

stowa

Ministerie van Verkeer en Waterstaat



Rijkswaterstaat

# BASISINFORMATIE DIJKEN



HANDREIKING INSPECTIE WATERKERINGEN

VIW 2008 03  
RWS WD 2008 010

BASISINFORMATIE DIJKEN

VIW

2008

03

ISBN 978.90.5773.396.3



stowa@stowa.nl www.stowa.nl  
TEL 030 232 11 99 FAX 030 231 79 80  
Arthur van Schendelstraat 816  
POSTBUS 8090 3503 RB UTRECHT

Publicaties van de STOWA kunt u bestellen bij:  
Hageman Fulfilment POSTBUS 1110, 3330 CC Zwijndrecht,  
TEL **078 623 05 00** FAX 078 623 05 48 EMAIL [info@hageman.nl](mailto:info@hageman.nl)  
onder vermelding van ISBN of STOWA rapportnummer en een afleveradres.

# COLOFON

Utrecht, 2008

## OPDRACHTGEVERS

RWS Waterdienst  
STOWA

P.J.L. Blommaart  
L.R. Wentholt

## PROJECTGROEP

Bart van der Roest  
Harmen Faber  
Martijn Guichelaar  
Ruud Joosten  
Klaas Klaassens  
Hans Knotte  
Wim Kornelis  
Randolph Maljaars  
Ronald van Oort  
Paul Overtoom  
Huub Ruber  
Marc Bruins Slot  
Reindert Stellingwerff  
Libbe Zijlstra

Rijkswaterstaat Noordzee (voorzitter)  
Rijkswaterstaat IJsselmeergebied  
Hoogheemraadschap Schieland en de Krimpenerwaard  
Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier  
Provincie Groningen  
Waterschap Rivierenland  
Rijkswaterstaat Oost-Nederland  
Waterschap Zeeuws-Vlaanderen  
Rijkswaterstaat Data-ICT-Dienst  
Rijkswaterstaat Noord-Holland  
Rijkswaterstaat Limburg  
Waterschap Fryslan  
Waternet  
Wetterskip Fryslân

## AUTEURS

G.M. Moser  
J.W. Kok  
F.J.J. Thijs

Partner in Water Management B.V.  
Beleid en Organisatie Mone Sale  
Infram B.V.

## REDACTIE

E. Goddijn  
N. Brummer

Bodytext  
T&J Assistance

## DRUK

Kruyt Grafisch Advies Bureau

STOWA rapportnummer VIW2008-03  
RWS rapportnummer RWS WD 2008.010  
ISBN 978.5773.396.3

# VOORWOORD

Op 7 maart 2008 is de groene versie van de handreiking inspectie waterkeringen gepresenteerd op de jaarlijkse kennisdag van Rijkswaterstaat en STOWA. Deze groene versie van de handreiking bieden de een integraal beeld van inspecties en de context waarin inspecties geplaatst kunnen worden en bestaat uit vier delen:

- VIW 2008-01 STRATEGISCH deel
- VIW 2008-02 OPERATIONEEL deel
- VIW 2008-03 Basisinformatie dijken
- VIW 2008-04 Basisinformatie inspecties

De beide delen basisinformatie zijn bedoeld als achtergrondinformatie over inspectie van waterkeringen en dienen als ondersteuning van de twee hoofd rapporten van de handreiking inspectie waterkeringen. In beide delen basisinformatie is bestaande kennis met betrekking tot dijken en inspecties samengebracht en gebundeld. We bieden daarmee de gebruikers een basis voor een gemeenschappelijk kennisniveau over inspecties. De beoogde gebruiker van deze delen is de medewerker waterkeringbeheer die betrokken is bij de organisatie en uitvoering van inspecties van waterkeringen. De inhoud van beide delen met basisinformatie is ruwweg als volgt onderverdeeld:

- Rapport VIW 2008-03 Basisinformatie dijken bevat algemene beschrijvingen van de constructie, belastingen, faalmechanismen en indicatoren.
- Rapport VIW 2008-04 Basisinformatie inspecties plaatst de werkprocessen inspectie in de algemene bedrijfsvoering van beheerders. Inspecties worden daarbij gepositioneerd in het beheer en benaderd als processen in de administratieve omgeving van de beheerder.

Doelen van de handreiking Inspectie Waterkeringen zijn ondermeer het explicieter en transparanter maken van de processen en daardoor het beter kunnen borgen van de kwaliteit van inspectieresultaten. Hierbij hoort ook het aangeven wat een medewerker zou moeten weten. Deze serie van vier rapporten geven hiervoor de eerste aanzet en naar onze mening voldoende stof om werk te kunnen maken van inspecties en aan de slag te gaan met de organisatie en uitvoering van inspecties. Daar het doel van de groene versie is om ervaring in de praktijk op te doen nodigen wij jullie uit aanvullingen en commentaar aan te geven zodat de blauwe versie een nog waardevoller document zal worden.

Wij wensen jullie succes met de aanpak, waarbij Waterdienst en STOWA het proces om te komen van een groene naar een blauwe versie zullen ondersteunen. Hierover zal worden gecommuniceerd via onze website: <http://www.inspectiewaterkeringen.nl>

Ludolph Wentholt  
STOWA

Peter Blommaart  
Waterdienst

# SAMENVATTING

De handreiking Inspectie Waterkeringen bestaat uit vier delen, het strategische/tactische deel, het operationele deel en twee basisrapporten met informatie over waterkeringen respectievelijk over inspecties. Dit deel geeft basisinformatie over dijken, kunstmatige grondlichamen die water keren. Het rapport geeft een beschrijving van de belangrijkste kenmerken van deze grondkeringen. Het geeft overigens géén gedetailleerde theoretische beschouwingen van typerende fenomenen of verschijnselen van de waterkeringen. Hiervoor verwijzen we naar de diverse technische rapporten en leidraden van de voormalige Technische Adviescommissie Waterkeringen (TAW) of naar recentere uitgaven van Expertise Netwerk Waterkeringen (ENW), het plaatsvervangende orgaan voor TAW.

Dit rapport brengt de medewerker beheer, die onder andere belast is met de organisatie en uitvoering van inspecties van waterkeringen, in contact met de basisbeginselen van dijken. Het geeft een overzicht van feiten die bekend worden verondersteld voor goed beheer van dit type waterkeringen. Ook geeft het de medewerker voldoende basis en houvast om de rol van beheerder en opdrachtgever naar derden te kunnen vervullen.

Nadat de typering van waterkeringen zijn beschreven, wordt in het bijzonder ingegaan op de opbouw van dijken. Hierbij is veel aandacht voor de bekledingen, zoals grasmatten, steenzettingen en asfaltbekledingen. De bijzondere eigenschappen van de bekledingstypen in relatie tot de functies komen aan bod. Ook gaat dit basisrapport in op de aard en soort van de belastingen waaraan dijken kunnen worden blootgesteld. Van falen van dijken is sprake als deze niet meer aan de functionele eisen voldoen. We kunnen verschillende faalmechanismen onderscheiden, die hier ook worden besproken. Het falen van steenzettingen wordt specifiek besproken. Hierbij worden de faalmechanismen gedetailleerder beschreven, waardoor het inzicht in bekledingen kan worden aangescherpt. Ten slotte leggen we de relatie tussen faalmechanismen en indicatoren. Een indicator geeft representatieve informatie over de staat van de waterkering in relatie tot een mechanisme van falen van de kering.

# VIW IN HET KORT

VIW, Verbetering Inspectie Waterkeringen is een gezamenlijk programma van STOWA en RWS Waterdienst. Het programma is in 2004 gestart in opdracht van de staatssecretaris van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat. Binnen het programma worden in samenwerking met beheerders projecten uitgevoerd die kunnen bijdragen aan de verbetering van inspecties en daarmee aan het borgen van het veiligheidsniveau tegen hoogwater en overstromingen.

De Waterdienst is een nieuwe landelijke dienst van Rijkswaterstaat, die kennis ontwikkelt die nodig is voor de uitvoering van de waterstaattaken. De Waterdienst heeft overzicht over de toestand en het gebruik van het hoofdwatersysteem: het samenhangende stelsel van de grote rivieren, kanalen, meren, kustwater en zee. Vanuit dit overzicht werkt de Waterdienst aan efficiënt en effectief waterbeheer, inclusief waterkeringenbeheer voor de gebruiker, nu en in de toekomst.

De Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, kortweg STOWA, is het onderzoeksplatform van Nederlandse waterbeheerders. Deelnemers zijn alle beheerders van grondwater en oppervlaktewater in landelijk en stedelijk gebied, beheerders van installaties voor de zuivering van huishoudelijk afvalwater en beheerders van waterkeringen. In 2002 waren dat alle waterschappen, hoogheemraadschappen en zuiveringsschappen, de provincies en het Rijk (het Rijksinstituut voor Zoetwaterbeheer en de Dienst Weg- en Waterbouw van Rijkswaterstaat).

De waterbeheerders gebruiken de STOWA voor het realiseren van toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk juridisch en sociaalwetenschappelijk onderzoek dat voor hen van gemeenschappelijk belang is. Onderzoeksprogramma's komen tot stand door te inventariseren welke behoeften bij de deelnemers leven. Onderzoekssuggesties van derden, zoals kennisinstituten en adviesbureaus, zijn van harte welkom. Deze suggesties toetst de STOWA aan de behoeften van de deelnemers.

De STOWA verricht zelf geen onderzoek, maar laat dit uitvoeren door gespecialiseerde instanties. De onderzoeken worden begeleid door begeleidingscommissies. Deze zijn samengesteld uit medewerkers van de deelnemers, zonodig aangevuld met andere deskundigen. Het geld voor onderzoek, ontwikkeling, informatie en diensten brengen de deelnemers samen bijeen. Momenteel bedraagt het jaarlijkse budget zo'n vijf miljoen euro.

U kunt de STOWA bereiken op telefoonnummer: +31 (0)30-2321199.

Ons adres luidt: STOWA, Postbus 8090, 3503 RB Utrecht.

Email: [info@inspectiewaterkeringen.nl](mailto:info@inspectiewaterkeringen.nl).

Website: [www.inspectiewaterkeringen.nl](http://www.inspectiewaterkeringen.nl)



# BASISINFORMATIE DIJKEN

## INHOUD

	VOORWOORD	
	SAMENVATTING	
	VIW IN HET KORT	
<b>1</b>	<b>INLEIDING</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>TYPEN WATERKERINGEN</b>	<b>2</b>
<b>2.1</b>	Algemeen	2
<b>2.2</b>	Indeling naar status en functie	4
2.2.1	Primaire waterkeringen	4
2.2.2	Regionale waterkeringen	5
2.2.3	Overige keringen	5
<b>3</b>	<b>OPBOUW VAN DIJKEN</b>	<b>6</b>
<b>3.1</b>	Opbouw in lengterichting	6
<b>3.2</b>	Opbouw in dwarsrichting	6
<b>3.3</b>	Constructieve functie van de elementen	8
<b>3.4</b>	Constructieve functie van de ondergrond	11
<b>3.5</b>	Bijzondere elementen	13
<b>3.6</b>	Aansluitingsconstructies	13



<b>4</b>	<b>BEKLEDINGEN</b>	<b>14</b>
<b>4.1</b>	Inleiding	14
<b>4.2</b>	Grasmat	14
<b>4.3</b>	Steenzetting	23
4.3.1	Bekledingssysteem	24
4.3.2	Toplaag van standaardelementen	25
4.3.3	Toplaag van aanverwante bekledingstypen	28
4.3.4	Inwasmateriaal	32
4.3.5	Granulaire laag	33
4.3.6	Geokunststof	34
4.3.7	Granulaire aanvulling	35
4.3.8	Basismateriaal	35
4.3.9	Teenbestorting	36
4.3.10	Teenconstructies	36
4.3.11	Overgangsconstructies	36
4.3.12	Aansluitingsconstructies	36
4.3.13	Berm, bovenbeloop, kruin, binnentalud, overlaten en kribben	37
<b>4.4</b>	Asfalt	37
4.4.1	Algemeen	37
4.4.2	Bouwstoffen	39
4.4.3	Mengselaspecten	41
4.4.4	Eigenschappen	42
<b>5</b>	<b>BELASTINGEN</b>	<b>50</b>
<b>5.1</b>	Inleiding	50
<b>5.2</b>	Permanente belastingen	50
<b>5.3</b>	Hydraulische belastingen	51
5.3.1	Inleiding	51
5.3.2	Maatgevende hoogwaterstand (MHW)	52
5.3.4	Hoogwaterstijging	54
5.3.5	Lokale waterstandverhogingen	55
5.3.6	Golfoverslaghoogte	55
5.3.7	Hydraulische belasting door schepen	56
5.3.8	Golfrandvoorwaarden bij een lagere waterstand dan MHW	56
<b>5.4</b>	Overige belastingen	56
5.4.1	Inleiding	56
5.4.2	Wind	57
5.4.3	IJs	57
5.4.4	Verkeer	58
5.4.5	Aardbevingen	58
5.4.6	Bodemonderzoek en explosies	58
5.4.7	Aanvaringen en drijvende voorwerpen	58
5.4.8	Biologische aantasting	58
5.4.9	Chemische aantasting	59
5.4.10	Klimatologische aantasting	59
5.4.11	Vandalisme en medegebruik	59

<b>6</b>	<b>FAALMECHANISMEN DIJKEN</b>	<b>60</b>
<b>6.1</b>	Algemeen	60
<b>6.2</b>	Kruinhoogte	60
6.2.1	Inleiding	60
6.2.2	De aanleghoogte van de kruin	60
6.2.3	Zetting	61
6.2.4	Horizontale vervormingen	63
6.2.5	De aanleghoogte van de kruin bij bijzondere constructies	63
<b>6.3</b>	Macrostabieliteit	63
6.3.1	Inleiding	63
6.3.2	Nadere beschouwing macrostabieliteit	64
<b>6.4</b>	Microstabieliteit	68
6.4.1	Inleiding	68
6.4.2	Zanddijk met een toplaag van klei	70
6.4.3	Zanddijk met zandige toplaag	71
<b>6.5</b>	Stabiliteit bij overslag	72
6.5.1	Inleiding	72
6.5.2	Infiltratie en afschuiven	72
6.5.3	Erosie binnentalud	74
<b>6.6</b>	Zandmeevoerende wellen	74
6.6.1	Inleiding	74
6.6.2	Procesbeschrijving	74
<b>6.7</b>	Stabiliteit vooroever	75
6.7.1	Inleiding	75
6.7.2	Stroming	76
6.7.3	Afschuiving en zettingvloeiingen	76
<b>6.8</b>	Samenvatting	78
<b>7</b>	<b>FAALMECHANISMEN BEKLEDINGEN</b>	<b>79</b>
<b>7.1</b>	Inleiding	79
<b>7.2</b>	Falen steenzetting door toplaaginstabiliteit	79
7.2.1	Toplaaginstabiliteit bij maximale golf rugtrekking	80
7.2.2	Toplaaginstabiliteit door golfklap	82
7.2.3	Toplaaginstabiliteit door langsstroming	83
7.2.4	Toplaaginstabiliteit door golfploop	83
7.2.5	Falen van steenzetting op een berm	84
<b>7.3</b>	Falen steenzetting door afschuiving	85
<b>7.4</b>	Falen steenzetting door materiaaltransport	87
7.4.1	Materiaaltransport vanuit ondergrond naar granulaire laag	87
7.4.2	Materiaaltransport vanuit de granulaire laag door de toplaag	89
<b>7.5</b>	Faalmechanismen van aanverwante bekledingstypen	90
7.5.1	Falen van geschakelde steenzettingen	90
7.5.2	Falen van doorgroeistenen	90
7.5.3	Falen van ingegoten steenzettingen	90
7.5.4	Falen van breuksteenoverlagingen	90
7.5.5	Falen van teen-, overgangs- of aansluitingsconstructie	93

<b>8</b>	<b>FAALMECHANISMEN EN INDICATOREN</b>	<b>94</b>
<b>8.1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>94</b>
<b>8.2</b>	<b>Indicatoren dijken</b>	<b>94</b>
	<b>REFERENTIES</b>	<b>96</b>

# 1

## INLEIDING

Dit hoofdstuk geeft de inleiding op basisinformatie dijken.

Doel van dit hoofdstuk is het vaststellen van de basisinformatie voor de medewerker beheer die belast is met de organisatie van inspecties van waterkeringen. Het geeft voldoende informatie om een inspectieplan te kunnen maken.

Dit basisrapport is vooral bedoeld voor medewerkers van waterkeringbeheerders die belast zijn met het planmatig organiseren van inspecties.

Het basisrapport maakt deel uit van de Handreiking Inspectie Waterkeringen. De handreiking Inspectie Waterkeringen bestaat uit vier delen, het strategische/tactische deel, het operationele deel en twee basisrapporten met informatie over dijken respectievelijk over inspecties. Dit deel geeft basisinformatie over waterkeringen, in het bijzonder over kunstmatige grondlichamen die water keren, dijken dus.

Het rapport geeft een beschrijving van de belangrijkste kenmerken van dijken. Het geeft overigens geen gedetailleerde theoretische beschouwingen van typerende fenomenen of verschijnselen van dit type waterkeringen. Hiervoor verwijzen we naar de diverse technische rapporten en leidraden van de voormalige Technische Adviescommissie Waterkeringen (TAW) of naar recentere uitgaven van Expertise Netwerk Waterkeringen (ENW), het plaatsvervangende orgaan voor TAW.

Het beheren en inspecteren van waterkeringen vraagt in de eerste plaats voldoende algemene inhoudelijke kennis van waterkeringen. Deze meer technisch inhoudelijke kennis is nodig om de inrichting en uitvoering van inspecties als beheerder vorm en inhoud te kunnen geven. De medewerkers beheer moeten in staat zijn het proces van planvorming rond inrichting en uitvoering van inspecties aan te sturen en de resultaten hieruit te kunnen beoordelen naar bereikte doelen.

Het rapport bevat inleidingen op de vele technische aspecten van dijken voor het beheer en bundelt hiermee de huidige kennis. De medewerker beheer kan hieruit een integraal beeld verkrijgen van het hele werkveld, wat nodig is voor het opzetten van en leiding geven aan inspecties van waterkeringen in de organisatie.

Het rapport heeft de volgende hoofdstukken. Hoofdstuk 2 geeft een algemene beschrijving van waterkeringen en is ontleend aan Grondslagen voor Waterkeren [1]. Vervolgens worden dijken er verder uitgelicht. De Handreiking Inspectie Waterkeringen is immers nog beperkt tot reguliere inspecties van kunstmatige grondlichamen die water keren. De opbouw van dijken in onderdelen komt in hoofdstuk 3 aan bod. Hoofdstuk 4 geeft informatie over de drie meest voorkomende bekledingen op dijken, namelijk gras, steenzettingen en asfalt. Dit hoofdstuk is gebaseerd op relevante passages uit de technische leidraden van TAW voor deze bekledingstypen. Hoofdstuk 5 gaat over belastingen van dijken. In hoofdstuk 6 worden mogelijke faalmechanismen van dijken beschreven. Faalmechanismen van bekledingen komen in hoofdstuk 7 aan de orde. Hoofdstuk 8 geeft de relatie tussen faalmechanismen en indicatoren.

# 2

## TYPEN WATERKERINGEN

### 2.1 ALGEMEEN

De Nederlandse kust wordt voor een groot deel door natuurlijke duinen beschermd tegen stormvloed. De kust is in zijn vorm ook een afspiegeling van de wisselwerking tussen de rivieren en de zee. Nederland, het deltagebied van Rijn en Maas, Schelde en Eems. Hoge gronden vormen een natuurlijke beveiliging tegen overstromingen. Alle andere waterkeringen zijn kunstmatig en worden van oudsher vooral gemaakt van een combinatie van klei en zand, zogenaamde grondconstructies. De verklaring hiervoor ligt voor de hand. Het materiaal is in grote hoeveelheden beschikbaar, gemakkelijk te verwerken, flexibel, eenvoudig te onderhouden en aan te passen en zeer duurzaam. Klei is, in combinatie met gras, redelijk erosiebestendig. In situaties waar de waterkeringen werden gekruist door (water)wegen, werden constructies als sluizen en coupures bedacht. Zo ontstonden waterkerende kunstwerken, vroeger meestal gemaakt van hout en metselwerk, later ook van beton en staal.

Het aantal van deze constructies werd meestal beperkt in verband met het risico van het niet (tijdig) kunnen sluiten en de problemen met het waterdicht aansluiten van deze stijve constructies op een grondlichaam. Er kunnen ook andere redenen zijn om geen grondconstructie toe te passen, doorgaans voortvloeiend uit andere functies die de waterkering heeft. Zo kan bijvoorbeeld de wens om schepen af te meren aan de kering vragen om een verticale wand, wat leidt tot een keermuurconstructie. Ook kan er bij versterking van een waterkering voor worden gekozen om deze geheel of gedeeltelijk als wand- of schermconstructie uit te voeren, teneinde ruimte te winnen om bijvoorbeeld waardevol geachte bebouwing te sparen.

Dit neemt echter niet weg dat bij het ontwerpen van nieuwe en ook bij het versterken van bestaande waterkeringen, om bovengenoemde redenen, de eerste gedachte toch uitgaat naar het ontwerpen van een grondconstructie.

Uitgaande van het hiervoor gestelde zijn er vier (hoofd)typen constructies voor bescherming tegen hoog water. Dit zijn (zie ook figuur 2.1):

- duinen;
- grondconstructies (dijken, dammen);  
bijzondere waterkerende constructies (onder andere kistdam, keermuur, damwand);
- waterkerende kunstwerken (onder andere sluizen, coupures, stormvloedkeringen, gemalen)

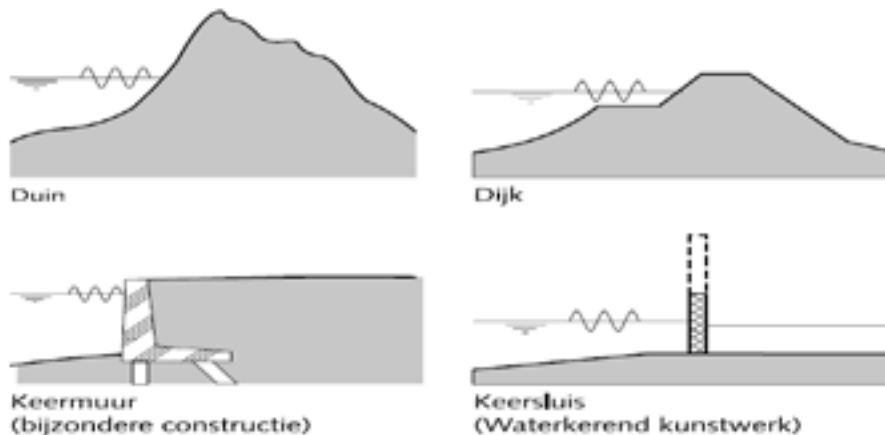
Daarnaast kunnen er objecten zijn in, op en langs waterkeringen, zoals pijpleidingen, gebouwen en bomen. Deze objecten zijn er doorgaans vanwege andere dan waterkerende functies, maar kunnen het waterkerende vermogen wel beïnvloeden. Voor alle waterkeringen geldt daarom dat het waterkerende vermogen moet worden beoordeeld aan de hand van de hoogte en standzekerheid van de gehele constructie, inclusief objecten.

## DUINEN

Duinen zijn natuurlijke landschapsvormen. Zij worden gevormd door de wind uit aangevoeld zand in wisselwerking met de vegetatie die het zand vangt en vasthoudt. De stabilisatie kan worden versneld of versterkt door helmaanplant. Die beplanting is echter niet bedoeld en ook niet in staat om erosie van de zandkorrels door golven bij hoge waterstanden tegen te houden. De werking van duinen als

FIGUUR 2.1

HOOFDTYPEN WATERKERINGEN



hoogwaterkering berust uitsluitend op de totale massa van het zand. Deze massa moet zo groot zijn dat er bij afkalving door storm nog voldoende zand blijft liggen om het waterstandsverschil tussen zee en achterland te keren. Na de storm kan bij lagere waterstanden het opbouwproces door de wind opnieuw beginnen. Door dit dynamische karakter vragen duinen om een speciale aandacht in beheer en onderhoud.

## GRONDCONSTRUCTIES

Dijken en dammen zijn kunstmatige grondlichamen. In tegenstelling tot duinen, die weinig bestendig zijn tegen erosie door golfslag, moeten dijken dat vanwege hun kleinere afmetingen in hoge mate wel zijn. Die erosiebestendigheid ontleent een dijk aan de gebruikte materialen, bijvoorbeeld klei met grasvegetatie of een bekleding van steenachtige materialen of asfalt. Typerend voor deze constructies is de vorm van het grondlichaam, die in dwarsdoorsnede trapeziumvormig is. Het waterkerende vermogen van de constructie wordt geleverd door de hoogte en de vormgeving van het dwarsprofiel. Gelet moet worden op een voldoende weerstand tegen afschuiven (standzekerheid) en waterdichtheid. De dijk ontleent zijn standzekerheid aan de schuifsterkte van het dijklichaam en de ondergrond.

## BIJZONDERE WATERKERENDE CONSTRUCTIES

Bijzondere waterkerende constructies hebben dezelfde waterkerende functie als een grondconstructie, maar vorm en materiaal kunnen geheel afwijkend zijn. Voorbeelden zijn: dijkmuur, kistdam en damwand. Het bijzondere van deze constructies is dat zij een grotere vrijheid in vormgeving en functionaliteit mogelijk maken dan een traditioneel dijkontwerp. Daartegenover staat dat zij meestal veel aandacht vragen in het beheer en onderhoud.

De sterkte ontleent deze constructies aan de gebruikte materialen zoals staal, beton en hout, die tegen veel grotere spanningen bestand zijn dan bijvoorbeeld klei. De globale stabiliteit wordt geleverd door wrijving (keermuur met grond), door heipalen of door inklemming in de bodem (kistdam). Speciale aandacht bij het ontwerp vereist de overgang van de bijzondere waterkerende constructie naar de aansluitende grondconstructie.

### WATERKERENDE KUNSTWERKEN

Waterkerende kunstwerken worden gemaakt voor een andere nuttige functie die de waterkering kruist. Die functie kan zijn:

- scheepvaart door een schutsluis (IJmuiden) of stormvloedkering (Nieuwe Waterweg, Hollandse IJssel);
- waterdoorvoer door een gemaal (Katwijk), een spuisluis (Haringvlietsluizen) of stormvloedkering (Oosterschelde);
- weg- of treinverkeer door een coupure (Lobith, Harlingen).

In verband met deze nuttige functies zijn deze waterbouwkundige kunstwerken meestal voorzien van één of meer beweegbare afsluitmiddelen. In gesloten toestand dragen deze middelen de krachten die erop werken, over op het starre deel van het kunstwerk.

FIGUUR 2.2

DE STORMVLOEDKERING IN DE OOSTERSCHELDE WAARBORGT DE VEILIGHEID VAN HET ACHTERLIGGEN DE GEBIED MET BEHOUD VAN HET UNIEKE GETIJDE-ECOSYSTEEM



### COMBINATIES

Uit het bovenstaande moge duidelijk zijn dat de grens tussen de diverse typen waterkering en de daarin opgenomen objecten niet zo scherp is. Bijzondere constructies kunnen grondconstructies versterken, aanvullen of volledig vervangen. Bijzondere constructies kunnen vast of beweegbaar zijn, terwijl waterkerende kunstwerken in feite altijd beweegbare bijzondere constructies zijn. Figuur 2.2 geeft een voorbeeld.

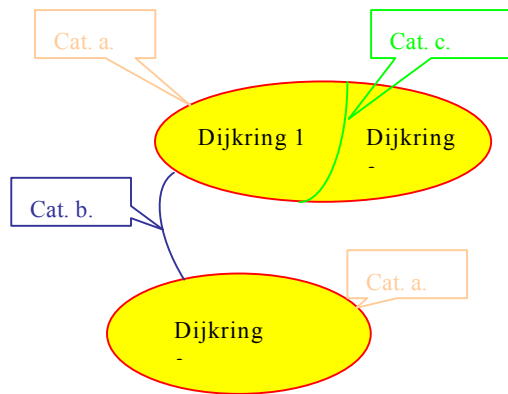
## 2.2 INDELING NAAR STATUS EN FUNCTIE

### 2.2.1 PRIMAIRE WATERKERINGEN

Volgens de Wet op de waterkering is een primaire waterkering een waterkering, die beveiliging biedt tegen overstroming doordat deze ofwel behoort tot een stelsel van een dijkkringgebied, al dan niet met hoge gronden, ofwel vóór een dijkkringgebied is gelegen. In het Hydraulisch Randvoorwaardenboek [2] en het Voorschrift Toetsen op Veiligheid [3] worden primaire waterkeringen ingedeeld in de volgende categorieën:

- a. waterkeringen die behoren tot stelsels die dijkkringgebieden - al dan niet met hoge gronden - omsluiten en direct buitenwater keren;
- b. waterkeringen die voor dijkkringgebieden zijn gelegen en buitenwater keren;
- c. waterkeringen, niet bestemd tot het direct keren van buitenwater;
- d. waterkeringen als een van de categorieën a tot en met c, maar buiten de landgrenzen.

FIGUUR 2.3 ONDERSCHIED TUSSEN PRIMAIRE WATERKERINGEN VAN CATEGORIE A, B EN C



De veiligheidsnormen voor de primaire waterkeringen van categorie a zijn per dijkkringgebied vastgelegd in de Wet op de Waterkering en variëren tussen 1/1.250 en 1/10.000 per jaar. Dit geldt niet voor de dijkkringgebieden langs de Maas ten zuiden van Nijmegen, waarvoor bij de laatste wijziging van de Wet op de Waterkering een veiligheidsnorm van 1/250 per jaar is vastgelegd.

De veiligheidsnormen voor de primaire waterkeringen van categorie b., die ook wel dijkkringverbinderende waterkeringen worden genoemd, staan in Katern 2 van het Voorschrift Toetsen op Veiligheid [3] en variëren tussen 1/2.000 en 1/10.000 per jaar.

### 2.2.2 REGIONALE WATERKERINGEN

Regionale keringen zijn niet-primaire waterkeringen, die binnen of buiten een dijkkringgebied gelegen gebieden beschermen en die als zodanig zijn aangewezen in provinciale verordeningen. De volgende keringen kunnen in principe worden aangewezen als regionale keringen:

1. boezemkaden
2. secundaire waterkeringen
3. polderkaden
4. landscheidingen en compartimenteringdijken
5. voorliggende waterkeringen

Op dit moment zijn er alleen voor een aantal boezemkaden veiligheidsnormen, die in provinciale verordeningen zijn vastgelegd. De normering is gebaseerd op een indeling in klassen (klasse I t/m V) die staat voor een veiligheidsnorm, die varieert tussen 1/10 per jaar (klasse I) en 1/1000 per jaar (klasse V)

De handreiking is beperkt tot de dijken

### 2.2.3 OVERIGE KERINGEN

Overige keringen zijn alle door de beheerder aangewezen keringen in de beheerverordening, die geen primaire of regionale keringen zijn.



# 3

## OPBOUW VAN DIJKEN

### 3.1 OPBOUW IN LENGTERICHTING

Voor een overzichtelijke weergave van de relevante onderdelen op, in of bij de waterkering kan de dijk worden opgedeeld in verschillende elementen, zowel in lengterichting als in het dwarsprofiel. In lengterichting wordt allereerst onderscheid gemaakt naar type waterkering (dijk, dam, kunstwerk, duin). Bij een opdeling van een dijk in vakken wordt een zo volledig mogelijk overzicht opgesteld van alle aanwezige kenmerken en elementen, in het bijzonder:

- Geometrie van het dijk- of damprofiel, waaronder het wel of niet aanwezig zijn van stabiliteits-, opbarst- of pipingbermen, de geometrie van het voorland en voorliggende geulen en de aanwezigheid van waterpartijen voor of achter de dijk (wielen, bermsloten en dergelijke);
- Opbouw van een dijklichaam (inclusief de historische dijkopbouw) en de ondergrond. Van belang is de grondmechanische situatie en welke ontwerpcriteria voor de dijk een rol spelen. Hiervoor moeten we onderscheid maken in de verschillende soorten ondergrond en kenmerken zoals samendrukbaarheid, kruip, waterdoorlatendheid, zettingsvloeiingsgevoeligheid en (schuif)sterkte.
- Hydraulische belasting, waarbij de mate van blootstelling en de aanwezigheid van een voorland een rol spelen, evenals overige belastingen;
- Type en de plaats van bekledingen;
- Bijzondere constructies, zoals filters, drainages, kwelschermen en grondkerende constructies;
- Overgangsconstructies naar landhoofden, strekdammen en dergelijke;
- Aansluitconstructies in lengterichting (met een kunstwerk, duin of hoge grond);
- Elementen voortkomend uit medegebruik van de dijk, vooral de aanwezigheid van begroeiing en andere elementen, zoals bebouwing, windmolens, kabels en leidingen.

De locatie van de diverse elementen wordt aan de metrerering van de dijk gerelateerd.

### 3.2 OPBOUW IN DWARSRICHTING

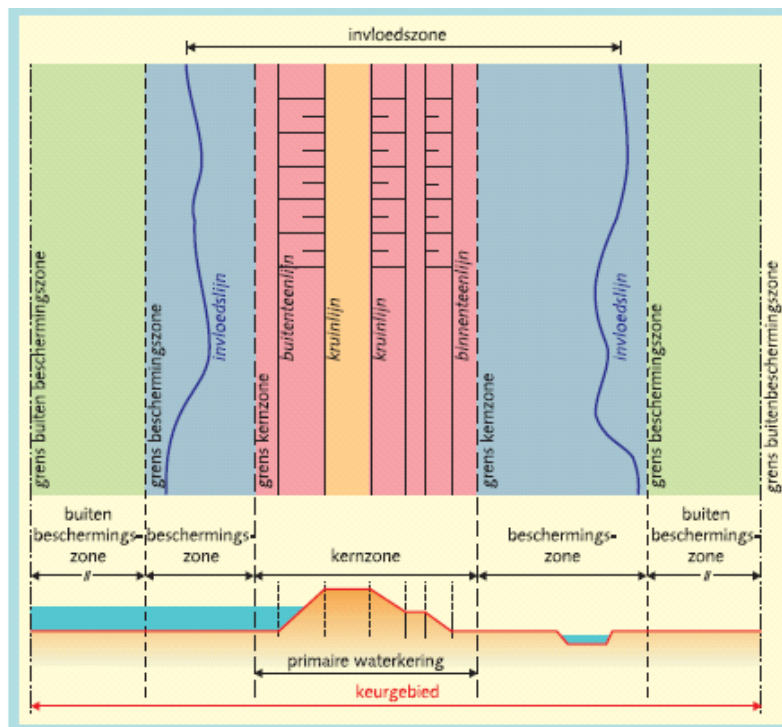
Naast een situering in de lengterichting van de dijk moet de locatie van de elementen eveneens in het dwarsprofiel worden aangegeven. Per vak is hiertoe een representatief dwarsprofiel toegekend.

#### BEHEERGRENZEN

De begrenzingen van het profiel moeten zowel aan de binnen- als buitenzijde worden aangegeven. De beheergrenzen zijn min of meer afhankelijk van het type dijk (rivier-, zee- of meer-dijk). De technische beheergrenzen van het profiel moeten zodanig worden gekozen, dat veranderingen in de situatie daarbuiten geen direct gevaar voor falen of bezwijken van de dijk of onderdelen daarvan opleveren. De grenzen moeten daarom ofwel voldoende ruim worden gekozen of door berekeningen worden vastgesteld, zie figuur 3.1.

FIGUUR 3.1

DWARSPROFIEL VAN EEN DIJK MET BENAMINGEN ZOALS GEBRUIKT IN DE KEUR (BRON: [3] ELEMENTEN)



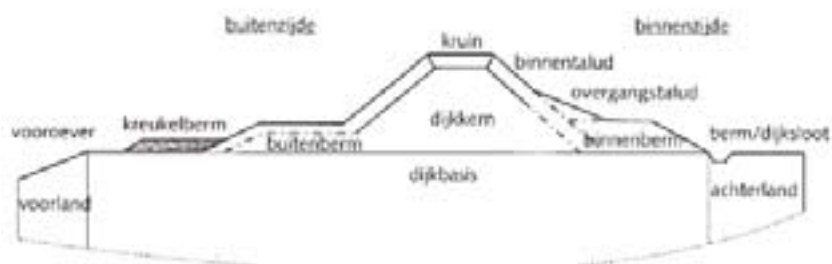
In figuur 3.2 is het principeprofiel gegeven voor een dijk. De onderverdeling van het dwarsprofiel in elementen is uitgevoerd op basis van gelaagdheid/opbouw en afmetingen/hellingen. De aangegeven elementen zijn zowel in rivier- als zeedijken terug te vinden. Het principeprofiel van een meerdijk is vergelijkbaar met dat van een zeedijk, waarbij de normale waterstand vrijwel niet varieert en de kreukelberm meestal op dit niveau ligt. Bijzondere waterkerende constructies zijn niet in figuur 3.2 aangegeven.

### ELEMENTEN EN DIJKTYPE

De hoofdfunctie van een element en het belang hiervan voor het totale dijkontwerp hangt af van het type dijk. Een rivierdijk wordt aan een relatief langdurige hoogwaterstand blootgesteld. Daarom richt de aandacht zich voornamelijk op binnendijks gelegen elementen die betrekking hebben op piping, binnenwaartse macrostabiliteit en microstabiliteit. Bij zeedijken is de belasting op een zeedijk relatief kortdurend en wordt voor een belangrijk deel gekenmerkt door golfaanval. Hier wordt extra aandacht besteed aan het buitentalud, de kruinhoogte en de bekleding. Hoewel een element verschillende functies kan vervullen en de hoofdfunctie afhankelijk is van het type waterkering wordt in de decompositie geen onderscheid gemaakt naar type waterkering. De elementen kunnen in beginsel namelijk in alle typen dijken worden toegepast en zullen slechts in dimensies van elkaar afwijken.

FIGUUR 3.2

PRINCIPEPROFIEL ZEE-/RIVIERDIJK EXCLUSIEF BIJZONDERE ELEMENTEN



Figuur 3.2 geeft een schematische voorstelling van een dijkprofiel: de figuur geeft mogelijke combinaties van elementen in een dijk weer. De begrenzing van de bekleding is gestippeld op plaatsen waar elementen (zoals binnen- en buitenberm) aansluiten op het dijklichaam. Bovenstaande figuur geeft ook een geometrische opdeling van de ondergrond in voorland, dijkbasis en achterland.

### ELEMENTGROEPEN

Het dwarsprofiel van een dijk is opgebouwd uit de volgende elementen, gegroepeerd in elementgroepen:

- elementen aangaande de ondergrond:
- vooroever en voorland
- dijkbasis
- achterland
- constructieve elementen:
- kreukelberm (bij zee- of meerdijk)/plasberm (in rivierengebied)
- buitenberm (inclusief bekleding)
- buitentalud (inclusief bekleding)
- dijkkern
- kruin (inclusief bekleding)
- binnentalud (inclusief bekleding)
- overgangstalud (binnendijks)
- binnenberm
- berm-/dijksloot
- bijzondere elementen:
- afsluiting watervoerende laag
- scherm in kruin
- drainage
- et cetera.

Naast het bovengenoemde bevinden zich vaak nog andere elementen in de waterkering, zoals een wegfundering. Omdat deze elementen niet direct een waterkerende functie hebben worden ze niet behandeld. Op de bekleding wordt in hoofdstuk 4 gedetailleerd teruggekomen.

### 3.3 CONSTRUCTIEVE FUNCTIE VAN DE ELEMENTEN

Het waterkerende vermogen van een dijk wordt primair bepaald door de kruin. De kruinhoogte bepaalt de kans op overlopen en de mate van overslag. Hoofddoel van de elementen van het dwarsprofiel is dan ook het op de juiste hoogte en het op zijn plaats houden van de kruin. Tegelijkertijd moet de grondconstructie zodanige afmetingen hebben dat deze bestand is tegen de ontwerpbelastingen. Dit betekent, dat onder die belasting de samenhang tussen de elementen niet verbroken mag worden en dat de elementen zelf niet in hun constructieve functie mogen worden aangetast.

Het uitgangspunt dat de constructie uit grond wordt opgebouwd betekent dat we rekening moeten houden met de specifieke eigenschap van grond, namelijk dat het gedeeltelijk uit water bestaat. Doordat het water van alle elementen van de constructie met elkaar in verbinding staat, vergroot dit de interactie tussen de elementen. Bovendien leiden bepaalde belastingen tot verhoging van de (grond)waterspanning die ook doorloopt door de verschillende elementen.

## KRUIN

De kruin voorkomt bij de juiste hoogteligging overlopen en een te groot overslagdebiet. Kruinhoogte, -breedte en de samenstelling van de bekleding moeten zo gekozen worden dat de overslag binnen de ontwerpcriteria blijft. Indien de kruin faalt, treedt niet alleen schade op door erosie aan het element zelf, maar ook aan het binnentalud, het overgangstalud en de binnenberm. De combinatie van erosie en infiltrerend water kan tot afschuiven op micro- of macroschaal leiden. Het teruglopen van de sterkte van de grond door het oplopen van de waterspanningen is daarbij een risicofactor waarmee bij de keuze van de grondsamenstelling van de andere elementen rekening moet worden gehouden.

## DIJKKERN

De dijk kern is de draagconstructie waarop de verschillende elementen van het dwarsprofiel zijn opgelegd. Eerste vereiste is dat de kern zelf stabiel is, zowel onder de belastingen van de dijkelementen als onder de externe belastingen. De afmetingen van de kern en de taluds worden daartoe berekend met behulp van de sterkteparameters van de grondsoort van de kern en van de verschillende lagen van de ondergrond. Bij de keuze van de grondsoort en de uitvoeringswijze moet rekening worden gehouden met zettingsvloeiingsgevoeligheid.

Het gewicht van de kern zorgt samen met de schuifweerstand van de ondergrond enerzijds voor de sterkte tegen zijdelings wegschuiven van de dijk bij de Maatgevende Hoogwaterstand (MHW). Anderzijds belast de kern (samen met de andere elementen) de ondergrond, waardoor in het algemeen behoorlijke zettingen zullen optreden. De noodzakelijke extra hoogte voor deze zetting en de klink van de kern zelf moet dan ook in de hoogte van de kern terugkomen.

Bij het bepalen van de afmetingen en de materiaalkeuze van de kern moeten we verder rekening houden met de verhouding van de doorlatendheden van de kern, de ondergrond en de taluds die van invloed zijn op de ontwikkeling van de waterspanningen in de dijk. En zolang de grondspanning hetzelfde blijft, verminderen oplopende waterspanningen de schuifsterkte.

De voetbreedte van de kern bepaalt mede de lengte van de kwelweg voor grondwater dat door watervoerende zandlagen onder de dijk door naar de polder loopt en daarmee de weerstand van de waterkering tegen erosie door zandmeevoerende wellen (piping).

De grondsamenstelling van de dijk kern zal in het algemeen niet geschikt zijn om belastingen als golven, stromingen et cetera te weerstaan. De kern wordt daarom beschermd door beklede taluds. Om diverse constructieve redenen kunnen daarin ook bermen zijn opgenomen.

## TALUDS EN BERMEN

De taluds en bermen hebben als gezamenlijk kenmerk dat zij een belangrijke functie hebben bij de stabiliteit van de dijk. In het algemeen geldt, hoe flauwer de taludhelling en hoe breder de berm, des te groter de stabiliteit. Tevens vormen de taluds en de bermen met hun bekleding de beschermende schil van de dijk kern.

## BUITENTALUD

Het ontwerp van het buintentalud heeft een directe relatie met de belasting door golven, in samenhang met plaats en afmetingen van de buitenberm. De golfoploop en daarmee het overslagdebiet kunnen gereduceerd worden door toepassing van een flauwere taludhelling en dit

kan weer resulteren in een lagere kruinhoogte. De keuze van de bekleding heeft eveneens invloed op de golfoploop en dient afgestemd te zijn op de diverse hydraulische belastingen.

### **BUITENBERM**

Een buitenberm wordt vanuit de waterkerende functie toegepast bij zee- en meerdijken om de golfoverslag te verminderen. De plaats van de berm wordt bepaald op grond van de hydraulische belastingen. Bij het ontwerp moet het effect van een berm worden beoordeeld samen met het effect van verschillende taludhellingen.

De buitenberm beïnvloedt door zijn gewicht de macrostabiliteit van het buitentalud, de mate waarin is afhankelijk van de plaats en de afmetingen. De invloed op de korrel- en waterspanningen in de dijk kern en -basis strekt zich ook uit tot de stabiliteit van het binnentalud. Voor de doorlatendheid geldt hetzelfde als hiervoor bij het buitentalud is gesteld. Ten slotte bepaalt de berm mede de lengte van de kwelweg wat van belang is voor de vereiste weerstand tegen piping.

### **LAGE BUITENBERM/PLASBERM/KREUKELBERM**

Wanneer op het buitentalud een harde bekleding wordt toegepast, dan moet de beëindiging daarvan worden beschermd tegen aantasting door golven of stroming. Daarvoor dient de plasberm, bij zeedijken even boven laagwater, bij meerdijken op het laagste meerpeil. Het is een overgangsconstructie met een 'halfhard' karakter tussen de harde bekleding en de grond van het verdere beloop of het voorland. Hiervoor wordt een kraagstuk met steenbestorting toegepast of een bekleding van riet of rijshout met puin.

### **BINNENTALUD**

Bij hoge waterstanden al of niet in combinatie met golfoverslag wordt de sterkte van het binnentalud op verschillende manieren aangesproken. Als eerste dreigt erosie door het overslaande water. De taludbekleding moet daarom erosiebestendig zijn. Door de infiltratie van het overslagwater dreigt lokale instabiliteit, mogelijk gevolgd door verdergaande infiltratie, verweking en stabiliteitsverlies op macroschaal. Door een juiste keuze van de beperkte doorlatendheid van de bekleding en grotere doorlatendheid en bergend vermogen van de dijk kern en eventueel drainage aan de teen van het talud, wordt dit risico beperkt. Bij de keuze van de grondsoort moeten we ook aan de verwekinggevoeligheid aandacht besteden.

Bij zeer hoge waterstanden is de taludhelling (mede) bepalend voor de zijdelingse stabiliteit van de grondconstructie in zijn geheel. In die belastingstoestand wordt de weerstand tegen afschuiven verminderd door de daarbij optredende hoge waterspanningen in de dijk en de ondergrond.

Ook uittredend kwelwater in het binnentalud kan dan tot lokale instabiliteit leiden. Wanneer deze mechanismen onvoldoende met een enkelvoudig binnentalud kunnen worden opgevangen kan de stabiliteit worden vergroot door een binnenberm en/of een overgangstalud in het ontwerp op te nemen.

### **OVERGANGSTALUD**

Een overgangstalud wordt toegepast om de weerstand tegen afschuiven van het binnentalud te vergroten en/of het optreden van micro-instabiliteit met name door het uittredende kwelwater te voorkomen.

**BINNENBERM**

Een binnenberm kan worden toegepast om de stabiliteit van het binnentalud te verzekeren. Bij het bepalen van de afmetingen van de berm wordt dan niet alleen de vergroting van de schuifweerstand in mogelijke schuifvlakken beoordeeld, maar ook de mate waarin efficiënt gebruik kan worden gemaakt van de bijdrage aan het tegenwerkende moment binnen de glijcirkel. De tweede reden om een binnenberm toe te passen hangt samen met de grondwaterstroming en de waterspanningen in de dijkbasis. Kwel met een groot verhang leidt tot risico's voor inwendige erosie of piping in een watervoerende laag. De breedte van de binnenberm kan zo worden gekozen dat de lengte van de kwelweg groot genoeg wordt om piping te voorkomen. De waterspanningen kunnen ook leiden tot opdrijven of opbarsten van de afdekkende laag van de dijkbasis of het achterland. De afmetingen van de binnenberm moeten dan worden afgestemd op de hoogte van de waterspanning en de breedte van de zone waarover de afdekkende laag onvoldoende stabiliteit heeft.

**BERM-/DIJKSLOOT**

De bermsloot heeft een gunstige invloed op de grondwaterstand en de waterspanningen in de dijk en het achterland. Deze hebben een positief effect op de stabiliteit van de waterkering. De kleinere laagdikte van de afsluitende lagen ter plaatse van de slootbodem kan daarop echter een ongunstig effect hebben doordat opbarsten of opdrukken eerder zal optreden. De bermsloot kan ook het uittreepunt voor piping zijn. Bij het ontwerpen moet dus rekening worden gehouden met de daarvoor van belang zijnde lengte van de kwelweg.

**3.4 CONSTRUCTIEVE FUNCTIE VAN DE ONDERGROND**

De keuze van een grondconstructie voor een waterkering betekent dat de ondergrond deel gaat uitmaken van die waterkering. Dit houdt meer in dan dat de bestaande bodem de dijk moet dragen. De ondergrond moet in staat zijn om de plaatsvastheid en vormvastheid van de grondconstructie te garanderen en tegelijkertijd in staat zijn zelf het water te keren. Net als de aangelegde grondconstructie wordt de ondergrond belast door hoge waterstanden, stromingen en golven. Bijzondere aandacht verdienen ook de grondwaterstromingen en -spanningen.

**DIJKBASIS**

De dijkbasis vormt het fundament van de waterkerende grondconstructie. Dit houdt in dat de verschillende grondlagen onderzocht moeten worden en beoordeeld moeten worden op hun sterkte- en vervormingeigenschappen als fundering van de dijk.

Als eerste gaat het om de zetting die door de aanleg van de dijk zal optreden en de mate waarin deze zettingen gelijkmatig verlopen zowel in lengte- als in dwarsrichting. De afdekkende (holocene) slappe lagen zijn hiervoor bepalend.

In de tweede plaats is de basis van grote invloed op de macrostabiliteit van de dijkkern, de taluds en de bermen. De eigenschappen van vooral de slappe lagen zijn van grote invloed op de stabiliteit en de mogelijke horizontale vervormingen.

In het algemeen neemt de sterkte van slappe grondlagen toe door het aanbrengen van een bovenbelasting, zoals in dit geval door de aanleg van een dijk. Helaas duurt het enige tijd voordat de ondergrond zich heeft aangepast en die grotere sterkte heeft verkregen. Tijdens de uitvoeringsfase worden de slappe lagen al wel zwaar belast maar is de sterkte nog niet toege-

nomen. Integendeel, doordat het poriënwater in eerste instantie de belasting draagt, nemen de waterspanningen toe en daarmee het risico voor stabiliteitsverlies.

Grondverbetering door de aanleg van een cunet of het aanbrengen van verticale drainage kan een oplossing zijn om stabiliteitsverlies in de uitvoeringsfase te voorkomen. In het algemeen wordt hiermee de definitieve constructie stabiel en bovendien worden de zettingen (bij een cunet) en de restzettingen (bij verticale drainage) verkleind.

In de derde plaats betekent het feit dat de ondergrond deel uitmaakt van de waterkering, dat er bij waterstandverhogingen een verhang over de dijkbasis ontstaat. Bij doorgaande watervoerende zandlagen kan de grondwaterstroming erosie en/of stabiliteitsverlies veroorzaken door zandmeevoerende wellen (piping) en of opdrijven of opbarsten van een afdekkende laag van het achterland. Terugschrijdende erosie en bezwijken van de afdekkende laag kunnen tot stabiliteitsverlies van de bovenliggende grondconstructie leiden.

#### **VOOROEVER OF VOORLAND**

De functies van het voorland vertonen grote overeenkomsten met die van het buitentalud en de buitenberm. Het voorland heeft invloed op de golfoploop en de golfoverslag, waarmee bij het bepalen van de kruinhoogte rekening wordt gehouden.

Meestal zal men vanuit het gezichtspunt waterkeren niet zover gaan om door ophoging van het voorland de golfoploop te reduceren. Maar wanneer er andere argumenten zijn om dat te overwegen dan kan dit bij de optimalisatie worden meegenomen.

Het voorland heeft ook een functie bij de buitenwaartse stabiliteit. Voor de beoordeling hiervan zijn de samenstelling van de ondergrond en de geometrie van het onderwatertalud van belang. Een steile vooroever met op korte afstand van de buitenteen een diepe geul of ontgrondingskuil vereist extra aandacht voor de schuifsterkte bij het grondonderzoek en later bij de stabiliteitsberekeningen.

#### **ACHTERLAND**

Voor de analyse van de constructieve bijdrage van het achterland is inzicht in de laagopbouw essentieel, naast inzicht in de grondparameters. Vaak zal het achterland bestaan uit slecht doorlatende klei- en veenlagen op goed doorlatende (pleistocene) zandlagen. Hoge buitenwaterstanden oefenen via het grondwater druk uit op het scheidingsvlak van deze lagen, waardoor de constructie wezenlijk beïnvloed kan worden. Wanneer zich in het klei/veenpakket doorgaande zandlagen of substantiële zandlenzen bevinden is de problematiek hetzelfde.

Op de stabiliteit van de binnenzijde van de kering is de sterkte en stabiliteit van de deklagen van grote invloed doordat de grondwaterspanning zo hoog kan oplopen dat opdrukken of opbarsten op het scheidingsvlak plaatsvindt. Hierdoor verliest de binnenzijde belangrijk aan stabiliteit.

Wanneer de deklaag wel stabiel is dan bestaat nog kans op piping. Voor het bepalen van de betrouwbaarheid van de kering op dit punt moet primair de grondsamenstelling van de deklaag en de watervoerende laag bekend zijn. Daarnaast spelen de dikte en de hoogteligging van de deklaag een rol en de locatie van het uittreepunt van de piping. Dit kan ook bepaald worden door nieuwe of aanwezige sloten, watergangen of wielen, afhankelijk van de plaats en de diepte daarvan.

### 3.5 BIJZONDERE ELEMENTEN

Door toepassing van bijzondere elementen zijn de dimensies van de constructie te beperken. Omdat vele varianten mogelijk zijn, noemen we hier drie veel toegepaste elementen als voorbeeld.

#### AFSLUITING WATERVOERENDE TUSSENZANDLAAG

Door afsluiting van de tussenzandlaag wordt piping via deze laag uitgesloten. De waterspanningen in de tussenzandlaag achter de afsluiting worden (binnendijks) verlaagd (indirecte invloed stabiliteit binnendijks). De waterspanningen in de tussenzandlaag voor de afsluiting worden echter verhoogd. Deze afsluiting kan worden uitgevoerd met een scherm of een kleikist.

#### SCHERM IN KRUIJN (DOORLOPEND IN DE ONDERGROND)

Het scherm vergroot de kwelweglengte (piping via Pleistoceen) en sluit 'ondiepe' piping uit. Hierdoor zal piping minder maatgevend zijn. Bovendien heeft het scherm een reducerend effect op de waterspanningen binnendijks (afhankelijk van de lengte), maar verhoogt de waterspanningen in elementen aan de waterkerende zijde van de dijk. Het scherm kan tevens als kerende constructie worden uitgevoerd, bijvoorbeeld als damwand of diepwand. Door een scherm worden de korrel- en waterspanningen aan weerszijden beïnvloed en daarmee de stabiliteit. De mate van beïnvloeding is afhankelijk van plaats en type van het scherm.

#### DRAINAGE

Drainage in de binnenteen verlaagt de grondwaterstand en de waterspanningen, waardoor de binnendijkse stabiliteit wordt verhoogd. Dit kan ook van belang zijn voor de standzekerheid van de bekleding van het binnentalud. Bij toepassing van drainage in een waterkerende grondconstructie moet in het ontwerp extra aandacht worden gegeven aan de duurzame werking van het systeem. Concreet moet rekening worden gehouden met neerslag van ijzeroxide uit het grondwater of verstikking als gevolg van biologische activiteit.

### 3.6 AANSLUITINGSCONSTRUCTIES

Een aansluitingsconstructie dient om waterkeringen van een verschillend type op elkaar aan te sluiten. Onder een aansluitingsconstructie wordt het gehele dwars- en lengteprofiel van een grondconstructie verstaan, in zijn afwijkende vorm, bij de overgang naar een duin, hoge gronden of een kunstwerk. Een dergelijke aansluiting is daarmee te beschouwen als een grootschalige overgangsconstructie.

Door de afwijkende vorm van de aansluiting kunnen, onder andere door turbulentie en golfdiffractie, lokaal grotere hydraulische belastingen optreden dan in eerste instantie met behulp van de aanwijzingen uit hoofdstuk 5 zijn bepaald. Dit kan gevolgen hebben voor de morfologie, ter plaatse van de overgang van bijvoorbeeld een dijk naar een duin resulterend in een versnelde afslag.

Deze verhoogde belastingen moet de beheerder zelf bepalen, op grond van zijn lokale ervaring eventueel met specialistische ondersteuning.



# 4

## BEKLEDINGEN

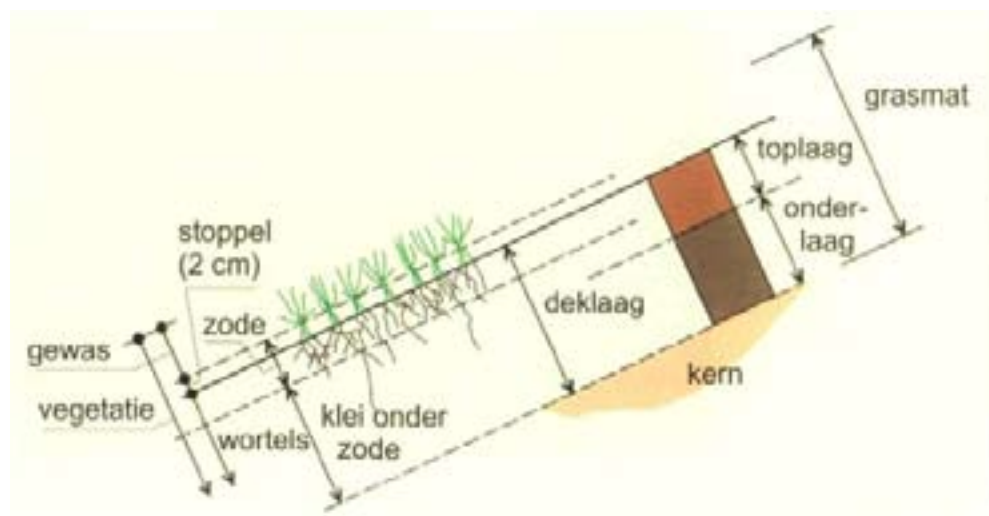
### 4.1 INLEIDING

In deze paragraaf worden de meest voorkomende bekledingstypen van dijken beschreven, te weten gras, steenzetting en asfalt. De informatie over deze bekledingstypen is overgenomen uit de volgende publicaties van de Technische Adviescommissie voor Waterkeringen: Grasmatt als Dijkbekleding [4], Technisch Rapport Steenzettingen, ontwerp [5] en Technisch Rapport Asfalt voor Waterkeringen [6]. De overgenomen en aangepaste passage geven de medewerker beheer een goed overzicht van de relevante beheer- en inspectieaspecten voor genoemde bekledingstypen.

### 4.2 GRASMAT

Het bekledingstype 'grasmatt' bestaat uit een graslandvegetatie die is geworteld in grond. Bij moderne dijken is dat doorgaans een deklaag van klei op een kern van zand.

FIGUUR 4.1 OPBOUW EN INDELING VAN GRASMATTEN



De grond nabij de oppervlakte van de deklaag is sterk doorworteld, in vochtige toestand elastisch en poreus. De onderliggende klei is echter stug (of plastisch als hij vochtig of ongerijpt is) en meestal iets minder waterdoorlatend. De erosiebestendigheid van de deklaag is nabij het grondoppervlak (meestal) groter dan dieper in de laag. Het bovenste sterk doorwortelde deel met een afwijkende bodemstructuur en een hogere erosiebestendigheid wordt 'zode' genoemd.

Een deklaag kan uit verschillende grondlagen zijn opgebouwd: een toplaag van zandige klei op een onderlaag van vette klei. Het bekledingstype 'grasmatt' is in onderdelen benoemd zoals aangegeven in de figuur.

## **FUNCTIES VAN DE GRASMAT**

Uit de hoofdfunctie van waterkering volgt een functie voor de grasmat als bekleding: bescherming van het dijklichaam tegen erosie bij belasting door golven of stroming. De Wet op de waterkering [7] vereist, dat men bij aanleg of wijziging van een waterkering ook rekening houdt met de andere functies van de waterkering en die bevordert. De functies liggen formeel vast door planologische beslissingen die zijn genomen door rijk, provincies en gemeenten. Een waterkering kan waarden hebben voor natuur, milieu, landschap en cultuurhistorie (kortweg: de LNC-waarden).

In de TAW-Grondslagen 1998 [1], hoofdstuk 5 en de TAW-Handreikingen 1994 [8] wordt aangegeven hoe men LNC-waarden kan benoemen en vervolgens behouden en bevorderen.

‘Grasmat’ is een bekledingstype dat meer functies tegelijk kan vervullen: door erosiebescherming te combineren met natuur of recreatie.

## **DE HOOFDFUNCTIE: WATER KEREN**

Het te keren water belast de waterkering en dus de grasmat met waterdruk, golven en stroming. De grasmat beschermt, zoals elke andere bekleding, het grondlichaam van de waterkering tegen erosie en ook enigszins tegen een hoge grondwaterstand. Aan de kwaliteit van de grasmat moeten eisen worden gesteld om die functies te kunnen vervullen.

### *Erosiebestendigheid*

Uit proeven en ervaringen blijkt, dat de weerstand van de grasmat tegen erosie goed valt te sturen met aanleg en graslandbeheer. Het graslandbeheer heeft de grootste invloed. Een zode is meer erosiebestendig naarmate de doorworteling intensiever is. De doorworteling koppelt de aggregaatjes en bodemdeeltjes, en voorkomt uitspoeling ervan. Door goed beheer krijgt men een goed doorwortelde zode.

Een goed graslandbeheer zorgt voor een relatief lage beschikbaarheid van voedingsstoffen. Dit leidt tot een grote verscheidenheid van plantensoorten, van zowel grassen als kruiden. Doordat de planten moeite moeten doen voor hun voeding, investeren ze in hun wortelstelsel.

Omdat de verschillende plantensoorten elk een eigen wijze van wortelgroei hebben, ontstaat een goede doorworteling van de zode. Ook is de grasproductie laag.

Een aangepast agrarisch beheerde, met schapen beweidde grasmat op een goed erosiebestendige kleiondergrond was in een laboratoriumproef vele uren bestand tegen erosie door golven tot 1,35 m. De weerstand van de bekleding tegen erosie zit voornamelijk in de zode. Zo wordt bijvoorbeeld door dezelfde golfbelasting de nauwelijks doorwortelde, maar wel gestructureerde klei onder de zode zo’n 15 tot 50 maal sneller geërodeerd dan de goede zode.

FIGUUR 4.2

EEN ZEEIJKGRASMAT WORDT IN DE DELTAGOOT BELAST DOOR HOGE GOLVEN



Een slechte zode, zoals die ontstaat door maaien en laten liggen van maaisel, is daar en tegen erosiegevoeliger dan het oorspronkelijk goede kleidek van kleicategorie 1, waarin die zode is geworteld.

De erosiebestendigheid is dan tot op enige decimeters diepte sterk verminderd door de weersinvloeden en vooral de graverij van dieren. De doorworteling is heel grof en slecht. Dit werd zowel waargenomen bij laboratoriumproeven als in het veld.

#### *'Waterdichtheid'*

De mate van doorlatendheid van de deklaag kan men niet sturen met de kleisamenstelling of het graslandbeheer.

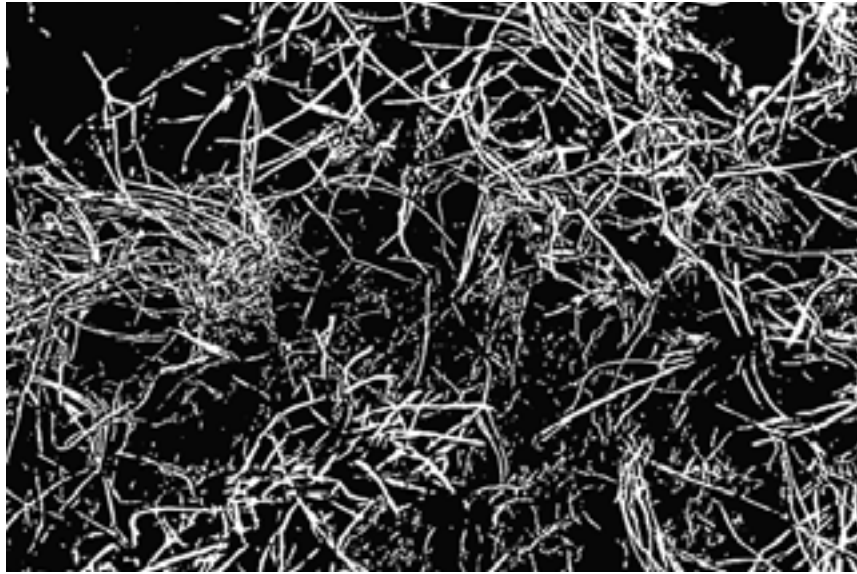
De grasmat biedt met zijn kleidek enige weerstand tegen de waterdruk door zijn doorlatendheid (105 tot  $10^{-1}$  m/s) die slechts iets lager is dan die van schoon zand in de kern van de dijk. Direct na aanleg kan de doorlatendheid lager zijn, doordat de klei ver kneedt en plastisch is en nog een geheel vormt. Maar later neemt de doorlatendheid van de klei, die boven de (grond)waterspiegel ligt, toe door rijping, gepaard gaand met scheurvorming en activiteiten van kleine bodemdieren. De relatief laagste doorlatendheid van een bepaald kleidek valt te bereiken door de klei goed te verdichten en niet te nat te verwerken [9].

#### *Stabiliteit*

De grasmat moet natuurlijk op zijn plaats blijven, zeker onder belasting. Daartoe moet de deklaag intern een voldoende hoge grondmechanische schuifsterkte hebben. Ook mag de grasmat niet opbarsten onder invloed van naar boven gerichte grondwaterdrukken, zowel bij uitstroming (bijvoorbeeld bij snelle val) als onder golfklappen. Bij steile taluds kunnen zowel infiltratie van golfoverslag als snelle val van het buitenwater leiden tot afschuiving van de zode over de kleilaag eronder. Bij zeer steile taluds ( $> 1:1,5$ ) kan de grond zelf al bijna instabiel zijn en kruipen. Dit uit zich in de vorming van zeer kleine afschuivingen, die vaak voor schapenpaadjes worden aangezien. Hoewel onder golfklappen uittredende grondwaterverhangen zijn gemeten die een niet doorwortelde klei doen opbarsten, blijkt een goede zode voldoende sterk en elastisch om opbarsten tegen te gaan, zelfs als er enige plastische vervorming optreedt in de klei eronder. Slechts op zeer steile taluds en onder extreme grondwatercondities kan de stabiliteit van de grasmat in gevaar komen.

FIGUUR 4.3

DE ZEEDIJKZODE SLIJT HEEL LANGZAAM (ZO'N 2,5 TOT 5 MM/UUR) ONDER DE GOLFBELASTING: NA 11 UUR STAAN DE GRASPLANTJES OP 'STELTWORTELS' VAN ENKELE CENTIMETERS



#### AANLEG VAN GRASMATTEN

Bij nieuwe aanleg of omvangrijke reconstructie van dijken duurt het enige jaren voor de grasmat klaar is. De aanleg van een grasmat gebeurt in drie stappen:

- 1) aanbrengen van het kleidek, dat zowel een goede groeiplaats voor de vegetatie moet bieden, als een voldoende erosiebestendigheid moet hebben;
- 2) 'zaaien' van gras en kruiden (door terugbrengen van oude bovengrond of zode, het uitleggen van hooi van een gewenste vegetatie uit de omgeving, of echt zaaien), of het bezoden. Hierbij houdt men rekening met het gewenste graslandtype en het daarbij horende uiteindelijke beheer;
- 3) ineengroeien van de afzonderlijke planten tot een gesloten vegetatie die in evenwicht is met het graslandbeheer en de groeiplaats.

Stappen 1 en 2 vinden plaats in het jaar van aanleg. Stap 3 kost enige jaren: 3 tot 5 jaar wordt wel als minimum gezien voor het verkrijgen van een redelijk goed gesloten zode. De aanleg van een grasmat is dus niet klaar als de laatste grondverzetmachines van het werk verdwijnen! Er kunnen zich tegenslagen voordoen bij de aanleg: het verdorren of bevriezen van de kiemplantjes, of het wegspoelen van de toplaag met zaad in het eerste jaar. De aanleg kan daardoor een jaar langer duren. Toch moet vanaf het ontkiemen al worden beheerd, waarbij in ieder geval na 1 tot 2 jaar de definitieve beheerwijze wordt gevolgd. Zo is het bijvoorbeeld aan te bevelen om een toekomstige weide eerst enige malen te maaien, tot er een min of meer gesloten zode is ontstaan. In de eerste jaren na aanleg kan enige bescherming tijdens hoogwaterperioden nodig zijn, bijvoorbeeld met een tijdelijk uitgelegd of biologisch afbreekbare geotextiel. Een kaal kleidek van kleicategorie 1 is op rivierdijken gedurende de eerste winter sterk genoeg.

De grond in de zode speelt een rol in de erosiebestendigheid, zij het een ondergeschikte. Bij aanleg wordt aanbevolen een maximaal zandgehalte van 50 procent te hanteren. Praktijk en proeven hebben uitgewezen dat ook grasmatten op grond met hogere zandgehalten goed erosiebestendig kunnen zijn. Bij een voldoende lage belasting is ook een goede grasmat op zandgrond voldoende erosiebestendig, al wordt een dijk geheel van zand bij aanleg niet aanbevolen. Hoe zanderiger de klei is, des te voedselarmere die van nature is. Op voedselarme grond

kan de best doorwortelde zode met de grootste erosiebestendigheid ontstaan. Op voedselrijke grond vraagt het verkrijgen van zo'n zode veel moeite en tijd. Daarom wordt wel de deklaag in twee lagen aangelegd: een vettere onderlaag, als die nodig wordt geacht voor de reststerkte of om een beschikbare klei te verwerken, met een 0,25 m dikke zanderiger, meer voedselarme toplaag voor een goede vegetatieontwikkeling.

**FIGUUR 4.4** EEN EXTENSIEF BEGRAASD EN GEHOOID BUITENTALUD OP DE WAALDIJK BIJ OOSTERHOUT (BEHEERCATEGORIE A OF B); IN HET VOORJAAR EEN DICHT MOZAÏEK VAN 40 PLANTENSOORTEN ('GLANSHAVERHOOILAND')



## GRASLANDBEHEER

### *Beheercategorieën*

Onder Nederlandse klimaatsomstandigheden moet grasland worden beweid of gemaaid, om te voorkomen, dat het verruigt en uiteindelijk via struweel tot bos wordt. Dat beweiden of hooien wordt 'graslandbeheer' of kortweg 'beheer' genoemd. Strikt genomen is dat regelmatig 'klein onderhoud'.

De samenstelling en de structuur van zowel de vegetatie als de klei, en daarmee de sterkte van de zode worden voornamelijk bepaald door de wijze van graslandbeheer.

Omdat het beheer zeer belangrijk is voor de grasmatkwaliteit, krijgt het een belangrijke plaats in de toetsing op veiligheid volgens de Leidraad Toetsen [3]. Ter vereenvoudiging worden de verschillende mogelijke beheerswijzen ingedeeld in vier beheercategorieën: A, B, C en D, die zoden opleveren met een van A tot D afnemende sterkte en tevens afnemende natuurwaarden. Ook voor ontwerp en aanleg kan van deze indeling worden uitgegaan. Hierna volgt een beschrijving van deze categorieën, de eronder vallende beheerswijzen en de vegetatietypen die men ermee bereikt.

FIGUUR 4.5

STROOMDALGRASLAND OP EEN IJSSELDIJK (BEHEERCATEGORIE A)



#### *Categorie A:*

De in deze categorie vallende beheerswijzen leiden tot goed erosiebestendige grasbekledingen. De bereikte erosiebestendigheid is zodanig dat bij lage belasting aan de ondergrond weinig eisen hoeven worden gesteld. Waterstaatkundig beheer en natuurtechnisch beheer vallen in deze categorie. Bemesting en gebruik van herbiciden blijven bij deze categorie beslist achterwege. De natuurwaarde kan hoog zijn.

- **Hooien:** Jaarlijks twee keer maaien. Afhankelijk van de productie kan meer of minder vaak worden gemaaid. In voedselarme situaties kan worden volstaan met jaarlijks eenmaal maaien in het najaar. Zo'n situatie kan ook ontstaan bij jarenlang consequent hooibeheer. Kenmerkend voor hooien is, dat na iedere keer maaien het maaisel wordt afgevoerd en wel binnen ongeveer acht dagen om onder andere te voorkomen dat voedingsstoffen uit het hooi spoelen. Na verloop van tijd leidt dit hooibeheer tot soortenrijk glanshaverhooiland. Op lange termijn is een ontwikkeling richting stroomdalgrasland mogelijk.
- **Beweiden:** Periodiek of continu beweiden met schapen. De hoeveelheid schapen is steeds afgestemd op de productie van het gras. Bij continu beweiden wordt het gehele groeiseizoen (van half april tot half oktober) beweid met een lage veedichtheid. Daarnaast moet op plaatsen waar de vegetatie niet is afgegraasd wel worden gemaaid. Op lange termijn kan dit beheer leiden tot soortenrijke kamgrasweide.

#### *Categorie B:*

Tot deze categorie behoren beheersvormen die wel een goed gesloten, redelijk erosiebestendige grasmat opleveren, maar waarvan de dikte en de doorworteling van de zode toch niet zo hoog zijn als bij beheercategorie A. Bij hoge belasting kan de sterkte onvoldoende zijn. De natuurwaarde van deze en volgende categorieën is laag. Het beheer bestaat uit:

FIGUUR 4.6

KAMGRAS OP EEN ZEEDIJK



- aangepast agrarisch beheer bijvoorbeeld door beweiding met schapen, continu of periodiek. Er wordt lichte bemesting (tot 70 kg N per ha. per jaar) toegepast. Het verschil met beheercategorie A is deze bemesting en grotere veedichtheden. Het resultaat van dit beheer is soortenarme kamgrasweide.
- gazonbeheer, dat bestaat uit jaarlijks zeven tot twaalf keer maaien, waarbij het maaisel niet wordt afgevoerd. Hier blijft bemesting achterwege. Gazonbeheer leidt tot soortenarme beemdgras-raaigrasweide.

*Categorie C:*

Het resultaat van dit beheer is een slecht tot matig erosiebestendige grasbekleding. De zode is slecht tot matig doorworteld. Open plekken kunnen bij intensief beweiden zeer snel ontstaan. Deze plekken zijn nauwelijks tot niet doorworteld en groeien niet meer dicht. De erosiebestendigheid op deze locaties moet worden ontleend aan de klei in en onder de zode. Bij hoge belastingen en de gebruikelijke deklaagdikten is die meestal niet voldoende.

Onder categorie C worden verstaan:

- intensieve agrarische beheervormen (meestal beweiding), gekenmerkt door (zware) bemesting. Het resultaat is bij beweiding een soortenarme beemdgras-raaigrasweide en bij hooien een soortenarm glanshaverhooiland.

*Categorie D:*

Zeer slecht erosiebestendige bekledingen ontstaan bijvoorbeeld bij:

- achterwege blijven van jaarlijks beheer,
- jaarlijks een tot vier maal (klepel)maaien zonder afvoer van het maaisel,
- van tijd tot tijd afbranden,
- beweiding met runderen of paarden,
- zeer zware bemesting en intensieve beweiding.

FIGUUR 4.7

SOORTENARM GLANSHAVERHOOILAND OP EEN WESTERSCHELDEDIJK; HOOIEN, BEMEST (BEHEERCATEGORIE C)



De zode is zeer slecht doorworteld en heeft een lage bedekking en veel open plekken. Bij de eerste drie beheerswijzen ontstaat een vegetatie van ruigtekruiden waarbij de klei in de zode bestaat uit losse, kruimelige aggregaten die zeer gemakkelijk worden weggespoeld. Bij beweiding ontstaan grote open plekken die in omvang toenemen. Deze vormen van beheer zijn niet geschikt voor waterkerende dijken.

FIGUUR 4.8

EEN INTENSIEF AGRARISCH BEHEERDE ESTUARIUMDIJK LANGS DE WESTERSCHELDE (BEHEERCATEGORIE C)



Een samenvatting van de graslandtypen, van de beheerswijzen en van de bereikte erosiebestendigheden staan in onderstaande tabel. Deze is afkomstig uit het TAW-Technisch Rapport Erosiebestendigheid van grasland als dijkbekleding [10], waarin meer informatie is te vinden over de erosie en de sterkte van grasmatten. Meer informatie over aanleg en beheer van dijkgraslanden in relatie tot de omgeving (rivier of zee) en het gewenste vegetatietype is te vinden in: Aanleg en beheer van grasland op rivierdijken, 1992 [11], Groene zeedijken in Noord Duitsland en Denemarken [12] en Introductie van inheemse flora [13].



TABEL 4.1 WAT MOET IK DOEN MET MIJN GRASMAT?

Graslandtype	Indicatief aantal soorten per 25 m <sup>2</sup>	erosiebesten- digheid van de zode	natuur- waarde	graslandbeheer
stroomdalgrasland	30	zeer goed	zeer hoog	1 à 2 x hooien, onbemest
glanshaverhooiland met zoomsoorten	27	goed	zeer hoog	onregelmatig hooien, onbemest
glanshaverhooiland, soortenrijk	32	zeer goed	zeer hoog	1 à 2 x hooien, onbemest
glanshaverhooiland, soortenarm	13	matig	laag	hooien, bemest
verruigd hooiland	8 - 20	slecht	laag	hooien, zwaar bemest, of klepelmaaien
kamgrasweide, soortenrijk	36	zeer goed	hoog	weiden, onbemest
kamgrasweide, soortenarm	15	goed	laag	weiden, licht bemest
beemdgras-raaigrasweide	12 - 18	matig	laag	weiden, zwaar bemest

#### *Toetsing op veiligheid*

In het voorgaande is een aantal mogelijkheden voor aanleg en beheer van grasmatten op dijken gegeven. Bij een toetsing op veiligheid wordt de grasmat, na een globale beoordeling op ervaringsgegevens, beoordeeld op basis van het beheer van de grasbekleding. Wanneer het beheer niet bekend is, niet in een van de beschreven categorieën past, of wanneer meer zekerheid is gewenst, vindt een gedetailleerde beoordeling plaats. Deze is gebaseerd op de aanwezige vegetatie. Natuurlijk kan de grasmat ook worden getoetst op zijn nevenfuncties. Het spreekt voor zich, dat een bekleding die civieltechnisch en qua LNC-waarden voldoet, niet hoeft te worden vervangen.

FIGUUR 4.9 EEN VERRUIGD 'HOOILAND' WAARBIJ VOOR DE AFRASTERING HET MAAISEL BLIJFT LIGGEN, 10 PLANTENSOORTEN, (BEHEERCATEGORIE D); RIJNDIJK



Een bij toetsing 'onvoldoende' scorende bekleding kan worden vervangen, maar een grasmat valt doorgaans beter, sneller en goedkoper te verbeteren door een aanpassing van het beheer. Valt het beheer in de lagere categorieën B, C of D, dan heeft men de mogelijkheid de sterkte van de grasmat te vergroten door over te gaan op een hogere beheercategorie die wel een voldoende sterkte oplevert.

De zodedichtheid en de doorworteling worden binnen een paar jaar beter. Aanpassing van het graslandtype kost meestal meer tijd, omdat de soortensamenstelling moet veranderen. Men kan de vestiging van de gewenste kruiden en grassen bevorderen met doorzaaien in de bestaande grasmat. Meer informatie daarover valt te vinden in: Introductie van inheemse flora [13]. Bij een overgang van intensief naar extensief agrarische begrazing vestigen zich soms ongewenste kruiden, die vanwege hun groeistructuur of uitzaaiing in de omgeving ongewenst zijn, zoals akkerdistel.

Massale vestiging kan men voorkomen met een tussenfase van enkele jaren niet bemesten en hooien of met extra maaien. Wil men het effect van een aanpassing van het beheer goed volgen, dan is 'monitoring' mogelijk door van meet af aan de kenmerken op te nemen die voor een gedetailleerde toetsing worden gevraagd. Men kan dan bedekking, vegetatiesamenstelling en doorworteling zien veranderen.

Een gehandhaafde grasmat die zich instelt op een aangepast beter beheer, zal meestal gedurende zo'n vier jaar sterker zijn dan een opnieuw aangelegde grasmat die nog sterkte moet krijgen.

#### **MEER WETEN?**

Voor meer informatie over de sterkte, de aanleg en het beheer van grasmatten op dijken kunt u zich wenden tot de Helpdesk Water: [www.helpdeskwater.nl](http://www.helpdeskwater.nl).

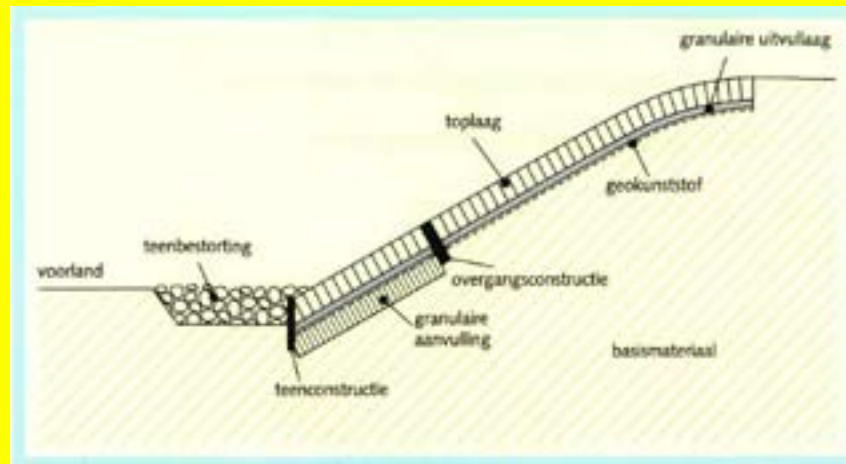
### **4.3 STEENZETTING**

In deze subparagraaf bespreken we het bekledingssysteem van een steenzetting. Achtereenvolgens komen de onderdelen van dit systeem aan de orde: de toplaag, het inwasmateriaal, de tussenlagen en het basismateriaal. Verder komen in deze subparagraaf aan de orde: overige constructieonderdelen van een steenzetting, zoals de teenbestorting, teenconstructies, horizontale overgangsconstructies en aansluitingsconstructies. In figuur 4.10 is een prinsipschets gegeven van een buitentalud van een dijk die met steen is bekleed.

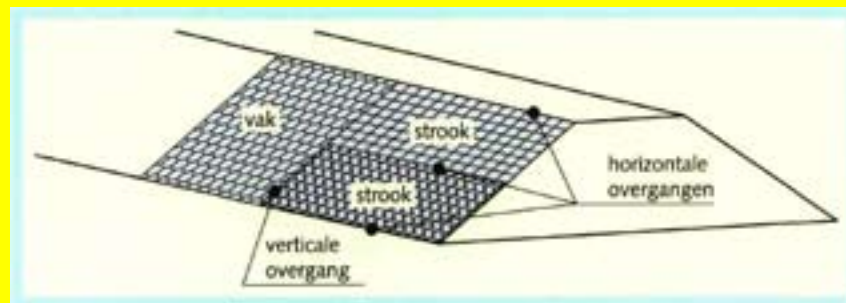
FIGUUR 4.10

PRINCIPESCHETS STEENZETTING OP DIJKTALUD

## Basisopbouw en vakverdeling steenzettingen



Bovenstaande figuur geeft de basisopbouw van een bekledingssysteem weer. De ondergrond van de steenzetting wordt gevormd door het basismateriaal - de bovenste laag van het grondlichaam, soms voorzien van een granulaire aanvulling van breed gegradeerd materiaal. Daarop ligt meestal een filterlaag - granulaair of van geokunststof - die uitspoeling moet voorkomen. Onder de topplaag - die wordt gevormd door de gezette elementen - is meestal een granulaire uitvulling aanwezig. Aan de onderkant ondersteunt een steenconstructie de bekleding, vaak geholpen door een steenbestorting. Overgangen tussen verschillende bekledingstypen worden mogelijk gemaakt door overgangsconstructies. Overgangen naar andere constructies heten aansluitingsconstructies.

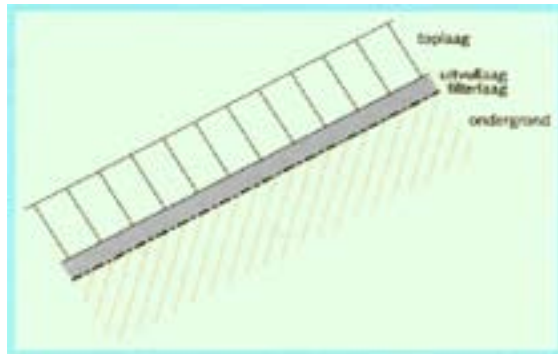


In bovenstaande figuur staat de basisverdeling van een projectgebied in vakken en stroken. Met een projectgebied worden niet alleen de bekledingen bedoeld, maar ook de aansluitende horizontale en verticale overgangen. Een vak is een gedeelte van een dijk, dam of oever tussen twee verticale overgangen. Voor vak worden ook termen gebruikt als dijkvak, toetsingsvak, randvoorwaardenvak en bekledingsvak. Een strook is een gedeelte van de bekleding tussen twee horizontale overgangen.

#### 4.3.1 BEKLEDINGSSYSTEEM

Het bekledingssysteem van elke steenzetting bevat een topplaag en een ondergrond (basismateriaal of granulaire aanvulling, zie figuur 4.11). Afhankelijk van de eigenschappen van de topplaag en de ondergrond en van de hydraulische omstandigheden, worden tussen de topplaag en de ondergrond extra lagen toegepast: de uitvulling en de filterconstructie. De uitvulling bestaat uit granulaair materiaal, de filterconstructie bestaat uit granulaair materiaal of uit geokunststof. Normaal gesproken wordt zowel een uitvulling als een filter toegepast; alleen in bijzondere omstandigheden is dat niet nodig, afhankelijk van vooral de volgende twee aspecten: de vatbaarheid voor uitspoeling van de ondergrond én de vorm van de topplagelementen.

FIGUUR 4.11 SCHEMATISCHE STANDAARDOPBOUW BEKLEDINGSSYSTEEM (DETAIL)



De maatregelen tegen materiaaltransport zijn sterk afhankelijk van de vatbaarheid voor uitspoeling van de ondergrond (korrelgrootte, cohesie). Bij een ondergrond van klei of keileem wordt materiaaltransport in het algemeen voorkomen door een geokunststof. Bij een ondergrond van zand kan worden gekozen tussen een granulaire filter en een geokunststof. Als de al aanwezige ondergrond van breed gegradeerd granulaire materiaal niet intern stabiel is, zijn soms ook maatregelen nodig. In zo'n geval kan worden gekozen tussen een granulaire filter en een geokunststof.

De stelregel is: (Bijna) altijd uitvullen

De vorm van de top-laagelementen heeft invloed op het ontwerp van de granulaire laag. Alleen bij zeer uniforme en vlakke top-laagelementen is uitvoeringstechnisch oogpunt een granulaire uitvullaag onder de top-laag niet noodzakelijk. In de praktijk kan alleen bij een top-laag van vlakke betonblokken boven/buiten de getijzone worden overwogen om geen uitvullaag toe te passen, maar dit is constructief ongunstig.

#### 4.3.2 TOPLAAG VAN STANDAARDELEMENTEN

Voor het ontwerp van de top-laag van een steenzetting komen twee groepen varianten in aanmerking: een groep standaardelementen en een groep aanverwante bekledingstypen. De eerste groep wordt hier besproken en de laatste in de volgende subparagraaf. Een top-laag van standaardelementen is de meest gebruikelijke top-laag van een steenzetting. Normaliter wordt deze top-laag toegepast in de golfklapzone van zee- en meerdijken, en vaak ook op minder zwaar belaste taluds (rivierdijken, golfoploopzone). Een belangrijk kenmerk van dit type is dat de elementen niet onderling verbonden zijn, maar dat ze extra stabiliteit ontleen aan het onderlinge verband van de zetting. De mogelijke typen worden in hoofdlijnen onderscheiden door hun vorm en hun materiaal, zie tabel 4.2.

TABEL 4.2 TYPEN TOPLAGEN MET STANDAARDELEMENTEN

	Blokken	Zuilen	Nieuw/hergebruik
Beton	Betonblokken	Betonzuilen	Nieuw+hergebruik
Natuursteen	Granietblokken	Basaltzuilen	Aleen hergebruik
Restproducten	Koperslabblokken		Aleen hergebruik en alleen als aan milieu-eisen wordt voldaan

FIGUUR 4.12 AFBEELDINGEN VAN TOPLAAGELEMENTEN UIT TABEL 4.2



Foto 2.1 Betonzuilen



Foto 2.2 Betonblokken



Foto 2.3 Basaltzuilen



Foto 2.4 Granietblokken



Foto 2.5 Koperstakblokken

Er is geen precieze definitie van blokken en zuilen. In tabel 4.3 staan de kenmerkende verschillen tussen blokken en zuilen.

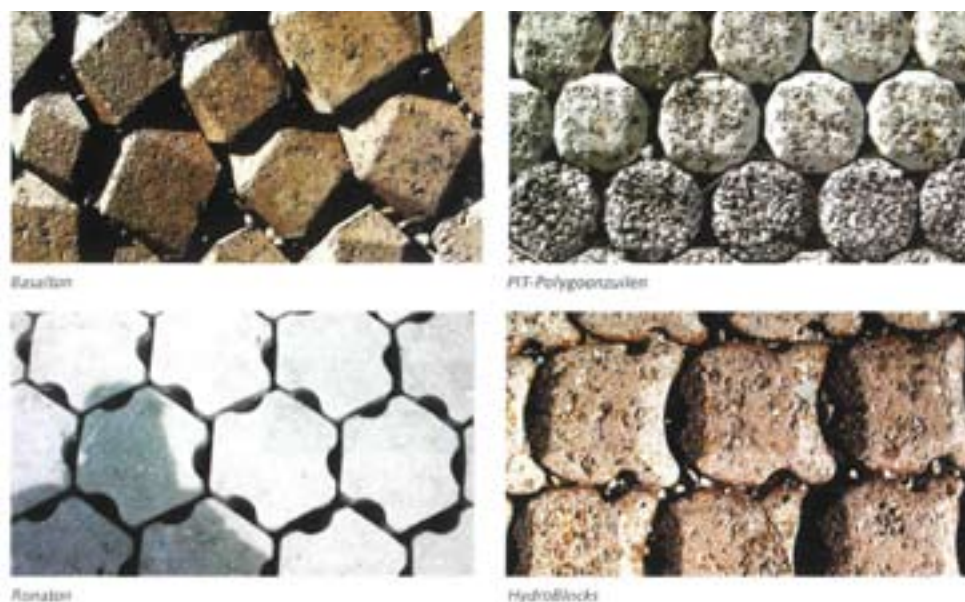
TABEL 4.3 VERSCHILLEN TUSSEN BLOKKEN EN ZUILEN

	Blokken	Zuilen
Spleetbreedte	Constant	Variabel
Vorm	Regelmatig vierkant, rechthoekig of zeshoekig	Orgelmatig (soms regelmatig) veelhoekig
Open ruimte	Meestal minder dan bij zuilen	Meestal meer dan bij blokken
Samenhang	Meestal minder dan bij zuilen	Meestal meer dan bij blokken
Toplaagstabiliteit	Meestal minder dan bij zuilen	Meestal meer dan bij blokken

### HET MATERIAAL VAN TOPLAAGELEMENTEN

Alle nieuw aan te leveren toplaagelementen zijn tegenwoordig van beton. Bij nieuwe elementen is beton namelijk gunstiger dan natuursteen vanwege ontwerp-vrijheid (verschillende afmetingen en typen leverbaar), materiaalkosten en uitvoeringstechniek (machinaal per pakket te plaatsen). Zijn er oude elementen beschikbaar voor hergebruik, dan verandert de afweging: hergebruik is vaak zeer

FIGUUR 4.13 BETONZUILEN



gunstig vanwege kosten en milieu. Daarnaast zijn soms op grond van esthetische overwegingen elementen van natuursteen gewenst. Bestaande elementen die bestaan uit restproducten, zoals koperslabblokken, worden alleen toegepast als wordt voldaan aan eisen met betrekking tot mogelijke milieuvuiling (bijvoorbeeld door uitloging).

### TYPEN BETONZUILEN

Uit het bovenstaande blijkt dat zuilen meestal gunstiger zijn dan blokken, en dat beton meestal gunstiger is dan andere materialen. Daarom wordt bij nieuw aan te leveren elementen meestal gekozen voor betonzuilen. Er bestaan verschillende typen betonzuilen (zie figuur 4.13): Basalton, PIT-Polygoonzuilen, Ronaton en Hydroblocks (dit laatste type wordt vanwege de vorm, en ondanks de naam, in dit rapport behandeld als een zuil). Deze typen kunnen machinaal in pakketten worden geplaatst, zijn leverbaar in verschillende zuilhoogten en dichtheden, kunnen worden voorzien van een ruw laagje op de kop van de steen - de ecotop - om de ecologische eigenschappen te verbeteren (zie foto 4.14) en zijn in verschillende kleuren verkrijgbaar. Deze verschillen spelen vooral een rol bij uitvoering en beheer.

FIGUUR 4.14 BETONZUIL MET ECOTOP



FIGUUR 4.15 GEKANTELTE BETONBLOKKEN



#### TWINTIG PRINCIPEVARIANTEN VOOR EEN STEENZETTING VAN STANDAARDELEMENTEN

Voor een steenzetting van standaardelementen bestaan twintig varianten, zie tabel 4.4

##### 4.3.3 TOPLAAG VAN AANVERWANTE BEKLEDINGSTYPEN

Soms heeft een steenzetting van standaardelementen niet de voorkeur. In dit deel Ontwerp behandelen we vijf alternatieven: blokkenmatten (onderling verbonden), doorgroeiëstenen (elementen met gaten), ingegoten steenzettingen, breuksteenoverlagingen en steenzettingen met ruwheidselementen. Deze vijf zijn aan standaardelementen verwant en worden daarom aanverwante bekledingstypen genoemd.

TABEL 4.4 V

## ARIANTEN STEENZETTINGEN

	Nieuw	Hergebruik	Ecotop
<b>Betonzuilen</b>			
Basaltton	ja	ja	ja
Hydroblocks	ja	ja	ja
Polygoonzuilen	ja	ja	ja
<b>Betonblokken</b>			
Normaal geplaatst	zelden	ja	Komt nog niet voor
Normaal + extra open ruimte	zelden	ja	Komt nog niet voor
Gekanteld	zelden	ja	Komt nog niet voor
Gekanteld + extra open ruimte	zelden	ja	Komt nog niet voor
<b>Basaltzuilen</b>			
Geplaatst met vlakke bovenkant	zelden	ja	nee
Geplaatst met vlakke onderkant	zelden	ja	nee
<b>Granietblokken</b>			
Normaal geplaatst, vlakke bovenkant	zelden	ja	nee
Normaal geplaatst, vlakke onderkant	zelden	ja	nee
Gekanteld, vlakke bovenkant	zelden	ja	nee
Gekanteld, vlakke onderkant	zelden	ja	nee
Koperslakblokken	zelden	ja	nee

**BLOKKENMATTEN**

Blokkenmatten bestaan uit betonblokken die onderling verbonden zijn door kabels of een geokunststof. Een steenzetting met onderling verbonden elementen heet geschakelde steenzetting. De onderlinge verbinding biedt  $\pm 10\%$  extra stabiliteit. In de praktijk blijkt echter dat de hoekelementen onder golfbelasting kunnen bewegen en daardoor voor schade zorgen. Het aan elkaar koppelen van aansluitende matten vermindert dit probleem. Bij uitvoering en beheer moet hiermee rekening worden gehouden. Een belangrijk voordeel kan zijn, dat blokkenmatten onder water kunnen worden aangebracht.



FIGUUR 4.16

## DIVERSE BEKLEDINGTYPEN



Foto 2.10: Blokkenmatten



Foto 2.11: Doorgroeistenen



Foto 2.12: Ingegaten steenzetting



Foto 2.13: Breuksteenoverlaging

**DOORGROEISTENEN**

Doorgroeistenen (ook wel grasbetonstenen genoemd) zijn betonblokken met gaten er in die begroeiing mogelijk maken. De elementen hebben een open oppervlak van 20 tot 30% en worden meestal rechtstreeks op een ondergrond van klei geplaatst. De open ruimte in de blokken wordt gevuld met grond en vervolgens ingezaaid. Het resultaat is een harde bekleding die er op enige afstand uitziet als gras. Op dijken worden ze toegepast op de overgang van de harde bekleding (van weg of taludbekleding) naar de grasbekleding. Doorgroeistenen voorkomen onder meer schade door verkeer en het ontstaan van zogenaamde schapenpaadjes.

Uit proeven in Groot-Brittannië is gebleken dat een bekleding van doorgroeistenen een grotere sterkte heeft dan een grasbekleding. De aanwezigheid van het beton beperkt weliswaar de horizontale wortelstructuur en de samenhang van het gras, maar zorgt ook voor afremming van de schade en voor bescherming tegen drijvend vuil. Bij grasbekleding ontstaat minder snel initiële schade, maar bij doorgroeistenen is de uiteindelijke schade kleiner.

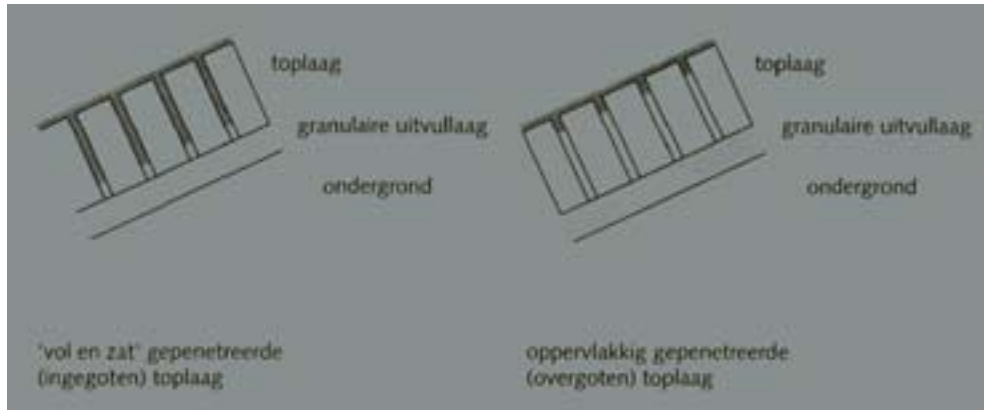
**INGEGOTEN STEENZETTINGEN**

Een ingegoten steenzetting kan soms worden overwogen om hergebruik van te lichte toplaagelementen mogelijk te maken, vooral als het een smalle strook betreft. Penetratie dient om uitspoeling te voorkomen en om de samenhang tussen de toplaagelementen te vergroten. Vaak wordt penetratie toegepast om een te lichte steenzetting te kunnen handhaven op dezelfde plaats. Maar daarbij moet de steenzetting niet worden ingegoten zonder herzetten, omdat voegvulling en ander materiaal tussen de toplaagelementen verhinderen dat de penetratie goed kan doordringen. Het is daarom in principe altijd nodig om de elementen

te herzetten (zonder voegvulling) en vervolgens te penetreren. Dan kan tegelijkertijd worden overwogen om de granulaire laag te verwijderen wat gunstiger is voor de stabiliteit. Wel kunnen er problemen ontstaan bij overgangen naar aansluitende bekledingen. Overigens worden overgangsconstructies vaak gepenetreerd.

FIGUUR 4.17

DEFINITIES GEOPENETREERDE TOPLAAG



Penetratie is mogelijk bij alle genoemde toplaagtypen, behalve bij tegen elkaar geplaatste betonblokken en koperslakblokken, vanwege de te kleine spleten. Het penetratiemateriaal is meestal mastiek, maar ook penetratie met beton is mogelijk. Gietasfalt (mastiek met grind) is meestal te grof voor de penetratie van steenzettingen. Voor de constructieve eigenschappen is het van belang dat de toplaag niet slechts overgoten wordt maar dat de penetratie 'vol en zat' is: de spleten moeten van boven af tot meer dan de helft van de toplaagdikte zijn gevuld met asfalt of beton, zie figuur 4.17. Alleen in dat geval kunnen we aannemen dat de toplaagelementen zodanig met elkaar verbonden zijn, dat het geheel fungeert als een plaatbekleding. Bij overgoten steenzettingen is de interactie tussen de toplaagelementen door de penetratie wel verbeterd, maar tijdens zware golfaanval kan het penetratiemateriaal na enkele uren plaatselijk los raken, waarna de kering plotseling kan bezwijken. Het is dus niet zinnig om een ontwerp te maken voor een oppervlakkig gepenetreerde (overgoten) toplaag, zoals in de rechterhelft van figuur 4.17: bij deze constructie moet rekening worden gehouden met de faalmechanismen van een ingegoten steenzetting, maar ook met die van een ongunstige standaard steenzetting.

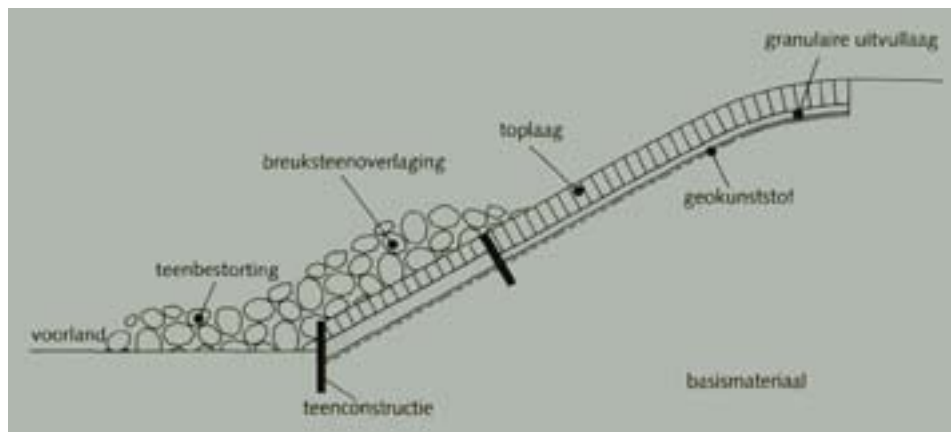
### BREUKSTEENOVERLAGING

Als een steenzetting na toetsing als 'onvoldoende' wordt beoordeeld, dan wordt in de regel een nieuwe bekleding ontworpen. Soms kunnen we echter overwegen om de bekleding niet te vervangen, maar te versterken. In dat geval komt het overlagen met breuksteen in aanmerking.

Overlagen met breuksteen is een maatregel waarbij op een bestaande steenzetting een pakket breuksteen wordt aangebracht, in het algemeen steunend op de teenbestorting. Het breuksteenpakket fungeert als voorbelasting op de toplaag, en voorkomt daardoor dat de toplaagelementen uit de toplaag worden gedrukt. Overlagen is vooral een goede keuze als de onderste strook van een steenzetting moet worden verbeterd, terwijl de steenzettingen erboven nog 'goed' zijn. Bij vervanging van de ondergelegen 'onvoldoende' steenzetting zou de bovengelegen 'goede' steenzetting er namelijk ook uitmoeten, omdat die tijdens de uitvoering niet meer wordt ondersteund.

FIGUUR4.18

OVERLAGING MET LOSSE BREUKSTEEN



Bij het overlagen met breuksteen zijn drie varianten mogelijk:

- losse breuksteen, zie figuur 4.18;
- patroon-gepenetreerde breuksteen (ook wel gedeeltelijk gepenetreerde breuksteen genoemd);
- 'vol en zat' gepenetreerde breuksteen.

#### STEENZETTINGEN MET RUWHEIDELEMENTEN

Bij het ontwerp van dijken is het golfoverslagdebiet een belangrijke parameter: normaal gesproken wordt de kruin van de dijk zo hoog gemaakt dat het overslagdebiet acceptabel is. De golfoverslag wordt echter ook beïnvloed door de ruwheid van het buitentalud. In bijzondere gevallen kan worden overwogen om een toplaag met ruwheidelementen (zoals 'beverkoppen') toe te passen, bijvoorbeeld als daardoor geen kruinophoging nodig is. In dit technische rapport wordt niet ingegaan op de berekening van de golfoploop [6], maar wel op de stabiliteit van de steenzetting met ruwheidelementen zelf.

Steenzettingen met ruwheidelementen hebben meestal een toplaag van rechthoekige, plat geplaatste blokken. Als de bedekkinggraad niet te groot is en als de ruwheidelementen niet te ver uitsteken, gelden voor de stabiliteit van de steenzetting in principe dezelfde regels als voor standaard steenzettingen. Buiten die grenzen gelden andere regels. De krachten van het water op de uitsteeksels zorgen voor een bijzondere belastingsituatie, die niet hier wordt behandeld: het kantelen en wrikken van de elementen.

#### 4.3.4 INWASMATERIAAL

Tussen de toplaagelementen wordt voegvulling aangebracht om wrijving en/of klemming tussen de toplaagelementen te bevorderen. In de huidige ontwerppraktijk wordt granulair inwasmateriaal toegepast. Het is van belang dat het materiaal niet te gemakkelijk uitspoelt. Als inwasmateriaal komt daarom vooral hoekig materiaal zoals steenslag of gebroken grind in aanmerking. Eventueel kunnen slakken (restmateriaal) worden toegepast, onder twee voorwaarden: de slakken bestaan niet uit hydraulisch materiaal, dat de toplaag namelijk waterdicht kan maken door samenkiten, en het materiaal is milieutechnisch acceptabel.

#### NEVENEFFECTEN VOEGVULLING

Een neveneffect van voegvulling is dat de waterdoorlatendheid van de toplaag afneemt, wat ongunstig is voor de stabiliteit van de toplaagelementen. In het algemeen wordt aangenomen dat het positieve effect groter is dan het negatieve effect. Vooralsnog kan echter in de reken-

regels (het programma ANAMOS) alleen de negatieve invloed van het inwasmateriaal worden gekwantificeerd, en niet het positieve effect. In de ontwerpberekeningen wordt daarom normaal gesproken uitgegaan van een niet ingewassen constructie, zodat beide effecten worden verwaarloosd.

De sortering van het inwasmateriaal moet aan de volgende eisen voldoen:

- de sortering moet breed zijn omdat de afmetingen van de open ruimte variëren;
- de fijne fractie moet niet te fijn zijn om te voorkomen dat de doorlatendheid van de top-laag in gevaar wordt gebracht;
- de grove fractie moet net tussen de toplaagelementen passen.

De benodigde sortering is dus afhankelijk van vorm en grootte van de open ruimte tussen de toplaagelementen.

### **STOPWERK**

In het verleden werd als voegvulling vaak stopwerk aangebracht: brokken en scherven van toplaagelementen die in de spleten zijn vastgezet. Stopwerk als voegvulling wordt niet aanbevolen: het is constructief niet gunstiger dan inwassen en is zeer arbeidsintensief. Verder moeten bij de uitvoering voorzieningen worden getroffen om uitzakken van het stopwerk te voorkomen; dat maakt stopwerk nog arbeidsintensiever.

#### **4.3.5 GRANULAIRE LAAG**

De granulaire laag kan verschillende functies hebben:

- een uitvulfunctie: de elementen van de toplaag worden machinaal of met de hand op het talud gezet. Vooral bij onregelmatige elementen is een granulaire laag nodig om de toplaagelementen met een vlakke bovenkant te kunnen zetten. Een granulaire laag met deze functie wordt uitvullaag genoemd. In de praktijk wordt een granulaire uitvullaag toegepast bij alle typen steenzettingen, behalve in sommige gevallen bij rechthoekige betonblokken;
- een filterfunctie: bij nieuwe constructies kan een granulaire filterlaag worden toegepast voor bekledingen waarvan het basismateriaal niet uit klei bestaat, zie figuur 4.17;
- overige functies: de granulaire laag heeft een functie in het voorkómen van afschuiving, het spreiden van de lokale belastingen en het voorkómen van drukopbouw bij een zandkern.

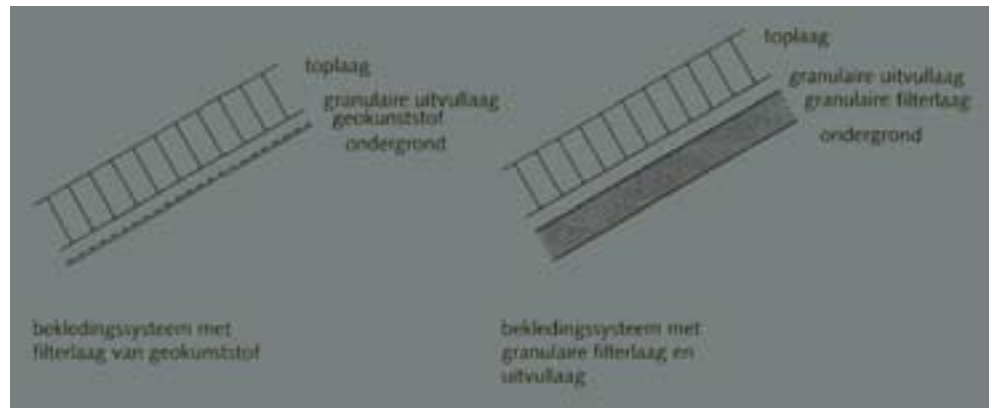
De granulaire laag onder de toplaag fungeert altijd als uitvullaag, en in sommige gevallen ook als filterlaag. In het dagelijkse spraakgebruik wordt de granulaire laag vaak filterlaag genoemd, ook als het eigenlijk een uitvullaag betreft. In dit basisrapport wordt de term granulaire laag gebruikt.

#### **HERGEBRUIK GEBROKEN TOPELEMENTEN**

In de praktijk wordt voor de granulaire laag meestal steenslag gebruikt. Soms is hergebruik mogelijk in de vorm van gebroken toplaagelementen of van granulair materiaal uit de bestaande constructie. Daarvoor moet wel worden nagegaan of het materiaal voldoet aan de constructieve eisen en of het niet gunstiger is om de elementen elders in hun geheel te hergebruiken.

Om de opwaartse druk op de toplaag door golven te beperken moet de doorlatendheid van de granulaire laag zo klein mogelijk zijn. Dit bereiken we door een fijne sortering met een lage porositeit. Anderzijds geldt de eis dat uitspoeling van het granulaire materiaal door de toplaag heen moet worden voorkomen. Daarvoor moet het materiaal een bepaalde minimale korrelgrootte hebben in relatie tot de openheid van de toplaag, zie ook bovenstaand kader. Voor richtwaarden verwijzen we naar bijlage B.3.9 uit het Technische Rapport Steenzettingen [5].

FIGUUR 4.19 TWEE TYPEN FILTERS



#### 4.3.6 GEOKUNSTSTOF

Een geokunststof op de ondergrond (zie figuur 4.19 en figuur 4.20) heeft in het algemeen een filterfunctie (voorkómen van uitspoeling van de ondergrond) en vaak ook een uitvoeringstechnische functie (bescherming van de ondergrond, voorkómen dat steentjes de klei in worden gereden). Met het oog op de filterfunctie moet de geokunststof gronddicht en waterdoorlatend zijn. Hiervoor komen met name vliezen (non-woven) en weefsels (woven) in aanmerking. De derde verschijningsvorm, folies, zijn waterdicht en komen daarom alleen in bijzondere gevallen in aanmerking. De afweging tussen de drie typen geokunststof wordt beschreven in paragraaf 5.2.4. van [5]

De belangrijkste ontwerpparameter van de geokunststof is de openingsgrootte  $O_{90}$ , en daarnaast moeten we sterkte-eisen stellen aan de uitvoering.

FOTO 4.20

GEOKUNSTSTOF OP DE ROL TIJDENS AANBRENGEN



#### 4.3.7 GRANULAIRE AANVULLING

Soms moet het dijklichaam worden aangevuld voordat de bekleding kan worden aangebracht (grondverbetering, afvlakken van de taludhelling). Soms kan dit met klei (basismateriaal), maar dat is vaak duur, en dicht bij de waterlijn bovendien onpraktisch omdat verdichten niet goed mogelijk is. In dat geval kan een granulaire aanvulling worden aangebracht van breed gegradeerd materiaal dat een fijne fractie bezit. De fijne fractie of nulfractie is belangrijk: bij een brede sortering met een fijne fractie (nulfractie) hoort een lage waterdoorlatendheid en dit is gunstig met het oog op het faalmechanisme toplaaginstabiliteit, zie hoofdstuk 7. Als de granulaire aanvulling een lage waterdoorlatendheid heeft, kan ze in het ontwerpproces op dezelfde manier worden behandeld als het basismateriaal. Verder is voor het ontwerp van belang dat het materiaal intern stabiel is. In de praktijk is ook van belang dat het materiaal voldoet aan de eisen ten aanzien van milieu (vervuiling oppervlaktewater).

Verschillende breed gegradeerde granulaire materialen komen in aanmerking: mijnsteen (een bijproduct van kolenwinning), silex (een restproduct van de cementindustrie) of betonpuin. Materiaal met een nulfractie wordt ook wel 'ongesorteerd' genoemd.

#### 4.3.8 BASISMATERIAAL

Het basismateriaal van een steenzetting is de bovenste laag die behoort tot het grondlichaam van de dijk, dam of oever. Als de kern van dijk, dam of oever uit klei bestaat, is dat doorgaans ook het basismateriaal. Bij een zandkern bestaan verschillende mogelijkheden: soms fungeert het zand als basismateriaal, maar in de praktijk wordt het zand vaak afgedekt door een laag klei of keileem. Deze afdekkende laag is weinig doorlatend en beperkt de kwel. Klei en keileem zijn bovendien cohesieve materialen; de afdekkende klei- of keileemlaag verkleint de kans op afschuiving én kan zorgen voor enige reststerkte als de toplaag zou bezwijken.

#### 4.3.9 TEENBESTORTING

De bestorting ondersteunt de teenconstructie, en in morfologisch actieve gebieden beschermt ze de teen tegen erosie.

De twee belangrijkste varianten zijn bestortingen van losgestorte steen en bestortingen van gedeeltelijk of patroongepenetreerde steen. Meestal gebruikt men hiervoor breuksteen van standaardsoorteringen. In de praktijk komen hiervoor, afhankelijk van de golfbelasting, vijf sorteringen in aanmerking: 5-40 kg, 10-60 kg, 40-200 kg, 60-300 kg en 300-1000 kg. Behalve nieuw aan te voeren breuksteen komen ook vrijkomende toplaagelementen van de bekleding in aanmerking, voor zover de vorm en de massaverdeling van de elementen voldoen aan de eisen van de standaardsoortering.

Voor de gronddichtheid wordt vaak een geokunststof gebruikt. Een granulair filter is mogelijk maar wordt zelden toegepast. Onder de zware sorteringen wordt vaak een beschermingslaag aangebracht om beschadiging van de geokunststof in de uitvoering te voorkomen.

#### 4.3.10 TEENCONSTRUCTIES

De eisen aan de teenconstructie worden sterk bepaald door de locatie, de aansluitende bekleding en/of de vooroever. Algemeen geldt dat de teenconstructie goed moet worden gefundeerd, dat de bovenliggende steenzetting er goed tegenaan moet kunnen worden gezet en dat de teenconstructie grond dicht is. Daarom bevatten teenconstructies meestal een diepstekend funderingselement en een rechthoekig vlak element waar de steenzetting tegenaan wordt geplaatst. De belangrijkste typen teenconstructies zijn schotten ondersteund door palen, prefab betonconstructies en damwanden. Voor de gronddichtheid wordt vaak een geokunststof gebruikt.

#### 4.3.11 OVERGANGSCONSTRUCTIES

Een overgangsconstructie maakt de overgang tussen twee bekledingstypen mogelijk. De onderdelen die een horizontale overgangsconstructie moet bevatten, worden sterk bepaald door de lager en hoger liggende toplaagtypen en onderlagen:

- afhankelijk van de constructieve eigenschappen kan ter plaatse van de overgang een diepstekende betonband, een niet diepstekende betonband of helemaal geen betonband nodig zijn;
- als de overgang een ongunstige invloed heeft op de toplaagstabiliteit van de aansluitende steenzetting, zijn bijzondere voorzieningen nodig (penetratie of zwaardere uitvoering van de toplaag).

Behalve horizontale komen ook verticale overgangsconstructies voor. Omdat de golfaanval in werkelijkheid een driedimensionaal proces is, gelden voor verticale overgangen in principe dezelfde overwegingen als voor horizontale overgangen.

#### 4.3.12 AANSLUITINGSCONSTRUCTIES

De aansluiting van een steenzetting op een andere constructie in het dijklichaam wordt een aansluitingsconstructie genoemd. Hiervoor geldt grotendeels dezelfde problematiek als bij overgangsconstructies: vanwege grotere opwaartse waterdruk is er grotere kans op toplaaginstabiliteit en vanwege de onderbreking van de constructie is er grotere kans op materiaaltransport. Daarom wordt in veel gevallen een strook van beperkte breedte ingegoten met gietasfalt of wordt de toplaag overgedimensioneerd.

#### 4.3.13 BERM, BOVENBELOOP, KRUIJN, BINNENTALUD, OVERLATEN EN KRIBBEN

In deze subparagraaf worden niet de vorm of constructie van deze constructieonderdelen zelf behandeld, maar alleen de eventuele bekleding van steenzettingen erop. De varianten hiervan zijn in principe hetzelfde als besproken in 4.3.1.

Niet elke relatief vlakke strook in het buitentalud wordt in het bekledingontwerp behandeld als een berm; daarvoor moet worden voldaan aan een aantal voorwaarden ten aanzien van taludhelling, breedte en in sommige gevallen niveau. Een strook die flauwer is dan 1:9 over een breedte van minimaal twee maal de maatgevende waarde van de significante golfhoogte  $H_5$  wordt in alle gevallen behandeld als een berm. Daarnaast worden smallere stroken (met een breedte tussen  $H_5$  en  $2 \cdot H_5$ ) onder de volgende voorwaarden ook als berm behandeld:

- het talud is flauwer dan 1:9 (ook in dit geval);
- de strook ligt lager dan ontwerppeil;
- er komen waterstandgolfcombinaties voor waarbij de waarde  $d_b / H_5$  ligt tussen 0,5 en 2,2 ( $d_b$  is gedefinieerd als de waterdiepte boven de buitenknik van de berm).

## 4.4 ASFALT

### 4.4.1 ALGEMEEN

In Nederland is asfalt vooral op grote schaal toegepast als taludbekleding op zeedijken en dammen tijdens het uitvoeren van de Deltawerken. Daarnaast is asfalt op minder grote schaal in andere constructies of constructieonderdelen verwerkt.

Dijkbekledingen worden aangebracht om het onderliggende kernmateriaal te beschermen tegen erosie. Harde dijkbekledingen zoals asfalt worden voornamelijk op het buitentalud aangelegd om bescherming te bieden tegen golfbelastingen en stroming. Als er veel golfoverslag over de kruin van de dijk plaatsvindt, kan ook op het binnentalud een harde bekleding worden aangelegd om erosie te voorkomen. Om als dijkbekleding toe te passen moet het dijkbekledingsmateriaal sterk genoeg zijn om de hydraulische belastingen te weerstaan en flexibel genoeg om zettingverschillen in de bekleding te overbruggen. Daarnaast moet de stabiliteit van het materiaal voldoende zijn op de bij waterkeringen gebruikelijke taludhellingen. Waterbouwasfaltbeton, met gietasfalt gepenetreerde breuksteen en open steenasfalt voldoen aan deze criteria en zijn geschikt voor dijkbekleding.

Op zeedijken is waterbouwasfaltbeton de meest toegepaste asfaltsoort. In mindere mate komen ook met gietasfalt gepenetreerde breuksteen en open steenasfalt voor als dijkbekleding. Gepenetreerde breuksteen en waterbouwasfaltbeton worden vooral toegepast vanwege de hoge sterkte en duurzaamheid. Hierdoor zijn beide asfaltsoorten zeer geschikt als taludbekleding op dijken met een zware golfaanval. Vanwege de lage aanlegkosten zijn vooral waterbouwasfaltbeton en open steenasfalt goed toepasbare bekledingen bij dijken met een minder zware golfaanval. Vanwege de plaatwerking is de benodigde laagdikte van asfaltbekledingen in het algemeen aanzienlijk geringer dan van elementenbekledingen.



FIGUUR 4.21

ZEEDIJK MET EEN BEKLEDING VAN WATERBOUWASFALTBETON - OUWERKER - 1996



Open steenasfalt is tevens goed begroeibaar. Als breuksteen zodanig wordt gepenetreerd met gietasfalt dat er holten in de bekleding aanwezig blijven en dat het oppervlak van de bekleding zoveel mogelijk vrij van gietasfalt blijft, biedt ook deze bekleding vooral in de tijzone mogelijkheden voor vestiging van flora en fauna. Waterbouwasfaltbeton biedt door de gesloten structuur en het gladde oppervlak geen mogelijkheden voor ontwikkeling van flora en fauna. Als open steenasfalt op rivierdijken en binnenwateren wordt aangelegd is dit doorgaans vanwege de begroeiingmogelijkheden. Figuur 4.21 geeft een voorbeeld van een zeedijk met een bekleding van waterbouwasfaltbeton.

Asfalt is een verzamelnaam voor mengsels die zijn opgebouwd uit korrelvormige minerale bouwstoffen (mineraal aggregaat) die door een bitumineus bindmiddel zijn omhuld en gebonden.

De minerale bouwstoffen bestaan uit steenslag, grind, zand en vulstof. Als bindmiddel wordt bitumen gebruikt. Uit de beoogde toepassing van het asfalt volgen eisen die aan de eigenschappen van het mengsel worden gesteld. Deze eigenschappen worden bepaald door de samenstelling en door de wijze van verwerking van het asfalt. Door de keuze van het bindmiddel, de aard en gradering van de minerale bouwstoffen, de mengverhouding en de methode van verwerken kunnen mengsels met een grote variatie aan gewenste eigenschappen worden gemaakt.

In de Standaard RAW-bepalingen, afgekort als de 'Standaard', hoofdstuk 52 Kust- en Oeverwerken zijn eisen voor bouwstoffen en asfaltmengsels opgenomen [14]. Hierin wordt veelal verwezen naar NEN-normen. De RAW-bepalingen worden elke 5 jaar geactualiseerd.

#### 4.4.2 BOUWSTOFFEN

##### MINERAAL-AGGREGAAT

Mineraal-aggregaat bestaat uit korrelvormige minerale bouwstoffen van verschillende aard en afmetingen zoals steenslag, grind, zand en vulstof.

*Steenslag* is mineraal aggregaat met korrels groter dan 2 mm waarvan het korreloppervlak grotendeels uit breukvlakken bestaat. Het wordt in een steenbrekerij vervaardigd door natuursteen (groeve) of kunstmatig bereide steen (slakken) met brekers te verkleinen en de gewenste gradering met een zeefinstallatie af te zeven.

In NEN-6240 zijn de eisen voor steenslag opgenomen. Hierin wordt voor verschillende eigenschappen aangegeven waaraan de steenslag moet voldoen: korrelverdeling, korrelvorm, sterkte en bestendigheid. De eisen zijn verdeeld in klassen, die in de Standaard voor elk asfaltmengsel zijn benoemd.

In Nederland wordt voor waterbouwasfalt overwegend kiezelslag (gebroken Maas- of Rijngrind) en kalksteen gebruikt. In de Standaard 2000 is ook de toepassing van fosforslakken toegestaan.

*Grind* is mineraal aggregaat met korrels groter dan 2 mm waarvan het korreloppervlak grotendeels bestaat uit natuurlijk oppervlak (géén breukvlakken).

Het wordt in de Maas (Nederland en België) en de Bovenrijn (Duitsland) gewonnen met baggerschepen en aan boord afgezeefd tot de gewenste gradering. De eisen voor grind zijn niet in een NEN-norm opgenomen maar worden apart in de Standaard vermeld.

*Zand* is mineraal aggregaat met een korrelafmeting overwegend tussen 2 mm en 63 µm. Het wordt op locatie gewonnen (natuurlijk zand) of het komt vrij bij het breekproces van steenslag (brekerzand).

In Nederland worden voor waterbouwasfalt alleen natuurlijke zanden gebruikt. Bekende soorten zijn plaatszand (Zeeland), wadzand (Waddenzee) en rivierzand (Maas en Rijn). Door menging van zandsoorten kan een goed gegradeerd zand worden verkregen. Brekerzand wordt niet gebruikt omdat voor bekledingen geen hoogstabiele mengsels zoals in de wegebouw nodig zijn.

In de Standaard zijn eisen voor zand opgenomen: korrelverdeling en vreemde bestanddelen.

*Vulstof* is een mineraal aggregaat dat overwegend bestaat uit korrels die kleiner zijn dan 63 µm. Daarbij maken we onderscheid in:

- fabrieksvulstof, speciaal geproduceerd voor toepassing in asfalt;
- het eigen stof, de fractie < 63 µm dat in zand en grind/steenslag aanwezig is.

Om de kwaliteit van asfaltmengsels te beheersen wordt het eigen stof in bouwstoffen beperkt en wordt grotendeels met fabrieksvulstof gewerkt.

Fabrieksvulstof bestaat in het algemeen uit steenmeel (gemalen steen) en vliegias van steenkoolcentrales. Voor waterbouwasfalt wordt alleen gemalen kalksteen toegepast.

In de Standaard wordt voor de te stellen eisen aan vulstof verwezen naar ontwerpnorm NEN 3975. Deze norm bevat onder meer eisen aan de korrelverdeling, het bitumengetal, de dichtheid en de watergevoeligheid. De kwaliteit van vulstof wordt gewaarborgd met een certificeringssysteem.

*Opmerking:*

De in deze en onderstaande paragraaf genoemde Nederlandse (NEN) normen zijn of zullen op termijn door Europese (EN) normen worden vervangen (zie bijlage 3: Testmethoden en Normen uit [6]).

### **BINDMIDDELEN**

Bitumineuze bindmiddelen in asfalt zijn bitumen of daarvan afgeleide producten. Normaliter wordt in asfalt gebruik gemaakt van bitumen. Daarnaast wordt bij oppervlakbehandelingen en het kleven van asfalt bitumenemulsie en vloeibitumen toegepast.

### **BITUMEN**

Bitumen is het feitelijke bindmiddel in asfalt. Het is gedefinieerd als 'een zeer viskeuze vloeistof of vaste stof, in hoofdzaak bestaande uit koolwaterstoffen of hun afgeleiden, die vrijwel geheel oplosbaar is in zwavelkoolstof' (NEN 3901).

De stof is bestand tegen de meeste chemicaliën (inert) behalve lichte koolwaterstoffen (zoals olieproducten).

Bitumen komt voor in natuurlijke afzettingen (Trinidad) maar wordt voornamelijk fabrieksmatig bereid door de raffinage van aardolie; het is de zwaarste fractie van de olie na afdestilleren van de lichtere fracties.

Om bitumen te kunnen mengen met mineraal aggregaat moet het worden verhit tot een laagviskeuze vloeistof.

Voor waterbouwafaltmengsels wordt in het algemeen alleen bitumen 70/100 toegepast (voorheen 80/100). (Dit is een standaardbitumen dat wordt getypeerd door de penetratie, zie bijlage 1, paragraaf 1.6 uit [ ]). Eisen die aan het bindmiddel worden gesteld zijn opgenomen in NEN 3902. Deze betreffen onder andere eigenschappen als penetratie en verwekingpunt, die een afgeleide maat zijn voor de viscositeit.

### **BITUMENEMULSIE**

Een andere manier om de viscositeit van bitumen te verlagen is door het emulgeren in water. Een bitumenemulsie is een systeem waarbij zeer kleine bitumendeeltjes (1 tot 10 µm) in water zijn verdeeld. Een emulgator voorkomt dat de bitumendeeltjes samenklonteren.

Eisen voor bitumenemulsies zijn opgenomen in NEN 3904. Bitumenemulsie wordt vooral toegepast bij het aanbrengen van oppervlakbehandelingen.

### **VLOEIBITUMEN**

Vloeibitumen is een laagviskeuze oplossing van bitumen in een verdunningsmiddel, dat kan bestaan uit kerosine, gasolie of terpentine. In het laatste geval wordt gesproken over asfaltkleefmiddel. Eisen die aan vloeibitumina worden gesteld zijn opgenomen in NEN 3905 en 3906.

Vloeibitumina worden vooral gebruikt om asfaltlagen en aansluitingen te kleven.

### **HULPSTOFFEN**

Hulpstoffen is de verzamelnaam voor stoffen die aan asfaltmengsels worden toegevoegd om de eigenschappen van bitumen en asfalt te verbeteren. Dit betreft hechtverbeteraars, die de hechting tussen bitumen en mineraal aggregaat verbeteren en afdruiptremmers, die de viscositeit van het bitumen verhogen. Het effect van deze stoffen is met name het vergroten van de duurzaamheid.

Asfalt voor dijkbekledingen bevat in het algemeen geen hulpstoffen. In open steenasfalt worden soms vezels aan het bindmiddel toegevoegd om een zo dik mogelijke bindmiddelmhulling te kunnen toepassen die door de vezels niet afdruipt van het mineraal aggregaat.

### **4.4.3 MENGSELASPECTEN**

#### **ALGEMEEN**

Een asfaltmengsel bestaat uit mineraalaggregaat, dat wordt gemengd met bitumen. Het bindmiddel omhult het mineraalaggregaat, bindt de korrels en vult de holle ruimte tussen de korrels in een bepaalde mate. Het mineraalaggregaat moet in het mengsel goed hechten aan het bitumen. Een ruw oppervlak, de chemische eigenschappen van de steen (zoals het basische kalksteen) en een laag vochtgehalte dragen daaraan bij.

Een asfaltmengsel kan qua samenstelling worden onderverdeeld in twee componenten:

- materialen die het skelet vormen;
- materialen die de holle ruimte in het skelet vullen.

Afhankelijk van het soort asfalt wordt het skelet gevormd door steenslag, grind of zand (of een combinatie daarvan). Het skelet zorgt voor draagvermogen. De holle ruimte wordt gevuld door bitumen, al dan niet in combinatie met vulstof en/of zand.

#### **HOLLE RUIMTE IN HET MINERAALAGGREGAAT**

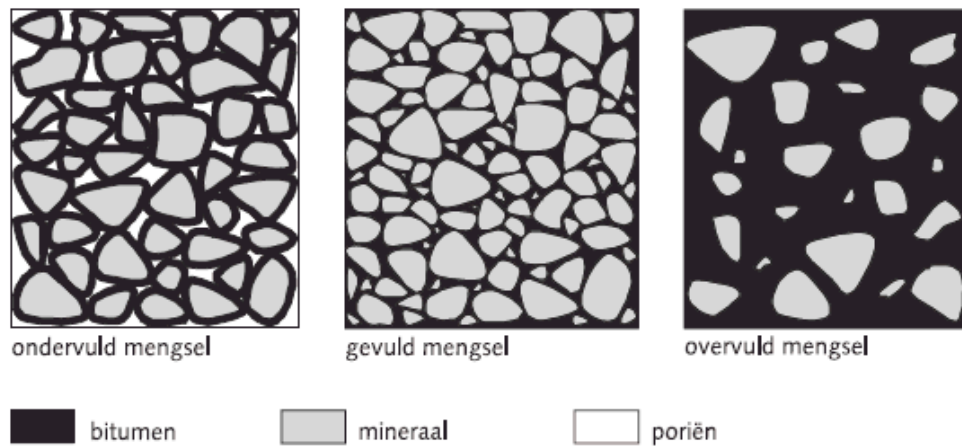
De holle ruimte in een skelet van mineraal aggregaat hangt sterk af van het feit of de korrelverdeling regelmatig (continue) is of onregelmatig (discontinue). Bij een regelmatige korrelverdeling, zoals bij waterbouwasfaltbeton, zijn alle fracties aanwezig waardoor de kleine korrels de ruimte tussen de grote korrels vullen en de holle ruimte in het korrelskelet wordt beperkt. Hierdoor kan met relatief weinig vulstof en bitumen een dicht mengsel worden verkregen. Bij een onregelmatige korrelverdeling, zoals bij open steenasfalt wordt de holle ruimte door het ontbreken van kleine fracties minder gevuld. Hierdoor kan bij een beperkte vulling van het korrelskelet een poreus asfalt worden verkregen.

#### **VULLING VAN DE HOLLE RUIMTE**

De mate van vulling van de holle ruimte in het korrelskelet heeft een grote invloed op de eigenschappen van het mengsel. Naarmate de holle ruimte meer wordt gevuld zullen de eigenschappen van het asfalt meer gaan afhangen van de eigenschappen van de vulling en zal de invloed van het korrelskelet afnemen.

FIGUUR 4.22

## VULLING VAN HET KORRELSKELET MET BITUMEN (OF ASFALTMASTIEK)



In de mate van vulling worden drie niveaus onderscheiden (figuur 4.22):

- *Ondervuld*: De holle ruimte in het skelet is maar gedeeltelijk gevuld. Voorbeelden zijn zand-asfalt, waarin het zandskelet beperkt is gevuld met bitumen en open steenasfalt, waarin het steenskelet beperkt is gevuld met asfaltmastiek.
- *Gevuld*: De holle ruimte in het skelet is bij benadering gevuld. Een voorbeeld is waterbouwasfaltbeton, waarin het skelet van steenslag en zand net gevuld is met bitumen en vulstof.
- *Overvuld*: De holle ruimte is meer dan gevuld, zodat het skelet wordt verbroken. Een voorbeeld is gietasfalt, waarin het skelet van grind is overvuld met asfaltmastiek.

De kwaliteit van de vulling hangt sterk af van de componenten die tot die vulling worden gerekend.

#### HOLLE RUIMTE IN HET MENGSEL

De hoeveelheid ongefulde ruimte in het mineraalskelet van asfaltmengsels wordt holle ruimte (HR) genoemd. De holle ruimte is het volumepercentage met lucht gevulde poriën in een mengsel. De holle ruimte is van groot belang voor eigenschappen als doorlatendheid en duurzaamheid.

Mengsels met hoge en onderling verbonden holle ruimte zijn doorlatend voor water (bijvoorbeeld zand-asfalt met 25% holle ruimte) of zelfs doorlatend voor zand (bijvoorbeeld open steenasfalt met 25% holle ruimte). Mengsels met lage en onderling niet verbonden holle ruimten zijn ondoorlatend voor water en zand (bijvoorbeeld waterbouwasfaltbeton met 3% holle ruimte). Mengsels met een lage holle ruimte zijn duurzamer dan die met een hoge holle ruimte omdat invloeden zoals lucht en water nauwelijks in het mengsel kunnen dringen.

#### 4.4.4 EIGENSCHAPPEN

De keuze van een asfaltmengsel is gebaseerd op de gewenste eigenschappen, die worden bepaald door de functie van de bekleding. Deze eigenschappen kunnen we verkrijgen door een juiste keuze in samenstelling en de aard van de bouwstoffen. De verwerking speelt hier uiteraard ook een rol bij. Deze keuze wordt volgens de Standaard 2000 bepaald door het uitvoeren van een vooronderzoek en een geschiktheidsonderzoek (zie paragraaf 2.5 in [6]). De belangrijkste eigenschappen van het asfalt zijn:

- doorlatendheid;
- mechanische eigenschappen;
- duurzaamheid;
- verwerkbaarheid (de verwerkbaarheid wordt in hoofdstuk 8 Uitvoering van [6 ] behandeld).

### **DOORLATENDHEID**

De mate van doorlatendheid wordt bepaald door de hoeveelheid holle ruimte en de onderlinge verbinding van de poriën. Bekledingen van waterkeringen moeten altijd grond dicht (of zand dicht) zijn, en soms waterdicht. Als een grond doorlatend asfaltmengsel zoals open steenasfalt wordt toegepast, dan moet een grond dichte filter worden aangebracht. Waterbouwasfaltbeton en met gietasfalt gepenetreerde breuksteen zijn onder normale omstandigheden grond dichte en waterdichte bekledingen. Open steenasfalt is doorlatend voor grond en water; zandasfalt is alleen water doorlatend.

Normaliter wordt de doorlatendheid niet beproefd. Alleen bij het vooronderzoek van open steenasfalt volgens de Standaard 2000 wordt de doorlatendheid indicatief bepaald. Voor doorlatendheidmetingen aan bekledingen in situ zijn geen standaardmethoden beschikbaar.

### **MECHANISCHE EIGENSCHAPPEN**

Bij asfalt zijn net als bij vele andere materialen twee mechanische eigenschappen van belang:

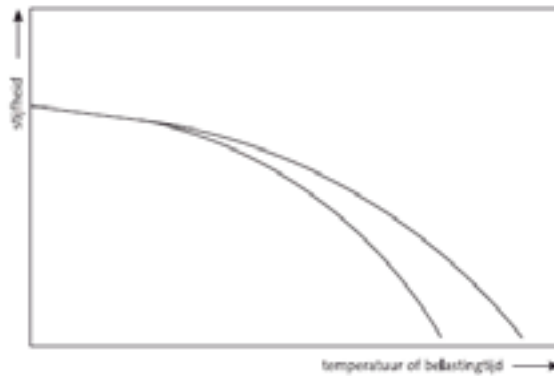
- stijfheid;
- sterkte.

Deze mechanische eigenschappen zijn geen vaste waarden maar vertonen net als bitumen een gedrag dat afhankelijk is van temperatuur en belastingtijd. Bij waterbouwkundige toepassingen van asfalt kunnen temperatuur en belastingtijd sterk variëren.

De temperatuur van een asfaltbekleding kan variëren van enige graden Celsius onder nul tot boven de vijftig graden bij zonbestraling. De belasting kan variëren van 0,1 seconde bij golfklappen tot jaren bij zettingen van de ondergrond. Onder kortdurende belastingen zoals golfklappen en bij lage temperatuur gedraagt asfalt zich stijf (elastisch) en sterk. Bij langdurige belasting, zoals bij zettingen en bij blootstelling aan hoge temperaturen, gedraagt het materiaal zich flexibel (viskeus) en is de sterkte gering (daardoor kunnen plantenwortels door een asfaltlaag groeien). Dit temperatuur- en tijdafhankelijk materiaalgedrag wordt visko-elastisch gedrag genoemd.

De stijfheid is een maat voor de vervorming onder invloed van een belasting en is gedefinieerd als het quotiënt tussen spanning en relatieve vervorming. In ontwerpberekeningen is de stijfheid van asfaltbekledingen een belangrijke parameter. De stijfheid van een asfaltmengsel is (naast temperatuur en tijd, figuur 4.23) in hoofdzaak afhankelijk van de stijfheid van het bitumen, de holle ruimte en de hoeveelheid mineraal aggregaat.

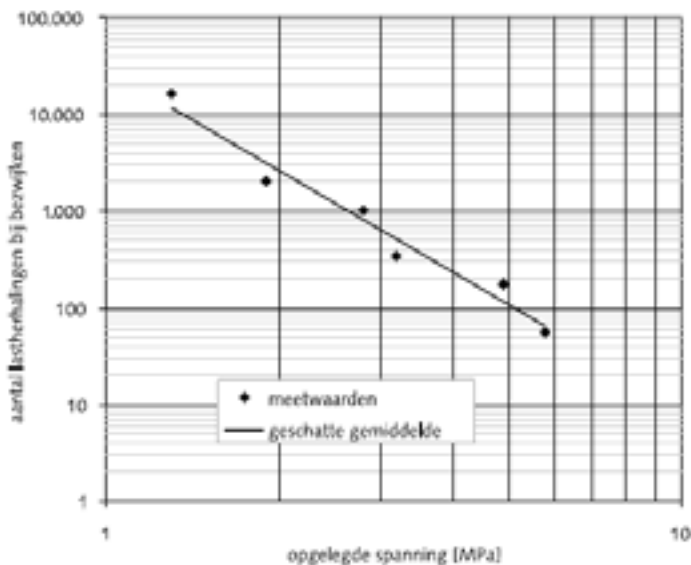
FIGUUR 4.23 STIJFHEID ALS FUNCTIE VAN TEMPERatuur EN TIJD



De stijfheid en sterkte van het asfalt beïnvloeden de gedragseigenschappen van de bekleding zoals stabiliteit en de flexibiliteit.

De *sterkte* is een maat die bepaalt welke maximale belasting leidt tot bezwijken. We kunnen onderscheid maken in verschillende vormen van sterkte, zoals treksterkte, druksterkte en buigsterkte. Voor asfaltbekledingen is de buigsterkte de belangrijkste, dit is een maat voor de weerstand tegen belasting op buiging als gevolg van golfklappen. Daarnaast zijn de scheursterkte en schuifsterkte van belang als maat voor de weerstand tegen scheurdoorgroei en weerstand tegen erosie (rafeling).

Breuk in asfaltmengsels treedt op als een bepaalde (trek)spanning wordt overschreden. Omdat asfaltmengsels vermoeiingsgedrag vertonen, is de toelaatbare spanning kleiner naarmate het materiaal vaker wordt belast. Het aantal golfklappen is dus van belang. De toelaatbare spanning wordt vastgelegd in een relatie tussen de aangebrachte spanning en het aantal lastherhalingen (figuur 4.24). Deze relatie is met proeven te bepalen of kan in nomogrammen worden afgelezen.

FIGUUR 4.24 RELATIE TUSSEN DE OPGELEGDE SPANNING ( ) EN HET AANTAL LASTHERHALINGEN WAARBIJ BEZWIJKEN OPTREEDT ( $N_f$ ) VAN EEN BEPAALD ASFALTBETONMENGSEL

Stabiliteit is het vermogen om blijvende vervorming onder invloed van een constante belasting te voorkomen. Dit is van belang bij bekledingen op een helling, die onder invloed van het eigen gewicht geen doorgaande vervormingen mogen vertonen. De ervaring leert dat de huidige mengsels geen stabiliteitproblemen kennen als ze worden verwerkt op hellingen die niet steiler zijn dan in tabel 4.5 is aangegeven. Bovendien wordt bij aanvang van het werk met een geschiktheidsonderzoek nagegaan of het materiaal voldoende stabiel is.

TABEL 4.5

MOGELIJKE TALUDHELLINGEN

asfaltsoort	maximale steilheid taludhelling	
asfaltbeton	1:1,7; in wateroverdrukkenzone maximaal 1:3 <sup>1)</sup>	
gepenetreerde breuksteen	onder water	1:1,7; in wateroverdrukkenzone maximaal 1:3 <sup>1)</sup> 2)
	boven water	1:3, 1:1,5 mogelijk na aanpassingen van mengsel en verwerkingstechniek <sup>4)</sup>
asfaltmestiek	onder water	1:7
	boven water	1:10
open steenasfalt	in situ	1:1,5
	mat	1:1, bovenzijde mat verankeren bij taluds van 1:2 en steiler <sup>4)</sup>
zandasfalt	ca. 1:2,5 als weinig vervormingen toelaatbaar zijn	
	ca. 1:1,5 als vervormingen niet relevant zijn	

<sup>1)</sup> De taludhelling van 1:3 is een indicatieve waarde. De maximale taludhelling moet nauwkeurig worden vastgesteld door het bepalen van de grondmechanische stabiliteit van het buitentakud en de stabiliteit van het mengsel.

<sup>2)</sup> Onder water wordt als penetrabemortel alleen asfaltmestiek toegepast.

<sup>3)</sup> Het getasfalt dient in dit geval in meerdere lagen te worden aangebracht. Bij het in één keer aanbrengen van een te grote hoeveelheid getasfalt vloeit een groot deel hiervan naar beneden weg.

<sup>4)</sup> De sterkte van het geotextiel moet voldoende zijn omdat de mat gedeeltelijk aan het geotextiel hangt. Daarnaast mag de rek van het geotextiel bij de opgelegde belasting niet groter zijn dan die van het asfalt.

Flexibiliteit is het vermogen om vervormingen te kunnen ondergaan waarbij de bekleding intact blijft. Dit is van belang bij zettingen en ontgrondingen. Bij deze geringe maar langdurige belasting moet het asfalt zoveel kunnen vervormen dat het op de ondergrond blijft aanliggen zonder het ontstaan van scheuren. Van de huidige mengsels blijkt de flexibiliteit in de praktijk voldoende te zijn. Alleen in extreme situaties, zoals grote zettingverschillen bij caissons in het dijklichaam of grote ontgrondingen aan de rand van slabben, blijken de asfaltmengsels niet toereikend. Mogelijk is de toepassing van wapening in die situaties een oplossing.

## DUURZAAMHEID

### Algemeen

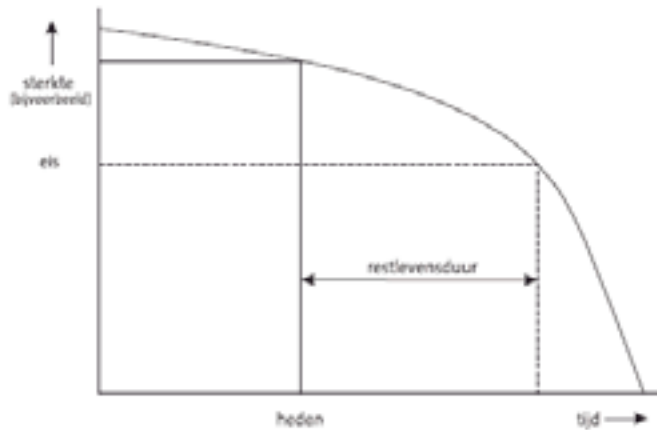
Een asfaltbekleding moet tijdens zijn levensduur zijn functie vervullen. De kenmerkende fysische en mechanische eigenschappen mogen dus niet te snel achteruitgaan. De duurzaamheid is de mate waarin de relevante eigenschappen op het gewenste niveau blijven.

Door blootstelling aan externe (weer)invloeden verouderd asfalt. Hierdoor kunnen eigenschappen zoals stijfheid en vermoeiingsgedrag veranderen. Hoe groter en toegankelijker de holle ruimte in het asfalt is, hoe meer veroudering kan optreden. Figuur 4.25 illustreert hoe een eigenschap in de tijd kan veranderen. Dichte ontoegankelijke mengsels worden nagenoeg niet beïnvloed door externe factoren.



Er zijn in de loop van de jaren goede ervaringen opgedaan met de duurzaamheid van asfalt bij waterkeringen. Schade aan asfaltbekledingen komt sporadisch voor en onderhoud is meestal zeer beperkt. Een zorgvuldige uitvoering en een goede kwaliteitszorg bij de aanleg van werken heeft daar zeker toe bijgedragen.

FIGUUR 4.25 VERANDERING VAN EEN EIGENSCHAP IN DE TIJD



De eigenschappen van het asfalt worden beïnvloed door veel externe factoren. Dit zijn factoren als de hydraulische belasting (golfklappen en stroming), het weer (warmte, vorst en regen), de omgeving (water, zuurstof en levende organismen) en de aanleg (hitte). Op grond van deze factoren zijn de volgende duurzaamheidsaspecten van asfalt te onderscheiden:

#### *Verharding (veroudering)*

Bitumen in asfaltmengsels verhardt in de loop van de tijd, dat wil zeggen dat het bindmiddel in de loop van de tijd stijver en brosser wordt, zodat het asfalt minder flexibel wordt.

De verharding wordt vooral veroorzaakt door hoge temperatuur, waardoor vluchtige bestanddelen ontwijken, en door oxidatie. Licht in de vorm van ultraviolette straling bevordert bovendien de oxidatiesnelheid. Een belangrijke verharding treedt op tijdens de productie en verwerking van het asfalt omdat de temperatuur dan extreem hoog is.

Verharding in de gebruiksfase kan worden beperkt door een lage holle ruimte en een hoog bitumengehalte in het mengsel. Een goede verdichting van waterbouwasfaltbeton is daarom noodzakelijk.

#### *Watergevoeligheid (stripping)*

Asfaltmengsels reageren op water omdat het mineraal aggregaat een grotere affiniteit voor water heeft dan voor bitumen. Water heeft daardoor het vermogen om bitumen te verdringen waardoor de samenhang van het asfalt verloren gaat en eigenschappen als stijfheid en sterkte afnemen. Dit verschijnsel wordt 'stripping' genoemd. Bij dichte mengsels levert de aanwezigheid van water geen probleem op. Open mengsels waarin de minerale delen met een dunne bitumenfilm zijn omhuld, zoals zandafalt, zijn wel gevoelig voor water. Bestaat de omhulling echter uit een laagje asfaltmastiek zoals bij open steenasfalt, dan vormt deze een duurzame omhulling.

*Erosiebestendigheid*

Asfaltmengsels zijn in meer of mindere mate gevoelig voor erosie onder invloed van water, wind en meegevoerd materiaal zoals zand, stenen, kruiend ijs en drijfhout. Dit geldt nauwelijks voor dichte mengsels, zoals waterbouwasfaltbeton en gietasfalt, die alleen enige erosie op microschaal vertonen. Open mengsels als open steenasfalt en zandasfalt zijn wel gevoelig voor erosie.

*Vermoeiing*

Asfalt is een vermoeiingsgevoelig materiaal, dat wil zeggen dat de mechanische kwaliteit afneemt naarmate het materiaal vaker wordt belast. Dit aspect is alleen relevant bij stijve mengsels die voortdurend worden belast. Asfaltbekledingen worden in de praktijk alleen onder extreme (storm) condities herhaaldelijk maar ook slechts tijdelijk belast. In de zomerperiode zal het effect van vermoeiing weer grotendeels verdwijnen, omdat hogere temperaturen een helend effect hebben op asfalt; door vermoeiing ontstane haarscheurtjes vloeien weer dicht.

*Vorstbestendigheid*

Asfaltmengsels zijn in het algemeen niet gevoelig voor aantasting door vorst. Zelfs mengsels die water kunnen bevatten, zoals open steenasfalt en zandasfalt, vertonen in Nederlandse omstandigheden geen schade.

*Biologische aantasting*

Asfalt wordt beïnvloed door de aanwezigheid van levende organismen. Het viskeuze gedrag van asfalt stelt organismen in staat om het materiaal heel geleidelijk te vervormen. Zo kunnen plantenwortels of zeepokken (figuur 2.3.24 ) zich in oppervlakteporiën nestelen en deze vergroten. Bij open steenasfalt vormt begroeiing in het algemeen geen probleem. Excessieve begroeiing kan wel tot problemen leiden.

*Chemische aantasting*

Bitumen is voor de meeste chemicaliën inert, dat wil zeggen dat het goed bestand is tegen de inwerking van chemicaliën, zeker als de belastingsduur kort is. Bitumen is echter wel volledig oplosbaar in lichte koolwaterstoffen, zoals terpentine en dieselolie. Als deze stoffen in het oppervlaktewater voorkomen kan het asfaltoppervlak worden aangetast. Omdat deze aantasting bij dichte bekledingen beperkt blijft tot het oppervlak, levert dit geen gevaar op voor de sterkte. Indien de bekleding zware chemische belastingen te verduren krijgt, bijvoorbeeld in een olieoverslaghaven, dan dient hier extra aandacht aan gegeven te worden. Alleen bij calamiteiten kan de aantasting zo groot zijn dat de sterkte in gevaar komt.

FIGUUR 4.26

BIOLOGISCHE AANTASTING VAN OPEN STEENASFALT DOOR ZEEPOKKEN - NEELTJE JANS - 1989



In tabel 4.6 wordt alles nog eens op een rijtje gezet, waarbij ‘++’ betekent dat de bekleding zeer goed bestand is tegen het optredende fenomeen. Een ‘+’ geeft een goede weerstand weer, een ‘0’ een redelijke weerstand en een ‘-’ geeft aan dat de bekleding niet bestand is tegen de genoemde vorm van aantasting.

TABEL 4.6

BESTENDIGHEID VAN DE ASFALTSOORTEN

	waterbouw- asfaltbeton	asfalt- mastiek	gepenetreerde breuksteen	open steenasfalt	zandasfalt
veroudering/stripping	+	++	++	0	0
erosiebestendigheid	+	++	++	0	-
vermoeling	++	++ <sup>1)</sup>	++ <sup>1)</sup>	+	0
vorstbestendigheid	++	++	++	+	+
biologische planten	+	++	++	+	-
aantastingen algen/wieren	2)	++	++	0	0
schaaldieren	2)	+	++	0 <sup>3)</sup>	0
chemische aantastingen	+	+	++	0	-

<sup>1)</sup> Asphaltmastiek en gietasfalt zijn niet gevoelig voor vermoeling

<sup>2)</sup> Waterbouw asfaltbeton wordt niet in de tijzone toegepast

<sup>3)</sup> Open steenasfalt scoort '0' indien één extra steenlaag wordt aangebracht, anders scoort open steenasfalt '-'

De mate waarin asfaltbekledingen bestendig of duurzaam zijn bepaalt hoe groot de levensduur is. Over de feitelijke levensduur van asfaltbekledingen is alleen in globale zin iets te zeggen, omdat deze van zoveel factoren afhangt. De ervaring leert dat dichte bekledingen minstens 50 jaar meegaan en waarschijnlijk wel 100 jaar. Open mengsels zijn gevoeliger voor externe invloeden en hebben een levensduur die naar verwachting de helft is van dichte bekledingen. In tabel 2.3.7 is een ruwe schatting gemaakt voor de levensduur van de verschillende asfaltbekledingen, waarbij onderscheid in belasting is gemaakt tussen zee-, meer- en rivierdijken:

TABEL 4.7

LEVENSDUURVERWACHTING VAN ASFALTBEKLEDINGEN (IN JAREN)

	waterbouw- asfaltbeton	open steenasfalt	gepenetreeerde breuksteen	zandasfalt	asfalt- mastiek
zeedijk	50-75	15-30	50-100	nvt	50-100
meerdijk	50-75	20-40	50-100	15-30	nvt
riverdijk	50-75	25-50	50-100	20-40	nvt

*Toelichting:*

De ondergrens geldt voor een matige aanlegkwaliteit asfalt, de bovengrens voor een goede kwaliteit. Onder goede kwaliteit wordt asfalt verstaan dat aan alle eisen voldoet. Daarnaast beïnvloeden omgevingsfactoren de levensduur van een asfaltbekleding. Voorbeelden hiervan zijn:

- aanwezigheid van water, vooral bij open mengsels;
- voorkomen van regelmatige zware golfaanval;
- aanwezigheid van drijvend vuil en lichte breuksteen die over de bekleding gaan rollen en vooral bij open steenasfalt schade veroorzaken.

# 5

## BELASTINGEN

### 5.1 INLEIDING

De belastingen op waterkerende grondconstructies zijn van permanente of veranderlijke aard. Ze zijn als volgt onderverdeeld:

- Permanent:
- Eigen gewicht en gronddruk (bij bijzondere constructies)
- Onttrekking van stoffen (water, olie, zout, aardgas) uit de ondergrond
- Veranderlijk:
- Hydraulische belastingen
- Overige belastingen

Figuur 5.1 geeft een globaal schematisch overzicht van de relatie tussen belastingen en schadeontwikkeling.

### 5.2 PERMANENTE BELASTINGEN

#### EIGEN GEWICHT EN GRONDDRUK

Het eigen gewicht van het dijklichaam moet als een belasting worden gezien.

Het aandrijvende moment in de analyse van de macrostabiliteit wordt in hoge mate door dit eigen gewicht bepaald. Het eigen gewicht hangt af van het volumieke gewicht van de in het grondlichaam aanwezige materialen (zand, klei wegverharding) alsmede van de mate van verzadiging van deze materialen.

Het gewicht levert ook een bijdrage aan de sterkte: de schuifweerstand langs het glijvlak door en onder het eigenlijke dijklichaam neemt hierdoor toe.

#### ONTTREKKINGEN UIT DE GROND

Onttrekking van water, olie, zout, aardgas en dergelijke op grote of minder grote diepte kan als belasting worden beschouwd. Ondiepe wateronttrekking zal door waterspanningverlaging, en dus korrelspanningverhogingen, in de ondergrond gepaard gaan met zetting. Winning van olie, zout of aardgas zal door de verminderde samendrukking in het winmassief aanleiding geven tot bodemdaling.

Indien de onttrekking gepaard gaat met zetting of bodemdaling heeft dit consequenties voor de hoogteligging van het dijklichaam, in het bijzonder de kruin. Er zal extra overhoogte nodig zijn om de lagere ligging van de kruin te compenseren.

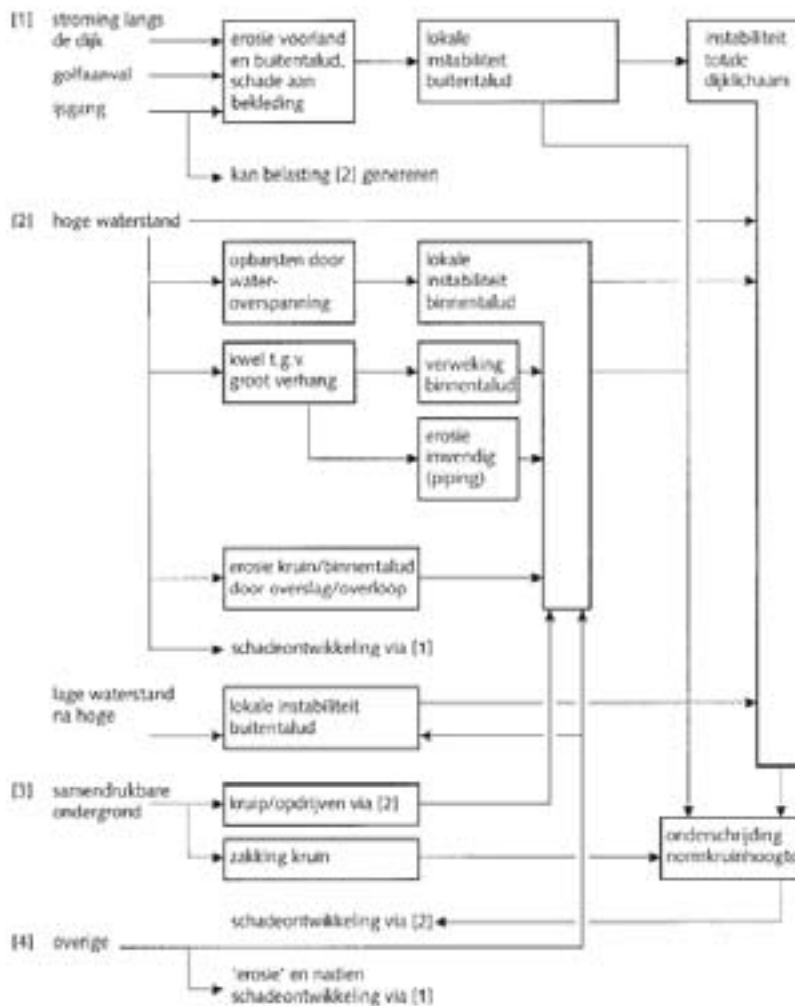
## 5.3 HYDRAULISCHE BELASTINGEN

### 5.3.1 INLEIDING

De hydraulische belastingen zijn gerelateerd aan de wettelijke veiligheidsnorm met betrekking tot overstroming, zoals die is gegeven in Wet op de waterkering [7]. In deze wet is de veiligheidsnorm voor de primaire waterkeringen aangegeven als de gemiddelde overschrijdingskans per jaar van de hoogste hoogwaterstand waarop elke keringsectie afzonderlijk moet zijn berekend, rekening houdend met overige waterkerend vermogen bepalende maatgevende factoren, zoals: lagere waterstanden, golven, stromingen, slingeringen in de waterstand, stormduur, sterkte-eigenschappen van kering en ondergrond, bodemdaling en zeespiegelstijging.

FIGUUR 5.1

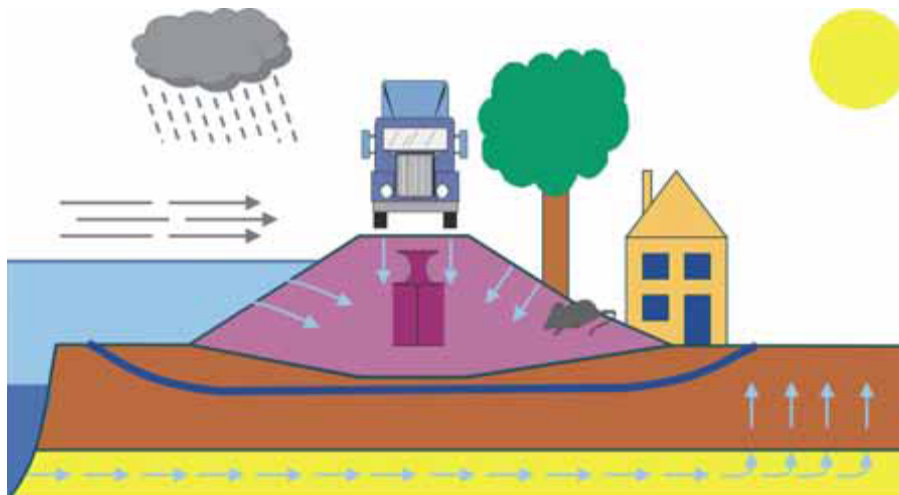
RELATIE TUSSEN BELASTING EN SCHADEONTWIKKELING



De volgende paragrafen leggen de verbinding met *Hydraulische randvoorwaarden voor primaire waterkeringen* [2] en geven, waar nodig, aanvullingen op de hydraulische randvoorwaarden. Voor het dimensioneren van grondconstructies, en bij de uitvoering van werkzaamheden hieraan, zijn de volgende hydraulische parameters van belang:

- Maatgevende hoogwaterstand (MHW; § 5.3.2);
- Waterstandverloop tijdens maatgevende belasting (§ 5.3.3);
- Hoogwaterstijging (§ 5.3.4);
- Lokale waterstandverhogingen (§ 5.3.5);
- Golfoverslaghoogte (§ 5.3.6);
- Hydraulische belasting door schepen (§ 5.3.7);
- Golfrandvoorwaarden bij een lagere waterstand dan MHW (§ 5.3.8);
- Stroming (§ 6.7.2);
- Overdrukken onder een bekleding (§ 7.2);
- Extreme neerslag (Het effect van extreme neerslag is nog niet diepgaand onderzocht).

FIGUUR 5.2 BELASTINGEN OP DIJKEN



### 5.3.2 MAATGEVENDE HOOGWATERSTAND (MHW)

In hoofdstuk 2 is een overzicht van waterkeringen en de daaraan gerelateerde systemen gegeven. Hierbij is een onderscheid gemaakt tussen categorieën (de plaats in de beveiliging van dijkkringgebieden) en typen (verschijningsvormen).

#### PRIMAIRE WATERKERINGEN

Het toetspeil staat in het randvoorwaardenboek en geeft alleen informatie voor primaire waterkeringen categorie 1 (dat zijn keringen die behoren tot het stelsel dat direct het dijkkringgebied omsluit en buitenwater keert). Aan de toevoeging van MHW is te zien voor welk referentiejaar de MHW is vastgesteld (bijvoorbeeld: MHW 2005 geldt voor het jaar 2005). De randvoorwaarden zijn gebaseerd op de veiligheidsnorm uit de Wet op de waterkering en worden eens per vijf jaar geactualiseerd en uitgebracht in een nieuw randvoorwaardenboek. Voor het eerste randvoorwaardenboek geldt MHW 2000 = Toetspeil 2000.

Zodra de veiligheidsnorm van waterstandnorm zal zijn vertaald in een inundatienorm zal dit worden uitgebreid naar de overige categorieën; tot die tijd moet hiervoor worden verwezen naar Grondslagen voor waterkeren[1] en de uitwerking daarvan in het beheerplan van de waterkeringbeheerder.

### NIET-PRIMAIRE KERINGEN

Voor een aantal gebieden in Nederland is naast de primaire kering een stelsel van 'tweede waterkeringen' of slaperdijken in gebruik. Het vaststellen van het veiligheidsniveau van de regionale waterkeringen valt onder de verantwoordelijkheid van de provinciale overheid. Bepalingen over deze (nader aan te wijzen) waterkeringen staan in de provinciale 'verordeningen waterkering'.

Voor het bepalen van randvoorwaarden voor boezemkaden, die ook tot de regionale waterkeringen worden gerekend, wordt verwezen naar [15].

#### 5.3.3 WATERSTANDVERLOOP TIJDENS MAATGEVENDE BELASTING

Achtereenvolgens behandelen we het bij het ontwerpen of toetsen in rekening te brengen waterstandverloop tijdens maatgevende belasting:

- Bij rivieren;
- Bij zeedijken;
- In het merengebied;
- In de delta's en
- In de estuaria.

#### RIVIERDIJKEN

Voor boven- en benedenrivieren kan het verloop van de hoogwatergolf worden toegeleverd door het HIS-R (Hoogwater Informatie Systeem - Regionaal), te bereiken via [www.hisinfo.nl](http://www.hisinfo.nl).

#### ZEEDIJKEN

Bij dijken langs zee gelden de volgende aannamen:

- Tijdens de maatgevende belasting is de vorm van het waterstandverloop langs de kust gelijk, ook in het Waddengebied;
- De stormduur  $t_s$  is in het Waddengebied 45 uur, en langs de gladde kust 35 uur;
- De top van de opzet ligt op MHW - GGA, waarin GGA (= Gemiddelde Getijamplitude) voor die locatie is. De basis ligt op de gemiddelde waterstand (GWS). Op deze opzet wordt de GGA van de betreffende locatie (deze is bekend bij de beheerder) gesuperponeerd, zodanig dat het tijdstip van een top van de getijkromme samenvalt met dat van de top van de opzet. De maximale waterstand wordt hiermee gelijk aan MHW.

#### MEERDIJKEN

Voor meerdijken bestaat de maatgevende belasting uit een combinatie van een hoog meerpeil en harde wind. Voor het bepalen van de kruinhoogte is vooral de windinvloed van belang. Voor de grondmechanische aspecten is in het bijzonder het verhoogde meerpeil dominant, een verhoogd meerpeil kan gedurende een periode van meerdere weken optreden. Zolang uit de (op stapel staande) rekenmodellen als HYDRA\_M geen andere regels volgen, wordt met de volgende aannamen volstaan:

- De stormduur  $t_s$  is 35 uur;
- De opzet verloopt volgens de dikke getrokken lijn in figuur 5.3<sup>1</sup>.

1) De maximale waterstand (top) ligt op  $SP + (MKH - SP)/3$ , waarin SP het streefpeil van het meer is (bekend bij de beheerder) en MKH de maatgevende kruinhoogte. De basis ligt op SP.



### DIJKEN IN DE DELTA'S

In de delta's wordt de aanpak als bij de dijken langs zee gevolgd, met een stormduur van 35 uur.

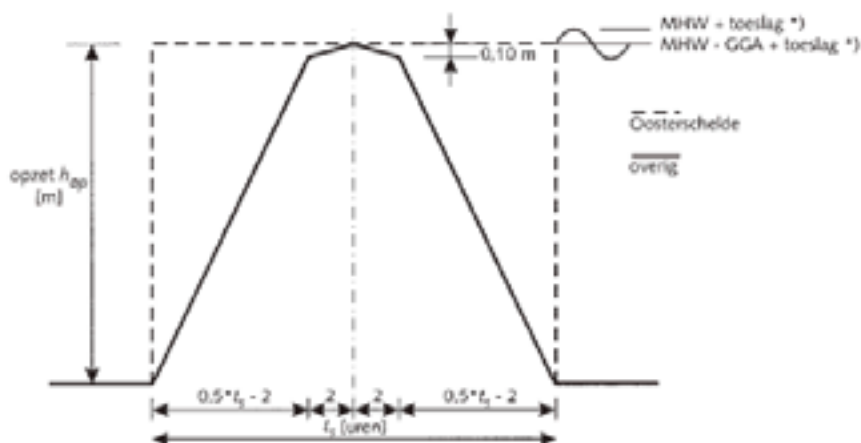
### DIJKEN IN DE ESTUARIA

In de Oosterschelde en de Westerschelde wordt de aanpak als bij de zeedijken gevolgd. Het waterstandverloop tijdens maatgevende belasting is hier voor zowel Westerschelde als aan de buitenzijde van de Oosterscheldekering gelijk aan wat geldig is voor de gehele kust. De stormduur bedraagt 35 uur.

Voor de resulterende waterstanden op de Oosterschelde is de aanwezigheid van de stormvloedkering een complicerende factor. Het meest negatieve verloop van de waterstanden wat betreft de reststerkte zal optreden wanneer de waterstand gedurende lange tijd weinig verandert. Dit zal optreden bij een gesloten kering. Uitgaande van een waterstandverloop aan de buitenzijde van de kering met eerdergenoemde uitgangspunten, zal de kering enkele malen achtereen gesloten worden. Hierbij kunnen we ervan uitgaan dat tijdens de eerste hoogwatertop de stormvloedkering gesloten is op een bekkenpeil van NAP + 1,00 m (centrum bekken) en dat de waterstand op het bekken zich gedurende de twee daaropvolgende getijden op ongeveer een peil van NAP + 2,00 m zal bevinden. Oorzaak hiervan is de te volgen sluitingsstrategie van de stormvloedkering, waarbij getracht wordt bij sluiting steeds afwisselend een bekkenpeil van NAP + 1,00 m respectievelijk NAP + 2,00 m in te stellen. Bij sterk verhoogd laagwater tijdens een stormperiode zal teruggaan van een peil van NAP + 2,00 m naar een peil van NAP + 1,00 m niet altijd mogelijk zijn. Daardoor moet worden gerekend op een waterstand van NAP + 2,00 m gedurende een periode van 20 uur.

De top van het opzetverloop ligt dan op MHW - GGA. Het opzetverloop is hier rechthoekig (zie figuur 5.3). Superpositie van dit verloop en de gemiddelde getijkromme levert het waterstandverloop onder maatgevende omstandigheden.

FIGUUR 5.3 VERLOOP VAN DE STORMOPZET



#### 5.3.4 HOOGWATERSTIJGING

De hoogwaterstijging is samengesteld uit de mondiale stijging van de zeespiegel, NAP-daling en de eventuele lokale wijzingen van de getijamplitude. De laatste factor is het gevolg van menselijk ingrijpen in lokale situaties en de daarmee gepaard gaande morfologische ontwikkelingen.

### 5.3.5 LOKALE WATERSTANDVERHOGINGEN

In vrijwel gesloten bekkens kunnen zich slingeringen voordoen bij het plotseling wegvallen van de windbelasting; hierdoor kan een waterstandverhoging door opwaaiing veranderen in een even grote verlaging, en een verlaging door afwaaiing veranderen in een even grote verhoging.

In langgerekte bekkens, die aan één zijde zijn afgesloten en in verbinding staan met het buitenwater, zoals havens, kunnen opslingeringen ('seiches') optreden. Hierbij treedt een sterke vergroting op van laagfrequente variaties van de buitenwaterstand. Significante effecten van seiches zijn alleen te verwachten bij langgerekte en grote bekkens. Voorbeelden zijn de bekkens in het Europoortgebied (golfperiodes tussen 10 en 180 minuten), de havens van Vlissingen (golfperiode kleiner dan 10 minuten), en de haven van IJmuiden (periode circa 10 minuten).

Als *Hydraulische randvoorwaarden voor primaire waterkeringen* [2] geen uitsluitel geeft, kan de grootte van een seiche op twee wijzen worden bepaald:

- Op grond van registraties; daar, waar significante seiches op kunnen treden, zijn in het algemeen ook registraties beschikbaar.
- Op grond van numerieke berekeningen door hierin gespecialiseerde diensten.

Naast seiches kunnen zich dwarsslingeringen en kortere langsslingeringen voordoen. Deze zullen ook uit bestaande registraties bekend zijn. Voor de berekening van lokale waterstandverhogingen door lokale opwaaiing, buistoten en bui-oscillaties kan aan zee en delta's, tenzij in het randvoorwaardenboek anders wordt geadviseerd, gebruik worden gemaakt van [16].

### 5.3.6 GOLFOVERSLAGHOOGTE

De golfoverslaghoogte is gerelateerd aan een ontwerp golfoverslagdebiet. In het verleden werd de overslag uitgedrukt in een percentage van de golven die over de kruin slaan. Bij het ontwerpen van dijkversterkingen vanwege de Deltawet is tot voor kort vrij algemeen gedimensioneerd op de golfoverslaghoogte, die wordt overschreden door 2% van de aankomende golven.

Het hanteren van een overslagdebiet maakt een meer genuanceerde benadering mogelijk. Afhankelijk van de erosiebestendigheid en stabiliteit van het binnentalud kan meer of minder overslag worden getolereerd en daarmee een lagere of hogere kruinhoogte worden aangehouden. Hierbij moeten we rekening houden met de gewenste begaanbaarheid bij extreme condities. Als een kruin onbegaanbaar is voor lopende dijkwachten kan hij nog wel toegankelijk zijn voor bijvoorbeeld een terreinauto of een vrachtauto. Ook moeten we ermee rekening houden dat in gebieden met bebouwing direct achter de kering het gevoel van veiligheid sterk afneemt bij een grotere overslag.

De relatie tussen golfoverslag en kruinhoogte is behandeld in het Technisch Rapport Golfoploop en golfoverslag bij dijken [17] en in Golfoverslag en krachten op verticale waterkeringconstructies, [18].

#### *Windgolven*

Wanneer de golfrandvoorwaarden niet in het randvoorwaardenboek worden vermeld, dan kan de golfgroei en de golfvorming tot bij de kering globaal handmatig worden berekend met de methode, die is beschreven in [16]. Een nauwkeuriger resultaat is te bereiken met behulp van rekenmodellen, zoals HISWA of SWAN. Het verdient aanbeveling in dat geval de hulp van een specialistische dienst in te roepen.

Als de ligging van een grondconstructie in een voorhaven zodanig geëxposeerd is, dat golfvoorwaarden voor het ontwerp belangrijk zijn, dan moeten golfdoordringingsberekeningen inclusief refractie en diffractie worden gemaakt, bijvoorbeeld met de rekenmodellen PHAROS of DIFFRAC. Ook moet rekening worden gehouden met mogelijke golftransmissie.

### 5.3.7 HYDRAULISCHE BELASTING DOOR SCHEPEN

De belasting door schepen is sterk locatiebepaald. Een afwijking van belang van het gemiddelde jaarlijkse beeld is niet te verwachten. De uitwerking van deze belasting op grondconstructies is bij de beheerder bekend. Stroomsnelheden zullen meestal kleiner zijn dan 2 m/s. De opgewekte golven zijn in het algemeen kleiner dan 0,5 m met een enkele uitschieter naar 1 m met een periode van 2 tot 5 s. In het algemeen zal een scheepsgeïnduceerde belasting dan ook geen rol spelen bij het ontwerp. Mocht een beheerder hierover in twijfel verkeren, dan wordt aanbevolen contact op te nemen met de Helpdesk Waterkeren bij de Dienst Weg- en Waterbouwkunde.

### 5.3.8 GOLFRANDVOORWAARDEN BIJ EEN LAGERE WATERSTAND DAN MHW

In Hydraulische randvoorwaarden voor primaire waterkeringen [2] zijn naast de toetspeilen langs de kust de bijbehorende golven gegeven. Deze combinatie van waterstand en significante golfhoogte is echter afgeleid voor het bepalen van de benodigde kruinhoogte. Voor het beschouwen van andere schademechanismen kunnen andere combinaties, met name die van lagere waterstanden en mogelijk hogere golven, maatgevend zijn. Deze combinaties moeten door nader onderzoek worden vastgesteld. Zo lang deze niet bekend zijn kan ook bij lagere waterstanden de in het hydraulische randvoorwaardenboek gegeven golfhoogte worden aangehouden, met een maximum van  $0,7h$ , waarin  $h$  (in m) de waterdiepte op voorland is.

Dezelfde redenering geldt voor de in rekening te brengen golven bij de veiligheidsbeschouwing met betrekking tot de uitvoering van werken in de zomerperiode. Wanneer de buitenwaterstand een rol speelt in de stabiliteitsanalyse moeten we uitgaan van veilige schattingen. Er moet worden gerekend met een extreme waterstand, gebaseerd op de hoogwaterstatistiek voor de zomerperiode, met een overschrijdingskans gelijk aan de voor het gebied vigerende MHW-overschrijdingsfrequentie.

## 5.4 OVERIGE BELASTINGEN

### 5.4.1 INLEIDING

Overige belastingen kunnen we omschrijven als invloeden of processen die de stabiliteit van de kering bedreigen, anders dan hydraulische of grondmechanische belastingen.

In het volgende komen aan de orde:

- Wind (§ 5.4.2);
- Ijs (§ 5.4.3);
- Verkeer (§ 5.4.4);
- Aardbevingen (§ 5.4.5);
- Bodemonderzoek en explosies (§ 5.4.6);
- Aanvaringen en drijvende voorwerpen (§ 5.4.7);
- Biologische aantasting (§ 5.4.8);
- Chemische aantasting (§ 5.4.9);
- Klimatologische aantasting (§ 5.4.10) en
- Vandalisme en medegebruik (§ 5.4.11).

#### 5.4.2 WIND

Voor windgegevens wordt verwezen naar Hydraulische randvoorwaarden voor primaire waterkeringen [2]. De indirecte invloed van wind op de waterkeringen via waterstand en golven is behandeld in § 5.3.

#### INVLOED WIND

De directe invloed van wind is aanwezig in de volgende gevallen:

- Als voor de buitenteen van de dijk een zandstrand aanwezig is, kan deze aanleiding geven tot het verstuiven en verstikken van grasbekleding. Tevens kunnen open glooiingsconstructies hierdoor inzanden. Dit aspect moet bij het dimensioneren worden meegenomen.
- Begroeiing (bomen en struiken) brengen windbelasting over op grondconstructies. Deze krachten kunnen een nadelige invloed hebben op de stabiliteit van het grondlichaam, met name onder maatgevende omstandigheden. Geval voor geval kan worden nagegaan hoe groot deze krachten zijn, en wat het effect op de grondconstructie zal zijn, ervan uitgaande dat de verankering van de bomen zodanig is dat omwaaien uitgesloten is. In het benedenrivierengebied en langs de kust moet ook het effect van ontworteling c.q. bezwijken van de fundering worden meegenomen; daarbij moeten zodanige voorzieningen worden aangebracht, dat ontworteling niet zal leiden tot schade aan het waterkerende deel van het grondprofiel (zie ook § 2.2 en de Handleiding Constructief Ontwerpen, [19]).
- Grondconstructies liggen bij uitstek op locaties die qua windaanbod zeer geschikt zijn voor solitaire windmolens of in het bijzonder voor windmolenparken. De plaatsing van windmolens binnen de waterkeringzone moet echter zoveel mogelijk worden voorkomen. Alleen bij uitzondering kan plaatsing op, of binnen de stabiliteitzones van het grondlichaam in beeld komen. Daarbij moet worden bedacht, dat draaiende windmolens trillingen veroorzaken met mogelijke gevolgen voor het zettinggedrag en de stabiliteit van de kering.
- Het directe windeffect op golfoverslag (spray) speelt een rol bij zowel taluds als bij verticale constructies. Dit effect is bij het opstellen van de rekenregels in de Technische Rapporten verdisconteerd.

#### 5.4.3 IJS

Nederland behoort niet tot de landen met gevestigde regels en voorschriften over de manier waarop bij het ontwerpen en beoordelen van constructies met ijsbelasting rekening moet worden gehouden. De temperatuur en het zoutgehalte van het water van de Noordzee aan de kust geven geen aanleiding tot het ontstaan van ijsvorming van enige betekenis. In de zeearmen, en zeker in de meren, zijn wel gevallen bekend van significante ijsvorming; de afsluiting van de zeearmen in Zeeland heeft invloed op de mate van ijsvorming langs de Zeeuwse oevers.

Op de rivieren kan ijsvorming leiden tot beïnvloeding van de waterstand op de rivier.

Ondanks de schade die ijs kan veroorzaken, is voor de Nederlandse situatie de kans op inundatie van het achterland toch erg laag. Hiervoor zou de ijsbelasting gepaard moeten gaan met hoge waterstand en zware golfaanval, zodat het grondlichaam onder de beschadigde bekleding verder kan eroderen en bezwijken. Een dergelijke samenloop van omstandigheden is onwaarschijnlijk, omdat de golfhoogte door het ijs op het water sterk wordt beperkt.

#### 5.4.4 VERKEER

In aansluiting op de Handreiking Constructief Ontwerpen [19] moet worden gerekend met een belasting van 400 kN per 12 m1, wat overeenkomt met 13,3 kN/m2 over een breedte van 2,5 m. Op die belasting moet evenzo gerekend worden als er geen rijweg is; ook in die situatie bestaat immers de kans dat in een dreigende calamiteit transport van zwaar materiaal en zwaar materieel noodzakelijk is. Bijlage 2 van [19] geeft aan hoe de belasting moet worden berekend. De berijdbaarheid moet worden afgestemd op het in rekening gebrachte overslag-debiet.

#### 5.4.5 AARDBEVINGEN

De kans op schade aan grondconstructies door een aardbeving is in Nederland zeer klein (< 10-4 per jaar). Omdat aardbevingen en extreem hoog water twee onafhankelijke gebeurtenissen zijn, is de bijdrage aan de kans op falen van grondconstructies geheel te verwaarlozen.

#### 5.4.6 BODEMONDERZOEK EN EXPLOSIES

In de Leidraad bij bodemonderzoek in en nabij waterkeringen [20] is behandeld hoe om te gaan met grondboringen, sonderingen, exploratieboringen, seismisch bodemonderzoek en proefheiningen.

#### 5.4.7 AANVARINGEN EN DRIJVENDE VOORWERPEN

Onder normale omstandigheden zal een aanvaring van een schip met een dijk zelden voorkomen. Maar juist als het stormt, kan een schip stuurloos of op drift raken en de waterkering treffen. De gevolgen zijn op dat moment het grootst. Ten eerste is de kracht die het schip dan op de dijk uitoefent groot. Ten tweede is er een hoge waterstand en zijn er hoge golven, zodat een eventueel opgetreden initiële schade zich snel kan uitbreiden. Hierdoor kan een stranding van een schip een reëel gevaar vormen voor een dijkdoorbraak. Als voorbeeld van een dergelijke aanvaring kan het schip 'Limbourg' dienen, dat in 1955 strandde op de Hondsbossche Zeewering. In het rivierengebied is de situatie tijdens storm minder maatgevend. Als een schip stuurloos is, is de mogelijkheid dat het op een dijk loopt aanwezig. De snelheid en de hoek waarmee het schip de dijk raakt, zijn dan bepalend voor de schade. Overigens zal de scheepvaart op de rivieren bij een zeer hoge waterstand zijn stilgelegd.

De beheerder moet zelf nagaan of in zijn specifieke situatie een combinatie van een scheepsaanvaring met bepaalde hydraulische randvoorwaarden een voor het ontwerp maatgevende situatie oplevert. In dat geval is specialistische ondersteuning gewenst. Een op deze wijze uitgevoerde risicoanalyse is onder andere toegepast bij het ontwerp van de stormvloedkering in de Nieuwe Waterweg. Informatie hierover is beschikbaar bij de Bouwdienst van de Rijkswaterstaat, hoofdafdeling Waterbouw te Utrecht. Drijvend vuil en wrakhout hebben in het algemeen te weinig massa om serieuze schade aan een harde bekleding te veroorzaken; beschadiging van grasmatten is wel mogelijk.

#### 5.4.8 BIOLOGISCHE AANTASTING

Waterplanten en dieren kunnen zich op en tussen de bekleding hechten maar richten hier in het algemeen weinig schade aan. Wel kunnen de fysische eigenschappen veranderen. De doorlatendheid van open bekledingen kan verminderen. Aangroei op een gladde bekleding kan de ruwheid vergroten waardoor de belasting door golven en stroming kan toenemen. Bitumineuze bekledingen zijn licht gevoelig voor aantasting door uitwerpselen van schapen en runderen. Dieren die gangen of holen graven, zoals ratten, muskusratten en mollen, kunnen een talud ondermijnen of een afdekkende kleibekleding aantasten of doorgraven. Dit laatste kan tot gevolg hebben dat de freatische lijn in het grondlichaam hoger komt te liggen.

Ook is het niet ondenkbaar dat zand uit de kern zal wegspoelen. Gevaar voor ondermijnende activiteiten van de muskusrat komt vooral voor bij langs de dijken gelegen waterpartijen, zoals wielen en strangen, en bij schaar dijken.

Niet goed gedoseerde beweiding kan schade aan grastaluds veroorzaken.

#### **5.4.9 CHEMISCHE AANTASTING**

Constructiematerialen kunnen door oxidatie, zout water en door stoffen die in vervuild water voorkomen, worden aangetast. Bitumineuze bekledingen zijn gevoelig voor olieverontreiniging. Gras en geotextielen zijn gevoelig voor chemische aantasting.

Aandacht moet worden besteed aan combinaties van belastingen. Zo kan een betonbekleding worden aangetast door erosie, waardoor eventuele wapening bereikbaar wordt voor zuurstof, water en daarin meegevoerde verontreinigingen met corrosie als gevolg. Dit geldt ook voor kabels in blokkenmatten.

#### **5.4.10 KLIMATOLOGISCHE AANTASTING**

Opgesloten water in voegen, spleten, scheuren en gaten zal bij bevriezing uitzetten en kan daardoor constructiematerialen aantasten. Door langdurige droogte kan een te dunne kleilaag op een talud zodanig uitdrogen dat een grasmat hier ernstige schade van ondervindt. Bij uitdroging van klei ontstaan krimpscheuren en neemt de erosiebestendigheid van de klei af. Door deze structuurvorming bestaat er verschil in de erosiebestendigheid van kleilagen (ook onder steenbekledingen) op zuid- en noordzijde door verschillende temperatuurontwikkeling en vochtigheid).

Geotextielen, kunststofschermen, enzovoorts moeten worden beschermd tegen ultraviolette straling.

#### **5.4.11 VANDALISME EN MEDEGEBRUIK**

Een bekleding moet zo veel mogelijk bestand zijn tegen aantasting door 'recreanten'. Sportvissers vergeten af en toe stenen, die ze uit een zetting halen, weer terug te zetten. Asphaltbekledingen kunnen slecht tegen het stoken van vuurtjes. In de nabijheid van woonwijken, maar ook elders, worden soms bestortingen (deels) opgeruimd door spelende kinderen of tuinbezitters. Voor gemakkelijk toegankelijke plaatsen is het daarom aan te bevelen bij het bepalen van de zwaarte van een bekleding tevens uit te gaan van het 'niet-te-tillen' criterium.

Bij taludtrappen en andere plaatsen waar veel mensen de dijk op en af gaan ontstaan kale plekken in de grasmat. Hier kunnen fietsgoten, doorgroei stenen of plaatselijke bekledingen worden toegepast om dit tegen te gaan.

# 6

## FAALMECHANISMEN DIJKEN

### 6.1 ALGEMEEN

Voor de beoordeling van waterkeringen is het belangrijk onderscheid te maken tussen falen en bezwijken. Er is sprake van falen als de waterkering één of meer functies niet meer vervult. Met bezwijken wordt verlies van samenhang of grote geometrieverandering aangeduid. In de Leidraad zee- en meerdijken [21] worden de volgende definities voor de begrippen ‘bezwijken’ en ‘falen’ gegeven:

- **Bezwijken:** het optreden van grote vervormingen in een constructie waardoor de samenhang van de constructie verloren gaat;
- **Falen:** het niet (meer) voldoen aan vastgestelde functionele criteria.

Een waterkering kan falen zonder dat er sprake is van bezwijken. Een voorbeeld hiervan is wanneer een dijktraject niet meer voldoet aan de gestelde eisen voor het geometrische profiel. De dijk is bijvoorbeeld te laag. Dit hoeft niet te betekenen dat de dijk daarom bezwijkt of is bezweken.

Het onderscheid tussen falen en bezwijken wordt lastiger als de faalcriteria worden ontleend aan sterkte-eigenschappen van de constructie. Sterkte-eigenschappen van de constructie kunnen daarbij gerelateerd zijn aan de belasting. Van belang is te weten dat de manier waarop het waterkerende vermogen van de constructie tekort schiet ‘faalmechanisme’ wordt genoemd. Een faalmechanisme wordt gedefinieerd als een werking op een waterkering waaraan een functionele eis is verbonden. In de volgende paragrafen worden de faalmechanismen van dijken beschreven.

### 6.2 KRUINHOOGTE

#### 6.2.1 INLEIDING

Voor de bepaling van de aanleghoogte van grondconstructies zijn niet alleen de mechanismen overlopen en golfoverslag van belang, maar ook de zetting en de te verwachten vervormingen door kruip van de grond. De aanleghoogte is de hoogte van de kruin onmiddellijk na het gereedkomen van de aanleg of de verbetering van de kering.

In § 6.2.2 wordt aandacht besteed aan de aanleghoogte van de kruin van een dijkprofiel. De paragrafen 6.2.3 en 6.2.4 behandelen respectievelijk zetting en horizontale deformaties. In § 6.2.5 wordt ingegaan op de aanleghoogte van de kruin van bijzondere constructies.

#### 6.2.2 DE AANLEGHOOGTE VAN DE KRUIJN

De aanleghoogte van de kruin wordt enerzijds bepaald door maatgevende hoogwaterstanden, hoogwaterstijging, lokale waterstandverhogingen, golfoverslaghoogte en anderzijds door de sterkte-eigenschappen van de grond. Bovendien spelen de geometrie van het buitentalud en de tijd een relevante factor bij de kwantificering van de aanleghoogte. Meer informatie hierover staat in [21] en in [16].

### 6.2.3 ZETTING

Als gevolg van de aanleg of de verhoging van een waterkering treden twee soorten vervormingen op:

- Zetting (of verticale vervormingen), als gevolg van zetting van de ondergrond en klink van het ophoogmateriaal;
- Horizontale vervormingen in, onder en naast de dijk; de vervormingen kunnen leiden tot belasting van constructies in en nabij de waterkering zoals leidingen en funderingen van gebouwen.

Zetting kan als een faalmechanisme van de waterkering worden beschouwd als wordt bedacht dat bij een te grote zetting van de kruin in de loop van de tijd overlopen kan ontstaan. Of er kan een grotere hoeveelheid overslag optreden dan waarop de sterkte van het binnentalud is gedimensioneerd.

#### KRUIN

De kruindaling van grondconstructies zal niet als gemiddelde bekend moeten zijn, maar als maximaal bedrag van een aantal punten, omdat geen enkel punt beneden de dijktafelhoogte mag dalen. Daarom zouden we in principe moeten rekenen met de karakteristieke waarden voor de samendrukkingcoëfficiënten en de bijbehorende materiaalfactoren.

Indien de zettingen gedurende de uitvoeringsperiode worden geobserveerd door middel van zakbaken, zodat het mogelijk is de in de ontwerpfase berekende overhoogte gedurende de uitvoeringsfase bij te stellen, mag met de rekenkundige gemiddelde waarde van de samendrukkingconstante worden gewerkt.

Het profiel van grondconstructies moet gedurende een onderhoudstermijn van 50 jaar in stand blijven. Daar zetting een tijdsafhankelijk proces is, dienen de zettingberekeningen daarop te worden afgestemd. De totale zetting wordt berekend, dat wil zeggen: de primaire zetting die optreedt gedurende de hydrodynamische periode plus de secundaire zetting over een periode van 50 jaar. In de berekeningen moet het extra gewicht worden verdisconteerd van de overhoogte die nodig is om de voorspelde zetting te compenseren. Een deel van de zetting treedt al op tijdens de uitvoering. Afhankelijk van de duur van de consolidatie (de hydrodynamische periode) en de fasering van de uitvoering en de eventueel toegepaste grondverbeteringstechniek kan hier in de ontwerpfase een verwachting voor worden uitgesproken.

#### GLOOIING EN BERMEN

Behalve de zetting van de kruin is het ook van belang inzicht te hebben in de te verwachten zetting van andere punten in het dwarsprofiel van het grondlichaam, denk bijvoorbeeld aan zetting van de glooiing en bermen. Bij de aanleg van een nieuwe grondconstructie op een maagdelijk vlakke ondergrond speelt het probleem dat in ieder punt van het dwarsprofiel de belastingtoename op de ondergrond (en die bepaalt mede de zetting) anders is. Bij grondverbetering is het probleem nog complexer, aangezien het nieuwe profiel naast en gedeeltelijk over het oude profiel wordt gelegd. In die situatie is in ieder punt van het dwarsprofiel behalve de belastingtoename ook de initiële spanningstoestand anders. In de berekeningen kan hiermee rekening worden gehouden.

Voor de bepaling van het tweedimensionale gedrag van grond is de eindige-elementenmethode een nuttig hulpmiddel. Het gebruik van een eindige-elementen-model vereist ervaring en geotechnische kennis voor wat betreft de parameterkeuze, de schematisering en de interpretatie van de resultaten.



### RESTZETTING

Naast de totale zetting van de kruin, is met name inzicht in de te verwachte restzetting van belang. Restzetting is de te verwachte zetting met inbegrip van kruip na het gereedkomen van de dijkverzwaring. Zeker bij een snelle uitvoeringstermijn kan deze restzetting groot zijn. Ongelijke restzetting in het dwarsprofiel van de glooiing zal in het algemeen zeer ongewenst zijn (denk bijvoorbeeld aan spleetbreedte en klemkracht tussen de harde elementen van de bekleding).

In voorkomende gevallen kan afhankelijk van de mogelijkheden het toepassen van verticale drainage (versnelling van het zettingproces) of het verlengen van de uitvoeringsperiode worden overwogen. Zelfs kan de tracékeuze door dit aspect worden beïnvloed. Een buitenwaartse versterking met een geheel nieuwe glooiing is in dit verband problematischer dan een binnenwaartse versterking waarbij ter plaatse van de bestaande glooiing geen of nauwelijks zetting plaatsvindt.

De werkelijke zettingen kunnen afwijken van de berekende zettingen. Het is daarom zinvol de zettingen vanaf het aanbrengen van de ophogingen te blijven volgen met behulp van zakbaken. Het is dan gebruikelijk om kort voor het aanbrengen van de laatste ophoging de zetting opnieuw te voorspellen, maar nu aan de hand van de verkregen zakbaakgegevens.

Voor het geven van een juiste zettingprognose zijn naast de zakbaakgegevens ook gegevens nodig over het verloop van de waterspanningen.

### KLINK

De te verwachten klink van vers aangebrachte grond is slechts bij benadering te bepalen. Voor de klink van klei wordt een waarde van 10% van de ophoging aanbevolen. Bij zorgvuldige uitvoering en verdichting kan deze waarde worden teruggebracht tot 5%. Bij toepassing van ongerijpte klei dienen veel hogere percentages te worden aangehouden. Overigens valt het gebruik van niet volledig gerijpte klei sterk te worden ontraden, bijvoorbeeld in verband met ongewenste scheurvorming (zie verder Technisch Rapport Eisen klei voor dijken [9]). Voor de klink van zandophogingen wordt dikwijls een waarde van 5% gehanteerd, maar bij een goede verdichting is deze klink verwaarloosbaar klein, zeker in vergelijking met de zettingen van de ondergrond.

Als het zand door middel van spuiten in het werk is gebracht (en niet meer wordt geroerd) kan van een klinkpercentage van enkele procenten worden uitgegaan.

### BODEMDALING

Bodemdaling treedt op door oxidatie van organische bestanddelen in bijvoorbeeld veen. Een bijzondere vorm van verticale vervorming kan bodemdaling door wateronttrekking (bijvoorbeeld het aanpassen van het polderpeil) of winning van delfstoffen zijn. Effecten hiervan kunnen dermate grote vormen aannemen dat, als dit is te voorzien, het noodzakelijk is deze mee te nemen bij de vaststelling van de aanleghoogte van het grondlichaam. Een concreet geval is de bodemdaling in de Provincie Groningen. Hier vindt sinds 1963 aardgaswinning plaats waarvan de invloed (in de vorm van bodemdaling) zich voordoet tot onder de zeedijk. Gebaseerd op de meest recente gasproductieverwachting voor het Groningerveld, wordt voorzien dat omstreeks het jaar 2050 de bodemdaling als gevolg van gaswinning in het centrum van het veld een waarde in de orde van 40 cm zal bereiken. Ter plaatse van de zeewering betekent dit bijvoorbeeld bij Delfzijl een zakking van circa 30 cm.

De prognoses worden per 5 jaar op grond van metingen geactualiseerd en openbaar gemaakt. De prognoses houden géén rekening met andere vormen van maaiveld-daling. Als bijvoorbeeld een polderpeil wordt verlaagd om de gevolgen van bodemdaling voor de drooglegging van landbouwgronden te compenseren, wordt met de extra daling die daarvan het gevolg is, géén rekening gehouden. Hoewel meestal van geringe invloed wordt erop gewezen dat De bodemdaling heeft, hoewel meestal van geringe invloed, óók consequenties voor de stabiliteit van het grondlichaam bij maatgevende omstandigheden.

#### **6.2.4 HORIZONTALE VERVORMINGEN**

Ten gevolge van de aanleg of verhoging van een grondconstructie treden niet alleen zettingen van de ondergrond op, maar ook horizontale grondverplaatsingen in, onder en naast het grondlichaam. De horizontale deformaties rondom het IJsselmeer, in het bovenrivierengebied en langs de zee-kust spelen een wat minder belangrijke rol dan in het benedenrivierengebied waar de voorkomende klei- en veenpakketten in het algemeen slapper en dikker zijn. Bovendien komt minder bebouwing voor in de directe nabijheid van de waterkeringen.

In de literatuur zijn verschillende analytische relaties voorhanden voor horizontale verplaatsingen in een lineair elastisch geval onder invloed van een strookvormige belasting, zoals een dijklichaam die druk uitoefent op de ondergrond. Aanbevolen wordt echter de horizontale verplaatsingen te berekenen met behulp van elementenprogramma's, waarin het elasto-plastische gedrag van grond is verdisconteerd.

Horizontale verplaatsingen kunnen invloed hebben op reeds aanwezige constructies en objecten.

#### **6.2.5 DE AANLEGHOOGTE VAN DE KRUIJN BIJ BIJZONDERE CONSTRUCTIES**

Het vertalen van het overslagdebiet in een aanleghoogte kan bijzonder complex van aard zijn bij bijzondere constructies. Hoofdstuk 3 wijst hierin de weg voor taluds en in beperkte mate voor verticale wanden. Meer informatie is te vinden in de Leidraad Kunstwerken [22]. In veel gevallen zal specialistische hulp, eventueel aangevuld met modelonderzoek, nodig zijn.

### **6.3 MACROSTABILITEIT**

#### **6.3.1 INLEIDING**

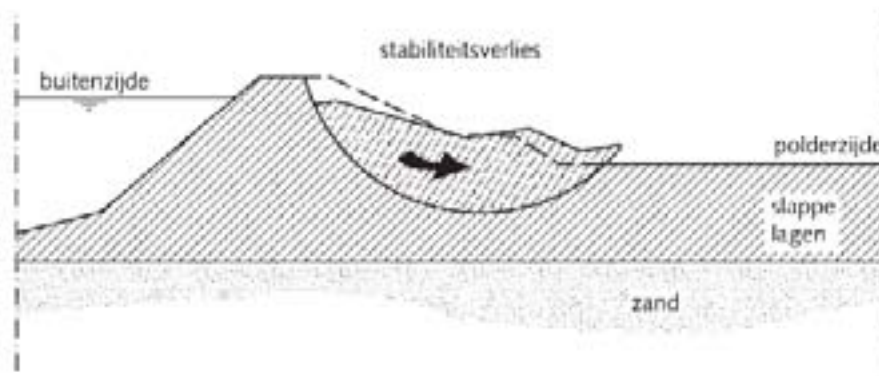
Onder de stabiliteit van een grondlichaam wordt in deze paragraaf verstaan: de weerstand tegen afschuiving van grote delen van het grondlichaam langs rechte of gebogen glijvlakken, dan wel het evenwichtsverlies door het ontstaan van grote plastische zones. Met andere woorden: 'Het vermogen om belastingen te weerstaan zonder functieverlies ten gevolge van te grote vervormingen'.

Voor analyse van de macrostabiliteit zijn de volgende gegevens nodig:

- Geometrie, dat wil zeggen het ingemeten dwarsprofiel van de waterkering;
- Laagopbouw van de ondergrond en het dijklichaam;
- Volumieke gewicht en de (representatieve) sterkte-eigenschappen voor elke laag;
- Belasting: maatgevende ligging van de freatische lijn en waterspanningverloop in de ondergrond.

FIGUUR 6.1

AFSCHUIVING BINNENTALUD



De sterkte-eigenschappen en de waterspanningen in en onder grondconstructies bepalen de weerstand tegen afschuiven.

### 6.3.2 NADERE BESCHOUWING MACROSTABILITEIT

#### ALGEMEEN

Met macrostabiliteit wordt het afschuiven van grote delen van een grondlichaam bedoeld. Dit afschuiven gebeurt langs rechte of gebogen glijvlakken dan wel door plastische zones, waarin door overbelasting geen krachterevenwicht meer aanwezig is.

De mate van vervorming speelt een belangrijke rol, vanwege de vaak grote stijfheidverschillen tussen enerzijds de bekleding en de grondlagen daaronder en anderzijds de grondlagen achter de kering. Voor de stabiliteitsbeoordeling staan twee verschillende wegen open:

- A. Glijvlakberekeningen
- B. Eindige-elementenmethode

ad A. In de adviespraktijk wordt veelvuldig gebruik gemaakt van glijvlakberekeningen voor een min of meer routinematige beoordeling van bestaande of nieuw ontworpen grondprofielen.

Deze aanpak leidt in normale situaties tot een voldoende betrouwbaar resultaat en is erg aantrekkelijk door de relatieve eenvoud van het rekenmodel in vergelijking met een eindige-elementenmethode.

Ad B. Bij een eindige-elementenmethode moet in elk punt van de grond de spanningstoestand worden bepaald. Vanwege het statisch onbepaalde karakter van grondconstructies moeten hierbij ook de vervormingen van de grond worden betrokken. De spanningsvervormingsrelaties van de grond moeten dus bekend zijn. Het voordeel van deze benadering is, dat de berekening zelf de zone aangeeft waar het potentiële glijvlak zich ontwikkelt, terwijl het ook een vrij volledig inzicht geeft in de spanningen en vervormingen in het grondmassief.

FIGUUR 6.2

## MACRO-INSTABILITEIT BINNENTALUD

**BELASTINGGEVALLEN**

Voor de macrostabiliteit zijn verschillende belastinggevallen te onderscheiden (zie stroomschema in figuur 6.3). Zo dient zowel de stabiliteit van het binnentalud als de stabiliteit van het buitentalud te worden beschouwd. Een ander onderscheid is te maken in de stabiliteit in de bouwfase en de stabiliteit in de eindfase.

**STABILITEIT BINNENTALUD**

Voor de stabiliteit van het binnentalud is of de situatie bij maatgevend hoogwater of de situatie bij extreme neerslag bepalend. Het tijdsafhankelijke karakter van de grondwaterstroming kan in rekening worden gebracht. Met name langs de kust en in het benedenrivierengebied kan dit van grote invloed zijn.

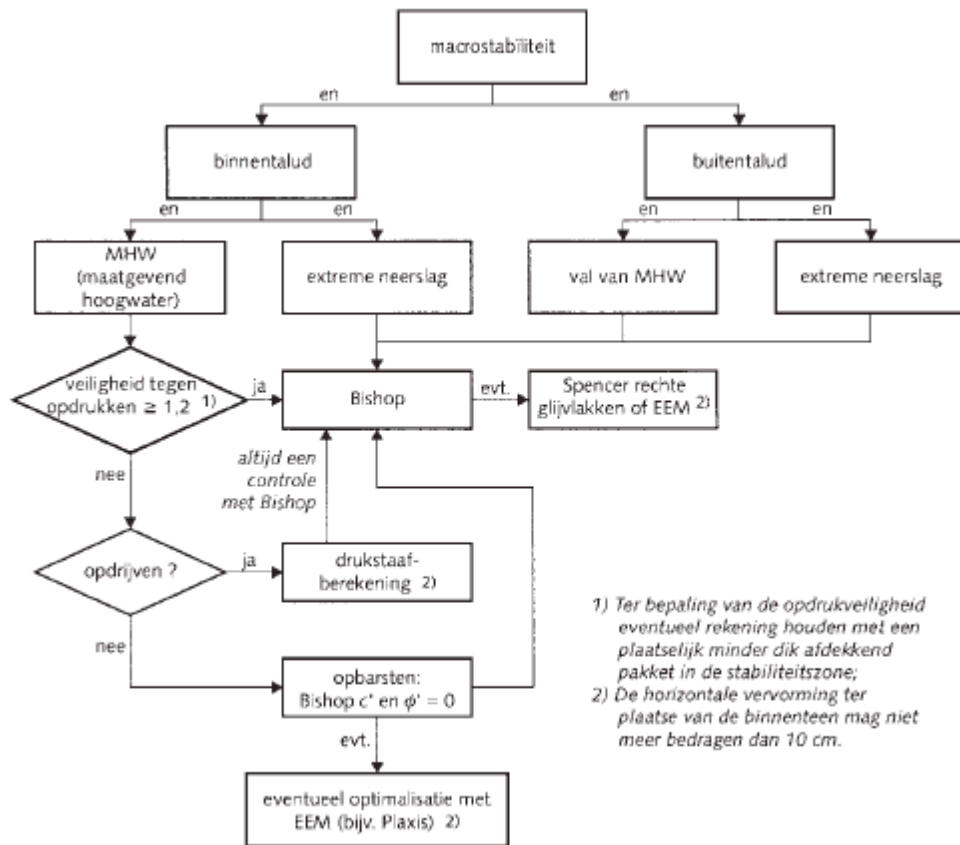
Bij het beschouwen van de macrostabiliteit van het binnentalud tijdens de situatie van maatgevend hoogwater moet onderscheid worden gemaakt tussen het geval dat afdekkende klei- en veenlagen op een ondergrond door hoge potentialen in het watervoerende pakket al dan niet worden opgedrukt

**STABILITEIT BUITENTALUD**

Voor de stabiliteit van het buitentalud is een ongunstige combinatie van hoge grondwaterstand in de dijk bij een snelle daling van de waterstand voor de dijk, of de situatie bij extreme neerslag bepalend. De relatie tussen de macrostabiliteit van het buitentalud enerzijds en zettingvloeiing en afschuiven van de vooroever anderzijds wordt behandeld in 6.7.

FIGUUR 6.3

STROOMSCHEMA BEOORDELING MACROSTABILITEIT



### STABILITEIT TIJDENS DE UITVOERING

Naast beoordeling van een dijkversterkingontwerp voor de volledig geconsolideerde eindsituatie, moet ook de stabiliteit gedurende de verschillende uitvoeringsfasen worden berekend. In de uitvoeringsfase zal de veiligheid tegen dijkdoorbraak als gevolg van instabiliteit voldoende gewaarborgd moeten zijn. Het beoogde ontwerp zal technisch realiseerbaar moeten zijn. In deze fase zal ook moeten worden nagegaan in welk tempo en in welke dikte de diverse lagen van de ophoging kunnen worden aangebracht.

Men moet zich realiseren dat de eindsituatie, zijnde 100% consolidatie, pas na lange tijd wordt bereikt. Gedurende een langere periode heeft de waterkering dus een lagere veiligheid.

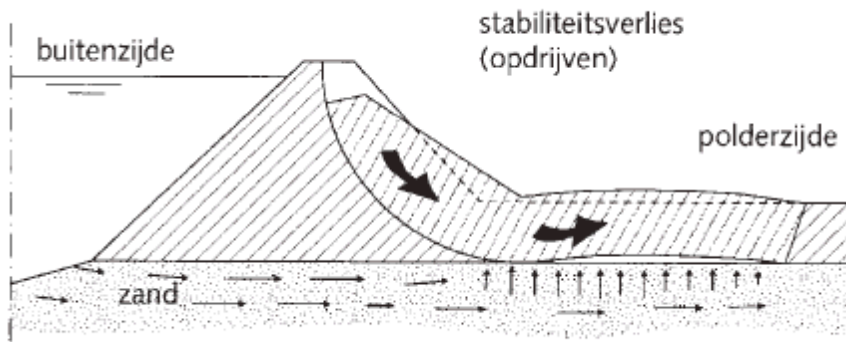
### STABILITEIT BIJ OPDRIJVEN EN OPBARSTEN

Bij het beschouwen van de macrostabiliteit van het binnentalud in de situatie van maatgevend hoogwater moet worden gecontroleerd of afdekkende klei- en veenlagen door hoge potentialen in een onderliggende, watervoerende zandlaag al dan niet worden opgedrukt.

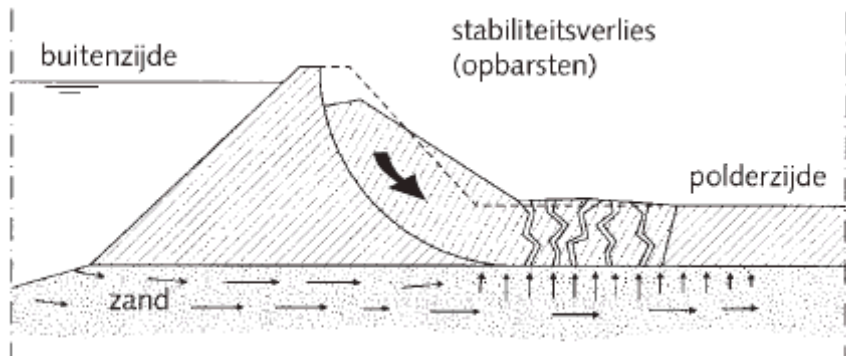
Indien rekening moet worden gehouden met opdrukken (als de veiligheid tegen opdrukken kleiner is dan 1,2) dient onderscheid te worden gemaakt tussen:

- Opdrrijven (figuur 6.4). Bij opdrukken kan zich de situatie voordoen dat het gehele afdekkende pakket gaat drijven (opdrrijven);
- Opbarsten (figuur 6.5). Bij opdrukken kan zich ook de situatie voordoen dat de laag ten gevolge van de overdruk kapot gaat (opbarsten). Opbarsten kan optreden bij relatief geringe dikte van het slappe lagenpakket.

FIGUUR 6.4 OPDRIJVEN



FIGUUR 6.5 OPBARSTEN

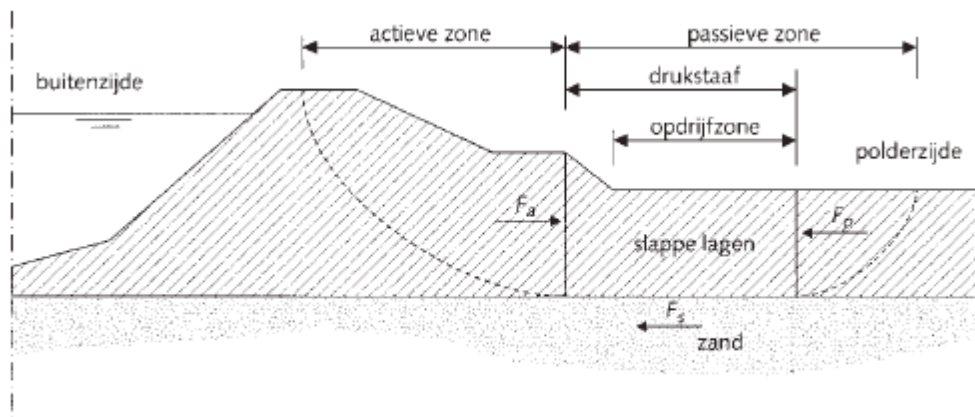


ad a. We beschouwen een situatie met 'opdrifven' (figuur 6.4). In een normale situatie, met lage waterstand, ontleent het grondlichaam binnenwaarts een zekere steun aan het grondlagenpakket. Bij hoogwater zal dit grondlagenpakket gaan opdrifven. De schuifweerstand in de actieve zone zal dan, als residuele schuifsterkte, vrijwel geheel zijn gemobiliseerd. De horizontale kracht in figuur 6.6 die door de potentieel afschuivende grondmoot wordt uitgeoefend,  $F_a$ , wordt in het passieve gebied enerzijds door schuifspanningen,  $F_s$ , overgedragen aan het pleistoceenzand, en anderzijds door de horizontale gronddruk,  $F_p$ , buiten de opdrifzone tegengewerkt. Bij hoge waterstanden neemt de opwaartse potentiaal in het zandpakket toe en vermindert de korrelspanning op het scheidingsvlak tussen slappe lagen en zand, en na enige tijd ook in de onderste zone van de slappe lagen zelf. Hierdoor neemt de maximaal mobiliseerbare schuifweerstand  $F_s$  in deze zone af.

Bij plaatselijk opdrifven gaat de weerstand op het scheidvlak geheel verloren: de opgedrukte grondlaag achter de dijk gaat zich gedragen als een slappe 'drukstaaf', omdat de horizontale schuifspanningen niet meer kunnen worden afgedragen naar de zandondergrond. Er moet dan een extra horizontale kracht worden gemobiliseerd in het achter de opdrifzone gelegen gebied.

FIGUUR 6.6

BESCHOUWDE KRACHTEN IN DRUKSTAAFMODEL



Voor alle duidelijkheid: tot deze categorie behoort ook de situatie waarin weliswaar van opdrijven nog geen sprake is, maar waar wel op het contactvlak tussen het slappe lagenpakket en het diepe zand door potentiaalstijging een aanzienlijke reductie optreedt van de schuifweerstand.

Het berekenen van de stabiliteit volgens het drukstaafmodel is in het jaar 2000 vernieuwd. Het nieuwe model sluit perfect aan bij de methode Bishop. Voor een situatie met een drukstaaf lengte die naar nul gaat levert het nieuwe model exact de Bishop-stabiliteitsfactor [23].

ad b. Bij opbarsten van de aan de binnenzijde aanwezige klei- en/of veenlagen kunnen we er vanuit gaan dat de sterkte van de opgebarsten laag ernstig is aangetast. Een normale Bishop analyse met  $c = 0$  en  $\varphi = 0$  in de opbarstzone is dan een veilige benadering. Aan de passieve zijde wordt dan alleen rekening gehouden met het eigen gewicht van deze lagen als tegenwerkende kracht. De schuifsterkte wordt in het passieve deel van het glijvlak gelijk aan nul. Deze benadering levert een veilig, maar wel enigszins overgedimensioneerd ontwerp op.








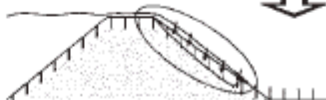
## 6.4 MICROSTABILITEIT

### 6.4.1 INLEIDING

Microstabiliteit is de stabiliteit van grondlagen van zeer beperkte dikte aan het oppervlak van het binnentalud onder invloed van door een grondlichaam stromend grondwater. Bij microstabiliteit komt de bedreiging voor de stabiliteit van binnen: eventuele problemen worden veroorzaakt door een hoge freatische lijn in het grondlichaam. Dit is anders dan de stabiliteit van het binnentalud onder invloed van golfoverslag (zie paragraaf 6.5); hier komt de bedreiging van buiten: door infiltrerend water ontstaat een verzadigde toplaag die vanwege het extra gewicht van het water af kan schuiven. Golfoverslag en microstabiliteit zijn daarom verschillende faalmechanismen. De modellering van beide is wel deels vergelijkbaar, maar niet hetzelfde (zie figuur 6.7).

FIGUUR 6.7

VERGELIJING MICROSTABILITEIT BIJ GOLFOVERSLAG

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

Bij microstabiliteit wordt gelet op zeer plaatselijke instabiliteiten, die echter ook een inleiding tot bezwijken van de gehele waterkering kunnen vormen. De term microstabiliteit duidt erop dat hier min of meer tot op het niveau van evenwicht van korrels wordt beoordeeld. Dit in tegenstelling tot de macrostabiliteit, waarbij het evenwicht van een grondlichaam of een groot gedeelte daarvan wordt bekeken. De term microstabiliteit duidt echter niet op een minder belangrijk facet van het grondlichaam. Ook micro-instabiliteit kan tot het bezwijken van een grondlichaam leiden.

De micro-instabiliteiten die kunnen optreden als gevolg van grondwaterstroming door grondconstructies zijn:

- Afdrukken van de binnentaludbekleding door waterdrukken in de kern van het grondlichaam (zie figuur 6.7); dit kan optreden als een minder doorlatende toplaag op een doorlatende kern ligt, bijvoorbeeld een toplaag van klei op een kern van zand (§ 6.4.2);
- Afschuiven van de binnentaludbekleding (of een combinatie van afschuiven en afdrukken van de binnentaludbekleding) door waterdrukken in de kern van het grondlichaam; dit kan optreden als een minder doorlatende toplaag op een doorlatende kern ligt, bijvoorbeeld een toplaag van klei op een kern van zand (§ 6.4.2);
- Afschuiven van de binnentaludbekleding (zie figuur 6.7) als gevolg van het stijgen van de freatische lijn in de dijk. Uitgegaan wordt van een uniforme opbouw van het dijklichaam (een zandkern met een zandige toplaag) en horizontaal uittredend grondwater bij taluds boven water (§ 6.4.3) en loodrecht uittredend grondwater bij taluds onder water (§ 6.4.4).



- Uitspoelen van gronddeeltjes uit het binnentalud door uittredend grondwater (figuur 6.7); dit kan optreden als de toplaag een ongeveer even grote doorlatendheid heeft als de kern van het grondlichaam, bijvoorbeeld een zandige toplaag op een zandkern. Uitgegaan wordt van horizontaal uittredend grondwater bij taluds boven water en loodrecht uittredend grondwater bij taluds onder water.

Bij dijken met een kleikern speelt microstabiliteit geen rol (zie figuur 6.7).

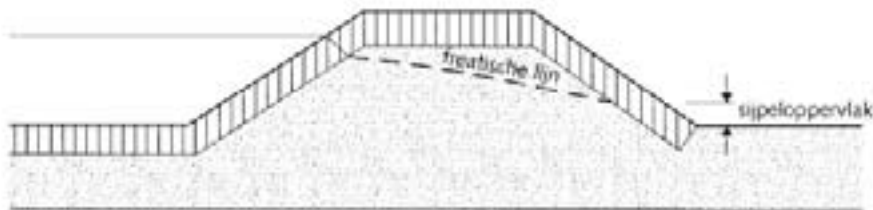
#### 6.4.2 ZANDDIJK MET EEN TOPLAAG VAN KLEI

Bij de beoordeling van dit type dijk moeten we twee zaken tegen elkaar afwegen, te weten de druk in het grondwater tegen de binnentaludbekleding en daar tegenin werkend het gewicht van de binnentaludbekleding. Bij het bepalen van de waterdrukken onder een taludbekleding komt het er in de gevolgde beschouwing op neer dat de te verwachten freatische lijn in het grondlichaam wordt bepaald. Vervolgens wordt beneden het punt waar de freatische lijn de binnenbekleding raakt een hydrostatisch drukverloop verondersteld. Deze laatste aanname bevat enkele vereenvoudigingen, zoals het weglaten van stromingsdrukken. Deze vereenvoudiging wordt toelaatbaar geacht.

Als we uitgaan van een initiële toestand waarbij buiten- en binnenwaterstand gelijk zijn, kan het volgende model worden geschetst. Op een zeker tijdstip treedt een plotselinge, langdurige verhoging van de buitenwaterstand op. De positie van de freatische lijn in het grondlichaam zal nu veranderen, omdat door de buitentaludbekleding en door de ondergrond water naar binnen dringt. Door snelheids- en geometrie-effecten zal de freatische lijn aan de buitentaludzijde het snelst stijgen. Vervolgens zet deze stijging zich door naar het binnentalud (zie figuur 6.8).

FIGUUR 6.8

OPDRUKKEN EN AFSCHUIVEN VAN BINNENBEKLEDING



Als de freatische lijn onder het binnentalud zoveel stijgt dat zij boven het binnentalud maaiveld uitstijgt, kan de binnentaludbekleding afgedrukt worden. Hierbij gaan we er van uit dat door de binnentaludbekleding geen noemenswaardige grondwaterstroming plaatsvindt. Onder deze aanname zal de binnentaludbekleding worden opgedrukt als de hydrostatische drukken in het grondlichaam groter worden dan het gewicht van de bekleding. Na het opdrukken van de bekleding kunnen van onder de bekleding aanwezige gronddeeltjes uitspoelen.

Een tweede bezwijkmechanisme dat bij dit type waterkering moet worden gecontroleerd is afschuiven van de binnenbekleding. Als gevolg van de hoge waterstand ontstaat een waterdruk onder de minder doorlatende binnenbekleding. Hierdoor neemt de effectieve korrelspanning (gronddruk min de waterdruk) op het grensvlak tussen kern en binnenbekleding af, ook al is de waterdruk nog niet zo groot dat afdrukken van de binnenbekleding aan de orde is. Als gevolg van een verminderde effectieve korrelspanning kan minder schuifweerstand

worden geleverd. De binnenbekleding heeft een gewichtscapcomponent evenwijdig aan het binnentalud. Als de waterspanningen onder de bekleding te hoog oplopen kan een afschuiving van de binnenbekleding het gevolg zijn.

#### 6.4.3 ZANDDIJK MET ZANDIGE TOPLAAG

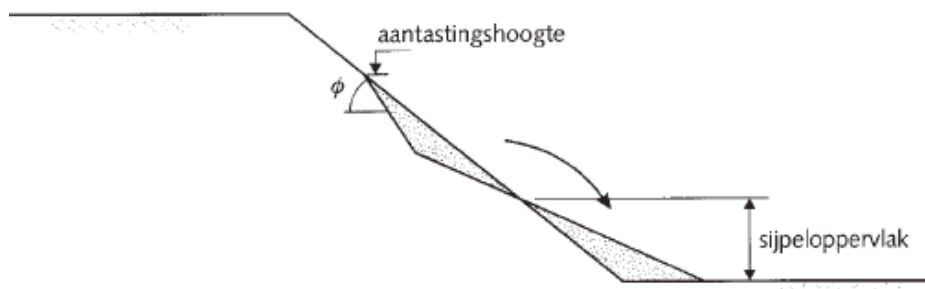
Bij dit type waterkering moet worden gekeken naar evenwicht loodrecht op het talud en evenwicht evenwijdig aan het talud. Evenwicht loodrecht op het talud wordt ook wel uitspoelen van gronddeeltjes genoemd. Evenwicht evenwijdig aan het talud gaat over ondiepe glijvlakjes in de zandige toplaag. Het uitspoelen van gronddeeltjes bij grondconstructies doet zich veelal voor aan de onderzijde van het binnentalud en wel tijdens of kort na hoge buitenwaterstanden. In de praktijk treedt dit verschijnsel alleen op bij granulaire, ofwel niet-cohesieve materialen. Bij cohesieve materialen zullen eerder diepere afschuivingen ontstaan.

Het optreden van micro-instabiliteit hoeft niet onmiddellijk tot verlies van de waterkerende functie van het grondlichaam te leiden. Het weggespoelde materiaal zal op enige afstand worden afgezet. De uitspoeling zal bovendien (althans theoretisch) beperkt blijven tot die zone waar niet aan het stabiliteitscriterium wordt voldaan. Voor bovenwatertaluds kunnen we een globale schatting van het schadeprofiel maken onder de volgende aannamen (zie figuur 6.9):

- Het materiaal kan niet hoger dan het oorspronkelijke sijnpeoppervlak uitspoelen;
- Het weggevloeide materiaal wordt afgezet onder een evenwichtshelling van circa 1V:5H;
- Het hoger gelegen materiaal kan wel bijzakken onder een helling van het natuurlijke talud; hierbij is een volume-evenwicht noodzakelijk.

FIGUUR 6.9

SCHADEPROFIEL



Het grondlichaam faalt door uitspoelen van gronddeeltjes wanneer de aantastingshoogte tot een minimale kruinbreedte voortschrijdt. De dijkbeheerder beoordeelt de grootte van dit minimum of de mate waarin erosie mag toenemen.

Een tweede bezwijkmechanisme bij dit type dijk is het ontstaan van ondiepe glijvlakjes in de zandige toplaag (evenwicht evenwijdig aan het talud). Onder invloed van de stromingsdruk van het water dat bij het oppervlak uittreedt, neemt de effectieve korreldruk van de gronddeeltjes af. Dit kan leiden tot het ontstaan van kleine, ondiepe glijvlakken.

Bij dit type dijk is de richting van de grondwaterstroming van belang. Bij taluds boven water treedt het grondwater vrijwel horizontaal uit het binnentalud. Bij taluds onder water (sloten, watergangen achter de dijk) liggen de equipotentiaallijnen vrijwel evenwijdig aan het talud en treedt het water loodrecht op het talud uit. Dit uit zich in een verschil in rekenregels voor taluds boven en taluds onder water.

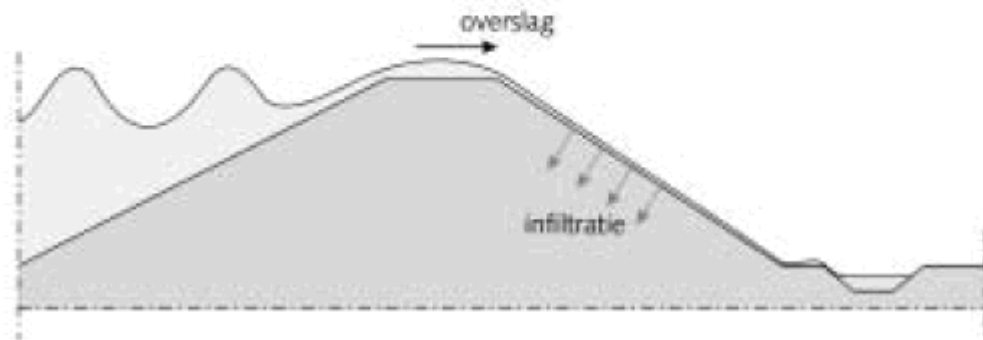
## 6.5 STABILITEIT BIJ OVERSLAG

### 6.5.1 INLEIDING

Overslag is niets anders dan water dat bij een hoge waterstand door van golven over de kruin van het grondlichaam slaat. Het water dringt in grondconstructies binnen: 'infiltreren' (figuur 6.10). Infiltratie kan leiden tot afschuiven van het binnentalud.

Bij de watersnoodramp van 1953 zijn veel Zeeuwse dijken bezweken door afschuiven van het binnentalud onder invloed van overslag. Het is daarom in de huidige praktijk gebruikelijk de kruinhoogte voldoende hoog te kiezen zodat er weinig overslag op zal treden, ook bij maatgevende condities. Dimensioneren op overslaand water hoeft dan niet.

FIGUUR 6.10 INFILTRATIE DOOR GOLFOVERSLAG



In complexe situaties kan het besluit vallen toch een groter overslagdebiet toe te laten. Dat moet een bewuste keuze zijn, waarbij de consequentie is dat de kruin en het binnentalud dusdanig worden gedimensioneerd dat deze hiertegen bestand zijn. Bovendien mag dit in de polder niet tot waterbezwaar leiden.

De mechanismen die optreden bij infiltratie door golfoverslag worden in § 6.5.2 beschreven. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen twee kenmerkende situaties voor de opbouw van een dijk. Het stromende water kan ook erosie van het oppervlak van het binnentalud veroorzaken, dit wordt in § 6.5.3 behandeld.

### 6.5.2 INFILTRATIE EN AFSCHUIVEN

Bij infiltratie door overslag of neerslag treedt water via de kruin en binnentalud in de dijk. Tijdens dit infiltratieproces neemt de volumieke massa toe van ~droog tot ~nat. De waterspanningen in de infiltratiezone zijn nauwelijks van enige betekenis zolang het geïnfiltreerde water verder de dijk instroomt. De mate van infiltratie hangt af van de hoeveelheid overstromend water (het overslagdebiet), de gesommeerde tijdsduur van overslag en de doorlatendheid van de afdekkende kleilaag. De factor tijd is dus erg belangrijk.

Bij een verzadigde infiltratiezone neemt de waterspanning toe en nemen de aanwezige korrelspanningen af en daarmee de te mobiliseren schuifspanning. De aandrijvende kracht echter neemt toe doordat de grond verzadigd is met water. Dit heeft een negatief effect op de stabiliteit van het binnentalud. Instabiliteit van het binnentalud uit zich door de daar optredende vervormingen. Het talud verplaatst zich in eerste instantie richting de teen van de dijk en bolt op. Nabij de kruinlijn ontstaat een trekzone waar een scheur parallel aan de kruin kan ontstaan. Wanneer deze situatie zich voordoet, wordt de dijk als 'bezweken' beschouwd.

Prototypeproeven hebben aangetoond, dat het ontstaan van een scheur en het opbollen of uitbuiken van de onderzijde van het binnentalud nagenoeg gelijktijdig optreden. Op het moment dat een scheur is ontstaan, verdwijnt een groot deel van het overgeslagen water in de scheur en zorgt ervoor dat de dijk zeer snel verzadigd raakt en afschuiven van het binnentalud inleidt. Het geeft meestal een oppervlakkige afschuiving waarbij de grasmat in zijn geheel van de dijk schuift en de dijk kern blootstelt aan erosie door het overslaande water. In korte tijd ontstaat nu een bres in de dijk.

In 1953 zijn deze parallelscheuren in Zuidwest Nederland waargenomen. In sommige gevallen hadden de beheerders zeildoeken over de scheuren neergelegd. Dit heeft meestal het bezwijken van de dijken vertraagd. Het bezwijkmechanisme door infiltratie wordt sterk bepaald door de configuratie (hellingshoek) en de opbouw van een dijk. Bij toepassing van taluds, die flauwer zijn dan 1V:3H, blijkt uit ervaring dat er nauwelijks gevaar is op instabiliteit door infiltratie door golfoverslag. In principe kunnen we voor het beschrijven van het infiltreren twee karakteristieke situaties onderscheiden:

- Grondlichaam bestaat uit een kleikern, afgedekt met een laag doorgroeide klei;
- Grondlichaam heeft een zandige kern, afgedekt met een kleilaag.

In de praktijk kunnen zeker situaties voorkomen waar heterogeniteit een belangrijke rol kan spelen. Plaatselijk kunnen zich dan andersoortige mechanismen voordoen. Gatenvorming door konijnen en mollen vormen een risico en versterken het proces van andere mechanismen.

#### **KLEIKERN**

De klei aan het oppervlak is veel doorlatender dan de klei in de kern. Scheurtjes en wortelkanalen creëren een voor klei vrij hoge doorlatendheid van de orde van  $10^{-5}$  tot  $10^{-4}$  m/s. Bij overslag infiltreert water juist het sterkst in de toplaag, waardoor de waterspanning oploopt. De korrelspanning neemt hierdoor uiteindelijk zoveel af, dat een glijvlak kan ontstaan op de grens van de toplaag en kern op een diepte van 1 m onder het maaiveld. Bij een steil talud schuift de toplaag af.

#### **ZANDIGE KERN**

Ook bij grondconstructies met een zandige kern kan infiltratie de oorzaak zijn van het bezwijken door overslag. De doorlatendheid van de toplaag is sterk anisotroop. Door scheurtjes en begroeiing is de doorlatendheid van de toplaag vaak maar weinig minder dan die van de kern. In de richting loodrecht op het talud is de doorlatendheidwaarde veel groter dan die in de richting langs het talud. Door deze anisotropie stroomt er relatief weinig water door de toplaag evenwijdig aan het talud, het meeste zakt de zandige kern in.

Als de kern niet is gedraineerd of als de toplaag minder doorlatend is dan de kern, bijvoorbeeld bij een toplaag van klei op een kern van zand, dan kan door infiltrerend water bij de teen onder de bekleding een hogere freatische lijn ontstaan, die een opwaartse druk over de toplaag veroorzaakt. Bij het beoordelen van afschuiven van het binnentalud onder invloed van overslag moeten we in dat geval rekening houden met deze extra kracht op de binnenbekleding. Aanbevolen wordt in die gevallen een grondwaterstromingberekening te maken om de freatische lijn in de dijk te kunnen bepalen. De duur van het infiltreren is hierbij van belang voor de totale hoeveelheid water die via het binnentalud kan infiltreren. Als de hoogte van de freatische lijn eenmaal is bepaald moeten we ook controleren of er geen combinatie van twee bezwijkmechanismen kan ontstaan: eerst ontstaat in het onderste deel van het

binnentalud micro-instabiliteit, waarna vervolgens afschuiven van het bovenste deel van de bekleding op het binnentalud plaatsvindt. Als dit fenomeen van een gecombineerd bezwijkmechanisme een bedreiging kan vormen, kunnen we dezelfde maatregelen treffen die onder microstabiliteit staan.

### 6.5.3 EROSIE BINNENTALUD

Erosie aan het binnentalud van grondconstructies wordt voornamelijk veroorzaakt door water, dat over de kruin heen is gestroomd. Dat water is afkomstig van golfoverslag of -overloop. De combinatie van een hoge waterstand en golfoploop op het buitentalud kan overslag opleveren. Bij een hoog overslagdebiet kan er erosie van het binnentalud optreden door langs- of afstromende water. De erosie blijkt een functie te zijn van het overslagdebiet, de taludhelling, de grondsoort waarmee het talud is bedekt en de kwaliteit van de begroeiing.

## 6.6 ZANDMEEVOERENDE WELLEN

### 6.6.1 INLEIDING

Het ontstaan van drijfzand bij verticaal uittredend water (Engels: 'heave') en vorming van ondergrondse kanaaltjes (Engels: piping) zijn verschijnselen die de stabiliteit van grondconstructies kunnen bedreigen. Het optillen van gronddeeltjes en terugschrijdende erosie kunnen worden teweeggebracht doordat bij groot verval over grondconstructies gronddeeltjes in watervoerende zandlagen door het kwelwater worden meegevoerd. Hierdoor kunnen doorgaande kanaaltjes onder de grondconstructie ontstaan óf kunnen de korrelspanningen wegvallen ten gevolge van een te groot verticaal verhang. In Technisch Rapport Zandmeevoerende wellen [24] wordt uitgebreid ingegaan op eventuele maatregelen in bedreigende situaties en aandachtspunten voor het beheer om gesteld te staan voor eventuele noodsituaties. Ten slotte worden verschillende case studies nader uitgewerkt, waarbij (klassieke) rekenregels gebaseerd op stationaire grondwaterstromingen en instationaire rekenmodellen zijn toegepast.

In deze paragraaf zullen bovengenoemde aspecten summier worden behandeld. Hier ligt de nadruk op de beschrijving van de verschillende fasen die bij kwel onder grondconstructies kunnen ontstaan (§ 6.6.2).

### 6.6.2 PROCESBESCHRIJVING

In principe kunnen we twee karakteristieke configuraties onderscheiden, waarbij kwel onder en door de grondslag van grondconstructies doordringt:

- 1) Binnenwaarts van de grondconstructie is op de watervoerende zandlaag een afdekkende laag bestaande uit klei- en/of veen aanwezig;
- 2) Binnenwaarts van de grondconstructie is op de watervoerende zandlaag geen of slechts een dunne afdekkende grondlaag aanwezig die bijvoorbeeld door een brede sloot wordt doorsneden.

#### **BINNENWAARTSE AFDEKKENDE LAAG**

Voor ondoorlatende grondconstructies waarvan de binnenwaartse bovenlaag waterdicht is, kunnen de volgende kwelfasen worden gekenmerkt:

- Opdrijven van de afdekkende laag. Door een hoge buitenwaterstand zullen de waterspanningen in de watervoerende zandlaag toenemen. Wanneer de waterspanningen ter plaatse van de afdekkende laag aan de binnenzijde groter worden dan het gewicht van die laag, zal deze gaan opdrijven. Deze gebeurtenis is een vorm van hydraulische groundbreuk. In de praktijk is opdrijven soms, maar niet altijd, waarneembaar door zwakke golfbewegingen van het maaiveld bij betreden.

- Opbarsten van de afdekkende laag. Door het opdrijven zal de afdekkende laag scheuren, waardoor kwelwater via verticale kanaaltjes, zich een weg naar het maaiveld zoekt.
- Erosieproces in de watervoerende zandlaag. Het optreden van horizontale kanaaltjes in watervoerende zandlagen is sterk afhankelijk van de optredende stroomsnelheid in deze kanaaltjes en de kritieke stroomsnelheid (= de gemiddelde stroomsnelheid van het water waarbij de zandkorrels nagenoeg in rust blijven). De optredende stroomsnelheid wordt grotendeels bepaald door het verval over de grondconstructie, terwijl de kritieke stroomsnelheid sterk afhankelijk is van de materiaaleigenschappen, bijvoorbeeld de korrelgrootte. In principe zijn er twee mogelijkheden, namelijk (1) de stroomsnelheid is kleiner dan de kritieke stroomsnelheid; het erosieproces stopt, of (2) de stroomsnelheid is groter dan de kritieke stroomsnelheid; de afvoer van zand uit het kanaaltje blijft voortduren. Het geërodeerde materiaal wordt door het kwelwater meegevoerd en rond de holte nabij het maaiveld afgezet. Bij voldoende groot verval zullen de kanaaltjes blijven groeien (terugschrijdende erosie). Als deze kanaaltjes het buitenwater bereiken is sprake van 'piping'. Wanneer er een open verbinding is tussen het buitenwater en de locatie waar het kwelwater uittreedt, zullen de afmetingen van de kanalen toenemen. Uiteindelijk zal dit leiden tot holle ruimtes onder de grondconstructie die zo groot worden dat verzakking en breuk en dus bezwijken van de grondconstructie zal optreden.

#### **BINNENWAARTS GEEN AFDEKKENDE LAAG**

Als de grondsamenstelling zandig is aan de binnenzijde van grondconstructies, kunnen daar de verticale korrelspanningen wegvallen onder invloed van kwel. Dit wordt aangeduid met 'heave', hierbij ontstaat drijfzand en dat vooral optreedt bij verticaal uittredend grondwater. Vervolgens zullen ondergrondse kanalen ontstaan die in grootte zullen toenemen door de eroderende werking van het kwelwater, met als uiteindelijk resultaat het bezwijken van de constructie. Omdat zowel heave als piping kunnen optreden bij een watervoerende laag aan het oppervlak, moeten we deze twee aspecten afzonderlijk beoordelen. Ter voorkoming van beide fenomenen worden veelal kwelbermen of kwelschermen (damwanden, kleikisten, kistdammen et cetera) toegepast. Deze verlengen de afstand die het water moet afleggen, waardoor de snelheid van het kwelwater en het uittredende verhang beide afnemen.

Uit onderzoek blijkt dat voor het opdrijven en opbarsten van een afdekkende laag het van primair belang is de dikte hiervan te kennen. Voor het optreden van drijfzand nabij het uit-treepunt moet informatie voorhanden zijn over de kwellengte, de doorlatendheid van het zand en de dikte van het watervoerende zandpakket: hoe dunner, des te kleiner het risico dat grond fluidiseert.

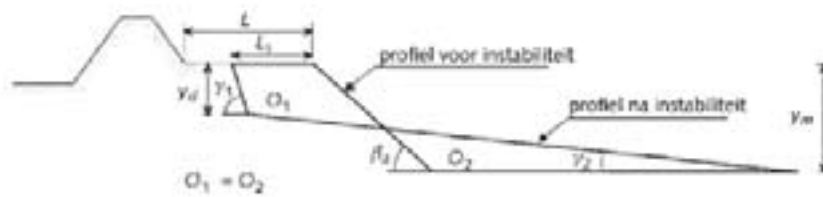
## **6.7 STABILITEIT VOOROEVER**

### **6.7.1 INLEIDING**

Bij grondconstructies, met al dan niet een aanwezig voorland van beperkte breedte langs een onderwatertalud, moeten we rekening houden met het optreden van instabiliteit van dit onderwatertalud. Dit zou van invloed kunnen zijn op de stabiliteit van de grondconstructie en dus op het waterkerende vermogen. Bij het mogelijke optreden van instabiliteit kan onderscheid worden gemaakt tussen instabiliteit door afschuiving en door zettingvloeiing. In § 6.7.3 worden de processen van deze verschijnselen behandeld en geëvalueerd en § 6.7.4 gaat in op rekenregels voor het beschrijven van bovengenoemde instabiliteiten.

FIGUUR 6.11

TWEEDIMENSIONAAL BERGINGSMODEL MET ONBEPERKTE BERGING



$y_d$	breshoogte
$L$	breedte voorland
$L_s$	inscharingslengte
$y_m$	maximale waterdiepte in de stroomgeul
$O_i$	oppervlakte
$\beta_a$	optredende gemiddelde zijhelling vóór de instabiliteit
$\gamma_1$	ziahelling nabij oever/grondconstructie
$\gamma_2$	sedimentatie-hellingshoek na de instabiliteit

### 6.7.2 STROMING

Stroming langs grondconstructies kan erosie van het voorland veroorzaken en op meerdere manieren krachten uitoefenen op een bekledingslaag. Het water zelf, maar ook meegevoerde materialen of objecten kunnen eroderend werken op de bekleding; stroomkrachten kunnen losse stortstenen meevoeren en de randen van kraagstukken en/of matten kunnen worden opgelicht en omgeklapt waardoor de onderliggende lagen worden blootgesteld aan erosie.

Natuurlijke stroming door de afvoer van water uit bovenstroomse gebieden en getij is vaak als hydraulische randvoorwaarde voor het ontwerpen van waterkeringen van ondergeschikt belang. Op plaatsen waar stroming erosie veroorzaakt onder frequent voorkomende omstandigheden zijn meestal al maatregelen genomen door de waterkeringbeheerder. Voorbeelden zijn schaarlijken en vooroevers van grondconstructies langs de rand van een getijgeul. Bij vooroevers moeten we de ontwikkeling van de stroomgeul in de gaten houden: te steile en te diepe taluds van de vooroever kunnen als inleidend mechanisme voor een zettingvloeiing of afschuiving optreden. Bij instabiliteiten spelen zowel geotechnische aspecten (sterkte) als wel de hydraulisch en morfologische condities (belasting) een rol (zie figuur 6.12).

### 6.7.3 AFSCHUIVING EN ZETTINGVLOEIINGEN

Afschuivingen kunnen optreden bij een vooroever die is opgebouwd uit samenhangende grond als klei en veen en/of al dan niet verwekinggevoelig zand. Als onder het voorland een laag van beperkte dikte met relatief slechte sterkte-eigenschappen (cohesie en hoek van inwendige wrijving), voorkomt, moet aandacht te worden besteed aan een mogelijke afschuiving langs een recht glijvlak. Dit is met name het geval, indien de genoemde laag onder een aflopende helling naar het onderwatertalud is gelegen.

Bij grondconstructies met of zonder vooroever van beperkte breedte en langs een onderwatertalud in los gepakt zand moeten we rekening houden met het bezwijkmechanisme zettingvloeiing. Dit is een mechanisme waarbij een met water verzadigde massa zand zeer grote verplaatsingen ondergaat dan wel 'vloeit' als gevolg van verweking. Verweking van zand in een talud wordt veroorzaakt door een ongunstige combinatie van losse pakking en taludgeome-

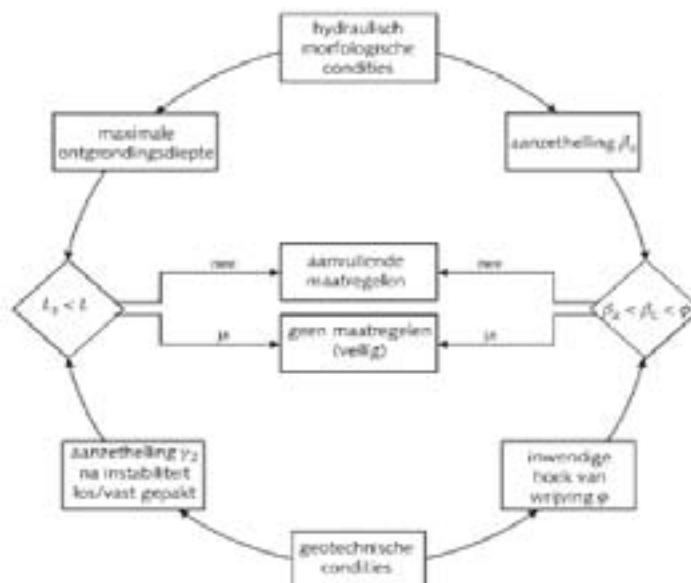
trie. Er is ook een aanleiding nodig: de verweking treedt op na een (soms slechts zeer kleine) schuifspanningtoename waarbij door een herschikking van het korrelskelet (waardoor volumeverkleining) een zodanige verhoging van de waterspanning in de poriën ontstaat, dat de contactdruk tussen de korrels onderling belangrijk wordt verminderd en de zandmassa zich als een zware vloeistof gaat gedragen, met als gevolg dat een zettingvloeiing optreedt.

De aanleiding tot een zettingvloeiing kan zijn:

- Steiler wordend onderwatertalud of verdieping van de geul door erosie;
- het aanbrengen van een ophoging of bovenbelasting;
- trillingen door bijvoorbeeld heien, trillen, explosies, aardbevingen, scheepsaanvaringen en zuigwerkzaamheden;
- golfbelasting tijdens bijvoorbeeld een (zware) storm; deze belasting veroorzaakt spanningswijzigingen en korrelskeletdeformaties in de bodem (golfindringingproces) die - eventueel zodanig ongunstig zijn dat het zand verweekt en er een vloeiing kan ontstaan.
- snelle val van het buitenwater.

Er is een duidelijk verschil tussen een zettingvloeiing en een afschuiving, hoewel zich tussen beide verschijnselen een grijs gebied bevindt. Grondmechanisch gezien ontstaat een zettingvloeiing door wateroverspanning in de grond (zand) ofwel door verweking, terwijl een afschuiving het gevolg is van overschrijding van de schuifweerstand van de grond. Een afschuiving kan wel de inleiding zijn tot het ontstaan van een zettingvloeiing. Om te voorkomen, dat in de stroomgeul hellingen optreden, die aanleiding kunnen geven tot instabiliteit van de waterkering, kan de helling door bestorten of bezinken of een combinatie van beide worden vastgelegd. Het fixeren van de helling heeft geen invloed op de verwekinggevoeligheid van het losgepakte zand. Het enige doel is om te voorkomen dat een nog steilere helling kan ontstaan. Andere maatregelen, zoals het verdichten, zijn praktisch gezien soms onuitvoerbaar of erg kostbaar. Het signaleren van vooroevers die versteilen en het vervolgens bestorten van steiler wordende vooroevers echter is in de Zeeuwse praktijk een succesvolle methode gebleken om zettingvloeiingen en afschuivingen vrijwel geheel te voorkomen.

FIGUUR 6.12 RELATIE TUSSEN STERKTE EN BELASTINGPARAMETERS



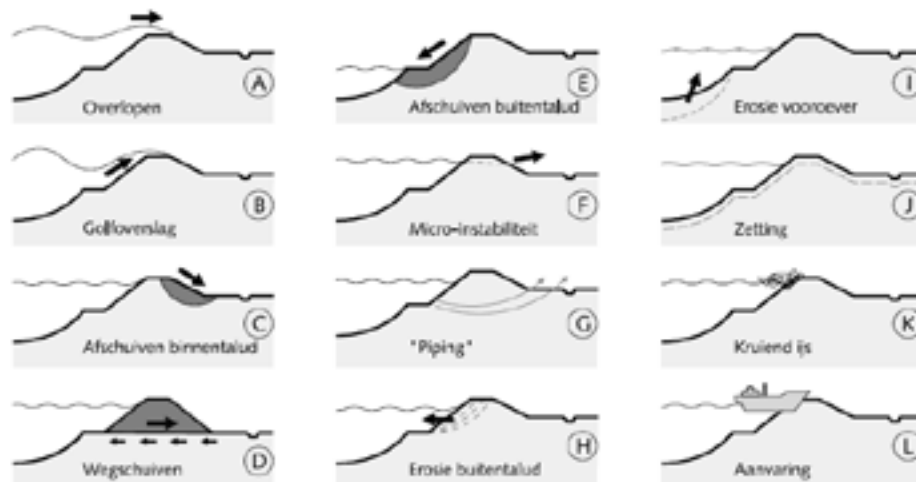


## 6.8 SAMENVATTING

Bij het beoordelen van de veiligheid van dijken en dammen zijn de volgende faalmechanismen van belang (zie figuur 6.13):

- inundatie van het dijkringgebied door een combinatie van hoge waterstand en golfoverslag zonder dat de kering bezwijkt (A);
- erosie van het binnentalud door de kracht van het stromende water, eveneens door een combinatie van hoge waterstand en golfoverslag (B);
- instabiliteit (afschuiven) van het binnentalud, hetzij door infiltratie van het overstromend water bij een combinatie van hoge waterstand en golfoverslag, hetzij door waterdruk tegen de kering en verhoogde waterspanning in de ondergrond (C);
- wegschuiven van een grondlichaam, eveneens door waterdruk tegen de kering en verhoogde waterspanning in de ondergrond (D);
- afschuiven van het buitentalud bij snelle daling van de buitenwaterstand na hoogwater (E);
- instabiliteit van het binnen- (of buiten)talud door uittredend kwelwater door het grondlichaam (micro-instabiliteit) analoog aan faalmechanisme C, maar bij lagere waterstanden (F);
- piping als gevolg van kwelstroming door de ondergrond waarbij achter de dijk erosie ontstaat en grond meegevoerd wordt (zandmeevoerende wellen) (G);
- erosie van het buitentalud of de vooroever door stroming of golfbeweging (H, I);
- grootschalige vervorming van het grondlichaam (J);
- mechanische bedreigingen zoals ijs en scheepvaart (K, L).

FIGUUR6.13 FAALMECHANISMEN GRONDCONSTRUCTIES



# 7

## FAALMECHANISMEN BEKLEDINGEN

### 7.1 INLEIDING

#### FALEN BEKLEDING VERSUS FALEN WATERKERING.

Faalmechanismen van bekledingen kunnen we relateren aan golven en stroming waaraan waterkeringen kunnen worden onderworpen en belast. Bekledingen zijn aan deze fysische verschijnselen blootgesteld, die kunnen resulteren in een toestand waarbij de bekleding geen bescherming meer biedt tegen erosie van de kern van de dijk.

De faalmechanismen van bekledingen hebben een relatie met de faalmechanismen van de hele waterkering. We moeten onderkennen dat bij falen door erosie van de bekleding de waterkering nog stabiel kan blijven en het hoge water kan blijven keren. Voor falen tegen overstroming van een beklede dijk of dam die voldoende hoog is, zijn twee gebeurtenissen nodig: het falen van de bekleding én het eroderen van het dijklichaam. Falen van de bekleding zal dus niet meteen tot falen van de waterkering leiden. In de wettelijke toetsing op veiligheid is deze combinatie van faalmechanismen expliciet verwerkt: voor een score 'goed' moet de bekleding sterk genoeg zijn onder maatgevende omstandigheden. Als dat niet zo is, kan de weerstand tegen erosie van het grondlichaam (de reststerkte) nog tot een score 'voldoende' leiden. In de huidige praktijk houden we in het ontwerp echter geen rekening met deze reststerkte: de bekleding wordt zo sterk ontworpen dat ze in stand blijft bij de maatgevende omstandigheden.

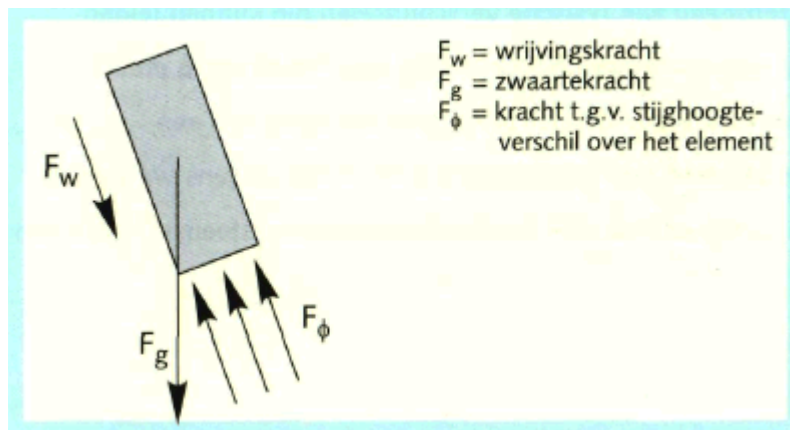
Deze paragraaf gaat dieper in op de mechanismen die kunnen leiden tot falen van de bekleding. De beschrijving van de mechanismen is overgenomen uit het Technisch Rapport Steenzettingen – Ontwerp [5]. Voor bekledingen van asfalt of gras zijn de fysische verschijnselen die de bekleding belasten vergelijkbaar. In de volgende subparagrafen beschrijven we het falen van alleen steenzettingen.

### 7.2 FALEN STEENZETTING DOOR TOPLAAGINSTABILITEIT

De toplaagelementen moeten in verband blijven om voldoende sterkte te kunnen leveren. Als dit verband wordt verbroken, is er sprake van falen. Door hydraulische belasting ontstaat onder de toplaagelementen een opwaartse waterdruk. Als deze opwaartse waterdruk groter is dan de neerwaartse waterdruk is er sprake van een opwaartse kracht op het toplaagelement. In bepaalde omstandigheden is deze opwaartse kracht groter dan het elementgewicht plus de onderlinge wrijving en/of klemming; in die omstandigheden worden de elementen uit de bekleding geduwd, zie figuur 2.6.1. Dit kan zich voordoen bij individuele elementen, maar meestal gaat het om een veld van elementen met een oppervlakte tot enkele vierkante meters. Dit faalmechanisme heet voluit stabiliteitsverlies van toplaagelementen, maar wordt meestal toplaaginstabiliteit genoemd.

FIGUUR 7.1

KRACHTEN OP TOPLAAGELEMENT DIE VAN BELANG ZIJN VOOR TOPLAAGINSTABILITEIT



Het faalmechanisme topaaginstabiliteit kan worden onderverdeeld in vier deelmechanismen:

- belasting door golven, situatie bij maximale golf terugtrekking maatgevend (7.2.1);
- belasting door golven, situatie bij golfklap maatgevend (7.2.2);
- belasting door langsstroming (7.2.3);
- belasting door golfloop (7.2.4);

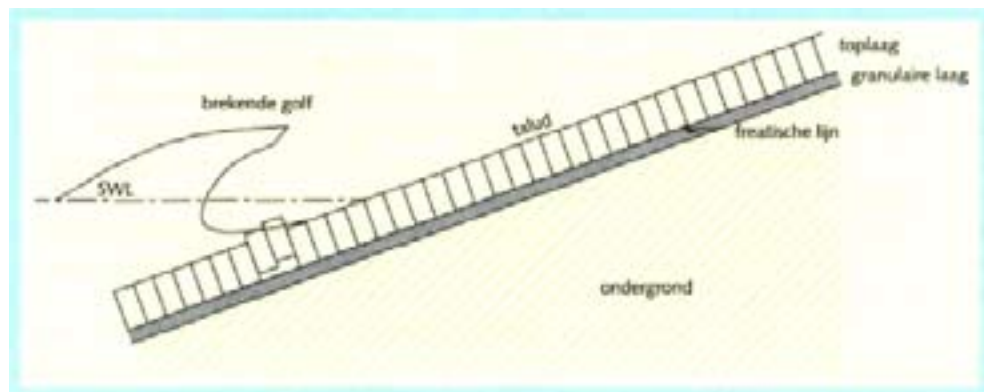
Topaaginstabiliteit bij steenzettingen op een berm krijgt apart aandacht in (7.2.5).

### 7.2.1 TOPLAAGINSTABILITEIT BIJ MAXIMALE GOLF TERUGTREKKING

Topaaginstabiliteit kan worden veroorzaakt door de opwaartse waterdruk op het moment van maximale golf terugtrekking. Het faalmechanisme is weergegeven in figuur 7.2.

FIGUUR 7.2

FAALMECHANISME TOPLAAGINSTABILITEIT



Op het moment van maximale golf terugtrekking is een deel van het talud drooggevallen, terwijl onder de topsoil nog water aanwezig is. Dit veroorzaakt een opwaartse verschildruk op de topsoilelementen, die maximaal is rond het punt tot waar de waterlijn zich heeft teruggetrokken. In werkelijkheid speelt zich in deze zone een complex dynamisch proces af. Er ontstaat een stroming door de granulaire laag in de richting van de topsoilelementen vlak boven de waterlijn. Deze stroming komt zowel van hoger op het talud (want de freatische lijn in de granulaire laag is nog hoog) als van lager op het talud (want onder de golf is de druk alweer opgebouwd). Dit stromingspatroon houdt per golf ongeveer een halve seconde aan en kan zorgen voor zodanige druk op de topsoilelementen dat deze worden uitgelicht. Hierbij

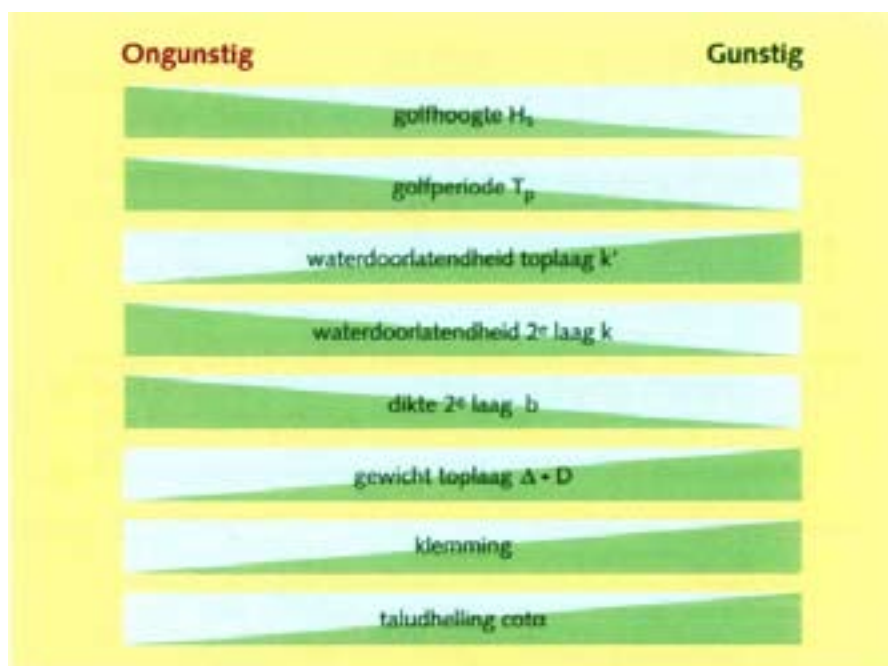
hebben ook de volgende elementen invloed: de onderlinge wrijving van de toplaagelementen, de verhinderde toestroming van water onder het toplaagelement, de massa-tragheid van het toplaagelement en de invloed van overgangsconstructies.

### PARAMETERS

De stabiliteit van de toplaag wordt bepaald door de parameters die de opwaartse waterdruk en de neerwaartse krachten (gewicht en wrijving en/of klemming) bepalen. Overigens: met opwaarts en neerwaarts worden de richtingen loodrecht op het talud bedoeld.

In figuur 7.3 is voor alle relevante parameters weergegeven wat de invloed is op het faalmechanisme. Bijvoorbeeld: voor de significante golfhoogte  $H_s$  is een grote waarde ongunstig (dus de balk is dik aan de linkerkant) en is een kleine waarde gunstig (dus de balk is dun rechts in de figuur).

FIGUUR 7.3 PARAMETERS TOPLAAGINSTABILITEIT BIJ MAXIMALE GOLFTERUGTREKKING



- 1) Golfhoogte  $H_s$ : de significante golfhoogte heeft invloed op het drukverschil boven en onder de toplaag. Bij hogere golven is de maximale freatische lijn hoger en dat levert bij maximale golfterugtrekking een grotere waterdruk onder de toplaag op.
- 2) Golfperiode  $T$ : de piekperiode heeft ook invloed op het drukverschil omdat de golf zich bij een grotere golfperiode verder terugtrekt. Dit geldt overigens slechts tot een bepaald maximum.
- 3) Waterdoorlatendheid van de toplaag  $k'$ : de doorlatendheid bepaalt hoe makkelijk het water onder de toplaag kan ontsnappen. Hoe groter de doorlatendheid, hoe gunstiger. (In feite gaat het om de lek lengte  $A$ : de verhouding tussen het gemak waarmee het water door de granulaire laag en door de toplaag stroomt, bepaald door de waterdoorlatendheid en de dikte van de toplaag en de granulaire laag (zie ook 4, 5 en 6).
- 4) Waterdoorlatendheid van de tweede laag  $k$  (meestal de granulaire laag, soms geokunststof of onderlaag): een grotere doorlatendheid leidt tot een grotere druk onder de toplaag, en daardoor tot een groter drukverschil met de bovenkant van de toplaag. Hoe kleiner deze doorlatendheid, hoe gunstiger.

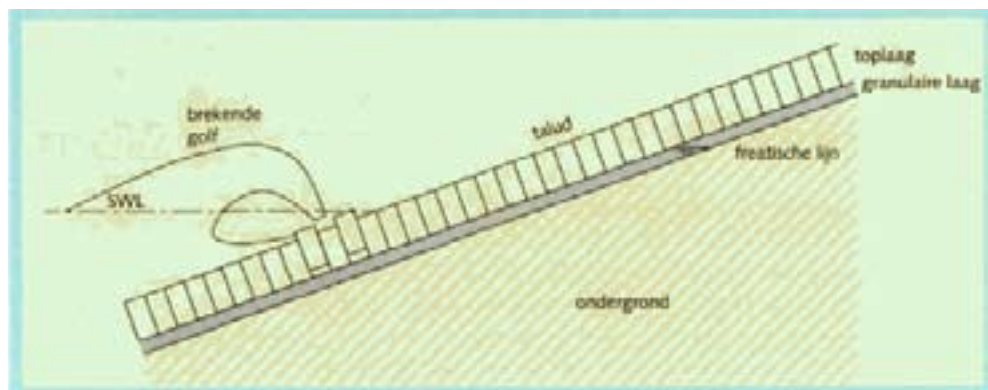
- 5) Dikte van de tweede laag b: een grotere dikte vergemakkelijkt de waterbeweging en daarmee de drukopbouw en is dus ongunstig.
- 6) Gewicht van de toplaag: het gewicht, bepaald door toplaagdikte en dichtheid van de toplaag-elementen, zorgt voor neerwaartse druk. Hoewel een grotere toplaagdikte ongunstig is voor het ontsnappen van water onder de toplaag (zie punt 3) is de positieve bijdrage van het gewicht per saldo groter.
- 7) Klemming: de klemming tussen de toplaagelementen levert neerwaartse kracht zodra er opwaartse waterdruk ontstaat door maximale golfterugtrekking.
- 8) Taludhelling cot a: hoewel een steilere taludhelling leidt tot betere klemming van de toplaag-elementen en dus een positieve bijdrage levert aan de neerwaartse druk, leidt het ook tot een kleinere gewichtsc component van de zwaartekracht en tot een hogere belasting door golfaanval. Per saldo is een steile taludhelling ongunstig.

### 7.2.2 TOPLAAGINSTABILITEIT DOOR GOLFKLAP

Steenzettingen onder golfaanval worden door opwaartse druk belast op het moment van maximale golfterugloop, maar ook op het moment van de golflap. De situatie bij maximale golfterugloop is meestal het belangrijkste faalmechanisme, maar uit modelproeven is geconcludeerd dat soms de situatie op het moment van golflap maatgevend is, vooral bij grote toplaagdoorlatendheid. Concreet komt dit voor bij open bekledingen van zuilen en bij bekledingen van rechthoekige blokken waartussen afstandhouders zijn aangebracht. Het faalmechanisme is weergegeven in figuur 2.6.4. Op het moment van de golflap is de waterdruk onder de toplaag aan het afnemen, maar nog wel aanwezig. De golflap veroorzaakt een locale drukpiek aan de bovenkant van de toplaag, die vervolgens doordringt tot onder de toplaagelementen. Bij de meeste constructies is de toplaag zodanig ondoorlatend dat de druk niet snel kan doordringen tot onder de elementen, en bovendien is de granulaire laag zodanig doorlatend dat de piek in de waterdruk weer snel wegvloeit. Alleen bij een doorlatende toplaag en een weinig doorlatende granulaire laag kan de golflap zorgen voor een piekwaarde van de opwaartse kracht die hoger ligt dan de waarde op het moment van maximale golfterugtrekking. Net als op het moment van maximale golfterugtrekking zijn ook bij de golflap een aantal bijkomende elementen van belang: de onderlinge wrijving van de toplaag-elementen, de verhinderde toestroming van water onder het omhoog komende toplaagelement, de massatraagheid van het toplaagelement en de invloed van overgangsconstructies. Vanwege de korte duur van de belastingsituatie hebben vooral de verhinderde toestroming en de massatraagheid een gunstige invloed op de stabiliteit.

FIGUUR 7.4

FAALMECHANISME TOPLAAGINSTABILITEIT DOOR GOLFKLAP



### PARAMETERS

De stabiliteit van de toplaag wordt bepaald door de parameters die de opwaartse waterdruk en de neerwaartse krachten (gewicht en wrijving en/of klemming) bepalen. Voor de opwaartse waterdruk en voor de neerwaartse krachten gelden dezelfde parameters als in 7.2.1.

#### 7.2.3 TOPLAAGINSTABILITEIT DOOR LANGSSTROMING

In de meeste situaties is de golfaanval maatgevend voor de stabiliteit van de toplaagelementen, maar in bijzondere omstandigheden kan ook aanval door stroming leiden tot stabiliteitsverlies van toplaagelementen. Het gaat om omstandigheden met een hoge stroomsnelheid ( $> 2$  m/s langs de dijk) of sterke turbulentie. Ook bij stromingsaanval is het ontstaan van opwaartse druk het belangrijkste faalmechanisme.

### PARAMETERS

In figuur 7.5 staan de belangrijkste belasting- en sterkteparameters die een rol spelen bij toplaaginstabiliteit onder langsstroming.

FIGUUR 7.5

PARAMETERS LANGSSTROMING



1. Stroomsnelheid  $u$ : een grote stroomsnelheid zorgt voor een grote belasting.
2. Turbulentie: behalve de waarde zelf, zijn ook de fluctuaties in de stroomsnelheid bepalend voor de belasting. Grote fluctuaties zijn ongunstig.
3. Gewicht van de toplaag  $\Delta + D$ : het gewicht, bepaald door toplaagdikte en dichtheid van de toplaagelementen, zorgt voor neerwaartse druk.
4. Klemming: de klemming tussen de toplaagelementen levert neerwaartse kracht zodra een element omhoog wordt gedrukt.

Hierna wordt dit faalmechanisme aangeduid als toplaaginstabiliteit door stroming.

#### 7.2.4 TOPLAAGINSTABILITEIT DOOR GOLFOPLOOP

Een steenzetting in de golfklapzone wordt ook belast door golfoploop, maar die belasting is nooit maatgevend. In de zone juist boven de maatgevende waterstand is de golfoploop wél de maatgevende belasting. Dit is relevant voor het buitentalud boven de maatgevende waterstand en voor de kruin en het binnentalud.

Voor steenzettingen boven de maatgevende waterstand op het buitentalud bestaan geen afzonderlijke rekenregels: de regels zijn gerelateerd aan de regels voor de golfklapzone. Voor steenzettingen op kruin en binnentalud bestaan wel aparte regels. Deze steenzettingen worden belast door het overslagdebiet van de golven in maatgevende omstandigheden. Voor steenzettingen op een kruin geldt, net als op een berm, dat de sterkte verschillend is doordat het talud

flauwer is: enerzijds werkt de zwaartekracht gunstiger, anderzijds rusten de elementen minder op elkaar waardoor er minder wrijving/klemming is. Ook de belasting is verschillend. Het maatgevende faalmechanisme voor deze zone is niet het langdurige overslagdebiet, maar de extreme overslag van een enkele hoge golf. Vooral de zone rond de binnenkruinlijn, de knik tussen kruin en binnentalud, wordt zwaar belast.

#### PARAMETERS

De belasting wordt bepaald door de *golfhoogte*  $H_s$  en *golfperiode*  $T_p$  in relatie tot de *afstand boven de maatgevende waterstand*. Een grote golfhoogte en -periode is ongunstig, een grote afstand tot de maatgevende waterstand is gunstig. De sterkteparameters zijn hetzelfde als voor de andere vormen van toplaaginstabiliteit.

#### 7.2.5 FALEN VAN STEENZETTING OP EEN BERM

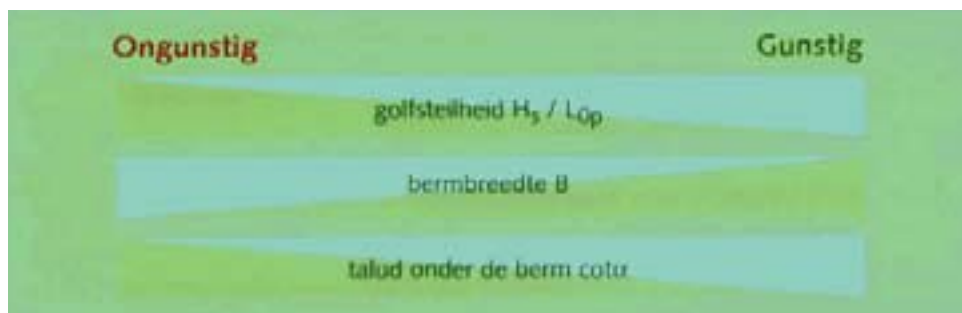
Een steenzetting op een berm is niet vergelijkbaar met een steenzetting op een zeer flauw talud, want de aanwezigheid van een talud onder de berm en de knik daartussen zorgt voor een bijzondere situatie. Dit geldt overigens alleen als de voorwaarden gelden zoals behandeld in 4.3.13. In de granulaire laag onder het talud ontstaat onder de golfaanval een op- en neergaande waterbeweging. Bij de knik naar de berm toe wordt deze stroming gedwongen om van richting te veranderen; dit kan leiden tot een grotere belasting op de toplaagelementen. Verder is de belasting afwijkend van die op een talud doordat op de bekleding vaak een dempende laag water aanwezig is. Ook de sterkte van de steenzetting is op een berm anders dan op een talud: enerzijds werkt de zwaartekracht gunstiger, anderzijds rusten de elementen minder op elkaar zodat er minder wrijving/klemming is.

#### PARAMETERS

De parameters zijn deels dezelfde als voor steenzettingen op een talud, maar in aanvulling daarop zijn enkele specifieke parameters van belang (zie figuur 7.6).

FIGUUR 7.6

AANVULLENDE PARAMETERS STEENZETTING OP BERM



- 1) Golfsteilheid  $H_s / LQ$  : voor de belasting is ook de golfsteilheid van belang: hoe steiler hoe ongunstiger.
- 2) Breedte van de berm  $B$ : een brede berm zorgt voor kleinere belastingen en is dus gunstig.
- 3) Taludhelling onder de berm  $\cot \alpha$ : de steilheid van het talud onder de berm beïnvloedt de belasting van de bekleding op de berm: hoe flauwer de helling van het benedenbeloop, hoe ongunstiger voor de bekleding op de berm.

Een andere belangrijke parameter is de verhouding tussen de diepte van de berm onder de stilwaterstand en de golfhoogte,  $dB / H_s$ . De situatie is het ongunstigst als de berm tussen 1,0 en 2,0 maal de golfhoogte  $H_s$  onder de stilwaterstand ligt. Deze parameter staat niet in de figuur omdat er geen eenduidig verband is.

### 7.3 FALEN STEENZETTING DOOR AFSCHUIVING

Bij het faalmechanisme toplaaginstabiliteit gaat het om beweging van elementen loodrecht op het talud. Maar daarnaast kan de bekleding falen door beweging langs het talud. De verschillende faalmechanismen waarbij beweging langs het talud plaatsvindt duiden we aan met de term 'afschuiving'. Het betreft bijna allemaal faalmechanismen onder invloed van golfbelasting, maar in bijzondere gevallen kan ook statische wateroverdruk een rol spelen.

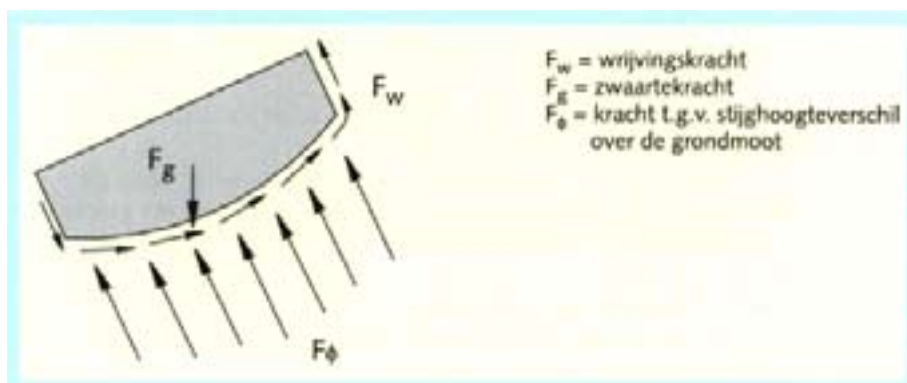
Op elke willekeurige moot bekleding en/of grond wordt enerzijds de aandrijvende component van de zwaartekracht en anderzijds de tegenwerkende wrijvingskracht langs het potentiële glijvlak uitgeoefend. Hydraulische belasting kan opwaartse druk veroorzaken: dit kan vlak onder de toplaag voorkomen (zie 7.2), maar ook dieper in de constructie. Deze opwaartse druk heeft invloed op de grondmechanische stabiliteit omdat de wrijving langs de glijvlakken erdoor wordt verkleind. Als de aandrijvende component van de zwaartekracht groter wordt dan de wrijvingskracht langs het glijvlak, dan kan afschuiving optreden (zie figuur 7.7).

In bijzondere gevallen kan statische wateroverdruk afschuiving veroorzaken. Dit is het geval als zich onder de bekleding een zogenoemde zandscheg bevindt: een insluiting van zand tussen de kleilaag van de bekleding en een oude kleikern. Hier kan wel water inkomen (bij hoogwater of door regen), maar het kan er niet meer uitstromen.

Er zijn meerdere vormen van afschuiving. Hierbij zijn twee elementen van belang: de plaats van het glijvlak en de omvang van de afschuiving. Bij de plaats van het glijvlak maken we onderscheid tussen afschuiving van de toplaag (het glijvlak is de laagscheiding tussen toplaag en de laag eronder) en afschuiving van de hele bekleding over een glijvlak in de ondergrond van zand. Bij de omvang maken we onderscheid tussen lokale afschuiving - waarbij een deel van de toplaag uitknikt - en grootschalige afschuiving, waarbij ook de teenconstructie bezwijkt. De rekenregels zijn gebaseerd op lokale afschuiving over een glijvlak in de ondergrond van zand, zie figuur 7.8. De regels zijn echter zo opgesteld dat ze ook de andere vormen van afschuiving bestrijken.

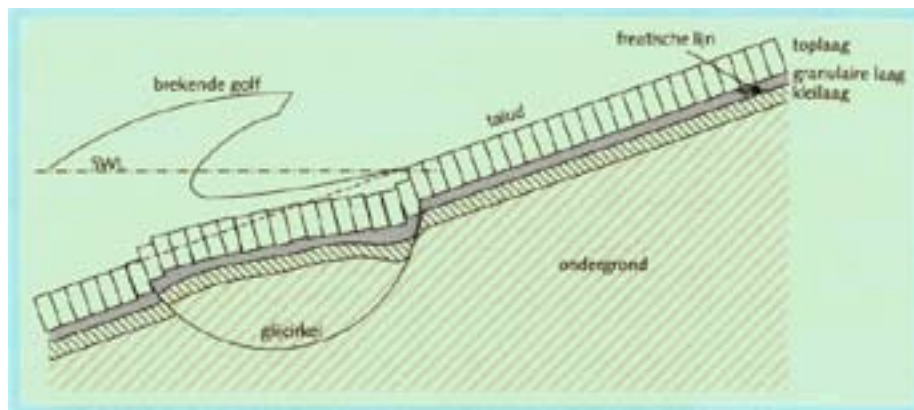
FIGUUR 7.7

KRACHTENEVENWICHT AFSCHUIVING





FIGUUR 7.8 DIEPE KLEINSCHALIGE AFSCHUIVING



### PARAMETERS

In figuur 7.9 staan de belasting- en sterkteparameters die een rol spelen bij het faalmechanisme afschuiving.

FIGUUR 7.9 PARAMETERS AFSCHUIVING



- 1) Golfhoogte  $H_s$ : een grotere golfhoogte is ongunstig voor zowel de belasting als de sterkte.
- 2) Golfsteilheid  $H_s / L_{op}$ : een steilere golf, dus een grotere waarde van de golfsteilheid, zorgt voor een lagere belasting en is dus gunstig.
- 3) Dikte bekleding, samengesteld uit toplaagdikte  $D$ , dikte granulaire laag  $b_f$  en dikte kleilaag  $b_k$ . Samen met de dichtheid van de bekleding bepaalt de dikte het gewicht. Het gewicht is de belangrijkste sterkteparameter bij afschuiving.
- 4) Dichtheid bekleding  $p$ , zie punt 3.
- 5) Taludhelling  $cota$ : een steile helling is ongunstig.
- 6) Korrelgrootte  $D_{15}$  van de zandondergrond: hoe groter de zandkorrels, hoe groter de weerstand tegen afschuiving.

#### 7.4 FALEN STEENZETTING DOOR MATERIAALTRANSPORT

De bekleding beschermt het grondlichaam tegen erosie. Daarom moet de toplaag intact blijven. Het is echter ook noodzakelijk dat uitspoeling wordt voorkomen van materiaal uit de lagen daaronder. De verschillende faalmechanismen waarbij uitspoeling van materiaal plaatsvindt, duiden we aan met de term materiaaltransport.

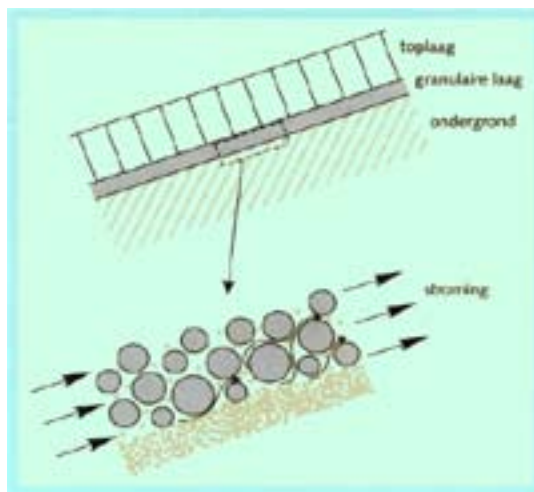
Voor dit faalmechanisme is ten eerste relevant of de laagovergangen geometrisch dicht of open zijn (dus of de deeltjes uit diepere lagen al dan niet groot genoeg zijn om door de openingen in de hogere lagen te kunnen). Vervolgens of de laagovergangen hydraulisch dicht of open zijn (dus of de hydraulische belasting zodanige opwaartse kracht op de gronddeeltjes kan veroorzaken dat het materiaal daadwerkelijk door de openingen in de hogere lagen uitspoelt).

In het algemeen geldt dat materiaaltransport door elke laagovergang moet worden voorkomen. Bij de meeste steenzettingen is vooral materiaaltransport door twee laagovergangen belangrijk: ten eerste van de ondergrond naar de granulaire laag en ten tweede van de granulaire laag door de toplaag naar buiten. Deze twee deelmechanismen worden besproken in de volgende paragrafen.

##### 7.4.1 MATERIAALTRANSPORT VANUIT ONDERGROND NAAR GRANULAIRE LAAG

De golfbeweging veroorzaakt een stroming in de granulaire laag die evenwijdig is aan het talud, zowel naar boven als naar beneden. Langs het grensvlak met de ondergrond kan deze stroming erosie van klei- of zanddeeltjes veroorzaken (zie figuur 7.10).

FIGUUR 7.10 UITSPOELING VAN MATERIAAL UIT DE ONDERLAAG



Overigens zal dit proces meestal niet direct leiden tot falen van de bekleding, maar eerst verzwakking veroorzaken. Er kunnen holle ruimten ontstaan onder de bekleding. Hierdoor kan de bekleding haar verband kwijtraken en plaatselijk verzakken, waardoor de sterkte afneemt. Bovendien kan de opwaartse druk toenemen doordat de doorlatendheid van de onderlaag toeneemt. De aanwezigheid van een filterlaag (granulair, geokunststof of vlijlaag) is bedoeld om dit mechanisme te voorkomen. Het faalmechanisme is weergegeven in figuur 7.11.

FIGUUR 7.11

SCHADEVERLOOP BIJ FAALMECHANISME MATERIAALTRANSPORT VANUIT DE ONDERGROND



### PARAMETERS

Bij materiaaltransport uit de ondergrond zijn de parameters van belang die de weerstand tegen uitspoeling en de opwaartse kracht op de gronddeeltjes bepalen (zie figuur 7.12).

FIGUUR 7.12

PARAMETERS MATERIAALTRANSPORT ONDERGROND &gt; GRANULAIRE LAAG



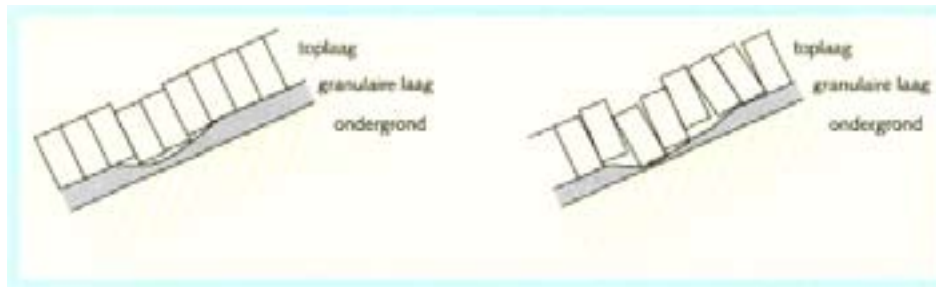
- 1) Grootte van de openingen in het filtermateriaal: hoe groter hoe ongunstiger. Bij een filter van geokunststof worden de openingsafmetingen beschreven door de karakteristieke openingsgrootte  $O_{90}$ , en afhankelijk van de rekenmethode spelen ook de doorlatendheid en de dikte  $T$  een rol. Bij een granulair filter zijn de afmetingen van de fijne fractie representatief voor de openingsgrootte. Hiervoor wordt de karakteristieke korreldiameter  $D_{f15}$  gebruikt, en afhankelijk van de rekenmethode is ook de porositeit  $n$  van de granulaire laag van belang.
- 2) Korrelgrootte van het basismateriaal: hoe groter hoe gunstiger. In de rekenregels worden hiervoor de karakteristieke korrelafmetingen  $D_{50}$  en  $D_{90}$  gebruikt. Bij een onderlaag van klei gaat het hierbij niet om de afzonderlijke kleideeltjes maar om de kleiklontjes; een aandachtspunt daarbij is, dat kleiklontjes uit elkaar vallen bij de overgang van zoet naar zout water.
- 3) Golfhoogte  $H_5$ : een grotere golfhoogte leidt tot een grotere waarde van het verhang  $i$ , dus een grotere belasting.
- 4) Het gemak waarmee het water door de top laag kan stromen, gelijk aan het quotiënt van de waterdoorlatendheid van de top laag en de top laagdikte ( $k' / D$ ). Hoe groter deze verhouding, hoe makkelijker het water door de top laag kan ontsnappen, dus hoe kleiner het verhang is dat in de granulaire laag kan ontstaan; een grotere waarde is dus gunstig (net als bij het faalmechanisme top laaginstabiliteit is feitelijk de leklengte  $A$  van belang: de verhouding tussen het gemak waarmee het water door de granulaire laag en door de top laag stroomt, bepaald door de waterdoorlatendheid en de dikte van de top laag en de granulaire laag (zie ook 5)).

- 5) Het gemak waarmee het water door de granulaire laag kan stromen, gelijk aan het product van de waterdoorlatendheid en de laagdikte van de granulaire laag; deze parameter wordt ook wel de transmissiviteit genoemd. Een grotere waarde leidt tot een groter verhang en is dus ongunstig.
- 6) Taludhelling cot  $\alpha$ : een steilere helling leidt tot een groter verhang en is dus ongunstig.

#### 7.4.2 MATERIAALTRANSPORT VANUIT DE GRANULAIRE LAAG DOOR DE TOPLAAG

De golfbeweging zorgt voor opwaartse waterdruk onder de toplaagelementen (zie 7.2). Als de sortering van de granulaire laag en de openingen tussen de toplaagelementen niet goed op elkaar zijn afgestemd kan deze opwaartse waterdruk leiden tot uitspoeling van materiaal vanuit de granulaire laag naar de toplaag. Ook dit kan leiden tot falen (zie figuur 7.13).

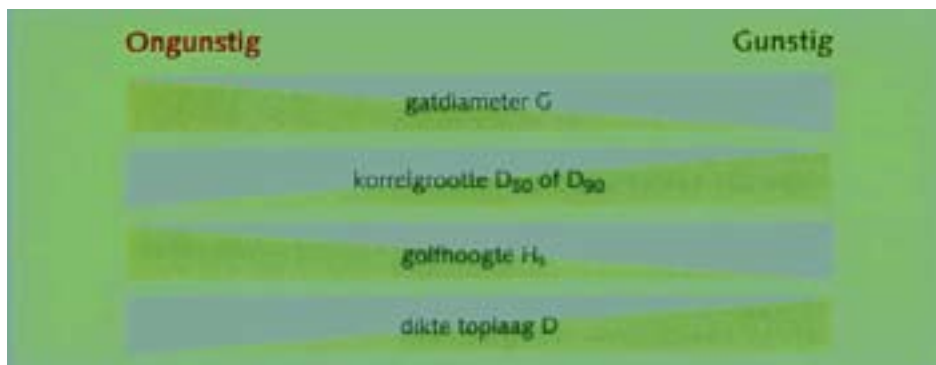
FIGUUR 7.13 SCHADEVERLOOP BIJ FAALMECHANISME MATERIAALTRANSPORT VANUIT DE GRANULAIRE LAAG



#### PARAMETERS

Bij materiaaltransport vanuit de granulaire laag zijn de parameters van belang die de weerstand tegen uitspoeling en de opwaartse kracht op de granulaire deeltjes bepalen (zie figuur 7.14).

FIGUUR 7.14 PARAMETERS MATERIAALTRANSPORT GRANULAIRE LAAG > TOPLAAG



- 1) Gatdiameter G: de grootte van de openingen tussen de toplaagelementen bepaalt de weerstand tegen uitspoeling.
- 2) Korrelgrootte van het granulaire materiaal: in de rekenregels worden hiervoor de karakteristieke korrelafmetingen D50 en D90 gebruikt.
- 3) Golfhoogte Hs: in de empirische rekenmethode karakteriseert de golfhoogte Hs de belasting.
- 4) Dikte D van de toplaag: een grotere laagdikte zorgt voor grotere weerstand tegen uitspoeling.

## 7.5 FAALMECHANISMEN VAN AANVERWANTE BEKLEDINGSTYPEN

### 7.5.1 FALEN VAN GESCHAKELDE STEENZETTINGEN

Voor geschakelde steenzettingen gelden globaal dezelfde faalmechanismen als voor standaard steenzettingen. De onderlinge verbinding maakt de toplaag iets stabielier. Blokkenmatten kunnen falen door het losraken en omklappen van hoekelementen onder golfaanval.

### 7.5.2 FALEN VAN DOORGROEISTENEN

Het maatgevende faalmechanisme voor doorgroeistenen is de uitspoeling van grond vanuit de gaten in de toplaagelementen wat de toplaag ondermijnt. Dit is alleen mogelijk als de grasbekleding in de gaten bezwijkt. Bij grasbekleding met doorgroeistenen ontstaat weliswaar eerder initiële schade dan bij gewone grasbekleding, maar de uiteindelijke schade is kleiner.

### 7.5.3 FALEN VAN INGEGOTEN STEENZETTINGEN

Penetratie met beton of asfalt kan de toplaag waterdicht maken en zoveel extra samenhang tussen de toplaagelementen tot stand brengen dat het geheel fungeert als een plaatbekleding. Voor dit bekledingstype zijn drie faalmechanismen van belang:

- oplichten van de toplaag
- afschuiving
- materiaaltransport

De mechanismen afschuiving en materiaaltransport zijn niet principieel anders dan voor standaard steenzettingen; daarvoor verwijzen we naar 7.3 en 7.4. Deze paragraaf gaat verder in op het faalmechanisme oplichten van de toplaag, dat specifiek geldt voor ingegoten bekledingen.

Een ingegoten toplaag kan oplichten door golfbelasting (via drukopbouw in de granulaire laag), door statische wateroverdruk of door een combinatie van beide. Vanaf een bepaalde mate van oplichten kunnen scheuren in de toplaag ontstaan, maar dit leidt nog niet direct tot falen. Het maatgevende mechanisme is, dat er ruimte ontstaat tussen toplaag en granulaire laag op het moment dat er een aanzienlijke stroming is in de granulaire laag. Als deze ruimte groot genoeg is, zal migratie van het granulaire materiaal optreden. Op den duur leidt dit tot vervorming van het profiel, waardoor de samenhang van de bekleding verloren gaat.

Als niet zeker is dat de toplaag fungeert als plaat, moet niet alleen rekening worden gehouden met oplichten van de toplaag, maar ook met het faalmechanisme toplaaginstabiliteit van een standaard steenzetting (zie 7.2). Dit is het geval bij een oppervlakkig gepenetreerde (overgoten) steenzetting. Ook als er getwijfeld wordt aan de kwaliteit van het penetratiemateriaal is dit aan de orde. Bij het ontwerp is dat niet relevant.

### 7.5.4 FALEN VAN BREUKSTEENOVERLAGINGEN

Een overlaging met breuksteen wordt alleen aangebracht als de steenzetting zelf niet voldoende sterkte kan bieden. Deze wordt ontworpen op de faalmechanismen van de overlaging zelf, zonder rekening te houden met de (rest)sterkte die wordt geleverd door de steenzetting onder het breuksteenpakket en door de onderlagen. De breuksteenoverlaging faalt als er geen voorbelasting meer aanwezig is op de onderliggende steenzetting.

We onderscheiden drie soorten breuksteenoverlagen:

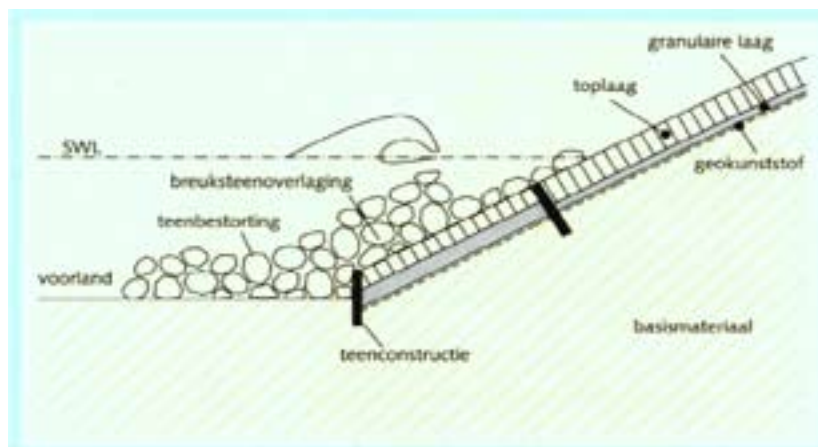
- 1) losse breuksteen;
- 2) gedeeltelijk of patroon-gepenetreerde breuksteen;
- 3) 'vol en zat' gepenetreerde breuksteen.

De eerste twee varianten lijken sterk op een 'normale' oeverbekleding van breuksteen, terwijl de derde variant op een plaatbekleding lijkt. Voor de verschillende typen zijn dus verschillende faalmechanismen maatgevend.

In het *Technisch Rapport Steenzettingen* [5] wordt alleen het faalmechanisme voor losse breuksteen behandeld: de beweging van individuele stenen onder golfaanval. De constructie faalt als geen voorbelasting meer aanwezig is op de onderliggende, 'onvoldoende' steenzetting. De beweging van de breuksteenelementen wordt voornamelijk veroorzaakt door de klap van de brekende golven en door het water dat terugstroomt vanaf het talud. De belasting door het terugstromende water zorgt voor een essentieel verschil met de belastingsituatie van een doorgaand breuksteentalud (zie figuur 7.15).

Voor de faalmechanismen van een 'vol en zat' gepenetreerde breuksteenoverlaging verwijzen we naar Technisch Rapport Asphalt voor waterkeren [6].

FIGUUR 7.15 FAALMECHANISME TOPLAAGSTABILITEIT OVERLAGING MET LOSSE BREUKSTEEN



#### PARAMETERS

Voor het faalmechanisme toplaaginstabiliteit van een overlaging met losse breuksteen wordt de belasting vooral bepaald door de golfhoogte en het aantal golven; de belangrijkste sterkte parameters zijn de grootte en de dichtheid van de stenen (zie figuur 7.16).

FIGUUR 7.16

## PARAMETERS BREUKSTEEVERLAGING

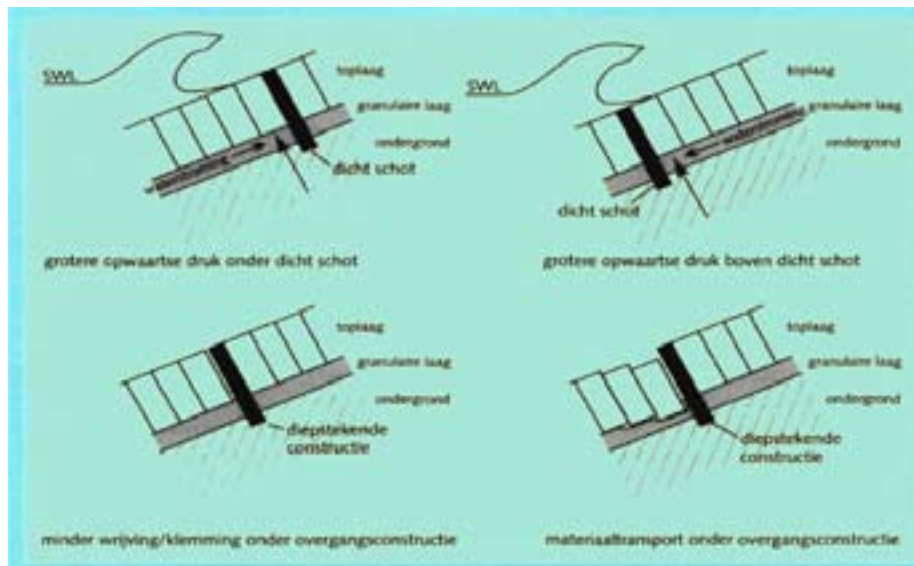


1. Golfhoogte  $H_s$ : hoe hoger de golfhoogte, hoe ongunstiger.
2. Aantal golven  $N$ : de belastingduur speelt een rol in de rekenregels en wordt gekarakteriseerd door het aantal golven tijdens een storm.
3. Taludhelling  $\cot \alpha$ : een steilere helling is ongunstig.
4. Grootte van de stenen  $D$ : samen met de dichtheid  $\rho$  bepaalt de steendiameter het gewicht van de stenen.
5. Dichtheid van de stenen  $\rho$  (zie 4).

In figuur 7.17 laten de bovenste twee afbeeldingen het blokkeren van de drukvoortplanting in de granulaire laag zien, de onderste twee de minder goede aansluiting tussen steenzetting en overgangsconstructie. In de praktijk blijken topplaaginstabiliteit en materiaaltransport vaak in de buurt van teen- en overgangconstructies voor te komen.

FIGUUR 7.17

## ONGUNSTIGE INVLOED VAN OVERGANGCONSTRUCTIES



## PARAMETERS

Voor de invloed op de aansluitende bekleding zijn de parameters zoals genoemd onder topplaaginstabiliteit en materiaaltransport van belang (zie 7.2 en 7.4). Daarnaast zijn enkele specifieke eigenschappen van de overgangsconstructie van belang (zie figuur 7.18).

FIGUUR 7.18 PARAMETERS INVLOED OVERGANGSCONSTRUCTIES

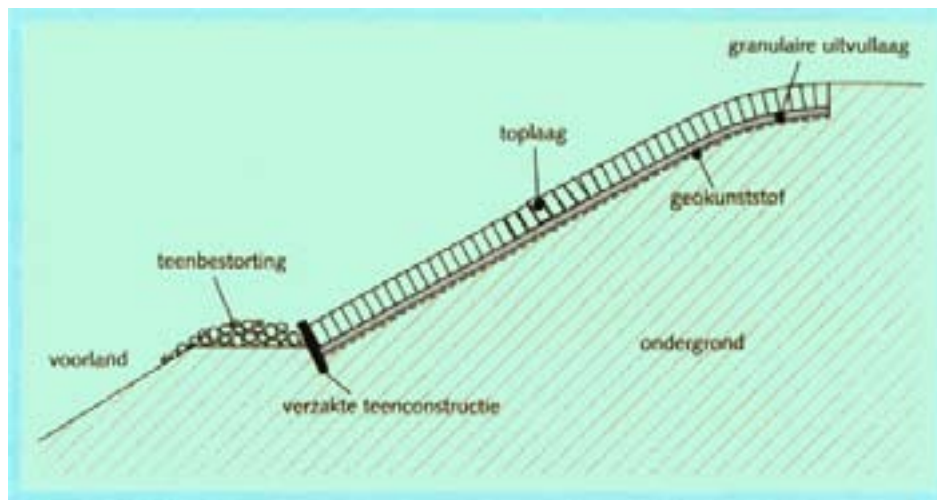


1. Mate van afsluiting van de granulaire laag: hoe meer de drukvoortplanting door de granulaire laag wordt geblokkeerd, hoe groter de maximale toename van de waterdruk en dus de extra belasting op toplaaginstabiliteit.
2. Aansluiting met de toplaagelementen: hoe slechter deze aansluiting, hoe groter de kans op materiaaltransport.

### 7.5.5 FALEN VAN TEEN-, OVERGANGS- OF AANSLUITINGSCONSTRUCTIE

De teen-, overgangs- of aansluitingsconstructie kan ook zelf falen, door grondmechanische instabiliteit en/of materiaaltransport. Een voorbeeld staat in figuur 2.6.19. Zoals een steenzetting tegen een teen- of overgangsconstructie rust, zo rust een teenconstructie tegen een onderliggende teenbestorting én die is gefundeerd in de bodem. Het verdwijnen van deze ondersteuning (bijvoorbeeld door ontgronding) kan leiden tot falen van de teenconstructie.

FIGUUR 7.19 FALEN TEENCONSTRUCTIE



### PARAMETERS

Voor het falen van de teen- of overgangsconstructies zelf worden geen concrete parameters genoemd: daarvoor bestaan teveel typen en zijn ze te complex. Dit komt ook tot uiting in de methodiek voor ontwerp en voor toetsing, die vooral gebaseerd is op kwalitatieve ervaringsgegevens. Voor laaggelegen constructies kunnen ervaringsgegevens een indicatie zijn van de veiligheid, omdat in die zone in de meeste gevallen vrijwel maatgevende belastingen zijn voorgekomen.



# 8

## FAALMECHANISMEN EN INDICATOREN

### 8.1 INLEIDING

Veel inspecties vinden plaats op basis van visuele waarnemingen. Voor het eenduidig vastleggen worden inspectieparameters gebruikt. Inspectieparameters zijn zichtbare of meetbare aspecten van waterkeringen die bijdragen aan informatie over de actuele conditie van de keringen. De aspecten zullen dus gerelateerd zijn aan de functies van de keringen. Inspectieparameters moeten we kunnen relateren aan faalmechanismen. De relatie tussen inspectieparameter en faalmechanisme hoeft niet een directe relatie te zijn. In veel gevallen draagt een inspectieparameter bij aan een indicatie voor een faalmechanisme. Een kale plek in een grasmat is een inspectieparameter die een indicatie geeft over de erosiebestendigheid bij overloop of golfoverslag. Erosiebestendigheid is een indicator voor het faalmechanisme overloop of golfoverslag. Een inspectieparameter geeft informatie over een indicator voor een faalmechanisme. Een scheur aan de oppervlakte van een grasmat is een ander voorbeeld van een inspectieparameter. De betekenis van de scheur in relatie tot het functioneren van de kering hangt samen met het ontwerp en de opbouw en ondergrond van de kering. De scheur kan een aanwijzing zijn voor het verlies aan samenhang van de kering. De scheur kan informatie geven over de actuele afschuifweerstand voor het faalmechanisme macro-instabiliteit. De indicator is in dit voorbeeld afschuifweerstand. De scheur kan ook informatie geven over het faalmechanisme zetting. Hierbij hoort de indicator hoogteveranderingen. De term indicator en inspectieparameter worden vaak door elkaar gebruikt. Een ander woord dat voor indicator wordt gebruikt is beoordelingsaspect.

### 8.2 INDICATOREN DIJKEN

De volgende indicatoren voor faal- en / of bezwijkmechanismen van dijken zijn tot nu toe geïdentificeerd:

- veranderingen in de kruinhoogte en/of het geometrische profiel;
- langsscheuren op kruin (glijvlakken, uitdrogen);
- langsscheuren of kieren langs vaste constructie onderdelen (afschuiven);
- dwarsscheuren (locale verlaging, uitdroging);
- opbolling bij de teen (glijvlakken, afschuiving);
- stromend water in de kwelsloot (bodemmateriaal meevoerende wellen);
- verkleuring van het water in de kwelsloot (bodemmateriaal meevoerende wellen);
- natte plekken op het binnentalud (verweking van het binnentalud);
- verandering van de vegetatie door vernatting (langere termijn);
- sloot wordt dichtgedrukt (afschuiving, verweking);
- beschadiging van het gras door vertrapping door vee (erosie taludbekleding); omhoogkomende en kammende stenen (erosie taludbekleding);
- niet meer aansluiten van de bekleding aan overgangsconstructies (erosie taludbekleding, verzakkingen constructies, et cetera);
- ver- en wegzakken stenen met als gevolg gaten in de bekleding (erosie van de taludbekleding);
- opwellend water (kwel, opbarsten), eventueel met meevoeren van zand (piping).

Een overzicht van faalmechanismen en indicatoren bij dijken is gegeven in tabel 8.1. De tabel is overgenomen uit [25].

TABEL 8.1 FAALMECHANISMEN EN INDICATOREN BIJ DIJKEN EN KADES UIT [25]

Faalmechanisme en indicatoren bij dijken en kades			
Faalmechanisme	Indicatoren		
	belasting	Constructie	
		zwakte-indicatoren	bezwijkindicatoren
overloop	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hoogwater,</li> <li>- extreme regenval,</li> <li>- storm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- lokale verlaging van de kruin, dwarsscheuren in de kruin</li> <li>- grootschalige verlaging van de kruin vaak als gevolg van klink en zetting,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- erosie van het binnentalud, beschadiging van de grasbekleding</li> <li>- scholvorming binnentalud als gevolg van verzadiging binnentalud</li> </ul>
overslag	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hoogwater,</li> <li>- storm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- lokale verlaging van de kruin, dwarsscheuren in de kruin</li> <li>- grootschalige verlaging van de kruin als gevolg van klink en zetting</li> <li>- niet waterkerende objecten (bomen op de kruin)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- erosie van de toplaag op kruin en binnentalud, concentratie van wegstromend water</li> <li>- verzadiging binnentalud waardoor afschuiving, langsscheuren in de kruin, vervorming bij de teen van het binnentalud</li> </ul>
macro-instabiliteit binnenzijde	<ul style="list-style-type: none"> <li>- langere tijd hoogwater</li> <li>- hoge freatische lijn</li> <li>- schade toplaag buitentalud waardoor de kleilaag beschadigd is</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- steil talud aan de binnenzijde</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- scheurvorming op de kruin</li> <li>- verzakken van de kruin</li> <li>- opbolling bij de teen van het binnentalud</li> <li>- dichtdrukken van de sloot bij de teen van het binnentalud</li> </ul>
micro-instabiliteit	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hoogwater</li> <li>- aanwezigheid van muskusratten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- gangenstelsels, gaten in toplaag</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- uittreden van water op het binnentalud</li> <li>- verkleuring slootwater</li> <li>- verandering van de vegetatie</li> <li>- vorming glijcirkel zie macro-instabiliteit</li> </ul>
piping en heave	<ul style="list-style-type: none"> <li>- combinatie van hoog water aan de buitenzijde en laag water aan de binnenzijde</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- natte plekken bij teen binnentalud dan wel op enige afstand van de teen van het binnentalud</li> <li>- verandering vegetatie</li> <li>- uitstromend water</li> <li>- drijfzand</li> <li>- zand heuveltjes met een krater</li> <li>- uitstromend water dan wel verkleuring van het water in de sloot</li> </ul>
macro-instabiliteit buitentalud	<ul style="list-style-type: none"> <li>- snelle waterstanddaling</li> <li>- aantasting voorland</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- steil talud</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- langsscheuren op de kruin</li> <li>- kanteling van de kruin</li> </ul>
afschuiven dijklichaam	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hoogwater</li> <li>- langdurige droogte</li> <li>- verlaging van de tegendruk</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mager ontwerp van dijk of kade</li> <li>- materiaal</li> <li>- recente verstoringen in de omgeving</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- opbolling voor de teen van het binnentalud</li> <li>- dichtdrukken sloot bij het binnentalud</li> <li>- vervorming beschoeiing</li> <li>- lawaai door breken beschoeiing en leidingen</li> </ul>
erosie toplaag buitenzijde	<ul style="list-style-type: none"> <li>- storm</li> <li>- extreme stroming</li> <li>- kruisend ijs</li> <li>- aanvaring</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ontbreken stenen</li> <li>- omhoogkomen dan wel verzakken van stenen of groepstenen</li> <li>- geulen of gaten onder de bekleding</li> <li>- scheuren in asfalt of beton</li> <li>- dunne plekken in asfalt/beton of klei</li> <li>- 'stripping' van het asfalt</li> <li>- openingen bij overgangen tussen verschillende bekledingstypen</li> <li>- gaten in het gras, bijv. door dieren, toeristen of vandalisme</li> <li>- kwaliteit gras</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- stenen, brokken asfalt of klei op de kruin</li> <li>- geluid rollende stenen</li> <li>- scheurvorming op de kruin</li> </ul>

# REFERENTIES

- [1] Leidraad Grondslagen voor Waterkeren  
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen  
Januari 1998
  
- [2] Hydraulisch Randvoorwaardenboek 2001 voor het toetsen van primaire waterkeringen  
Directoraat-generaal Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ  
Dienst weg- en waterbouwkunde  
Januari 2002
  
- [3] De veiligheid van de primaire waterkeringen in Nederland  
Voorschrift Toetsen op Veiligheid voor de tweede toetsronde 2001 - 2006 (VTV)  
Ministerie van Verkeer en Waterstaat  
Januari 2004
  
- [4] Grasmatten als Dijkbekleding  
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen  
Februari 1999
  
- [5] Technisch Rapport Steenzettingen, ontwerp  
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen  
December 2003
  
- [6] Technisch Rapport Asfalt voor Waterkeringen  
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen  
November 2002
  
- [7] Wet op de waterkering  
Ministerie van Verkeer en Waterstaat  
Januari 1996
  
- [8] Handreiking Inventarisatie en waardering LNC-aspecten  
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen  
April 1994
  
- [9] Klei voor dijken  
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen  
Mei 1996
  
- [10] Erosiebestendigheid van grasland als dijkbekleding  
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen  
Augustus 1998

- [11] Aanleg en beheer van grasland op rivierdijken,  
Unie van Waterschappen  
September 1992
  
- [12] Groene zeedijken in Noord Duitsland en Denemarken  
RWS - DWW Rapport W-DWW-97-003  
Mei 1997
  
- [13] Introductie van inheemse flora, Handreiking voor een verantwoorde keuze en aanpak  
met een accent op multifunctionele terreinen  
IKC-Natuurbeheer Wageningen  
1998
  
- [14] Standaard RAW Bepalingen  
CROW 2000-a  
Oktober 2000
  
- [15] Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen  
Katern boezemkaden  
Concept 2006
  
- [16] Leidraad rivieren  
Directoraat-generaal Water Ministerie van Verkeer en Waterstaat  
2007
  
- [17] Technisch Rapport Golfploop en golfoverslag bij dijken  
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen  
September 2002
  
- [18] Golfoverslag en krachten op verticale waterkeringconstructies  
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen  
Mei 2002
  
- [19] Handreiking constructief ontwerpen  
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen  
April 1994
  
- [20] Leidraad bij bodemonderzoek in en nabij waterkeringen  
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen  
Mei 1988
  
- [21] Leidraad zee- en meerdijken  
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen  
December 1999
  
- [22] Leidraad Kunstwerken  
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen  
Mei 2003

- [23] Theorieontwikkeling rondom opdrijven  
Rapport nummer SE-52029/2 GeoDelft  
Februari 2000
  
- [24] Technisch Rapport Zandmeevoerende wellen  
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen  
Maart 1999
  
- [25] Inspectie van waterkeringen, een overzicht van meettechnieken  
STOWA rapport 2006 10, DWW rapport 200660  
Juli 2006