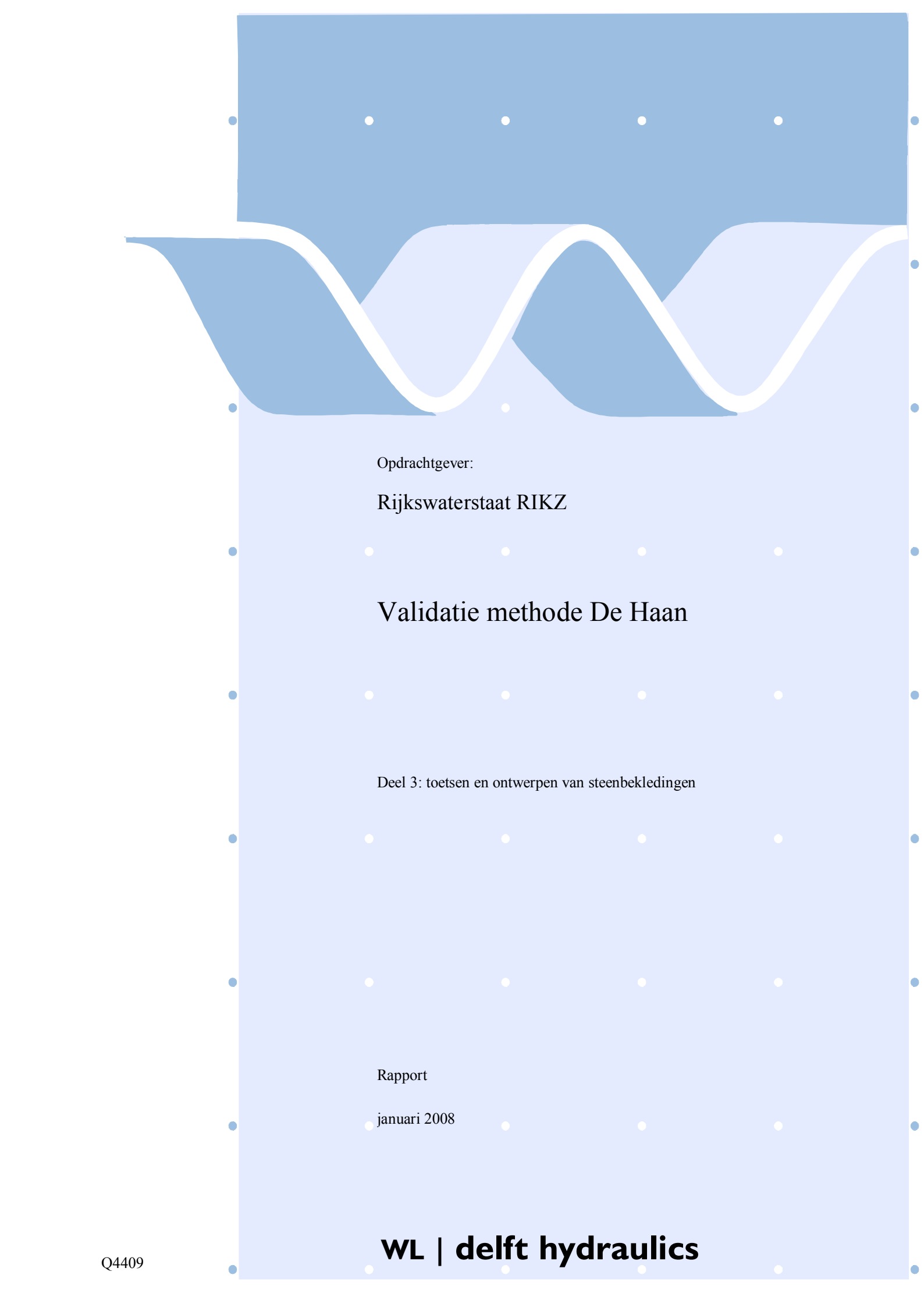




Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat RIKZ

Validatie methode De Haan

Deel 3: toetsen en ontwerpen van steenbekledingen

Rapport

januari 2008

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat RIKZ

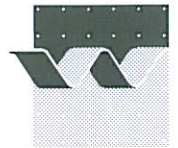
Validatie methode De Haan

Deel 3: toetsen en ontwerpen van steenbekledingen

F.L.M. Diermanse en H.J. Verheij

Rapport

januari 2008



Opdrachtgever:	RIKZ				
Titel:	Validatiemethode De Haan, toetsen en ontwerpen van steenbekledingen				
Samenvatting:					
Vanaf januari 1996 is de nieuwe "Wet op de Waterkering" van kracht. Middels deze wet is onder andere vastgelegd dat er iedere vijf jaar door de beheerders een toetsing op veiligheid moet plaatsvinden van alle primaire waterkeringen in Nederland. Om de toetsing te kunnen uitvoeren moeten tevens de hydraulische randvoorwaarden bekend zijn. In de Wet op de Waterkering wordt de minister van Verkeer en Waterstaat opgedragen deze beschikbaar te stellen. De hydraulische randvoorwaarden worden elke vijf jaar vastgesteld en gepresenteerd in de publicatie "Hydraulische randvoorwaarden voor Primaire Waterkeringen" (HR). Eén van de deelsystemen waarvoor randvoorwaarden moeten worden afgeleid zijn de zoute wateren. Meer specifiek zijn dat de Westerschelde, de Oosterschelde, de Waddenkust, de Zeeuwse Noordzeekust en de Hollandse kust. De hydraulische randvoorwaarden voor deze wateren bestaan voor elke locatie uit een combinatie van de waterstand en enkele relevante golfkarakteristieken (golfhoogte, golfperiode, golfrichting). Om deze randvoorwaarden te bepalen is door RIKZ het probabilistische rekenprogramma Hydra-K ontwikkeld. Naar aanleiding van het opstellen van de (concept-) randvoorwaarden voor HR2006 en het presenteren van de rekenmethoden die aan de basis liggen is een aantal vraagstukken naar voren gekomen. Naar aanleiding daarvan zijn 8 activiteiten gedefinieerd in het kader van het project "validatie methode De Haan" dat WL Delft Hydraulics uitvoert in samenwerking met ARGOS en HKV <u>LIJN IN WATER</u>. Het onderhavige rapport beschrijft 2 van de 8 activiteiten: 1. testen en analyseren van de performance van Hydra-K voor het afleiden van toetsrandvoorwaarden voor steenbekledingen; 2. formuleren van een advies aangaande het toetsen en ontwerpen voor steenbekledingen (en kruinhoogte) met Hydra-K.					
Referenties:					
Ver	Auteur	Datum	Opmerk.	Review	Goedkeuring
1.0	F.L.M. Diermanse	november 2007		S.van Vuren	A.G. Segeren
2.0	F.L.M. Diermanse	januari 2008		S. van Vuren	A.G. Segeren
Projectnummer:		Q4409			
Trefwoorden:					
Aantal bladzijden:		66			
Classificatie:		Geen			
Status:		Definitief			
Dit document is een voorlopig rapport, niet een definitief rapport, en uitsluitend bedoeld voor discussiedoeleinden. Aan de inhoud van dit rapport kunnen noch door de opdrachtgever, noch door derden rechten worden ontleend.					

Inhoud

1	Inleiding	1-1
2	Toetsrandvoorwaarden van steenbekledingen.....	2-1
2.1	Inleiding	2-1
2.2	Uitgebreide probleembeschrijving.....	2-1
2.2.1	Inleiding.....	2-1
2.2.2	Mogelijke problemen met de ontwerpberekening.....	2-2
2.2.3	Mogelijke problemen met de bepaling van het ontwerp punt (illustratiepunt)	2-5
2.2.4	Oplossingsrichtingen uit het verleden.....	2-6
2.3	Analyse foutmeldingen	2-7
2.3.1	Inleiding.....	2-7
2.3.2	Foutmelding [1] – “geen of onvoldoende faalwaarnemingen gevonden”	2-8
2.3.3	Foutmelding [2] – “sommige waarden liggen buiten de ondergrens of bovengrens”	2-11
2.3.4	Foutmelding [3] – “illustratiepunt niet berekend”	2-11
2.3.5	Overzicht van locaties met foutmeldingen.....	2-19
2.4	Analyse van de berekende dikte van steenbekledingen	2-21
2.5	Overzicht	2-23
2.6	Conclusies	2-25
3	Ontwerpen van waterkeringen met Hydra-K.....	3-1
3.1	Inleiding	3-1
3.1.1	Achtergrond	3-1
3.1.2	Doelstelling en aanpak.....	3-1
3.2	Kader.....	3-2
3.3	Ontwerpen versus toetsen.....	3-2
3.4	Huidige situatie en daaruit volgende problemen.....	3-3
3.5	Samenvatting discussie in workshop.....	3-5
3.6	Advies over gebruik Hydra-K.....	3-7
4	Samenvatting en conclusies	4-1
5	Referenties	5-1

Bijlagen

A	Figuren ontwerpdikte steenbekleding	A-1
B	Overzicht foutmeldingen productiesommen HR2006.....	B-1
C	Overzicht foutmeldingen Hydra-K versie 3.5	C-1

I Inleiding

Kader

Vanaf januari 1996 is de nieuwe "Wet op de Waterkering" van kracht. Middels deze wet is onder andere vastgelegd dat er iedere vijf jaar door de beheerders een toetsing op veiligheid moet plaatsvinden van alle primaire waterkeringen in Nederland. Voor het toetsen op veiligheid is door het ministerie van Verkeer en Waterstaat een voorschrift uitgebracht: "Voorschrift Toetsen op Veiligheid" (VTV). Het geeft aan hoe de toetsing moet worden uitgevoerd om de veiligheid van de waterkeringen te kunnen beoordelen. Om de toetsing te kunnen uitvoeren moeten tevens de hydraulische randvoorwaarden bekend zijn. In de Wet op de Waterkering wordt de minister van Verkeer en Waterstaat opgedragen deze beschikbaar te stellen. De hydraulische randvoorwaarden worden elke vijf jaar vastgesteld en gepresenteerd in de publicatie "Hydraulische randvoorwaarden voor Primaire Waterkeringen" (HR).

Eén van de deelsystemen waarvoor randvoorwaarden moeten worden afgeleid zijn de zoute wateren. Meer specifiek zijn dat de Westerschelde, de Oosterschelde, de Waddenkust, de Zeeuwse Noordzeekust en de Hollandse kust. De hydraulische randvoorwaarden voor deze wateren bestaan voor elke locatie uit een combinatie van de waterstand en enkele relevante golfkarakteristieken (golfhoogte, golfperiode, golfrichting). Voor harde waterkeringen zijn de hydraulische randvoorwaarden bepaald aan de teen van de kering. Om te bepalen of een harde waterkering faalt is nodig:

1. de statistiek van de wind, de waterstand en golven op diep water;
2. de vertaling van de hydraulische condities van diep water naar ondiep water nabij de kering; en
3. de betrouwbaarheidsfunctie, d.w.z. het model dat de sterkte van de kering vergelijkt met de belasting.

De eerste twee onderdelen vormen samen het (probabilistische) model voor de hydraulische belasting, de derde is het (deterministische) sterktemodel. Voor harde waterkeringen zijn deze drie onderdelen geïmplementeerd in een probabilistisch rekenmodel, Hydra-K, waarmee uiteindelijk de Hydraulische randvoorwaarden voor harde waterkeringen langs de zoute waterkeringen zijn vastgesteld. De probabilistische rekenmethode waarop Hydra-K gebaseerd is staat bekend als de methode "De Haan".

Dit project

Naar aanleiding van het opstellen van de (concept-) randvoorwaarden voor HR2006 en het presenteren van de rekenmethoden die aan de basis liggen is een aantal vraagstukken naar voren gekomen. In een offerte-aanvraag van d.d. 27 maart 2007, kenmerk 2007/05188 heeft RIKZ een aantal van deze vraagstukken gebundeld in de vorm van werkzaamheden. Op 23 april 2007 heeft het consortium van WL | Delft Hydraulics (penvoerder), ARGOSS en HKV LJN IN WATER offerte uitgebracht voor het uitvoeren van deze werkzaamheden (brief, kenmerk ZWS24780/Q4409/lj). Op 24 mei 2007 is het contract getekend tussen RIKZ als opdrachtgever en het genoemde consortium als opdrachtnemer (kenmerk RKZ/2007/05331).

De belangrijkste doelstelling van het project is het verschaffen van inzicht in de prestaties van de methode De Haan in Hydra-K op het gebied van het berekenen van lokale golfparameters, golfoploop en belastingen van steenbekledingen. Op basis van de uitkomsten wil RIKZ meer draagvlak krijgen voor de methode. Daarnaast wil RIKZ graag aanbevelingen krijgen om eventuele zwakkere onderdelen (indien aanwezig) in de methode te verbeteren.

De volgende activiteiten staan centraal in dit project:

1. testen en analyseren van de performance van Hydra-K voor golfparameters;
2. testen en analyseren van de performance van Hydra-K voor het mechanisme golfoploop;
3. testen en analyseren van de performance van de “methode Vrijling” voor golfparameters en het mechanisme golfoploop;
4. kwantificeren van de mogelijke overschatting van de faalkans door de methode De Haan op analytische wijze;
5. kwantificeren van de mogelijke overschatting van de faalkans door de methode De Haan op experimentele wijze;
6. kwantificeren van de nauwkeurigheid van de methode om op basis van simultane metingen de staartcorrelatiecoëfficiënt af te leiden;
7. testen en analyseren van de performance van Hydra-K voor het afleiden van toetsrandvoorwaarden voor steenbekledingen;
8. formuleren van een advies aangaande het toetsen en ontwerpen voor steenbekledingen (en kruinhoogte) met Hydra-K;

Dit rapport

Ter bevordering van de procesgang gedurende het project zijn de 8 activiteiten in 3 zogenaamde “blokken” onderverdeeld:

- blok 1 (activiteit 1-3): validatie Hydra-K;
- blok 2 (activiteit 4-6): validatie methode De Haan;
- blok 3 (activiteit 7-8): toetsen en ontwerpen van steenbekledingen.

Voor elk blok is een separaat rapport opgeleverd. Dit rapport beschijft de activiteiten die zijn uitgevoerd in het kader van **blok 3: toetsen en ontwerpen van steenbekledingen**.

Leeswijzer

Blok 3 bestaat uit twee onderdelen die separaat behandeld worden in dit rapport. Hoofdstuk 2 beschrijft de analyse van de performance van Hydra-K voor het afleiden van toetsrandvoorwaarden voor steenbekledingen. Deze performance wordt afgemeten aan [a] het kunnen uitvoeren van de berekeningen zonder dat er foutmeldingen optreden en [b] het opleveren van realistische uitvoer. Hoofdstuk 3 beschrijft de mogelijkheden om Hydra-K in de toekomst in te zetten bij het *ontwerpen* van steenbekledingen en de stappen die gezet moeten om Hydra-K daar geschikt voor te maken. Hoofdstuk 4 beschrijft de belangrijkste conclusies.

2 Toetsrandvoorwaarden van steenbekledingen

2.1 Inleiding

Behalve de faalmechanismen ‘golfoploop’ en ‘golfoverslag’ kunnen met Hydra-K ook hydraulische randvoorwaarden voor dijkbekledingen bepaald worden. Het betreft de bekledingstypen gras, asfalt en steen. In een aantal gevallen functioneert de achterliggende rekenmethode voor bekledingen echter niet naar wens. Dat resulteert hetzij in foutmeldingen, hetzij in onrealistische ontwerpdiktes voor bekledingen en/of onrealistische “illustratiepunten”.

Dit hoofdstuk beschrijft een nadere analyse naar problemen die zich voordoen bij het bepalen van hydraulische randvoorwaarden voor *steenbekledingen*. De bekledingstypen asfalt en gras komen niet aan bod. De analyse verloopt volgens de volgende procedure:

1. identificeren van berekeningen waar deze problemen zich voordoen;
2. stap voor stap nalopen van de berekeningen in Hydra-K;
3. analyseren waarom deze berekeningen niet naar wens voltooid worden;
4. voorstellen voor oplossingsrichtingen.

2.2 Uitgebreide probleembeschrijving

2.2.1 Inleiding

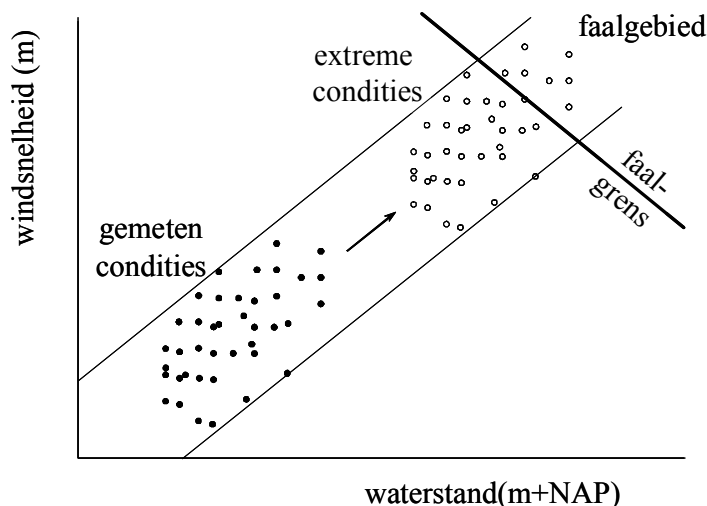
Bij het bepalen van hydraulische randvoorwaarden voert Hydra-K eerst een zogenaamde *ontwerpberekening* uit. Met een dergelijke berekening worden de benodigde kenmerken bepaald van de kering om exact een faalkans te hebben die gelijk is aan de normfrequentie. Het type kenmerk dat berekend wordt is afhankelijk van het type faalmechanisme waarvoor de berekening wordt uitgevoerd. Voor de faalmechanismen golfoploop en golfoverslag bepaalt Hydra-K de benodigde kruinhoogte. Voor het faalmechanisme “instabiliteit van de bekleding” wordt doorgaans de benodigde dikte van de bekleding bepaald.

Na uitvoering van de *ontwerpberekening* bepaalt Hydra-K vervolgens de met het ontwerp corresponderende maatgevende hydraulische condities, ofwel de hydraulische randvoorwaarden. Dit type berekening wordt aangeduid als *ontwerppuntberekening* of *illustratiepuntberekening*. Uit voorgaande studies bleek dat het probleem van onrealistische uitkomsten zowel in de *ontwerpberekening* als in de daarop volgende *ontwerppuntberekening* kan ontstaan. Onderstaand verklaren we het ontstaan van de problemen aan de hand van de achterliggende theorie van de berekeningen en aan de hand van rekenvoorbeelden.

2.2.2 Mogelijke problemen met de ontwerpberekening.

De belangrijkste *invoer* van een ontwerpberekening bestaat uit de maatgevende frequentie waarvoor het ontwerp wordt bepaald, bijvoorbeeld 1/10.000 per jaar of 1/4.000 per jaar. De belangrijkste uitvoer bestaat uit de kruinhoogte of steendikte die nodig is om dit veiligheidsniveau te bereiken. Een ontwerpberekening wordt uitgevoerd op iteratieve wijze: de kruinhoogte/steendikte wordt net zo lang aangepast tot het gewenste veiligheidsniveau, c.q. faalfrequentie, is bereikt. Om het ontstaan van deze problemen beter te kunnen verwoorden, beschrijven we eerst beknopt de wijze waarop Hydra-K een faalfrequentie berekent en vervolgens de wijze waarop Hydra-K voor een gegeven faalfrequentie (bijvoorbeeld de normfrequentie) een ontwerpberekening uitvoert.

De basis van de faalfrequentieberekening is een verzameling waarnemingen (op relatief diep water) van wind, waterstand en golfcondities gedurende stormgebeurtenissen uit het verleden. In het voorbeeld van Figuur 2.1 zijn deze waarnemingen weergegeven door de puntenwolk met gesloten bolletjes. Elk punt in de puntenwolk representeert de hoogste waarneming van waterstand en windsnelheid gedurende een stormgebeurtenis. De methode De Haan is gebaseerd op de aanname dat de puntenwolk van de waarnemingen te verschuiven is naar het extreme gebied zonder dat de puntenwolk “uitwaaiert”. Door de verschuiving wordt elke waargenomen stormgebeurtenis getransformeerd in een meer extreme stormgebeurtenis. Zo kan bijvoorbeeld een gemeten waterstand van NAP + 3m en een windsnelheid van 20 m/s getransformeerd worden naar NAP + 4m respectievelijk 30 m/s.



Figuur 2.1 Schematische weergave van het opschalen van stormgebeurtenissen tot nabij of zelfs in het faalgebied.

Voor elke opgeschaalde stormgebeurtenis wordt bepaald hoe groot de hydraulische belasting voor de kering is. De belasting voor de kering is een combinatie van de waterstand, de golfhoogte, de golfperiode en de golfrichting. Vervolgens bepaalt Hydra-K voor welke stormgebeurtenissen de kering zal falen. Daartoe zijn in Hydra-K zogenaamde betrouwbaarheidsfuncties geïmplementeerd die per faalmechanisme kunnen verschillen. In het algemeen heeft een dergelijke functie de vorm:

$$Z = R - S$$

waarin:

- Z = betrouwbaarheidsfunctie;
 R = sterkte c.q. weerstand van de kering;
 S = hydraulische belasting.

Voor de faalmechanismen golfoploop en golfoverslag is er sprake van één z-functie waarmee de faalgrens voor het hele dijkprofiel wordt vastgelegd. In het geval van steenbekledingen kan de z-functie variëren over de hoogte van het dijkprofiel, doordat zowel de hydraulische belasting als de dikte van de steenkleding kunnen variëren over het profiel. Bij het bepalen van toetsrandvoorwaarden voor steenbekleding moet in Hydra-K daarom ook altijd de ondergrens en de bovengrens van het te toetsen deel van het dijkprofiel worden opgegeven.

De kering faalt als $Z < 0$, ofwel als de belasting groter is dan de weerstand van de kering. De faalfrequentie van de kering kan als volgt bepaald worden:

$$\mu = \frac{\kappa}{\Delta} e^{-\nu} \quad (2.1)$$

met

- μ = de faalfrequentie (per jaar);
 κ = aantal punten dat in het faalgebied geschoven is;
 ν = de grootte van de verschuiving;
 Δ = de lengte van de meetreeks (in jaren).

De grootte van de verschuiving die Hydra-K toepast wordt gestuurd door de gebruiker. De waarde van κ is namelijk een invoerwaarde van Hydra-K. Hydra-K draagt er zorg voor dat de grootte van de verschuiving, ν , zodanig groot is dat er exact κ stormgebeurtenissen tot falen leiden. Hydra-K bepaalt deze benodigde verschuiving op iteratieve wijze.

De uitvoering van een ontwerpberekening vertoont veel overeenkomsten met die van een faalfrequentieberekening. Herschrijven van vergelijking (2.1) geeft:

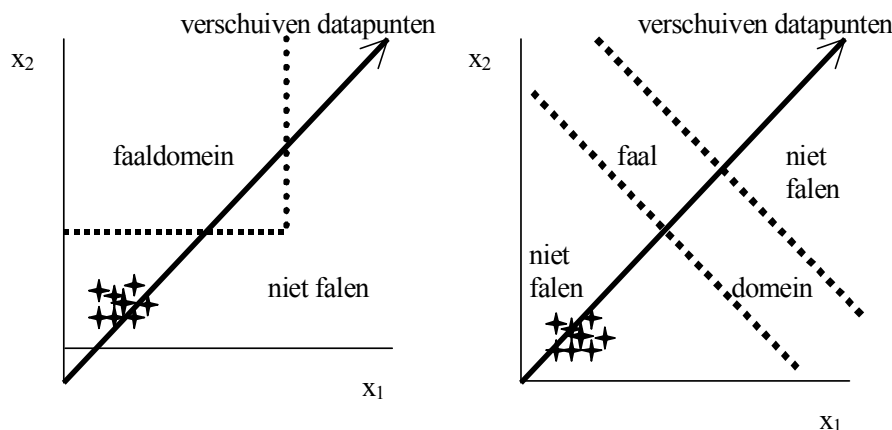
$$\nu = -\ln\left(\frac{\mu \Delta}{\kappa}\right) \quad (2.2)$$

Omdat de gebruiker wederom de waarde van κ invoert is het rechterlid van bovenstaande vergelijking bij aanvang van een ontwerpberekening reeds bekend. De grootte van de verschuiving, ν , is dus eveneens bekend en kan derhalve direct toegepast worden. De berekening van de kruinhoogte (of, analoog, de steendikte) komt neer op het net zo lang schuiven met de kruinhoogte (en indirect de faalgrens) totdat er exact κ verschoven waarnemingen in het faaldomein van terecht komen. De dan gevonden kruinhoogte (steendikte) is de gezochte ontwerpwaarde.

Zoals gezegd verschillen de betrouwbaarheidsfuncties per type faalmechanisme. Vertaald naar Figuur 2.1 impliceert dit dat de vorm en ligging van de faalgebied verschilt per type faalmechanisme. De faalmechanismen golfoploop en golfoverslag hebben de prettige eigenschap dat deze “reguliere” betrouwbaarheidsfuncties en faalgebieden hebben. Daarmee bedoelen we dat een toename in de windsnelheid of waterstand ook leidt tot een toename in de hydraulische belasting. Door een stormgebeurtenis steeds verder op te schalen komt er een moment dat deze het faalgebied in schuift. Nog verder opschalen heeft tot gevolg dat de gebeurtenis verder het faalgebied in schuift. Het faalmechanisme “instabiliteit van de bekleding” bezit helaas niet per definitie deze eigenschap. Dit geldt met name voor bekledingen laag op het talud. Deze kunnen bij extreme condities zó ver onder de waterspiegel liggen dat ze volgens de rekenregels van de VTV [2006] niet belast worden. Het gevolg is dat het opschalen van de waterstand niet altijd tot een toename van de hydraulische belasting leidt en het zelfs mogelijk is dat een stormgebeurtenis bij het opschalen het faalgebied uitgeschoven wordt. In dat geval spreken we van “irreguliere faalgebieden”.

Figuur 2.2 geeft schematische voorbeelden van irreguliere faaldomeinen. Dit type faaldomein brengt twee mogelijke problemen met zich mee:

- 1 In het slechtste geval is het faalgebied zó gesitueerd dat er niet voldoende (κ) punten in het faalgebied verschoven kunnen worden, ongeacht de grootte van de verschuiving.
- 2 De iteratieve zoektocht naar de kruinhoogte wordt bemoeilijkt omdat niet meer per definitie aan het basisprincipe wordt voldaan dat een toename in de verschuiving leidt tot een toename van het aantal faalgebeurtenissen. Dit kan mogelijk veroorzaken dat de iteratieve procedure niet convergeert.



Figuur 2.2 Schets van niet-reguliere faaldomeinen (uit: WL&TNO, 2003b)

2.2.3 Mogelijke problemen met de bepaling van het ontwerp punt (illustratiepunt)

Het ontwerp punt/illustratiepunt is dié combinatie van hydraulische condities waarvoor geldt:

- 1 de combinatie ligt op de faalgrens ($z=0$), d.w.z. als deze combinatie van hydraulische condities optreedt, is de hydraulische belasting gelijk aan de weerstand van de kering
- 2 van alle mogelijke combinaties die aan eigenschap (i) voldoen is dit de combinatie met de grootste kans van voorkomen¹.

Figuur 2.3 geeft een schematische weergave van de bepaling van het illustratiepunt voor 2 stochasten (waterstand en windsnelheid). Hierin is te zien dat het illustratiepunt op de faalgrens ligt, zoals gedefinieerd. In feite dient de faalgrens “afgelopen” te worden om na te gaan welk punt op de faalgrens de grootste kans van voorkomen heeft. Het probleem is echter dat daarvoor de gezamenlijke kansverdeling nodig is. Deze is niet beschikbaar omdat de methode De Haan een niet-parametrische methode is; dat wil zeggen een methode waarbij geen functievoorschrift wordt afgeleid voor de gezamenlijke kansverdeling. Daarom wordt de locatie van het illustratiepunt geschat. Daartoe wordt een lijn getrokken door het midden van de puntenwolk van stormgebeurtenissen die tot falen leiden. Deze lijn loopt onder een hoek van 45 graden (in de standaard exponentiële ruimte, waarnaar alle stochastische variabelen worden getransformeerd). Het ontwerp punt ligt precies op het kruispunt van die lijn met de faalgrens (zie Figuur 2.3). De exacte locatie van de lijn wordt bepaald door de term C_L in Figuur 2.3. Deze wordt als volgt bepaald:

[1] De gemeten waarden van wind en waterstand van alle stormgebeurtenissen worden eerst getransformeerd naar standaard-exponentieel verdeelde stochastische grootheden A_1 en A_2 .

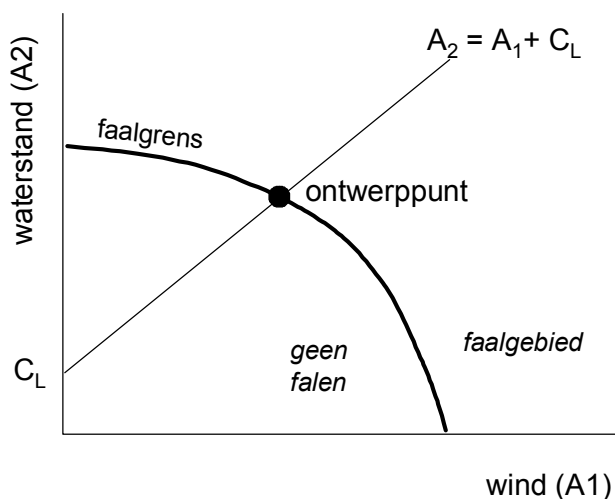
[2] Voor elke waarneming *in het faalgebied* wordt de volgende term bepaald:

$$T = \frac{A_1 - A_2}{2} \quad (4.3)$$

[3] De berekende waarden van T worden op volgorde van grootte gezet en de middelste waarde wordt bepaald. Dit is de mediaan van de variabele T . De waarde van C_L is gelijk aan:

$$C_L = 2 * \text{mediaan}(T) \quad (4.4)$$

¹. In Hydra-K wordt nog een tweede illustratiepunt berekend waarbij de waterstand gelijk is aan het toetspeil. Dit tweede illustratiepunt voldoet alleen aan eigenschap (i): het ligt op de faalgrens.



Figuur 2.3 Schematische weergave van de berekening van het illustratiepunt.

Het ontwerppunt wordt dus bepaald als snijpunt van de faalgrens ($Z = 0$) en de lijn $A_2 = A_1 + C_L$. In de rekencode wordt de lijn stapsgewijs doorlopen. Bij elke stap wordt de waarde van betrouwbaarheidsfunctie Z berekend. Aan “het begin” van de lijn is Z positief (geen falen) en aan “het eind” van de lijn is Z negatief (falen). Bij het doorlopen van de lijn neemt de Z -waarde steeds af. Dáár waar de waarde van Z overgaat van positief naar negatief is het gezochte snijpunt met de faalgrens, en dat is de locatie van het gezochte ontwerppunt (zie Figuur 2.3).

Net als bij de *ontwerpberekening* geldt dat deze methode bij een regulier faalgebied een bruikbaar ontwerppunt oplevert. Het probleem ontstaat echter bij de irreguliere faalgebieden. Op detailniveau zijn er verschillende oorzaken waardoor een ontwerppuntberekening kan mislukken bij een irregulier faalgebied. Het algemene verhaal is dat bij het stapsgewijs doorlopen van de lijn in Figuur 2.3, de waarde van Z overal positief is en er dus geen ontwerppunt/illustratiepunt bepaald kan worden.

2.2.4 Oplossingsrichtingen uit het verleden

Het hiervoor beschreven probleem is niet nieuw. In 2003/2004 is in de zogenaamde “haalbaarheidsstudie Hydra-K” uitgebreid onderzoek gepleegd naar dit type faalgebieden (WL/TNO 20003a,b; 2004a,b,c). Uit die studie bleek dat *in de regel* de uitkomsten van de methode de Haan goed overeen komen met die van Monte Carlo en numerieke integratie. Er kwamen echter ook uitzonderingssituaties aan het licht die om een praktische oplossing vragen. In vervolgstudies in het kader van de HR2006 is gewerkt aan die praktische oplossingen (o.a. HKV/WL, 2005):

- De modellering van het stormverloop van opgeschaalde stormgebeurtenissen is sterk verbeterd. Het verloop is daardoor veel realistischer geworden en het heeft ervoor gezorgd dat bekledingen laag op het talud ook bij extreme stormcondities belast worden (nl. in de “flanken” van een stormgebeurtenis”);
- De iteratieve zoekmethode naar de kruinhoogte/steendikte is robuuster gemaakt;
- Het zoekgebied naar het ontwerppunt is uitgebreid;

- Er is een overgangszone gecreëerd tussen “volledige belasting” en “geen belasting”. Volgens de VTV [2006] zijn er namelijk delen van het talud die wel belast worden en delen van het talud die niet belast worden. De overgang tussen die twee delen is in VTV [2006] zeer abrupt. In Hydra-K had dit voorheen tot gevolg dat de Z-functie nogal abrupte sprongen kon maken, waardoor de zoektocht naar ontwerpdikte en ontwerp punt nog eens extra bemoeilijkt werden. Dat probleem is dus opgelost door een overgangszone te creëren waardoor de overgang tussen “volledige belasting” naar “geen belasting” een continu verloop kent.

Deze maatregelen hebben geleid tot een reductie van het aantal rekengevallen waarvoor geen ontwerp punt bepaald kan worden en/of waar een onrealistisch ontwerp punt bepaald werd. Hydra-K is echter nog steeds niet volledig gevrijwaard van dit soort problemen zoals blijkt uit de volgende paragrafen.

2.3 Analyse foutmeldingen

2.3.1 Inleiding

In totaal bevat Hydra-K ruim 2000 uitvoerlocaties. Om voor dit grote aantal locaties randvoorwaarden te kunnen bepalen bevat Hydra-K een batchmodule. Daarmee kunnen voor elke regio alle locaties in die bewuste regio doorgerekend worden. De berekening die Hydra-K dan uitvoert is een ontwerp berekening, aangevuld met een illustratiepunt berekening. De berekening wordt uitgevoerd voor de maatgevende herhalings tijd, d.w.z. 10.000 jaar voor de Hollandse kust en 4.000 jaar voor de Zeeuwse estuaria.

In de huidige analyse gebruiken we de batchuitvoer om vast te stellen voor welke locaties de ontwerp berekening en/of illustratiepunt berekening niet succesvol verloopt. We maken daarbij gebruik van twee batch-exercities:

- 1 de batchberekeningen die zijn uitgevoerd in het kader van het project “productiesommen HR2006”, uitgevoerd met versies 3.2g en 3.2h van Hydra-K;
- 2 batchberekeningen met de meest recente versie van Hydra-K op het moment dat deze analyse uitgevoerd wordt: versie 3.5.

Omdat de eerste exercitie met een oudere versie is uitgevoerd zijn enkele foutmeldingen mogelijk achterhaald. De belangrijkste reden om de resultaten toch te gebruiken in de huidige analyse is het feit dat de afhandeling van foutmeldingen niet correct blijkt te zijn in versie 3.5, terwijl dat in de oudere versies 3.2g en 3.2h wel het geval is. De foutmeldingen van versie 3.2g en 3.2h vormen de start van de huidige analyse: deze worden stap voor stap nagelopen om te achterhalen wat de exacte oorzaak is. Verder wordt telkens aangegeven in hoeverre deze foutmeldingen ook van toepassing zijn op versie 3.5 van Hydra-K. De foutmeldingen worden in de huidige paragraaf (2.3) besproken. Paragraaf 2.4 beschrijft vervolgens de berekeningen die weliswaar voltooid konden worden, maar waarvan de uitkomsten als “verdacht” geïdentificeerd zijn.

De batchberekeningen zijn uitgevoerd voor combinaties van:

- 1 de 6 regio's: kust noord, kust midden, kust zuid, Westerschelde, Oosterschelde en de verbindende waterkeringen;
- 2 de twee faalmechanismen voor steenbekleding: afschuiving en topplaaginstabiliteit; en
- 3 de 3 taluddelen: onder de berm, de berm of boven de berm.

Niet alle mogelijke combinaties zijn overigens doorerekend. Bijvoorbeeld in de regio's kust noord, midden en zuid wordt steenbekleding alleen geacht boven de berm voor te komen en zijn daarom zijn geen steendiktes bepaald voor de berm zelf en voor het gedeelte onder de berm.

N.B. als in dit hoofdstuk gesproken wordt over "het taluddeel onder de berm", dan doelen we op het hele taluddeel van teen tot berm. Idem, indien gesproken wordt over het taluddeel boven de berm, dan doelen we op het hele taluddeel van berm tot kruin. Hydra-K biedt weliswaar ook de mogelijkheid om kleinere delen van het talud door te rekenen (bijvoorbeeld van de berm tot halverwege de kruin) maar om het aantal berekeningen eindig te houden is in het project "productiesommen HR2006" deze optie niet toegepast en wordt daarom in de huidige analyse ook niet beschouwd.

Uit de batchberekeningen van versies 3.2g en 3.2h kwamen drie typen foutmeldingen naar voren:

- 1 "geen of onvoldoende faalwaarnemingen";
- 2 "sommige waarden liggen buiten de ondergrens of bovengrens"; en
- 3 "illustratiepunt niet berekend".

In het vervolg van deze paragraaf bespreken we deze foutmeldingen afzonderlijk. Zoals eerder aangegeven zijn deze foutmeldingen niet terug te vinden in de batchuitvoer van versie 3.5. De uitvoer van dezelfde berekeningen via de user-interface van versie 3.5 geeft echter wel deze foutmeldingen! voorbeelden:

[1] "geen of onvoldoende faalwaarnemingen gevonden". Als de user-interface deze foutmelding geeft, dan bevat de corresponderende batchuitvoer een berekende steendikte van 104 meter! De kolommen van het illustratiepunt worden in dat geval overgenomen van de berekening die voorafgaand in de batch is uitgevoerd. Daardoor lijkt het dus alsof het illustratiepunt wel netjes is berekend, terwijl dat niet het geval is.

[2] "illustratiepunt niet berekend". Als de user-interface deze foutmelding geeft, dan bevat de corresponderende batchuitvoer waarden van -999.

2.3.2 Foutmelding [1] – "geen of onvoldoende faalwaarnemingen gevonden"

Deze foutmelding komt met name veel voor in de regio's Westerschelde en Oosterschelde. Vooral in de Westerschelde komt deze foutmelding veelvuldig voor wanneer ontwerpen voor bermen bepaald worden op basis van het faalmechanisme "afschuiving".

Ook voor het taluddeel boven de berm komt deze foutmelding bij enkele locaties voor. Bij het taluddeel onder de berm komt deze foutmelding niet voor. Onderstaand bespreken we enkele voorbeelden waar deze foutmelding optreedt.

Bermen; faalmechanisme afschuiving

Analyse van de code van Hydra-K leert dat bermen per definitie niet falen voor het faalmechanisme afschuiving van steenbekleding. In de code wordt de sterkte op 1 gezet en de belasting op 0. Daarom is het niet zo vreemd dat Hydra-K meldt dat er geen faalwaarnemingen gevonden zijn. Dit wordt bevestigd in WL/TNO [2004b], op blz 2-6:

Tot slot wordt opgemerkt dat voor bermen het faalmechanisme “afschuiving” niet getoetst hoeft te worden, m.a.w. dit faalmechanisme zal niet plaatsvinden op een berm.

Deze foutmelding in Hydra-K is derhalve niet verontrustend. Het is echter wel aan te raden om deze melding in dit specifieke geval aan te passen in:

Het faalmechanisme afschuiving vindt niet plaats op een berm.

Boven de berm; faalmechanisme afschuiving

Boven de berm bij het faalmechanisme “afschuiving” komt deze foutmelding vooral voor langs de Oosterschelde. Een voorbeeld van zo’n locatie is [X=71381.2, Y=406298] in de Oosterschelde. De oorzaak van het probleem ligt in het feit dat onder de steenbekleding een filter- en kleilaag ligt waarvan de dikte in de berekeningen default gelijk is gesteld aan 0.5 m. Bij het vaststellen van de sterkte van de bekledingen wordt de dikte van de filter- en kleilaag opgeteld bij de dikte van de steenbekleding. De dikte van de steenbekleding wordt daarbij vermenigvuldigd met de “relatieve dichtheid” die gelijk is gesteld aan 1.6. Voorbeeld: stel dat een steenbekleding van 40 cm wordt neergelegd, dan is de effectieve dikte van de kleilaag+bekleding gelijk aan $0.50 + 0.40 \cdot 1.6 = 1.14$ m.

Het probleem bij de locaties waar deze foutmelding optreedt is dat de golfbelasting daar zó laag is dat een dikte van 0.50 m volstaat om de golven te weren. De belasting van de opgeschaalde stormgebeurtenissen is dus onvoldoende om tot falen te leiden, zelfs met de dunst mogelijke steenbekleding. Dit leidt tot de foutmelding dat er geen steendikte vastgesteld kan worden.

Een keuze voor een dunnere filter+kleilaag zal er toe leiden dat de kering wel kan falen en dat er dus wel een ontwerpdikte van de steenbekleding vastgesteld kan worden. In die zin valt er voor te pleiten om ook de dikte van de filter- en kleilaag in het ontwerp te betrekken. De te bepalen grootte in de ontwerpberekening zou dan moeten zijn:

$$X = \text{dikte filter\&kleilaag} + \text{relatieve dichtheid} \cdot \text{steendikte}$$

Boven de berm; faalmechanisme toplaaginstabiliteit

Boven de berm bij het faalmechanisme “toplaagstabiliteit” komt deze foutmelding vooral voor langs de Oosterschelde. Voor de regio’s Westerschelde, kust Zuid en verbindende waterkeringen waren er destijds in versie 3.2g en 3.2h ook enkele locaties waar deze foutmelding *boven* de bermen voorkwam, maar deze locaties zijn niet meer aanwezig in de meest recente versie van Hydra-K (3.5). De foutmelding voor locaties in laatstgenoemde regio’s werden namelijk veroorzaakt door onrealistisch lage waarden van de golfhoogte (0.01 m) en piekperiode (0.4 s) in de database met SWAN-resultaten. Vanwege deze onrealistische resultaten zijn deze locaties destijds op de “zwarte lijst” beland en uit Hydra-K verwijderd.

Voor de Oosterschelde zijn nog relatief veel locaties aanwezig in versie 3.5 waarvoor deze foutmelding optreedt. We hebben er twee onderzocht:

- $x=37443.6$, $y=402314$; en
- $x=50551.6$, $y=395975$.

In beide gevallen bleek de foutmelding dezelfde oorzaak te hebben: zelfs een laag steenbekleding van 0.01 m wordt nog onvoldoende belast om voor minimaal 50 stormen tot falen te leiden. Voor de meeste stormen is er zelfs helemaal geen sprake van belasting op het talud boven de berm, dat voor deze twee locaties van 5 m+NAP tot 9 m+NAP loopt. Eén van de criteria waaraan bij dit faalmechanisme aan voldaan moet worden voordat er sprake is van belasting is als volgt:

$$h + \frac{1}{2} z_q \geq z_o$$

waarin:

h = waterstand [m+NAP];

z_q = 2% golfploophoogte ten opzichte van de waterspiegel [m];

z_o = niveau onderzijde van het talud [m+NAP].

Kortom, de waterstand plus de helft van de 2% golfploophoogte moet boven de onderzijde van het talud uit komen anders is er geen sprake van belasting. In de huidige rekenvoorbeelden wordt voor het overgrote deel van de opgeschaalde stormgebeurtenissen niet aan deze eis voldaan en is er dus geen sprake van belasting. Dit verklaart waarom Hydra-K aangeeft dat er geen of onvoldoende faalwaarnemingen zijn. Hieruit blijkt dat dit stuk talud onvoldoende belast wordt om tot falen te leiden en dus verder niet getoetst hoeft te worden. Het is derhalve geen probleem dat Hydra-K in dit geval geen illustratiepunten kan leveren. Het is echter wel raadzaam om de foutmelding voor dit specifieke geval aan te passen in:

Het geselecteerde stuk dijkbekleding ligt te hoog om belast te worden; geen ontwerpdikte kunnen vaststellen

Zoals aangegeven komt deze foutmelding in de huidige versie van Hydra-K vooral voor in de regio Oosterschelde. Vergeleken bij de overige regio's zijn de waterstanden en golfbelasting in de Oosterschelde relatief laag, waardoor het kan voorkomen dat het taluddeel boven de berm niet wordt belast, zelfs onder maatgevende omstandigheden. Het is zeker niet uitgesloten dat deze foutmelding ook in de overige regio's kan optreden, met name als een gebruiker een relatief hoog deel van het dijklichaam wil toetsen.

2.3.3 Foutmelding [2] – “sommige waarden liggen buiten de ondergrens of bovengrens”

Dit betreft locaties waarvoor de database met SWAN-resultaten onrealistische resultaten bevat. Bijvoorbeeld negatieve waarden voor de golfhoogte of golfperiode. Deze locaties waren nog onderdeel van Hydra-K versie 3.2f/g, maar zijn inmiddels verwijderd uit de meest recente versie (3.5). Deze foutmelding treedt dus niet meer op.

2.3.4 Foutmelding [3] – “illustratiepunt niet berekend”

Deze foutmelding komt eigenlijk in alle regio's wel voor. Deze foutmelding komt voor als de *ontwerpberekening* is voltooid, maar de daarop volgende berekening van het illustratiepunt niet is voltooid. In sommige gevallen gaat de berekening van het *eerste* illustratiepunt mis (d.w.z. het formele ontwerppunt met) en in andere gevallen het tweede illustratiepunt (d.w.z. het illustratiepunt waarin de waterstand gelijk is gesteld aan het toetspeil).

De algemene aanleiding voor deze foutmelding is eerder al aangehaald: De aanwezigheid van een irregulier faaldomein leidt er toe dat de lijn in Figuur 2.3 niet kruist met een punt dat als ontwerppunt geïdentificeerd kan worden. De reden waarom dat niet lukt kan nog wel per locatie verschillen. Onderstaand werken we een aantal voorbeelden uit.

Boven de berm; faalmechanisme afschuiving

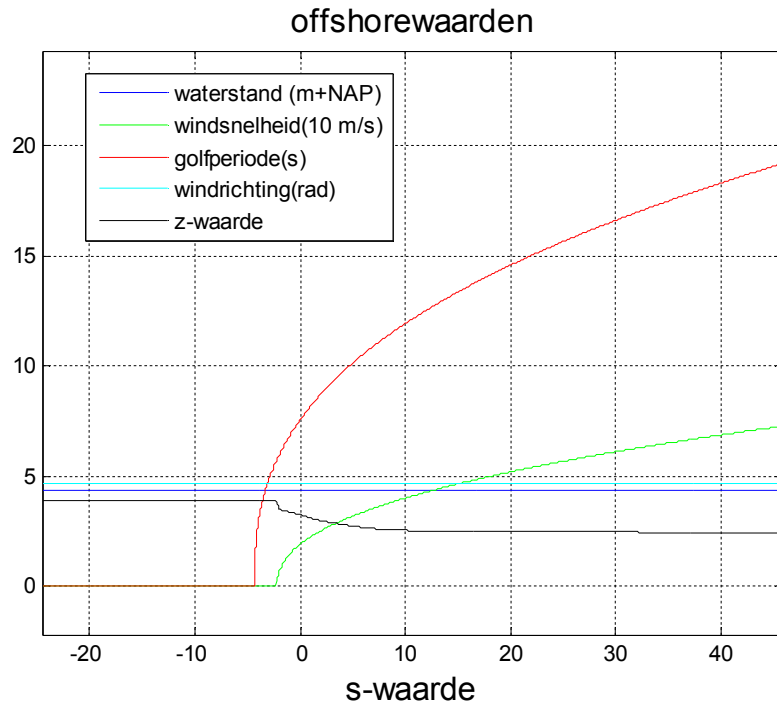
Bij vrijwel alle locaties in de regio's kust noord en kust midden geeft Hydra-K deze foutmelding voor het faalmechanisme afschuiving op het taluddeel boven de berm. Een voorbeeld van zo'n locatie is $x=109878$; $y=551092$, bij Den Helder. Bij deze locatie (en vrijwel alle andere locaties in de regio kust noord) geeft Hydra-K een foutmelding bij de bepaling van het tweede ontwerppunt (waterstand = toetspeil). Bij de analyse naar de oorzaak van de foutmelding dienen Figuur 2.4 en Figuur 2.5 als hulpmiddel. Deze figuren geven het verloop weer van de offshore- en nearshore variabelen en de z-functie over de in Figuur 2.3 geschetste lijn $A_2 = A_1 + 2 \cdot \text{mediaan}(T)$. Op de x-as van Figuur 2.4 en Figuur 2.5 staat de “s-waarde”, waarmee de lijn $A_2 = A_1 + 2 \cdot \text{mediaan}(T)$ binnen Hydra-K is geparametriseerd. De x-as representeert dus als het ware een wandeling over de lijn $A_2 = A_1 + 2 \cdot \text{mediaan}(T)$.

Figuur 2.4 laat zien dat voor s -waarden < -4 de offshorewaarden van windsnelheid en golfperiode gelijk zijn aan 0. Vanaf $s=-4$ (golfperiode) en $s=-2$ (windsnelheid) neemt de waarde van beide variabelen toe. Nearshore leidt dit tot een toename van de golfhoogte en piekperiode en daardoor een daling van de z -waarde. Deze daling van de z -waarde zet echter onvoldoende door en bereikt nooit het niveau $z=0$. Een belangrijke oorzaak is het feit dat de waterstand voor alle waarden van s gelijk is aan het toetspeil (4.45 m+NAP) en dat ligt onder de ondergrens van het getoetste taluddeel (5.13 m+NAP). Volgens de regels van de VTV [2006] treedt er geen afschuiving op van steenbekleding als de waterstand onder het niveau van de bekleding licht. Vertaald naar Hydra-K betekent dit dat de belasting gelijk is aan 0. Echter om plotselinge “sprongen” in de belasting te voorkomen is in Hydra-K een geleidelijke overgang ingebouwd van “volledige belasting” naar “geen belasting”. Deze overgang verloopt lineair van de onderzijde van de bekleding naar 1 meter onder de onderzijde van de bekleding. Aangezien de waterstand in dit voorbeeld 68 cm onder de onderzijde van de bekleding ligt is er nog wel sprake van belasting, maar wel een sterk gereduceerde belasting (gereduceerd met een vermenigvuldigingsfactor $1-0.68 = 0.32$). De reductie in de belasting zorgt ervoor dat deze voor geen enkele waarde van s groot genoeg is om tot falen te leiden. De waarde van z is derhalve altijd positief en dit is de reden dat er geen illustratiepunt gevonden kan worden.

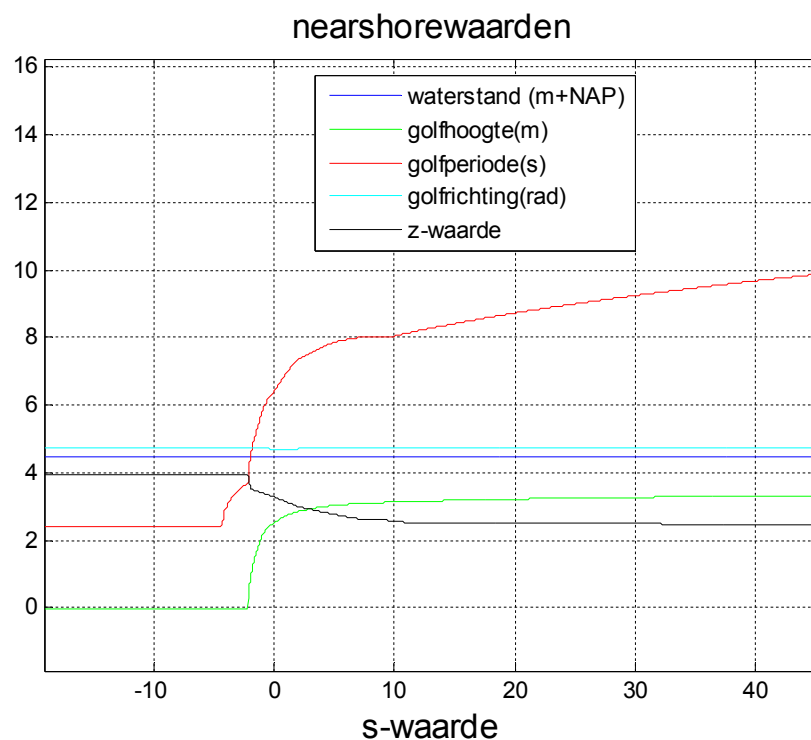
Een andere oorzaak ligt in het feit dat de nearshore golfhoogte voor grote s -waarden niet of nauwelijks meer toeneemt (Figuur 2.5), ondanks het feit dat de windsnelheid voor grote s -waarden wel toeneemt. De golfhoogte loopt hier duidelijk tegen een “fysische begrenzing” op en deze begrenzing heeft alles te maken met het feit dat de waterstand constant is en de waterdiepte daarmee beperkt. Bij de berekening van het eerste illustratiepunt (met variabele waterstand) is er bijvoorbeeld geen sprake van een begrenzing van de golfhoogte.

Het rekenconcept binnen Hydra-K ter bepaling van het illustratiepunt werkt dus niet naar behoren in dit rekenvoorbeeld. De lijn $A_2 = A_1 + C_L$, geschetst in Figuur 2.3, blijkt hier dus in het geheel niet door het faalgebied te lopen. Dat heeft alles te maken met het feit dat, zoals toegelicht in 2.2.2 en 2.2.3, we hier te maken hebben met een irregulier faalgebied. Het rekenconcept ter bepaling van illustratiepunten gaat in principe uit van reguliere faalgebieden, waarbij een toename in de windsnelheid of waterstand per definitie leidt tot een toename in de mate van belasting. In dat geval zal de lijn $A_2 = A_1 + C_L$, altijd voor een deel door het faalgebied lopen.

Deze foutmelding en de bovenbeschreven oorzaak is representatief voor de hele regio kust noord (lees: locatie Den Helder) waar toetspeilen gelijk zijn aan 4.45 m+NAP en de berm van het standaardprofiel in Hydra-K gelijk is aan 5.13 m+NAP. Ook bij de regio Kust midden, waar toetspeilen van de Hondsbossche zeekering en Petten variëren in de orde van 4.75 m+NAP tot 4.80 m+NAP komt deze foutmelding telkens terug. Uitzondering vormt locatie IJmuiden met een toetspeil van 5.16 m+NAP. Dit toetspeil ligt boven de ondergrens van de berm (5.13 m+NAP) en dat betekent dat het getoetste stuk bekleding boven de berm volledig belast wordt.



Figuur 2.4 Verloop van offshore randvoorwaarden en de z-functie op de lijn $A_2 = A_1 + 2 \cdot \text{mediaan}(T)$ voor het faalmechanisme “afschuiving steenbekleding” bij locatie (x=109878; y=551092). Berekening van illustratiepunt 2: waterstand = toetspeil.



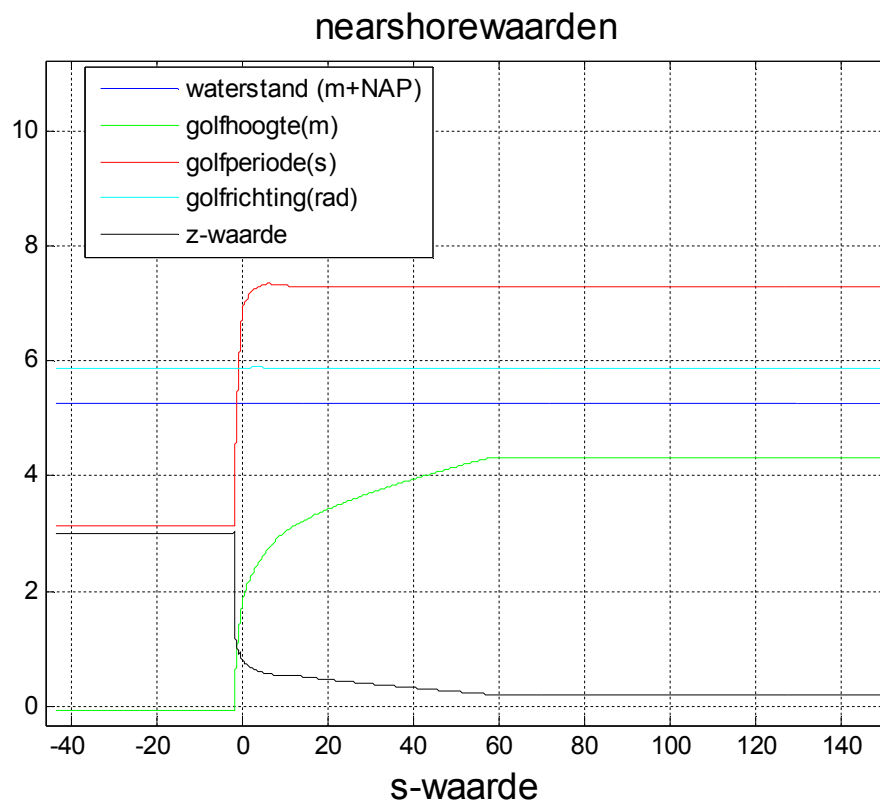
Figuur 2.5 Verloop van nearshore randvoorwaarden en de z-functie op de lijn $A_2 = A_1 + 2 \cdot \text{mediaan}(T)$ voor het faalmechanisme “afschuiving steenbekleding” bij locatie (x=109878; y=551092). Berekening van illustratiepunt 2: waterstand = toetspeil.

Berm; faalmechanisme topplaaginstabiliteit (I)

Bijvoorbeeld voor locatie $x=27075$; $y=381214$ in de Westerschelde kan het tweede illustratiepunt niet bepaald worden voor het faalmechanisme “toplaaginstabiliteit” voor de berm van het dijkprofiel. De betrouwbaarheidsfunctie voor dit faalmechanisme wordt gegeven door:

$$Z = n_{s,crit} - n_s$$

Waarbij n_s het zogenaamde “stabiliteitsgetal” is: de verhouding tussen sterkte en belasting. $n_{s,crit}$ is de kritische waarde van het stabiliteitsgetal die de grens tussen wel/niet falen markeert waarbij de kering tot falen komt. Het stabiliteitsgetal, n_s , wordt gekwantificeerd door het quotient van de golfhoogte en de dikte van de bekleding. Indien van toepassing wordt deze waarde nog gecompenseerd door correctiewaarden omdat bijvoorbeeld de waterstand te laag is om tot volledige belasting te leiden. De waarde van $n_{s,crit}$ is een functie van de hellingshoek, de golfhoogte en de piekperiode. In het rekenvoorbeeld is het stabiliteitsgetal voor geen enkele waarde van s groot genoeg om tot falen te leiden. Figuur 2.6 laat zien dat de waarde van z (zwarte grafiek) daardoor overall positief is en er derhalve geen snijpunt met de faalgrens gevonden wordt.



Figuur 2.6 Verloop van nearshore randvoorwaarden en de z -functie op de lijn $A_2 = A_1 + 2 \cdot \text{mediaan}(T)$ voor het faalmechanisme “toplaaginstabiliteit steenbekleding” bij locatie ($x=27075$; $y=381214$). Berekening van illustratiepunt 2: waterstand = toetspeil.

N.B. het niet kunnen bepalen van het tweede illustratiepunt komt op meer locaties voor in de Westerschelde. Dat geldt zowel voor bermen als voor taluddelen onder de berm. Voor enkele van deze locaties hebben we kunnen constateren dat de oorzaak telkens hetzelfde is: het stabiliteitsgetal is voor geen enkele waarde van s groot genoeg om tot falen te leiden. Belangrijk om te constateren is dat het eerste illustratiepunt (waarin de waterstand onderdeel is van het illustratiepunt) wel voor alle locaties bepaald kon worden. Het vastzetten van de waterstand is in dit geval dus een belemmerende factor bij de zoektocht naar het illustratiepunt.

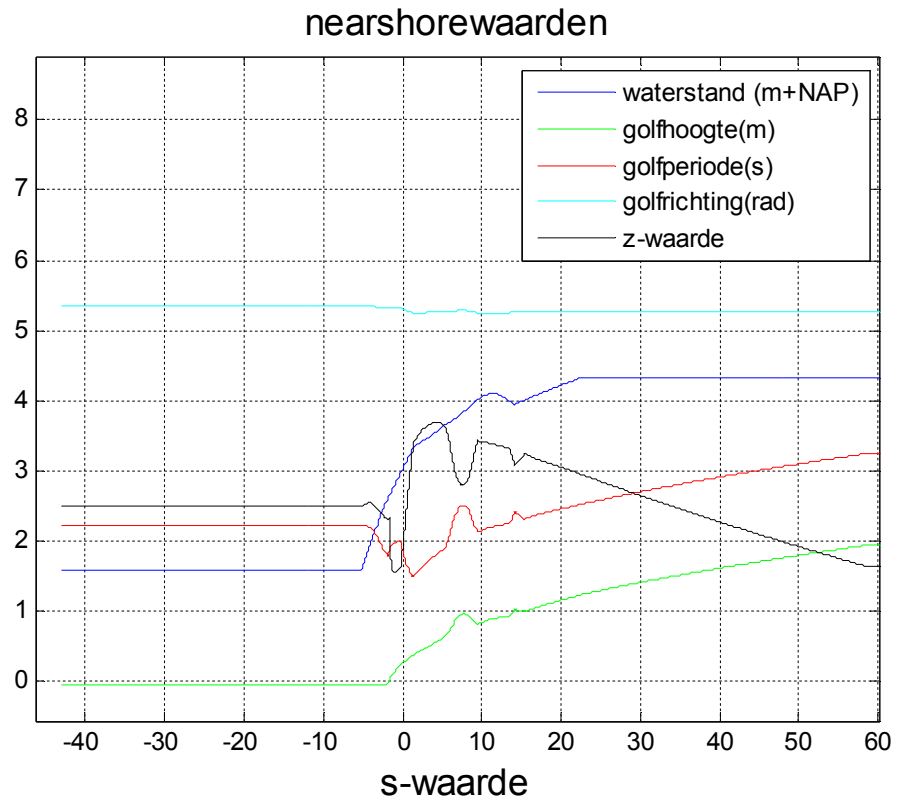
Net als bij het vorige rekenvoorbeeld faalt het rekenconcept van Hydra-K hier dus als gevolg van het feit dat we hier te maken hebben met een irregulier faalgebied.

Berm; faalmechanisme topplaaginstabiliteit (2)

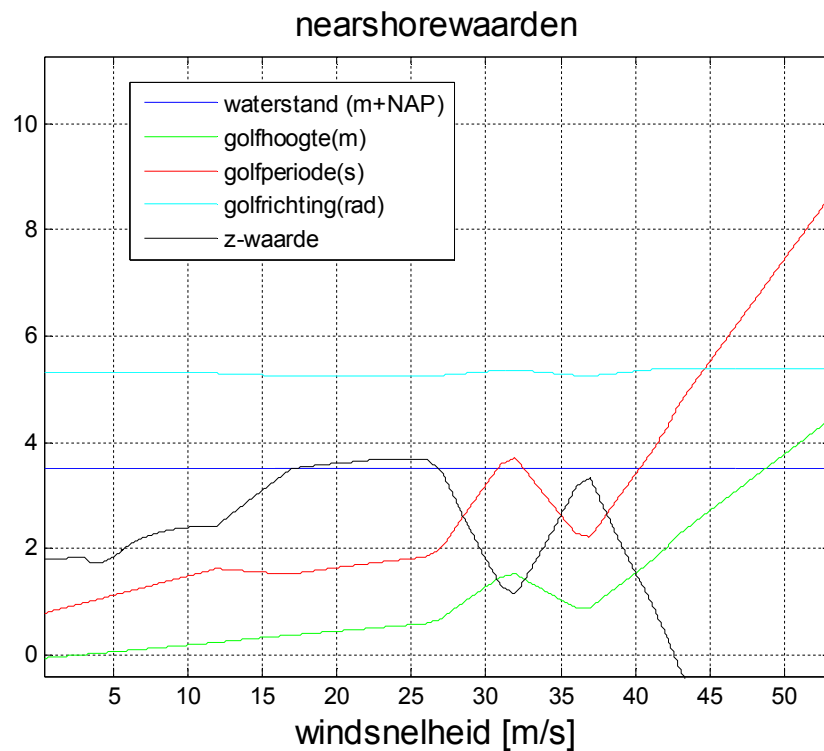
Voor bijvoorbeeld locatie $x = 37418$, $Y = 402645$ in de Oosterschelde kan het eerste illustratiepunt niet bepaald worden (het tweede illustratiepunt wel). Van belang om te weten is dat de berekening van het tweede illustratiepunt (waterstand gelijk aan het toetspeil) voor de Oosterschelde afwijkt van die van andere gebieden. Voor een uitgebreide beschrijving van de reden van de afwijkende rekenmethode verwijzen we naar het functionele rapport van Hydra-K. In het kort komt het er op neer dat er voor de Oosterschelde, in tegenstelling tot andere gebieden, geen 1-op-1 relatie bestaat tussen de offshore en nearshore waterstand. De nearshore waterstand in dit gebied wordt bepaald door enkele additionele invloedsfactoren, zoals het functioneren van de stormvloedkering bij sluiting en de windsnelheid. Het ontbreken van de 1-op-1 relatie tussen de offshore en nearshore waterstand voor de Oosterschelde maakte het noodzakelijk om een andere aanpak te kiezen bij het bepalen van het tweede illustratiepunt. Er is een methode geïmplementeerd waarin de offshore waterstand gelijk wordt gekozen aan het toetspeil en waarin de windsnelheid wordt gevarieerd. De overige invloedsfactoren (wel/niet sluiten kering, stormduur, etc.) worden gelijk gekozen aan hun respectievelijke waarden volgens de “reguliere” ontwerpberkening. Vervolgens wordt dié windsnelheid gekozen waarvoor $z=0$.

Figuur 2.7 toont het verloop van de nearshorewaarden als functie van s bij de berekening van het *eerste* illustratiepunt. Hier speelt weer het eerder beschreven probleem dat het stabiliteitsgetal voor geen enkele waarde van s groot genoeg is om tot falen te leiden. Figuur 2.8 toont het verloop van de nearshorewaarden als functie van de windsnelheid bij de berekening van het *tweede* illustratiepunt. Als het gevolg van het opschalen van de windsnelheid neemt de golfhoogte en golfperiode voldoende toe om tot falen van de kering te leiden ($z < 0$).

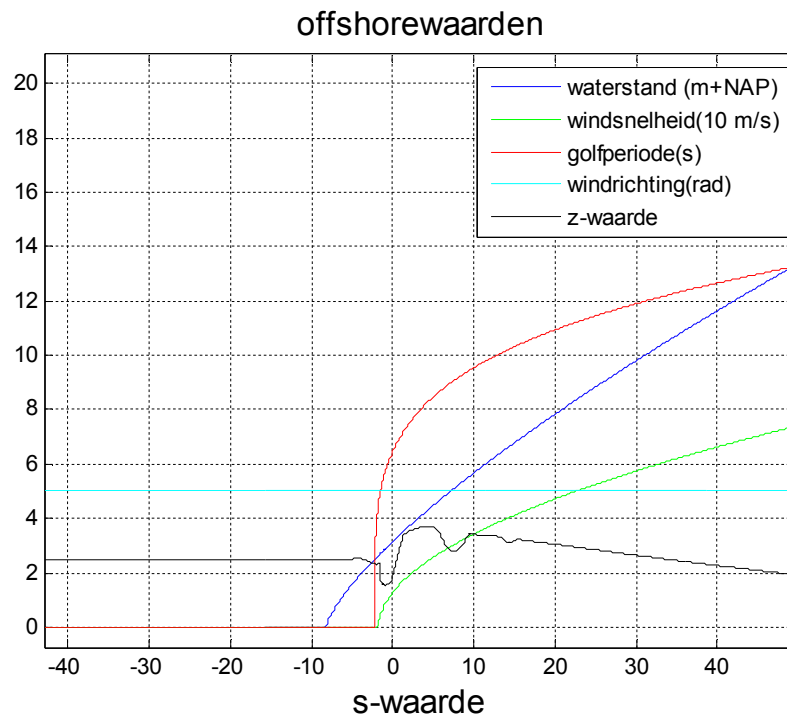
Wat verder opvalt is het “wispelturige” verloop van de golfhoogte, golfperiode en z -waarde in het interval $-4 < s < 15$. Figuur 2.9 toont dat de randvoorwaarden *offshore* wel een vloeiend en stijgend verloop laten zien. Het wispelturige gedrag ontstaat dus bij de transformatie van buiten de kering naar binnen de kering. De nearshore golf randvoorwaarden kunnen soms dalen, terwijl de offshore windsnelheid en waterstand toenemen. Dit zijn inconsistenties in de rekenresultaten van IMPLIC en SWAN, veroorzaakt door de aanwezigheid van de kering.



Figuur 2.7 Verloop van nearshore randvoorwaarden en de z-functie op de lijn $A_2 = A_1 + 2 \cdot \text{mediaan}(T)$ voor het faalmechanisme “toplaaginstabiliteit steenbekleding” bij locatie (x=37418, y=402645). Berekening van illustratiepunt 1: waterstand onderdeel van het illustratiepunt.



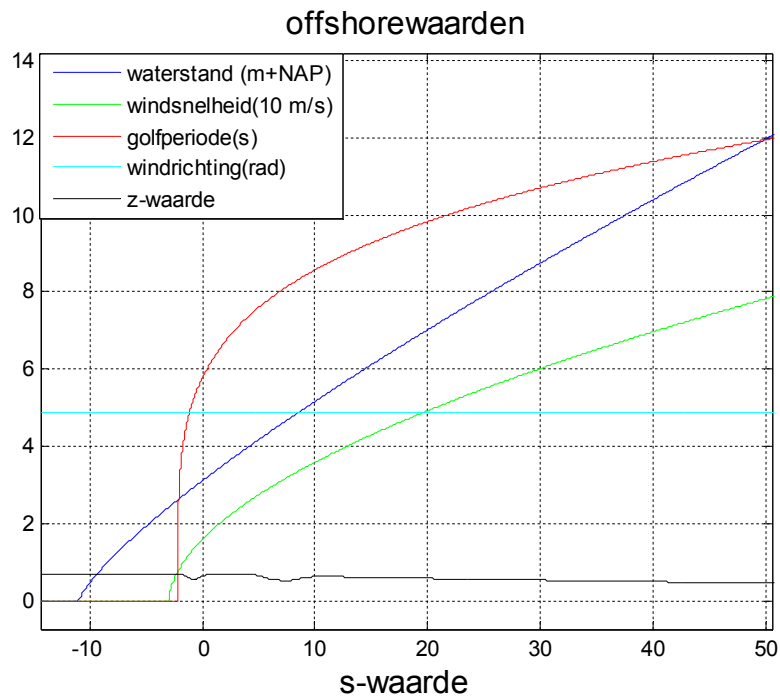
Figuur 2.8 Verloop van nearshore randvoorwaarden als functie van de windsnelheid voor het faalmechanisme “toplaaginstabiliteit steenbekleding” bij locatie (x=37418, y=402645). Berekening van illustratiepunt 2: waterstand = toetspeil.



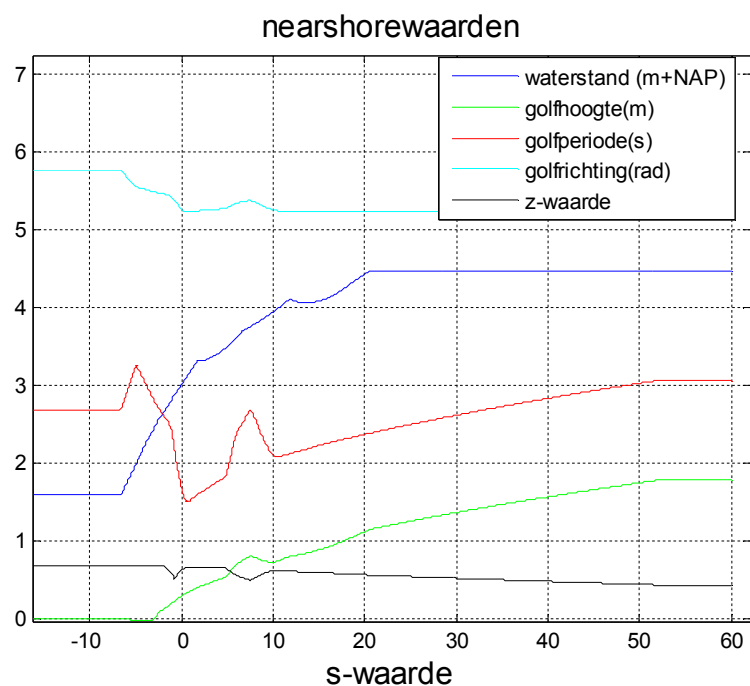
Figuur 2.9 Verloop van offshore randvoorwaarden en de z-functie op de lijn $A_2 = A_1 + 2 \cdot \text{mediaan}(T)$ voor het faalmechanisme “toplaaginstabiliteit steenbekleding” bij locatie (x=37418, y=402645). Berekening van illustratiepunt 1: waterstand onderdeel van het illustratiepunt.

Onder de berm; faalmechanisme “afschuiving”

Deze combinatie leidt alleen tot foutmeldingen in de Oosterschelde en dan met name voor locaties nabij de kering (aan de binnenzijde). Bijvoorbeeld locatie X=37665.6, Y=402405 in de Oosterschelde. Figuur 2.10 en Figuur 2.11 tonen het verloop van de offshore respectievelijk nearshorewaarden op de lijn $A_2 = A_1 + 2 \cdot \text{mediaan}(T)$. Daaruit blijkt dat, ondanks de sterkte toename van windsnelheid en waterstand, de nearshore golfbelasting slechts in beperkte mate toeneemt voor toenemende waarde van s. Het gevolg is dat de bekleding voor geen enkele waarde van s voldoende belast wordt om tot falen te leiden.



Figuur 2.10 Verloop van offshore randvoorwaarden en de z-functie op de lijn $A_2 = A_1 + 2 \cdot \text{mediaan}(T)$ voor het faalmechanisme “afschuiving steenbekleding” bij locatie (x=37665.6, y=402405). Berekening van illustratiepunt 1: waterstand onderdeel van het illustratiepunt.



Figuur 2.11 Verloop van offshore randvoorwaarden en de z-functie op de lijn $A_2 = A_1 + 2 \cdot \text{mediaan}(T)$ voor het faalmechanisme “afschuiving steenbekleding” bij locatie (x=37665.6, y=402405). Berekening van illustratiepunt 1: waterstand onderdeel van het illustratiepunt.

2.3.5 Overzicht van locaties met foutmeldingen

Bijlagen B en C bevatten overzichtkaarten van de Hollandse kust en Zeeuwse estuaria met daarop aangegeven de foutmeldingen die voor de diverse locaties in Hydra-K zijn waargenomen. Elke foutmelding is aangegeven met een afzonderlijke kleur:

- donkerblauw: geen foutmelding
- rood: “geen of onvoldoende waarnemingen”
- lichtblauw: “illustratiepunt niet berekend”
- groen: “sommige waarden buiten de ondergrens of bovengrens”

In de legenda's van de figuren zijn deze foutmeldingen ingekort tot:

- “in orde”;
- “geen steendikte”;
- “illustratiepunt”;
- “buiten grens”.

De figuren zijn afgeleid voor twee verschillende rekenexercities met Hydra-K:

- 1 De berekeningen die zijn uitgevoerd in het kader van het project “productiesommen Hydra-K”, met versies 3.2g en 3.2h. Deze figuren zijn opgenomen in **Bijlage B**.
- 2 De berekeningen die zijn uitgevoerd in het kader van het huidige project met versie 3.5. Deze figuren zijn opgenomen in **Bijlage C**.

Voor beide exercities zijn in totaal 8 figuren opgenomen voor verschillende combinaties van gebied, taluddeel en faalmechanisme. Onderstaande tabel beschrijft de 8 combinaties.

Tabel 2.1 Overzicht van de combinaties van gebied, taluddeel en faalmechanisme waarvoor bijlagen B en C figuren bevatten met locaties waar foutmeldingen in Hydra-K optreden.

nr.	gebied	taluddeel	faalmechanisme
1	Hollandse kust	boven de berm	afschuiving
2	Hollandse kust	boven de berm	toplaaginstabiliteit
3	Zeeland	boven de berm	afschuiving
4	Zeeland	de berm	afschuiving
5	Zeeland	onder de berm	afschuiving
6	Zeeland	boven de berm	toplaaginstabiliteit
7	Zeeland	de berm	toplaaginstabiliteit
8	Zeeland	onder de berm	toplaaginstabiliteit

Onderstaand volgt per figuur een opsomming van de foutmeldingen in versie 3.5 (de meest recente versie van Hydra-K). De onderstaande nummering correspondeert met de nummering in Tabel 2.1 en met de nummering van de figuren in bijlage C (Figuur C1-Figuur C8).

[1] De eerste figuur bevat relatief veel lichtblauwe locaties, ofwel locaties waarvoor het illustratiepunt niet berekend kan worden. Meer precies: locaties waarvoor het tweede illustratiepunt (waterstand gelijk aan toetspeil) niet bepaald kan worden.

Dit is het geval voor *bijna alle* locaties bij Den Helder en voor *alle* locaties bij Petten, de Hondsbossche zeewering en Flauwe Werk. In paragraaf 2.3.4 onder het kopje “Boven de berm; faalmechanisme afschuiving” staat in detail beschreven voor één van deze locaties waarom de berekening van het hier mis gaat. Deze beschrijving is illustratief voor de overige locaties. Kort gezegd komt het er op neer dat met de in Hydra-K geïmplementeerde zoekmethode naar het illustratiepunt het faalgebied niet gevonden kan worden. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat we hier te maken hebben met een irregulier faalgebied.

[2] Voor deze combinatie verlopen alle berekeningen succesvol.

[3] Bij deze combinatie zijn er enkele locaties waarvoor geen illustratiepunt berekend kan worden, met name nabij de kering langs de Oosterschelde. In dit geval is het met name het eerste illustratiepunt (waterstand onderdeel van illustratiepunt) dat niet bepaald kan worden, maar ook de berekening van het tweede illustratiepunt verloopt niet altijd succesvol. Voor deze locaties geldt dat bij een sterke toename van windsnelheid en waterstand, de nearshore golfbelasting slechts in beperkte mate toeneemt. De golfbelasting is daardoor onvoldoende om tot falen te leiden bij de bepaling van het illustratiepunt. Met andere woorden, het faalgebied wordt niet gevonden en daarmee ook het illustratiepunt niet. De oorzaak ligt dus in de (complexe) vertaalslag van offshore belasting naar de belasting aan de binnenzijde van de kering.

Verder zijn er in dit gebied enkele rood gekleurde locaties, ofwel locaties waarvoor de ontwerpberekening faalt (en er dus geen steendikte bepaald kan worden). Voor deze locaties is de belasting van de opgeschaalde stormgebeurtenissen onvoldoende om tot falen te leiden, zelfs met de dunst mogelijke steenbekleding. De onderliggende filter + kleilaag van (default) 0.5 m is sterk genoeg om de golven te keren. Een voorbeeld hiervan is uitgebreid beschreven in paragraaf 2.3.2.

[4] Voor deze combinatie zijn alle locaties rood gekleurd, hetgeen betekent dat voor geen van de locaties een steendikte bepaald kan worden. Dit is simpelweg omdat de berm niet kan falen als gevolg van het mechanisme “afschuiving”. Ondanks de rode kleur is hier dus geen probleem.

[5] Deze figuur lijkt bijzonder veel op figuur [3]. Het meest in het oog springende verschil is dat er aan de westzijde van de Westerschelde in figuur [5] geen locaties afgebeeld zijn, maar dat is simpelweg omdat deze locaties geen steenbekleding onder de berm hebben en wel boven de berm. Verder zijn het dus dezelfde locaties die hier problemen opleveren, met ook dezelfde oorzaken.

[6] Deze figuur bevat enkele locaties in de Oosterschelde waarvoor geen steendikte vastgesteld kan worden. In dit geval betreft het locaties waarvan het taluddeel boven de berm te hoog ligt om dusdanig belast te worden dat de steenbekleding faalt onder maatgevende condities. Dit staat in detail beschreven in paragraaf 2.3.2, onder het kopje “Boven de berm; faalmechanisme topaaginstabiliteit”. Verder zijn er enkele locaties langs de Oosterschelde waar het tweede illustratiepunt niet bepaald kan worden. Het vastzetten van de waterstand is in dit geval een belemmerende factor bij de zoektocht naar het illustratiepunt. Het zorgt ervoor dat over de hele zoeklijn het stabiliteitsgetal niet groot genoeg is om tot falen te leiden.

[7] Ook hier weer enkele locaties in de Oosterschelde waarvoor geen steendikte vastgesteld kan worden. De oorzaak is hetzelfde als beschreven onder punt [6]. Verder zijn in de Westerschelde enkele locaties waarvoor het illustratiepunt niet bepaald kan worden. In deze gevallen is het tweede illustratiepunt (waterstand gelijk aan het toetspeil) de boosdoener. Het vastzetten van de waterstand is in dit geval een belemmerende factor bij de zoektocht naar het illustratiepunt. Het zorgt ervoor dat over de hele zoeklijn het stabiliteitsgetal niet groot genoeg is om tot falen te leiden. Daardoor kan het faalgebied niet gevonden worden en daarmee ook het illustratiepunt niet. Dit staat in detail beschreven in paragraaf 2.3.4, onder het kopje “Berm; faalmechanisme topaaginstabiliteit (1)”.

[8] In deze figuur zijn in de Westerschelde weer dezelfde foutmeldingen te zien als in de vorige figuur. In de Oosterschelde. Over de hele zoeklijn blijkt de golfbelasting te laag om tot falen te leiden.

2.4 Analyse van de berekende dikte van steenbekledingen

Bijlage A toont figuren van de ontwerpdiktes van steenbekleding die zijn berekend met versie 3.5 van Hydra-K. Elke figuur vertegenwoordigt een combinatie van:

- 1 de regio: kust noord, kust midden, kust zuid, Westerschelde, Oosterschelde of de verbindende waterkeringen;
- 2 het faalmechanisme voor steenbekleding: afschuiving of topaaginstabiliteit; en
- 3 het taluddeel: onder de berm, de berm of boven de berm.

Niet alle mogelijke combinaties zijn overigens doorgerekend. Bijvoorbeeld in de regio's kust noord, midden en zuid wordt steenbekleding alleen geacht boven de berm voor te komen en zijn daarom zijn geen steendiktes bepaald voor de berm en onder de berm. Verder zijn (niet weergegeven) ook figuren gemaakt van de waarden in de illustratiepunten. Op basis van deze figuren hebben we enkele “verdachte” resultaten geïdentificeerd.

Oosterschelde; locatie X=38623.7, Y=402113

Eén van de zaken die opviel was het feit dat voor enkele locaties in de Westerschelde en in de Oosterschelde extreem lage ontwerpdiktes voor steenbekleding worden berekend (<5 cm). Een voorbeeld van zo'n locatie is [X=38623.7, Y=402113] in de Oosterschelde. Versie 3.5 van Hydra-K berekent hier een steendikte van 0.03 m voor het faalmechanisme “afschuiving”. Dit heeft vooral te maken met het feit dat onder de steenbekleding een filter- en kleilaag ligt waarvan de dikte in de berekeningen gelijk is gesteld aan 0.5 m. Bij het vaststellen van de sterkte van de bekledingen wordt de dikte van de filter- en kleilaag opgeteld bij de dikte van de steenbekleding. De dikte van de steenbekleding wordt daarbij vermenigvuldigd met de “relatieve dichtheid” die gelijk is gesteld aan 1.6. Kortom, de effectieve dikte van de bekleding in dit voorbeeld is gelijk aan $0.50 + 0.03 \cdot 1.6 = 0.545$ m. Dit is dus aanmerkelijk meer dan de ontwerpwaarde van 0.03 m.

Dus zelfs als de ontwerpdikte gelijk aan 0 gekozen wordt dan is de effectieve dikte nog altijd gelijk aan 0.50 m, ofwel de dikte van de filter- en kleilaag. Dat is ook de reden dat Hydra-K voor sommige locaties geen ontwerpwaarde kan bepalen: zelfs met een steendikte van 0.00 m zijn er voor die locatie minder dan 50 opgeschaalde stormgebeurtenissen die tot falen leiden. Dit stond eerder al beschreven, in paragraaf 2.3.2. Dit probleem kan opgelost worden door ook de dikte van de filter- en kleilaag in het ontwerp te betrekken.

Den Helder; locatie X=110987, Y=553139

Tabel 2.2 toont de twee illustratiepunten wordt voor het faalmechanisme “afschuiving” op het talud boven de berm bij locatie x=110987, Y=553139 bij Den Helder. Gevoelmatig zou het tweede illustratiepunt een zwaardere belasting moeten geven dan het eerste, omdat de golfbelasting veel hoger is, terwijl de golfrichting vrijwel gelijk is. Daarbij geldt dat de waterstand van het tweede illustratiepunt hoger is en daarmee dichtert tegen de onderzijde van het getoetste taluddeel (5.13 m+NAP). Het feit dat beide geïdentificeerd zijn als illustratiepunt geeft echter aan dat ze volgens Hydra-K dezelfde mate van hydraulische belasting veroorzaken voor dit faalmechanisme.

Na bestudering van de code blijkt dat Hydra-K op dit onderdeel een bug bevat. Dat zit als volgt: bij het tweede illustratiepunt ligt de waterstand 68 cm onder de bekleding (4.45 m+NAP versus 5.13 m+NAP). Dat is minder dan een meter en dat betekent in Hydra-K dat er sprake is van de “overgangszone” tussen volledige belasting en geen belasting. Praktisch gezien betekent dat, dat initieel berekende belasting wordt vermenigvuldigd met een reductiefactor die in dit geval gelijk is aan $1 - 0.68 = 0.32$. Bij het eerste illustratiepunt ligt de bekleding 1.62 meter onder de bekleding. Dat is meer dan een meter en dat betekent dat de belasting gelijk aan 0 hoort te zijn. Echter in plaats daarvan rekent Hydra-K met de volledige belasting, dus zonder toepassing van een reductie! Dat zorgt ervoor dat ondanks de lagere golfbelasting de berekende hydraulische belasting van het eerste illustratiepunt toch gelijk is aan de berekende hydraulische belasting van het tweede illustratiepunt (immers beide illustratiepunten liggen op de faalgrens en hebben daarmee dezelfde hydraulische belasting).

Deze bug dient uiteraard z.s.m. aangepast te worden.

Bij het faalmechanisme “toplaagstabiliteit” stelt Hydra-K de belasting wél gelijk aan nul als het taluddeel te hoog ligt om belast te worden. Voor dit faalmechanisme hoeft derhalve geen bug gerepareerd te worden.

Tabel 2.2 Vergelijking van de twee illustratiepunten bij locatie x=110987, Y=553139 bij Den Helder voor het faalmechanisme afschuiving op het taluddeel boven de berm

	illustratiepunt	
	waterstand vrij	waterstand = toetspeil
Waterstand [m+NAP]	3.51	4.45
Significante golfhoogte [m]	2.85	4.72
Piekperiode [s]	7.32	13.46
Golfrichting [graden]	257	258

2.5 Overzicht

Type foutmeldingen

De bepaling van hydraulische randvoorwaarden voor steenbekleding met Hydra-K verloopt niet voor alle mogelijke combinaties van locaties, faalmechanismen en taluddelen succesvol. Vanwege meerdere oorzaken geeft Hydra-K soms foutmeldingen en/of foutieve uitvoer. Een deel van deze foutmeldingen is echter niet problematisch en/of relatief eenvoudig te verhelpen. Het betreft:

[1] Voor het faalmechanisme “afschuiving” op de berm van de dijk geeft Hydra-K de melding “geen of onvoldoende faalwaarnemingen gevonden”. Dit is niet vreemd omdat dit faalmechanisme per definitie niet op een berm kan optreden. Deze foutmelding in Hydra-K is derhalve niet verontrustend. Het is echter wel aan te raden om deze melding in dit specifieke geval aan te passen in: *“Het faalmechanisme afschuiving vindt niet plaats op een berm”*. Merk op dat na deze aanpassingen nog steeds geen hydraulische randvoorwaarden bepaald kunnen worden, maar dat is in dit geval ook niet nodig.

[2] Voor het faalmechanisme “toplaaginstabiliteit”, regio Oosterschelde, geeft Hydra-K voor enkele locaties de melding “geen of onvoldoende faalwaarnemingen gevonden”. De oorzaak is dat deze taluddelen te hoog liggen om dusdanig belast te worden dat de steenbekleding faalt onder maatgevende condities. In feite geeft Hydra-K daarmee aan dat dit deel van het talud voor deze locaties per definitie veilig genoeg is en derhalve niet getoetst hoeft te worden. Het is aan te raden om dit expliciet aan te geven in de foutmelding.

[3] Voor het faalmechanisme “afschuiving” komt het zelfs voor dat Hydra-K voor delen onder de berm de foutmelding “geen of onvoldoende faalwaarnemingen gevonden” geeft. De oorzaak van het probleem is dat onder de steenbekleding een filter- en kleilaag ligt waarvan de dikte in de berekeningen default gelijk is gesteld aan 0.5 m. Bij het vaststellen van de sterkte van de bekleding wordt de dikte van de filter- en kleilaag opgeteld bij de dikte van de steenbekleding. De dikte van de steenbekleding wordt daarbij vermenigvuldigd met de “relatieve dichtheid” die gelijk is gesteld aan 1.6. Kortom, stel dat een steenbekleding van 40 cm wordt neergelegd, dan is de effectieve dikte van de kleilaag+bekleding gelijk aan $0.50 + 0.40 \cdot 1.6 = 1.14$ m. Het probleem bij de locaties waar deze foutmelding optreedt is dat de golfbelasting daar zó laag is dat een dikte van 0.50 m volstaat om de golven te weren. De kleilaag van 0.50 cm volstaat dus en dat betekent dat zelfs met de dunst mogelijke steenbekleding geen sprake is van falen. Dit leidt tot de foutmelding dat er geen steendikte vastgesteld kan worden. Een keuze voor een dunnere filter+kleilaag zal er toe leiden dat de kering wel kan falen en dat er dus wel een ontwerp dikte van de steenbekleding vastgesteld kan worden. In die zin valt er voor te pleiten om ook de dikte van de filter- en kleilaag in het ontwerp te betrekken.

[4] Voor het faalmechanisme afschuiving blijkt Hydra-K een bug te bevatten. Dit betreft de bepaling van de belasting in de zogenaamde overgangszone tussen het deel van het talud dat volledig belast wordt en delen van het talud die niet belast wordt. In deze overgangszone hoort sprake te zijn van “gedeeltelijke belasting”, ofwel belasting die minder zwaar is dan “volledige belasting”. Echter, in plaats daarvan kent Hydra-K aan dit deel van het talud de volle belasting toe. Deze bug kan relatief eenvoudig verholpen worden.

[5] In de uitvoerbestanden van de batchmodule worden geen foutmeldingen meer weergegeven, ondanks het feit dat er nog wel fouten in de berekeningen optreden. Als het illustratiepunt niet berekend kan worden, dan bevat het uitvoerbestand voor die locatie allemaal waarden van -999. Als de steendikte niet bepaald kan worden, dan geeft de user – interface de foutmelding “geen of onvoldoende faalwaarnemingen gevonden”. De batchuitvoer, daarentegen, geeft dan voor de berekende steendikte een waarde van 104 meter weer. Bovendien worden voor dergelijke locaties de kolommen van het illustratiepunt gevuld met resultaten van de vorige locatie. Daardoor lijkt het dus alsof het illustratiepunt wel netjes is berekend, terwijl dat niet het geval is.

Zoals gezegd zijn bovenstaande 5 punten allemaal relatief eenvoudig oplosbaar. Dat geldt zeker niet voor het laatste probleem:

[6] Er zijn locaties, verspreid over meerdere regio's, waarvoor wél een ontwerpdikte voor de steenbekleding bepaald kan worden, maar geen illustratiepunt. Dit zijn de locaties die in bijlage C lichtblauw gekleurd zijn. Voor al deze locaties geldt dat het faalgebied niet gevonden wordt tijdens de zoektocht naar het illustratiepunt. Dat heeft alles te maken met het feit dat, zoals toegelicht in 2.2.2 en 2.2.3, we hier te maken hebben met een irregulier faalgebied. Het rekenconcept ter bepaling van illustratiepunten gaat in principe uit van reguliere faalgebieden, waarbij een toename in de windsnelheid of waterstand per definitie leidt tot een toename in de mate van belasting. Voor de faalmechanismen golfoploop en golfoverslag wordt aan deze voorwaarde voldaan. Bij steenbekleding is dat echter niet het geval en dat leidt tot irreguliere faaldomeinen.

Om het rekenconcept ter bepaling van het illustratiepunt “waterdicht” te maken is naar verwachting een geheel nieuwe zoekprocedure nodig waarbij de uitkomst ruimte van de betrokken stochasten in alle dimensies wordt doorzocht.

Aantal kilometers dijk versus foutmeldingen

Ten aanzien van foutmeldingen/bugs onderscheiden we drie mogelijkheden:

- (i) er is geen sprake van een foutmelding; de berekening verloopt succesvol en levert bruikbare toetsrandvoorwaarden op.
- (ii) er is sprake van een bug of foutmelding, maar deze is relatief snel te verhelpen door kleine aanpassingen te plegen aan Hydra-K. Dit betreft de foutmeldingen, genoemd onder punt [1] t/m [5] van de vorige sectie.
- (iii) er is sprake van een foutmelding die niet eenvoudig is op te lossen; dit zijn de locaties waarvoor wel een ontwerpdikte bepaald kan worden maar geen illustratiepunt. Dit betreft de foutmelding, genoemd onder punt [6] van de vorige sectie.

Tabel 2.3 en Tabel 2.4 geven een overzicht van het aantal kilometers dijk met bovengenoemde 3 “typen” foutmeldingen voor respectievelijk de faalmechanismen “afschuiving” en “toplaagstabiliteit”. Hierbij is onderscheidt gemaakt tussen de 3 taluddelen. De genoemde kilometers zijn ruwe schattingen en mede daarom afgerond op veelvouden van 5 km.

Merk overigens op dat een aanpassing van Hydra-K om de fouten van type (ii) op te lossen niet in alle gevallen tot gevolg heeft dat voor deze situaties alsnog een illustratiepunt berekend kan worden. In sommige gevallen is er namelijk gewoonweg geen sprake van belasting op het betreffende taluddeel. In dat geval betekent “repareren” van de fout alleen maar dat het ontbreken van hydraulische belasting dit taluddeel op correcte wijze aan de gebruiker gemeld wordt.

Uit deze tabellen blijkt dat het aantal locaties waarvoor een probleem is geconstateerd dat niet op korte termijn is op te lossen (laatste kolom) relatief klein is. Voor de volledigheid: het betreft de lichtblauw gekleurde trajecten in de figuren van bijlage C. Voor het faalmechanisme “afschuiving” betreft het de Helderse, Pettemer en Hondsbossche zeewering en enkele kilometers dijk nabij de Oosterschelde-kering. Voor het faalmechanisme “toplaagstabiliteit” betreft het trajecten aan de oostkant van de Westerschelde.

Tabel 2.3 Aantal kilometers dijk versus foutmelding; faalmechanisme “afschuiving”.

	“status” foutmelding		
talluddeel	(i) geen	(ii) direct repareerbaar	(iii) complex
onder berm	290	10	5
berm	0	310	0
boven berm	355	10	15

Tabel 2.4 Aantal kilometers dijk versus foutmelding; faalmechanisme “toplaagstabiliteit”.

	“status” foutmelding		
talluddeel	(i) geen	(ii) direct repareerbaar	(iii) complex
onder berm	295	0	10
berm	270	20	10
boven berm	355	20	0

2.6 Conclusies

In een aantal gevallen functioneert de rekenmethode voor het bepalen van hydraulische randvoorwaarden voor steenbekledingen niet naar wens. Dat resulteert hetzij in foutmeldingen, hetzij in onrealistische randvoorwaarden. Op detailniveau zijn de oorzaken divers, maar in de kern komt het telkens neer op het feit dat bij faalmechanismen voor (steen-)bekledingen de faaldomeinen niet zo mooi “regulier” zijn als bij de faalmechanismen golfoploop en golfoverslag. Met “regulier faaldomein” doelen we op het feit dat een toename in de windsnelheid of waterstand ook leidt tot een toename in de hydraulische belasting op de kering. Het bepalen van hydraulische randvoorwaarden met Hydra-K is mede op dit concept gebaseerd. Het faalmechanisme “instabiliteit van de (steen-)bekleding” bezit helaas niet per definitie deze eigenschap. Dit geldt met name voor bekledingen laag op het talud. Deze kunnen bij extreme condities zó ver onder de waterspiegel liggen dat ze volgens de rekenregels van de VTV [2006] niet belast worden. Een toename in de waterstand leidt in dat geval dus tot een afname in de hydraulische belasting. In dat geval spreken we van “irreguliere faalgebieden”.

Voor alle dijklocaties in Hydra-K is nagegaan of er problemen optreden bij het bepalen van hydraulische randvoorwaarden. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen de talluddelen “onder de berm”, “berm” en “boven de berm”. Verder is er onderscheid gemaakt tussen de faalmechanismen “afschuiving” en “toplaaginstabiliteit”. Het merendeel van de berekeningen (79%) is succesvol afgerond. Voor 19% van de berekeningen geldt dat deze weliswaar niet succesvol zijn afgerond, maar dat dat met een relatief eenvoudige aanpassing/verbetering van Hydra-K opgelost kan worden. De overgebleven 2% betreft berekeningen geven een foutmelding die niet eenvoudig op te lossen is. Voor het faalmechanisme “afschuiving” betreft dit locaties bij de Helderse, Pettemer en Hondsbossche zeewering en enkele kilometers dijk nabij de Oosterschelde-kering. Voor het faalmechanisme “toplaagstabiliteit” betreft het trajecten aan de oostkant van de Westerschelde. Om ook voor deze “probleemlocaties” hydraulische randvoorwaarden te kunnen bepalen dient het rekenconcept ter bepaling van de hydraulische randvoorwaarden met Hydra-K grondig herzien te worden.

3 Ontwerpen van waterkeringen met Hydra-K

3.1 Inleiding

3.1.1 Achtergrond

RIKZ heeft de afgelopen jaren het probabilistische rekenprogramma Hydra-K ontwikkeld voor het bepalen van TOETS-randvoorwaarden voor dijken langs de zoute wateren. Het is vooralsnog niet geschikt om ONTWERP-randvoorwaarden te bepalen. Voor dat doeleinde wordt o.a. het rekenprogramma WindWater gebruikt. WindWater heeft het probleem dat niet helder is welke veiligheidsnorm geboden wordt aan de burger per dijkvak omdat WindWater een deterministisch rekenprogramma is. Een mogelijk alternatief is om Hydra-K in de toekomst ook in te zetten bij het ontwerp van bekledingen. Hydra-K is namelijk een probabilistisch rekenprogramma, zodat aan de uitkomsten een expliciete kans gekoppeld kan worden. Het ontwerp van steenbekledingen kan in dat geval gebaseerd worden op een ontwerp*norm* en/of kosten-batenanalyses.

Een advies om Hydra-K te gaan gebruiken is recent gegeven (HKV, 2006). Het is echter op dit moment nog niet helder hoe met Hydra-K een dijk ontworpen zou moeten worden. RIKZ heeft daarom besloten advies in te winnen van experts over het eventuele gebruik van Hydra-K voor het toetsen en ontwerpen van dijken in de (nabije) toekomst.

In deze notitie, opgesteld door ir. Henk Verheij van WL | Delft Hydraulics, worden de uitkomsten van een workshop terzake besproken. Na vermelden van doelstelling en aanpak (paragraaf 3.1.2) wordt kort nader ingegaan op het bredere kader waarin onderstaande studie past (paragraaf 3.2). Vervolgens worden verschillen tussen ontwerpen en toetsen besproken (paragraaf 3.3) om daarna dieper in te gaan op de mogelijke problemen bij toepassen Hydra-K (paragraaf 3.4). Tenslotte komen aan de orde een verslag van de discussies in de workshop (paragraaf 3.5) en het uiteindelijke advies inzake toetsen en ontwerpen met Hydra-K (paragraaf 3.6).

3.1.2 Doelstelling en aanpak

De doelstelling is het formuleren van een advies aangaande het toetsen en ontwerpen voor steenbekledingen (en kruinhoogte) met Hydra-K.

Om deze doelstelling te realiseren zijn de volgende activiteiten uitgevoerd:

1. literatuurstudie;
2. workshop met enkele experts in Delft op 12 september 2007;
3. opstellen van advies.

Het uiteindelijke advies is gebaseerd op:

- de leidraad ontwerpen voor rivieren wat betreft robuust ontwerpen;
- beschikbare kennis van Hydra-K;
- expertise op het gebied van onzekerheden inzake de formuleringen voor faalmechanismen voor steenzettingen en kruinhoogte;
- uitkomsten van de workshop met experts.

3.2 Kader

Opstellen van een advies maakt onderdeel uit van het project “Validatie methode de Haan” (de methode de Haan is de probabilistische rekenmethode achter Hydra-K). Binnen het project wordt een aantal zaken aangaande Hydra-K en de methode de Haan uitgediept en de workshop is daar een onderdeel van. Het betreft het onderzoeken van de mogelijkheid om het probabilistische rekenprogramma Hydra-K (ontwikkeld voor het bepalen van *toets*-randvoorwaarden voor dijken langs de zoute wateren) in de toekomst ook in te zetten bij het *ontwerp* van bekledingen.

Daarnaast zijn er nog enkele aanverwante ontwikkelingen:

- In het project “SBW -faalmechanismen” wordt momenteel het nodige uitgezocht over ditzelfde onderwerp, zij het in een andere context (integratie onzekerheidsanalyse belasting en sterkte).
- Het document “ontwerp zee- en meerdijken” van J.W. van der Meer is in concept gereed, maar nog niet verschenen. Van der Meer kwantificeert voor ontwerpen allerlei onzekerheden in de verwachtingswaarde van de HR en geeft de marges aan. De verwachtingswaarde kan ook worden gebruikt bij de toetsing.

3.3 Ontwerpen versus toetsen

In de Leidraad Rivieren wordt onderscheid gemaakt tussen ontwerpen en toetsen. De Wet op de Waterkeringen schrijft voor dat de beheerders van waterkeringen iedere 5 jaar toetsen of de waterkeringen voldoen. De meest recente uitgangspunten voor toetsen zijn beschreven in de VTV2004 en de HR2006. Er is een verschil tussen het toetsen of een waterkering op dit moment voldoet aan voorschriften en het ontwerpen van een constructie die gedurende langere tijd moet blijven voldoen aan die voorschriften.

De belangrijkste ontwerptechnische verschillen zijn dan ook (RWS, 2007):

- Bij ontwerpen wordt uitgegaan van een bepaalde levensduur; 50 jaar voor dijken en 100 jaar voor kunstwerken. Bij toetsen wordt beoordeeld of de bescherming tegen overstroming tot de eerstvolgende 5-jaarlijkse peildatum voldoende gewaarborgd is.
- Bij het ontwerp is niet precies bekend hoe sterk de waterkering in de praktijk zal zijn. Daarom wordt gerekend met een onzekerheidsmarge voor de sterkte. Bij toetsen wordt de sterkte tegen overstromen beoordeeld aan de hand van de gegeven situatie.

- Bij toetsen wordt voor de belastingen uitgegaan van de randvoorwaarden uit het Randvoorwaardenboek. Voor ontwerpen dient rekening te worden gehouden met klimaatverandering gedurende de planperiode en de invloed daarvan op de belastingen.

Bij het ontwerpen rekening houden met bovenstaande punten betekent een robuust ontwerp maken. In de Leidraad Rivieren wordt hiervoor de volgende definitie gebruikt:

Goed (robuust) ontwerpen betekent: in het ontwerp rekening houden met toekomstige ontwikkelingen en onzekerheden, zodat het uitgevoerde ontwerp tijdens de planperiode blijft functioneren zonder dat ingrijpende en kostbare aanpassingen noodzakelijk zijn, en dat het ontwerp uitbreidbaar is indien dat economisch verantwoord is.

In essentie betekent dit dat bij het ontwerp er vooral aandacht dient te zijn voor de aspecten ontwerpbelastingen, onzekerheid, en uitbreidbaarheid.

Overigens is de term robuust ontwerpen vooralsnog voor meerdere interpretaties vatbaar. Volgens professor Vrijling is robuust ontwerpen verbonden met tenminste drie aspecten (citaat uit: HKV, 2006):

1. een constructie hoeft niet te worden afgekeurd, zodra hij niet meer aan de ontwerpnorm voldoet;
2. bij het ontwerp dient rekening gehouden te worden met alle onzekerheden;
3. flexibel ontwerpen/bouwen houdt in dat men later de constructie tegen relatief lage kosten kan aanpassen als één van de onzekerheden werkelijkheid wordt.

Voor toepassing van Hydra-K is met name het tweede punt relevant en het op te stellen advies zal zich met name daarop concentreren. Met andere woorden: welke onzekerheden spelen een belangrijke rol en in hoeverre kunnen we daar binnen Hydra-K rekening mee houden?

Onzekerheden kunnen zich voordoen in:

- de hydraulische belasting: de ontwerpbelasting is de verwachte toetsbelasting aan het eind van de planperiode plus een toeslag voor onzekerheden (bij rivierdijken wordt een toeslag van 0,30 m gehanteerd);
- Onzekerheden in de sterkte van de waterkeringen: deze worden al langer in het ontwerp verwerkt via veiligheidsfactoren of materiaalfactoren, of via een probabilistische benadering met een kansverdeling voor de relevante onzekerheden.

3.4 Huidige situatie en daaruit volgende problemen

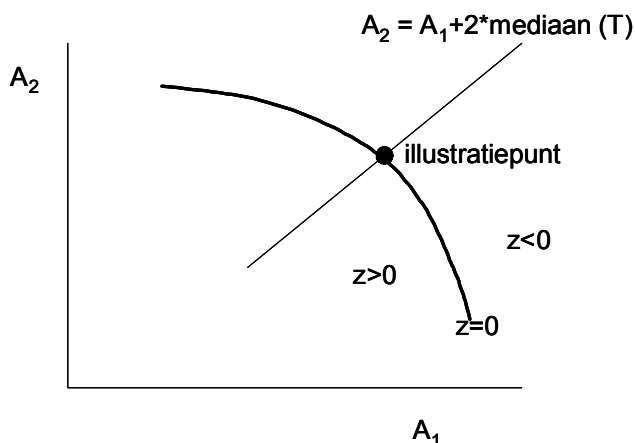
De probabilistische rekenmethode van Hydra-K (de methode de Haan) is in eerste instantie ontwikkeld voor het bepalen van de faalkans van een dijk met gegeven eigenschappen. Omgekeerd kan Hydra-K ook gebruikt worden voor het ontwerpen of toetsen van een dijk gegeven een bepaald veiligheidsniveau. Via enkele iteraties worden de dimensies van de dijk bepaald zodanig dat precies het veiligheidsniveau van ongeveer 10^{-3} à 10^{-4} wordt gerealiseerd.

Nadat de dimensies zijn bepaald, genereert Hydra-K een zogenaamd “illustratiepunt”: een maatgevende combinatie van waterstand en golfparameters die tot een belasting leiden die exact gelijk is aan de sterkte van de kering². Dit illustratiepunt kan voor elk gewenst veiligheidsniveau bepaald worden. Het Hydraulische Randvoorwaardenboek bevat de illustratiepunten die horen bij een veiligheidsniveau gelijk aan de normfrequentie.

Het principe van de rekenmethode staat in Figuur 1 uiteengezet. Elke combinatie van de parameters A_1 en A_2 (bijvoorbeeld golfhogte, H_s , en waterstand, h) heeft een bepaalde kans van voorkomen. Er is een kansverdelingsruimte. In die ruimte zijn lijnen met gelijke golfoverslag aan te geven (bijvoorbeeld de lijn met $Z = 0$). Bij de bepaling van de maatgevende combinatie worden de lijnen van gelijke overslag verschoven zodat de totale overschrijdingskans gelijk is aan een vooraf opgegeven veiligheidsniveau, bijvoorbeeld eens in de 4000 jaar. Langs deze resulterende lijn van gelijke overslag wordt vervolgens de combinatie gezocht met de grootste kans van optreden: het illustratiepunt. Deze combinatie dient als hydraulische randvoorwaarde voor de toetsing van de doorgerekende dijk.

De vorm van de lijnen met gelijke golfoverslag is afhankelijk van het dijkprofiel, maar ook bij een geheel andere vorm is het gevolg naar verwachting niet dat het illustratiepunt op een heel andere plaats in de grafiek komt te liggen. Met andere woorden: de hydraulische randvoorwaarden zijn slechts zeer matig afhankelijk van het dijkprofiel.

Dat blijkt niet te gelden voor de mate van hydraulische belasting bij toetsing of bij ontwerpen op basis van gegeven hydraulische randvoorwaarden. Bijvoorbeeld bij de toetsing van de waterkering Petten waar een kleine afwijking van de vorm van de berm leidde tot een afwijking in de benodigde kruinhoogte van 1 meter (Joost Beckers, persoonlijke communicatie). De geometrie is hier dus een belangrijke parameter onzekerheid.



Figuur 1 Principe bepaling illustratiepunt in Hydra-K

In het voorbeeld is uitgegaan van het faalmechanisme overlopen/overslag. Dit faalmechanisme is goed beschreven en identiek aan de stand-alone versie in PC-Overslag (wordt via een DLL in Hydra-K aangeroepen).

² Het betreft hier de sterkte van de kering zoals vastgelegd in de rekenregels van de VTV [2006], dus zonder inachtneming van reststerkte.

Voor steenbekledingen zijn in Hydra-K de formuleringen van de faalmechanismen vereenvoudigd en geschematiseerd. Het gaat om de faalmechanismen toplaagstabiliteit en afschuiven en deze zijn overgenomen uit de VTV2004 (RIKZ, 2006). Duidelijk zal zijn dat de beschrijving van deze faalmechanismen een bron van onzekerheden is.

Kort samengevat gaat het om de volgende “problemen”:

- Berekening van de kruinhooogte blijkt gevoelig voor kleine wijzigingen in de geometrie van de dijk bij een gegeven hydraulische belasting.
- De faalmechanismen voor steenbekledingen zijn in Hydra-K vereenvoudigd en geschematiseerd opgenomen conform de eenvoudige toestmethode. Maar er ontbreken ook mechanismen zoals bijvoorbeeld materiaaltransport uit onderlaag en uit filterlaag.
- Meer specifieke problemen zijn:
 - Waterdoorlatendheid (gedrag in de tijd, dichtslibben)
 - Toplaagdikte
 - Taludhelling (vaak bol)
 - Schematisatie inklemming
 - Steenzetting op berm
 - Grotere golfperiode
 - Scheve golfaanval
 - Taluds steiler dan 1:3
 - Gebogen dijkvakken (minder inklemming)

3.5 Samenvatting discussie in workshop

Op basis van een notitie, waarvan de inhoud grotendeels is weergegeven in de voorgaande paragrafen 3 en 4, is op 12 september 2007 door een groep experts in Delft gediscussieerd. De experts die hebben deelgenomen aan de discussie waren:

- Jitse Wouters (INFRAM);
 - Matthijs Kok (HKV);
 - Henk Steetzel (ALKYON);
 - Henk Verheij (WL);
 - Ferdinand Diermanse (WL);
 - Robert Vos (RIKZ).
- Tijdens de discussie komen vele onderwerpen aan bod, enkele zelfs meerdere malen. Onderstaand de belangrijkste punten die naar voren kwamen.
- Hydra-K kan mogelijk in de toekomst uitgebreid worden met de (relatief rekenintensieve) sterktemodules die nu voor het toetsen van keringen worden toegepast (bijvoorbeeld “steenzet”). Dat zal uiteraard een toename van de rekentijd geven en is weliswaar een relevante potentiële aanpassing van Hydra-K, maar in essentie niet van belang voor het uit te brengen advies. De potentiële aanpassing is namelijk niet specifiek van toepassing op ontwerpen, maar kan ook voor toetsen uitgevoerd worden. De discussie in de workshop focust vooral op de extra onzekerheden in randvoorwaarden die wel relevant zijn voor ontwerpen (planperiode 50-100 jaar), maar niet voor toetsen (planperiode 5 jaar).

- In feite moet bij ontwerpen rekening gehouden worden met alle onzekerheden die een rol spelen bij de bepaling van de uiteindelijke hydraulische randvoorwaarden. En dat zijn er nogal wat. Met name de opsomming van alle onzekerheden in het modelleren van falen van steenbekledingen is daarbij illustratief. Wederom geldt echter dat het merendeel van die onzekerheden zowel relevant zijn voor ontwerpen als voor toetsen en dus eigenlijk in essentie niet van belang zijn voor het advies en dus de discussie in de workshop.
- Relevant is de vraag of deze onzekerheden niet zo dominant zijn dat probabilistisch ontwerpen feitelijk geen zin heeft omdat het alleen maar “schijnzekerheid” toevoegt aan het ontwerp. Zo wordt bijvoorbeeld bij het falen van de steenbekleding uitgegaan van de sterkte van een *los liggend blok*. Dit is een conservatieve aanname die strijdig lijkt met het principe van “scherp toetsen” en “verwachtingswaarde gebruiken in HR”. Hier moet bij probabilistisch ontwerpen van steenbekledingen dus met aandacht naar worden gekeken. Overigens is probabilistisch ontwerpen alleen mogelijk (en zinvol) als er een betrouwbare kansdichtheidsfunctie van zowel de belasting als van de sterkte bekend is. In het voorgaande wordt feitelijk gesteld dat er geen kansdichtheidsfunctie voor de sterkte van een steenzetting bestaat. Dit geeft aan dat het ontwikkelen van een volledig probabilistisch ontwerptool voor steenzettingen wel degelijk zinvol is.
- Er is voor dijkvakken feitelijk geen formele ontwerpnorm beschikbaar, behalve dan de ietwat adhoc gekozen “factor 10” voor verschil tussen falen en bezwijken. Dat zou in de toekomst nog eens scherper gesteld moeten worden.
- In de Leidraad Rivieren is er eenvoudigweg voor gekozen om een correctie van 30 cm op de waterstand toe te passen als “vergaarbak” van alle onzekerheden. Hieraan is wel nadrukkelijk toegevoegd dat als de beheerder op specifieke locaties sterke aanwijzingen heeft dat dit getal incorrect is, de vrijheid bestaat om middels een aanvullende studie een andere correctiewaarde af te leiden.
- Uiteindelijk zijn de extra’s waar bij ontwerpen in vergelijking met toetsen rekening mee gehouden moet worden:
 - Klimaatverandering (plus onzekerheden in de klimaatverandering);
 - Mogelijke toekomstige wijzigingen in statistiek en/of modellen;
 - Bodem: morfologische veranderingen.

NB: Onzekerheden over de mogelijk veranderde normstelling in de toekomst wordt niet meegenomen omdat de mens daar zelf toe kan beslissen.

- Vervolgens is er nog een discussie over de invloed van gekozen (ontwerp-)profielen in Hydra-K op de resulterende randvoorwaarden. De profielvorm heeft invloed op het sterktemodel en daarmee op de uitkomsten van Hydra-K. En dus ook op de resulterende randvoorwaarden. Het vermoeden bestaat dat deze invloed niet groot is, maar dat is nooit echt uitgezocht. Het verdient aanbeveling om dat alsnog te doen. Dit geldt overigens voor meerdere Hydra-modellen (Hydra-M, Hydra-B etc.).

- De planperiode (50, 100 jaar) zou in theorie geoptimaliseerd moeten worden, maar het is niet realistisch om dit voor elk project te doen op basis van een Kosten-Batenanalyse. Daarom blijft men vasthouden aan termijnen van 50 en 100 jaar.
- Het mogelijk in de toekomst ontbreken van eenduidige randvoorwaarden die in hardcopy beschikbaar zijn, maar tevens ook digitaal (zoals nu voor meren het geval is) wordt aangesneden als een potentieel probleem. Het is nadrukkelijk de bedoeling dat de randvoorwaarden voor de kust, zoals opgenomen in het randvoorwaardenboek, ook in de toekomst als een eenduidige set van toetspeil, golfhoogte en golfperiode (en soms de golfrichting) worden opgeleverd.

3.6 Advies over gebruik Hydra-K

Er bestaat consensus bij de experts over de wenselijkheid om het gebruik van Hydra-K voor ontwerpdoeleinden nader te verkennen. Zij bevelen aan daartoe een studie op te starten, waarin de betrokken onzekerheden nog scherp onderzocht worden, met name ook in de faalmechanismen. De motivatie voor deze aanbeveling is:

- Hydra-K biedt de mogelijkheid te voldoen aan de behoefte om het ontwerp mede te baseren op de veiligheidsnorm. Er moeten echter nog wel een aantal aanpassingen worden gepleegd;
- Een keuze voor Hydra-K is van belang voor eenduidigheid van de methode van ontwerpen, maar daarbij wordt aangetekend dat niet de fout gemaakt moet worden om Hydra-K te snel tot de standaard te verheffen en programma's als WindWater te snel op een zijspoor te zetten;
- Mogelijk het grootste winstpunt van probabilistisch ontwerpen kan blijken te zijn het inzicht dat wordt verkregen in de onzekerheden in faalmechanismen, ontwerprandvoorwaarden, etc.

De experts zijn verder van mening dat de huidige normstelling nodig aan verbetering toe is, maar zijn zich bewust dat dit zowel technisch als politiek een moeilijk thema is. Zij bevelen wel aan de discussie terzake te starten, maar voor het gebruik van toets- dan wel ontwerp tools uit te gaan van een normstelling die valt binnen de definitie conform art 3 lid 1³ van de Wet op de Waterkering en niet conform lid 2⁴.

³ Artikel 3 lid 1 luidt: Op de bij deze wet behorende bijlage II en bijlage IIA is voor elk dijkkringgebied de veiligheidsnorm aangegeven als gemiddelde overschrijdingskans - per jaar - van de hoogste hoogwaterstand waarop de tot directe kering van het buitenwater bestemde primaire waterkering moet zijn berekend, mede gelet op overige het waterkerend vermogen bepalende factoren.

⁴ Artikel 3 lid 2 luidt: In overeenstemming met en ter vervanging van de overschrijdingskans in de zin van het eerste lid, wordt bij algemene maatregel van bestuur voor elk dijkkringgebied de veiligheidsnorm nader aangegeven als de gemiddelde kans per jaar op een overstroming door het bezwijken van een primaire waterkering.

Tot slot: de huidige versie van Hydra-K is niet 100% robuust ten aanzien van het bepalen van toetsrandvoorwaarden van steenbekledingen: bij enkele kustlocaties geeft Hydra-K foutmeldingen (zie hoofdstuk 2). Deze problemen dienen eerst opgelost te worden alvorens Hydra-K ingezet gaat worden ten behoeve van het ontwerp van steenbekledingen.

4 Samenvatting en conclusies

Kader

Vanaf januari 1996 is de nieuwe "Wet op de Waterkering" van kracht. Middels deze wet is onder andere vastgelegd dat er iedere vijf jaar door de beheerders een toetsing op veiligheid moet plaatsvinden van alle primaire waterkeringen in Nederland. Om de toetsing te kunnen uitvoeren moeten tevens de hydraulische randvoorwaarden bekend zijn. In de Wet op de Waterkering wordt de minister van Verkeer en Waterstaat opgedragen deze beschikbaar te stellen. De hydraulische randvoorwaarden worden elke vijf jaar vastgesteld en gepresenteerd in de publicatie "Hydraulische randvoorwaarden voor Primaire Waterkeringen" (HR).

Eén van de deelsystemen waarvoor randvoorwaarden moeten worden afgeleid zijn de zoute wateren. Meer specifiek zijn dat de Westerschelde, de Oosterschelde, de Waddenkust, de Zeeuwse Noordzeekust en de Hollandse kust. De hydraulische randvoorwaarden voor deze wateren bestaan voor elke locatie uit een combinatie van de waterstand en enkele relevante golfkarakteristieken (golfhoogte, golfperiode, golfrichting). Om deze randvoorwaarden te bepalen is door RIKZ het probabilistische rekenprogramma Hydra-K ontwikkeld.

Naar aanleiding van het opstellen van de (concept-) randvoorwaarden voor HR2006 en het presenteren van de rekenmethoden die aan de basis liggen is een aantal vraagstukken naar voren gekomen. Naar aanleiding daarvan zijn 8 activiteiten gedefinieerd in het kader van het project "validatie methode De Haan" dat WL | Delft Hydraulics uitvoert in samenwerking met ARGOSS en HKV [LIJN IN WATER](#). Het onderhavige rapport beschrijft 2 van de 8 activiteiten:

1. testen en analyseren van de performance van Hydra-K voor het afleiden van toetsrandvoorwaarden voor steenbekledingen;
2. formuleren van een advies aangaande het toetsen en ontwerpen voor steenbekledingen (en kruinhoogte) met Hydra-K.

Conclusies toetsrandvoorwaarden van steenbekledingen

In een aantal gevallen functioneert de rekenmethode voor het bepalen van hydraulische randvoorwaarden voor steenbekledingen niet naar wens. Dat resulteert hetzij in foutmeldingen, hetzij in onrealistische randvoorwaarden. Op detailniveau zijn de oorzaken divers, maar in de kern komt het telkens neer op het feit dat bij faalmechanismen voor (steen-)bekledingen de faaldomeinen niet zo mooi "regulier" zijn als bij de faalmechanismen golfoploop en golfoverslag. Met "regulier faaldomein" doelen we op het feit dat een toename in de windsnelheid of waterstand ook leidt tot een toename in de hydraulische belasting op de kering. Het bepalen van hydraulische randvoorwaarden met Hydra-K is mede op dit concept gebaseerd. Het faalmechanisme "instabiliteit van de (steen-)bekleding" bezit helaas niet per definitie deze eigenschap. Dit geldt met name voor bekledingen laag op het talud. Deze kunnen bij extreme condities zó ver onder de waterspiegel liggen dat ze volgens de rekenregels van de VTV [2006] niet belast worden.

Een toename in de waterstand leidt in dat geval dus tot een afname in de hydraulische belasting. In dat geval spreken we van “irreguliere faalgebieden”.

Voor alle dijklocaties in Hydra-K is nagegaan of er problemen optreden bij het bepalen van hydraulische randvoorwaarden. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen de talluddelen “onder de berm”, “berm” en “boven de berm”. Verder is er onderscheid gemaakt tussen de faalmechanismen “afschuiving” en “toplaaginstabiliteit”. Het merendeel van de berekeningen (79%) is succesvol afgerond. Voor 19% van de berekeningen geldt dat deze weliswaar niet succesvol zijn afgerond, maar dat dat met een relatief eenvoudige aanpassing/verbetering van Hydra-K opgelost kan worden. De overgebleven 2% betreft berekeningen geven een foutmelding die niet eenvoudig op te lossen is. Voor het faalmechanisme “afschuiving” betreft dit locaties bij de Helderse, Pettemer en Hondsbossche zeewering en enkele kilometers dijk nabij de Oosterschelde-kering. Voor het faalmechanisme “toplaagstabiliteit” betreft het trajecten aan de oostkant van de Westerschelde. Om ook voor deze “probleemlocaties” hydraulische randvoorwaarden te kunnen bepalen dient het rekenconcept ter bepaling van de hydraulische randvoorwaarden met Hydra-K grondig herzien te worden.

Conclusies ontwerpen van waterkeringen met Hydra-K

Het op dit moment nog niet helder hoe met Hydra-K een dijk ontworpen zou moeten worden. RIKZ heeft daarom besloten advies in te winnen van experts over het eventuele gebruik van Hydra-K voor het toetsen en ontwerpen van dijken in de (nabije) toekomst. Er bestaat consensus bij de experts over de wenselijkheid om het gebruik van Hydra-K voor ontwerpdoeleinden nader te verkennen. Zij bevelen aan daartoe een studie op te starten, waarin de betrokken onzekerheden nog scherp onderzocht worden, met name ook in de faalmechanismen. De motivatie voor deze aanbeveling is:

- Hydra-K biedt de mogelijkheid te voldoen aan de behoefte om het ontwerp mede te baseren op de veiligheidsnorm. Er moeten echter nog wel een aantal aanpassingen worden gepleegd;
- Een keuze voor Hydra-K is van belang voor eenduidigheid van de methode van ontwerpen, maar daarbij wordt aangetekend dat niet de fout gemaakt moet worden om Hydra-K te snel tot de standaard te verheffen en programma's als WindWater te snel op een zijspoor te zetten;
- Mogelijk het grootste winstpunt van probabilistisch ontwerpen kan blijken te zijn het inzicht dat wordt verkregen in de onzekerheden in faalmechanismen, ontwerprandvoorwaarden, etc.

5 Referenties

- ENW, 2004: Technische Richtlijnen Steenzettingen, Rapport TR25
- GD, 2007: Onzekerheden in de sterkte van dijken – Waddenzeedijken, GeoDelft, rapport 427070/12, Delft, juli 2007
- HKV, 2006: Vergelijking WindWater met Hydra-K
HKV rapport PR032.10, december 2006
- HKV/WL, 2005: testrapport HYDRA-K oktober 2005, HKV LIJN IN WATER en WL | Delft Hydraulics in opdracht van RIKZ, oktober 2005.
- RIKZ (2006): De Veiligheid van de primaire waterkeringen in Nederland, rapport RIKZ/2006.029, december 2006
- RWS (2004): De veiligheid van de primaire waterkeringen in Nederland, Voorschrift Toetsen op Veiligheid voor de tweede toetsronde 2001-2006
- RWS (2007): Leidraad Rivieren
- WL (2007): Validatie methode De Haan, WL | Delft Hydraulics, offerte, Delft, april 2007
- WL & TNO, 2003a: Haalbaarheidsstudie HYDRA-K; fase 1: Plan van aanpak. WL | Delft Hydraulics en TNO-Bouw in opdracht van RIKZ, oktober 2003.
- WL & TNO, 2003b: Haalbaarheidsstudie HYDRA-K; fase 2: Inbouwen van faalmechanismen en bekledingstypen in het demonstratiemodel. WL | Delft Hydraulics en TNO-Bouw in opdracht van RIKZ, november 2003.
- WL & TNO, 2004a: Haalbaarheidsstudie HYDRA-K; fase 3: Indicatieve bepaling van de nauwkeurigheid. WL | Delft Hydraulics en TNO-Bouw in opdracht van RIKZ, februari 2004.
- WL & TNO, 2004b: Haalbaarheidsstudie HYDRA-K; fase 4: Alternatieven (work arounds) voor het inbouwen van faalmechanismen. WL | Delft Hydraulics en TNO-Bouw in opdracht van RIKZ, maart 2004.
- WL & TNO, 2004c: Haalbaarheidsstudie HYDRA-K; fase 5: Inbouwen van een additionele stochast en additionele faalmechanismen in het demonstratiemodel, WL | Delft Hydraulics en TNO-Bouw in opdracht van RIKZ, maart 2004.

A Figuren ontwerpdikte steenbekleding

Deze bijlage bevat figuren van de ontwerpdiktes van steenbekleding die zijn berekend in het kader van het project “productiesommen HR2006”. Elke figuur vertegenwoordigt een combinatie van:

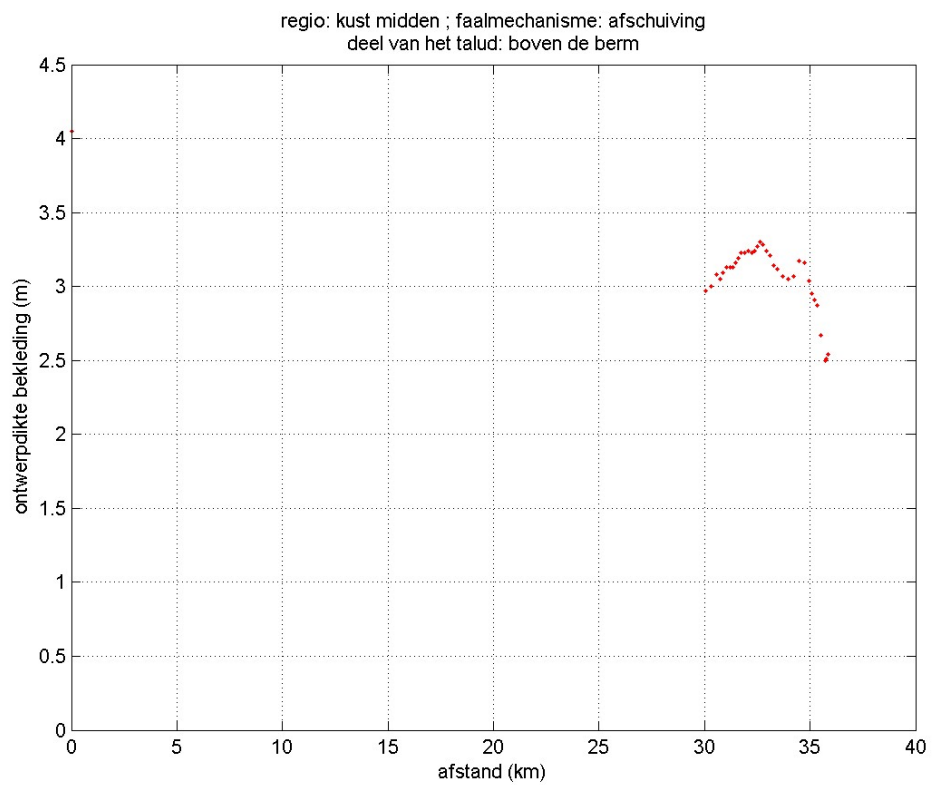
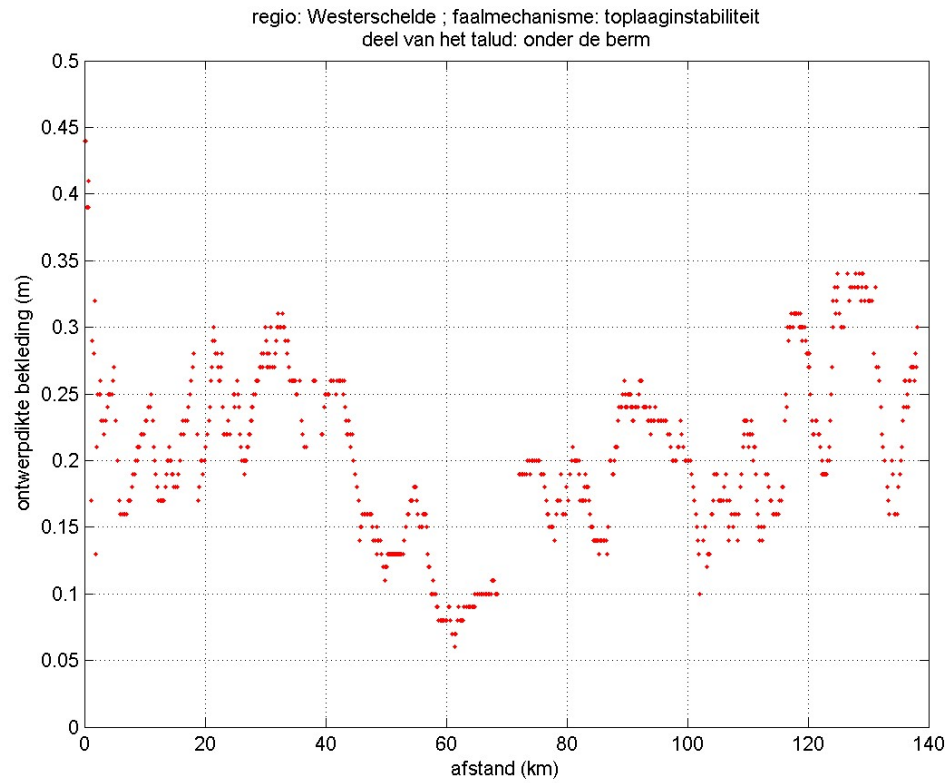
- 1 de regio: kust noord, kust midden, kust zuid, Westerschelde, Oosterschelde of de verbindende waterkeringen;
- 2 het faalmechanisme voor steenbekleding: afschuiving of toplaaginstabiliteit; en
- 3 het taluddeel: onder de berm, de berm of boven de berm.

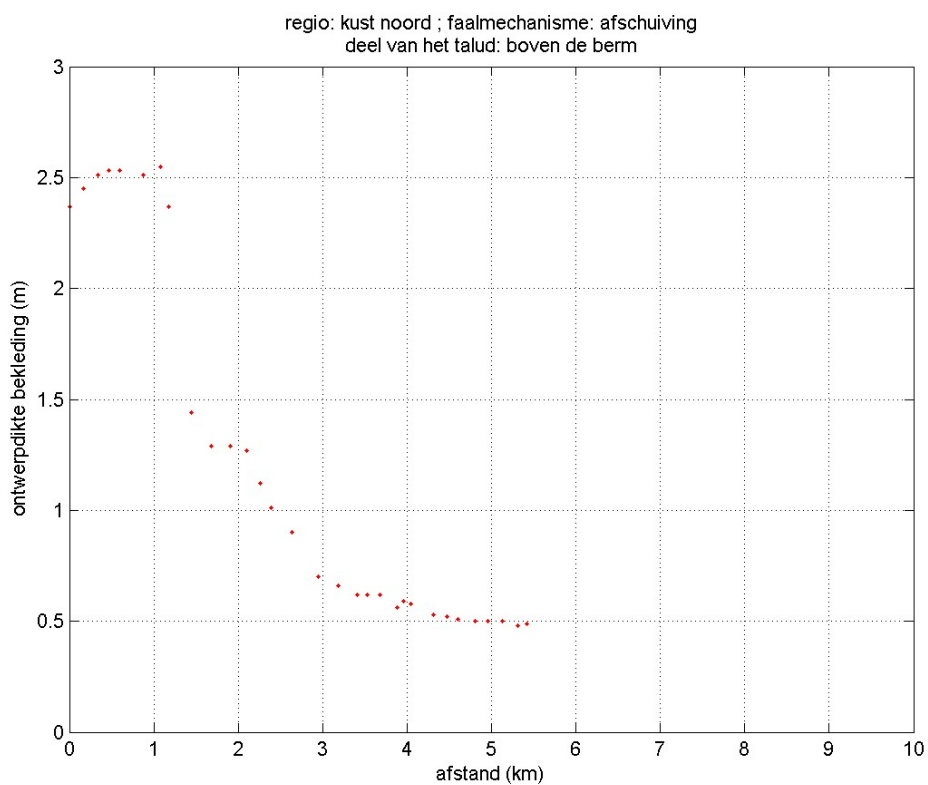
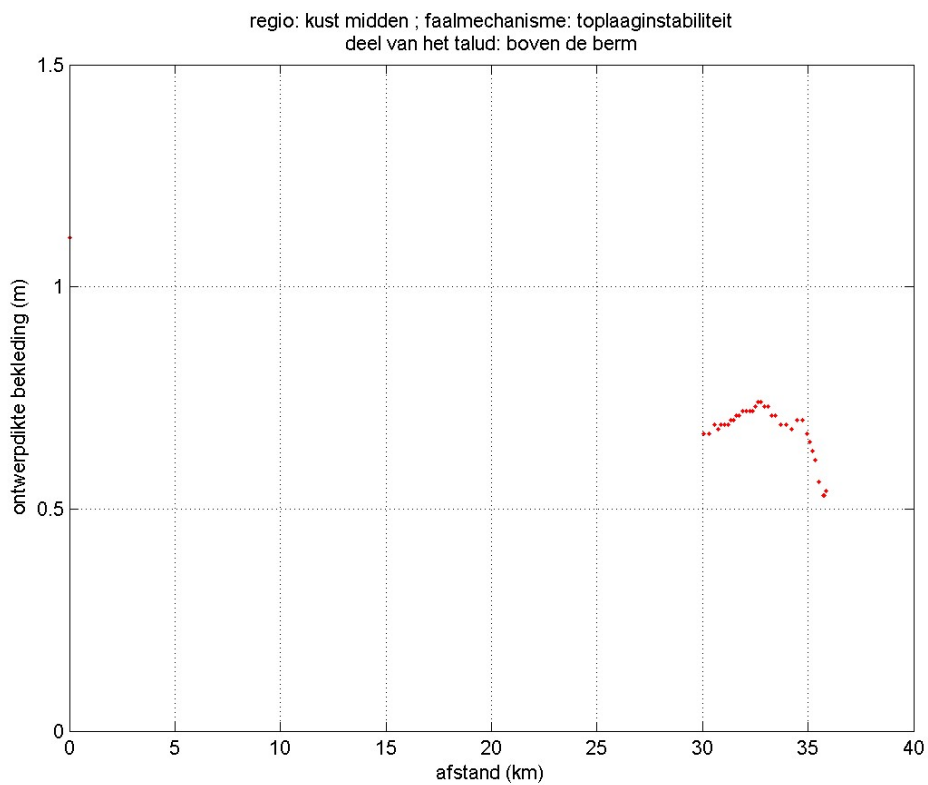
Niet alle mogelijke combinaties zijn overigens doorgerekend. Bijvoorbeeld in de regio's kust noord, midden en zuid wordt steenbekleding alleen geacht boven de berm voor te komen en zijn daarom zijn geen steendiktes bepaald voor de berm en onder de berm.

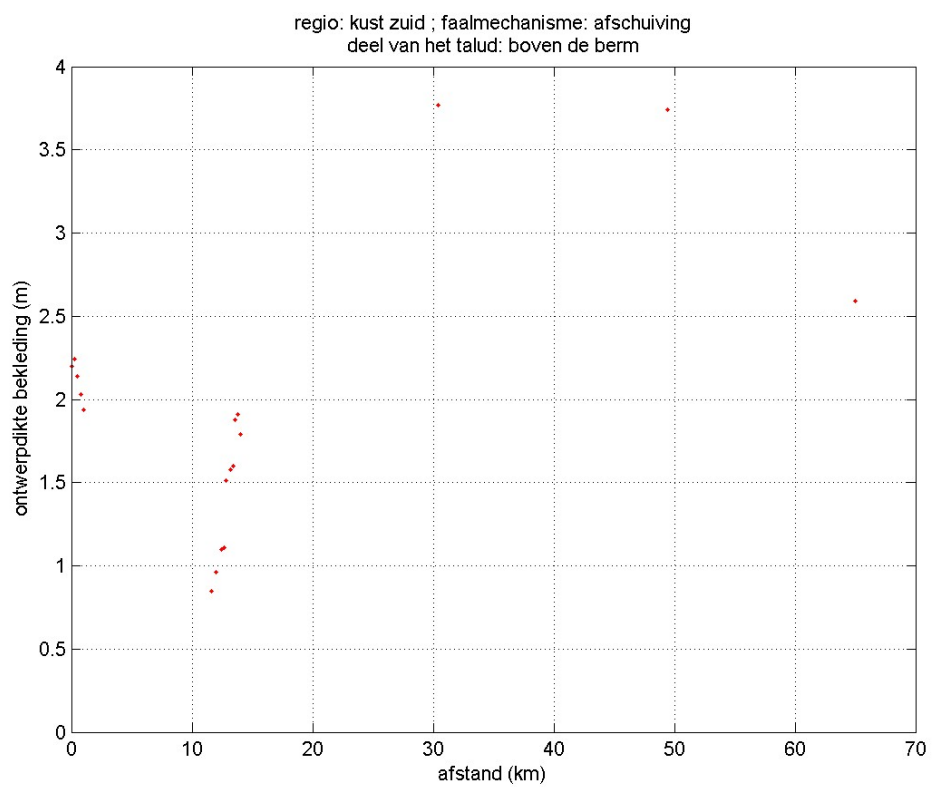
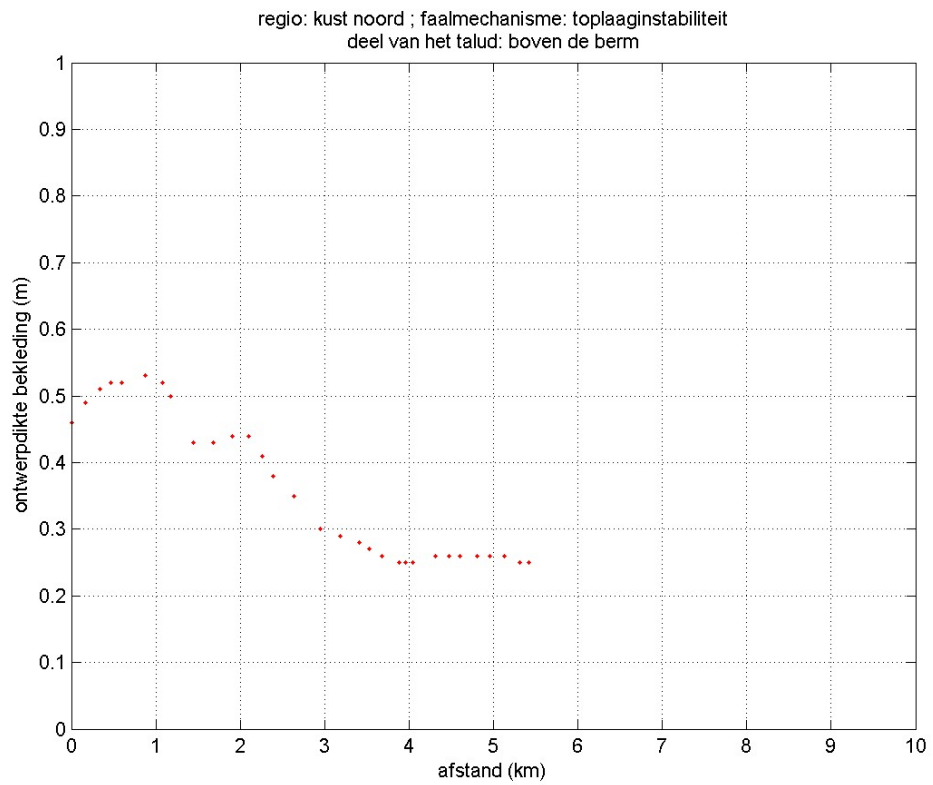
De horizontale as geeft de afstand aan die afgelegd moet worden als je van locatie 1 via locatie 2, locatie 3, ... tot locatie x loopt. De volgorde van de locaties is als volgt:

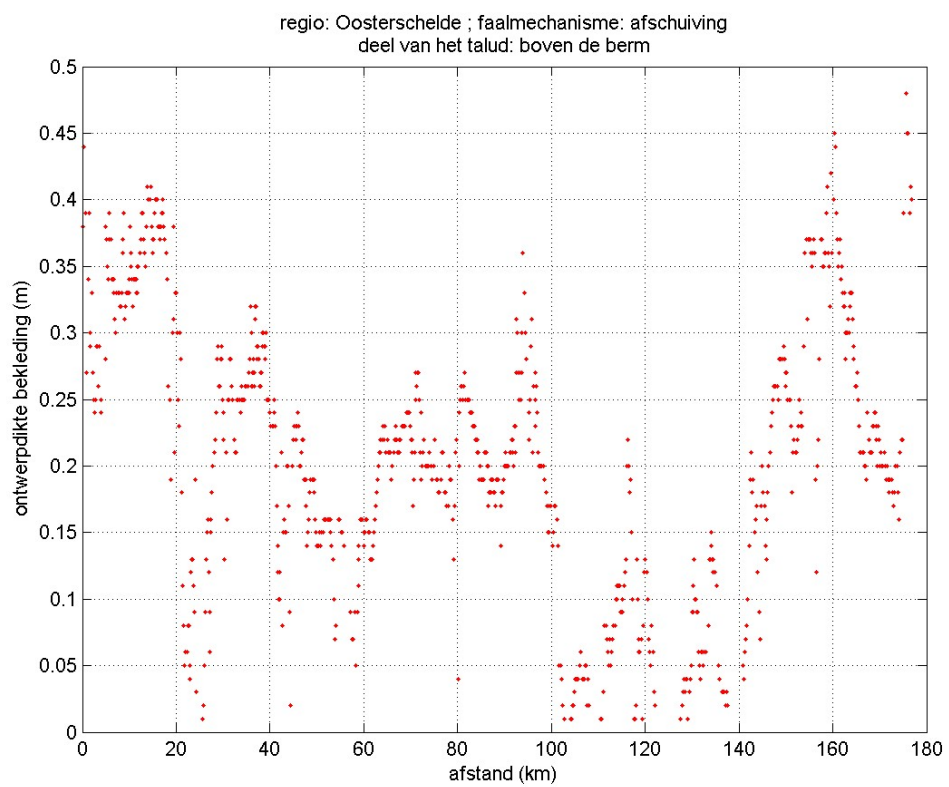
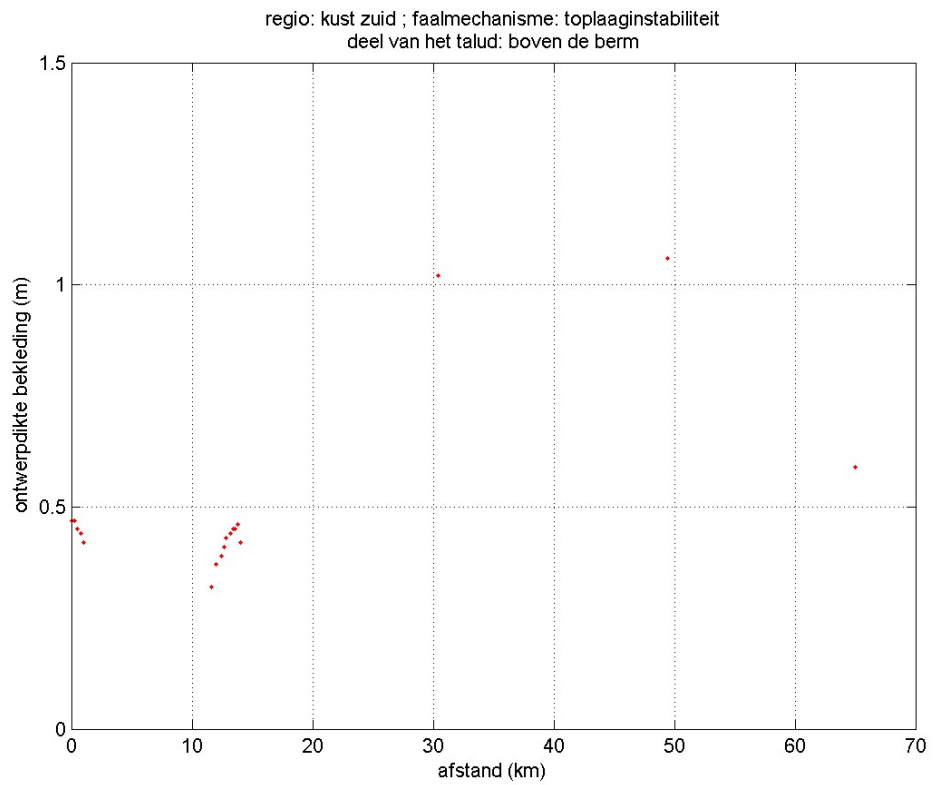
- Westerschelde en Oosterschelde: rondje tegen de klok in;
- kust noord, midden en zuid: van zuid naar noord;
- verbindende waterkeringen: van noord naar zuid;

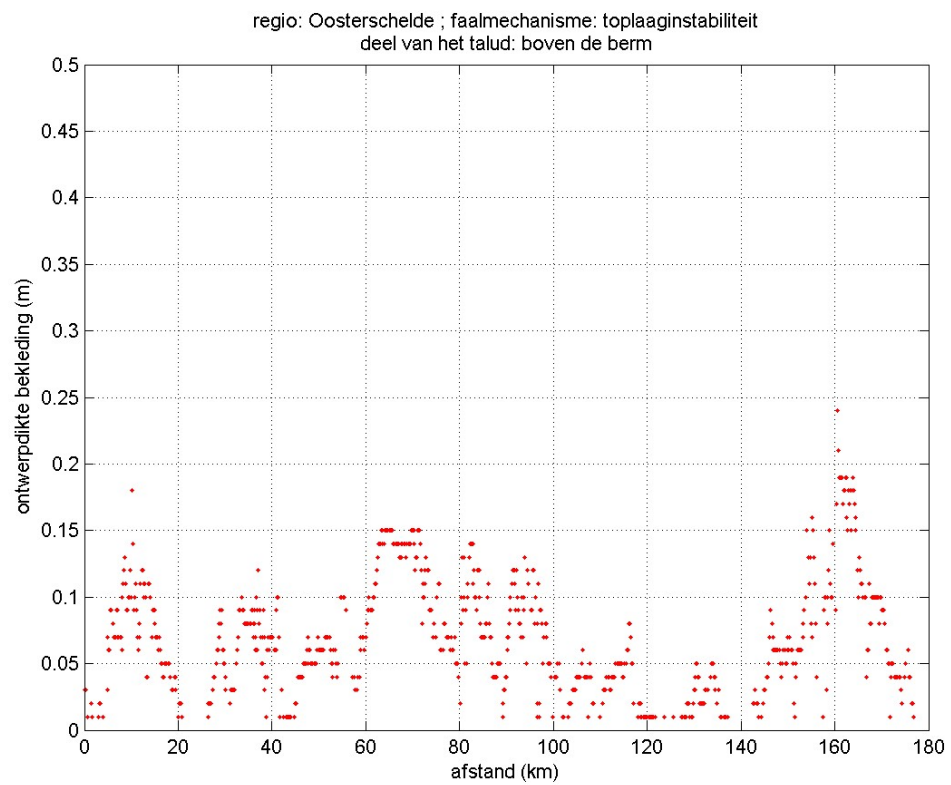
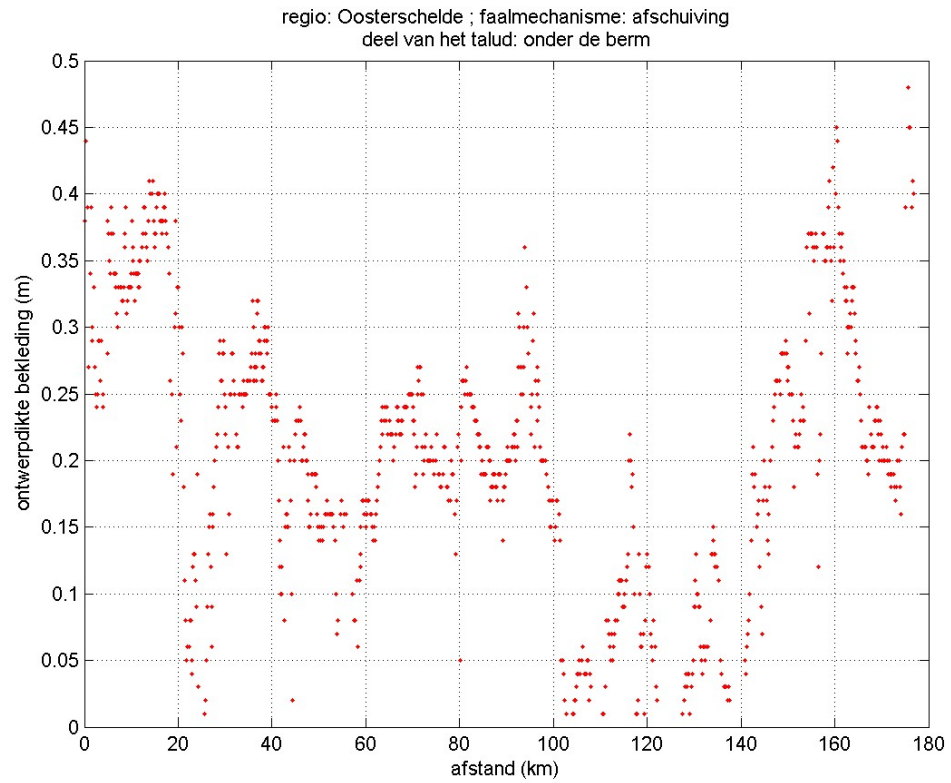
De hier getoonde resultaten zijn verkregen met versie 3.5 van Hydra-K.

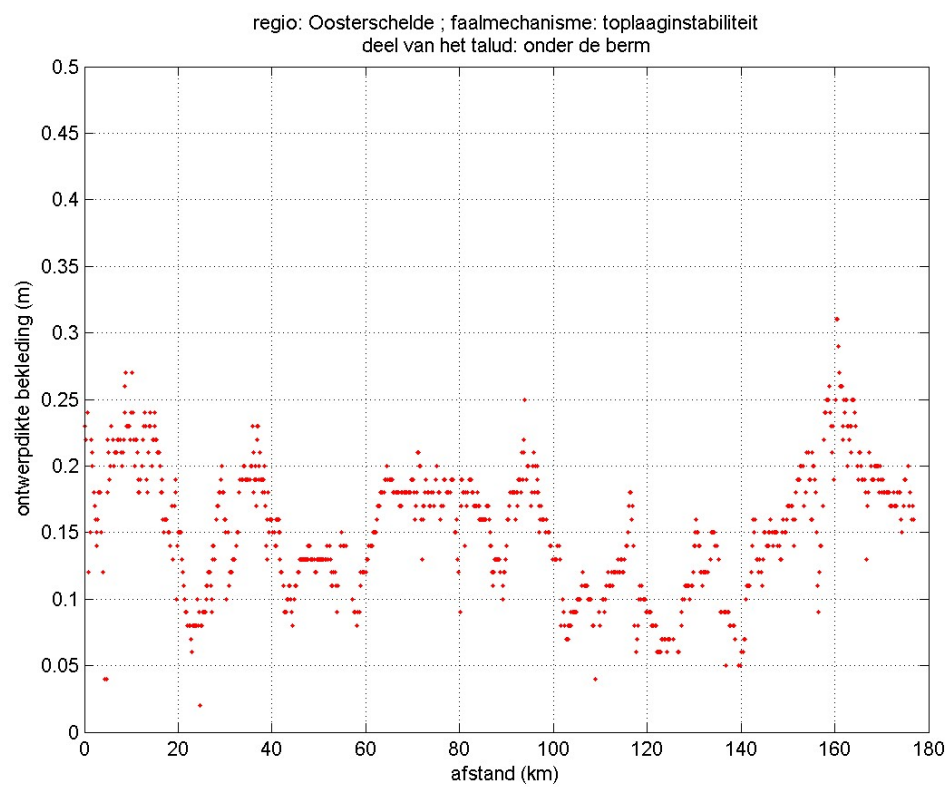
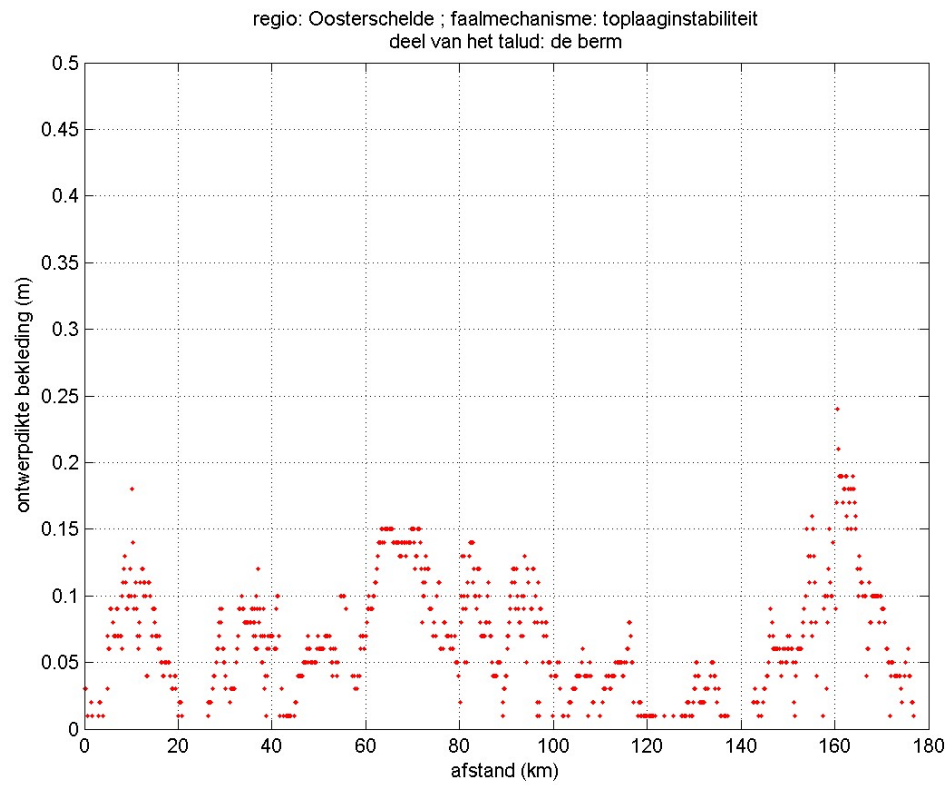


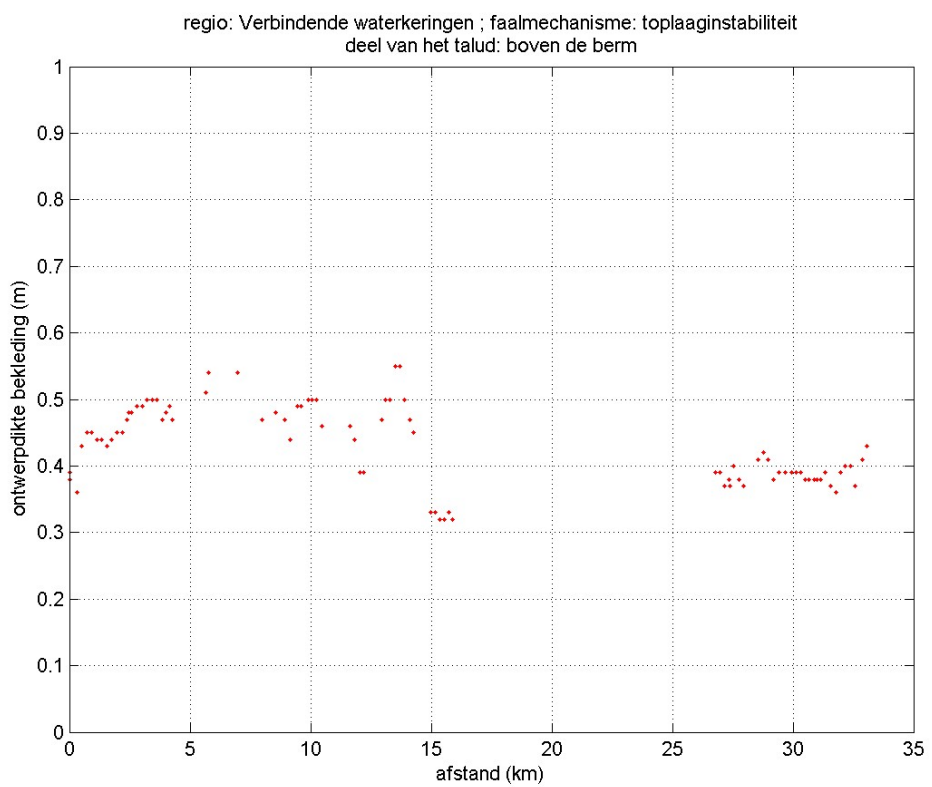
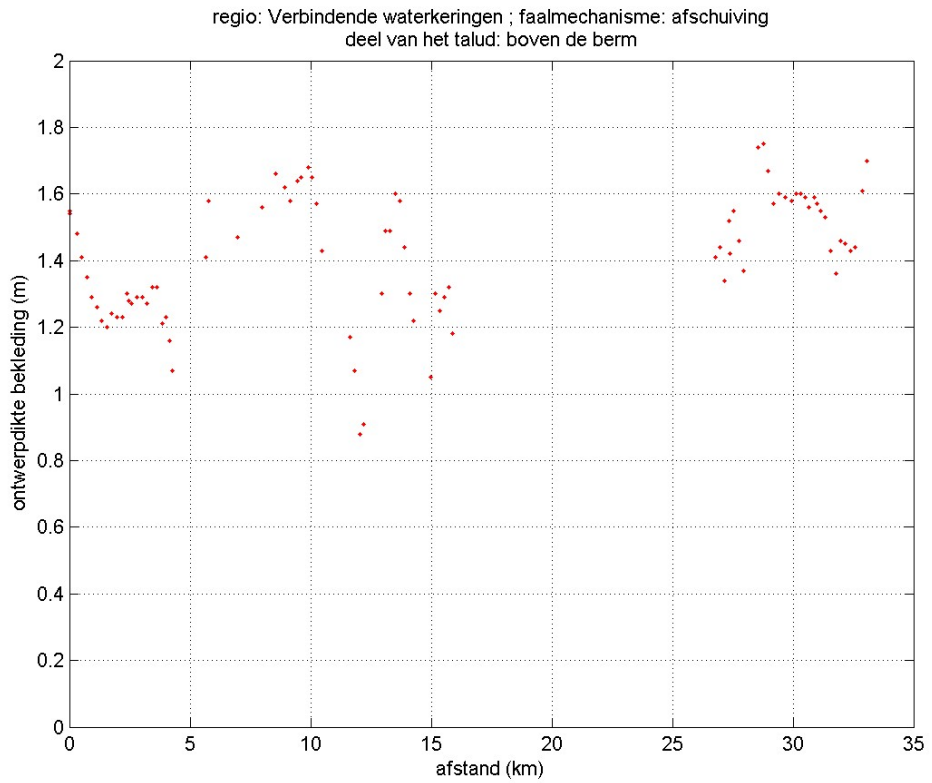


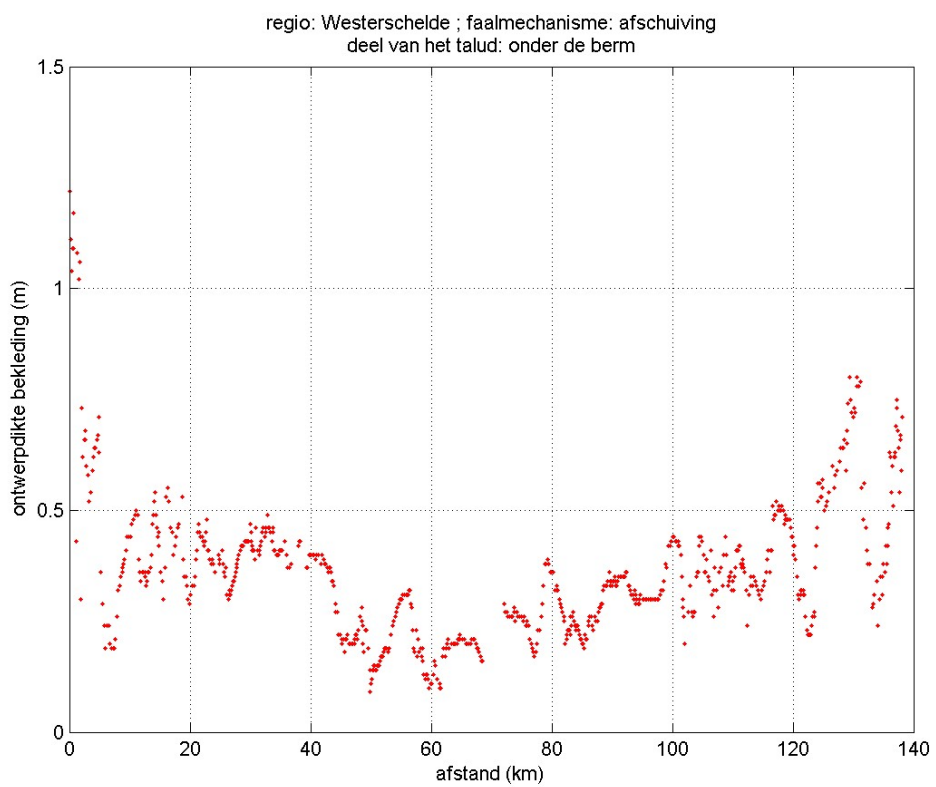
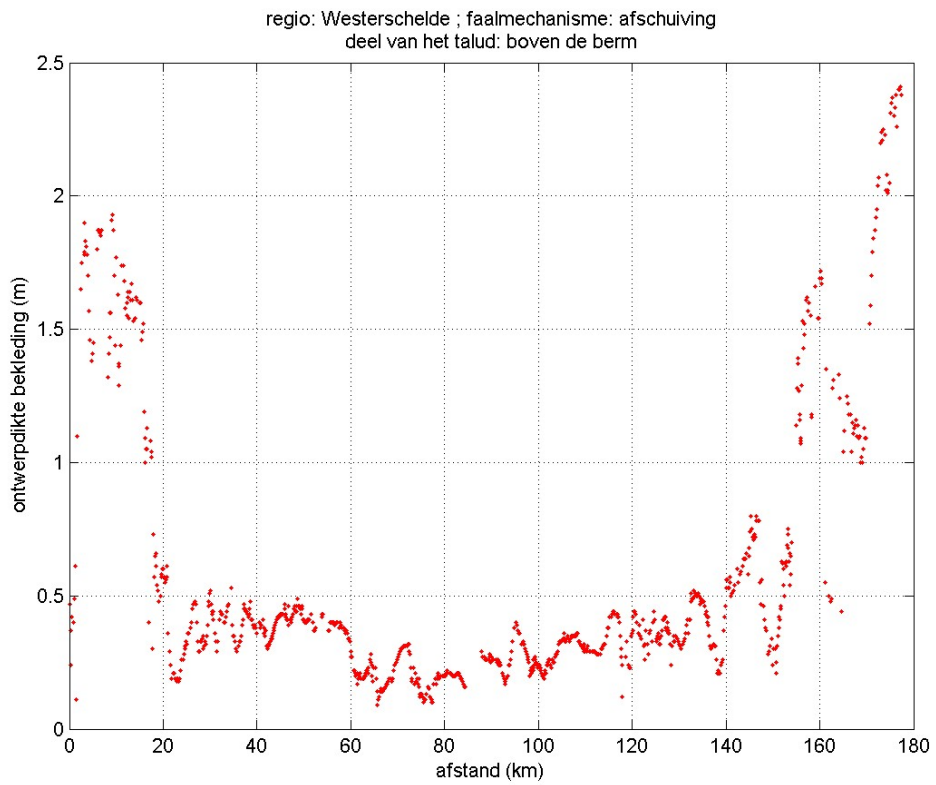


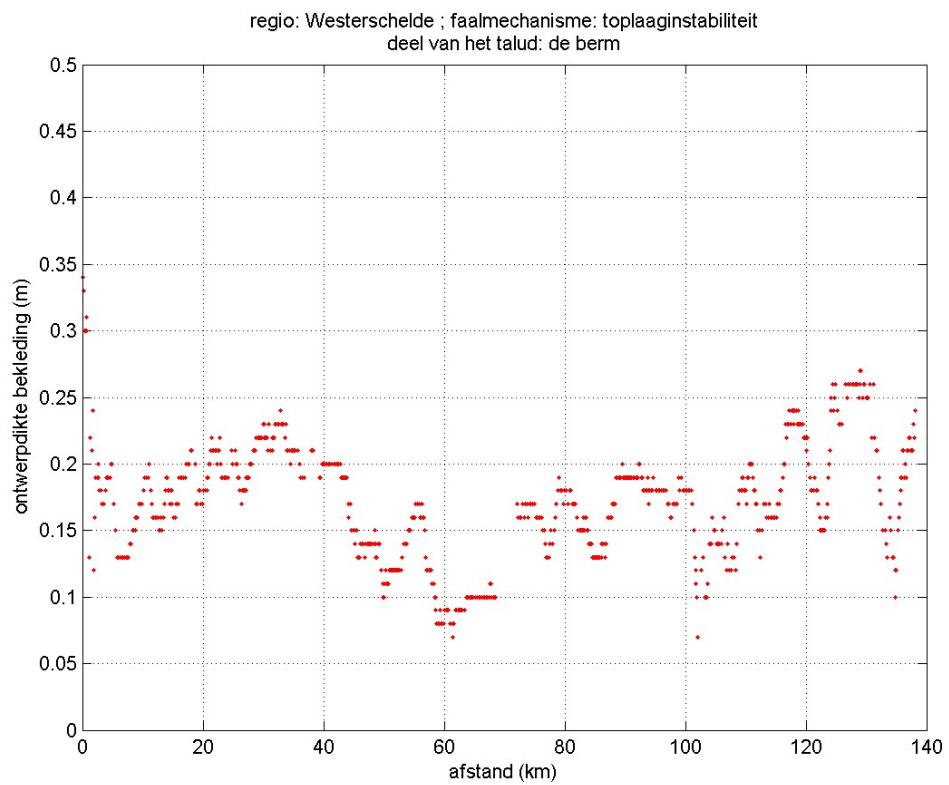
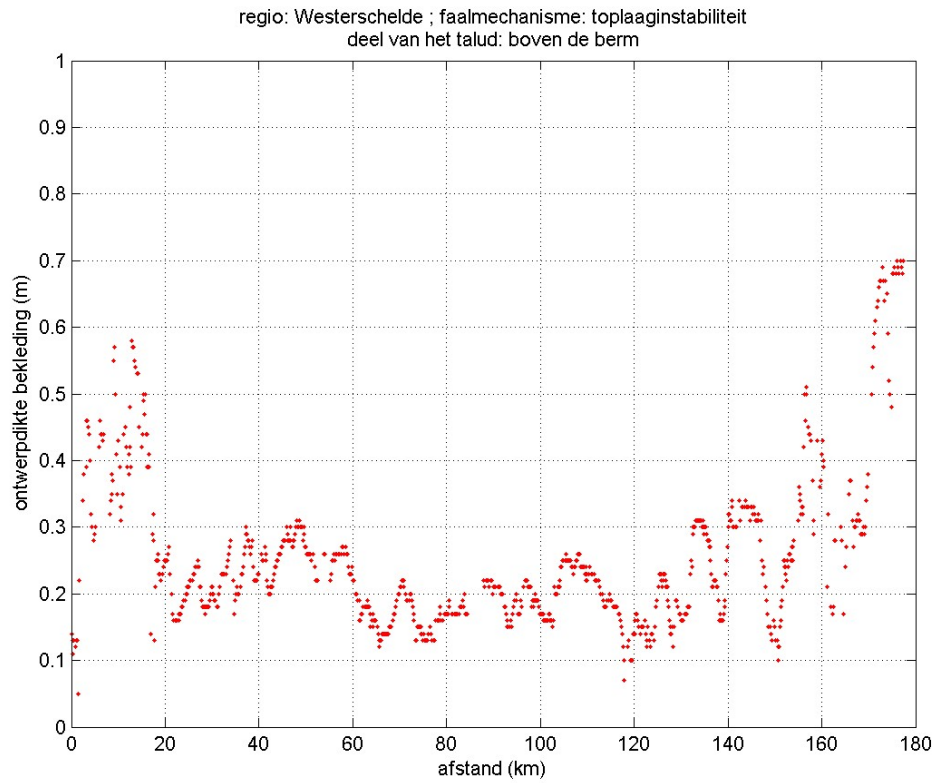












B Overzicht foutmeldingen productiesommen HR2006

Deze bijlage bevat overzichtkaarten van de Hollandse kust en Zeeuwse estuaria met daarop aangegeven de foutmeldingen die voor de diverse locaties in Hydra-K zijn waargenomen. Elke foutmelding is aangegeven met een afzonderlijke kleur:

- donkerblauw: geen foutmelding
- rood: “geen of onvoldoende waarnemingen”
- lichtblauw: “illustratiepunt niet berekend”
- groen: “sommige waarden buiten de ondergrens of bovengrens”

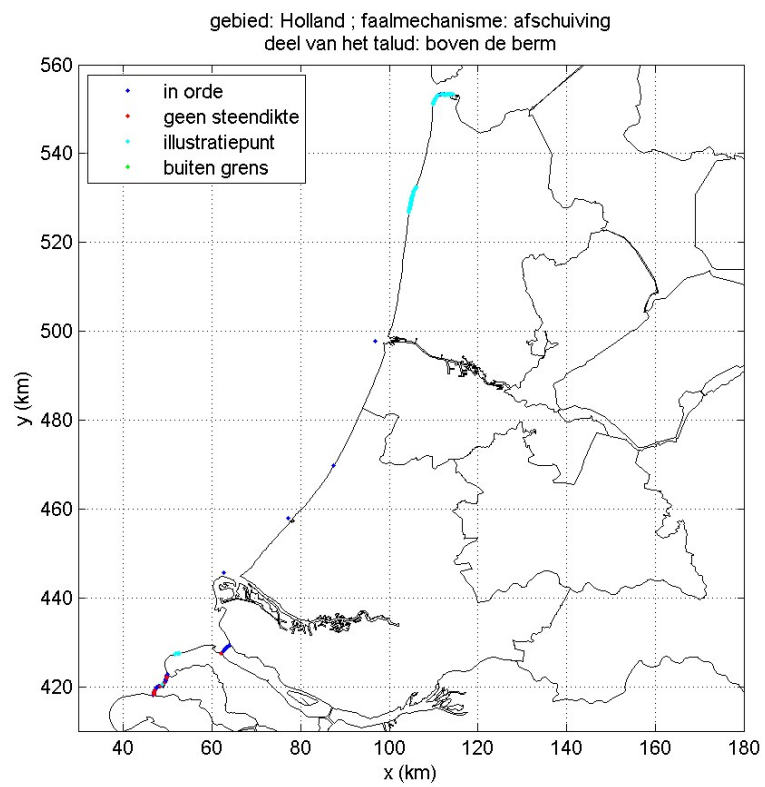
In de legenda's van de figuren zijn deze foutmeldingen ingekort tot:

- “in orde”;
- “geen steendikte”;
- “illustratiepunt”;
- “buiten grens”.

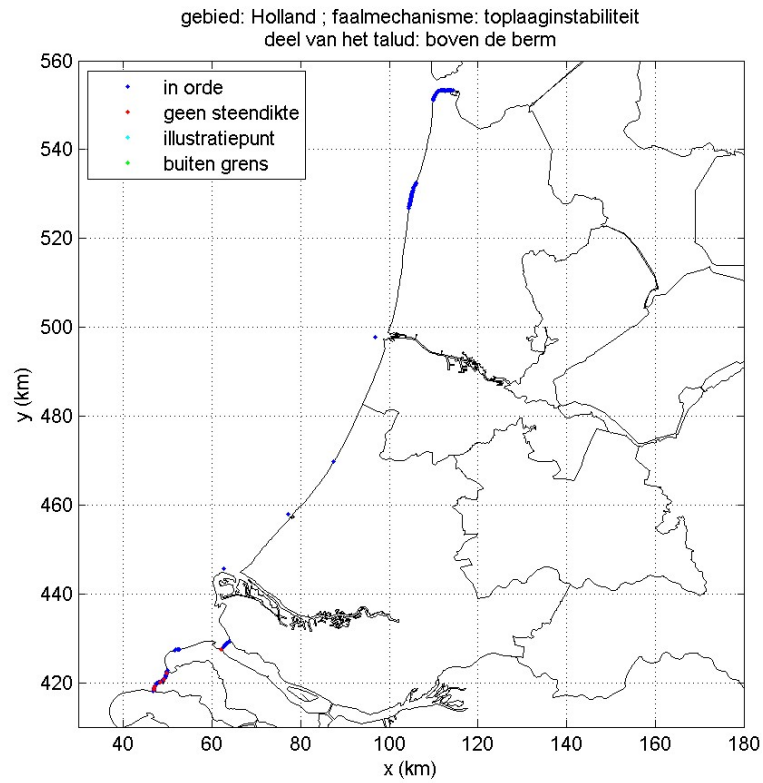
Deze figuren zijn afgeleid op basis van de rekenexercitie met Hydra-K die is uitgevoerd in het kader van het project “productiesommen Hydra-K”, met versies 3.2g en 3.2h. Voor beide exercities zijn in totaal 8 figuren opgenomen (zie onderstaande tabel):

nr.	gebied	taluddeel	faalmechanisme
1	Hollandse kust	boven de berm	afschuiving
2	Hollandse kust	boven de berm	toplaaginstabiliteit
3	Zeeland	boven de berm	afschuiving
4	Zeeland	de berm	afschuiving
5	Zeeland	onder de berm	afschuiving
6	Zeeland	boven de berm	toplaaginstabiliteit
7	Zeeland	de berm	toplaaginstabiliteit
8	Zeeland	onder de berm	toplaaginstabiliteit

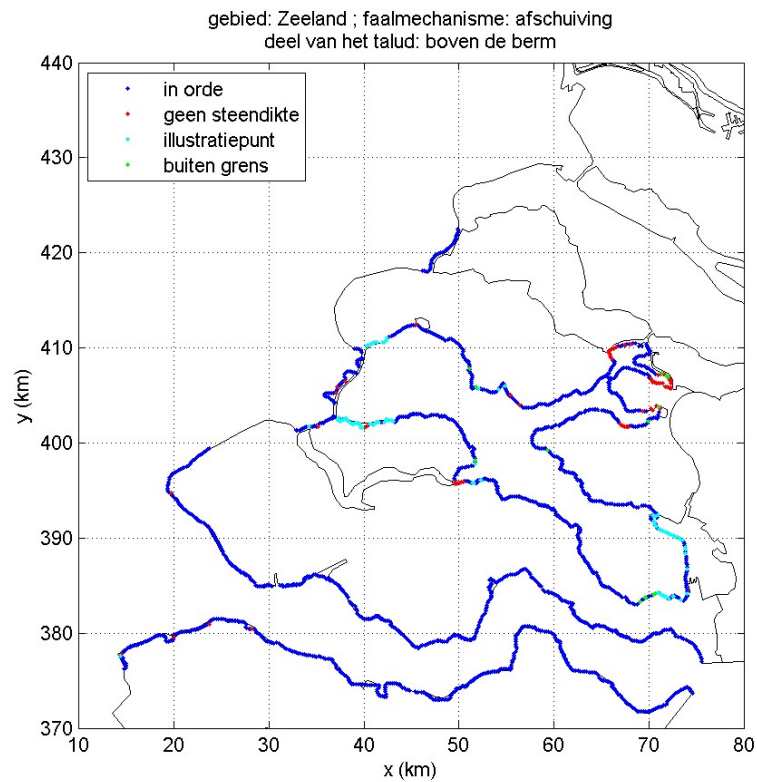
De nummering in de eerste kolom van bovenstaande tabel correspondeert met de nummering onder de figuren (B1 – B8)



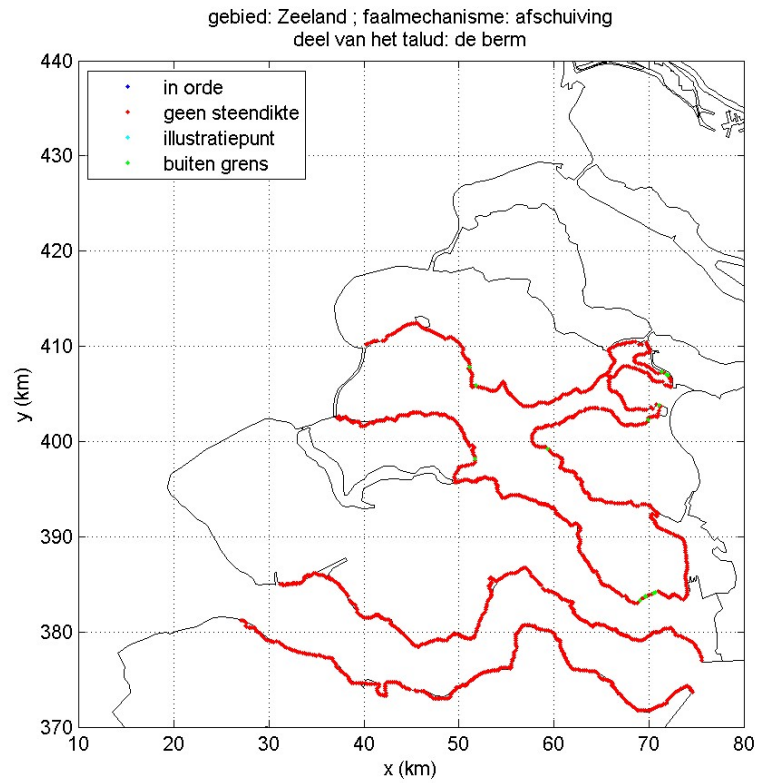
Figuur B1



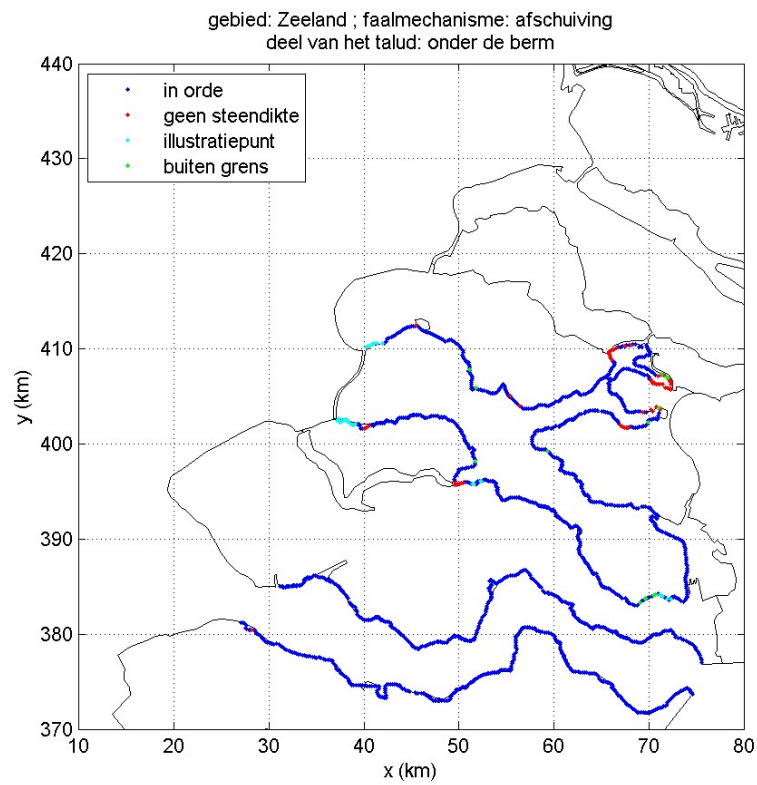
Figuur B2



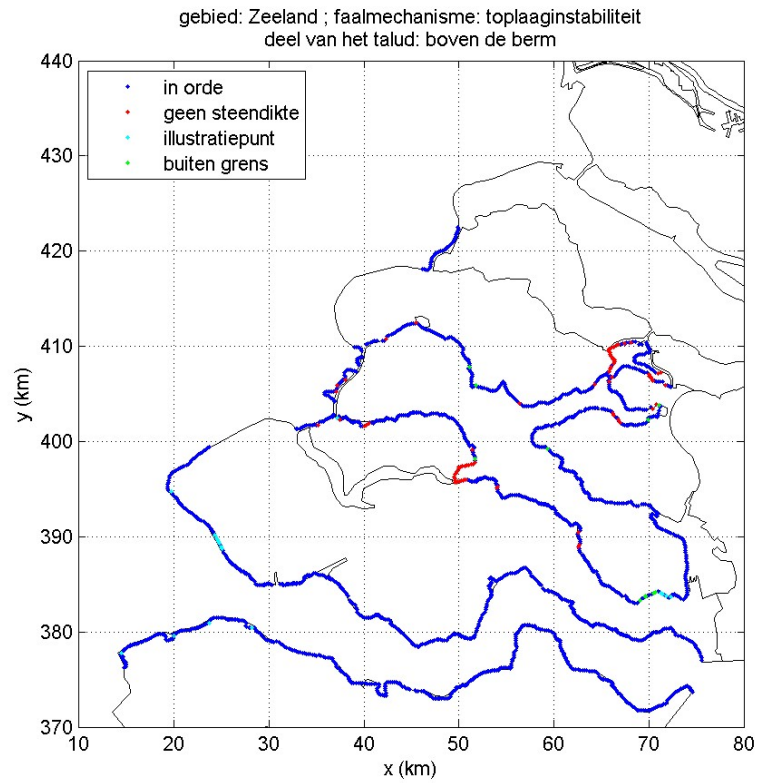
Figuur B3



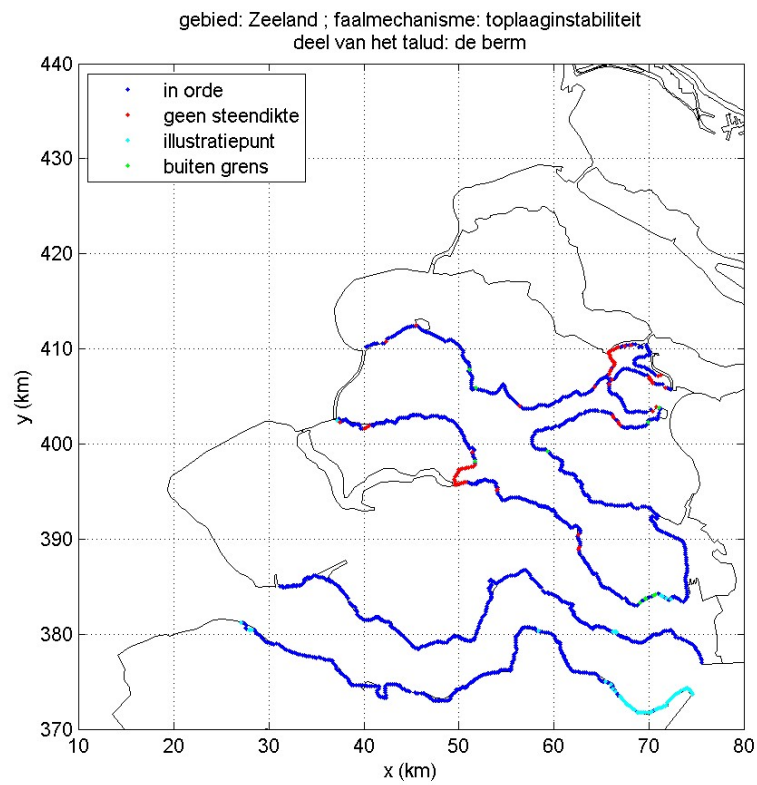
Figuur B4



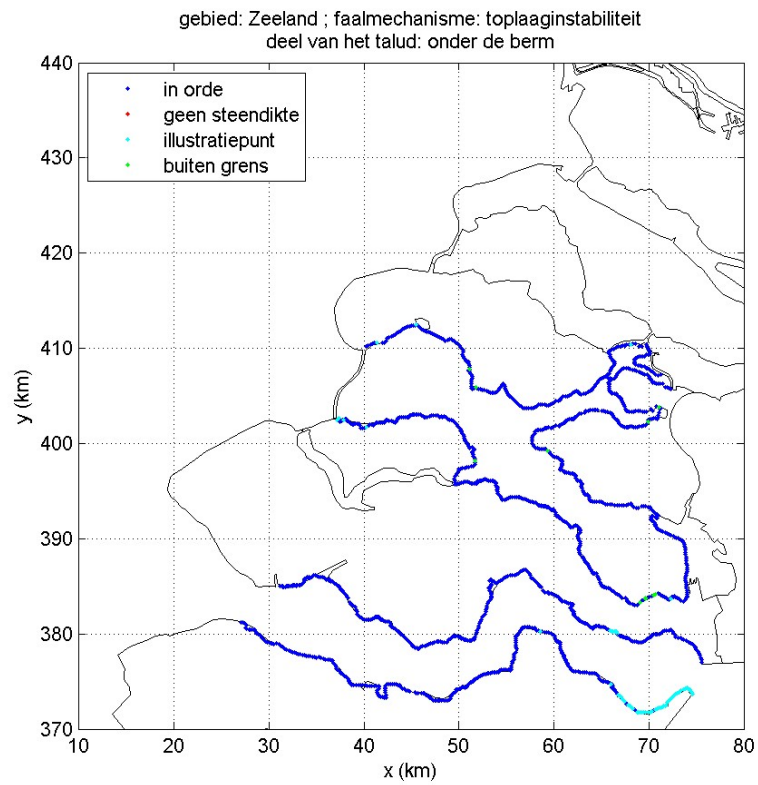
Figuur B5



Figuur B6



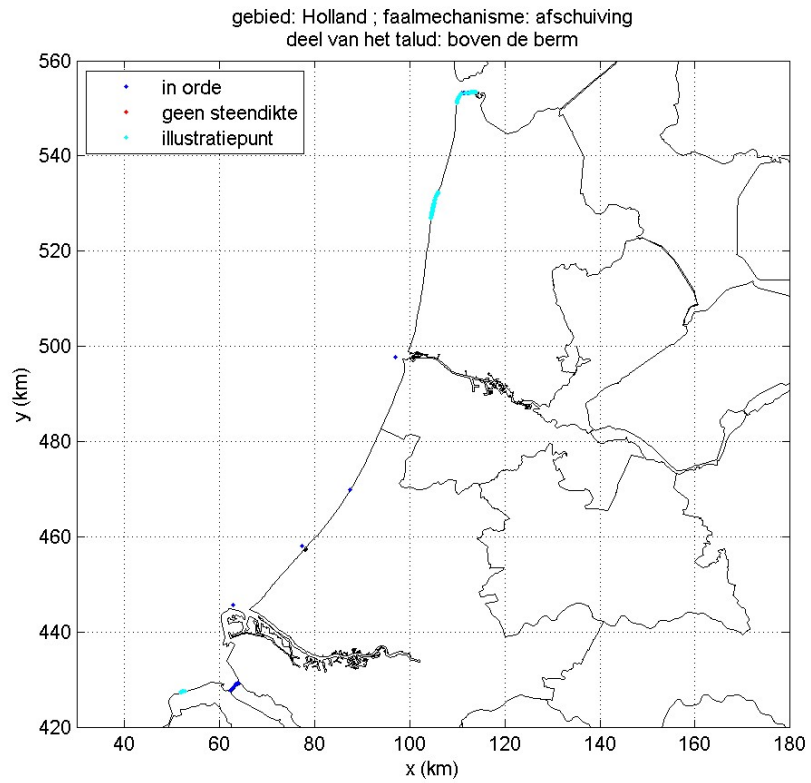
Figuur B7



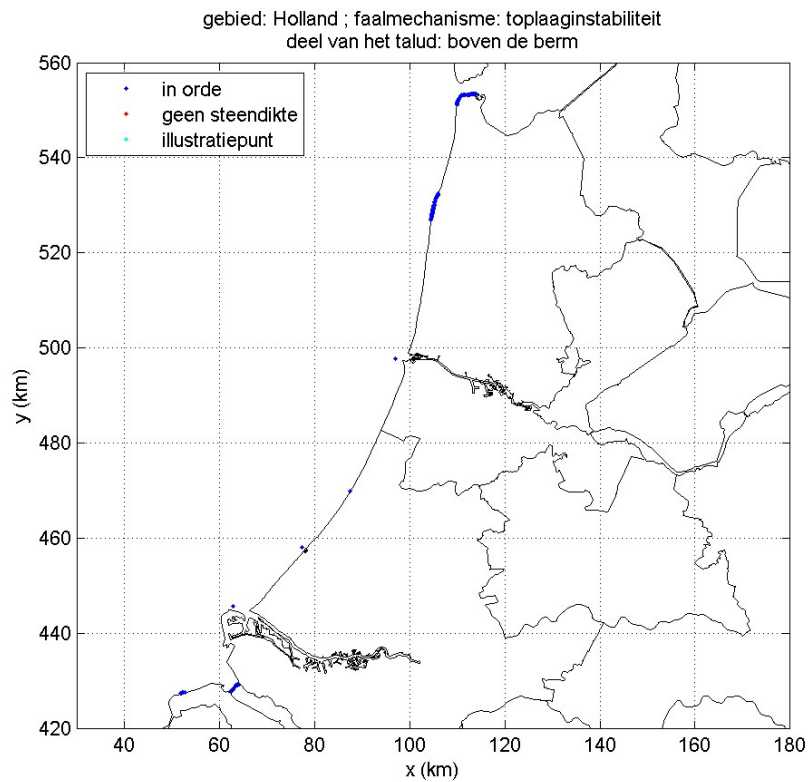
Figuur B8

C Overzicht foutmeldingen Hydra-K versie 3.5

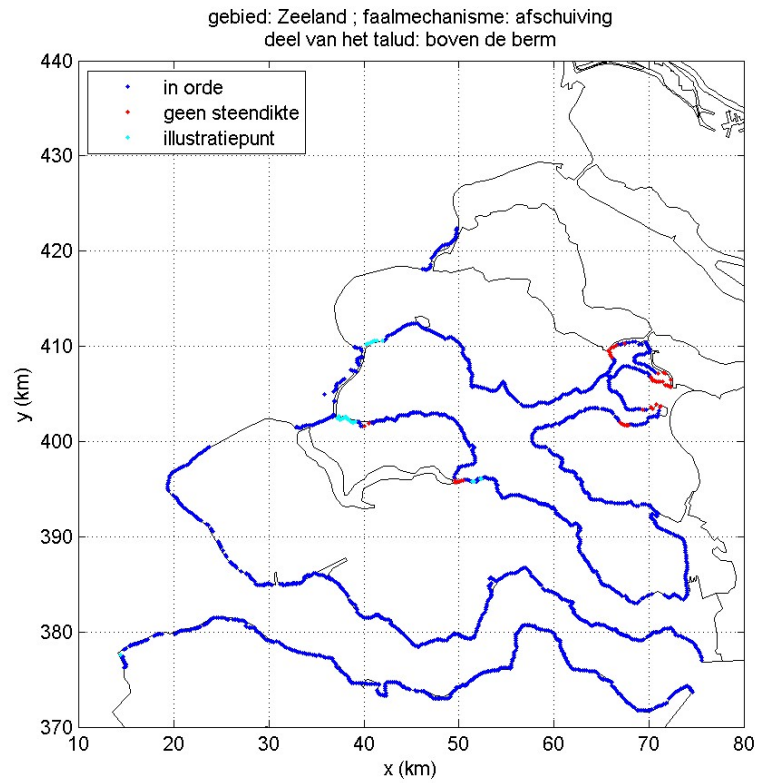
Deze bijlage geeft eenzelfde overzicht als bijlage B, maar dan voor de foutmeldingen van de meest recente versie van Hydra-K: versie 3.5.



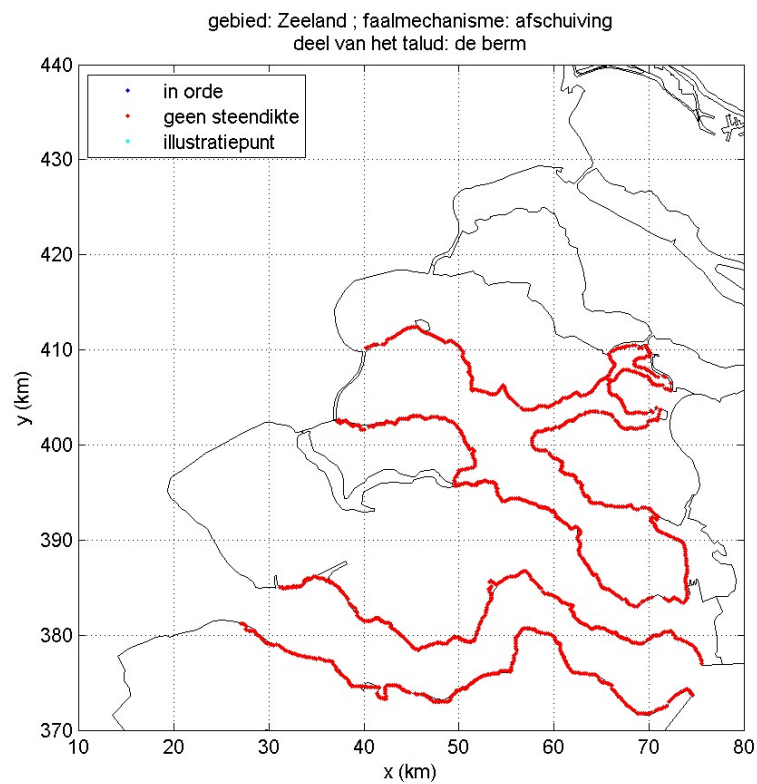
Figuur C1



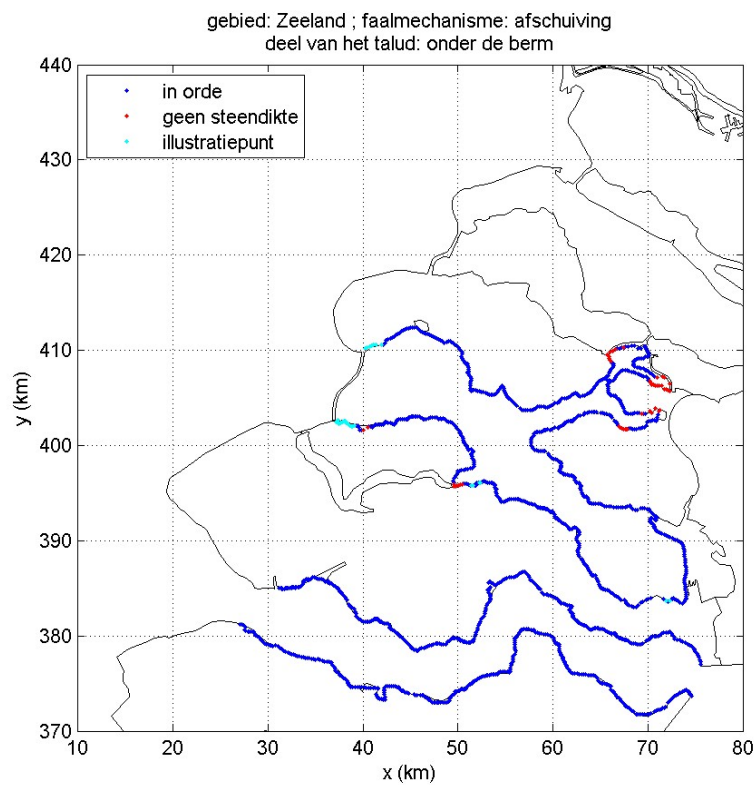
Figuur C2



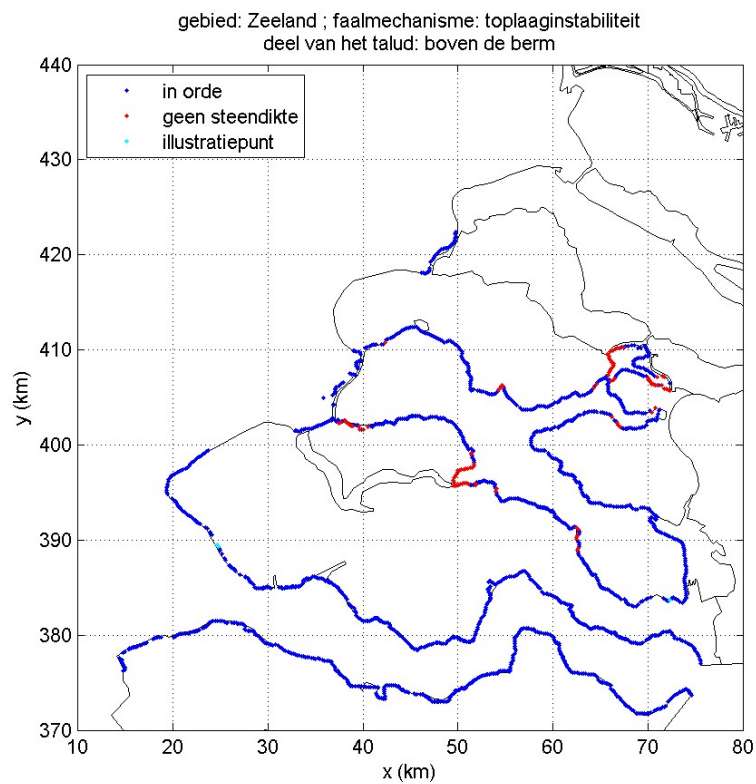
Figuur C3



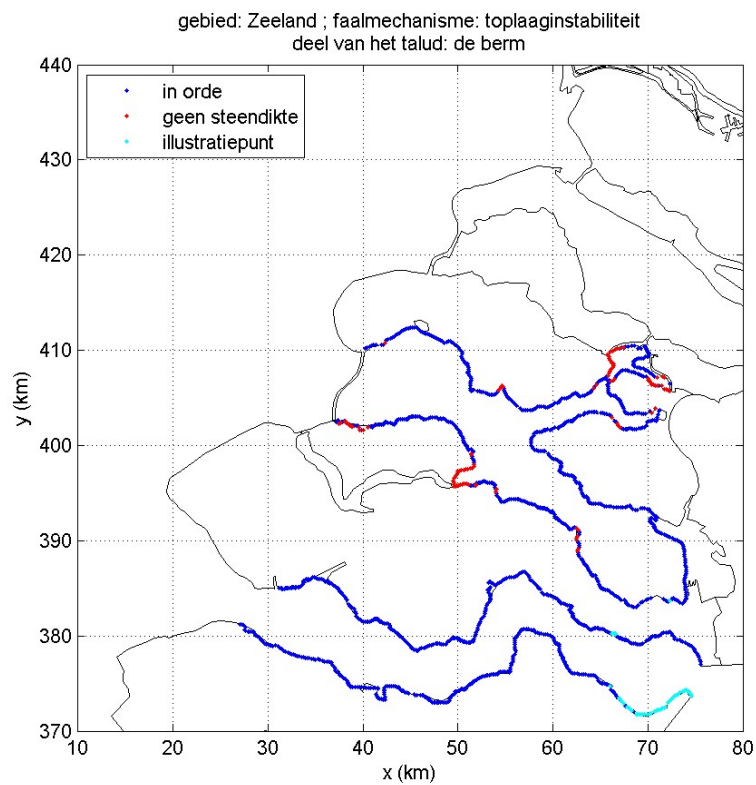
Figuur C4



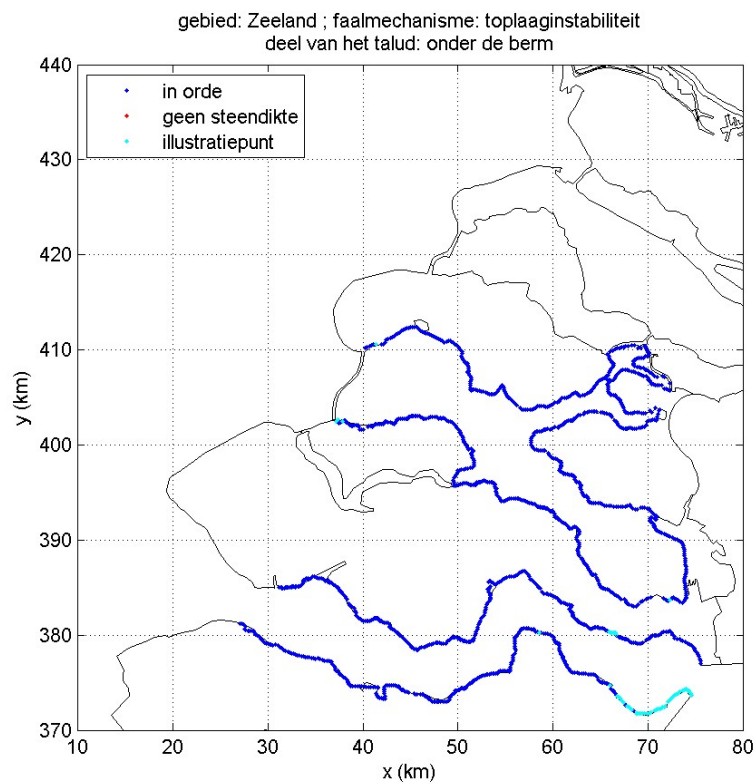
Figuur C5



Figuur C6



Figuur C7



Figuur C8