

Opdrachtgever:

Deltares

Indicatoren voor kustlijn­zorg

Analyse van indicatoren voor veiligheid en recreatie





HKV LIJN IN WATER

Postbus 2120

8203 AC Lelystad

Nederland

Telefoon: 0320 294242

Fax: 0320 253901

E-mail: info@hkv.nl

Internet: <http://www.hkv.nl>

Bezoekadressen:

Botter 11-29, Lelystad

Elektronicaweg 12, Delft

Opdrachtgever:

Deltares

Indicatoren voor kustlijnzorg

Analyse van indicatoren voor veiligheid en recreatie

Auteurs: Wim van Balen
Vincent Vuik
Saskia van Vuren

Inhoudsopgave

1 Inleiding	1
1.1 Achtergronden	1
1.2 Kustdatabase	2
1.3 Doelstelling	3
1.4 Werkwijze	3
1.4.1 Kustfunctie veiligheid	3
1.4.2 Kustfunctie recreatie	4
1.4.3 Scope	4
1.5 Leeswijzer	5
2 Het gebruik van online data	7
2.1 Inleiding	7
2.2 Jarkusprofielen	7
2.2.1 Beschikbare gegevens	7
2.2.2 Het aanvullen van ontbrekende data	7
2.2.3 Het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN)	8
2.2.4 Het verwijderen van dubbele duinenrijen	8
2.2.5 Illustratie	9
2.2.6 Variaties in de tijd	10
2.3 Overige gegevens	10
2.3.1 Suppleties	10
2.3.2 Hydraulica	10
3 Definitie van de indicatoren	13
3.1 Inleiding	13
3.2 Faalkans als indicator voor veiligheid	13
3.2.1 Modelkeuze	13
3.2.2 Sterktemodel	13
3.2.3 Belastingmodel	14
3.2.4 Probabilistische benadering	14
3.2.5 Probabilistische rekenmethodes	15
3.2.6 Geldigheid van het duinafslagmodel	16
3.2.7 Zeedijken	17
3.3 Strandbreedte als indicator voor recreatie	17
3.3.1 Definitie	17
3.3.2 Werkwijze	17
3.3.3 Alternatieve methodes	20
4 Analyse van de faalkans	23
4.1 Inleiding	23
4.2 Deelgebieden	23
4.2.1 Duinen	23
4.2.2 Dijken	24
4.2.3 Convergentie	24
4.2.4 Selectie relevante raaien	24
4.3 Smalle duinenrijen	24
4.3.1 Afslagprofielen	25

4.3.2	Invloed van suppleties	27
4.3.3	Autonome ontwikkeling	28
4.4	Brede duinenrijen	29
4.4.1	Afslagprofielen	30
4.4.2	Invloed van suppleties	31
4.5	Relatie tussen suppleties en faalkans	33
4.6	Het kustvak Noord-Holland door de jaren heen	34
4.7	De Hondsbossche Zeewering	35
4.8	Conclusies	36
5	Analyse van de strandbreedte	39
5.1	Inleiding	39
5.2	Illustratie van de methode	39
5.3	Relatie met suppleties	41
5.4	Conclusies	42
6	Synthese	43
6.1	Methodiek	43
6.2	Conclusies	43
6.3	Aanbevelingen	44
Bijlage A	Analyseren met de AfslagViewer	47
A.1	Inleiding	47
A.1.1	Uitgevoerde berekeningen	47
A.1.2	De invoer	47
A.1.3	De uitvoer	47
A.1.4	De Matlab-applicatie	47
A.2	De user interface	48
A.2.1	De online database OpenEarth	48
A.2.2	Opstarten	48
A.2.3	Het lezen van gegevens	49
A.3	Een voorbeeld	49
A.3.1	Het afslagprofiel	49
A.3.2	De faalkans in de tijd	50
A.3.3	De faalkans langs de kustlijn	51
A.3.4	Convergentie per Jarkusraai	52
A.4	Meldingen op het scherm	52
A.5	Bugs en onvolkomenheden	53
Bijlage B	Convergentie van afslagberekeningen	55
Bijlage C	Stochasten voor duinafslag	57
C.1	Sterktestochasten	57
C.2	Belastingstochasten	57
Bibliografie	59

1 Inleiding

1.1 Achtergronden

De totale Nederlandse kust heeft een lengte van 432 km. Een groot deel hiervan bestaat uit duingebieden, die variëren in breedte van minder dan honderd meter tot enkele kilometers. De duinen zorgen samen met het strand en de kustlijn voor een natuurlijke, zandige kustverdediging. De duinenkust heeft een flexibel karakter en is onder invloed van natuurlijke krachten voortdurend in beweging. Zo kan de kust zich terugtrekken en voortschrijden.

Om de diverse functies in de kustzone duurzaam te handhaven is in 1990 wettelijk besloten de kustlijn *dynamisch* te handhaven. Het huidige kustbeheer is dynamisch van aard en is gericht op ruimte voor natuurlijke processen en het bestrijden van doorgaande structurele erosie. Indien de momentane kustlijn de basiskustlijn (een vaste aangewezen referentielijn) overschrijdt, dan moeten corrigerende maatregelen worden genomen. Door het uitvoeren van zandsuppleties wordt *dynamisch handhaven* in praktijk gebracht.

De Deltacommissie heeft de klimaatbestendigheid van Nederland in de toekomst geagendeerd. De commissie adviseert voor de Noordzeekust 'Bouwen met de natuur': bescherming en aangroei (met maatschappelijke meerwaarde) van de kust door middel van zandsuppleties. Het kan dan volgens de Deltacommissie in de toekomst om flinke suppletievolumes gaan, waardoor de omvang van zandvolumes aanzienlijk toeneemt ten opzichte van het huidige volume dat jaarlijks op de kust wordt gesuppleerd. De Deltacommissie stelt de vraag hoe deze grote volumes ecologisch, economisch en energetisch zo efficiënt mogelijk kunnen worden gesuppleerd.

Eind 2010 heeft HKV [LIJN IN WATER](#) een studie uitgevoerd naar de invloed van kustonderhoud op hoogwaterbescherming ([HKV \[LIJN IN WATER\]\(#\) \(2010\)](#)). In deze studie heeft HKV [LIJN IN WATER](#) een concept uitgewerkt waarmee het effect van kustonderhoud op het hoogwaterbeschermingsniveau langs de kust gekwantificeerd kan worden. Dit concept is door [HKV \[LIJN IN WATER\]\(#\) \(2010\)](#) geïllustreerd aan de hand van het kustvak Ter Heijde bij Monster (zie figuur 1-1). De toepassing van het concept heeft de invloed laten zien van zandige maatregelen, die in het verleden zijn uitgevoerd, op de faalkans van het kustprofiel bij Ter Heijde.



Figuur 1-1 Duinen bij Ter Heijde (Zuid-Holland). Bron: www.infopuntveiligheid.nl.

Ook Arcadis heeft gekeken naar de relatie tussen kustlijnzorg en kustveiligheid. Arcadis (2011) heeft een studie uitgevoerd op basis van profielanalyses en duinafslagberekeningen en heeft zich daarbij gebaseerd op ingemeten Jarkusprofielen voor de Hollandse kust (kustvakken 7, 8 en 9). Het onderzoek geeft aan hoe de kans op duinafslag van de kustlijnligging in het jaar 2009 is veranderd ten opzichte van het jaar 1990.

Belangrijke vraag in het onderzoek van Arcadis (2011) was of het effect van zandsuppleties in de ontwikkeling van de kans is terug te zien. Arcadis (2011) heeft aandacht besteed aan de ontwikkeling van zandvolumes in diverse profielonderdelen van het kustfundament. Na invoering van het kustlijnzorgbeleid in 1990 is het zandvolume boven de gemiddelde laagwaterlijn toegenomen en zijn de duinen aangegroeid. Dit heeft een positief effect op het hoogwaterbeschermingsniveau.

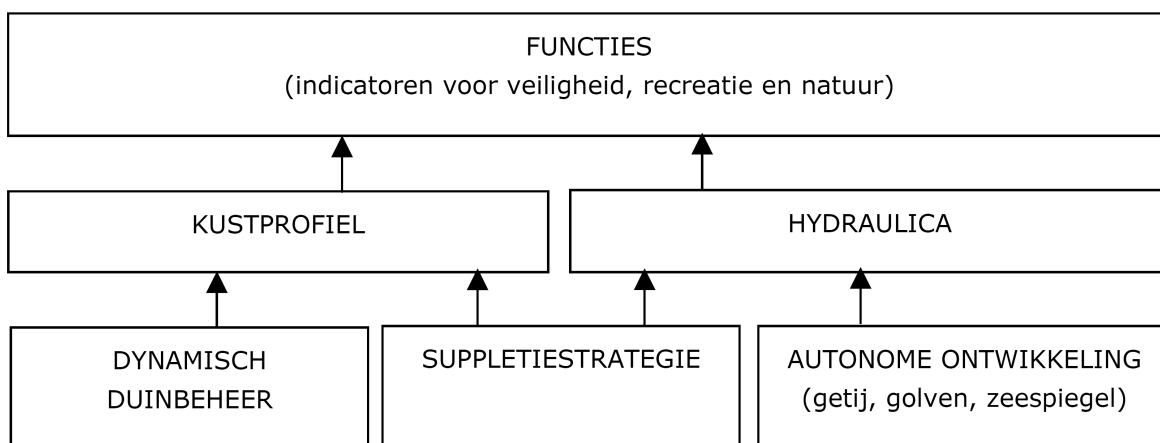
1.2 Kustdatabase

Het voorliggende onderzoek is uitgevoerd in opdracht van Deltares. Om het inzicht in de ontwikkeling van de kust en de rol van zandsuppleties te vergroten, wil Deltares niet alleen hedendaagse rekenmodellen gebruiken, maar wil Deltares ook beschikbare meetdata goed benutten. Binnen het meerjarenprogramma voor kustlijnzorg en kustbeheer werkt Deltares in 2011 aan:

- De bouw van een uitgebreide kustdatabase. Deze database moet het mogelijk maken onderdelen uit de procesketen van de gehele kust over de periode 1965 tot heden in beeld te brengen en het historische gedrag van het kuststelsel te analyseren en te doorgronden.
- Onderzoek (o.a. modelontwikkeling) naar de herverdeling van zand in het kustfundament: processen in dwarsrichting en in langsrichting. Hieronder valt ook onderzoek naar de herverdeling van suppletiezand langs de kust (Hollandse Kust, Deltakust, Waddenzee).

De kustdatabase moet zorgen voor een goede ontsluiting van data en instrumenten (analyse scripts) om deze data te kunnen analyseren. Met de database kan kennis worden opgedaan over het historische gedrag van het kuststelsel.

De functies veiligheid, natuur en recreatie worden beïnvloed door veranderingen in het kustprofiel en in de hydraulica. Deze veranderingen worden in belangrijke mate gestuurd door de natuurlijke autonome ontwikkelingen en menselijk ingrijpen. Figuur 1-2 geeft een schets van de onderdelen uit de procesketen die de samenhang van dit proces weergeeft.



Figuur 1-2 Een schets van de onderdelen uit de procesketen.

De kustdatabase moet bestaande meetdata en instrumenten ontsluiten. Het moet onder andere inzicht geven in de ontwikkeling van het kustprofiel onder invloed van zowel de natuurlijke autonome ontwikkelingen als menselijk ingrijpen (zandsuppleties en duinbeheer), en het effect van de kustontwikkeling op diverse functies, zoals hoogwaterbescherming, recreatie en natuur. Met het verworven inzicht kunnen vuistregels worden opgesteld die de relatie tussen het kustgedrag, de natuurlijke processen, het menselijk ingrijpen en de indicatoren voor de functies beschrijven.

1.3 Doelstelling

Op basis van de reeds beschikbare informatie vanuit de kustdatabase, zal HKV [LIJN IN WATER](#) twee functies van de kust in kaart brengen: de functie veiligheid en de functie recreatie. Deze twee *functies* kunnen in beeld gebracht worden aan de hand van van bepaalde *indicatoren*.

Het doel van de voorliggende studie is het analyseren van de relatie tussen het historische kustgedrag en de in het verleden uitgevoerde zandsuppleties bezien vanuit verschillende functies (veiligheid en recreatie) en hun bijbehorende indicatoren.

Gegeven de relaties op basis van meetdata uit het verleden kunnen hypothesen ten aanzien van het effect van zandsuppleties (hoeveel, waar en wanneer) op de kustindicatoren worden getoetst.

1.4 Werkwijze

We zullen nu nader ingaan op de wijze waarop we invulling geven aan de kustfunctie veiligheid en de kustfunctie recreatie.

1.4.1 Kustfunctie veiligheid

Bij de definitie van de indicator voor de kustfunctie *veiligheid* sluiten we conform [HKV \[LIJN IN WATER\]\(#\) \(2010\)](#) aan bij het project Veiligheid Nederland in Kaart (VNK). Als indicator wordt de faalkans voor het meest bepalende faalmechanisme van het betreffende kustprofiel aangehouden.

Bij een pure duinenkust, met faalmechanisme duinafslag, is het doorbraakpunt het punt waar nog juist een kritiek grensprofiel aanwezig is. Het doorbraakpunt markeert de grens tot waar de duinen zouden mogen afslaan zodat het grensprofiel nog aan de landwaartse zijde resteert. De landwaartse grens betreft daarmee als het ware het uiterste toelaatbare afslagpunt. Zandsuppleties beïnvloeden het kustprofiel. Door zand toe te voegen aan het kustprofiel komt er een grotere zandbuffer zeewaarts van het doorbraakpunt te liggen. Met het rekenmodel van VNK (PC-Ring) kan het effect van een profielaanpassing door uitgevoerde zandsuppleties op de faalkans worden bepaald door een kustprofiel van vóór en ná de suppleties te beschouwen.

Het rekenmodel dat voor VNK gehanteerd wordt, PC-Ring, is gebaseerd op het bekende duinafslagmodel DUROS+. Een bekend manco van DUROS+ is dat het problemen kan geven bij het beschouwen van duinen die bestaan uit meerdere duinenrijen. Dit euvel doet zich met name voor indien meerdere duintoppen in het profiel aanwezig zijn boven het voor die duinen relevante stormpeil. Het is om deze reden dat als indicator voor de kustfunctie veiligheid niet zozeer het falen van de gehele duinenrij beschouwd wordt, maar *het falen van de eerste duinenrij van het duinprofiel*. Op de meer technische aspecten hiervan zal nader worden ingegaan in de paragrafen [2.2.4](#) en [3.2.6](#).

Resultaten van probabilistische berekeningen voor meerdere jaren zullen niet alleen de absolute faalkans geven voor een bepaald duinprofiel, maar tevens de *verandering in de faalkans* door de jaren heen. Juist ook deze verandering van faalkans kan direct gekoppeld worden aan de uitgevoerde zandsuppleties.

1.4.2 Kustfunctie recreatie

De afname van het strandareaal langs de kust heeft een directe koppeling met het economische belang vanuit de recreatieve functie. De strandbreedte wordt daarom gezien als indicator voor de kustfunctie *recreatie*. Om de economische belangen van een voldoende breed strand te borgen is door HKV [LIJN IN WATER](#) (2011) de potentie en uitwerking van een recreatiebasiskustlijn (rBKL) verkend.

Door HKV [LIJN IN WATER](#) (2011) is een methode afgeleid om een recreatiebasiskustlijn vast te stellen langs de Noordzeekust. Op basis van Jarkus-metingen kunnen de positie van de duingrens en de zeegrens per raai worden vastgesteld. Aangezien de zeegrens varieert (uitgaande van Gemiddeld HoogWater (GHW) en Gemiddeld LaagWater (GLW)) kan de strandbreedte worden bepaald voor zowel het gedeelte dat altijd droog staat en een gedeelte waarbij daaraan het gedeeltelijk natte areaal is toegevoegd.

1.4.3 Scope

De voorliggende rapportage van het onderzoek door HKV [LIJN IN WATER](#) maakt onderdeel uit van het project Kustlijnzorg zoals dat door Deltares voor de Waterdienst wordt uitgevoerd. De scope van dat project is het onderzoeken van de ontwikkeling van de verschillende kustindicatoren en wat het (langere termijn) effect is van een bepaalde suppletie strategie. Dit is mogelijk, aangezien kustgegevens beschikbaar zijn voor de gehele Nederlandse kust (zie figuur 1-3) voor enkele decennia zonder zandsuppleties (periode 1965 t/m 1989) en tevens voor de periode gedurende het uitvoeren van zandsuppleties (periode vanaf 1990).



Figuur 1-3 Verdeling van de Nederlandse kust in kustvakken. Bron: www.rws.nl/rws/rikz.

In deze rapportage wordt toegelicht hoe twee van deze kustindicatoren bepaald zijn en wordt tevens een eerste indicatie gegeven van het *momentane* effect van zandsuppleties op deze twee indicatoren. Derhalve zal in dit rapport aandacht worden besteed aan de resultaten voor de faalkans bij het mechanisme duinafslag (kustfunctie veiligheid) en de resultaten voor de strandbreedte (kustfunctie recreatie) voor het kustvak Noord-Holland.

Om het *momentane* effect van zandsuppleties in kaart te brengen, is door HKV LJN IN WATER onderzocht wat de effecten zijn van zandsuppleties *binnen één jaar na het uitvoeren van de suppleties*. In aanvulling hierop zal in de toekomst onderzocht worden of er sprake is van trendbreuken in de kustontwikkeling (op korte, middellange en lange termijn) en hoe die samenhangen met de suppletiestrategie.

Om te komen tot een dergelijke analyse, zal elke gemeten Jarkusraai uit de periode 1965 tot en met 2010 worden onderworpen aan een faalkansberekening met behulp van het probabilistische rekenmodel PC-Ring en zal voor elk van die Jarkusraaien, in dezelfde periode, de bijbehorende strandbreedte worden bepaald. We beginnen hierbij met kustvak 7 (Noord-Holland).

Naast de faalkansberekeningen voor Noord-Holland is getracht zo veel mogelijk vorderingen te maken met faalkansberekeningen voor de gehele Nederlandse kustlijn. Bij verschijning van dit rapport, zijn de resultaten van faalkansberekeningen beschikbaar voor de volgende kustvakken:

- Hollandse kust: Noord-Holland, Rijnland en Delfland (kustvakken 7, 8 en 9),
- Waddeneilanden: Ameland, Terschelling, Vlieland, Texel (kustvakken 3, 4, 5 en 6),
- Deltakust: Goeree, Schouwen, Walcheren (kustvakken 12, 13 en 16),

waarmee een groot gedeelte van de Nederlandse kust is afgedekt. In de voorliggende rapportage zal alleen aandacht worden geschonken aan de analyse van de resultaten (van zowel de faalkans als de strandbreedte) voor het kustvak Noord-Holland.

1.5 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 zal de basis worden gelegd voor de gehele analyse door het formuleren van de methode, waarmee de Jarkusprofielen per raai en per jaar worden gegenereerd. In dit hoofdstuk zal de link worden gelegd met de online database van Deltares zoals deze op het moment van schrijven bestaat.

In hoofdstuk 3 zal nader worden ingegaan op de technische achtergronden bij de bepaling van de faalkans en de strandbreedte. De analyse van beide indicatoren zal verder beschreven worden in hoofdstuk 4 voor de faalkans en hoofdstuk 5 voor de strandbreedte. In hoofdstuk 6 zullen de voornaamste conclusies worden gerecapituleerd.

Omdat er langs de Nederlandse kust vele Jarkusraaien gelegen zijn en er dus buitengewoon veel data beschikbaar komt uit de analyse voor de faalkans en de strandbreedte, heeft HKV LJN IN WATER een tool ontwikkeld in Matlab waarmee op een zeer eenvoudige wijze de resultaten kunnen worden bekeken en geanalyseerd: de zogeheten AfslagViewer. Een beschrijving van deze tool en een gebruiksaanwijzing ervan worden gegeven in appendix A.

In appendix B wordt nader ingegaan op het aspect van convergentie bij de faalkansberekeningen; in appendix C worden de stochasten voor de sterkte van de duinen en de hydraulische belasting op een rij gezet.

2 Het gebruik van online data

2.1 Inleiding

Deltares is gestart met het ontwikkelen van de kustdatabase in het zogenaamde *OpenEarth* systeem. Dit is een database die via internet ontsloten is en waarmee kustdata en ontwikkelde instrumenten voor data-analyse met derden kunnen worden gedeeld. Bij de uitvoering van de voorliggende studie wordt gebruik gemaakt van dit OpenEarth systeem. In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe data uit dit systeem worden aangewend voor de analyse van de twee kustindicatoren.

2.2 Jarkusprofielen

In deze paragraaf willen we aangeven op welke wijze de resultaten uit de OpenEarth als basis hebben gediend om profielen te genereren.

2.2.1 Beschikbare gegevens

Eenmaal per jaar worden langs de gehele Nederlandse kust metingen (de zogeheten Jarkusmetingen) uitgevoerd. Deze metingen worden uitgevoerd langs lijnen die loodrecht op de kust staan (raaien). Elke raai is gemarkeerd door een strandpaal die met onderlinge afstand van ongeveer 250 m langs de gehele Noordzeekust op het strand staan. Sinds 1965 wordt jaarlijks langs iedere raai het kustprofiel opgemeten. Het profiel wordt ingemeten van circa 800 m zeewaarts van de strandpalen tot circa 200 m landwaarts van de eerste duinenrij.

De kustmetingen bestaan uit metingen op het natte en droge deel van het profiel. Het natte deel wordt met behulp van een boot (automatisch lodingsysteem) gemeten. De metingen van het droge deel wordt met een radarvliegtuig gemeten. Het hoogte- en diepteprofiel van elke raai wordt zo jaarlijks vastgesteld.

2.2.2 Het aanvullen van ontbrekende data

Aangezien jaarlijks niet altijd even ver wordt doorgemeten aan het kustprofiel (zowel landwaarts als zeewaarts), gebeurt het per Jarkusraai meer dan eens dat data over een gedeelte van de geometrie ontbreken. Omdat het ontbreken van gedeelten van het profiel een betrouwbare berekening van de faalkans en/of bepaling van de strandbreedte in de weg staat, dienen aanvullingen uitgevoerd te worden. Bij ontbrekende geometrische data voor een bepaald jaar j kan het profiel niettemin volledig gereconstrueerd worden aan de hand van de volgende stappen:

1. Neem de data uit het betreffende jaar (jaar j); deze kunnen direct uit OpenEarth worden gehaald.
2. Indien voor jaar j bepaalde data ontbreken, wordt het profiel aangevuld met data uit het voorgaande jaar, het jaar $j - 1$. Indien na eventuele aanvullingen met data uit het jaar $j - 1$ nog steeds 'gaten' in het profiel zitten, dan kan verder worden teruggekeken naar jaar $j - 2$, $j - 3$, etc. tot en met 1965.
3. Indien in het verleden geen data beschikbaar zijn, dan wordt vooruit gekeken naar toekomstige jaren, te beginnen met het jaar $j + 1$. Na een aanvulling, kan voor eventuele noodzakelijke extra aanvullingen vooruit gekeken worden naar jaar $j + 2$, $j + 3$, etc. tot en met 2010.

Met andere woorden: eerst wordt het profiel aangevuld met data uit het verleden (beginnend bij het recente verleden), vervolgens wordt er aangevuld met data uit latere jaren (beginnend in de nabije toekomst). De gedachte dat data uit het verleden voorrang krijgen boven data uit latere

jaren houdt in dat we eerst aannemen dat het profiel niet verandert, zolang dit niet gemeten is. Pas als er in het verleden geen enkele informatie over een bepaald deel van het profiel aanwezig is, worden data uit latere jaren geselecteerd.

Op deze manier krijgen alle profielen op een zekere locatie dezelfde lengte, waardoor fluctuaties van de strandbreedte in de tijd enkel het resultaat zijn van fluctuaties in de geometrie, niet van fluctuaties in de lengte van inmeten.

Merk overigens op dat het meest dynamische deel van het profiel eigenlijk elk jaar wordt ingemeten, waardoor de veranderingen in faalkans voornamelijk gerelateerd zijn aan de profielveranderingen die in het betreffende jaar zijn opgemeten.

2.2.3 Het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN)

Voor de Jarkusprofielen ter plaatse van brede duingebieden (zoals bijvoorbeeld Zandvoort, Bloemendaal of Wassenaar) lijkt alleen aanvullen vanuit andere Jarkusmetingen niet voldoende. Voor eventuele extra toevoegingen landinwaarts, zou kunnen worden voorgesteld om de profielen in zeer brede duingebieden aan te vullen met hoogtedata uit het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN). In het AHN zijn hoogtedata van heel Nederland beschikbaar over een raster van 100 m bij 100 m. Zo zouden profielen door interpolatie kunnen worden aangevuld met extra datapunten om de 50 m.

Echter, van AHN-data is in de huidige studie *geen* gebruik gemaakt. Dit heeft de volgende redenen:

1. Met de strategie uit paragraaf 2.2.2 blijkt dat voor alle Jarkusprofielen in Noord-Holland de geometrische gegevens ver genoeg landinwaarts doorlopen om een PC-Ring berekening mogelijk te maken.
2. Het aanvullen van profielen met AHN-data levert vaak juist problemen op in de berekening van de faalkans. De reden hiervoor ligt in het feit dat aanvulling met AHN-data vaak meerdere duinenrijen toevoegt aan het profiel; het rekeninstrumentarium is echter vaak niet geschikt om de faalkans te berekenen voor duinen met meerdere duinenrijen (zie ook paragraaf 3.2.6).

2.2.4 Het verwijderen van dubbele duinenrijen

Het rekeninstrument PC-Ring is niet altijd geschikt om meervoudige duinenrijen mee door te rekenen. Het komt echter regelmatig voor dat, zonder aanvulling van het Jarkusprofiel met AHN-data, meerdere duinenrijen voorkomen in het profiel. Daarom wordt de huidige analyse van de indicator veiligheid beperkt tot *de faalkans van de eerste duinenrij*.

Eventuele meervoudige duinenrijen worden per profiel per jaar getraceerd en, indien aanwezig, verwijderd volgens het volgende algoritme (zie ook figuur 2-1):

1. Het (vanaf de landzijde beschouwde) laatste neerwaartse snijpunt met het niveau van h_{grens} wordt gezien als een plek op het *buitentalud van de eerste duinenrij*. We kiezen het niveau van h_{grens} , enigszins arbitrair, gelijk aan 8 m +NAP. Deze waarde is redelijk gezien de duidelijke marge met het vaak berekende stormvloedpeil (vaak ca. 5 a 6 m +NAP). Duinen lager dan h_{grens} worden door het script op deze manier niet beschouwd als zelfstandige zeekering.
2. Daar waar het teken van de helling landinwaarts van het bij (1) gevonden snijpunt wisselt, is de *top van de eerste duinenrij* aanwezig. Deze top heeft een hoogte h_{top} .
3. Vervolgens wordt verder landinwaarts gekeken of er een *dal* aanwezig is met een hoogtelig-

ging h_{dal} zodanig dat:

$$h_{dal} < \min \begin{cases} h_{top} - \Delta h_{eis} & \text{(criterium 1)} \\ h_{top} - 0.75 \cdot (h_{top} - h_{grens}) & \text{(criterium 2)} \end{cases}$$

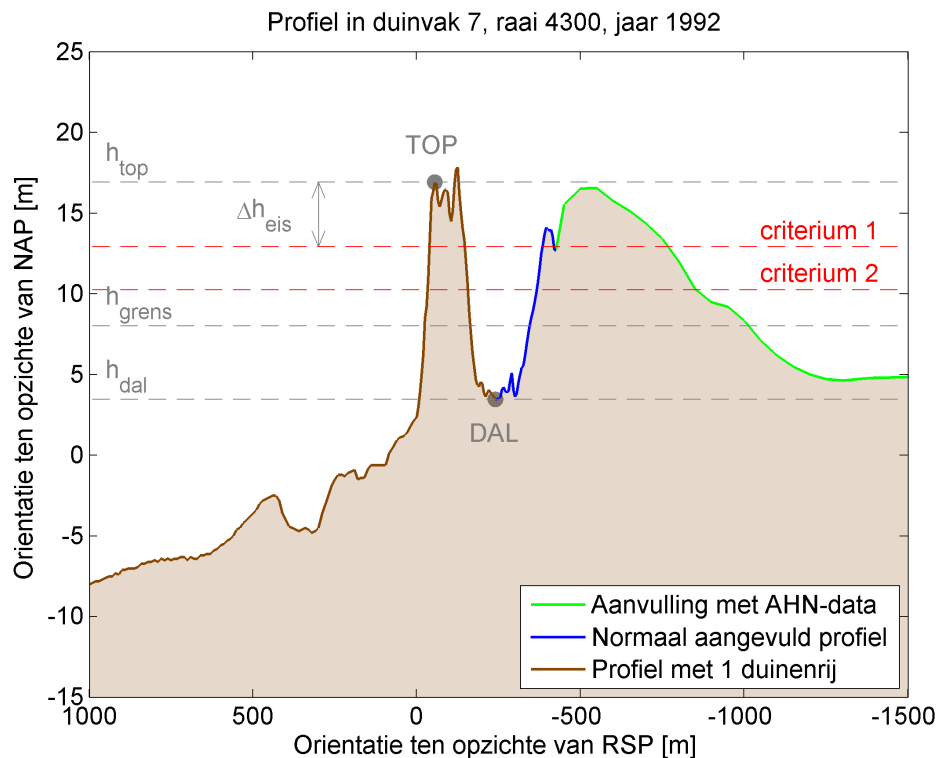
Criterium 1 is maatgevend voor duinen die niet al te ver boven h_{grens} uit komen. Voor grote duinen die ver boven h_{grens} uit komen, wordt een grotere daldiepte dan Δh_{eis} onder de duintop vereist (criterium 2) om de dubbele duinenrij te verwijderen. Voor Δh_{eis} is, enigszins arbitrair, 4 m genomen.

- Als er zo'n dal aanwezig is, wordt er 'geknipt' in het diepste punt van het betreffende dal. Op deze manier worden alle dalen landwaarts van de eerste duinenrij afgegaan. De knip wordt gezet in het meest zeewaartse dal dat aan de voorwaarden voldoet.

Het bepalen van de verschillende locaties gebeurt op basis van profielen waar een zekere *smoothing* op is toegepast, zodat kleine discontinuïteiten in de metingen de werkwijze niet beïnvloeden. Deze enigszins abstract overkomende methodiek wordt in de volgende paragraaf toegelicht aan de hand van een voorbeeld.

2.2.5 Illustratie

In figuur 2-1 wordt een voorbeeld getoond van het verwijderen van een tweede duinenrij. We kiezen Δh_{eis} gelijk aan 4 m, en h_{grens} gelijk aan 8 m +NAP. Natuurlijk zijn deze gekozen waarden tamelijk arbitrair. De pragmatische methode is uiterst werkzaam gebleken.



Figuur 2-1 Profielaanpassingen voor raai 4300 in kustvak 7 in het jaar 1992.

De eerste duinenrij is hoger dan 8 m+NAP, en is daarom voldoende hoog. De top van de eerste duinenrij ligt ongeveer op een hoogte van 17 m+NAP.

$$h_{dal} < \min \begin{cases} 17 - 4 & = 13 & \text{m +NAP} & \text{(criterium 1)} \\ 17 - 0.75 \cdot (17 - 8) & = 10.25 & \text{m +NAP} & \text{(criterium 2)} \end{cases}$$

Het dal landinwaarts van het dal mag maximaal een bodemligging hebben van het minimum van 13 m +NAP en 10.25 m +NAP. Omdat de top van de duin ($h_{top} = 17$ m +NAP) ver boven het grensniveau uitkomt ($h_{grens} = 8$ m +NAP), is het tweede criterium maatgevend: het dal ($h_{dal} \approx 3.5$ m+NAP) ligt aanzienlijk lager dan 10.25 m +NAP. Het deel landinwaarts van het laagte punt in het dal wordt daarom verwijderd.

Figuur 2-1 laat tevens zien dat het niet zinvol is om data aan te vullen met AHN-data. Vaak wordt immers het verder landinwaartse gedeelte van het profiel al weggeknipt. Mogelijk kan de aanvulling met AHN-data zelf ook nog eens voorzien in meervoudige duinenrijen.

2.2.6 Variaties in de tijd

Voor bepaalde raaien is in geen enkel jaar een dubbele duinenrij aanwezig. Dan is de methode helder: er wordt nooit een tweede duinenrij verwijderd. Hetzelfde geldt voor de situatie als er altijd een dubbele duinenrij aanwezig is: dan wordt de tweede duinenrij altijd verwijderd. We hebben hierbij per raai een vaste profiellengte gehanteerd voor alle jaren.

Een zeer beperkt aantal profielen ontstaat of verdwijnt echter een dubbele duinenrij na verloop van tijd. Om fluctuaties in de faalkans enkel het gevolg te laten zijn van fluctuaties in de geometrie willen we echter dat de profiellengte door de jaren heen gelijk is. Om die reden wordt het al of niet verwijderen van dubbele duinenrijen bepaald op basis van het over alle jaren (1965 tot en met 2010) gemiddelde dwarsprofiel. Het op basis van dit gemiddelde dwarsprofiel bepaalde 'knippunt' wordt vervolgens op de profielen van alle jaren voor de betreffende raai toegepast.

2.3 Overige gegevens

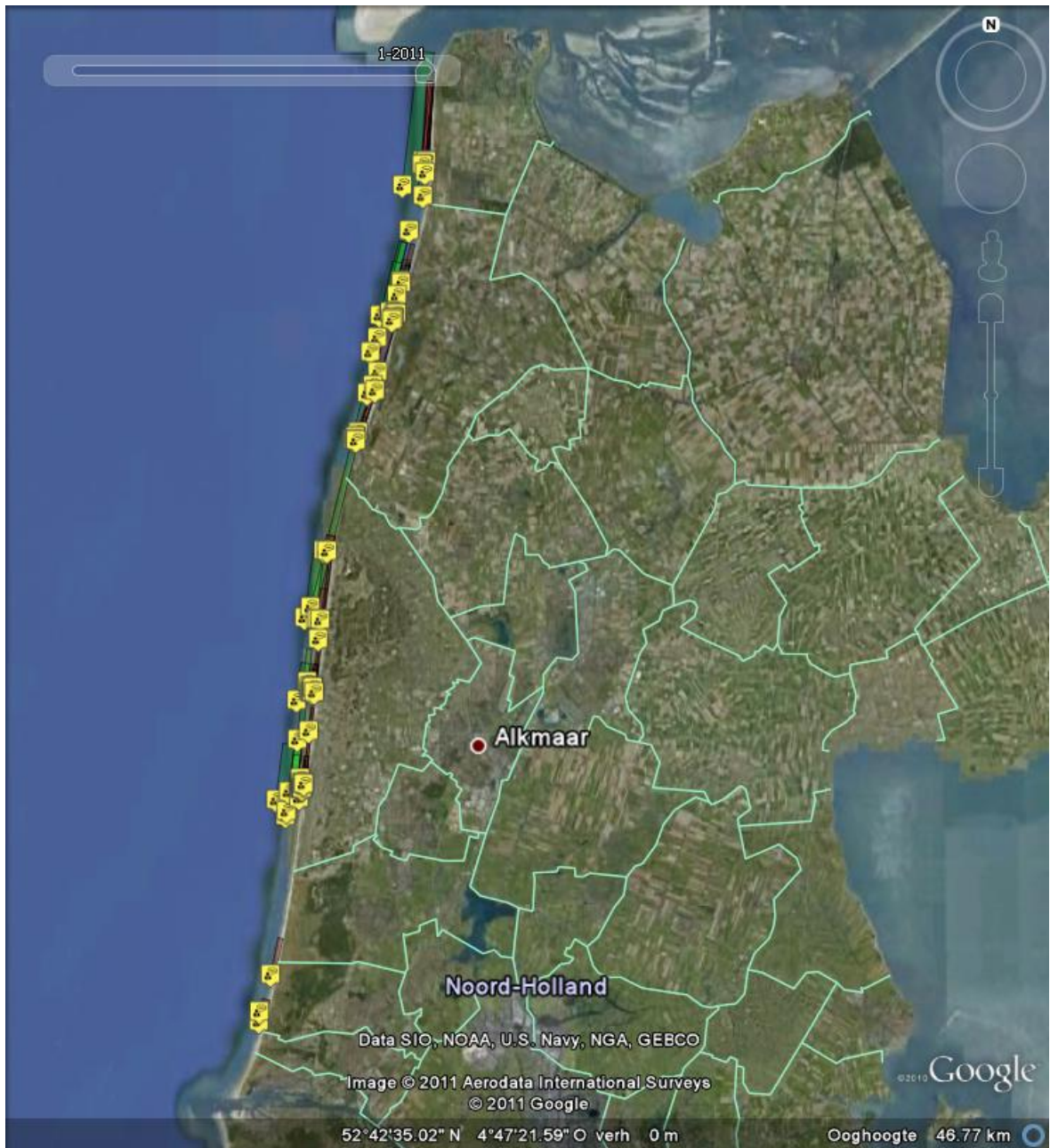
2.3.1 Suppleties

Om de invloed van zandsuppleties op zowel de faalkans als de strandbreedte te analyseren, wordt direct gebruik gemaakt van de online beschikbare gegevens in OpenEarth. Net zoals de momenten in de tijd van het meten van de Jarkusprofielen zijn opgenomen in de database, zijn voor de zandsuppleties (zowel vooroeversuppleties als strandsuppleties) momenten van suppleren gegeven, net als de hoeveelheden zand. De gebieden langs de kust van Noord-Holland, waar zandsuppleties zijn uitgevoerd in het verleden, zijn getoond in figuur 2-2.

Voor de kuststrook van Noord-Holland zijn de zandsuppleties voor het eerst eind jaren '80 uitgevoerd. Het zuidelijke gedeelte van kustvak Noord-Holland heeft niet of nauwelijks geprofiteerd van de zandsuppleties.

2.3.2 Hydraulica

Ook gegevens over de waterstanden kunnen direct ingelezen worden vanuit de online database in OpenEarth. Zoals we in paragraaf 5.2 zullen zien, zullen we ons voor de strandbreedte inzake de hydraulica vooral richten op het Gemiddeld HoogWater en het Gemiddeld LaagWater. Deze gegevens zijn in OpenEarth beschikbaar.



Figuur 2-2 Voorbeeld van de visualisatie van suppletiegegevens in Google Earth. De groene en rode vlakken geven vooreversuppleties respectievelijk strandsuppleties aan. Bron: <http://dtvirt5.deltares.nl/kml/suppleties/>.

3 Definitie van de indicatoren

3.1 Inleiding

In hoofdstuk 1 zijn we reeds ingegaan op de indicatoren voor veiligheid en recreatie, namelijk de faalkans van de eerste duinenrij en de breedte van het strand. In dit hoofdstuk zullen we nu verder ingaan op de technische aspecten van de wijze waarop deze indicatoren voor het kustvak Noord-Holland in kaart gebracht zullen worden.

3.2 Faalkans als indicator voor veiligheid

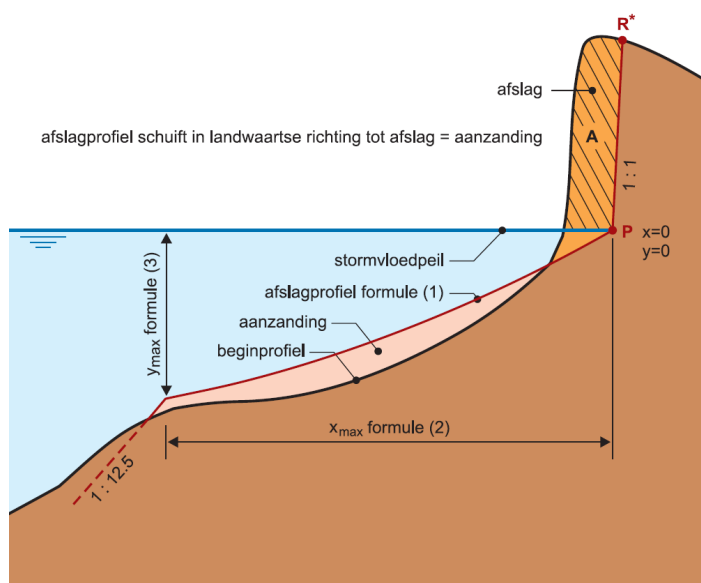
Voor de analyse van de faalkans als indicator, wordt het van TNO afkomstige model PC-Ring gebruikt. In deze paragraaf worden de achtergronden bij de module voor duinafslag binnen PC-Ring op een rij gezet.

3.2.1 Modelkeuze

Voor de analyses is gebruik gemaakt van het rekenmodel PC-Ring. Dit rekenmodel is geprogrammeerd door TNO en omvat methodes voor de berekening van de kans op falen van dijken, waterbouwkundige kunstwerken en duinen, bij bepaalde fysische mechanismen. Voor het voorliggende onderzoek is de methode voor de faalkansbepaling binnen het project Kustlijnzorg gekoppeld aan het gebruik van PC-Ring.

3.2.2 Sterktemodel

Voor het berekenen van duinafslag binnen PC-Ring wordt het model DUROS+ gebruikt, zoals dat beschreven is door TAW (2007). DUROS+ is een empirisch balansmodel waarbij het afslagprofiel wordt bepaald aan de hand van het dwarsprofiel, de golfhoogte, de piekperiode van de golven (beide bepaald op relatief diep water, namelijk 20 m -NAP), de waterstand en de korreldeiameter. De positie van dit nieuwe profiel wordt zo gekozen dat het afgeslagen volume gelijk is aan het depositievolume, zoals te zien is in figuur 3-1. Dit resulteert in een punt tot waar de duinen afslaan; dit punt is in figuur 3-1 aangegeven als R^* .



Figuur 3-1 Het afslagprofiel zoals berekend met DUROS+, overgenomen uit TAW (2007).

In DUROS+ is de duur van een storm geen variabele: het gaat uit van een vaste stormduur die als representatief wordt aangenomen voor een maatgevende storm langs de Nederlandse kust. Een bijdrage voor de variatie van de stormduur wordt, samen met modelonnauwkeurigheden, verrekend in een toeslag op het afgeslagen volume, waardoor het maatgevende afslagpunt iets verder landinwaarts ligt dan het eerder berekende afslagpunt.

Het minimale benodigde duinprofiel wordt het grensprofiel genoemd. De beschrijving van het grensprofiel (afhankelijk van de belastingen) kan worden beschouwd als het sterktemodel. Een duinvak faalt wanneer het grensprofiel wordt overschreden door het maatgevende afslagpunt.

3.2.3 Belastingmodel

In PC-Ring zijn de hydraulische belastingen geïmplementeerd die door de overheid worden voorgeschreven voor de toetsing van waterkeringen. In dit geval worden de TMR2006 (Thermometerrandvoorwaarden 2006) gehanteerd, aangezien dit de meest recente set randvoorwaarden is die in PC-Ring zijn geïmplementeerd. De TMR2006 zijn gebaseerd op waterloopkundige berekeningen en worden niet gebruikt voor de toetsing, maar alleen ten bate van een beheerdersoordeel.

3.2.4 Probabilistische benadering

Voor het uitvoeren van een probabilistische berekening wordt vaak, en ook binnen PC-Ring, de zogeheten grenstoestandsfunctie als basis gehanteerd. Deze grenstoestandsfunctie, vaak simpelweg aangeduid als Z -functie, is gedefiniëerd als de sterkte R minus de belasting S . Indien

$$Z = R - S < 0 \quad (3-1)$$

is er sprake van falen. Het punt in de verzameling $Z = 0$ met de grootste waarschijnlijkheid van optreden leidt tot de faalkans; de set van stochastwaarden, die aanleiding geven tot dat specifieke geval, wordt aangeduid als het *ontwerppunt*.

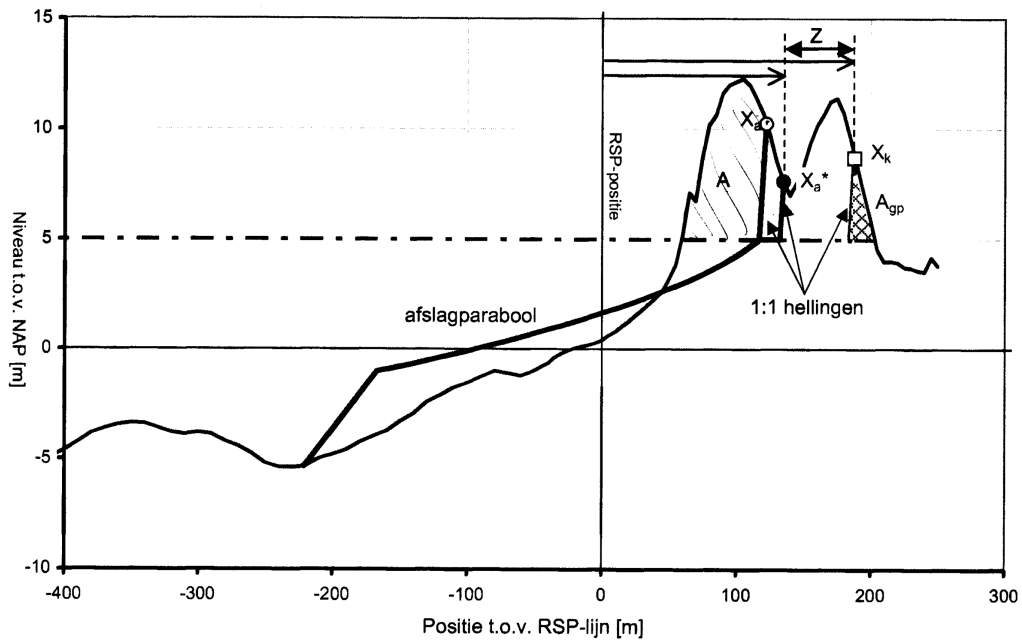
In het model PC-Ring wordt als grenstoestandsfunctie voor duinafslag een regressiemodel gehanteerd. Hierbij treedt falen op als de berekende positie van het afslagpunt X_a^* ten gevolge van de belastingen verder landinwaarts gelegen is dan de kritieke positie van het afslagpunt X_k . Uitgaande van de Rijksstrandpalenlijn (RSP), wordt de grenstoestandsfunctie:

$$Z = X_k - X_a^* \quad (3-2)$$

Voor het berekenen van een faalkans vormen het afslagpunt X_a^* en het kritieke afslagpunt X_k dus elementaire input. Deze posities worden als volgt berekend in PC-Ring (zie ook figuur 3-2).

De positie X_a^* is gebaseerd op de positie X_a zoals deze direct berekend wordt volgens de afslagprofielbenadering uit het Technisch Rapport TAW (2007) (geïllustreerd in figuur 3-1). De positie X_a uit figuur 3-2 is identiek aan de positie R^* uit figuur 3-1. Het verder landinwaarts liggen van X_a^* ten opzichte van X_a is het resultaat van het meenemen van onzekerheden in de stormduur, buien en de berekeningsmethode. De berekende positie van het afslagpunt X_a is afhankelijk van het dwarsprofiel, het stormvloedpeil, de significante golfhoogte en de korreldiameter van het duinzand. Standaard wordt in PC-Ring het afslagprofiel ook afhankelijk gemaakt van de piekperiode T_p .

De positie X_k heeft een belastingafhankelijke waarde die volgt uit het grensprofiel. Voor dit grensprofiel definieert het Technisch Rapport TAW (2007) een trapeziumvormige duin met een 1:1 talud aan de zeezijde en een 1:2 talud aan de landzijde. Vervolgens wordt de positie X_k zo-



Figuur 3-2 Het afslagpunt X_a en het kritieke afslagpunt X_k ten opzichte van de Rijksstrandpalenlijn.

danig berekend dat het volume A_{gp} volgens figuur 3-2 exact gelijk is aan het volume van het trapeziumvormige grensprofiel, dus:

$$A_{gp} = h_{gp} \cdot \left(b_{gp} + \frac{3}{2} h_{gp} \right) \quad (3-3)$$

met een breedte b_{gp} gelijk aan 3 m (de kruinbreedte van het trapeziumvormige grensprofiel van de duin) en een hoogte h_{gp} van het grensprofiel gelijk aan

$$h_{gp} = 0.12 \cdot T_p \sqrt{H_s}, \quad (3-4)$$

die dus direct afhankelijk is van de golfbelasting. Aan de parameters A_{gp} en h_{gp} worden respectievelijk de ondergrenzen 16.9 m² en 2.5 m meegegeven.

Als de optredende afslag het kritieke afslagpunt zou overschrijden, wordt aangenomen dat de duinregel doorbreekt. In dat geval geldt $Z < 0$. Een overzicht van de daarbij beschouwde stochasten, zowel voor de sterkte-zijde als voor de belasting-zijde, is gegeven in appendix C.

3.2.5 Probabilistische rekenmethodes

Voor het berekenen van de faalkans zijn binnen PC-Ring verschillende rekenmethodes beschikbaar. In essentie zijn de meest relevante methodes (voor een meer uitgebreide beschrijving, verwijzen we naar TNO (2007) (mechanismebeschrijvingen) en TNO (2003) (rekentechnieken):

1. FORM (First Order Reliability Method): bij deze benaderende methode wordt de grenstoestandsfunctie rondom het ontwerppunt gelineariseerd en worden alle kansverdelingen van stochasten getransformeerd naar een standaard normale verdeling. De uitkomst wordt middels iteratie verkregen, hetgeen een goede convergentie naar het antwoord noodzakelijk maakt. De methode FORM vereist verreweg de kortste rekentijd van alle methodes uit de probabilistische rekenbibliotheek.
2. MC (Monte Carlo): bij deze methode wordt een zeer groot aantal trekkingen uitgevoerd voor de stochasten, waarna het aantal realisaties, waarvoor $Z < 0$, gedeeld door het totaal aantal

trekkingen de faalkans voor het mechanisme representeert.

3. DS (Directional Sampling): deze methode is verwant aan Monte Carlo in de zin dat er uitgegaan wordt van een groot aantal trekkingen voor de stochasten, en verwant aan FORM in de zin dat de verdeling van alle stochasten wordt getransformeerd naar een standaard normale verdeling. Bij de methode DS worden de trekkingen op basis van richtingen en niet op basis van punten, zoals bij Monte Carlo, uitgevoerd.

Naast deze drie methodes, bestaat er binnen PC-Ring de mogelijkheid om rekenmethodes te combineren. Zo bestaat er de mogelijkheid om DS te gebruiken, waarbij FORM wordt gebruikt om het rekenproces te versnellen. Bij de benadering van het aspect veiligheid binnen de context van de voorliggende studie, heeft HKV LIJN IN WATER de methode FORM gehanteerd als uitgangspunt, gezien het aanzienlijke verschil in rekentijd tussen FORM enerzijds en MC en DS anderzijds.

Het rekenmodel PC-Ring zoekt bij een zeker faalmechanisme naar het *ontwerppunt*, zijnde die combinatie van stochasten waarbij falen het meest waarschijnlijk is. De eenvoudige methode FORM hanteert hieromtrent twee belangrijke uitgangspunten:

1. De grenstoestandsfunctie Z wordt gelineariseerd in het ontwerppunt.
2. Alle stochasten worden in het ontwerppunt als standaard normaal verdeeld beschouwd.

Aangezien het ontwerppunt mede de gezochte uitkomst van de berekening is en op voorhand niet direct uit te rekenen is in welk ontwerppunt (dus: voor welke stochastwaarden) de maximale faalkans optreedt, dient het antwoord (bestaande uit de faalkans én het ontwerppunt) op iteratieve wijze verkregen te worden. Het nadeel van iteratieve methodes in het algemeen is dat er de eis van convergentie aan verbonden is. Bij het gebruik van FORM bestaat echter de mogelijkheid dat het iteratieproces binnen de berekening niet convergeert. In die gevallen dient het resultaat met zorg beschouwd te worden.

3.2.6 Geldigheid van het duinafslagmodel

Het DUROS+ model, waarop de afslagmodule binnen PC-Ring gebaseerd is, heeft de volgende belangrijke beperkingen:

1. Het model DUROS+ kan vaak niet overweg met het duinprofiel op het moment dat daar meerdere duinenrijen in optreden. De problemen doen zich met name voor indien boven het berekende stormvloedpeil meerdere onafhankelijke pieken te identificeren zijn. In het geval van figuur 3-2 zou zich dat probleem niet voordoen, omdat het duindal zich bevindt boven het stormvloedpeil. Problemen zouden zich wel bij figuur 3-2 voor kunnen doen, indien het berekende stormvloedpeil bijvoorbeeld 9 m +NAP zou zijn geweest, omdat in dat geval het duindal zich beneden het stormvloedpeil zou bevinden.
2. Verder is bekend dat DUROS+ moeite heeft met het doorrekenen van complexe vooroevers. Aangezien een aanzienlijke vooroeversuppleties zorgt voor een complexe vooroever, kan het zijn dat PC-Ring geen effect zal tonen van een bepaalde vooroeversuppletie.
3. Daarnaast kan het voorkomen bij vooroeversuppleties dat de suppletie zó ver zeewaarts is geplaatst dat deze buiten het geldigheidsbereik van het DUROS+ model valt. In dergelijke gevallen zal de directe bijdrage aan verlaging van de faalkans door vooroeversuppleties niet zichtbaar zijn.
4. Ten vierde dient opgemerkt te worden dat een belangrijk effect van vooroeversuppleties niet meegenomen wordt in DUROS+, namelijk de reductie van de golfhoogte die de suppletie teweegbrengt. Hierdoor wordt de faalkans na vooroeversuppleties structureel overschat.

Deze beperkingen, tezamen met het iteratieve karakter van de FORM-rekenroutine, vereisen een zorgvuldig oog bij het analyseren van de resultaten die door PC-Ring worden geleverd.

3.2.7 Zeedijken

Langs de kust van Noord-Holland bevinden zich twee zeedijken, namelijk de Hondsbossche Zeewering nabij Petten en de Noordzeedijk nabij Den Helder. De focus van dit rapport is echter op de duinenkust van Noord-Holland. Niettemin zal een kleine analyse uitgevoerd worden voor de Hondsbossche Zeewering. Hierbij is gekeken naar de mechanismen overloop/golfoverslag en piping. Aangezien dijken slechts een marginaal onderdeel van deze studie vormen, wordt voor de verdere beschrijving van de mechanismes direct verwezen naar [TNO \(2007\)](#).

3.3 Strandbreedte als indicator voor recreatie

In deze paragraaf geven we de achtergronden weer van de methode voor het bepalen van de strandbreedte, ten bate van de analyse voor de indicator recreatie.

3.3.1 Definitie

Het strandareaal langs de kust heeft een directe koppeling met het economische belang vanuit de recreatieve functie. De strandbreedte wordt daarom gezien als indicator voor de kustfunctie recreatie.

Om de economische belangen van een voldoende breed strand te borgen, is door [HKV LIJN IN WATER \(2011\)](#) de potentie en uitwerking van een recreatiebasiskustlijn (rBKL) verkend. Daarvoor is methode afgeleid om een recreatiebasiskustlijn langs de Noordzeekust vast te stellen. Als onderdeel hiervan zijn strandbreedtes bepaald langs de Nederlandse kust in de jaren 2000 tot en met 2010 op basis van de Jarkus-metingen. Hiertoe zijn alleen de delen van de kust met een recreatief belang beschouwd. Er is onderscheid gemaakt in de breedte van het droge en totale strand. Een analyse van de Jarkus-metingen heeft, per raai, geresulteerd in een positie van de duingrens en de zeegrens. Hieruit is per jaar (binnen de periode 2000 - 2010) de breedte van het droge en het totale strand afgeleid.

3.3.2 Werkwijze

De jaarlijkse kustmetingen zijn bedoeld om inzicht te krijgen in de ligging van de kustlijn, en hebben niet als primair doel de strandbreedte te bepalen. Door een aanname te doen voor de duingrens en de zeegrens kan de strandbreedte wel op basis van JARKUS-metingen worden afgeleid.

De duingrens is de locatie van de duinvoet in het horizontale vlak. Het Basisrapport Zandige Kust verstaat onder duinvoet *de benedenrand van het duin, de overgang van het duinbeloop naar het strand*. In veel gevallen is de ligging van de duinvoet moeilijk te bepalen. Dit komt omdat de overgang tussen strand en duin niet abrupt is maar geleidelijk. Mogelijke, en dikwijls gebruikte, definities voor de duinvoet zijn:

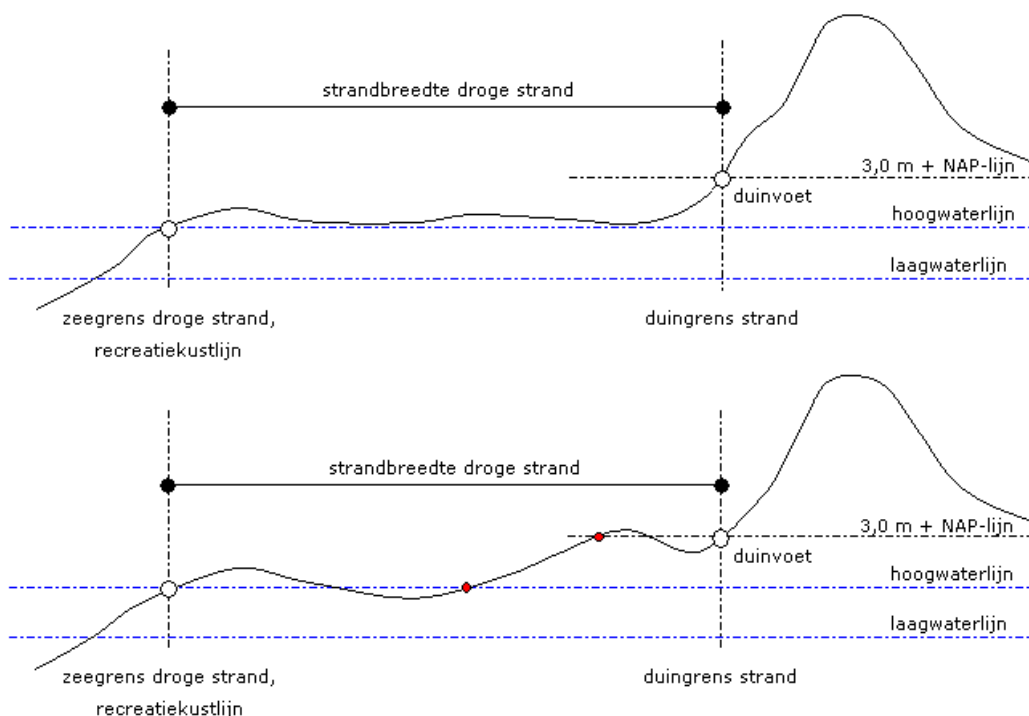
- het snijpunt van het gemiddelde duinbeloop en de gemiddelde ligging van het strand,
- het snijpunt tussen het buitenste duinbeloop en een vaste waarde ten opzichte van NAP (over het algemeen 3.0 m + NAP, maar ook wel eens 2.5 m + NAP of + 3.5 m + NAP)

De Helpdesk Water verwijst naar een website waarop standaarden en definities van begrippen worden gegeven (www.aquo-lex.nl, de InformatieDesk Standaarden Water). Op deze website staan verschillende definities: 'de plaats waar het droge strand overgaat in de zeereep' of 'de benedenrand van het duin - overgang van het duinbeloop naar het strand' of 'het terrein achter het duin'. Deze definities kunnen op verschillende manieren worden geïnterpreteerd: hierbij kan gekeken worden naar het snijpunt met een bepaalde hoogtelijn (zoals voor deze studie wordt voorgesteld) of naar de overgang van het duintalud naar het strandtalud. De benadering met

taluds heeft als nadeel dat het lastig is om een eenduidige definitie vast te stellen, omdat de grootte van de taludhelling sterk afhankelijk is van het beschouwde gebied (zowel voor het strand als voor het duin).

In de Memorie van Toelichting bij de Waterregeling wordt gebruik gemaakt van het snijpunt met een bepaalde hoogtelijn. De hoogte van deze lijn is afhankelijk van de regio:

De duinvoet wordt in de Beleidslijn Kust gedefinieerd als de overgang van het duinbeloop naar het strand. Voor de kuststrook langs de Waddenzee en op de Waddeneilanden wordt hiervoor in de meeste gevallen een lijn van +2.5m boven NAP gehanteerd. Voor de kuststrook langs de Noordzee wordt hiervoor in de meeste gevallen een lijn van +3.0m boven NAP gehanteerd. In Zeeland is een gedeelte van de duinvoet op + 3.5m boven NAP gelegen. Deze duinvoet vormt een mobiele grens: als gevolg van kustafslag en duinaangroei ligt de duinvoet gedurende het jaar steeds ergens anders.



Figuur 3-3 Berekening strandbreedte in het ideale geval (bovenste figuur) en in het geval van lokale oneffenheden in het strand (onderste figuur).

Voor dit onderzoek zijn de volgende definities gehanteerd (zie figuur 3-3 voor een grafische weergave):

1. De **duinvoet** is gelijk aan het snijpunt tussen het buitenste duinbeloop en het lokale duinvoetniveau, zoals gedefinieerd in het Memorie van Toelichting bij de Waterregeling (bijv. de 3.0 m + NAP-lijn).
2. De **duingrens** van het strand is gelijk aan de locatie van de duinvoet in het horizontale vlak.
3. De **zeegrens** van het **droge strand** (het strand dat droog blijft bij gemiddeld hoogwater) is gelijk aan de locatie van het snijpunt van het strand met de plaatselijke gemiddelde hoogwaterlijn (GHW).
4. De **zeegrens** van het **totale strand** (het strand dat droogvalt bij gemiddeld laagwater) is gelijk aan de locatie van het snijpunt van het strand met de plaatselijke gemiddelde laagwa-

terlijn (GLW).

- De **strandbreedte** van het droge en het totale strand is gelijk aan de horizontale afstand tussen de duingrens en de zeegrens van respectievelijk het droge en het totale strand.

Enkele kanttekeningen bij de voorgestelde methode:

- De methode zal worden toegepast op de aangevulde profielen, zoals staat beschreven in hoofdstuk 2.
- Bij een deel van de stranden wordt het bepalen van de strandbreedte via de beschreven methode verstoord door lokale oneffenheden in het strand. Vergelijk hiertoe de onderste figuur en de bovenste figuur uit figuur 3-3. Oneffenheden tussen het duinvoetniveau en het duinvoetniveau + 1.0 m worden om deze reden genegeerd. Deze hoger liggende delen van het strand worden niet gezien als duinen. Hetzelfde geldt voor oneffenheden tussen GHW en het gemiddelde van GHW en GLW. Een snijpunt met deze lager liggende delen van het strand wordt niet beschouwd als de zeegrens van het strand.
- Een andere keuze voor de locatie van de duinvoet kan tot een verschil in strandbreedte leiden, oplopend tot enkele tientallen meters voor een vlak oplopend duin. Omdat we ontwikkelingen in de tijd beschouwen heeft de definitie van de duinvoet nauwelijks gevolgen voor de analyse.
- De kustmetingen worden in het voorjaar uitgevoerd. Hierdoor geven de metingen geen inzicht in de seizoensfluctuatie van de strandbreedte (een smal strand in de winter; een breed strand in de zomer). Het voorjaar is wel een gunstig moment gezien de piek in de recreatieve activiteit op het strand in de zomer.

De bepaling van de begrenzings van het strand worden volledig geautomatiseerd uitgevoerd met behulp van Matlab-scripts. Figuur 3-4 geeft een voorbeeld van de presentatie van de begrenzings van het strand met behulp van Google Earth. Er is gebruik gemaakt van OpenEarth voor het toevoegen van de informatie aan de Google Earth omgeving.



Figuur 3-4 Weergave van de duingrens (rood), de zeegrens van het droge strand (blauw) en de baasikustlijn (zwart) in Google Earth.

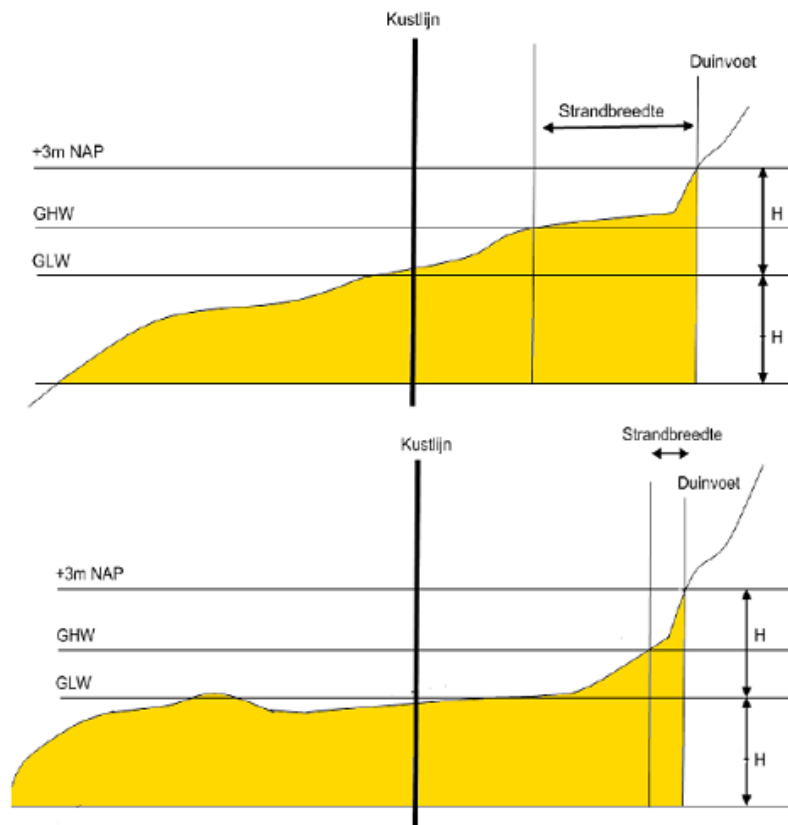
3.3.3 Alternatieve methodes

In de in dit rapport beschreven methodiek worden zowel de zeegrens als de duingrens van het strand bepaald door de locatie van de snijpunten met respectievelijk het lokale GHW (of GLW) en het lokaal geldige duinvoetniveau.

Een alternatieve methode is het bepalen van begrenzings op basis van volumes (of oppervlaktes van een dwarsdoorsnede):

- Voor de zeegrens van het strand kan een vergelijkbare methode worden gehanteerd als voor de berekening van de momentane kustlijn ten behoeve van het in stand houden van de basis kustlijn.
- Voor de duingrens wordt een alternatieve methode beschreven in een rapport van [Arcadis \(2011\)](#). Allereerst wordt het Momentane Duinvolume bepaald door het oppervlak van het kustprofiel boven het duinvoetniveau en zeewaarts van het maatgevende duinafslagpunt uit het referentiejaar 1990 te berekenen. Vervolgens wordt een Typische Duinhoogte bepaald door voor 1990 het momentane duinvolume te delen door de afstand tussen het maatgevende duinafslagpunt en de duinvoet. De Momentane Duinlijn wordt uiteindelijk bepaald door het Momentane Duinvolume te delen door de Typische Duinhoogte uit 1990.

Beide methoden resulteren in een robuustere indicator voor de begrenzings van het strand: de variaties in de tijd zijn kleiner dan bij de in paragraaf 3.3.2 voorgestelde methode. Echter, deze volumes zijn niet direct relevant voor het beschikbare momentane strandoppervlak. Figuur 3-5 illustreert dit: een gelijk volume betekent zeker niet dat de strandbreedte ook gelijk is. De volumes zijn hooguit indirect van belang in verband met de duurzaamheid van de momentane strandbreedte. Om deze reden zal in de voorliggende studie de methodiek zoals beschreven in paragraaf 3.3.2 worden gehanteerd.



Figuur 3-5 Voorbeeld waarbij een gelijk volume bij de toetsingsmethode voor de handhaving van de basis kustlijn een gelijke kustlijn oplevert, terwijl de strandbreedte sterk verschilt, volgens [Decisio \(2011\)](#).

4 Analyse van de faalkans

4.1 Inleiding

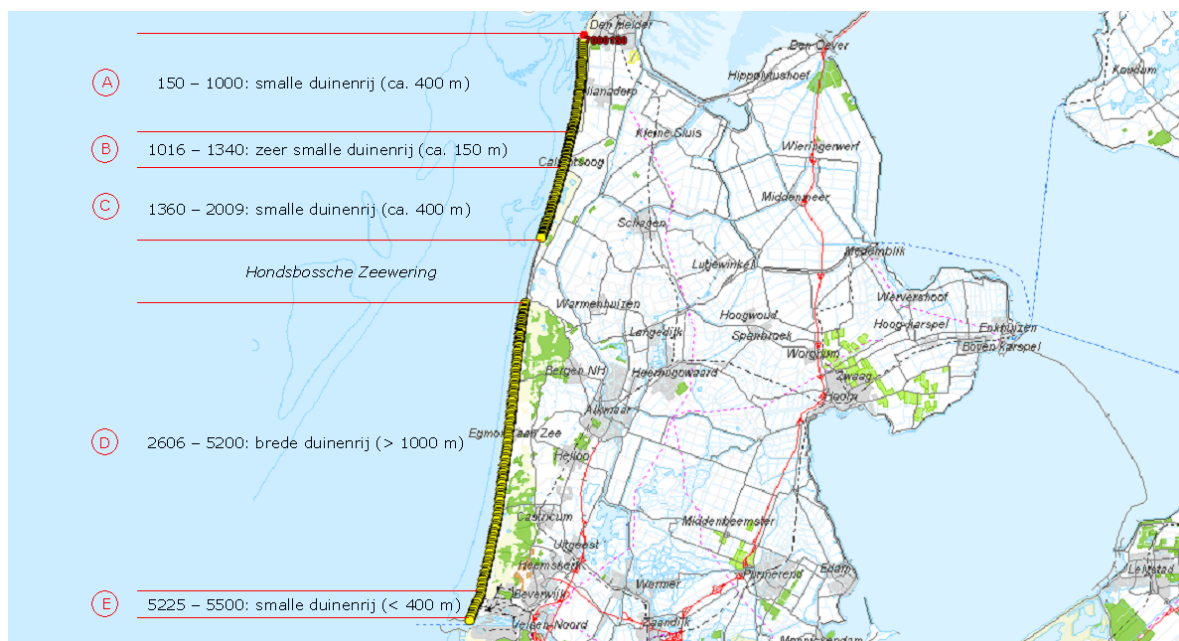
In dit hoofdstuk worden de resultaten voor de faalkans voor duinafslag in kaart gebracht voor kustvak 7: Noord-Holland. Daartoe wordt de kustlijn van kustvak 7 eerst opgedeeld in deelgebieden, waarna voor elk deelgebied zal worden geanalyseerd hoe de faalkans zich ontwikkelt in de tijd. Hierbij hanteren we voor de faalkans, conform de methodebeschrijving in paragraaf 3.2, de faalkans voor duinafslag van de eerste duinenrij.

4.2 Deelgebieden

De kustlijn van kustvak Noord-Holland bestaat niet allen uit duinen, maar ook uit dijken. Binnen het duinengebied maken verder in deze paragraaf onderscheid tussen diverse deelgebieden: gebieden met een smalle en gebieden met een brede duinenrij.

4.2.1 Duinen

Voor de analyse van de faalkans wordt de kustlijn van kustvak 7 onderverdeeld in deelgebieden. Deze onderverdeling is gemaakt op basis van de breedte van de volledige duinenrij. De gekozen deelgebieden zijn getoond in figuur 4-1. In deze figuur zijn tevens alle locaties getoond, waarvoor met PC-Ring faalkansberekeningen zijn uitgevoerd.



Figuur 4-1 Opdeling van de kustlijn van Noord-Holland in deelgebieden. De getallen verwijzen naar de nummering van de Jarkusraai. De gele stippen geven de locaties van de Jarkusraai aan waarvoor met PC-Ring faalkansberekeningen zijn uitgevoerd.

In de noordelijke helft (raainummers 150 t/m 2009) is de duinenrij over het algemeen te classificeren als 'smal'. De duinenrij heeft in deze gebieden een breedte van ca. 400 m. De duinenrij nabij Callantsoog is echter met een breedte van ca. 150 m te classificeren als 'zeer smal'. De duinenrij in de zuidelijke helft, afgezien van het havengebied nabij IJmuiden, is met een breedte meer dan 1000 m te classificeren als 'breed'.

4.2.2 Dijken

Langs de kustlijn bevinden zich twee zeedijken: de Hondsbossche Zeewering (ca. 5500 m lang) en de Noordzeedijk nabij Den Helder. Het rekenmodel PC-Ring is in staat om voor dijken diverse faalmechanismes door te rekenen, zoals overslag, piping, stabiliteit, etc. Aangezien PC-Ring echter niet in staat is om hierbij het voorliggend zandlichaam mee te nemen, kan er voor deze locaties geen verband worden gelegd tussen de uitgevoerde suppleties en de faalkans voor diverse mechanismes. Daarom zal de analyse voor de Hondsbossche Zeewering beknopt zijn (paragraaf 4.7) en zal de Noordzeedijk nabij Den Helder buiten beschouwing worden gelaten.

4.2.3 Convergentie

In totaal is voor 225 Jarkusraaien (binnen kustvak 7) de faalkans bepaald voor de periode 1965 t/m 2010, dus 46 jaren; er zijn dus 10350 PC-Ring berekeningen uitgevoerd. Echter, niet elke berekening heeft geresulteerd in een correct berekende faalkans, mogelijk omdat:

1. de berekening niet geconvergeerd is (zie ook paragraaf 3.2.5),
2. of op een of andere manier er toch nog een dubbele duinenrij aanwezig is, die op voorhand niet was weggefilterd.

Uiteindelijk is 80% van de berekeningen geconvergeerd¹. Naar schatting 10% (dit getal is moeilijk exact vast te stellen) van de berekeningen heeft een niet realistisch (i.e. niet bruikbaar, niet zinvol) resultaat opgeleverd. De berekeningen zijn dus voor ca. 70% succesvol geweest. De grootste bijdrage aan de *niet*-geconvergeerde verzameling sommen is geleverd door Jarkusraaien in deelgebied E: in het havengebied nabij IJmuiden zijn in vrijwel alle gevallen (ca. 10 raaien) de resultaten van de berekeningen niet realistisch. Dit oorzaak hiervan is het zeer grillige verloop van het duinprofiel.

4.2.4 Selectie relevante raaien

Om de verdere analyse enigszins beknopt te houden, worden enkele Jarkusraaien in het bijzonder voor het voetlicht gebracht. Deze selectie heeft plaats op basis van de berekende faalkansen voor het meest recente jaar: het jaar 2010. Deze berekende faalkansen zijn weergegeven in figuur 4-2. Deelgebied E (nabij de haven van IJmuiden) is hierin buiten beschouwing gelaten, vanwege de onrealistische resultaten.

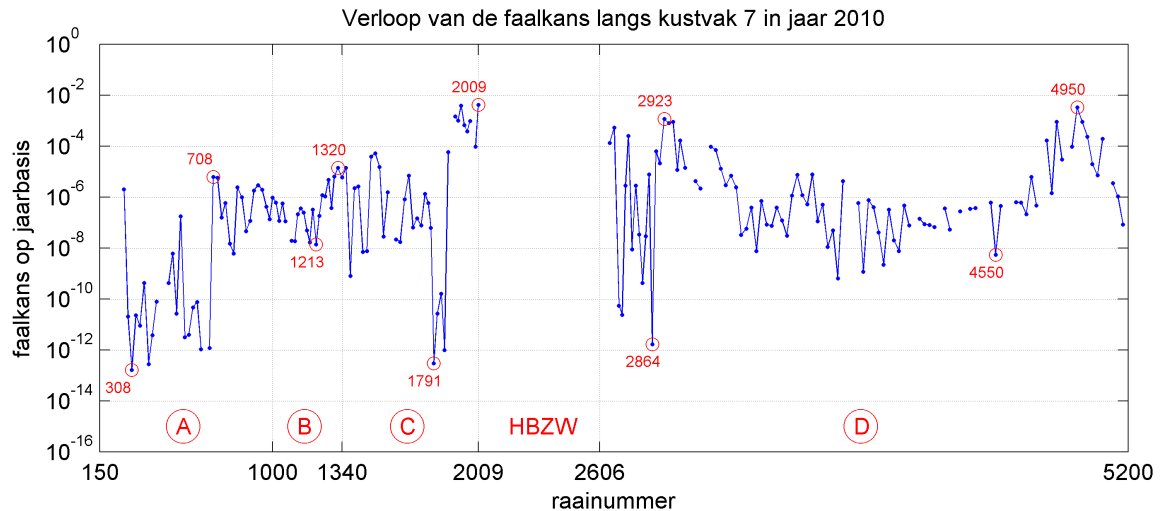
In figuur 4-2 zijn per deelgebied de raaien met de hoogste en de laagste faalkans omcirkeld. Voor deelgebied D zijn twee extra raaien omcirkeld om onderscheid te maken tussen enerzijds de noordelijke helft, waar door de jaren heen veel suppleties zijn uitgevoerd, en anderzijds de zuidelijke helft, waar nauwelijks suppleties zijn uitgevoerd.

De in figuur 4-2 omcirkelde raaien zijn nader gespecificeerd in tabel 4-1. In deze tabel zijn niet alleen de faalkansen op een rij gezet, maar tevens de berekende afslagvolumina. Daarbij gaat het om het volume dat onder invloed van de hydraulische belasting richting zee verplaatst wordt onder die omstandigheden waarbij het falen van de duinenrij het meest waarschijnlijk is.

4.3 Smalle duinenrijen

In deze paragraaf worden de resultaten voor de meer smalle duinenrijen over het voetlicht gebracht. Daarbij is de focus gericht op het afslagprofiel en het verloop van de faalkans in de tijd.

¹Het kan overigens voorkomen dat PC-Ring *ten onrechte* aangeeft dat een bepaalde berekening niet is geconvergeerd met de methode FORM. Deze zijn *niet* verdisconteerd in de genoemde 80%. In appendix B wordt dit issue nader toegelicht aan de hand van een voorbeeld. Het percentage succesvolle berekeningen wordt uiteindelijk geschat op 80%.



Figuur 4-2 Het verloop van de berekende faalkans op jaarbasis langs de kustlijn van het kustvak Noord-Holland in het meest recente meetjaar: 2010. De omcirkelde letters refereren aan de deelgebieden uit figuur 4-1, de afkorting 'HBZW' aan de Hondsbossche Zeewering. Helemaal links: Den Helder, helemaal rechts: IJmuiden. De rode getallen geven enkele gemarkeerde raainummers aan.

Tabel 4-1 Resultaten van PC-Ring voor vijf goed scorende raaien en vijf slecht scorende raaien voor het jaar 2010. De faalkans is gegeven op jaarbasis; het afslagvolume is gegeven in m^3/m .

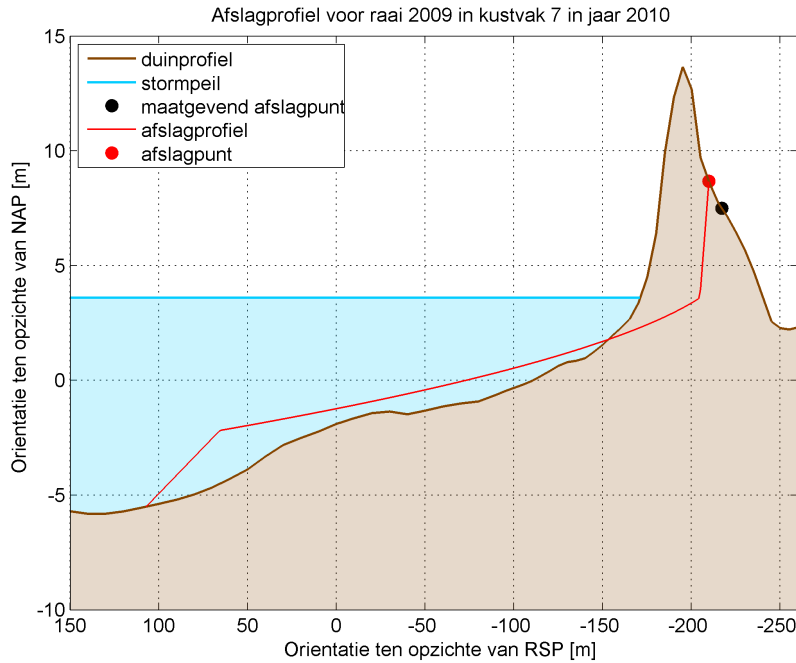
	Goede raaien			Slechte raaien		
	Jarkusraai	Faalkans	Afslagvolume	Jarkusraai	Faalkans	Afslagvolume
A	7000308	1.64E-13	1218	7000708	6.32E-06	578
B	7001213	1.39E-08	915	7001320	1.41E-05	688
C	7001791	2.98E-13	1053	7002009	4.19E-03	250
D	7002864	1.71E-12	824	7002923	1.18E-03	219
D	7004550	5.48E-09	1081	7004950	3.38E-03	328

4.3.1 Afslagprofielen

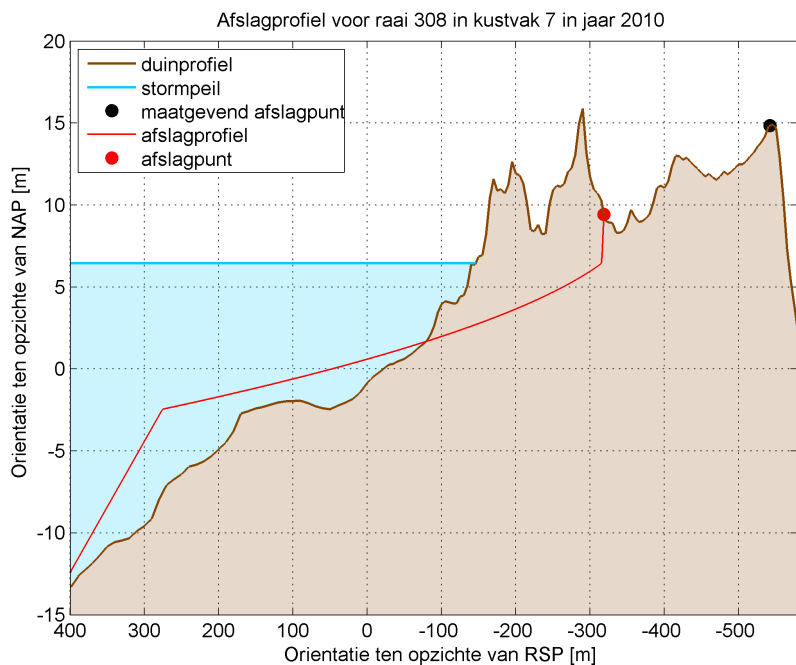
Bij de berekende faalkans hoort een set van stochastwaarden, die de bijbehorende optredende situatie representeren. Dit is feitelijk de set van waarden, waarbij het optreden van duinafslag het meest waarschijnlijk is: het zogeheten ontwerppunt. Dit ontwerppunt kan direct gevisualiseerd worden in het afslagprofiel. Voor de raai waarvoor in het jaar 2010 de hoogste faalkans berekend wordt in de regio met een relatief smalle duinenrij, raai 2009, is het afslagprofiel weergegeven in figuur 4-3.

Deze figuur toont het berekende afslagprofiel tezamen met het oorspronkelijke duinprofiel en geeft daarbij aan wat het hydraulisch belastingniveau is. De lokale waterstand bij raai 2009 die hoort bij de meest waarschijnlijke faalsituatie is 3.59 m +NAP. Als maatgevend afslagpunt wordt de locatie -217 m ten opzichte van de Rijksstrandpalenlijn (RSP) gegeven. Bij de bepaling van dit maatgevend afslagpunt zijn ook onzekerheden in stormvloedduur en buien in rekening gebracht. In figuur 4-3 zijn direct de figuren 3-1 en 3-2 te herkennen.

In figuur 4-4 wordt het afslagprofiel gegeven voor raai 308: de raai in het gebied met een relatief smalle duinenrij met de laagste faalkans. De verklaring voor het grote verschil in bere-



Figuur 4-3 Afslagprofiel voor raai 2009 in het jaar 2010. De rood en zwart gemarkeerde posities geven respectievelijk het afslagpunt zonder en met het meenemen van onzekerheden in stormduur, buien en berekeningsmethode aan. Het maatgevend afslagpunt is hier gelijk aan het kritieke afslagpunt (dus $X_a^* = X_k$ in uitdrukking 3-2 en figuur 3-2).



Figuur 4-4 Afslagprofiel voor raai 308 in het jaar 2010. De rood en zwart gemarkeerde posities geven respectievelijk het afslagpunt zonder en met het meenemen van onzekerheden in stormduur, buien en berekeningsmethode aan. Het maatgevend afslagpunt is hier gelijk aan het kritieke afslagpunt (dus $X_a^* = X_k$ in uitdrukking 3-2 en figuur 3-2).

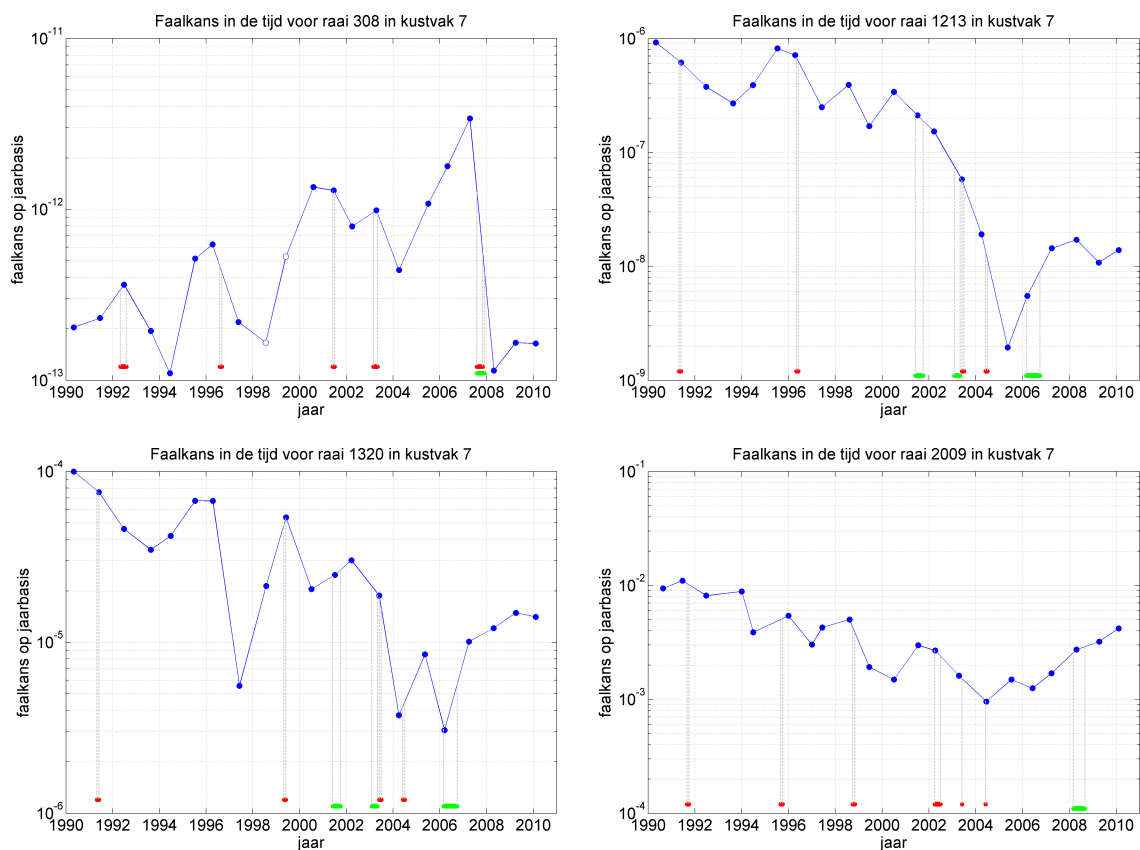
kende faalkans tussen raai 2009 (figuur 4-3) en raai 308 (figuur 4-4) is evident: de duinenrij bij raai 308 is een stuk omvangrijker dan bij raai 2009, waardoor een hoger hydraulisch belastingniveau is vereist.

4.3.2 Invloed van suppleties

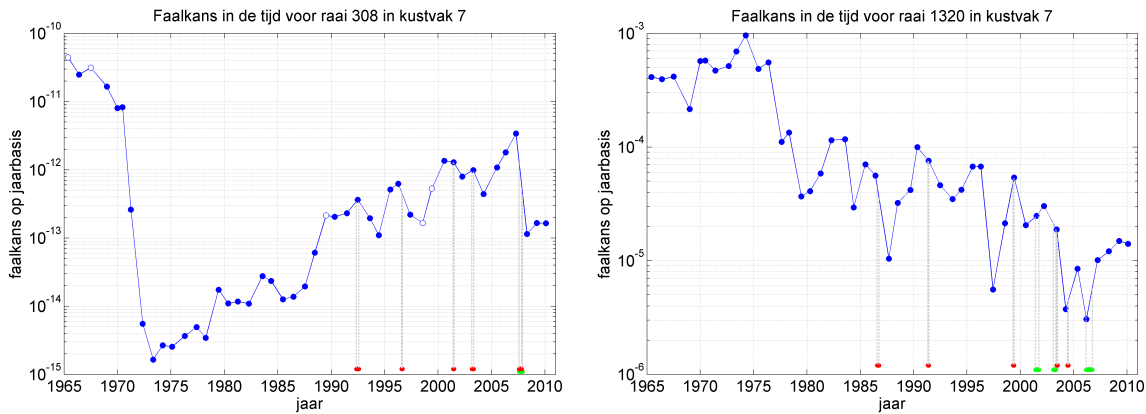
Om na te gaan in hoeverre de zandsuppleties hebben bijgedragen aan het verloop van de faalkans in de tijd, worden de volgende raaien nader belicht (zie ook figuur 4-2):

- raaien 1213 en 1320: deze twee raaien bevinden zich in deelgebied B, waar de duinenrij het smalst is; aangezien dit deelgebied intuïtief snel aangezien kan worden als de meest nuttige locaties voor zandsuppleties; binnen deelgebied B wordt voor raai 1213 de laagste faalkans en voor raai 1320 de hoogste faalkans berekend,
- raaien 308 en 2009: deze zijn de raaien waar over deelgebied A, B en C de laagste respectievelijk de hoogste faalkans wordt berekend.

Voor deze raaien is in figuur 4-5 het verloop van de faalkans weergegeven in de tijd, voor de periode 1990-2010. Juist deze periode is gekozen, vanwege het feit dat rond 1990 voor het eerst begonnen is met zandsuppleties aan de kust van Noord-Holland. In figuur 4-5 zijn tevens de perioden weergegeven waarin suppleties hebben plaatsgehad. Hierbij zijn met groene lijnen de vooroeversuppleties weergegeven en met rode lijnen de strandsuppleties.



Figuur 4-5 Het verloop van de faalkans in de tijd voor raaien 308, 1213, 1320 en 2009, weergegeven vanaf 1990. De groene lijnen geven perioden aan waarin vooroeversuppleties zijn uitgevoerd, de rode lijnen geven perioden aan waarin strandsuppleties zijn uitgevoerd. Blauwe bolletjes representeren geconvergeerde rekenresultaten, witte bolletjes representeren niet-geconvergeerde rekenresultaten.



Figuur 4-6 Het verloop van de faalkans in de tijd voor raaien 308 en 1320, weergegeven vanaf 1965. De groene lijnen geven perioden aan waarin vooroeversuppleties zijn uitgevoerd, de rode lijnen geven perioden aan waarin strandsuppleties zijn uitgevoerd. Blauwe bolletjes representeren geconvergeerde rekenresultaten, witte bolletjes representeren niet-geconvergeerde rekenresultaten.

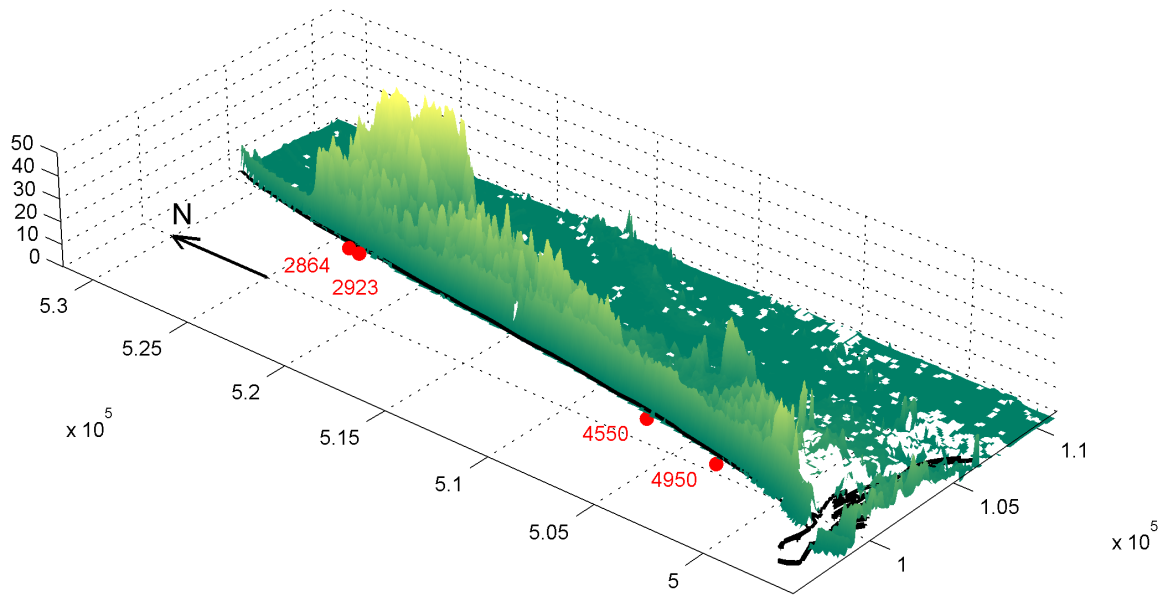
Elke van deze vier raaien kan nu afzonderlijk geanalyseerd worden:

- raai 308: figuur 4-5 laat zien dat de afgelopen 20 jaar de duinen bij deze raai behoorlijk solide zijn geweest. Indien we het eindpunt van een suppletieperiode als maatstaf hanteren, dan kunnen we vaststellen dat bij deze raai de zandsuppletie altijd effectief is geweest, dat wil zeggen: na het einde van een suppletieperiode daalt de faalkans. Opvallend zijn de suppleties in het jaar 2007: na deze suppleties is een enorme daling in de faalkans zichtbaar.
- raai 1213: het verloop van de faalkans in de tijd suggereert een zeer optimistisch beeld van de invloed van zandsuppleties. Met name de sterke daling in de faalkans in de periode 2000 tot 2005 veronderstelt een sterke correlatie tussen de suppletiestrategie en de veiligheid die de duinenrij biedt. In 2006 is hier sprake van een vooroeversuppletie die geen *direct* effect vertoont, mogelijk omdat deze buiten het berekende afslagprofiel gesitueerd is.
- raai 1320: de correlatie tussen de suppletiestrategie en het faalkansverloop in de tijd lijkt nagenoeg afwezig voor deze raai. De grootste daling in faalkans, namelijk in 1997, is niet direct toe te schrijven aan suppleties. Mogelijk speelt hier langtransport een rol; dit kan echter met de huidige methodiek niet direct in kaart gebracht worden.
- raai 2009: ook bij deze raai is de correlatie tussen de suppletiestrategie en het faalkansverloop in de tijd niet goed te identificeren.

Op basis van de plaatjes in figuur 4-5 is het moeilijk om tot eenduidige conclusies te komen over de relatie tussen zandsuppleties en het faalkansverloop in de tijd, omdat eventuele invloeden niet strikt kunnen worden gescheiden van de autonome ontwikkelingen. Daarom zullen we in de volgende paragraaf ons richten op de autonome ontwikkelingen en zullen we in paragraaf 4.5 een meer generieke statistische analyse uitvoeren.

4.3.3 Autonome ontwikkeling

Om de invloed van suppleties in een breder perspectief te kunnen plaatsen, is het noodzakelijk ook het autonome gedrag van het duinprofiel te bekijken door de tijd heen. Hiervan zijn twee voorbeelden getoond in figuur 4-6. Van de raaien 308, 1213, 1320 en 2009 zijn echter alleen de raaien 308 en 1320 bemeten vanaf het jaar 1965. Daarom is in figuur 4-6 alleen de autonome ontwikkeling getoond voor raaien 308 en 1320.



Figuur 4-7 Hoogteligging van het duingebied tussen de Hondsbossche Zeewering en de haven van IJmuiden volgens het Actueel Hoogtebestand Nederland (www.ahn.nl). Afstanden zijn in meters. De rode getallen verwijzen naar raainummers.

Figuur 4-6 biedt interessant extra inzicht in het faalkansverloop door de tijd heen. Geanalyseerd naar raai, kunnen de volgende ontwikkelingen worden geconstateerd:

- raai 308: figuur 4-6 laat een opmerkelijk daling in faalkans zien in de jaren '70. In deze periode neemt, om onbekende oorzaken, de faalkans af met een factor 10000. Na deze jaren '70 is over het algemeen een stijgende trend waar te nemen, waarbij de zandsuppleties een tamelijk marginale rol lijken te spelen.
- raai 1320: figuur 4-6 laat vanaf 1974 een grillige, dalende trend zien. Deze grilligheid laat zien dat het lastig is om algemene conclusies te trekken over de effectiviteit van zandsuppleties ten opzichte van de autonome trend door de jaren heen.

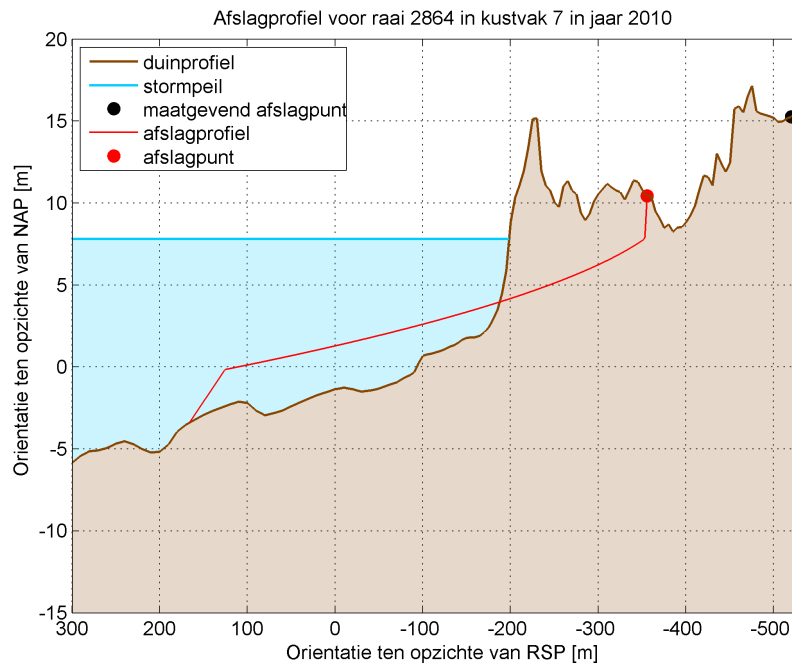
Het mede beschouwen van de autonome ontwikkelingen werpt dus een bijzonder licht op de resultaten.

Wel kan hoe dan ook worden gesteld dat veranderingen in de faalkans direct gekoppeld zijn aan ontwikkelingen in het Jarkusprofiel. Immers, het afslagprofiel, dat de basis vormt van de DUROS+ module, is direct gekoppeld aan het Jarkusprofiel dat als invoer wordt aangeboden.

4.4 Brede duinenrijen

In paragraaf 4.3 zijn de duinen geanalyseerd voor het gebied waar de duinen bestaan uit één enkele duinenrij met een relatief beperkte breedte (deelgebieden A, B en C). In deze paragraaf wordt de analyse uitgebreid naar het gebied waar de duinen relatief breed zijn en, bij nagenoeg elke Jarkusraai, bestaan uit meerdere duinenrijen (deelgebied D). Ter illustratie hiervan, is in figuur 4-7 de hoogteligging getoond voor het gebied tussen de Hondsbossche Zeewering en de haven van IJmuiden.

In paragraaf 2.2.4 is aangegeven hoe het duinprofiel ten behoeve van de faalkansberekening gereduceerd wordt tot één enkele duinenrij. We benadrukken andermaal dat hierbij dus als definitie voor de veiligheidsindicator de faalkans van *de eerste duinenrij* wordt gehanteerd. Deze



Figuur 4-8 Afslagprofiel voor raai 2864 in het jaar 2010. De rood en zwart gemarkeerde posities geven respectievelijk het afslagpunt zonder en met het meenemen van onzekerheden in stormduur, buien en berekeningsmethode aan. Het maatgevend afslagpunt is hier gelijk aan het kritieke afslagpunt (dus $X_a^ = X_k$ in uitdrukking 3-2 en figuur 3-2).*

kan derhalve, bij brede duinenrijen, geïnterpreteerd worden als een zeer conservatieve bovengrens voor de faalkans van de volledige duinenrij als geheel.

4.4.1 Afslagprofielen

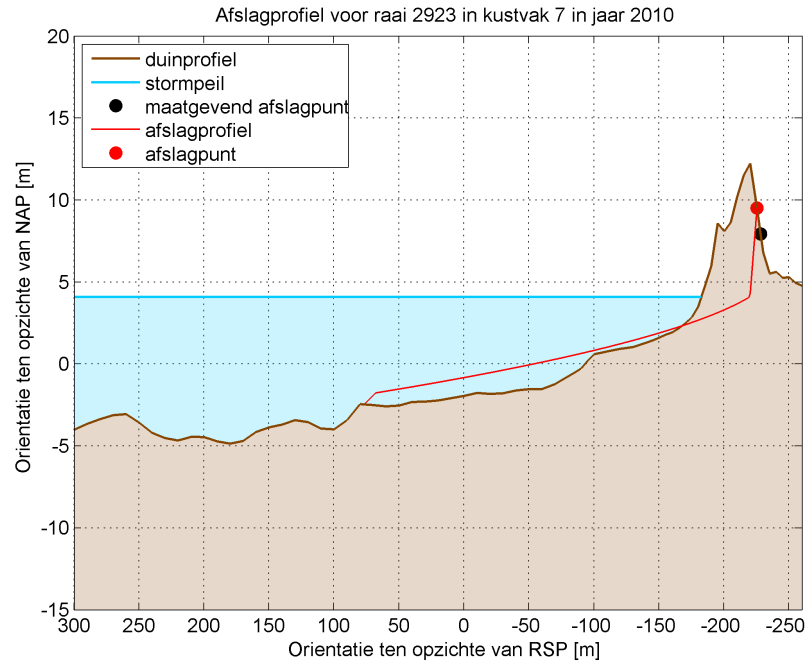
In de noordelijke helft van deelgebied D liggen de raaien, waarvoor de hoogste en de laagste faalkans worden berekend, slechts 500 m van elkaar verwijderd (cf. figuur 4-2). Daarom is het voor een goed begrip van het resultaat nuttig de bijbehorende afslagprofielen te beschouwen.

De afslagprofielen voor de raaien 2864 en 2923 zijn getoond in respectievelijk figuur 4-8 en figuur 4-9. Figuur 4-8 laat zien dat bij raai 2864 sprake is van een brede duinenrij van enkele honderden meters. Het laagste punt binnen deze brede duinenrij is relatief hoog gelegen: ca. 8 m +NAP.

Figuur 4-9 laat zien dat 500 m verderop, bij raai 2923, er een duidelijke afzonderlijke eerste duinenrij te onderscheiden valt. Deze eerste duinenrij is losgekoppeld van het achterliggende duinprofiel, omdat het laagste punt op ca. 5 m +NAP ligt. Het verder meenemen van het overige deel van het profiel zou convergentieproblemen leveren in PC-Ring.

De figuren 4-8 en 4-9 laten zien hoe lastig het is om tot een zuivere vergelijking te komen van duinprofielen, zolang er geen algemeen geaccepteerde definitie is van 'de eerste duinenrij'. Het geven van een dergelijke definitie zou in zichzelf tevens zeer lastig zijn, zeker wanneer complexere duinprofielen beschouwd worden, bijvoorbeeld bij de Noordzeekust van de Waddeneilanden.

Als we de figuren 4-8 en 4-9 in het perspectief zetten van figuur 4-7, dan kunnen we stellen dat, over de gehele duinbreedte, de duinprofielen voor raaien 2864 en 2923 sterk vergelijkbaar zijn:



Figuur 4-9 Afslagprofiel voor raai 2923 in het jaar 2010. De rood en zwart gemarkeerde posities geven respectievelijk het afslagpunt zonder en met het meenemen van onzekerheden in stormduur, buien en berekeningsmethode aan. Het maatgevend afslagpunt is hier gelijk aan het kritieke afslagpunt (dus $X_a^ = X_k$ in uitdrukking 3-2 en figuur 3-2).*

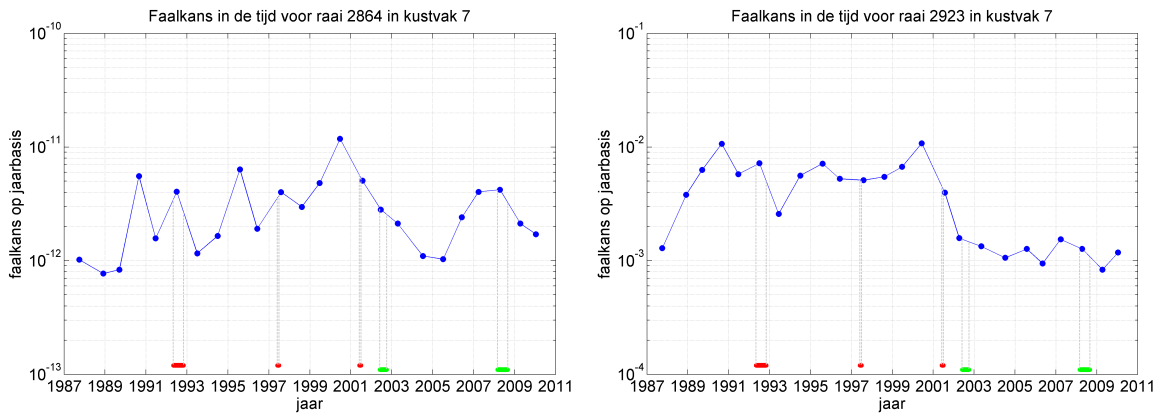
erg breed (ca. 4 km) en erg hoog (tot ca. 40 m +NAP). Op het moment dat voor duinafslag van de smalle eerste duinenrij van raai 2923 een faalkans van $1.18E-03$ berekend wordt en voor de brede eerste duinenrij van raai 2864 een faalkans van $1.17E-12$, dan kan rustig gesteld worden dat in het noordelijk gedeelte van deelgebied D de duinen nooit zullen falen over de gehele breedte.

Figuur 2-2 toont op welke locaties langs de kust van kustvak Noord-Holland zand is gesuppleerd. Gesteld kan worden dat bij de raaien 2864 en 2923 intensief is gesuppleerd. Bij de raaien 4550 en 4950 zijn nooit zandsuppleties uitgevoerd. Gegeven het zeer uitgestrekte duinprofiel en de brede eerste duinenrij, kan de vraag gesteld worden of het zinvol is zand te suppleren om veiligheidsredenen bij duinen zoals raai 2864: bij dit type duinen is falen van de duinenrij als geheel hoe dan ook zeer onwaarschijnlijk. Wel kan, in gevallen zoals raai 2923, de eerste duinenrij versterkt worden, maar dat zal dan weinig toevoegen aan de veiligheid van de duinenrij als geheel.

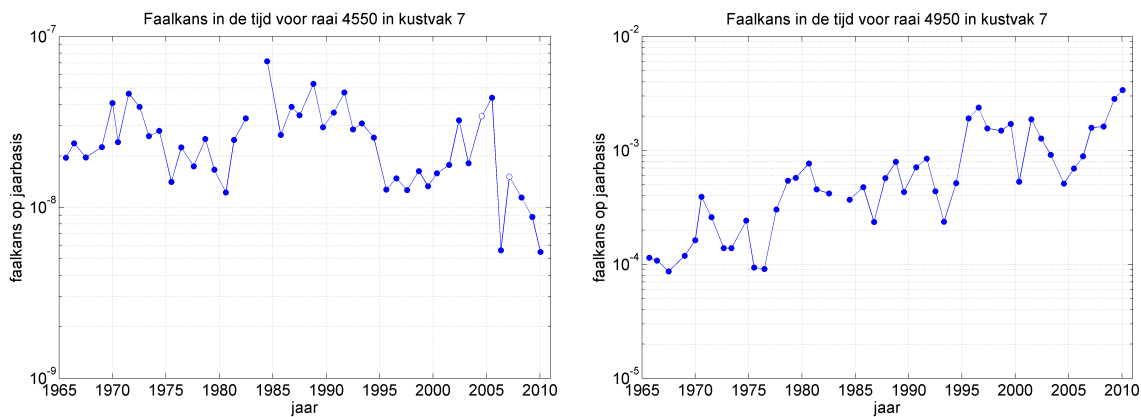
In het zuidelijke gedeelte van deelgebied D zijn nauwelijks zandsuppleties uitgevoerd; ter plaatse van de raaien 4550 en 4950 zijn nooit zandsuppleties uitgevoerd. Ook bij deze twee raaien is het verschil in berekende faalkans te verklaren aan de hand van het profiel. Ter hoogte van het stormpeil heeft raai 4550 een duinbreedte van ca. 180 m, terwijl deze bij raai 4950, ter hoogte van het stormpeil, ca. 50 m bedraagt (eerste duinenrij).

4.4.2 Invloed van suppleties

In figuur 4-10 zijn de berekende resultaten voor de faalkans voor de raaien 2864 en 2923 weergegeven als functie van de tijd. Hierbij is alleen gekeken naar de ontwikkeling vanaf het jaar 1987, aangezien daarvóór voor een aanzienlijk aantal jaren geen meetdata bekend zijn.



Figuur 4-10 Het verloop van de faalkans in de tijd voor raaien 2864 en 2923, weergegeven vanaf 1987. De groene lijnen geven perioden aan waarin vooroeversuppleties zijn uitgevoerd, de rode lijnen geven perioden aan waarin strandsuppleties zijn uitgevoerd.



Figuur 4-11 Het verloop van de faalkans in de tijd voor raaien 4550 en 4950, weergegeven vanaf 1965. Bij deze raaien zijn nooit zandsuppleties uitgevoerd. Blauwe bolletjes representeren geconvergeerde rekenresultaten, witte bolletjes representeren niet-geconvergeerde rekenresultaten.

Voor zowel raai 2864 (brede eerste duinenrij) en raai 2923 (smalle eerste duinenrij) zijn de conclusies ten aanzien van de invloed van suppleties hetzelfde: de strandsuppleties bewerkstelligen in de meeste gevallen een verlaging van de berekende faalkans; vooroeversuppleties tonen een geringe *momentane* invloed op de berekende faalkans. In het kader van de vooroeversuppleties dient opgemerkt te worden dat deze vaak plaats hebben gehad buiten het bereik van het afslagprofiel.

In figuur 4-11 is het verloop van de faalkans in de tijd getoond voor de raaien 4550 en 4950. Bij deze raaien heeft, over de volledige periode van 1965 tot en met 2010, nooit een zandsuppletie plaatsgehad. Daarom is de ontwikkeling van de faalkans alleen toe te schrijven aan de autonome ontwikkeling van het duinprofiel.

Figuur 4-11 laat zien dat voor raai 4550 de faalkans tot het jaar 2005 schommelt rond de $3.0E-08$ per jaar; na 2005 worden duidelijk lagere waarden gevonden. Over het algemeen verandert er niet veel in de faalkans, hetgeen direct te verklaren is uit de ontwikkeling van het profiel door de jaren heen: dat verschilt nauwelijks.

Figuur 4-11 laat voor raai 4950 echter een duidelijke stijgende trend in de faalkans zien: van ca. $1.0E-04$ per jaar in 1965 tot $3.0E-03$ per jaar in 2010, een stijging van een factor 30. Deze stijging is een duidelijke weerslag van de verzwakking van de eerste duinenrij ter plaatse van raai 4950. Over de gehele periode van 1965 tot en met 2010 is het *type* profiel constant (een geprononceerde eerste duinenrij), maar is de *omvang* duidelijk verschillend: de hoogte neemt af van 20 m +NAP naar 18 m +NAP en de breedte ter hoogte van het stormpeil neemt af van ca. 80 m tot ca. 50 m.

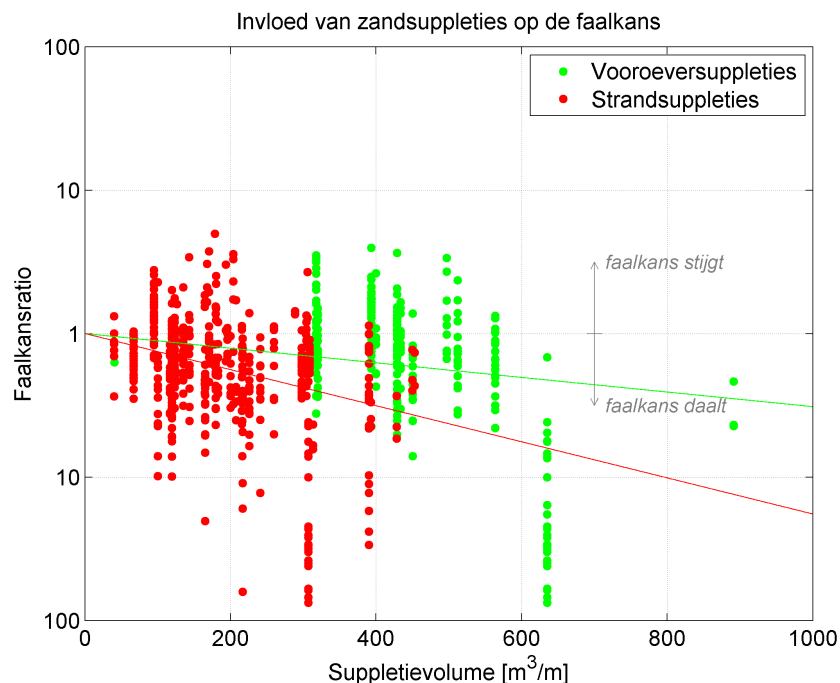
4.5 Relatie tussen suppleties en faalkans

De analyse in de paragrafen 4.3 en 4.4 heeft zich beperkt tot slechts enkele raaien. In deze paragrafen is enkele malen reeds ingegaan op de relatie tussen de faalkans voor duinafslag en de uitgevoerde suppleties. In deze paragraaf willen we een algemeen beeld schetsen van de relatie tussen het gesuppleerde zandvolume en de *momentane* invloed daarvan op de faalkans.

Om tot een dergelijk beeld te komen, hanteren we voor de verandering in faalkans de *ratio* van de faalkans in het jaar j en de faalkans in het jaar $j - 1$, dus P_j/P_{j-1} .

Om de zandsuppleties in kaart te brengen, hanteren we de *hoeveelheid* gesuppleerd zand: het suppletievolume V (in kubieke meters per strekkende meter). De gegevens voor de hoeveelheid gesuppleerd zand zijn direct uit te lezen uit de database OpenEarth.

We beschouwen nu per Jarkusraai of er in het jaar vóór het inmeten ervan, een periode van uitvoering van zandsuppleties beëindigd is. Indien dat het geval is, dan wordt de faalkansratio P_j/P_{j-1} bepaald en in een figuur uitgezet tegen het bewuste suppletievolume V . Het resultaat is getoond in figuur 4-12.



Figuur 4-12 Relatie tussen de momentane verandering in faalkans en het suppletievolume, voor elk jaar waarin een zandsuppletie daadwerkelijk is uitgevoerd.

Voor zowel de strandsuppleties als voor de vooroeversuppleties is een dalende trend waarneembaar. Op basis van de resultaten kunnen deze trends als volgt in beeld gebracht worden. Voor

de strandsuppleties is af te leiden:

$$\log \frac{P_j}{P_{j-1}} = -\frac{V}{700} \quad (4-1)$$

en voor de vooroeversuppleties is af te leiden:

$$\log \frac{P_j}{P_{j-1}} = -\frac{V}{3300}. \quad (4-2)$$

Op basis van de vuistregel 4-1 kan dus grofweg gesteld worden dat de faalkans afneemt met een factor 10, indien er 700 m³/m zand gesuppleerd wordt op het strand, en dat deze een factor 100 afneemt, indien er 1400 m³/m zand op het strand gesuppleerd wordt.

Figuur 4-12 wekt de suggestie dat strandsuppleties aanzienlijk effectiever zijn dan vooroeversuppleties. Ten aanzien van figuur 4-12 en vuistregels 4-1 en 4-2 dienen echter drie belangrijke voorbehouden gemaakt te worden:

1. De resultaten beschrijven alleen de *initiële* effecten van zandsuppleties. Er is immers alleen gekeken naar de relatie tussen een zandsuppletie en de faalkans *binnen één jaar* na suppleren. Hiermee worden spatiële invloeden (het verplaatsen van zandvolumina door langtransport) en temporele invloeden (het mogelijk meerjarig effect van een zandsuppletie) *niet* meegenomen in de beschouwing.
2. Afgezien van meerjarige effecten, kan er niet altijd onderscheid worden gemaakt tussen strandsuppleties en vooroeversuppleties, indien deze *beide* zijn uitgevoerd in het jaar vóór de profielmeting van een Jarkusraai.
3. De locatie, waar de zandsuppletie exact heeft plaatsgehad bij een zekere raai, valt bij *vooroeversuppleties* regelmatig buiten het bereik van het afslagprofiel zelf. Hierdoor is de invloed van de vooroeversuppletie, in de vorm van een profielverandering, niet altijd zichtbaar.

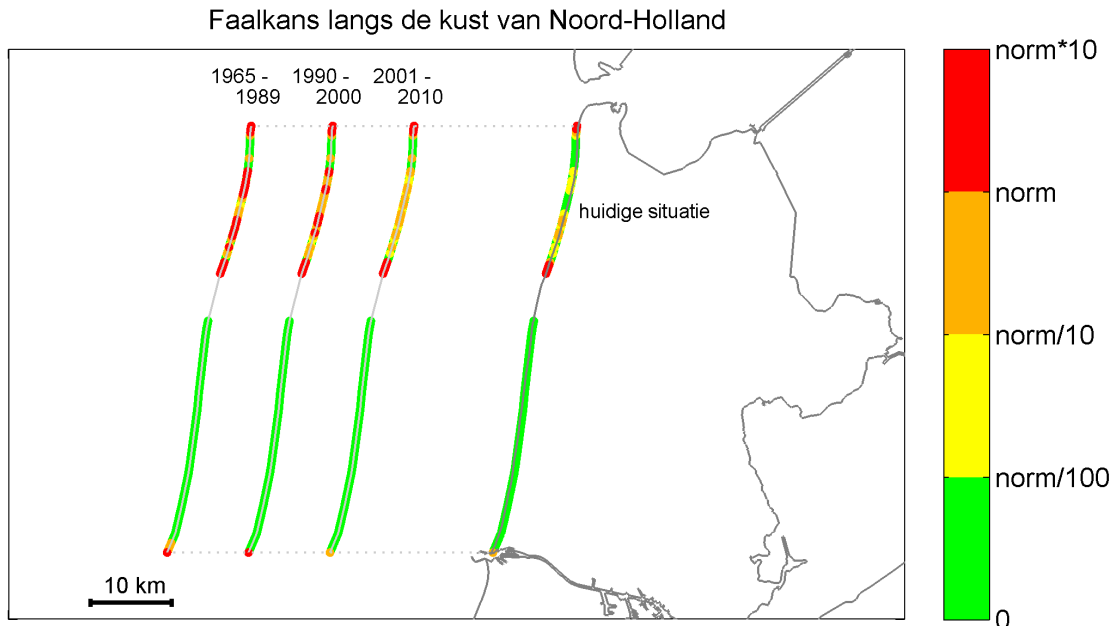
Een interessante illustratie van het tweede en derde voorbehoud, tegelijkertijd, is raai 308. Eerder zagen we in figuur 4-4 dat het invloedsbereik van het afslagprofiel bij deze raai vaak zeer groot is: in het jaar 2010 omvat het afslagprofiel bij raai 308 circa 800 meter, tot ruim 400 m zeewaarts van de Rijksstrandpalenlijn. In figuur 4-5 (linksboven) zagen we dan ook een enorme reductie in de faalkans van jaar 2007 naar 2008: een periode waarin zowel een strandsuppletie als een vooroeversuppletie is uitgevoerd. Gezien het enorme bereik van het afslagprofiel, worden dus én de strandsuppletie én de vooroeversuppletie in de faalkansberekening meegenomen.

4.6 Het kustvak Noord-Holland door de jaren heen

Met de thans beschikbare rekenresultaten uit PC-Ring is het mogelijk om de faalkansen voor duinafslag zowel in de ruimte als in de tijd in kaart te brengen. Voor het kustvak Noord-Holland onderscheiden we daarbij drie perioden:

- het tijdvak 1965-1989: een periode waarin geen zandsuppleties zijn toegepast in dit kustvak en waarin het kustprofiel dus puur wordt bepaald door autonome ontwikkelingen,
- het tijdvak 1990-2000: een periode waarin de eerste zandsuppleties zijn toegepast, gericht op het behoud van de kustlijn,
- het tijdvak 2001-2010: een recente periode waarin zandsuppleties zijn toegepast, gericht op het behoud van de kustvolumes.

Voor de gehele kustlijn van het kustvak Noord-Holland zijn in figuur 4-13 de *hoogste*, berekende faalkansen getoond per Jarkusraai. Deze *maximale* faalkansen (bepaald per periode) zijn uitge-



Figuur 4-13 De maximale berekende faalkans voor duinafslag (op jaarbasis) voor Noord-Holland gedurende de periode 1965 t/m 2010, gerelateerd aan de overschrijdingsnorm voor de hydraulische belasting (normfrequentie 1/10.000).

drukt in termen van de overschrijdingsnorm voor de hydraulische belasting, zijnde de frequentie 1/10.000 per jaar, gebruik makende van vier verschillende gradaties (van groen tot rood). Tevens is de meest recente situatie (het jaar 2010) weergegeven.

In figuur 4-13 is tevens rekening gehouden met het voorkomen van brede duinenrijen (vgl. figuur 4-1). Aangezien het gebied ten zuiden van de Hondsbossche Zeewering zeer breed is, zijn in dit gebied de berekende faalkansen ten behoeve van figuur 4-13 geïnterpreteerd als conservatieve bovengrenzen. Hierdoor ontstaat een faalkans voor de duinenrij als geheel die klein is ten opzichte van de overschrijdingsnorm.

4.7 De Hondsbossche Zeewering

Tot zover is de analyse uitgevoerd voor de duinenkust van kustvak Noord-Holland. Binnen dit kustvak is echter over een afstand van 5.5 km de zeedijk 'Hondsbossche Zeewering' gelegen nabij Petten en een zeedijk nabij Den-Helder. Omdat deze studie zich alleen richt op duinafslag, zal de veiligheid van de zeedijken niet uitputtend worden geanalyseerd. Toch willen we, vanwege haar significante lengte, enige aandacht besteden aan de Hondsbossche Zeewering, en wel op de aspecten overslag en piping op doorsnedeniveau.

De faalkans voor het mechanisme overloop/golfoverslag wordt standaard in PC-Ring berekend met het zogeheten CIRIA model. Hierbij wordt de hoeveelheid zand aan de zeezijde van de waterkering *niet* meegenomen. Wat het CIRIA wél meeneemt is de sterkte van de grasmat aan de landzijde van de waterkering (cf. TNO (2007)). Hiermee wordt de hoeveelheid water berekend, die stroomt over de waterkering, met daaraan gekoppeld het gevolg dat de landzijde van de waterkering erodeert.

Tabel 4-2 geeft de resultaten voor de faalkans voor het mechanisme overloop/golfoverslag. Hieruit blijkt dat de invloed van de grasmat een tamelijk grote invloed heeft op de kans op falen

Tabel 4-2 Faalkansen voor het mechanisme overloop/golfoverslag voor raai 3300, volgens het CIRIA model in PC-Ring. De overschrijdingsnorm is eens in de 10.000 jaar.

Type grasmat	faalkans op jaarbasis
Goede grasmat	4.50E-05
Matige grasmat	2.14E-04
Slechte grasmat	4.21E-04

voor dit mechanisme. Het gebruikte dijkprofiel is representatief voor de gehele dijk.

Bij het mechanisme opbarsten en piping bezwijkt de dijk doordat het zand eronder wordt weggespoeld. Door de druk van het water zal eerst, indien aanwezig, de afsluitende laag opbarsten. Vervolgens kunnen 'pijpen' ontstaan waardoor het zand wegspoelt. Piping kan in PC-Ring worden doorgerekend met de formule van Sellmeijer. De benodigde gegevens hiervoor, zoals doorlatenheid, dikte van de deklaag, de korreldiameter, etc., zijn beschikbaar en kunnen direct worden ingevoerd in PC-Ring. Op basis hiervan wordt een faalkans gelijk aan $7.10E-09$ berekend.

De berekende waarden voor de faalkans zeggen echter niet heel veel: een grondige analyse van de invoerparameters en hun invloed (gemiddelde waarde en standaardafwijking) op de uitkomst zou nuttig voor een goed begrip van de faalmechanismen voor deze kering. Aangezien de voorliggende studie zich primair richt op duinafslag, wordt de Hondsbossche Zeewering verder niet uitputtend uitgewerkt.

4.8 Conclusies

Met behulp van PC-Ring zijn faalkansberekeningen uitgevoerd voor het mechanisme duinafslag, voor de volledige kustlijn van het kustvak Noord-Holland, voor de jaren 1965 tot en met 2010. Bij de analyse van de faalkans als indicator voor veiligheid, is als maat de faalkans van de *eerste duinenrij* gehanteerd, aangezien het achterliggende model DUROS+ niet geschikt is voor meerdere duinenrijen.

In de noordelijke helft van het kustvak Noord-Holland (raaien 150 - 2009) is er sprake van een relatief smalle duinenrij die over het algemeen kan worden beschouwd als één enkele duinenrij. In de zuidelijke helft (raaien 2606 - 5200) is de duinenrij relatief breed en is er langs de kuststrook gedeeltelijk sprake van een zeer brede eerste duinenrij en gedeeltelijk van een tamelijk smalle duinenrij.

De faalkans van een zeer *brede eerste* duinenrij is over het algemeen van de orde 10^{-8} (of lager) op jaarbasis; voor een tamelijk *smalle* duinenrij is dat over het algemeen van de orde 10^{-3} .

De zwakste duinenrijen worden vlak ten noorden van de Hondsbossche Zeewering gevonden: de duinenrij is daar relatief smal (< 100 m) en niet bijzonder hoog (ca. 13 m +NAP). Omdat bij een brede *brede eerste* duinenrij ook het afslagprofiel vaak relatief breed is, kunnen vooroeversuppleties beter worden meegenomen in de afslagberekening (bijvoorbeeld in het gebied tussen raai 150 en 708).

De *initiële* invloed van vooroeversuppleties op de faalkans is tamelijk zwak: voor een daling van de faalkans met een factor 10, is gemiddeld genomen ruim $3000 \text{ m}^3/\text{m}$ zand nodig. Strandsuppleties lijken effectiever te zijn: voor een daling van de faalkans met een factor 10, is gemiddeld genomen ca. $700 \text{ m}^3/\text{m}$ zand nodig.

Opgemerkt dient nog te worden dat het berekenen van een hoge faalkans voor duinafslag van de eerste duinenrij, ter plaatse van een in totaliteit brede duinenrij, niet per se een indicator is voor gebrekkige veiligheid van de volledige duinenrij.

5 Analyse van de strandbreedte

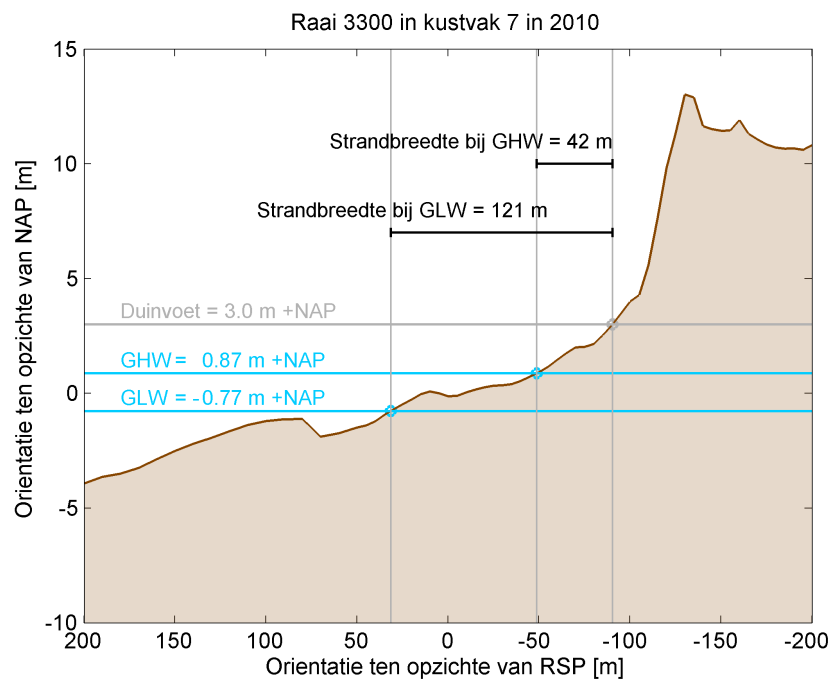
5.1 Inleiding

In paragraaf 3.3 is de methode beschreven, waarop in het kader van deze studie voor een bepaald duinprofiel de strandbreedte is bepaald, zowel bij Gemiddeld HoogWater (GHW) als bij Gemiddeld LaagWater (GLW).

In dit hoofdstuk worden de resultaten getoond voor de duinprofielen in het kustvak Noord-Holland. Daartoe zal eerst de methodiek worden geïllustreerd aan de hand van een voorbeeld, en zullen daarna vuistregels afgeleid worden voor de strandbreedte in relatie tot het gesuppleerde zandvolume.

5.2 Illustratie van de methode

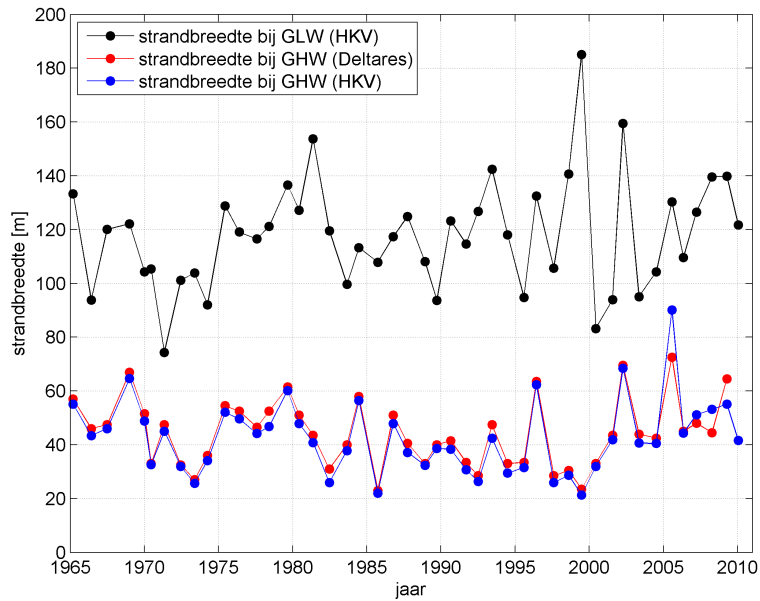
Voor de bepaling is van de strandbreedte, zowel bij GHW als bij GLW, zijn in totaal drie punten van het duinprofiel nodig: de duinvoet (gelegen op 3 m +NAP in kustvak Noord-Holland), het snijpunt van het duinprofiel met de GHW-lijn en het snijpunt van het duinprofiel met de GLW-lijn.



Figuur 5-1 De bepaling van de strandbreedte, geïllustreerd aan de hand van het duinprofiel ter plaatse van raai 3300. Het meetjaar is 2010.

De methode voor de bepaling van de strandbreedte kan direct wordt geïllustreerd aan de hand van een voorbeeld. Als voorbeeld hanteren we raai 3300, in het jaar 2010. Figuur 5-1 toont voor deze raai de directe weergave van de drie relevante punten voor de bepaling van de strandbreedte. De waarden van het GHW en GLW zijn direct gebruikt vanuit de online database OpenEarth. Het resultaat van de methode is een breedte van 42 m voor het droge strand en een breedte van 121 m voor het totale strand, inclusief het 'natte' gedeelte.

Om enig inzicht te krijgen in de voorgeschiedenis van de strandbreedte ter plaatse van raai



Figuur 5-2 Berekende strandbreedte door de jaren heen, voor kustvak 7, raai 3300. In zwart: strandbreedte bij laagwater, in blauw: strandbreedte bij hoogwater. GHW staat voor Gemiddeld HoogWater en GLW staat voor Gemiddeld LaagWater.

3300, is in figuur 5-2 getoond hoe aldaar de strandbreedte varieert van 1965 tot en met 2010. Figuur 5-2 laat voor de strandbreedte bij zowel GHW als bij GLW een grillig karakter zien. Voor de koppeling met de uitgevoerde zandsuppleties is tabel 5-1 toegevoegd.

Tabel 5-1 Suppletiegegevens voor raai 3300.

Type	maand	jaar	volume [m^3]	volume p.e.v.b. [m^3/m]
Strandsuppletie	mei	1990	385.774	257
Strandsuppletie	mei	1992	1.472.640	120
Strandsuppletie	juni	1994	100.683	168
Strandsuppletie	mei	1995	306.000	306
Strandsuppletie	juni	1997	352.000	144
Strandsuppletie	april	1999	205.793	165
Vooroeversuppletie	april	2000	994.000	497
Strandsuppletie	juni	2000	225.000	450
Strandsuppletie	april	2005	300.000	200
Vooroeversuppletie	augustus	2005	1.262.364	269

Uit figuur 5-2 wordt duidelijk dat de momentane strandbreedte sterk kan variëren in de tijd. Het is gebleken dat de variatie in de ligging van de zeegrens de grootste invloed heeft op de variatie in de strandbreedte, groter dan de invloed van de duingrens.

Voor raai 3300 lijkt er een zwak statistisch verband te bestaan tussen de strandbreedte en de strandsuppleties (figuur 5-2). Immers, in 2001 en 2005 is de strandbreedte wel iets toegenomen, maar relatief weinig in vergelijking met jaren waarin niet gesuppleerd is. In het jaar 2002 is een duidelijke toename van de strandbreedte te zien, zonder dat er gesuppleerd is. Mogelijk is dit een gevolg van suppleties ten zuiden van de raai.

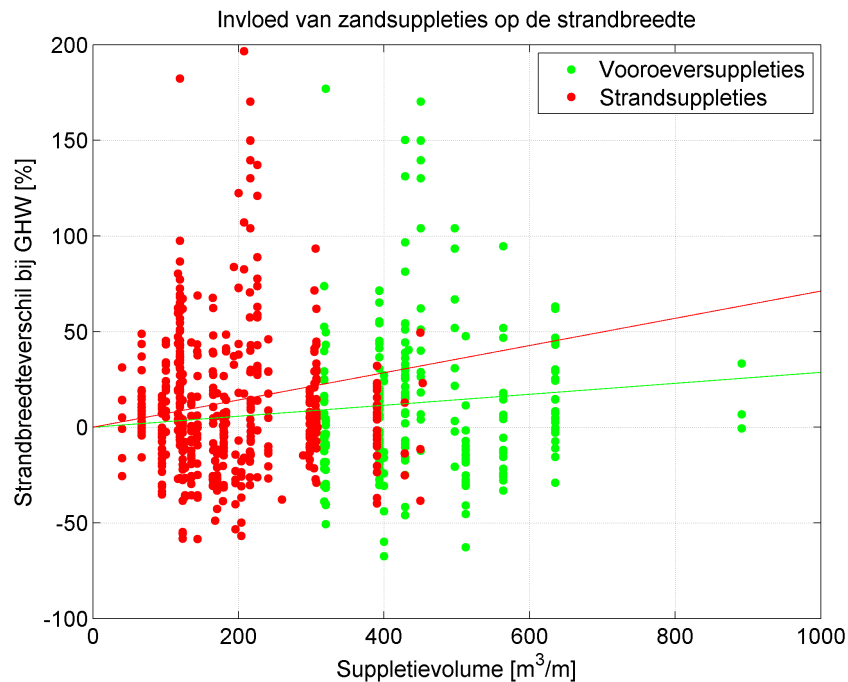
Overigens laat figuur 5-2 zien dat er slechts marginale verschillen zijn tussen de methode waarmee Deltares de strandbreedte bij GHW heeft bepaald, en de methode waarmee HKV LIJN IN WATER dat heeft gedaan. Slechts incidenteel is het verschil groter dan 10 m. Waarschijnlijk zijn de kleine verschillen tussen de 'methode Deltares' en de 'methode HKV' voornamelijk het resultaat van enigszins verschillende methoden waarmee de 'gaten' in de Jarkusmetingen worden opgevuld. Ook is het mogelijk dat detailverschillen in de implementatie een rol spelen.

5.3 Relatie met suppleties

Om de invloed van de suppleties op de eventuele toename van de strandbreedte in kaart te brengen, beschouwen we het percentuele verschil in de strandbreedte ΔB , in jaar j , volgens:

$$\Delta B_j = 100 \cdot \frac{B_j - B_{j-1}}{B_{j-1}}, \quad (5-1)$$

en zetten de waarden hiervan uit tegen het volume van het gesuppleerde zand V (in kubieke meters per stekkende meter). Het resultaat hiervan is getoond in figuur 5-3 voor de strandbreedte bij GHW. In deze figuur zijn zowel de strandsuppleties (in rood) als de vooroever-suppleties (in groen) beschouwd.



Figuur 5-3 Het verschil in strandbreedte, bij GHW, in procenten uitgezet tegen het suppletievolumen.

De figuur 5-3 is tot stand gekomen door voor elk einde van een suppletieperiode de strandbreedte te bepalen zowel vóór als na het eind van de suppletieperiode.

Uit de figuren kunnen vuistregels worden afgeleid die grofweg de relatie beschrijven tussen het strandbreedteverschil ΔB_j en het suppletievolumen V . Bij GHW kan worden afgeleid dat:

$$\Delta B = \begin{cases} 0.0712 \cdot V & \text{voor strandsuppleties} \\ 0.0287 \cdot V & \text{voor vooroever-suppleties} \end{cases}$$

Dit zou dus betekenen dat voor elke 100 m³/m die gesuppleerd wordt op het strand, het strand gemiddeld circa 7% breder is, het jaar ná het uitvoeren van de suppletie.

Net als bij de analyse van de faalkans, dient bij de strandbreedte het voorbehoud gemaakt te worden, dat er in een aantal jaren zowel een strandsuppletie als een vooroeversuppletie is uitgevoerd. Hierdoor is niet altijd direct te verklaren of de toename komt door ofwel de strandsuppleties ofwel de vooroeversuppleties. Gezien een directe invloed van strandsuppleties op het strand realistischer is dan een directe invloed van vooroeversuppleties, wordt de invloed van suppleties in dit verband toegeschreven aan de strandsuppleties. De *initiële* invloed van vooroeversuppleties op de strandbreedte wordt derhalve zwak geacht.

5.4 Conclusies

Voor de kustlijn van het kustvak Noord-Holland zijn de strandbreedtes bepaald bij zowel Gemiddeld HoogWater (GHW) als bij Gemiddeld LaagWater (GLW). Over het algemeen laten de strandbreedtes in het verloop van de jaren een tamelijk grillig verloop zien.

Niettemin heeft een statistische analyse van de resultaten laten zien dat de strandsuppleties netto een strandverbredende invloed hebben gehad. Bij GHW heeft elke 100 m³/m gemiddeld een strandbreedtetoenname van ca. 7% tot gevolg.

De analyse heeft tevens uitgewezen dat de verschillen tussen de methode waarop Deltares de strandbreedte bij GHW bepaalt zeer weinig verschilt van de methode waarop HKV LJDN IN WATER deze bepaalt. Deze verschillen kunnen waarschijnlijk worden verklaard door het voorkomen van enige verschillen in de manier waarop Jarkusprofielen worden aangevuld op plekken waar meetdata missen.

6 Synthese

6.1 Methodiek

In de voorliggende studie is een analyse uitgevoerd van twee indicatoren voor kustlijnzorg: veiligheid en recreatie. Als indicator voor veiligheid is uitgegaan van *de faalkans van de eerste duinenrij* en als indicator voor recreatie is uitgegaan van *de strandbreedte bij gemiddeld hoogwater en gemiddeld laagwater*.

De inhoudelijke analyse is uitgevoerd voor het kustvak Noord-Holland. Daartoe zijn voor 225 raaien voor 46 jaren (1965 - 2010) Jarkusprofielen samengesteld op basis van beschikbare meetresultaten vanuit de online database OpenEarth. Deze Jarkusprofielen zijn vervolgens gebruikt om met behulp van het probabilistische rekenmodel PC-Ring faalkansen te berekeningen voor het mechanisme duinafslag, voor elk van de 225 raaien, voor elk van de 46 jaren.

In totaal zijn faalkansberekeningen uitgevoerd voor 10 verschillende kustvakken van de Nederlandse kust, namelijk:

- Hollandse kust: Noord-Holland, Rijnland en Delfland (kustvakken 7, 8 en 9),
- Waddeneilanden: Ameland, Terschelling, Vlieland, Texel (kustvakken 3, 4, 5 en 6),
- Deltakust: Goeree, Schouwen, Walcheren (kustvakken 12, 13 en 16).

Met behulp van de gegevens voor de duinvoet (staat vast voor Noord-Holland), het Gemiddeld HoogWater (GHW) en het Gemiddeld LaagWater (GLW) (beide uit OpenEarth), is tevens voor elke raai in Noord-Holland, in elk jaar, de strandbreedte (bij GHW en bij GLW) berekend.

Zowel voor de analyse van de faalkans als van de strandbreedte, is een koppeling gelegd tussen de berekende resultaten enerzijds en de hoeveelheid gesuppleerd zand anderzijds, zowel aan de vooroever als aan het strand. In het voorliggende rapport zijn alleen de resultaten voor het kustvak Noord-Holland geanalyseerd en gerapporteerd.

6.2 Conclusies

Wat betreft de faalkans, zijn uit de studie de volgende conclusies naar boven gekomen:

- Voor relatief brede duinenrijen wordt in de regel een faalkans van de orde 10^{-8} of lager berekend (op jaarbasis), voor relatief smalle duinenrijen een faalkans van de orde 10^{-3} .
- Ten noorden van de Hondsbossche Zeewering (raaien 150 - 2009) bestaan de duinen over het algemeen uit één enkele duinenrij, ten zuiden ervan (raaien 2606 - 5200) uit meerdere. In de zuidelijke helft dient dus de faalkans in nauwe samenhang met het duinprofiel geïnterpreteerd te worden.
- Vooroeversuppleties hebben een zwakke instantane invloed op de faalkans; vaak vallen de vooroeversuppleties buiten het bereik van het berekende afslagprofiel. Het bereik van het afslagprofiel hangt echter sterk samen met de breedte van de beschouwde duinenrij. Voor elke instantane daling van de faalkans met een factor 10 is gemiddeld ruim $3000 \text{ m}^3/\text{m}$ aan zand op de vooroever nodig. Het statistische verband is echter tamelijk zwak.
- Strandsuppleties zijn aanzienlijk effectiever als het gaat om de instantane verlaging van de faalkans van de eerste duinenrij. Voor elke daling van de faalkans met een factor 10 is gemiddeld circa $700 \text{ m}^3/\text{m}$ aan zand op het strand nodig.
- De meest succesvolle suppletieactiviteit in Noord-Holland zijn de suppleties (zowel vooroever- als strand-) in de kop van Noord-Holland geweest in 2007, tussen de raaien 150 en 708. In deze periode zijn in dit gebied faalkansverlagingen met meer dan een factor 50 waargenomen. Dit is mede te verklaren door het duinprofiel: aangezien de eerste duinenrij

relatief breed is, is ook het afslagprofiel relatief breed, waardoor zowel de strandsuppleties als de vooroeversuppleties kunnen worden meegenomen in de berekening. Hoe smaller de eerste duinenrij, des te kleiner is mogelijkheid dat de vooroeversuppletie in de afslagberekening wordt meegenomen.

Wat betreft de strandbreedte, zijn uit de studie de volgende conclusies naar boven gekomen:

- Door de jaren heen, vertoont de strandbreedte, zowel bij GHW als bij GLW, een behoorlijk grillig verloop, die geen natuurlijke trend toont.
- Bij GHW is ten behoeve van iedere toevoeging van 7% aan de strandbreedte 100 m³/m strandsuppletie nodig en voor iedere toevoeging van 3% aan de strandbreedte 100 m³/m vooroeversuppletie nodig.
- De analyse heeft tevens uitgewezen dat de verschillen tussen de methode waarop Deltares de strandbreedte bij GHW bepaalt zeer weinig verschilt van de methode waarop HKV [LIJN IN WATER](#) deze bepaalt. Deze verschillen zijn waarschijnlijk het resultaat van enige verschillen in de manier waarop Jarkusprofielen worden aangevuld op plekken waar meetdata missen.

6.3 Aanbevelingen

Op basis van deze studie, zijn de volgende zaken aan te bevelen:

- Het uitbreiden van de analyse naar de resultaten voor overige gedeelten van de Nederlandse kust. Een dergelijke uitbreiding kan een veel uitgebreider licht werpen de invloed van zandsuppleties op zowel de faalkansreductie als de strandbreedtetoeename. De resultaten zijn beschikbaar voor 10 verschillende kustvakken in totaal.
- Bij de analyse van de indicator voor veiligheid, is in de voorliggende studie alleen een koppeling gelegd tussen de suppletiehoeveelheden en de faalkans van de eerste duinenrij. Het zou nuttig zijn om deze analyse uit te breiden naar de ligging van het berekende afslagpunt en het berekende afslagvolume. Zeker een volumevergelijking zou een goed beeld kunnen geven van de mogelijke effectiviteit van zandsuppleties.
- Het vergelijken van de uitkomsten van PC-Ring met de uitkomsten die verkregen zijn met Monte-Carlo simulatie. Een dergelijke vergelijking kan een goed zicht bieden op de kwaliteit van beide rekenmethodes. PC-Ring is immers nog nooit op zo ruime schaal toegepast voor duinafslagberekeningen aan de Nederlandse kust.
- Het vergelijken van de resultaten voor de strandbreedte, zoals HKV [LIJN IN WATER](#) deze nu berekend heeft, en de resultaten zoals die volgens uit alternatieve methoden, zoals gehanteerd door Deltares en Arcadis.
- De DUROS+ module is niet toegerust voor zowel het correct doorrekenen van meervoudige duinenrijen als het meenemen van de golfreductie bij verhoogde vooroever. Het zou een zeer waardevolle toevoeging zijn, voor studies als de voorliggende, om deze twee zaken in de toekomst in het instrumentarium op te nemen.
- Nu de berekende faalkansen voor duinafslag beschikbaar zijn voor het overgrote gedeelte van de Nederlandse kust, zou een koppeling met de *risico's*, opgevat als de combinatie van kans en gevolg, zeer waardevol zijn. Een dergelijke analyse kan licht werpen op de kosteneffectiviteit van zandsuppleties.

Bijlage(n)

A Analyseren met de AfslagViewer

A.1 Inleiding

A.1.1 Uitgevoerde berekeningen

In dit rapport worden de resultaten van PC-Ring berekeningen voor duinafslag bij de kustlijn van Noord-Holland geanalyseerd. Daartoe zijn 225 raaien \times 46 jaren aan berekeningen uitgevoerd. Deze 10350 berekeningen maken deel uit van een set berekeningen die voor de volledige Nederlandse kustlijn zijn uitgevoerd.

A.1.2 De invoer

De invoer van een PC-Ring berekening bestaat uit een database, die ingelezen kan worden in Microsoft Access en in het programma PC-Ring zelf. Voor kustvak 7 is de basisdatabase `07_noordholland.pc5` gegenereerd. Deze database bevat alle informatie ten aanzien van de relevante stochasten voor het mechanisme duinafslag, voor elk van de 225 raaien in dit kustvak. Omdat het profiel voor elke raai per jaar varieert, zijn kopieën van de basisdatabase gemaakt: `1965_07_noordholland.pc5`, ..., `2010_07_noordholland.pc5`.

Het uitvoeren van de berekening is geschied door voor elk jaar de betreffende database in te lezen in PC-Ring en vervolgens voor elke raai een faalkansberekening voor het mechanisme duinafslag uit te voeren. Dit proces is geautomatiseerd met behulp van Matlab.

A.1.3 De uitvoer

De uitvoer van een PC-Ring berekening bestaat uit vier tekstbestanden:

- `invoer.txt`: in dit bestand wordt de informatie die ten grondslag heeft gelegen aan de berekening gerecapituleerd, zoals het profiel van de duinen en de randvoorwaarden,
- `uitvoer.txt`: dit bestand bevat de belangrijkste uitvoer van de berekening: de faalkans, en bovendien de zogeheten invloedscoëfficiënten per stochast (deze geven aan in welke mate het stochastische karakter van een variabele relevant is voor de variatie in de faalkans),
- `reken.txt`: in dit bestand wordt meer informatie geboden in het rekenproces zelf, in het bijzonder het convergentieverloop van de FORM-berekening,
- `design.txt`: dit bestand bevat de waarden van de stochasten in het ontwerp punt, zijnde de omstandigheden waarbij het falen van het mechanisme het meest waarschijnlijk is.

Deze vier bestanden worden per raai, per jaar gegeven. De betreffende raai en het betreffende jaar wordt meegegeven aan de naam van de bestanden. Dat levert voor een willekeurig vak dus: `2010_07_noordholland-7002009-501-design.txt`. Hierbij representeert 7002009 het id-nummer van de raai en 501 het id-nummer van het faalmechanisme.

A.1.4 De Matlab-applicatie

Aangezien alleen voor kustvak 7 al 10350 \times 4 bestanden worden weggeschreven, heeft HKV LIJN IN WATER een applicatie ontwikkeld in Matlab, waarmee elke van deze 41400 bestanden afzonderlijk ingelezen kan worden. Het betreft hier de `afslagViewer`.

De `afslagViewer` is in staat om de volgende zes aspecten van de uitvoer van de faalkansberekening in beeld te brengen:

1. het afslagprofiel: de visualisatie van het afslagprofiel en het ontwerp punt,
2. het convergentieverloop van de faalkans,

3. het convergentieverloop van de grenstoestandsfunctie: niet alleen de convergentie van de faalkans is relevant, maar ook die van de grenstoestandsfunctie (de Z -functie); de waarde van deze grenstoestandsfunctie dient te convergeren naar 0,
4. de locatie van de Jarkusraai: deze wordt gevisualiseerd op de schaal van het beschouwde kustvak,
5. de faalkans door de jaren heen: deze optie toont het verloop van de faalkans in de tijd, voor een bepaalde raai en koppelt dat aan de periodes waarin zandsuppleties zijn uitgevoerd voor het betreffende vak,
6. de faalkans langs de kustlijn: deze optie toont het verloop van de faalkans langs de kustlijn van een kustvak voor een zeker jaartal.

A.2 De user interface

A.2.1 De online database OpenEarth

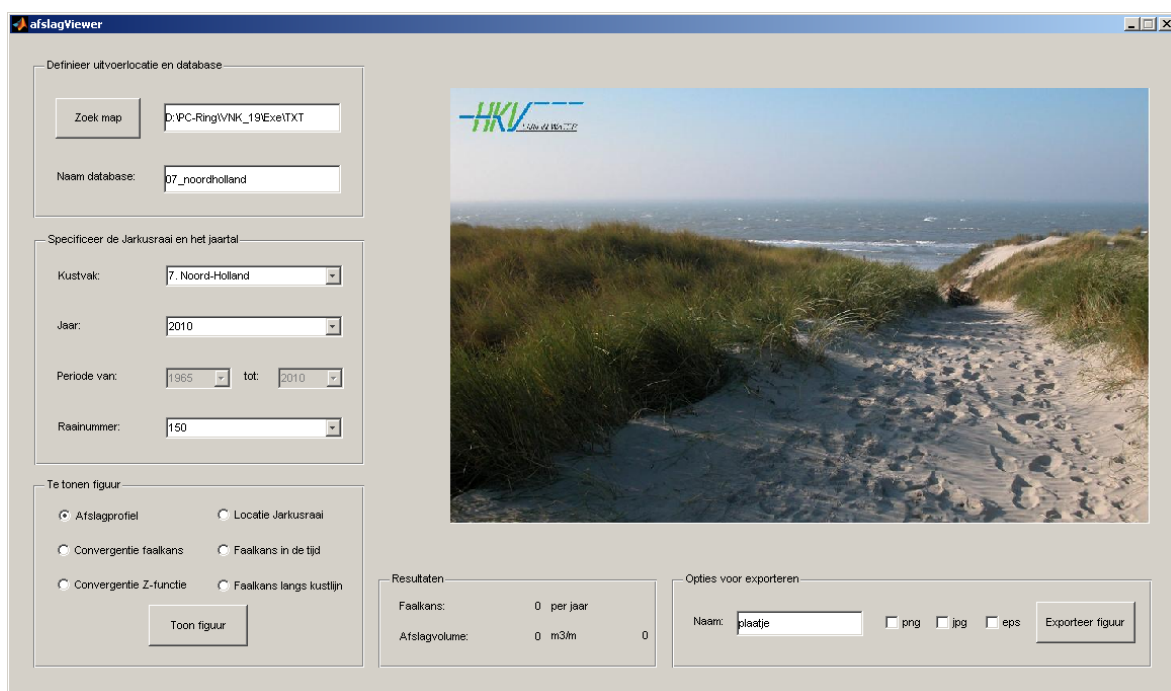
Aangezien de Matlab-applicatie is gekoppeld aan de online database OpenEarth, dienen de alle daarvoor benodigde data en bestanden op de PC van de gebruiker te zijn geïnstalleerd. Indien dat niet het geval is, verwijzen we voor nadere informatie over de installatie en het gebruik naar de website:

<http://public.deltares.nl/display/OET/OpenEarth+developer+in+five+easy+steps>.

A.2.2 Opstarten

Voordat de `afslagViewer` opgestart wordt, dient de link gelegd te worden met OpenEarth door, bij verwijzing naar de juiste directory, `oetsettings` te typen bij de command prompt van Matlab.

De applicatie zelf kan worden opgestart door `afslagViewer` te typen in de command prompt, bij verwijzing naar de directory waar de relevante scripts geplaatst zijn. Het scherm weergegeven in figuur A-1 verschijnt.



Figuur A-1 Opstartscherm van de Matlab-applicatie voor het visualiseren van duinafslagresultaten.

De user interface van de applicatie heeft zes relevante velden:

1. Definieer uitvoerlocatie en database: met de knop Zoek map kan worden genavigeerd naar de locatie waar de relevante uitvoerbestanden van PC-Ring staan; daarnaast dient te worden opgegeven met welke basisdatabase er gerekend is.
2. Specificeer de Jarkusraai en het jaartal: de velden Jaar en Periode spreken voor zich, welke van deze twee velden wit en grijs worden gemaakt, hangt af van de gevraagde uitvoer in het veld Te tonen figuur. Tevens dient het kustvak te worden gespecificeerd; daarna wordt het veld Raainummer automatisch gevuld en kan een raai worden geselecteerd.
3. Te tonen figuur: binnen dit veld kan aangegeven worden welk resultaat getoond dient te worden.
4. Resultaten: binnen dit veld worden de getalsmatige resultaten getoond voor de afslagberekening, bestaande uit de faalkans op jaarbasis, het afslagvolume en de nauwkeurigheid van het berekende afslagvolume bij de reconstructiebenadering van het afslagprofiel, los van PC-Ring.
5. Opties voor exporteren: hiermee kan de figuur worden geëxporteerd. Het resultaat wordt geplaatst in de directory waar ook de scripts voor de afslagViewer geplaatst zijn. Plaatjes in png-formaat en in jpg-formaat worden standaard met een resolutie van 300 dpi geëxporteerd.
6. De figuromgeving: in dit veld worden de visuele resultaten getoond.

A.2.3 Het lezen van gegevens

De uitvoer van PC-Ring voor kustvak 7 (Noord-Holland) zijn opgeleverd in een specifieke directory met de naam `kustvak07`. Hierin zijn alle uitvoerbestanden geplaatst. Deze uitvoerbestanden zijn het directe resultaat van PC-Ring en zijn op geen enkele manier nadien bewerkt. Alle uitkomsten kunnen dus ook afzonderlijk ingezien worden. Met de knop Zoek map kan direct worden genavigeerd naar de locatie waar de directory `kustvak07` geplaatst is.

A.3 Een voorbeeld

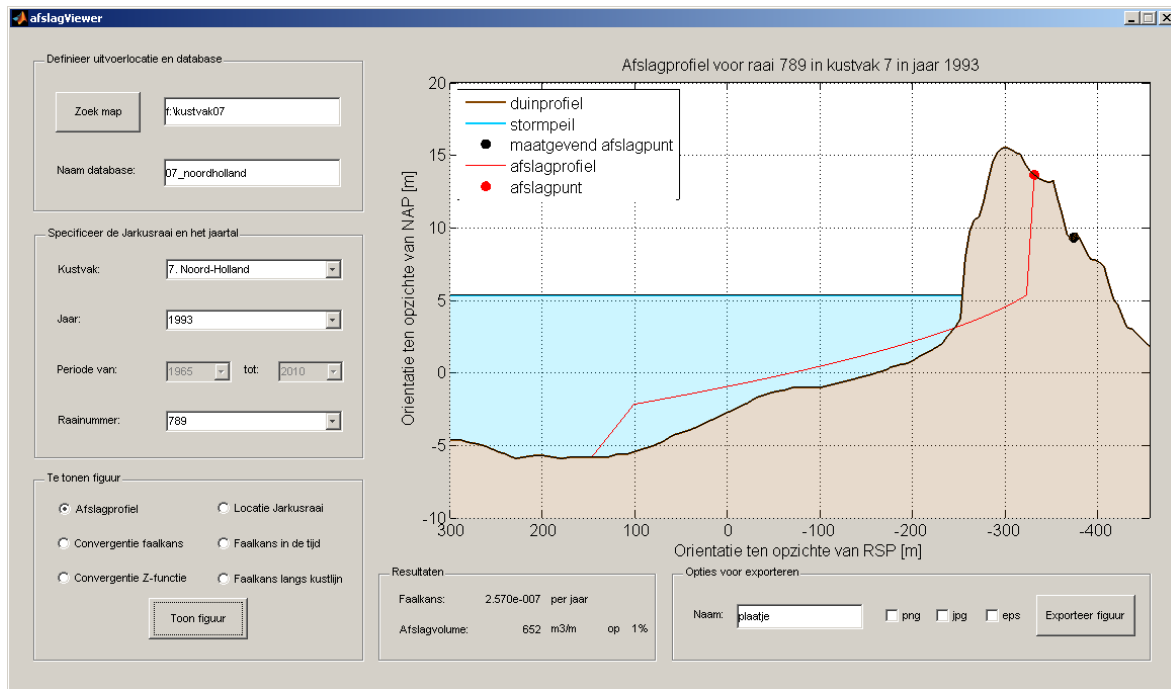
De werking van de applicatie kan het gemakkelijkst worden geïllustreerd aan de hand van een voorbeeld. De applicatie staat standaard ingesteld op de casus Noord-Holland. We richten ons hierbij op raai 789.

A.3.1 Het afslagprofiel

Het visualiseren van het afslagprofiel kan uitgevoerd worden door, na opstarten, de volgende drie velden gereed te zetten:

1. Met de knop Zoek map dient genavigeerd te worden naar de locatie waar de data staan. In dit voorbeeld is dat de directory `f:/kustvak07`. Aangezien als basisdatabase het bestand `07_noordholland.pc5` is gehanteerd, kan bij Naam database gewoon de naam `07_noordholland` genoteerd worden.
2. Het kustvak is Noord-Holland, hetgeen al ingevuld is. Alleen het jaartal en het raainummer dient nog te worden ingevuld. We kiezen het jaartal 1993 en de raai 789.
3. De button bij Afslagprofiel staat al aangevinkt, zodat we direct kunnen klikken op Toon figuur.

Het resultaat is getoond in figuur A-2. Met de zwarte stip wordt het maatgevend afslagpunt gevisualiseerd. Met de rode lijn wordt een reconstructie getoond van het afslagprofiel aan de hand van de uitvoer van PC-Ring. Dit afslagprofiel wordt *niet* door PC-Ring zelf uitgevoerd; PC-



Figuur A-2 Resultaat voor het afslagprofiel in het jaar 1993 voor raai 789 in kustvak 7.

Ring levert *alleen* het maatgevend afslagpunt.

Het maatgevend afslagpunt kan aan de hand van een modelfactor, die onzekerheden in de duur van de stormvloed en buien in rekening brengt (zie paragraaf 3.2.4), teruggerekend worden naar een standaard afslagpunt (rode stip). Vervolgens kan aan de hand van het standaard duinafslag formularium het afslagprofiel worden gereconstrueerd.

Op basis van dit afslagprofiel wordt het afslagvolume berekend en weergegeven in het veld **Resultaten**. Tevens wordt de nauwkeurigheid van de reconstructie van het afslagprofiel met een percentage in beeld gebracht. In dit voorbeeld is het afslagvolume dus $652 \text{ m}^3/\text{m}$ met een nauwkeurigheid van 1%. Met dit percentage wordt het relatieve verschil tussen het afgeslagen volume en het depositievolumen gegeven. Let op: het gaat hier dus om de nauwkeurigheid van de *reconstructie* van het afslagprofiel, en niet zozeer om de nauwkeurigheid van PC-Ring zelf.

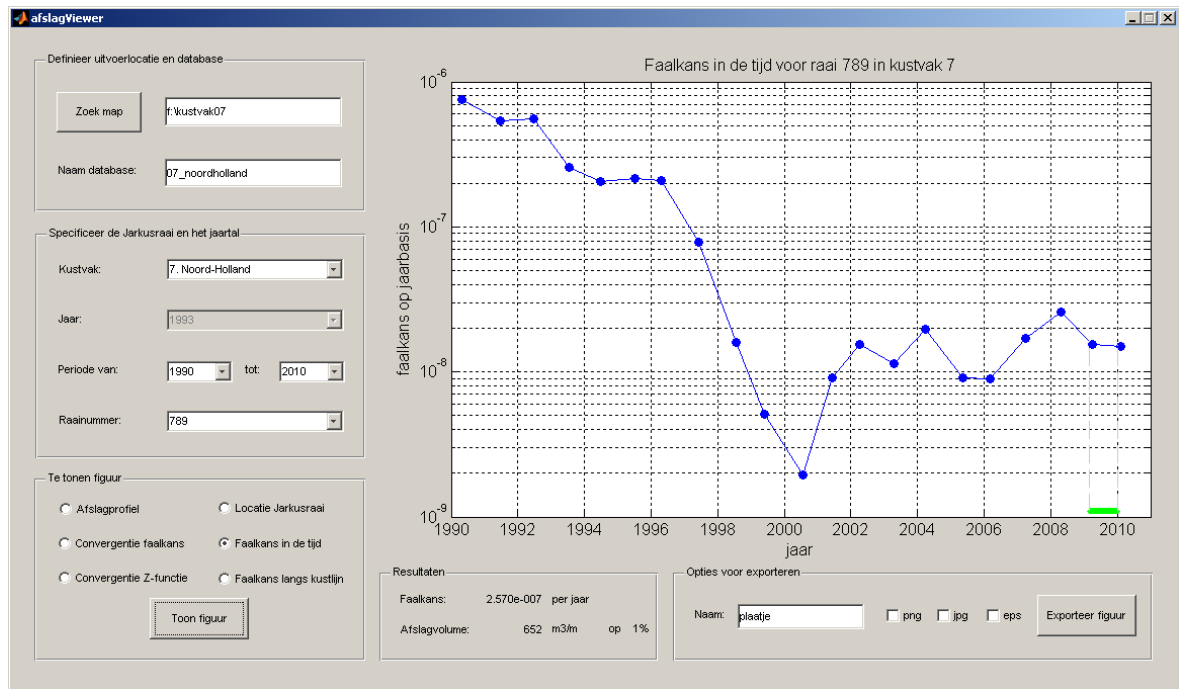
A.3.2 De faalkans in de tijd

Naast het afslagprofiel is met name de faalkansontwikkeling in de tijd een belangrijk resultaat. Wanneer in het veld **Te tonen figuur** de optie **Faalkans in de tijd** wordt aangevinkt, dan wordt in het veld **Specificeer de Jarkusraai en het jaartal** de optie **Periode** actief gemaakt. Hiermee kan de gebruiker aangeven over welke periode de faalkansontwikkeling moet worden gevisualiseerd.

Als we kiezen voor de periode van 1990 tot en met 2010, dan ziet de user interface met de daarbij horende uitvoer eruit zoals weergegeven in figuur A-3.

In de figuur worden ook, indien van toepassing, de perioden weergegeven waarin zandsuppleties zijn uitgevoerd. Voor vooroeversuppleties wordt de kleur groen gehanteerd, voor strandsuppleties de kleur rood. Voor raai 789 is kennelijk alleen over een bepaalde periode in 2009 een vooroeversuppletie uitgevoerd.

De jaartallen op de horizontale as van de figuur representeren de eerste dag in dat jaar. Het la-



Figuur A-3 Resultaat voor de faalkansontwikkeling van 1990 tot en met 2010 voor raai 789 in kustvak 7.

bel 1996 representeert dus 1 januari 1996. De momenten waarvoor de faalkans getoond wordt, is het moment waarop de bathymetry van de Jarkusraai is ingemeten.

Aangezien voor het weergeven van de faalkansontwikkeling in de tijd tevens informatie wordt ingeladen vanuit de online database OpenEarth, dient de gebruiker er rekening mee te houden dat het weergeven van de bijbehorende figuur wat meer tijd in beslag neemt.

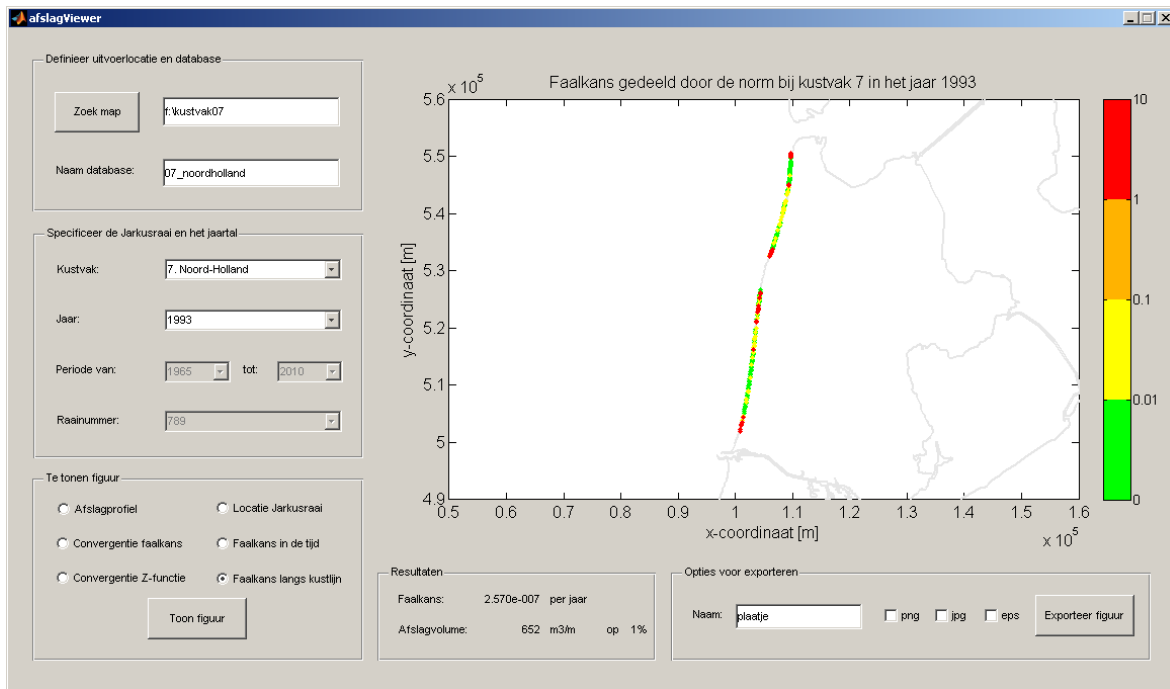
Het kan overigens voorkomen dat het faalkansverloop niet alleen met blauwe bolletjes wordt getoond, maar ook met witte bolletjes. Het verschil hiertussen zit in het wel of niet geconvergeerd zijn van de achterliggende berekening: blauw geeft aan dat de achterliggende berekening *wel* is geconvergeerd, en wit geeft aan dat dat niet het geval is.

A.3.3 De faalkans langs de kustlijn

Mogelijk de meest relevante optie van de applicatie is het weergeven van alle berekende faalkansen, dus voor elke Jarkusraai, bij een zeker kustvak. De gebruiker kan het resultaat bekijken door de optie *Faalkans langs kustlijn* aan te klikken. De enige vrijheidsgraad die voor een kustvak resteert ter specificatie is het jaartal.

Het resultaat van deze optie is weergegeven in figuur A-4. De getoonde faalkansen zijn hierbij gerelateerd aan de overschrijdingsnorm voor de hydraulische belasting, zoals deze van gedefinieerd is per dijkvak. Voor dijkvak 13, waar kustvak 7 in ligt, is de normfrequentie 1/10.000 jaar. De getoonde faalkansen betreffen de faalkans voor duinafslag *van de eerste duinenrij* (vgl. figuur A-4, waar de *volledige* duinenrij is beschouwd).

De optie om de volledige kustlijn in kaart te brengen vraagt enig geduld van de gebruiker. De applicatie dient namelijk eerst per Jarkusraai de locatie in te lezen vanuit de uitvoerbestanden; vervolgens dienen de resultaten te worden ingelezen. Tijdens dit proces krijgt de gebruiker twee maal een statusbalk te zien die de voortgang van het inleesproces in beeld brengt.



Figuur A-4 De faalkans (op jaarbasis) voor kustvak 7, in het jaar 1993, gerelateerd aan de overschrijdingsnorm voor de hydraulische belasting.

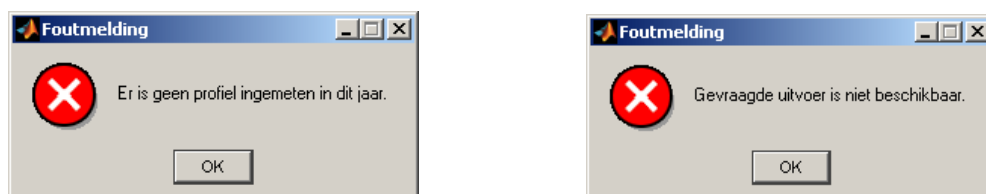
A.3.4 Convergentie per Jarkusraai

Het kan voorkomen dat het getoonde aflslagprofiel het resultaat is van een niet-geconvergeerde aflslagberekening. Dit kan worden gecontroleerd met de opties *Convergentie faalkans* en *Convergentie Z-functie*. Convergentie treedt in PC-Ring op als de faalkans niet meer verandert en als de grenstoestandsfunctie nagenoeg gelijk aan nul is (tot maximaal 350 iteraties).

A.4 Meldingen op het scherm

Niet voor elke raai is in elk jaar een profielmeting uitgevoerd. Voor een gedeelte van kustvak 7 is pas in 1987 begonnen met het uitvoeren van Jarkusmetingen. Raaien waarvoor in een bepaald jaar geen profielmeting beschikbaar is, zijn toch meegenomen in de beschouwing, juist om aan te geven dat er geen meting is uitgevoerd in plaats van de mogelijkheid dat de faalkansberekening niet is uitgevoerd.

Om dit onderscheid terug te laten komen in de applicatie, zijn daarom twee typen foutmeldingen opgenomen: zie figuur A-5. Het kan echter natuurlijk wel zo zijn dat de gevraagde PC-Ring uitkomsten wel beschikbaar zijn, maar *niet* gevonden worden op de aangegeven locatie.



Figuur A-5 Mededeling in het geval dat er geen profielmeting beschikbaar is (linkerfiguur) en mededeling dat er geen PC-Ring uitkomsten beschikbaar zijn (rechterfiguur).

A.5 Bugs en onvolkomenheden

De AfslagViewer is op natuurlijke wijze ontstaan tijdens de uitvoering van het onderzoek; de ontwikkeling van de AfslagViewer was bij aanvang van het onderzoek geen doel op zich. Het is niettemin wel een nuttig resultaat van het onderzoek, omdat de resultaten individueel per raai kunnen worden geanalyseerd en op waarde kunnen worden geschat. Daarom heeft HKV LJN IN WATER deze AfslagViewer ook voor gebruikers beschikbaar gesteld als Matlab p-code.

De AfslagViewer is, gezien deze wijze van ontstaan, nooit grondig aan professionele tests onderworpen. Derhalve kan het voorkomen dat tijdens het gebruik ervan bepaalde bugs zich voor blijken te doen. In dat geval, is het raadzaam deze bug te melden bij HKV LJN IN WATER door een email te sturen naar w.vanbalen@hkv.nl. De AfslagViewer is specifiek voor de toepassing binnen het voorliggende onderzoek ontworpen.

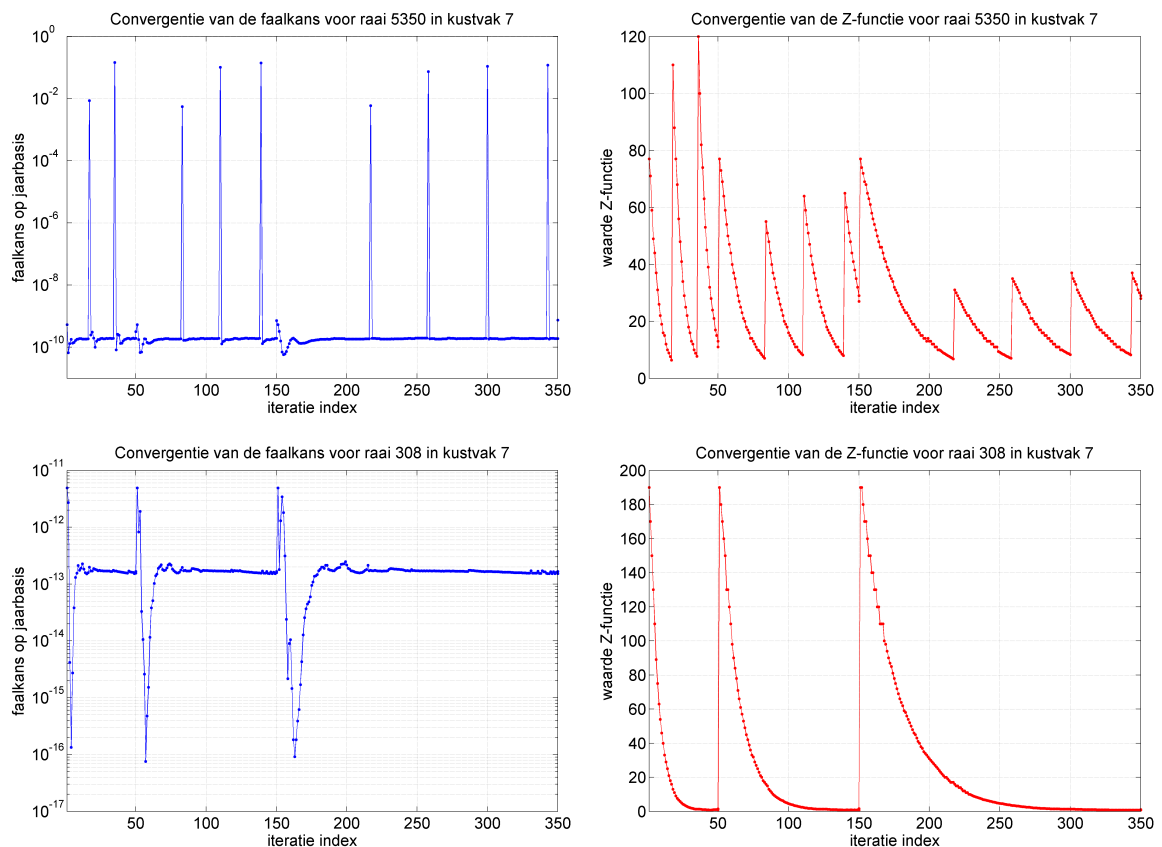
B Convergentie van afslagberekeningen

Met de AfslagViewer kan worden nagegaan of de onderliggende faalkansberekening wel geconvergeerd is of niet. Hiervoor worden de faalkans en de grenstoestandsfunctie als maat genomen.

Ten aanzien van convergentie kunnen er vier situaties optreden:

1. er treedt *wel* convergentie op, en de resultaten zien er *wel* deugdelijk uit,
2. er treedt *wel* convergentie op, maar de resultaten zien er *niet* deugdelijk uit,
3. er treedt *geen* convergentie op, en de resultaten zien er *niet* deugdelijk uit,
4. er treedt *geen* convergentie op, maar de resultaten zien er *wel* deugdelijk uit.

De situaties 1 en 3 zijn triviaal, de situaties 2 en 4 niet. Situatie 2 kan optreden wanneer er dubbele duinenrijen aanwezig zijn in het duinprofiel. PC-Ring kan dan op een of andere manier soms wel tot een antwoord komen, maar dat antwoord is dan vaak niet realistisch en niet compatibel met de achterliggende voorbehouden van het DUROS+ model. Situatie 2 doet zich zeer sporadisch voor en is voor kustvak Noord-Holland, voor zover bekend, nergens opgetreden.



Figuur B-1 Bovenste figuren: convergentie van de faalkans en de grenstoestandsfunctie voor raai 5350 in het jaar 1998, onderste figuren: convergentie van de faalkans en de grenstoestandsfunctie voor raai 308 in het jaar 1998. De knikken na 50 en 150 iteratiestappen markeren een geprogrammeerde wijziging in iteratiestrategie.

Situatie 4 kan optreden wanneer, door onbekende oorzaken, aan het in PC-Ring geprogrammeerde convergentie criterium niet direct wordt voldaan, maar waarvan op basis van de uitkomst

sten wel kan worden gesteld dat de berekening geconvergeerd is. Van deze situatie is in figuur B-1 (onderste twee figuren) een voorbeeld gegeven tezamen met een voorbeeld van situatie 3 (bovenste twee figuren), ter vergelijking. De knikken na 50 en 150 iteratiestappen markeren een geprogrammeerde wijziging in iteratiestrategie.

Het optreden van situatie 4, hetgeen regelmatig voorkomt, leverde de motivatie om in het faalkansverloop in de tijd de niet-geconvergeerde berekeningen weer te geven met een wit (in plaats van blauw) bolletje. Deze keuze stelt de gebruiker van de applicatie in staat om de kwaliteit van niet-geconvergeerde berekeningen zelf vast te stellen.

C Stochasten voor duinafslag

C.1 Sterktestochasten

In PC-Ring worden voor duinafslag de volgende drie stochasten gehanteerd aan de sterkte-zijde:

- de duinhoogte h_d : deze wordt direct ingevoerd vanuit de OpenEarth database en krijgt in PC-Ring standaard een standaardafwijking van 0.1 m mee,
- de modelfactor m_D : de modelfactor voor de afslagberekening, volgens de leidraad bevat het model een modelonzekerheid: de afgeslagen hoeveelheid zand boven de hoogwaterlijn heeft een variatiecoëfficiënt van 0.25,
- de mediane korreldiameter D_{50} : de gemiddelden en variatiecoëfficiënten voor de mediane diameter van het zand zijn, per raai, overgenomen uit het Technische Rapport Duinafslag (TAW (2007)).

C.2 Belastingstochasten

In PC-Ring worden voor duinafslag de volgende vijf stochasten gehanteerd aan de belasting-zijde:

- een fout in de bodemligging van het profiel, met een gemiddelde van 0 m en een standaardafwijking 0.3 m,
- een modelfactor voor de significante golfhoogte H_s , volgens Bretschneider, deze dimensieloze parameter heeft een gemiddelde van 1 en een standaardafwijking van 0.15,
- een modelfactor voor de significante golfperiode T_s , volgens Bretschneider, deze dimensieloze parameter heeft een gemiddelde van 1 en een standaardafwijking van 0.15,
- een modelfout voor de lokale waterstand h_{loc} , deze kan in feite meegenomen worden als stochast, maar dat wordt binnen de standaard methodiek niet gedaan,
- de stormduur t_s : deze heeft standaard een gemiddelde waarde van 7.5 uur en een variatiecoëfficiënt van 0.25.

Bibliografie

- HKV LIJN IN WATER. *Verbinden van toetsingsystematiek van kustlijnzorg en wettelijke veiligheidstoetsronde*. S. van Vuren, F. Havinga en J.W. Stijnen, PR2063.10, december 2010.
- HKV LIJN IN WATER. *Recreatiebasiskustlijn Noordzeekust, Bepaling strandbreedtes en vertaling naar recreatiebasiskustlijn*. S.J. Ouwerkerk en V. Vuik, PR2078.10, maart 2011.
- Arcadis. *Verkenning relatie kustlijnzorg en kustveiligheid. Resultaten uit het verleden*. R.B. van Santen en H.J. Steetzel, C04021.002681 / A2681, maart 2011.
- Decisio. *Ruimte voor recreatie op het strand, onderzoek naar een recreatiekustlijn*. Decisio, HKV LIJN IN WATER en Oranjewoud, mei 2011.
- TAW. *Technische Rapport Duinafslag - Beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering ten behoeve van Voorschrift Toetsen op Veiligheid 2006*. WL | Delft Hydraulics, TUDelft en Alkyon, H4357, mei 2007.
- TNO. *Theoriehandleiding PC-Ring Versie 4.0 Deel C: Rekentechnieken*. A.C.W.M. Vrouwenfelder en H.M.G.M. Steenbergen, 2003-CI-R0022, april 2003.
- TNO. *Theoriehandleiding PC-Ring Versie 5.0 Deel A: Mechanismenbeschrijvingen*. H.M.G.M. Steenbergen, A.C.W.M. Vrouwenfelder en T. Koster, 2007-D-Rxxxx/A, september 2007.



Bezoekadressen Botter 11-29
Lelystad
Elektronicaweg 12
Delft

Postadres Postbus 2120
8203 AC Lelystad

Telefoon 0320 294242
Fax 0320 253901
E-mail info@hkv.nl
Internet www.hkv.nl