindelijk bezwijkt.

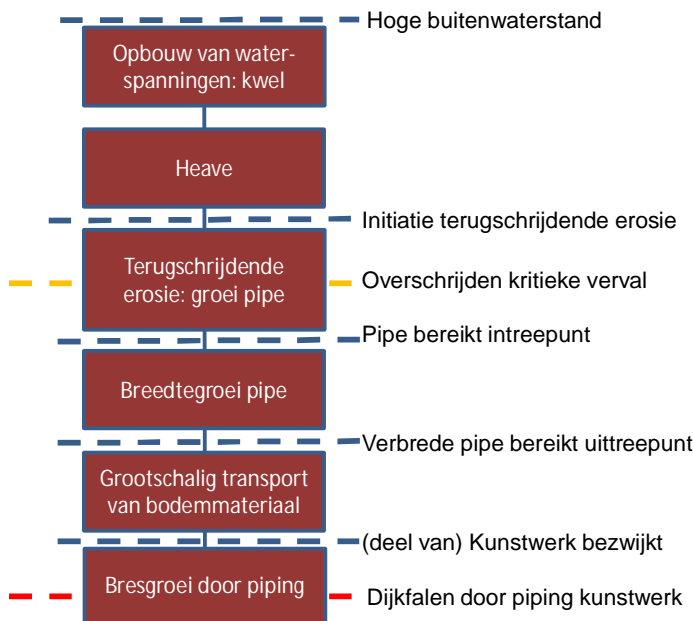
De resterende sterkte van het kunstwerk na het overschrijden van het kritieke verval is dus afhankelijk van een groot aantal factoren. De belangrijkste zijn:

- Grondeigenschappen onder het kunstwerk  
De vorming van een doorgaande pipe en het ruimingsproces gaat in fijn-zandige grond sneller dan in zandgronden met een grovere fractie.
- Fundatie van het kunstwerk  
Een kunstwerk dat op palen staat zal minder snel (deels) bezwijken dan een kunstwerk dat op staal gefundeerd is.
- Aanwezigheid van kwelschermen  
Het proces van pipevorming en ruiming van de doorgaande pipe gaat langzamer naarmate er meer of diepere kwelschermen aanwezig zijn.
- Geometrie van het kunstwerk  
Een kort kunstwerk zal sneller kantelen of afschuiven dan een lang kunstwerk.

Nadat het kritieke verval is overschreden moet er dus nog het nodige gebeuren voordat het kunstwerk als geheel bezwijkt.

#### 10.3.5 Overzicht van het faaltraject piping bij kunstwerken

In Figuur 10.10 is een schematisch overzicht gegeven van het traject dat leidt tot falen van het kunstwerk als gevolg van piping.



Figuur 10.10 Gebeurtenissen leidend tot falen van de waterkering door piping gerelateerd aan het kunstwerk

#### 10.4 Falen waterkering door gebrek aan sterkte van het kunstwerk

In deze paragraaf wordt een beschrijving gegeven van de faalmechanismen betreffende de sterkte van het kunstwerk. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen *bezwijken waterkerende constructieonderdelen* en *instabiliteit constructie en grondlichaam*. Onder het bezwijken van de waterkerende constructieonderdelen valt naast bezwijken als gevolg van een hoogwatersituatie ook het bezwijken als gevolg van een aanvaring. Bij dit laatste gaat het specifiek over het aanvaren van constructieonderdelen van schut- en keersluizen, waarbij vooral onder dagelijkse omstandigheden sprake kan zijn van een aanvaring met als gevolg een overstroming. In de praktijk zullen vooral schutsluizen voor een beoordeling op aanvaren in aanmerking komen, aangezien de scheepvaart gestremd zal zijn door hoogwater op het moment dat keersluizen zijn gesloten.

Deze paragraaf geeft een beschrijving van de beoordeling van de constructieve veiligheid van kunstwerken in het kader van hoogwaterveiligheid, welke gebaseerd is op:

- Bouwbesluit (en voorgangers) met daarin aangeroepen bouwrichtlijnen.
- Waterwet (en voorgangers).
- Leidraad Kunstwerken 2003 [25].
- Richtlijnen Ontwerpen Kunstwerken [32].

De faalmechanismen *bezwijken constructieonderdelen* en *instabiliteit constructie en grondlichaam* zijn zowel bij puntconstructies als bij langsconstructies van belang. Bij puntconstructies kan gedacht worden aan sluizen, gemalen, coupures etc. Vaste wanden op dijken, demontabele keringen en stabiliteitsschermen zijn voorbeelden van langsconstructies. Deze paragraaf gaat alleen in op de puntconstructies.

##### 10.4.1 Fenomenologische beschrijving

Aangezien het toetspoot *sterkte en stabiliteit kunstwerk* uit een tweetal faalmechanismen bestaat, wordt in deze paragraaf en de daaronder hangende sub-paragrafen telkens de uitwerking per faalmechanisme beschreven.

#### 10.4.1.1 *Beschrijving op hoofdlijnen*

Falen als gevolg van een tekort aan sterkte en/of stabiliteit treedt op als de belastingen zodanig groot worden dat onderdelen van het kunstwerk bezwijken of het gehele kunstwerk instabiel wordt (kantelen, verzakken, verschuiven).

##### *Faalmechanisme bezwijken constructieonderdelen*

Falen als gevolg van het bezwijken van constructie onderdelen vindt in een hoogwatersituatie plaats wanneer als gevolg van vervalbelasting en golfbelasting de sterkte van een constructieonderdeel niet meer toereikend is om deze belasting af te dragen. Onder dagelijkse omstandigheden kan bezwijken ook plaatsvinden door aanvaringen.

In eerste instantie zullen zich bij het constructieonderdeel grotere vervormingen voordoen, waarna uiteindelijk een uiterste grenstoestand (UGT) wordt overschreden. In het geval van de beoordeling op waterveiligheid zal over het algemeen de uiterste grenstoestand de te beoordelen grenstoestand zijn. Dit is veelal in de vorm van overschrijding van een maximaal opneembare spanning.

Nadat het constructieonderdeel is bezweken, kan mogelijk dusdanig veel water door het kunstwerk stromen dat dit leidt tot overschrijding van het faalcriterium (maximale sterkte waterkering) welke is gekoppeld aan overstromingsgevolgen. Overschrijding van het faalcriterium kan enerzijds optreden doordat het instromende water niet meer geborgen kan worden in de achterliggende watergang (komberging) en anderzijds door het eroderen van de bodembescherming en vervolgens de bodem achter het kunstwerk. In het laatste geval leidt de erosie tot ontgrondingskuilen, waardoor het kunstwerk instabiel wordt. Dit kan uiteindelijk leiden tot een bres.

##### *Faalmechanisme instabiliteit constructie en grondlichaam*

Hier treedt falen op als het kunstwerk en het grondlichaam ter plaatse van het kunstwerk niet meer in staat zijn om de vervalbelasting en golfbelasting te keren zonder dat dit tot substantiële vervormingen leidt. Als gevolg van deze vervormingen gaat het waterkerende vermogen van het kunstwerk verloren en ontstaat een bres. Het faalcriterium (maximale sterkte waterkering) dat gekoppeld is aan overstromingsgevolgen zal vervolgens worden overschreden. De stabiliteit van de achterliggende bodembescherming is als faalcriterium hier niet van belang, aangezien de bodembescherming moet voorkomen dat het kunstwerk als gevolg van ontgrondingen zijn stabiliteit verliest. Echter geldt bij onderhavig faalmecanisme dat instabiliteit al om andere redenen is opgetreden en dus heeft de bodembescherming geen noemenswaardige positieve invloed op het faaltraject.

#### 10.4.1.2 *Gedetailleerde beschrijving van het faaltraject bezwijken constructie onderdelen*

In deze sub paragraaf wordt het faaltraject als gevolg van het bezwijken van constructieonderdelen verder in detail beschreven.

##### *Belasting*

De belasting op het kunstwerk wordt gevormd door meerdere componenten. Gelet op de functie waterkeren zijn niet alle mogelijke belastingen van belang. Per situatie dient afgewogen te worden welke belastingen van belang zijn in combinatie met een hoogwaterbelasting.

Permanente belastingen dienen altijd meegenomen te worden. Met betrekking tot waterkeren onder hoogwatersituaties zijn het verval en golfbelastingen van prominent belang. Aanvullende belastingen zoals wind en stroming of ijs kunnen ook van belang zijn, maar dit is sterk afhankelijk van de situatie ter plaatse. Ditzelfde geldt voor andere externe belastingen.

Uiteindelijk wordt het falen geïnduceerd door het toenemen van het verval als gevolg van het stijgen van de buitenwaterstand.

Vervalbelastingen ontstaan door een hoogteverschil tussen de binnen- en buitenwaterstand. Het buitenpeil is hierbij de waterstand aan de buitenzijde van de waterkering, terwijl het binnenpeil betrekking heeft op de waterstand van de watergang die binnendijks van de waterkering aanwezig is.

De binnenwaterstand wordt doorgaans onder normale omstandigheden vanuit het aspect waterbeheer in grote mate gereguleerd. Ten tijde van hoogwaters kan een afwijkend beheersregime gelden. Hiermee dient dan rekening te worden gehouden.

De buitenwaterstand wordt beïnvloed door de afvoer van rivieren en/of de waterstanden op zee en daarnaast door de wind. De wind kan zorgen voor aanvullende golfbelastingen maar ook voor een opzet van de waterstand. De waterstanden en golven die gebruikt worden bij het beoordelen van de primaire waterkeringen worden binnen Nederland vanuit Rijkswaterstaat voorgeschreven.

Golven kunnen door verschillende oorzaken ontstaan. Voor waterkeringen geldt doorgaans dat onder hoogwateromstandigheden wind geïnduceerde golven maatgevend zijn. Afhankelijk van locatie en geometrie worden (onderdelen van) de constructies belast door golven.

Golven worden beschreven aan de hand van de golfhoogte, de golflengte en de golfperiode. Van deze drie parameters zijn vele combinaties mogelijk, wat leidt tot een heel scala aan golfvormen. De hele lange golven (seiches) kunnen leiden tot een waterstandsverhoging die langere periode aanhoudt (10 minuten tot 2 uur). De kortere golven kunnen leiden tot golfklappen op onderdelen van de constructie. Voor het mechanisme *bezwijken constructie onderdelen* zijn zowel de lange als de korte golven van belang.

Voor overige belastingen dient per situatie gekeken te worden of deze van toepassing zijn in combinatie met maatgevende (hoogwater) omstandigheden.

In onderstaande *Tabel 10.1* zijn de diverse belastingen weergegeven, waarbij onderscheid gemaakt is in permanente, veranderlijke en bijzondere belastingen (tabel B4.1 uit [25]).

Permanent	Veranderlijk	Bijzonder
Eigen gewicht	Stroming	Aanvaring
Gronddruk	Scheepsgolven	Aardbeving
Grondwaterdruk	Scheepsstroming	Explosie
	Troskrachten	IJs
	Temperatuur	Vandalisme/sabotage/terrorisme
	Verkeersbelasting	

*Tabel 10.1 Overige belastingen kunstwerken*

Voor de veranderlijke belastingen geldt dat deze vooral van toepassing zijn onder dagelijkse omstandigheden en niet in combinatie met een hoogwaterbelasting. Ditzelfde geldt ook voor de bijzondere belastingen. De permanente belastingen dienen altijd in beschouwing te worden genomen.

Een bijzondere belasting die apart dient te worden genoemd, is het aanvaren van een onderdeel van de constructie dat leidt tot het bezwijken van een waterkerend onderdeel. Dit kan ook plaatsvinden bij lagere waterstanden. Vooral bij schutsluizen kan dit een rol spelen. Keersluizen worden gesloten vlak voor naderend hoogwater, op dat moment is de scheepvaart gestremd zodat keersluizen een verwaarloosbare kans hebben om aangevaren

te worden. Alleen in het uitzonderlijke geval waarin een keersluis zodanig is gelegen aan een drukke locatie dat ondanks stremming van de scheepvaart nog steeds verwacht wordt dat er een reële kans op aanvaren is (dronken schipper, losgeslagen schip), moet er ook voor een keersluis gerekend worden op een aanvaarbeasting.

De aanvaarbeastingen zijn afhankelijk van de scheepsklasse, de configuratie van de sluis en het type constructie. Bij aanvaarbeastingen wordt de uiteindelijke belasting bepaald door de stijfheidsverhouding tussen schip en constructieonderdeel.

Aanvaarbeastingen gaan vaak samen met een bepaald aanwezig verval over het beschouwde constructieonderdeel dat dus ook onder normale omstandigheden aanwezig kan zijn. Als de aanvaring tot bezwijken leidt, kan water vrijelijk het achterland binnenstromen.

### *Sterkte*

De sterkte van het kunstwerk bestaat uit de sterkte van de constructieonderdelen, de sterkte van de bodembescherming en het kombergend vermogen van het achterland.

De sterkte van de constructieonderdelen wordt gevormd door de afmetingen, opbouw, het materiaal, de opleggingen en de conditie van deze constructieonderdelen in relatie tot de belastingen. Bij overschrijding van maximaal toelaatbare spanningen (Eurocodes en nationale bijlagen) bezwijken deze constructieonderdelen. Dit bezwijken vindt over het algemeen plaats doordat een specifiek subonderdeel van het beschouwde constructieonderdeel bezwijkt, waardoor vervolgens andere subonderdelen ook bezwijken. Dit leidt uiteindelijk tot het geheel bezwijken van het keermiddel.

Wanneer een constructieonderdeel is bezweken, kan nog een poging worden gedaan om het waterkerende vermogen te herstellen door inzet van een alternatief constructieonderdeel (bijvoorbeeld een ander keermiddel). Dit moet dan kunnen worden aangebracht in stromend water. Wanneer deze herstpoging faalt en het waterkerend vermogen van het kunstwerk niet meer intact is, stroomt er water ongecontroleerd het achterland in. Falen treedt op wanneer het instromende water niet meer kan worden geborgen in het achterland (het achterliggende watersysteem), doordat de binnenwaterstand eenvoudigweg te hoog oploopt. Dit faalcriterium betreft het kombergend vermogen. Indien het instromende debiet het kombergend vermogen overschrijdt, leidt dit tot significante overstromingsgevolgen doordat bijvoorbeeld de achterliggende regionale kering als gevolg van stijging van het binnenwater bezwijkt. Vervolgens kan (een deel van) de kom leeglopen in de achterliggende polder en daarmee leiden tot substantiële gevolgen.

In het geval er geen achterliggende watergang en daarmee komberging aanwezig is, zoals bij een coupure, dient op andere gronden een afweging te worden gemaakt van het moment van falen in relatie tot het volume instromend water. Het moment waarop gesproken kan worden van significante overstromingsgevolgen is dan vaak een subjectief oordeel.

Wanneer het instromende volume water door het kunstwerk wel geborgen kan worden in het achterliggende watersysteem, dient daarnaast de sterkte van de bodembescherming toereikend te zijn om niet te bezwijken onder de stroomsnelheden die het gevolg zijn van het instromende debiet. Wanneer de bodembescherming onvoldoende sterkte heeft, raken onderdelen (stenen) van de bodembescherming los. Hierdoor zullen aansluitende onderdelen ook gemakkelijker loslaten en kan de bodem onder de bodembescherming ook gaan eroderen. Uiteindelijk leidt dit tot het geheel bezwijken/verdwijnen van de bodembescherming, waarna de gronddeeltjes van de onderliggende bodem direct worden blootgesteld aan de optredende stroomsnelheden. Hierdoor kunnen erosiekuilen ontstaan, wat uiteindelijk kan leiden tot instabiliteit van de constructie. De laatste fase in het faaltraject bestaat uit het verzakken, kantelen of verschuiven van het gehele kunstwerk of een

substantieel deel hiervan. Er is dan sprake van een bres, waarbij bresgroei zeer wel mogelijk is.

#### *Het traject van initiatie tot falen*

Onder normale omstandigheden keert een kunstwerk dagelijkse waterstanden en waterstanden die voortkomen uit het normale gebruik van het kunstwerk. Bij hoogwatersituaties is een kunstwerk in principe gesloten en stijgt de buitenwaterstand. Als gevolg hiervan neemt ook het verval over het kunstwerk toe. Daarnaast kunnen ook golven leiden tot aanvullende belastingen op de constructie. Windbelasting kan een bijkomende belasting zijn. Wanneer het totaal van relevante belastingen groter is dan de sterkte die een constructieonderdeel kan afdragen, zal het constructieonderdeel bezwijken en leiden tot een opening in de waterkering. Als gevolg hiervan stroomt er buitenwater naar binnen. Een poging tot herstel van het waterkerend vermogen is dan wellicht nog mogelijk door de ontstane opening op alternatieve wijze te sluiten (bijvoorbeeld met een ander keermiddel, inzet big bags), maar dit is afhankelijk van grote van het kunstwerk en de mogelijkheden om een herstelactie uit te voeren. Wanneer de herstelactie faalt of niet mogelijk is, blijft het gat in de waterkering aanwezig. Aanvullende sterkte in relatie tot falen van het kunstwerk (overstromingsgevolgen) wordt dan geleverd door het achterliggende watersysteem en de bodembescherming achter het kunstwerk.

Op het moment dat het instromende water niet meer zonder significante gevolgen kan worden geborgen in het achterliggende watersysteem, is er sprake van falen. Het kombergend vermogen is afhankelijk van het kombergend oppervlak en de toelaatbare peilstijging op het achterliggende watersysteem. Wanneer er dusdanig veel water is ingestroomd dat het kritieke binnenpeil wordt overschreden, zal (een deel van) de kade van het achterliggende watersysteem op enigerlei bezwijken, met overstromingsgevolgen in de daarachter liggende polder. Water kan nu vrijelijk instromen door het kunstwerk en vervolgens door de bezweken kade van de komberging, waarna het de polder bereikt. Er is dan sprake van een bres.

Een andere wijze van falen kan optreden na het bezwijken van een constructieonderdeel doordat de bodembescherming achter het kunstwerk wordt blootgesteld aan dusdanig hoge stroomsnelheden dat deze bezwijkt. Na het bezwijken van een onderdeel van de bodembescherming leidt dit tot verdere erosie van de bodembescherming en gedeelte van de onderliggende bodem. Uiteindelijk is de bodem geheel onbeschermd en wordt deze blootgesteld aan de dan aanwezige stroomsnelheden van het instromende water. Afhankelijk van de bodemopbouw, ontstaan vervolgens erosiekuilen die bij voldoende diepte kunnen leiden tot instabiliteit van het gehele kunstwerk of een substantieel deel hiervan. Dit leidt uiteindelijk tot een bres.

Een apart faaltraject treedt op, op het moment dat een waterkerend constructieonderdeel bezwijkt als gevolg van aanvaring. Wanneer dit waterkerende constructieonderdeel op dat moment het enige kerende deel is tussen binnen- en buitenwater, is er direct sprake van het verlies van waterkerend vermogen van het kunstwerk. Buitenwater stroomt dan het achterliggende watersysteem binnen. Op dat moment kan nog een poging tot herstel worden gedaan door het kunstwerk door middel van een ander onderdeel (lees keermiddel) alsnog te sluiten. Dit is afhankelijk van de stroomsnelheid van het instromende water. Indien de poging tot herstel van het waterkerend vermogen faalt, blijft er water instromen en kunnen de aanvullende sterkte-eigenschappen in de vorm van komberging en sterkte bodembescherming een rol gaan spelen, zie de beschrijving hierboven.

#### 10.4.1.3 Gedetailleerde beschrijving van het faaltraject instabiliteit constructie en grondlichaam

In deze sub-paragraaf wordt het faaltraject met betrekking tot de instabiliteit van de constructie en het grondlichaam verder in detail beschreven.

##### *Belasting*

Vanuit het blikveld van waterkeren is vooral de vervalbelasting van belang bij *instabiliteit constructie en grondlichaam*. Min of meer permanente belastingen als grondbelasting, grondwaterbelasting en eigen gewicht behoren daarnaast te worden meegenomen bij beschouwing van het mechanisme. Golfbelastingen kunnen ook een rol spelen, maar het gaat daarbij voornamelijk om lange golven. Deze lange golven zoals seiches moeten standaard worden meegenomen in de hydraulische belastingen. Overige belastingen spelen in het geval van instabiliteit in combinatie met maatgevende (hoogwater) omstandigheden geen substantiële een rol.

Vervalbelastingen ontstaan door een hoogteverschil tussen de binnen- en buitenwaterstand. Het buitenpeil is hierbij de waterstand aan de buitenzijde van de waterkering, terwijl het binnenpeil betrekking heeft op de waterstand van de watergang die binnendijks van de waterkering aanwezig is.

De binnenwaterstand wordt doorgaans onder normale omstandigheden vanuit het aspect waterbeheer in grote mate gereguleerd. Ten tijde van hoogwaters kan een afwijkend beheersregime gelden. Hiermee dient dan rekening te worden gehouden.

De buitenwaterstand wordt beïnvloed door de afvoer van rivieren en/of de waterstanden op zee en daarnaast door de wind. De wind kan zorgen voor aanvullende golfbelastingen maar ook voor een opzet van de waterstand. De waterstanden die gebruikt worden bij het beoordelen van de primaire waterkeringen worden binnen Nederland vanuit Rijkswaterstaat voorgeschreven.

Golven kunnen door verschillende oorzaken ontstaan. Voor waterkeringen geldt doorgaans dat onder hoogwateromstandigheden wind geïnduceerde golven maatgevend zijn. Afhankelijk van locatie en geometrie worden (onderdelen van) de constructies belast door golven.

Golven worden beschreven aan de hand van de golfhoogte, de golflengte en de golfperiode. Van deze drie parameters zijn vele combinaties mogelijk, wat leidt tot een heel scala aan golfvormen. De hele lange golven (seiches) kunnen leiden tot een waterstandsverhoging die langere periode aanhoudt (10 minuten tot 2 uur). De kortere golven kunnen leiden tot golfklappen op onderdelen van de constructie. Voor het faalmechanisme *instabiliteit constructie en grondlichaam* zijn voornamelijk de lange golven van belang. De korte golven kunnen wel tot golfklappen leiden op een specifiek onderdeel, maar zijn vaak dusdanig kortstondig aanwezig, dat door de traagheid van de gehele constructie dit niet tot daadwerkelijk aanvullende belastingen leidt. Alleen wanneer golfklappen met regelmaat voorkomen kan het aanhoudend 'hameren' wellicht tot een stabiliteitsprobleem leiden.

##### *Sterkte*

De sterkte van het kunstwerk bestaat uit de weerstand van het kunstwerk en het aanwezige grondlichaam tegen kantelen en horizontaal dan wel verticaal verplaatsen. Het gaat hierbij dus om stabiliteit van het kunstwerk

De stabiliteit van het kunstwerk is afhankelijk van de fundatie, de afmetingen van het kunstwerk de aanwezigheid van schermen (en haar aansluitingen op de harde constructie) en de grondeigenschappen van het grondmassief waarin het kunstwerk is gelegen. Bij overschrijding van maximale (schuif)spanningen kan leiden tot instabiliteit van (onderdelen van) de constructie. Dit uit zich in significante verplaatsingen in het horizontale en/of verticale

vlak, waarbij ook rotaties van de constructie kunnen optreden. Als gevolg van deze verplaatsingen is het waterkerende vermogen van het kunstwerk niet meer gewaarborgd, doordat water langs of onder de constructie door kan stromen het achterliggende watersysteem in. Als gevolg hiervan zijn aanvullende verplaatsingen te verwachten, waardoor uiteindelijk het geheel bezwijken van de constructie kan plaatsvinden.

Wanneer de constructie is bezweken is een onbeheersbare situatie ontstaan en is direct sprake van bresvorming. Een eventueel aanwezige komberging kan de eerste tijd de gevolgen wellicht nog beperken, maar doordat het aansluitende dijklichaam niet wordt afgeschermd door een harde constructie, deze is immers bezweken, zal er ook bresgroei optreden. Bresgroei bij een kunstwerk met achterliggende watergang kan leiden tot het eroderen van aangrenzende dijklichamen, waarbij ook water instroomt buiten het achter het kunstwerk liggende watersysteem.

#### *Het traject van initiatie tot falen van het kunstwerk*

Het faaltraject begint doordat het verval over een kunstwerk dusdanig groot wordt dat verplaatsingen optreden. Deze kunnen in eerste instantie nog gering zijn, maar vervolgens bij toenemende belastingen verder doorzetten tot significante vervormingen. Op welke wijze dit proces verloopt, is sterk afhankelijk van de fundatie, de afmetingen van het kunstwerk en de aanwezigheid van schermen. Zo zal bij een op loodpalen gefundeerd kunstwerk in eerste instantie de schuifweerstand van de wanden ten opzichte van de grond moeten worden overschreden voordat hier enige verplaatsingen optreden. Wanneer dit stadium is bereikt en er sprake is van enige verplaatsingen worden de palen aangesproken op buigende momenten. Die dragen daardoor bij aan de horizontale stabiliteit. Bij een kunstwerk waarbij ook nog schermen in de langsrichting van het kunstwerk aanwezig zijn (bijvoorbeeld vanuit de bouwkuip) zullen deze schermen ook direct belasting gaan afdragen en dragen de palen nauwelijks bij aan de horizontale schuifweerstand van het kunstwerk.

Nadat significante verplaatsingen van (onderdelen van) het kunstwerk zijn opgetreden, worden aansluitingen tussen kunstwerk en naastliggende grond of tussen onderdelen van het kunstwerk verbroken. Hierdoor kan het aanwezige water gaan bijdragen aan erosie van de grondconstructie naast en onder het object. Bij stijgende buitenwaterstand worden mede hierdoor verplaatsingen groter en zal het waterkerende vermogen verdwijnen. Omdat de naast- en onderliggende grondlagen daardoor onbeschermd blootgesteld kunnen worden aan stromend water, treedt erosie van deze grondlagen op. Feitelijk is er op dat moment sprake van bresgroei.

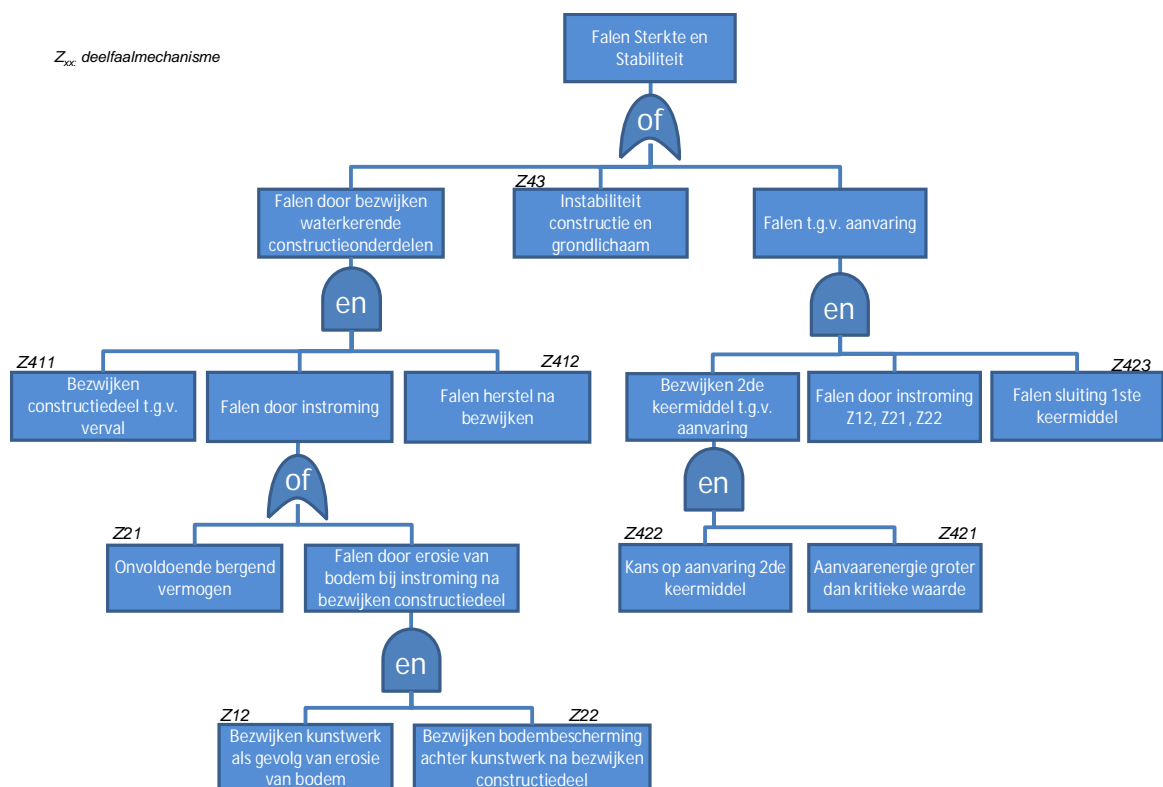
#### *10.4.1.4 Te beoordelen deelmechanismen voor bezwijken constructieonderdelen*

Zoals uit paragraaf 10.4.1.2 kan worden afgeleid, zijn de volgende deelmechanismen te onderscheiden met betrekking tot het falen van constructieonderdelen ten gevolgen van verval- en golfbelastingen, zie de linker tak van Figuur 10.11:

- $Z_{411}$  Bezwijken constructieonderdelen ten gevolge van het verval  
Bezwijken van een waterkerend constructieonderdeel als gevolg van het verval inclusief eventueel aanwezige golfbelastingen.
- $Z_{412}$  Falen herstel sluiting  
Falen van het herstel van het waterkerende vermogen nadat een waterkerend constructieonderdeel is bezweken.
- $Z_{22}$  Bezwijken bodembescherming achter kunstwerk  
Het bezwijken van de bodembescherming aan de achterzijde van het kunstwerk als gevolg van de stroomsnelheden nadat een waterkerend constructieonderdeel is bezweken en herstel hiervan gefaald is.



- Z<sub>12</sub> Bezijken kunstwerk als gevolg van erosie van de bodem  
Nadat de bodembescherming is bezweken, erodeert de onbeschermde bodem en ontstaan er erosiekuilen als gevolg van de aanwezige stroomsnelheden van het instromende water. Dit leidt tot een kans van het als geheel bezwijken van het kunstwerk door instabiliteit van het kunstwerk, waarmee een bres in de waterkering een feit is.
- Z<sub>21</sub> Onvoldoende bergend vermogen  
Het kombergend vermogen op het achterliggende watersysteem is onvoldoende om het instromende volume buitenwater te bergen zonder dat dit tot significante overstromingsgevolgen leidt in de achterliggende polder(s).



Figuur 10.11 Foutenboom falen waterkering als gevolg van gebrek aan sterkte/stabiliteit van het kunstwerk

Zoals uit paragraaf 10.4.1.2 kan worden afgeleid, zijn de volgende deelmechanismen te onderscheiden met betrekking tot het falen van constructieonderdelen van schutsluizen ten gevolge van aanvaarbeastingen, zie de rechter tak van Figuur 10.11:

- Z<sub>422</sub> Kans op aanvaring van het gesloten tweede keermiddel  
Kans dat het tweede keermiddel wordt aangevaren op het moment dat het eerste keermiddel open staat.
- Z<sub>421</sub> Aanvaarenergie groter dan opneembaar  
Kans dat de aanvaarenergie groter is dan de door de constructie van de keermiddelen opneembare energie.
- Z<sub>423</sub> Falen sluiting ander keermiddel ten behoeve van herstel  
Falen van het herstel van het waterkerende vermogen met behulp van het niet-gesloten keermiddel, nadat door aanvaring het gesloten tweede keermiddel is bezweken.

Naast bovengenoemde deelmechanismen spelen bij aanvaren ook het bezwijken van de bodembescherming ( $Z_{12}$  en  $Z_{22}$ ) en het kombergend vermogen ( $Z_{21}$ ) nog een rol als sterkte. Deze deelmechanismen zijn reeds hierboven beschreven.

#### 10.4.1.5 *Te beoordelen deelmechanisme voor instabiliteit constructie en grondlichaam*

In paragraaf 10.4.1.2 is het volgende deelmechanisme onderscheiden:

- $Z_{43}$  Bezwijken door algeheel stabiliteitsverlies ten gevolge van het verval Falen van het kunstwerk als gevolg van instabiliteit van het grondlichaam en/of de constructie.

#### 10.4.1.6 *Resterende sterkte*

Bij het faalmechanisme *sterkte constructieonderdelen* is sprake van resterende sterkte na het moment van bezwijken van de bodembescherming als het resterende deel van de sterkte niet kan worden gekwantificeerd. Deze resterende sterkte zit opgesloten in het mechanisme *bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem* ( $Z_{12}$ ). Dit mechanisme betreft de kans dat het kunstwerk als geheel bezwijkt (onderuit gaat) door erosie van de ondergrond nadat bezwijken van de bodembescherming heeft plaatsgevonden.

Voordat het kunstwerk als geheel bezwijkt moet een aantal vervolprocessen zijn beslag krijgen. Allereerst moet in de nabijheid van het kunstwerk een ontgrondingskuil van voldoende omvang ontstaan. Vervolgens moet een afschuiving aan de rand van deze ontgrondingskuil optreden, waarvan de inscharing het kunstwerk bereikt. Als gevolg van het wegvallen van de passieve gronddruk aan de binnenzijde van het kunstwerk moet vervolgens de overall-stabiliteit van het kunstwerk onvoldoende worden, waarna kantelen of afschuiven van het hele kunstwerk optreedt. Ook kan na het wegvallen van de passieve gronddruk een proces in gang worden gezet waarbij successievelijk (onder)delen van het kunstwerk constructief bezwijken. Met het bezwijken van het totale kunstwerk als uiteindelijke gevolg.

Resterende sterkte bij het faalmechanisme *instabiliteit constructie en grondlichaam* wordt normaliter niet beschouwd. Er wordt vanuit gegaan dat bij het bezwijken van de constructie als gevolg van instabiliteit er direct sprake is van het verloren gaan van waterkerend vermogen, dat direct een bres ontstaat. De situatie is dan al onbeheersbaar.

#### *Resterende sterkte na bezwijken bodembescherming*

Het bezwijken van de bodembescherming ( $Z_{22}$ ) bestaat uit het optreden van doorgaande erosie van (onderdelen van) de bodembescherming als gevolg van de stroomsnelheden van het instromende water. De resterende sterkte die dan nog aanwezig is, betreft de sterkte die ervoor zorgt dat het kunstwerk na bezwijken van de bodembescherming niet onderuit gaat en er geen bres ontstaat (verlies van waterkerend vermogen).

Voordat er een bres ontstaat en het kunstwerk dus als geheel onderuit gaat na het bezwijken van de bodembescherming, worden er nog een aantal processen doorlopen:

- Erosie van de onbeschermd bodem als gevolg van de stroomsnelheden. Dit proces leidt uiteindelijk tot steeds diepere ontgrondingskuilen.
- Door het steeds verder wegvallen van passieve gronddruk aan de binnenzijde, door het uitspoelen van gronddeeltjes onder de binnenzijde van het kunstwerk, zal het kunstwerk steeds verder vervormen dan wel verplaatsen (kantelen, verschuiven). Uiteindelijk leidt dit tot het opeenvolgend bezwijken van onderdelen van de constructie of tot instabiliteit (kantelen, verschuiven) van het kunstwerk als geheel: het kunstwerk faalt.

De resterende sterkte van het kunstwerk na bezwijken van de bodembescherming is dus afhankelijk van een groot aantal factoren. De belangrijkste zijn:

- *Erosiebestendigheid van de bodem onder de bodembescherming*  
De vorming van een ontgrondingskuil gaat in zandige grond veel sneller dan in cohesieve grond (klei).
- *Fundatie van het kunstwerk*  
Een kunstwerk dat op palen staat zal minder snel (deels) bezwijken dan een kunstwerk dat op staal gefundeerd is, aangezien de verticale stabiliteit (in eerste instantie) door de palen wordt gewaarborgd.
- *Geometrie van het kunstwerk*  
Een kort kunstwerk zal sneller kantelen of afschuiven dan een lang kunstwerk.
- *Aanwezigheid van een scherm aan de binnenzijde van het kunstwerk*  
Bij het ontbreken van een scherm aan de binnenzijde treden eventuele ontgrondingen onder het kunstwerk veel sneller op.

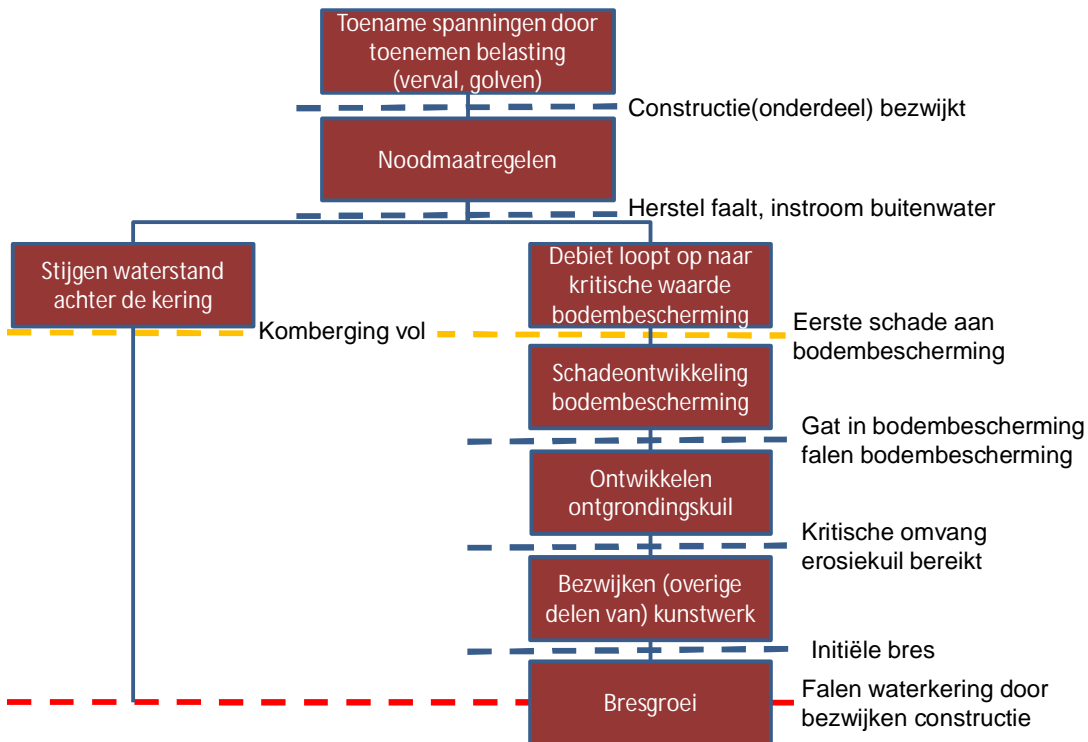
Nadat de bodembescherming is bezweken moet er dus nog het nodige gebeuren voordat het kunstwerk feitelijk faalt. Dit kan in rekening worden gebracht via het mechanisme *bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie van de bodem ( $Z_{12}$ )*. Het is echter zeer lastig deze resterende sterkte te kwantificeren en uit te drukken in een concrete kans op bezwijken van het kunstwerk als geheel nadat bezwijken van de bodembescherming is opgetreden. Opgemerkt wordt dat bij het bezwijken van de constructie of constructie-onderdelen het verval over het kunstwerk nagenoeg altijd substantieel is, waardoor na bezwijken grote stroomsnelheden zeker zullen optreden. Het niet meenemen van eventuele resterende sterkte is dan een verantwoorde keuze.

#### *Resterende sterkte na overschrijding kombergend vermogen*

Het overschrijden van het kombergend vermogen ( $Z_{21}$ ) bestaat uit het instromen van dusdanig veel water dat het niet meer kan worden geborgen in het achterliggende gebied, zonder dat dit tot het overschrijden van de faalcriteria leidt. Deze faalcriteria zijn gekoppeld aan het optreden van substantiële gevolgen. Hiermee is er na overschrijden van het kombergend vermogen geen sprake meer van resterende sterkte.

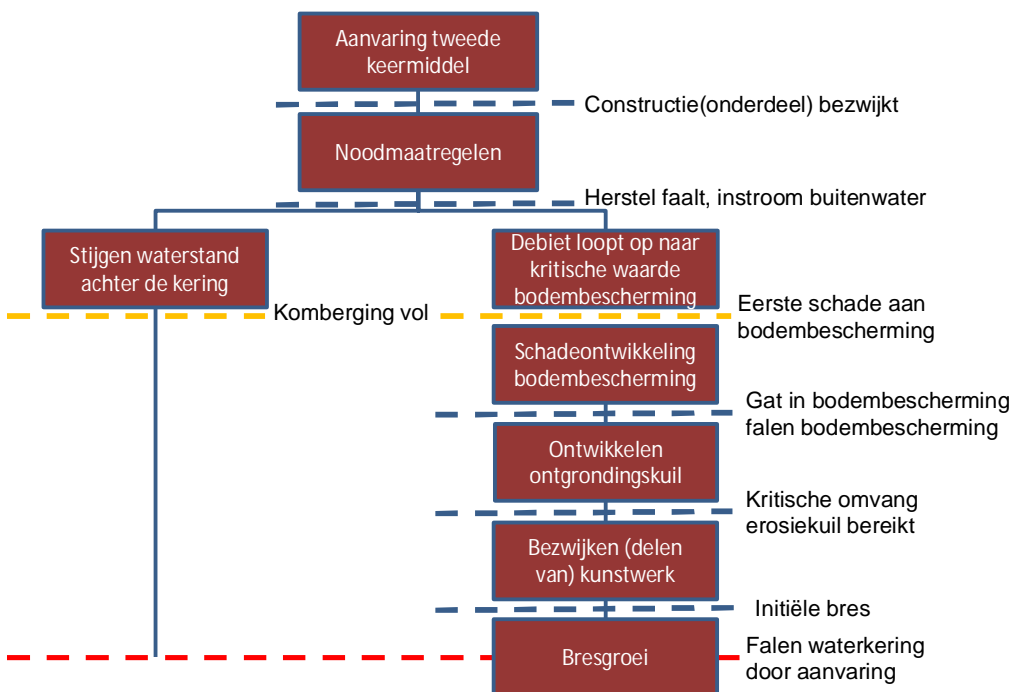
#### 10.4.2 Schematisch overzicht van het faaltraject

In onderstaand Figuur 10.12 is een schematisch overzicht gegeven van het traject dat leidt tot falen als gevolg van het faalmechanisme *bezwijken constructieonderdelen*.



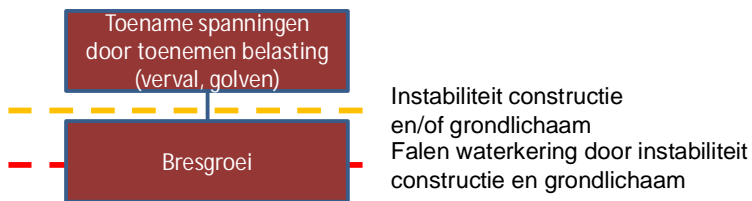
Figuur 10.12 Schematische weergave proces van falen voor faalmechanisme bezwijken constructieonderdelen

Voor het traject dat leidt tot falen als gevolg van aanvaren wordt in Figuur 10.13 een schematische weergave gegeven. Dit schema is grotendeels hetzelfde als in bovenstaand Figuur 10.12. Het verschil zit in het initiële mechanisme.



Figuur 10.13 Schematische weergave proces van falen voor bezwijken als gevolg van aanvaren

Ten slotte is voor het faalmechanisme *instabiliteit constructie en grondlichaam* onderstaand schema van toepassing. Dit is een eenvoudig schema, omdat er geen resterende sterkteprocessen aan gekoppeld zijn, zie Figuur 10.14.



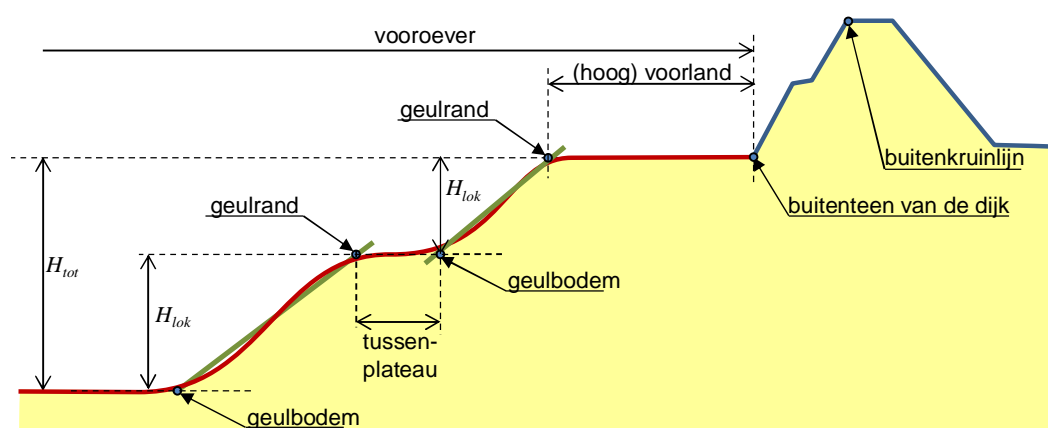
Figuur 10.14 Schematische weergave proces van falen bij instabiliteit constructie en grondlichaam



## 11 Voorland

### 11.1 Inleiding

Bij de beveiliging tegen hoogwater wordt meestal de stabiliteit van de waterkering zelf bekeken. Ook buiten de waterkering zelf is een aantal mechanismen van belang, die de waterkering kunnen bedreigen. Hieronder valt een aantal mechanismen betreffende het voorland, die tot een inschaling tot in of vlakbij de waterkering kunnen leiden, waardoor de standzekerheid in gevaar kan komen of anderszins de belastingen substantieel veranderen. De vooroever is het gebied aansluitend aan de buitenzijde van de waterkering tot aan het diepste deel van de geul. Het gebied tussen de teen van de dijk en de geulrand wordt voorland genoemd. Als er, bij een schaaldijk, sprake is van een steile vooroever naar een diepe stroomgeul, dan moet deze steile vooroever als voorland worden beschouwd. Het voorland kan dus zowel onder als boven water liggen, en zelfs boven de maatgevende waterstand. Figuur 11.1 geeft een prinscheschets met definities van begrippen. Hierin is uitgegaan van de waterkering in de vorm van een dijklichaam, maar dit kan uiteraard ook een kunstwerk betreffen.



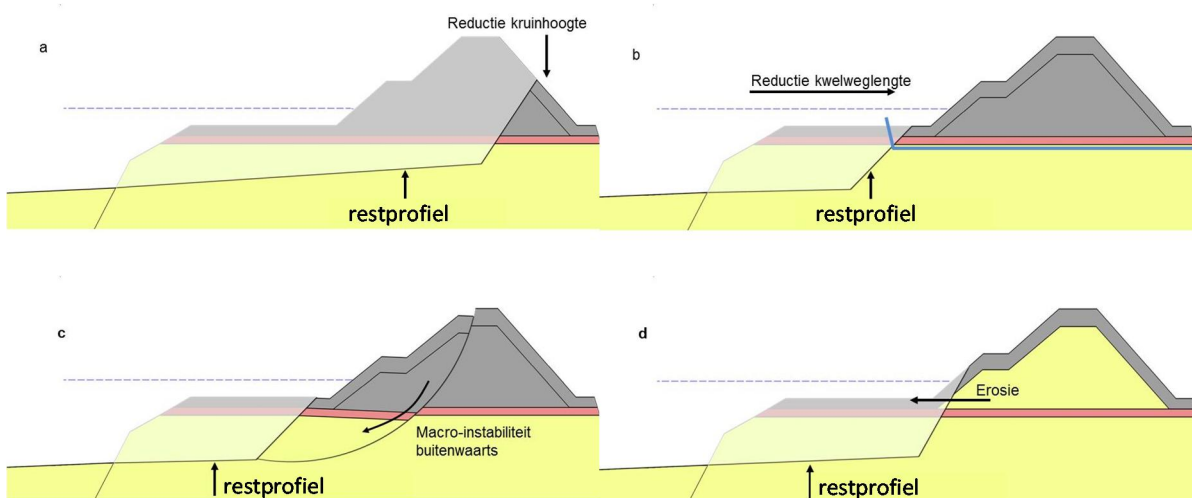
Figuur 11.1 Prinscheschets voorland met begrippen als de waterkering een dijk betreft

Het talud van de dijk is het gedeelte van het dijkprofiel met een helling tussen 1:1 en 1:10. De buitenteen is de overgang van het talud naar het maaiveld buitendijks. In Figuur 11.1 zijn verder twee lokale taludhoogtes ( $H_{lok}$ ) en de totale taludhoogte ( $H_{tot}$ ) van de geul te onderscheiden. Als er een tussenplateau aanwezig is dat voldoende breed is, zal alleen de bovenste lokale geuldiepte criteria geven die van invloed zijn op de stabiliteit van de dijk. Als het tussenplateau niet voldoende breed is, geeft de totale geuldiepte de criteria voor de stabiliteit van de dijk.

Omdat de mechanismen met betrekking tot het voorland niet direct leiden tot falen van de waterkering, maar wel indirect invloed hebben op de kans van optreden van mechanismen die wel hoogwater-gedreven zijn, worden dit indirecte mechanismen genoemd. De hoogwater-gedreven mechanismen worden de directe mechanismen genoemd. De belangrijkste directe mechanismen die beïnvloed kunnen worden door de processen in het voorland zijn:

- Grasbekleding, erosie kruin en binnentalud (door kruinverlaging en eventueel toename golfoverslag door minder golfbreking op het voorland).
- Piping (door verschuiving intredepunt en verandering waterspanningsverdeling in en onder dijk of kunstwerk).
- Buiten- en binnenwaartse macro-instabiliteit (het tweede door verandering van de waterspanningsverdeling in dijk).
- Erosie buitentalud (door schade tot aan het buitentalud of door toename golfbelasting door minder golfbreking op het voorland).
- Overslag en/of overloop van het kunstwerk (door toename golfoverslag door minder golfbreking op het voorland).
- Sterkte en stabiliteit van het kunstwerk.

Een en ander is voor een dijk geïllustreerd in Figuur 11.2. Indien een zettingsvloeiing tot een extreme kruinverlaging leidt, kan dit, in combinatie met een laag achterland, zelfs direct tot een overstrooming leiden. In het merendeel van de gevallen zal het indirecte mechanisme echter niet tot falen van de waterkering leiden omdat na optreden voldoende tijd is voor herstel van de schade. Optreden valt namelijk niet samen met hoogwater.



Figuur 11.2 Invloed van de vloeijing op directe mechanismen (a) erosie kruin en binnentalud (overloop), (b) piping, (c) buitenwaartse macro-instabiliteit en (d) erosie buitentalud (schade aan bekleding)

Andere gebeurtenissen op het voorland die bedreigend zijn voor de veiligheid van de dijk zijn niet zozeer gerelateerd aan de sterkte maar aan de belasting. Het geheel of gedeeltelijk wegvallen van het belastingreducerend effect van het voorland kan ontstaan door:

- Het geheel of gedeeltelijk verdwijnen van stroomgeleidende en/of golfbrekende constructies.
- Erosie van een hoog en/of breed voorland.
- Het verdwijnen of eroderen van afsluitende (slib)lagen, waardoor de kwelengte wordt verkort.



Sommige dammen en kunstwerken hebben aan twee zijden een voorland waar deze gebeurtenissen een rol kunnen spelen.

Drie mechanismen maken deel uit van de beoordeling op de stabiliteit van het voorland:

- Erosie door golfafslag.
- Afschuiving.
- Zettingsvloeiing.

In de drie volgende paragrafen worden deze drie mechanismen beschreven.

## 11.2 Erosie voorland door golfafslag

Deze paragraaf behandelt de erosie die gedurende een storm/ hoogwatergebeurtenis optreedt in het voorland door golfafslag. Hij gaat niet in op andere erosieverschijnselen die op en bij het voorland kunnen optreden maar die wel van belang zijn als inleidende mechanismen die potentieel bedreigend zijn voor de standzekerheid van de waterkering. Een eerste voorbeeld daarvan is de geleidelijke verschuiving van een geul richting waterkering. Het monitoren hiervan valt onder de actieve zorgplicht. Voor de berekening wordt uitgegaan van de ongunstigste situatie die zich naar verwachting voordoet tot aan de datum waarmee in het ontwerp of de beoordeling wordt rekening gehouden. Een tweede voorbeeld is de erosie die rond niet-waterkerende objecten in het voorland (gebouwen) kan optreden ten gevolge van stromend water rondom de objecten (ontgrondingskuilen). Dit kan bij voorbeeld effect hebben op de kwelweglengte voor piping. De mogelijke consequenties van niet-waterkerende objecten moeten apart worden beoordeeld.

### 11.2.1 Fenomenologische procesbeschrijving erosie voorland

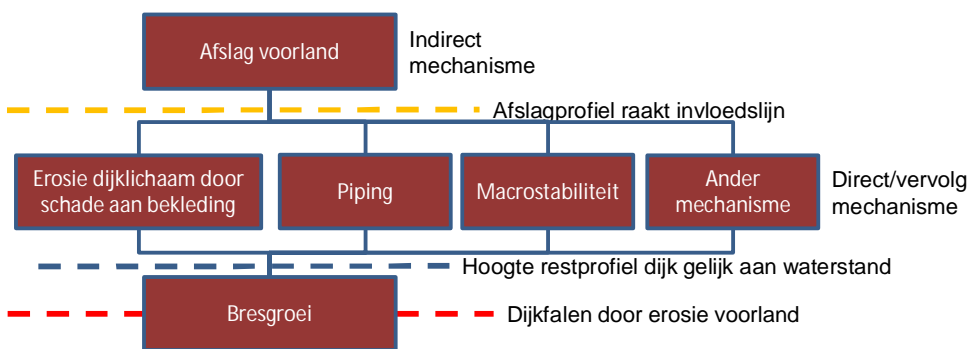
Afhankelijk van de waterhoogte kan de geulrand van de vooroever gedurende een storm / hoogwatergebeurtenis zich verplaatsen richting waterkering. Wanneer het water ver boven de geulrand staat is er geen sprake van terugschrijdende erosie. Dit is het geval wanneer het verschil tussen de waterstand bij de norm en de maaiveldhoogte meer dan twee maal de significante golfhoogte is. Golfafslag speelt dan geen rol in het voorland (mogelijk wel op de dijk).

Bij een waterstand bij de norm van minder dan twee maal de significante golfhoogte boven het maaiveld ondervindt dit nog invloed van de golfbeweging. Als er een grasmat aanwezig is, dan wordt deze potentieel aangetast, en komt het onbeschermd maaiveld bloot te staan aan de golfwerking. Dat laatste is uiteraard ook het geval als er bij voorbaat geen grasmat aanwezig is. Als de golfhoogte minder dan 0,75 m is, wordt een aanwezige grasmat geacht daartegen bestand te zijn.

Wanneer de waterstand onder de geulrand ligt, geeft erosie van het talud aanleiding tot versteiling, totdat er een instabiele situatie optreedt en er een hoeveelheid grond naar beneden stort. Door golfbeweging en retourstroom wordt dit materiaal afgevoerd, waarna er opnieuw uitholling en versteiling van het talud optreedt en het proces zich herhaalt. In veel gevallen is bij een geringe afstand tussen de geulrand en de buitenteen een bestorting aanwezig om erosie van de geulrand tegen te gaan. Deze helpt niet tegen een geleidelijke verschuiving van de geul (zie de vorige paragraaf) maar wel tegen golferosie. De ligging van de bestorting bepaalt mede de ligging van het maatgevende profiel voor de twee volgende mechanismen afschuiven en zettingsvloeiing.

11.2.2 Overzicht van het faaltraject erosie voorland

De fenomenologische beschrijving van het mechanisme erosie voorland, dat uiteindelijk kan leiden tot een overstroming, is in Figuur 11.3 schematisch weergegeven. De erosie kan effecten hebben op verschillende faalmechanismen, vooral de buitenwaartse macrostabiliteit en piping. Ook binnenwaartse macrostabiliteit kan worden beïnvloedt via een verandering van de waterspanningen. De figuur is opgesteld uitgaande van de aanname dat de waterkering wordt gevormd door een dijk. Maar als het gaat om een waterkerend kunstwerk dan kan afslag van het voorland ook leiden tot een hogere kans op falen door piping, door overslag of door bezwijken van (delen van) het kunstwerk.



Figuur 11.3 Gebeurtenissen leidend tot falen door erosie voorland

11.3 Afschuiving voorland

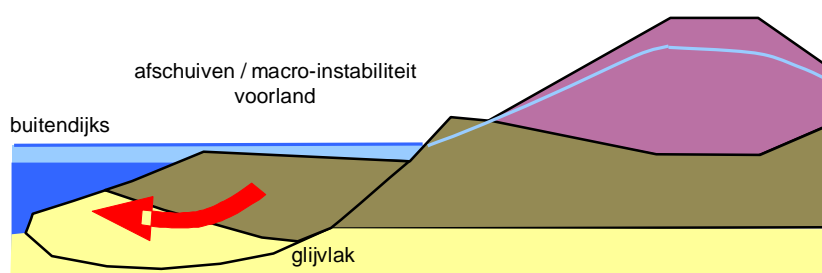
11.3.1 Fenomenologische procesbeschrijving afschuiving voorland

Indien een vooroever is opgebouwd uit slappe klei- en veenlagen of verwekinggevoelig zand, dient rekening te worden gehouden met een kans op grootschalige afschuivingen en zettingsvloeiingen van de vooroever met mogelijke invloed op de veiligheid van de waterkering. Deze paragraaf richt zich op afschuiving, de volgende paragraaf behandelt zettingsvloeiingen. In beide paragrafen is voor de voorbeelden telkens uitgegaan van de aanname dat de waterkering een dijk betreft. Maar uiteraard kan een afschuiving of zettingsvloeiing van het voorland ook ten koste gaan van de veiligheid van een achter dit voorland gelegen kunstwerk.

Afschuiving is een mechanisme dat optreedt indien de kritieke schuifspanning in een bepaald vlak (al dan niet recht) in de grond wordt overschreden. Afschuivingen kunnen optreden bij een vooroever die is opgebouwd uit samenhangende grond zoals klei en veen, maar ook bij al dan niet zettingsvloeiing-gevoelig zand en zelfs bij bestorte vooroevers.

Afschuiving van het voorland is in essentie hetzelfde mechanisme als macro-instabiliteit van het buitentalud van de dijk. De oorzaak van macro-instabiliteit is een verlies van evenwicht. Dit evenwicht kan verloren gaan door:

- Een toename van het aandrijvend moment, bijvoorbeeld door verkeer of door sedimentatie op het voorland.
- Door een afname van het tegenwerkend moment, bijvoorbeeld door erosie van de geul of geulwand,
- Door een afname van de schuifsterkte van de ondergrond als gevolg van toenemende waterspanningen [1].



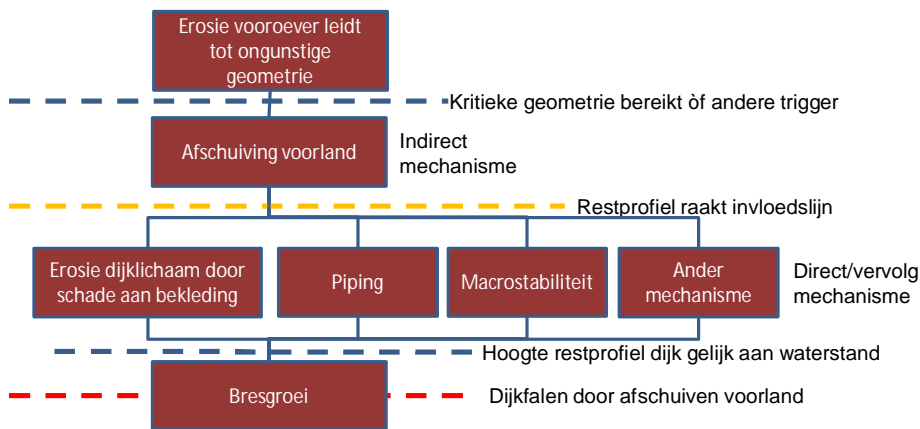
Figuur 11.4 Principeschets afschuiving/ macro-instabiliteit voorland

De mechanismen buitenwaartse macro-stabiliteit / afschuiving voorland lijken in veel opzichten op het mechanisme binnenwaartse macro-stabiliteit. De mechanismedescriptie komt dus sterk overeen met wat in hoofdstuk 2 (Binnenwaartse macro-instabiliteit) is behandeld. De deelprocessen initiatie, scheurvorming en afschuiving zijn ook hier van toepassing en kunnen ook onder water optreden. Bij de situatie met een tussenplateau (Figuur 11.1) is het achtereenvolgens optreden van een cascade van afschuivingen goed denkbaar: een afschuiving in het diepe gedeelte, gevolgd door een afschuiving in het ondiepe gedeelte (mogelijk gevolgd door verlies van buitenwaartse stabiliteit van de waterkering zelf).

Een belangrijk verschil met binnenwaartse stabiliteit is dat voor buitenwaartse stabiliteit de kritieke situatie in het algemeen pas ontstaat na de hoogwatergolf, als de trigger tot het mechanisme überhaupt hoogwater gerelateerd is. Tijdens een hoogwatergolf zal de freatische lijn in het voorland stijgen door infiltratie via het maaiveld en via de ondergrond vanuit het watervoerend pakket. Een andere mogelijkheid is dat de freatische lijn stijgt door hevige regenval. Door de hogere waterspanning kan de ondergrond een geringere schuifsterkte mobiliseren. Meestal is de buitenwaartse macrostabiliteit tijdens een hoogwatergolf niet direct in gevaar, maar dit kan wel het geval zijn na een snelle val van de buitenwaterstand, dat wil zeggen dat de buitenwaterstand dusdanig snel daalt dat de freatische lijn niet voldoende tijd heeft om te volgen. Het aandrijvend moment is relatief hoog door het hoge gewicht van de verzadigde grond terwijl door de hoge waterspanning onvoldoende schuifsterkte kan worden gemobiliseerd.

### 11.3.2 Overzicht van het faaltraject afschuiving voorland

De fenomenologische beschrijving van de het mechanisme afschuiven voorland, dat uiteindelijk kan leiden tot een overstroming, is in Figuur 11.5 schematisch weergegeven. Het inleidende mechanisme voor de afschuiving kan zijn een onder dagelijkse omstandigheden optredende erosie van de vooroever (verplaatsing van de geul) of opslibbing van de vooroever, in beide gevallen leidend tot een ongunstige geometrie. Een andere trigger kan zijn een verhoogd freatisch vlak door neerslag of een snelle val van de buitenwaterstand. Omdat deze triggers niet positief gecorreleerd zijn aan de waterstand is hier sprake van een indirect mechanisme dat niet onmiddellijk tot falen van de waterkering leidt.



Figuur 11.5 Gebeurtenissen leidend tot falen van de dijk door afschuiving voorland

## 11.4 Zettingsvloeiing

### 11.4.1 Fenomenologische procesbeschrijving zettingsvloeiing

Een onderwater zandtalud kan soms schijnbaar spontaan instabiel worden, waarna het zand uitvloeit om pas bij een zeer flauwe helling te sedimenteren. Gewoonlijk wordt dit met ‘zettingsvloeiing’ betiteld. Twee verschillende processen kunnen leiden tot een dergelijke sterke taludverflauwing: verweken en bressen. Deze processen worden aangeduid met ‘verwekingsvloeiing’ respectievelijk ‘bresvloeiing’. Vaak zal het echter gaan om een combinatie van beide.

Een *verwekingsvloeiing* kan worden omschreven als een verschijnsel waarbij een pakket losgepakt zand onder water plotseling verweekt: er ontstaat een soort drijfzand. *Verweking* impliceert een dramatische vermindering van het onderlinge contact tussen de zandkorrels en daarmee van de schuifsterkte van het zandlichaam. Als het zandpakket oorspronkelijk in een helling aanwezig is, dan zal de verweekte massa naar beneden *vloeien* en pas weer onder een zeer flauwe helling tot rust komen. De mate van verweking waarbij de zandkorrels in het geheel geen onderling contact meer hebben (volledige verweking), treedt niet zo vaak op. Maar gedeeltelijke verweking kan het vermogen van het zand om schuifspanning op te nemen al zodanig doen verminderen dat het talud instabiel wordt en er een grote massa zand naar beneden vloeit.

De belangrijkste parameters voor het optreden van een pure verwekingsvloeiing in het onderwater zandtalud zijn:

- 1 De verwekinggevoeligheid. Hoe losser het zand is gepakt, des te groter is het risico.
- 2 De taludhelling. Hoe steiler het talud, des te groter het risico.
- 3 De hoogte van het talud. Hoe hoger het talud, des te groter het risico.

Daarbij dient men zich te realiseren dat de combinatie van parameterwaarden de grootte van het risico bepaalt. Om een verwekingsvloeiing te krijgen moet bijvoorbeeld de helling relatief steil zijn als de verwekinggevoeligheid beperkt is.

Voorwaarde voor het *optreden* van verweking, en daarmee een verwekingsvloeiing, is bovendien dat er sprake moet zijn van een inleidend mechanisme (“trigger”).

De volgende zaken kunnen de vloeijing in gang zetten:

- Een flinke trilling, bijvoorbeeld een kleine aardbeving of heien in de nabijheid.
- De lokale afschuiving van een kleilaagje.
- Erosie waardoor een versteiling van het talud plaatsvindt.
- Een snelle waterspiegeldaling.

Een *bresvloeijing* in een onderwater talud is een gestaag terugschrijdend erosieproces dat zichzelf versterkt of althans zichzelf in stand houdt. Het proces wordt in gang gezet door een lokale afschuiving of verwekingsvloeijing. Die resulteert enerzijds in een zand-watermengsel dat als een dichtheidsstroom langs het talud naar beneden stroomt ("suspensiestroom") en daarbij verdere erosie veroorzaakt, waardoor de suspensiestroom steeds sterker wordt. Anderzijds resulteert de lokale taludinstabiliteit doorgaans in een zo steil taludgedeelte ("bres" of "walletje") dat het zand aan het oppervlak afregent, waardoor het steile taludgedeelte terugschrijdt en het afregene zand de suspensiestroom voedt.

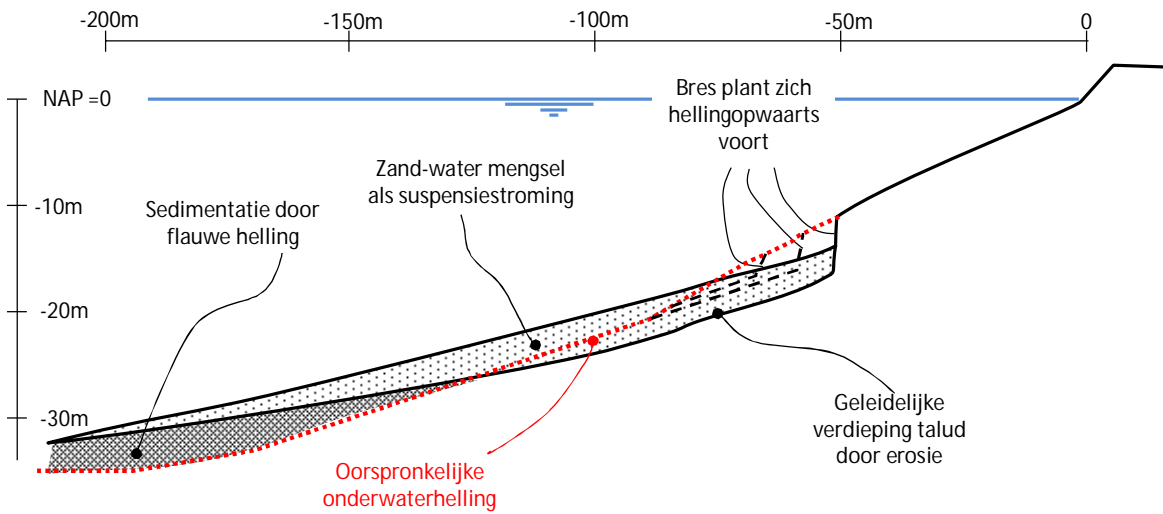
Voorwaarden voor het ontstaan van een (pure) bresvloeijing zijn:

- 1 Het onderwater talud bestaat uit erosiegevoelig materiaal zoals silt of zand; het is fijn genoeg (hoe fijner des te erosiegevoeliger; bij een  $D_{50}$  groter dan 1 mm is een bresvloeijing nauwelijks mogelijk).
- 2 Een doorgaand talud zonder bermen of beschermde zones.
- 3 Het "afgebreste" materiaal moet in de vorm van een suspensiestroom vanaf de teen van de initiële bres in voldoende mate kunnen wegstromen (of worden opgezogen).
- 4 Het onderwater talud moet voldoende hoog en steil zijn (in Nederland doorgaans hoger dan 10 m en gemiddeld steiler dan 1:4 à 1:6).
- 5 Een grote verstoring ofwel initiële bres ergens in het talud.

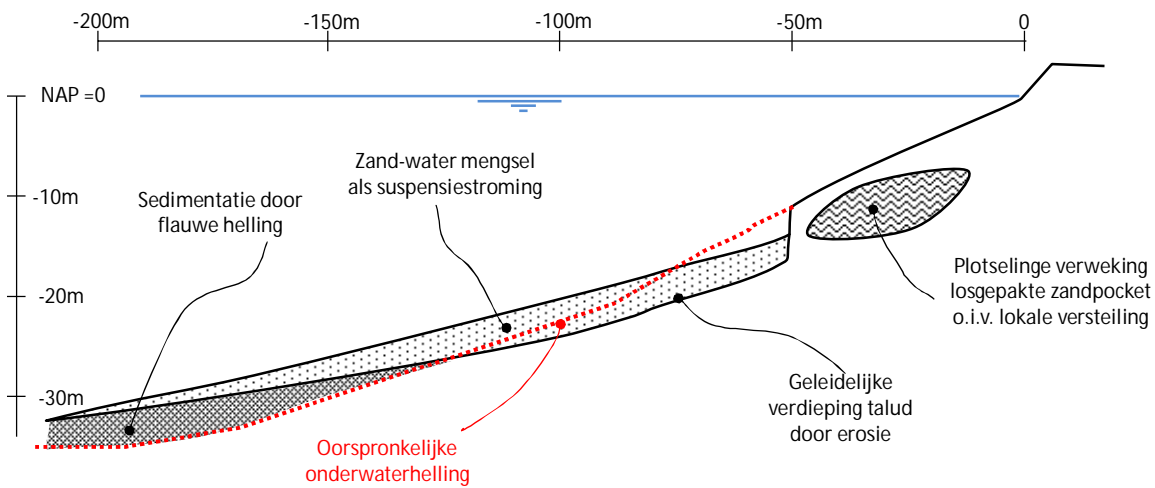
Waarschijnlijk zal bij veel vloeijingen sprake zijn van een combinatie van de mechanismen verwekingsvloeijing en bresvloeijing:

- Een verwekingsvloeijing in het deel van een talud met losgepakte zandlagen kan in een paar minuten een steile bres doen ontstaan aan de bovenkant van de vloeijing en/of een mengselstroom met groot zanddebiet aan de onderkant.
- Door bressen kan de taludvorm zodanig veranderen (veelal versteilen) dat (een deel van) het talud potentieel instabiel wordt en verweekt.

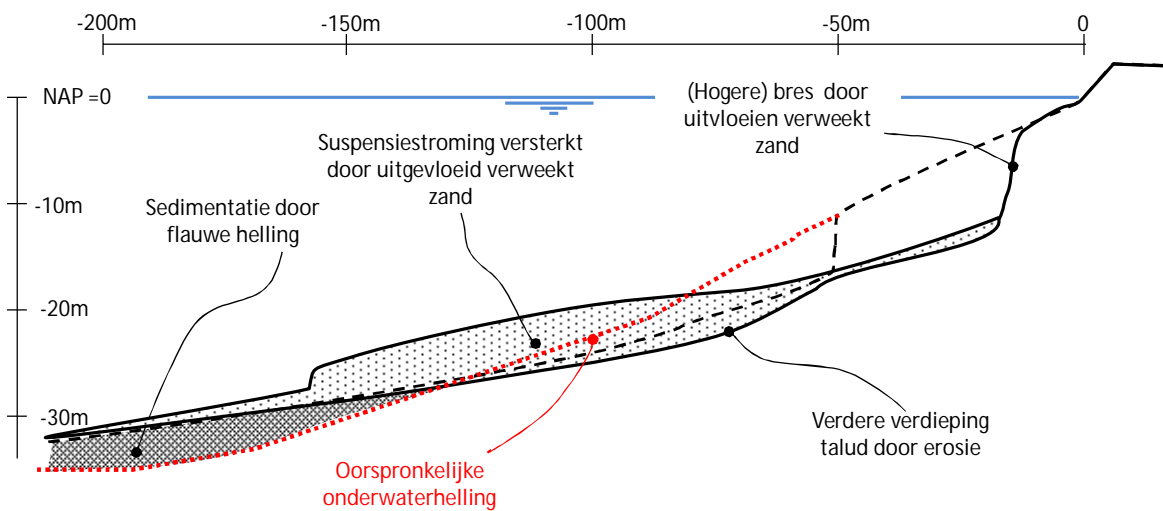
Ook zonder potentiële instabiliteit ten aanzien van verweken is het denkbaar dat tijdens een vrij rustig lopend bresproces plotseling een vrij omvangrijke vloeijing in losgepakt zand optreedt die een steile bres en/of groot zanddebiet doet ontstaan. Dat zou het geval kunnen zijn als het onderste deel van het talud uit (middel) vastgepakt zand bestaat en daarboven een laag losgepakt zand ligt. Figuur 11.6 geeft een beeld van de aanvankelijk pure bresvloeijing. Als de bres van onderin het talud langzaam naar boven loopt door het (middel) vastgepakte zand kan het losgepakte zand gaan vloeien op het moment dat de bres die laag bereikt, zie Figuur 11.7. Door een vrij omvangrijke vloeijing van het losgepakte zand ontstaat een hoge steile bres en een groot zanddebiet, zie Figuur 11.8.



Figuur 11.6 Typisch verloop van een (pure) bresvloeiing



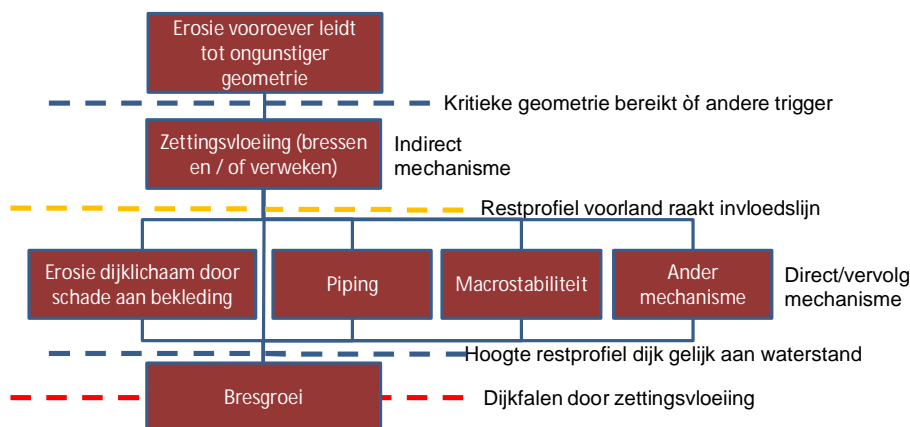
Figuur 11.7 Scenario bresvloeiing en lokale verweking (1)



Figuur 11.8 Scenario bresvloeiing en lokale verweking (2)

#### 11.4.2 Overzicht van het faaltraject zettingsvloeiing

De fenomenologische beschrijving van de het mechanisme zettingsvloeiing in de vooroever van een waterkering, dat uiteindelijk kan leiden tot een overstroming, is in Figuur 11.9 schematisch weergegeven. Omdat het optreden van een zettingsvloeiing niet positief gecorreleerd is aan de waterstand (een door verweking geïnitieerde zettingsvloeiing zal zelfs eerder optreden bij een daling van de waterstand), zal zettingsvloeiing meestal niet direct tot een overstroming leiden (tenzij een zeer grote inscharing optreedt in combinatie met een laag achterland of indien hoogwaters elkaar snel opvolgen zoals in het getijdegebied).



*Figuur 11.9 Gebeurtenissen leidend tot falen van de dijk door zettingsvloeiing. Onder directe mechanismen worden hoogwater gedreven mechanismen verstaan. Het optreden van een zettingsvloeiing is niet-hoogwater gedreven en zal (meestal) niet direct tot een overstroming leiden*





## 12 Literatuur

- [1] *Dijkdoorbraakprocessen*. E.O.F. Calle, GeoDelft rapport kenmerk 720201/39. Delft, maart 2002.
- [2] *Theorieontwikkeling rondom opdrijven*. M.A. Van en A. van Hoven. GeoDelft rapport SE-52029/2, versie 2, definitief. Delft, februari 2000.
- [3] *Tijdsafhankelijke stabiliteit van dijken*. J.M. van Esch. Grondmechanica Delft, rapport CO-347950/13. Delft, november 1994.
- [4] *Druk op de dijken 1995, de toestand van de rivierdijken tijdens het hoogwater van januari-februari 1995*, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. Delft, augustus 1995.
- [5] *Schematiseringshandleiding macrostabiliteit*. September 2016.
- [6] *Technisch Rapport Ontwerpbelastingen voor het rivierengebied*. Uitgave: Ministerie van Verkeer en Waterstaat / Expertise Netwerk Waterkeren, ISBN 978-90-369-1409-3. Den Haag, juli 2007.
- [7] *Dijkdoorbraak Tholen december 1894*. F.M. Waarsenburg en P. van Dam. Rapport S-80.056. COW. November 1980.
- [8] *Experimenteel onderzoek in geocentrifuge, Micro-instabiliteit kan ook optreden bij flauwe taluds*. H. den Adel, D.R. Mastbergen, T.P. Stoutjesdijk (Nb. het artikel vermeldt ten onrechte: A.R. Koelewijn, C. Zwanenburg). Artikel in: Land + Water nr. 5, 2008.
- [9] *Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken, deel 1 bovenrivierengebied*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, ISBN 90-12-05169-X. Staatsuitgeverij 's-Gravenhage, september 1985.
- [10] *Microstabiliteit overzicht modellering*. T.P. Stoutjesdijk, J. Dekker. GeoDelft, rapport 393440/81, Delft, augustus 2000.
- [11] *Micro-instabiliteit binnentalud zanddijk*. M.B. de Groot, H. den Adel, D.R. Mastbergen. Delft Cluster, Deltares kenmerk 418020-0009, Delft, maart 2008.
- [12] *Handreiking Dijkbekledingen, Deel 3: Asfaltbekledingen*. In opdracht van RWS-WLV en Projectbureau Zeeweringen. Deltares, januari 2015.
- [13] Voorspellingsmodel voor breuksterkte, afhankelijk van leeftijd en holle ruimte, J. Telman, Q-Consult, 3 december 2013.
- [14] *Aanpassing toetsmethodiek Afschuiving bij steenzettingen*. R. Bosters. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rapportnummer PZDT-R-08300, 1 september 2008.
- [15] *Black box model voor afschuiving bij steenzettingen*. WL|Delft Hydraulics rapport H4635. Delft, november 2007.

- [16] *Handreiking Toetsen Grasbekledingen op Dijken t.b.v. het opstellen van het beheerdersoordeel (BO) in de verlengde derde toetsronde.* Rijkswaterstaat 2012.
- [17] *Studie voor richtlijnen klei op dijktaluds in het rivierengebied.* G.A.M. Kruse, Deltares rapportnummer 1202512-000-GEO-0002. Delft, juli 2010.
- [18] *Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies, Geotechnische aspecten van dijken, dammen en boezemkaden.* Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, RWS-DWW, ISBN 90-369-3776-0. Delft, juni 2001.
- [19] *Technisch Rapport Duinafslag. Beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering ten behoeve van Voorschrift Toetsing op Veiligheid 2006.* Expertisenetwerk waterveiligheid, Mei 2007.
- [20] *Schematiseringshandleiding betrouwbaarheid sluiten kunstwerk.* Delft, september 2016.
- [21] *Schematiseringshandleiding hoogte kunstwerk.* Delft, september 2016
- [22] *Schematiseringshandleiding piping bij kunstwerk.* Delft, september 2016.
- [23] *Schematiseringshandleiding sterkte en stabiliteit kunstwerk, puntconstructie.* Delft, september 2016.
- [24] *Handreiking aansluitconstructies (WTI 2017 Kunstwerken).* J. Bredeveld, B. van Bree. Deltares rapport 1220087-006-GEO-0002, Versie D1. Delft, 6 juli 2015.
- [25] *Leidraad Kunstwerken.* Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. ISBN 90-369-5544-0. Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft, mei 2003.
- [26] *Achtergrondrapport toetsspoor Betrouwbaarheid Sluiting kunstwerk IV – Toets op maat voor demontabele keringen (WTI 2017).* Deltares rapport 1220087-002-GEO-0008. Delft, februari 2016.
- [27] *Waterstandsverlopen kust, WTI2017.* H. Chbab. Deltares rapport 1220082-002-HYE-0003, Versie 2. Delft, december 2015.
- [28] *Waterstandsverlopen Rijntakken en Maas, WTI2017.* H. Chbab. Deltares rapport 1220082-002-HYE-0002. Delft, januari/februari 2016.
- [29] *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen.* U. Förster, G. van den Ham, E.O.F. Calle, G.A.M. Kruse. Deltares rapport 1202123-003-GEO-0002 in opdracht van RWS Waterdienst. Delft, Maart 2012.
- [30] *Ontwerp van schutsluizen.* Rijkswaterstaat, Bouwdienst, deel 1: ISBN 90-369-3305-6, deel 2: ISBN 90-369-3306-4. Utrecht, juni 2000.
- [31] *Considerations and Model tests on the Design of River Barrages with Respect to Piping.* M. Achmus, B.G.S. Mansour. Proceedings Third International Conference on Scour and Erosion. ICSE, Amsterdam, The Netherlands, November 1-3 2006. CURNET, Gouda, 2006.

- [32] *Richtlijnen Ontwerpen Kunstwerken ROK 1.2*. Rijkswaterstaat Technisch Document RTD 1001:2013, Rijkswaterstaat Dienst Infrastructuur. Utrecht, januari 2013.



## A Afkortingen

OKH	Open Keerhoogte.
OKP	Open Keerpeil.
OSA	Open steenasfalt.
RWS	Rijkswaterstaat.
TR	Technisch Rapport
TRDA	Technisch Rapport DuinAfslag
WAB	Waterbouw asfaltbeton.
WBI	Wettelijk BeoordelingsInstrumentarium.