

SBW Buitendijkse zones en afslagbeheer

Inventarisatie beschikbare kennis, witte vlekken en rekenmodellen

Ons kenmerk
427070/8

Versie
03 Concept

Datum
18 januari 2008

Opgesteld in opdracht van
**Rijkswaterstaat Dienst Weg- en
Waterbouwkunde**

Postbus 69
NL-2600 AB
Stieltjesweg 2
NL-2628 CK Delft

Telefoon (015) 26 93 500
Telefax (015) 26 10 821
info@geodelft.nl
www.geodelft.nl

Postbank 234342
ING Bank NV
rek.nr.65.09.62.524
KvK 541146461
BTW NL80097476B01

Rapportnummer
427070/8 v03 Concept

Datum
18 januari 2008

Samenvatting rapport

Versie
03 Concept

Aantal pagina's
37

Titel / subtitel

SBW Buitendijkse zones en afslagbeheer /
Inventarisatie beschikbare kennis, witte
vlekken en rekenmodellen

Projectleider(s)

H.A. Schelfhout

Projectbegeleider(s)

ir. T.P. Stoutjesdijk

Opgesteld in opdracht van

Rijkswaterstaat Dienst Weg- en
Waterbouwkunde

<u>Versie</u>	<u>Datum</u>	<u>Opgesteld door</u>	<u>Paraaf</u>	<u>Gecontroleerd door</u>	<u>Paraaf</u>
	18 januari 2008	H.A. Schelfhout			

Rapportnummer
427070/8 v03 Concept

Datum
18 januari 2008

Inhoudsopgave

1	Inleiding	1
2	Probleembeschrijving	3
2.1	Definitie voorland	3
2.2	Geometrische verschillen	3
2.3	Methodiek	5
3	Faalmechanismen	7
3.1	Faalmechanismen voorland	7
3.1.1	Afschuiving en zettingsvloeiing	7
3.1.2	Erosie/afslag voorland	7
3.1.3	Falen bekleding voorland	8
3.1.4	Falen constructies voorland	8
3.1.5	Invloed niet-waterkerende objecten voorland	8
3.2	Faalmechanismen dijken	9
3.3	Falen dijk in relatie tot falen voorland	10
3.3.1	Piping	10
3.3.2	Macro-instabiliteit buitenwaarts	10
3.3.3	Sterkte bekleding buitentalud	10
3.3.4	Ontgrondingskuil bij de teen	11
3.3.5	Overloop/golfoverslag	11
3.3.6	Falen bekledingen	11
3.3.7	Falen bijzondere waterkerende constructies	11
3.4	Resumé	11
4	Veiligheidseisen	13
4.1	Algemeen	13
4.2	Veiligheidseisen VTV voor dijken	13
4.3	Veiligheidseisen voorland	14
5	Belastingen	15
5.1	Bedreigingen per watersysteem	15
5.2	Berekeningsmethoden	15
5.3	Hydraulische randvoorwaarden dijken	16
5.4	Hydraulische randvoorwaarden voorland	18
6	Sterkte	21
6.1	Erosie en afslag	21
6.2	Macro-instabiliteit	22
6.3	Piping	23
6.4	Bekledingen	23
6.5	Bijzondere constructies	23
7	Conclusies en aanbevelingen	25
8	Literatuuroverzicht	27
9	Overzicht rekenmodellen	31

1 Inleiding

Deze rapportage betreft een nadere invulling van activiteit 1: 'Inventarisatie beschikbare kennis en witte vlekken' en activiteit 2: 'Inventarisatie beschikbare rekenmodellen' uit het plan van aanpak SBW Buitendijkse zones en afslagbeheer, kenmerk CO-427070/8 van augustus 2007.

Het plan van aanpak voorziet in een go-no-go moment na het uitvoeren van de activiteiten 1 en 2. Ten grondslag hieraan ligt de wens van het SBW Reviewteam Dijken om na het uitvoeren van deze activiteiten nogmaals het plan van aanpak en een nadere invulling van de activiteiten te beoordelen.

Op grond van deze rapportage is een aangepast plan van aanpak gemaakt, waarover apart is gerapporteerd in het Aangepaste plan van aanpak SBW Buitendijkse zones en afslagbeheer, kenmerk CO-427070/8, concept 03 van 18 januari 2008

Doelstelling

In deze rapportage wordt een beeld gegeven van de huidige beschikbare kennis en leemten daarin en de op dit moment beschikbare rekenmodellen.

Het doel daarvan is om inzicht te krijgen in de specifieke onderdelen van het project, waarvoor op grond van de huidige beschikbare kennis en rekenmodellen nu al een aanzet kan worden gemaakt en welke onderdelen, die nog een andere uitwerking behoeven of waarvoor nog onvoldoende gegevens beschikbaar zijn.

Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt de probleemstelling gedefinieerd in het licht van verschillende voorlandsituaties en de toetsmethode uit het Voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV).

In hoofdstuk 3 wordt nader ingegaan op de faalmechanismen van het voorland en de faalmechanismen van de dijk, die daardoor kunnen worden beïnvloed.

In hoofdstuk 4 worden de veiligheidseisen behandeld.

In hoofdstuk 5 worden per watersysteem de bedreigingen en de bijbehorende belastingen benoemd met het Randvoorwaardenboek (HR2006) als vertrekpunt.

In hoofdstuk 6 worden de sterkte per faalmechanisme belicht.

Tot slot staan in hoofdstuk 7 de conclusies en aanbevelingen.

2 Probleembeschrijving

2.1 Definitie voorland

Het SBW-project Buitendijkse zones en Afslagbeheer heeft betrekking op voorlandsituaties bij dijken langs de Noordzee, estuaria, meren en rivieren. Het Voorschrift Toetsen op Veiligheid [V&W-2007b] geeft de volgende definities:

1. Voorland: "Het gebied aansluitend aan de buitenzijde van de waterkering. Dit gebied wordt ook wel vooroever genoemd. Ook een diepe steile stroomgeul bij een schaaldijk valt onder de definitie van voorland. Het voorland kan zowel onder als boven water liggen en zelfs boven Toetspeil."
2. Vooroever: "Waterbodem in de zone vlak voor de teen van de dijk."

Hieruit blijkt dat er qua definitie geen onderscheid wordt gemaakt tussen het voorland en de vooroever. Omdat verschillen in de hoogte en/of de breedte van het voorland mede bepalend zijn voor de aanpak worden in dit rapport de geometrische verschillen op basis van de fysiek aanwezige situatie als vertrekpunt genomen.

Opgemerkt wordt dat de beoordeling van het voorland bij de zachte kust buiten het kader van dit project valt. Dit wordt geacht te vallen onder het project SBW Duinen 2 en voor wat betreft de kustplaatsen onder de problematiek van Risicobeheersing in Kustplaatsen. Voor de nadere uitwerking van voorlandsituaties bij dijken met een zandige ondergrond kan daarop worden aangesloten.

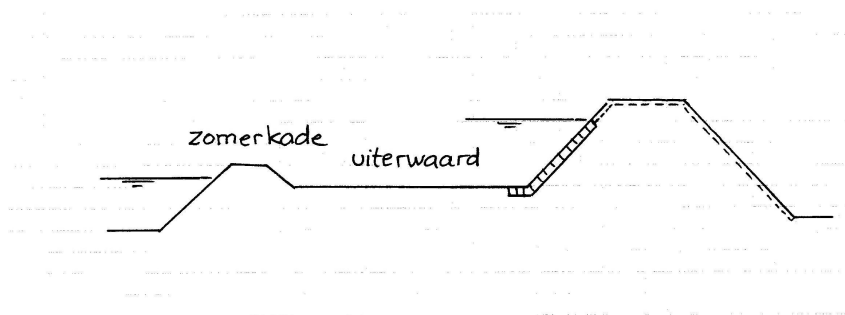
2.2 Geometrische verschillen

Er zijn twee standaardgevallen te onderscheiden:

- A. Dijk met voorland in de vorm van een uiterwaard (A1) of hoogliggend terrein (A2), dat periodiek of permanent droogligt;
- B. Dijk met diep water vlak voor de dijk, zoals bijvoorbeeld een schaaldijk, waarbij het voorland altijd onder water ligt.

A1. Dijk met uiterwaard

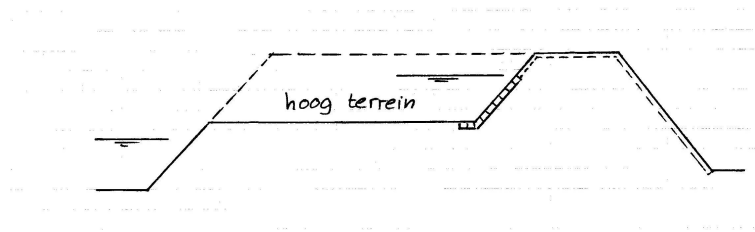
De situatie van een dijk met een uiterwaard kan als volgt worden geschematiseerd.



Figuur 2.1. Dijk met uiterwaard.

A1. Dijk met hoog terrein

De situatie van een dijk met daarvoor een hooggelegen terrein kan als volgt worden geschematiseerd.

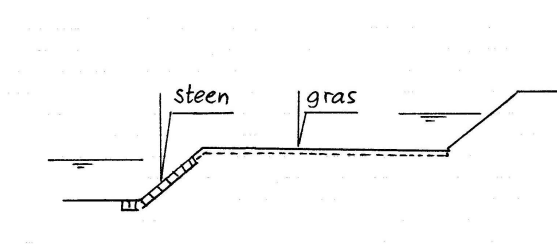


Figuur 2.2. Dijk met hoog terrein.

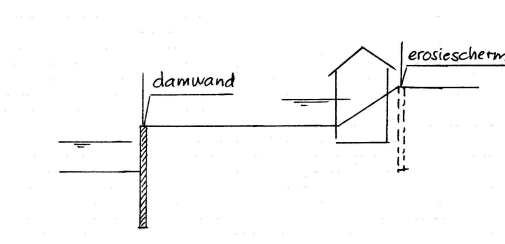
Een bijzondere situatie is wanneer het hoge terrein boven het Toetspeil ligt. Dat geldt ook voor de situatie dat het voorland direct aansluit op de kruin van de dijk.

De breedte van het voorland is niet overal hetzelfde. Bovendien is kan er verschil zijn met een dijk met een buitenberm, die een stabiliteitsfunctie of een golfreducerende functie kan hebben. Verder hoeft bij voldoende breed voorland het falen van het voorland niet altijd te leiden tot een veiligheidsprobleem.

Op het voorland aanwezige bekledingen (gras, steen, asfalt etc.) en constructies (damwanden, keermuren etc.) kunnen invloed hebben op het falen van het voorland en/of het falen van de dijk.



Figuur 2.3. Bekledingen op het voorland.

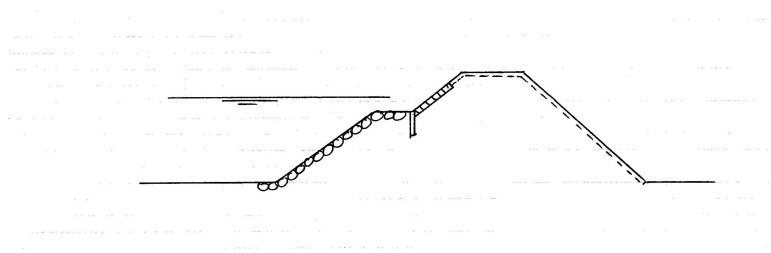


Figuur 2.4. Constructies op het voorland.

Bovendien kunnen er aan de buitenzijde van de dijk stabiliteit- of erosieschermen aanwezig zijn of afschermconstructies, zoals bijvoorbeeld bij de aanwezigheid van buitendijkse bebouwing. Overigens valt de beoordeling van bebouwing, evenals andere niet-waterkerende objecten (begroeiing, pijpleidingen etc.) op het voorland buiten het kader van dit project.

B. Schaardijk

De situatie met diep water voor de dijk kan als volgt worden geschematiseerd.



Figuur 2.5. Schaardijk

In deze situatie is voor het overgrote deel sprake van een onderwateroever natte oever, die qua fysische benadering afwijkt van de situatie met een droge oever c.q. voorland, waarbij ook het restprofiel na falen aanzienlijk minder of zelfs afwezig kan zijn.

2.3 Methodiek

De methodiek uit Katern 9 Voorland van het VTV [V&W-2007b] is nog niet compleet omdat deze enkel betrekking heeft op de faalmechanismen afschuiving en zettingsvloeiing, terwijl andere faalmechanismen, die ook van invloed kunnen zijn op de veiligheid niet worden beschouwd. Bovendien is niet duidelijk of de methode wel representatief genoeg is voor voorlandssituaties met specifieke kenmerken en hydraulische randvoorwaarden, die voor de verschillende watersystemen gelden.

De consequenties van het ontbreken van een complete toetsmethode kunnen twee kanten opwerken. Potentiële gevaarlijke situaties kunnen over het hoofd worden gezien (gevaar van bezwijken van de waterkering door erosie of afslag wordt niet onderkend), maar er kan ook onterecht worden afgekeurd, bijvoorbeeld als gevolg van toepassing van een te conservatief afslagprofiel.

Om in de praktijk de geometrische kenmerken van het voorland heel verschillend kunnen zijn, moeten de toetsmethoden veel verder worden gedifferentieerd dan nu het geval is. Bij een situatie met voorland wordt de bekleding op het voorland in de regel niet getoetst. Dit is niet consistent, want ook bij een voorland dient de waterkering bestand te zijn tegen erosie (of er moet worden aangetoond dat het voorland zo breed is dat ook als erosie optreedt de waterkerende functie is gewaarborgd). Er zijn veel situaties met voorland waarbij twee aspecten er de oorzaak van zijn dat een toets van erosiebestendigheid van op het voorland aanwezige bekledingen praktisch gezien lastig is. Voorbeelden daarvan zijn:

1. Situaties met op korte afstand meerdere kademuurtjes, damwanden, slecht onderhouden steenzettingen, gescheurd asfalt of alleen gras. Verder staat er soms een damwand langs een buitendijks industrieterrein, waarvan geen verdere gegevens bekend zijn. De vraag is tot op welke afstand dit soort zaken moeten worden meegenomen of met andere woorden: hoe breed moet het voorland worden gedefinieerd? Afhankelijk van de afstand tot de dijk hoeft er niet altijd sprake te zijn van een veilige benadering. Schade kan namelijk invloed hebben op de benodigde kwelweglengte of de buitenwaartse macrostabiliteit.

2. Vaak is het zo dat de waterkeringbeheerder niet de beheerder is van de constructie langs de waterkant. Uit oogpunt van zeggenschap wordt dan vaak de keuze gemaakt dat de waterkeringbeheerder voor het waarborgen van de veiligheid niet afhankelijk wil zijn van elementen waar hij geen zeggenschap over heeft.

Een omissie in de methodiek is dat er bij de aanwezigheid van voorland zonder niet-waterkerende objecten niet wordt getoetst op erosie door stroming of afslag door golven. De toetsing van het voorland is namelijk beperkt tot ongestoorde situaties, waarbij geen niet-waterkerende objecten, zoals begroeiing, bebouwing en pijpleidingen in het voorland aanwezig zijn. De beoordeling van de invloed van niet-waterkerende objecten in het voorland geschiedt op basis van Katern 10 Niet-waterkerende objecten van het VTV en valt buiten het kader van dit project. De invloed van niet-waterkerende objecten op erosie wordt in het kader van dit project dan ook niet nader beschouwd. Vooralsnog wordt er van uitgegaan dat dit aspect ter zijner tijd nader wordt ingevuld bij de actualisatie van Katern 10. Wel zal de mogelijke impact van dit project op de bepaling van de kritieke lijnen van het beoordelingsprofiel van niet-waterkerende objecten in beeld worden gebracht.

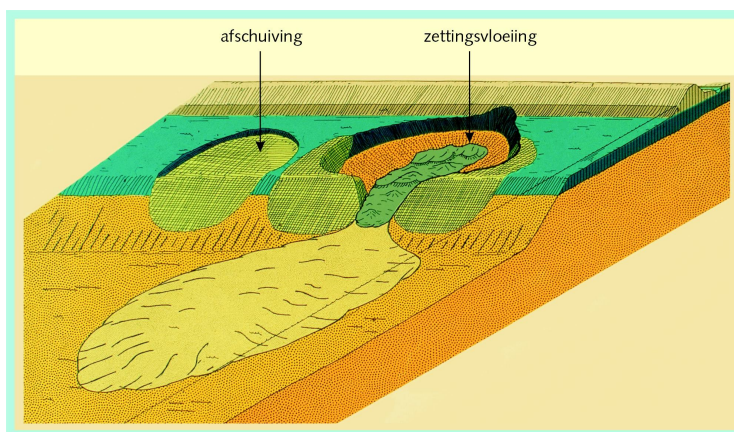
Een bijzonder aandachtspunt is de situatie bij schaar dijken. Aangezien er hier geen sprake is van een hoog voorland is nu de stabiliteit van de onderwater gelegen stroomgeul nog geen onderdeel van de toetsing. Omdat dit kan leiden tot gevaarlijke situaties moet dit in de toetsing worden ondervangen.

Een andere witte vlek is dat er ten aanzien van de rekenregels op dit moment nog geen gevalideerde rekenregels zijn voor het erosiegedrag van cohesieve materialen. Voor loskorrelige materialen zoals zand en grind en voor uniforme stromingen waarbij alleen bodemturbulentie een rol speelt is het Shields Diagram (zie [HV:1997]) beschikbaar. Daarentegen zijn er voor cohesieve materialen, zoals klei, veen of een combinatie van klei en veen wel rekenregels/kentallen beschikbaar uit de literatuur, maar die zijn voor zover bekend nog niet gevalideerd voor typisch Nederlandse gronden.

3 Faalmechanismen

3.1 Faalmechanismen voorland

3.1.1 Afschuiving en zettingsvloeiing

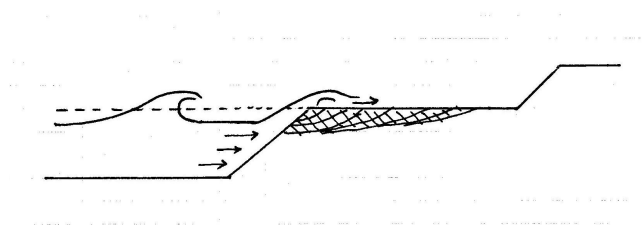


Figuur 3.1. Afschuiving en zettingsvloeiing (bron: VTV)

In het huidige VTV wordt de toetsing van het voorland enkel uitgevoerd voor de faalmechanismen afschuiving en zettingsvloeiing. Omdat het voorland op verschillende manieren kan falen, waarbij de consequenties voor de veiligheid ook verschillend kunnen zijn, dient de toetsing te worden uitgevoerd voor meer faalmechanismen. Deze worden in het volgende nader benoemd.

3.1.2 Erosie/afslag voorland

Erosie door stroming en/of afslag door golven van het voorland is vanuit de belastingkant gezien afhankelijk van de stroomsnelheid, de buitenwaterstand en de golfrandvoorwaarden. Vanuit de sterktekant gezien zijn de grondeigenschappen van belang. De faalmechanismen worden afzonderlijk beschouwd maar



Figuur 3.2. Erosie/afslag voorland

kunnen in combinatie met elkaar een cumulatief effect op ontgronding van het voorland hebben. De aanwezigheid van stroomgeulen of nevengeulen in het voorland kan invloed hebben op het erosie/afslaggedrag en zijn daarom een specifiek aandachtspunt.

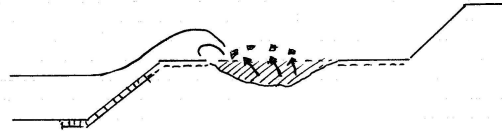
Specifiek aandachtspunt zijn de lokaties waar geen erosie, maar aanslibbing plaatsvindt. Erosie van het voorland komt bij een onbebouwd voorland (weiland, akkerland) namelijk in de praktijk bijna nooit voor. Dit fenomeen wordt nu bij de beoordeling van het voorland niet meegenomen. De vraag is of dat nodig is. Punt is wel dat bij maatgevende omstandigheden (bij Toetspeil) geen aanslibbing zal optreden, maar bij een zakkend peil wel.

In het huidige VTV wordt afslag van het voorland enkel behandeld bij de beoordeling van niet-waterkerende objecten. Echter ook voor de situatie zonder niet-waterkerende objecten kan afslag van het voorland een veiligheidsprobleem zijn, zodat deze situatie ook een plek in de

toetsing zou moeten krijgen. Het ligt voor de hand om dit op te nemen in Katern 9 Voorland van het VTV.

3.1.3 Falen bekleding voorland

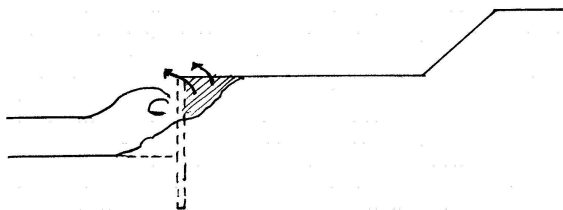
Indien er op het voorland geen bekleding aanwezig is zijn de grondeigenschappen bepalend. Echter in de regel is er een bekleding op het voorland aanwezig in de vorm van een grasmat, steen- of asfaltbekleding etc. Indien deze bekledingen voldoen aan de eisen van relevante leidraden of andere normen of richtlijnen kan het positieve effect daarvan op de erosiebestendigheid van het voorland worden meegenomen. Zoniet dan is nadere analyse van de sterkte van de bekleding nodig. Ingeval van twijfel kan worden gekozen voor een veilige benadering door geen sterkte aan de bekleding toe te kennen.



Figuur 3.3. Falen bekledingen voorland

3.1.4 Falen constructies voorland

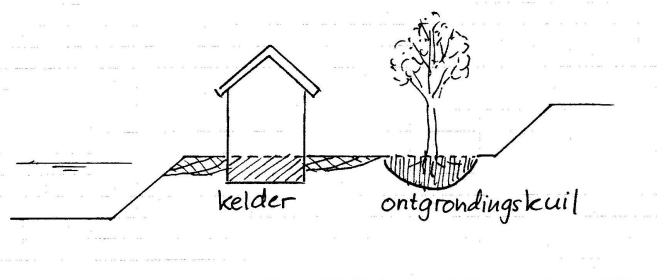
In het voorland kunnen constructies voorkomen zoals keermuren, damwanden, beschoeiingen etc. Indien deze constructies voldoen aan de eisen van de Leidraad Kunstwerken of andere normen (NEN) en richtlijnen (CUR) kan de sterkte van de constructie bij het falen van het voorland worden betrokken. Zoniet dan dient dit aan de hand van nadere analyse van de constructie te worden gekwantificeerd. Ingeval van twijfel kan worden gekozen om bij een eerste benadering volgens een eenvoudige toetsing een veilige benadering te kiezen door geen sterkte aan de constructie toe te kennen. De aanwezige constructie wordt dan in feite buiten beschouwing gelaten, zodat wordt getoetst op erosiebestendigheid van de ondergrond tegen stroming en erosie door golfafslag.



Figuur 3.4. Falen constructies voorland

3.1.5 Invloed niet-waterkerende objecten voorland

Indien er niet-waterkerende objecten op het voorland aanwezig zijn, zoals bebouwing, begroeiing, kabels en leidingen etc. kunnen deze als gevolg van de bijbehorende verstoringzone (bijvoorbeeld een ontgrondingskuil bij lekkage van een pijpleiding) een nadelige invloed uitoefenen op het waterkerend vermogen. Dit aspect wordt behandeld in Katern 10 Niet-waterkerende objecten van het VTV. Daarbij wordt aan de buitenzijde van de uitgang van een afslagprofiel van het voorland, dat representatief is voor



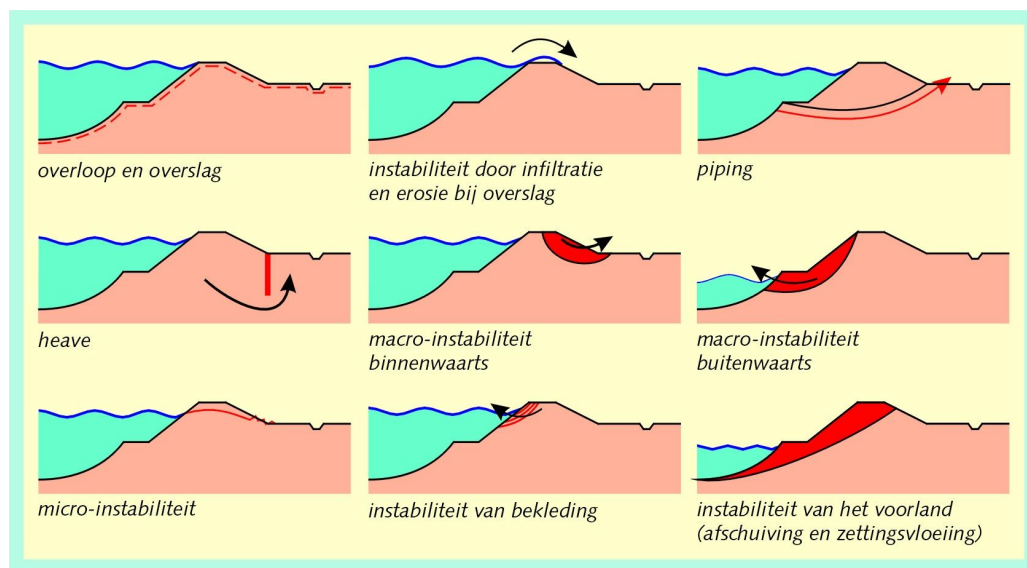
Figuur 3.5. Invloed verstoringzones NWO voorland

zandige ondergrond. Daarvoor is dus ook nog een actualisatieslag nodig, die echter buiten het kader van dit project valt. Wel zullen de mogelijke consequenties van dit project voor Katern 10 in beeld worden gebracht.

Falen van het voorland kan, zoals bijvoorbeeld bij een zettingsvloeiing waarbij de dijk in zijn totaliteit afschuift, direct leiden tot een veiligheidsprobleem. Echter indirect kan dit ook het geval zijn als het falen van het voorland een ongunstige invloed heeft op de faalmechanismen van de dijk, zoals bijvoorbeeld afslag van het voorland kan leiden tot vermindering van de benodigde de kwelweglengte. Dit betekent dat de faalmechanismen van het voorland ook in relatie tot de faalmechanismen van de dijk moeten worden beschouwd. In het volgende worden de faalmechanismen van de dijk behandeld, die kunnen worden beïnvloed door falen van het voorland.

3.2 Faalmechanismen dijken

Alle faalmechanismen, die betrekking hebben op dijken zijn samengevat in het volgende plaatje.



Figuur 3.6. Faalmechanismen dijken (bron: VTV)

Voor de beoordeling van het voorland in relatie tot de veiligheid van de dijk zijn de volgende faalmechanismen van belang:

- piping/heave
- macro-instabiliteit buitenwaarts
- overloop/golfoverslag
- falen bekledingen.

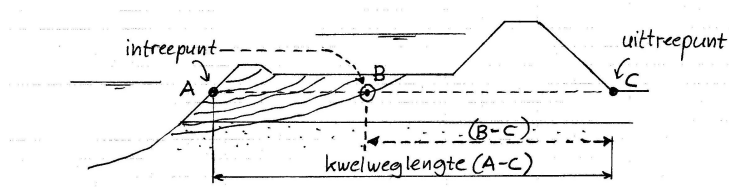
In het volgende wordt hier per faalmechanisme nader op ingegaan.

3.3 Falen dijk in relatie tot falen voorland

3.3.1 Piping

Bij ontgravingen op het voorland kan het intreepunt landwaarts verplaatsen, waardoor de kwelweglengte korter wordt en mogelijk niet meer aan de benodigde kwelweglengte wordt voldaan. Dit speelt met name als bij het ontwerp de intreeweerstand van het

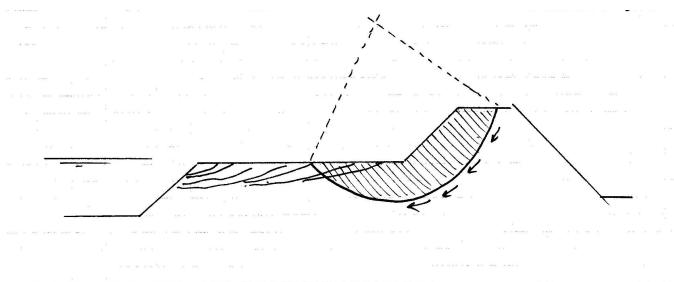
voorland bij de bepaling van de benodigde kwelweglengte is betrokken en als bij stroomvoerende geulen het terrein tussen de geul en de dijk als intreelengte in rekening is gebracht. Specifieke aandachtspunt daarbij is dat hier vaak, in tegenstelling tot de oever van het zomerbed, geen of beperkte maatregelen worden genomen om erosie/afslag tegen te gaan.



Figuur 3.7. Invloed op kwelweglengte

3.3.2 Macro-instabiliteit buitenwaarts

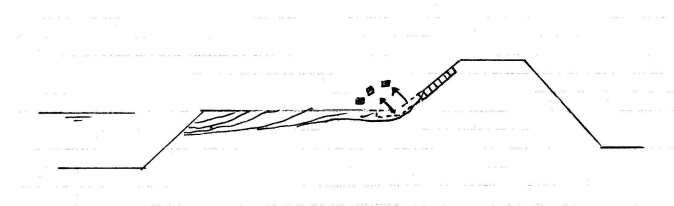
Ontgravingen op het voorland kunnen leiden tot stabiliteitsverlies, als deze in de invloedssfeer komen van de passieve zone, waar de benodigde weerstand tegen afschuiven van het buitentalud wordt gemobiliseerd. In dat geval wordt mogelijk niet meer wordt voldaan aan de schadefactor. Dit is de vereiste stabiliteitfactor, waaraan wordt getoetst.



Figuur 3.8. Invloed op buitenwaartse stabiliteit

3.3.3 Sterkte bekleding buitentalud

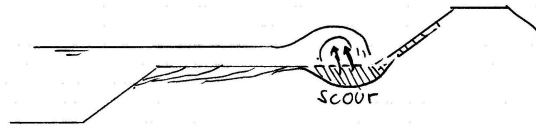
Door ontgravingen op het voorland kan de bekleding op het buitentalud worden ondermijnd, waardoor de sterkte en/of stabiliteit van de bekleding mogelijk niet meer aan de eisen voldoet.



Figuur 3.9. Invloed op bekleding buitentalud

3.3.4 Ontgrondingskuil bij de teen

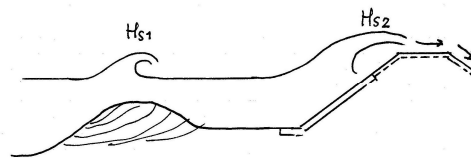
Bij afslag van het voorland kan een ontgrondingskuil (scour) bij de teen van de dijk ontstaan, die een nadelige invloed kan hebben op de benodigde kwelweglengte de buitenwaartse stabiliteit of de sterkte van de bekleding. Dit kan ook gebeuren bij geulvorming vlak langs de dijk. Dit aspect hoort bij de uitwerking van de situatie met diep water vlak langs de dijk, die in het kader van dit project buiten beschouwing wordt gelaten.



Figuur 3.10. Invloed ontgrondingskuil (scour)

3.3.5 Overloop/golfoverslag

Verlaging van golfreducerend voorland kan leiden tot verhoogde golfbelasting, met als mogelijk gevolg een groter overslagdebiet, waardoor de sterkte van de bekleding op de kruin en het binnentalud zwaarder wordt belast.



Figuur 3.11. Invloed op golfbelasting

3.3.6 Falen bekledingen

Door het toetsen van de bekleding op het voorland (gras, steen, asfalt of overig) wordt duidelijk of deze bekledingen een functie hebben ten aanzien van de veiligheid en dus volgens Katern 8 Bekledingen van het VTV moeten worden getoetst, of dat het profiel zo ruim is dat erosie van het voorland geen bedreiging voor de veiligheid betekent.

3.3.7 Falen bijzondere waterkerende constructies

In de dijk kunnen bijzondere waterkerende constructies aanwezig zijn. Dit zijn in de regel verticale constructies, zoals bijvoorbeeld stabiliteit- en erosieschermen in de buitenkruinlijn of buitenteen van de dijk. Ook kunnen daar functiescheidende schermen aanwezig zijn in verband met de aanwezigheid van bebouwing op het voorland. Verificatie is nodig of deze constructies bestand zijn tegen erosie/afslag van het voorland.

3.4 Resumé

In de volgende tabel zijn alle faalmechanismen, die betrekking hebben op falen van een dijk met voorland in de vorm van een uiterwaard of hooggelegen terrein samengevat.

Faalmechanismen dijken	Faalmechanismen voorland					
	Afschuiving	Zettings-vloeiing	Erosie/afslag	Falen BK	Falen BWC	Falen NWO
Overloop/overslag	-	-	+	-	-	-
Infiltratie/erosie	-	-	-	-	-	-
Piping	+	-	+	+	+	-
Heave	-	-	-	-	-	-
Macro-instabiliteit binnenwaarts	-	-	-	-	-	-
Macro-instabiliteit buitenwaarts	+	-	+	-	+	-
Micro-instabiliteit	-	-	-	-	-	-
Falen BK buitentalud	+	-	+	+	+	-
Invloed NWO	-	-	-	-	-	-

Tabel 3.1. Overzicht faalmechanismen dijken met voorland (uiterwaard of hoog terrein)

Voor de de faalmechanismen waar een + achter staat is in het kader van dit project een nadere uitwerking nodig. De grootste witte vlekken zitten daarbij in de nadere uitwerking van erosie door stroming en afslag door golven.

4 Veiligheidseisen

4.1 Algemeen

De veiligheidseisen in het VTV [V&W:2007b] zijn gekoppeld aan de norm. Dit is de veiligheidsnorm, die per dijkkringgebied is vastgelegd in de Wet op de waterkering. Aan de norm wordt voldaan indien de score per deelspoor 'voldoende' of 'goed' is. In geval van de score 'onvoldoende' wordt niet aan de norm voldaan. De eindscore is de slechtste score per deelspoor. Per deelspoor zijn specifieke veiligheidseisen en toetscriteria ontwikkeld, die zijn vastgelegd in Leidraden en Technische Rapporten of in het VTV.

De huidige beoordelingsmethode in het VTV van het voorland voor afschuiving en zettingsvloeiing is hoofdzakelijk geënt op geometrische kenmerken. Echter of deze methode wel veilig genoeg en hoe deze zich verhoudt tot de norm is niet duidelijk. Sommige faalmechanismen, zoals bijvoorbeeld zettingsvloeiing, kunnen direct leiden tot volledig falen van de waterkering. Dat hoeft bij andere faalmechanismen niet altijd het geval te zijn. Zo kan bijvoorbeeld na afslag of afschuiving nog zoveel restbreedte aanwezig zijn dat de waterkerende functie nog niet in het geding is. Om hier inzicht in te krijgen is het nodig dat dit aspect bij de bepaling van veiligheidseisen wordt betrokken.

Om een relatie met de norm te kunnen leggen is inzicht nodig in de kans op falen van het voorland, die voor het geval dat deze invloed uitoefent op de kans op falen van de dijk (immers beide leveren dan een bepaalde bijdrage aan de kans op overstroming) moet elkaar moeten worden gecombineerd. Immers alleen dan is het mogelijk om aparte veiligheidseisen en criteria voor het voorland en de dijk te bepalen. Omdat dit op dit moment slechts voor een beperkt aantal faalmechanismen (bijvoorbeeld voor afschuiving en zettingsvloeiing) mogelijk is, kan dit in het kader van dit project nog niet volledig worden ingevuld en zal in voorkomende gevallen moeten worden volstaan met een pragmatische veilige benadering. In de volgende paragraaf worden de standaard veiligheidseisen uit het VTV voor dijken vermeld. Dit betreft met name die faalmechanismen die kunnen worden beïnvloed door falen van het voorland.

4.2 Veiligheidseisen VTV voor dijken

Piping

Veiligheidsfactor 1,0 (Bligh en Lane) of 1,2 (Sellmeijer) op benodigde kwelweglengte.

Veiligheidsfactor 1,0 op opdrukveiligheid.

Macro-instabiliteit buitenwaarts

Stabiliteitsfactor (methode Bishop)

Veiligheidsfactor tegen afschuiven: schadefactor γ_N afhankelijk van veiligheidsnorm. De vigerende eisen uit het VTV staan in de volgende tabel.

Wettelijke norm [1/jaar]	Schadefactor γ_N voor macro-instabiliteit buitenwaarts [-]		Vereiste betrouwbaarheids-index β_{INST} volgens LOR-2, App.G [1/j]	Vereiste kans op instabiliteit P_{INST}	
	Methode 1 (LOR-1)	Methode 2 (LOR-2)		[1/j]	% v.d. norm
1/10000	1,09	1,14	4,56	2,54E-06	2,0%
1/4000	1,07	1,12	4,42	4,94E-06	1,9%
1/2000	1,05	1,10	4,27	9,65E-06	1,9%
1/1250	1,03	1,08	4,12	1,89E-05	2,4%
1/500	1,00	1,05	3,88	5,20E-05	2,6%
1/250	0,98	1,03	3,71	1,02E-04	2,6%

Hierbij zijn de drie rechtse kolommen bij wijze van voorbeeld toegevoegd om een beeld te krijgen van de faalkansruimte, die voor de buitenwaartse macro-instabiliteit van een dijk op basis van de huidige eisen wordt gereserveerd. Deze blijkt 2 tot 2,5% van de norm te zijn.

Overloop/golfoverslag

Overslagcriterium afhankelijk van bekleding kruin en binnentalud: 0,1 – 1 – 10 l/s.m

Kruinhoogtemarge: minstens 0,50 m

Toelaatbare kans op overslag per dijkvak: wettelijke norm.

Falen bekleding

Afhankelijk van type bekleding en toetsspoor (voor meer info zie VTV, Katern 8 Bekledingen)

Falen bijzondere constructies

Veiligheidseisen volgens Leidraad kunstwerken:

- eis overbelasting (overloop/overslagdebiet): norm
- eis sterkte constructie-onderdelen: 1% van de norm
- eis niet-sluiten keermiddelen: 10% van de norm.

4.3 Veiligheidseisen voorland

Bij de uitwerking van de diverse deelsporen voor de beoordeling van het voorland dient te worden nagegaan of de huidige eisen criteria voor de deelsporen afschuiving voorland en zettingsvloeiing veilig genoeg zijn. Voor de overige deelsporen zijn er nog geen veiligheidseisen, die rekening houden met falen van het voorland, dus die zullen nog nader moeten worden onderbouwd en bepaald. Daarbij is ook het restprofiel van de waterkering na falen van het voorland van belang en de invloed daarvan op andere faalmechanismen van de dijk.

Aanknopingspunten voor de bepaling van het restprofiel en veiligheidscriteria zijn onder meer te vinden in:

- Appendix G van de Leidraad voor het Ontwerpen van Rivierdijken, deel 2 [TAW:1989]
- Achtergrondrapport Materiaalfactoren Rivierdijken [FUGRO:2007]
- Beoordeling binnenwaartse stabiliteit op basis van een zoneringsmethode [GD:2002]
- Technisch Rapport Actuele Sterkte van Dijken [ENW:2007d]
- Onderzoek zettingsvloeiing dijken Dordtsche Kil en Spui [GD:2005] en Brielse Maasdijk [GD:2006]

Op grond daarvan kan, in analogie met de aanpak voor binnenwaartse macro-instabiliteit (spoor STBI), mogelijk een zonering worden bepaald, aan de hand waarvan differentiatie van de veiligheidseisen kan plaatsvinden.

5 Belastingen

5.1 Bedreigingen per watersysteem

HR2006 [V&W:2007a] geeft belastingen die worden bepaald door rivierafvoer, getij en wind. Deze resulteren in hydraulische randvoorwaarden zoals waterstanden, waterstandsverlopen, windgolven, buistoten/-oscillaties, seiches en slingeren. De hydraulische randvoorwaarden zijn afhankelijk van de geografische ligging en het betreffende watersysteem. Vanuit de watersystemen worden de volgende typen onderscheiden:

- Zee (Hollandse en Zeeuwse kust) en estuaria
- IJsselmeer/Markermeer
- Bovenrivieren
- Benedenrivieren
- IJsseldelta
- Vechtdelta

Voor elk type watersysteem gelden specifieke hydraulische randvoorwaarden en rekenmodellen (de diverse HYDRA-modellen), die ten behoeve van de toetsing zijn ontwikkeld. Opgemerkt wordt dat voor de bepaling van de afslag bij cumulatieve belasting de HYDRA-modellen nog niet up-to-date zijn. In de volgende tabel zijn de specifieke bedreigingen en hydraulische randvoorwaarden per type watersysteem samengevat.

Bedreiging door randvoorwaarden	Afvoer	Getij	Wind		
	Waterstand	Waterstand	Waterstand	Golven	Buistoten, bui-oscillaties, seiches en slingeren
Bovenrivieren	+			(+)	
Benedenrivieren	+	+	+	+	+
IJsseldelta	+		+	(+)	
Vechtdelta	+		+	+	
IJsselmeer/Markermeer	+		+	+	(+)
Zee- en estuaria		+	+	+	+

+ = van belang; (+) = minder van belang

Tabel 5.1. Bedreigingen en hydraulische randvoorwaarden per watersysteem (bron: HR2006)

In de volgende paragrafen wordt nader ingegaan op de berekeningsmethoden per bedreiging en de per watersysteem beschikbare hydraulische randvoorwaarden van HR2006 en belangrijkste onderliggende uitgangspunten en rekenmodellen.

5.2 Berekeningsmethoden

Rivierafvoer

De overschrijdingsfrequentie van de maatgevende afvoer is 1/1250 per jaar, met uitzondering van de Limburgse Maas, waarvoor 1/250 per jaar geldt. De maatgevende afvoeren voor de toetsing zijn:

- 16.000 m³/s (Rijn bij Lobith)
- 3.800 m³/s (Maas bij Borgharen)
- 3.280 m³/s (Limburgse Maas)
- 550 m³/s (Overijsselsche Vecht bij Vechterweerd)

Deze waarden zijn bepaald op basis van geëxtrapoleerde meetgegevens. De toetspeilen zijn representatief voor de top van de afvoergolf. Naast de maatgevende afvoer is ook de vorm van de afvoergolf (afvoerterlooptij) van belang. Hiertoe zijn de gemeten afvoergolven gereconstrueerd tot golven met een enkelvoudige piek, waarbij meervoudige pieken zijn samengevoegd. Vervolgens zijn de gereconstrueerde afvoergolven door vermenigvuldiging opgeschaald naar de maatgevende afvoer.

Wind

De bedreiging door wind bestaat uit stormopzet en windgolven, waarbij de windsnelheid en de windrichting bepalend zijn. De voorkomenskansen van extreme windsnelheden zijn per windrichting (in sectoren van 30°) bepaald met het Rijkooit Weibullmodel. De daarbij gebruikte windstatistiek is gebaseerd op geëxtrapoleerde meetgegevens en gebruikt bij de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden voor het benedenrivierengebied, de Vechtdelta, de meren, de zeeën en de estuaria.

Meerpeil

De belangrijkste bedreigingen zijn het meerpeil en de wind. De statistiek voor de peilen op het IJsselmeer en het Markermeer is gebaseerd op geëxtrapoleerde meetgegevens. Hierbij zijn enkel de winterhalfjaar metingen meegenomen en zijn de metingen gesplitst in de twee windsectoren west (195° – 45°) en oost (45° – 195°). De meerpeilen zijn berekend met het model BEKKEN.

Zeewaterstand

De belangrijkste bedreigingen zijn stormvloed, die ontstaan doordat het astronomisch getij fors wordt verhoogd door de invloed van wind (windopzet). De stormvloedpeilen zijn berekend op basis van geëxtrapoleerde meetgegevens en vastgelegd in de vorm van Basispeilen met een overschrijdingsfrequentie van 1/10.000 per jaar. Voor de bepaling van peilen met een andere overschrijdingsfrequentie wordt in HR2006 verwezen naar het rapport De basispeilen langs de Nederlandse kust [RIKZ:1995].

5.3 Hydraulische randvoorwaarden dijken

Bovenrivierengebied

Het bovenrivierengebied betreft het stroomgebied van de Maas en de Rijn en zijn takken. Het getij vanuit zee speelt hier geen rol. De waterstanden zijn berekend met het 2-dimensionale waterbewegingsmodel WAQUA. De overschrijdingsfrequentie van de Toetspeilen is 1/1.250 per jaar.

Voor de hoogtetoets zijn in het rekenmodel HYDRA-R oeverdatabases gemaakt, die zijn opgenomen op de DVD bij HR2006. Deze databases bevatten ook gegevens over waterstanden, strijklengten en bodemhoogten, die door de gebruiker kunnen worden aangepast en/of aangevuld. De berekening van windgolven is gebaseerd op de formules en grafieken van Brettschneider.

Voor de toetsing van bekledingen wordt in het VTV uitgegaan van een belastingduur van 12 uur.

Voor een groot aantal lokaties ook langsstroomsnelheden gegeven. Deze databases kunnen worden gebruikt als basis voor de ontwikkeling van databases voor de toetsing van het voorland.

Limburgse Maas

Voor de waterkeringen langs de Limburgse Maas bestaat de bedreiging uit waterstanden die het gevolg zijn van hoge afvoeren. De maatgevende afvoer en de waterstanden zijn op berekend op basis van dezelfde statistiek als voor het bovenrivierengebied. De overschrijdingsfrequentie van de Toetspeilen is 1/250 per jaar.

Benedenrivierengebied

In het benedenrivierengebied bestaat de bedreiging uit een combinatie van rivierafvoer en zee-invoed (met name zeespiegel- en getijhoogwaterstijging). Daarbij spelen ook de aanwezigheid en de de Maeslant- en Hartelkering (open of dichte situatie) en lokale opwaaiing door de wind een rol. Buiten de Maeslantkering worden toeslagen toegepast voor seiches en deining. Voor alle mogelijke combinaties van bedreigingen zijn de waterstanden berekend met het 1-dimensionale model SOBEK, waarbij voor de duur van de stormopzet is uitgegaan van 29 uur. De overschrijdingsfrequentie van de Toetspeilen varieert, afhankelijk van het beschouwde dijkkringgebied tussen is 1/2.000 en 1/10.000 per jaar.

Voor de hoogtetoets zijn in het rekenmodel HYDRA-B oeverdatabases gemaakt, die zijn opgenomen op de DVD bij HR2006. Deze databases bevatten ook gegevens over belastingcombinaties, strijklengten en bodemhoogten, die door de gebruiker kunnen worden aangepast en kunnen worden gebruikt voor de berekening van windgolven. De golfrandvoorwaarden staan niet in HR2006; deze moeten door de gebruiker worden berekend met HYDRA-B.

Voor de toetsing van het voorland kunnen andere belastingcombinaties met een andere overschrijdingsfrequentie maatgevend zijn. HR2006 geeft hierover geen informatie.

Voor een bepaling van het waterstandsverloop geeft HR2006 (zie Figuren 2-5 t/m 2-9) voor vijf deelgebieden een standaard waterstandsverlooptlijn met het Toetspeil als hoogwatertop. Voor de toetsing van het voorland moeten deze worden verschaald.

IJsseldelta

Voor de IJsseldelta is de getijhoogwaterstijging niet van belang. De waterstanden zijn voor twee combinaties van bedreigingen (extreme hoge windsnelheid en extreem hoge rivierafvoer) berekend met het 2-dimensionale waterbewegingsmodel WAQUA bij een overschrijdingsfrequentie van 1/2.000 per jaar. HR2006 geeft geen informatie over het waterstandsverloop en andere overschrijdingsfrequenties.

Vechtdelta

Voor de Vechtdelta zijn er meerdere bedreigingen, maar is de afvoer van de Vecht dominant. Daarbij wordt onder meer ook rekening gehouden met de faalkans van de Ramspolkering. De waterstanden zijn voor verschillende combinaties van bedreigingen berekend met het 2-dimensionale waterbewegingsmodel WAQUA. De overschrijdingsfrequentie van het toetspeil varieert, afhankelijk van het beschouwde dijkkringgebied tussen 1/1250 en 1/4.000 per jaar. HR2006 geeft geen informatie over het waterstandsverloop en andere overschrijdingsfrequenties.

Voor de hoogtetoets zijn in het rekenmodel HYDRA-VIJ oeverdatabases gemaakt, die zijn opgenomen op de DVD bij HR2006. Deze databases bevatten ook gegevens over belastingcombinaties, strijklengten en bodemhoogten, die door de gebruiker kunnen worden aangepast en kunnen worden gebruikt voor de berekening van windgolven. De golfrandvoorwaarden staan niet in HR2006; deze moeten door de gebruiker worden berekend met HYDRA-VIJ.

Voor de toetsing van het voorland kunnen belastingcombinaties met een andere overschrijdingsfrequentie maatgevend zijn. HR2006 geeft hierover geen informatie.

Meren

Voor het IJsselmeer en het Markermeer wordt de bedreiging gevormd door hoge meerpeilen of harde wind of een combinatie daarvan. De waterstanden zijn voor twee situaties (windsnelheid dominant en meerpeil dominant) berekend met het WAQUA (IJsselmeer, IJburg en Eem) of DELFT-2D (Markermeer). De overschrijdingsfrequentie van het Toetspeil varieert, afhankelijk

van het beschouwde dijkringgebied tussen 1/1250 en 1/4.000 per jaar. HR2006 geeft geen informatie over andere overschrijdingsfrequenties. De windgolven zijn berekend met het golfmodel HISWA.

Voor een bepaling van het waterstandsverloop geeft HR2006 (zie Figuur 2-10) een standaard waterstandsverlooplijn met een stormopzetduur van 35 uur en het Toetspeil als hoogwatertop. Voor de toetsing van het voorland moeten deze worden verschaald.

Voor de hoogtetoets zijn in het rekenmodel HYDRA-M databases gemaakt, die zijn opgenomen op de DVD bij HR2006. Deze databases bevatten hydraulische belastingcombinaties voor alle randvoorwaardenlokaties. De golf randvoorwaarden staan niet in HR2006; deze moeten door de gebruiker worden berekend met HYDRA-M.

Voor de toetsing van het voorland kunnen andere belastingcombinaties maatgevend zijn. HR2006 geeft hierover geen informatie.

Noordzee en Westerschelde

De belasting wordt gevormd door waterstanden, windgolven, buistoten en bui-oscillaties. De hydraulische randvoorwaarden voor de dijken worden berekend met het model HYDRA-K. Omdat de golfstatistiek enkel beschikbaar is voor diepwater is met het golfmodel SWAN een vertaalslag gemaakt van diepwatervolven naar ondiepwatervolven vlak voor de dijk. De overschrijdingsfrequentie van de belasting (Toetspeil in combinatie met diepwatervolven) varieert, afhankelijk van het beschouwde dijkringgebied, tussen 1/2.000 en 1/10.000 per jaar.

De hoogtetoets kan worden uitgevoerd met het rekenmodel HYDRA-K. Voor de toetsing van bekledingen kunnen met dit model ook specifieke golf randvoorwaarden worden bepaald.

Voor de toetsing van het voorland kunnen andere overschrijdingsfrequenties en andere belastingcombinaties maatgevend zijn. HR2006 geeft hierover geen informatie.

Voor een bepaling van het waterstandsverloop geeft HR2006 (zie Figuur 2-10) een standaard waterstandsverlooplijn met een stormopzetduur van 35 uur en het Toetspeil als hoogwatertop. Voor de toetsing van het voorland moeten deze worden verschaald.

Oosterschelde

Voor de Oosterschelde worden de hydraulische randvoorwaarden berekend met het model IMPLIC. Verder zijn de uitgangspunten hetzelfde als voor de Noordzee, met uitzondering van het waterstandsverloop, waarvoor HR2006 (zie figuur 2-11) een aparte grafiek geeft.

Waddenzee

De hydraulische randvoorwaarden voor de dijken langs de Waddenzee zijn gebaseerd op het meest recente ontwerp. De aan te houden Toetspeilen en golf randvoorwaarden staan in HR2006. De overschrijdingsfrequentie van de belasting (Toetspeil in combinatie met diepwatervolven) varieert, afhankelijk van het beschouwde dijkringgebied, tussen 1/2.000 en 1/10.000 per jaar. HR2006 geeft geen informatie over het waterstandsverloop.

5.4 Hydraulische randvoorwaarden voorland

Voor de toetsing van het voorland zijn waterstanden, stroomsnelheden, belastingduur en golf randvoorwaarden nodig, die per watersysteem verschillend kunnen zijn. In het volgende wordt aangegeven welke data uit HR2006 en de bijbehorende HYDRA-modellen voor de verschillende watersystemen kunnen worden gebruikt en welke aanvullende gegevens nader moeten worden bepaald. Dit zijn randvoorwaarden die kunnen worden toegepast voor een eerste globale uitwerking van een aantal cases, die de basis kan vormen voor een eenvoudige toetsing met latente reserve. Voor een meer gedetailleerde uitwerking zullen de

randvoorwaarden per faalmechanisme moeten worden berekend met de daarvoor beschikbare rekenmodellen en worden toegespitst op de specifieke voorlandsituaties. Dit zal in onderling overleg met de watersysteemgroepen in het kader van het bepalen van de randvoorwaarden voor HR2011 moeten geschieden.

Bovenrivieren

- bedreigingen: waterstand en stroming;
- stroomsnelheden uit database HYDRA-R gebruiken;
- belastingduur = 12 uur of nader bepalen op basis van waterstandsverloop.

Limburgse Maas

- bedreigingen: waterstand en stroming;
- stroomsnelheden nader bepalen;
- belastingduur c.q. waterstandsverloop nader bepalen.

Benedenrivieren

- bedreigingen: waterstand, stroming en golven;
- stroomsnelheden uit database HYDRA-R gebruiken;
- belastingduur nader te bepalen op basis van waterstandsverloop;
- golfrandvoorwaarden voor hoogte- en/of bekledingtoets dijken uit HR2006 gebruiken (te berekenen met HYDRA-B).

IJsseldelta

- bedreigingen: waterstand en stroming;
- stroomsnelheden nader bepalen;
- belastingduur c.q. waterstandsverloop nader bepalen.

Vechtdelta

- bedreigingen: waterstand en stroming;
- stroomsnelheden nader bepalen;
- belastingduur c.q. waterstandsverloop nader bepalen.
- golfrandvoorwaarden voor hoogte- en/of bekledingtoets dijken uit HR2006 gebruiken (te berekenen met HYDRA-VIJ).

Meren

- bedreiging: waterstand en golven;
- belastingduur = 35 uur of nader bepalen op basis van waterstandsverloop;
- golfrandvoorwaarden voor hoogte- en/of bekledingtoets dijken uit HR2006 gebruiken (te berekenen met HYDRA-M).

Noordzee en Westerschelde

- bedreigingen: waterstand, stroming en golven;
- stroomsnelheden nader bepalen;
- belastingduur c.q. waterstandsverloop nader bepalen;
- golfrandvoorwaarden voor hoogte- en/of bekledingtoets dijken uit HR2006 gebruiken (te berekenen met HYDRA-K).

Oosterschelde

- bedreigingen: waterstand, stroming en golven;
- stroomsnelheden nader bepalen;
- belastingduur c.q. waterstandsverloop uit HR2006 gebruiken;
- golfrandvoorwaarden uit HR2006 gebruiken

Waddenzee

- bedreigingen: waterstand, stroming en golven;
- stroomsnelheden nader bepalen;
- belastingduur c.q. waterstandsverloop uit HR2006 gebruiken;
- golfrandvoorwaarden uit HR2006 gebruiken

6 Sterkte

6.1 Erosie en afslag

Erosie

Voor erosie door stroming is, met uitzondering van de beoordeling van de stabiliteit van bekledingen, nog geen toetsmethode beschikbaar. Het gaat hierbij met name om erosie die bij maatgevende omstandigheden kan optreden. Erosie die gedurende langere periodes onder minder extreme omstandigheden optreedt wordt ondervangen door de ontwikkeling van de rivierbodem te monitoren of met een numeriek model te berekenen. Als dit leidt tot problemen kan dat worden ondervangen door maatregelen in de vorm van een vooroeverbesteding of taludverdediging.

In principe kunnen twee situaties worden onderscheiden, die nader moeten worden onderzocht:

- 1) geen erosie/uitschuring van oever/voorland;
- 2) beperkte erosie/uitschuring (of lokale ontgronding).

Indien er geen erosie wordt toegestaan zou dit mogelijk kunnen leiden tot een te conservatieve benadering. Daarom dient het ontgrondingsproces langs de oevers en het voorland in beschouwing te worden genomen. Door de belastingduur c.q. het waterstandsverloop daarbij te betrekken kan blijken of er nog voldoende restprofiel aanwezig is om de waterkerende functie te kunnen vervullen. Hierbij zijn ook aspecten zoals het niveau waar de erosie/afslag optreedt, de geometrie van het voorland (hoogte, breedte en taludhellingen) en de grondeigenschappen van belang.

Voor zand is de korreldiameter (d_{50}) de belangrijkste sterkteparameter. Voor erosie van zand kan gebruik worden gemaakt van het Scour Manual [HV:1997]. Voor van afslag van zand kan gebruik worden gemaakt van de kennis en de rekenmodellen, die zijn ontwikkeld voor de bepaling van afslag langs de zandige kust. Afstemming met en uitwisseling van kennis met het project SBW Duinen is gewenst.

Voor cohesieve grond zijn er nog veel kennisleemtes en zijn de sterkte-eigenschappen minder eenduidig omdat de erosiebestendigheid mede afhankelijk is van de gelaagdheid en de structuur van de grond. Voor de erosie van klei kan gebruik worden gemaakt van materiaaleigenschappen uit het Scour Manual [HV:1997]. Hierin staat een eenvoudige rekenregel, die de toelaatbare stroomsnelheid voorspelt als functie van de cohesie, de plasticiteitsindex en de hoek van inwendige wrijving.

Omdat deze rekenregel is ontwikkeld op basis van Russische georiënteerde gronden en omdat ook andere fenomenen een rol spelen zoals temperatuur, zuurgehalte, zoutgehalte enzovoorts, verdient het aanbeveling om voor Nederlandse situaties deze rekenregel nader te onderzoeken. Omdat met name de fysische achtergronden van het erosieproces bij cohesieve grond nog niet geheel duidelijke zijn en er nog veel onzekerheden zijn in de sterkte-eigenschappen wordt aanbevolen zullen waarschijnlijk ook aanvullende modelproeven nodig zijn..

Omdat het fenomeen erosiebestendigheid ook speelt bij de projecten SBW Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding, SBW Reststerkte van Dijken en SBW Waddenzee is het gewenst om de activiteiten van deze projecten met elkaar af te stemmen en relevante kennis uit te wisselen.

Voor de berekening van erosie door stroming kan waarschijnlijk gebruik worden gemaakt van het rekenmodel Delft3D-FLOW.

Afslag

Op dit moment wordt buitendijkse afslag door golven alleen getoetst als er niet-waterkerende objecten op het voorland aanwezig zijn. Bij 'voldoende hoog en breed voorland' kan dan gebruik gemaakt worden van een beoordelingsprofiel dat afkomstig is uit de Handreiking Constructief Ontwerpen [TAW:1994] of het TR Waterkerende Grondconstructies [TAW:2001]. Dit beoordelingsprofiel is gebaseerd op zandige ondergrond (basis: afslagprofiel duinen) en is voor situaties langs rivier- en meerdijken (met klei/veen ondergrond) veelal te conservatief.

Door GeoDelft [GD:2001] is onderzoek naar mogelijke verbetering hierin uitgevoerd, onder andere met DUROSTA-berekeningen, die zijn uitgevoerd door WL|Delft Hydraulics. In eerste instantie is dit gedaan voor een lage golfbelasting bij een stagnante waterstand. Dit bleek perspectief te bieden op een aanzienlijk minder conservatieve aanpak. Daarom is de studie uitgebreid met wisselende waterstanden [GeoDelft:2004a]. Een bijzonder punt is dat er in dat geval verschillende combinaties van waterstand(sverloop), windsnelheid en windrichting bekeken moeten worden.

Bij de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden zijn geen ontwerppunten (maatgevende combinaties van waterstanden, windsnelheden en windrichting) beschikbaar. Daarom moet voor een eerste globale aanpak worden uitgegaan van Toetspeilen en waterstandsverlooptlijnen die in HR2006 staan en/of golftrandvoorwaarden die met de HYDRA-modellen kunnen worden berekend. Lopende het traject zal duidelijk moeten worden of er nog tijdig aanvullende randvoorwaarden voor de specifieke ontwerppunten kunnen worden bepaald.

Bij een nadere uitwerking van de invloed wisselende waterstanden en het verder ontwikkelen van de methode, waarbij het voorland dat bij maatgevend hoogwater onder water verdwijnt kan de door GeoDelft ontwikkelde methode voor de praktijk algemener toepasbaar worden gemaakt.

Inmiddels zijn er voor de zandige kust nieuwe rekenmodellen beschikbaar, zoals X-BEACH en DELFT-3D, waarvan dient te worden onderzocht in hoeverre deze toepasbaar zijn of kunnen worden gemaakt voor afslag van voorland in de verschillende watersystemen en gebieden.

Erosie en afslag

In het voorgaande zijn erosie door stroming en erosie door golfaanval separaat benoemd. Echter de combinatie van stroming en golfaanval zal in de regel het gevaarlijkst zijn. Daarbij gaat het in eerste instantie om beschadiging van de toplaag door golven en vervolgens om materiaaltransport uit het profiel. Een en ander is mede afhankelijk van de onderlinge verhouding tussen stroming en golfaanval. Zo is bij rivierdijken de belasting vaak veel groter dan de golfcomponent. Het is op dit moment nog niet duidelijk of de actuele rekenmodellen deze combinatie aankunnen. Daarvoor is nader onderzoek nodig.

6.2 Macro-instabiliteit

Voor de bepaling van de weerstand tegen afschuiving kan worden uitgegaan van Katern 5 Dijken en dammen van het VTV [V&W:2007b], die daarvoor doorverwijst naar de verschillende Leidraden en Technische Rapporten. Dit betreft met name de Leidraden voor het Ontwerpen van Rivierdijken [TAW:1985] en [TAW:1989], de Leidraad Zee- en meerdijken [TAW:1999] en het Technische Rapport Waterkerende Grondconstructies [TAW:2001].

Voor toepassing van de eenvoudige en de gedetailleerde methode kan worden verwezen naar Katern 5 Dijken en dammen. Aanvullend daarop zijn inmiddels ook de Leidraad Rivieren [ENW:2007b] en het Addendum bij het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies [ENW:2007c] verschenen, waarin onder meer een nieuwe methodiek staat voor de bepaling van materiaalfactoren en schadefactoren. Omdat daarin enkel schadefactoren staan voor het buitentalud zonder voorland moeten voor de beoordeling van de stabiliteit van het voorland nadere eisen worden afgeleid.

Voor afschuiving zijn voldoende rekenmethoden (BISHOP) en –modellen (MSTAB) beschikbaar. De kern van de problematiek zit hier in onduidelijkheid over de toe te passen schadefactor en de relatie tussen breedte en hoogte van het voorland, een eventuele afschuiving en de vraag of dat bedreigend is voor de waterkerende functie. In feite gaat het hier om een soort buitendijkse zoneringsmethode, waarbij bij een eventuele afschuiving echter ook nog rekening moet worden gehouden met eventuele vervolgschade door erosie van het voorland.

6.3 Piping

Voor de bepaling van de benodigde kwelweglengte kan worden uitgegaan van Katern 5 Dijken en dammen van het VTV [V&W:2007b], die daarvoor doorverwijst naar de verschillende Leidraden en Technische Rapporten. Dit betreft met name de Leidraden voor het Ontwerpen van Rivierdijken [TAW:1985] en [TAW:1989], de Leidraad Zee- en meerdijken [TAW:1999] en het Technische Rapport Waterkerende Grondconstructies [TAW:2001]. Omdat daarin enkel schadefactoren staan voor het buitentalud zonder voorland moeten voor de beoordeling van de stabiliteit van het voorland nadere eisen worden afgeleid.

6.4 Bekledingen

Op het voorland kan gras of een grote diversiteit van harde bekledingen aanwezig zijn. Hierbij kan onderscheid worden gemaakt in bekledingen:

- a) die voldoen aan de eisen van het VTV of de relevante TAW/ENW-Leidraden en Technische Rapporten;
- b) waarvan de sterkte niet voldoet aan de gestelde eisen;
- c) waarvoor geen eisen beschikbaar zijn;

Enkel ingeval van a) kan de sterkte van de bekleding bij de beoordeling van het voorland worden betrokken. Voor de toetsing van de bekleding kan worden verwezen naar Katern 8 Bekledingen van het VTV [V&W:2007b] en de onderliggende Leidraden en Technische Rapporten. Voor de overige gevallen kan geen sterkte aan de bekleding worden toegekend en zal veiligheidshalve moeten worden uitgegaan van de sterkte-eigenschappen van de ondergrond.

6.5 Bijzondere constructies

Op of in het voorland kunnen bijzondere constructies aanwezig zijn, die invloed kunnen hebben op de faalmechanismen van het voorland en/of de waterkering. Het gaat daarbij in de regel om verticale constructies, zoals schermen en keermuurtjes van allerlei soorten materialen (beton, staal, metselwerk, hout etc.). Het VTV [V&W:2007b] geeft hiervoor geen toetsregels.

Indien deze bijzondere constructies voldoen aan de eisen van de Leidraad Kunstwerken [TAW:2003] en tevens binnen de beheerzone van de waterkeringbeheerder liggen (of waarbij, als dat niet het geval is, beheersafspraken zijn gemaakt met derden), kan de sterkte daarvan bij de beoordeling van het voorland worden betrokken. Voor zover dit relevant is voor de beoordeling van de primaire waterkering kan bij een gedetailleerde methode de faalkans van de bijzondere constructie impliciet worden meegenomen.

7 Conclusies en aanbevelingen

Uit de inventarisatie kunnen de volgende conclusies worden getrokken.

1. Er zijn verschillende voorlandsituaties met wisselende geometrie (hoogte en breedte) en belastingen, die per watersysteem verschillen. Bovendien is er wezenlijk verschil in aanpak tussen een dijk met uiterwaarden of hoog terrein ervoor en een schaarndijk. Vanwege deze grote diversiteit is het van belang om tot een goede afbakening te komen van wat wel en niet binnen het project haalbaar is en zal mogelijk een prioritering van de uit te werken onderdelen nodig zijn. Aanbevolen wordt om bij het zoeken naar de grootst gemene deler de ervaring en de knelpunten van de beheerders te betrekken, zodat een compleet beeld van het probleemgebied wordt verkregen.
2. Bij de faalmechanismen erosie door stroming en afslag door golven zijn er nog veel witte vlekken ten aanzien van de fysische gedrag van cohesieve grond. Op basis van de huidige kennis zal niet meer dan een eenvoudige toetsmethode haalbaar zijn. Wellicht kan voortschrijdend inzicht uit andere SBW-projecten ook nog voor dit project worden benut. Aanbevolen wordt om nader onderzoek op dit punt te stimuleren.
3. Het streven om te komen tot een generieke methode op basis van een semi-probabilistisch concept is op dit moment vanwege de kennisleemtes nog een brug te ver. Voor het faalmechanismen afschuiving en zettingsvloeiing is een gedetailleerde toetsmethode, die rekening houdt met het restprofiel na afschuiven, op basis van een faalkansanalyse een haalbare kaart.
4. Voor een eenvoudige toetsing kunnen de in HR2006 beschikbare hydraulische randvoorwaarden voor de hoogtetoets en/of bekledingtoets als veilige waarden worden gebruikt. Echter voor een gedetailleerde toetsing op het voorland zijn toegesneden randvoorwaarden nodig op basis van de juiste ontwerppunten. Dit is een behoorlijke uitbreiding van wat nu beschikbaar is, dus afstemming met de watersysteemgroepen is nodig om tijdig de juiste randvoorwaarden in HR2011 te krijgen.

8 Literatuuroverzicht

[FUGRO:2007]

Achtergrondrapport Materiaalfactoren Dijken
Fugro Ingenieursbureau B.V.
2007

[GD:2001]

Onderzoek problematiek voorland definitief
GeoDelft, CO-386930/20
December 2001

[GD:2002]

Beoordeling binnenwaartse stabiliteit op basis van een zoneringsmethode
GeoDelft, CO-390110/34
Mei 2002

[GD:2004a]

Gedetailleerde toetsing voorland en buitendijkse bebouwing
GeoDelft, CO-412280-0007
Augustus 2004

[GD:2004b]

Geavanceerde toetsing bebouwing in parallel dijkt Krimpenwaard
GeoDelft, CO-373460.237
April 2004

[GD:2004c]

Beoordeling voorland en buitendijkse bebouwing DV Nederlek
GeoDelft, CO-398203/75
April 2004

[GD:2004c]

Faalkansanalyse Zettingsvloeiing het Spui en de Dordtsche Kil zijde Hoekse Waard
2^{de} fase faalkansanalyse onderzoek
GeoDelft CO-369841-0286 versie 04 Definitief
November 2004

[GD:2005]

Faalkansanalyse Zettingsvloeiing Dordtsche Kil (Dordtsche zijde) en het Vuile gat (Hoekse Waard zijde)
Eerste fase conform Plan van Aanpak
GeoDelft CO-369841-269 versie 03
Mei 2005

[GD:2006]

Brielse Maasdijk, stabiliteit onderwatertalud
GeoDelft, CO-377511-0036 versie 06 Definitief
Februari 2006

[GD:2007a]

SBW Buitendijkse zones en afslagbeheer, Plan van aanpak versie 02 definitief

GeoDelft, CO 427070/8
Augustus 2007

[HV:1997]
Scour Manual
G.J.C.M. Hoffmans en H.J. Verheij
1997

[RIKZ:1995]
De basispeilen langs de Nederlandse kust
Ruimtelijke verdeling en overschrijdingslijnen
Rapport RIKZ/95.008
Mei 1995

[RIKZ:2002]
Golfbelasting in havens en afgeschermd gebied; een gedetailleerde methode voor het
bepalen van golfbelastingen voor het toetsen van waterkeringen.
Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, kenmerk RIKZ/2002.034
September 2002

[TAW:1985]
Leidraad voor het Ontwerpen van Rivierdijken, deel 1 bovenrivierengebied
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen
September 1985

[TAW:1989]
Leidraad voor het Ontwerpen van Rivierdijken, deel 2 benedenrivierengebied + Appendices
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen
September 1985

[TAW:1994]
Handreiking Constructief Ontwerpen, bijlagen 2 – 5
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen
April 1994

[TAW:1999]
Technisch Rapport Zandmeevoerende wellen
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen
Maart 1999

[TAW:2001]
Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen
Juni 2001

[TAW:2003]
Leidraad Kunstwerken
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen
Mei 2003

[ENW:2007a]
Leidraad Rivieren
Ministerie van Verkeer en Waterstaat Expertise Netwerk Waterveiligheid
Juli 2007

[ENW:2007b]
Technisch Rapport Ontwerpbelastingen voor het Rivierengebied

Ministerie van Verkeer en Waterstaat Expertise Netwerk Waterveiligheid
Juli 2007

[ENW:2007c]

Addendum bij het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies
Deel A Stabiliteitsfactoren
Ministerie van Verkeer en Waterstaat Expertise Netwerk Waterveiligheid
Juli 2007

[ENW:2007d]

Technisch Rapport Actuele Sterkte van Dijken
Ministerie van Verkeer en Waterstaat Expertise Netwerk Waterveiligheid
September 2007

[V&W:2007a]

Hydraulische Randvoorwaarden 2006 voor het toetsen van primaire waterkeringen
Ministerie Verkeer en Waterstaat RIKZ/RWS/RIZA
September 2007

[V&W:2007b]

Voorschrift Toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen
Ministerie van Verkeer en Waterstaat
September 2007

[WL:1999]

Afslagprofiel van zandig voorland bij dijken
Briefverslag bureaustudie H3531
WL | Hydraulics Delft
Mei 1999

[WL:2002]

Afslag voorland en hydrodynamische krachten op gebouwen
Projectnummer H4132
WL | Delft hydraulics
November 2002

9 Overzicht rekenmodellen

BEKKEN

BEM

DUROS DUineROSie-model. Berekent de duinafslag van een onverdedigd duinprofiel, waarbij wordt uitgegaan van een sluitende zandbalans in dwarsrichting. Opgevolgd door WINKUST 2000.
WL | Delft Hydraulics

DUROS+ DUineROSie-model. Berekent de duinafslag van een onverdedigd duinprofiel, waarbij wordt uitgegaan van een sluitende zandbalans in dwarsrichting. Opgevolgd door WINKUST 2004, vanaf versie 1.5
WL | Delft Hydraulics

DUROSTA DUineROSie-TijdsAfhankelijk model. Als DUROS, maar dan met medeneming van de ontwikkeling van het duinprofiel tijdens de storm als functie van de tijd.
WL | Delft Hydraulics en Rijkswaterstaat RIKZ en DWW

DELFT-2D WL | Delft Hydraulics

DELFT-3D WL | Delft Hydraulics

HISWA

HYDRA-B Rekenmodel voor de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden (2006-2011) voor het toetsen van de kruinhoogte en de bekleding van primaire waterkeringen in het benedenrivierengebied. Onderdeel van de Hydraulische randvoorwaarden 2006 voor het toetsen van primaire waterkeringen (HR2006).
Ministerie van Verkeer en Waterstaat, augustus 2007

HYDRA-K Rekenmodel voor de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden (2006-2011) voor het toetsen van de bekleding van primaire waterkeringen langs de Hollandse kust en estuaria. Onderdeel van de Hydraulische randvoorwaarden 2006 voor het toetsen van primaire waterkeringen (HR2006).
Ministerie van Verkeer en Waterstaat, augustus 2007

HYDRA-M Rekenmodel voor de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden (2006-2011) voor het toetsen van de kruinhoogte van primaire waterkeringen langs het IJsselmeer en het Markermeer. Onderdeel van de Hydraulische randvoorwaarden 2006 voor het toetsen van primaire waterkeringen (HR2006).
Ministerie van Verkeer en Waterstaat, augustus 2007

HYDRA-Q Rekenmodel voor de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden (2006-2011) voor het toetsen van de bekleding van primaire waterkeringen langs het IJsselmeer en het Markermeer. Onderdeel van de Hydraulische randvoorwaarden 2006 voor het toetsen van primaire waterkeringen (HR2006).
Ministerie van Verkeer en Waterstaat, augustus 2007

HYDRA-R	Rekenmodel voor de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden (2006-2011) voor het toetsen van de kruinhoogte en de bekleding van primaire waterkeringen in het bovenrivierengebied. Onderdeel van de Hydraulische randvoorwaarden 2006 voor het toetsen van primaire waterkeringen (HR2006). Ministerie van Verkeer en Waterstaat, augustus 2007
HYDRA-VIJ	Rekenmodel voor de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden (2006-2011) voor het toetsen van de kruinhoogte van primaire waterkeringen in de Vechtdelta. Onderdeel van de Hydraulische randvoorwaarden 2006 voor het toetsen van primaire waterkeringen (HR2006). Ministerie van Verkeer en Waterstaat, augustus 2007
SOBEK	
SWAN	
WAQUA	
WINKUST	Vanaf versie 1.5 als DUROS+, met gebruikersinterface in Windowsomgeving Koster Engineering

