

Opdrachtgever:

Deltares

Indicatoren voor kustlijn­zorg

Analyse van stormen, suppleties en kust­veiligheid





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 stormen, suppleties en kust­veiligheid

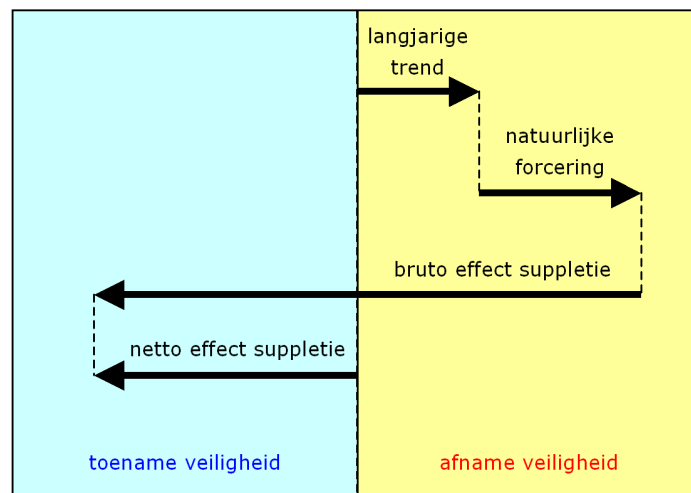
Auteurs: Vincent Vuik
Wim van Balen
Andries Paarlberg

Samenvatting

De toestand van de zandige kust staat onder invloed van een combinatie van natuurlijke forcing en ingrepen door de menselijke gebruiker. Als gevolg van golven en stroming tijdens dagelijkse omstandigheden én gedurende zware stormen verandert de ligging van de kust voortdurend. Omdat het beschermen tegen hoogwater de belangrijkste functie van de Nederlandse kust is, zorgt dit dynamische karakter van de kust ervoor dat de hoogwaterveiligheid door de tijd heen verandert. Om de veiligheid van de Nederlandse kust te waarborgen, voert Rijkswaterstaat een suppletieprogramma uit, waarbij zowel gebruik gemaakt wordt van strandsuppleties als vooroeversuppleties.

Doelstelling

De centrale hypothese in het onderzoek als beschreven in dit rapport is dat veranderingen in de veiligheid van de kust het gevolg zijn van de som van een langjarige trend, het effect van natuurlijke forcing en het effect van zandsuppleties. Dit samenspel van effecten wordt schematisch weergegeven in onderstaande figuur.



Het hoofddoel van deze studie is het inzichtelijk maken van de effectiviteit van zandsuppleties in het handhaven van de veiligheid van de Nederlandse kust. Door de langjarige trend en het effect van een variabele natuurlijke forcing (stormmchtigheid) uit de data te filteren, kan de effectiviteit van vooroeversuppleties en strandsuppleties scherper in beeld worden gebracht.

Indicatoren

De veiligheid van de kust is gekarakteriseerd door de volgende drie indicatoren:

1. de duinvoetpositie;
2. de momentane kustlijn (MKL);
3. de faalkans van de eerste duinenrij.

De volgende drie indicatoren geven de sterkte van de natuurlijke forcing in een bepaald jaar weer:

1. de jaarlijkse maximale waterstand;
2. de jaargemiddelde golfenergie;
3. het jaargemiddelde Dean getal.

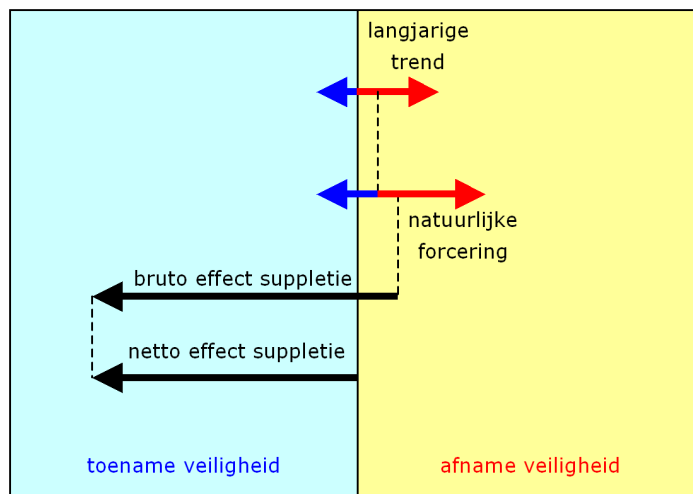
Conclusies

Het onderzoek heeft inzicht verschaft over de mate waarin diverse indicatoren voor de veiligheid van de kust worden beïnvloed door natuurlijke forcering en verschillende typen suppleties.

Uit de studie bleek dat veranderingen in de duinvoetpositie het sterkst zijn gerelateerd aan de jaarlijkse maximale waterstand, en dat de jaargemiddelde golfenergie de beste indicator is voor veranderingen in de momentane kustlijn en de faalkans van de eerste duinenrij.

Daarnaast geven de resultaten van het onderzoek aanleiding tot de volgende conclusies over de effectiviteit van suppleties in het beïnvloeden van de veiligheid van de kust:

1. Alle beschouwde indicatoren voor de veiligheid worden positief beïnvloed door de uitgevoerde suppleties.
2. Het effect van een strandsuppletie is instantaan aanwezig, maar neemt vervolgens gestaag af. Het effect van een vooroeversuppletie neemt daarentegen na verloop van jaren nog sterk toe ten opzichte van het instantane effect, en benadert na ongeveer 5 jaar per volume-eenheid het effect dat een strandsuppletie op dat moment nog heeft.
3. Het effect van suppleties is duidelijk groter dan het effect van een individueel stormachtig jaar of langjarige trends. De eerder in deze samenvatting getoonde figuur kan daarom beter vervormd worden tot onderstaande figuur met aangepaste verhoudingen.



4. Effecten van verschillende suppleties lopen door elkaar heen, waardoor het analyseren van het effect van een afzonderlijke suppletie wordt bemoeilijkt.

Aanbevelingen

Op basis van het verrichte onderzoek doen we de volgende aanbevelingen:

1. Dit onderzoek geeft inzicht in de effectiviteit van suppleties in het handhaven en verbeteren van de veiligheid van de kust. De resultaten van het onderzoek geven handvatten om suppletievolumes te bepalen, waarmee een bepaalde gewenste verandering in de veiligheid moet worden bewerkstelligd.
2. De resultaten van het onderzoek verschaffen inzicht in het verschil in effectiviteit tussen strandsuppleties en vooroeversuppleties, zowel instantaan als na verloop van jaren. Op basis van de kosten per volume-eenheid van beide suppletietypen is het mogelijk om een gefundeerde keuze voor één van beide suppletietypen te maken.
3. Om enkel de langjarige trends en het effect van stormen te compenseren, zouden gemiddeld genomen suppleties volstaan met een duidelijk kleiner volume dan op het moment gebrui-

kelijk is. Lokaal kan een relatief sterke langjarige negatieve trend wel om een intensiever suppletiebeleid vragen. Gezien de verhouding tussen langjarige trends en effecten van stormen enerzijds en het effect van suppleties anderzijds is voor de Hollandse kust een reactief suppletiebeleid mogelijk. Deze aanbeveling houdt geen rekening met de discussie over het meegroeien van de kust met de zeespiegelstijging.

4. Binnen een recent onderzoek van HKV LIJN IN WATER is een overzicht berekend van de overstromingskansen langs de gehele Nederlandse kust. Daarmee is materiaal beschikbaar ter ondersteuning bij het bepalen van welke locaties prioriteit hebben binnen het suppletieprogramma. Met behulp van het voorliggende onderzoek kan vervolgens beter gekwantificeerd worden welk suppletievolume en welk suppletietype geschikt zijn om de gewenste verhoging van de veiligheid te bewerkstelligen. Op deze manier vullen beide onderzoeken elkaar aan.

Inhoudsopgave

1 Inleiding	1
1.1 Context	1
1.2 Doelstelling	2
1.3 Leeswijzer	2
2 Gegevens	5
2.1 Indicatoren voor kustveiligheid	5
2.2 Indicatoren voor natuurlijke forcering	6
2.2.1 Jaarlijkse maximale waterstand	6
2.2.2 Jaargemiddelde golfenergie	7
2.2.3 Jaargemiddeld Dean getal	8
2.3 Zandsuppleties	9
3 Effect van natuurlijke forcering	11
3.1 Werkwijze	11
3.1.1 Centrale gedachte	11
3.1.2 Filtering datasets	12
3.1.3 Langjarige trend	12
3.1.4 Het effect van natuurlijke forcering	13
3.2 Resultaten	15
3.2.1 Duinvoetpositie	15
3.2.2 Momentane kustlijn	19
3.2.3 Faalkans van de eerste duinenrij	23
3.3 Conclusies	27
4 Effect van suppleties	29
4.1 Werkwijze	29
4.1.1 Centrale gedachte	29
4.1.2 Filtering datasets	29
4.1.3 Het effect van suppleties	30
4.1.4 Vertraagde effecten	31
4.2 Resultaten	32
4.2.1 Duinvoetpositie	32
4.2.2 Momentane kustlijn	37
4.2.3 Faalkans van de eerste duinenrij	40
4.2.4 Langjarige effecten en vergelijking van veiligheidsindicatoren	44
4.3 Schaalgrootte effecten	48
4.3.1 Duinvoetpositie	48
4.3.2 Momentane kustlijn	49
4.3.3 Faalkans van de eerste duinenrij	49
4.4 Conclusies	50
5 Synthese	53
5.1 Terugblik	53
5.2 Conclusies	53
5.3 Aanbevelingen	54
Bijlage A Controle van uitkomsten	59

A.1	Dwarsprofiel	59
A.2	Afslagprofiel	59
A.3	Faalkans	60
A.4	Convergentie	60
A.5	Conclusie.....	60
Bijlage B	Trendvergelijking	61
B.1	Methodiek voor de analyse van veiligheid	61
B.2	Beoordelingscriteria	62
B.3	Toepassing voor de Hollandse kust.....	62
B.4	Uitsplitsing naar kustvak.....	63
B.4.1	Noord-Holland	63
B.4.2	Rijnland	64
B.4.3	Delfland	64
B.5	Conclusie.....	65
Bijlage C	Strandbreedtes	67
Bijlage D	Veranderingen in ruimte en tijd	69
Bibliografie	71

1 Inleiding

De toestand van de zandige kust staat onder invloed van een combinatie van natuurlijke forcing en ingrepen door de menselijke gebruiker. Als gevolg van golven en stroming tijdens dagelijkse omstandigheden én gedurende zware stormen verandert de ligging van de kust voortdurend. Omdat het beschermen tegen hoogwater de belangrijkste functie van de Nederlandse kust is, zorgt dit dynamische karakter van de kust ervoor dat de hoogwaterveiligheid door de tijd heen verandert.

Om de veiligheid van de Nederlandse kust te waarborgen, voert Rijkswaterstaat een suppletieprogramma uit, waarbij zowel gebruik gemaakt wordt van strandsuppleties als vooroeversuppleties. Het voorliggende rapport beschrijft de resultaten van een studie, waarin de verschillende processen die de veiligheid van de kust beïnvloeden zijn gescheiden. Het beoogde resultaat is het op zuivere wijze inzichtelijk maken van de effectiviteit van de verschillende typen zandsuppleties.

1.1 Context

Het in dit rapport beschreven onderzoek valt binnen het project 'Toestand van de Kust', dat op zijn beurt weer onderdeel is van het project Kennis van Primaire Processen, Beheer en Onderhoud Kust (KPP-B&O Kust). Rijkswaterstaat maakt keuzes bij het vaststellen van het suppletieprogramma voor de Nederlandse kust. Die keuzes zijn gebaseerd op een combinatie van kennis en een aantal hypothesen. Binnen het project KPP-B&O Kust wordt onderzoek uitgevoerd om deze hypothesen te toetsen.

In het deelproject Toestand van de Kust staan de volgende hypothesen centraal:

1. Als gevolg van de uitgevoerde suppletiestrategie treedt er (op termijn) een positieve trendwijziging op in alle indicatoren in het dwarsprofiel.
2. Suppleren draagt bij aan veiligheid door zeewaartse verplaatsing van het afslagpunt.
3. Het zand dat wordt afgevoerd uit een suppletievak komt ten goede aan de aangrenzende kust (droge en natte deel).

In 2011 is een keuze gemaakt voor een set indicatoren die gezamenlijk de toestand van de verschillende functies van de kust beschrijven, zie [Deltares \(2012\)](#). Tabel 1-1 geeft deze set weer.

Systemfunctie	Beleidsdoel	Indicator
Korte termijn veiligheid	Handhaven van de veiligheid	Erosielengte
		Faalkans van de zeewering
Middellange termijn veiligheid	Duurzame handhaving van de veiligheid	Te toetsen kustlijn (TKL)
		Momentane kustlijn (MKL)
		Basiskustlijn (BKL)
		Momentane duinlijn (MDL)
Lange termijn veiligheid	Duurzaam onderhoud van de duinen	Zandvolumes op verschillende waterdieptes
Natuur en recreatie		Duinvoetpositie
		Strandbreedte

Tabel 1-1 Indicatoren voor de toestand van de kust (overgenomen uit [Deltares \(2012\)](#))

HKV LIJN IN WATER heeft in 2011 voor de gehele Nederlandse kust en voor de periode tussen 1965 en

2010 de ontwikkeling van de indicatoren 'faalkans van de zeekering' en 'strandbreedte' berekend (HKV [LIJN IN WATER \(2011b\)](#)). Daarnaast is een relatie gelegd tussen veranderingen in de faalkans en uitgevoerde zandsuppleties. Dit werk vormt de basis voor een deel van het hoofdrapport voor Toestand van de Kust in 2011 ([Deltares \(2012\)](#)).

In [Deltares \(2012\)](#) is ook een start gemaakt met het kwantificeren van het effect van natuurlijke forcering tijdens (met name) stormen op de veiligheid van de kust. Daarvoor is gebruik gemaakt van een methode als ontwikkeld door [Ruessink & Jeuken \(2002\)](#). Er is een relatie gelegd tussen diverse indicatoren voor de stormachtigheid en indicatoren voor de veiligheid van de kust.

Het voorliggende rapport beschrijft het resultaat van het onderzoek, waarbij zowel het effect van suppleties als het effect van natuurlijke forcering op de veiligheid is meegenomen. Daarmee vormt dit onderzoek de verbindende schakel tussen de gescheiden studies zoals verricht in 2011 door Deltares en HKV [LIJN IN WATER](#).

1.2 Doelstelling

Het voornaamste uitgangspunt in het voorliggende onderzoek is dat veranderingen in de veiligheid V van de kust worden gedomineerd door drie effecten:

1. een langjarige trend L van structurele erosie of sedimentatie;
2. het effect van natuurlijke forcering F door variaties in de stormachtigheid;
3. het effect van zandsuppleties S .

In formulevorm is dit uitgangspunt weer te geven als:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = L + f(F) + g(S), \quad (1-1)$$

waarbij $f(F)$ en $g(S)$ nader te onderzoeken functies van F en S zijn.

Het hoofddoel van deze studie is het inzichtelijk maken van de effectiviteit van zandsuppleties in het handhaven van de veiligheid van de Nederlandse kust. Door de langjarige trend en het effect van een variabele natuurlijke forcering (stormachtigheid) uit de data te filteren, kan dit verband zo zuiver mogelijk worden onderzocht.

Enkele nevendoelstellingen zijn:

1. Het controleren van de in 2011 berekende faalkansen voor de Zuid-Hollandse kust. In 2011 zijn faalkansen langs de gehele Nederlandse kust berekend, maar zijn alleen de resultaten voor de kust van Noord-Holland in detail gecontroleerd.
2. Het vergelijken van de berekende faalkansen als gepresenteerd in [HKV \[LIJN IN WATER \\(2011b\\)\]\(#\)](#) en [Arcadis \(2011\)](#).
3. Het berekenen van strandbreedtes langs de gehele Nederlandse kust voor de periode van 1965 tot en met 2010. In 2011 zijn alleen strandbreedtes berekend voor de kust van Noord-Holland.

1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 geeft een beschrijving van de datasets met beschouwde indicatoren voor de kustveiligheid, indicatoren voor de natuurlijke forcering en typen zandsuppleties. In hoofdstuk 3 wordt de relatie beschreven tussen indicatoren voor de natuurlijke forcering en veranderingen in indicatoren voor de kustveiligheid. In hoofdstuk 4 wordt een verband gelegd tussen suppletievolumes en veranderingen in indicatoren voor de veiligheid, na correctie voor natuurlijke force-

ring volgens de in hoofdstuk 3 gevonden relaties. Het rapport wordt afgerond met een terugblik, conclusies en aanbevelingen in hoofdstuk 5.

Enkele losse onderdelen van het verrichte onderzoek zijn in bijlagen geplaatst. Het gaat om de controle van berekende faalkansen in bijlage A, de vergelijking van trends in kansen als gepresenteerd in [HKV LIJN IN WATER \(2011b\)](#) en [Arcadis \(2011\)](#) in bijlage B en een toelichting bij de berekende strandbreedtes voor de gehele Nederlandse kust in bijlage C.

2 Gegevens

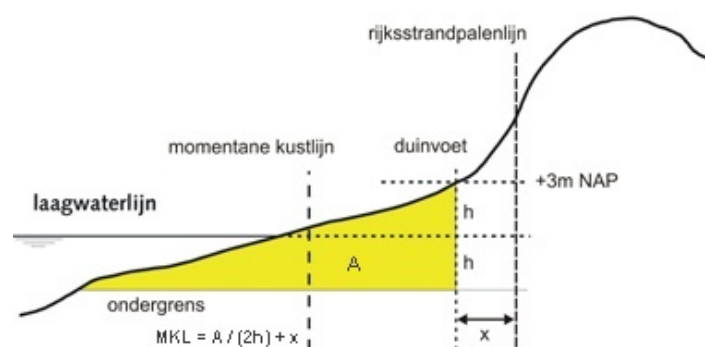
De veiligheid van de Nederlandse kust staat centraal in dit onderzoek. Daarbij wordt gesteld dat veranderingen in veiligheid het gevolg zijn van de som van een langjarige trend, het effect van een variabele natuurlijke forcering (stormachtigheid) en het effect van suppleties (vergelijking 1-1).

De veiligheid van de kust kan worden gekarakteriseerd door diverse indicatoren. Hetzelfde geldt voor de natuurlijke forcering. Dit hoofdstuk beschrijft de geselecteerde indicatoren voor de veiligheid, enkele indicatoren voor de natuurlijke forcering en de verschillende typen zandsuppleties. Daarnaast wordt ingegaan op de gebruikte datasets op basis waarvan deze indicatoren zijn berekend.

2.1 Indicatoren voor kustveiligheid

In paragraaf 1.1 zijn de indicatoren genoemd die gezamenlijk de toestand van de kust weergeven. In het voorliggende onderzoek zijn alleen de volgende drie indicatoren beschouwd:

1. De duinvoetpositie, het snijpunt van het buitenste duinbeloop met het duinvoetniveau van 3 m+NAP.
2. De momentane kustlijn (MKL), een denkbeeldige lijn langs de kust, die wordt bepaald op basis van de ligging van het strand en het bovenste gedeelte van de vooroever, zie figuur 2-1, overgenomen uit [Ministerie van Verkeer en Waterstaat \(RIKZ\) \(2009\)](#).
3. De faalkans van de eerste duinenrij, zoals in 2011 door HKV [LIJN IN WATER](#) voor de gehele Nederlandse kust berekend met behulp van PC-Ring. PC-Ring vormt een probabilistische schil rond de duinafslagmodule DUROS+. Falen wordt overeenkomstig [TAW \(2007\)](#) gedefinieerd als het overschrijden van het zogenaamde grensprofiel. Het grensprofiel is het dwarsprofiel, dat geacht wordt nog precies de optredende belasting te kunnen keren. In [HKV \[LIJN IN WATER\]\(#\) \(2011b\)](#) is de rekenmethode in detail beschreven. De dataset met faalkansen is ten opzichte van 2011 enigszins gewijzigd op basis van de controles, als besproken in bijlage A.



Figuur 2-1 Definitie van de Momentane Kustlijn (MKL), zoals berekend op basis van het duinvoetniveau en de Gemiddeld Laagwaterlijn (GLW). De afstand tussen duinvoetniveau (3 m+NAP) en het lokale GLW-niveau is gelijk aan h . De zogenaamde rekenschijf is gelijk aan het oppervlak A van de doorsnede tussen duinvoetniveau en het niveau van 2 maal h onder duinvoetniveau. De MKL-positie ligt vervolgens een afstand $A/(2 \cdot h)$ zeewaarts van de duinvoetpositie.

Alle datasets zijn gedownload vanaf de online database OpenEarth. Voor het bepalen van alle indicatoren is gebruik gemaakt van de Jaarlijkse Kustmetingen (JarKus), zoals sinds 1965 uitge-

voerd door Rijkswaterstaat. De JarKus-database bevat dwarsprofielen met hoogtemetingen van de duinen, het strand en de vooroever. Deze dwarsprofielen worden ingemeten langs ruim 2000 vastgestelde JarKus-raaien langs de Nederlandse kust, met een onderlinge afstand van ongeveer 250 meter. Veelal (niet altijd dus) worden de profielen in het voorjaar vastgelegd, dus na het stormseizoen.

2.2 Indicatoren voor natuurlijke forcering

De veranderingen in de indicatoren voor de kustveiligheid worden gerelateerd aan indicatoren voor de natuurlijke forcering, ofwel de stormachtigheid. Drie indicatoren zijn onderzocht:

1. De jaarlijkse maximale waterstand;
2. De jaargemiddelde golfenergie;
3. Het jaargemiddelde Dean getal.

De jaarlijkse maximale waterstand is vrijwel alleen gerelateerd aan extreme omstandigheden. De andere indicatoren zijn meer een maat voor de jaargemiddelde stormachtigheid.

Waterstandsdata en golfdata zijn verkregen via de online database OpenEarth. De data in OpenEarth is ongewijzigd overgenomen uit DONAR.

Een belangrijk punt is dat maxima en gemiddelden telkens bepaald zijn per raai tussen JarKus-metingen in twee opeenvolgende jaren. Bijvoorbeeld de jaarlijkse maximale waterstand met het label 2009 is niet geldig voor de periode tussen 1 januari 2009 en 31 december 2009, maar tussen de data behorend bij de JarKus-metingen uit 2008 en 2009. De periode is dus ook niet voor alle raaien gelijk. Door deze aanpak wordt in het vervolg van het onderzoek de verandering in veiligheid tussen twee JarKus-metingen ook nauwkeurig gerelateerd aan de natuurlijke forcering in deze periode.

Data bij de meetstations is vertaald naar de locaties van de JarKus-raaien door interpolatie op basis van de afstand tot de twee omliggende meetstations, of, in het geval van het uiterste zuiden of noorden, door ongewijzigd overnemen van de data van het dichtstbijzijnde meetstation.

2.2.1 Jaarlijkse maximale waterstand

Voor de waterstandsdata is gebruik gemaakt van de 6 meetstations, zoals weergegeven met gele markers in figuur 2-2.

Er is waterstandsdata beschikbaar vanaf 1973 (Huibertgat), 1932 (Den Helder), 1900 (Hoek van Holland), 1971 (Westkapelle en Cadzand) en 1863 (Vlissingen). Omdat de JarKus-metingen beschikbaar zijn vanaf 1965, is voor een beperkt aantal jaren gebruik gemaakt van slechts 3 stations (Den Helder, Hoek van Holland en Vlissingen).

Per JarKus-raai is eerst de data van de meetstations door interpolatie vertaald naar data ter plaatse, waardoor elke raai een eigen tijdreeks voor de waterstand kent. Vervolgens is per jaar de maximale waterstand bepaald over de periode tussen de JarKus-meting in het betreffende jaar en de JarKus-meting in het voorgaande jaar. Omdat het meetmoment van jaar tot jaar en van raai tot raai verschilt, geldt dat ook voor de periode waarover de maximale waterstand is bepaald. Op deze manier kunnen veranderingen in het dwarsprofiel tussen twee opeenvolgende JarKus-metingen nauwkeurig gerelateerd worden aan de opgetreden maximale waterstand tussen deze twee momenten.

2.2.2 Jaargemiddelde golfenergie

Als maat voor de golfenergie wordt H_s^2 (met eenheid m^2) aangehouden, waarin H_s de significante golfhoogte is. Voor de golfdata is gebruik gemaakt van de 4 meetstations, zoals weergegeven met rode markers in figuur 2-2.



Figuur 2-2 Locatie meetstations voor waterstandsdata (geel) en golfdata (rood)

Voor alle stations is er pas golfdata (golfhoogte en golfperiode) beschikbaar vanaf 1989. Omdat de JarKus-metingen beschikbaar zijn vanaf 1965, kan slechts een deel van de data van de indicatoren voor de veiligheid (die alle zijn gebaseerd op de JarKus-database) gerelateerd worden aan golfdata.

In de golfdata zoals beschikbaar in OpenEarth (ongewijzigd overgenomen vanuit Waterbase) waren onrealistisch hoge pieken aanwezig, tot significante golfhoogtes van wel 30 m. Opvallend genoeg waren er dan ook vrijwel altijd dubbele metingen op één tijdstip beschikbaar. Deze extreme waarden zijn uit de datasets verwijderd.

Bij het vertalen van golfkarakteristieken van de meetstations naar de locaties langs de kust is geen rekening gehouden met golfvervorming door bijvoorbeeld shoaling en refractie. Niettemin wordt dit in eerste instantie verondersteld niet van cruciaal belang te zijn voor dit project, omdat niet de absolute waarde van de golfenergie bij de kust van belang is, maar de variatie in gemid-

delde golfenergie over de verschillende jaren.

Per JarKus-raai is eerst de golfdata van de meetstations vertaald naar data ter plaatse. Vervolgens is per jaar de gemiddelde golfenergie H_s^2 bepaald over de periode tussen de JarKus-meting in het betreffende jaar en de JarKus-meting in het voorgaande jaar. Omdat het meetmoment van jaar tot jaar en van raai tot raai verschilt, geldt dat ook voor de periode waarover de gemiddelde golfenergie is bepaald. Op deze manier kunnen veranderingen in het dwarsprofiel tussen twee opeenvolgende JarKus-metingen nauwkeurig gerelateerd worden aan de gemiddelde golfenergie over de periode tussen deze twee momenten.

2.2.3 Jaargemiddeld Dean getal

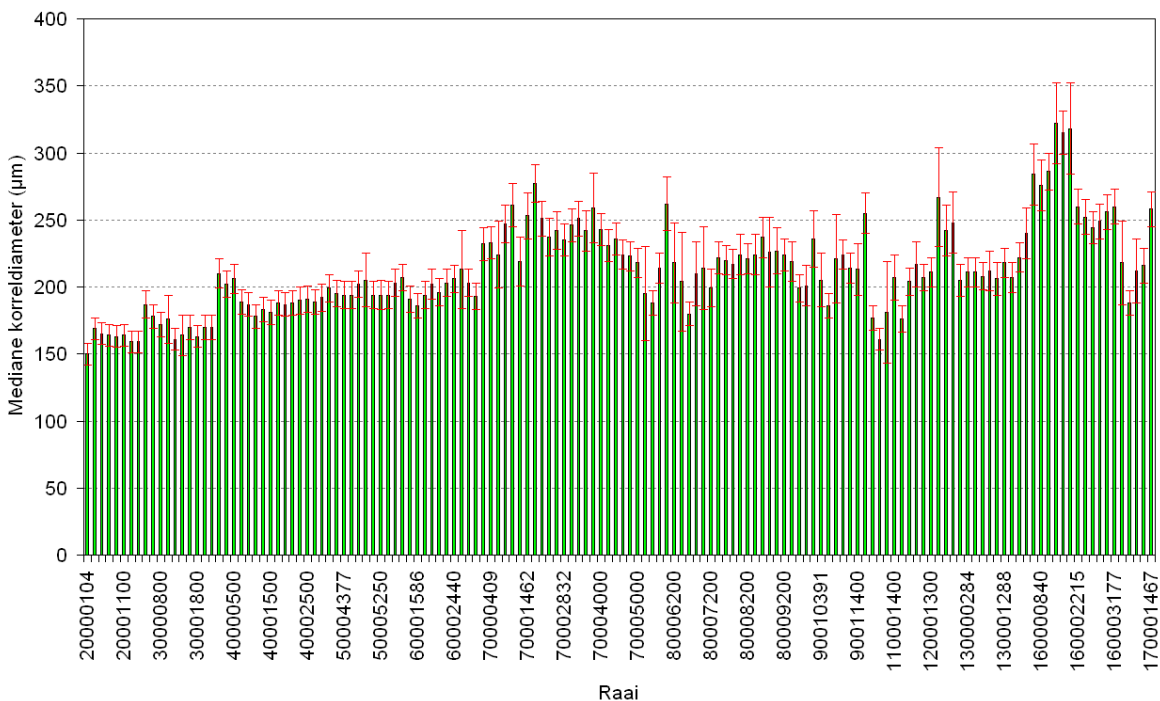
Het Dean getal wordt gegeven door

$$\Psi = \frac{H_s}{T_{m02} \cdot w_s}, \quad (2-1)$$

waarin T_{m02} de golfperiode (in s) en w_s de valsnelheid van het zand (in m/s) is, zie [Dean \(1973\)](#).

Deze indicator is toegevoegd om ook karakteristieken van de sterkte van de zandige kust (de valsnelheid van het sediment) mee te nemen.

Data voor de golfperiode is beschikbaar voor dezelfde stations en perioden als de data voor de golfhoogte. De valsnelheid is berekend met de vergelijkingen uit [Rijn \(1993\)](#) op basis van korreldiameters, zoals beschreven in [TAW \(1984\)](#). Figuur 2-3 toont de verschillende waarden voor de korreldiameters langs de kust. Zowel de mediane waarde als de standaardafwijking is weergegeven.



Figuur 2-3 Korreldiameters langs de kust volgens [TAW \(1984\)](#). De figuur toont de mediane waarden met in rood de standaardafwijkingen aan weerszijden van de mediane waarden.

Per JarKus-raai is eerst de golfdata van de meetstations vertaald naar data ter plaatse. De korreldiameter (en daarmee indirect de valsnelheid) per raai is bepaald door lineaire interpolatie

tussen de waarden uit TAW (1984). Vervolgens is per jaar het gemiddelde Dean getal bepaald over de periode tussen de JarKus-meting in het betreffende jaar en de JarKus-meting in het voorgaande jaar. Omdat het meetmoment van jaar tot jaar en van raai tot raai verschilt, geldt dat ook voor de periode waarover het gemiddelde Dean getal is bepaald. Op deze manier kunnen veranderingen in het dwarsprofiel tussen twee opeenvolgende JarKus-metingen nauwkeurig gerelateerd worden aan het gemiddelde Dean getal over de periode tussen deze twee momenten.

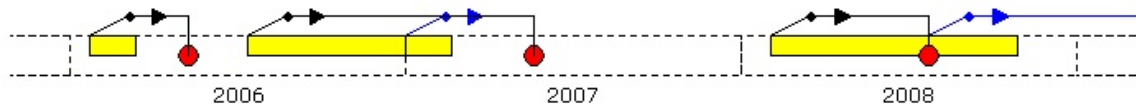
2.3 Zandsuppleties

Voor gegevens over de uitgevoerde zandsuppleties is gebruik gemaakt van de database van Rijkswaterstaat, zoals beschikbaar in OpenEarth. In deze database is per suppletie de periode (begin- en einddatum), het gesuppleerde volume en de strekking langs de kust vermeld. Bijvoorbeeld tussen januari 2009 en maart 2009 is nabij Den Helder 1.302.000 m³ gesuppleerd over een strekking langs de kust van 3 km.

In OpenEarth is reeds een vertaling opgenomen naar suppletievolumes in m³/m per raai en per jaar. Daarbij is de informatie over de begin- en einddatum in het betreffende jaar behouden. De genoemde suppletie bij Den Helder levert dan een volume van 434 m³/m in 2009, geldig voor de raaien die binnen de strekking van 3000 m vallen.

Er wordt onderscheid gemaakt tussen vooroever-suppleties, strand-suppleties, duin-suppleties en overige suppletietypen, waarbij de eerste twee typen verreweg het meest voorkomen. In dit onderzoek is daarom alleen onderscheid gemaakt tussen vooroever-suppleties en strand-suppleties. De volumes voor duin-suppleties en overige suppletietypen zijn bij de volumes van de strand-suppleties gevoegd.

Per jaar en per raai is het suppletievolume bepaald over de periode tussen de JarKus-meting in het betreffende jaar en de JarKus-meting in het voorgaande jaar. Deze periode varieert dus per raai en per jaar. Wanneer een suppletie in een bepaald jaar deels vóór en deels na het meetmoment voor de JarKus-meting viel, is het suppletievolume opgesplitst. De verdeling is dan afhankelijk van de ligging van het JarKus-meetmoment binnen de suppletieperiode. Figuur 2-4 geeft deze werkwijze schematisch weer. Op deze manier kunnen veranderingen in het dwarsprofiel tussen twee opeenvolgende JarKus-metingen nauwkeurig gerelateerd worden aan het gesuppleerde volume in de periode tussen deze twee momenten. De suppletie van het voorbeeld bij Den Helder viel geheel tussen de JarKus-metingen van 2008 en 2009, zodat het volume van 434 m³/m in zijn geheel aan die periode is toegeschreven.



Figuur 2-4 Principeschets voor het toewijzen van suppletieperiodes (geel) aan periodes tussen JarKus-meetmomenten (rood) in verschillende jaren (zwarte, onderbroken lijnen)

3 Effect van natuurlijke forcering

De centrale hypothese in dit onderzoek is dat veranderingen in veiligheid het gevolg zijn van de som van een langjarige trend, het effect van natuurlijke forcering en het effect van suppleties (vergelijking 1-1). In dit hoofdstuk staat de invloed van de natuurlijke forcering centraal.

3.1 Werkwijze

Deze paragraaf gaat in op de methode om het verband tussen (indicatoren voor) natuurlijke forcering en veranderingen in (indicatoren voor) de veiligheid te bepalen.

3.1.1 Centrale gedachte

In de periode voor 1990 werd relatief weinig gesuppleerd. Vanaf de eerste Kustnota in 1990 is wettelijk bepaald dat de basiskustlijn (BKL) moest worden gehandhaafd. Met behulp van 'dynamisch handhaven' moet de kustlijn sindsdien tenminste gehandhaafd blijven op de plaats waar die in 1990 lag. Dit heeft geleid tot een sterke intensivering van het suppletiebeleid. Vanaf ongeveer 2000 is het handhaven van de zandvoorraden in het kustfundament daaraan toegevoegd. De Nota Ruimte van 2006 omschrijft het kustfundament als 'het gehele zandgebied, nat én droog, dat als geheel van belang is als drager van functies in het kustgebied'.

Vanwege deze ontwikkeling in de intensiteit van het suppletieprogramma is de relatie tussen natuurlijke forcering en de veiligheid bepaald op basis van de periode 1965 tot en met 1990. De trends werden in die periode nog relatief weinig 'verstoord' door menselijk ingrijpen.

Stormen beïnvloeden het dwarsprofiel van de kust binnen een korte tijdschaal. Gesteld wordt daarom dat langjarige trends in de ontwikkeling van de kust niet afhankelijk zijn van een individuele storm. Langjarige trends (structurele erosie of sedimentatie) worden veroorzaakt door permanente oorzaken, als de aanleg van strekdammen, golfbrekers of een structurele import of export van sediment. Daarom wordt de langjarige trend uit de data verwijderd, alvorens het effect van stormen wordt onderzocht.

In hoofdstuk 1 is de centrale vergelijking uit dit onderzoek (vergelijking 1-1) geponeerd:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = L + f(F) + g(S),$$

waarin V een bepaalde indicator voor de kustveiligheid, L de langjarige trend, $f(F)$ een nader te bepalen functie van het effect van natuurlijke forcering F , en $g(S)$ een nader te bepalen functie van het effect van suppleties S is.

Voor de periode tot en met 1990 wordt dus aangenomen dat de invloed van suppleties verwaarloosd kan worden, ofwel:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = L + f(F). \quad (3-1)$$

Het verwijderen van de langjarige trend is weer te geven als:

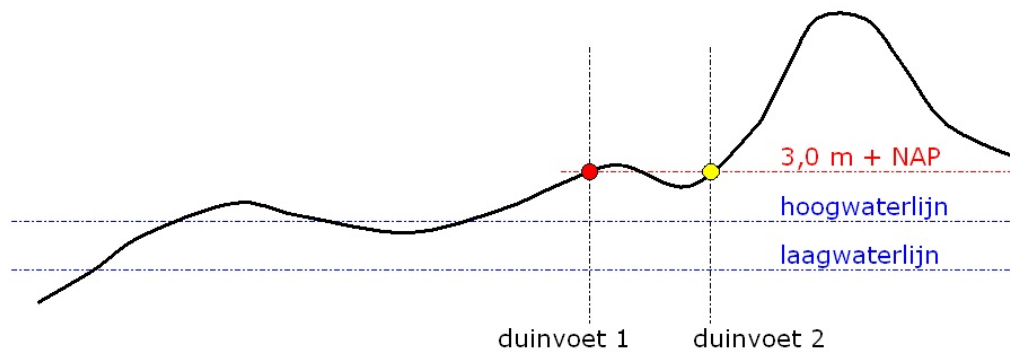
$$\frac{\Delta V}{\Delta t} - L = f(F), \quad (3-2)$$

waarbij voor V een indicator voor de veiligheid uit paragraaf 2.1, en voor F een indicator voor de natuurlijke forcering uit paragraaf 2.2 kan worden ingevuld.

3.1.2 Filtering datasets

Voornamelijk de datasets met de duinvoetpositie en de MKL bevatten veel discontinuïteiten. Landwaartse verschuivingen kunnen tot op zekere hoogte gerelateerd worden aan stormen. De datasets bevatten echter ook sprongen van honderden meters. Dit is geen fysisch verschijnsel, maar het gevolg van de methodiek. Figuur 3-1 toont meerdere snijpunten met het duinvoetniveau van 3 m+NAP. Bij de situatie uit de figuur wordt 'duinvoet1' aangemerkt als de duinvoetpositie. Wanneer het 'heuveltje' tussen de twee snijpunten in een volgend jaar geheel onder 3 m+NAP verdwijnt, verspringt de duinvoetpositie naar 'duinvoet2'. Dergelijke discontinuïteiten zijn onwenselijk, omdat ze een *zeer* sterke invloed hebben op de $\Delta V/\Delta t$. Omdat de MKL-positie afhangt van de duinvoetpositie, komen deze discontinuïteiten ook voor in de dataset met MKL-posities.

Een landwaartse verschuiving van meer dan 50 m in duinvoetpositie of MKL-positie is daarom uit de data verwijderd. Hetzelfde geldt voor een zeewaartse verschuiving van meer dan 50 m. Zo'n zeewaartse verschuiving is ofwel het gevolg van de methodiek, ofwel van een forse strandsuppletie. Beide effecten zijn niet wenselijk bij het onderzoeken van het verband uit vergelijking 3-2.



Figuur 3-1 Meerdere snijpunten met het duinvoetniveau van 3 m+NAP

Voor de veranderingen in de faalkans ($\Delta \log P$) is een filter toegepast op waarden kleiner dan -5 en groter dan 5. Dit houdt in dat de faalkansratio tussen twee opeenvolgende jaren groter zou zijn dan 10^5 . De dataset met faalkansen bevat echter vrijwel geen onrealistische sprongen, waardoor filtering eigenlijk niet nodig is. Het filter heeft dan ook geen aantoonbaar effect op de uitkomsten gehad.

3.1.3 Langjarige trend

In de datasets met indicatoren voor de veiligheid zijn langjarige trends zichtbaar, die niet gerelateerd kunnen worden aan een individuele storm of aan een bepaalde suppletie. Het betreft dan structurele erosie of sedimentatie door een structureel tekort of overschot aan sedimentaanbod. Dit kan bijvoorbeeld het gevolg zijn van de aanleg van havendammen zoals bij IJmuiden of strekdammen zoals op Texel bij het Eierlandse Gat.

Met behulp van lineaire regressie is de langjarige trend L in een bepaalde indicator voor de veiligheid V bepaald. Het lineaire verband wordt gegeven door:

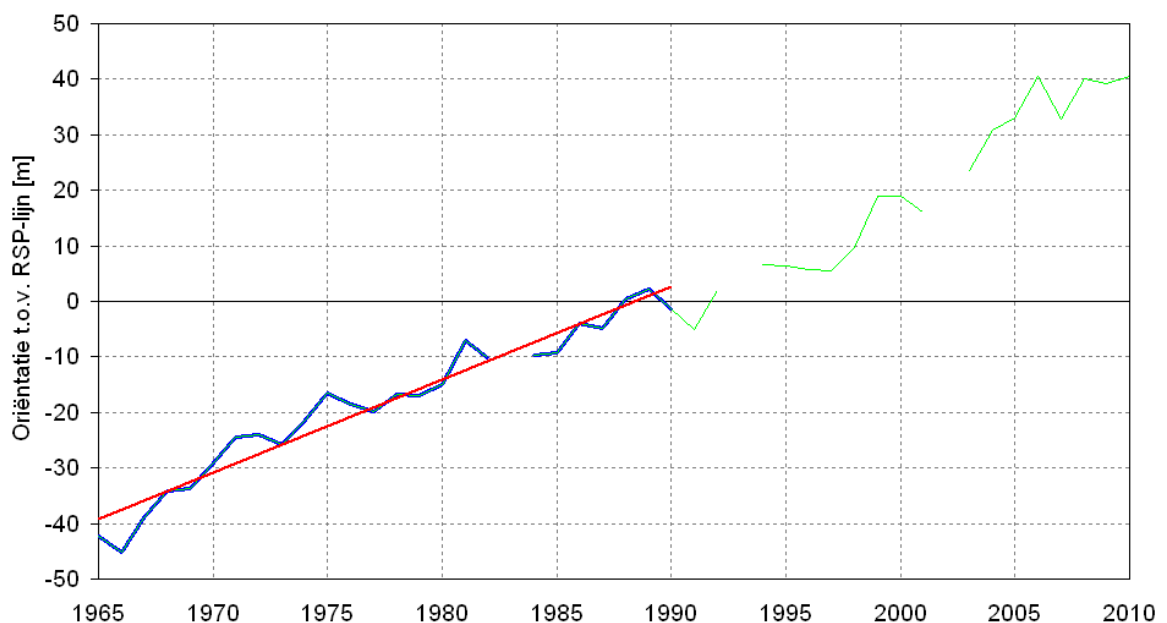
$$V = a \cdot t + b. \quad (3-3)$$

De coëfficiënten a en b zijn bepaald door toepassing van de kleinste kwadraten methode op

de data voor de periode 1965 tot en met 1990. De langjarige trend L is dan gelijk aan de richtingsofficiënt van het lineaire verband:

$$L = \frac{dV}{dt} = a. \quad (3-4)$$

Figuur 3-2 toont een voorbeeld van een duidelijke langjarige trend bij raai 7005300 in Noord-Holland. Deze raai ligt net ten noorden van de haven van IJmuiden. De havendammen blokkeren hier het transport van sediment langs de kust. Het zand hoopt zich daardoor op ten noorden van de havendammen. Hierdoor verschuift de duinvoetpositie structureel in zeewaartse (positieve) richting. Voorkómen moet worden dat het effect van het intensieve suppletieprogramma uit de data wordt verwijderd. Dit zou leiden tot een onderschatting van de effectiviteit van suppleties in het volgende hoofdstuk. De langjarige trend wordt daarom bepaald op de periode tot en met 1990.



Figuur 3-2 Voorbeeld van een langjarige trend in de data voor de duinvoetpositie t.o.v. de Rijkstrandpaal (RSP) van raai 7005300 in Noord-Holland, direct ten noorden van de haven van IJmuiden. Data na 1990 (in groen) is niet meegenomen bij het bepalen van de langjarige trend.

Overeenkomstig vergelijking 3-2 wordt de gevonden langjarige trend per raai uit de data verwijderd, voordat het effect van natuurlijke forcering op de veranderingen in de kustveiligheid wordt bepaald. Géén correctie voor de langjarige trend wordt toegepast wanneer er én zeer weinig metingen (minder dan 5 datapunten) zijn, én de gevonden 'trend' een relatief erg grote (absolute) waarde heeft. Het gevonden lineaire verband wordt dan als niet realistisch beschouwd.

3.1.4 Het effect van natuurlijke forcering

Onder de aanname dat het effect van suppleties vóór 1990 nog beperkt was, resteert na verwijdering van de langjarige trend in de indicatoren voor de kustveiligheid een tijdreeks, die (volgens de centrale hypothese uit dit onderzoek) gedomineerd wordt door het effect van stormen. Het verband wordt kernachtig weergegeven door vergelijking 3-2.

De Nederlandse kust is verdeeld in kustvakken, zie figuur 3-3. De geometrie van de kust wordt

in elk kustvak vastgelegd door een fors aantal Jarkus-raaien. Zo zijn drie niveaus te onderscheiden: de gehele kust, het kustvak en de afzonderlijke raai.



Figuur 3-3 Weergave van de verdeling van de Nederlandse kust in kustvakken

De langjarige trend is bepaald per raai. Deze keuze is gemaakt omdat binnen een kustvak duidelijke variaties op kunnen treden in de trend. Voorbeelden zijn de eilandkoppen van de Waddeneilanden, of het verschil tussen het noorden en het zuiden van de Noord-Hollandse kust.

Het effect van stormen is bepaald per kustvak. De achterliggende gedachte is dat het effect van een storm niet sterk varieert binnen een kustvak. Anderzijds heeft een storm meer invloed op de dynamische kust van de Waddeneilanden dan op de Hollandse kust. Om enerzijds voldoende data te hebben voor het leggen van betrouwbare statistische verbanden, en anderzijds de verschillen in gebiedskarakteristieken niet uit het oog te verliezen, is gekozen voor het schaalniveau van een kustvak voor de analyse.

Een tijdreeks van een indicator voor de natuurlijke forcering F wordt vergeleken met veranderingen in de tijd $\Delta V / \Delta t$ van een indicator voor de veiligheid. Met behulp van lineaire regressie wordt vervolgens een lineair verband bepaald tussen F en $\Delta V / \Delta t$. De verwachting is dan dat een toename van de natuurlijke forcering F gepaard gaat met een grotere afname van de kustveiligheid V . In formulevorm luidt dit lineaire verband:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} - L = f(F) = C \cdot F(t) + D. \quad (3-5)$$

Er zijn twee methoden voorhanden om de coëfficiënten C en D per kustvak te bepalen, opnieuw voor de periode tot en met 1990.

1. De waarden voor $\Delta V/\Delta t$, L en F middelen over het kustvak, en vervolgens lineaire regressie toepassen op deze gemiddelde waarden;
2. Lineaire regressie toepassen op de waarden voor $\Delta V/\Delta t$, L en F per raai, en vervolgens het gemiddelde nemen van de coëfficiënten c en d van alle raaien in het kustvak.

Het verschil gaat dus over *de volgorde* van het bepalen van het gemiddelde en het uitvoeren van de lineaire regressie. De eerste methode heeft het voordeel van robuustere data (minder ruis), de tweede methode het voordeel van het meenemen van lokale verschillen in de langjarige trend. Beide methoden zijn toegepast. Idealiter komen de resultaten sterk overeen.

3.2 Resultaten

De resultaten van de analyse naar het verband tussen natuurlijke forcering en kustveiligheid komen in deze paragraaf *pér* onderzochte indicator voor de veiligheid (zie § 2.1) aan de orde.

De relatie tussen indicatoren voor veiligheid en natuurlijke forcering worden telkens op drie manieren gepresenteerd:

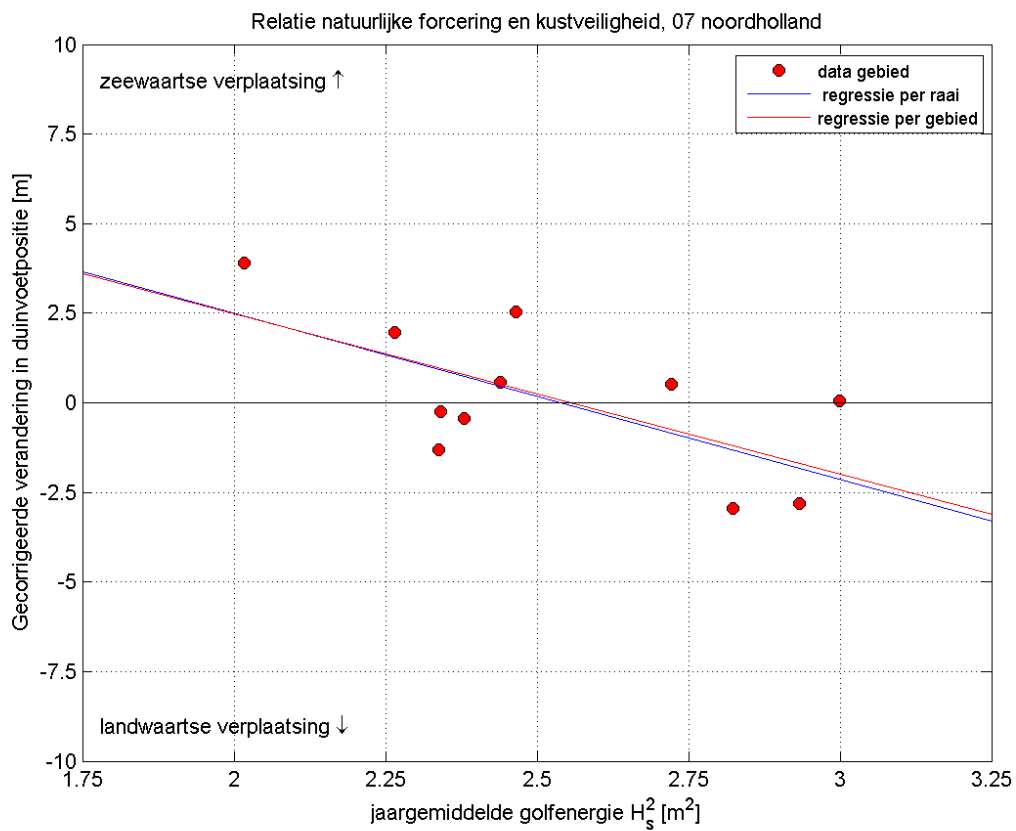
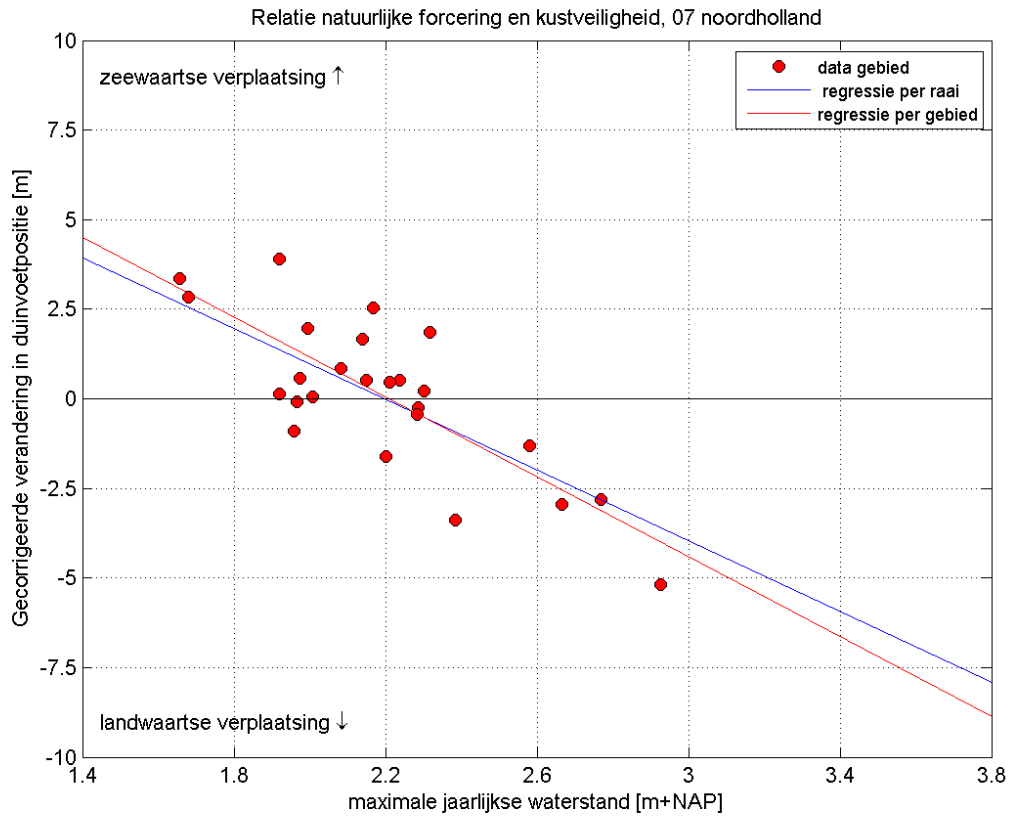
1. Figuren met natuurlijke forcering versus verandering in veiligheid, inclusief regressielijnen;
2. Tabellen met richtingscoëfficiënten van het lineaire verband uit vergelijking 3-5, overeenkomstig de twee methoden die besproken zijn in § 3.1.4.
3. Classificatietabellen met aantallen waarden per klasse met een zekere combinatie van natuurlijke forcering en verandering van de veiligheid;

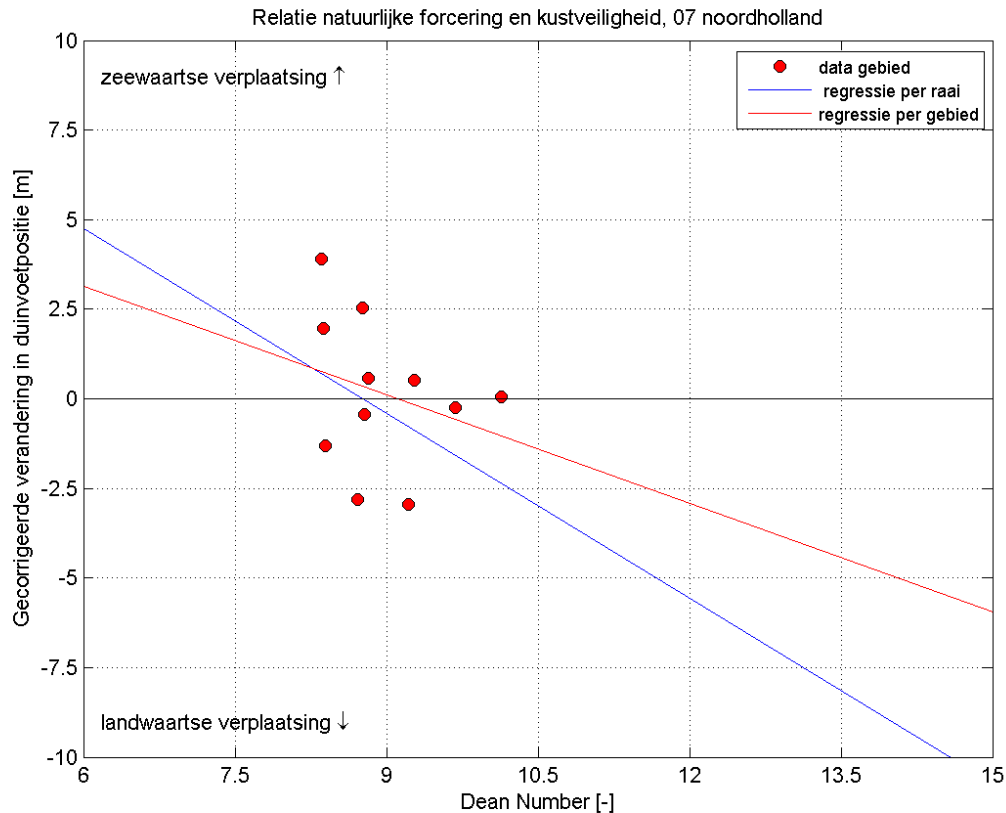
3.2.1 Duinvoetpositie

Tijdens zwaardere stormen kan de duinvoetpositie veranderen ten gevolge van duinafslag. De verwachting is dan ook dat de duinvoetpositie relatief gezien sterker landwaarts verschuift bij zwaardere stormen. Een landwaartse verschuiving heeft een negatief teken, overeenkomstig de tekendefinitie in de JarKus-data.

Onderstaande drie delen van figuur 3-4 tonen de relatie tussen de drie indicatoren voor de natuurlijke forcering (zie § 2.2) en veranderingen in duinvoetpositie. De veranderingen in duinvoetpositie zijn eerst gecorrigeerd voor de langjarige trend, overeenkomstig het concept uit vergelijking 3-5. Vervolgens is een lineair verband bepaald op basis van de kleinste-kwadratenmethode volgens de twee methoden als genoemd in § 3.1.4.

De rode markers en de rode lijn behoren bij de eerste methode (regressie per kustvak na middelen over de raaien). De blauwe lijn behoort bij de tweede methode (middelen over de raaien in het kustvak na regressie per raai). De lijnen kunnen van elkaar verschillen wanneer het verband niet aanwezig of zwak is, of wanneer de langjarige trend sterk verschilt binnen het kustvak.





Figuur 3-4 Relatie tussen jaarlijkse maximale waterstand (boven), jaargemiddelde golfenergie (midden) H_s^2 en jaargemiddelde Dean getal (onder) en verandering in duinvoetpositie in Noord-Holland. De veranderingen in duinvoetpositie zijn gecorrigeerd voor de langjarige trend. De rode markers geven waarden voor de onderzochte jaren (1965 tot en met 1990 of 1979 tot en met 1990), gemiddeld over de raaien van Noord-Holland. De rode lijn is het resultaat van lineaire regressie door deze punten. De blauwe lijn is het resultaat van regressie per raai, en vervolgens middelen over de raaien.

Drie criteria zijn beschouwd om de sterkte van de relatie tussen beide indicatoren weer te geven.

1. Het teken van de richtingscoëfficiënt. Verwacht wordt een negatief verband, wat inhoudt dat de duinvoetpositie sterker landwaarts verschuift bij een hogere natuurlijke forcering.
2. De determinatiecoëfficiënt R^2 , behorend bij de regressie over de over het kustvak gemiddelde waarden, idealiter gelijk aan 1.
3. Het relatieve verschil tussen beide richtingscoëfficiënten C_1 en C_2 behorend bij beide regressiemethoden uit § 3.1.4, gegeven door $\Delta C/\bar{C} = |C_1 - C_2| / (|C_1/2| + |C_2/2|)$ in procenten, idealiter gelijk aan 0%.

Voor Noord-Holland (zie figuur 3-4) geven alle drie de indicatoren voor de natuurlijke forcering een negatief verband. De determinatiecoëfficiënt R^2 bedraagt voor de jaarlijkse maximale waterstand 0.63, voor de jaargemiddelde golfenergie 0.42 en voor het jaargemiddelde Dean getal 0.08. Dit houdt in dat de spreiding van de punten rond het lineaire verband het kleinst is in het geval van de jaarlijkse maximale waterstand, en het grootst bij het jaargemiddelde Dean getal. Merk daarbij op dat het aantal punten (jaren) bij de waterstand groter is dan bij de andere twee, aan golven gerelateerde indicatoren. Het verschil tussen beide richtingscoëfficiënten bedraagt

respectievelijk 12%, 4% en 52%.

Tabel 3-1 toont de resultaten van de regressie voor *alle* kustvakken. Te zien is dat de jaarlijkse maximale waterstand de beste indicator is voor de natuurlijke forcering in het geval van de duinvoetpositie. De richtingscoëfficiënten zijn altijd negatief, met uitzondering van één waarde voor Noord-Beveland. Deze licht positieve waarde is te verklaren uit het feit dat de kust van Noord-Beveland slechts uit 28 raaien bestaat. Daarnaast is de determinatiecoëfficiënt R^2 bij de maximale waterstand groter dan bij de andere indicatoren. Tenslotte zijn de relatieve verschillen tussen de twee richtingscoëfficiënten het kleinst bij de jaarlijkse maximale waterstand. Er is geen significant verband tussen het Dean getal en veranderingen in duinvoetpositie.

Vanuit fysisch oogpunt is de volgorde in kwaliteit van de indicatoren voor de natuurlijke forcering verklaarbaar. Veranderingen in de bodemligging rond het duinvoetniveau van 3 m+NAP zijn sterk gerelateerd aan hoge waterstanden. Een relatief sterke golfaanval gedurende lagere waterstanden heeft wel invloed op de vooroever, maar niet op het buitenste duinbeloop.

De relatie tussen veranderingen in veiligheid en het jaargemiddelde Dean getal is zeer zwak. De verhouding H_s/T_{m02} is gerelateerd aan de golfsteilheid. In theorie geeft het Dean getal daardoor een indicatie voor de kans op aanzanding of erosie op een bepaalde locatie. Daarnaast is de dimensieloosheid van de parameter een sterk punt. Gaande van diep water richting de kust, verandert het Dean getal zeer sterk als gevolg van golftransformatieprocessen als shoaling en refractie. Omdat gebruik is gemaakt van off-shore golfdata, kan geen relatie gelegd worden met de near-shore morfologische processen. Omdat de verhouding H_s/T_{m02} bij de meetlocaties verder weinig zegt over de sterkte van de belasting op een bepaald moment, is het matige presteren van het Dean getal verklaarbaar.

Kustvak	C_1			C_2			R^2 bij C_1			$ \Delta C / \bar{C} $		
	h	H_s^2	Ψ	h	H_s^2	Ψ	h	H_s^2	Ψ	h	H_s^2	Ψ
Schiermon.	-1.3	0.3	1.1	-2.8	-0.7	1.5	0.05	0.00	0.10	71%	200%	28%
Ameland	-8.8	-12.1	0.3	-10.0	-10.9	2.5	0.56	0.30	0.00	13%	11%	158%
Terschell.	-2.4	-3.0	0.4	-2.4	-3.9	-0.3	0.26	0.13	0.01	2%	25%	200%
Vlieland	-3.3	-5.8	-1.4	-3.3	-5.8	-1.4	0.32	0.65	0.20	2%	0%	2%
Texel	-8.5	-7.4	-0.1	-9.4	-6.8	0.2	0.54	0.24	0.00	10%	9%	200%
N-Holland	-5.6	-4.5	-1.0	-4.9	-4.6	-1.7	0.63	0.42	0.08	12%	4%	52%
Rijnland	-5.3	-4.2	0.2	-5.3	-4.2	0.1	0.43	0.18	0.00	0%	0%	14%
Delfland	-7.2	-6.6	-0.5	-6.6	-6.8	-0.8	0.26	0.14	0.00	9%	3%	54%
Voorne	-4.0	0.9	0.0	-4.0	-0.2	0.0	0.13	0.01	0.00	1%	200%	10%
Goeree	-4.8	-2.7	0.7	-4.2	-2.0	0.6	0.17	0.10	0.03	13%	33%	17%
Schouwen	-6.9	-3.8	-0.1	-4.6	-3.0	-0.6	0.37	0.16	0.00	39%	23%	136%
N-Beveland	-2.8	-5.2	-1.5	0.2	-3.6	-0.4	0.06	0.66	0.26	200%	34%	124%
Walcheren	-3.5	-3.5	0.1	-2.6	-3.7	-0.1	0.13	0.38	0.00	30%	7%	200%
Zeeuws-Vl.	-0.3	-2.9	-0.1	-0.8	-2.6	-0.1	0.00	0.29	0.00	82%	9%	19%
Gemiddeld	-4.6	-4.3	-0.1	-4.3	-4.2	0.0	0.28	0.26	0.05	35%	40%	87%

Tabel 3-1 Richtingscoëfficiënten bij regressie per kustvak (C_1) of regressie per raai (C_2), samen met de determinatiecoëfficiënten R^2 behorend bij C_1 en het relatieve verschil tussen beide richtingscoëfficiënten $|\Delta C|/|\bar{C}|$. Rode richtingscoëfficiënten geven een onrealistische, positieve relatie.

De richtingscoëfficiënten voor de relatie tussen de jaarlijkse maximale waterstand en veranderingen in de duinvoetpositie (zie de vijfde kolom uit tabel 3-1) variëren aanzienlijk over de verschillende kustvakken, maar duidelijke patronen (bijvoorbeeld structurele verschillen tussen Waddeneilanden, de Hollandse kust en de Zeeuwse eilanden) zijn niet zichtbaar.

Een alternatieve wijze van presenteren is die in de vorm van classificatietabellen, zoals tabel 3-2. Elke combinatie van een raai in een bepaald kustvak en een jaar levert een datapunt. Voor alle datapunten van Noord-Holland is een maximale waterstand en een bijbehorende verandering in duinvoetpositie bekend. Daarmee valt elk datapunt in een bepaalde klasse. Zoals te verwachten zijn de totale aantallen met een verandering in duinvoetpositie rond 0 relatief groot. De meeste waarden voor de jaarlijkse maximale waterstand bevinden zich in de klasse tussen 1.8 en 2.2 m+NAP.

We delen het aantal waarden in een bepaalde 'combinatieklasse' door het aantal waarden in een klasse voor de jaarlijkse maximale waterstand. Daardoor ontstaat een verdeling van de waarden in een klasse voor de maximale waterstand over de klassen met veranderingen in duinvoetpositie. Percentages tellen dan ook horizontaal (en niet verticaal) op tot 100%. Een voorbeeld: bij een maximale waterstand lager dan 1.8 m+NAP ligt 33% van de veranderingen in duinvoetpositie tussen +2.5 en +5.0 m. Waarden tussen 10 en 20% zijn blauw gekleurd, waarden hoger dan 20% rood. Een positieve verschuiving is een zeewaartse verschuiving.

Het is duidelijk zichtbaar dat de landwaartse verschuiving van de duinvoet toeneemt naarmate de jaarlijkse maximale waterstand groter is. Hetzelfde beeld is zichtbaar bij vrijwel alle kustvakken in het geval van de relatie tussen jaarlijkse maximale waterstand en veranderingen in duinvoetpositie. Het valt op dat in jaren met een relatief lage jaarlijkse maximale waterstand er vrijwel altijd een zeewaartse verschuiving optreedt, terwijl er bij een hogere jaarlijkse maximale waterstand vrijwel altijd landwaartse verschuivingen zichtbaar zijn. Dit beeld komt overeen met het door nul snijden van de regressielijnen in figuur 3-4.

Δ duinvoetpositie [m]		$-\infty$	-7.5	-5.0	-2.5	0.0	2.5	5.0	7.5	
		-7.5	-5.0	-2.5	0.0	2.5	5.0	7.5	∞	
h_{max} [m]	Aantal	357	419	788	1163	1086	703	309	191	
0.0	1.8	502	1%	2%	3%	11%	27%	33%	18%	4%
1.8	2.2	3118	3%	6%	15%	28%	25%	14%	6%	4%
2.2	2.6	1882	8%	10%	18%	21%	20%	14%	6%	4%
2.6	∞	848	22%	18%	21%	18%	12%	5%	2%	1%

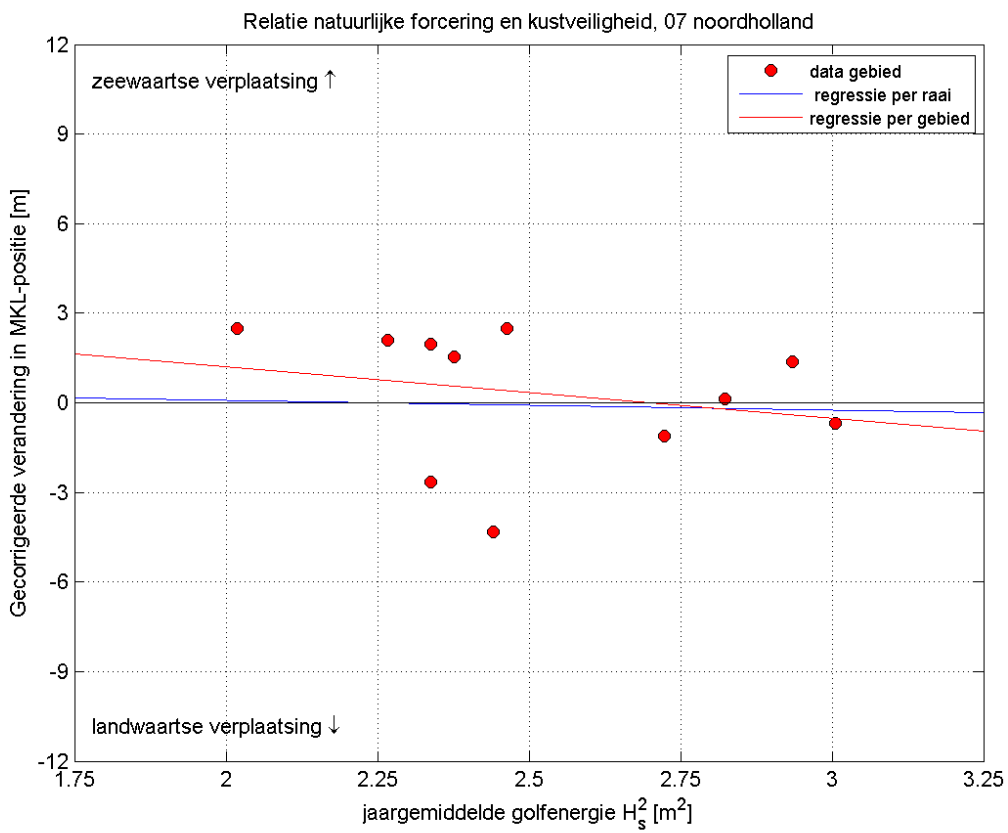
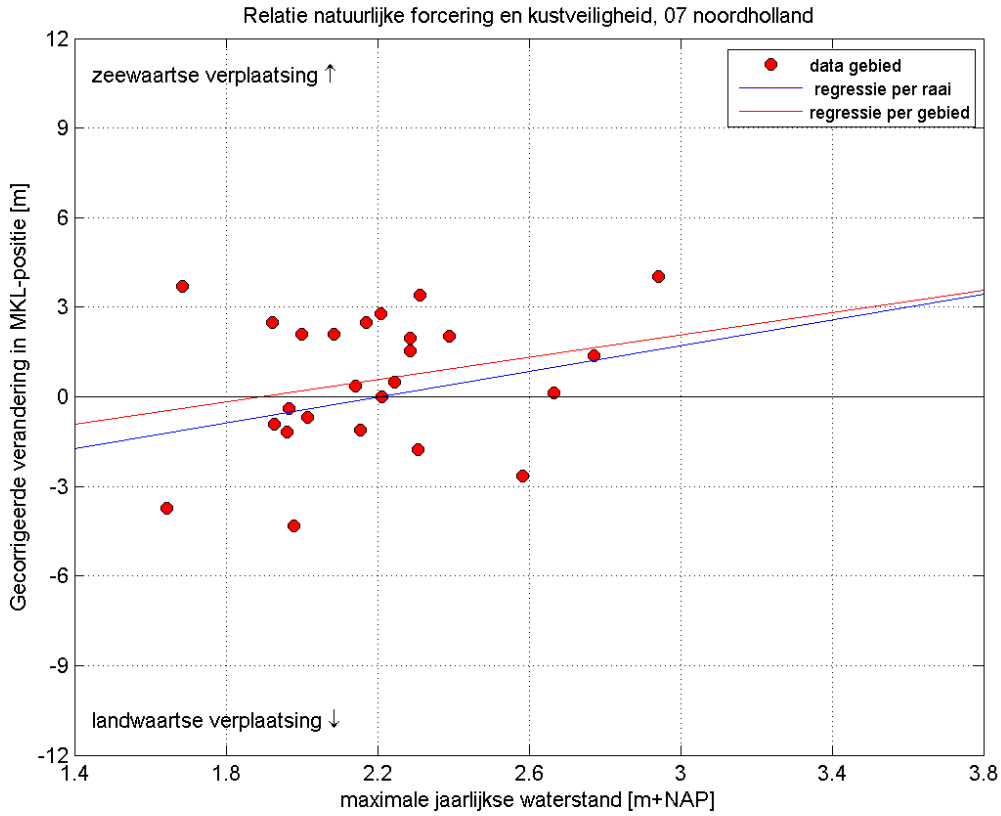
Tabel 3-2 Classificatie van data voor Noord-Holland in klassen voor de jaarlijkse maximale waterstand en klassen voor de bijbehorende verandering in duinvoetpositie. Percentages zijn berekend door een aantal te delen door het totaal aantal in een bepaalde klasse voor de jaarlijkse maximale waterstand.

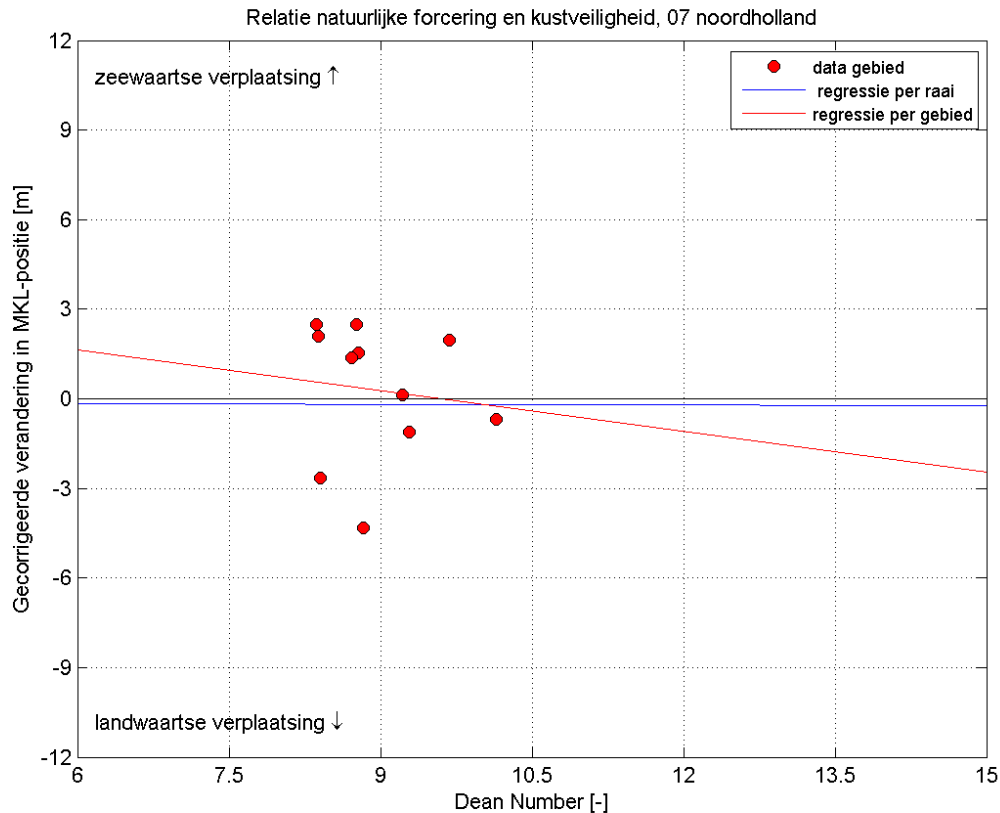
Het beeld uit tabel 3-2 is kwalitatief ook zichtbaar met de jaargemiddelde golfenergie als indicator voor de natuurlijke forcering. Bij het Dean getal zijn er geen duidelijke patronen waarneembaar.

3.2.2 Momentane kustlijn

De MKL-positie is afhankelijk van de duinvoetpositie en van het volume zand rond de waterlijn, zie figuur 2-1. De verwachting is dan ook dat de MKL-positie relatief gezien sterker landwaarts verschuift in stormachtigere jaren. Een landwaartse verschuiving heeft een negatief teken, overeenkomstig de tekendefinitie in de JarKus-data.

Onderstaande drie delen van figuur 3-4 tonen de relatie tussen de drie indicatoren voor de natuurlijke forcering (zie § 2.2) en veranderingen in MKL-positie. In § 3.2.1 over de duinvoetpositie is een nadere toelichting bij dit type figuren te vinden.





Figuur 3-5 Relatie tussen jaarlijkse maximale waterstand (boven), jaargemiddelde golfenergie (midden) H_s^2 en jaargemiddelde Dean getal (onder) en verandering in MKL-positie in Noord-Holland. De veranderingen in MKL-positie zijn gecorrigeerd voor de langjarige trend. De rode markers geven waarden voor de onderzochte jaren (1965 tot en met 1990 of 1979 tot en met 1990), gemiddeld over de raaien van Noord-Holland. De rode lijn is het resultaat van lineaire regressie door deze punten. De blauwe lijn is het resultaat van regressie per raai, en vervolgens gemiddelen over de raaien.

Dezelfde drie criteria (als beschreven bij de behandeling van de duinvoetpositie in § 3.2.1) zijn beschouwd om de sterkte van de relatie tussen beide indicatoren weer te geven. Voor Noord-Holland (zie figuur 3-5) geeft de jaarlijkse maximale waterstand een positief verband, en de andere twee indicatoren voor de natuurlijke forcering een negatief verband.

De positieve relatie tussen maximale waterstand en verandering in MKL-positie is ook zichtbaar bij veel andere kustvakken. Enerzijds leidt een hoge waterstand tot een landwaartse (negatieve) verschuiving van de duinvoetpositie door duinafslag (zie § 3.2.1), en daarmee indirect ook tot een landwaartse verschuiving van de MKL-positie. Anderzijds komt het afgeslagen volume weer in de rekenschijf terecht (zie figuur 2-1), waardoor de MKL-positie zeewaarts verschuift. De jaarlijkse maximale waterstand is daarom geen goede indicator om de terugschrijving van de MKL-positie te voorspellen.

De beide andere indicatoren zijn aan het jaargemiddelde golfklimaat gerelateerd. Deze indicatoren vertonen wél een negatief verband, wat inhoudt dat de MKL-positie landwaarts verschuift bij sterkere structurele erosie, veroorzaakt door relatief sterke golfwerking over langere perioden in dat jaar.

De determinatiecoëfficiënt R^2 bedraagt in het geval van Noord-Holland voor de jaarlijkse maximale waterstand 0.07, voor de jaargemiddelde golfenergie 0.05 en voor het jaargemiddelde Dean getal 0.01. De statistische relaties zijn in alle gevallen duidelijk zwakker dan in het geval van de duinvoetpositie. De spreiding van de punten rond het lineaire verband is het kleinst in het geval van de jaarlijkse maximale waterstand, en het grootst bij het jaargemiddelde Dean getal. Merk daarbij op dat het aantal punten (jaren) bij de waterstand groter is dan bij de andere twee, aan golven gerelateerde indicatoren. Het relatieve verschil tussen beide richtingscoëfficiënten bedraagt voor Noord-Holland respectievelijk 14%, 137% en 194%.

Tabel 3-3 toont de resultaten van de regressie voor *alle* kustvakken. Te zien is dat de jaargemiddelde golfenergie H_s^2 de beste indicator is voor het verband tussen natuurlijke forcering en terugschrijving van de MKL-positie. De richtingscoëfficiënten zijn veelal negatief, met uitzondering van Ameland en Voorne. Daarnaast is de determinatiecoëfficiënt R^2 het grootst en het relatieve verschil tussen beide richtingscoëfficiënten het kleinst bij H_s^2 . De statistische verbanden zijn zwakker dan in het geval van de duinvoetpositie. Dit komt doordat de MKL-positie aan meer invloeden onderhevig is dan de duinvoetpositie. Opnieuw is er geen eenduidig beeld zichtbaar bij het Dean getal, om redenen als genoemd in § 3.2.1.

Kustvak	C_1			C_2			R^2 bij C_1			$ \Delta C / \bar{C} $		
	h	H_s^2	Ψ	h	H_s^2	Ψ	h	H_s^2	Ψ	h	H_s^2	Ψ
Schiermon.	1.1	-32.1	-2.3	0.4	-18.7	-0.3	0.00	0.20	0.02	84%	53%	147%
Ameland	-0.6	0.7	2.0	-1.7	-2.4	1.2	0.00	0.00	0.02	91%	200%	50%
Terschell.	-0.7	-7.9	7.8	-3.2	-9.8	6.0	0.00	0.05	0.29	130%	22%	25%
Vlieland	1.4	-8.6	-1.1	4.1	-9.9	-1.6	0.01	0.20	0.02	101%	14%	34%
Texel	2.0	-10.9	0.6	0.6	-7.5	-0.2	0.01	0.22	0.00	106%	37%	200%
N-Holland	1.9	-1.7	-0.5	2.2	-0.3	0.0	0.07	0.05	0.01	14%	137%	194%
Rijnland	-1.6	-2.5	-0.6	-1.6	-1.8	-0.3	0.01	0.02	0.01	1%	30%	64%
Delfland	-3.2	-4.8	-0.1	-2.6	-5.0	0.0	0.04	0.08	0.00	21%	5%	60%
Voorne	6.4	1.9	0.2	2.1	0.4	0.3	0.04	0.01	0.00	100%	136%	22%
Goeree	3.4	-4.5	-2.8	2.2	-2.2	-2.7	0.03	0.09	0.23	42%	70%	4%
Schouwen	3.2	-2.2	0.1	3.9	-2.6	-0.4	0.07	0.14	0.00	20%	20%	200%
N-Beveland	9.3	-9.2	-2.6	4.8	-3.1	0.0	0.15	0.23	0.15	65%	100%	194%
Walcheren	2.9	-2.7	-0.6	2.1	-1.0	0.3	0.12	0.11	0.02	33%	88%	200%
Zeeuws-Vl.	0.2	-5.8	-3.5	3.0	-5.6	-4.1	0.00	0.34	0.53	172%	4%	17%
Gemiddeld	1.8	-6.4	-0.2	1.2	-5.0	-0.1	0.04	0.12	0.09	70%	65%	101%

Tabel 3-3 Richtingscoëfficiënten bij regressie per kustvak (C_1) of regressie per raai (C_2), samen met de determinatiecoëfficiënten R^2 behorend bij C_1 en het relatieve verschil tussen beide richtingscoëfficiënten $|\Delta C|/|\bar{C}|$. Rode richtingscoëfficiënten geven een positieve relatie, ofwel een zeewaartse verschuiving van de MKL-positie bij een hogere natuurlijke forcering.

De richtingscoëfficiënten voor de relatie tussen de jaargemiddelde golfenergie en veranderingen in de MKL-positie (zie de zesde kolom uit tabel 3-3) variëren aanzienlijk over de verschillende kustvakken. De invloed van de golfenergie op de ligging van de Momentane Kustlijn is sterker bij de Waddeneilanden dan bij de andere delen van de kust.

Tabel 3-4 toont de classificatietabel voor de relatie tussen gemiddelde golfenergie H_s^2 en veranderingen in de MKL-positie voor kustvak 7, Noord-Holland. Het principe van de classificatietabel is uitgelegd in § 3.2.1.

Tabel 3-2 gaf een goed beeld van de statistische relatie tussen jaarlijkse maximale waterstand en duinvoetpositie. Uit tabel 3-4 is eigenlijk alleen af te leiden dat het verloop van de MKL-

Δ MKL-positie [m]		$-\infty$	-9	-6	-3	0	3	6	9	
		-9	-6	-3	0	3	6	9	∞	
H_s^2 [m ²]	Aantal	498	195	187	218	216	178	144	442	
0	2.00	119	20%	13%	11%	8%	10%	8%	8%	21%
2.00	2.25	107	9%	6%	6%	13%	13%	18%	10%	25%
2.25	2.50	1354	25%	10%	9%	11%	10%	8%	7%	21%
2.50	2.75	229	23%	10%	12%	17%	13%	5%	5%	15%
2.75	∞	677	25%	8%	8%	8%	11%	9%	7%	22%

Tabel 3-4 Classificatie van data voor Noord-Holland in klassen voor de jaargemiddelde golfenergie H_s^2 en klassen voor de bijbehorende verandering in MKL-positie. Percentages zijn berekend door een aantal te delen door het totaal aantal in een bepaalde klasse voor de jaargemiddelde golfenergie.

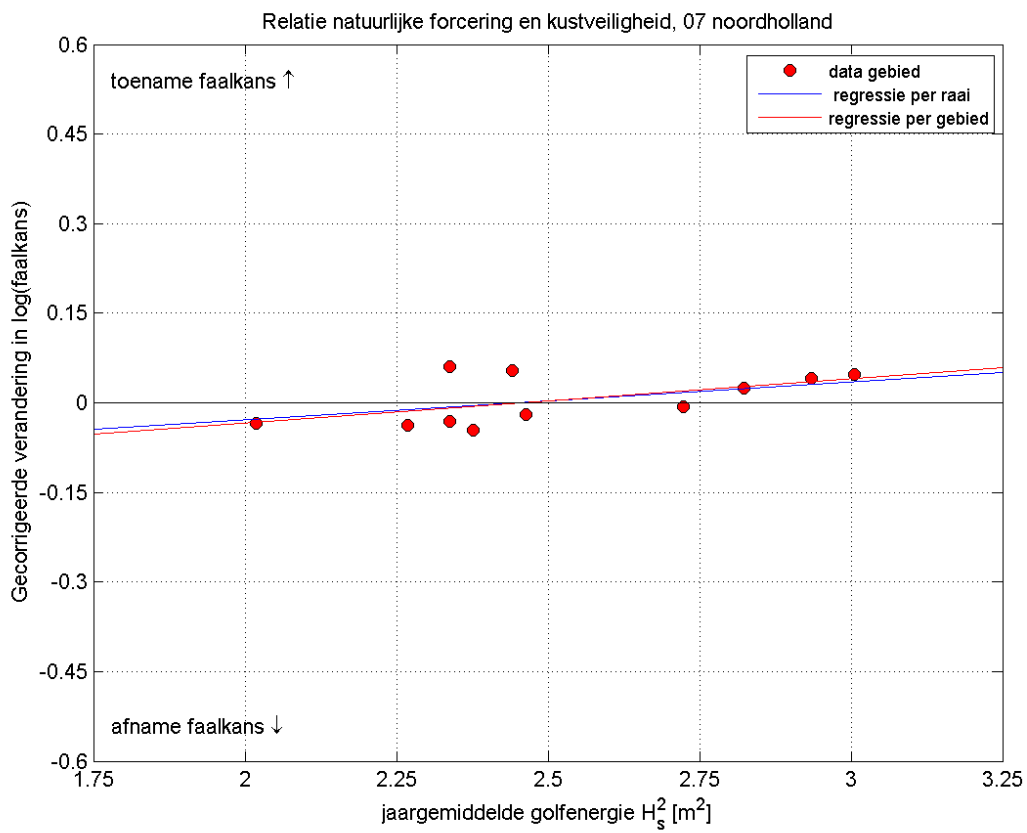
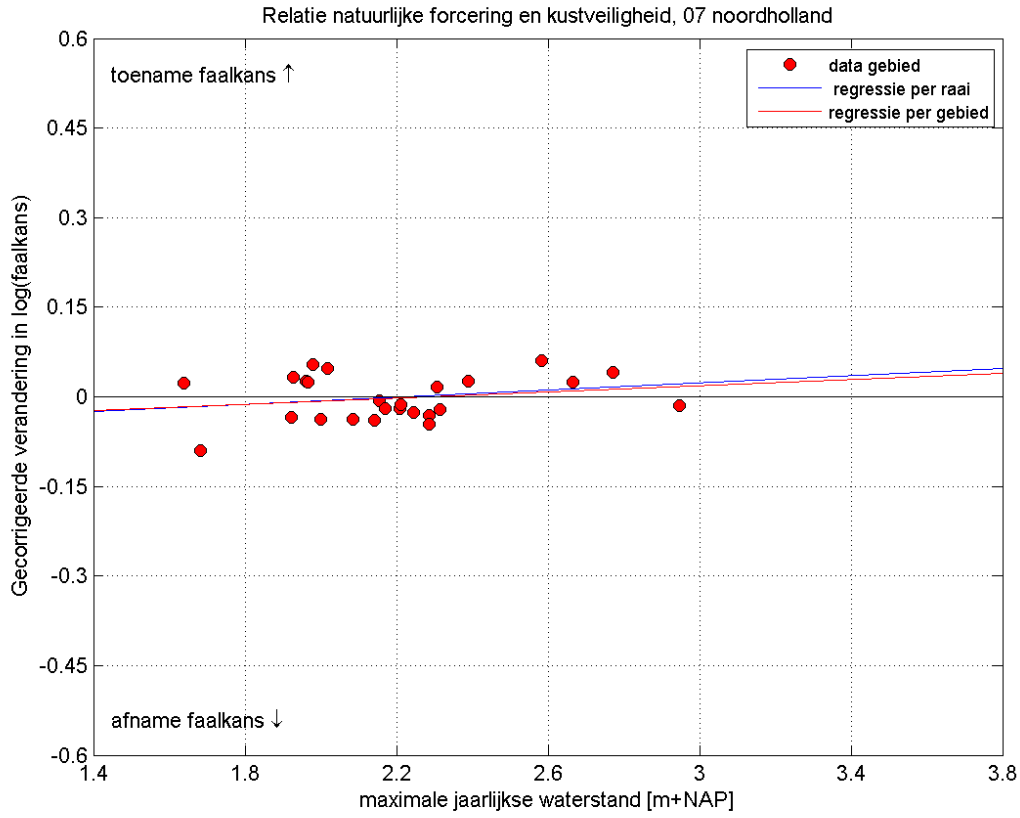
positie door de tijd heen zeer grillig is. Het aandeel van de grote veranderingen is relatief erg groot, maar weinig veranderingen liggen rond nul. Deze conclusie komt overeen met de zeer kleine waarde voor R^2 van 0.05. Een statistisch verband is niet zichtbaar, zoals ook al bleek uit de kleine gemiddelde richtingscoëfficiënt van -0.3 voor Noord-Holland. Dit beeld is kwalitatief zichtbaar bij alle kustvakken.

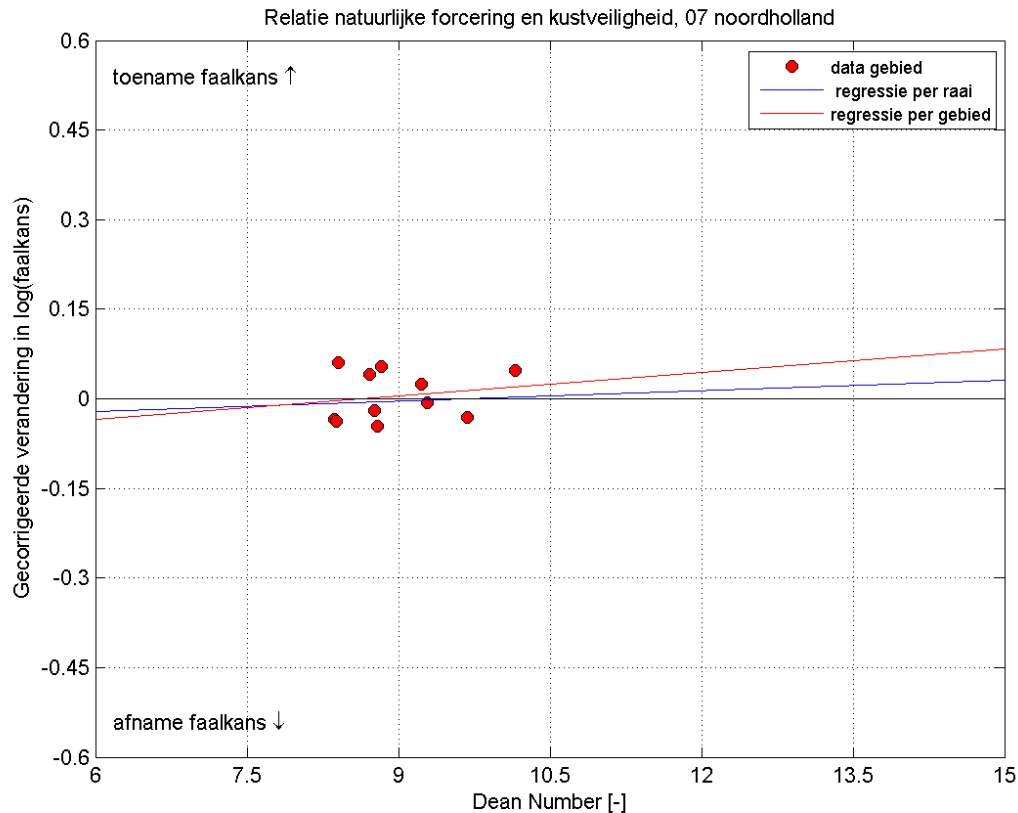
Al met al blijkt dat de statistische verbanden tussen de beschouwde indicatoren voor de natuurlijke forcering en veranderingen in de MKL-positie zwak zijn. Conclusies op basis van de uitkomsten kunnen dan ook alleen met de nodige voorzichtigheid getrokken worden.

3.2.3 Faalkans van de eerste duinenrij

Er worden lagere faalkansen gevonden bij een massiever duinprofiel en (in mindere mate) een hoger voorland. Wanneer door duinafslag of structurele erosie zand verdwijnt uit deze zones, zal de faalkans toenemen. De verwachting is dan ook dat de faalkansen relatief gezien sterker toenemen bij zwaardere stormen. Onderzocht is de faalkansratio tussen de jaren i en $i - 1$: P_i/P_{i-1} . Op logaritmische schaal is deze ratio gelijk aan $\Delta \log P = \log P_i - \log P_{i-1}$. Deze $\Delta \log P$ wordt gepresenteerd in de figuren en tabellen in deze paragraaf.

Onderstaande drie delen van figuur 3-6 tonen de relatie tussen de drie indicatoren voor de natuurlijke forcering (zie § 2.2) en veranderingen in de faalkans. In § 3.2.1 over de duinvoetpositie is een nadere toelichting bij dit type figuren te vinden.





Figuur 3-6 Relatie tussen jaarlijkse maximale waterstand (boven), jaargemiddelde golfenergie (midden) H_s^2 en jaargemiddelde Dean getal (onder) en de faalkansveranderingen ($\Delta \log P$) in Noord-Holland. De veranderingen in de faalkans zijn gecorrigeerd voor de langjarige trend. De rode markers geven waarden voor de onderzochte jaren (1965 tot en met 1990 of 1979 tot en met 1990), gemiddeld over de raaien van Noord-Holland. De rode lijn is het resultaat van lineaire regressie door deze punten. De blauwe lijn is het resultaat van regressie per raai, en vervolgens middelen over de raaien.

Dezelfde drie criteria (als beschreven bij de behandeling van de duinvoetpositie in § 3.2.1) zijn beschouwd om de sterkte van de relatie tussen beide indicatoren weer te geven. Voor Noord-Holland (zie figuur 3-6) geven alle indicatoren een positief verband. Dit houdt in dat de faalkans groter (dus minder veilig) wordt naarmate de natuurlijke forcering toeneemt.

De determinatiecoëfficiënt R^2 bedraagt in het geval van Noord-Holland voor de jaarlijkse maximale waterstand 0.04, voor de jaargemiddelde golfenergie 0.31 en voor het jaargemiddelde Dean getal 0.03. Dit houdt in dat de spreiding van de punten rond het lineaire verband het kleinst is in het geval van de jaargemiddelde golfenergie, en het grootst bij het jaargemiddelde Dean getal. Merk daarbij op dat het aantal punten (jaren) bij de waterstand groter is dan bij de andere twee, aan golven gerelateerde indicatoren. De statistische relaties zijn in alle gevallen zwakker dan in het geval van de duinvoetpositie, maar sterker dan bij de MKL-positie. Het relatieve verschil tussen beide richtingscoëfficiënten bedraagt voor Noord-Holland respectievelijk 17%, 16% en 78%.

Tabel 3-5 toont de resultaten van de regressie voor *alle* kustvakken. Te zien is dat de jaargemiddelde golfenergie H_s^2 de beste indicator is voor het verband tussen natuurlijke forcering en faalkansveranderingen. De richtingscoëfficiënten zijn veelal positief, met uitzondering van zeer

geringe negatieve waarden bij Terschelling en Rijnland. Daarnaast is de determinatiecoëfficiënt R^2 het grootst en het relatieve verschil tussen beide richtingscoëfficiënten met groot verschil het kleinst bij H_s^2 . De maximale waterstand levert een positieve relatie op, maar kent een relatief grote spreiding. Opnieuw is er geen eenduidig beeld zichtbaar bij het Dean getal, om redenen als genoemd in § 3.2.1.

Kustvak	C_1			C_2			R^2 bij C_1			$ \Delta C / \bar{C} $		
	h	H_s^2	Ψ	h	H_s^2	Ψ	h	H_s^2	Ψ	h	H_s^2	Ψ
Schiermon.	0.01	0.08	0.02	0.05	0.11	0.03	0.00	0.03	0.02	143%	28%	74%
Ameland	0.11	0.15	-0.05	0.13	0.14	-0.06	0.14	0.06	0.04	17%	9%	13%
Terschell.	0.04	-0.03	-0.05	0.06	-0.01	-0.02	0.04	0.01	0.12	41%	123%	105%
Vlieland	0.00	0.14	0.02	-0.07	0.14	0.03	0.00	0.21	0.02	192%	3%	20%
Texel	0.08	0.39	-0.06	0.03	0.36	-0.06	0.02	0.23	0.02	102%	9%	0%
N-Holland	0.03	0.07	0.01	0.03	0.06	0.01	0.04	0.31	0.03	17%	16%	78%
Rijnland	0.01	-0.02	-0.02	0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.01	0.05	28%	10%	21%
Delfland	0.10	0.18	0.03	0.09	0.18	0.03	0.13	0.40	0.06	4%	1%	11%
Voorne	0.25	0.17	0.01	0.37	0.12	-0.02	0.10	0.03	0.00	36%	35%	200%
Goeree	0.13	0.14	-0.07	0.15	0.13	-0.10	0.10	0.08	0.12	13%	7%	45%
Schouwen	-0.03	0.16	0.00	0.00	0.18	0.03	0.00	0.28	0.00	200%	11%	200%
N-Beveland	-0.11	0.57	0.18	-0.17	0.56	0.12	0.02	0.59	0.23	42%	2%	36%
Walcheren	0.10	0.13	0.02	0.09	0.15	0.03	0.11	0.28	0.02	14%	10%	37%
Zeeuws-Vl.	-0.09	0.14	0.18	0.00	0.13	0.15	0.02	0.05	0.27	188%	7%	19%
Gemiddeld	0.04	0.16	0.02	0.05	0.16	0.01	0.05	0.18	0.07	74%	19%	61%

Tabel 3-5 Richtingscoëfficiënten bij regressie per kustvak (C_1) of regressie per raai (C_2), samen met de determinatiecoëfficiënten R^2 behorend bij C_1 en het relatieve verschil tussen beide richtingscoëfficiënten $|\Delta C|/|\bar{C}|$. Rode richtingscoëfficiënten geven een negatieve relatie, ofwel een afname van de faalkans (de situatie wordt veiliger) bij een hogere natuurlijke forcering.

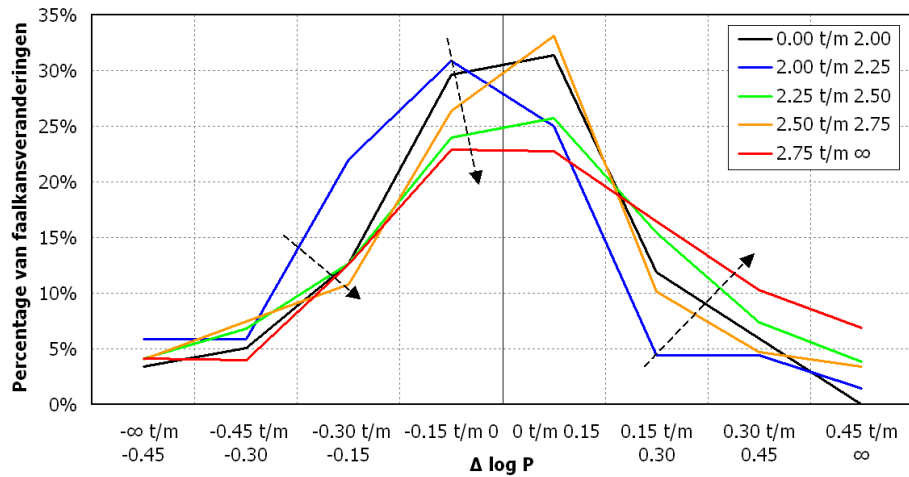
De richtingscoëfficiënten voor de relatie tussen de jaargemiddelde golfenergie en veranderingen in de faalkans (zie de zesde kolom uit tabel 3-5) variëren over de verschillende kustvakken, maar duidelijke patronen (bijvoorbeeld structurele verschillen tussen Waddeneilanden, de Hollandse kust en de Zeeuwse eilanden) zijn niet zichtbaar.

Tabel 3-6 toont de classificatietabel voor de relatie tussen gemiddelde golfenergie H_s^2 en faalkansveranderingen voor kustvak 7, Noord-Holland. Het principe van de classificatietabellen is uitgelegd in § 3.2.1.

$\Delta \log P$			$-\infty$	-0.45	-0.30	-0.15	0	0.15	0.30	0.45
			-0.45	-0.30	-0.15	0	0.15	0.30	0.45	∞
H_s^2 [m ²]	Aantal		86	124	267	507	535	307	162	90
0	2.00	118	3%	5%	13%	30%	31%	12%	6%	0%
2.00	2.25	106	6%	6%	22%	31%	25%	4%	4%	1%
2.25	2.50	1342	4%	7%	13%	24%	26%	15%	7%	4%
2.50	2.75	227	4%	7%	11%	26%	33%	10%	5%	3%
2.75	∞	671	4%	4%	13%	23%	23%	16%	10%	7%

Tabel 3-6 Classificatie van data voor Noord-Holland in klassen voor de jaargemiddelde golfenergie H_s^2 en klassen voor de bijbehorende faalkansveranderingen ($\Delta \log P$). Percentages zijn berekend door een aantal te delen door het totaal aantal in een bepaalde klasse voor de jaargemiddelde golfenergie.

De inhoud van de classificatietabel is grafisch weergegeven in figuur 3-7. De pijlen geven sche-



Figuur 3-7 Grafische weergave van classificatietabel 3-6. Pijlen geven schematisch het kwalitatieve beeld weer van de verschuiving van de percentages naarmate de natuurlijke forcering toeneemt.

matisch het kwalitatieve beeld weer van de verschuiving van de percentages naarmate de natuurlijke forcering toeneemt. De veranderingen in $\log P$ liggen veelal tussen -0.15 en 0.15 . Dit houdt in dat de ratio tussen opeenvolgende faalkansen varieert tussen $10^{-0.15}=0.7$ en $10^{0.15}=1.4$. Een faalkans van bijvoorbeeld $1.0 \cdot 10^{-8}$ verandert dan in een waarde tussen uiterlijk $0.7 \cdot 10^{-8}$ en $1.4 \cdot 10^{-8}$. In het licht van hoogwaterveiligheid zijn deze veranderingen klein te noemen. De spreiding in faalkansveranderingen wordt groter naarmate de jaargemiddelde golfenergie toeneemt. Daarnaast worden relatief meer toenames van de faalkans (afnames van de veiligheid) gevonden bij hogere waarden voor de jaargemiddelde golfenergie. Het beeld is minder duidelijk dan in het geval van de duinvoetpositie, maar kent meer structuur dan bij de MKL-positie.

3.3 Conclusies

Het onderzoek naar een statistisch verband tussen indicatoren voor natuurlijke forcering en veranderingen in indicatoren voor de veiligheid van de kust heeft geleid tot de volgende voornaamste conclusies:

1. Veranderingen in **duinvoetpositie** zijn het sterkst gerelateerd aan de jaarlijkse maximale waterstand. De reden hiervoor is dat de duinvoetpositie vooral wijzigt door duinafslag, en dat bij zeer hoge waterstanden aanzienlijk meer duinafslag optreedt. Het statistische verband tussen beide indicatoren is relatief sterk. Een relatief lage maximale waterstand in een bepaald jaar resulteert vrijwel altijd in een zeewaartse verschuiving van de duinvoetpositie, terwijl een relatief hoge maximale waterstand vrijwel altijd gepaard gaat met een landwaartse verschuiving.
2. De **MKL-positie** houdt verband met zowel duinafslag (verandering van de duinvoetpositie) als variaties in structurele erosie (verandering van het volume zand rond de laagwaterlijn). De beste indicator voor terugschrijving van de MKL-positie is de jaargemiddelde golfenergie H_s^2 , waaruit blijkt dat variatie in gemiddelde stormachtigheid over de jaren een sterkere rol speelt dan incidentele duinafslag tijdens extreme stormvloed. Door de vele invloeden is de statistische relatie tussen de beschouwde indicatoren voor de natuurlijke forcering en veranderingen in MKL-positie relatief zwak en is de spreiding in de veranderingen van de MKL-

positie relatief groot.

3. De jaargemiddelde golfenergie H_s^2 is eveneens de beste indicator voor veranderingen in de **faalkans van de eerste duinenrij**. Jaarlijkse veranderingen in de faalkansen door natuurlijke forcering zijn echter veelal relatief klein.
4. De relatie tussen veranderingen in veiligheid en het jaargemiddelde Dean getal is zeer zwak. De verhouding H_s/T_{m02} is gerelateerd aan de golfsteilheid. In theorie geeft het Dean getal daardoor een indicatie voor de kans op aanzanding of erosie op een bepaalde locatie. Gaande van diep water richting de kust, verandert het Dean getal sterk als gevolg van golftransformatieprocessen. Omdat gebruik is gemaakt van off-shore golfdata, kan geen relatie gelegd worden met de near-shore morfologische processen. Omdat de verhouding H_s/T_{m02} bij de meetlocaties verder weinig zegt over de sterkte van de belasting op een bepaald moment, is het matige presteren van het Dean getal verklaarbaar.

4 Effect van suppleties

De centrale hypothese in dit onderzoek is dat veranderingen in veiligheid het gevolg zijn van de som van een langjarige trend, het effect van natuurlijke forcering en het effect van suppleties (vergelijking 1-1). In dit hoofdstuk staat het effect van suppleties centraal. De analyse blijft beperkt tot de Hollandse kust, bestaand uit de kustvakken Noord-Holland, Rijnland en Delfland.

4.1 Werkwijze

Deze paragraaf gaat in op de methode om het verband tussen suppleties en veranderingen in (indicatoren voor) de veiligheid te bepalen. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen vooroever-suppleties en strandsuppleties.

4.1.1 Centrale gedachte

In hoofdstuk 1 is de centrale vergelijking uit dit onderzoek (vergelijking 1-1) geponeerd:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = L + f(F) + g(S),$$

waarin V een bepaalde indicator voor de kustveiligheid, L de langjarige trend, $f(F)$ een nader te bepalen functie van het effect van natuurlijke forcering F , en $g(S)$ een nader te bepalen functie van het effect van suppleties S is.

In hoofdstuk 3 is beschreven dat in de periode vóór 1990 relatief weinig werd gesuppleerd. Daarom zijn de langjarige trend in de veiligheid en de relatie tussen natuurlijke forcering en de veiligheid bepaald op basis van de periode 1965 tot en met 1990. De trends werden in die periode nog relatief weinig 'verstoord' door het effect van suppleties.

De statistische analyses uit hoofdstuk 3 resulteerden in een langjarige trend L per raai en een lineaire relatie als invulling van $f(F)$, het verband tussen natuurlijke forcering en veranderingen in de veiligheid. Door deze twee invloeden te kwantificeren en de ruwe datasets te corrigeren, kan de effectiviteit van de suppleties scherper in beeld worden gebracht. In formulevorm luidt deze correctie:

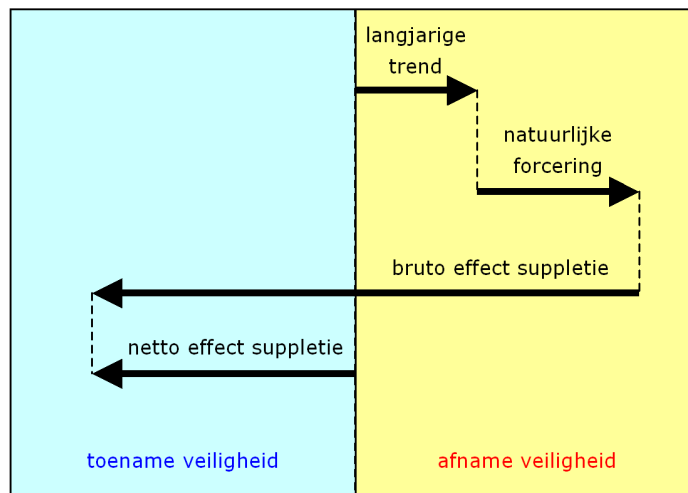
$$\frac{\Delta V}{\Delta t} - L - f(F) = g(S), \quad (4-1)$$

waarbij voor V een indicator voor de veiligheid uit paragraaf 2.1, en voor F een indicator voor de natuurlijke forcering uit paragraaf 2.2 kan worden ingevuld. $g(S)$ is het bruto effect van de suppleties. Dit effect is pas te berekenen na correctie van de netto veranderingen in veiligheid voor langjarige trends en effecten van natuurlijke forcering. Het verschil tussen het bruto en netto effect van suppleties is schematisch weergegeven in figuur 4-1.

4.1.2 Filtering datasets

In § 3.1.2 is uitgelegd dat de datasets met indicatoren voor de veiligheid zijn gefilterd om twee redenen. De eerste reden was het verspringen van de duinvoetpositie als gevolg van de methodiek. De andere reden was dat het effect van grote strandsuppleties van vóór 1990 uit de data moest worden gefilterd.

De eerste reden blijft ook bij de analyse naar de effectiviteit van suppleties staan. De tweede reden komt logischerwijs te vervallen. Daarom is het filter voor de duinvoetpositie en de MKL-



Figuur 4-1 Netto verandering in veiligheid als de som van een langjarige trend, het effect van natuurlijke forcering en het bruto effect van suppleties.

positie verruimd tot het interval van -200 tot 200 m. Om de dataset niet te 'vervormen' is het filter symmetrisch gehouden.

Filtering van de set met faalkansen (zie ook § 3.1.2) was opnieuw niet nodig.

4.1.3 Het effect van suppleties

Onder de aanname dat het effect van suppleties vóór 1990 nog beperkt was, resteert na correctie voor de langjarige trend en het effect van natuurlijke forcering alleen nog het effect van suppleties. Het verband wordt kernachtig weergegeven door vergelijking 4-1.

In hoofdstuk 3, vergelijking 3-4, is de langjarige trend gedefinieerd als:

$$L = \frac{dV}{dt} = a.$$

In vergelijking 3-5 is een lineair verband aangenomen tussen natuurlijke forcering en veranderingen in de veiligheid:

$$f(F) = C \cdot F(t) + D.$$

Voor de duinvoetpositie bleek de jaarlijkse maximale waterstand de beste indicator F te zijn, voor de MKL-positie en de faalkans van de eerste duinenrij was dit de jaargemiddelde golfenergie H_s^2 . De waarde a is per raai bepaald, en de waarden C en D zijn per kustvak bepaald, om redenen als beschreven in hoofdstuk 3.

Vergelijking 4-1 uit het onderzoek kan nu worden geschreven als:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} - a - C \cdot F(t) - D = g(S), \quad (4-2)$$

Er is géén correctie voor de langjarige trend toegepast bij raaien waarvoor er én zeer weinig metingen (minder dan 5 datapunten) zijn, én de gevonden langjarige trend een relatief erg grote (absolute) waarde heeft. De gevonden trend bij die raai wordt dan als niet realistisch beschouwd.

De correctie voor het effect van natuurlijke forcering is niet toegepast bij kustvakken waar het lineaire verband aangaf dat de veiligheid sterker toeneemt bij een hogere waarde voor de natuurlijke forcering. Deze richtingscoëfficiënten C zijn rood gemarkeerd in de tabellen 3-1, 3-3 en 3-5.

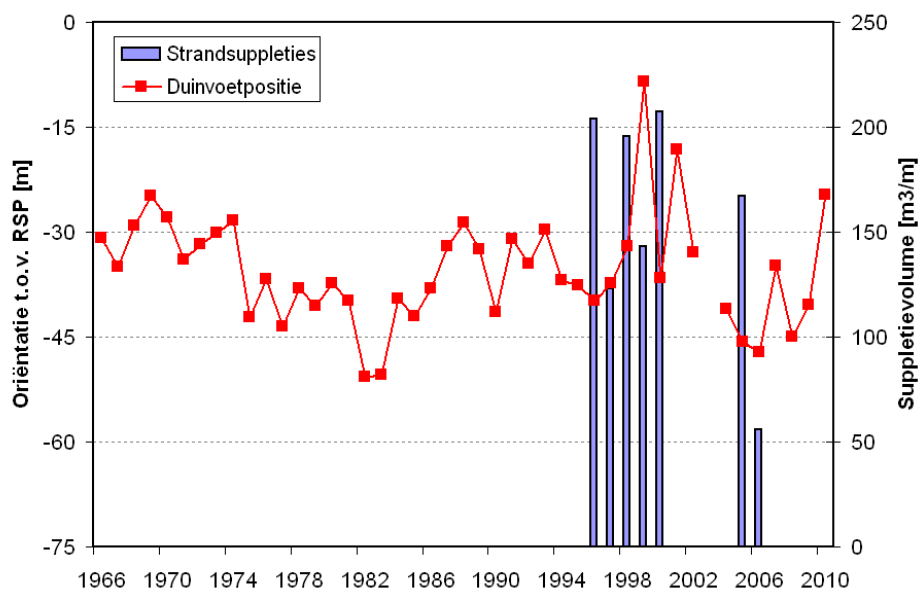
Ook voor de functie $g(S)$ wordt een lineair verband aangenomen, geschreven als:

$$g(S) = P \cdot S(t) + Q, \quad (4-3)$$

waarin S een suppletievolume in m^3/m is tussen twee JarKus-metingen, als beschreven in § 2.3. Wanneer er niet wordt gesuppleerd, behoort ook het effect van de suppleties gelijk aan nul te zijn. Daarom heeft het lineaire verband een snijpunt met de oorsprong, ofwel $Q = 0$. De richtingscoëfficiënt P is bepaald per kustvak, zodat voldoende datapunten (combinaties van S en ΔV) beschikbaar zijn om een betrouwbaar statistisch verband te bepalen. Het verband is bepaald op basis van alle suppleties langs de Hollandse kust in de periode van 1965 tot en met 2010.

4.1.4 Vertraagde effecten

Tot zover is er vanuit gegaan dat alle effecten instantaan merkbaar zijn, dat wil zeggen: het effect zoals zichtbaar na de eerste JarKus-meting. Omdat vooral vooroeversuppleties geacht worden vertraagd te werken, is de analyse uitgebreid naar een analyse over de jaren heen. Daarbij zijn twee methoden gebruikt: 'verschuiven' en 'accumuleren'.



Figuur 4-2 Tijdreeks met strandsuppleties (blauwe balken, schaalverdeling op rechter verticale as) en duinvoetpositie (schaalverdeling op linker verticale as) ten opzichte van de Rijksstrandpaal (rode lijn) voor raai 7003875 in Noord-Holland.

1. Bij de methode **verschuiven** wordt een suppletie in een bepaald jaar gerelateerd aan de verandering in veiligheid over meerdere jaren na deze suppletie.
2. Bij de methode **accumuleren** wordt het gesommeerde suppletievolume over meerdere jaren vergeleken met de verandering in veiligheid over dezelfde periode.

Ter illustratie is figuur 4-2 toegevoegd, waarin voor raai 7003875 in Noord-Holland de volumes van de strandsuppleties en de duinvoetpositie zijn getoond. Tussen 1996 en 1999 is de duinvoet

31 m zeewaarts verschoven. Deze verandering wordt gerelateerd aan het suppletievolume tussen 1996 en 1997 bij de methode 'verschuiven', of aan de som van de suppletievolumes tussen 1996 en 1999 in het geval van de methode 'accumuleren'.

Wanneer het tijdsinterval tussen verschillende suppleties voldoende groot is, geven beide methoden vrijwel hetzelfde resultaat. Wanneer echter binnen een relatief kort tijdsbestek meerdere suppleties zijn uitgevoerd, gaan de effecten van de suppleties door elkaar heen lopen.

Gesommeerde suppletievolumes worden bij 'accumuleren' groter bij een langere beschouwde periode. Bij 'verschuiven' is dit niet het geval. De verschillen in de indicator voor de veiligheid over een bepaalde periode zijn voor beide methoden echter gelijk. Hierdoor zijn de resultaten niet één op één vergelijkbaar. Bij 'accumuleren' wordt niet alleen het effect van een suppletie na N jaar beschouwd, maar ook de effecten van eventuele andere suppleties van N-1 enzovoorts jaar terug. Er is dus eigenlijk geen sprake van het vertraagde effect van suppleties over een periode van N jaar, maar meer over het gesommeerde effect van de suppleties over de afgelopen N jaar. Bij 'verschuiven' worden alle tussentijdse suppleties genegeerd.

Beide methoden hebben voor- en nadelen. In het vervolg van het onderzoek (in § 4.2.4) zal echter blijken, dat het negeren van tussentijdse suppleties bij de methode 'verschuiven' bij het onderzoeken van langjarige effecten (ruwweg meer dan 4 jaar) tot een te grote fout leidt. Daarom zijn de resultaten van de methode 'accumuleren' in het vervolg van het hoofdstuk als maatgevend beschouwd.

4.2 Resultaten

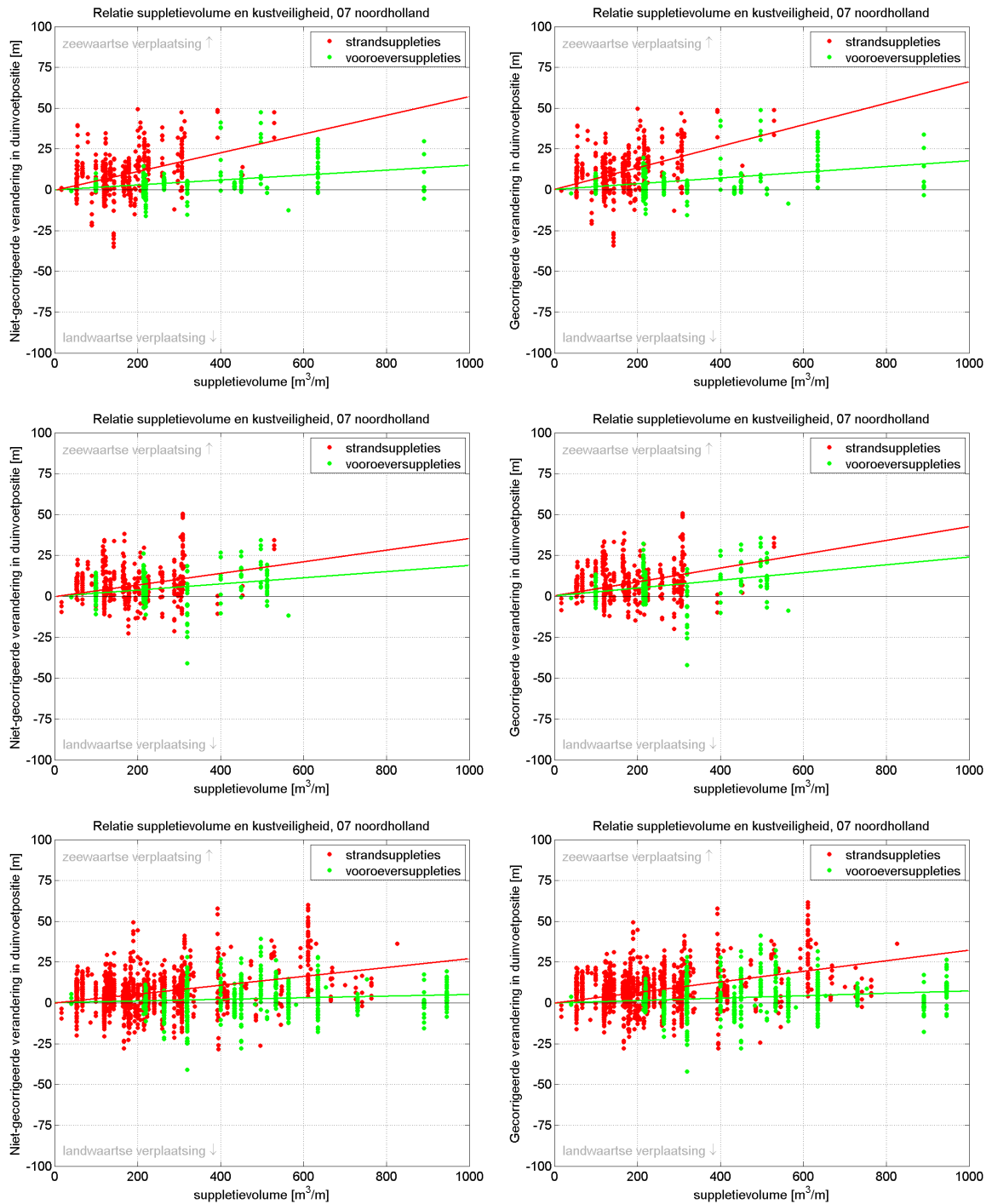
In deze paragraaf komen de resultaten van de analyse naar het verband tussen suppleties en kustveiligheid aan de orde, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen strandsuppleties en vooroeversuppleties (zie § 2.3).

4.2.1 Duinvoetpositie

Het verband tussen suppletievolumes en veranderingen in duinvoetpositie is voor het kustvak Noord-Holland weergegeven in figuur 4-3. Rode data en regressielijnen behoren bij strandsuppleties, groene data en regressielijnen bij vooroeversuppleties. Positieve veranderingen zijn zee-waartse verplaatsingen van de duinvoetpositie. Zowel het effect van de correcties (voor langjarige trends en natuurlijke forcering) als de tijdsvertraging is weergegeven in deze figuur.

De figuren links bevatten ongecorrigeerde duinvoetdata. De figuren rechts bevatten data na correctie voor langjarige trends en het effect van natuurlijke forcering als functie van de jaarlijkse maximale waterstand. Uit hoofdstuk 3 kwam namelijk naar voren dat de jaarlijkse maximale waterstand de beste indicator was om het effect van natuurlijke forcering op de duinvoetpositie weer te geven. De figuren links tonen dus het netto effect van suppleties, de figuren rechts het bruto effect. Zie figuur 4-1 voor een schematische weergave van het verschil tussen beide.

De bovenste figuren bevatten het instantane effect van de suppleties, de middelste figuren het effect na 4 jaar volgens de methode 'verschuiven', de onderste figuren het effect na 4 jaar volgens de methode 'accumuleren'.



Figuur 4-3 Suppletievolumen [m^3/m] versus verandering in **duinvoetpositie** [m], waarbij een positieve verandering een zeewaartse verplaatsing is. De figuren links bevatten ongecorrigeerde duinvoetdata, de figuren rechts bevatten data na correctie voor langjarige trends en het effect van natuurlijke forcering als functie van de jaarlijkse maximale waterstand. De bovenste figuren bevatten het instantane effect van de suppleties, de middelste figuren het effect na 4 jaar volgens de methode 'verschuiven', de onderste figuren het effect na 4 jaar volgens de methode 'accumuleren'. Rode data en regressielijnen behoren bij strandsuppleties, groene data en regressielijnen bij vooroever-suppleties.

De figuren leiden tot de volgende (kwalitatieve) conclusies voor het kustvak **Noord-Holland**:

- Een groter suppletievolume leidt tot een grotere zeewaartse verschuiving van de duinvoetpositie. Dit geldt zowel voor vooroeversuppleties als voor strandsuppleties.
- Een strandsuppletie leidt per volume-eenheid tot een grotere verschuiving in duinvoetpositie dan een vooroeversuppletie. Vergelijk de rode en de groene lijnen.
- Het effect van een strandsuppletie na 4 jaar is kleiner dan zijn instantane effect. Dit volgt zowel uit de methode 'verschuiven' als uit de methode 'accumuleren'. Vergelijk de bovenste figuren met de middelste en onderste figuren.
- Zoals beargumenteerd in § 4.1.4 zijn de resultaten van de methoden 'verschuiven' en 'accumuleren' niet één op één vergelijkbaar. De verschillen in resultaten tonen echter wel duidelijk aan dat de effecten van verschillende suppleties door elkaar heen lopen.
- De richtingscoëfficiënten van de relatie tussen suppletievolumes en gecorrigeerde duinvoetdata zijn structureel iets groter dan in het geval zonder correctie. Vergelijk de linker en rechter figuren. Dit houdt in dat de suppletievolumes deels dienen ter compensatie van langjarige trends en natuurlijke invloeden. Zie figuur 4-1.

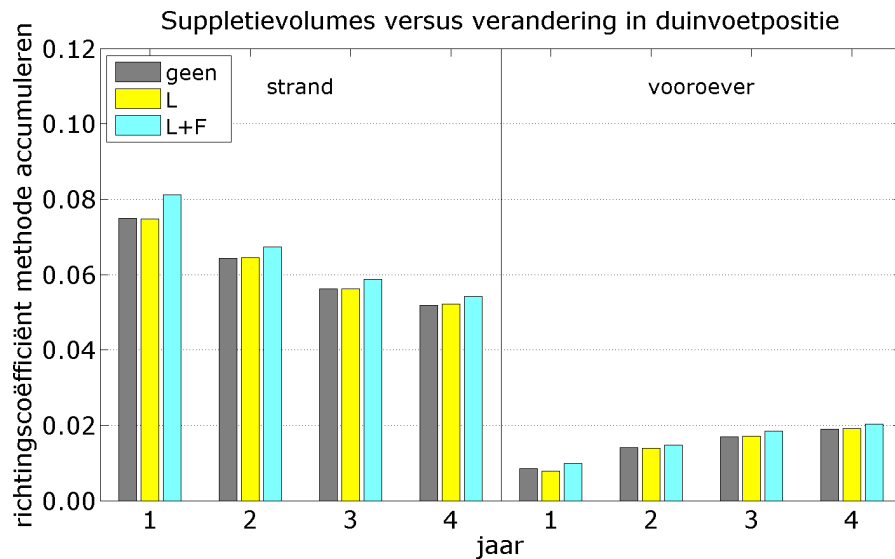
De essentie van de figuren is te vatten in de grootte van de richtingscoëfficiënten. Hoe groter de richtingscoëfficiënt, hoe effectiever de suppletie. De figuur linksboven uit figuur 4-3 toont het instantane, netto effect van suppleties op de duinvoetpositie. De bij deze figuur behorende richtingscoëfficiënten bedragen 0.057 voor de strandsuppleties en 0.015 voor de vooroeversuppleties. Een typisch volume voor een strandsuppletie langs de Hollandse kust is $200 \text{ m}^3/\text{m}$. Deze suppletie leidt dan gemiddeld genomen tot een zeewaartse verplaatsing van $0.057 \times 200 = 11.4 \text{ m}$ in één jaar. Een typisch volume voor een vooroeversuppletie langs de Hollandse kust is $300 \text{ m}^3/\text{m}$. Deze suppletie leidt dan gemiddeld genomen tot een zeewaartse verplaatsing van $0.015 \times 300 = 4.5 \text{ m}$ in één jaar.

Tabel 4-1 geeft een overzicht van *alle* berekende richtingscoëfficiënten volgens de methode 'accumuleren'.

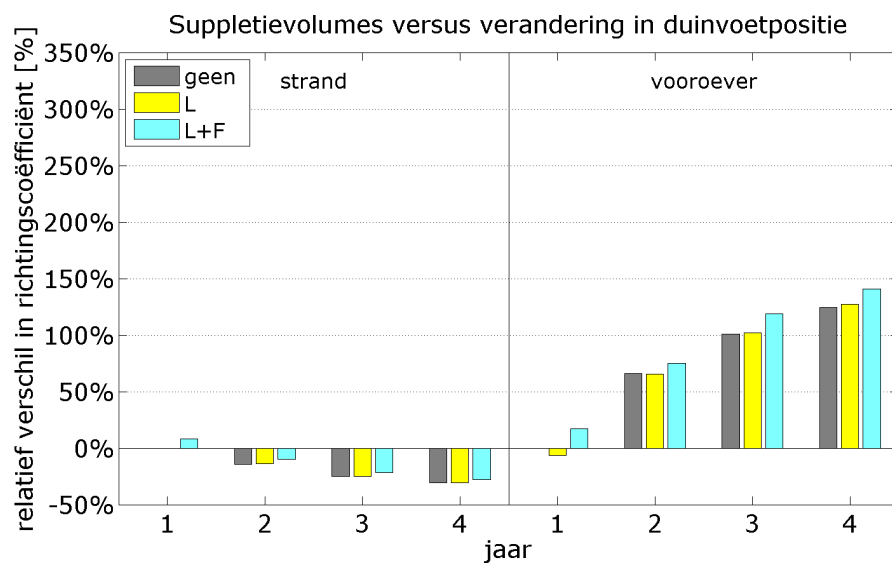
Kustvak	Correctie	Strandsuppleties				Vooroeversuppleties			
		Jaar 1	Jaar 2	Jaar 3	Jaar 4	Jaar 1	Jaar 2	Jaar 3	Jaar 4
Noord-Holland	Geen	0.057	0.040	0.034	0.027	0.015	0.010	0.006	0.005
	Langjarige trend	0.065	0.046	0.039	0.032	0.017	0.012	0.009	0.008
	Maximale H	0.066	0.046	0.039	0.032	0.018	0.011	0.008	0.007
Rijnland	Geen	0.082	0.080	0.074	0.075	0.007	0.007	0.009	0.012
	Langjarige trend	0.082	0.080	0.075	0.075	0.007	0.007	0.009	0.012
	Maximale H	0.089	0.082	0.076	0.077	0.005	0.007	0.010	0.013
Delfland	Geen	0.085	0.073	0.060	0.053	0.004	0.025	0.036	0.040
	Langjarige trend	0.077	0.067	0.055	0.049	0.000	0.023	0.034	0.038
	Maximale H	0.089	0.074	0.061	0.054	0.006	0.026	0.038	0.041
Gemiddeld	Geen	0.075	0.064	0.056	0.052	0.008	0.014	0.017	0.019
	Langjarige trend	0.075	0.064	0.056	0.052	0.008	0.014	0.017	0.019
	Maximale H	0.081	0.067	0.059	0.054	0.010	0.015	0.018	0.020

Tabel 4-1 Richtingscoëfficiënten voor het verband tussen suppletievolumes S en veranderingen in **duinvoetpositie** als indicator voor de veiligheid V . De richtingscoëfficiënten zijn berekend op basis van datasets voor ΔV (1) zonder correcties, (2) met een correctie voor alleen de langjarige trend en (3) met een gecombineerde correctie voor de langjarige trend én het effect van stormen, met de maximale waterstand als indicator. Onderscheid is gemaakt tussen strandsuppleties (links) en vooroeversuppleties (rechts). De richtingscoëfficiënten zijn bepaald na 1 jaar (instantaan effect) tot en met 4 jaar volgens de methode 'accumuleren'.

Bovenstaande tabel bevat veel informatie. Daarom focussen we ons eerst op de gemiddelde waarden over de drie kustvakken (de onderste rij van de tabel). Deze zijn vertaald in de grafische weergave van figuur 4-4. Om het effect van de correcties voor langjarige trend en natuurlijke forcering inzichtelijk te maken, is het relatieve verschil van alle richtingscoëfficiënten berekend ten opzichte van de niet-gecorrigeerde, instantane waarde (jaar 1). Deze relatieve verschillen zijn opgenomen in figuur 4-5. Hier zien we dus (1) het effect van de tijdsvertraging (jaar 1 tot en met jaar 4 op de horizontale as) en (2) het effect van de correcties voor langjarige trends en natuurlijke forcering (het verschil tussen de verschillend gekleurde staven).



Figuur 4-4 Grafische weergave van de onderste rij van tabel 4-1), de gemiddelde waarden voor de gehele Hollandse kust. De staven geven respectievelijk het effect zonder correcties, met correctie voor de langjarige trend (L) en met correcties voor zowel de langjarige trend als de jaarlijkse maximale waterstand (L+F).



Figuur 4-5 Relatief verschil in richtingscoëfficiënten uit figuur 4-4 ten opzichte van de richtingscoëfficiënt in jaar 1 zonder correctie.

De figuren 4-4 en 4-5 geven aanleiding tot de volgende conclusies over het verband tussen zandsuppleties en veranderingen in de duinvoetpositie:

1. Een groter suppletievolume leidt tot een grotere zeewaartse verschuiving van de duinvoetpositie. Dit geldt zowel voor vooroever-suppleties als voor strand-suppleties.
2. Strand-suppleties hebben per volume-eenheid een sterker effect op de duinvoetpositie dan vooroever-suppleties.
3. Het effect van een strand-suppletie op de duinvoetpositie heeft direct zijn maximale waarde bereikt, en neemt vervolgens langzaam af.
4. Het effect van een vooroever-suppletie neemt na 2, 3 en 4 jaar gemiddeld genomen met ongeveer 65%, 100% en 125% toe ten opzichte van het instantane effect in jaar 1.
5. Corrigeren voor langjarige trends heeft nauwelijks invloed op de berekende effectiviteit van de suppleties.
6. Correctie voor zowel de langjarige trend als de natuurlijke forcering via de jaarlijkse maximale waterstand leidt tot een vergroting van de berekende effectiviteit van *vooroeversuppleties*, door de jaren heen variërend tussen 10 en 20%. De correctie heeft geen noemenswaardige invloed op de berekende effectiviteit van *strand-suppleties*.

Deze conclusies gelden voor de Hollandse kust als geheel. Uit tabel 4-1 blijkt dat er duidelijke verschillen bestaan tussen de drie kustvakken. Een deel van deze verschillen wordt veroorzaakt door het gegeven dat de suppletie-intensiteit in de drie kustvakken niet gelijk is. Langs de kust van Noord-Holland en Delfland is door de jaren heen aanzienlijk meer gesuppleerd dan langs de kust van Rijnland.

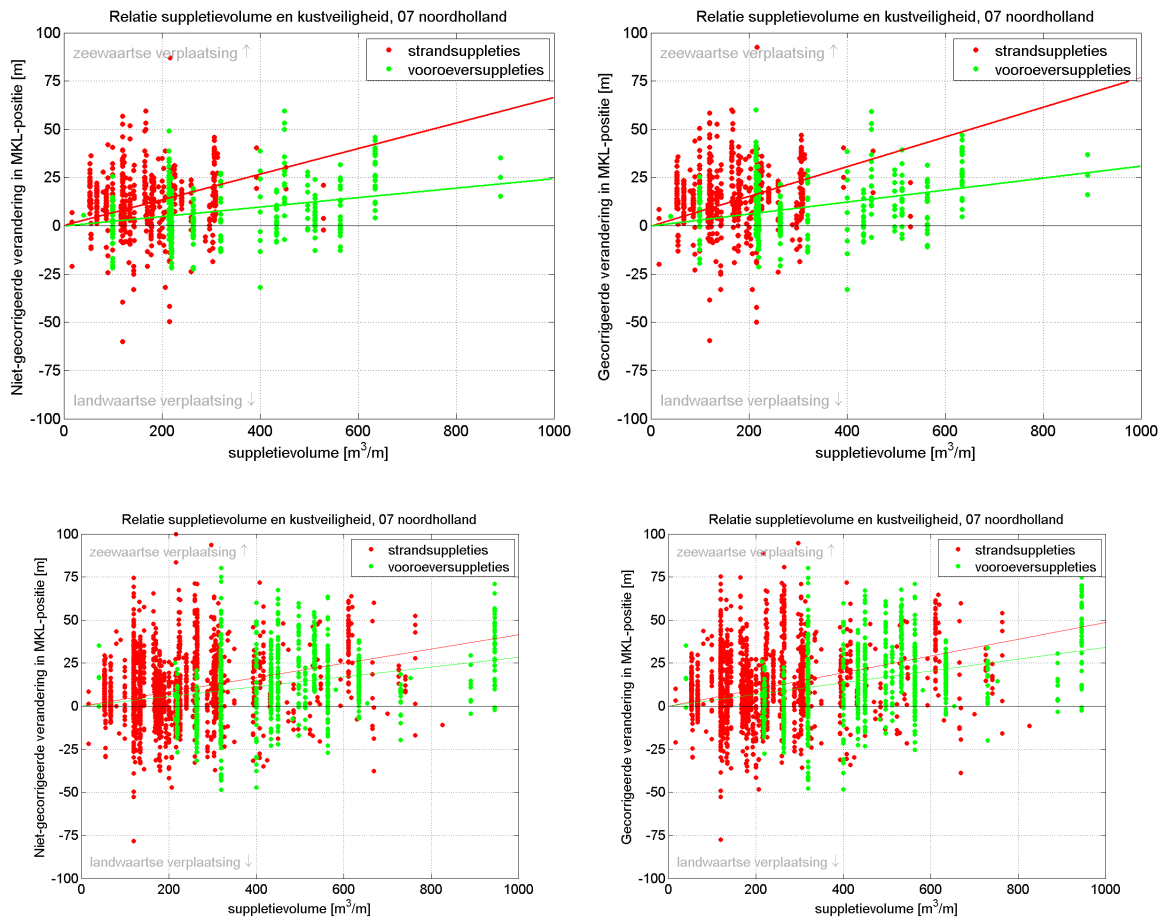
Wanneer we de drie kustvakken met elkaar vergelijken, vallen vooral de volgende verschillen op:

1. Strand-suppleties zijn bij de kust van Rijnland en Delfland effectiever in het beïnvloeden van de duinvoetpositie dan bij Noord-Holland. Onderzoek doen naar de betrouwbaarheid van deze uitkomst en naar een eventuele oorzaak valt buiten de scope van dit onderzoek.
2. De versterking van het effect van vooroever-suppleties door de jaren heen is bij alleen zichtbaar bij de kust van Rijnland en in zeer sterke mate bij de kust van Delfland. Bij Noord-Holland neemt de effectiviteit van vooroever-suppleties door de jaren heen af. Enkele mogelijke redenen voor deze verschillen zijn een verschil in steilheid van de vooroever, een verschil in golfklimaat of een verschil in afstand tot de kust waarop de vooroever-suppleties gemiddeld genomen worden uitgevoerd.

Ter aanvulling is in bijlage D een alternatieve presentatiewijze opgenomen. Daarbij zijn veranderingen in de duinvoetpositie tussen opeenvolgende jaren als functie van de afstand langs de kust X en de tijd t uitgezet. Ook de uitgevoerde suppleties zijn aangegeven in het $X - t$ -vlak, waarbij onderscheid is gemaakt tussen vooroever-suppleties en strand-suppleties. Het doel is het visualiseren van trends in duinvoetverschuivingen in ruimte en tijd als gevolg van suppleties. Vooral na strand-suppleties zijn regelmatig duidelijke zeewaartse verschuivingen (positieve waarden) van de duinvoetpositie zichtbaar. Daarnaast geven de figuren een beeld van de spreiding in ruimte en tijd van de verschillende typen suppleties. Het beeld is echter te grillig om vertraagde effecten of ruimtelijk verschoven effecten waar te kunnen nemen. De twee figuren voor Noord-Holland en Zuid-Holland geven daarom geen aanvullende inzichten. Voor de andere indicatoren zijn dergelijke figuren dan ook niet in het rapport opgenomen.

4.2.2 Momente kustlijn

Het verband tussen suppletievolumes en veranderingen in MKL-positie is voor het kustvak Noord-Holland weergegeven in figuur 4-6. Rode data en regressielijnen behoren bij strandsuppleties, groene data en regressielijnen bij vooroever-suppleties. Positieve veranderingen zijn zee-waartse verplaatsingen van de MKL-positie. Zowel het effect van de correcties (voor langjarige trends en natuurlijke forcering) als de tijdsvertraging is weergegeven in deze figuur.



*Figuur 4-6 Suppletievolumen [m^3/m] versus verandering in **MKL-positie** [m], waarbij een positieve verandering een zee-waartse verplaatsing is. De figuren links bevatten ongecorrigeerde veranderingen in MKL-posities, de figuren rechts bevatten data na correctie voor langjarige trends en het effect van natuurlijke forcering als functie van de jaargemiddelde golfenergie H_s^2 . De bovenste figuren bevatten het instantane effect van de suppleties, de onderste figuren het effect na 4 jaar volgens de methode 'accumuleren'. Rode data en regressielijnen behoren bij strandsuppleties, groene data en regressielijnen bij vooroever-suppleties.*

De figuren links bevatten ongecorrigeerde veranderingen in MKL-positie. De figuren rechts bevatten data na correctie voor langjarige trends en het effect van natuurlijke forcering als functie van de jaargemiddelde golfenergie H_s^2 . Uit hoofdstuk 3 kwam namelijk naar voren dat de jaargemiddelde golfenergie de beste indicator was om het effect van natuurlijke forcering op de MKL-positie weer te geven. De figuren links tonen dus het netto effect van suppleties, de figuren rechts het bruto effect. Zie figuur 4-1 voor een schematische weergave van het verschil tussen beide. De bovenste figuren bevatten het instantane effect van de suppleties, de onderste figuren het effect na 4 jaar volgens de methode 'accumuleren'.

De figuren leiden tot de volgende (kwalitatieve) conclusies voor het kustvak **Noord-Holland**:

- Een groter suppletievolume leidt tot een grotere zeewaartse verschuiving van de MKL-positie. Dit geldt zowel voor vooroeversuppleties als voor strandsuppleties.
- Een strandsuppletie leidt instantaan per volume-eenheid tot een grotere verschuiving in MKL-positie dan een vooroeversuppletie.
- Het effect van een strandsuppletie is na 4 jaar kleiner dan zijn instantane effect.
- Het effect van een vooroeversuppletie op de MKL-positie is na 4 jaar aanzienlijk groter dan zijn instantane effect, zelfs zodanig dat na 4 jaar het effect van een vooroeversuppletie per volume-eenheid het effect dat een strandsuppletie op dat moment nog heeft benadert (vergelijk de groene en rode lijn in de bovenste en onderste figuren).
- De richtingscoëfficiënten van de relatie tussen suppletievolumes en gecorrigeerde veranderingen in MKL-posities zijn structureel groter dan in het geval zonder correctie. Dit houdt in dat de suppletievolumes deels dienen ter compensatie van langjarige trends en natuurlijke invloeden. Zie figuur 4-1.

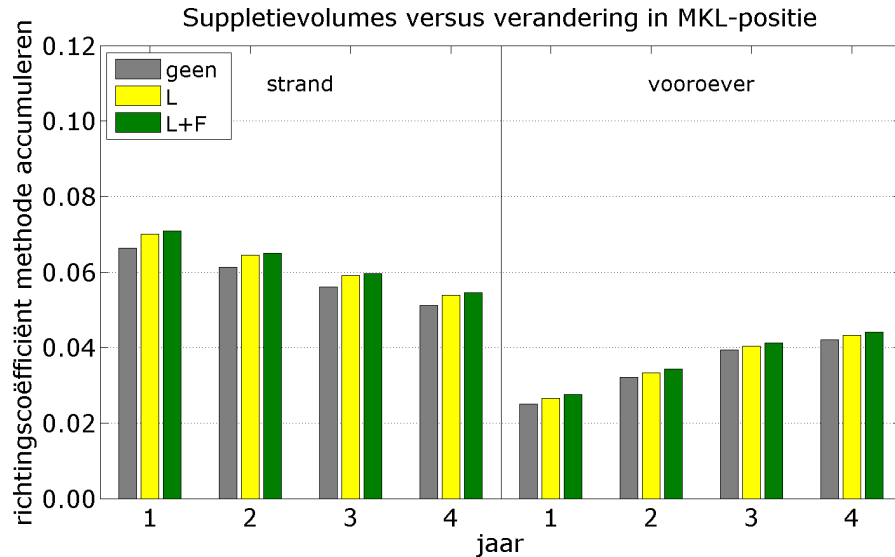
De essentie van de figuren is te vatten in de grootte van de richtingscoëfficiënten. Hoe groter de richtingscoëfficiënt, hoe effectiever de suppletie. De figuur linksboven uit figuur 4-6 toont het instantane, netto effect van suppleties op de MKL-positie. De bij deze figuur behorende richtingscoëfficiënten bedragen 0.066 voor de strandsuppleties en 0.024 voor de vooroeversuppleties. Een typisch volume voor een strandsuppletie langs de Hollandse kust is $200 \text{ m}^3/\text{m}$. Deze suppletie leidt dan gemiddeld genomen tot een zeewaartse verplaatsing van $0.066 \times 200 = 13.2 \text{ m}$ in één jaar. Een typisch volume voor een vooroeversuppletie langs de Hollandse kust is $300 \text{ m}^3/\text{m}$. Deze suppletie leidt dan gemiddeld genomen tot een zeewaartse verplaatsing van $0.024 \times 300 = 7.2 \text{ m}$ in één jaar.

Tabel 4-2 geeft een overzicht van *alle* berekende richtingscoëfficiënten volgens de methode 'accumuleren'.

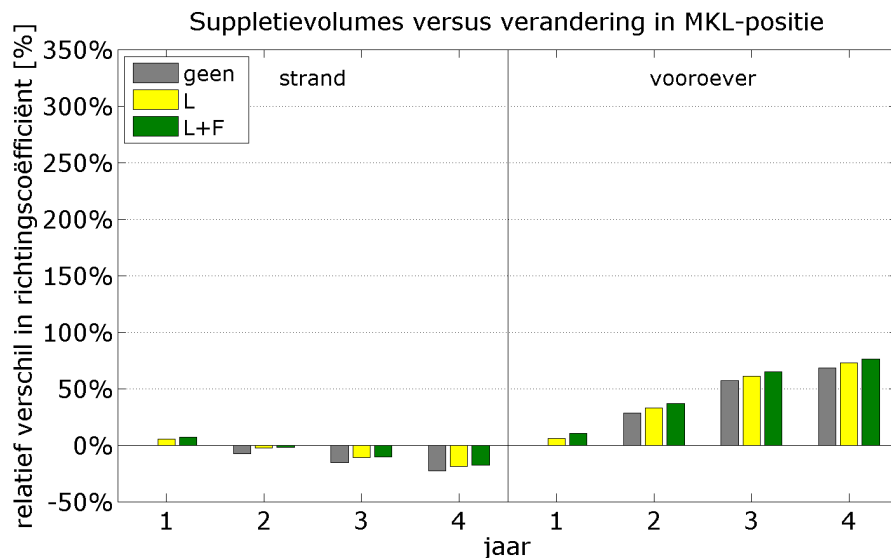
Kustvak	Correctie	Strandsuppleties				Vooroeversuppleties			
		Jaar 1	Jaar 2	Jaar 3	Jaar 4	Jaar 1	Jaar 2	Jaar 3	Jaar 4
Noord-Holland	Geen	0.066	0.070	0.063	0.040	0.024	0.032	0.044	0.053
	Langjarige trend	0.077	0.080	0.073	0.050	0.031	0.038	0.052	0.063
	Gemiddelde H_s^2	0.077	0.081	0.074	0.051	0.031	0.039	0.052	0.063
Rijnland	Geen	0.060	0.054	0.054	0.085	0.033	0.056	0.071	0.087
	Langjarige trend	0.061	0.055	0.055	0.089	0.034	0.057	0.071	0.087
	Gemiddelde H_s^2	0.063	0.055	0.055	0.089	0.036	0.057	0.074	0.087
Delfland	Geen	0.072	0.070	0.081	0.094	0.018	0.063	0.079	0.065
	Langjarige trend	0.072	0.070	0.082	0.094	0.015	0.060	0.076	0.064
	Gemiddelde H_s^2	0.073	0.071	0.085	0.103	0.016	0.064	0.076	0.064
Gemiddeld	Geen	0.066	0.065	0.066	0.073	0.025	0.050	0.065	0.068
	Langjarige trend	0.070	0.069	0.070	0.078	0.026	0.052	0.066	0.071
	Gemiddelde H_s^2	0.071	0.069	0.071	0.081	0.028	0.053	0.067	0.072

Tabel 4-2 Richtingscoëfficiënten voor het verband tussen suppletievolumes S en veranderingen in **MKL-positie** als indicator voor de veiligheid V . De richtingscoëfficiënten zijn berekend op basis van datasets voor ΔV (1) zonder correcties, (2) met een correctie voor alleen de langjarige trend en (3) met een gecombineerde correctie voor de langjarige trend én het effect van stormen, met de jaargemiddelde golfenergie H_s^2 als indicator. Onderscheid is gemaakt tussen strandsuppleties (links) en vooroeversuppleties (rechts). De richtingscoëfficiënten zijn bepaald na 1 jaar (instantaan effect) tot en met 4 jaar volgens de methode 'accumuleren'.

De focus ligt evenals in § 4.2.1 eerst op de gemiddelde waarden over de drie kustvakken (de laatste rij van deze tabel). Deze zijn vertaald in de grafische weergave van figuur 4-7. Om het effect van de correcties voor langjarige trend en natuurlijke forcering inzichtelijk te maken, is het relatieve verschil van alle richtingscoëfficiënten berekend ten opzichte van de niet-gecorrigeerde, instantane waarde (jaar 1). Deze relatieve verschillen zijn opgenomen in figuur 4-8.



Figuur 4-7 Grafische weergave van de onderste rij van tabel 4-2), de gemiddelde waarden voor de gehele Hollandse kust. De staven geven respectievelijk het effect zonder correcties, met correctie voor de langjarige trend (L) en met correcties voor zowel de langjarige trend als de jaargemiddelde golfenergie (L+F).



Figuur 4-8 Relatief verschil in richtingscoëfficiënten uit figuur 4-7 ten opzichte van de richtingscoëfficiënt in jaar 1 zonder correctie.

De figuren 4-7 en 4-8 geven aanleiding tot de volgende conclusies over het verband tussen zandsuppleties en veranderingen in de MKL-positie:

1. Een groter suppletievolume leidt tot een grotere zeewaartse verschuiving van de MKL-positie. Dit geldt zowel voor vooroeversuppleties als voor strandsuppleties.
2. Strandsuppleties hebben instantaan per volume-eenheid een significant sterker effect op de MKL-positie dan vooroeversuppleties.
3. Het effect van een strandsuppletie op de MKL-positie heeft instantaan zijn maximale waarde, en neemt vervolgens langzaam af.
4. Het effect van een vooroeversuppletie neemt na 2, 3 en 4 jaar gemiddeld genomen met ongeveer 30%, 60% en 70% toe ten opzichte van het instantane effect in jaar 1.
5. Na een periode van 4 jaar benadert een vooroeversuppletie per volume-eenheid de effectiviteit van een strandsuppletie.
6. Corrigeren voor langjarige trends zorgt ervoor dat de effectiviteit van beide suppletietypen met ongeveer 5% wordt vergroot.
7. Correctie voor zowel de langjarige trend als de natuurlijke forcering via de jaargemiddelde golfenergie H_s^2 leidt tot een vergroting van de berekende effectiviteit van beide suppletietypen van 5 tot 10%.

Deze conclusies gelden voor de Hollandse kust als geheel. Uit tabel 4-2 blijkt dat er kwantitatief gezien verschillen bestaan tussen de drie kustvakken. Een deel van deze verschillen wordt veroorzaakt door het gegeven dat de suppletie-intensiteit in de drie kustvakken niet gelijk is. Langs de kust van Noord-Holland en Delfland is door de jaren heen aanzienlijk meer gesuppleerd dan langs de kust van Rijnland.

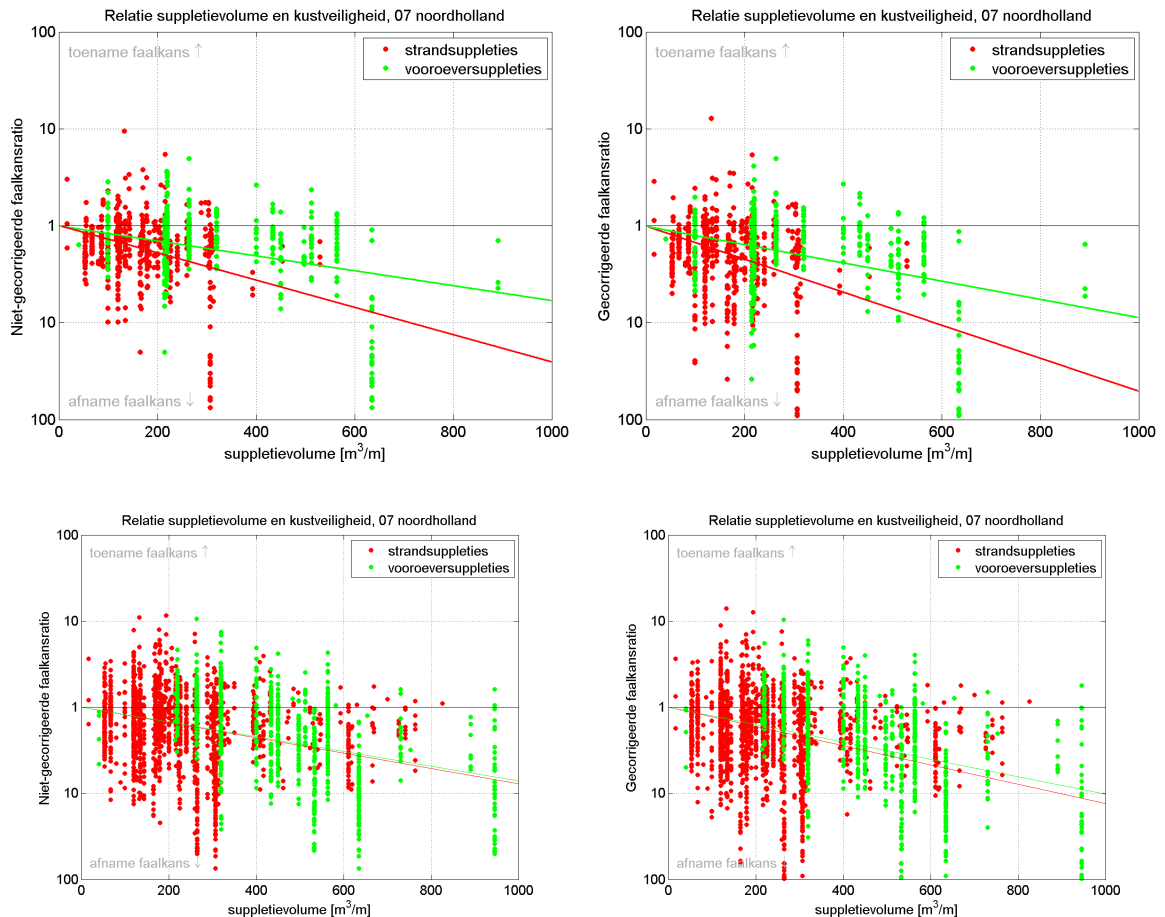
Wanneer we de drie kustvakken met elkaar vergelijken, vallen vooral de volgende verschillen op:

1. In Noord-Holland en Delfland is na verloop van jaren een afname van de effectiviteit van strandsuppleties zichtbaar in het beïnvloeden van de MKL-positie. Bij Rijnland blijft het effect door de jaren heen vrijwel constant.
2. De versterking van het effect van vooroeversuppleties door de jaren heen is bij alle kustvakken zichtbaar, maar is duidelijk sterker in Delfland dan in Noord-Holland en Rijnland. Dit verschil was ook in § 4.2.1 zichtbaar. Enkele mogelijke redenen hiervoor zijn een verschil in steilheid van de vooroever, een verschil in golfklimaat of een verschil in afstand tot de kust waarop de vooroeversuppleties gemiddeld genomen worden uitgevoerd.

4.2.3 Faalkans van de eerste duinenrij

Het verband tussen suppletievolumes en veranderingen in de faalkans van de eerste duinenrij is voor het kustvak Noord-Holland weergegeven in figuur 4-9. Verticaal is de ratio tussen de faalkans in de beschouwde jaren uitgezet, dus de faalkans (met eenheid 1/jaar) in jaar i gedeeld door de faalkans in jaar $i-1$. Rode data en regressielijnen behoren bij strandsuppleties, groene data en regressielijnen bij vooroeversuppleties. Waarden boven de horizontale as indiceren een toename van de faalkans in de tijd, waardoor de situatie onveiliger wordt. Zowel het effect van de correcties (voor langjarige trends en natuurlijke forcering) als de tijdsvertraging is weergegeven in deze figuur.

De figuren links bevatten ongecorrigeerde faalkansratio's. De figuren rechts bevatten data na correctie voor langjarige trends en het effect van natuurlijke forcering als functie van de jaargemiddelde golfenergie H_s^2 . Uit hoofdstuk 3 kwam namelijk naar voren dat de jaargemiddelde golfenergie de beste indicator was om het effect van natuurlijke forcering op de faalkans weer te geven. De figuren links tonen dus het netto effect van suppleties, de figuren rechts het bruto



Figuur 4-9 Suppletievolumen [m^3/m] versus ratio in de faalkans van de eerste duinenrij tussen opeenvolgende jaren (P_i/P_{i-1}), waarbij waarden boven de horizontale as een toename van de faalkans aanduiden. De figuren links bevatten ongecorrigeerde faalkansratio's, de figuren rechts bevatten data na correctie voor langjarige trends en het effect van natuurlijke forcering als functie van de jaargemiddelde golfenergie H_s^2 . De bovenste figuren bevatten het instantane effect van de suppleties, de onderste figuren het effect na 4 jaar volgens de methode 'accumuleren'. Rode data en regressielijnen behoren bij strandsuppleties, groene data en regressielijnen bij vooroerversuppleties.

effect. Zie figuur 4-1 voor een schematische weergave van het verschil tussen beide.

De bovenste figuren bevatten het instantane effect van de suppleties, dus de ratio tussen de faalkans in een bepaald jaar en het voorgaande jaar. De onderste figuren tonen het effect na 4 jaar volgens de methode 'accumuleren', dus de ratio tussen de faalkans in een bepaald jaar en 4 jaar terug. De suppletie is dan telkens eveneens 4 jaar geleden uitgevoerd.

De figuren leiden tot de volgende (kwalitatieve) conclusies voor het kustvak **Noord-Holland**:

- Een groter suppletievolumen leidt tot een grotere afname van de faalkans. Dit geldt zowel voor vooroerversuppleties als voor strandsuppleties.
- Een strandsuppletie leidt instantaan per volume-eenheid tot een grotere afname in de faalkans dan een vooroerversuppletie.
- Het effect van een strandsuppletie is na 4 jaar duidelijk kleiner dan zijn instantane effect.
- Het effect van een vooroerversuppletie op de faalkans is na 4 jaar iets groter dan zijn instantane effect. Hierdoor is na 4 jaar het effect van een vooroerversuppletie per volume-eenheid

ongeveer even groot geworden als het effect dat een strandsuppletie op dat moment nog heeft (vergelijk de groene en rode lijn in de bovenste en onderste figuren).

- De richtingscoëfficiënten van de relatie tussen suppletievolumes en gecorrigeerde veranderingen in faalkansen zijn structureel groter dan in het geval zonder correctie. Dit houdt in dat de suppletievolumes deels dienen ter compensatie van langjarige trends en natuurlijke invloeden. Zie figuur 4-1.

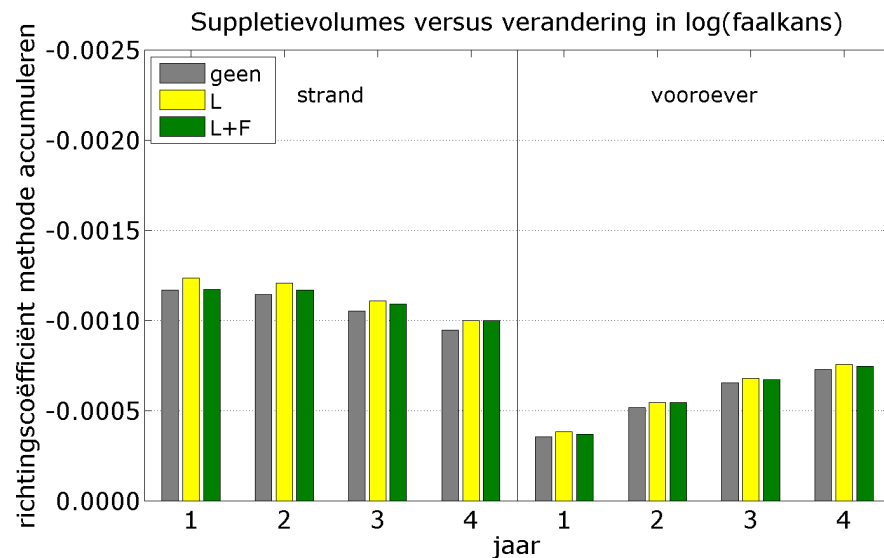
De essentie van de figuren is te vatten in de grootte van de richtingscoëfficiënten. Hoe groter de (absolute waarde van de) richtingscoëfficiënt, hoe effectiever de suppletie. De figuur linksboven uit figuur 4-6 toont het instantane, netto effect van suppleties op de faalkans P . De bij deze figuur behorende richtingscoëfficiënten bedragen -0.0014 voor de strandsuppleties en -0.0008 voor de vooroeversuppleties. Een typisch volume voor een strandsuppletie langs de Hollandse kust is $200 \text{ m}^3/\text{m}$. Deze suppletie leidt dan gemiddeld genomen tot een verandering in $\log P$ van $-0.0014 \times 200 = -0.28$ in één jaar. Dit betekent dat de faalkans met een factor $10^{+0.28} = 1.9$ afneemt. Een typisch volume voor een vooroeversuppletie langs de Hollandse kust is $300 \text{ m}^3/\text{m}$. Deze suppletie leidt dan gemiddeld genomen tot een verandering in $\log P$ van $-0.0008 \times 300 = -0.24$ in één jaar. Dit betekent dat de faalkans met een factor $10^{+0.24} = 1.7$ afneemt. In het licht van hoogwaterveiligheid zijn deze veranderingen klein te noemen.

Tabel 4-3 geeft een overzicht van *alle* berekende richtingscoëfficiënten (vermenigvuldigd met een factor 1000) volgens de methode 'accumuleren'.

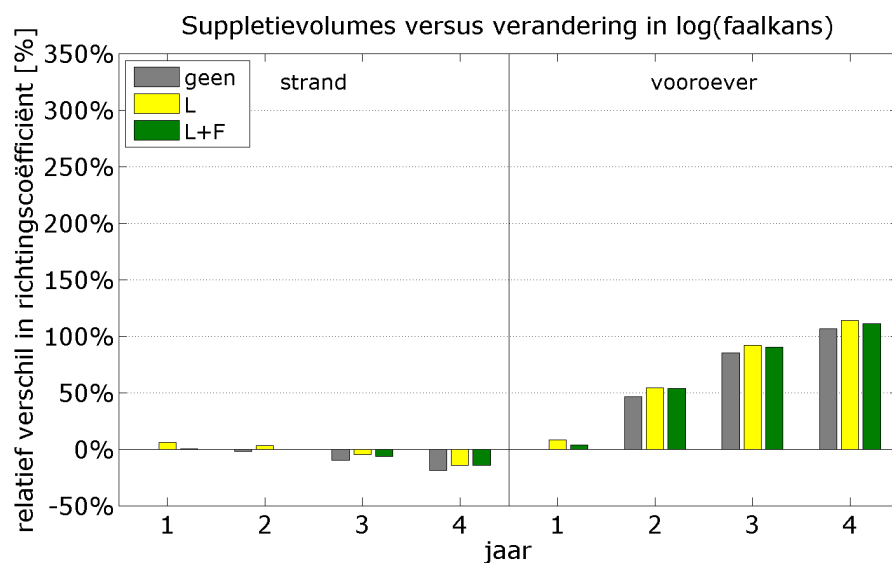
Kustvak	Correctie	Strandsuppleties				Vooroeversuppleties			
		Jaar 1	Jaar 2	Jaar 3	Jaar 4	Jaar 1	Jaar 2	Jaar 3	Jaar 4
Noord-Holland	Geen	-1.40	-1.54	-1.42	-0.85	-0.77	-0.95	-1.19	-1.20
	Langjarige trend	-1.69	-1.83	-1.71	-1.12	-0.93	-1.11	-1.37	-1.44
	Gemiddelde H_s^2	-1.71	-1.86	-1.78	-1.21	-0.95	-1.12	-1.39	-1.46
Rijnland	Geen	-0.90	-1.00	-0.85	-1.21	-0.11	-0.25	-0.37	-0.48
	Langjarige trend	-0.92	-1.02	-0.86	-1.27	-0.11	-0.25	-0.36	-0.47
	Gemiddelde H_s^2	-0.92	-1.02	-0.86	-1.27	-0.11	-0.25	-0.36	-0.47
Delfland	Geen	-1.19	-1.32	-1.42	-1.45	-0.17	-0.82	-1.15	-1.13
	Langjarige trend	-1.10	-1.22	-1.32	-1.34	-0.10	-0.76	-1.08	-1.07
	Gemiddelde H_s^2	-0.88	-1.07	-1.27	-1.52	-0.04	-0.79	-1.00	-1.00
Gemiddeld	Geen	-1.17	-1.29	-1.23	-1.17	-0.35	-0.67	-0.90	-0.94
	Langjarige trend	-1.24	-1.36	-1.30	-1.24	-0.38	-0.70	-0.94	-0.99
	Gemiddelde H_s^2	-1.17	-1.32	-1.31	-1.33	-0.37	-0.72	-0.92	-0.98

Tabel 4-3 Richtingscoëfficiënten ($\times 1000$) voor het verband tussen suppletievolumes S en veranderingen in de **faalkans van de eerste duinenrij** ($\Delta \log P$) als indicator voor de veiligheid V . De richtingscoëfficiënten zijn berekend op basis van datasets voor ΔV (1) zonder correcties, (2) met een correctie voor alleen de langjarige trend en (3) met een gecombineerde correctie voor de langjarige trend én het effect van stormen, met de jaargemiddelde golfenergie H_s^2 als indicator. Onderscheid is gemaakt tussen strandsuppleties (links) en vooroeversuppleties (rechts). De richtingscoëfficiënten zijn bepaald na 1 jaar (instantaan effect) tot en met 4 jaar volgens de methode 'accumuleren'.

De focus ligt evenals bij de andere indicatoren eerst op de gemiddelde waarden over de drie kustvakken (de laatste rij uit tabel 4-3). Deze zijn vertaald in de grafische weergave van figuur 4-10. Om het effect van de correcties voor langjarige trend en natuurlijke forcering inzichtelijk te maken, is het relatieve verschil van alle richtingscoëfficiënten berekend ten opzichte van de niet-gecorrigeerde, instantane waarde (jaar 1). Deze relatieve verschillen zijn opgenomen in figuur 4-11.



Figuur 4-10 Grafische weergave van de onderste rij van tabel 4-3), de gemiddelde waarden voor de gehele Hollandse kust. De staven geven respectievelijk het effect zonder correcties, met correctie voor de langjarige trend (L) en met correcties voor zowel de langjarige trend als de jaargemiddelde golfenergie (L+F).



Figuur 4-11 Relatief verschil in richtingscoëfficiënten uit figuur 4-10 ten opzichte van de richtingscoëfficiënt in jaar 1 zonder correctie.

De figuren 4-10 en 4-11 geven aanleiding tot de volgende conclusies over het verband tussen zandsuppleties en veranderingen in de faalkans van de eerste duinenrij:

1. Een groter suppletievolume leidt tot een grotere afname van de faalkans. Dit geldt zowel voor vooroeversuppleties als voor strandsuppleties.
2. Strandsuppleties hebben instantaan per volume-eenheid een significant sterker effect op de faalkans dan vooroeversuppleties.
3. Het effect van een strandsuppletie op de faalkans heeft direct vrijwel zijn maximale waarde bereikt, en neemt vervolgens door de jaren heen licht af.

4. Het effect van een vooroeversuppletie neemt gemiddeld na 2, 3 en 4 jaar met ongeveer 50%, 85% en 105% toe ten opzichte van zijn instantane effect (in jaar 1).
5. Na een periode van 4 jaar is de effectiviteit van een vooroeversuppletie per volume-eenheid ongeveer gelijk aan 80% van de effectiviteit van een strandsuppletie.
6. Corrigeren voor langjarige trends zorgt ervoor dat de effectiviteit van beide typen suppleties met ruim 5% wordt vergroot.
7. De correctie voor natuurlijke forcering via de jaargemiddelde golfenergie H_s^2 leidt niet tot een significant ander beeld dan wanneer alleen voor de langjarige trend wordt gecorrigeerd. De rol van de correctie voor de natuurlijke forcering is dus gering.

Deze conclusies gelden voor de Hollandse kust als geheel. Uit tabel 4-3 blijkt dat er kwantitatief gezien verschillen bestaan tussen de drie kustvakken. Een deel van deze verschillen wordt veroorzaakt door het gegeven dat de suppletie-intensiteit in de drie kustvakken niet gelijk is. Langs de kust van Noord-Holland en Delfland is door de jaren heen aanzienlijk meer gesuppleerd dan langs de kust van Rijnland.

Wanneer we de drie kustvakken met elkaar vergelijken, vallen vooral de volgende verschillen op:

1. In Noord-Holland en Delfland is na verloop van jaren een afname van de effectiviteit van strandsuppleties zichtbaar in het beïnvloeden van de faalkans. Bij Rijnland is de afname van de effectiviteit na verloop van jaren niet zichtbaar. Dit verschil was eveneens zichtbaar bij de MKL-positie.
2. De versterking van het effect van vooroeversuppleties door de jaren heen is bij alle kustvakken zichtbaar, maar is sterker in Delfland en Rijnland dan in Noord-Holland. Bij de indicatoren duinvoetpositie en MKL-positie was de volgorde hetzelfde, maar was er sprake van een afnemende effectiviteit bij Noord-Holland.
3. De correctie voor natuurlijke forcering leidt in Noord-Holland tot een versterking van de berekende effectiviteit van suppleties. In Rijnland is geen noemenswaardig effect zichtbaar, en in Delfland is de berekende effectiviteit na correctie zelfs kleiner. Dit bevestigt de eerdere conclusie dat de rol van de correctie voor natuurlijke forcering gering is.

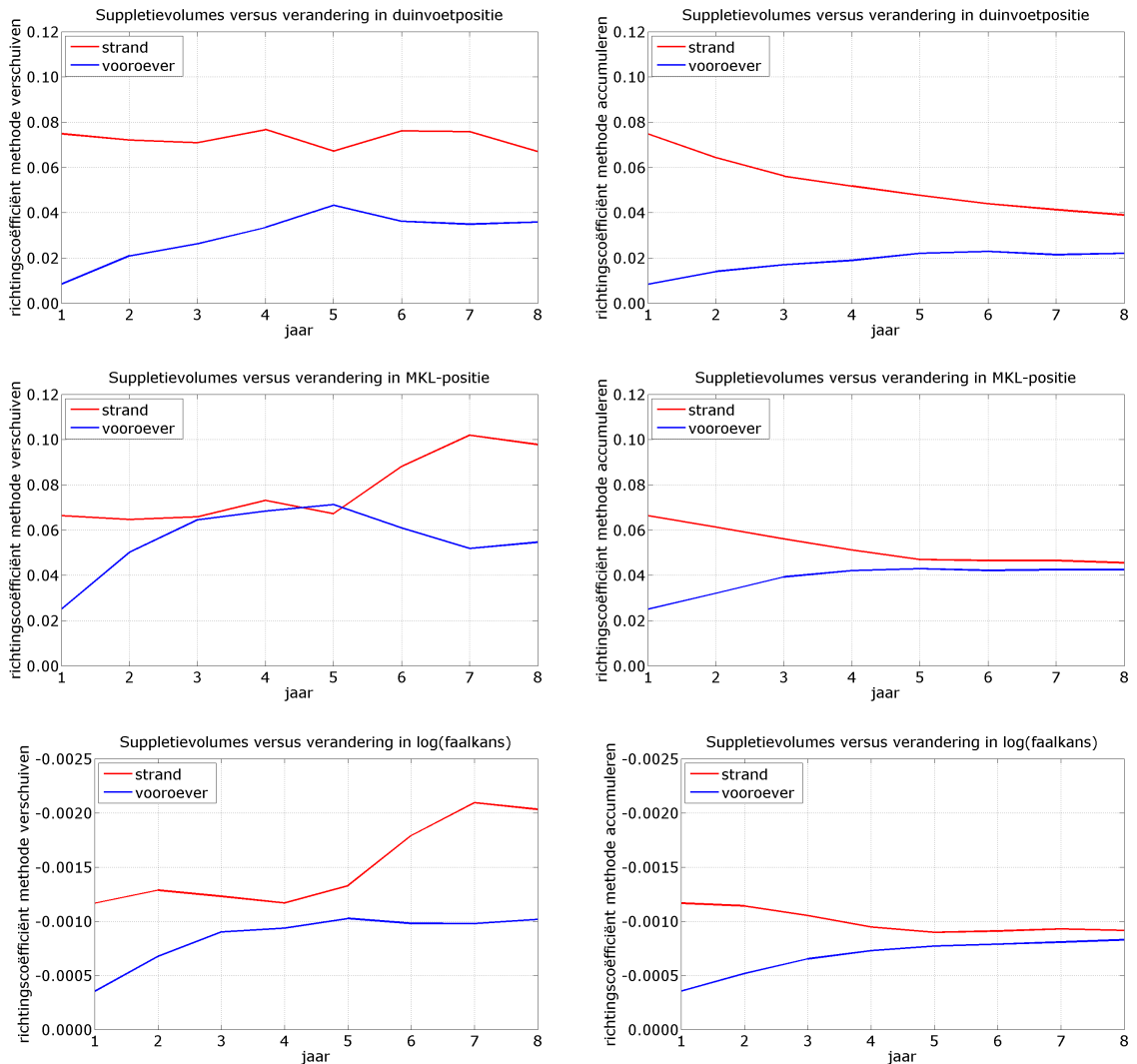
4.2.4 Langjarige effecten en vergelijking van veiligheidsindicatoren

In de analyse tot zo ver is de beschouwing van vertraagde effecten beperkt tot 4 jaar. De reden daarvoor is dat de effecten van suppleties steeds sterker door elkaar heen gaan lopen, naarmate de beschouwde periode langer wordt. De figuren 4-4, 4-7 en 4-10 geven echter aanleiding om te vermoeden dat vooroeversuppleties na 4 jaar nog niet hun maximale effect hebben. Daarom is in figuur 4-12 een extra set figuren toegevoegd.

Figuur 4-12 toont het effect van een bepaalde suppletie op de verandering in een indicator van de veiligheid na 1 tot en met 8 jaar. De richtingscoëfficiënt tussen suppletievolume en de veranderingen in een indicator zijn een maat voor de effectiviteit van strandsuppleties en vooroeversuppleties door de tijd heen. Het effect na 1 jaar beschouwen we als het instantane effect, de effecten na 2 jaar en verder als het vertraagde effect. De linker figuren zijn verkregen met de methode 'verschuiven', de rechter figuren met de methode 'accumuleren'. Deze methoden zijn beschreven in § 4.1.4. De groottes van de richtingscoëfficiënten als verkregen met beide methoden kunnen onderling niet rechtstreeks vergeleken worden, omdat de suppletievolumes bij 'verschuiven' niet, en bij 'accumuleren' wél door de tijd heen worden gesommeerd.

Beide methoden geven een ander beeld van de verhouding in effectiviteit van strandsuppleties en vooroeversuppleties door de tijd heen. Uit de figuren blijkt dat het toepassen van de methode 'verschuiven' voor langere tijdsvertragingen steeds onnauwkeuriger wordt. Dit blijkt bij-

voorbeeld uit de niet realistische toename van het effect van strandsuppleties op de faalkans vanaf 6 jaar. De fout die gemaakt wordt door het negeren van tussentijdse suppleties wordt steeds groter. De methode 'accumuleren' vertoont een stabiel beeld, met een gestaag afnemende effectiviteit van strandsuppleties en een gestaag toenemende effectiviteit van vooroeversuppleties.



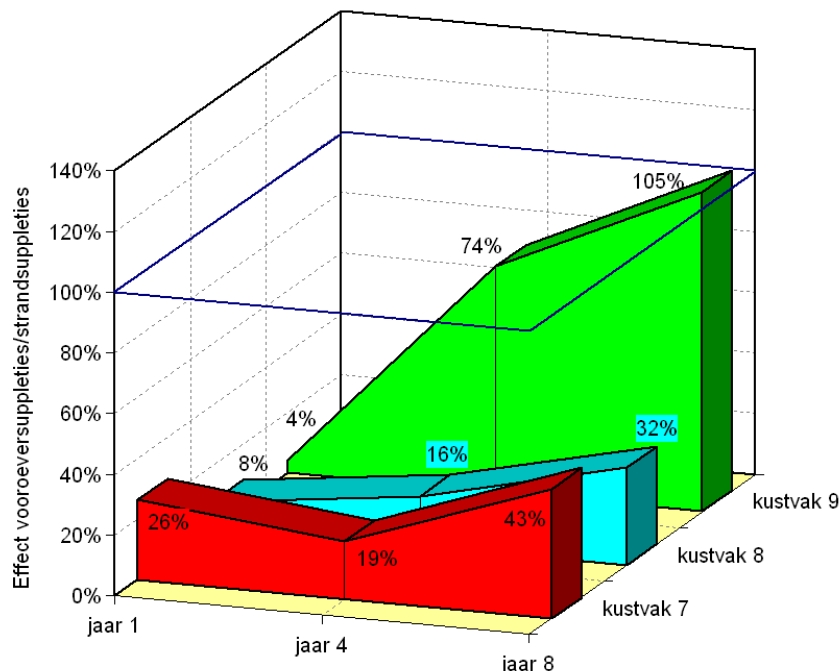
Figuur 4-12 Richtingscoëfficiënten als maat voor het effect van suppletievolumes [$m^3/m/jaar$] op veranderingen in indicatoren voor de veiligheid met een tijdsvertraging van 1 tot en met 8 jaar volgens de methoden 'verschuiven' (links) en 'accumuleren' (rechts).

Alle beschouwde indicatoren worden positief beïnvloed door de uitgevoerde suppleties. Het kwantitatieve effect van strandsuppleties en vooroeversuppleties verschilt echter van indicator tot indicator.

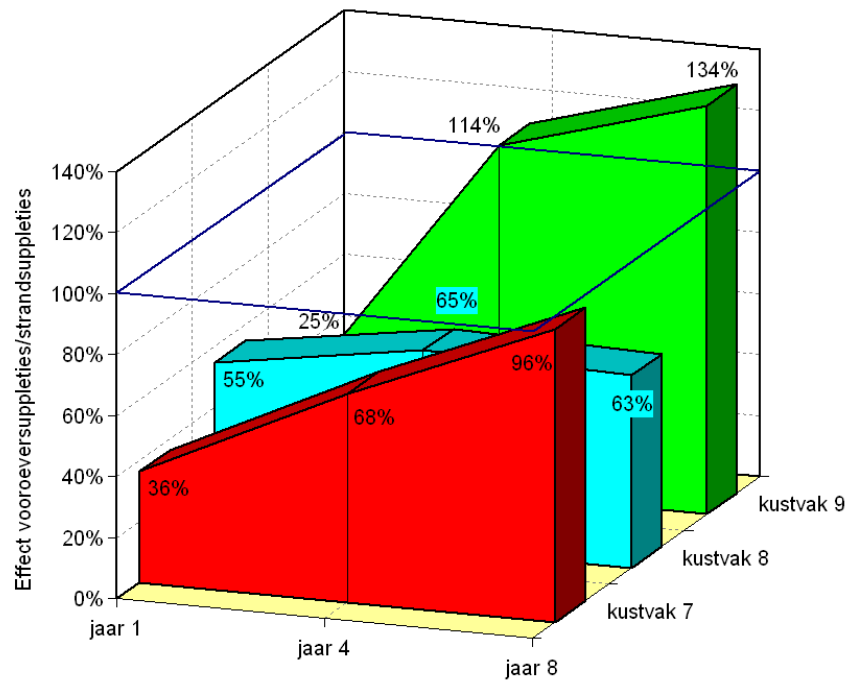
1. Strandsuppleties hebben per volume-eenheid initieel aanzienlijk meer invloed op de **duinvoetpositie** dan vooroeversuppleties. Het effect van een strandsuppletie op de duinvoetpositie neemt door de jaren heen gestaag af, tot ongeveer 50% na 8 jaar. Het effect van een vooroeversuppletie neemt daarentegen door de jaren heen toe. Na een periode van 5 jaar lijkt het definitieve effect bereikt te zijn. Na 8 jaar is het verschil in effectiviteit tussen beide suppletietypen duidelijk kleiner geworden, maar nog steeds significant aanwezig. Het effect van een vooroeversuppletie op de duinvoetpositie verloopt langzamer dan het effect op de

- MKL-positie of de faalkans van de eerste duinenrij.
- Strandsuppleties hebben per volume-eenheid initieel significant meer invloed op de **MKL-positie** dan vooroeversuppleties. Het effect van een strandsuppletie op de MKL-positie neemt door de jaren heen af, terwijl het effect van een vooroeversuppletie door de jaren heen aanzienlijk toeneemt. De effecten van beide suppletietypen lijken zich na ongeveer 5 jaar te stabiliseren. De verandering in effectiviteit is zelfs zodanig, dat het effect van een vooroeversuppletie na ca. 5 jaar bijna net zo groot is als het effect van een strandsuppletie op dat moment (ruim 90%).
 - Het effect van strandsuppleties op de faalkans van **de eerste duinenrij** is per volume-eenheid initieel duidelijk groter dan dat van vooroeversuppleties. Het effect van een strandsuppletie op de faalkans neemt door de jaren heen af, terwijl het effect van een vooroeversuppletie door de jaren heen aanzienlijk toeneemt. De effecten van beide suppletietypen lijken zich na ongeveer 5 jaar te stabiliseren. De verandering in effectiviteit is zelfs zodanig, dat het effect van een vooroeversuppletie na ca. 5 jaar bijna net zo groot is als het effect van een strandsuppletie op dat moment (85 tot 90%).

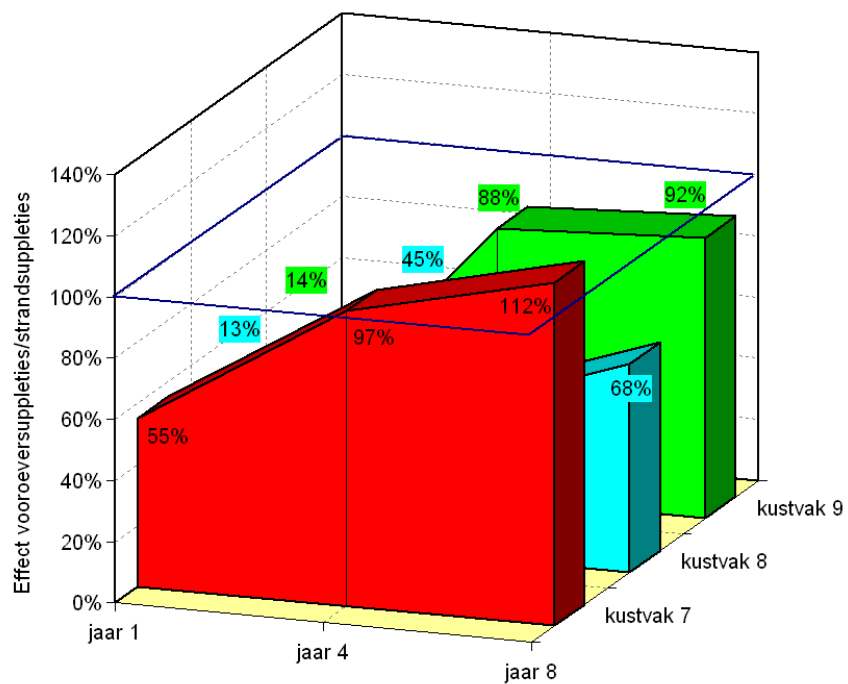
De conclusies over de verhouding in effectiviteit tussen beide suppletietypen gelden gemiddeld genomen voor de Hollandse Kust. Per kustvak zijn er echter duidelijke verschillen aanwezig. Ter illustratie van deze verschillen zijn figuur 4-13, 4-14 en 4-15 opgenomen. Deze figuren tonen per kustvak de ratio in de richtingscoëfficiënt volgens de methode 'accumuleren' (als aanwezig in de tabellen 4-1, 4-2 en 4-3). Het effect van een vooroeversuppletie wordt dan als percentage van het effect van een strandsuppletie met gelijk volume getoond. In de getallen is dus zowel het (overwegend) afnemende effect van strandsuppleties als het (overwegend) toenemende effect van vooroeversuppleties inbegrepen.



Figuur 4-13 Ratio tussen effectiviteit vooroeversuppleties en strandsuppleties in het beïnvloeden van de **duinvoetpositie** voor de kustvakken 7 (Noord-Holland), 8 (Rijnland) en 9 (Delfland) na 1, 4 en 8 jaar volgens de methode 'accumuleren'.



Figuur 4-14 Ratio tussen effectiviteit vooroeversuppleties en strandsuppleties in het beïnvloeden van de **MKL-positie** voor de kustvakken 7 (Noord-Holland), 8 (Rijnland) en 9 (Delfland) na 1, 4 en 8 jaar volgens de methode 'accumuleren'.



Figuur 4-15 Ratio tussen effectiviteit vooroeversuppleties en strandsuppleties in het beïnvloeden van de **faalkans van de eerste duinenrij** voor de kustvakken 7 (Noord-Holland), 8 (Rijnland) en 9 (Delfland) na 1, 4 en 8 jaar volgens de methode 'accumuleren'.

4.3 Schaalgrootte effecten

Veranderingen in veiligheid worden bepaald door het effect van langjarige trends, variaties in de sterkte van natuurlijke forcering en het effect van zandsuppleties. In deze paragraaf wordt de orde van grootte van deze invloeden vergeleken. Daarbij zijn de waarden uit tabel 4-4 aangehouden.

Effect	Positieve waarde	Gemiddelde waarde	Negatieve waarde
Langjarige trend L	L_{max}	L_{gem}	L_{min}
Natuurlijke forcering F	$C \cdot F_{min} + D$	$C \cdot F_{gem} + D$	$C \cdot F_{max} + D$
Suppleties S		$P \cdot S_{gem}$	

Tabel 4-4 Keuze voor positieve, gemiddelde en negatieve waarden voor de vergelijking van de schaalgrootte van verschillende effecten.

De langjarige trend, als gebaseerd op de periode tot en met 1990, varieert van raai tot raai. De over alle raaien van de Hollandse kust gemiddelde waarde geeft een indicatie van de autonome ontwikkeling van de Hollandse kust als geheel. Daarnaast worden de maximale en minimale waarde getoond, om de ruimtelijke spreiding in de langjarige trend te laten zien.

De uitersten voor het effect van de natuurlijke forcering worden berekend door de maximale en minimale waarde voor de natuurlijke forcering te kiezen, en het effect te berekenen op basis van het lineaire verband als gegeven door vergelijking 3-5.

Deze effecten worden vergeleken met het effect van een gemiddelde suppletie na 4 jaar, als berekend volgens vergelijking 4-3. Na 4 jaar heeft ook een vooroeversuppletie namelijk ongeveer het definitieve effect bereikt. Het gemiddelde suppletievolumen langs de Hollandse kust bedraagt ongeveer 225 m³/m voor een strandsuppletie en 300 m³/m voor een vooroeversuppletie. Omdat het gemiddelde volume van een individuele suppletie wordt gehanteerd, is alleen de methode 'verschuiven' geschikt. Deze is dan ook toegepast.

4.3.1 Duinvoetpositie

Tabel 4-5 geeft een beeld van de invloed van de verschillende effecten op de totale verandering van de duinvoetpositie. Daarbij geldt dat een negatieve waarde een landwaartse verschuiving van de duinvoetpositie is.

Effect	Positieve waarde	Gemiddelde waarde	Negatieve waarde
Langjarige trend L	17.6	-0.03	-3.2
Natuurlijke forcering F	3.6	-0.40	-5.4
Strandsuppletie na 4 jaar		18.0	
Vooroeversuppletie na 4 jaar		10.7	

Tabel 4-5 Schaalgrootte van positieve, gemiddelde en negatieve veranderingen van de duinvoetpositie [m/jaar].

Uit deze getallen blijkt dat bij een gemiddelde raai en een jaar met een gemiddelde natuurlijke forcering de duinvoetpositie enigszins landwaarts zou verschuiven (-0.03-0.40 m/jaar).

De grootste negatieve trend langs de Hollandse kust (geldig voor de periode tot en met 1990) bedraagt 3.2 m per jaar, in Noord-Holland, ten noorden van Petten. Grote positieve trends worden gevonden rond de golfbrekers bij Hoek van Holland en IJmuiden door blokkering van sedimenttransporten langs de kust.

De natuurlijke forcering verschilt van jaar tot jaar, waardoor in het ene jaar de duinvoetpositie zeewaarts, en het andere jaar landwaarts verschuift. Bij de hoogst gemeten waterstand tussen 1965 en 2010 treedt gemiddeld over de raaien een landwaartse verschuiving van 5.4 m op.

De huidige gemiddelde suppletievolumes zijn ruimschoots afdoende om de gemiddelde verandering in de duinvoetpositie te compenseren. Daar waar grotere negatieve langjarige trends optreden moet regelmatig gesuppleerd worden om de duinvoetpositie te stabiliseren. Afgaand op de verhouding tussen de invloed van de maximale natuurlijke forcering en een gemiddelde suppletie, is een reactief suppletiebeleid voldoende. Bij een reactief suppletiebeleid wordt alleen daar gesuppleerd waar een ongewenste terugschrijdende beweging van de duinvoetpositie heeft plaatsgevonden.

4.3.2 Momentane kustlijn

Tabel 4-6 geeft een beeld van de invloed van de verschillende effecten op de totale verandering van de MKL-positie. Daarbij geldt dat een negatieve waarde een landwaartse verschuiving van de MKL-positie is.

Effect	Positieve waarde	Gemiddelde waarde	Negatieve waarde
Langjarige trend L	19.5	0.5	-4.1
Natuurlijke forcering F	1.3	-0.6	-4.3
Strandsuppletie na 4 jaar		18.1	
Vooroeversuppletie na 4 jaar		21.5	

Tabel 4-6 *Schaalgrootte van positieve, gemiddelde en negatieve veranderingen van de MKL-positie [m/jaar].*

Uit deze getallen blijkt dat bij een gemiddelde raai en een jaar met een gemiddelde natuurlijke forcering de MKL-positie ongeveer constant zou zijn (+0.5-0.6).

De grootste negatieve trend langs de Hollandse kust (geldig voor de periode tot en met 1990) bedraagt 4.1 m per jaar, in Noord-Holland, ten zuiden van Camperduin. Grote positieve trends worden evenals bij de duinvoetpositie gevonden rond de golfbrekers bij Hoek van Holland en IJmuiden door blokkering van sedimenttransporten langs de kust.

De natuurlijke forcering verschilt van jaar tot jaar, waardoor in het ene jaar de momentane kustlijn zeewaarts, en het andere jaar landwaarts verschuift. Bij de hoogst gemeten jaargemiddelde golfenergie tussen 1979 en 2010 treedt gemiddeld over de raaien een landwaartse verschuiving van 4.3 m op.

De huidige gemiddelde suppletievolumes zijn ruimschoots afdoende om de gemiddelde verandering in de ligging van de momentane kustlijn te compenseren. Daar waar grotere negatieve langjarige trends optreden moet regelmatig gesuppleerd worden om de momentane kustlijn te stabiliseren. Afgaand op de verhouding tussen de invloed van de maximale natuurlijke forcering en een gemiddelde suppletie, is een reactief suppletiebeleid voldoende. Bij een reactief suppletiebeleid wordt alleen daar gesuppleerd waar een ongewenste terugschrijdende beweging van de momentane kustlijn heeft plaatsgevonden.

4.3.3 Faalkans van de eerste duinenrij

Tabel 4-7 geeft een beeld van de invloed van de verschillende effecten op de totale verandering van de faalkans.

Uit deze getallen blijkt dat bij een gemiddelde raai en een jaar met een gemiddelde natuurlijke

Effect	Positieve waarde	Gemiddelde waarde	Negatieve waarde
Langjarige trend L	0.73	0.98	1.27
Natuurlijke forcering F	0.81	1.00	1.54
Strandsuppletie na 4 jaar		0.50	
Vooroeversuppletie na 4 jaar		0.51	

Tabel 4-7 *Schaalgrootte van positieve veranderingen (afname), gemiddelde en negatieve (toename) veranderingen van de faalkans, gepresenteerd als de ratio in faalkans tussen opeenvolgende jaren [-]. Waarden groter dan 1 duiden op een toename in de faalkans, waarden kleiner dan 1 op een afname.*

forcering de faalkans nagenoeg constant zou blijven (waarden rond 1).

De natuurlijke forcering verschilt van jaar tot jaar, waardoor in het ene jaar de faalkans toeneemt, en in het andere jaar weer afneemt. Bij de hoogst gemeten gemiddelde golfenergie tussen 1979 en 2010 treedt gemiddeld over de raaien een toename van de faalkans van 54% op. In termen van faalkansen is een dergelijke verandering klein te noemen.

De grootste negatieve trend langs de Hollandse kust (geldig voor de periode tot en met 1990) bedraagt 27% per jaar, in een gebied nabij de kop van Noord-Holland. Met een dergelijke trend neemt de faalkans (pas) na ruim 9 jaar een gehele orde (een factor 10) toe, bijvoorbeeld van 1/100.000 jaar naar 1/10.000 jaar. De jaarlijkse veranderingen in de faalkans zijn dus behoorlijk klein.

Zowel met een gemiddelde strandsuppletie als een gemiddelde vooroeversuppletie neemt de faalkans na een periode van 4 jaar met ongeveer 50% af. Hieruit blijkt dat er forse suppleties nodig zijn om significante faalkansveranderingen te bewerkstelligen.

De conclusie is dat de jaarlijkse veranderingen in de faalkans van de zeewering klein zijn. Zowel de gevoeligheid voor natuurlijke forcering als voor zandsuppleties is gering.

4.4 Conclusies

Het onderzoek naar een statistisch verband tussen zandsuppleties en veranderingen in indicatoren voor de veiligheid van de kust heeft geleid tot de volgende voornaamste conclusies, alle geldig voor het *gemiddeld genomen effect* van suppleties langs de *Hollandse kust*:

1. Alle beschouwde indicatoren voor de veiligheid worden positief beïnvloed door de uitgevoerde suppleties. Dit is één van de hypothesen die wordt getoetst binnen het project KPP-B&O Kust, zie § 1.1. Het voorliggende onderzoek leidt dus tot bevestiging van deze hypothese.
2. Het effect van een strandsuppletie is instantaan aanwezig, maar neemt vervolgens gestaag af. In het geval van de MKL-positie of de faalkans van de eerste duinenrij neemt het effect van een vooroeversuppletie na verloop van jaren toe, en benadert het na ongeveer 5 jaar per volume-eenheid het effect van een strandsuppletie. De beïnvloeding van de duinvoetpositie door een vooroeversuppletie verloopt langzamer, en de effectiviteit blijft ook op langere termijn nog duidelijk kleiner dan die van een strandsuppletie.
3. De berekende effectiviteit van suppleties wordt slechts licht vergroot wanneer veranderingen in de indicatoren voor de veiligheid worden gecorrigeerd voor langjarige trends en het effect van natuurlijke forcering. Om enkel de langjarige trends en het effect van stormen te compenseren, zouden daarom gemiddeld genomen suppleties volstaan met een kleiner volume dan op het moment gebruikelijk is. Lokaal kan een relatief sterke langjarige negatieve

trend wel om een intensiever suppletiebeleid vragen. Gezien de verhouding tussen langjarige trends en effecten van stormen enerzijds en het effect van suppleties anderzijds is een reactief suppletiebeleid mogelijk. Deze conclusie houdt geen rekening met de discussie over het meegroeien van de kust met de zeespiegelstijging, zie bijvoorbeeld [Deltares \(2010\)](#).

4. Jaarlijkse veranderingen in de faalkans van de zeewering zijn klein. Zowel de gevoeligheid voor natuurlijke forcering als voor zandsuppleties is gering.
5. Effecten van verschillende suppleties lopen door elkaar heen, waardoor het analyseren van het effect van een afzonderlijke suppletie wordt bemoeilijkt.

5 Synthese

In dit hoofdstuk wordt het rapport besloten met een terugblik, de voornaamste conclusies van het onderzoek, en aanbevelingen die uit het onderzoek voortkomen.

5.1 Terugblik

De centrale hypothese in het onderzoek als beschreven in dit rapport is dat veranderingen in de veiligheid van de kust het gevolg zijn van de som van een langjarige trend, het effect van natuurlijke forcering en het effect van zandsuppleties.

De duinvoetpositie, de positie van de momentane kustlijn en de faalkans van de eerste duinenrij zijn de beschouwde indicatoren voor de veiligheid van de kust. Al deze indicatoren zijn berekend op basis van de JarKus-dataset.

De jaarlijkse maximale waterstand, de jaargemiddelde golfenergie H_s^2 en het Dean getal $H_s/(T_{m02} \cdot w_s)$ zijn bij het onderzoek betrokken als indicatoren voor de natuurlijke forcering. Hierin is H_s de significante golfhoogte, T_{m02} de golfperiode en w_s de valsnelheid van het zand. Gegevens over waterstanden en golfhoogtes zijn afkomstig uit DONAR.

In de periode vóór 1990 werd er nog relatief extensief gesuppleerd. Op basis van deze periode zijn de langjarige trend en het effect van de natuurlijke forcering bepaald. Vervolgens zijn de datasets met indicatoren voor de veiligheid gecorrigeerd voor deze twee effecten. Op basis van de gecorrigeerde dataset is de effectiviteit van zandsuppleties in kaart gebracht. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen strandsuppleties en vooroever-suppleties, zowel instantaan als na verloop van jaren.

Maximale waterstanden, gemiddelde golfcondities en aangebrachte suppletievolumes zijn alle bepaald over de periode tussen twee JarKus-metingen. Deze periode varieert dus van jaar tot jaar en van raai tot raai. Op deze manier zijn veranderingen in veiligheid ook nauwkeurig gerelateerd aan de hydraulische condities en suppletie-activiteiten in de periode tussen de metingen van het dwarsprofiel.

Het onderzoek heeft inzicht verschaft over de mate waarin diverse indicatoren voor de veiligheid van de kust worden beïnvloed door natuurlijke forcering en verschillende typen suppleties.

5.2 Conclusies

Het verrichte onderzoek leidt tot de volgende conclusies over het **effect van natuurlijke forcering** op de indicatoren van de veiligheid van de kust:

1. Veranderingen in **duinvoetpositie** zijn het sterkst gerelateerd aan de jaarlijkse maximale waterstand. De reden hiervoor is dat de duinvoetpositie vooral wijzigt door duinafslag, en dat bij zeer hoge waterstanden aanzienlijk meer duinafslag optreedt. Het statistische verband tussen beide indicatoren is relatief sterk. Een relatief lage maximale waterstand in een bepaald jaar resulteert vrijwel altijd in een zeewaartse verschuiving van de duinvoetpositie, terwijl een relatief hoge maximale waterstand vrijwel altijd gepaard gaat met een landwaartse verschuiving.
2. De **MKL-positie** houdt verband met zowel duinafslag (verandering van de duinvoetpositie) als variaties in structurele erosie (verandering van het volume zand rond de laagwaterlijn). De beste indicator voor terugschrijding van de MKL-positie is de jaargemiddelde golfenergie

H_s^2 , waaruit blijkt dat variatie in gemiddelde stormmchtigheid over de jaren een sterkere rol speelt dan incidentele duinafslag tijdens extreme stormvloed. Door de vele invloeden is de statistische relatie tussen de beschouwde indicatoren voor de natuurlijke forcering en veranderingen in MKL-positie relatief zwak en is de spreiding in de veranderingen van de MKL-positie relatief groot.

3. De jaargemiddelde golfenergie H_s^2 is eveneens de beste indicator voor veranderingen in de **faalkans van de eerste duinenrij**. Jaarlijkse veranderingen in de faalkansen door natuurlijke forcering zijn veelal relatief klein.
4. De relatie tussen veranderingen in veiligheid en het jaargemiddelde Dean getal is zeer zwak. De verhouding H_s/T_{m02} is gerelateerd aan de golfsteilheid. In theorie geeft het Dean getal daardoor een indicatie voor de kans op aanzanding of erosie op een bepaalde locatie. Gaande van diep water richting de kust, verandert het Dean getal sterk als gevolg van golftransformatieprocessen. Omdat gebruik is gemaakt van off-shore golfdata, kan geen relatie gelegd worden met de near-shore morfologische processen. Omdat de verhouding H_s/T_{m02} bij de meetlocaties verder weinig zegt over de sterkte van de belasting op een bepaald moment, is het matige presteren van het Dean getal verklaarbaar.

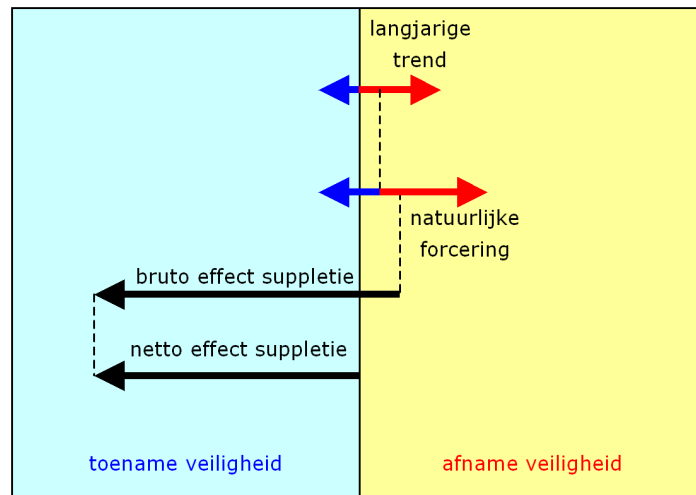
Daarnaast geven de resultaten van het onderzoek aanleiding tot de volgende conclusies over de **effectiviteit van suppleties** in het beïnvloeden van de veiligheid van de kust:

1. Alle beschouwde indicatoren voor de veiligheid worden *positief beïnvloed* door de uitgevoerde suppleties. Dit is één van de hypothesen die wordt getoetst binnen het project KPP-B&O Kust, zie § 1.1. Het voorliggende onderzoek leidt dus tot bevestiging van deze hypothese.
2. Het effect van een strandsuppletie is instantaan aanwezig, maar neemt vervolgens gestaag af. In het geval van de MKL-positie of de faalkans van de eerste duinenrij neemt het effect van een vooroeversuppletie na verloop van jaren toe, en benadert het na ongeveer 5 jaar per volume-eenheid het effect van een strandsuppletie. De beïnvloeding van de duinvoetpositie door een vooroeversuppletie verloopt langzamer, en de effectiviteit blijft ook op langere termijn nog duidelijk kleiner dan die van een strandsuppletie.
3. Het effect van suppleties is *aanzienlijk groter* dan het effect van een individueel stormmchtig jaar of langjarige trends. De schematische weergave in figuur 4-1 op pagina 30 kan daarom beter vervormd worden tot een figuur met de verhoudingen uit figuur 5-1. Langjarige trends kunnen positief en negatief zijn, maar zijn gemiddeld licht negatief. Het effect van een variabele natuurlijke forcering leidt tot een bandbreedte om de langjarige trend heen. Beide effecten kunnen echter ruimschoots gecompenseerd worden door een gemiddelde suppletie.
4. Effecten van verschillende suppleties lopen door elkaar heen, waardoor het analyseren van het effect van een afzonderlijke suppletie wordt bemoeilijkt.

5.3 Aanbevelingen

Op basis van het verrichte onderzoek doen we de volgende aanbevelingen:

1. Dit onderzoek geeft inzicht in de effectiviteit van suppleties in het handhaven en verbeteren van de veiligheid van de kust. De resultaten van het onderzoek geven handvatten om suppletievolumes te bepalen, waarmee een bepaalde gewenste verandering in de veiligheid moet worden bewerkstelligd.
2. De resultaten van het onderzoek verschaffen inzicht in het verschil in effectiviteit tussen strandsuppleties en vooroeversuppleties, zowel instantaan als na verloop van jaren. Op basis van de kosten per volume-eenheid van beide suppletietypen is het mogelijk om een ge-



Figuur 5-1 Schematische weergave van de verhouding in grootte tussen langjarige trends, het effect van de natuurlijke forcering en het effect van suppleties.

fundeerde keuze voor één van beide suppletietypen te maken.

3. Om enkel de langjarige trends en het effect van stormen te compenseren, zouden gemiddeld genomen suppleties volstaan met een duidelijk kleiner volume dan op het moment gebruikelijk is. Lokaal kan een relatief sterke langjarige negatieve trend wel om een intensiever suppletiebeleid vragen. Gezien de verhouding tussen langjarige trends en effecten van stormen enerzijds en het effect van suppleties anderzijds is voor de Hollandse kust een reactief suppletiebeleid mogelijk. Deze aanbeveling houdt geen rekening met de discussie over het meegroeien van de kust met de zeespiegelstijging, zie bijvoorbeeld [Deltares \(2010\)](#).
4. Binnen het recente onderzoek als beschreven in [HKV LIJN IN WATER \(2012\)](#) is een overzicht berekend van de overstromingskansen langs de gehele Nederlandse kust. Daarmee is materiaal beschikbaar ter ondersteuning bij het bepalen van welke locaties prioriteit hebben binnen het suppletieprogramma. Met behulp van het voorliggende onderzoek kan vervolgens beter gekwantificeerd worden welk suppletievolume en welk suppletietype geschikt zijn om de gewenste verhoging van de veiligheid te bewerkstelligen. Op deze manier vullen beide onderzoeken elkaar aan.

Tenslotte merken we op dat de resultaten van het onderzoek nog verder kunnen worden verbeterd en uitgebreid. Suggesties daarvoor zijn:

1. De veranderingen in de veiligheid van de kust zijn gerelateerd aan golfdata op een redelijk grote afstand vanaf de kust. Hoewel trends in de data waarschijnlijk goed overeen zullen komen, zou een vertaling van de golfgegevens naar near-shore resulteren in een verbetering van het onderzoek. Voor de Hollandse kust is in OpenEarth een tool beschikbaar, waarmee op basis van transformatiematrices golfdata nabij de kust kan worden berekend. Deze transformatiematrices zijn ontwikkeld op basis van simulaties met SWAN. Een beschrijving van de tool is te vinden in [Deltares \(2011\)](#).
2. De datasets met duinvoetposities en MKL-posities bevatten, zoals beschreven in het rapport, relatief veel niet-realistische sprongen, die het gevolg zijn van de gebruikte methodiek. Het verbeteren van deze datasets viel buiten de scope van dit onderzoek. De dataset kan mogelijk verbeterd worden door het toepassen van de methode uit [HKV LIJN IN WATER \(2011a\)](#), waarin de duinvoetpositie eveneens bepaald is, als begrenzing van de strandbreedte. Deze methode kent een correctie waardoor oneffenheden in het strand de duinvoetpositie niet beïnvloeden.

De invloed van de ruis in de datasets is in het voorliggende rapport beperkt door middel van filtering van extremen, maar een meer gedetailleerde filtering van niet-realistische waarden zou leiden tot een verbetering van de analyse.

3. De statistische relaties tussen de beschouwde indicatoren voor natuurlijke forcering en veiligheid zijn regelmatig zwak. De consequenties hiervan op de verhouding tussen de invloed van stormen enerzijds en suppleties anderzijds zijn in dit onderzoek niet inzichtelijk gemaakt. Deze extra stap kan mogelijk de fundering van de hieruit voortvloeiende conclusies en aanbevelingen versterken.
4. Het onderzoek is uitgevoerd voor de kust van Noord-Holland en Zuid-Holland. In een later stadium zou dit uitgebreid kunnen worden naar de Waddenkust en de Zeeuwse kust.

Bijlage(n)

A Controle van uitkomsten

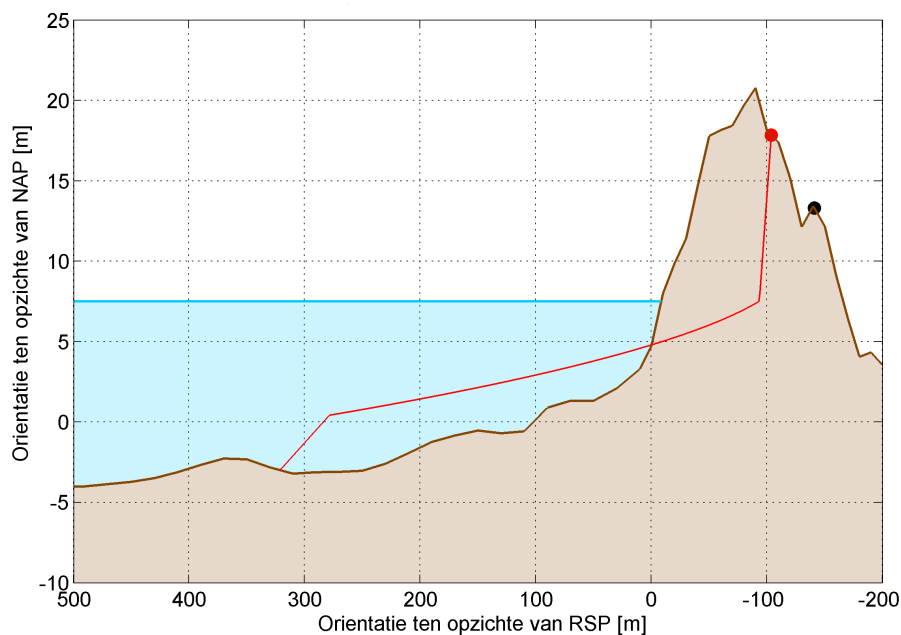
Alle faalkansberekeningen zijn op raainiveau gecontroleerd. De controles zijn onder te verdelen in vier categorieën: beoordeling van het dwarsprofiel, beoordeling van de grootte van de faalkansen, controle van de maatgevende afslagberekening door DUROS+ en controle van het convergentieverloop van de probabilistische FORM-berekening door PC-Ring. In dit appendix worden deze vier aspecten toegelicht aan de hand van een voorbeeld: een raai uit kustvak 8.

A.1 Dwarsprofiel

Als voorbeeld wordt raai 8005950 beschouwd. Dit profiel is weergegeven in figuur A-1. Ten aanzien van het profiel zijn de volgende conclusies te trekken:

- het profiel bevat een volledige duin,
- het profiel bevat geen dubbele duinenrijen,
- het profiel kent een glad verloop.

Op basis van deze conclusies is het waarschijnlijk dat DUROS+ goed in staat is om een realistisch afslagprofiel te berekenen.



Figuur A-1 Het berekende afslagprofiel voor een voorbeeldraai uit kustvak 8.

A.2 Afslagprofiel

Figuur A-1 toont het maatgevende afslagprofiel voor raai 5950, behorend bij falen. Het rode punt geeft het bijbehorende afslagpunt. Na meenemen van onzekerheden (in bijvoorbeeld de stormduur, neerslagintensiteit en rekentechniek) ontstaat het maatgevende afslagpunt, getoond in zwart. Het verschil tussen het afgeslagen volume en het aangezande volume is 3%. Dit is voldoende nauwkeurig om vertrouwen te hebben in de berekende faalkans.

A.3 Faalkans

De nauwkeurigheid van de berekeningen door DUROS+ is gecontroleerd door het afslagprofiel te beschouwen. Grillige profielen of profielen waarin dubbele duinenrijen zijn achtergebleven, leveren vaak onnauwkeurige afslagberekeningen op. De controle wordt uitgevoerd aan de hand van massabehoud. Zodra het afgeslagen duinvolume en het aangezande zandvolume aanzienlijk verschillen, is het resultaat buiten beschouwing gelaten. De faalkans wordt dan niet meegenomen in de gecombineerde kans voor het ringdeel.

De berekende faalkans op jaarbasis is $4.31 \cdot 10^{-8}$. Het volume boven duinvoetniveau (3 m+NAP) van de eerste duinenrij (V_2) bedraagt $1967 \text{ m}^3/\text{m}$. Voor de twee voorgaande jaren werd respectievelijk een faalkans van $4.23 \cdot 10^{-8}$ en $5.54 \cdot 10^{-8}$ per jaar berekend.

De profielen van de naastgelegen raai 5925 zijn sterk vergelijkbaar met de profielen van raai 5950. De berekende faalkans voor raai 5925 is $8.98 \cdot 10^{-9}$. Deze lagere faalkans is te verklaren uit het feit dat het volume boven duinvoetniveau voor raai 5925 groter is dan voor raai 5950: $2323 \text{ m}^3/\text{m}$ versus $1967 \text{ m}^3/\text{m}$. De hoogte van beide (eerste) duinen is vrijwel gelijk, maar de breedte van de duin in raai 5925 is groter.

Vergelijking van de berekende faalkans met de profielkarakteristieken, met voorgaande jaren en met naastgelegen raaien geeft vertrouwen in de berekende faalkans.

A.4 Convergentie

De probabilistische FORM-berekening wordt gekenmerkt door een iteratief verloop. Op basis van convergentiecriteria wordt binnen de berekening bepaald of er een eindresultaat is bereikt. Een grillig verloop van het profiel kan aanleiding geven tot het uitblijven van convergentie. Uitkomsten van niet-geconvergeerde berekeningen zijn in principe buiten beschouwing gelaten.

Uit het convergentieverloop van raai 5950 is gebleken dat de faalkans stabiel is rondom de waarde $4.31 \cdot 10^{-8}$. De waarde van de grenstoestandsfunctie is aan het einde van de iteratie gelijk aan $Z = 4 \text{ m}$. De nauwkeurigheid van het berekende afslagpunt is eveneens in die orde van grootte. Dit is voldoende voor het nauwkeurig berekenen van een faalkans.

Overigens hoeft een convergentieverloop, dat door PC-Ring als 'slecht' wordt gekwalificeerd, niet per se een nutteloos resultaat op te leveren. Het kan voorkomen dat door minimale schommelingen in het convergentieverloop net niet strikt wordt voldaan aan de convergentiecriteria. In dergelijke gevallen kan het afslagprofiel echter wel nauwkeurig zijn. Een voorbeeld van een dergelijke situatie is reeds gegeven in appendix B van [HKV LIJN IN WATER \(2011b\)](#).

A.5 Conclusie

De berekende faalkans voor de gegeven voorbeeldraai mag als 'betrouwbaar resultaat' worden gekwalificeerd. Op de wijze zoals hierboven geschetst zijn nu faalkansen voor alle raaien in de kustvakken 7, 8 en 9 geverifieerd.

B Trendvergelijking

In dit appendix wordt geanalyseerd in welke mate de trends in de door Arcadis en HKV [LJN IN WATER](#) berekende faalkansen overeenkomen. Hiertoe worden de resultaten uit 2011 gebruikt, zoals gerapporteerd in [Arcadis \(2011\)](#) en [HKV \[LJN IN WATER\]\(#\) \(2011b\)](#).

B.1 Methodiek voor de analyse van veiligheid

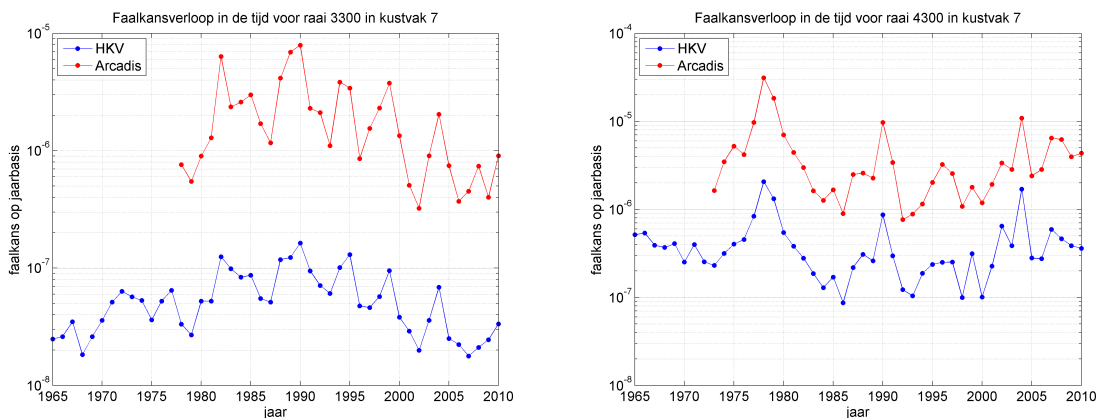
In 2011 zijn zowel door Arcadis als door HKV [LJN IN WATER](#) faalkansen berekend voor de Hollandse kust, voor de periode van 1965 tot en met 2010. De ene partij heeft een methode gebruikt die methodologisch afwijkt van de methode van de andere partij.

HKV [LJN IN WATER](#) heeft de kans op een duindoorkraak berekend, in absolute zin. Bijvoorbeeld, bij een bepaalde raai is de kans op falen van de duinen $1.0 \cdot 10^{-7}$ per jaar. In dat geval heeft het falen van de duin een verwachte terugkeertijd van eens in de 10 miljoen jaar.

Arcadis heeft de kans van optreden berekend op de gebeurtenis dat het afslagpunt in een bepaald jaar meer landwaarts ligt dan het maatgevende afslagpunt zoals dat is berekend voor het jaar 1990. Bijvoorbeeld, als in 1990 het maatgevende afslagpunt bij een bepaalde raai op -200 m +RSP ligt, dan is de kans dat in een bepaald ander jaar het afslagpunt meer landwaarts ligt $4.0 \cdot 10^{-6}$ per jaar.

Het resultaat van beide benaderingen is niet in *absolute zin*, maar wèl in *relatieve zin* te vergelijken. De waarden zijn verschillend, maar de trends zouden hetzelfde moeten zijn. In beide gevallen geldt dat hoe verder de kans is afgenomen, hoe veiliger het achterland is geworden.

Een voorbeeld is getoond in figuur B-1. In deze figuur zijn twee resultaatreeksen getoond, voor raaien 3300 en 4300 uit kustvak 7 (Noord-Holland). De hierboven genoemde kanswaarden zijn ontleend aan het jaar 1999 van raai 3300. Deze twee tijdreeksen zijn door Arcadis tevens in haar rapportage van 2011 opgenomen.



Figuur B-1 Ontwikkeling van de overschrijdingskans (resultaat van Arcadis) en van de faalkans (resultaat van HKV [LJN IN WATER](#)) voor raaien 3300 (links) en 4300 (rechts) uit kustvak 7 (Noord-Holland).

Figuur B-1 laat zien dat de trend voor de twee getoonde raaien op het oog redelijk tot goed overeenkomen. Het verschil tussen de absolute kanswaarden verschilt van raai tot raai: bij raai 3300 ongeveer een factor 15, bij raai 4300 ongeveer een factor 10.

B.2 Beoordelingscriteria

In deze paragraaf wordt nagegaan hoezeer de resultaten van Arcadis en HKV LJN IN WATER overeenkomen voor de gehele Hollandse kust. Het is echter ondoenlijk om per raai op het oog vast te gaan stellen of de tijdreeksen overeenkomen. Hiertoe is een *tweetal criteria* geformuleerd.

Het eerste criterium is gebaseerd op de *standaardafwijking* van $\log P_{hkv}$ en van $\log P_{arc}$, de kansen zoals berekend door respectievelijk HKV LJN IN WATER en Arcadis. Hiermee wordt dus de interne spreiding van de tijdreeks bepaald. De standaardafwijkingen worden σ_{hkv} en σ_{arc} genoemd en als volgt verwerkt in het criterium:

$$\text{criterium 1} = c_1 = \frac{\sigma_{hkv} - \sigma_{arc}}{\sigma_{arc}}. \quad (\text{B-1})$$

Bij perfect overeenkomende trends, zou criterium 1 gelijk aan nul zijn: $c_1 = 0$.

Het eerste criterium geeft het verschil tussen de interne spreidingen van beide reeksen. Daarmee geeft het criterium nog geen informatie over de richting van de trend in beide tijdreeksen. Daarom is een tweede criterium gedefinieerd: de standaardafwijking van de ratio tussen beide tijdreeksen. Allereerst wordt de ratio f_p tussen de tijdreeksen gedefinieerd: het quotiënt van $\log P_{hkv}$ en $\log P_{arc}$. Het tweede criterium is dan gelijk aan de *standaardafwijking* van f_p :

$$\text{criterium 2} = c_2 = \sigma_{f_p} = \text{spreiding van } \frac{\log P_{hkv}}{\log P_{arc}}. \quad (\text{B-2})$$

en representeert dus de spreiding in de ratio tussen beide tijdreeksen. Bij perfect overeenkomende trends, zou criterium 2 gelijk aan nul zijn: $c_2 = 0$.

De twee criteria worden nu gecombineerd in één enkele beoordelingsfactor c , volgens:

$$c = \sqrt{c_1^2 + c_2^2}. \quad (\text{B-3})$$

Criteria c_1 en c_2 bleken in dit onderzoek van vergelijkbare orde te zijn, met (absolute) waarden die grosso modo variëren van 0 tot 1, met incidentele uitschieters met waarden groter dan 1. De kwaliteit van de overeenkomst wordt aan de hand van deze beoordelingsparameter c (die absoluut wordt geïnterpreteerd: altijd groter dan 0) verdeeld in vier klassen:

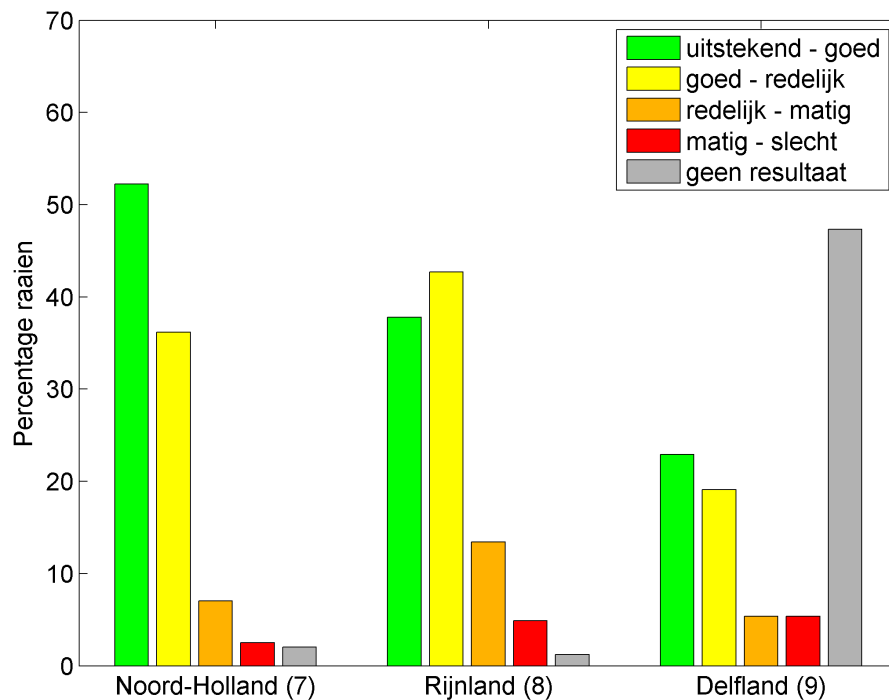
- $0.00 < c \leq 0.25$: de overeenkomst varieert van uitstekend tot goed,
- $0.25 < c \leq 0.50$: de overeenkomst varieert van goed tot redelijk,
- $0.50 < c \leq 0.75$: de overeenkomst varieert van redelijk tot matig,
- $c > 0.75$: de overeenkomst varieert van matig tot slecht.

Volgens deze classificering zou raai 3300 (linkerplaatje in figuur B-1) vallen in de categorie 'redelijk tot goed' met $c = 0.28$. Raai 4300 (rechterplaatje in figuur B-1) zou vallen in de categorie 'uitstekend tot goed' met $c = 0.11$.

Natuurlijk is deze classificering van de kwaliteit aan de hand van de parameter c enigszins arbitrair. Handmatige, steekproefsgewijze controle heeft echter laten zien dat deze classificering een goede afspiegeling biedt van de mate van overeenkomst, maar dat het criterium c als beoordelingsparameter tamelijk streng is.

B.3 Toepassing voor de Hollandse kust

De resultaten voor kustvakken 7, 8 en 9 (ofwel Noord-Holland, Rijnland en Delfland) van zowel HKV LJN IN WATER als Arcadis zijn onderworpen aan de beoordeling van overeenkomst in trend aan de



Figuur B-2 Classificatie van de overeenkomst in trend tussen de door Arcadis berekende overschrijdingskansen en de door HKV LJN IN WATER berekende faalkansen.

hand van de parameter c .

Bij deze vergelijking is gekeken naar de raaien waarbij een resultaat vanuit zowel HKV LJN IN WATER als Arcadis beschikbaar is. Met name voor kustvak Delfland is dat relevant, aangezien Arcadis over een relatief lange strekking om de drie draaien één raai heeft doorgerekend.

Figuur B-2 laat het resultaat zien voor de drie kustvakken afzonderlijk. Hiertoe zijn per kustvak de resultaten voor de overeenkomst tussen de overschrijdingskans (Arcadis) en de faalkans (HKV LJN IN WATER) gegroepeerd naar de classificaties. In deze figuur is te zien dat het aantal raaien waarbij de overeenkomst redelijk tot slecht is (oranje en rood) duidelijk in de minderheid is.

Bij Noord-Holland is het percentage raaien waarbij de overeenkomst redelijk tot uitstekend is (geel en groen) circa 90% procent. Bij Rijnland is dit percentage circa 80%. Bij Delfland is dit circa 40%. Als bij Delfland echter het aantal raaien, waarbij 'geen resultaat' is gegeven, buiten beschouwing wordt gelaten, dan wordt dit percentage circa 80%.

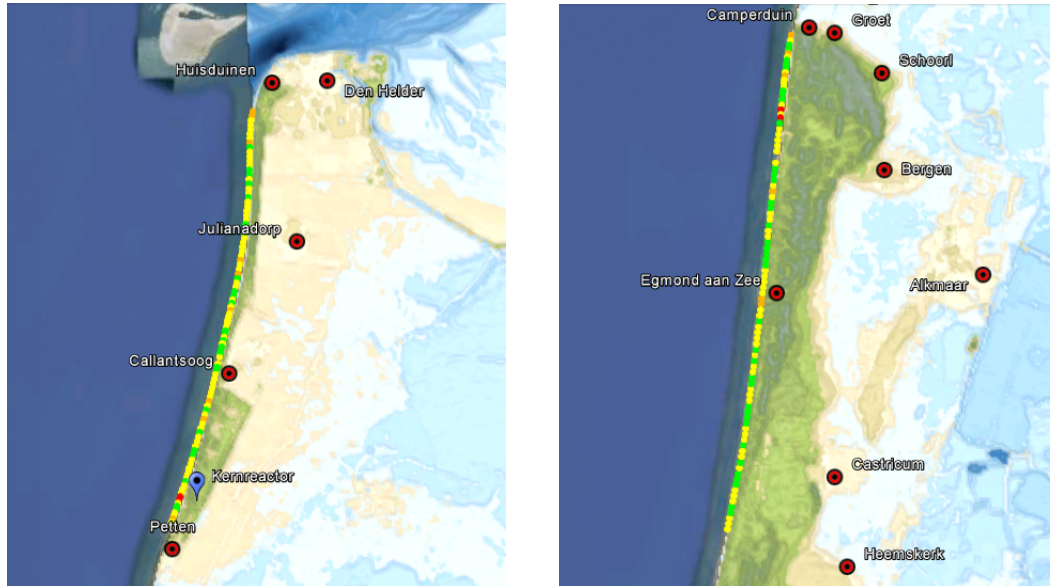
B.4 Uitsplitsing naar kustvak

In de figuren B-3, B-4 en B-5 is de beoordeling van de overeenkomst weergegeven voor elk kustvak, voor elke raai.

B.4.1 Noord-Holland

Het kustvak Noord-Holland is opgesplitst in twee helften: het gedeelte ten noorden van de Hondsbossche Zeewering en het gedeelte ten zuiden van de Hondsbossche Zeewering. Het linkerplaatje van figuur B-3 toont noordelijke helft, het rechterplaatje de zuidelijke helft.

De linkerfiguur laat zien dat met name in de smalle duinenrij nabij Callantsoog, waar intensief gesuppleerd is, een goede overeenkomst in trend is. Omdat situaties, waarbij de overeenkomst 'redelijk tot slecht' is, indicenten lijken, is verder niet gezocht naar een verklaring voor dit optreden.



Figuur B-3 Classificatie van de overeenkomst in trend tussen de door Arcadis berekende overschrijdingskansen en de door HKV LIJN IN WATER berekende faalkansen voor het kustvak Noord-Holland.

B.4.2 Rijnland

Figuur B-4 laat de overeenkomst in trend voor het kustvak Rijnland zien. Zoals getoond in figuur B-2, is over het algemeen de overeenkomst goed te noemen. Figuur B-4 toont dat de raaien waarbij de overeenkomst redelijk tot slecht is, voornamelijk zijn te vinden vlak ten zuiden van de haven van IJmuiden.

In het gebied ten zuiden van de haven van IJmuiden is het patroon wel steeds hetzelfde: zowel Arcadis als HKV LIJN IN WATER berekent een monotoon dalende trend in de kansen. In het jaar 1965 is de verschilfactor echter ca. 10^5 , terwijl in het jaar 2010 dit verschil is gereduceerd tot een factor 10^3 . Dit verschil vertaalt zich in een hoog criterium c_2 , en dus in een hoge c . Dit onderstreept andermaal hoe lastig het is om tot een eenduidig criterium te komen.

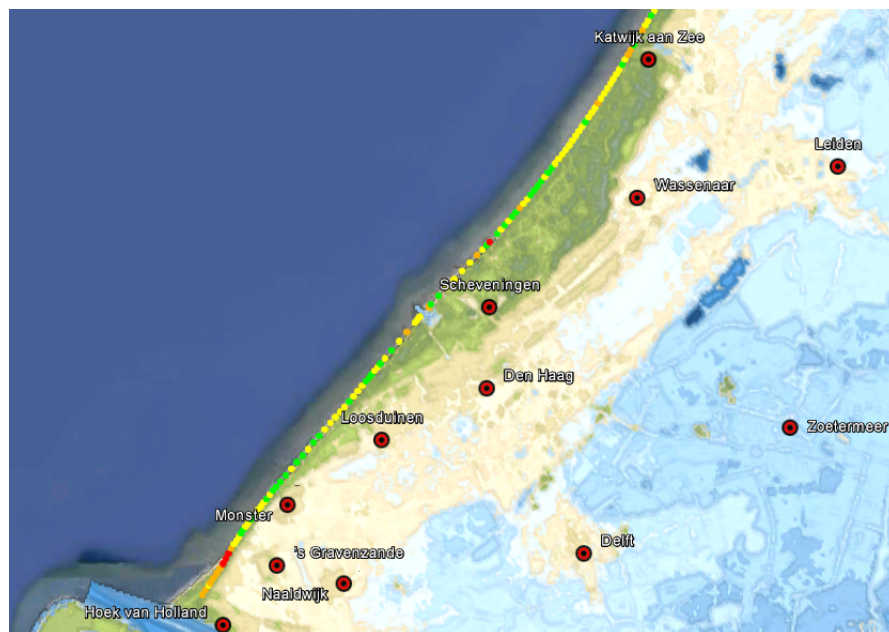
B.4.3 Delfland

Net als kustvak Rijnland, kent kustvak Delfland een duidelijk gebied waar de overeenkomsten relatief matig zijn. Zoals figuur B-5 laat zien, betreft dit het gebied juist ten noorden van Hoek van Holland. De waarneming achter deze raaien is tevens analoog aan die bij de mindere vakken van Rijnland: de trend is duidelijk dalend, over de gehele periode van 1965 tot 2010.

De resultaten van Arcadis dalen van een waarde 10^0 in 1965 tot een waarde van circa 10^{-8} in 2010. De resultaten van HKV LIJN IN WATER dalen van een waarde van 10^{-4} in 1965 tot een waarde van 10^{-8} in 2010. Dit verschil leidt tot een hoge waarde van criterium 2. De faalkansfactor is namelijk 10^4 . Niettemin is in beide gevallen de daling evident.



Figuur B-4 Classificatie van de overeenkomst in trend tussen de door Arcadis berekende overschrijdingskansen en de door HKV LIJN IN WATER berekende faalkansen voor het kustvak Rijnland.



Figuur B-5 Classificatie van de overeenkomst in trend tussen de door Arcadis berekende overschrijdingskansen en de door HKV LIJN IN WATER berekende faalkansen voor het kustvak Delfland.

B.5 Conclusie

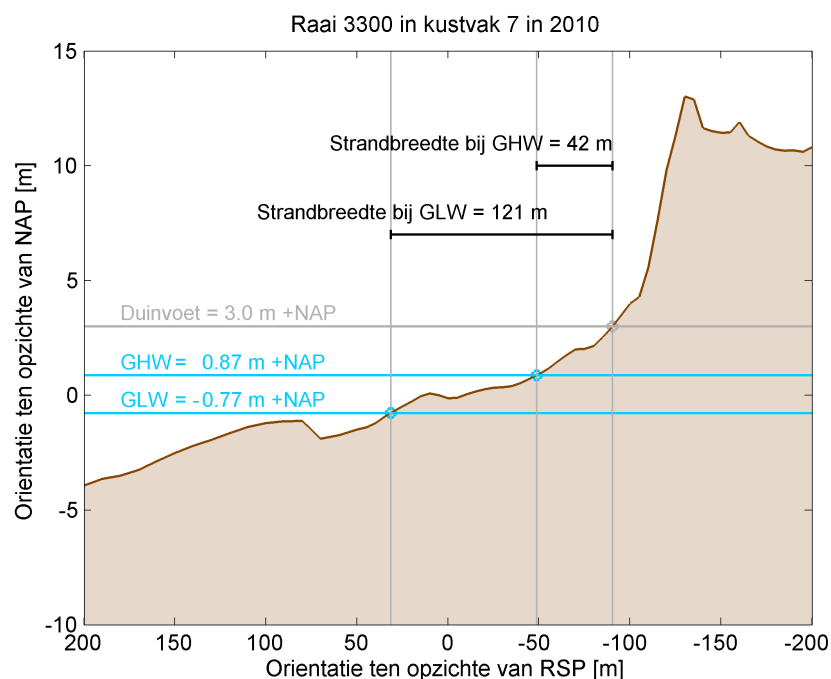
In het bovenstaande is een analyse gerapporteerd van de vergelijking in de trend (van 1965 – 2010) van de resultaten van Arcadis enerzijds en HKV LIJN IN WATER anderzijds. Ter beoordeling van die overeenkomst is een tweetal criteria opgesteld, gebaseerd op de spreiding in beide tijdreeksen. Deze criteria bleken tamelijk streng te zijn geweest.

Op basis van de resultaten kan geconcludeerd worden dat de resultaten van Arcadis en van HKV LIJN IN WATER grosso modo dezelfde trends vertonen. Wat betreft de invloed van suppleties op de veiligheid van het achterland laten de berekeningen van Arcadis en van HKV LIJN IN WATER dus hetzelfde beeld zien.

C Strandbreedtes

In 2011 zijn door HKV [LIJN IN WATER](#) strandbreedtes berekend voor het kustvak Noord-Holland. Binnen dit project zijn nu ook de strandbreedtes berekend voor de overige delen van de Nederlandse kust. De strandbreedtes zijn nu voor elke raai langs de kust berekend. De gehanteerde methodiek waarmee de strandbreedtes zijn bepaald, worden in dit appendix kort gerecapituleerd aan de hand van een voorbeeld. Meer details over de gebruikte methode zijn te vinden in [HKV \[LIJN IN WATER\]\(#\) \(2011a\)](#) en [HKV \[LIJN IN WATER\]\(#\) \(2011b\)](#).

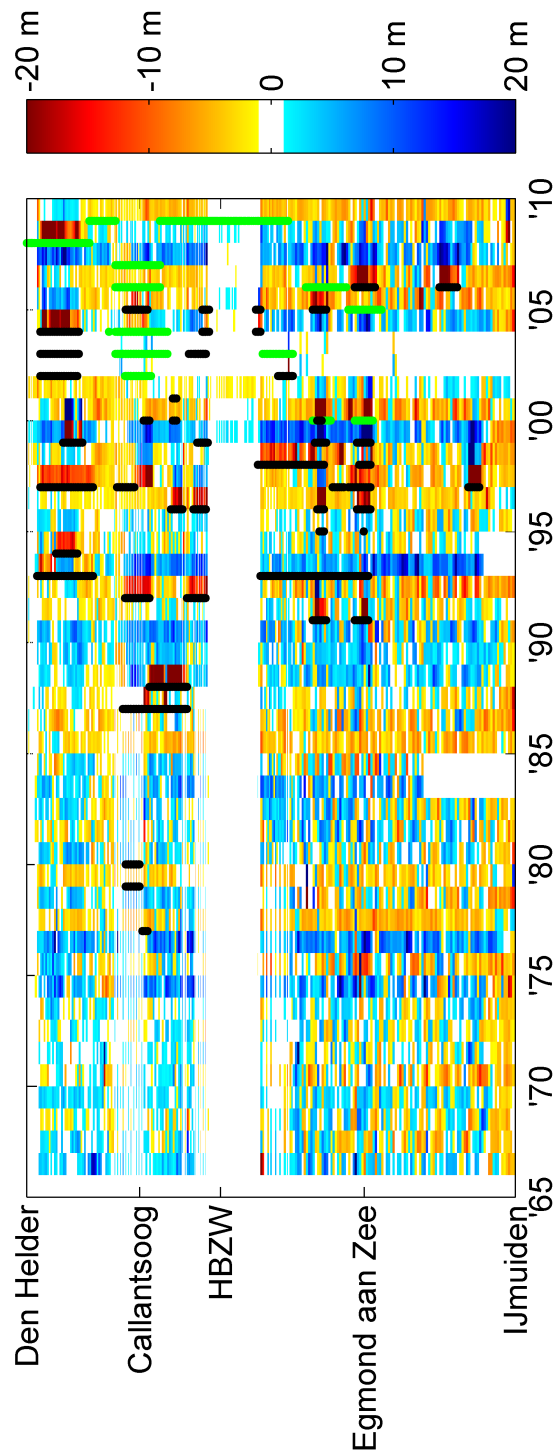
Voor de bepaling van de strandbreedte, zowel bij Gemiddeld HoogWater (GHW) als bij Gemiddeld LaagWater (GLW), zijn in totaal drie punten van het duinprofiel nodig: de duinvoet (het snijpunt van het buitenste duinbeloop met het niveau van 3 m+NAP), het snijpunt van het duinprofiel met de GHW-lijn en het snijpunt van het duinprofiel met de GLW-lijn.



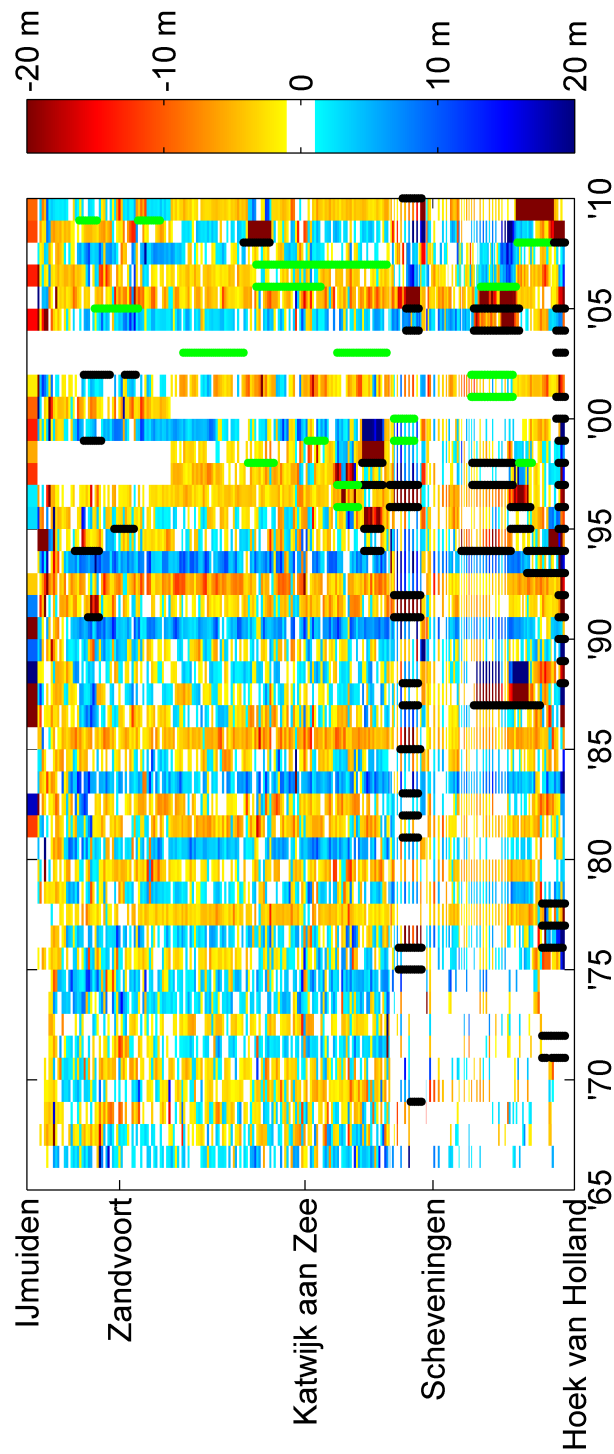
Figuur C-1 De bepaling van de strandbreedte, geïllustreerd aan de hand van het duinprofiel ter plaatse van raai 3300. Het meetjaar is 2010.

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 C-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.

D Veranderingen in ruimte en tijd



Figuur D-1 Veranderingen in duinvoetpositie tussen opeenvolgende jaren, weergegeven in de tijd en langs langs de Noord-Hollandse kust. Positieve veranderingen indiceren zeewaartse verschuivingen. Strandsuppleties zijn aangegeven met zwarte lijnen, vooroeversuppleties met groene lijnen.



Figuur D-2 Veranderingen in duinvoetpositie tussen opeenvolgende jaren, weergegeven in de tijd en langs langs de Zuid-Hollandse kust. Positieve veranderingen indiceren zeewaartse verschuivingen. Strandsuppleties zijn aangegeven met zwarte lijnen, vooroeversuppleties met groene lijnen.

Bibliografie

- Arcadis (2011), *Relatie Kustlijnzorg & Kustveiligheid, Nadere uitwerkingen*, R.B. van Santen en H.J. Steetzel, rapport C03041.002738/A2738.
- Dean, R. (1973), *Heuristic models of sand transport in the surf zone*, Proceedings of engineering dynamics in the surf zone, Institute of Engineers, Australia, p. 208-214.
- Deltares (2010), *Definitie zeespiegelstijging voor bepaling suppletiebehoefte; rekenmodel t.b.v. handhaven kustfundament*, D. Dillingh, F. Baart, J.G. de Ronde, 1201993-002.
- Deltares (2011), *Wave look-up table; Memo on technical background*, A. de Fockert en A. Luijendijk, 1002337-002-ZKS-0001.
- Deltares (2012), *The state of the coast (Toestand van de kust); case study North Holland*, A. Giardino, G. Santinelli en A. Bruens, 1206171-003-ZKS-0001.
- HKV LIJN IN WATER (2011a), *Recreatiebasiskustlijn Noordzeekust, Bepaling strandbreedtes en vertaling naar recreatiebasiskustlijn*, S.J. Ouwerkerk en V. Vuik, PR2078.10.
- HKV LIJN IN WATER (2011b), *Indicatoren voor kustlijnzorg - Analyse van indicatoren voor veiligheid en recreatie*, W. van Balen en V. Vuik, PR2063.20.
- HKV LIJN IN WATER (2012), *Overstromingskansen voor de Nederlandse kust*, V. Vuik en W. van Balen, pr2334.10.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (RIKZ) (2009), *Kustlijnkaarten 2010.*, WD1209ZH014.
- Rijn, L. v. (1993), *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*, Aqua Publications, The Netherlands.
- Ruessink, B. & Jeuken, C. (2002), *Dunefoot dynamics along the Dutch coast*, Journal of Earth Surface Processes and Landforms. Vol. 27, Issue 10, p. 1043-1056.
- TAW (1984), *Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering*, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Den Haag, Nederland.
- TAW (2007), *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.



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