

Fenomenologische beschrijving

Faalmechanismen WTI



Fenomenologische beschrijving

Faalmechanismen WTI

Robert 't Hart
Huub De Bruijn
Goaitske de Vries

1220078-000



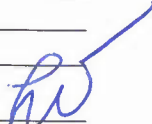
Titel
Fenomenologische beschrijving

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving	1220078-000	1220078-000-GEO-0010- gbh	165

Trefwoorden
Wettelijk ToetsInstrumentarium (WTI), Faalmechanismen, Primaire waterkering, Fenomenologische beschrijving

Samenvatting
Als achtergronddocument bij het Wettelijk toetsinstrumentarium (WTI 2017) is in deze rapportage een fenomenologische beschrijving gegeven van de belangrijkste faalmechanismen die in het kader van de toetsing van primaire waterkeringen moeten worden beoordeeld. Per faalmechanisme wordt het totale faaltraject van initiatie tot falen van de waterkering beschreven. Daarbij wordt duidelijk gemaakt welk moment in dit traject voor de Gedetailleerde toets (toetslaag 2) als moment van falen wordt aangemerkt: de faaldefinitie.

Summary
This report, which is part of the background documentation for the statutory safety assessment (WTI 2017), describes the major failure mechanisms to consider in the assessment of water defences. For each mechanism the chain of events from initiation to the final failure of the water defence is described. In this chain of events the moment associated to failure according to the detailed assessment procedure (toetslaag 2) is marked.

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	

Status
definitief

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Algemeen	1
1.2	Doelgroep	2
1.3	Leeswijzer	2
1.4	Definities	4
1.5	Totstandkoming	7
2	Macrostabieliteit binnenwaarts	9
2.1	Globale beschrijving van macrostabieliteit	9
2.2	Gedetailleerde beschrijving macro-instabiliteit	10
2.2.1	Inleiding	10
2.2.2	Initiatie	10
2.2.3	Scheurvorming	11
2.2.4	Afschuiving	12
2.2.5	Mogelijke vervolgmecanismen na een afschuiving	12
2.2.6	Tweede afschuiving	13
2.2.7	Micro-instabiliteit	13
2.2.8	Overslag of overloop	14
2.2.9	Mogelijk verloop van het faaltraject na een afschuiving	14
2.2.10	Opdrijven	17
2.3	Overzicht van het faaltraject macro-instabiliteit binnenwaarts	18
2.4	Beknpte modelbeschrijving voor het te toetsen mechanisme	19
2.5	Literatuur macrostabieliteit	21
3	Macrostabieliteit buitenwaarts	23
3.1	Globale beschrijving buitenwaartse macrostabieliteit	23
3.2	Gedetailleerde beschrijving macro-instabiliteit buitenwaarts	24
3.3	Overzicht van het faaltraject macro-instabiliteit buitenwaarts	26
3.4	Beknpte modelbeschrijving voor het te toetsen mechanisme	27
3.5	Literatuur macrostabieliteit buitenwaarts	27
4	Piping	29
4.1	Globale beschrijving van piping	29
4.2	Gedetailleerde beschrijving van het faaltraject tot op niveau van de deelmechanismen	31
4.2.1	Belasting	31
4.2.2	Sterkte	33
4.2.3	Het traject van initiatie tot dijkfalen	34
4.2.4	Binnen het toetsproces te beoordelen deelmechanismen	45
4.2.5	Reststerkte	45
4.3	Overzicht van het faaltraject piping	45
4.4	Beknpte modelbeschrijving van de te toetsen deelmechanismen	47
4.4.1	Opbarsten	47
4.4.2	Heave	47
4.4.3	Terugschrijdende erosie	47
4.5	Literatuur piping	48
5	Microstabieliteit	51

5.1	Globale beschrijving van microstabiliteit	51
5.2	Faaltrajectbeschrijving	52
5.3	Falen door combinaties van mechanismen	55
5.4	Beknopte modelbeschrijving van de te toetsen deelmechanismen	56
5.5	Literatuur microstabiliteit	57
6	Stabiliteit bekleding asfalt	59
6.1	Inleiding	59
6.2	Veroudering materiaal bekledingslaag	59
6.3	Bezwijken ten gevolge van golfklappen	60
6.3.1	Overschrijding van de vermoeiingssterkte door golfklappen	60
6.3.2	Afschuiving in de asfaltbekleding ten gevolge van golfklappen	61
6.3.3	Bezwijken van de ondergrond door golfklappen	62
6.4	Bezwijken ten gevolge van wateroverdrukken	62
6.5	Materiaaltransport van onder de bekleding	64
6.6	Erosie bekledingsoppervlak	64
6.7	Reststerkte	65
6.8	Overzicht van het faaltraject door bezwijken van de asfaltbekleding	65
6.8.1	Inleiding	65
6.8.2	Traject van initiatie tot falen ten gevolge van golfklappen (AGK)	66
6.8.3	Gebeurtenissen tot dijkfalen ten gevolge van opdrukken door wateroverdruk	67
6.9	Beknopte modelbeschrijving asfaltbekledingen	68
6.10	Literatuur asfaltbekledingen	70
7	Stabiliteit bekleding gras	71
7.1	Inleiding	71
7.2	Grasbekleding erosie buitentalud	71
7.2.1	Inleiding en afbakening	71
7.2.2	Fenomenologische procesbeschrijving van erosie buitentalud	72
7.2.3	Overzicht van het faaltraject erosie grasbekleding op buitentalud	76
7.2.4	Beknopte modelbeschrijving van de toets voor erosie buitentalud	76
7.3	Grasbekleding afschuiven buitentalud	77
7.3.1	Inleiding en afbakening	77
7.3.2	Fenomenologische procesbeschrijving van afschuiven buitentalud	77
7.3.3	Overzicht van het faaltraject afschuiven grasbekleding op buitentalud	80
7.3.4	Beknopte modelbeschrijving van de toets op afschuiven buitentalud	81
7.4	Grasbekleding erosie kruin en binnentalud	81
7.4.1	Fenomenologische procesbeschrijving van erosie kruin en binnentalud	81
7.4.2	Overzicht van het faaltraject erosie grasbekleding op kruin en binnentalud	83
7.4.3	Beknopte modelbeschrijving van de toets voor erosie kruin en binnentalud	83
7.5	Grasbekleding afschuiven binnentalud	83
7.5.1	Inleiding en afbakening	83
7.5.2	Fenomenologische procesbeschrijving van afschuiven binnentalud	84
7.5.3	Overzicht van het faaltraject afschuiven van grasbekleding op binnentalud	87
7.5.4	Beknopte modelbeschrijving van de toets afschuiven binnentalud	88
7.6	Literatuur grasbekledingen	88
8	Stabiliteit bekleding steenzetting	91
8.1	Inleiding	91
8.2	Instabiliteit van de toplaag door golfbelasting	93
8.3	Instabiliteit van de toplaag door stroming langs de dijk	96

8.4	Lokale afschuiving door golfbelasting	96
8.5	Materiaaltransport vanuit de ondergrond	97
8.6	Materiaaltransport vanuit de granulaire laag	99
8.7	Erosie van de onderlagen	99
8.8	Overzicht van het faaltraject door bezwijken van de steenzetting	99
8.8.1	Inleiding	99
8.8.2	Falen als gevolg van instabiliteit van de toplaag	100
8.8.3	Falen als gevolg van overige mechanismen	102
8.9	Beknopte modelbeschrijvingen voor de te toetsen deelmechanismen	103
8.9.1	Initieel bezwijkmechanisme resulterend in gat in toplaag	103
8.9.2	Van bezwijken toplaag tot falen bekleding	104
8.10	Literatuur steenzettingen	105
9	Duinwaterkering	107
9.1	Fenomenologische procesbeschrijving	107
9.2	Reststerkte faalmechanisme duinafslag	111
9.3	Overzicht van het faaltraject duinafslag	112
9.4	Beknopte modelbeschrijving	114
9.5	Literatuur duinafslag	114
10	Kunstwerken	115
10.1	Falen waterkering door overslag en/of overloop van het kunstwerk	115
10.1.1	Fenomenologische beschrijving op hoofdlijnen	115
10.1.2	Gedetailleerde beschrijving van het faaltraject	115
10.1.3	Onderscheiden deelmechanismen	117
10.1.4	Reststerkte	118
10.1.5	Overzicht van het faaltraject overslag/overloop bij kunstwerken	119
10.1.6	Beknopte modelbeschrijving van de te toetsen deelmechanismen behorende bij overslag/overloop	119
10.2	Falen waterkering door niet sluiten keermiddelen van het kunstwerk	120
10.2.1	Beschrijving op hoofdlijnen	121
10.2.2	Gedetailleerde beschrijving van het faaltraject	122
10.2.3	Onderscheiden deelmechanismen in het beoordelingsspoor betrouwbaarheid sluiting	127
10.2.4	Reststerkte	127
10.2.5	Overzicht van het faaltraject niet sluiten bij kunstwerken	128
10.2.6	Beknopte modelbeschrijving van de te toetsen deelmechanismen	129
10.3	Falen waterkering door achter- of onderloopsheid van het kunstwerk	130
10.3.1	Fenomenologische beschrijving op hoofdlijnen	130
10.3.2	Gedetailleerde beschrijving van het faaltraject	131
10.3.3	Onderscheiden deelmechanismen	134
10.3.4	Reststerkte	135
10.3.5	Overzicht van het faaltraject piping bij kunstwerken	136
10.3.6	Beknopte modelbeschrijving van de te toetsen deelmechanismen behorende bij achter- of onderloopsheid van kunstwerken	137
10.4	Falen waterkering door gebrek aan sterkte van het kunstwerk	138
10.4.1	Fenomenologische beschrijving	139
10.4.2	Schematisch overzicht van het faaltraject	147
10.4.3	Beknopte modelbeschrijving van de te toetsen deelmechanismen behorende bij gebrek aan sterkte en stabiliteit.	149
10.4.4	Beoordelingen in het WT12017	151

10.5 Literatuur kunstwerken	152
11 Voorland	155
11.1 Inleiding	155
11.2 Erosie door golfafslag	157
11.2.1 Fenomenologische procesbeschrijving	157
11.2.2 Overzicht van het faaltraject erosie voorland	157
11.2.3 Beknopte modelbeschrijving voor het te toetsen mechanisme	158
11.3 Afschuiving voorland	158
11.3.1 Fenomenologische procesbeschrijving	158
11.3.2 Overzicht van het faaltraject afschuiven voorland	159
11.3.3 Beknopte modelbeschrijving voor het te toetsen mechanisme	160
11.4 Zettingsvloeiing	160
11.4.1 Fenomenologische procesbeschrijving	160
11.4.2 Overzicht van het faaltraject zettingsvloeiingen	163
11.4.3 Beknopte modelbeschrijving voor het te toetsen mechanisme	163
11.5 Literatuur voorland	164
Bijlage(n)	
Afkortingen	165
A Begrippen	A-1

1 Inleiding

1.1 Algemeen

Om het overstromingsrisico nu en in de toekomst te kunnen beheersen wordt er iedere twaalf jaar verslag gedaan over de algemene waterstaatkundige toestand van de primaire waterkeringen. De wijze waarop de waterkeringen worden beoordeeld staat in het Wettelijk Toetsinstrumentarium 2017.

Het Wettelijk Toets Instrumentarium 2017 (afgekort WTI 2017) is opgebouwd uit de volgende drie wettelijke onderdelen:

1. *Voorschrift Toetsen op Veiligheid, Algemeen deel* (VTV Algemeen deel). Dit deel geeft de belangrijkste kaders en definities, beschrijft het toetsproces en geeft de beoordelings- en rapportageverplichtingen.
2. *Voorschrift Toetsen op Veiligheid, Technisch deel* (VTV Technisch deel). Dit deel geeft de inhoudelijke uitwerking van alle voorkomende toetsporen.
3. *Hydraulische Randvoorwaarden, Technisch deel* (HR Technisch deel). Dit deel geeft de maatgevende hydraulische belastingen voor primaire keringen ten behoeve van de toetsing.

Daarnaast wordt voor het toetsproces software ter beschikking gesteld. Dit betreft software voor het uitvoeren van de Eenvoudige toets (toetslaag 1) en de Gedetailleerde toets (toetslaag 2).

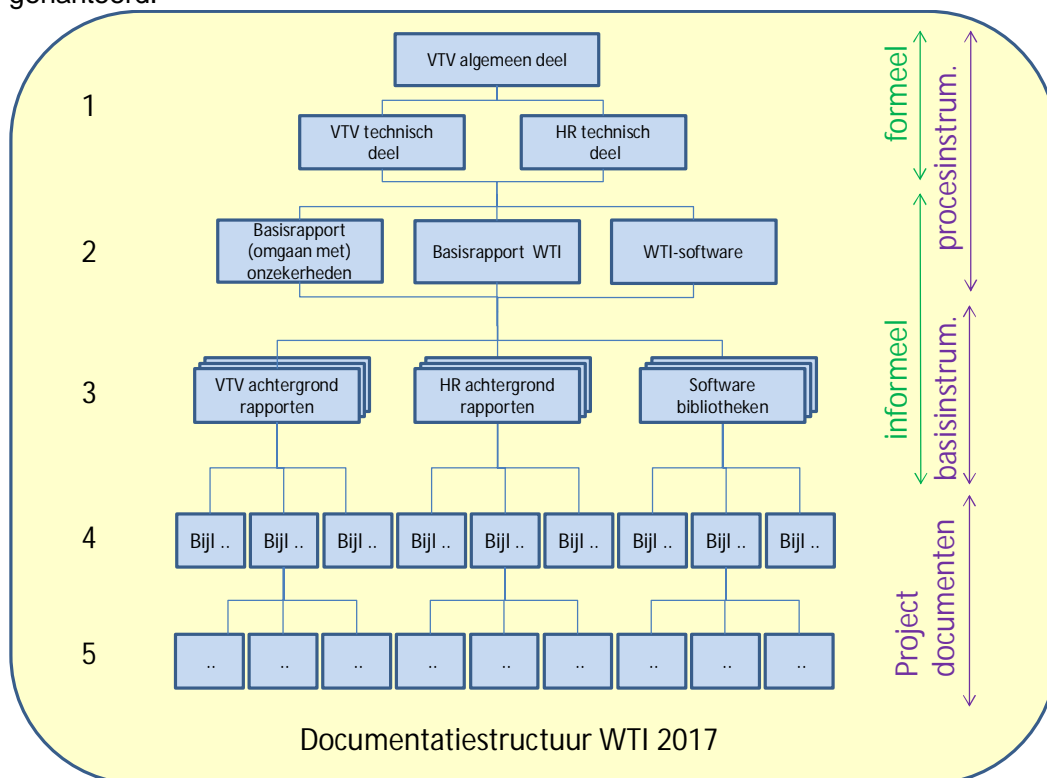
De achtergronden bij het VTV staan in verschillende rapportages:

- In het basisrapport bij het WTI 2017 worden de algemene uitgangspunten en consequenties van toepassing van het WTI beschreven. Het basisrapport is beschikbaar via de helpdesk water
- In achtergrondrapporten bij het VTV staan achtergronden bij en handreikingen voor de uitvoering van de toetsing: faalmechanismebescriptions (dit rapport), modelbeschrijvingen, schematiseringshandleidingen, en handvatten voor geavanceerde analyses in de toets op maat. De achtergrondrapporten zijn beschikbaar via de Helpdesk Water.
- Bijlagerapporten bevatten de onderzoeksrapportages met wetenschappelijke verantwoording. Deze documenten kunnen via de Helpdesk Water worden opgevraagd.

Dit document betreft de fenomenologische beschrijving van de faalmechanismen en maakt daarmee onderdeel uit van de achtergrondrapporten bij het VTV.

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 de faaldefinitie voor de verschillende faalmechanismen is. Doordat het totale proces tot falen van de waterkering inzichtelijk is gemaakt voor de verschillende faalmechanismen, wordt duidelijk welke processen van het faaltraject worden meegenomen in de Gedetailleerde toets: de processen tot aan de faaldefinitie. En welke processen in de toetsing *niet* worden meegewogen in de beoordeling van het faalmechanisme: de processen *na* de faaldefinitie tot aan het moment waarop de waterkering daadwerkelijk faalt.

Eén van de te volgen strategieën voor de Toets op maat is het kwantificeren van de sterkte van één of meer van de processen na faaldefinitie die bij de Gedetailleerde toets is gehanteerd.



Figuur 1.1 Documentatiestructuur WTI 2017

Alhoewel dit document als achtergrond rapport bij het VTV is samengesteld, geven de beschrijvingen inzicht in de verschillende mechanismen volgens welke waterkeringen kunnen worden aangetast. Deze inzichten kunnen evenzeer behulpzaam zijn als achtergrondkennis bij inspecties, het uitoefenen van de zorgplicht en het ontwerpen.

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 die van toepassing zijn binnen de diverse toetssporen van het Wettelijk Toets Instrumentarium (WTI).

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 dit rapport wordt voor de verschillende faalmechanismen ook de faaldefinitie gegeven zoals die binnen WTI worden gehanteerd.

In Tabel 1.1 is het overzicht uit het VTV weergegeven van de toetsporen welke per type waterkering worden beoordeeld. Een toetspoot kan meerdere faalmechanismen bevatten.

Faalmechanismen	Code	Hoofdstuk VTV-TD	Hoofdstuk FM
Dijken en dammen			
Macro-instabiliteit binnenwaarts	STBI	3	2
Macro-instabiliteit buitenwaarts	STBU	4	
Opbarsten, heave en piping	STPH	5	4
Micro-instabiliteit	STMI	6	[4]
Erosie dijklichaam door schade aan bekledingen			
Asfaltbekleding Golfklappen	AGK	7	6.3
Asfaltbekleding Wateroverdrukken	AWO	8	6.4
Grasbekleding Erosie buitentalud	GEBU	9	7.2
Grasbekleding Afschuiven buitentalud	GABU	10	7.3
Grasbekleding erosie kruin en binnentalud	GEKB	11	7.4
Grasbekleding afschuiven binnentalud	GABI	12	7.5
Stabiliteit bekleding steenzetting	ZST	13	8
Toplaaginstabiliteit onder golfaanval ZTG			
Toplaaginstabiliteit onder langsstroming ZTS			
Afschuiving ZAF			
Materiaaltransport vanuit de granulaire laag ZMG			
Erosie onderlaag ZEO			
Materiaaltransport vanuit de ondergrond ZMO			
Duinwaterkering			
Duinafslag	DA	14	9
Kunstwerken			
Hoogte kunstwerken	HTKW	15	10.1
Betrouwbaarheid sluiting	BSKW	16	10.2
Piping	PKW	17	10.3
Sterkte en stabiliteit puntconstructies	STKWp	18	10.4
Sterkte en stabiliteit langsconstructies	STKWI	19	10.4
Voorland			11
Golfafslag	VLGA	20	11.2
Afschuiving	VLAF	21	11.3
Zettingsvloeiing	VLZV	22	11.4
Havendammen	HAV	23	
Niet-waterkerende objecten		24	
Bebouwing	NWObe		
Begroeiing	NWObo		
Kabels en leidingen	NWOkI		
Overige constructies	NWOoc		
Technische Innovatie	INN	25	

Tabel 1.1 Toetsporen per type waterkering

Deze tabel noemt de beoordeling van innovaties niet, die beoordeling wordt toegepast als een (onderdeel van een) waterkering niet volgens de toetsporen in bovenstaande tabel kan worden beoordeeld.

In vergelijking met het VTV2006 ontbreken verschillende mechanismen. Die mechanismen vallen onder de zorgplicht. Zo is winderosie bij duinwaterkeringen niet meer opgenomen als toetspoot in het WTI2017. Bij normaal goed beheer van de landzijde van het duin (begroeiing en geen kale plekken) heeft winderosie een verwaarloosbaar kleine invloed op de beoordeling van de sterkte van het duin.

In deze rapportage is tekens een hoofdstuk gereserveerd per mechanisme of (onder)deel van de waterkering waarvoor een of meer beoordelingssporen in het VTV technisch deel zijn opgenomen. Daarbij is dezelfde volgorde aangehouden als in het VTV. Het gaat vooral om beoordelingssporen waarvoor er sinds het opstellen van het (concept) WTI2011 nieuwe ontwikkelingen zijn geweest. Zaken die volgens het VTV wèl moeten worden beoordeeld, maar om voorgaande reden niet terugkomen in deze rapportage betreffen:

- Havendammen (HAV).
- Niet waterkerende objecten (NWO).
- Innovatie (INN).

In dit rapport is een begrippenlijst opgenomen, die een ruime selectie bevat uit de algemene begrippenlijst die in het kader van het WTI2017 is opgesteld. De literatuur waar in deze rapportage naar wordt verwezen is omwille van de overzichtelijkheid per hoofdstuk in een laatste paragraaf opgenomen en vermeldt de specifieke achtergronddocumenten.

1.4 Definities

In deze rapportage zijn een aantal begrippen gebruikt die vrij essentieel zijn voor de beschrijving van de faalmechanismen. In deze paragraaf worden deze begrippen nader toegelicht.

In deze rapportage is onderscheid gemaakt tussen *bezwijken* en *falen*, en de grens tussen sterkte en reststerkte wordt voor de toetsing gegeven door de *faaldefinitie*.

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

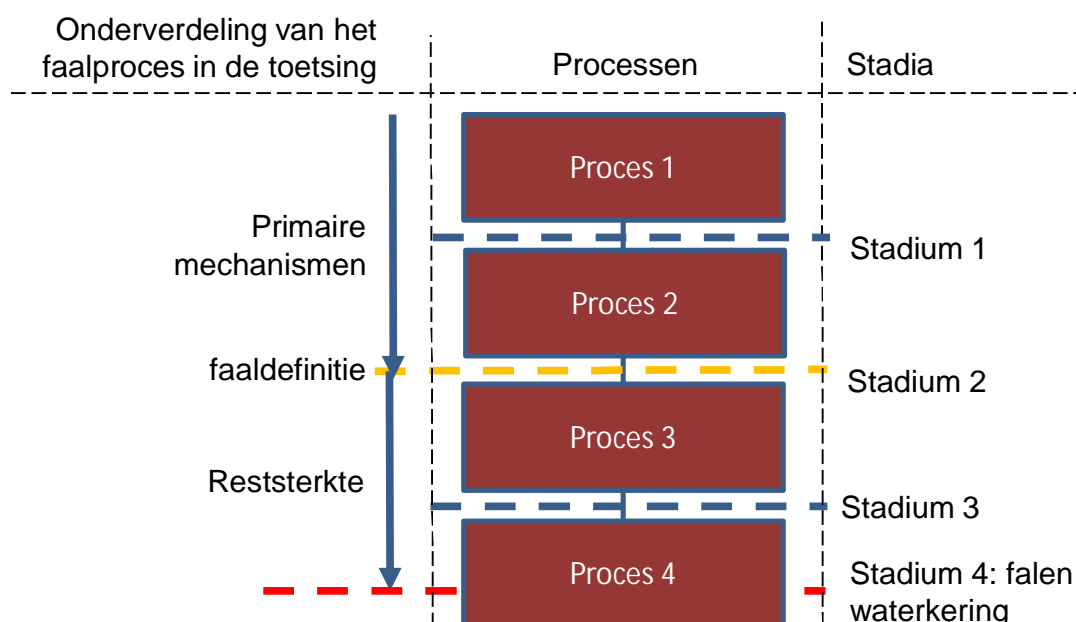
daarmee ook moet worden gesteld dat het falen van het keermiddel samengaat met het falen van de waterkering als geheel.

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.

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 1.2. 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 1.2 Beschrijvingswijze van het traject tot falen van de waterkering voor een beoordelingsspoor

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 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 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 primaire 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 *deelmechanisme*. Een deelmechanisme is een onderscheiden deel van het traject 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.

Het woord *faaldefinitie* wordt in dit document gebruikt voor de toestand die in de toetsing volgens een specifiek beoordelingsspoor wordt aangemerkt als het moment van falen van de waterkering. De grens tussen sterkte en reststerkte wordt voor die toetsing gegeven door de faaldefinitie, de reststerkte wordt in die toetsing dus verwaarloosd. Als bij de faaldefinitie niet expliciet een toetslaag is genoemd, dan gaat het altijd om de faaldefinitie volgens de Gedetailleerde toets.

In de Toets op maat kan ervoor worden gekozen om de faaldefinitie verderop te leggen in het faaltraject. De sterkte die kan worden ontleend aan een proces dat in de Gedetailleerde toets is verwaarloosd, moet dan worden gekwantificeerd.

Het woord "reststerkte" wordt in dit document gebruikt voor de sterkte die kan worden ontleend aan het deel van het faaltraject dat na de toestand beschreven door de faaldefinitie moet worden doorlopen alvorens de waterkering daadwerkelijk faalt. Het kwantificeren van de reststerkte kan in de Toets op maat één van de strategieën zijn om te komen tot een oordeel Voldoet.

De wijze waarop het woord reststerkte in dit rapport wordt gebruikt, wijkt af van het gebruik in sommige onderzoeksrapporten waar het woord reststerkte soms wordt gebruikt voor de sterkte 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 heeft dan nog de nodige sterkte: de onderlagen moeten eerst eroderen voordat het dijklichaam direct bloot aan erosie. De erosie-weerstand van die onderlagen kan tegenwoordig worden gekwantificeerd en deze sterkte 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 vervolgmechanisme 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

gereviewd door Rijkswaterstaat-WVL, waarna van deze deelrapportages een consistent achtergrondrapport bij het WTI 2017 is gemaakt.

Inhoudelijke bijdragen zijn geleverd door:

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

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

Van de zijde van RWS is inbreng geleverd door:

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

De projectleiding bij RWS-WVL was in handen van R. Slomp.

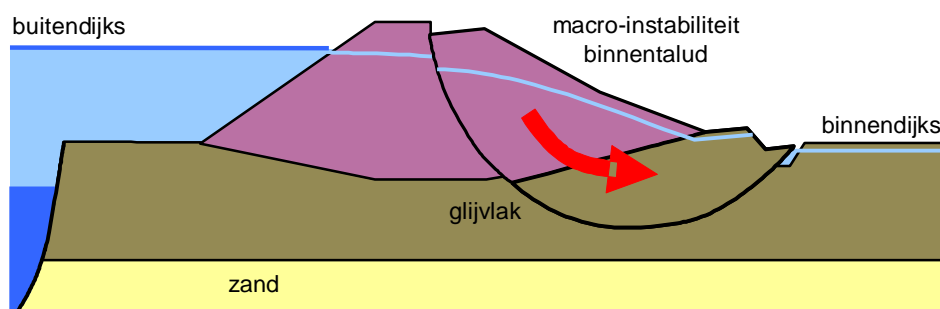
2 Macrostabiteit binnenwaarts

2.1 Globale beschrijving van macrostabiteit

De macrostabiteit binnenwaarts moet worden beschouwd bij het ontwerpen of toetsen van de waterkerende capaciteit van een dijk. Dat gebeurt bij de toetsing (WTI2017) in het beoordelingsspoor macrostabiteit binnenwaarts (STBI). Het faalmechanisme wordt aangeduid als macro-instabiliteit.

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) komen aan de orde onder 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. Dit evenwicht bestaat in een glijvlakanalyse uit een aandrijvend moment, bij een cirkelvormig verondersteld schuifvlak is dit het gewicht maal de arm van het grondlichaam links van het middelpunt van de cirkel, een tegenwerkend moment, het gewicht maal de arm van het grondlichaam rechts van het middelpunt, en de schuifspanningen langs het schuifvlak (zie Figuur 2.1). 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.



Figuur 2.1 Macro-instabiliteit binnenwaarts van een dijktalud

In deze faalmechanismebesrijving wordt alleen gekeken naar het verlies van evenwicht van een binnentalud als gevolg van een hoge 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 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.

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.

Deze paragraaf geeft een fenomenologische procesbeschrijving van het gehele faaltraject dat start met het initieel mechanisme macro-instabiliteit binnenwaarts. In paragraaf 2.3 is een overzicht van het faaltraject gegeven. Voor het te toetsen mechanisme uit dat faaltraject geeft paragraaf 2.4 een beknopte beschrijving.

Voor het opstellen van deze faalmechanismebeschrijving zijn grote delen van de tekst overgenomen uit het rapport Dijkdoorbraakprocessen [3]. 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 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 getoetst volgens het toetschema?
- Bijdrage van reststerkte aan het faaltraject.

2.2.2 Initiatie

Bij macro-instabiliteit bij dijken is niet zozeer sprake van een belastingverandering door hoogwater, maar van een afname van de mobiliseerbare schuifsterkte van de grond door hoogwater. Het hoogwater veroorzaakt een toename van waterspanningen 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. Enige 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 een 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 is, zal een instabiliteit optreden. Wanneer de mobiliseerbare schuifsterkte 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. Kleine geïsoleerde scheuren kunnen ontstaan door uitdrogen van de toplaag. Deze scheuren leiden niet tot een afschuiving. Grotere scheuren evenwijdig aan de kruin duiden op de ontwikkeling van een mogelijk afschuifvlak.

Het ontstaan van een scheur 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.

Overigens duiden niet alle scheuren op een beginnende afschuiving. Ook (extreme) droogte kan tot scheuren in kleilagen op de dijk leiden.

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 binnendijs (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 gecreëerd. 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 kadeverschuiving 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 falen van de waterkerende functie alleen ontstaan wanneer na de afschuiving vervolgmechanismen optreden.

De faaldefinitie voor het toetsspoor Macrostabieleit binnenwaarts betreft het optreden van een afschuiving van het binnentalud van de dijk. De beoordeling betreft 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 vervolgmechanismen, die kunnen optreden nadat een afschuiving is ontstaan, worden niet beoordeeld in het toetsspoor Macrostabieleit. De mogelijke vervolgmechanismen vormen dus de eventueel aanwezige reststerkte 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 geen reststerkte heeft en 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 dijk heeft veel reststerkte.
- 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 geen vervolgmecanismen 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' vervolgafschuiving 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 vervolgafschuiving toe. Afhankelijk van de plaats van het intredepunt van de vervolgafschuiving wordt de kruinhoogte door een tweede afschuiving aangetast. Indien de kruinhoogte door vervolgafschuiving(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

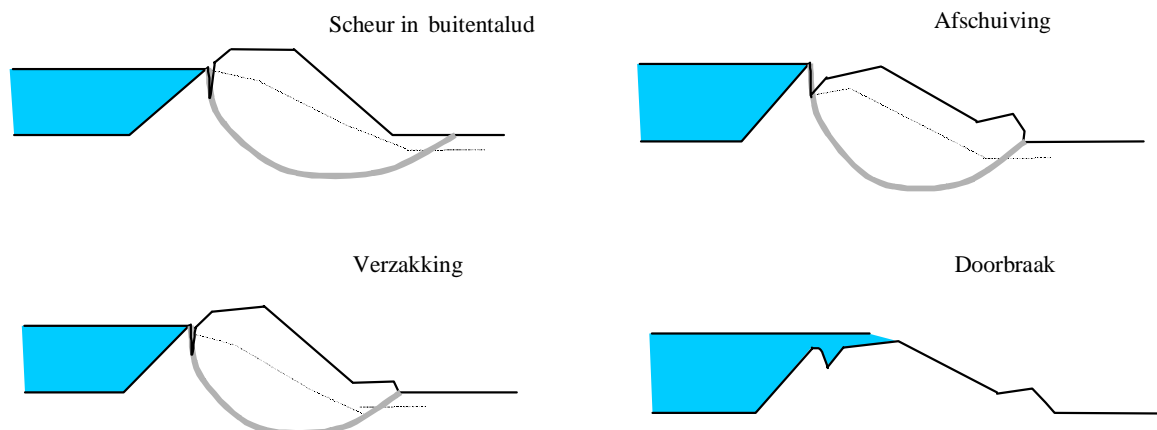
Na een afschuiving is de bekleding gedeeltelijk van de dijk afgeschoven. Indien overslag of overloop optreedt, heeft het overslaande water vrij spel met het kernmateriaal. Indien het kernmateriaal uit zand bestaat, is weinig water nodig om de dijk verder aan te tasten. Erosie van een kleikern zal, alhoewel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

2.2.9 Mogelijk verloop van het faaltraject na een afschuiving

De locatie van het intredepunt (buitentalud, kruin of binnentalud) van een afschuiving 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 afschuiving van het binnentalud, waarbij het schuifvlak het buitentalud van de dijk snijdt resulteren in een verlaging van de kruin (zie Figuur 2.2). 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.



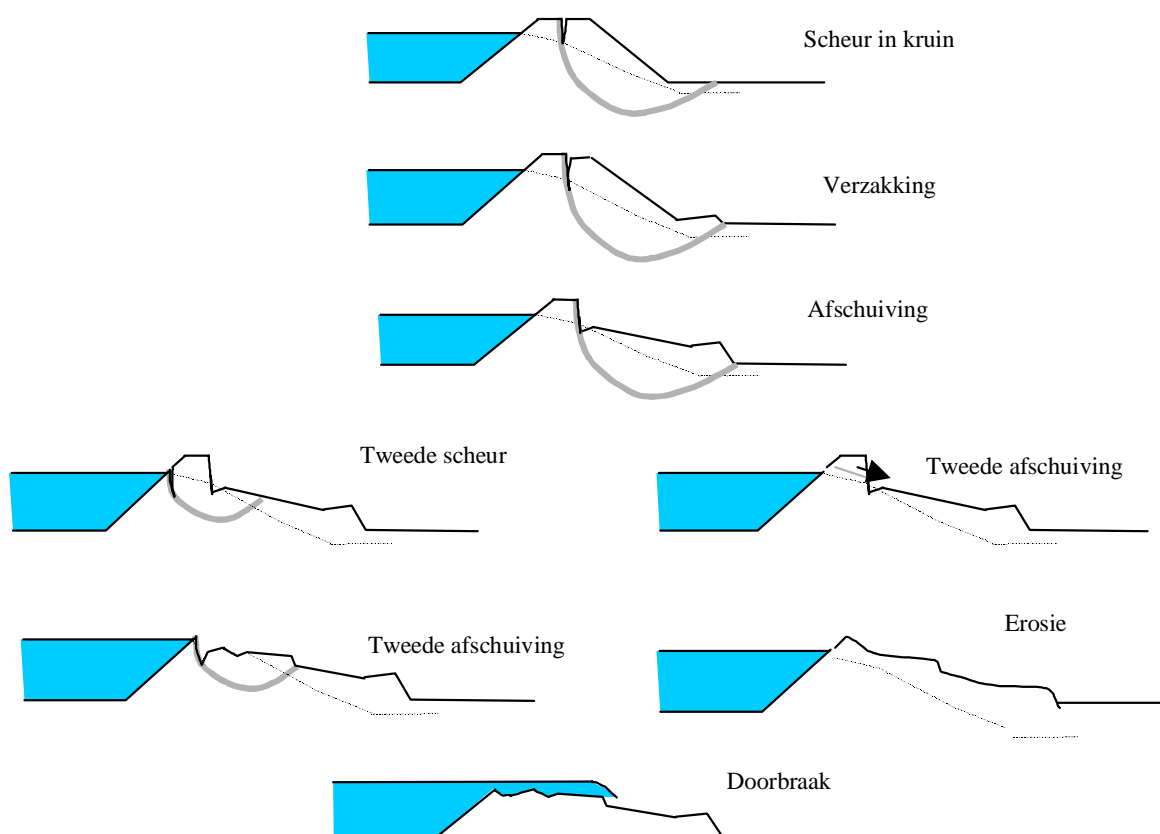
Figuur 2.2 Mogelijk faaltraject bij intredepunt schuifvlak in het buitentalud

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 vervolgmecanismen 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 wordt dat door de eerste afschuiving de erosiebestendigheid van het binnentalud sterk is 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 vervolgmecanismen 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 deel van het dijklichaam intact: er is sprake van bezwijken van het dijklichaam zonder dat de waterkering faalt. Door eventuele vervolgmecanismen kan de dijk wel doorbreken (zie Figuur 2.3). 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.



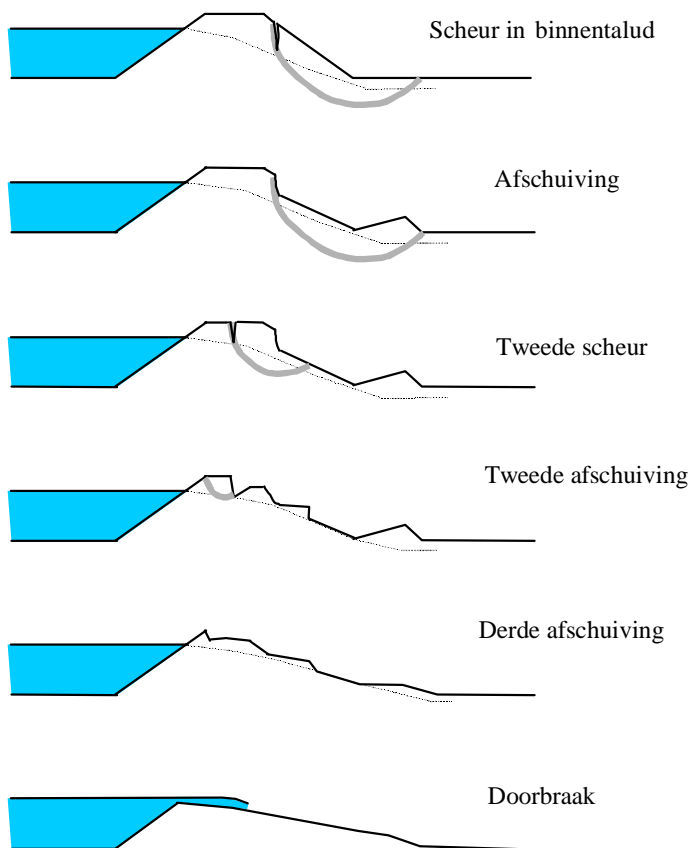
Figuur 2.3 Mogelijk faaltraject bij intredepunt schuifvlak in de kruin

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. 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 2.4). 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 2.4 Mogelijk faaltraject bij intredepunt schuifvlak in het binnentalud

Over het intredepunt van het primaire schuifvlak

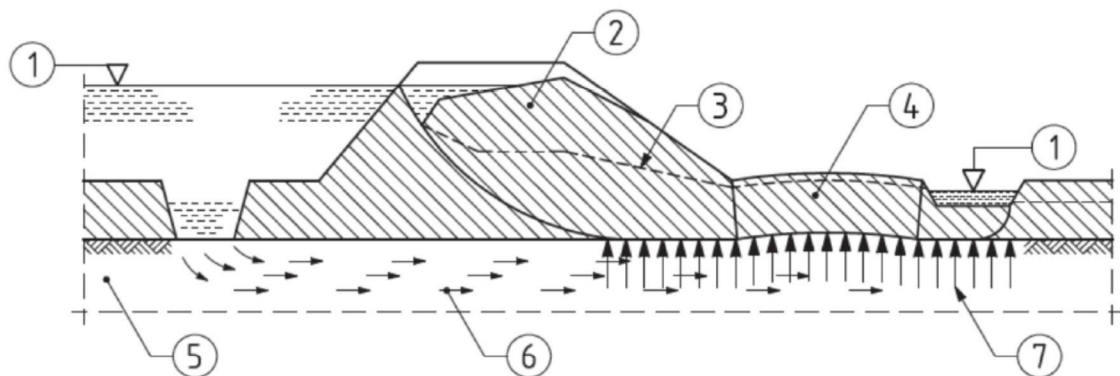
De plaats van het intredepunt hangt, naast de geometrie van de dijk, af van de waterspanningsopbouw en de dikte van het slappe lagen pakket. Op basis van ervaring kan het volgende worden afgeleid: Bij een dun slappe lagen pakket zal het schuifvlak niet zo diep gaan en is de kans groot dat deze daardoor 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, dalen de schuifspanningen 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 plaats gevonden.

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 2.5 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 schuifweerstand op dit grensvlak afneemt. 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 grote verplaatsingen van de binnentoe van de dijk dat er in de actieve zone van de dijk sprake is van een afschuiving.

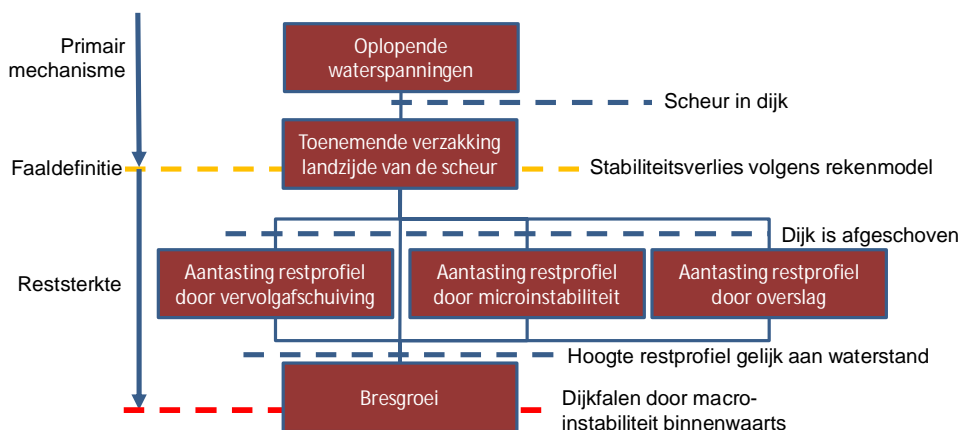
Bij oplopende waterspanningen onder de dijk kan de dijk dus afschuiven doordat er geen krachteenwicht heerst of door te grote vervormingen in het achterland. In het eerste geval ontstaat een volledig doorlopende glijvlak naar het maaiveld achter de dijk, waarbij met een berekening het evenwicht langs 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 macro-instabiliteit binnenwaarts

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

In Figuur 2.6 is falen als gevolg van het mechanisme binnenwaartse macro-instabiliteit verder uitgewerkt.



Figuur 2.6 Gebeurtenissen leidend tot falen van de dijk na macro-instabiliteit, waarbij verschillende vervolgmecanismen mogelijk zijn

De volgende fasen kunnen bij het faaltraject van een dijk worden onderscheiden (zie Figuur 2.6):

- Verhoging waterspanningen. 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. Dit mechanisme wordt aan de hand van een evenwichtsbeschouwing beoordeeld in het toetsspoor Macrostabieleit. Een afschuiving kan tot direct falen van de waterkerende functie van een dijk leiden als de kruin afschuift tot onder het niveau van de buitenwaterstand. Maar meestal zullen vervolgmecanismen nodig zijn om na een afschuiving falen van de waterkerende functie te bereiken.
- De dijk is afgeschoven. Een gedeelte van het grondmassief is verplaatst en weer tot stilstand gekomen.
- Eventueel vervolgmecanisme (overslag, micro-instabiliteit of tweede afschuiving). Als de waterkering niet direct faalt door de afschuiving 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.

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

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 [1].

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.

2.4 Beknopte modelbeschrijving voor het te toetsen mechanisme

Deze paragraaf geeft een beschrijving van het mechanicamodel van het te toetsen mechanisme.

De toets van het faalmechanisme macro-instabiliteit is een controle van de weerstand tegen afschuiven van een grondlichaam. In de Eenvoudige toets (toetslaag 1) vindt deze

beoordeling plaats op basis van een geometrische toets, waarmee wordt nagegaan of het profiel van de waterkering voldoet aan veilige afmetingen. In de Gedetailleerde toets (toetslaag 2) wordt de beoordeling van de macrostabiliteit uitgevoerd met een glijvlakanalyse.

Een controle op afschuiven van een grondlichaam met een glijvlakmodel is een analyse van de verhouding van de mobiliseerbare schuifsterkte van de grond ten opzichte van de aandrijvende kracht van de potentieel afschuivende grondmoot. De stabiliteitsfactor of de faalkans zijn een maat of de stabiliteit van een grondlichaam voldoet aan de gestelde eisen.

Cirkelvormig glijvlak of gedeeltelijk horizontaal glijvlak?

Instabiliteit van een talud van de waterkering kan ontstaan door verhoging van het freatisch vlak in de dijk en de verhoging van de stijghoogte in een watervoerende zandlaag (met andere woorden: de waterspanningen in de dijk en de ondergrond) bij maatgevende omstandigheden. In het gehanteerde rekenmodel leidt deze toename van de waterspanningen tot een afname van de sterkte. Door de toename van de waterspanningen neemt namelijk de effectieve spanning in de grond af. En daarmee neemt ook de mobiliseerbare schuifsterkte van de grond af. Het evenwicht tussen de mobiliseerbare schuifsterkte van de grond en de aandrijvende kracht van de potentieel afschuivende grondmoot kan verstoord raken door deze afname van de mobiliseerbare schuifsterkte. De afname van de effectieve spanning en de mobiliseerbare schuifsterkte kan dus leiden tot deformatie, scheurvorming en afschuiven van een dijktalud.

Door de toename van de stijghoogte in een watervoerende zandlaag kan ook de slecht doorlatende deklaag aan de binnenzijde van een dijk worden opgedrukt als de opwaartse waterdruk in de watervoerende zandlaag gelijk wordt aan het gewicht per m^2 van de deklaag. Bij opdrijven van de deklaag kan geen schuifspanning worden overgedragen van de deklaag naar de onderliggende zandlaag. Het opdrijven kan ook resulteren in opbarsten van de deklaag in het achterland. Bij opbarsten gaat de structuur (of samenhang) van de deklaag verloren en neemt de mobiliseerbare schuifsterkte in de deklaag af. Door opdrijven en opbarsten verliest de waterkering de steun aan de binnenzijde van de dijk (passieve zone). Ook hierdoor neemt de stabiliteit van de waterkering af. Situaties waarbij de slecht doorlatende deklaag aan de binnenzijde van de dijk (bijna) wordt opgedrukt, worden niet goed beschreven met cirkelvormige glijvlakken, maar moeten worden berekend met een het glijvlak drukstaaf-model (LiftVan).

Gedraineerde of ongedraineerde schuifsterkte?

Een belangrijke overweging bij het uitvoeren van de toetsing van macrostabiliteit is de afweging tussen een gedraineerde of ongedraineerde analyse.

De deformatie van de verzadigde grond die bij afschuiven optreedt, kan wateroverspanningen of wateronderspanningen genereren. De vervormingssnelheid bepaalt of die waterspanningen kunnen dissiperen uit de slecht doorlatende grondlagen. Zo wordt onderscheid gemaakt in een snelle of langzame afschuiving van een dijktalud. Langzaam is hier in de orde van weken, maanden of zelfs jaren. Wanneer de deformatie langzaam gaat, zullen de waterspanningen die door de deformatie van de grond worden opgewekt dissiperen. De hydrodynamische periode is dan kleiner dan de belastingsduur. Wanneer een afschuiving zich snel voltrekt, is de afschuiving binnen enkele uren of een dag voorbij. Binnen een dergelijk tijdsbestek zullen waterspanningen in slecht doorlatende lagen niet dissiperen. Voor een snel optredende afschuiving moet in slecht doorlatende grondlagen dus worden gerekend met ongedraineerd grondgedrag. De waterspanningen die door de vervormingen worden gegenereerd beïnvloeden dus de mobiliseerbare schuifsterkte in de slecht doorlatende grondlagen.

Voor het toetsen van primaire waterkeringen zijn de snel optredende afschuivingen maatgevend. Ongedraineerde stabiliteitsanalyses zijn daarmee noodzakelijk voor slecht waterdoorlatende lagen zoals klei en veen. Bij het optreden van een afschuiving in waterkeringen zal in de eventueel aanwezige zandlagen geen ongedraineerd gedrag optreden. In een ongedraineerde stabiliteitsanalyse zullen voor de goed doorlatende lagen, zoals zandlagen, daarom gedraineerde sterkte-eigenschappen worden toegepast.

Dat neemt echter niet weg dat door hoogwater de waterspanning in het zand kunnen stijgen. De effectieve spanning neemt daardoor dan af. In het zand neemt de mobiliseerbare schuifsterkte in dat geval dus om een andere reden af naarmate de buitenwaterstand stijgt.

Bij het ongedraineerd gedrag van de slecht doorlatende lagen speelt de mate van overconsolidatie van de grond een rol. Deze bepaalt de grootte van de wateroverspanningen of wateronderspanningen die door de grond worden gegenereerd als gevolg van het ongedraineerd afschuiven. Aangezien de dichtheid samenhangt met de mate van overconsolidatie, hangt bij ongedraineerd gedrag de mobiliseerbare schuifsterkte dan ook af van de dichtheid.

Te toetsen mechanismen

Bij het toetsen van de macrostabiliteit wordt geen onderscheid gemaakt tussen deformatie, scheurvorming of afschuiving van een waterkering.

De beoordeling van de macrostabiliteit in toetslaag 2a is alleen een controle of de stabiliteit met betrekking tot afschuiven voldoet aan de gestelde eis. Wanneer de berekende faalkans lager is dan de eis, dan mag men ervan uitgaan dat geen deformatie, scheurvorming of afschuiving zal optreden. Wanneer de berekende faalkans hoger is dan de eis, dan moet men bij hoogwater alert zijn op deformatie van de waterkering. Deformatie kan dan een eerste signaal zijn dat scheurvorming of een afschuiving zullen optreden.

De beoordeling van de macrostabiliteit volgens toetslaag 2b, de volledig probabilistische toetsing per dijktraject, is een controle of de berekende kans op afschuiven, samen met die van de overige faalmechanismen, voldoet aan de gestelde trajecteis.

Bij de beoordeling van de macrostabiliteit worden alleen schuifvlakken beschouwd die tot falen van de waterkering kunnen leiden. Kleine schuifvlakken die niet tot falen van de waterkeringen kunnen leiden worden niet beschouwd.

Bij de toetsing van de macrostabiliteit volgens toetslaag 2, vindt geen beoordeling van de reststerkte na een eerste afschuiving plaats.

2.5 Literatuur macrostabiliteit

- [1] *Tijdsafhankelijke stabiliteit van dijken*. GeoDelft rapport CO-347950/13. Delft, november 1994.
- [2] *Theorieontwikkeling rondom opdrijven*. GeoDelft rapport SE-52029/2, versie 2, definitief. Delft, februari 2000.
- [3] *Dijkdoorbraakprocessen*. E.O.F. Calle, GeoDelft rapport kenmerk 720201/39. Delft, maart 2002
- [4] *Schematiseringshandleiding Macrostabiliteit*. J. van Deen, A. van Duinen. Deltares rapport 1220083-008-GEO-0003, Versie 3. Delft, december 2015.
- [5] *Functional design semiprobabilistic assessments Ringtoets*. R.B. Jongejan, W.J. Klerk. Deltares rapport 1209431-008-ZWS-0009. Delft, May 2015

- [6] *Derivation of the semi-probabilistic safety assessment rule for inner slope stability, WTI 2017: Cluster C, macrostability.* W. Kanning, M. Huber, M. van der Krogt, T. Schweckendiek, A.C. Martins Teixeira. Deltares report 1220080-003-ZWS-0019. Delft, December 2015

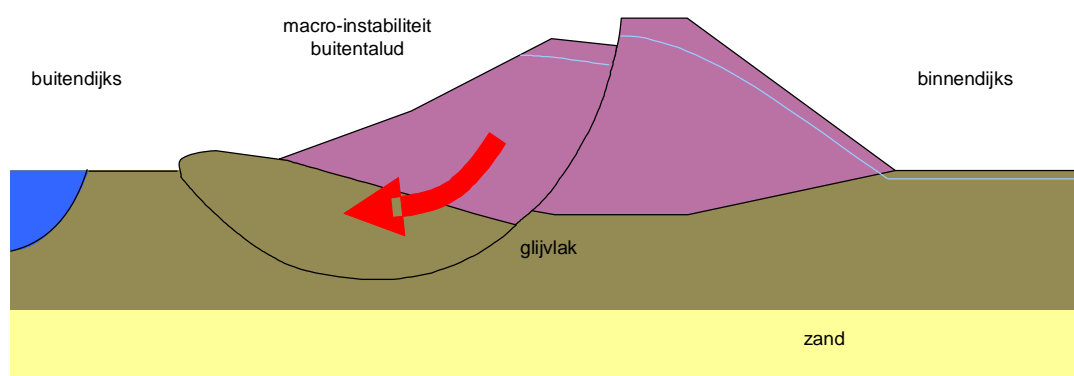
3 Macrostabieliteit buitenwaarts

3.1 Globale beschrijving buitenwaartse macrostabieliteit

Bij de beoordeling van de stabiliteit van dijken gaat in de regel de meeste aandacht uit naar de Macrostabieliteit binnenwaarts (STBI). Bij binnenwaartse macro-instabiliteit treedt afschuiven op van grote delen van de dijk aan de landzijde. Daarnaast kan onder omstandigheden ook macro-instabiliteit optreden aan de rivier- of zeezijde van de dijk: Macrostabieliteit buitenwaarts (STBU), het onderwerp van dit hoofdstuk. Omdat dit mechanisme in algemeen optreedt ná 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. Macrostabieliteit buitenwaarts is dan ook gerangschikt onder de indirecte mechanismen.

Er is sprake van macro-instabiliteit als grote delen van een grondmassief afschuiven langs rechte of gebogen schuifvlakken. De oorzaak van macro-instabiliteit is een verlies van evenwicht van een grondmassa. Dit evenwicht bestaat in een glijvlakanalyse uit een aandrijvend moment, bij een cirkelvormig verondersteld schuifvlak is dit het gewicht maal de arm van het grondlichaam rechts van het middelpunt van de cirkel, en een tegenwerkend moment, het gewicht maal de arm van het grondlichaam links van het middelpunt, en de schuifspanningen langs het schuifvlak (zie Figuur 3.1).

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.



Figuur 3.1 Macro-instabiliteit buitenwaarts

Voor het opstellen van deze faalmechanismebeschrjving zijn 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.

3.2 Gedetailleerde beschrijving macro-instabiliteit buitenwaarts

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 macro-stabiliteit buitenwaarts 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 '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 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.

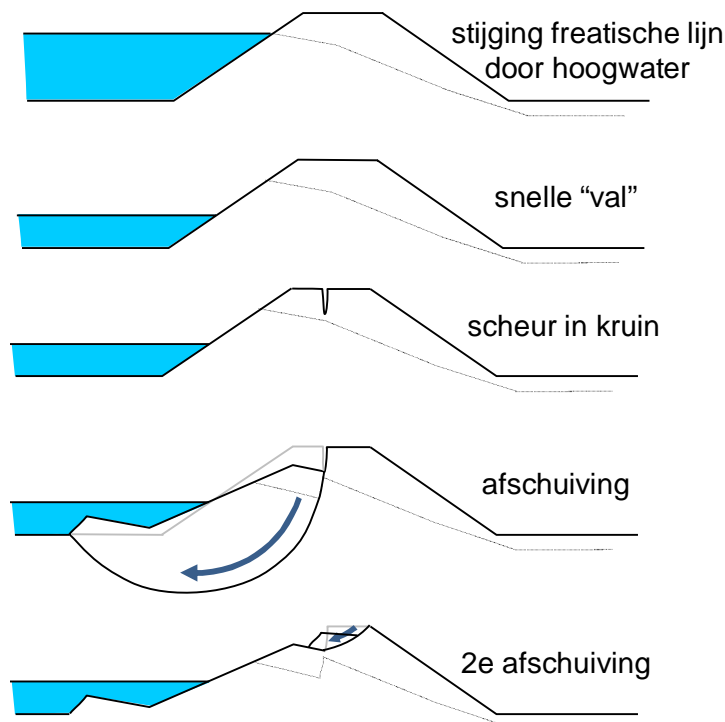
Een afschuiving van het buitentalud kan veel schade opleveren, maar is meestal niet direct gevaarlijk voor de waterkerende functie; het hoogwater is immers voorbij of niet aan de orde. Bijna altijd zal er enige tijd zijn om de schade te herstellen voordat zich een (nieuwe) hoogwatergolf zal voordoen [2].

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: buitenwaartse erosie en het optreden van vervolg afschuivingen. Ook is na een buitenwaartse afschuiving de beschermende taludbekleding beschadigd. De kwetsbare dijk kern 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 relatief gemakkelijk plaatsvinden als de waterstand weer hoog wordt.

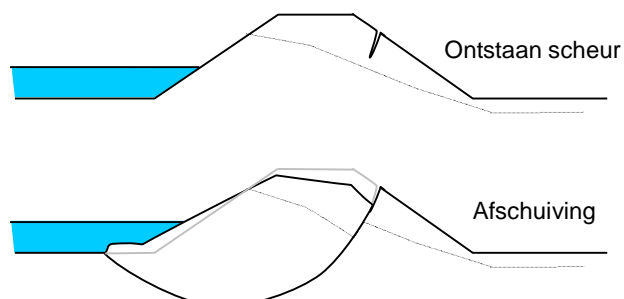
Na het optreden van de eerste afschuiving ontstaat bij het intredepunt van de glijcirkel een steil talud dat voor de tweede keer kan afschuiven. De kans op het optreden van een tweede afschuiving is bij een buitenwaartse afschuiving kleiner dan bij de binnenwaartse afschuiving. Bij een binnenwaartse 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 3.2 Buitenwaartse afschuiving met intredepunt in de kruin

Als het intredepunt in het binnentalud ligt, 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.



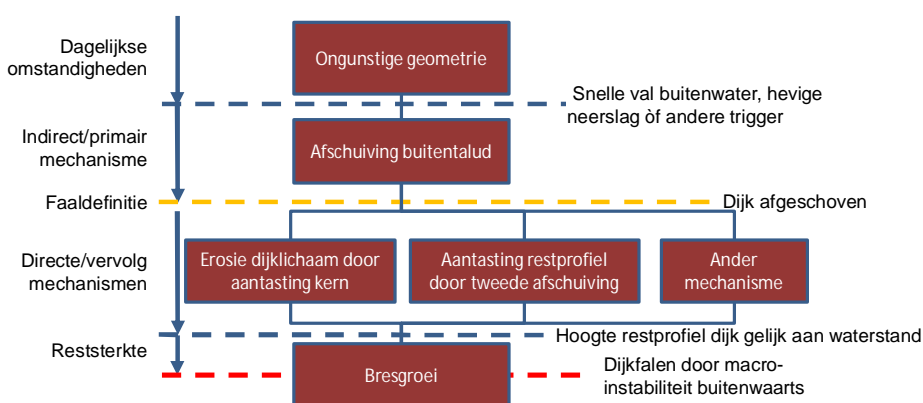
Figuur 3.3 Buitenwaartse afschuiving met intredepunt in het binnentalud

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 buitenwaartse erosie verder worden aangetast.

3.3 Overzicht van het faaltraject macro-instabiliteit buitenwaarts

De fenomenologische beschrijving van het mechanisme macro-instabiliteit buitenwaarts, dat uiteindelijk kan leiden tot een overstroming, is in Figuur 3.4 schematisch weergegeven. Het inleidend mechanisme voor de afschuiving kan zijn een verhoogd freatisch 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 3.4 Gebeurtenissen leidend tot falen van de dijk door macro-instabiliteit buitenwaarts

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.
- 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 lage schuifspanningen en het verdwijnen van de stabiliserende werking van de hoge buitenwaterstand.
- Verzakken van het maaiveld aan de buitendijkse zijde van de scheur: Het maaiveld aan de buitendijkse zijde van de scheur verzakt. 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 (buitenwaartse erosie, tweede afschuiving): Als de waterkering niet heeft gefaald kunnen vervolgmecanismen optreden waardoor het dijklichaam alsnog faalt.
- Kruinverlaging.

- Bresgroei: na verloop van tijd ontstaat er een gat in de dijk.

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.

3.4 Beknopte modelbeschrijving voor het te toetsen mechanisme

De beoordeling van het faalmechanisme instabiliteit buitenwaarts betreft een controle van de weerstand tegen afschuiven van een grondlichaam [3]. In de Eenvoudige toets (toetslaag 1) vindt deze beoordeling plaats op basis van een geometrische toets, waarin wordt nagegaan of het profiel van de dijk en de breedte van het voorland voldoen aan veilige afmetingen.

In de Gedetailleerde toets (toetslaag 2) wordt de beoordeling van de macrostabiliteit buitenwaarts uitgevoerd met een glijvlakanalyse op basis van ongedraineerde schuifsterkteparameters (met CSSM) zoals ook bij macrostabiliteit binnenwaarts (STBI) (hoofdstuk 2). Daarbij wordt de waterspanning veiligheidshalve op het niveau verondersteld dat optreedt bij de maximale buitenwaterstand. De criteria voor "snelle val" zijn locatie-afhankelijk (bovenrivieren, benedenrivieren, IJssel/Vecht delta) en zijn uitgewerkt in het TR Ontwerpbelastingen Rivierengebied [4].

3.5 Literatuur macrostabiliteit buitenwaarts

- [1] *Dijkdoorbraakprocessen*. E.O.F. Calle, GeoDelft rapport kenmerk 720201/39. Delft, maart 2002.
- [2] *Druk op de dijken 1995, de toestand van de rivierdijken tijdens het hoogwater van januari-februari 1995*, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, augustus 1995.
- [3] *Schematiseringshandleiding Macrostabiliteit*. J. van Deen, A. van Duinen. Deltares rapport 1220083-008-GEO-0003, Versie 05. Delft, december 2015.
- [4] *Technisch Rapport Ontwerpbelastingen voor het rivierengebied*, Ministerie van Verkeer en Waterstaat / ENW, juli 2007.

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 piping (STPH).

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 [4].

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 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 μm . 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 microstabiliteit, 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 hier terugschrijdende interne erosie aangeduid als piping.

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 uit 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 grondwaterstroming onder de dijk kan ontstaan. 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, 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 het watervoerende pakket. 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.

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.

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 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, van 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 waterstandsverlooplijnen beschreven. Als de reststerkte, d.i. de nog aanwezige sterkte na beperkte onderloopsheid van de dijk volgens het rekenmodel tot aan falen van de dijk (verlies van waterkerende functie) groter is dan de belastingduur, dan bezwijkt de dijk niet. Door de variërende waterstand kan een dijk gedurende een storm meerdere malen worden belast.

Bij rivierdijken treedt in het algemeen één langdurig hoogwater op met 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 mechanismen 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 faaldefinitie en de daarna nog voorhanden reststerkte. Pas als er ook geen reststerkte meer aanwezig is, zal de waterkering daadwerkelijk falen. De nog voorhanden reststerkte, veelal gekwantificeerd met de tijd tot falen, is vaak niet eenduidig te kwantificeren. Reststerkte wordt daarom voor het toetsen van het faalmechanisme piping 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

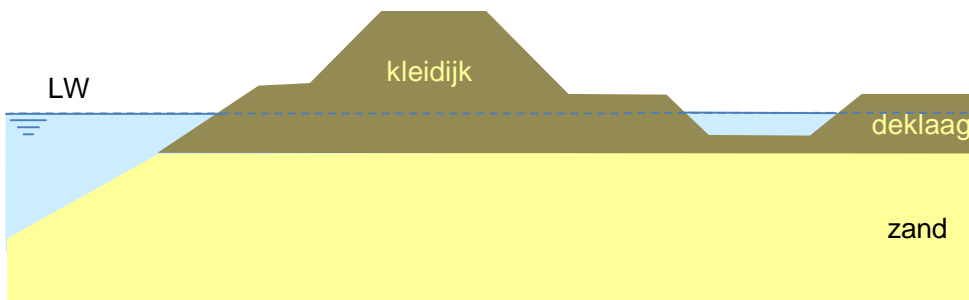
was ontwikkeld. Hoe breder de dijk, hoe langer het duurt voordat de pipe volledig ontwikkeld is. Bij sommige belastingsituaties is de duur van het hoogwater relatief kort, waardoor het kanaaltje niet de tijd krijgt zich gedurende het hoogwater volledig te kunnen ontwikkelen. Alhoewel voorafgaande hoogwaters 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

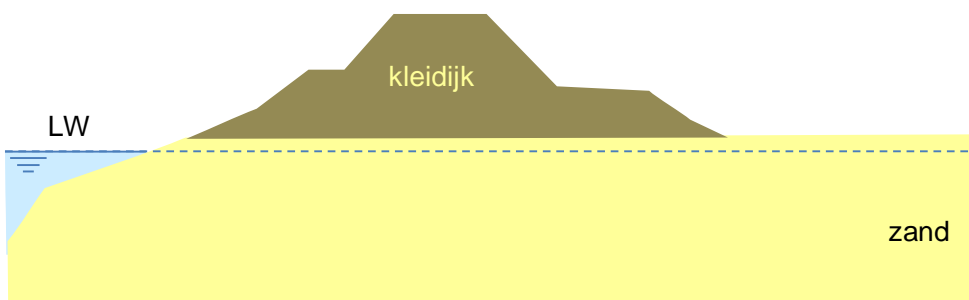
4.2.3.1 Stap 0: de uitgangssituatie situatie

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.



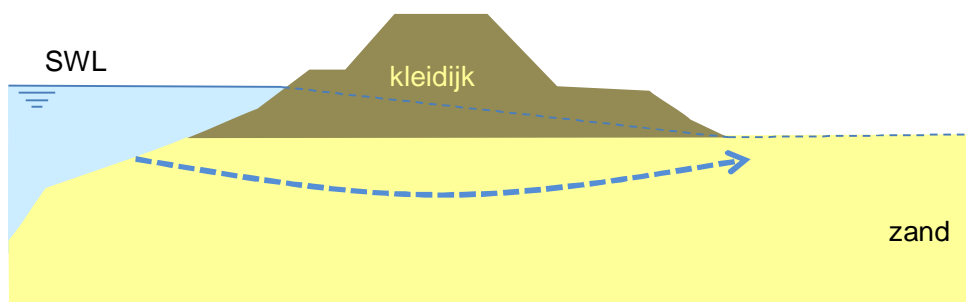
Figuur 4.1 Situatie met slappe deklaag op het binnendijkse maaiveld. Geen waterstandsverschil tussen buiten- en binnenwater aanwezig en dus geen grondwaterstroming



Figuur 4.2 Situatie met zand direct onder het binnendijkse maaiveld

4.2.3.1. 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

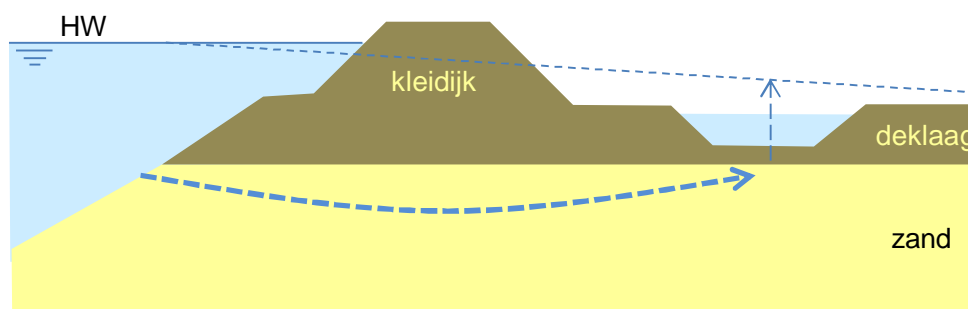
Bij een situatie waarbij de dijk niet direct op het zand ligt, maar op een doorgaande klei- of veenlaag, komt deze kwelstroom vanwege de slechte doorlatendheid van de deklaag minder snel en duidelijk op gang en is een groter waterstandsverschil nodig om de eerste signalen te kunnen zien die duiden op 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 binnenteen 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 kwelsloten 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.

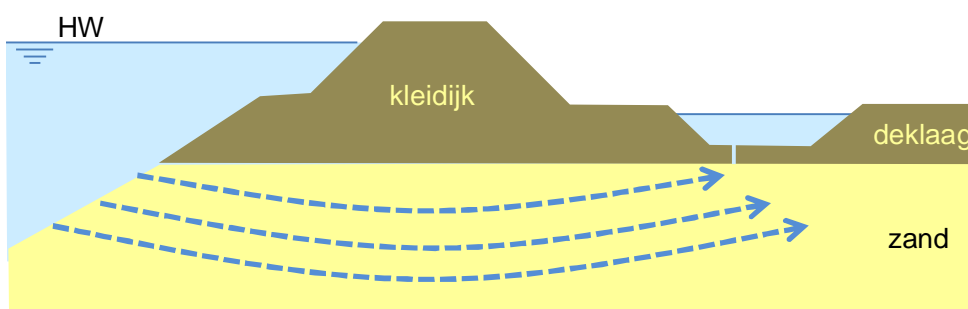


Figuur 4.6 Stijgende buitenwaterstand veroorzaakt verval over dijk waardoor de stijghoogte onder in zandlaag en daarmee de waterdruk onder het slappe lagenpakket toeneemt, waardoor de deklaag langzaam wordt opgedrukt.

4.2.3.1. 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.



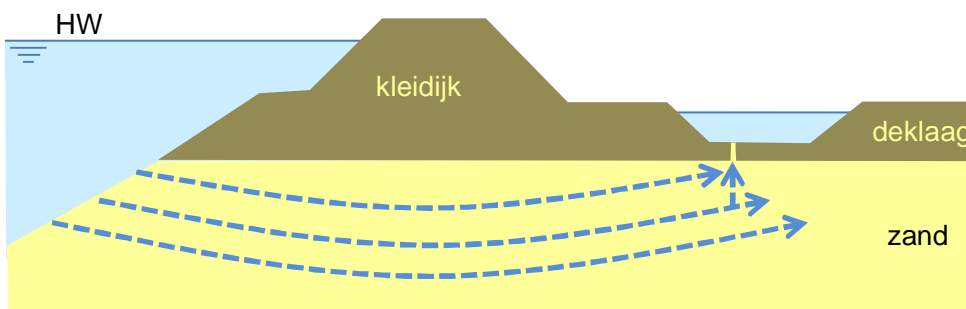
Figuur 4.7 Binnendijks maaiveld drijft als gevolg van de grote waterdruk in het watervoerende pakket op. De locatie met het geringste deklaaggewicht (hier de slootbodem) scheurt en barst als eerste op.

4.2.3.2 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 stuwten. 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.

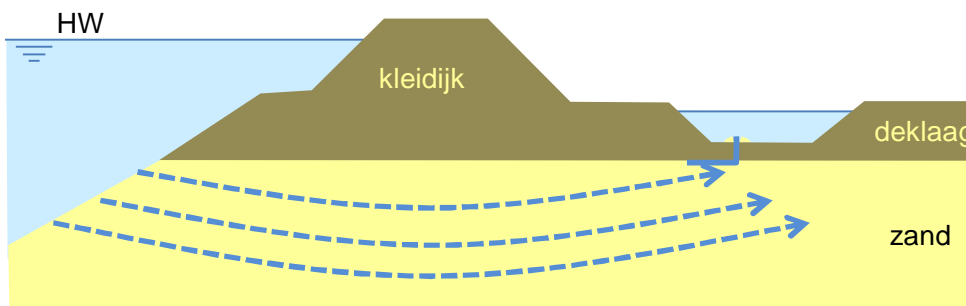
Het proces van omhoog stromend zand wordt heave genoemd.



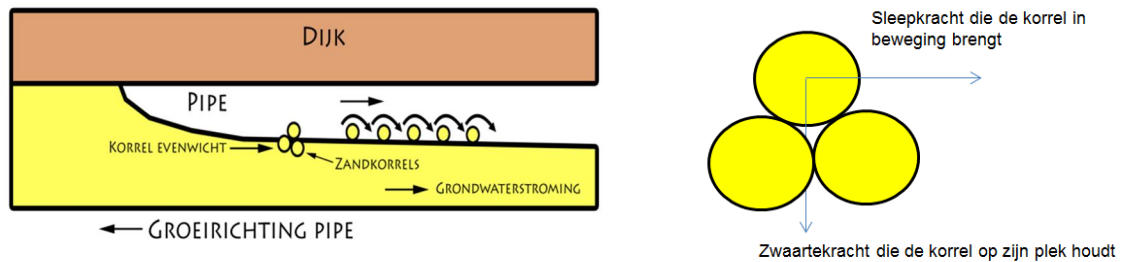
Figuur 4.8 Heave

4.2.3.3 Stap 4: de buitenwaterstand stijgt verder en pipes ontstaan

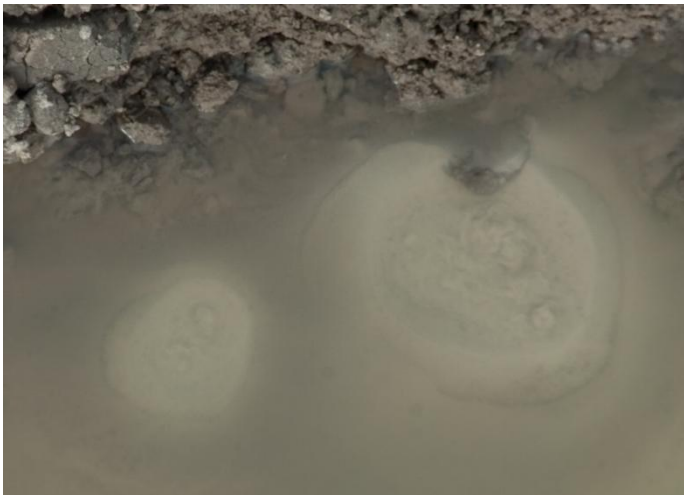
Wanneer de buitenwaterstand verder stijgt, wordt het zand over de rand van de wel gegooid en zet zich op het maaiveld af en er ontstaan zandmeevoerende wellen. In deze fase begint de vorming van een pipingkanaal. Een pipingkanaal is een zeer ondiepe holle ruimte (meerdere korreldiameters diep) aan de 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



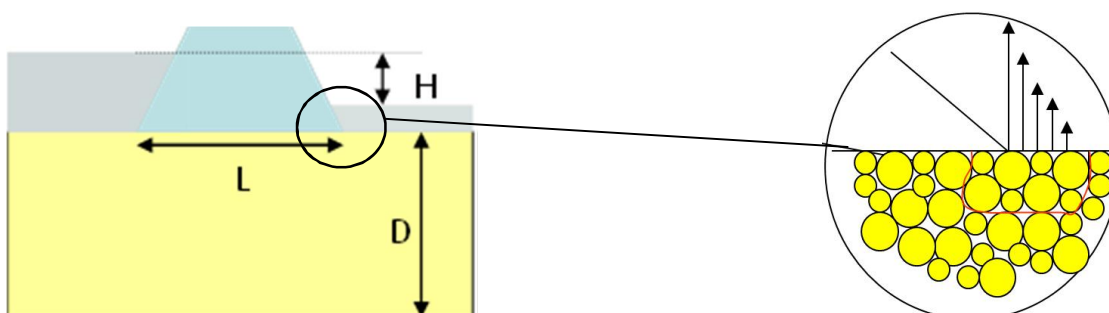
Figuur 4.10 Korrelevenwicht c.q. transport van zandkorrels in pipe



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 gefluidiseerd 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.



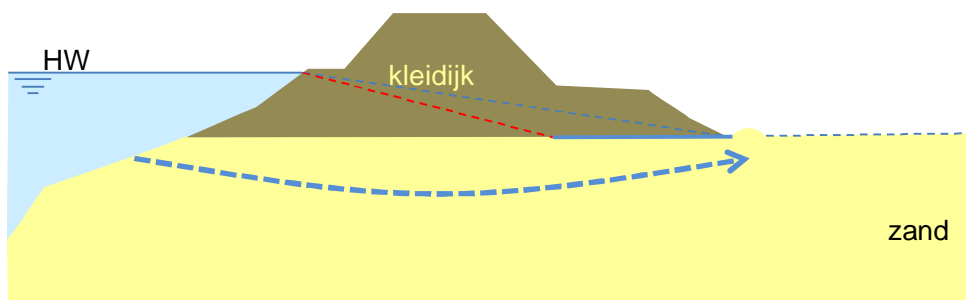
Figuur 4.12 Schematisering van de uittredepunt bij afwezigheid deklaag

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 opbartskanaal, 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. Voor de Gedetailleerde toets wordt het bereiken van het kritieke verval aangemerkt als faaldefinitie.

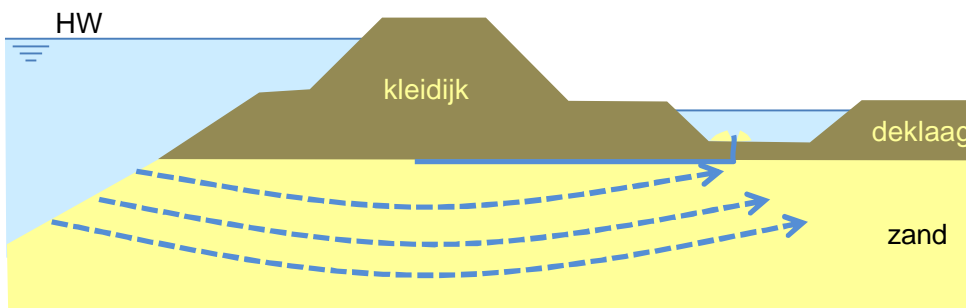
In de praktijk kan het voorkomen dat het proces net in evenwicht komt, doordat de wel het zand niet meer over de rand van de zandkrater kan transporteren. De zandmeevoerende wel kist zich – bij wijze van spreken - zelf op. De rand van de zandkrater wordt hoger, waardoor ook het waterpeil in de krater 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.

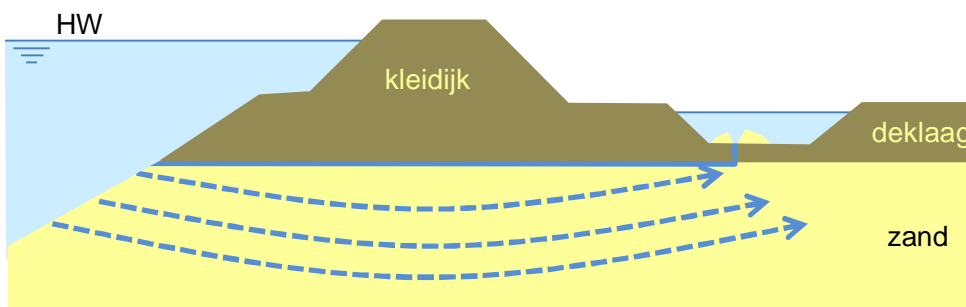
In de progressiefase treedt geen evenwichtssituatie meer op zodat de pipe bij gelijkblijvende belasting zal doorgroeien.



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

4.2.3.4 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.

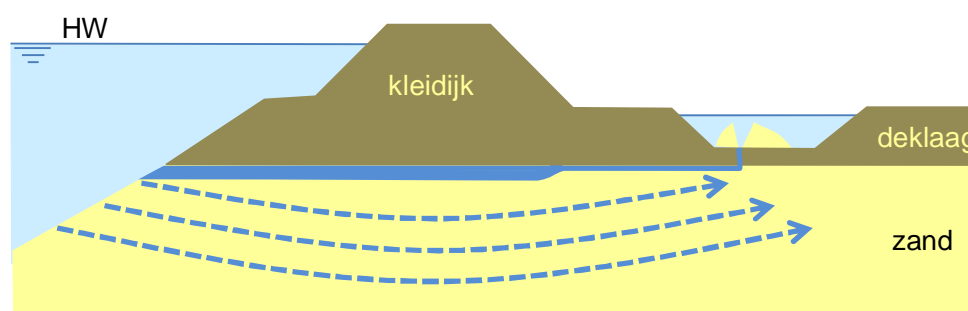
4.2.3.5 Stap 6: ruimproces naar de uittredepunt toe

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 ontstopping 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.

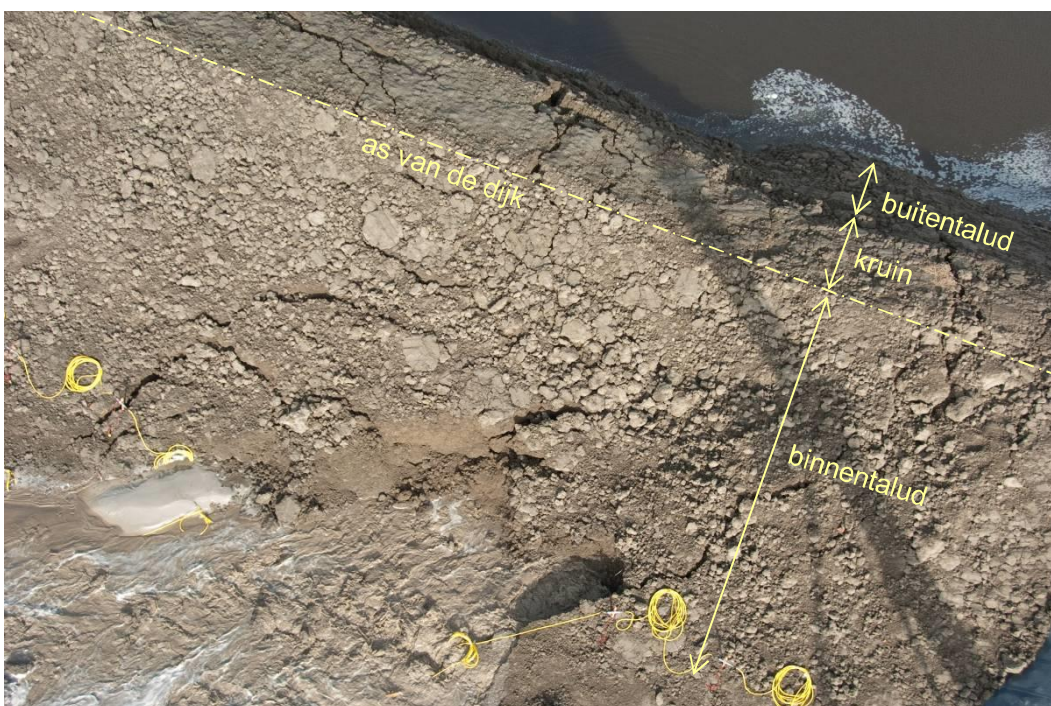


Figuur 4.16 Ruimen (verbreding en verdieping van de pipe)

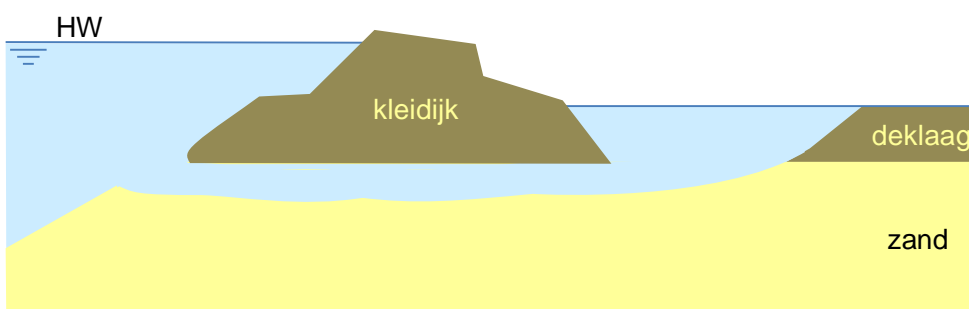
4.2.3.6 Stap 7: bezwijkproces

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

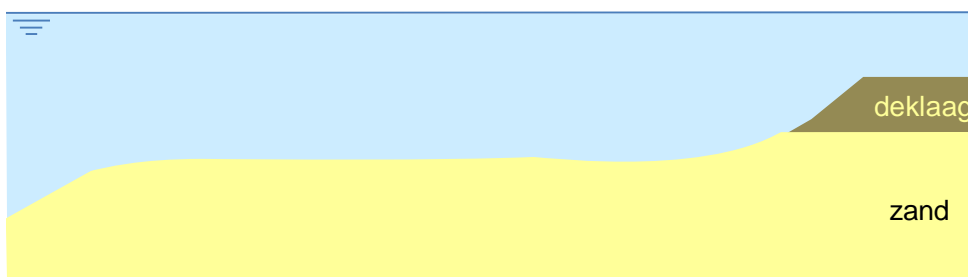
een modderfontein. Dit resulteert in een groot erosie gat onder de gehele dijk door waardoor de dijk uiteindelijk volledig wordt ondermijnd. In de IJkdijkproeven was dit gat ruim 1,5 m diep. Er treden dan grote scheuren in de dijk op en de dijk zakt aan de bovenstroomse, dus buitendijkse zijde in. Een 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 Binnen het toetsproces te beoordelen deelmechanismen

Binnen het toetsproces (Gedetailleerde toets) worden drie mechanismen (de hierboven beschreven stappen 2, 3 en 4) onderscheiden en getoetst:

- Opbarsten.
- Heave.
- Terugschrijdende erosie.

Als voor één van de mechanismen het toetsoordeel “voldoet” kan worden gegeven, wordt voor het faalmechanisme piping het toetsoordeel “voldoet” gegeven. Pas als de dijk aan alle drie criteria niet voldoet, wordt het criterium gesteld door de faaldefinitie overschreden. De dijk zal dan in werkelijkheid nog niet per se falen, maar omdat de nog voorhanden reststerkte bij het optreden van piping niet gekwantificeerd kan worden, dient de kering op piping te worden afgekeurd (faaldefinitie).

4.2.5 Reststerkte

Reststerkte is de restcapaciteit van de dijk om de waterkerende functie na optreden van een primair mechanisme te vervullen. Bij het faalmechanisme piping is er sprake van reststerkte na het moment van overschrijden van het kritieke verval. Dit is het verval, waarbij het proces van terugschrijdende erosie niet meer tot stilstand komt.

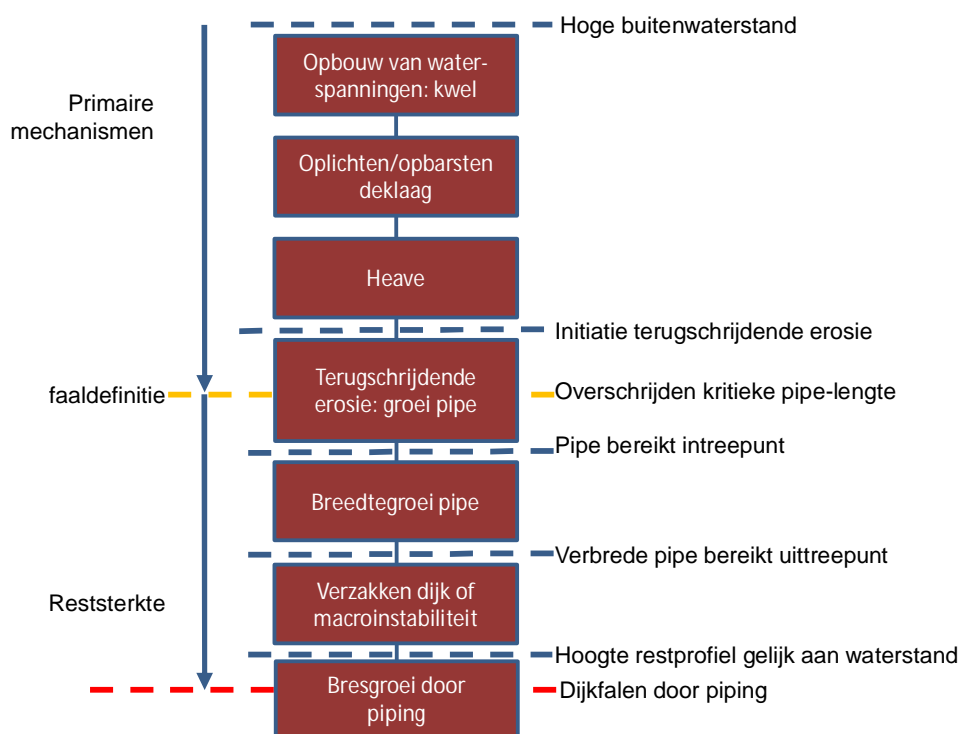
De reststerkte van de dijk na overschrijden van het kritieke verval is afhankelijk van de grondeigenschappen onder de dijk. Deze reststerkte is moeilijk te kwantificeren. Zo faalde de testdijk gelegen op fijn zand vrij snel, terwijl in de testdijk op grof zand na het ruimen een verzakking optrad, waardoor het 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 dijcfalen als gevolg van piping.

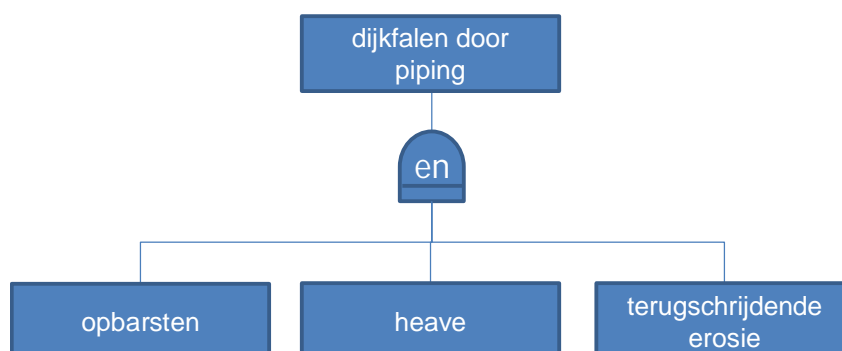
Binnen deze reeks processen is onderscheid te maken tussen de primaire (bezwijk)mechanismen tot overschrijden van de kritieke pipe-lengte (faaldefinitie) en de reststerkte-deelprocessen tot aan falen van de waterkering.

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. Een sequentie van verschillende (deel)mechanismen en processen (faaltraject) treedt op voordat een waterkering daadwerkelijk faalt. De waterkering faalt als het de waterkerende functie niet kan vervullen. Reststerkte is dus de restcapaciteit van de dijk om de waterkerende functie naar optreden van een primair mechanisme te vervullen.



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

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



Figuur 4.21 Foutenboom voor situatie met een deklaag achter de dijk

4.4 Beknopte modelbeschrijving van de te toetsen deelmechanismen

4.4.1 Opbarsten

Wanneer de waterdruk, die door het grondwater in het watervoerende pakket aan de onderkant van de deklaag wordt uitgeoefend, groter is dan het gewicht van de deklaag, zal opbarsten van de deklaag optreden. Door de scheurvorming van de deklaag en de eroderende werking van de kwelstroom kunnen opbarstkanaaltjes ontstaan, waardoor de kwelstroom zanddeeltjes mee naar het maaiveld kan nemen. Hierdoor ontstaat op het maaiveld c.q. op de slootbodem een zandmeevoerende wel.

Indien een afdekkende klei- of veenlaag aanwezig is, is opbarsten een noodzakelijke voorwaarde voor het ontstaan van zandmeevoerende wellen. Zonder opbarsten is het niet mogelijk dat piping ontstaat.

De toetsing ten aanzien van piping begint dus met de controle op de veiligheid tegen opbarsten. Wordt hieraan voldaan, dan kan een verdere toetsing op het pipingmechanisme achterwege blijven.

De beoordeling in de Gedetailleerde toets is gebaseerd op de evenwichtsvergelijking opgesteld voor de afdekkende laag. De naar beneden gerichte druk die door het gewicht van de deklaag, en het eventueel daarop rustende water, wordt uitgeoefend (weerstand) dient groter te zijn dan de waterdruk in de watervoerende zandlaag (belasting). Weerstand en belasting zijn voorzien van partiële veiligheidsfactoren.

4.4.2 Heave

Zandtransport kan alleen optreden als de verticale uitstroomgradiënt bij de uittredepunt een kritieke waarde voor heave overschrijdt. Het kritieke heave verhang is het (gemiddelde) verticale verhang over de deklaag waarbij nog net niet de zandkorrels uit de watervoerende laag naar maaiveld worden meegevoerd.

4.4.3 Terugschrijdende erosie

Het krachteenwicht op de zandkorrel in de pipe, de stroming door de pipe en de grondwaterstroming naar de pipe worden gecombineerd in het model van Sellmeijer. Het Sellmeijer model gaat uit van het evenwicht van de korrels op de bodem van de pipe en bepaalt op basis daarvan of een pipe kan groeien. De aanwezigheid van de pipe wordt verondersteld en er wordt bepaald bij welk verval de korrels nog juist in evenwicht zijn. Uitgaande van de geometrie van dijk, voor- en achterland, wordt met dit model het maximale

waterstandsverschil berekend waarbij de korrels in de pipe nog juist in evenwicht zijn. Dit is het kritiek verval. Blijft het verval langdurig hoger dan het kritiek verval zal de pipe uiteindelijk doorgroeien tot het intredepunt.

Het mathematisch model blijft echter een onvolledige beschrijving van de werkelijkheid met allerlei onzekerheden. Zo wordt er bijvoorbeeld van een homogene zandlaag uitgegaan.

Het ontstaan van zandmeevoerende wellen wordt in Nederland (anders dan bijvoorbeeld in de VS) geaccepteerd, omdat men aanneemt dat zich bij een niet al te groot waterstandsverschil over de dijk een evenwichtssituatie instelt waarbij het zandtransport tot stilstand komt. Maar overschrijdt het waterstandsverschil, het verval, een kritieke waarde (het kritiek verval), dan komt het zandtransport alleen tot stilstand als het verval vrij snel weer terugloopt. Zo niet, dan vormt zich uiteindelijk een doorgaande pipe onder de dijk door. In de Eenvoudige toets wordt er voor zeedijken, als de belastingsduur kort is in verhouding tot de tijdsduur die nodig is om de pipe naar het intredepunt te laten groeien, onder bepaalde condities goedgekeurd. In de Gedetailleerde toets wordt verondersteld dat de dijk geen sterkte meer heeft zodra het kritiek verval is overschreden.

De beoordeling van piping in toetslaag 2a is alleen een controle of de faalkans betrekking tot piping voldoet aan de gestelde eis. Wanneer de berekende faalkans lager is dan de eis, dan kan men ervan uitgaan dat zandmeevoerende wellen kunnen optreden, maar dat de pipes slechts over een beperkte lengte zullen groeien, oftewel dat de zandmeevoerende wellen na verloop van tijd geen zand meer zullen meevoeren. Wanneer de berekende faalkans hoger is dan de eis, dan bestaat er een te groot risico op de vorming van doorgaande pipes.

De beoordeling op piping volgens toetslaag 2b, de volledig probabilistische toetsing per dijktraject, is een controle of de voor piping en andere relevante faalmechanismen berekende kansen passen binnen de gestelde faalkanseis.

Bij de toetsing van piping volgens toetslaag 2, vindt geen beoordeling van de reststerkte na het overschrijden van het kritiek verval plaats. Ook blijft buiten beschouwing of de pipe-groei zich binnen de belastingduur tot een problematische lengte kan ontwikkelen. Doordat de hoogwatergolf op rivieren lang duurt, is daarvan voor het bovenrivierengebied waarschijnlijk weinig reststerkte te verwachten. Maar voor locaties waar de hoogwaterbelasting stormgedreven is, kan de overschrijding van het kritiek verval zodanig kort zijn dat het mechanisme zich niet volledig kan ontwikkelen.

4.5 Literatuur piping

- [1] *Technisch rapport Zandmeevoerende wellen*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. RWS-DWW, Delft 1999.
- [2] *Schematiseringshandleiding voor toetsing Piping bij dijken, WTI2017*. U. Förster, M. de Visser, H.T.J. de Bruijn, G.A.M. Kruse, M.P. Hijma, L.M. Vonhögen-Peeters. Deltares rapport: 1220084-006-GEO-0001, Versie 2. Delft, december 2015.
- [3] *Derivation of the semiprobabilistic safety assessment for piping, WTI 2017: Cluster C, piping failure mechanism*. A.C. Martins Teixeira, K.A. Wojciechowska, W.L.A. ter Horst. Deltares report: 1220080-002-ZWS-0006 Version 4. Delft, February 2016.
- [4] *Functional design semiprobabilistic assessments Ringtoets*. R.B. Jongejan, W.J. Klerk. Deltares rapport 1209431-008-ZWS-0009. Delft, May 2015.

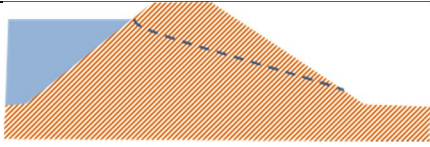
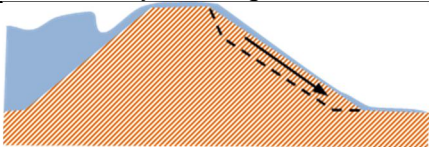
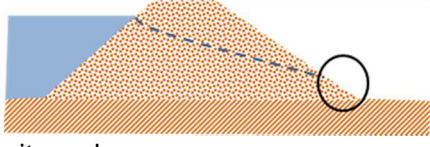
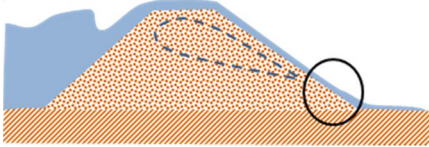
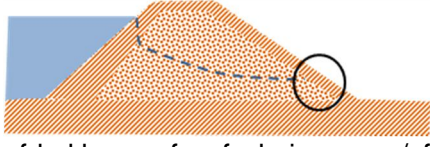
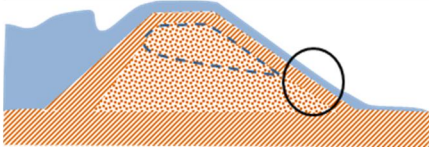
- [5] *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen*. U. Förster, G. van den Ham, E.O.F. Calle, G.A.M. Kruse. Deltares rapport 1202123-003-GEO-0002 in opdracht van RWS Waterdienst. Delft, Maart 2012.
- [6] *Calibration of the L/H ratio on behalf of a level 1 assessment rule ('eenvoudig') for Piping WTI2017*. A. .C. Martins Teixeira. Memo 1209435-002-GEO-0001. Deltares, Delft. 21 November 2014.
- [7] *Dijkdoorbraak Tholen december 1894*. F.M. Waarsenburg en P. van Dam. Rapport S-80.056. COW. November 1980.

5 Microstabiliteit

5.1 Globale beschrijving van microstabiliteit

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 de 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.

Type dijk	microstabiliteit	stabiliteit bij overslag
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 microstabiliteit en stabiliteit van de bekleding bij golfoverslag

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

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. Verder is klei door cohesie beter bestand tegen erosie dan zand. Bij zeer langdurige hoogwaterstanden kan door verweking van het binnentalud de doorlatendheid van de toplaag afnemen wat mogelijk tot micro-instabiliteit kan leiden. Vooral nog is hier echter niets over bekend.

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 [2] 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 [3], 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 op kunnen treden:

- 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 òf 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.

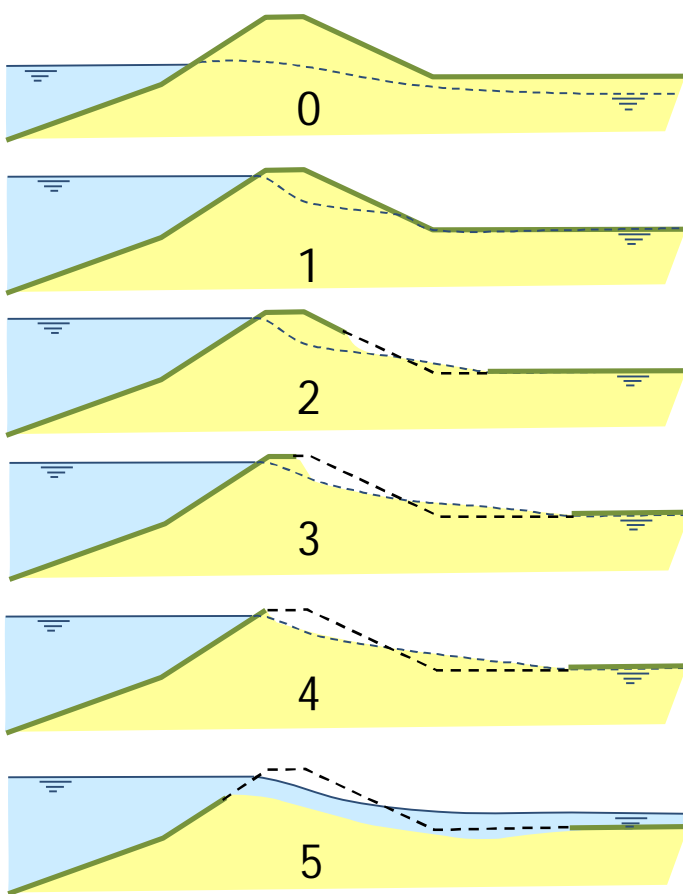
Geval C, zandtaluds onder water betreffen bijvoorbeeld dijken met binnendijks gelegen wielen en strangen. Deze kunnen relatief diep zijn en een zandtalud onder water hebben, waarbij onder extreme omstandigheden het kritische uittrede verhang wordt overschreden. Omdat dit zich onder water afspeelt kan het pas laat worden opgemerkt [4].

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.



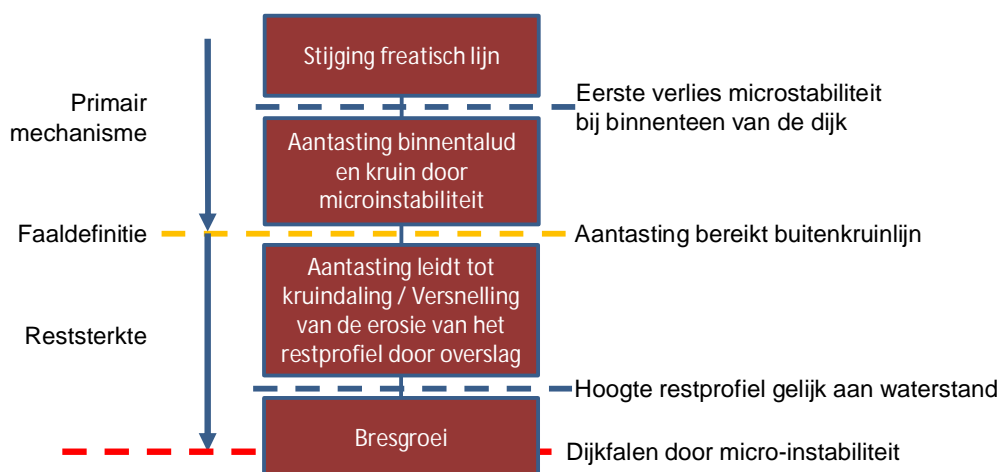
Figuur 5.2 Schetsmatige weergave van het traject tot falen van de dijk als gevolg van micro-instabiliteit

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 teen 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 behoorlijk langdurig proces kan vergen [5]. Vooral nog zijn er geen methoden beschikbaar om deze tijdsafhankelijkheid in rekening brengen.

De opvolgende gebeurtenissen leidend tot falen van de dijk staan in Figuur 5.3.



Figuur 5.3 Gebeurtenissen leidend tot falen van de dijk geïnitieerd door micro-instabiliteit

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 worden niet meegenomen in de bovengenoemde beschrijving van het mechanisme en komen ook niet tot uiting in de voor dit mechanisme gehanteerde modellen.

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 golfoploop 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.

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

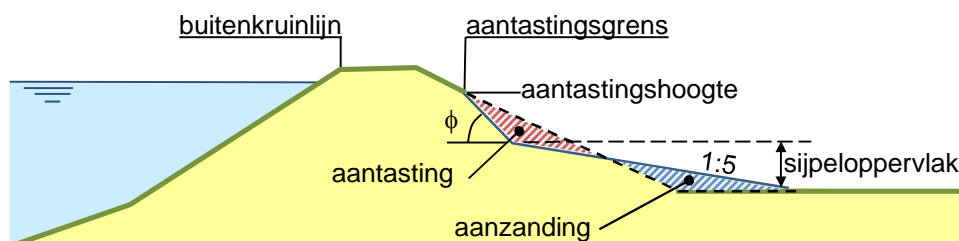
5.4 Beknopte modelbeschrijving van de te toetsen deelmechanismen

De Gedetailleerde toets op microstabiliteit betreft feitelijk de beoordeling van een tweetal stadia. Beide stadia zijn in Figuur 5.3 aangegeven:

- Eerste verlies microstabiliteit bij de binnenteen van de dijk.
- Aantasting bereikt buitenkruinlijn.

Maar voordat die beoordeling plaatsvindt wordt eerst vastgesteld of micro-instabiliteit in de gegeven situatie wel het eerste mechanisme is dat op zal treden. Als het overslagdebiet een grenswaarde overschrijdt, zal immers de infiltratie zodanig groot zijn dat afschuiving van het binnentalud eerder optreedt.

De feitelijke beoordeling van de microstabiliteit begint met de beoordeling of verlies van microstabiliteit kan optreden. De rekenregels die daarvoor worden gebruikt zijn gebaseerd op evenwichtsbeschouwingen van het binnentalud. Als er sprake is van een kleidek op het binnentalud, dan gaat het om het evenwicht van deze kleilaag. Als het binnentalud niet is bekleed, maar uit zand bestaat, dan gaat het om het evenwicht van de zandkorrels op het binnentalud.



Figuur 5.4 Evenwicht tussen aanzanding bij de teen en aantasting van het oorspronkelijk profiel bepaalt de aantastingsgrens

Als micro-instabiliteit blijkt op te kunnen treden, dan wordt met een geometrische beschouwing, zie Figuur 5.4, nagegaan of het proces van micro-instabiliteit kan leiden tot een zodanige aantasting van binnentalud en kruin dat kruinverlaging optreedt. Volgens de modellering voor de Gedetailleerde toets treedt falen op (de faaldefinitie) als micro-instabiliteit optreedt en uit de geometrische toets blijkt dat de aantasting als gevolg van micro-instabiliteit de buitenkruinlijn kan bereiken.

Bij de toetsing van het spoor microstabiliteit volgens toetslaag 2, vindt geen beoordeling van de reststerkte na kruinverlaging plaats. Ook blijft buiten beschouwing of de aantasting door micro-stabiliteit zich binnen de belastingduur tot aan de buitenkruinlijn kan ontwikkelen.

5.5 Literatuur microstabiliteit

- [1] *Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies, Geotechnische aspecten van dijken, dammen en boezemkaden*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, juni 2001.
- [2] *Microstabiliteit overzicht modellering*. GeoDelft kenmerk 393440/81, Delft, 2000.
- [3] *Micro-instabiliteit binnentalud zanddijk*. Delft Cluster, Deltares kenmerk 418020-0009, Delft, maart 2008.
- [4] *Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken – deel 1 Bovenrivierengebied*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, september 1985.
- [5] Den Adel, H., D.R. Mastbergen, T. Stoutjesdijk. *Experimenteel onderzoek in geocentrifuge, Micro-instabiliteit kan ook optreden bij flauwe taluds*, Artikel in: Land + Water nr. 5, 2008.
- [6] *Schematiseringshandleiding voor toetsing microstabiliteit WTI-2017 cluster 2, Product 2.3B*. A. van Hoven. Deltares rapport 1220083-009-0001, Versie 2. Delft december 2015.

6 Stabiliteit bekleding asfalt

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 of keileem. Een asfaltbekleding is altijd aangelegd in combinatie met andere bekledingstypen zoals dikwijls een steenzetting lager op het talud en 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.

Bewijkmechanismen 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 vermoeiingsverschijnselen optreden en het asfalt uiteindelijk kan bezwijken (mechanisme AGK: Asfaltbekleding GolfKlap). De tweede belangrijke belastingsituatie kan optreden na een hoge waterstand. Als de asfaltbekleding (of de eventuele onderlaag) ondoorlatend is, kan de bekleding bij een dalende buitenwaterstand worden opgedrukt (mechanisme AWO: Asfaltbekleding WaterOverdrukken).

De kwaliteit van de constructie is onderhevig aan veroudering en dit heeft invloed op (de parameters voor) de toetsing. 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 waarop getoetst wordt en de reststerkte.

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 kan ook optreden door bepaalde soorten begroeiing (zoals riet of houtvormende gewassen) die het materiaal 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 houtvormende gewassen ontstaan.

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. 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. Deze gaat ruimtelijk veel meer spreiding vertonen, met een hoge stijfheid voor goed maar hard geworden asfalt en een lage 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 Bezijken ten gevolge van golfklappen

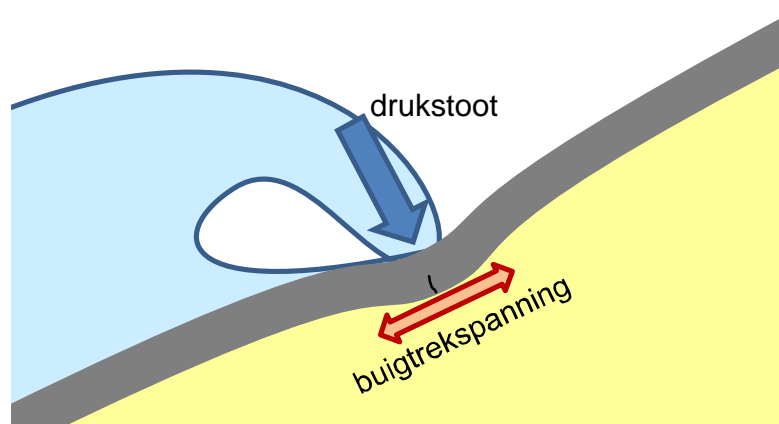
Een asfaltbekleding moet een aaneengesloten geheel blijven vormen om weerstand te bieden aan de optredende hydraulische belastingen, teneinde erosie van de ondergrond te voorkomen. Een golf die het talud treft, veroorzaakt een drukstoot op de bekleding. De bekleding moet hiertegen voldoende weerstand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

- Bezijken asfalt door overschrijding van de vermoeiingssterkte door golfklappen.
- Afschuiving in de bekleding door golfklappen.
- Bezijken van de ondergrond door golfklappen.

6.3.1 Overschrijding van de vermoeiingssterkte door golfklappen

Bij een maatgevende storm wordt het asfalt gedurende enige tijd (uren - dag) belast door herhaalde golfklappen (brekers). 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.

Voor de Gedetailleerde toets (AGK) wordt het moment waarop de scheuren vanaf de onderzijde door de bekleding gaan groeien aangemerkt als falen van de bekleding (faaldefinitie AGK).



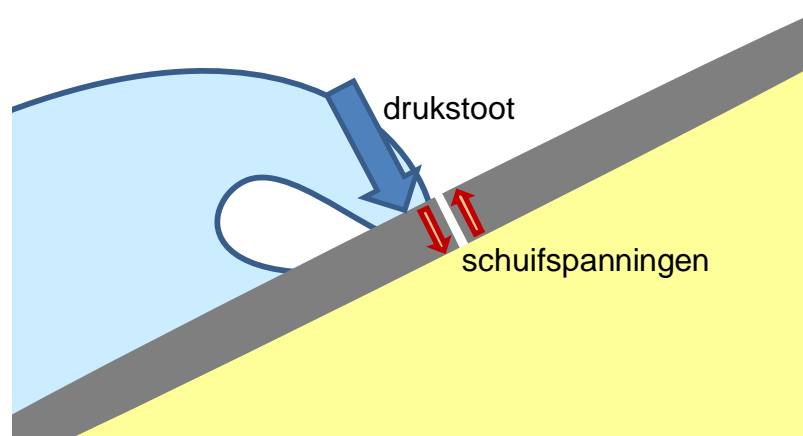
Figuur 6.1 Mechanisme overschrijden van de buigtreksterkte door golfklappen

Bij aanhoudende belasting kan het asfalt zodanig deformeren dat deze scheuren doorgroeien naar de bovenzijde van het asfalt. 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 van klei of keileem kan de reststerkte 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 Afschuiving in de asfaltbekleding ten gevolge van 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 is dit mechanisme nooit maatgevend vanwege het feit dat een dijkbekleding altijd met een laagdikte van ten minste 15 cm wordt aangelegd.

6.3.3 Bezwijken van de ondergrond door golfklappen

Bij zware golfaanval, d.w.z. bij significante golfhoogte van ongeveer 3 meter of meer, kunnen mechanismen optreden die kunnen leiden tot bezwijken van de ondergrond. Vooral als gevolg van een verhoogde grondwaterstand tijdens de stormduur kan het draagvermogen van de ondergrond tekort schieten. Bij grote vervormingen van de ondergrond zal ook de asfaltbekleding bezwijken. Mechanismen die mogelijk kunnen optreden zijn:

- *Verweking 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 gaat deze vervormen en een dichtere pakking aanneemt. 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 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.
- *Afschuiving 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 naar beneden. 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. In de toetsing op veiligheid wordt hier vanuit gegaan.
- *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 inveert 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. 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. Daarnaast kan stuik in de ondergrond (elastische vervorming) optreden onder invloed van herhaalde belastingen. Als de ondergrond vervormt, vervormt uiteraard ook de bekleding die daar bovenop ligt. Tot op zekere hoogte kan een asfaltbekleding dergelijke vervormingen volgen maar dat is een ongecontroleerd proces en moet dus voorkomen worden.

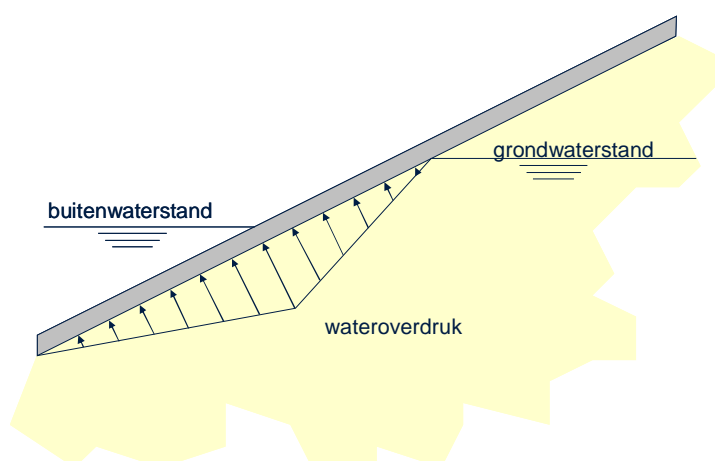
Deze mechanismen zijn uitgesloten in de toepassingsvoorwaarden voor de Gedetailleerde toetsing van WAB. In het bijzonder wanneer significante golfhoogten van meer dan 3 m kunnen optreden, alsmede bij een grondwaterstand achter de asfalt bekleding, moet op maat getoetst worden.

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 waterbouwasfaltbeton en vol en zat gepenetreerde breuksteenbekledingen.

Een bekleding van open steenasfalt is altijd zodanig doorlatend dat 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 6.3.



Figuur 6.3 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 het mechanisme AGK kan bij doorgaande belasting het asfalt zodanig deformerend 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 van klei of keileem is er nog sprake van meer reststerkte.

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.
- Bijzondere belastingen die scheuren of gaten in de bekleding veroorzaken, zoals scheepsaanvaringen, kruiend ijs en 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 doorgaand moet zijn en enige breedte moet hebben.

Onder dagelijkse omstandigheden kan er soms ook 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 ontgroning van de onbeschermde vooroever. Deze twee mechanismen hebben invloed op de stabiliteit van het bovengelegen talud met bekleding en staan beschreven in de Handreiking Dijkbekledingen, Deel 3 Asfaltbekledingen: 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. 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.

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 Reststerkte

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 zal dus grootschalige erosie van het dijklichaam gaan 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 falen van de bekleding zelf kan een asfaltbekleding 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 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

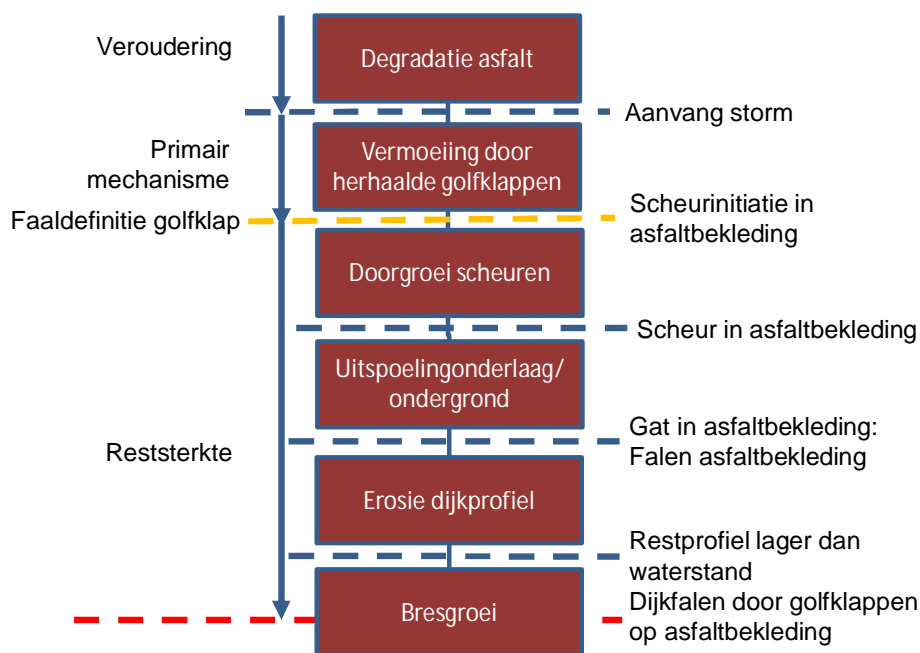
6.8.1 Inleiding

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 de toetsing (eventueel) rekening wordt 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 in door die belastingen doorgaans voldoende tijd heeft om de schade te herstellen.

Om het schema niet te overladen, zijn de faalmechanismen die in de toetsing worden onderscheiden, Golfklap (AGK) en Opdrukken door wateroverdruk (AWO), apart behandeld. Onderin de schema's tonen zij vergelijkbare stadia en processen.

6.8.2 Traject van initiatie tot falen ten gevolge van golfklappen (AGK)



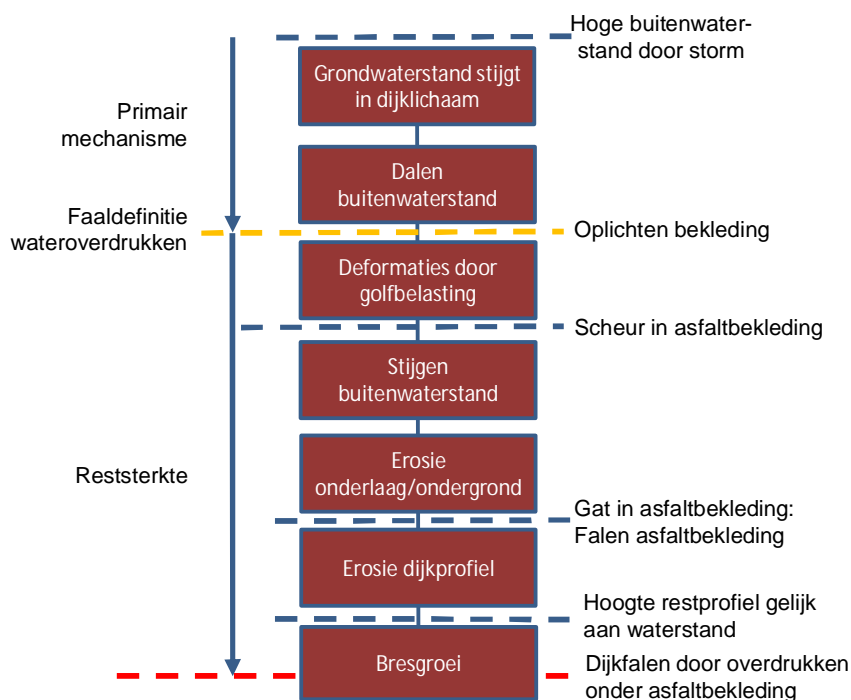
Figuur 6.4 Traject leidend tot falen van de dijk ten gevolge van golfklappen (AGK)

De belasting op de bekleding bestaat uit de golfhoogte, golfperiode en stormduur. De weerstand tegen golfklappen wordt bepaald door de laagdikte, breuksterkte en vermoeïngseigenschappen, 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 vermoeïngsschade aan het asfalt.
- *Stormduur*. Een langere stormduur leidt tot meer golfklappen tijdens een storm en levert dus een grotere vermoeïngsschade aan het asfalt.
- *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 6.5 Traject leidend tot falen van de dijk ten gevolge van opdrukken (AWO)

De belasting voor de situatie die volgens de faaldefinitie 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 afstroommogelijkheden 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 langerdurende 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 reststerkte-deel van het faaltraject zijn het waterstandsverloop en de golven.

6.9 Beknopte modelbeschrijving asfaltbekledingen

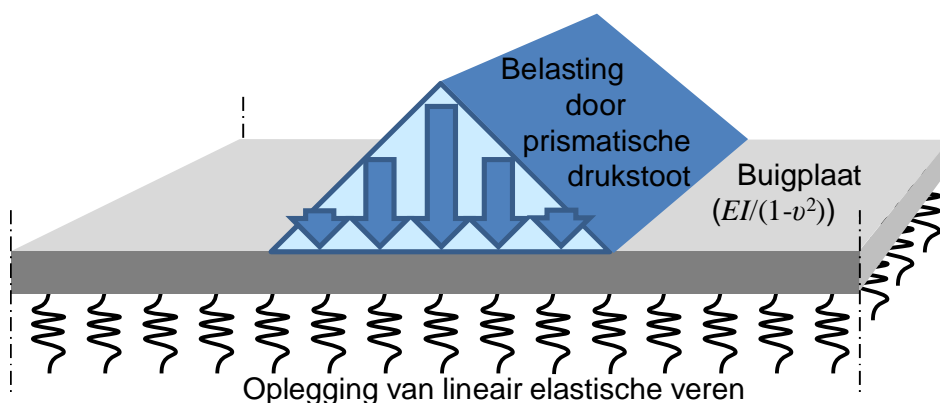
Voor asfaltbekledingen moeten in de toetsing twee faalmechanismen worden beoordeeld: bezwijken als gevolg van golfklappen (AGK) en bezwijken als gevolg van wateroverdruk (AWO).

Voor de Eenvoudige toets op golfklappen is alleen voor vol en zat gepenetreerde breuksteen een beoordeling voorzien. Deze beoordeling is een vuistregel ten aanzien van de minimale laagdikte van de bekleding: als daaraan wordt voldaan, dan leert de praktijk dat geen schade mag worden verwacht.

Voor de Gedetailleerde toets van bekledingen van waterbouwasfaltbeton belast door golfklappen wordt binnen het WTI getoetst (toetslaag 2) op het begin van scheurvorming ten gevolge van vermoeiing. De mechanica-modellering waarmee de spanningen onderin de asfaltbekleding worden berekend is weergegeven in Figuur 6.6. De golfklapbelasting is daarbij geschematiseerd tot een prismatische belasting. Aangezien bezwijken van waterbouwasfaltbeton naar verwachting optreedt door vermoeiing van het materiaal, wordt voor iedere golfklap in het golfveld een bijdrage aan de vermoeiingsschade berekend.

Het stadium waarop wordt beoordeeld, de zogenaamde faaldefinitie, is het begin van scheuren van de asfaltbekleding vanaf de onderzijde van de asfaltbekleding. Voor die berekening wordt het materiaal gekarakteriseerd door een vermoeiingsrelatie die aangeeft hoeveel belastingwisselingen van een zeker spanningsniveau kunnen optreden alvorens het materiaal gaat scheuren. De breuksterkte van het materiaal die aan de hand van materiaalproeven op monsters kan worden bepaald, is een belangrijke grootte die de ligging van de vermoeiingsrelatie bepaald. Met de regel van Miner wordt de totale vermoeiingsschade door alle lastherhalingen gedurende een storm bepaald. De daarvoor benodigde formules zijn geïmplementeerd in software: GOLFKLAP / WaveImpact [2], [6]. Voor omstandigheden waarbij de ondergrond mogelijk bezwijkt, wordt verwezen naar de Toets op maat.

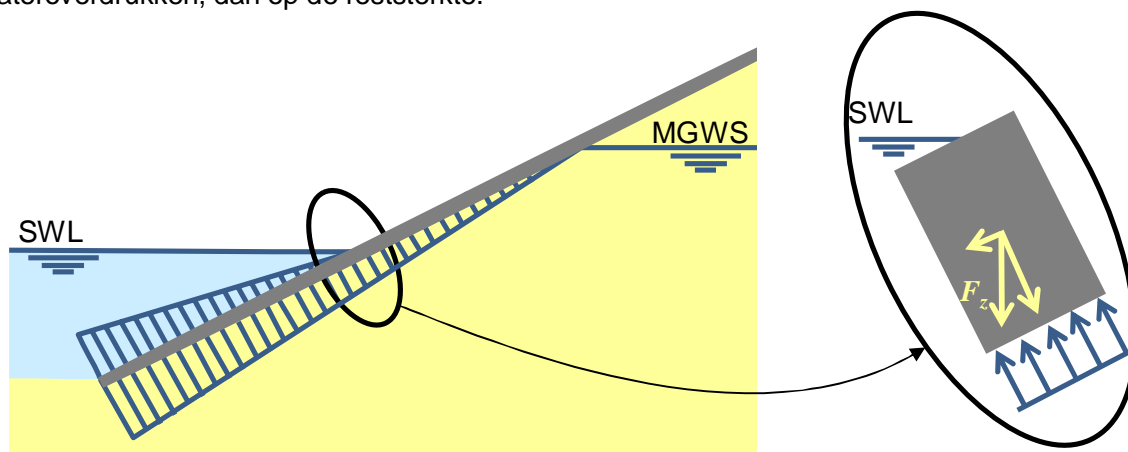
Door het levensduurmodel voor WAB te gebruiken om de breuksterkte op de peildatum te bepalen wordt niet alleen rekening gehouden met de vermoeiing tijdens de storm, maar ook met de daaraan voorafgaande veroudering, de degradatie van het asfalt.



Figuur 6.6 *Mechanica-modellering voor het berekenen van buigtrekspanningen in asfaltbekledingen*

Voor de beoordeling van asfaltbekledingen belast door wateroverdruk wordt binnen het WTI (toetslaag 1) het evenwicht van een mootje van de bekleding loodrecht op het talud beoordeeld, zie Figuur 6.7. De belasting bestaat daarbij uitsluitend uit de statische waterdrukken door het grondwater in de dijk wat stroomt van de maatgevende grondwaterstand (MGWS) via en de buitenwaterstand (SWL).

De faaldefinitie die voor dit mechanisme wordt gehanteerd is het lokaal loskomen van de bekleding van zijn ondergrond als gevolg van een netto wateroverdruk. De bij de rekenregels gegeven aannamen voor het niveau van de freatische lijn in de dijk die bij de modellering zijn gegeven, zijn conservatief. Als een Toets op maat nodig blijkt, kan daarom de aandacht wellicht beter worden gericht op de geohydrologische omstandigheden, de grootte van de wateroverdrukken, dan op de reststerkte.



Figuur 6.7 *Modellering opdrukken asfaltbekleding*

In de beoordeling van asfaltbekledingen is na bezwijken van de toplaag ook nog een beoordeling van de erosiebestendigheid van de eventueel aanwezige onderlaag van klei (ABO) voorzien. Voor dat onderdeel is voor de vierde toetsronde van asfaltbekledingen alleen een Toets op maat voorzien. En in de Toets op maat kan er uiteraard ook aandacht worden geschonken aan andere reststerkte-componenten zoals de bijvoorbeeld reststerkte van het dijklichaam zelf.

Het erosiemodel voor de onderlaag is hetzelfde empirische model dat voor erosiesterkte van de onderlaag van grasbekledingen kan worden gebruikt.

6.10 Literatuur asfaltbekledingen

- [1] *State of the art asfaltdijkbekledingen*. M.P. Davidse, R. 't Hart, A.K. de Looff, C.C. Montauban, M.F.C. van de Ven, B.G.H.M. Wichman. STOWA Rapport 2010-W06 Amersfoort 2010.
- [2] *Golfklap a model to determine the impact of waves on dike structures with an asphaltic concrete layer*. A.K. de Looff, R. 't Hart, C.C. Montauban, M.F.C. van de Ven. Proceedings of the 30th International Conference on Coastal Engineering, 3 - 8 September 2006, pag. 5106-5115, ICCE2006, San Diego, USA.
- [3] *Handreiking Dijkbekledingen, Deel 3: Asfaltbekledingen*. In opdracht van RWS-WLV en Projectbureau Zeeweringen. Januari 2015.
- [4] *Schematiseringshandleiding toetsing asfaltbekledingen, WT12017 product 5.31*. R. 't Hart. Deltares rapportnr. 1220086-013-HYE-0007-gbh. Delft december 2015.
- [5] *Calibration of Safety Factors for wave impact on Hydraulic Asphalt Concrete Revetments, WTI Cluster C*. W.J. Klerk, W. Kanning. Deltares report 1209431-010-ZWS-0002. Delft, december 2014.
- [6] *Specificaties rekenhart GOLFKLAP (C#)*. R. 't Hart. Deltares rapportnr. 1220086-009-HYE-0001. Delft, oktober 2015.
- [7] *Handreiking zorgplicht*. STOWA. Amersfoort, 2016. In bewerking.
- [8] *Validation of WAVE IMPACT assessment based on an analysis of experimental results*. B.G.H.M. Wichman. Deltares report 1209437-021-HYE-0010. Delft, 2015.
- [9] *Definition and quatification of a modelfactor for the WAVE IMPACT model*. B.G.H.M. Wichman. Deltares report 1209437-021-HYE-0006-v4. Delft, 2015.

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 golfoplooptongen die de bekleding belasten. 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 [4]. Is er veel sprake van golfoverslag, dan zal er veel water via het binnentalud infiltreren. Dat kan leiden tot afschuiven van het binnentalud. Na extreem hoog water kan de grondwaterstand in de dijk hoog zijn opgelopen, waardoor bij een vallende buitenwaterstand de bekleding op het buitentalud eventueel kan afschuiven.

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

- Erosie buitentalud (GEBU) (klappen en golfoploop).
- Afschuiven buitentalud (GABU).
- Erosie kruin en binnentalud (GEKB).
- Afschuiven binnentalud (GABI).

De volgende vier paragrafen gaan in op deze mechanismen.

7.2 Grasbekleding erosie buitentalud

7.2.1 Inleiding en afbakening

Erosie van de grasbekleding op het buitentalud treedt op als gevolg van twee belastingtypes: de golfklapbelasting 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.

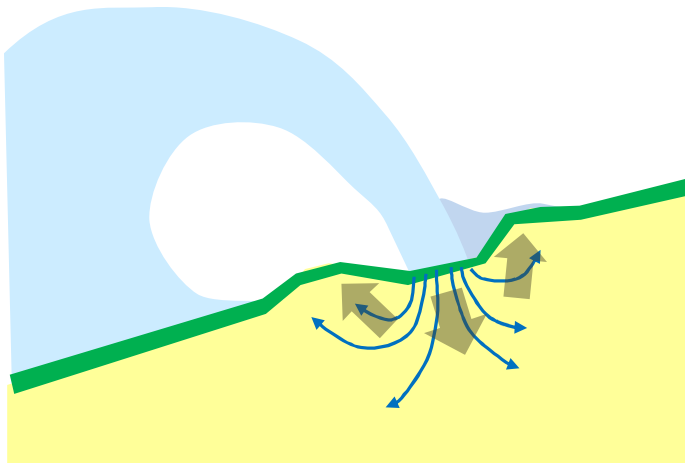
Een golfklapbelasting treedt op iets onder de waterlijn. In de toetsing wordt ervan uitgegaan dat golfklappen optreden in de zone tussen het waterpeil en een halve significante golfhoogte onder dit peil.

Met het variëren verloop van het waterpeil gedurende een hoogwatergolf of stormopzet varieert dus ook de plek waar de golfklappen optreden. Golfoploop 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 [5]). 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.

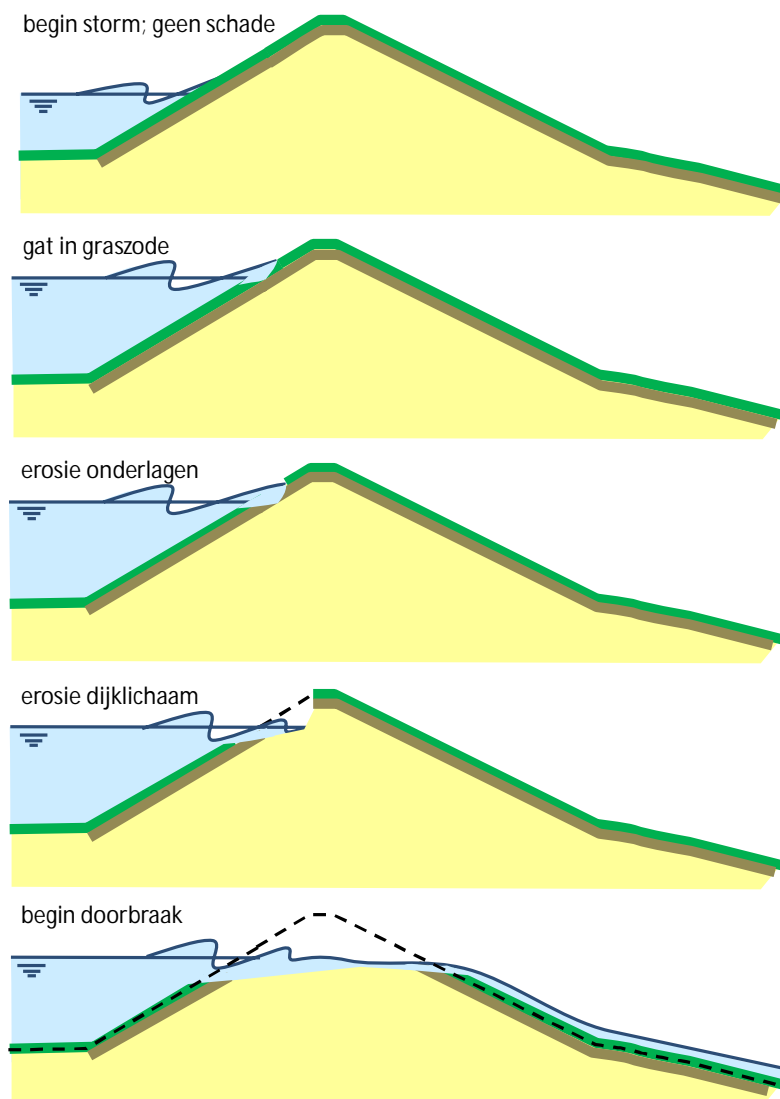


Figuur 7.1 Schetsmatige weergave van een golfklap op het talud, de grondwaterstroming (dunne blauwe peilen) en grondverplaatsing (dikke bruine peilen)

Een dicht gewoven wortelnet van een graszode heeft een grote sterkte en veerkracht. Uit golfgootproeven 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 [6]. 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 een deelmechanisme van GEBU. 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 binnen GEBU. 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 zal dit proces uiteraard veel langzamer gaan dan in zand. Als er zand aanwezig is, dan wordt er geen erosie-sterkte in rekening gebracht. Voor klei wordt onderscheid gemaakt tussen de laag tot 0,5 m onder het taludoppervlak en klei die dieper zit. Voor beide lagen is een apart erosiemodel. Aannemende dat de dijk een zandkern heeft met daarop een kleilaag met grasbekleding, wordt falen van de grasbekleding ten gevolge van erosie door golfklappen gedefinieerd als het moment waarop de kleilaag lokaal is weggeërodeerd en de erosie van het zandlichaam dus begint (faaldefinitie).



Figuur 7.2 Schetsmatige weergave faaltraject veroorzaakt door erosie grasbekleding door golfklappen

Als erosie leidt tot een resterend dijkprofiel 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 dijkprofiel 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.

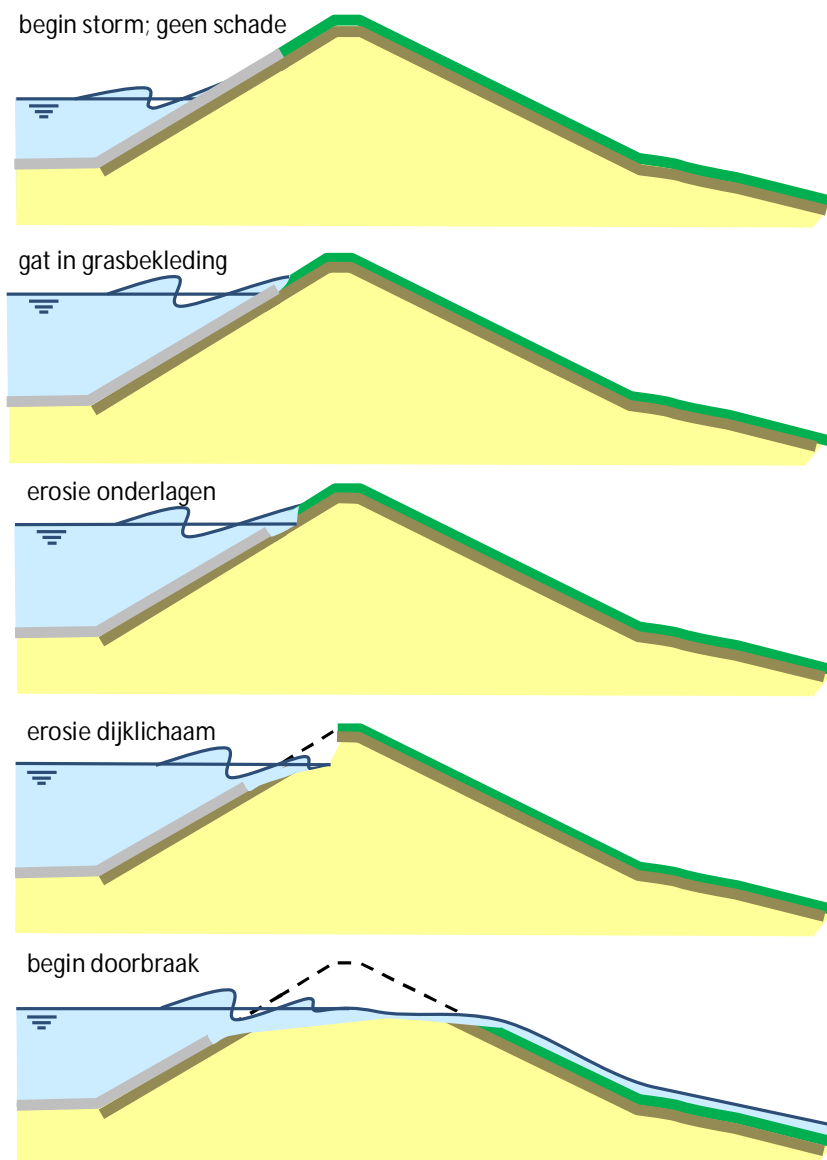
De stroming van de oplopende en neergaande golftong is turbulent, waardoor de graszode wordt onderworpen aan een snel wisselende waterdruk. De drukwisselingen planten zich gedempt en vertraagd door in de zode en de hieronder liggende grondlagen. Hierdoor en door de ruimtelijke variabiliteit van de wisselende 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 toetsen graszode ten opzichte van de stilwaterlijn. Ook de stormduur, of eigenlijk de tijd dat een te toetsen 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 golfploop wordt gedefinieerd als het moment waarop de sterk doorwortelde toplaag met een dikte van circa 0,2 m lokaal wordt doorbroken en de erosie van de onderlaag begint (faaldefinitie).

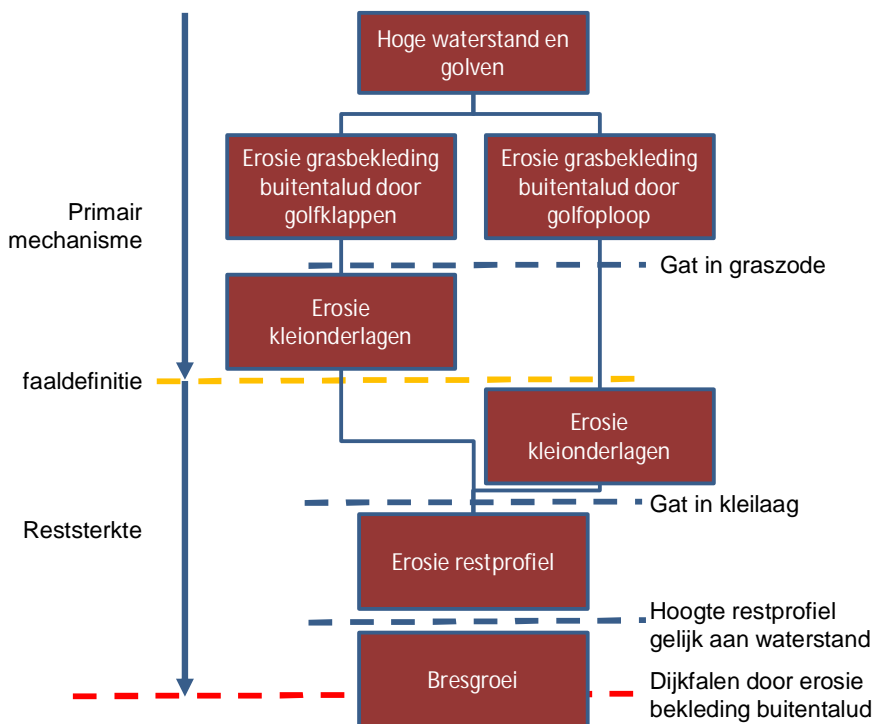
Na het falen van de grasbekleding kan de erosie van de onderlagen en de dijk kern uiteindelijk leiden tot kruindaling en uiteindelijk tot falen van de dijk. Dit is de reststerkte van de dijk na falen van de grasbekleding. Dit proces verloopt vergelijkbaar met dat bij falen van de grasbekleding door golfklappen (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 reststerkte na falen van de graszode in de golfploopzone. 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 golfploop

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 de volgende Figuur 7.4.



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

7.2.4 Beknopte modelbeschrijving van de toets voor erosie buitentalud

7.2.4.1 Erosie door golfklapbelasting

In de toets (laag 1 en 2) komen zowel het falen van de grasbekleding (deelmechanisme) als erosie van de onderlagen bestaande uit klei (deelmechanisme) aan bod. Voor beide processen is er een empirisch model waarmee op grond van de belasting en de bekledingseigenschappen een conservatieve tijdsduur voor het proces kan worden bepaald: de zogenaamde standtijd. De standtijd van de grasbekleding en die van de onderlagen bestaande uit klei worden bij elkaar opgeteld en vergeleken met de belastingduur. Bij de berekening van de erosie van de onderlagen wordt nog onderscheid gemaakt tussen de klei tot een diepte van 0,5 m en dieper gelegen klei. Aantasting van de zandkern na het doorbreken van de kleilagen maakt geen onderdeel uit van de Gedetailleerde toets, maar wordt tot de reststerkte gerekend.

7.2.4.2 Erosie door golfoploop

Bij de toets (laag 1 en 2) wordt alleen rekening gehouden met het falen van de grasbekleding. Voor de modellering van erosie van de onderlagen in de oploopzone is geen model beschikbaar. Die erosie en de erosie van de zandkern, de reststerkte, kan eventueel in de Toets op maat worden gekwantificeerd. De stabiliteit van de overgangsconstructie van gras naar eronder gelegen harde bekleding dient daarbij in het oordeel te worden betrokken.

7.3 Grasbekleding afschuiven 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 [2]. Deze studie is onder andere uitgevoerd voor de situatie van een steenzetting op een kleilaag op zand, maar 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.

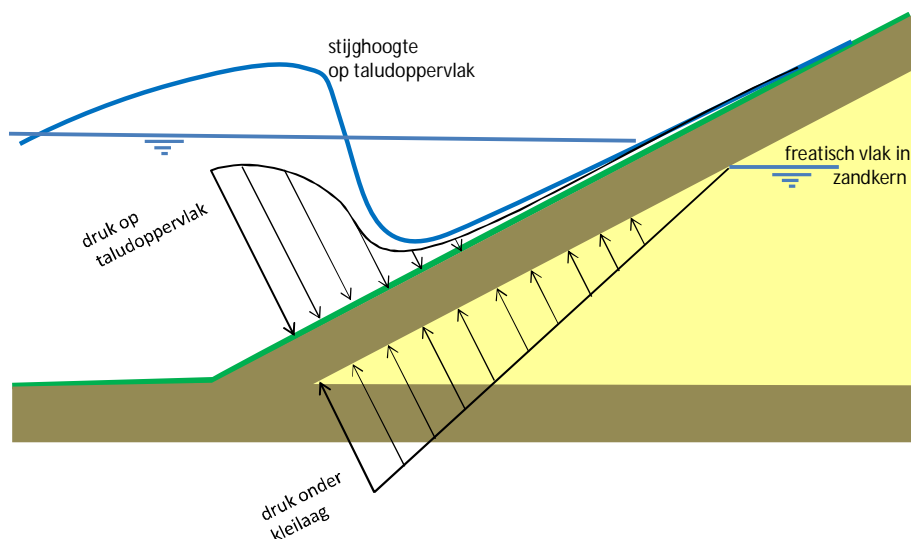
Ook plaatselijke vervormingen van de kleilaag zelf als gevolg van golfklappen maken geen onderdeel uit van het hier beschreven mechanisme.

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 GABU is dit anders. De belastingsituatie is gekoppeld aan een hoogwatersituatie en niet aan een situatie met een lage buitenwaterstand na hoogwater. Bij GABU 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.



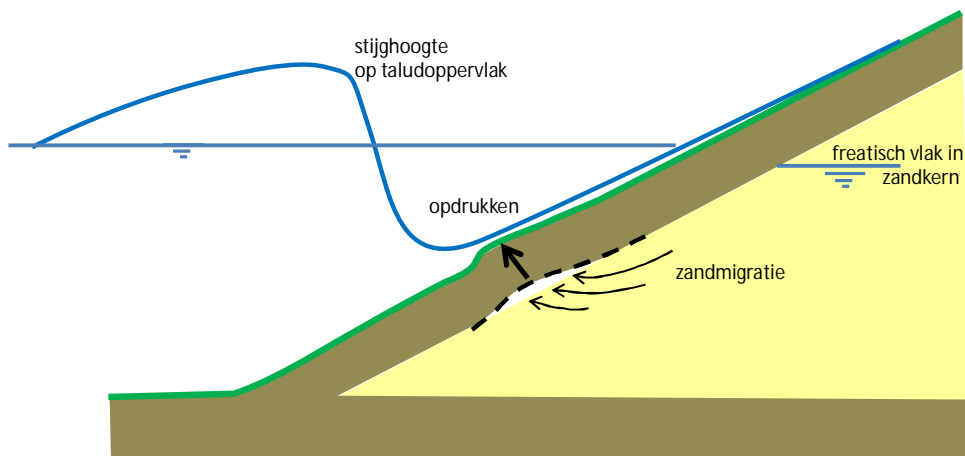
Figuur 7.5 Gemodelleerde weergave kritische situatie voor de stabiliteit van de kleibekleding bij golfneerloop

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.

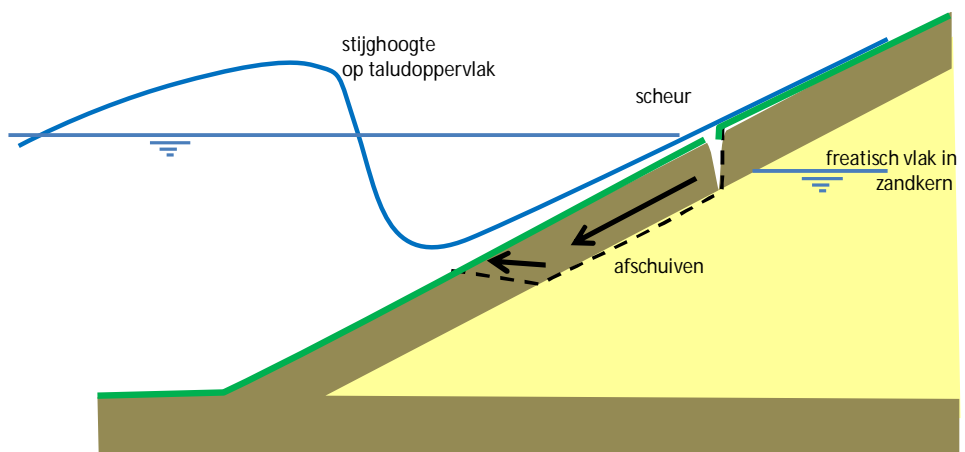
Een hoog freatisch vlak in de dijk kan ook optreden indien er onder dagelijkse omstandigheden onvoldoende drainage van de zandkern mogelijk is in combinatie met een langdurige regenperiode. Dit kan dan leiden tot stabiliteitsproblemen van de kleilaag en/ of het uitspoelen van zand, of wel micro-instabiliteit.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

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.

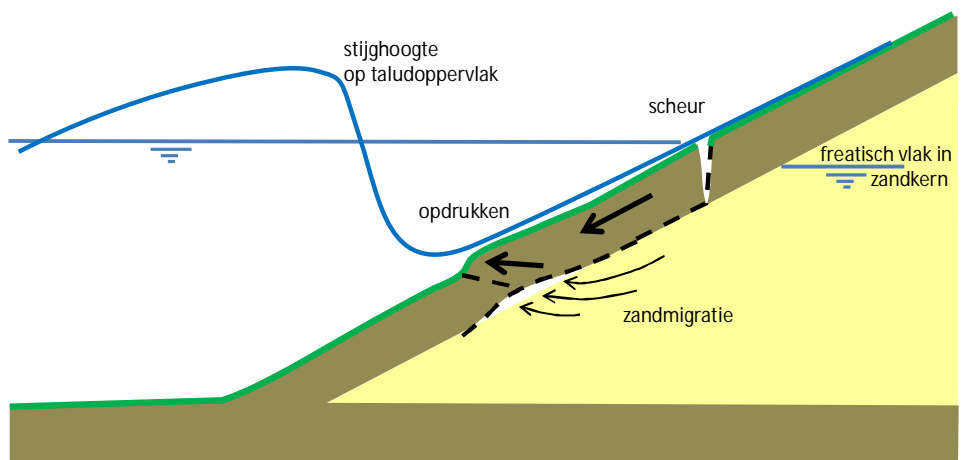
Het ongunstige verval over een deel van de kleilaag kan leiden tot opdrukken van de kleilaag (Figuur 7.6), tot afschuiven van de kleilaag (Figuur 7.7) of tot een combinatie van beide mechanismen (Figuur 7.8). Welk van de mechanismen maatgevend is, hangt af van de specifieke situatie, zoals van de sterkte 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 gewichtsc component 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 [3].

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.

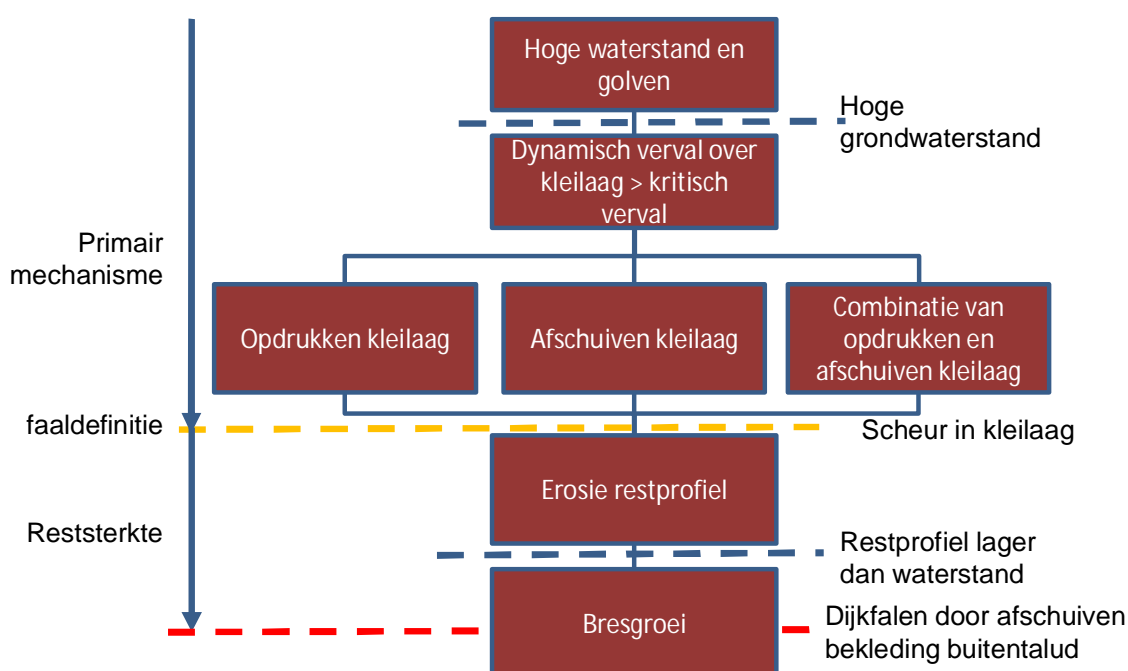
Wordt de druk te hoog dan wordt verondersteld dat de kleilaag opbarst: de klei met de graszode breekt. Dit kan gepaard gaan met het plotseling uitspoelen van zand. Bovendien zal de erosiebestendigheid van de bekleding, graszode en klei, zijn aangetast. Golven zullen eerst de restanten van de kleilaag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

Ook zonder opdrukken van de kleilaag kan de bekleding falen optreden 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 overstromen 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 vervolproces 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

7.3.4 Beknopte modelbeschrijving van de toets op afschuiven buitentalud

Voor de Gedetailleerde toets op afschuiving van het buitentalud (GABU) wordt een empirische relatie (black-box model) gebruikt die is ontwikkeld voor steenzettingen op een kleilaag (zie [2] en [3]). Alleen de dikte van de kleilaag, golfhoogte en de taludhelling worden beschouwd. Op basis van een empirische formule wordt met deze parameters getoetst of de kans op afschuiven van de bekleding voldoende klein is. Reststerkte wordt niet meegenomen. Een afschuivende bekleding zal op een zand ondergrond liggen, waarvan de reststerkte gering is of nog onvoldoende bekend.

In een geavanceerde toets kan een schatting worden gemaakt van de optredende waterspanningen in het onderliggende zand en op het talud en kan de geotechnische stabiliteit worden berekend. Hiervoor zijn diverse modellen beschikbaar, bijvoorbeeld D-Geostability met het Spencer - van der Meij model [4], of een FEM-programma.

7.4 Grasbekleding erosie 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, waardoor de grasbekleding wordt blootgesteld aan een sterk wisselende waterdruk en kan eroderen.

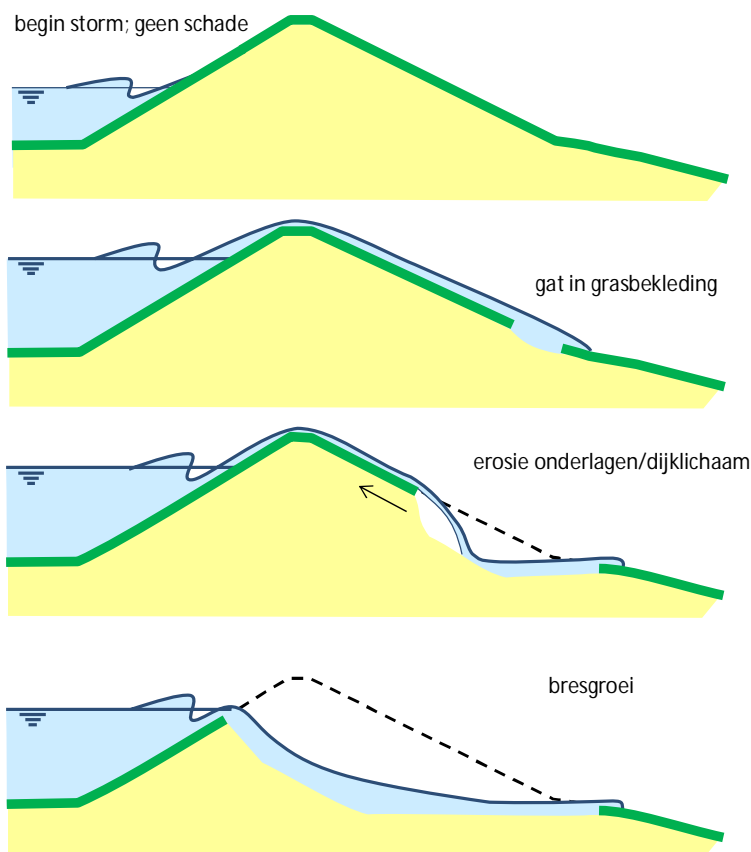
De sterkte van de grasbekleding concentreert zich in de toplaag van circa 20 cm dikte. Deze toplaag bestaat uit de graszode van 5 à 10 cm dikte en de hieronder gelegen zone waar de wortels nog een grote invloed hebben op de erosiebestendigheid van de grond. Uit grootschalige golfoverslagproeven is gebleken dat een graszode met een dicht wortelnet zeer

effectief is in het vasthouden van grond in deze stroming. Het geleidelijk wegspoelen van gronddeeltjes uit en door de zode blijkt dan ook niet maatgevend voor de sterkte van de bekleding.

Uit waarnemingen is gebleken dat de wortelmat ergens scheurt waardoor ineens een stuk van de zode uit de bekleding loskomt. Er is bij meerdere overslagproeven geconstateerd dat een eerste gat in de zode leidt tot het benedenwaarts afstropen van de zode en de schade slechts langzaam verdiept. In een enkel geval verdiepte de erosiekuil zich echter veel sneller.

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 (faaldefinitie).

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 reststerkte heeft om bresvorming te voorkomen. Binnen de Eenvoudige en Gedetailleerde toets wordt reststerkte 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

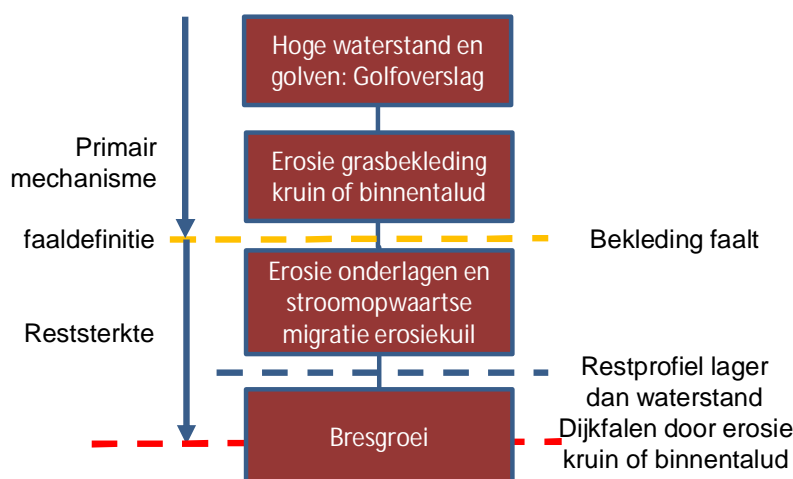
De belasting, golfoverslag, wordt gekarakteriseerd door het gemiddeld overslagdebiet in $m^3/s/m$ of $l/s/m$. Het maakt echter een groot verschil of het golfoverslagdebiet een gevolg is van een relatief hoge waterstand en lage golven of een relatief lage waterstand en hoge golven. In het eerste geval 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. Zowel de sterkte van de graszode kan rondom een overgang lager zijn, bijvoorbeeld omdat het gras niet vastgroeit aan een object, en de belasting kan groter zijn doordat de drukgradiënten op het talud groter zijn rondom 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

7.4.3 Beknopte modelbeschrijving van de toets voor erosie kruin en binnentalud

Alleen het falen van de grasbekleding, de doorwortelde toplaag van ca. 20 cm, door erosie door golfoverslag wordt getoetst (Toetslaag 1 en 2). De modellering die daarvoor in het kader van WTI ter beschikking gestelde software is opgenomen, bestaat uit empirische formules geijkt aan de resultaten van diverse grootschalige proeven. In deze modellering wordt rekening gehouden met de kwaliteit van de grasbekleding, het overslagdebiet, de golfhoogte. Binnen de Eenvoudige en Gedetailleerde toets wordt reststerkte van de onderlagen niet meegenomen.

7.5 Grasbekleding afschuiven binnentalud

7.5.1 Inleiding en afbakening

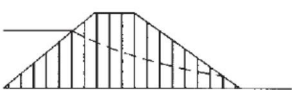



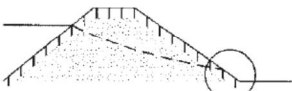
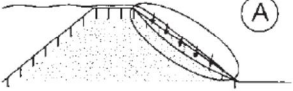
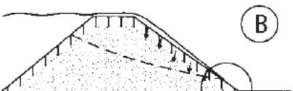

Hoewel 'afschuiven' de alom geaccepteerde benaming voor dit faalmechanisme is, zou stabiliteitverlies een betere benaming zijn. De bekleding kan als gevolg van een te groot drukverschil over de bekleding opdrukken, afschuiven of een combinatie van beide

mechanismen vertonen. Ook kan zand uitspoelen als gevolg van een buitenwaarts gerichte gradiënt veroorzaakt door uitredend 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 (GABI), de graszode plus de eventuele kleilaag, bij golfoverslag is nauw verwant met het mechanisme micro-instabiliteit (STMI), hoofdstuk [4]. Grote delen van de onderstaande tekst komen dan ook overeen met passages uit hoofdstuk [4]. Bij micro-instabiliteit worden problemen veroorzaakt door water dat door de dijk sijpelt. Er hoeft geen golfoverslag te zijn. Bij het mechanisme GABI 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 GABI maatgevend is, terwijl zonder significante golfoverslag het mechanisme STMI maatgevend is.

De verschillen (en overeenkomsten) worden geïllustreerd door Figuur 7.12 uit [1].

type dijk	microstabiliteit	stabiliteit bij overslag
kleidijk	 geen probleem	 infiltratie en afschuiven
zanddijk	 uitspoelen	 erosie binnentalud
zanddijk met kleiafdekking	 afdrukken/afschuiven	 infiltratie en afschuiven (A)
		 infiltratie en micro-instabiliteit (B)
		 afschuiven bovenste deel talud

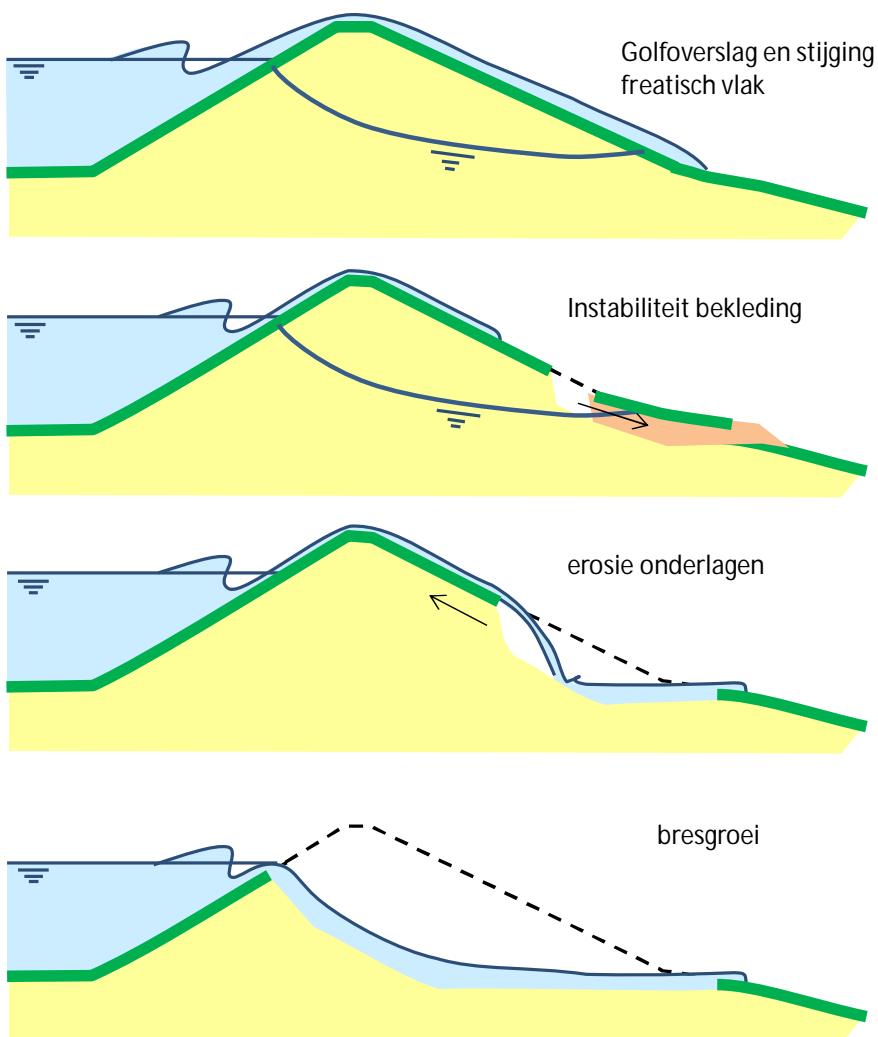
Figuur 7.12 Schematische weergave onderscheid tussen microstabiliteit en stabiliteit bekleding bij golfoverslag of overloop (overgenomen uit [1])

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.

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 gelijk 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 en 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 [6].



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

De ontwikkeling van waterspanningen bij hoogwater is naast de genoemde hydraulische randvoorwaarden 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 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 [2]:

- 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 [1] 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 op kunnen treden:

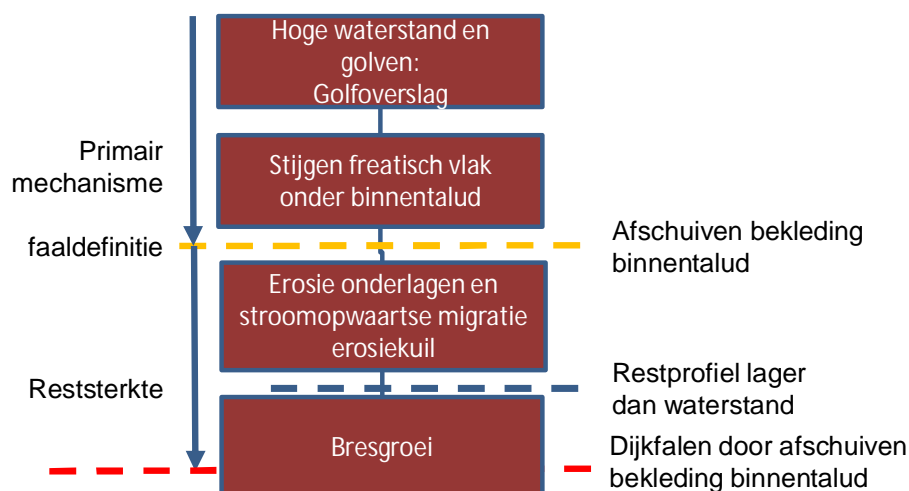
- A Bij een zanddijk met afdekkende kleilaag op het binnentalud:
 - 2 Afschuiven van (een deel van) het binnentalud door waterdruk onder de kleilaag.
 - 2 opdrukken van de kleilaag op het binnentalud door waterdruk onder de kleilaag.
 - 3 Combinatie van afdrücken en afschuiven door waterdruk onder de 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 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 [4].

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 getoetst. Erosie van de zandkern kan vervolgens leiden tot een profielhoogte onder het waterpeil, gevolgd door bresvorming en overstroming van het achterland. Dit laatste maakt geen onderdeel uit van de toetsing.

7.5.3 Overzicht van het faaltraject afschuiven van grasbekleding op binnentalud

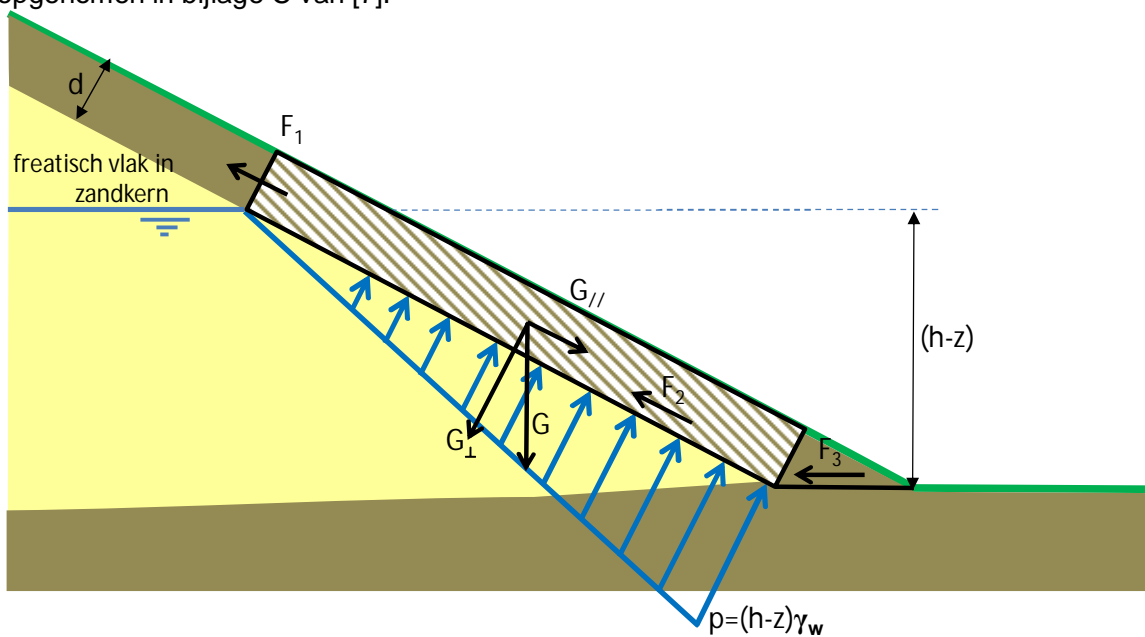
Het proces dat leidt tot falen van de dijk als gevolg van instabiliteit van de grasbekleding op het binnentalud als gevolg van golfoverslag staat in Figuur 7.14.



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

7.5.4 Beknopte modelbeschrijving van de toets afschuiven binnentalud

De Gedetailleerde toets (laag 2) beslaat alleen de stappen 'stijging van freatisch lijn door hoge buitenwaterstand en golfoverslag' en 'Instabiliteit van de bekleding binnentalud'. De modellering die daarvoor in de toetssoftware is opgenomen, bestaat uit een set formules die gebaseerd zijn op evenwichtsbeschouwingen van de laag die afschuift. Een voorbeeld van de daarbij gehanteerde uitgangspunten is gegeven in Figuur 7.15. De volledige set formules is opgenomen in bijlage C van [7].



Figuur 7.15 Modellering van krachten op een grondmoot voor de beschrijving van het evenwicht parallel aan het talud

In de Eenvoudige en Gedetailleerde toets wordt geen rekening gehouden met de reststerkte ten gevolge van erosie van de onderlagen en de terugschrijdende erosie van de schade richting buitenwaterstand.

7.6 Literatuur grasbekledingen

- [1] *Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies, Geotechnische aspecten van dijken, dammen en boezemkaden*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, juni 2001.
- [2] *Black box model voor afschuiving bij steenzettingen*. WL|Delft Hydraulics rapport H4635. Delft, november 2007.
- [3] *Aanpassing toetsmethodiek Afschuiving bij steenzettingen*. R. Bosters. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rapportnummer PZDT-R-08300, 1 september 2008.
- [4] *A Genetic Algorithm for Solving Slope Stability Problems: from Bishop to a Free Slip Plane*, Van der Meij, R. and J.B. Sellmeijer. Proceedings 7th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE) Trondheim. Balkema, Rotterdam, 2010.

- [5] *Studie voor richtlijnen klei op dijktafuds in het rivierengebied*, Deltares rapportnummer 1202512-000-GEO-0002. Delft, juli 2010.
- [6] *Handreiking Toetsen Grasbekledingen op Dijken t.b.v. het opstellen van het beheerdersoordeel (BO) in de verlengde derde toetsronde*. Rijkswaterstaat 2012.
- [7] *Toetsschema's en foutenboom grasbekledingen, Product 5.25. WTI2017 Onderzoek en ontwikkeling landelijk toetsinstrumentarium*. A. van Hoven. Deltares rapport 1220086-001-HYE-0001, september 2015.
- [8] *Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken – deel 1 Bovenrivierengebied*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, september 1985.
- [9] *Microstabiliteit overzicht modellering*. GeoDelft kenmerk 393440/81, Delft, 2000.
- [10] *Micro-instabiliteit binnentalud zanddijk*. Delft Cluster, Deltares kenmerk 418020-0009, Delft, maart 2008.
- [11] *Schematiseringshandleiding voor toetsing grasbekledingen, WTI-2017, cluster 5, Product 5.27*. A. van Hoven. Deltares rapportnr. 1220086-003-HYE-0002, Versie 2. Delft, december 2015.
- [12] *Functional design semiprobabilistic assessments Ringtoets*. R.B. Jongejan, W.J. Klerk. Deltares rapport 1209431-008-ZWS-0009. Delft, May 2015.
- [13] *Semi-probabilistic assessment of wave impact and runup on grass revetments, WTI Product C.4*. W.J. Klerk, R. Jongejan. Deltares report 1220080-005-ZWS-0003. Delft, December 2015.

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).

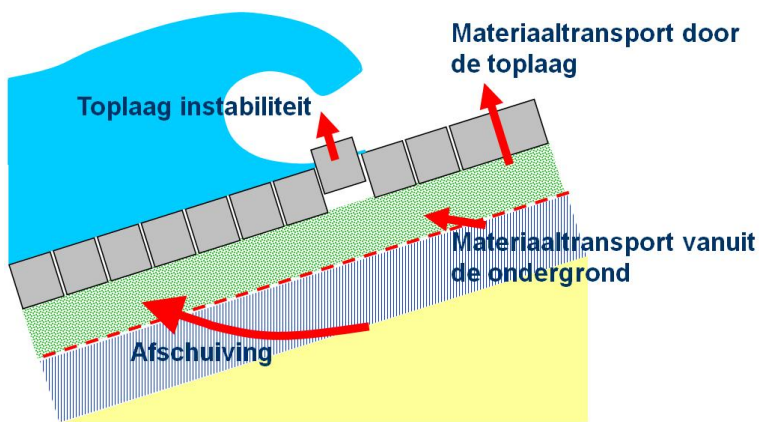


Figuur 8.1 Aanleg van een steenzetting waarbij verschillende lagen zichtbaar zijn

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

- 1 Toplaaginstabiliteit onder golfaanval (ZTG) (een zetsteen wordt uit de steenzetting gelicht als gevolg van brekende golven op het talud).
- 2 Toplaaginstabiliteit onder langsstroming (ZTS) (een zetsteen wordt uit de steenzetting gelicht als gevolg van sterke stroming langs de dijk).
- 3 Afschuiving (ZAF) (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 (ZMO) (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 (ZMG) (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 (ZOB) (de overgang is in slechte staat waardoor de ondergrond of het filter kan uitspoelen). Het bezwijken van de overgangs-, teen- of aansluitingsconstructie (ZOB) wordt niet in het WTI getoetst en wordt daarom hier niet behandeld.



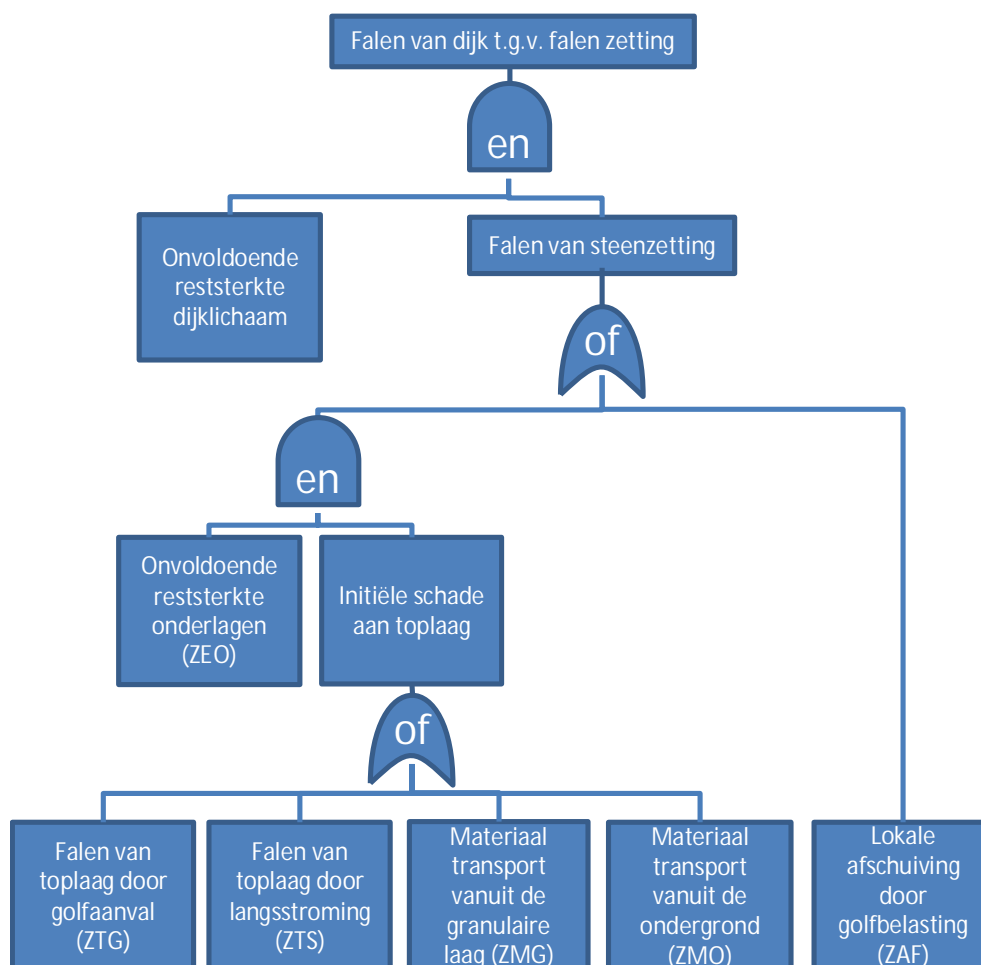
Figuur 8.2 Enkele bezwijkmechanismen van steenzettingen

Na het bezwijken van de toplaag leveren de onderlagen nog enige sterkte (Erosie van de onderlagen ZEO), 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 sterkte volgens het mechanisme waarbij de toplaag schade oploopt bedoeld. In deze rapportage wordt het begrip reststerkte gehanteerd voor de sterkte die niet gekwantificeerd is.

Het bezwijken van de overgangs-, teen- of aansluitingsconstructie (ZOB) wordt niet in het WTI2017 getoetst en is daarom hier niet opgenomen.

In de volgende paragrafen wordt ingegaan op de vijf andere initiële bezwijkmechanismen.



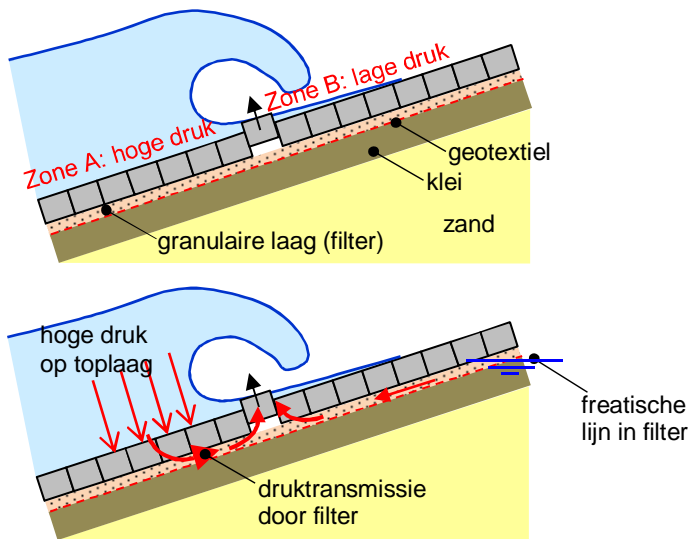
Figuur 8.3 Foutenboom falen waterkering als gevolg van bezwijken steenzetting

8.2 Instabiliteit van de toplaag door golfbelasting

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 (golfneerloop) 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.

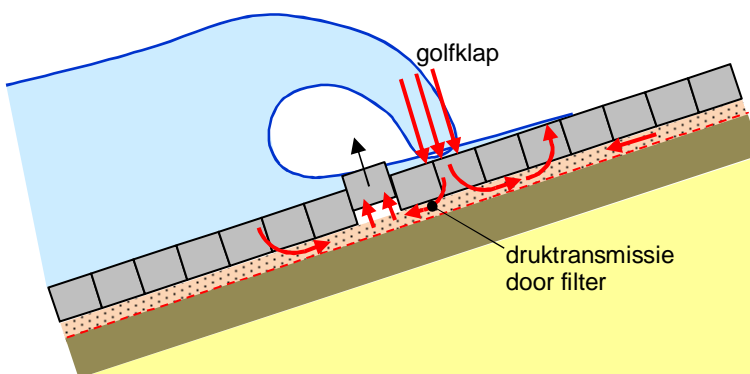
Deze situatie houdt in elke golf ca. 0,2 à 0,7 s aan en dat kan voldoende zijn om de zetstenen stukje bij beetje uit de toplaag te drukken, of ineens helemaal tijdens een grote golf.



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

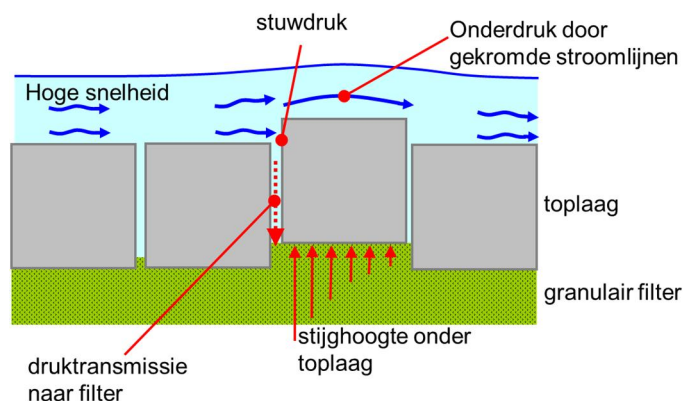
De mate waarin bovenstaande processen leiden tot een drukverschil over de toplaag is afhankelijk van de doorlatendheid van toplaag en de onderliggende granulaire laag. Als het filter relatief doorlatend is en de toplaag is relatief ondoorlatend, dan is dat ongunstig voor de stabiliteit van steenzetting,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

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 leklengte van een dergelijke constructie is relatief kort.

Omdat de leklengte 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 in deze paragraaf 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 golfloopniveau.

De belasting wordt veroorzaakt door verdwaalde zwakke golfklappen, het drukfront van het golfloopfront en hoge stroomsnelheden. Ook hier speelt de leklengte 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 die 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.
- Asfaltmestiek 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 Instabiliteit van de toplaag 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 bijvoorbeeld een schaaldijk langs een rivier.

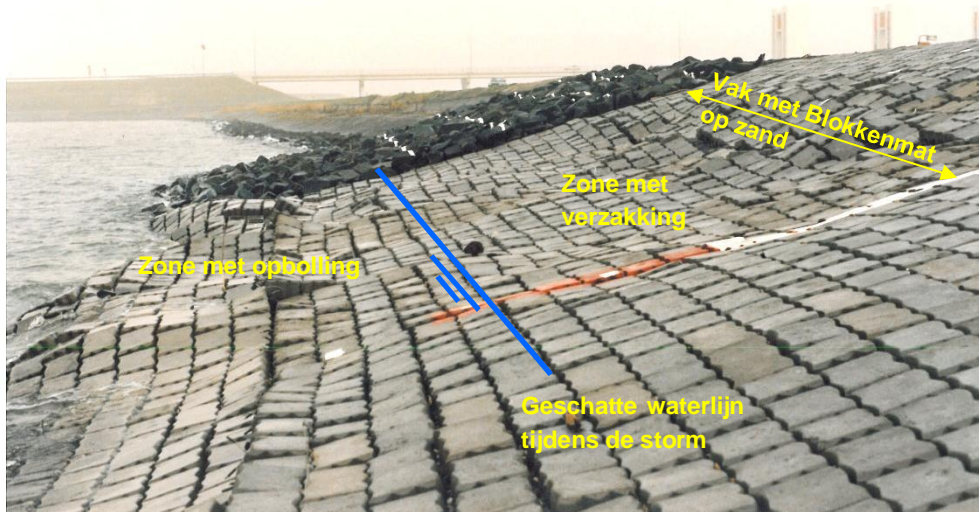
De stroming langs de dijk zal vooral kunnen leiden tot schade op plaatsen waar de steenzetting niet volledig vlak is gezet (uitstekende stenen, zie Figuur 8.6), ter plaatse van overgangsconstructies, aansluitingen of knikken in het talud.

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

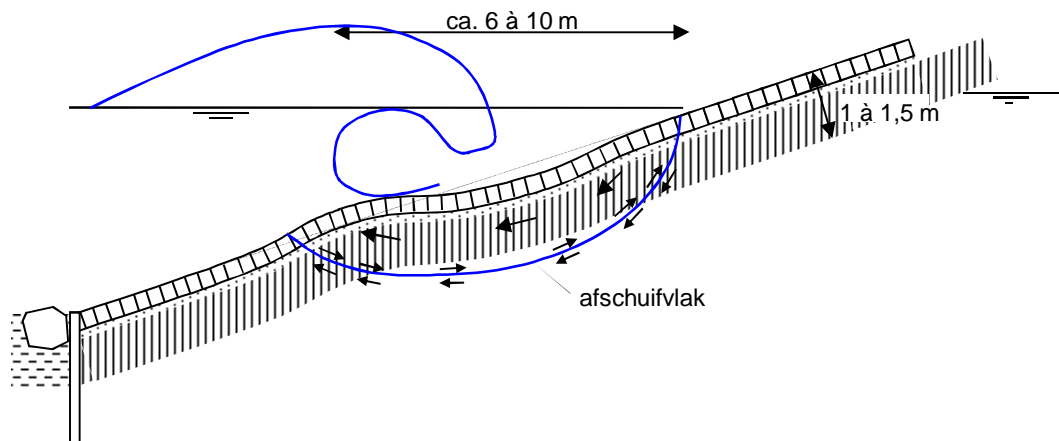
Golfbelasting kan niet alleen leiden tot bezwijken van de steenzetting, maar in bijzondere omstandigheden ook tot bezwijken van de ondergrond onder die steenzetting, zie Figuur 8.7.

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.

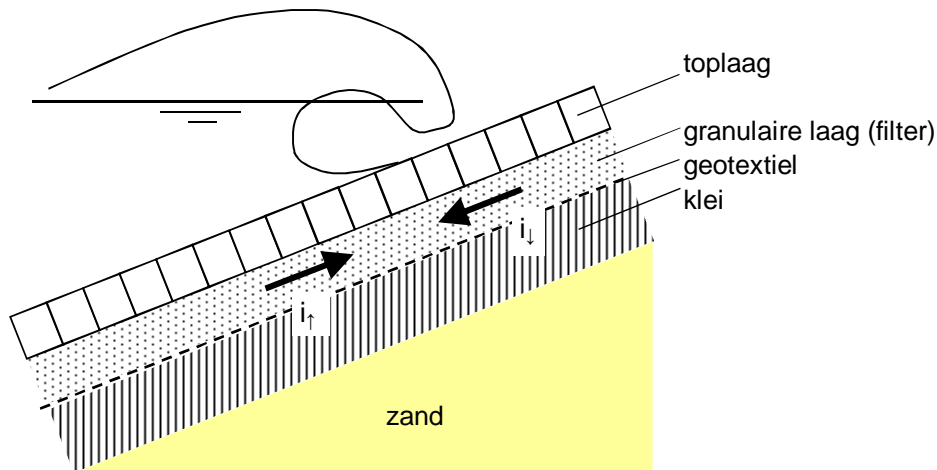


Figuur 8.8 Gemodelleerde weergave van de vervorming tot een S-profiel

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 werd in plaats van een geotextiel vaak vlijlagen op de klei gebruikt (minstens een dubbele laag) of een granulair 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 topplaat. 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 ZEO'. Dit is nader omschreven in paragraaf 8.8.2.

8.8 Overzicht van het faaltraject door bezwijken van de steenzetting

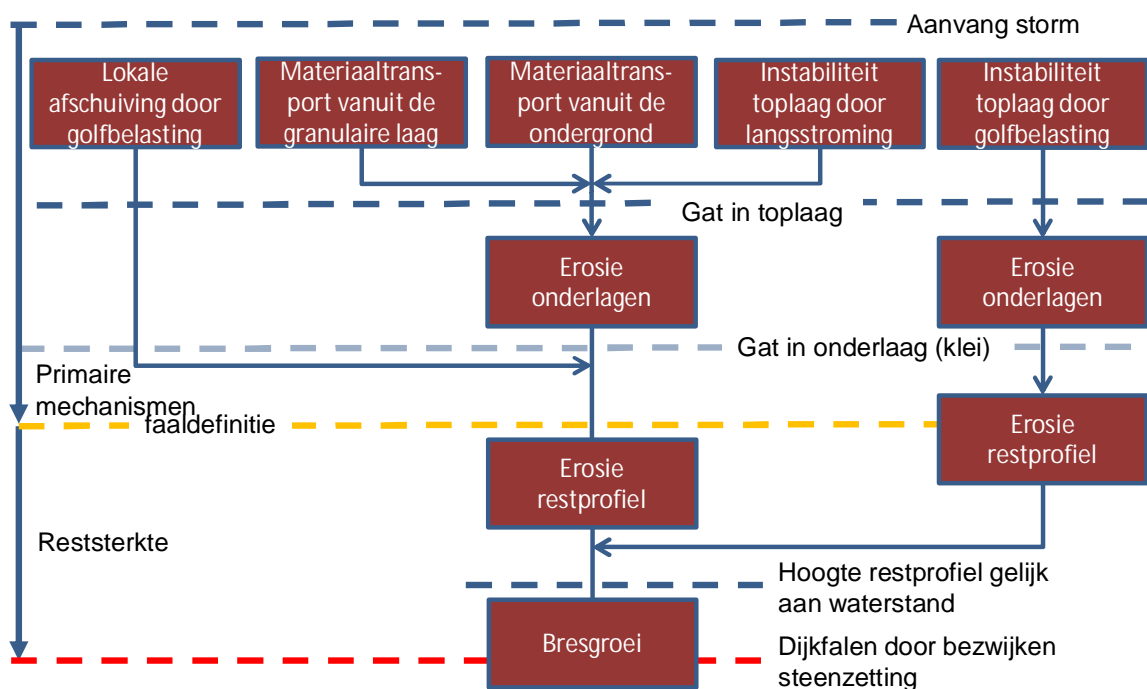
8.8.1 Inleiding

De steenzetting faalt als zij zodanig beschadigd is dat de zandkern niet meer wordt beschermd tegen de hydraulische belasting door golven of stroming (faaldefinitie). 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 is nog niet voldoende om de bekleding te laten falen. Daarvoor moet bij de meeste bezwijkmechanismen ook nog erosie van de onderlagen (ZEO) 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.



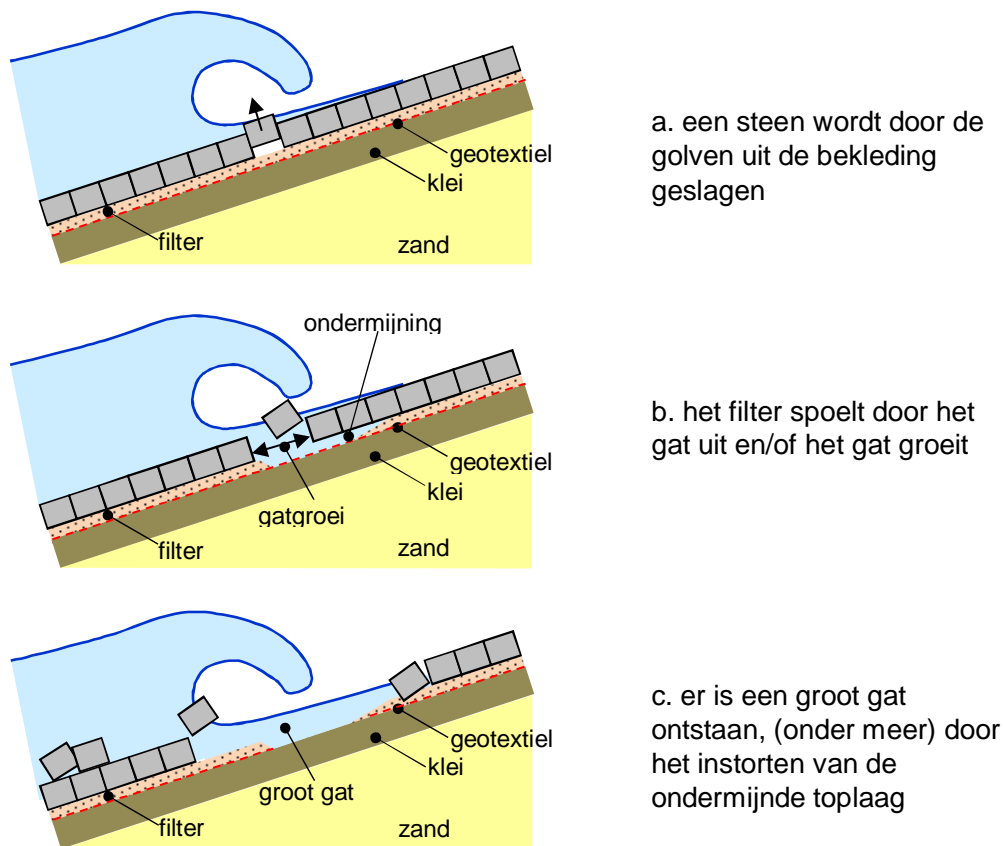
Figuur 8.10 Gebeurtenissen leidend tot falen van de dijk door bezwijken van de steenzetting

8.8.2 Falen als gevolg van instabiliteit van de toplaag

Veelal is instabiliteit van de toplaag door golfbelasting (ZTG) bepalend voor de sterkte van de bekleding. Daarom is dat initiële bezwijkmechanisme als uitgangspunt gekozen voor deze beschrijving.

Het mechanisme "instabiliteit van de toplaag door golfaanval" 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 (ZEO). 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.



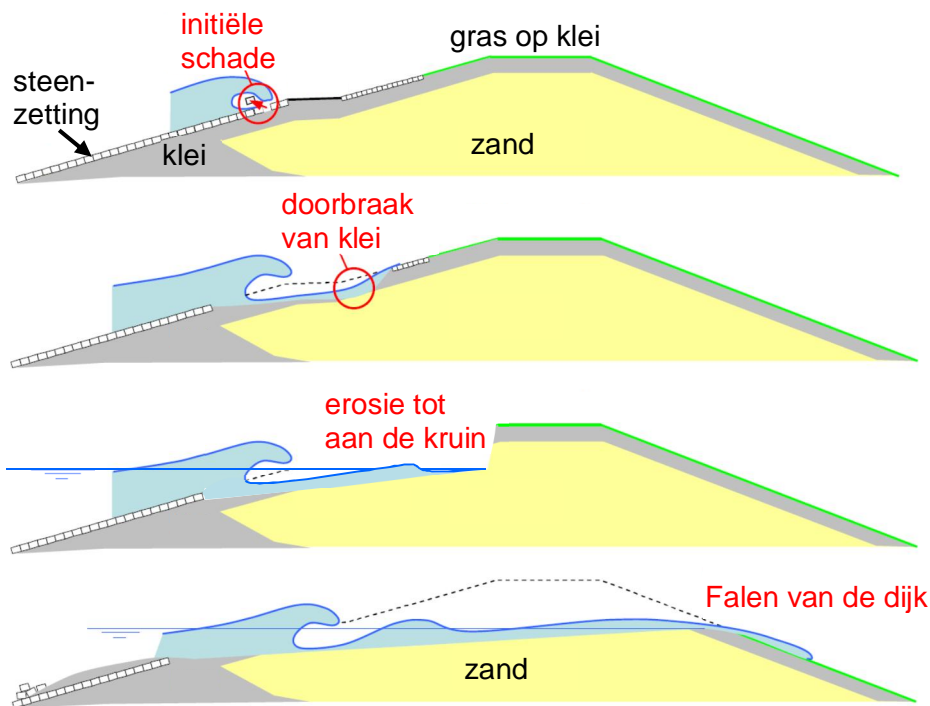
Figuur 8.11 Ontwikkeling van schade aan de steenzetting: van toplaag tot geotextiel

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 reststerkte (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 reststerkte.

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 vervolgen in de zandkern. 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 reststerkte 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 achterligt. Dergelijke dijken hebben daarom een grote tot zeer grote reststerkte.



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 reststerkte, zal de erosie tot een dijkdoorbraak leiden. Anderzijds kan de reststerkte voldoende zijn om een doorbraak te voorkomen, ondanks dat de steenzetting reeds is bezwaken. Daarmee is de reststerkte 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 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).

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 ZMO (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 ZMG (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 wordt er voor de Gedetailleerde toets van uitgegaan 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 de zandkern kan aanvallen en voortgaande erosie kan veroorzaken. 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 reststerkte, terwijl in de toetsmethode dat niet wordt meegeteld. De Gedetailleerde toets 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. Omdat voor dit initieel mechanisme geen Gedetailleerde toets beschikbaar is wordt op het verloop van de schadeontwikkeling niet ingegaan.

8.9 Beknopte modelbeschrijvingen voor de te toetsen deelmechanismen

Deze paragraaf gaat in op de modellen die worden gebruikt voor de Gedetailleerde toets van de stabiliteit van steenzettingen.

De Gedetailleerde toets van de stabiliteit van steenzettingen betreft feitelijk de beoordeling van een tweetal stadia. Beide stadia zijn in Figuur 8.10 aangegeven:

- Gat in de toplaag: bekleding bezwaken.
- Gat in de onderlaag: bekleding faalt.

Maar voordat die beoordeling plaatsvindt wordt eerst vastgesteld of de te toetsen steenzetting valt binnen de toepassingsvoorwaarden van het rekenmodel.

8.9.1 Initieel bezwijkmechanisme resulterend in gat in toplaag

Het gat in de toplaag kan door een vijftal initiële mechanismen ontstaan. Elk van die mechanismen heeft zijn eigen modellering, waarvan de benodigde formules zijn opgenomen in de WTI-toetssoftware.

Het initiële mechanisme *Lokale afschuiving door golfaanval (ZAF)* wordt beoordeeld met een empirische relatie die grote overeenkomsten vertoont met een vergelijking die volgt uit een evenwichtsrelatie van het totale bekledingspakket.

De belasting (H_s) gedeeld door de sommatie van bekledingsdikte maal de relatieve dichtheid wordt vergeleken met een factor maal de cosinus uit de taludhelling.

Voor het initiële mechanisme *Materiaaltransport vanuit de granulaire laag* (ZMG) wordt bij een open toplaag in essentie de geometrische dichtheid van de toplaag voor het filtermateriaal beoordeeld. De karakteristieke korreldiameter van de granulaire laag dient groter te zijn dan het maximum van spleetbreedte en eventuele gaten in de toplaag. Wordt niet voldaan aan die geometrische eis, dan wordt nog een erosiediepte in de gaten berekend om te beoordelen of er sprake is van een voldoende dynamisch evenwicht.

Voor het initiële mechanisme *Materiaaltransport vanuit de ondergrond* (ZMO) zijn diverse modellen beschikbaar die worden gebruikt afhankelijk voor de verschillende situaties: dunne/dikke filterlaag; wel/niet een geotextiel; ondergrond zand of klei. Voor diverse situaties wordt de met de lek lengte-theorie berekende verhangen in de filterlaag vergeleken met het kritische verhang. Het kritische verhang is steeds afhankelijk van de korreldiameter van de ondergrond.

Voor het initiële mechanisme *Toplaaginstabiliteit onder langsstroming* (ZTS) wordt geen gedetailleerde toets uitgevoerd. Als dit mechanisme mogelijk relevant is, moet een Toets op maat worden uitgevoerd.

Voor het initiële mechanisme *Toplaaginstabiliteit onder golfaanval* (ZTG) wordt voor de meest voorkomende bekledingen gebruik gemaakt van een model dat voor de belasting gebaseerd is op de lek lengte-theorie. De waterdrukken op het talud ten gevolge van golfbelastingen op het talud worden met de lek lengte-theorie omgerekend naar verschildrukken over de toplaag. Als het om een niet-geklemde zetting gaat bestaat de sterkte in hoofdzaak uit het gewicht van de zettingselementen (los blok) Is er wel sprake van klemming in de toplaag, dan wordt het gewicht vermeerderd met de boogwerking in de toplaag. De evenwichtsvergelijking loodrecht op het talud bepaalt of de sterkte afdoende is om de belasting te dragen.

8.9.2 Van bezwijken toplaag tot falen bekleding

Na het initiële bezwijkmechanisme volgt een beoordeling van de weerstand tegen erosie van de onderlagen. Uitzondering daarbij is het initieel mechanisme afschuiven. Bij dat mechanisme zullen toplaag en onderlagen afschuiven, waardoor de kans aanzienlijk is dat er direct een gat in de kleilaag ontstaat, zodat de zandkern direct kan worden belast door de golven: bij het mechanisme afschuiven (ZAF) wordt verondersteld dat de bekleding faalt zodra de bekleding bezwijkt.

Voor de ander mechanismen bestaat de weerstand tegen erosie van de onderlagen in essentie uit empirische relaties gebaseerd op modelonderzoek. Deze empirische relaties leveren een conservatieve schatting van de tijdsduur tot het ontstaan van een gat in de betreffende onderlaag aan de hand van enkele constructie- en belastingparameters. Als de tijdsduur nodig voor de erosie de belastingduur overtreft, dan is de erosieweerstand afdoende om falen van de bekleding te voorkomen.

Voor het initieel mechanisme *Toplaaginstabiliteit onder golfaanval* gaat de beoordeling nog iets verder. In de kalibratiestudie [3] is voor de toplaagstabiliteit onder golfaanval een veiligheidsfactor bepaald, waarbij de waarde afhankelijk is van de reststerkte van het

dijklichaam. Als de reststerkte van de dijk erg groot is, de dijk is erg breed in verhouding tot de golfhoogte, dan is het beschermingsniveau dat de toplaag moet bieden aan het erosiegevoelige dijklichaam geringer dan voor een smalle dijk. Voor de brede dijk is de benodigde veiligheidscoëfficiënt danook wat lager dan in geval van een smalle dijk. In de faaldefinitie voor de Gedetailleerde toets is voor het mechanisme *Toplaaginstabiliteit onder golfaanval* dus deels rekening gehouden met de erosieweerstand van het dijklichaam.

In *Tabel 8.1* worden voor de verschillende initiële bezwijkmechanismen de verschillende sterktecomponenten benoemd waarmee rekening moet worden gehouden in de Gedetailleerde toets. Als de belasting door langsstroming daartoe aanleiding geeft zal de beoordeling (ZTS) in een Toets op maat plaatsvinden.

Initieel mechanisme:	ZTG	ZMO	ZMG	ZAF	ZTS
Sterktecomponenten:					
Sterkte toplaag	Ja	Ja	Ja	Ja	NVT
Groei gat in toplaag/erosie van granulaire laag	Ja	Ja	Ja	Nee	NVT
Reststerkte geotextiel	Nee	Nee	Nee	Nee	NVT
Erosie onderlaag van klei	Ja	Ja	Ja	Nee	NVT
Reststerkte dijklichaam: erosie van de "overmaat" in breedte	Ja	Nee	Nee	Nee	NVT
Reststerkte dijklichaam: erosie van een smal dijklichaam	Nee	Nee	Nee	Nee	NVT

Tabel 8.1 Overzicht welke sterktecomponenten worden gebruikt in de Gedetailleerde toets van steenzettingen gegeven een initieel bezwijkmechanisme

8.10 Literatuur steenzettingen

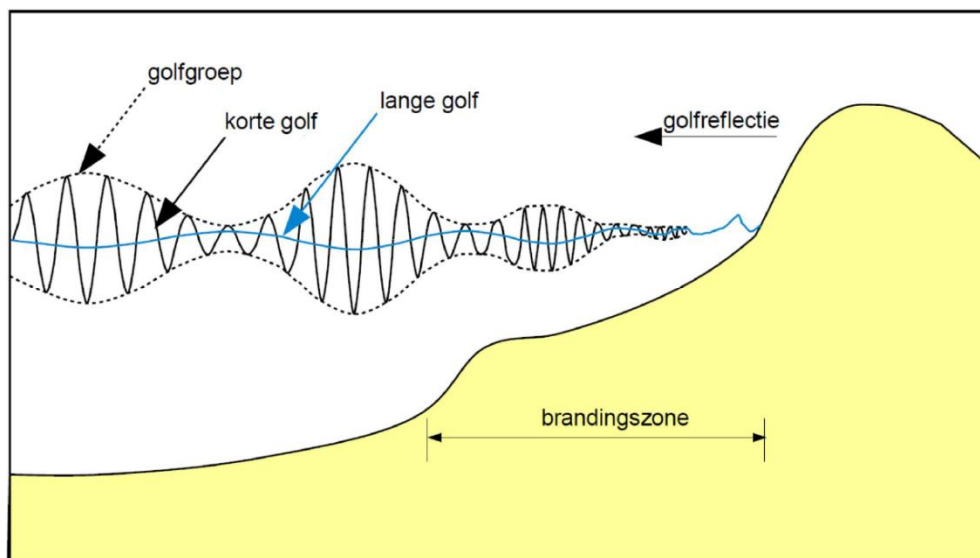
- [1] *Handreiking Dijkbekledingen, Deel 2: Steenzettingen*. In opdracht van RWS-WLV en Projectbureau Zeeweringen, januari 2015.
- [2] *Schematiseringshandleiding voor toetsing steenzettingen WTI-2017, Cluster 5, product 5.35*. M. Klein Breteler, G.C. Mourik. Deltares rapport 1220086-013-HYE-0008, versie 3. Delft, december 2015.
- [3] *A semi-probabilistic assessment rule for the stability of block revetments under wave attack*. R.B. Jongejan, M. Klein Breteler. Deltares rapport 1220080-004-ZWS-0002. Delft, August 2015.
- [4] *Functional design semiprobabilistic assessments Ringtoets*. R.B. Jongejan, W.J. Klerk. Deltares report 1209431-008-ZWS-0009. Delft, May 2015.
- [5] *Documentatie Steentoets2015, Excel-programma voor het berekenen van de stabiliteit van steenzettingen*. M. Klein Breteler. Deltares rapport 1209832-006-HYE-0006, november 2015.
- [6] *Handleiding Steentoets2015, Excel-programma voor het toetsen en ontwerpen van steenzettingen*. M. Klein Breteler. Deltares rapport 1209832-006-HYE-0008, november 2015.

9 Duinwaterkering

9.1 Fenomenologische procesbeschrijving

Het faalmechanisme duinafslag treedt specifiek op voor 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 basis voor de Hydraulische Randvoorwaarden 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 bij 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 windgolven.



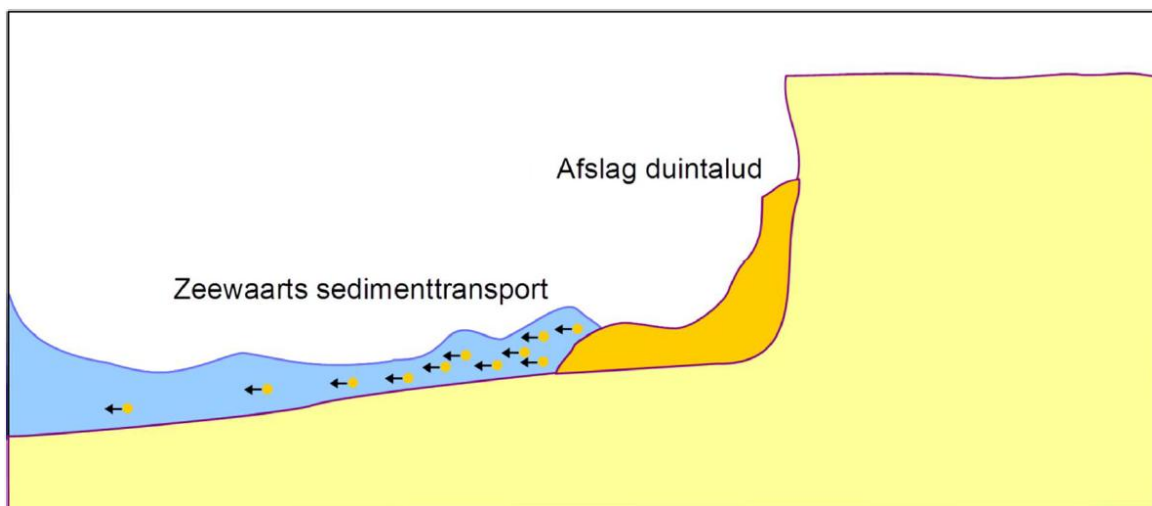
Figuur 9.1 Belasting van een duin door windgolven en lange golven

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 korreldeiameter van het zand van belang, waarbij een grotere korreldeiameter voor minder duinafslag zorgt.

Onder invloed van golven, stromingen en wind hebben duinwaterkeringen een dynamisch karakter. Reeds 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. Zonder deze maatregelen zou op plaatsen van structurele erosie tijdens stormen veel zand van het duin

afslaan dat vervolgens wordt afgevoerd naar omliggende gebieden. Als gevolg hiervan zou na verloop van tijd het duin zijn sterkte verliezen.

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.

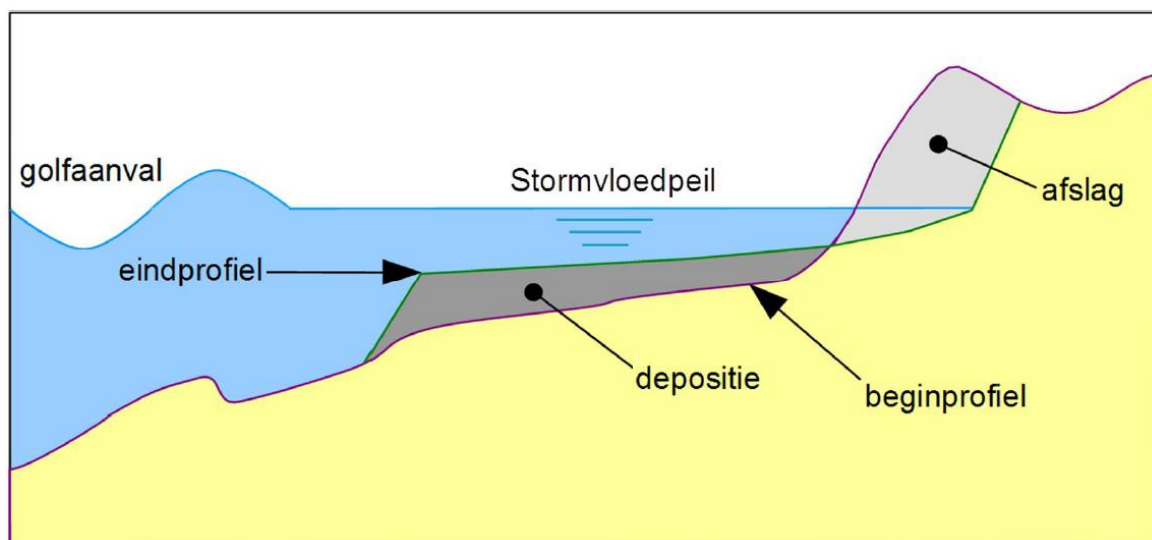


Figuur 9.2 Duinerosieproces door afslag en zeewaarts transport

Als door stormopzet de golven een duin gaan belasten, wordt het duinfront aan de onderkant uitgehold. Als gevolg hiervan wordt het duinalud 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 duinalud 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 voor het duinfront komen te liggen. Daardoor krijgen windgolven na verloop van tijd steeds minder 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 de belasting door de lange golven ook af. Als de hydraulische randvoorwaarden voor de kust (waterstand en golven) maar lang genoeg stationair blijven, zal er 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 de sterkte 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. Dit 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 geen significant netto zandtransport uit het beschouwde duinvak plaatsvindt. Alleen dan kan worden verondersteld dat de depositie op de vooroever gelijk is aan de afslag.

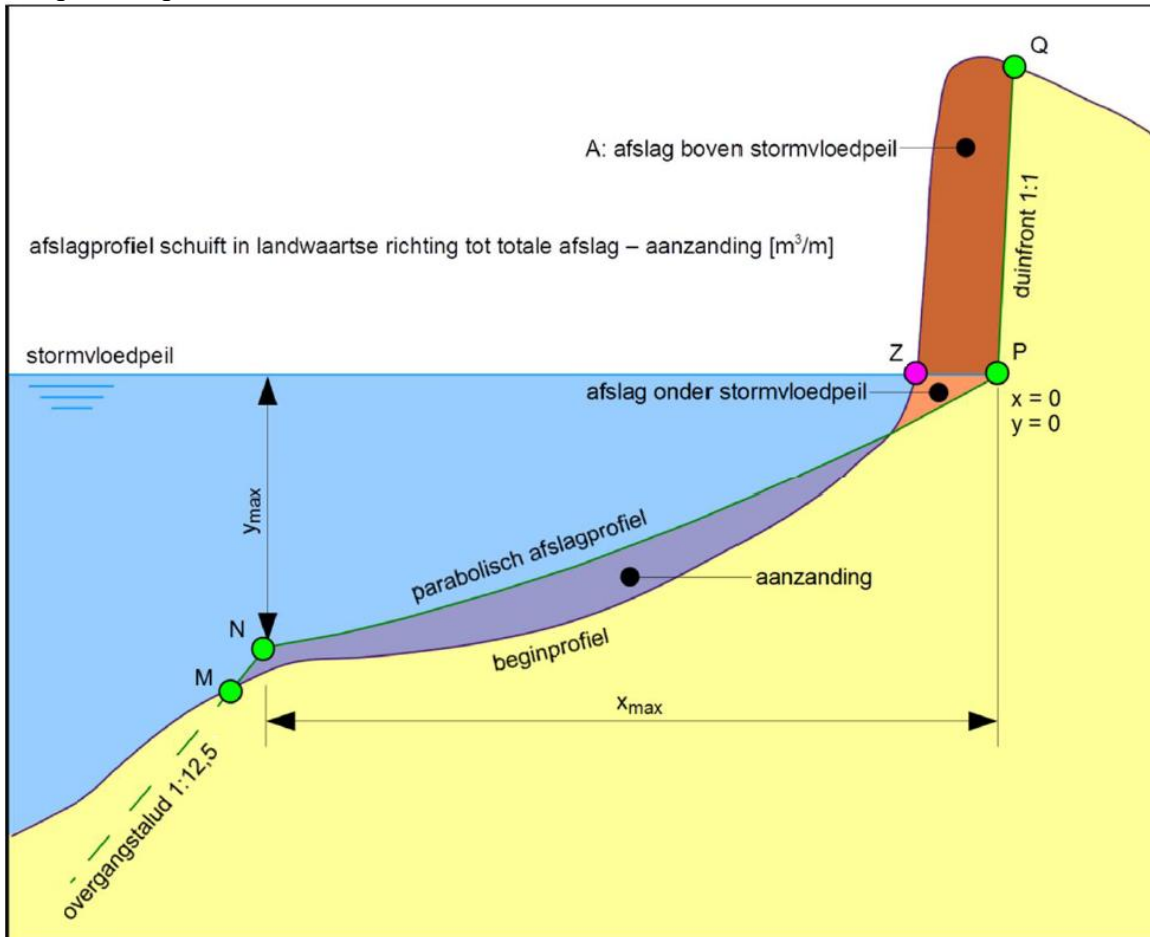
Er is vrijwel altijd sprake van zandtransport langs de kust, maar voor de beoordeling van een specifieke kustvak is het van belang of de instroom van zand door dat zandtransport langs de kust gelijk is aan de uitstroom van zand. In- en uitstroom zullen voor een uniforme rechte kustlijn elkaar in evenwicht 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.

Beoordeling van het faalmechanisme duinafslag in WTI2017

Binnen het WTI2017 is er alleen een Gedetailleerde toets beschikbaar voor duinafslag voor een enkele duinregel met uniforme condities in langsrichting. In deze toetsing is niet voorzien het toetsen van aansluitingsconstructies, hybride keringen, NWO's, lage duinen, kromme kustlijnen en andere complexe duinwaterkeringen. Bijzonderheden zijn aanleiding om een geavanceerde toets uit te voeren.

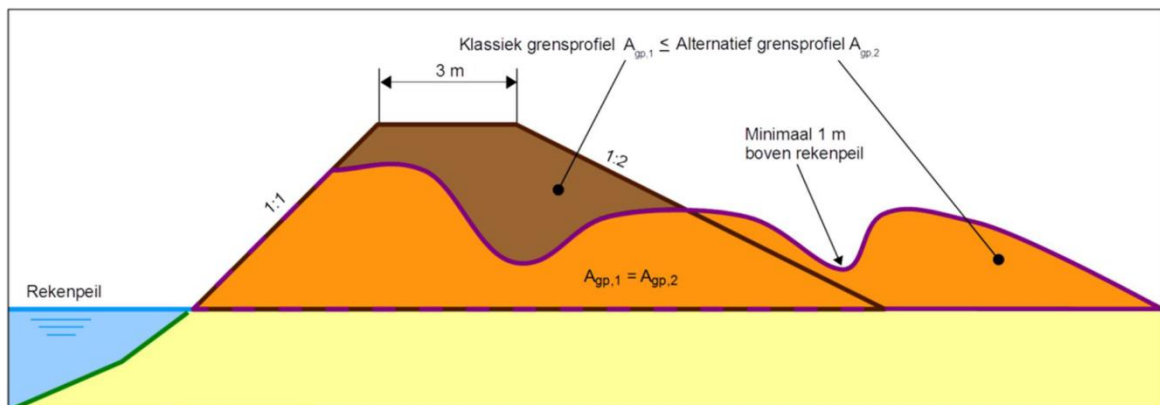
In de Gedetailleerde toets wordt gebruik gemaakt van de in het kader van de toetsing beschikbaar gestelde software. Daarin is hetzelfde rekenmodel opgenomen als beschreven in het TRDA2006, zie Figuur 9.4.

In de WTI-software is het mogelijk om de schematisering van een duinwaterkering uit te voeren. Dit wordt beschreven in de schematiseringshandleiding [2]. Door vergelijking van het aanwezig profiel met de duinafslag en het benodigd grensprofiel wordt de beoordeling van de veiligheid uitgevoerd.



Figuur 9.4 Afslagmodellering zoals geïmplementeerd in MorphAn (let op, in de WTI-software is de zee- en landzijde andersom dan in deze figuur)

Ter voorkoming van een overstroming door overslag dient er landwaarts van de afslagzone een minimaal grensprofiel aanwezig te zijn. Het TRDA2006 beschrijft de eisen die er aan een grensprofiel worden gesteld, zie Figuur 9.5. Hierbij kan worden uitgegaan van een klassiek grensprofiel of een alternatief profiel met minimaal eenzelfde doorsnedeoppervlakte.



Figuur 9.5 Gensprofiel volgens TRDA2006 [1]

9.2 Reststerkte faalmechanisme duinafslag

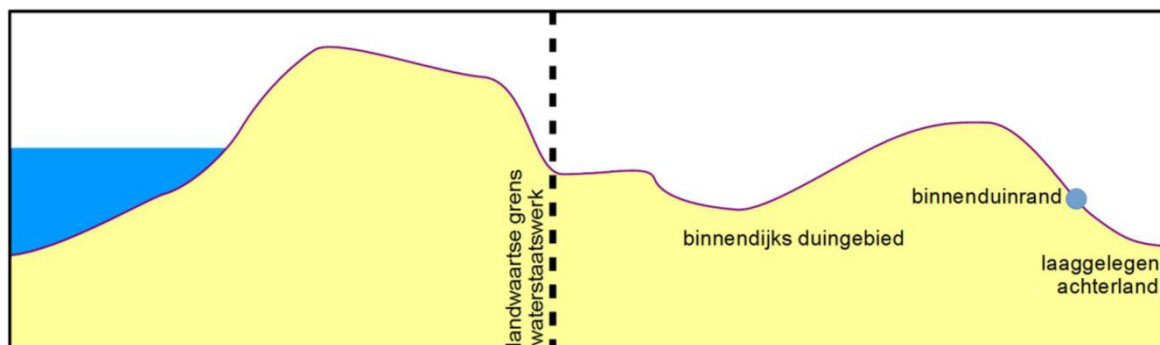
In de waterkering dient voldoende ruimte aanwezig te zijn voor de maatgevende afslagzone en landwaarts daarvan het grensprofiel ter voorkoming van overslag. Als het maatgevend afslagprofiel het grensprofiel snijdt of zelfs voorbijgaat, betekent dit dat er een overstroming wordt verondersteld. Een duinwaterkering waarin precies een maatgevende afslagzone en grensprofiel past, wordt verondersteld geen reststerkte te bezitten.

Positie legger in een duingebied

Bij de beoordeling van een duinwaterkering wordt getoetst of er onder maatgevende omstandigheden voldoende ruimte is voor een afslagprofiel en een grensprofiel binnen het werkelijk aanwezige duingebied. Het waterstaatswerk zoals dat is vastgelegd in de legger is voor de veiligheidsbeoordeling niet maatgevend. Voor sommige brede duingebieden is om verscheidene redenen ervoor gekozen om slechts een deel, de meest zeewaartse strook als waterstaatswerk te definiëren.

In dat geval ligt de landwaartse grens van het waterstaatswerk in het werkelijk aanwezige duingebied, zie Figuur 9.6. Het gebied landwaarts daarvan geldt formeel als binnendijks, ook als dit een duingebied betreft.

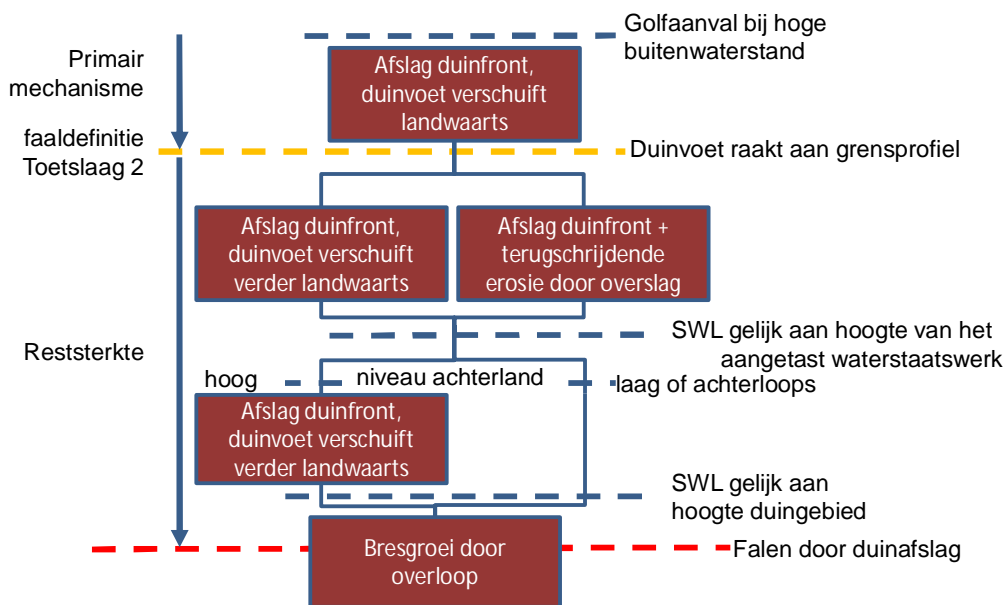
Wanneer er geen legger is vastgesteld, of wanneer de legger het totale duingebied betreft, dan wordt er getoetst of er zeewaarts van de binnenduinrand voldoende ruimte is voor een afslagprofiel en een grensprofiel.



Figuur 9.6 Landwaartse grens van een waterstaatswerk in een duingebied. Indien een legger ontbreekt wordt uitgegaan van de binnenduinrand

9.3 Overzicht van het faaltraject duinafslag

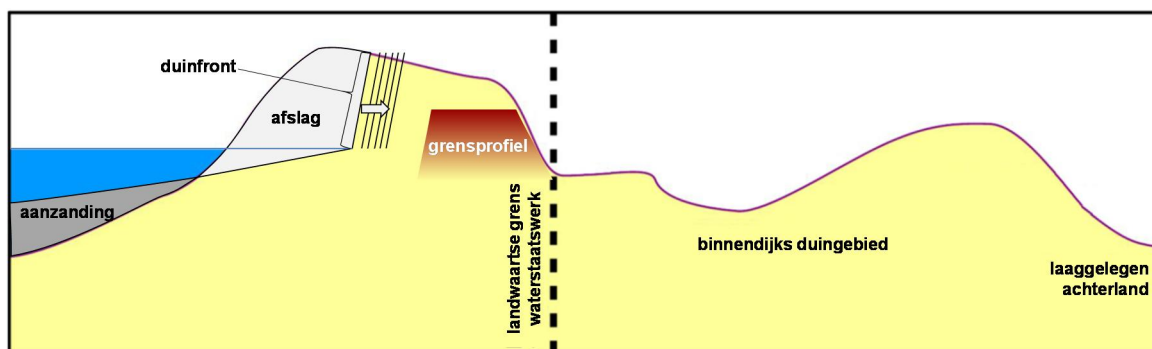
Figuur 9.7 geeft schematisch de gebeurtenissen weer die optreden totdat een duinwaterkering faalt. De beoordeling van de veiligheid vindt plaats op basis van het primair mechanisme. Als het faalcriterium wordt overschreden, dan kunnen er verschillende gebeurtenissen optreden. Deze worden weergegeven in het gedeelte "Reststerkte".



Figuur 9.7 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 randvoorwaarden gedurende de top van de storm.

- **Afslag duinfront.** Tijdens een zware storm treedt er duinafslag op waardoor de duinvoet steeds verder landwaarts verschuift, zie Figuur 9.8, tot uiteindelijke een evenwichtssituatie wordt bereikt, of tot het volgende stadium wordt bereikt:

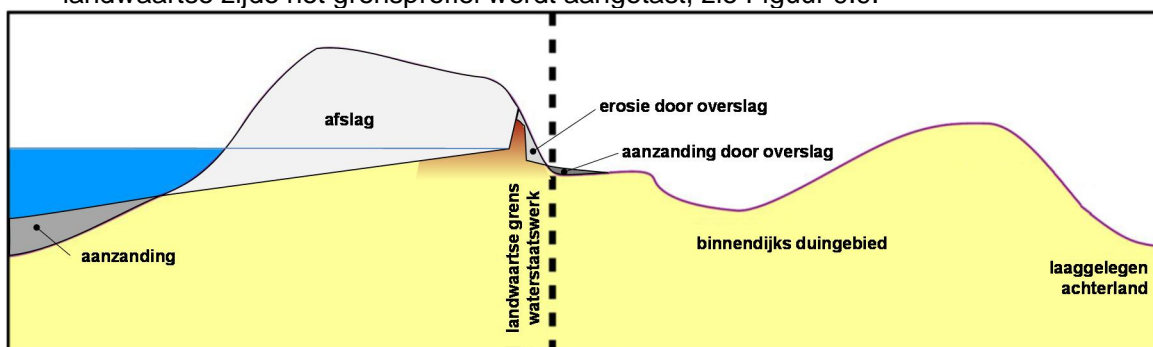


Figuur 9.8 Landwaartse verschuiving van het duinfront voordat het grensprofiel wordt aangetast

- Duinvoet raakt aan grensprofiel. Als de stormomstandigheden zwaar genoeg zijn in vergelijking met de sterkte van het duin, zal als gevolg van de afslag de duinvoet het grensprofiel bereiken. Het grensprofiel bevindt zich op de meest landwaartse positie binnen het waterstaatswerk.

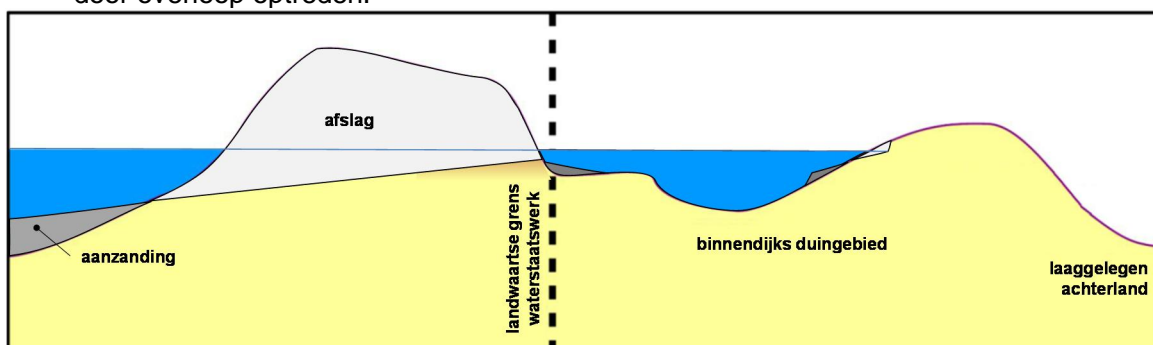
Als de duinvoet raakt aan het grensprofiel is de faaldefinitie bereikt. Als de stormomstandigheden zwaarder zijn dan de situatie waarbij de duinvoet in de evenwichtssituatie juist het grensprofiel bereikt, dan wordt de reststerkte van de kering aangesproken.

- Afslag van het grensprofiel. Doorgaande duinafslag leidt tot aantasting van het grensprofiel waarbij, al dan niet na verlaging van het duin golfoverslag kan optreden, leidend tot het gelijktijdig gaan optreden van het vervolgde mechanisme.
- Terugschrijdende erosie door golfoverslag. Als het duin te laag wordt, kan overslag plaatsvinden naar het achterland. Dat kan ertoe leiden dat niet alleen het duinfront door afslag landwaarts verschuift, maar dat ook door (terugschrijdende) erosie van de landwaartse zijde het grensprofiel wordt aangetast, zie Figuur 9.9.



Figuur 9.9 Grensprofiel aangetast door verdere duinafslag en erosie door overslag

- Hoogte aangetast waterstaatswerk gelijk aan SWL. Als de sterkte van het duin in vergelijking met de stormomstandigheden flink tekort schiet, zal de hoogte van het aangetaste duinprofiel uiteindelijk gelijk worden aan de buitenwaterstand (SWL). Afhankelijk van of er sprake is van een binnendijks duingebied of dat het waterstaatswerk wordt begrensd door de binnenduinrand, zijn er twee mogelijkheden.
 - Erosie binnendijks duingebied. Als er landwaarts van het grensprofiel nog een binnendijks duingebied aanwezig is met voldoende hoogte en er zijn geen mogelijkheden voor achterloopsheid, dan zal er lokaal waterbezwaar en erosie van het binnenduinengebied optreden, zie Figuur 9.10. Als die erosie zich zover doorzet tot de hoogte van het aangetaste duinprofiel gelijk is aan de SWL, zal uiteindelijk bresgroei door overloop optreden.



Figuur 9.10 Situatie na formeel falen van het waterstaatswerk maar waarbij het Waterstaatswerk slechts een deel van het duingebied omvat: erosie van het binnendijks duingebied

- 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 overstroming van het achterland. De duinwaterkering faalt.

9.4 Beknopte modelbeschrijving

Het rekenmodel voor duinafslag te gebruiken voor de Gedetailleerde toets, bepaalt feitelijk de positie van het de duinvoet ná afslag. De duinvoet is het punt op het stormvloedpeil waar het steile front van het afgeslagen duin overgaat in het veel flauwere profiel van het strand.

Het rekenmodel berekent uitgaande van empirische relaties de ontwikkeling van het afslagprofiel als functie van de tijd. Daarbij is er altijd sprake van massaevenwicht tussen de zone met afslag en de zone met aanzanding. Aangezien het model uitgaat van herverdeling van zand in de raaien loodrecht op de kust, komt dat in een raai neer op gelijke oppervlakken van afslag en aanzanding, zie Figuur 9.4. Aangezien er tijdsafhankelijk wordt gerekend, is er bij eindige stormen altijd sprake van een eindsituatie, die niet per se gelijk hoeft te zijn aan de evenwichtssituatie die zal ontstaan gegeven een stationaire buitenwaterstand en golfbelasting.

In deel B van het Technisch Rapport Duinafslag [1] staat het rekenmodel in meer detail beschreven.

9.5 Literatuur duinafslag

- [1] *Technisch Rapport Duinafslag. Beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering ten behoeve van Voorschrift Toetsing op Veiligheid 2006*. (TRDA2006) ENW, Expertisenetwerk waterveiligheid, Mei 2007.
- [2] *Schematiseringshandleiding Duinafslag WTI 2017*. M. Boers, J.P. den Bieman, M. de Visser. Deltares rapport 1220085-003-HYE-0001, Versie 1.3. Delft, december 2015.
- [3] *Functional design semiprobabilistic assessments Ringtoets*. R.B. Jongejan, W.J. Klerk. Deltares rapport 1209431-008-ZWS-0009. Delft, May 2015.
- [4] *Kalibratie van semi-probabilistisch toetsvoorschrift voor duinen*. P.F.C. van Geer, F.L.M. Diermanse. Deltares concept rapport 1220080-008-ZWS-0002. Delft, september 2015.

10 Kunstwerken

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

- Falen waterkering door overslag/overloop van het kunstwerk: Hoogte HTkw.
- Falen waterkering door niet sluiten keermiddelen van het kunstwerk: Betrouwbaarheid sluiting BSkw.
- Falen waterkering door achter- of onderloopsheid van het kunstwerk: Piping, Pkw.
- Falen waterkering door gebrek aan sterkte van het kunstwerk:
 - Sterkte en stabiliteit puntconstructie STkwp.
 - Sterkte en stabiliteit langsconstructie STkwl.

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 faal criterium (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 WBI de volgende definitie van 'significante gevolgen' gehanteerd: meer dan 10 miljoen euro schade en/of tenminste 1 slachtoffer. In de schematiseringshandleidingen van de verschillende toetsproeven bij kunstwerken 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.

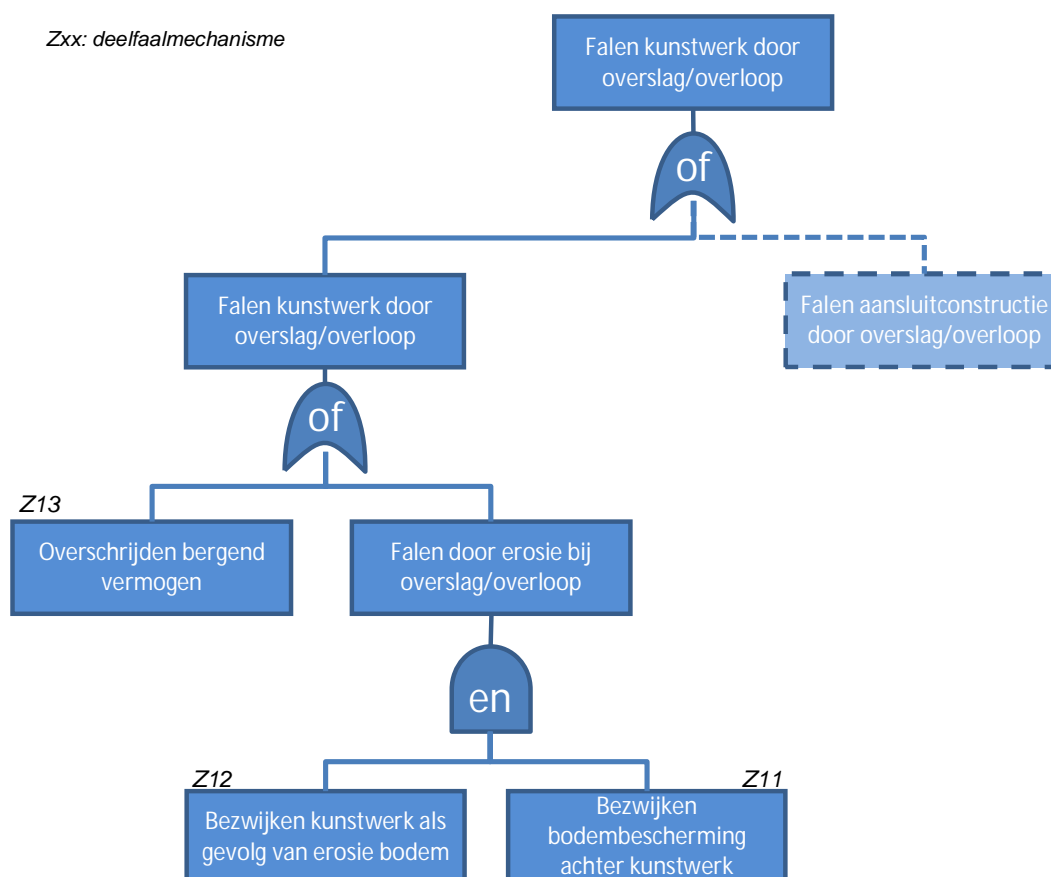
Ook als het kunstwerk zelf niet bezwijkt, moet het overslag-/overloopdebiet na passage van het kunstwerk in het achterliggende gebied veilig kunnen worden geborgen. Als het inkomend debiet groter is dan het kombergend vermogen, leidt dit tot significante overstromingsgevolgen. Dan is eveneens sprake van falen van het kunstwerk. Overschrijding van het kombergend vermogen leidt direct tot significante gevolgen als bijvoorbeeld de waterstand in het binnendijkse watersysteem zo ver 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

De volgende deelmechanismen worden onderscheiden in de foutenboom die wordt gehanteerd voor de toetsing (zie Figuur 10.9):

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

Zxx: deelfaalmechanisme



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 geconcretiseerd in de beoordeling van het kunstwerk. Bredeveld en van Bree [10] gaan dieper in op de problematiek van aansluitconstructies. Verondersteld wordt dat eventuele gebreken aan de aansluitconstructie worden onderkend en hersteld in het dagelijks beheer. Of de invloed van de (overgang naar de) constructie op een eventueel aangrenzende grasmatt moet worden verrekend door in dat aangrenzende dijkvak rekening te houden met een op de situatie toegesneden sterkte-reductiefactor in geval van een overgang staat nog ter discussie.

10.1.4 Reststerkte

Bij het faalmechanisme *overslag en overloop* kan worden gesteld dat sprake is van reststerkte na het moment van bezwijken van de bodembescherming. Deze reststerkte 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 bezwiken 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 reststerkte van het kunstwerk na bezwijken van de bodembescherming is dus afhankelijk van een groot aantal factoren. De belangrijkste zijn:

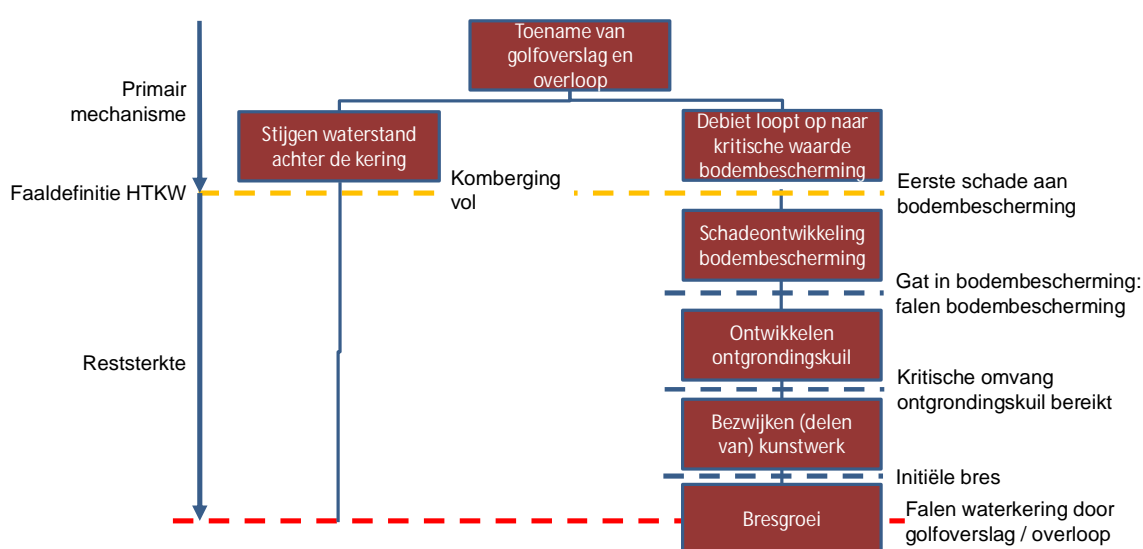
- Erosiebestendigheid van de bodem onder de bodembescherming
De vorming van een ontgrondingskuil gaat in zandige grond veel sneller dan in cohesieve grond (klei).
- Fundatie van het kunstwerk.
Een kunstwerk dat op palen staat zal minder snel (deels) bezwijken dan een kunstwerk dat op staal gefundeerd 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 bezwiken moet er dus nog het nodige gebeuren voordat het kunstwerk als geheel bezwijkt. Helaas is het zeer lastig de reststerkte 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 reststerkte 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 reststerkte aanwezig is.

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

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

10.1.6 Beknopte modelbeschrijving van de te toetsen deelmechanismen behorende bij overslag/overloop

Hieronder worden de deelmechanismen die in de toetsing zijn onderscheiden, zie paragraaf 10.1.3, nader beschreven.

Z₁₁ Bezwijken bodembescherming

Dit deelmechanisme betreft het bezwijken van de bodembescherming achter het kunstwerk. Dit kan optreden door hoge stroomsnelheden boven de bodembescherming als gevolg van het overstortende of overlopende water of doordat de bodembescherming rechtstreeks door de overstortende straal wordt belast. Onder bezwijken wordt in dit geval verstaan het ontstaan van een zodanige schade aan de bodembescherming dat zodanig materiaaltransport uit de ondergrond plaats kan vinden dat dit leidt tot het ontstaan van erosiekuilen. De kritieke stroomsnelheid waarbij bezwijken van de bodembescherming optreedt, verschilt per type bodembescherming. Zo is een bodembescherming bestaande uit beton, asfalt of gezette steen doorgaans bestand tegen hogere stroomsnelheden dan een bodembescherming bestaande uit losgestorte steen. De kritieke stroomsnelheid wordt bepaald met vigerende ontwerpregels, die per type bodembescherming kunnen verschillen. In de schematiseringshandleiding worden hiervoor aanwijzingen gegeven.

Z₁₂ Bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem

Dit deelmechanisme betreft de kans dat het kunstwerk als geheel bezwijkt (onderuit gaat) door erosie van de onbeschermd bodem nadat bezwijken van de bodembescherming heeft plaatsgevonden. Hierdoor ontstaan ontgrondingskuilen, die een dusdanige afmeting kunnen krijgen dat een afschuiving kan optreden aan de rand van deze ontgrondingskuil. Als vervolgens een instabiliteit van deze ontgrondingskuil optreedt waarvan de inscharing het kunstwerk bereikt, kan de overall-stabiliteit van het kunstwerk onvoldoende worden. Dit kan gebeuren door kantelen of afschuiven van het hele kunstwerk, of door een proces waarbij successievelijk delen van het kunstwerk constructief bezwijken met het bezwijken van het totale kunstwerk als uiteindelijke gevolg. Dit kan leiden tot een bres in de waterkering, met bresgroei tot gevolg: de waterkering faalt.

Dit mechanisme behandelt dus in feite de aanwezige reststerkte na bezwijken van de bodembescherming. Zoals in paragraaf 10.1.4 is uitgelegd, ontbreken handvatten om deze reststerkte te kwantificeren. Eventueel wordt dit ingevuld op grond van expert judgement. Een veilige (en conservatieve) benadering is om de kans op bezwijken als gevolge van erosie van de bodem op een getalswaarde van 1 te zetten.

Z₁₃ Overschrijden bergend vermogen

Dit deelmechanisme betreft het falen van het kunstwerk als gevolg van onvoldoende waterbergend vermogen in het achterland doordat er te veel water overslaat/overloopt over het hoogwaterkerend-gesloten kunstwerk gedurende een hoogwatergolf.

Bij het mechanisme Z_{13} 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.

Voor dit mechanisme wordt een kombergingsberekening uitgevoerd. Het instromend debiet volgt, afhankelijk van de waterstand ten opzichte van het niveau van het kunstwerk of keermiddelen, uit een golfoverslag berekening danwel uit een overlaatformule (overlopen). Dit debiet gedeeld door het bergend oppervlak van het achter de kering gelegen watersysteem bepaalt de snelheid waarmee de waterspiegel achter de kering stijgt. De waterspiegel stijging tijdens de duur van de maatgevende storm mag niet leiden tot significante overstromingsgevolgen. In de schematiseringshandleiding worden daarvoor handvatten gegeven.

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 behorende bij het toetsspoor *betrouwbaarheid sluiting*. Deze beschrijving is grotendeels geënt op hetgeen hierover staat beschreven in de Leidraad Kunstwerken [2].

Het faalmechanisme *betrouwbaarheid sluiting* kan zowel bij hoogwaterkerende punt-¹ als langconstructies 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. Het toetsspoor *betrouwbaarheid sluiting* voor de demontabele keringen is een apart document opgesteld [14]. Hier vindt de uitwerking voor de puntconstructies plaats.

De verwachting is dat de Leidraad Kunstwerken in de komende jaren (deels) wordt herschreven. In de nieuwe leidraad wordt de overstromingskansbenadering opgenomen, wat tot aanpassingen van de toelaatbare faalkansruimte leidt, en wellicht ook het faalcriterium zal leiden. 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 Betrouwbaarheid 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 de 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*, behorende bij het toetsspoor *betrouwbaarheid sluiting*, 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 bedoeld 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 binnendijs aanwezige bodembescherming. Indien deze bodembescherming de optredende stroomsnelheden niet kan weerstaan – op dit moment wordt de kritieke

¹ 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;

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 reststerkte. Deze kan in de bepaling van de faalkans (bezwijkkans) worden meegenomen.

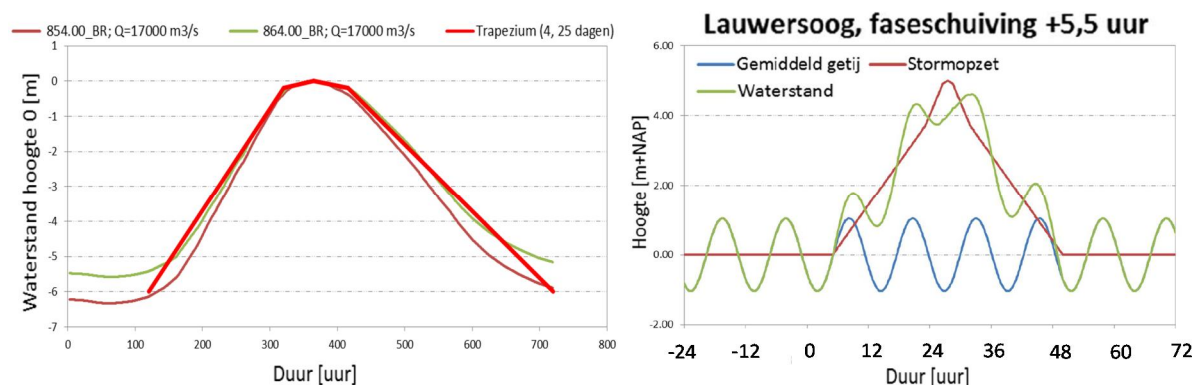
10.2.2 Gedetailleerde beschrijving van het faaltraject

Belasting

De hydraulische belasting 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 worden gevormd door de buitenwaterstand en de golven. In combinatie met het watersysteem-afhankelijke verloop van een hoogwatergolf bepaalt deze belasting 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 waarvan het kunstwerk deel uitmaakt. Zo is het verloop van een hoogwatergolf in het bovenriviereengebied anders dan dat van een hoogwatergolf langs de kust. In Figuur 10.3 is voor zowel een deel van het bovenriviereengebied als een kustlocatie een geschematiseerd verloop van een hoogwatergolf weergegeven. Deze grafieken zijn afkomstig uit studies om te komen tot een standaard voor waterstandsverlooptlijnen [19][20]. 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.

Voor deze drie situaties zijn algemeen geldende hydraulica formules beschikbaar, die kunnen worden gevonden in de schematiseringshandleiding [5].

Sterkte

De sterkte van het kunstwerk bestaat in feite uit de betrouwbaarheid van het sluitingsproces van de keermiddelen in combinatie met de volgende twee componenten: 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 aanwezige 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 aanwezige 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 toetsen 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 randvoorwaarden.

Een kombergend vermogen is meestal alleen aanwezig in het geval het kunstwerk een binnendijks water verbindt met het buitenwater, zoals dat het geval is bij sluisen, 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.

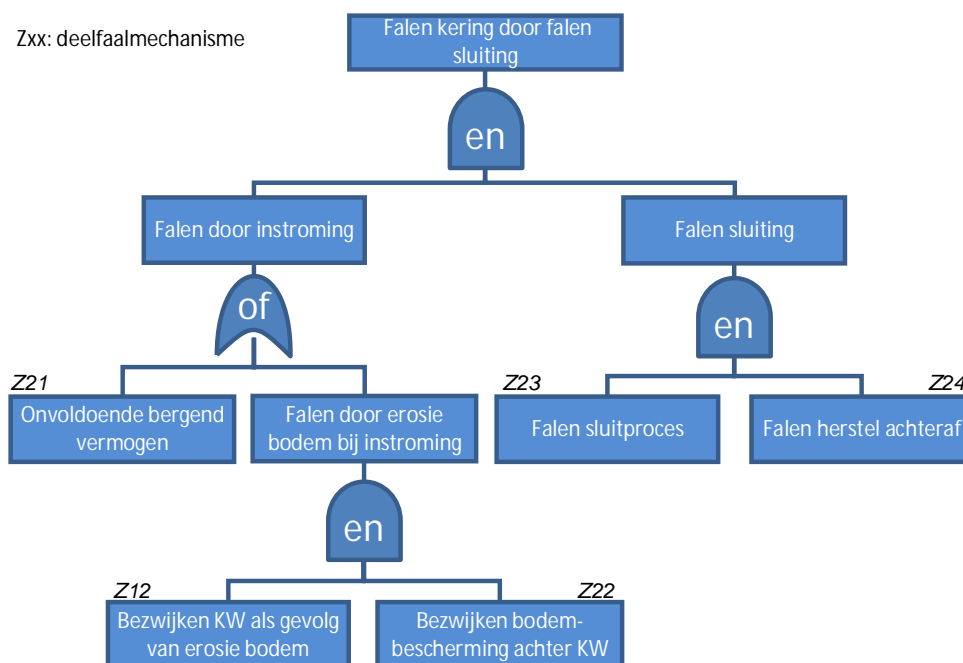
Het instromende debiet als gevolg van *niet sluiten* van het kunstwerk mag ook niet leiden tot significante gevolgen in het achterland. Hiervan is sprake als achterliggende regionale keringen bezwijken, waarna het watersysteem leegloopt in het achterliggende gebied, of er kortsluiting ontstaat tussen 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 bodem-

bescherming wordt overschreden. Waardoor achter het kunstwerk ontgroning plaats kan vinden, dat uiteindelijk tot bresgroei leidt.

10.2.3 Onderscheiden deelmechanismen in het beoordelingsspoor betrouwbaarheid sluiting
Zoals uit de voorgaande paragraaf kan worden afgeleid, worden binnen het toetspoor *betrouwbaarheid sluiting* de volgende deelmechanismen onderscheiden, zie de foutenboom in Figuur 10.4:

- Z₂₃ Falen van het sluitproces van de (hoog)waterkerende keermiddelen, waardoor het kunstwerk niet gesloten is als een hoogwater zich voordoet.
- Z₂₄ Falen van het herstel van een falend sluitingsproces.
- Z₂₂ Bezwijken van de binnendijs aanwezige bodembescherming als gevolg van het instromende water door het niet-gesloten kunstwerk.
- Z₁₂ Kans dat het kunstwerk als geheel bezwijkt (onderuit gaat) gegeven het feit dat bezwijken van de bodembescherming heeft plaatsgevonden. Heeft betrekking op het eroderen van de onbeschermd bodem, het ontstaan van ontgrondingskuilen en hiermee op de reststerkte van het kunstwerk (na bezwijken van de bodem).
- Z₂₁ 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.

Deze deelmechanismen worden meegenomen in de toetsing (zie paragraaf 10.2.6).



Figuur 10.4 Foutenboom falen waterkering als gevolg van niet sluiten kunstwerk

10.2.4 Reststerkte

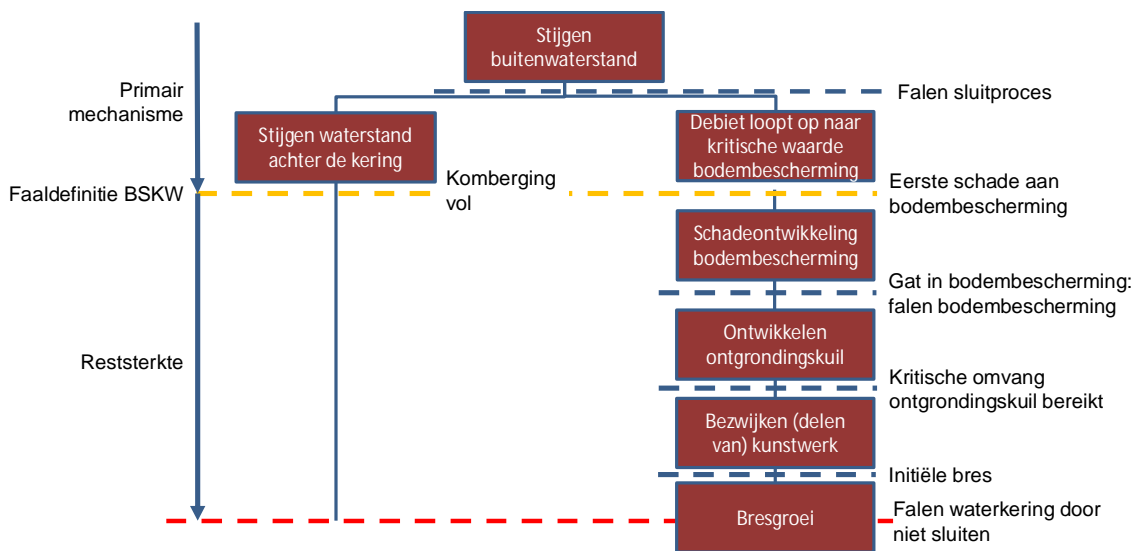
Bij het faalmechanisme *niet sluiten* is sprake van reststerkte na het moment van bezwijken van de bodembescherming. Deze reststerkte zit opgesloten in het deelmechanisme *bezwijken kunstwerk als geheel* (Z₁₂). Middels dit deelmechanisme kan de kans worden

meegenomen dat het kunstwerk als geheel bezwijkt (onderuit gaat) door erosie van de ondergrond nadat bezwijken van de bodembescherming heeft plaatsgevonden.

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 reststerkte wordt daarom verwezen naar paragraaf 10.1.4.

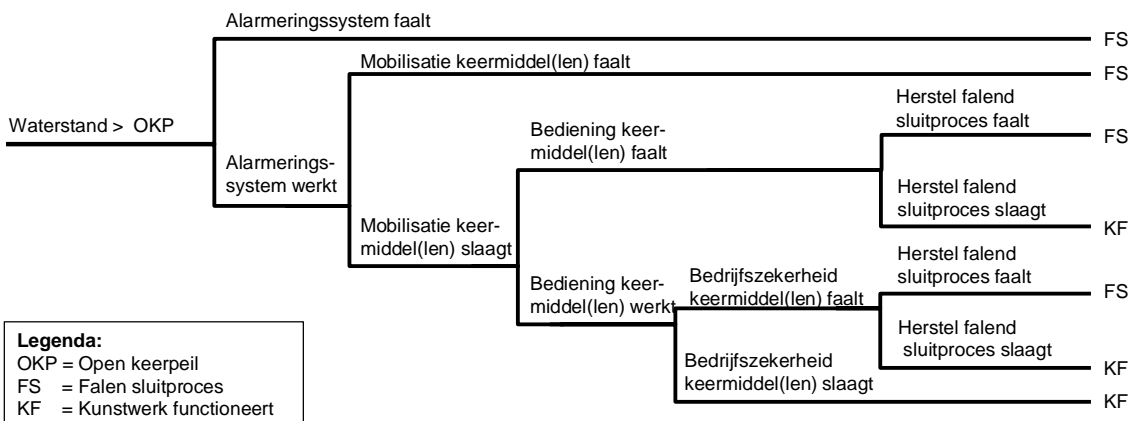
10.2.5 Overzicht van het faaltraject niet sluiten bij kunstwerken

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

10.2.6 Beknopte modelbeschrijving van de te toetsen deelmechanismen

Hieronder worden de deelmechanismen die in de toetsing zijn onderscheiden, zie paragraaf 10.2.3, nader beschreven.

Z₁₂ Bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem

Zie de beschrijving van Z_{12} in paragraaf 10.1.6.

Z₂₁ Onvoldoende bergend vermogen

Dit deelmechanisme betreft het falen van het kunstwerk als gevolg van onvoldoende kombergend vermogen in het achterland doordat er te veel water door het niet-gesloten kunstwerk het achterland instroomt gedurende een hoogwatergolf. Hierbij moet sprake zijn van significante overstromingsgevolgen. Een harde definitie van significante gevolgen is echter niet te geven, maar er zal aanzienlijke economische schade optreden en/of er zullen één of meerdere slachtoffers vallen. In de schematiseringshandleiding worden verdere handvatten gegeven.

De rekenmodellen om te berekenen of er sprake is van toereikende berging betreffen enerzijds de berekening van het instromende debiet en anderzijds een eenvoudige volumebalans. Voor het instromende debiet bij een geopend kunstwerk geeft [5] voor de volgende situaties rekenregels:

- Overslag/overloopdebiet verticale wand.
- Onvolkomen stroming over lage drempel.
- Volkomen stroming over lage drempel.
- Stroming door verdrongen koker.

Zoals in paragraaf 10.1.6 onder Z_{13} al is gememoreerd zouden in theorie situaties kunnen voorkomen waarbij overschrijding van het kombergend vermogen leidt tot bezwijken van het kunstwerk.

Z₂₂ Bezwijken bodembescherming achter kunstwerk

Dit deelmechanisme betreft het bezwijken van de aan de binnenzijde aanwezige bodembescherming. Dit kan optreden door hoge stroomsnelheden boven de bodembescherming als gevolg van het instromende water. Onder bezwijken wordt in dit geval verstaan het ontstaan van een zodanige schade aan de bodembescherming, dat de ondergrond wordt blootgesteld aan de hoge stroomsnelheden van het water.

Voor rekenregels voor het instromend debiet wordt verwezen naar item Z_{21} .

De kritieke stroomsnelheid, waarbij bezwijken van de bodembescherming optreedt, verschilt per type bodembescherming. Zo is een bodembescherming van beton, asfalt of gezette steen doorgaans bestand tegen hogere stroomsnelheden dan een bodembescherming bestaande uit losgestorte steen. De kritieke stroomsnelheid wordt buiten Ringtoets om bepaald met vigerende ontwerpregels, die per type bodembescherming kunnen verschillen. In de schematiseringshandleiding [5] worden hiervoor aanwijzingen gegeven.

Het kritiek debiet is het product van de stroomvoerende breedte van de bodembescherming en de kritieke stroomsnelheid.

Z₂₃ Falen van het sluitproces

Dit deelmechanisme betreft het falen van het sluitproces van de (hoog)waterkerende keermiddelen, waardoor het kunstwerk niet gesloten is als een hoogwater zich voordoet. Dat is het geval als voor het optreden van het hoge water één van de onderdelen van de procedure en technische uitvoering van het sluitingsproces van de keermiddelen faalt. Daarbij wordt bedoeld op het falen van:

- Het hoogwateralarmeringssysteem.
- De mobilisatie.
- De bediening.
- De bedrijfsvoering.

Z₂₄ Falen van herstel van het sluitproces

Er zijn situaties onder hoogwatercondities denkbaar dat er, ondanks één of meer fouten in de procedure en technische uitvoering van het sluitproces van de keermiddelen, tijdens het instromen van water door het geopende kunstwerk toch sluiting kan plaatsvinden. Door de fout(en) in het sluitproces te herstellen of een alternatief keermiddel aan te wenden. Echter, het sluiten van keermiddelen bij het optreden van stroming door een kunstwerk is niet altijd even eenvoudig.

De mogelijkheden hiertoe zijn afhankelijk van de beperkt beschikbare tijd tussen het tijdstip van gefaalde sluiting en het tijdstip dat er water door het niet-gesloten kunstwerk dreigt te gaan stromen, waardoor een (alternatieve) sluiting niet meer mogelijk wordt geacht. Dit deelmechanisme beschrijft de kans dat, na een gefaalde sluiting van de hoogwater kerende keermiddelen onder hoogwatercondities, het herstel van deze mislukte sluiting faalt.

10.3 Falen waterkering door achter- of onderloopsheid van het kunstwerk

10.3.1 Fenomenologische beschrijving op hoofdlijnen

Falen door *piping* vindt plaats als uitspoelen van gronddeeltjes optreedt 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.

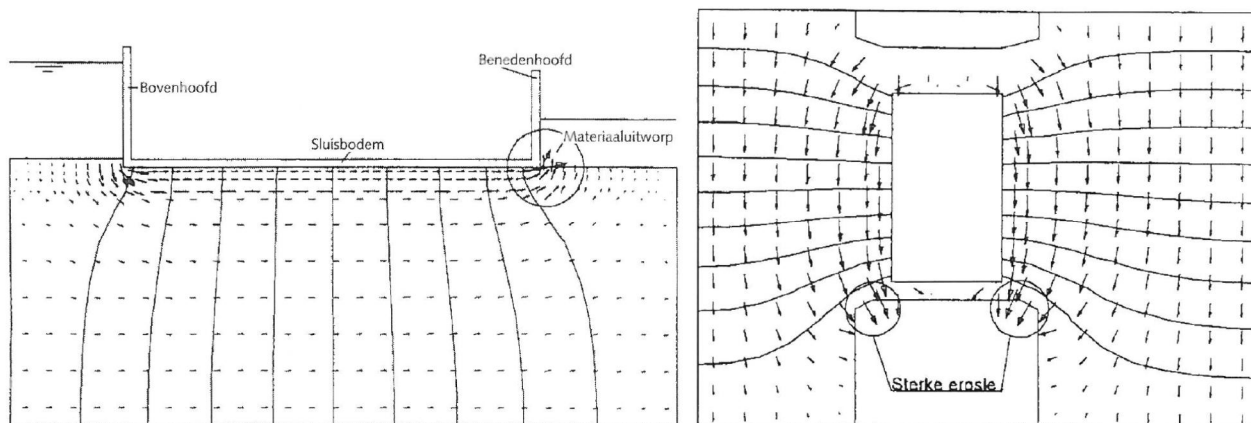
In Nederland wordt de term 'piping' als synoniem voor terugschrijdende erosie gebruikt, omdat vooral dat pipingmechanisme voor Nederland van belang is. Onder de noemer piping vallen internationaal echter verschillende vormen van interne erosie. De twee belangrijkste mechanismen zijn terugschrijdende 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 korrelskelet 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 [15] 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 [8].

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):

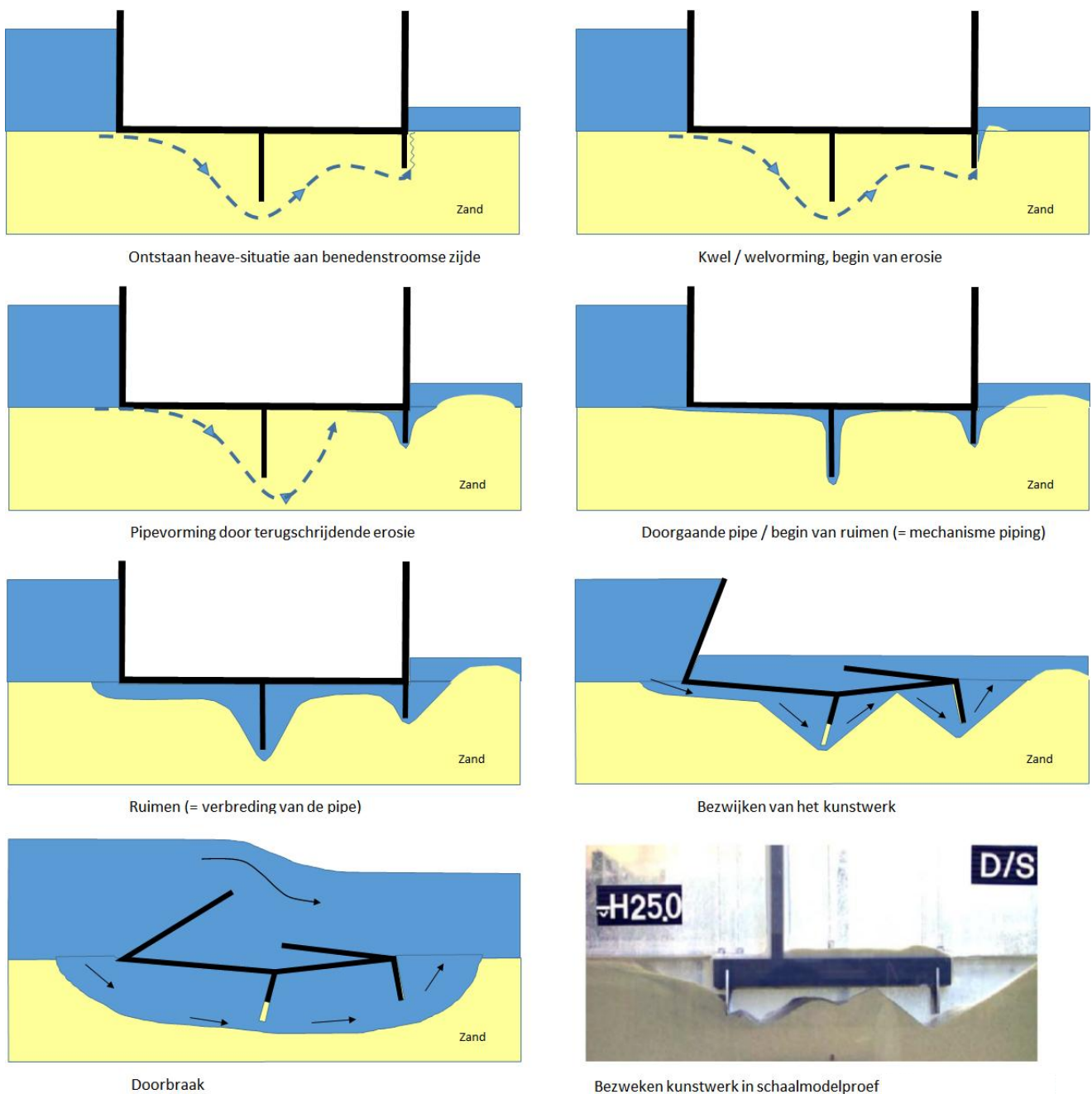
- **Erosie van de zandlaag**
Bij kunstwerken met een benedenstrooms kwelscherm ontstaat een situatie waarbij het zand tussen de onderzijde van het kwelscherm en het uittredepunt zich in gefluïdiseerde toestand bevindt (heave, zie plaatje linksboven in Figuur 10.8). Individuele zandkorrels worden meegevoerd 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 uittredepunt, 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 uittredepunt 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 [1]

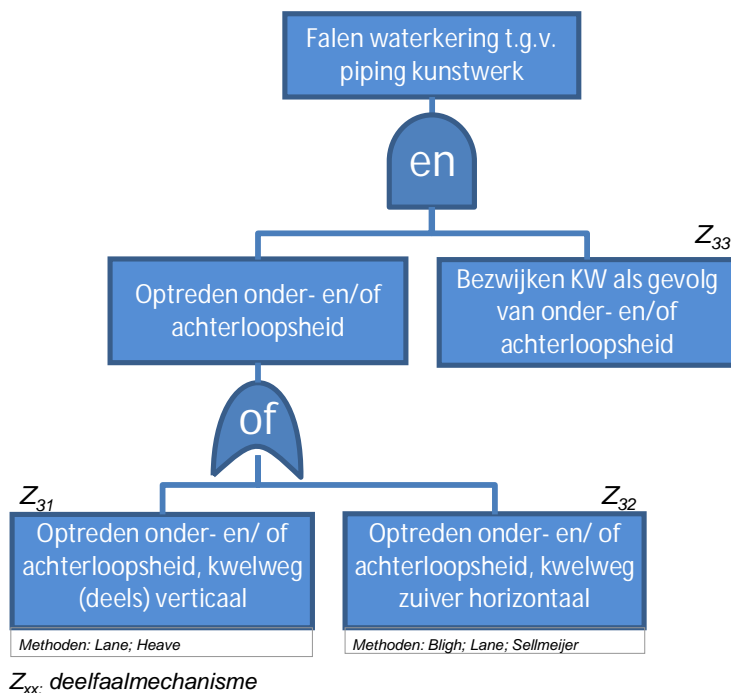
10.3.3 Onderscheiden deelmechanismen

De volgende deelmechanismen worden onderscheiden in de foutenboom die het falen van de kering beschrijft (zie Figuur 10.9):

- Z₃₁ Optreden onder- en/ of achterloopsheid, kwelweg (deels) verticaal.
- Z₃₂ Optreden onder- en/ of achterloopsheid, kwelweg zuiver horizontaal.
- Z₃₃ Bezwijken 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 uitrede 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 Reststerkte

Bij het faalmechanisme *piping* is sprake van reststerkte 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 overallstabiliteit 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.

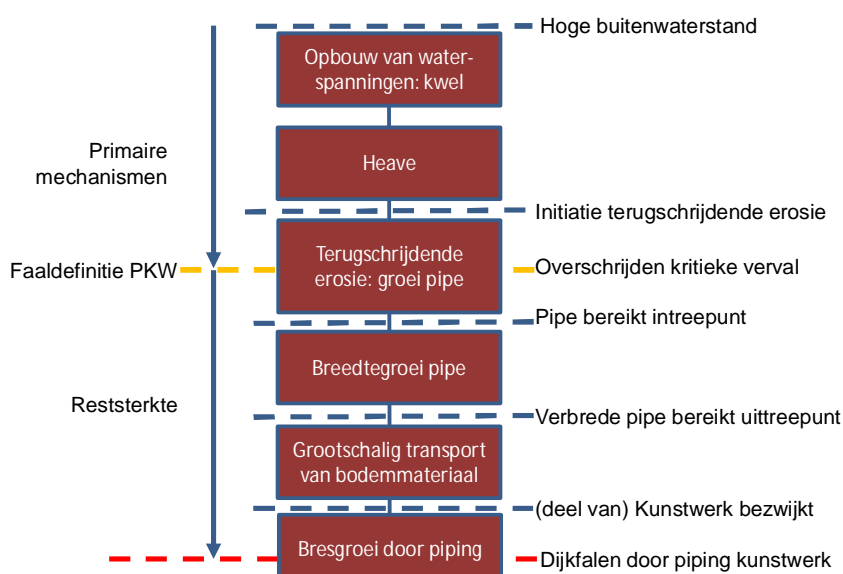
De reststerkte van het kunstwerk na het overschrijden van het kritieke verval is dus afhankelijk van een groot aantal factoren. De belangrijkste zijn:

- 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

10.3.6 Beknopte modelbeschrijving van de te toetsen deelmechanismen behorende bij achter- of onderloopsheid van kunstwerken

Voor het toetsspoor *piping* bij kunstwerken wordt géén volledig probabilistische toets op niveau 2b uitgewerkt. Toetsing vindt plaats op niveau 1 (Eenvoudige toets) en 2a (Gedetailleerde toets, semi-probabilistisch).

Hieronder worden de deelmechanismen die in de toetsing zijn onderscheiden, zie paragraaf 10.3.3, nader beschreven.

Z₃₁ Optreden onder- en/ of achterloopsheid, kwelweg (deels) verticaal

Dit mechanisme betreft het uitspoelen van gronddeeltjes ten gevolge van een geconcentreerde kwelstroom die (deels) verticaal gericht is, waardoor holle ruimten ontstaan onder en/of naast het kunstwerk. Dit leidt tot een proces van terugschrijdende (interne) erosie, waarbij uiteindelijk een doorgaande pipe ontstaat onder en/of naast het kunstwerk. Het kritieke verval is het verval waarbij nog net geen doorgaande pipe ontstaat. Dit kritieke verval is afhankelijk van de grondeigenschappen onder het kunstwerk en de aanwezige kwelweglengte, die wordt bepaald door de geometrie van het kunstwerk (afmetingen, kwelschermen). De kwelweglengte wordt bepaald met vigerende ontwerpregels: het heave criterium, zie paragraaf 4.4.2 en de empirische rekenregel van Lane [9]. Doorgaans is hiervoor een gedegen driedimensionale analyse van het kunstwerk noodzakelijk. In de schematiseringshandleiding [6] worden hiervoor aanwijzingen gegeven.

Z₃₂ Optreden onder- en/ of achterloopsheid, kwelweg zuiver horizontaal

Dit mechanisme betreft het uitspoelen van gronddeeltjes ten gevolge van een geconcentreerde kwelstroom die zuiver horizontaal gericht is. Voor het overige is dit mechanisme hetzelfde als mechanisme Z_{31} . De rekenregel die voor dit mechanisme wordt gehanteerd is dezelfde als die voor dijken: de regel van Sellmeijer, zie paragraaf 4.4.3.

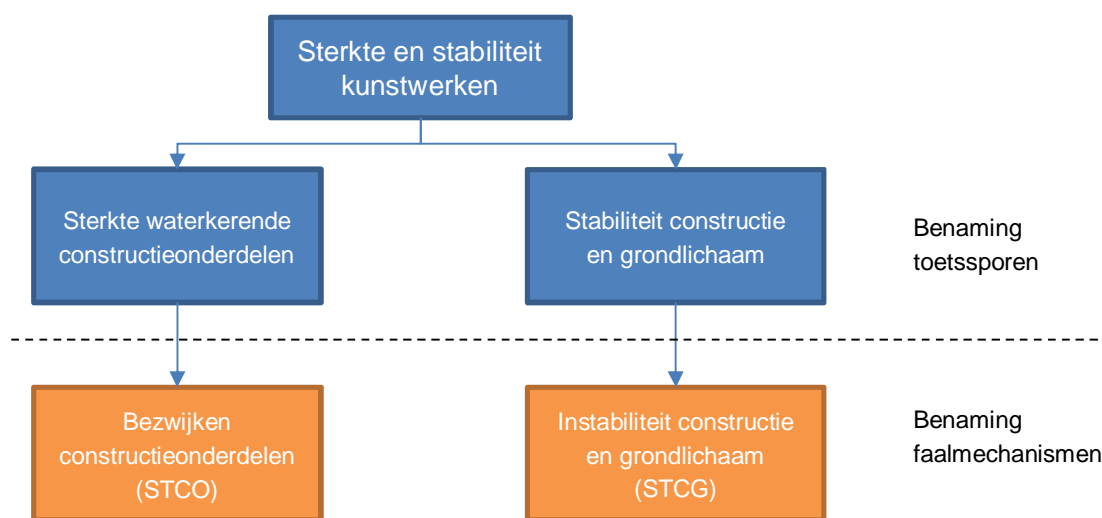
Z₃₃ *Bezwijken kunstwerk als gevolg van onder- en/of achterloopsheid*

Dit mechanisme betreft de kans dat het kunstwerk als geheel bezwijkt (volledig onderuit gaat) gegeven het feit dat onder- en/of achterloopsheid heeft plaatsgevonden. Hierdoor ontstaat een dusdanige erosie van bodemmateriaal onder en/of naast het kunstwerk dat de overall-stabiliteit van het kunstwerk onvoldoende wordt. Dit kan gebeuren door kantelen of afschuiven van het hele kunstwerk, of door een proces waarbij opeenvolgend delen van het kunstwerk constructief bezwijken met het bezwijken van het totale kunstwerk als uiteindelijke 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. Dit kan leiden tot een bres in de waterkering, met bresgroei tot gevolg.

Dit mechanisme behandelt dus in feite de aanwezige (rest)sterkte van het kunstwerk (inclusief aanliggende grondlichaam) na het ontstaan van een doorgaande pipe onder en/of naast het kunstwerk. Zoals in paragraaf 10.3.4 is uitgelegd ontbreken handvatten om deze reststerkte te kwantificeren.

10.4 Falen waterkering door gebrek aan sterkte van het kunstwerk

In deze paragraaf wordt een beschrijving gegeven van de faalmechanismen behorende bij het toetspoot *sterkte en stabiliteit*. Dit toetspoot is opgesplitst in een tweetal andere toetspooten te weten *sterkte waterkerende constructieonderdelen* en *stabiliteit constructie en grondlichaam*. De bijbehorende faalmechanismen zijn *bezwijken constructieonderdelen* (STCO) en *instabiliteit constructie en grondlichaam* (STCG), zie Figuur 10.11. Onder STCO 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 toets op aanvaren in aanmerking komen, aangezien de scheepvaart gestremd zal zijn door hoogwater op het moment dat keersluizen zijn gesloten.



Figuur 10.11 Overzicht toetspoot sterkte en stabiliteit

Dit hoofdstuk geeft een beschrijving van de toetsing 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 [2].
- Richtlijnen Ontwerpen Kunstwerken [3].

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 toetsspoor sterkte en stabiliteit uit een tweetal andere toetssporen bestaat en daaraan gekoppeld andere faalmechanismen, 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 (STCO)

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 toetsen op waterveiligheid zal over het algemeen de uiterste grenstoestand de te toetsen 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 faal criterium (maximale sterkte waterkering) welke is gekoppeld aan overstromingsgevolgen. Overschrijding van het faal criterium 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 (STCG)

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 faal criterium (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 faalmechanisme 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. Bij de toets vanuit het aspect 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 binnendijs 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 toetsen van de primaire waterkeringen worden binnen Nederland vanuit Rijkswaterstaat voorgeschreven en aangeleverd door de in het kader van de toetsing beschikbaar gestelde software.

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 [2]).

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 bezwaken, 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 los laten 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 (zie ook paragraaf 10.1.6).

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 aanvaring². 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 worden standaard meegenomen in de hydraulische randvoorwaarden. 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 toetsen van de primaire waterkeringen worden binnen Nederland vanuit Rijkswaterstaat voorgeschreven en aangeleverd door de in het kader van de toetsing beschikbaar gestelde software.

² Binnen het WTI2017 is dit gerelateerd aan het aanvaren van de tweede deur in het geval van een schutsluis.

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 toetsen 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:

- Z₄₁₁ Bezwijken constructieonderdelen ten gevolge van het verval.
Bezwijken van een waterkerend constructieonderdeel als gevolg van het verval inclusief eventueel aanwezige golfbelastingen.
- Z₄₁₂ Falen herstel sluiting.
Falen van het herstel van het waterkerende vermogen nadat een waterkerend constructieonderdeel is bezweken.
- Z₂₂ 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.
- Z₁₂ Bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie van de bodem.
Nadat de bodembescherming is bezweken, erodeert de onbeschermd 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.
- Z₂₁ Onvoldoende bergend vermogen.
Het kombegend 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).

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 gevolgen van aanvaarbeastingen:

- Z₄₂₂ Kans op aanvaring van het gesloten tweede keermiddel.
Kans dat het tweede keermiddel wordt aangevaren op het moment dat het eerste keermiddel open staat.
- Z₄₂₁ Aanvaarenergie groter dan opneembaar.
Kans dat de aanvaarenergie groter is dan de door de constructie van de keermiddelen opneembare energie.
- Z₄₂₃ 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.

De faalmechanismen zoals in deze paragraaf aangegeven worden in paragraaf 10.4.3.1 verder omschreven.

10.4.1.5 *Te toetsen 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.

Het bovengenoemde faalmechanisme wordt in paragraaf 10.4.3.2 verder omschreven.

10.4.1.6 *Reststerkte*

Bij het faalmechanisme *sterkte constructieonderdelen* is sprake van reststerkte na het moment van bezwijken van de bodembescherming. Deze reststerkte zit opgesloten in het mechanisme *bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie bodem* (Z_{12}). 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 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.

Reststerkte bij het faalmechanisme *instabiliteit constructie en grondlichaam* wordt 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.

Reststerkte 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 reststerkte 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 onbeschermde 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 reststerkte 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.

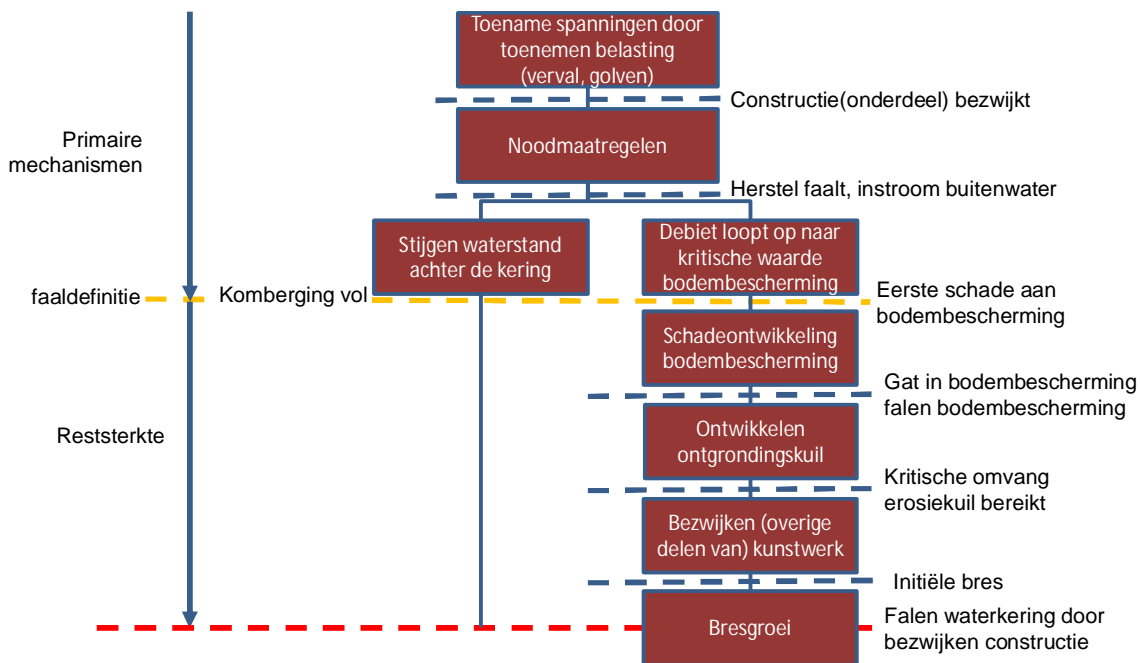
Nadat de bodembescherming is bezweken moet er dus nog het nodige gebeuren voordat het kunstwerk feitelijk faalt. Dit kan in rekening worden gebracht via het mechanisme *bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie van de bodem* (Z_{12}) Het is echter zeer lastig deze reststerkte te kwantificeren en uit 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 reststerkte is dan een verantwoorde keuze.

Reststerkte 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 reststerkte.

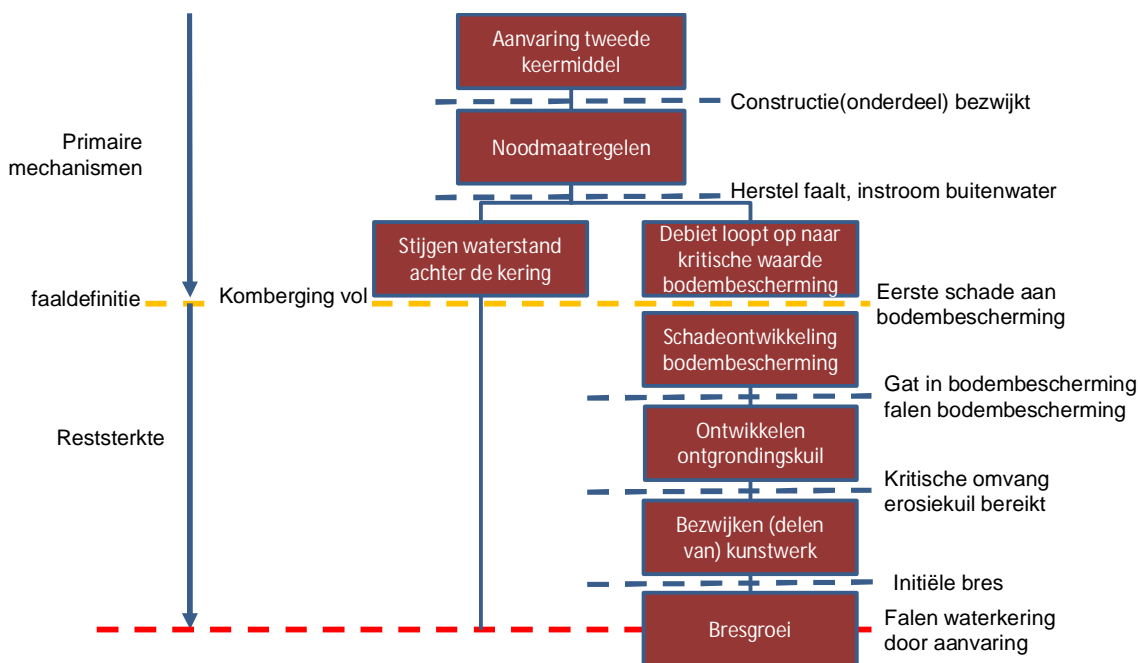
10.4.2 Schematisch overzicht van het faaltraject

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



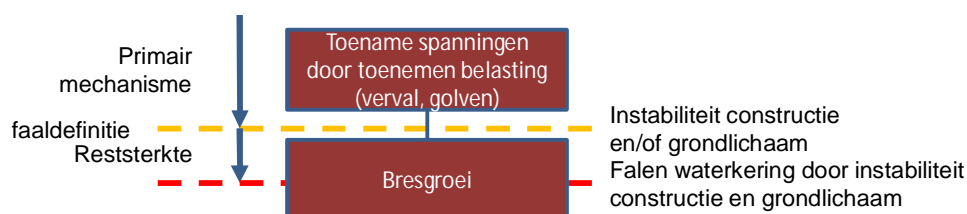
Figuur 10.12 Schematische weergave proces van falen voor faalmechanisme bezwijken constructieonderdelen

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 reststerkte processen aan gekoppeld zijn, zie Figuur 10.14.



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

10.4.3 Beknopte modelbeschrijving van de te toetsen deelmechanismen behorende bij gebrek aan sterkte en stabiliteit.

In de toetsing spelen meerdere deelmechanismen een rol. In deze paragraaf wordt kort ingegaan op deze deelmechanismen.

10.4.3.1 Deelmechanismen bij bezwijken constructieonderdelen

Hieronder worden de deelmechanismen die in de toetsing zijn onderscheiden, zie paragraaf 10.4.1.4, nader beschreven.

Z₄₁₁ *Bezwijken constructieonderdelen ten gevolge van het verval*

Dit mechanisme betreft het bezwijken van de constructie(-onderdelen) van het kunstwerk als gevolg van de optredende belastingen. Hierbij gaat het om belastingen die gerelateerd zijn aan hoogwaterkeren, zijnde hydraulische en wellicht windbelastingen. Bezwijken treedt op als de sterkte van de constructie(-onderdelen) niet toereikend is voor de belastingen. In bijna alle gevallen zijn de maatgevende constructie(-onderdelen) van een waterkerend kunstwerk de keermiddelen of zaken die hieraan zijn gerelateerd, zoals opleggingen. Het beoordelen van dit mechanisme bestaat uit het vergelijken van de maximaal toelaatbare snedekrachten in een constructie(-onderdeel) met de optredende snedekrachten als gevolg van de belastingen.

Z₄₁₂ *Falen herstel sluiting*

Dit mechanisme betreft de kans op falen van herstellpogingen van het waterkerend vermogen van het kunstwerk nadat een waterkerend constructieonderdeel is bezweken. In de praktijk kan het ongewenst instromen van water als gevolg van het bezwijken van een waterkerende constructieonderdeel wellicht nog worden gestopt door het kerende vermogen van het kunstwerk te herstellen. Hierbij kan gedacht worden aan het sluiten van een nog ander aanwezig keermiddel, of het op alternatieve wijze stoppen van het instromende debiet. Bij alternatieve wijze kan bv worden gedacht aan het gooien van zandzakken in een watervoerende leiding door de waterkering.

Er zijn geen richtlijnen voor het hanteren van een faalkans voor herstellpogingen. Dit betekent dat in de toetspraktijk in principe de kans van falen van herstel van de sluiting een waarde 1 krijgt (herstellpogingen falen altijd). Met name bij de kleinere kunstwerken kan het mogelijk zijn om een instroming nog te stoppen. Indien bereikbaarheid en materieel en materiaal geen probleem zijn, kan dan een inschatting van de faalkans van herstel worden geschat.

Z₄₂₁ Aanvaarenergie groter dan opneembaar

Dit mechanisme betreft het bezwijken van een constructie als gevolg van een aanvaring door een schip. Om deze kans op bezwijken te bepalen wordt de door de constructie opneembare energie vergeleken met de energie uitgeoefend door het schip tijdens de botsing. Indien de opneembare energie kleiner is dan de optredende energie zal bezwijken van de constructie plaatsvinden. Dit leidt vervolgens tot instroming van water in het achterland. Van belang bij dit mechanisme zijn de opneembare energie en de vaarsnelheid en massa van het schip. De opneembare energie is over het algemeen lastig te bepalen. Een nauwkeurige berekening hiervan vereist zeer uitgebreide sommen. De opneembare energie is daarbij ook afhankelijk van het soort en de opbouw van de constructie (keermiddel).

Metingen en kentallen van vaarsnelheden in sluizen kunnen worden gebruikt om snelheden af te schatten. De massa's van de diverse schepen is meestal redelijk bekend. Algemeen uitgangspunt is dat recreatievaart te weinig massa bezit om een constructie middels een botsing te laten bezwijken.

Z₄₂₂ Kans op aanvaring van het gesloten tweede keermiddel

Dit mechanisme beschrijft de kans per jaar op aanvaring van een keermiddel door een schip. Het faalmechanisme speelt met name een rol bij schutsluizen, waarbij tijdens het invaren van een schip varende van buiten naar binnen, bij nog openstaande buitendeur, de binnendeur wordt aangevaren. De kans dat dit gebeurt is met name afhankelijk van het aantal nivelleringsen dat plaats vindt en kans op een aanvaring per nivellering. De kans op aanvaring per nivellering wordt onder andere beïnvloed door de afmetingen van de schepen in relatie tot de afmetingen van de kolk en de aanvaarroute van de sluis. Indien de aanvaarroute dusdanig is dat dit nog niet tot substantiële afname van de normale vaarsnelheid leidt, betekent dit dat het verminderen van vaart alleen vanuit de optiek van schipper en sluiswachter plaats zal vinden. Bij bijvoorbeeld een bocht voor de sluis, wordt de schepen bij het naderen van de sluis kolk al gedwongen om sterk vaart te minderen.

De kans op aanvaren wordt zeer sterk gereduceerd als er in de sluis aanvaarconstructies worden toegepast bij het schutten.

Z₄₂₃ Falen sluiting ander keermiddel ten behoeve van herstel

Dit mechanisme betreft de kans op falen van herstelmaatregelen met betrekking tot het waterkerende vermogen, nadat door een botsing dit vermogen is verdwenen. In de praktijk komt dit neer op het alsnog realiseren van een gesloten kunstwerk nadat een constructie(-onderdeel) is uitgevaren. Vaak wordt hierbij gekeken naar het alsnog sluiten van het keermiddel in het andere hoofd van de schutsluis. Of een dergelijke sluiting alsnog lukt hangt af van het type keermiddel dat wordt ingezet voor het herstel en de stroomsnelheden die optreden nadat het constructie(-onderdeel) is uitgevaren. Hierbij geldt dat waaierdeuren bij hogere stroomsnelheden gesloten kunnen worden dan puntdeuren.

Z₂₂ Bezwijken bodembescherming achter kunstwerk

Dit mechanisme betreft het bezwijken van de bodembescherming achter het kunstwerk. Een nadere beschrijving van Z₂₂ is gegeven in paragraaf 10.2.6.

Z₁₂ Bezwijken kunstwerk als gevolg van erosie van de bodem

Dit mechanisme betreft de kans dat het kunstwerk als geheel bezwijkt (onderuit gaat) door erosie van de onbeschermd bodem nadat bezwijken van de bodembescherming heeft plaatsgevonden. Een nadere beschrijving van Z₁₂ is gegeven in paragraaf 10.1.6.

Z₂₁ Onvoldoende bergend vermogen

Dit deelmechanisme betreft het falen van het kunstwerk als gevolg van onvoldoende waterbergend vermogen in het achterland doordat er te veel water door het niet waterkerende kunstwerk stroomt gedurende een hoogwatergolf. Hierbij moet sprake zijn van significante overstromingsgevolgen. Een harde definitie van significante gevolgen is vooralsnog niet voor handen.

Het rekenmodel is grofweg hetzelfde als bij Z₁₃, zie paragraaf 10.1.5, alleen het instromend debiet na bezwijken van een constructie(-onderdeel) wordt bepaald met behulp van stromingsmodellen voor de diverse situaties, zoals het model "lage drempel" en "verdronken koker". Het instromende debiet is volgens deze modellen afhankelijk van de afmetingen van de doorstroomopening(en), de hoogte van de drempel en het verval over het kunstwerk.

10.4.3.2 Deelmechanismen bij instabiliteit constructie en grondlichaam

Bij dit faalmechanisme zijn in de toetsing het volgende deelmechanisme van toepassing:

Z₄₃ Bezwijken door algeheel stabiliteitsverlies ten gevolge van het verval

Feitelijk is dit geen deelmechanisme, maar direct het faalmechanisme. Bezwijken als gevolg van algeheel stabiliteitsverlies treedt op wanneer de belastingen niet kunnen worden afgedragen naar de ondergrond, zonder dat dit leidt tot substantiële vervormingen. De belastingen die van toepassing zijn, zijn met name hoogwater gerelateerd zoals verval en wellicht windbelasting. Golfbelastingen kunnen van toepassing zijn indien de golfperiode lang genoeg is om de constructie te laten 'merken' dat er een golf aanwezig is. Bij grote golven kunnen golfklappen optreden, welke bij veelvuldig voorkomen ook kunnen bijdragen aan instabiliteit.

Stabiliteitsverlies van het grondlichaam waarin een kunstwerk is opgenomen is zelden van belang, aangezien het kunstwerk vaak zijn eigen fundatie kent. Daarnaast wordt door de aanwezigheid van (kwel-)schermen en vleugelwanden ook al een weerstand tegen instabiliteit van het grondlichaam opgebouwd.

Het beoordelen van dit mechanisme bestaat uit het vergelijken van de maximaal optredende belastingen en de maximaal opneembare belastingen. Een opneembare belasting die kleiner is dan de optredende belasting, leidt tot falen.

10.4.4 Beoordelingen in het WTI2017

In het WTI2017 wordt voor het toetsspoor gestart met een eenvoudige beslisregel. Deze is nagenoeg gelijk aan de tweede stap in de vigerende toetsmethodiek. De volgende stap (stap 2) bestaat uit het uitvoeren van een Gedetailleerde toets, niveau 2a-2 (volledig probabilistisch). De toetsing op niveau 2a-1 (semi-probabilistisch) wordt wel uitgewerkt, maar is niet in stap 2 beschikbaar. De semi-probabilistische toets kan worden gebruikt in een Toets op maat of ter verificatie van de gedetailleerde analyse op probabilistisch niveau.

10.5 Literatuur kunstwerken

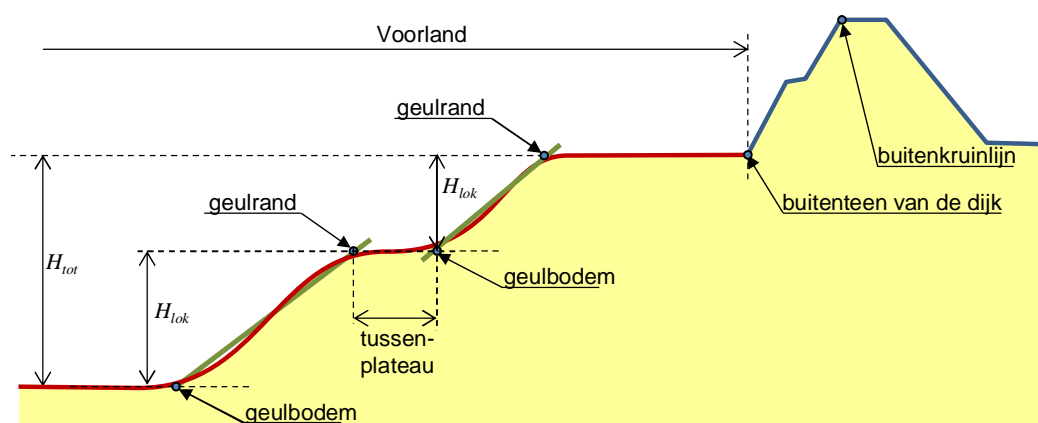
- [1] *Considerations and Model tests on the Design of River Barrages with Respect to Piping*. M. Achmus, B.G.S. Mansour. Proceedings Third International Conference on Scour and Erosion. ICSE, Amsterdam, The Netherlands, November 1-3 2006. CURNET, Gouda, 2006
- [2] *Leidraad Kunstwerken*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, ISBN 90-369-5544-0, Delft, mei 2003
- [3] *Richtlijn Ontwerp Kunstwerken*. RWS Dienst Infrastructuur, document RTD 1001:2013, versie 1.2 definitief, januari 2013
- [4] *WTI 2017 – Cluster Toetsregels Kunstwerken, Achtergrondrapportage toetsspoor hoogte*. Deltares rapport 1209438-000-GEO-000x Concept. Delft, 15 april 2014
- [5] *WTI 2017 - Cluster Toetsregels Kunstwerken, Achtergrondrapport toetsspoor Betrouwbaarheid Sluiting*. R. Delhez. Deltares rapportnr. 1209438-000-GEO-0007 Concept. Delft, 15 april 2014
- [6] *WTI 2017 – Cluster Toetsregels Kunstwerken, Achtergrondrapportage toetsspoor Piping*. Deltares rapport 1209438-000-GEO-000x Concept. Delft, 15 april 2014
- [7] *WTI 2017 – Cluster Toetsregels Kunstwerken, Faalmechanisme beschrijvingen Sterkte en Stabiliteit Kunstwerken*. R.C.M. Delhez, Deltares rapportnr. 1220087-004-GEO-0005 Versie C2. Delft, 29 september 2015
- [8] *Ontwerp van schutsluizen*. Rijkswaterstaat, Bouwdienst, ISBN 90-369-3305-6 / 90-369-3306-4. Utrecht, juni 2000
- [9] *Technisch rapport Zandmeevoerende wellen*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. RWS-DWW, Delft, maart 1999
- [10] *WTI 2017 Cluster Toetsregels Kunstwerken, Handreiking aansluitconstructies (product 6.0F)*. J. Bredeveld, B. van Bree. Deltares rapport 1220087-006-GEO-0002, Versie D1. Delft, 6 juli 2015
- [11] *Functional design failure mechanism height of structures, WTI 2017 –CTK*. B. van Bree. Deltares report 12209438-000-GEO-0024, final. Delft, October 2014
- [12] *Functional Design, Reliability of closure process hydraulic structure (final), WTI 2017 – CTK*. R.C.M. Delhez, J. Bredeveld. Deltares report 12209438-002-GEO-0005, version D1, final. Delft, December 2014
- [13] *Functional Design, Structural failure, WTI 2017 – CTK*. R.B. Jongejan, R.C.M. Delhez, J. Bredeveld. Deltares report 12209438-002-GEO-0005, version D1, final. Delft, December 2014
- [14] *Toets op maat Betrouwbaarheid Sluiting demontabele keringen WTI 2017 – Kunstwerken*. Deltares, rapport 1220087-002-GEO-0008-vD1-r. Delft, februari 2016
- [15] *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

- [16] *Kunstwerken Schematiseringshandleiding faalmechanisme overslag en/of overloop.* B. van Bree. Deltares rapport 120087-001-GEO-0001-gbh, Versie C1. Delft, november 2015
- [17] *Kunstwerken Schematiseringshandleiding faalmechanisme niet sluiten.* R.C.M. Delhez. Deltares rapport 120087-002-GEO-0002, Versie D1. Delft, december 2015
- [18] *Kunstwerken Schematiseringshandleiding faalmechanisme onder- of achterloopsheid.* B. van Bree. Deltares rapport 120087-003-GEO-0003-gbh, Versie D1. Delft, november 2015
- [19] *Waterstandsverlopen Rijntakken en Maas, WT12017.* H. Chbab. Deltares rapport 1220082-002-HYE-0002, Concept. Delft, november 2015
- [20] *Waterstandsverlopen kust, WT12017.* H. Chbab. Deltares rapport 1220082-002-HYE-0003, Versie 2. Delft, december 2015
- [21]

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 op het voorland, die tot een inscharing tot in of vlakbij de waterkering kunnen leiden, waardoor de standzekerheid in gevaar kan komen of anderszins de randvoorwaarden substantieel veranderen. Voorland is het gebied aansluitend aan de buitenzijde van de waterkering. Dit gebied wordt ook wel vooroever genoemd. Ook een diepe steile stroomgeul bij een schaarlijk valt onder de definitie van voorland. Het voorland kan zowel onder als boven water liggen, en zelfs boven toets- of ontwerppeil. Figuur 11.1 geeft een principeschets 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 Principeschets voorland met begrippen als de waterkering een dijk betreft

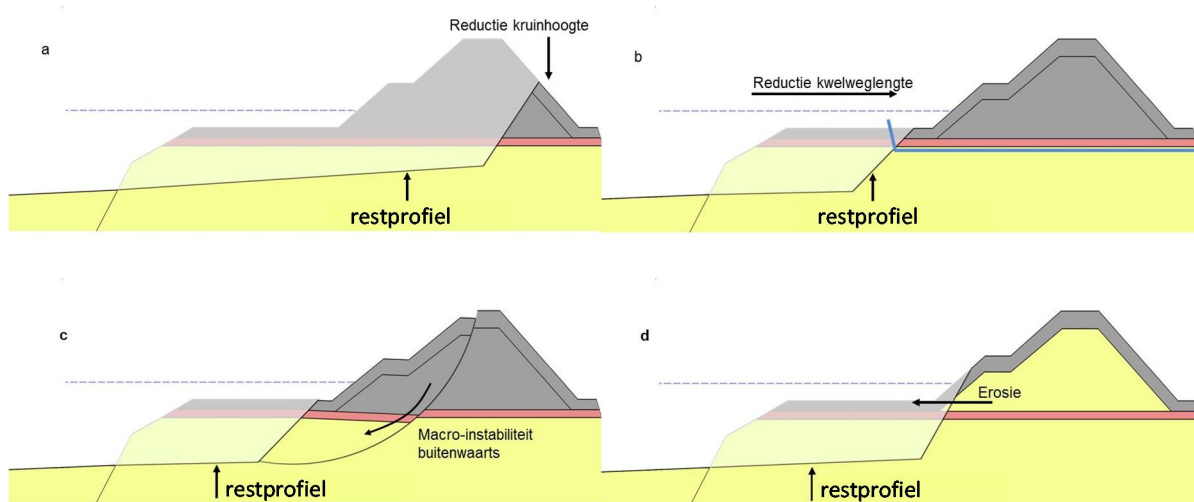
Het talud van de dijk is het gedeelte van het dijkprofiel met een helling tussen 1:1 en 1:10. De buitenteen is de overgang van het talud naar het maaiveld buitendijks. In Figuur 11.1 zijn verder twee lokale taludhoogtes (H_{lok}) en de totale taludhoogte (H_{tot}) van de geul te onderscheiden. Als er 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 directe mechanismen genoemd. De belangrijkste directe mechanismen die beïnvloed kunnen worden door de processen in het voorland zijn:

- Overslag/overloop (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).
- Stabiliteit bekleding buitentalud.

Een en ander is geïllustreerd in Figuur 11.2. Indien een zettingsvloeiing tot een extreme kruinverlaging leidt, kan dit, in combinatie met een laag achterland, direct tot een overstroming 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 vloeïng op directe mechanismen (a) overslag/overloop, (b) piping, (c) buitenwaartse macro-instabiliteit en (d) beschadiging 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 toetsing op de stabiliteit van het voorland:

- Erosie door golfafslag.
- Afschuiving.
- Zettingsvloeiing.

In de drie volgende paragrafen worden deze drie mechanismen beschreven.

11.2 Erosie door golfafslag

Deze paragraaf behandelt de erosie die gedurende een storm/ hoogwatergebeurtenis optreedt in het voorland. 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 toetsing wordt uitgegaan van de situatie die zich naar verwachting ontwikkeld heeft ten tijde van de (toekomstige) peildatum van de toetsing. Een tweede voorbeeld is de erosie die rond niet-waterkerende objecten (NWO) 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. Deze mechanismen worden getoetst in het kader van het toetsspoor NWO.

11.2.1 Fenomenologische procesbeschrijving

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 toetspeil en maaiveldhoogte meer dan twee maal de significante golfhoogte is. Golfafslag speelt dan geen rol in het voorland (mogelijk wel op de dijk).

Bij een toetspeil van minder dan twee maal de significante golfhoogte boven het maaiveld ondervindt dit nog invloed van de golfbeweging. Als er een grasmat aanwezig is, wordt deze potentieel aangetast (of als er bij voorbaat geen grasmat aanwezig is), en staat het onbeschermde maaiveld bloot aan de golfwerking. Als de golfhoogte minder dan 0,75 m is wordt een aanwezige grasmat geacht daartegen bestand te zijn.

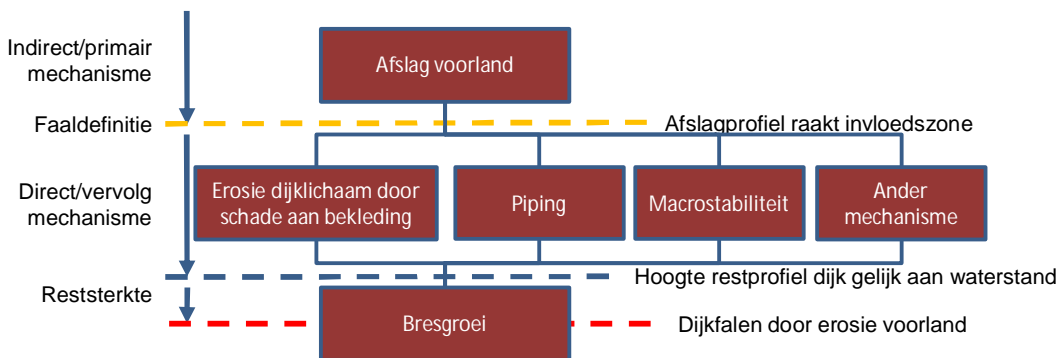
Wanneer de waterstand onder de geulrand ligt, geeft erosie van het talud aanleiding tot versteiling, totdat er een instabiele situatie optreedt en er een hoeveelheid grond naar beneden stort. Door golfbeweging en retourstroom wordt dit materiaal afgevoerd, totdat er opnieuw uitholling en versteiling 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 toetsprofiel voor de twee volgende mechanismen afschuiven en zettingsvloeiing.

Als het verschil tussen toetspeil en maaiveldhoogte meer dan twee maal de significante golfhoogte is, dan kan bij een voldoende lange duur van de belasting een significante verlaging van het maaiveld optreden nabij de teen van de dijk.

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, met name buitenwaartse stabiliteit en piping. Ook binnenwaartse stabiliteit 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

11.2.3 Beknopte modelbeschrijving voor het te toetsen mechanisme

Het faalmechanisme erosie kent alleen de Eenvoudige toets (toetslaag 1). Hierin worden achtereenvolgens het schadelijkheids criterium en het optredingscriterium getoetst. Het eerste gaat op basis van een eenvoudige grafiek van de benodigde maximale afslagbreedte als functie van de golfhoogte, het tweede toetst de voorwaarden beschreven in paragraaf 11.2.1. Voor dit mechanisme bestaat geen Gedetailleerde toets.

11.3 Afschuiving voorland

11.3.1 Fenomenologische procesbeschrijving

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 oevers.

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 verkeer over de waterkering, door een afname van het tegenwerkend moment, bijvoorbeeld door erosie van de geul of geulwand, door sedimentatie op het voorland, of door een afname van de schuifsterkte van de ondergrond als gevolg van toenemende waterspanningen [3].

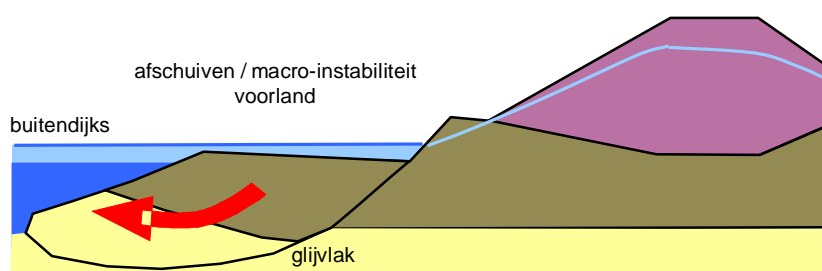


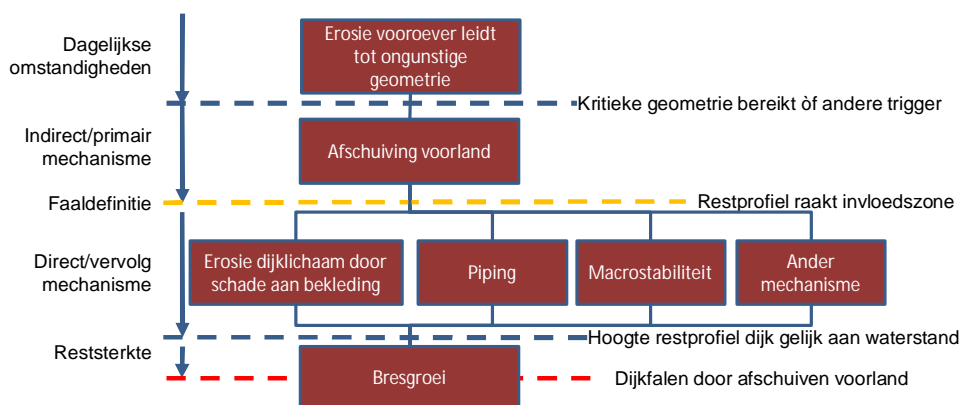
Figure 11.4 Principeschets afschuiving/ macro-instabiliteit voorland

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 (Macro-stabiliteit) 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 een cascade van afschuivingen een goed denkbaar scenario: 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 macro-stabiliteit 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 afschuiven 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

11.3.3 Beknopte modelbeschrijving voor het te toetsen mechanisme

De toets van het faalmechanisme afschuiving verloopt analoog aan die van macrostablieiteit buitenwaarts. Het betreft een controle van de weerstand tegen afschuiven van een grondlichaam. In de Eenvoudige toets (toetslaag 1) vindt deze beoordeling plaats op basis van een geometrische toets, waarmee wordt nagegaan of het profiel van het voorland voldoet aan veilige afmetingen, met name de horizontale afstand tussen de geulrand en de waterkering en de steilheid van het profiel. In de Gedetailleerde toets (toetslaag 2) wordt de beoordeling van afschuiving voorland uitgevoerd met een glijvlakanalyse op basis van ongedraineerde schuifsterkteparameters (met CSSM) zoals ook bij macrostablieiteit binnenwaarts (STBI) en macrostablieiteit buitenwaarts (STBU).

11.4 Zettingsvloeiing

11.4.1 Fenomenologische procesbeschrijving

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. Overeenkomstig kan gesproken worden over een 'verwekingsvloeiing' of 'een 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 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 het risico.
- 2 De taludhelling, hoe steiler des te groter het risico.
- 3 De hoogte van het talud, hoe hoger, 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 vloeiing in gang zetten:

- Een flinke trilling zijn, bijvoorbeeld door 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 *bresvloeiing* 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 verwekingsvloeiing. 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) bresvloeiing 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 bresvloeiing 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 vloeiingen sprake zijn van een combinatie van de mechanismen verwekingsvloeiing en bresvloeiing:

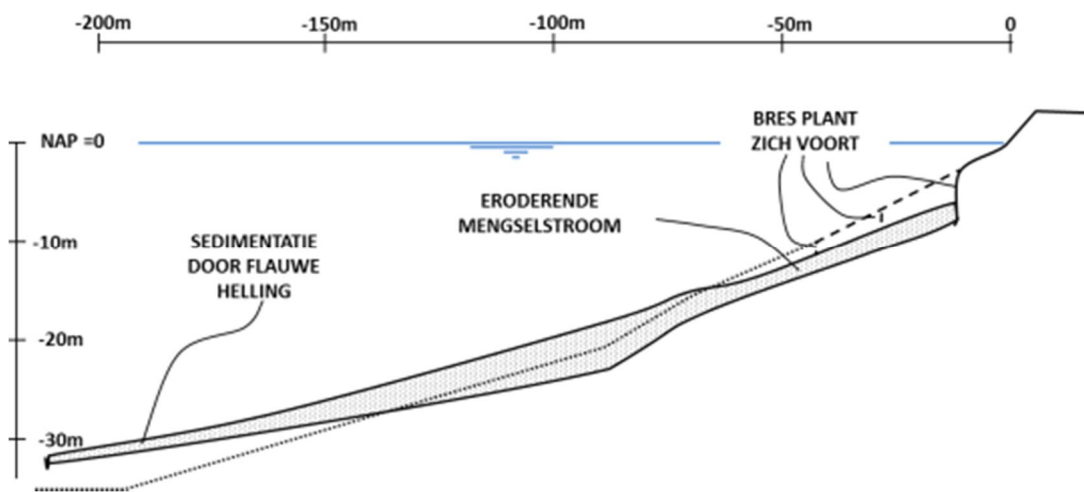
- Een verwekingsvloeiing in het deel van een talud met losgepakte zandlagen kan in een paar minuten een steile bres doen ontstaan aan de bovenkant van de vloeiing en/of een mengselstroom met groot zanddebiet aan de onderkant.
- Door bressen kan de taludvorm zodanig veranderen (veelal versteilen) dat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

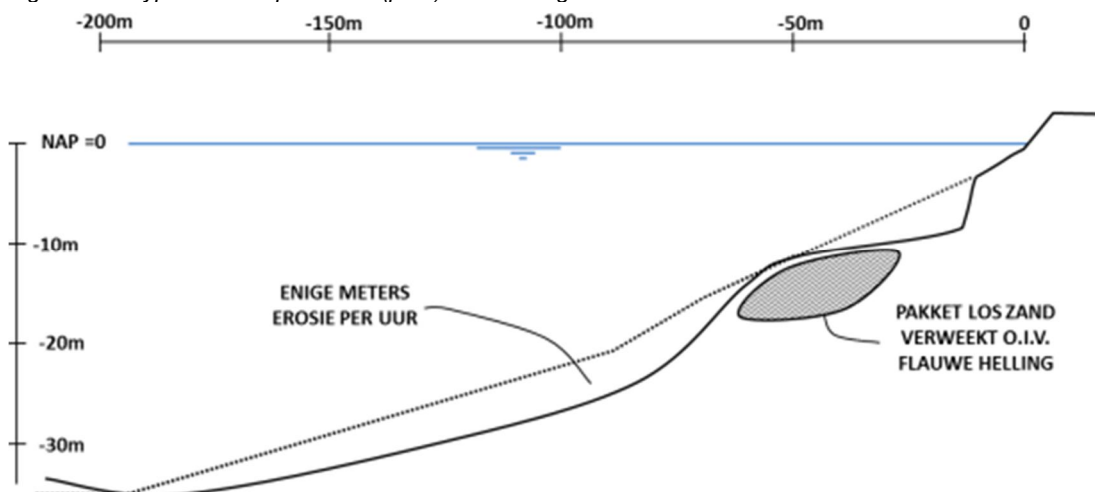
een laag losgepakt zand ligt. Als een bres onderin het talud begint en langzaam naar boven loopt door het (middel) vastgepakte zand kan het losgepakte zand gaan vloeien op het moment dat de bres die laag bereikt.

Het verloop van een dergelijke vloeïng waarin zowel verweking als bresvloeiing een rol speelt is geïllustreerd in Figuur 11.6 t/m Figuur 11.8.

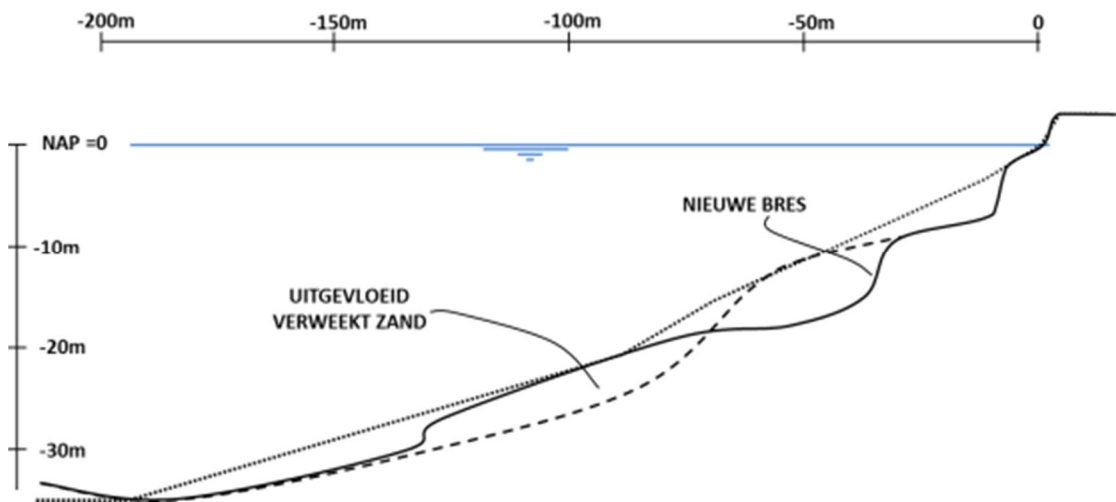
Afhankelijk van de grondopbouw en opbouw van de dijk en de lengte waarover een vloeïng terugschrijdt, kan profiel dat resteert na de zettingsvloeïng op korte of langere termijn tot een zogenaamd direct (d.w.z. hoogwater-gedreven) mechanisme leiden en, als ook de reststerkte is opgesoupeerd, tot een overstrooming (zie verder paragraaf 11.4.2).



Figuur 11.6 Typisch verloop van een (pure) bresvloeiing



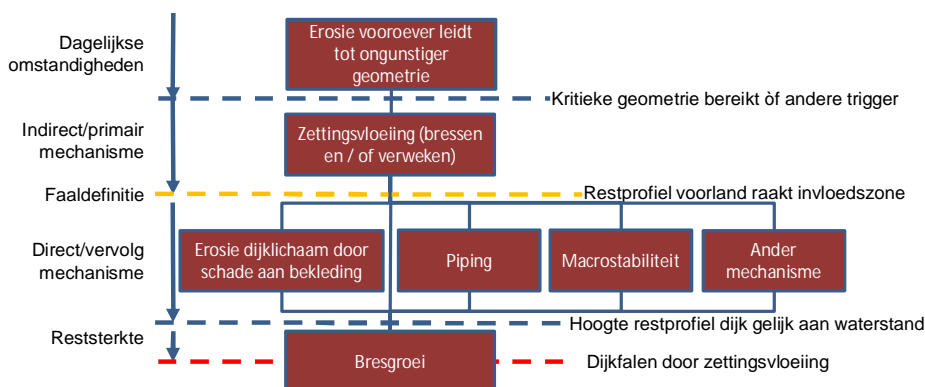
Figuur 11.7 Mogelijk verloop van een (pure) bresvloeiing die overgaat in een verwekingsvloeïng



Figuur 11.8 Mogelijk verloop van een verwekingsvloeiing die weer overgaat in bresvloeiing

11.4.2 Overzicht van het faaltraject zettingsvloeiingen

De fenomenologische beschrijving van de het mechanisme zettingsvloeiing in de vooroever van een waterkering, dat uiteindelijk kan leiden tot een overstrooming, 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 overstrooming leiden (tenzij een zeer grote inscharing optreedt in combinatie met een laag achterland of indien hoogwaters elkaar snel opvolgen zoals in het getijdgebied).



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 overstrooming leiden

11.4.3 Beknpte modelbeschrijving voor het te toetsen mechanisme

In de Eenvoudige en de Gedetailleerde toets op zettingsvloeiing worden niet alle deelmechanismen die in de gebeurtenissenboom zijn weergegeven expliciet meegenomen. In onderstaande figuur is weergegeven welke deelmechanismen binnen een zettingsvloeiing worden getoetst.

De beoordeling vereist drie berekeningen:

1. Berekening van de kritieke inscharingslengte.
2. Berekening van de kans op een zettingsvloeiing.
3. Berekening van de kans dat de inscharingslengte de kritieke inscharingslengte overschrijdt.

Ad 1. De kritieke inscharingslengte wordt bepaald door het vervolgmecanisme dat de meest stringente eis aan het voorland stelt. Met de rekenmodellen voor de mogelijk kritieke vervolgmecanismen moet dus de omhullende van alle buitendijkse invloedzones worden bepaald.

Ad 2. Met behulp van een op empirie gebaseerde relatie kan de frequentie van voorkomen van een zettingsvloeiing worden berekend uitgaande van een schematisatie van het meest ongunstige profiel gedurende de beoordelingsperiode. Uiteraard zijn voor deze berekening ook lokaal verzamelde materiaalparameters, dijkgeometrie en lodingsgegevens noodzakelijk. Uit de frequentie kan de kans op een zettingsvloeiing worden bepaald.

Ad 3. De inscharingslengte zelf wordt berekend op basis van een vereenvoudigd volume-evenwicht, waarbij het weggevoerde gedeelte overeen moet komen met de aanzanding ten gevolge van de vloeiing. Door rekening te houden met de onzekerheden dient door middel van een probabilistische berekening de kans te worden bepaald.

Onzekerheden in de opbouw van de ondergrond wordt bij de berekeningen genoemd onder ad. 2, in rekening gebracht door meerdere ondergrondscenario's door te rekenen en de kansen per scenario te combineren met de kans op het scenario.

In de Gedetailleerde toets wordt nagegaan of de kans dat de kritieke inscharingslengte wordt overschreden groter is dan de toelaatbare kans.

In een toets op maat kan de kans dat de kritieke inscharingslengte wordt, worden gecombineerd met de kans op het vervolgmecanisme, teneinde te bepalen of de combinatie van eventuele zettingsvloeiing gevolgd door het vervolgmecanisme leidt tot een voldoende kleine faalkans.

11.5 Literatuur voorland

- [1] *Update of detailed assessment method on flow slides - final report, WTI Cluster A.* G.A. van den Ham. Deltares report 1209439-002-GEO-0001-jvm. Delft, September 2015.
- [2] *Schematiseringshandleiding zettingsvloeiing.* G.A. van den Ham. Deltares rapport 1220078-007-GEO-0007, Versie 4. Delft, december 2015.
- [3] *Dijkdoorbraakprocessen.* E.O.F. Calle, GeoDelft rapport kenmerk 720201/39. Delft, maart 2002.

Afkortingen

ABO	Bezijken onderlaag van asfaltbekleding door erosie.
AGK	Bezijken asfaltbekleding door golfklappen.
AWO	Bezijken asfaltbekleding door wateroverdruk.
BSKW	Betrouwbaarheid sluiting van het kunstwerk.
CUR	Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving.
DA	Duinafslag.
FM	Fenomenologisch beschrijving van de faalmechanismen (dit rapport).
GABI	Grasbekledingen afschuiven binnentalud.
GABU	Grasbekleding afschuiven buitentalud.
GEBU	Grasbekledingen erosie buitentalud.
GEKB	Grasbekledingen erosie kruin en binnentalud.
HAV	Havendammen.
HTKW	Overslag/overloop van het kunstwerk.
NWO	Niet-waterkerende objecten.
NWObe	bebouwing als niet-waterkerende object (onderdeel van NWO).
NWObo	begroeiing als niet-waterkerende object (onderdeel van NWO).
NWOkI	kabels en leidingen (onderdeel van NWO).
NWOoc	Overige constructies (onderdeel van NWO).
OKH	Open Keerhoogte.
OKP	Open Keerpeil.
OSA	Open steenasfalt.
PKW	Achter- of onderloopsheid van het kunstwerk.
RWS	Rijkswaterstaat.
STBI	Macrostabieleit binnenwaarts.
STBU	Macrostabieleit buitenwaarts.
STKWI	Sterke en stabiliteit van het kunstwerk: langsconstructie.
STKWp	Sterke en stabiliteit van het kunstwerk: puntconstructie.
STOWA	Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer.
STPH	Opbarsten, heave en piping.
STVL	Stabiliteit voorland.
VLAF	Afschuiving van het voorland.
VLGA	Golfafslag van het voorland.
VLZV	Zettingsvloeiing van het voorland.
VTV	Voorschrift Toetsen op Veiligheid van Primaire Waterkeringen.
VTV-TD	Technisch deel van het VTV.
V&ZG	Vol en zat gepenetreerd(e breuksteen).
WAB	Waterbouw asfaltbeton.
WTI	Wettelijk toetsinstrumentarium.
ZAF	Afschuiven steenzetting (onderdeel van ZST).
ZEO	Erosie onderlaag van de steenzetting (onderdeel van ZST).
ZMG	Materiaaltransport vanuit de granulaire laag van de steenzetting (onderdeel van ZST).
ZMO	Materiaaltransport vanuit de ondergrond van de steenzetting (onderdeel van ZST).
ZTG	Toplaaginstabiliteit steenzetting bij golfaanval (onderdeel van ZST).
ZTS	Toplaaginstabiliteit steenzetting bij langsstroming (onderdeel van ZST).
ZST	Stabiliteit steenzetting.

A Begrippen

Opgemerkt wordt dat deze begrippenlijst uitgebreider is dan noodzakelijk voor deze rapportage.

Begrip	Omschrijving
Aanleghoogte	Kruinhoogte van de waterkering onmiddellijk na het gereedkomen ervan.
Aansluitingsconstructie	Aansluiting van twee typen waterkeringen, bijvoorbeeld een dijk, een duin, hybride kering, kunstwerken en hoge gronden.
Aanverwant bekledingstype	Niet-standaardsteen-zetting of bekledingstype dat verwant is aan steenzettingen.
Achterland	Gebied aansluitend aan de landzijde van de waterkering.
Achterloopsheid (duinen)	Proces waarbij water zijdelings achter een waterkering langs stroomt.
Achterloopsheid (kunstwerken)	Ontstaan van holle ruimten aan de zijkant van een kunstwerk als gevolg van een geconcentreerde kwelstroom waarbij gronddeeltjes worden meegevoerd. Hierbij loopt de kwelstroom langs het kunstwerk op het grensvlak van een cohesieve laag en zand.
Actuele sterkte	Huidige werkelijke sterkte.
Afdeklaag	Ondoorlatende of slecht doorlatende laag op het zandpakket aan de binnendijkse zijde, bestaande uit klei of veen.
Afschuiving	Verplaatsen van een deel van een grondlichaam of bekleding door overschrijding van het evenwichtsdragvermogen.
Afslag	Erosie van het duinprofiel tijdens storm.
Afslaglijn	Lijn in lengterichting van de kust die de afslagpunten verbindt.
Afslagprofiel	Profiel van duin of dijk met voorland waarbij tijdens storm afslag is opgetreden.
Afslagpunt	Snijpunt van het afgeslagen duinfront met het Rekenpeil. Het kritieke afslagpunt geeft die mate van duinafslag aan waarbij nog juist geen doorbreken optreedt.
Afslagzone	Deel van een duingebied waar tijdens storm afslag optreedt.
Afsluitmiddel	Beweegbaar onderdeel van een waterkerend kunstwerk waarmee de doorgang in de waterkering ten behoeve van goederen, voertuigen en/of personen waterkerend kan worden afgesloten. De functie kan door een afsluitmiddel op verschillende wijzen worden ingevuld: in beginsel gesloten, eventueel te openen op aanvraag, of in beginsel open en pas te sluiten bij sluitpeil of calamiteit
Afvoerdebiet	De rivierafvoer.
Afvoergolf	Zie hoogwatergolf.

Afvoerpiek	Grootste debiet in een gemodelleerde afvoergolf.
Afvoerstochast	Afvoer is het volume water die per seconde door een dwarsdoorsnede van bijvoorbeeld een rivier stroomt. In het rivierengebied is dit een basisstochast omdat de afvoer in grote mate bijdraagt aan de natuurlijke variabiliteit van de hydraulische belasting in dat gebied.
Afvoerverloop	Verloop in de tijd van de rivierafvoer op een bepaalde locatie.
Afzinktunnel	Tunnel bestaande uit geprefabriceerde elementen, die in drijvende toestand worden verplaatst en in een vooraf gebaggerde sleuf worden afgezonken.
Aggregaten	Natuurlijk gevormde brokken grond met afmetingen van millimeters tot decimeters.
Aquaduct	Kunstwerk waarmee een waterloop in een open constructie over een weg of andere waterloop wordt gevoerd.
Aquifer	Watervoerend pakket. Grondlagen waarbinnen de relatief (ten opzichte van de omgeving) hoge doorlatendheid aanzienlijk transport van grondwater mogelijk maakt.
Aquitard	Grondlagen met een in vergelijking tot een aquifer lage doorlatendheid (bijvoorbeeld een kleipakket). De horizontale stroming in een aquitard is zeer gering, terwijl wel aanzienlijke verticale stroming mogelijk is.
AQUO	Aquo-standaard – de uniforme taal voor de uitwisseling van gegevens binnen de watersector. De Aquo-standaard maakt het mogelijk om op een uniforme manier gegevens uit te wisselen tussen partijen die betrokken zijn bij het waterbeheer en draagt daarmee bij aan een kwaliteitsverbetering van het waterbeheer.
Artesisch water	(Grond)water met een wateroverspanning ten opzichte van een hydrostatische waterspanningsverdeling, waarbij de wateroverspanning het gevolg is van de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket.
Artesisch watervoerend pakket	Afgesloten watervoerend pakket, waarin de stijghoogte van het grondwater boven het maaiveld uitkomt.
Asfalt	Natuurlijk of kunstmatig mengsel van bitumen en minerale stoffen.
Asfaltkleefmiddel	Dun vloeibaar mengsel van bitumen en een vluchtig oplosmiddel.
Asfaltmastiek	Warm bereid asfalt met een continu gegradeerd mengsel van zand en vulstof en een overmaat aan bitumen, dat nagenoeg geen holle ruimte heeft.
Asfaltmortel	Mengsel van bitumen met zand en vulstof als component van een asfaltmengsel.
Autocorrelatiefunctie	Functie die de mate van samenhang aangeeft tussen de waarde van een variabele op locatie x en de waarde van diezelfde variabele op naburige locaties.
Balgstuw	Type stuw, die ook kan worden ingezet als keersluis. Bij dit type stuw wordt een rubber doek bevestigd aan constructies op de bodem van de watergang en de oevers. Als men wil dat de stuw het water tegenhoudt, pompt men de balg vol met water en lucht, waardoor de stuw omhoog komt. Afhankelijk van het gewenste waterpeil kan men in de stuw meer of minder water/lucht laten stromen.

Bandijk	Dijk die het winterbed omsluit.
Basaltzuil	Zuilvormig toplaagelement van basalt.
Basisinstrumentarium	Beoordelingsschema's, rekentechnieken en modellen, aangevuld met handleidingen en achtergronddocumenten.
Basiskustlijn	Kustlijn die in het kader van het kusthandhavingsbeleid als referentie dient. In het algemeen de positie van de 'gemiddelde' kustlijn op 1 januari 1990.
Basismateriaal	Bovenste laag van het grondlichaam onder de bekledingsconstructie.
Basisstochasten	Stochasten die de belangrijkste bedreigingen in het belastingmodel beschrijven: rivierafvoer, wind, zeewaterstand, meerpeil en golven op zee.
Basisveiligheid	De minimale veiligheid tegen overstromingen voor iedereen achter de dijk.
Beddingsconstante	Een coëfficiënt die de verhouding aangeeft tussen de door de grond geleverde tegendruk en de zakking van de grond ten gevolge van een bovenbelasting (een parameter die de stijfheid van de ondergrond uitdrukt).
Beheer	Het geheel van activiteiten dat noodzakelijk is om te waarborgen dat de functies van de waterkering blijven voldoen aan de daarvoor vastgestelde eisen en normen.
Beheerder	Zie waterkeringbeheerder.
Beheerdersoordeel	Beoordeling van de veiligheid op basis van een onderbouwde inschatting van de beheerder.
Beheersplan	Document waarin het geplande beheer van een kering is vastgelegd.
Beheersregister	Ook wel Technisch beheersregister. Document met de beschrijving van de voor het behoud van het waterkerend vermogen kenmerkende gegevens van de constructie en de feitelijke toestand van de waterkering.
Bekkenpassage	Een vispassage bestaande uit een cascade van kleine bakken met stromend water, waarbij de vis steeds naar een hoger niveau moet zwemmen of springen om een waterbouwkundig kunstwerk te passeren.
Bekleding	De afdekking van de kern van een dijk ter bescherming tegen golfaanvallen, langsstromend water, golfoverslag en overloop.
Bekledingsconstructie	Geheel van lagen die tot doel hebben de dijk kern te beschermen tegen erosie door de waterbeweging, bestaande uit een toplaag met daaronder (eventueel) uitvul-, filter- en kleilagen.
Belasting	Op een constructie (een waterkering) uitgeoefende in- en uitwendige krachten, ofwel de mate waarin een constructie door in- en uitwendige krachten wordt aangesproken, uitgedrukt in een fysische grootheid.
Benedenbeloop	Deel van het talud tussen teen en buitenberm.
Benedenrivieren-gebied	Het rivierengebied ten westen van de lijn Schoonhoven - Werkendam Dongemond, inclusief Hollands Diep en Haringvliet, maar zonder de Hollandsche IJssel. De combinatie van waterstanden op zee en rivierafvoeren veroorzaakt in dit gebied de hoge waterstanden.

Benedenstreams	Stroomafwaarts.
Benedenstroomse richting	Voor het mechanisme piping: de richting waarheen het kwelwater stroomt.
Beoordelingsmethode	De wijze waarop de toetsing moet worden uitgevoerd. De beoordelingsmethoden in dit voorschrift betreffen het beoordelen op basis van een filter en het beoordelen op basis van toetsregels.
Beoordelingsprofiel	Denkbeeldig minimum profiel van gedefinieerde afmetingen waarbinnen zich geen objecten bevinden, dat binnen het werkelijk aanwezige profiel moet passen en dat de garantie moet bieden dat de waterkering voldoende sterk is.
Beoordelingsschema	Opeenvolging van stappen waarmee voor een beoordelingsspoor het toetsingsresultaat kan worden bepaald.
Beoordelingsspoor	Eén van de aspecten aan de hand waarvan de toetsing op veiligheid van de waterkering wordt uitgevoerd.
Berm	Een extra verbreding aan de binnendijkse of buitendijkse zijde van de dijk om het dijklichaam extra steun te bieden, zandmeevoerende wellen te voorkomen en de golfslag en /of golfoverslag te reduceren.
Bermfactor	Factor bepaald door golfhoogte en waterdiepte boven de berm, benodigd voor ontwerp en toetsing op topplaaginstabiliteit van steenzettingen op een buitenberm.
Beschermingsniveau	Zie veiligheidsnorm.
Beschermingszone	In de keur beschreven zone ter weerszijden aan het waterstaatswerk waarbinnen een beperkt gebodsregime geldt met als doel aantasting van de waterkering door bijzondere belastingen (delfstofwinning, seismisch onderzoek, explosies van leidingen) te voorkomen.
Beslisregel	Regel aan de hand waarvan een beslissing moet worden genomen.
Betonblok	Blokvormig toplaagelement van beton.
Betonpuin	Restproduct dat wordt gebruikt als granulair materiaal.
Betonzuil	Zuilvormig toplaagelement van beton.
Betrouwbaarheid sluiting van kunstwerken	Betrouwbaarheid van de sluitingsoperatie van de hoogwaterkerende keermiddelen van een waterkerend kunstwerk.
Betrouwbaarheidseis	Eis die gesteld wordt aan de betrouwbaarheid (faalkans) van een constructie. De wettelijke toetsnorm is een voorbeeld van een betrouwbaarheidseis aan de waterkeringen.
Betrouwbaarheidseis op doorsnedeniveau	Eis die in de toetsing wordt gesteld aan de kans van falen van een dijkdoorsnede (faalkanseis).
Betrouwbaarheids-index	Waarde die de mate van 'betrouwbaarheid' van een waterkering weergeeft. Een hoge betrouwbaarheid correspondeert met een kleine faalkans
Bezwijken	Het optreden van verlies van inwendig evenwicht (bijvoorbeeld afschuiven) en/of het optreden van verlies van samenhang in materiaal (bijvoorbeeld het verweken) en/of het optreden van ontoelaatbaar grote vervormingen van de waterkering.
Bezwijkmechanisme	De wijze waarop een constructie bezwijkt.

Bijzonder waterkerend object	Kering geplaatst en ontworpen ter bescherming van waterstaatswerken in oorlogstijd.
Bijzondere waterkerende constructie	Constructie om, in combinatie met een grondlichaam (dijk) of in plaats van een grondlichaam, water te keren, zoals muralt- of dijkmuern, damwanden, kistdammen, keermuren en kwelschermen.
Binnenberm	Extra verbreding aan de landzijde van de dijk om het dijklichaam extra steun te bieden en/of om zandmeevoerende wellen te voorkomen.
Binnendijks	Aan de kant van het land of het binnenwater.
Binnendijks duingebied	Duingebied waarvoor de primaire veiligheid volgens de Waterwet wordt geborgd.
Binnenduin	Duin die niet direct aan het strand grenzen.
Binnenduinrand	Overgang tussen een duingebied en het laaggelegen achterland.
Binnenkruinlijn	Lijn die de overgang markeert tussen de kruin en het binnentalud.
Binnentalud	Hellend vlak van het dijklichaam aan de binnendijkse zijde van de dijk.
Binnenteen	De onderrand van het dijklichaam aan de landzijde van de dijk (de overgang van dijk naar maaiveld).
Bitumen	Een zeer viskeuze vloeistof of vaste stof, in hoofdzaak bestaande uit koolwaterstoffen of hun derivaten, die vrijwel geheel oplosbaar is in zwavelkoolstof.
Blokduur	De representatieve duur van het tijdafhankelijke proces dat met een blok wordt geschematiseerd.
Blokken	Toplaagelementen die nauw op elkaar aansluiten en waarbij de spleetbreedte rondom elk element min of meer constant en meestal klein is.
Blokkenmat	Geprefabriceerde toplaagelementen die onderling door kabels of een geokunststof zijn verbonden tot een mat.
Bodemligging	Positie van de bodem ten opzichte van een referentievlak, dikwijls NAP.
Boortunnel	Ondergrondse tunnel die wordt samengesteld achter de boorinstallatie waarmee de grond aan de kop van deze installatie wordt verwijderd.
Bovenbeloop	Deel van het talud tussen buitenberm en kruin.
Bovenrivierengebied	Het door Rijn en Maas gevoede rivierengebied ten oosten van de lijn Schoonhoven - Werkendam – Dongemond. Hoge rivierafvoer veroorzaakt de hoge waterstanden in dit gebied.
Bovenstrooms	Stroomopwaarts.
Bovenstroomse richting	Hier m.b.t. de stroming van het kwelwater onder de dijk heen, vanuit de in-/toestromende zijde van de dijk.
Boventafel	Bovenste gedeelte van de taludbekleding (boven Gemiddeld Hoogwater of boven een overgangsconstructie).
Brekerparameter	Verhouding tussen de taludhelling en de (wortel uit) de golfsteilheid, die een indicatie is voor de wijze waarop golven op het talud breken.
Bres	Een gat in de waterkering.
Bresvloeiing	Bezwijken van een onderwatertalud door het gestaag wegstromen van zandlagen, gevoed door een steil taludopwaarts bewegende verstoring.

Breuksteenoverlaging	Constructie waarbij op een bestaande, te lichte steenzetting ter versterking een pakket breuksteen is aangebracht.
Bui-oscillaties	Onregelmatige schommelingen van het wateroppervlak met een wisselende periode die vooral bij zware storm optreden.
Buistoot	Afzonderlijk optredende vrij kort durende waterspiegelverheffing als gevolg van een zware bui.
Buitenberm	Extra verbreding aan de buitendijkse zijde van de dijk om het dijklichaam extra steun te bieden, om zandmeevoerende wellen te voorkomen en/of om de golfoploop te reduceren.
Buitendijks	Aan de kant van het te keren (buiten)water.
Buitenknik	Knik tussen de berm en het benedenbeloop.
Buitenkruinlijn	Lijn die de overgang markeert tussen de kruin en het buitentalud.
Buitentalud	Hellend vlak van het dijklichaam aan de kerende zijde.
Buitenteen	Onderrand van het dijklichaam aan de buitendijkse zijde van de dijk (de overgang van dijk naar maaiveld en/of voorland).
Buitenwater	Oppervlaktewater waarvan de waterstand direct onder invloed staat van de waterstand op zee, de grote rivieren, het IJsselmeer of het Markermeer.
Caisson	Een betonnen rechthoekige bak die in de waterbouw over het algemeen dienst doet als golfbreker of als hulpconstructie bij de sluiting van dijken en/of dammen.
Calamiteitenplan	Een draaiboek waarin verschillende acties om de dijk te bewaken (in geval van calamiteit) staan vermeld. Volgens de Waterstaatswet 1900 zijn waterbeheerders verplicht dit op te stellen.
Cellenwand	Gewichtsconstructie opgebouwd uit damwanden, die tot cirkelvormige of deels cirkelvormige cellen worden geconstrueerd en met grond of een ander materiaal worden gevuld om voldoende massa te krijgen. Door de cellen onderling te verbinden ontstaat een cellenwand.
Cohesieve laag	Zie afdeklaag.
Combiwand	Constructie opgebouwd uit een combinatie van open buispaal-elementen (of H-profielen), die een hoge sterkte en stijfheid bezitten, en damwandelementen.
Compartimentering	Opdelen van een grote dijkring in (een aantal) kleinere compartimenten of dijkringen, om de gevolgen van een overstroming te beperken tot een kleiner gebied.
Consolidatie tijd	Tijdsduur die nodig is om vanaf het aanbrengen van een belasting, de wateroverspanning in de grond te laten afnemen tot deze (vrijwel) geheel is verdwenen. Ook hydrodynamische periode.
Constructieve functie (kunstwerken)	Het bijdragen aan het in stand houden van de waterkering, door het afdragen naar de ondergrond van belastingen die niet direct gerelateerd zijn aan de waterkerende functie.
Correlatie in de tijd	Mate van samenhang tussen de waarde van een variabele op tijdstip t en de waarde van diezelfde variabele op een ander tijdstip.
Correlatiefuncties	Statistische functies die de mate van samenhang tussen twee stochasten kwantificeren.

Correlatielengte	Lengtemaat die bepalend is voor de mate van ruimtelijke (auto-)correlatie van een parameter.
Coupure	Onderbreking in de waterkering voor de doorvoer van een (water)weg of spoorweg die bij hoge buitenwaterstanden afsluitbaar is.
Cumulatieve kansverdeling	Functie die de kans van onderschrijden beschrijft van alle (relevante) mogelijke uitkomsten van een stochastische variabele.
Dam	Waterbouwkundige constructie met aan twee zijden water. Kan zijn aangelegd om de golfhoogte er achter te reduceren, de havendam, of als primaire waterkering.
Damwand	Een damwand is een verticale grond- en/of waterkerende constructie, die bestaat uit een rij losse de grond in gedreven wandelementen (planken of panelen) die door middel van een grond-dichte en in sommige gevallen ook waterdichte messing-en-groefverbinding (genoemd 'slot' bij stalen damwanden) met elkaar zijn verbonden.
Debiet	Het vloeistofvolume dat per tijdseenheid door een doorsnede stroomt.
Decimeringshoogte	Absoluut verschil in hoogte tussen het een waterstand met een bepaalde overschrijdingsfrequentie en een waterstand met een overschrijdingsfrequentie, die een factor 10 hoger of lager is.
Deelfaalmechanisme	Zie deelmechanisme.
Deelmechanisme	Deel van het faalproces dat voortkomt uit het falen van onderdelen van het systeem, maar waarbij nog geen sprake hoeft te zijn van volledig functieverlies.
Deining	Windgeïnduceerde watergolven, die niet meer onder invloed zijn van het windveld dat hen opwekte.
Dekzand	Door de wind afgezet zand, dat als een dek op oudere zanden of afzettingen ligt in een laag, variërend van enkele decimeters tot meerdere meters dikte.
Delta	Uitmonding van een rivier als een stelsel van aftakkingen.
Demontabele kering	Mobiele kering waarvan een deel van de constructie alleen bij dreigend hoogwater wordt opgebouwd en waarvan onder normale omstandigheden slechts een beperkt deel van de constructie (zoals funderingsbalken, kwelschermen, of aansluitingen op bestaande constructies) achterblijft op het waterkeringstracé.
Depositie	Aanzanding van het afgeslagen duinzand.
Deterministisch	Hiermee wordt bedoeld dat tijdens het toetsen een parameter niet als stochast wordt gemodelleerd. De waarde van deze parameter wordt als "bekend" verondersteld.
Deterministisch model	Een model dat de invoer volgens een vaststaande wetmatigheid omzet in uitvoer, zonder rekening te houden met onzekerheden.
Dicht steenasfalt	Een licht overvuld mengsel met een gap-graded aggregaat, waardoor verdichting door eigen gewicht optreedt.
Dichtheid	Verhouding tussen massa en volume van het materiaal (volumieke massa, soortelijke massa).
Dichtingslaag	Een laag bindmiddel aangebracht op een oppervlak van waterbouwasfaltbeton.
Diepwand	Doorgaande (meestal onverankerde) wandconstructie, die is opgebouwd uit (trillingsvrij) in de grond vervaardigde betonnen panelen voorzien van wapening.

DiffRACTIE	Buiging van golffront/golfstraal in het schaduwgebied van een obstakel.
Dijk	Waterkerend grondlichaam.
Dijkbasis	De zich binnen de invloedssfeer van de dijk bevindende ondergrond.
Dijk-in-duin	Hybride kering waarbij een dijk wordt beschermd door een voorliggend volume zand.
Dijkkern	Grondlichaam van zand en/of klei in een dijk dat moet worden beschermd tegen de inwerking van de waterbeweging.
Dijkmuur	Constructie op een dijk aangebracht om golfoverslag over de dijk te beperken.
Dijkringgebied	Een gebied dat door een stelsel van waterkeringen, of hoge gronden beveiligd moet zijn tegen overstromingen.
Dijktraject	Zie waterkeringtraject.
Dijkvak	Een deel van een waterkering met uniforme eigenschappen en belasting.
Dijkvernageling	Een van de INSIDE-technieken. Hierbij worden nagels met een kern van staal of kunststof in de dijk geplaatst. De kern is omhuld met een schil van grout (cement en water) die zorgt voor een goede hechting tussen de nagels en de grond in de dijk. Hiermee worden potentiële afschuifvlakken van de dijk gestabiliseerd.
Doorgaand kanaal	Kanaal van de benedenstroomse naar de bovenstroomse zijde.
Doorgroeisteen	Platte betontegel of betonblok met gaten er in die begroeiing mogelijk maken (grasbetonstenen).
Doorlatendheid	Het vermogen van de grond om vloeistof door te laten. Verhouding tussen specifiek debiet en verhang. Darcy doorlatendheid, afhankelijk van de viscositeit van het water.
Drukstaafmethode	Methode om de stabiliteit van de dijk te benaderen onder inachtneming van de vervorming van het slappe grondpakket achter de dijk, dat hiertoe als een door druk belaste staaf wordt opgevat (opdrijven).
Dubbele duinen	Meerdere duinregels die samen een duinwaterkering vormen.
Duin	Min of meer aansluitende zandheuvelds langs de kust, al dan niet door de natuur gevormd, die het waterkerend vermogen ontleent aan de geometrie en de hoeveelheid zand binnen het dwarsprofiel.
Duinafslag	Faalmechanisme voor duinen dat betrekking heeft op de erosie van een duin onder stormcondities.
Duinfront	Zeezijde van het duinprofiel.
Duinvak	Zie dijkvak.
Duinvoet	Overgang van strand naar duin. De positie van de duinvoet in een dwarsprofiel wordt door veel beheerders gedefinieerd met behulp van een in de tijd constante hoogtelijn (bijvoorbeeld NAP +3 m).
Duinvoetverdediging	Harde waterkeringsconstructie die het achterliggend duin beschermt tegen duinafslag, gezamenlijk vormt dit een hybride kering.
Duinwaterkering	Deel van een duingebied dat aangemerkt is als primaire waterkering.
Economische schade	De schade die opgelopen is door ontwrichting van economische processen.

Eenheid/Eenheden (van WTI-SOS)	WTI-SOS verdeelt de ondergrond in eenheden, in totaal 43 (Bijlage B). Een WTI-SOS eenheid bestaat uit een grondlaag of grondlagen die relatief homogeen verdeelde eigenschappen hebben. De lithologie kan homogeen zijn, maar het is ook mogelijk dat de eenheid een homogene afwisseling bevat van verschillende lithologieën, bijvoorbeeld zand/klei afwisselingen. De eenheden zijn zo opgezet en beschreven dat ze herkend kunnen worden in boringen en sonderingen en dat ze relatief eenvoudig zijn te koppelen aan proevenverzamelingen.
Eenvoudige toetsing	De eerste stappen in een beoordelingsschema, met relatief gemakkelijk toepasbare regels, uitgewerkt in het Voorschrift Toetsen op Veiligheid.
Erosie	Het proces waarbij grond, gesteente en dergelijke verplaatst worden door c.q. wegspoelen onder invloed van wind, stromend water of bewegende ijsmassa's.
Erosie van de onderlagen	Faalmechanisme van bekledingen dat zich voordoet als de beschermende werking van de toplaag weggevallen is.
Erosiescherm	Een in het buitentalud aanwezige wandconstructie, die bij een geërodeerd buitentalud samen met het resterende deel van de dijk de waterkerende functie overneemt.
Estuarium	Wijde trechtervormige riviermond, waarin het getij zich sterk doet gevoelen.
Evenstandslijn	Lijn die weergeeft hoe plaatselijk een bepaalde waterstand kan ontstaan onder invloed van combinaties van de rivierafvoer en de hoogwaterstand te Hoek van Holland.
Faaldefinitie	(Praktische en juridisch relevante) afspraak over wat het VTV als falen beschouwt. De faaldefinitie beschrijft de situatie die in de Gedetailleerde toets voor falen van de waterkering wordt aangehouden.
Faalkans	Kans op falen.
Faalkansenbudget	Verdeling van de toegestane faalkans over de faalmechanismen. Wordt toegepast in toetslaag 2a: de toetsing per dijkvak met "vaste faalkansbegroting". In toetslaag 2b wordt de faalkansbegroting uiterekend door de toetssoftware ("vrije faalkansbegroting")
Faalkansruimteverdeling	Zie Faalkansenbudget.
Faalmechanisme	De opeenvolging van gebeurtenissen die leidt tot falen.
Faaltraject	Geheel van (deel)processen en stadia die worden doorlopen alvorens daadwerkelijk falen optreedt
Falen	Falen van een technisch systeem houdt in dat het zich bevindt in een toestand waarbij een of meer functies daadwerkelijk niet meer (kunnen) worden vervuld.
Fictieve taludhelling	Gewogen gemiddelde van de taludhelling onder en boven de buitenberm, benodigd voor ontwerp en toetsing op toplaaginstabiliteit van steenzettingen op de berm.
Filter	Tussenlaag in de taludbekleding die uitspoeling van fijnkorrelig materiaal uit de ondergrond door de bovenliggende laag van de bekleding voorkomt.
Flexibiliteit	Buigzaamheid, het vermogen om vervormingen te kunnen ondergaan waarbij het materiaal intact blijft.

Fluctuatieschaal	Lengtemaat die bepalend is voor de mate van ruimtelijke variabiliteit van een parameter
Fluidisatie	Proces waarbij fijne vaste deeltjes door een stromend gas of vloeistof in beweging worden gebracht
Foutenboom	Schematische weergave van combinaties van oorzaken die tot een bepaalde ongewenste gebeurtenissen, topgebeurtenissen genoemd, aanleiding kunnen geven.
Fractie	Verzameling korrels die de grootste van twee nader aangeduide zeven (nominale fractiegrenzen) passeert en blijft liggen op de kleinste. De ondergrens kan daarbij ook nul zijn.
Freatisch vlak	Vlak in de grond waar de druk in het poriën water gelijk is aan nul.
Freatische lijn	Niveau van de grondwaterspiegel in een dijklichaam.
Frequentielijn	Het gemiddeld aantal keren per periode (jaar/seizoen) dat een betreffende stochastwaarde wordt overschreden.
Functiescheidend scherm	In de waterkering aanwezige wandconstructie om te voorkomen dat de onderdelen die gezamenlijk de waterkerende functie vervullen (i.e. grondlichaam, constructieve elementen) onder normale omstandigheden de aangrenzende niet-waterkerende functies (bv wonen, werken, recreatie) negatief beïnvloeden als gevolg van grondbelastingen en -vervormingen.
Fysische model	Een beschrijving van een grenstoestandfunctie die aangeeft wanneer sprake is van falen.
Gap-graded	Type korrelverdeling waarbij alleen grove en fijne korrels voorkomen, de tussenliggende maat ontbreekt (vrijwel) geheel.
Geavanceerde toetsing	De laatste stap in het toetsproces volgens het VTV2006, waarvoor geen uitgewerkte rekenregels bestaan, uit te voeren door specialisten.
Gedetailleerde toets	Tweede beoordelingsstap in het getrapte toetsproces die uitgaat van een voorgeschreven faaldefinitie en bijbehorend generiek rekenmodel
Gedragsmodellen	Zie fysische modellen.
Gegradeerde korrelverdeling	Een monster korrels met een gelijk matig verdeelde diameter.
Gelaagtheid	Hiermee wordt aangegeven dat de oorspronkelijk gelaagde structuur t.g.v. de afzetting van de lagen nog aanwezig is.
Geldigheidsgebied	Het geheel van voorwaarden waaronder een model mag worden toegepast.
Gemaal	Kunstwerk om water van een laag peil naar een hoog peil te brengen, waarvan de noodzaak kan liggen in wateroverschot aan de lage kant (afvoer) of in waterbehoefte in het gebied aan de hoge kant (aanvoer). Een gemaal is een samenstel van verschillende onderdelen: <ul style="list-style-type: none"> • één of meerdere doorvoerleidingen of –kokers. • één of meerdere afsluitmiddelen. • een gebouw met installaties.
Gemiddeld hoog water	De gemiddelde hoogte van hoogwater op een locatie over een periode van 19 jaar (in een getijdegebied).
Geokunststof	Kunststof doek dat bijvoorbeeld op zand of klei wordt toegepast om uitspoeling ervan te voorkomen.

Geometrisch dicht	Criterion voor grond dichtheid van een filter, waarbij materiaaltransport fysiek onmogelijk is doordat de openingen in het filter kleiner zijn dan de korrelafmetingen van het basismateriaal.
Geotechnisch profiel	De verticale opbouw in grondmechanische zin van een waterkering.
Gepenetreerde steenzetting	Steenzetting waarbij tussen de toplaagelementen beton of asfalt is aangebracht om de sterkte te vergroten.
Getijhoogwaterstijging	De relatieve stijging van de gemiddelde hoogwaterstand (inclusief NAP-daling).
Getijkans	De kans dat gedurende een getijperiode een bepaalde windsnelheid een keer wordt overschreden.
Getijperiode	Tijdsduur van (ongeveer) 1 getij.
Gewapende grond	Bij kerende constructies met een steile of verticale begrenzing in gewapende grond wordt de inwendige stabiliteit verzekerd door meerdere lagen van wapening (strippen, roosters of grids) die, door interactie (wrijving) tussen grond en wapening trekkracht kunnen overdragen.
Gewichtsmuur	Op staal gefundeerde grondkerende constructie die zijn algehele stabiliteit ontleent aan zijn eigen gewicht (inclusief eventueel door de muur ondersteunde volumes aanvulling).
Gietasfalt	Warm bereid asfalt met een mengsel van gegradeerd grind (of steenslag) en een overmaat aan asfaltmestiek, dat nagenoeg geen holle ruimte heeft.
Glijvlak	Het vlak waarlangs een afschuivende grondmoot afschuift over het stabiele deel van een grondlichaam en waarlangs door de grond schuifsterkte wordt gemobiliseerd.
Glijvlak model	Rekenmodel waarmee de weerstand van een grondmoot tegen afschuiven langs een schuifvlak wordt berekend.
Golfcondities	Weergave van de toestand van een golfveld op een bepaald moment, veelal in termen van significante golfhoogte, (gemiddelde of piek)periode en gemiddelde golfrichting.
Golfhoogte	De verticale afstand tussen dal en top van een golf.
Golfhoogte duinafslag	Rekenwaarde voor de golfhoogte waarmee in Toetslaag 2A voor het faalmechanisme duinafslag dient te worden gerekend.
Golfinvalshoek	De hoek tussen de golfrichting en de normaal op de kering.
Golfklap	Korte drukstoot op het talud die ontstaat doordat de watermassa van een brekende golf het talud met grote snelheid treft.
Golfklapzone	Deel van het talud dat door golfklappen wordt belast, gelegen onder de stil waterstand.
Golfoploop	Het tegen het talud oplopen van golven.
Golfoploophoogte	Hoogste niveau ten opzichte van de stilwaterlijn tot waar een golf het talud nat maakt.
Golfoploopzone	Deel van het talud dat niet door golfklappen maar door golfoploop wordt belast, gelegen boven de stil waterstand.
Golfoverslag	Situatie waarbij de waterstand lager is dan de hoogte van de waterkering en waarbij golven over de waterkering heen slaan.
Golfoverslagdebiet	De hoeveelheid water die door golven per strekkende meter gemiddeld per tijdseenheid over de waterkering slaat.

Golfoverslaghoogte	De hoogte ten opzichte van de waterstand, waarbij een bepaald opgegeven debiet optreedt. Iets preciezer gezegd is de golfoverslaghoogte het verschil tussen het niveau van de buitenkruinlijn en de lokale waterstand in de situatie dat de buitenkruinlijn zó hoog ligt dat de overslag daarover precies gelijk is aan het opgegeven debiet.
Golfperiode	Tijdsduur tussen twee opeenvolgende neergaande passages van de middenstand van een golf.
Golfrandvoorwaarden	Golfcondities die worden gebruikt voor het toetsen en ontwerpen van de diverse faalmechanismen.
Golfspectrum	Verdeling van de golfenergiedichtheid als functie van de periode (bij een breed spectrum zijn de golfperioden van de windgolven onderling sterk verschillend).
Golfsteilheid	Verhouding tussen de hoogte en de lengte van een golf.
Gradiënt	Verloop van een grootheid per eenheid van lengte. Zie: verhang.
Granulaire laag	Laag van korrelig materiaal van beperkte dikte die onder de toplaag kan liggen, fungerend als filterlaag en/of uitvullaag.
Gras	Individuele plantensoort (enkelvoud) of begroeiing met een grasachtig uiterlijk (meervoud; dan ook 'grasland', 'grasvegetatie'). Echte grassen (Poaceae) of verwante eenzaadlobbige soorten zijn dominant of beeldbepalend. In de meeste dijkgraslanden komen echter ook kruiden voor.
Graszode	Het intensief doorwortelde bovenste deel van de toplaag, bestaande uit substraat plus wortels. In de zode zijn de wortels van individuele spruiten meestal sterk vervlochten. De zode is gewoonlijk 5 tot 10 cm dik.
Grenslaag	Onderste deel van het afdekkende pakket. Bij hoogwater wordt de waterspanning in de grenslaag beïnvloed door de stijghoogte in de onderliggende aquifer.
Grenspotentiaal	Stijghoogte in de aquifer die in evenwicht is met het gewicht van het afdekkende pakket.
Grensprofiel	Deel van de duinwaterkering landwaarts van de afslagzone dat bedoeld is om golfoverslag te voorkomen.
Grenstoestand	Toestand waarin de sterkte van een constructie of een onderdeel daarvan nog juist evenwicht maakt met de daarop werkende belastingen.
Grenstoestandfunctie	Wiskundige functie die voor alle mogelijke uitkomsten van de combinaties van betrokken stochastische variabelen beschrijft of de waterkering wel/niet faalt
Grof zand	Aanduiding voor zanden met een gemiddelde korrelgrootte van de zandfractie tussen 210 en 2000 µm.
Grondbreuk	Zie hydraulische grondbreuk.
Grondwaterstand	Hoogteligging van het freatisch vlak.
Havendam	Dam gelegen voor de primaire waterkering die zich uitstrekt vanaf de kust of oever het open water in, om de stroming en golven te beïnvloeden of om te voorkomen dat de toegang tot een haven of een rivier dichtslibt.
Havenslingering	Zie seiches.

Heave	Situatie waarbij verticale korrelspanningen in een zandlaag wegvallen onder invloed van een verticale grondwaterstroming; ook fluïdisatie of de vorming van drijfzand genoemd.
Heterogeen	Van punt tot punt belangrijke verschillen in eigenschappen bezittend.
Hevel(pers)leiding	Kokervormige constructie met een verhoogd middengedeelte, in de regel over waterkering of (stroom)scheiding heen, dat twee wederzijds gelegen wateren met elkaar verbindt. Het overbrengen van water via de hevel vindt plaats op basis van de principes van communicerende vaten en wordt in gang gebracht door het aanbrengen van een vacuüm in de leiding.
Hevelvistrap	In dit type vistrap bevinden de traptreden zich binnen een afgesloten bak onder vacuüm, waardoor deze flexibel plaatsbaar is, naast, in of op een waterbouwkundig kunstwerk.
Hoge drempel	Een element in een niet hoogwaterkerend gesloten kunstwerk, dat zorgt voor een drempel waar het water via golfoverslag en/of overloop overheen moet stromen zonder dat het invloed van eventueel aanwezig binnenwater ondervindt.
Hoge gronden	De natuurlijke hoge delen van Nederland.
Hogedrukleiding (vloeistof, gas)	Leiding deel uitmakend van een systeem waarin een bedrijfsdruk groter dan of gelijk aan 1 MPa (10 bar) wordt aangehouden.
Hoogwatergolf	Tijdelijk verhoogde waterstanden in een rivier (met een golfvorm) door een vergrote rivierafvoer. De hoogwatergolf kan enkele uren tot enkele dagen aanblijven.
Hybride kering	Primaire kering, bestaande uit een combinatie van een zandlichaam (duin) en een harde waterkeringsconstructie.
Hydraulisch belastingniveau	De kruinhoogte waarbij de kans op het overschrijden van een kritiek golfoverslagdebiet gelijk is aan de normfrequentie van het dijktraject waar de waterkering onderdeel van uitmaakt.
Hydraulisch dicht	Criterium voor gronddichtheid van een filter, waarbij materiaaltransport onmogelijk is doordat de weerstand tegen uitspoeling voldoende groot is bij de maatgevende belasting.
Hydraulisch materiaal	Granulair materiaal dat kan samenkiten.
Hydraulische belasting	Belasting op de waterkering als gevolg van de lokale waterstand en bijbehorende golven.
Hydraulische condities	De condities die bepalend zijn voor de hydraulische belasting. Het betreft onder meer waterstanden, stroming, golfhoogten en golflengten.
Hydraulische grondbreuk	Verlies van korrelcontact in de grond als gevolg van te hoge wateroverspanningen; in geval van een cohesieve afdekkende grondlaag leidt dit tot opdrijven en opbarsten, in geval van een niet cohesieve grondlaag tot heave.
Hydraulische waterspanning	(Grond)waterspanning in een punt in de (onder)grond die overeenkomt met de waterspanning als gevolg van een kolom water vanaf dat punt tot aan de vrije grondwaterspiegel.
Hydraulische weerstand	Karakterisering van de doorlatendheid van grondlagen. Weerstand die een bepaalde laag biedt tegen (meestal verticale) grondwaterstroming. Bij een homogene laag is deze grootte gelijk te stellen aan het quotiënt van laagdikte D en (verticale) doorlaatcoëfficiënt k.
Hydroblock	Type betonzuil.

Hydrodynamisch model	Model waarmee de stroming in open en gesloten waterlopen berekend kan worden.
Hydrodynamische periode	Zie: consolidatie tijd.
Hydrostatische waterspanning	(Grond-)waterspanning in een punt in de (onder-)grond die overeenkomt met de waterspanning als gevolg van een kolom water vanaf dat punt tot aan de vrije grondwaterspiegel.
In de grond ingebedde grondkering	Relatief dunne wanden van staal, gewapend beton of hout, ondersteund door ankers, stempels en/of passieve gronddruk. De buigweerstand van dergelijke wanden speelt een significante rol in de ondersteuning van het materiaal, terwijl het gewicht van de ingebedde wand zelf onbelangrijk is.
Indirecte faalmechanisme	Mechanisme dat niet direct tot falen van het systeem leidt maar de kans op falen door een vervolgmechanisme vergroot.
Indringingslengte	Verticale afstand aan de onderzijde van de slecht doorlatende deklaag waarover de waterspanning in de deklaag verandert bij waterspanningsvariaties in de watervoerende zandlaag.
Infiltratie	Indringen van water in de dijk of ondergrond.
Infiltratiecapaciteit	Het vermogen van de grond om water te laten indringen ($m^3/s/m^2$).
Ingegoten steenzetting	Steenzetting waarbij tussen de toplaagelementen van boven af tot meer dan de helft van de toplaagdikte beton of asfalt is aangebracht ("vol en zat" gepenetreerde steenzettingen).
Inlaatduiker	Kokervormige constructie door een grondconstructie, eventueel voorzien van keermiddelen, met als doel om onder vrij verval (via een vrij wateroppervlak) buitenwater in te laten.
Inscharingslengte	De lengte gerekend vanaf de geulrand waarover het voorland landinwaarts wordt aangetast.
INSIDE technieken	Het innovatietraject <i>INnovation Stability Improvements enabling Dike Elevations</i> (INSIDE) van CURNET en RWS heeft drie alternatieve dijkversterkingsconcepten opgeleverd, die zich bij uitstek lenen voor locaties met weinig ruimte waar significante trillingshinder (bij toepassing van de bestaande dure oplossingen met damwanden of kistdammen) onacceptabel is.
Interlockelementen	Geprefabriceerde toplaagelementen die door hun vorm in elkaar haken, waardoor individuele elementen niet uit de zetting kunnen worden gelicht.
Interne instabiliteit	Migratie van de fijne fractie van een filter door de poriën van het filter.
Intreepunt	(Theoretisch) punt waar het buitenwater tot de aquifer toetreedt, als gevolg van het verval over de waterkering.
Intreeweerstand	Weerstand veroorzaakt door een slecht-doorlatend sliblaagje ter plaatse van het intreepunt.
Invloedscoëfficiënt	Indicator voor het relatieve belang van een stochastische variabele in de faalkansberekening, d.w.z. in vergelijking met de andere stochastische variabelen.
Invloedsgebied	Gebied waarbinnen het bezwijken of falen van een waterkerend kunstwerk, bijzondere constructie of niet-waterkerend object merkbaar is. Denk hierbij aan de ontgrondingskuil rond een bezweken leiding of een ontwortelde boom.

Invloedslijn	Uiterste lijn op het maaiveld waarvoor geldt dat als aan de dijkzijde van die lijn het maaiveld wordt verstoord de veiligheid van de waterkering zakt onder de (volgens de toetsing) vereiste veiligheid, gelet op alle directe faalmechanisme
Invloedsstrook	Strook, direct landwaarts van de reservestrook, waar aan gebruiksfuncties beperkingen worden gesteld teneinde de waterkering in stand te houden.
Invloedszone	De zone waarbinnen de invloed van een bepaald faalmechanisme aanwezig is.
Inwas materiaal	Granulair materiaal dat in de spleten tussen de stenen wordt aangebracht om de interactiekrachten tussen de blokken te vergroten.
Inwateringssluis	Waterstaatkundige constructie die in de waterkering is gelegen en bedoeld is om (vers) water in de polder te laten.
Inwendige stabiliteit	mate van weerstand van een asfaltmengsel tegen blijvende en ongewenste vervormingen ten gevolge van het eigen gewicht of externe belastingen (bijvoorbeeld walsen).
JARKUS	Landelijk databestand van jaarlijks diepte- en hoogtemetingen van de zandige kust (Jaarlijkse Kustmetingen).
Kade	Kleine dijk.
Kademuur	Grondkerende constructie om schepen aan af te meren, opdat overslag van goederen mogelijk kan worden gemaakt.
Kadewand	In de grond ingebedde wandconstructie langs een oeverstrook waarlangs de schepen kunnen aanleggen, die de overslag en tijdelijke opslag van (bulk)goederen mogelijk maakt.
Kalibratiecriterium	Criterium op basis waarvan veiligheidsfactoren worden vastgesteld. Het criterium heeft in de regel de vorm van een faalkanseis voor een doorsnede van een waterkering.
Kansdichtheidfunctie	Functie die aangeeft welke mogelijke uitkomsten van een variabele de grootste kans van optreden heeft (formeel: de grootste kansdichtheid).
Karakteristieke lijnen	Lijn die de karakteristieke punten met elkaar verbindt.
Karakteristieke waarde	Waarde met een voorgeschreven onder- of overschrijdingskans, bepaald op grond van een statistische analyse van beschikbare gegevens.
Keermuur (of keerwand)	Muur die door vorm, gewicht en fundering zonder verankering de grond keert.
Keersluis	Een sluis die als voornaamste doel het keren van hoogwater heeft.
Kerende hoogte	Laagste punt van de bovenrand van de waterkering, het niveau waarbij overloop optreedt als de buitenwaterstand dit niveau overschrijdt.
Kernzone	Zie waterstaatswerk.
Keur	Verordening met strafbepaling van een waterschap.
Keurgebied	Gebied waarop de keur van toepassing is.
Keurzone	Zie keurgebied.
Kistdam	Set damwandschermen verbonden door één of meerdere ankers waarbij de ruimte tussen de schermen gevuld is met grond.
Kleibekleding	Laag klei, inclusief een eventueel aanwezig laagje teelaarde, die dient ter bescherming van het onderliggende kernmateriaal van een dijk of dam.

Klemming	Bijdrage aan de weerstand tegen topaaginstabiliteit doordat naast elkaar liggende topaagelementen onderlinge beweging onmogelijk maken.
Klink	Dikteafname van een grondconstructie of -laag ten gevolge van autonome verdichting van het materiaal.
Klinker	Toplaagtype.
Kolk	Ontgrondingskuil direct achter of voor een dijk die is ontstaan bij een oude dijkdoorbraak waar nu vaak de dijk in een kronkel omheen ligt. Het is dan een klein meertje geworden.
Kombergend vermogen	Het vermogen van het achterliggende watersysteem van een waterkerend kunstwerk om een bepaalde hoeveelheid instromend water te bergen, zonder dat dit in het achterland tot sterkte reducerende schade aan kades dan wel een substantiële hoeveelheid water op straat in bebouwd gebied leidt.
Korrelgroep	Verzameling korrels die met uitzondering van geringe percentages boven- en ondermaat blijft liggen tussen twee nader aangeduide zeven.
Korrelverdeling	Verdeling van de korrels naar afmeting in de diverse fracties binnen een korrelgroep.
Kreukelberm	Zie 'teenbestorting'.
Kritiek grensprofiel	Meest landwaarts gelegen grensprofiel.
Kritiek verval	Waarde van het verval, c.q. de lengte van de maatgevende kwelweg, waarbij juist geen piping of heave optreedt.
Kritieke kwelweglengte	De lengte van de maatgevende kwelweg waarbij wel zandtransport, maar juist geen piping of heave optreedt.
Kruiden	Tweezaadlobbige plantensoorten, vaak gekenmerkt door een weinig 'grasachtig' uiterlijk en – in vergelijking met grassen – veel opvallender bloemen. In natuurlijke graslanden en ook op de meeste dijkgraslanden komen naast grasachtigen ook kruiden voor.
Kruin	1. Strook tussen buitenkruinlijn en binnenkruinlijn; 2. Hoogste punt in het dwarsprofiel van het dijklichaam; 3. Buitenkruinlijn.
Kruinhoogte	Hoogte van de waterkering.
Kruip	In de tijd doorgaande vervorming van een materiaal ten gevolge van een belasting.
Kunstwerk (Waterkerend)	Constructie die onderdeel uitmaakt van een waterkering en over een beperkte lengte de waterkerende functie van het grondlichaam geheel of gedeeltelijk overneemt, maar is aangelegd ten behoeve van een andere (utilitaire) functie die de waterkering kruist (zoals schutten en spuien). In verband met deze utilitaire functie zijn deze waterbouwkundige constructies meestal voorzien van één of meer beweegbare afsluitmiddelen.
Kustlijn	Gemiddelde laagwaterlijn. Deze is aangegeven op de door de Minister van Verkeer en Waterstaat of haar opvolger vastgestelde peilkaart.

Kwel	Het uittreden van grondwater (water dat door of onderdoor een waterkering stroomt) als gevolg van het te keren verval over de waterkering (waterstandsverschil). Doorsijpeling van water onder de dijk door. In het algemeen: het diffuus uittreden van grondwater. In het bijzonder: het uittreden van grondwater onder invloed van grotere stijghoogten elders in het hydrologische systeem
Kwelkade	In het direct aan de dijk grenzende achterland aangebrachte kade om afstromen van kwelwater te verminderen waarmee wordt getracht het optreden van pipingverschijnselen te voorkomen alsmede wateroverlast binnendijs tijdens hoge rivierafvoeren te beperken.
Kwelscherm	Een ondoorlatende, in de regel verticale, constructie voor verlenging van de kwelweg.
Kwelsloot	Sloot aan de binnenzijde van de dijk die tot doel heeft kwelwater op te vangen en af te voeren.
Kwelweg	Mogelijk pad in de grond dat het kwelwater aflegt, van het intreepunt naar het uitreepunt.
Kwelweglengte	Lengte van de kwelweg, d.i. de afstand die het kwelwater ondergronds aflegt voordat het weer aan de oppervlakte komt.
Laag duin	Duin waarbij er sprake is van golfoverslag.
Lage drempel	Een element in een niet hoogwaterkerend gesloten kunstwerk, dat zorgt voor een drempel waarbij er na overstromen direct contact ontstaat tussen buiten- en binnenwater, zodat het debiet aan instromend water door de binnenwaterstand wordt beïnvloed.
Lagedrukleiding (vloeistof, gas)	Leiding deel uitmakend van een systeem waarin een bedrijfsdruk kleiner dan 1 MPa (10 bar) wordt aangehouden.
Landwaartse grens waterstaatswerk	Overgang tussen een duinwaterkering en het binnendijs duingebied
Langsconstructie	Type kunstwerk in een waterkering waarvoor geldt dat de onzekerheden gerelateerd aan de (relatief) grote lengte in de richting van de as van de waterkering (ten opzichte van de lengte loodrecht op de as van de waterkering) in de beoordeling moeten worden meegenomen zoals kademuren en stabiliteitschermen.
Langsstroming	Stroming van water over het talud evenwijdig aan de as van de dijk.
Legger	Een kaart met juridische status die waterkeringbeheerders opstellen. Hierop staat de exacte ligging van de waterkering en de daarin te onderscheiden zones (waterstaatswerk, beschermingszone en buitenbeschermingszone).
Leklengte	Een lengtemaat voor de doorlaatcapaciteit van de watervoerende zandlaag. De doorlaatcapaciteit wordt bepaald door het doorlaatvermogen van de watervoerende zandlaag en door de weerstand van de slecht doorlatende toplaag.
Lengte-effect	Het relatieve verschil in de faalkans van een "uniform" dijksegment en de faalkans van een dwarsdoornede uit datzelfde segment
Levensduurfactor	Factor om de invloed van het gecorreleerd zijn van faalkansen in afzonderlijke jaren binnen de levensduur op de faalkans voor de gehele levensduur in rekening te brengen.

Life cycle analysis	Beschouwing over één of meer aspecten van een product, proces, et cetera, waarbij de gehele levenscyclus van het onderzochte in de beschouwing voorkomt.
Liquefactie	Zie verweking.
Lokale opstuwing	lokale waterstandsverhoging ter plaatse van de waterkering als gevolg van obstakels in het rivierbed.
Lokale opwaaiing	Opwaaiing tussen de locatie waarvoor de hydraulische randvoorwaarde wordt gegeven en de waterkering.
L-wand	Al dan niet verankerde grondkerende constructie in de vorm van een L, waarvan de verticale wand primair is om de grond te keren en het horizontale deel om de stabiliteit van de constructie te waarborgen. Door het gewicht dat op de constructie rust ontstaat er een grote wrijving tussen de L-wand en de grond. Deze wrijving moet de horizontale belasting van dezelfde grondmassa en eventueel een externe horizontale last opvangen.
Maatgevend afslagpunt	Afslagpunt in een dwarsraai berekend tijdens de toetsing van een duinwaterkering.
Maatgevende afslagzone	Afslagzone berekend tijdens de toetsing van een duinwaterkering.
Maatgevende afvoer	De afvoer die bepalend is gesteld voor het ontwerp of een deel ervan.
Maatgevende Hoogwaterstand	De waterstand met een kans van voorkomen gelijk aan de normfrequentie van het dijktraject waar de waterkering onderdeel van uitmaakt.
Macro-instabiliteit	Het afschuiven van grote delen van het grondlichaam van een dijk langs rechte of gebogen glijvlakken, dan wel het evenwichtsverlies ten gevolge van het ontstaan van grote plastische zones.
Macrostabiliteit	Weerstand tegen het optreden van een glijvlak in het talud en de ondergrond.
Mastiek	Warm bereid asfalt met een continu gegradeerd mengsel van zand en vulstof en een overmaat aan bitumen, dat nagenoeg geen holle ruimte heeft (asfaltmastiek).
Materiaalfactoren	Partiële factoren, die op de karakteristieke materiaalparameters worden toegepast om onzekerheden in de grondeigenschappen te verdisconteren.
Materiaaltransport	Faalmechanisme waarbij uitspoeling vanuit onderlagen leidt tot ondermijning van de toplaag.
Meerdijk	Primaire waterkering, gelegen langs in het algemeen grote wateren, anders dan rivieren, zonder getijdenwerking.
Meerpeil	De waterstand op een bepaald moment gemiddeld over het beschouwde meer.
Microstabiliteit	Weerstand tegen erosie van het talud als gevolg van uittredend water.
Middenkruinlijn	Midden van buiten-en binnenkruinlijn.
Mijnsteen	Restproduct van mijnbouw bestaand uit breed gegradeerd granulair materiaal.
Mineraal aggregaat	Mengselcomponent in asfalt, bestaande uit grind of steenslag, zand en vulstof of een combinatie hiervan.

Mobiele kering	Demontabele of tijdelijk keermiddel dat niet permanent aanwezig is en apart moet worden opgebouwd bij een (dreigend) hoogwater.
Modelfactor	Partiële factor waarin onzekerheden in de berekeningsmethodes zijn verdisconteerd.
Modelonzekerheidsfactor	Stochast die de modelonzekerheid beschrijft.
Morfologie	Leer en beschrijving van de bodemligging van zee, zeearmen, meren en rivieren
Nat kunstwerk	Civiel-bouwkundige constructie die onderdeel is van een vaarweg of waterweg met als doel regulering van de waterstanden, passage van schepen, hoogwaterbescherming, kruising van waterwegen of afvoer van water.
Naviduct	Combinatie van sluis en aquaduct die als constructie één geheel vormen.
Niet waterkerend object	Objecten op of in de dijk die geen waterkerende functie hebben, zoals leidingen, woningen, gemalen en bomen.
Nominale waarde	Gemiddelde waarde of mediane waarde.
Noorse steen	Verzamelnaam voor stenen die in de ijstijd door ijsmassa's zijn meegenomen en die in de 19e en begin 20e eeuw in Midden- en Noord-Nederland als bekleding op de dijk zijn aangebracht (Noordse steen, Drentse steen, Poolse steen, flinten).
Norm	Wettelijk vastgestelde eis aan de overstromingskans van een dijktraject.
Normaal Amsterdams Peil	Hoogte ten opzichte van het 'Amsterdams Peil', de gemiddelde zomervloedstand van het IJ voor Amsterdam toen dit nog in vrije verbinding stond met de Zuiderzee.
Normaal onderhoud	Vast en variabel onderhoud dat tijdig wordt uitgevoerd door de beheerder, waardoor het kwaliteitsniveau van de onderdelen van de kering boven het vastgestelde minimum blijft.
Normfalen	Normfalen van een technisch systeem houdt in dat het systeem rekenkundig voor een of meer functies niet aan de wettelijke of juridische kansnorm wordt voldaan.
Normfrequentie	Toelaatbare overstromingskans van een dijktraject.
Normtraject	Dijktraject waarvoor in de Waterwet een faalkanseis is gegeven (ook traject).
Nulfractie	Fractie van granulair materiaal met kleine diameter, globaal kleiner dan 10 mm (nulfractie).
Numeriek model	Model dat door middel van discretisatie de differentiaalvergelijkingen oplost, die de fysische processen beschrijven
Object	Een in of op de waterkering aanwezige constructie of aanwezig element (bv begroeiing, bebouwing, pijpleidingen of weg en dijkmeubilair) met of zonder waterkerende functie.
Ondergrond	Grond die onder maaiveld of het betreffende constructieonderdeel aanwezig is.
Ondergrondmodel	Een ondergrondmodel geeft de ruimtelijke verdeling van geologische, geotechnische of hydrologische eenheden in de ondergrond, vaak in 3D.

Ondergrondprofiel	2D dwars- of langsprofiel waarin de opbouw van de ondergrond wordt weergegeven. Meestal grotendeels gebaseerd op een extrapolatie van informatie uit ondergrondgegevens.
Ondergrondscenario	De stapelingen van WTI-SOS eenheden die binnen segmenten kunnen voorkomen worden scenario's of WTI-SOS scenario's genoemd. Vanwege de onzekerheid over de werkelijke grondopbouw op elke locatie langs de dijk worden er meestal meerdere scenario's vastgesteld en wordt voor elk van die scenario's de kans van aantreffen gegeven. De WTI-SOS scenario's worden tijdens het toetsen lokaal verfijnd tot lokale scenario's.
Ondergrond-schematisatie	Een schematische weergave van (een deel) van de ondergrond voor een bepaald gebied.
Onderlagen	Alle lagen tussen de dijk kern en de toplaag.
Onderloopseid	Lekstroom onder een constructie door.
Onderloopseid (faalmechanisme)	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.
Ondertafel	Onderste gedeelte van de taludbekleding (onder Gemiddeld Hoogwater of onder een overgangsconstructie).
Onderwateroever	Zie vooroever.
Ongesorteerd	Aanduiding van granulair materiaal waaruit de nulfractie niet is uitgesorteerd.
Ontgroning	Erosie van de waterbodembodem of vooroever als gevolg van stroming en golfbeweging.
Onvolkomen stroming	De situatie waarin het water achter een (lange) overlaat wordt gestuwd door het water dat over de overlaat stroomt, waarbij zich benedenstrooms een bodemneer vormt.
Opbarsten	Scheuren (bezwijken) van de binnendijks gelegen afdekkende laag die is opgedreven als gevolg van een te grote wateroverspanning in de daaronder gelegen watervoerende laag. Algemeen: Bezwijken van de grond door het ontbreken van verticaal evenwicht in de grond, onder invloed van wateroverdrukken.
opdrifveiligheid	Verhouding tussen het gewicht van het afdekkend pakket slecht doorlatende lagen (klei/veen) en de opwaartse waterdruk direct er onder, uitgedrukt in de parameter 'n'.
Opdrijfzone	Zone achter de dijk waar de grenspotentiaal wordt bereikt.
Opdrijven (asfalt, bekledingen)	Onder extreme omstandigheden optredende neiging tot oplichten van een bekleding langs het talud door een wateroverdruk onder de bekleding die groter is dan de component van het eigen gewicht loodrecht op het talud.
Opdrijven (piping, macrostabiliteit)	Vorm van hydraulische grondbreuk waarbij een cohesieve afdekkende laag wordt opgelicht ten gevolge van wateroverspanning in de onderliggende watervoerende laag. Opdrukken van het afdekkende pakket door het bereiken van de grenspotentiaal.
Open keerhoogte	1. De kerende hoogte van een waterkering met beweegbare afsluitmiddelen bij open afsluitmiddel; 2. De kerende hoogte van de kaden langs het achterliggende (binnen)watersysteem wanneer dit bij open afsluitmiddel in directe verbinding staat met het buitenwater.

Open keerpeil	Buitenwaterstand welke bij open afsluitmiddel nog juist niet tot een ontoelaatbaar instromend volume buitenwater leidt.
Open ruimte	Het deel van het oppervlak dat niet door de toplaagelementen wordt bedekt.
Open steenasfalt	warm bereid asfalt met een mengsel van grof en uniform gegradeerd steenslag en een ondermaat aan asfaltmastiek, dat een hoog percentage holle ruimte heeft.
Open tunnelbak	Weg in een constructie welke onder (grond)waterniveau ligt.
Oppervlakbehandeling	Een dichtingslaag en/of een slijtlaag op een bekleding van asfaltbeton.
Oprollen	Combineren van faalkansen van faalmechanismen en dijkvakken.
Oscillatie	Het rond een vast punt heen en weer gaan van massa of energie.
Overgang	Een ruimtelijke verandering (dus geen veranderingen in de tijd) in de bekleding of constructie in het vlak van de buitencontour van een primaire waterkering.
Overgangs-constructies	Aansluiting tussen twee wezenlijk verschillende type constructies. Het kan gaan om aansluitingen tussen een duin, dijk en/of kunstwerk, maar ook om een overgang tussen twee verschillende typen bekledingen.
Overgeconsolideerd	Staat van grond waarbij in het verleden een hogere (verticale) grondspanning is opgetreden, waardoor de grond een grotere dichtheid en stijfheid heeft gekregen dan dezelfde grond die deze voorbelasting niet heeft gekregen.
Overgoten steenzettingen	Steenzettingen waarbij tussen de toplaagelementen van boven af tot minder dan de helft van de toplaagdikte beton of asfalt is aangebracht (oppervlakkig gepenetreerde steenzettingen).
Overlaat	Drempel waarover water van de ene naar de andere zijde stroomt.
Overloop	Het verschijnsel waarbij water over de (kruin van de) waterkering het achterland in loopt, omdat de waterstand in het buitenwater (rivier, zee, meer) hoger is dan de waterkering.
Overloopdebiet	De hoeveelheid water die door overloop per strekkende meter gemiddeld per tijdseenheid over de waterkering loopt.
Overloopscherm	Ondoorlatende wandconstructie ter vergroting van de kerende hoogte van een waterkering, die daarmee binnen de waterkerende functie een bijdrage levert aan de weerstand tegen overloop en golfoverslag.
Overlopen	Het over de waterkering heen stromen van water, als de waterstand hoger is dan de waterkering.
Overslagdebiet	Volume water dat per strekkende meter per seconde door de golfbeweging over de buitenkruinlijn slaat.
Overstromingskans	Voor bedijkt gebied: kans dat het gebied overstroomt doordat een waterkering die het gebied beschermt, faalt. Voor onbedijkt gebied: kans dat de waterstand hoger komt dan het maaiveldniveau.
Overstromingskansbenadering	De onzekerheden over de belastingen en sterkte-eigenschappen worden tot uitdrukking gebracht in de kans dat de belasting groter is dan de sterkte.
Overstromingskansnorm	De normspecificatie geldend voor een dijktraject.
Pakking of pakkingsdichtheid	Mate waarin korrels in een zandpakket dicht opeen gepakt zitten.

Palenwand	Een palenwand is opgebouwd uit een rij in de grond gevormde, overlappende palen van beton of cementgrout, eventueel gewapend om buigende momenten te kunnen opnemen.
Partiële (veiligheids)factor	Vermenigvuldigingsfactor die (mits >1) resulteert in een strengere betrouwbaarheidseis.
Partiële factor	Factor waarmee een representatieve waarde vermenigvuldigd (of gedeeld) wordt ter verkrijging van de rekenwaarde. De partiële factoren dienen om onzekerheden in belastingen, materiaaleigenschappen, rekenmethodes, gevolgen van falen en de overschrijdingskans van grenstoestanden in rekening te brengen.
Patroonpenetratie	Penetratie met asfalt of beton van een breuksteenbekleding over een deel van het oppervlak.
Peil	De hoogte van de waterstand.
Peilbuis	Algemene term voor een in de grond geplaatste buis of soortgelijke constructie met een kleine diameter voorzien van een filter, waarin de grondwaterstand c.q. stijghoogte kan worden gemeten.
Peildatum	Datum, vastgesteld door de Minister van Infrastructuur en Milieu, waarop de toetsing van de primaire waterkering betrekking heeft. De (verwachte) toestand op de peildatum wordt getoetst.
Penetratie (van bitumen)	De getalwaarde van de indringing, uitgedrukt in eenheden van 0,1 mm, van een standaard naald die verticaal op het oppervlak van een bitumineus materiaal is geplaatst onder gespecificeerde condities van temperatuur, belasting en tijd.
Penetratie-index	Een maat voor de temperatuurafhankelijkheid van de viscositeit van bitumen.
Persleiding	Leidingsysteem waar onder druk een vloeistof of een gas doorheen wordt gepompt.
Petit graniet	Blokvormig top laagtype van graniet, destijds afkomstig van leverancier Petit.
Piping	Het verschijnsel dat onder een waterkering (dijk of kunstwerk) holle pijpvormige ruimte ontstaan, ten gevolge van een geconcentreerde kwelstroom waarbij gronddeeltjes worden meegevoerd; dit verschijnsel wordt ook onderloopsheid genoemd. In de feitelijke definitie is sprake van piping indien zich een doorgaand open kanaal heeft gevormd van intreepunt tot uitreepunt doordat het erosieproces van een zandmeevoerende wel niet stopt.
Plaatbekleding	Monoliete en waterdichte bekleding.
Plasberm	Zie teenbestorting.
Plus/min-afweging	Afweging waarbij de volgorde van geschiktheid van varianten wordt bepaald.
Polder	Op de boezem uitslaand of lozend gebied met geregelde waterstand.
Polderpeil	Peil van het oppervlaktewater binnen een beheersgebied.
Porositeit	Verhouding tussen de open ruimte tussen de korrels en het totale volume (open ruimte + korrels) van het granulaire materiaal.
Potentiaal	Stijghoogte ten opzichte van een referentievlak.
Primaire waterkering	Waterkering die beveiliging biedt tegen overstroming doordat deze behoort tot een dijktraject waarvoor een norm is opgenomen in de

	Waterwet.
Probabilistische analyse/faalkans-berekening	Analyse waarin de faalkans van een waterkering wordt bepaald, rekening houdend met alle relevante onzekerheden (natuurlijke variabiliteit en kennisonzekerheden).
Probabilistische beoordeling	Beoordeling of een waterkering voldoet, op basis van een probabilistische analyse.
Probabilistische rekenhart	Verzameling rekenmodules van de toetssoftware waarmee probabilistische berekeningen uitgevoerd worden.
Probabilistische rekentechniek	Rekenmethode om faalkansen te bepalen. Er zijn meerdere rekentechnieken beschikbaar in de toetssoftware.
Probabilistische toets	Toetsing op basis van probabilistische analyses.
Proevenverzameling	Verzameling/steekproef van in het terrein gemeten of in het laboratorium bepaalde waarden van grondeigenschappen, ingedeeld naar geologische/geotechnische formatie.
Puntconstructie	Type kunstwerk in een waterkering waarvoor geldt dat de onzekerheden gerelateerd aan de lengte in de richting van de as van de waterkering (relatief beperkt ten opzichte van de lengte loodrecht op de as van de waterkering) over het algemeen een ondergeschikte rol speelt, zoals sluizen en coupures.
Randvoorwaarde-locatie	Locatie waarvoor de hydraulische randvoorwaarden worden gegeven.
Randvoorwaarden	Beschrijving van de wijze waarop uitwisseling (massa, energie) van het gemodelleerde systeem met de omgeving plaatsvindt.
Regionale (water)kering	Niet-primaire waterkering. Door Gedeputeerde Staten wordt vastgesteld welke niet-primaire waterkeringen worden aangemerkt als regionale kering en aan welke criteria de regionale keringen dienen te voldoen.
Rekenwaarde	Volgens de definitie in [CUR162 1992], de parameterwaarde die wordt berekend door de karakteristieke waarde te delen door of, in het geval dat dit ongunstiger is, te vermenigvuldigen met een partiële veiligheidsfactor.
Relatieve dichtheid	Relatief gewicht van materie onder water, gedefinieerd als het soortelijk gewicht van de materie minus het soortelijk gewicht van het water, gedeeld door het soortelijk gewicht van het water.
Representatieve waarde	De basiswaarde die de werkelijke waarde van een parameter met voldoende zekerheid representeert. De representatieve waarde is gelijk aan de karakteristieke waarde of een nominale waarde. Hieruit wordt met behulp van de partiële factor de rekenwaarde bepaald.
Reserveringsstrook	Strook (duin), direct landwaarts van het grensprofiel, deel uitmakend van de primaire waterkering, onder meer ten behoeve van de opvang van de effecten van de verwachte getijhoogwaterstijging over een periode van 200 jaar
Reservestrook	Zie 'Reserveringsstrook'.
Restproduct	Bijproduct van productieprocessen dat als constructiemateriaal wordt gebruikt.
Reststerkte	Sterkte die kan worden ontleend aan het deel van het faaltraject dat na de toestand beschreven door de faaldefinitie moet worden doorlopen alvorens de waterkering daadwerkelijk faalt.
Rijksstrandpalenlijn	Langs de gehele kust gelegen referentielijn voor meetraaien (hoofdraai).

Rijkszeeweringen-reglement	Verordening met verbods- en gebodsbepalingen van het Rijk als beheerder van een zeewering. Vergelijkbaar met de Keur.
Risicoanalyse	Het nagaan van de kans op een ongewenste gebeurtenis en de gevolgen daarvan.
Rivierdijk	Dijk langs een rivier.
Rolweerstandshoek	Hoek in het krachtenevenwicht die aangeeft hoeveel de korrels bieden tegen rollen.
RSP-lijn	Rijksstrandpalenlijn; de langs de gehele zandige kust gelegen referentielijn voor meetraaien (hoofdraai).
Ruigte	Begroeiing met doorgaans vrij forse en hoog opgaande plantensoorten. Dit kunnen forse grassen zijn, zoals Kropaar (<i>Dactylis glomerata</i>) of Kweek (<i>Elytrigia repens</i>). Echter, vaak domineren kruiden zoals Fluitenkruid (<i>Anthriscus sylvestris</i>), Gewone berenklaauw (<i>Heracleum sphondylium</i>), Grote brandnetel (<i>Urtica dioica</i>) of Japanse duizendknoop (<i>Fallopia japonica</i>). Kenmerkend voor veel ruigtevegetaties is de relatief lage soortenrijkdom en de matig tot zeer slechte bedekkings- en doorwortelingsgraad.
Ruimen	Proces in het faaltraject Piping, dat volgt op terugschrijdende erosie, waarbij het kanaal van de bovenstroomse zijde naar de benedenstroomse zijde schoongedrukt (schoongespoeld en verbreed) wordt.
Ruimtelijke (uit)middeling	gemiddelde waarde van een stochastische variabele over een bepaalde ruimtelijke grootheid.
Ruimtelijke correlatie	Mate van samenhang tussen de waarde van een variabele op locatie x en de waarde van diezelfde variabele op naburige locaties.
Ruimtelijke variabiliteit	Variatie van een stochastische variabele over een waterkering, in dwarsrichting en/of lengterichting.
Scenario (van WTI-SOS)	De stapelingen van WTI-SOS eenheden die binnen segmenten kunnen voorkomen worden scenario's of WTI-SOS scenario's genoemd. Vanwege de onzekerheid over de werkelijke grondopbouw op elke locatie langs de dijk worden er meestal meerdere scenario's vastgesteld en wordt voor elk van die scenario's de kans van aantreffen gegeven.
Schaardijk	Dijk die onmiddellijk aan de rivier ligt en niet door uiterwaarden daarvan gescheiden is.
Schadefactor	Partiële veiligheidsfactor die verband houdt met schade, die in rekening brengen in welke mate de vereiste betrouwbaarheid afwijkt van het basisbetrouwbaarheidsniveau.
Scheidingsdijk	Primaire waterkering, die niet bestemd is tot directe kering van het buitenwater en niet langs oppervlakte water is gelegen, maar deel uitmaakt van een dijkkringgebied als gemeenschappelijke scheiding tussen twee aangrenzende dijkkringgebieden.
Schematisch ondergrondmodel	De stratigrafie waarop het model is gebaseerd.
Schematisering	Vereenvoudigde voorstelling van de ruimtelijke en temporele verdeling van systeemvariabelen en parameters.
Schematiserings-handleiding	Handleiding waarin voor een faalmechanisme waarop getoetst moet worden staat hoe de relevante aspecten geschematiseerd moeten worden.

Scheve windopzet	Het verschil tussen hoogwaterstand en astronomisch hoogwater, ongeacht een eventueel tijdsverschil tussen beide.
Schrale klei	Weinig erosiebestendige klei.
Schroefstraal	Beweging in het water achter de draaiende schroef van het schip.
Schuifsterkte	De sterkte die de grond kan mobiliseren langs het (potentiële) schuifvlak.
Schutsluis	Een kunstwerk waarmee het mogelijk is om schepen van het ene naar het andere waterpeil te brengen en die, indien gelegen in de primaire waterkering, tegelijkertijd buitenwater keert.
Sedimentatie / resedimentatie	(Opnieuw) bezinken van zandkorrels en/of slib in een stroming.
Segment (van WTI-SOS)	Bij het opstellen van WTI-SOS zijn de dijken opgedeeld in segmenten. Aan elk segment zijn scenario's van mogelijke grondopbouw toegekend.
Seiche	Resonantieverschijnsel in bekkens (onder andere havens) als gevolg van laagfrequente variaties van de buitenwaterstand.
Semi-probabilistische analyse	Analyse of de kering voldoet aan een gestelde betrouwbaarheids-eis op basis van karakteristieke waarden en veiligheidsfactoren.
Semi-probabilistische beoordeling	Toetsing op basis van een semi-probabilistische analyse.
Sifon	Een duikervormige constructie waarmee, bij een kruising van twee waterlopen, water van de ene waterloop onder een ander waterloop wordt geleid.
Significante golfhoogte	De gemiddelde golfhoogte van het hoogste één derde deel van de golven (op diep water is dat de golfhoogte die door ongeveer 13,5% van de golven wordt overschreden) gedurende een bepaalde periode, bijvoorbeeld een half uur.
Sijpeloppervlak	Deel van het dijktaalud waar grondwater uittreedt.
Sijpelpunt	Hoogste punt op het dijktaalud waar grondwater uittreedt.
Slakken	Restproduct, in bepaalde gevallen bruikbaar als granulair materiaal.
Sluis	Kunstmatige, beweegbare waterkering die de verbinding tussen twee wateren (met eventueel een verschillende waterpeil) kan afsluiten of openstellen (voor scheepvaart) en daartoe van deuren of schuiven is voorzien.
Sluit proces	De gehele procedure die nodig is om een kunstwerk hoogwaterkerend te sluiten dat bestaat uit de deelprocessen alarmering, mobilisatie, bediening en bedrijfszekerheid keermiddel(len) en eventueel het herstel van een falend sluitproces.
Sluitpeil	Waterstand waarbij de kering wordt gesloten.
Spreidingslengte	De wortel uit het product van het doorlaatvermogen kD van een watervoerend pakket en de hydraulische weerstand c van de onder- of bovenliggende slecht doorlatende laag.
Stabiliteitsfactor	De verhouding tussen sterkte en belasting.
Stabiliteitsnorm	De minimale waarde van de stabiliteitsfactor, waaraan een waterkering moet voldoen.

Stabiliteitsscherm	In de waterkering aanwezige al dan niet verankerde verticale wandconstructie die, in combinatie met het grondlichaam, de macrostabiliteit van de waterkering verhoogt en daarmee binnen de waterkerende functie mede de verantwoordelijkheid draagt voor de stabiliteit van de waterkering.
Stabiliteitszone	De terreinstrook naast het waterstaatswerk die wordt bepaald door het faalmechanisme macro-instabiliteit van het waterstaatswerk.
Standaarddeviatie / standaardafwijking	Maat voor de variatie van de waarde van een stochastische variabele.
Standaardelement	Toplaagelement van een standaardtype: niet onderling verbonden, zonder gaten, zonder grote uitsteeksels.
Standardsortering	Sortering van granulair materiaal volgens erkende normen.
Standaardsteen-zetting	Steen-zetting met een toplaag van standaardelementen.
Standtijd	Tijdsduur van begin van belasting tot aan bezwijken van het betreffende onderdeel van de waterkering.
State parameter	Maat voor verwekingsgevoeligheid: verschil tussen poriëngetal van het zand en poriëngetal in critical state bij dezelfde spanning.
Steenslag	Procesmatig gebroken gesteente, waarbij onder gesteente wordt verstaan gesteente van natuurlijke oorsprong en kunstmatig gevormde gesteente zoals slakken, granulaten, gecalcineerd bauxiet, gecalcineerde vuursteen e.d..
Steentoets	Excel-programma voor de Gedetailleerde toets van steen-zettingen volgens de Leidraad Toetsen op Veiligheid.
Steen-zetting	Bekleding waarvan de toplaag bestaat uit in verband geplaatste elementen.
Stevige klei	Klei die voldoet aan de voorwaarden van erosiebestendige klei.
Stijghoogte	Niveau tot waar het water zou stijgen in een peilbuis met filter ter plaatse van het punt; wordt uitgedrukt in meters waterkolom ten opzichte van een referentievlak.
Slijtlaag	Dunne laag vloeibitumen of bitumenemulsie die wordt aangebracht op een asfaltbetonbekleding om de bekleding te conserveren, afgestrooid met steenslag of grind om het aanzicht te verbeteren.
Stochast / stochastische variabele	Variabele die een onzeker proces beschrijft.
Stochastische ondergrond (schematisatie)	Met stochastisch wordt bedoeld dat een bepaald aspect, bij WTI-SOS de opbouw van de ondergrond, variabel is. Deze variabiliteit wordt bij WTI-SOS gevat in verschillende scenario's met kansen van aantreffen.
Stoorlaag	Dunne klei-, leem-, of veenlaag in een overigens dik zand- of grindpakket.
Stormduur	Duur van de storm. Voor kunstwerken: de duur van de tot hoogwaterblok gemodelleerde piek van de storm waarmee het instromende volume van buitenwater kan worden bepaald.
Stormopzet	Zie windopzet.
Stormseizoen	Periode waarin geen werkzaamheden aan waterkeringen mogen worden uitgevoerd, meestal 15 oktober-15 april (gesloten seizoen).
Stormvloed	Hoogwaterperiode waarbij te Hoek van Holland het grenspeil (met een gemiddelde overschrijdingsfrequentie van 0,5 per jaar) wordt bereikt of overschreden (voor het grenspeil: zie getijtafels op

www.getij.nl).

Strandmuur	Verticale muur die het achterliggend duin beschermt tegen duinafslag, gezamenlijk vormt dit een hybride kering.
Strijklengte	Lengte waarover de wind over het wateroppervlak strijkt.
Stripping	Het indringen van water tussen het mineraal en het bitumen waardoor de hechting wordt verbroken en de samenhang van het asfalt vermindert.
Strook	Een gedeelte van de bekleding tussen twee horizontale begrenzingen.
Stuw	Vaste of beweegbare keerconstructie voor het bovenstreams van de constructie beheersen van het waterpeil, ten behoeve van scheepvaart, waterkwantiteit en/of waterkwaliteit.
Suspensiestroming	Stroming van een vloeistof met turbulent gesuspendeerd materiaal, bijvoorbeeld zand.
Talud	De schuin aflopende zijden aan de binnen- en buitenkant van een dijk of andere aardenbaan.
Taludbekleding	Afdekking van de kern van een dijk ter bescherming tegen golfaanvallen en langsstromend water. De taludbekleding bestaat uit een erosiebestendige toplaag, inclusief de onderliggende vlijlaag, filterlaag, kleilaag en/of geotextiel.
Te toetsen kustlijn	Gemiddelde ligging van de kustlijn in een willekeurig jaar na 1990. Het verschil in de posities van de TKL en de BKL is maatgevend in het beleid om de ligging van de kustlijn te handhaven.
Technisch rapport	Publicatie van ENW waarin een afzonderlijk deelaspect van waterkeringen wordt behandeld.
Technische toepasbaarheid	Mate waarin een bekleding sterk genoeg is om te worden toegepast in het projectgebied.
Teenbescherming	Constructie die het talud beschermt door ontgroning en/of afslag van de voorliggende oever te voorkomen.
Teenbestorting	Horizontaal gedeelte van een dijk, aan de buitenzijde gelegen, als overgang tussen de harde bekleding en de rest van het talud of de vooroever. Ook wel 'kreukelberm' (Zeeland) of 'plasberm' genoemd.
Teenconstructie	Constructie aan de onderzijde van het talud als overgang naar het voorland of de teenbestorting.
Terugslagklep	Een onder invloed van zwaartekracht (en waterdruk) sluitende waterkerende klep, waarmee een watervoerend element kan worden afgesloten (wat terugstromen van water voorkomt).
Theoretische potentiaal	Potentiaal in de aquifer indien deze niet wordt begrensd door bijvoorbeeld het gewicht van het afdekkende pakket.
Tijdelijke kering	Een mobiele waterkering waarvoor geen permanent op locatie achterblijvende voorzieningen zoals fundatiebalk, sponningen et cetera benodigd zijn. In de meeste gevallen wordt een tijdelijke kering vooral toegepast om golfoverslag te voorkomen. De kerende hoogte van de tijdelijke kering is dan ook beperkt.
Toeslagvolume duinafslag	Extra hoeveelheid duinafslag boven toetspeil waarmee Toetslaag 2A voor het faalmechanisme duinafslag is gekalibreerd.
Toetsingsronde	Cyclus van rapportage over de veiligheid van de waterkeringen.

Toetsinstrumentarium	Het vanuit de wetgever beschikbaar gestelde nadere regels over de beoordeling van de algemene waterstaatkundige toestand van de primaire waterkering.
Toetslaag 1 (eenvoudig)	Toets op basis van eenvoudig inwinbare informatie en eenvoudig toepasbare beslisregels.
Toetslaag 2a (gedetailleerd, vakttoets)	Toets gebaseerd op modelmatige analyses en generieke rekenregels met vaste faalkansverdeling op dijkvakniveau.
Toetslaag 2b (gedetailleerd, trajectniveau)	Toets gebaseerd op modelmatige analyses en generieke rekenregels op trajectniveau.
Toetspeil	Waterstand behorende bij de overschrijdingskans gelijk aan de normoverstromingskans conform Bijlage II en IIA bij de Waterwet, die als randvoorwaarde dient te worden gebruikt voor de toetsing conform het VTV
Toetspeil Duinafslag	Rekenwaarde voor het stormvloedpeil waarmee in Toetslaag 2A voor het faalmechanisme duinafslag dient te worden gerekend.
Toetsproces	De stappen die moeten worden doorlopen tijdens de uitvoering van de toetsing.
Toetsregel	De receptuur voor het bepalen van een toetsoordeel. De toetsregels in dit voorschrift betreffen de beoordeling per toetsspoor.
Toetsschema	Schema welke het toetsproces weergeven.
Toetsspoor	Een waterkering moet op verschillende aspecten of faalmechanismen worden beoordeeld. De toetsing voor een specifiek aspect of faalmechanisme wordt aangeduid als toetsspoor.
Toetsvlak	Een deel van de bekleding waarvoor geldt dat de randvoorwaarden en kenmerken voor de toetsing bij benadering constant zijn.
Toplaag	Buitenste verdedigingslaag van een taludbekleding.
Toplaagdikte	Het gemiddelde van de elementhoogte over het elementoppervlak (toplaagelementhoogte).
Toplaaginstabiliteit	Faalmechanisme waarbij één of meer toplaagelementen uit de zetting worden gedrukt door waterdruk onder de toplaag.
Topvervlakking	Het verschijnsel dat een hoogwatergolf benedenwaarts gaande afvlakt.
Transmissiviteit	Het gemak waarmee water door een granulaire laag kan stromen, gelijk aan het product van de waterdoorlatendheid en de laagdikte.
Tunnel	Ondergrondse of onder water gelegen civiel-bouwkundige constructie, die onderdeel is van een (auto-, spoor- of water)weg bij kruising met een andere weg of een terreinverdieping waarbij aan beide zijden grond en/of (grond)water moet worden gekeerd en/of een overdekt gedeelte van meer dan 80 m ontstaat voor de onderdoorgaande weg.
Tussenlaag	Constructielaag tussen toplaag en basismateriaal.
Tussenraai	Een extra raai tussen twee JARKUS-raaien waarvoor tijdens de toetsing een maatgevend afslagpunt wordt berekend
Twijfelachtig	Tussenresultaat van de toetsing volgens het VTV2006, als met de tot dan doorlopen stappen niet is aangetoond dat de waterkering op de peildatum 'goed', 'voldoende' of 'onvoldoende' is.

Uiterwaard	Zie 'winterbed'.
Uitspoeling	Transport van materiaal vanuit tussenlaag of ondergrond door de toplaag naar buiten.
Uittredepunt	Locatie aan de landzijde waar kwelwater het eerst aan het oppervlak treedt
Uittredeverhang	Verhang in het grondwater ter plaatse van het uittredepunt.
Uittredeweerstand	Weerstand veroorzaakt door een slecht-doorlatend laagje ter plaatse van het uittredepunt.
Uitvullaag	Dun laagje granulair materiaal, bedoeld om oneffenheden van het oppervlak van de laag eronder op te vullen, zodat een vlak oppervlak voor het plaatsen van de toplaagelementen wordt verkregen.
Uitwateringsduiker	Kokervormige constructie door een grondconstructie, eventueel voorzien van keermiddelen, met als doel om onder vrij verval (via een vrij wateroppervlak) overtollig binnenwater te lozen op het buitenwater.
Uitwateringssluis	Waterstaatkundige constructie die in de waterkering is gelegen en tot doel heeft overtollig binnenwater te spuien en buitenwater te keren.
Vak	Segment van het dijktraject waarvoor condities in of meer uniform zijn
Variantie	Maat voor de variatie van de waarde van een stochastische variabele. De variantie is het kwadraat van de standaarddeviatie.
Variatiecoëfficiënt	Quotiënt van de standaarddeviatie en de verwachtingswaarde.
Vegetatie	Begroeiing, in casu op dijken. Een voorbeeld van een dijkvegetatie is een 'grasmat' (bestaande uit grasachtigen en kruiden) of een ruigte.
Veiligheidsfactor	Zie partiële veiligheidsfactor.
Veiligheidsmarge	De mate waarin extra veiligheid aanwezig is.
Veiligheidsnorm	Eis waaraan een primaire waterkering moet voldoen, aangegeven als de gemiddelde overschrijdingskans -per jaar - van de hoogste hoogwaterstand waarop de tot directe kering van het buitenwater bestemde primaire waterkering moet zijn berekend, mede gelet op overige het waterkerend vermogen bepalende factoren.
Veiligheidstoeslag	Toeslag op de in rekening te brengen hydraulische belasting bij kunstwerken om de onzekerheid in de bepaling van de hydraulische belasting te compenseren.
Verborgene bekleding	Bekleding die afgedekt is met grond.
Verdelingstype	Kansverdeling waarvan de parameters bepaald moeten worden uit meetgegevens. Voorbeelden: Gumbel, normale verdeling.
Verdichtingsgraad (van grond)	verhouding tussen de werkelijk bereikte dichtheid en een referentiedichtheid (bijvoorbeeld de maximum proctordichtheid).
Verdronken koker	Een geheel onder water gelegen buis of koker waardoor bij het niet hoogwaterkerend gesloten zijn van het kunstwerk water naar binnen stroomt, waarbij er direct contact is tussen binnen- en buitenwater.
Verhang	Verhouding tussen het verschil in stijghoogte tussen twee punten en de afstand tussen die punten; wordt ook gradiënt genoemd.
Verhanglijn	De waterspiegel volgens de stroomrichting in een waterloop bij een bepaalde afvoer of onder bepaalde omstandigheden.

Vermoeiing	Het veranderen van de mechanische eigenschappen van een materiaal ten gevolge van herhaalde belastingen.
Veroudering	Het veranderen van de materiaaleigenschappen onder invloed van licht, lucht en belastingen.
Verstoringszone	Zone om een niet-waterkerend object, waarbinnen de invloed van de aanwezigheid, bezwijken of falen van het niet-waterkerende object in de grond merkbaar is.
Verval	Verskil in hoogte van de waterspiegel tussen twee plaatsen.
Verwachtingswaarde	Verwachte uitkomst van het gemiddelde.
Verweking	Verlies aan samenhang van het korrelskelet als gevolg van toename van de waterspanning (in de poriën).
Verweking	Verlies van korrelspanningen in een losgepakt zandpakket, waardoor dit dik-vloeibaar wordt en/of bezwijkt.
Verwekingsvloeiing	Bezwijken van een onderwatertalud door het plotseling wegstromen van verweekt zand.
Verzadigde doorlatendheid	Doorlatendheid van verzadigde grond (m/s).
Vlies	Geokunststof van korte vezels die willekeurig georiënteerd aan elkaar zijn gehecht (non-woven).
Voegvulling	Granulair materiaal dat in de spleten tussen de toplaagelementen wordt aangebracht om de wrijving en/of klemming te vergroten.
Vol en zat penetratie	Het volledig vullen van de holle ruimten in een laag breuksteen met gietasfalt of asfaltmastiek over de gehele dikte en over het gehele oppervlak van de laag, zodanig dat de steenstukken in de bovenste laag voor ten minste 50% zijn ingebed in het gietasfalt of asfaltmastiek.
Voldoet	Resultaat van de toetsing als de waterkering op de peildatum minimaal voldoet aan de veiligheidsnorm.
Volkomen stroming	De situatie waarin het benedenwater achter een (lange) overlaat niet wordt gestuwd door het water dat over de overlaat stroomt, waarbij zich benedenstrooms een watersprong vormt.
Voorland	Buitendijks terrein tussen de dijk en de rivier, of ondiepe waterbodem voor de teen van de dijk
Vooroever	Waterbodem in de zone voor de teen van een dijk, tot aan het diepste punt van de geul.
Vooroeververdediging	Lage dam op enige afstand van de primaire waterkering die een onder water gelegen ondiep deel van de oeverzone en waterkering beschermt, voornamelijk om mogelijkheden voor flora- en faunaontwikkeling te creëren of structurele kusterosie te bestrijden.
Vrij vervalleiding	Een onder afschot aangelegd leidingstelsel waarbij, onder invloed van de zwaartekracht, water via natuurlijke stroming wordt afgevoerd.
Walsnelheid	Snelheid waarmee een actieve bres of taludverstoring taludopwaarts terugschrijdt.
Waterbouwasfaltbeton	Warm bereid asfalt met een continu gegradeerd mengsel van steenslag (of grind), zand en vulstof, dat een laag percentage holle ruimte heeft.
Waterkerend kunstwerk	Constructie die onderdeel uitmaakt van een waterkering of de waterkering vervangt, maar is aangelegd ten behoeve van een andere functie, die de waterkering kruist (bv. schutten, spuien).

Waterkerend object	Object in of op de waterkering dat volledig zelfstandig of in combinatie met andere onderdelen waaruit de kering is opgebouwd, de waterkerende functie voor zijn rekening neemt.
Waterkerende functie	Het beveiligen tegen overstroming en scheiden van binnen- en buitenwater.
Waterkering	Kunstmatige hoogten en die (gedeelten van) natuurlijke hoogten of hooggelegen gronden, met inbegrip van daarin of daaraan aangebrachte werken, die een waterkerende of mede een waterkerende functie hebben, en die als zodanig in de legger zijn aangegeven.
Waterkeringbeheerder	Door de overheid aangewezen verantwoordelijke voor het beheren van de (primaire) waterkeringen.
Waterkeringszone	Zie keurgebied.
Waterkeringtraject	Een aan een gesloten stuk/lengte primaire keringen waarbij de gevolgen van een doorbraak of overstromen (verlies van waterkerend vermogen) in termen van schade en/of het overstroomde gebied, onafhankelijk van de locatie van de doorbraak of overstroming min of meer vergelijkbaar zijn. Ook wel dijktraject genoemd.
Waterkwantiteits-functie	Reguleren van waterstanden middels het in- of uitlaten van water uit een bepaald gebied.
Waterover-/onderspanning	Verskil tussen de aanwezige waterspanning en de hydrostatische waterspanning.
Wateroverdruk	Waterdruk onder een gesloten bekleding ten gevolge van een waterstandsverschil binnen en buiten het dijklichaam.
Waterreguleringswerk	Stuwen, overlaten, doorlaatwerken, duikers.
Waterspanning	Druk van het grondwater in de grond, vooral van belang bij samendrukbare lagen. Bij watervoerende lagen is sprake van stijghoogte of van een freatische waterstand in deze laag.
Waterstaatswerk	Waterkering plus het gebied dat zich uitstrekt tot waar bezwijkmechanismen van de waterkering reiken. Denk hierbij aan het uittreepunt in het maaiveld van een glijcirkel.
Waterstandsverloop	Verloop van de waterstand als functie van de tijd op een bepaalde locatie.
Waterwet	De Waterwet regelt het beheer van oppervlaktewater en grondwater, en verbetert ook de samenhang tussen waterbeleid en ruimtelijke ordening.
Weefsel	Geokunststof van garens of bandjes met een geordende structuur (woven).
Wel	Geconcentreerde uitstroming van kwelwater, bijvoorbeeld door een opbarstkanaal of een gat in de afdekkende kleilaag of langs een object in de afdekkende laag.
Werklijn	Relatie tussen de daadwerkelijke rivierafvoer en de rekenkundig bepaalde overschrijdingsfrequentie van deze afvoer.
Wettelijk Toetsinstrumentarium	Zie Toetsinstrumentarium.
Windgolven	Golven, ontstaan door de wrijving van de lucht over het water.
Windopzet	Lokale waterstandverhoging als gevolg van de door de wind op een watermassa uitgeoefende kracht.

Wrijving	Bijdrage aan de weerstand tegen topplaaginstabiliteit doordat bij onderlinge beweging van naast elkaar liggende topplagelementen een kracht wordt opgewekt.
Zandasfalt	Warm bereid asfalt met gegradeerd zand en een ondermaat aan bitumen, dat een hoog percentage holle ruimte heeft.
Zandmeevoerende wel	Wel, die zand meevoert uit de (onder)grond. Kan zo onbeheersbaar worden dat piping optreedt.
Zandscheg	Een insluiting van zand tussen de kleilaag van de bekleding en de kleikern.
Zandverlies in langsrichting	Situatie waarbij tijdens storm netto zandvolume uit een raai verdwijnt als gevolg van een langstransportgradiënt.
Zeedijk	Primaire waterkering van de categorie a, die zout water keert.
Zeereep	Eerste aaneengesloten duinenrij vanaf het strand.
Zeespiegelstijging	De stijging van de gemiddelde zeestand ten opzichte van NAP.
Zetting	Verticale verplaatsing als gevolg van volumeverkleining van samendrukbare lagen in de ondergrond, hoofdzakelijk ten gevolge van een bovenbelasting, de eigen massa en/of het uit treden van water.
Zettingsvloeiing	Een mechanisme waarbij zand in een onderwatertalud schijnbaar spontaan vervloeit, waardoor tot honderdduizenden kubieke meters zand over afstanden van soms honderden meters verplaatst kunnen worden.
Zode	Zie graszode.
Zorgplicht	Wettelijke taak van de beheerder om de primaire kering aan de veiligheidseisen te laten voldoen en voor het noodzakelijke preventieve beheer en onderhoud te zorgen.
Zuilen	Veelhoekige topplagelementen waarbij de spleetbreedte rondom elk element variabel is en meestal relatief groot.