

DUINVEILIGHEID VAN DE KUST VAN NOORD- HOLLAND, NABIJ HET ZEEGAT VAN TEXEL

Een probabilistische uitwerking volgens de methode 'De Haan'.

Afstudeerverslag

A.D. Mus
Juli 2003

Afstudeercommissie

Prof. dr. ir. M.J.F. Stive
Dr. ir. P.H.A.J.M. van Gelder
Dr. J. Cleveringa
Ir. ing. E.P.L. Elias
Ir. P. Huisman

Voorwoord

Nadat ik de studie Civiele Techniek aan de HTS van Alkmaar afgerond had beseft ik dat mijn interesse in dit vakgebied alleen maar groter was geworden. Het besluit lag daar dan ook om de studie Civiele Techniek, afstudeerrichting waterbouwkunde aan de Technische Universiteit Delft te gaan volgen. Dit rapport is het afstudeerverslag van die studie. Het afstuderen heeft plaats gevonden op het Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee in Den Haag.

Het rapport is een case-studie die de veiligheid van de duinwaterkering nabij de buitendelta van het zeegat van Texel berchshouwd. De uitwerking is op de probabilistische methode 'De Haan' gebaseerd. De invloed van de buitendelta op het golfveld en de tijdsafhankelijke processen zijn daarin meegenomen.

Mijn dank gaat uit naar de medewerkers van het RIKZ die hun kennis en kunde met mij gedeeld hebben en mijn afstudeercommissie: prof. dr. ir. M.J.F. Stive, dr. ir. P.H.A.J.M. van Gelder, dr. J. Cleveringa, ir. ing. E.P.L. Elias en ir. P. Huisman voor het leveren van commentaar tijdens mijn afstuderen. Een speciaal woord van dank gaat uit naar mijn direct betrokken begeleiders dr. J. Cleveringa en ir. ing. E.P.L. Elias. Zij hebben mij gedurende het afstuderen wekelijks bijgestaan door het leveren van commentaar en het geven van adviezen. Tot slot een woord van dank aan familie, vriendin en vrienden, een meelevende achterban is een prettige gedachte.

Den Haag
Juli 2003
Danny Mus

Inhoudsopgave

| | |
|--|----|
| Voorwoord | 2 |
| Inhoudsopgave | 3 |
| Samenvatting..... | 5 |
| Lijst van figuren..... | 8 |
| Lijst van tabellen..... | 10 |
| 1. Inleiding | 11 |
| 2. Gebiedsbeschrijving..... | 14 |
| 2.1. Inleiding | 14 |
| 2.2. Beschrijving van het huidige zeegat van Texel. | 15 |
| 2.3. Ontwikkelingen in het verleden | 17 |
| 2.3.1. Periode voor Afsluiting..... | 18 |
| 2.3.2. Periode na Afsluiting | 18 |
| 2.3.3. Effect van de buitendelta op het golfveld | 19 |
| 2.3.4. JARKUS-raaien | 20 |
| 3. Duinbeheer en beleid | 22 |
| 3.1. Inleiding | 22 |
| 3.2. Duin- en kustbeheer | 22 |
| 3.2.1. Duinindeling | 23 |
| 3.2.2. Eisen aan het duin | 24 |
| 3.2.3. Technisch beheer | 24 |
| 3.3. De duinafslagberekening. | 25 |
| 3.3.1. Duinafslag | 25 |
| 3.3.2. Huidige duinafslag rekenmodel | 26 |
| 3.3.3. Invoerspecificatie..... | 28 |
| 3.4. Beperkingen van de huidige leidraad..... | 31 |
| 3.4.1. Conclusie..... | 32 |
| 4. Diep-water randvoorwaarden..... | 33 |
| 4.1. Inleiding | 33 |
| 4.2. Faalkansberekening..... | 33 |
| 4.3. Berekeningsopzet..... | 34 |
| 4.3.1. Methode De Haan | 35 |
| 4.3.2. Simultane stormparameters..... | 35 |
| 4.3.3. Extreme waarden statistiek. | 38 |
| 4.3.4. De extrapolatie van de correlatiestructuur. | 38 |
| 4.3.5. Asymptotische afhankelijkheid..... | 41 |
| 4.4. De Haan en duinafslag | 44 |
| 4.4.1. Stormduur | 44 |
| 4.4.2. Extreme stormduren..... | 46 |
| 4.4.3. ‘De Haan’ voor duinafslag..... | 48 |
| 4.5. Diep water randvoorwaarden | 50 |
| 5. Ondiep-water golfrandvoorwaarden | 52 |
| 5.1. Inleiding | 52 |
| 5.2. SWAN..... | 52 |
| 5.3. Modelschematisatie..... | 53 |
| 5.3.1. Bodemgeometrie en rekengrids | 53 |
| 5.3.2. Randvoorwaarden | 54 |
| 5.3.3. Validatie van het (SWAN)model..... | 56 |

| | | |
|--------|---|----|
| 5.4. | Resultaten..... | 56 |
| 5.4.1. | Golfaanval Nederlandse kust | 57 |
| 5.4.2. | Golfaanval buitendelta..... | 59 |
| 5.4.3. | Golfveld in de JARKUS-raaien | 60 |
| 5.4.4. | Invloed van geometrie op variatie in golfhoogte in een raai. | 64 |
| 5.4.5. | Gevoeligheid golfhoogte..... | 66 |
| 5.5. | Piekperiode | 68 |
| 5.6. | Randvoorwaarden duinafslagberekening..... | 69 |
| 6. | Duinafslag..... | 72 |
| 6.1. | Inleiding | 72 |
| 6.2. | Processen in de brekerzone..... | 72 |
| 6.2.1. | Hydrodynamische processen | 72 |
| 6.2.2. | Morfologische processen | 72 |
| 6.3. | DUROSTA..... | 74 |
| 6.3.1. | Modelopzet | 74 |
| 6.3.2. | Validatie..... | 75 |
| 6.4. | Berekeningsopzet..... | 75 |
| 6.4.1. | Getij nabij Den Helder | 75 |
| 6.4.2. | Stormverloop..... | 76 |
| 6.4.3. | Duinmateriaal..... | 81 |
| 6.4.4. | Rekengrid, tijdstap en bodemgrid | 81 |
| 6.4.5. | Samenvatting invoer duinafslag..... | 82 |
| 6.5. | Resultaten duinafslag | 82 |
| 6.5.1. | Afslagprofielen | 82 |
| 6.5.2. | Kwantificering duinafslag..... | 83 |
| 6.6. | Geulinvloed..... | 86 |
| 7. | Discussie | 88 |
| 8. | Conclusies..... | 93 |
| 8.1. | Duinveiligheid..... | 93 |
| 8.2. | Methode De Haan en invloed van de buitendelta | 93 |
| 8.2.1. | Methode ‘De Haan’ voor duinafslag..... | 93 |
| 8.2.2. | Invloed buitendelta op het golfveld | 93 |
| 8.2.3. | Tijdsafhankelijke duinafslag..... | 94 |
| | Literatuurlijst..... | 95 |
| | Bijlagen..... | 98 |

Samenvatting

In Nederland bestaat 72% van de primaire zeeweringen uit duinen. Deze duinen beschermen het achterland tegen overstromingen vanuit zee. Duinwaterkeringen worden in de huidige praktijk beoordeeld op sterkte aan de hand van de in 1984 opgestelde 'Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering' [TAW, 1984]. Deze leidraad is gebaseerd op een probabilistische uitwerking welke de ontwerp-duinafslag berekend met een overschrijdingsfrequentie van eens per 100.000 jaar. De berekende duinafslag is een functie van waterstanden en golfbrandvoorwaarden in extreme situaties op diep water.

Het gebruik van de huidige leidraad kent zijn beperkingen. In de afgelopen jaren is veel inzicht verkregen in de duinafslagbepalende parameters en is er een tijdsafhankelijk model ontwikkeld voor het berekenen van de duinafslag. Een aantal van deze parameters, waaronder de stormduur, zijn niet opgenomen in de huidige leidraad, zodat daar geen rekening mee gehouden kan worden in de toetsing. Een ander aandachtspunt waar in de praktijk vaak geen rekening mee wordt gehouden is de aanwezigheid van een niet-uniform kustprofiel (zoals een buitendelta), waardoor het maatgevende golfklimaat wezenlijk anders is dan het diep-water golfklimaat dat in de huidige leidraad wordt gebruikt voor de berekeningen. Deze studie is een case-studie waarbij de duinenkust tussen Julianadorp en Huisduinen (Noord-Holland) beschouwd wordt. Door de voorliggende buitendelta van het zeegat van Texel vindt er golftransformatie (breking, refractie en diffractie) plaats op de vooroever. Het optredende golfveld dat tijdens extreme situaties optreedt is berekend met het golfmodel SWAN [Holthuijsen, L.H., e.a., 2000]. De duinafslag is vervolgens berekend met het tijdsafhankelijke duinafslagprogramma DUROSTA [Steetzel, H.J., 1993].

De doelstelling van dit rapport is het berekenen van de veiligheid van de duinen nabij het zeegat van Texel met dit nieuwe model. Er wordt daarbij gebruik gemaakt van de probabilistische methode 'De Haan' [van Marle, J.G.A., 2000, de Valk, C.F., 1997, de Haan, L. en Resnick, S.I., 1977] om de frequentieverdeling van de duinafslag te bepalen. Deze methode wordt thans gebruikt om dijken te ontwerpen. De basis van de methode 'De Haan' is een dataset van stormen met simultaan gemeten stormparameters op diep water, bestaande uit windsnelheid, golfhoogte, waterstand en piekperiode. Deze dataset is opgedeeld in vijf verschillende stormrichtingen zodat per stormrichting een dataset verkregen is van stormparameters. Indien er een storm heerst zorgt een verhoogde windsnelheid voor hogere golven en langere piekperioden. Indien de windrichting landwaarts is gericht, zal de waterstand ook toenemen. Er is dus een mate van afhankelijkheid aanwezig tussen de onderlinge stormparameters. De methode 'De Haan' gaat ervan uit dat, indien er is aangetoond dat de stormparameters asymptotisch afhankelijk zijn, de dataset geëxtrapoleerd mag worden naar een dataset van extreme 'waarnemingen' op diep water. Meer dan bij dijken is daarbij de stormduur van belang bij het bepalen van de veiligheid van de waterkering. Afhangelijkheid tussen stormduur en overige stormparameters is aangetoond zodat ook deze parameter meegenomen is in de uitwerking volgens de methode 'De Haan'.

De extreme waarnemingen op diep-water zijn doorgerekend met behulp van het golfmodel SWAN naar stormparameters op ondiep-water. Er is daarbij een opdeling

gemaakt in het aantal stormen om de rekentijd te beperken. De originele dataset bestaat uit 727 stormen. Per stormrichting is de dataset opgedeeld in een drietal klassen. Elke klasse representeert een aantal stormen met ongeveer dezelfde intensiteit. Zodoende zijn 15 stormen doorerekend (5 stormrichtingen maal 3 klassen) van diep-water naar ondiep-water.

De stormparameters op ondiep-water van de 15 doorerekende stormen dienen als invoer om de duinafslag. Er is daarbij gebruik gemaakt van het tijdsafhankelijke duinafslagmodel DUROSTA. Dit programma maakt het mogelijk om de verlopen van de stormparameters in de tijd alsmede de stormduur mee te nemen in de berekening. Aan de hand van de berekende duinafslagen en de grootte van de extrapolatie zijn vervolgens de frequentieverdelingen opgesteld van de duinafslag.

De volgende conclusies zijn getrokken:

- De veiligheid van de duinen, berekend volgens de methode ‘De Haan’, is groter dan de huidige leidraad vereist. De duinprofielen nabij het zeegat van Texel zijn breed en hoog genoeg om afslagen met een frequentie kleiner dan eens per 100.000 jaar te kunnen weerstaan.
- De methode ‘De Haan’ voor het berekenen van de veiligheid van een duinwaterkering geeft een duidelijk beeld van de overschrijdingsfrequenties van de duinteruggang. Een vereiste is daarbij de aanname van afhankelijkheid. Indien niet aan deze eis wordt voldaan wordt bij het gebruik van de methode een overschatting van de duinafslag gemaakt. Het aantonen van afhankelijkheid werd bemoeilijkt door dat de datasets, als gevolg van de opdeling in stormrichtingen, te klein waren.
- Door de opdeling van de dataset in verschillende stormrichtingen zijn er verbanden aangetoond tussen de stormduur en de overige stormparameters. Hierdoor is het mogelijk om de stormduur mee te nemen in de berekening volgens de methode ‘De Haan’.
- De invloed van de buitendelta op het golfveld is groot. Ten opzichte van diep water is de significante golfhoogte nabij de kust zo’n 50% afgenomen. Ook kan de significante golfhoogte in een enkele storm, langs de kust zo’n halve meter verschillen. Dit is het gevolg van de geometrie van het zeegat van Texel. De geulen in het zeegat hebben een belangrijke rol in het geleiden van de golven: Als gevolg van de grotere diepte in de geulen, breken de golven in de geulen minder snel en kunnen golven met een golfrichting gelijk aan de oriëntatie van de geul, zich voortplanten tot vlakbij de kust. De ontwikkeling van de piekperiode is als gevolg van beperkingen van het model SWAN niet goed te berekenen, wel is duidelijk dat op de buitendelta een dubbeltoppig spectrum ontstaat.
- Door het gebruik van het tijdsafhankelijke duinafslagmodel DUROSTA is het mogelijk om de stormduur in de berekening mee te nemen, welke een belangrijke duinafslagbepalende factor is. Tevens kunnen de overige stormparameters tijdsafhankelijk opgelegd worden. Het is daarbij wel van belang dat de verlopen van deze parameters bekend zijn in de tijd. In deze uitwerking zijn aannames gedaan omtrent deze verlopen.

De uitwerking heeft tot de volgende discussiepunten geleid:

- Als gevolg van de opdeling van de dataset in verschillende stormrichtingen zijn de datasets per stormrichting te klein geworden om nauwkeurige uitspraken te doen over de verbanden tussen de stormparameters.
- Het extrapoleren van de dataset is een volledig statistische benadering voor het bepalen van de extreme waarden. Er wordt niet gecontroleerd of de geëxtrapoleerde stormen fysisch mogelijk zijn.
- In dit rapport is door middel van het opdelen van de stormen in verschillende stormrichtingen aangetoond dat er verbanden bestaan tussen stormduren en de overige stormparameters. Aan de hand van deze verbanden zijn extreme stormduren opgesteld. De basis van deze extreme stormduren is een dataset van 18 jaar stormmetingen. Voor een nauwkeurigere bepaling van de extreme stormduren zijn echter langere meetreeksen benodigd.
- Om de stormen te modelleren is uitgegaan van een standaard verloop van de storm. De waterstand beschrijft een cosinus kwadraat verloop met een enkele piek. Uit de praktijk is bekend dat stormen meerdere pieken kunnen vertonen. Deze stormverlopen hebben een ander effect op de duinafslag.
- In de meest noordelijke duinprofielen is vlak onder de kust een getijdegeul aanwezig. Een mogelijk effect dat deze geul op de duinafslag kan hebben is een toenemende erosie tijdens extreme condities. Dit effect is in deze uitwerking niet meegenomen. De mogelijkheid bestaat dat de berekende duinafslagen onderschat worden.

Lijst van figuren

| | |
|--|----|
| Figuur 1-1; Berekeningsstructuur | 13 |
| Figuur 2-1: Overzicht platen en geulen van het zeegat van Texel (1997) | 15 |
| Figuur 2-2: Overzicht ontwikkeling geometrie van de Buitendelta 1932-2000. | 17 |
| Figuur 2-3: Ligging van de geulas, 1925-2000..... | 19 |
| Figuur 2-4: Overzicht JARKUS-raaien | 20 |
| Figuur 3-1: Dwarsdoorsnede van een kustprofiel en indeling van beheersgebied, (bron: TAW, Basisrapport zandige kust, 1995) | 23 |
| Figuur 3-2: Eisen aan een duinwaterkering, (bron: TAW, Basisrapport zandige kust, 1995) | 24 |
| Figuur 3-3: Principe van duinafslag..... | 26 |
| Figuur 3-4: Principe van het rekenmodel DUROS voor duinafslag, (bron: TAW, Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering, 1984) | 27 |
| Figuur 3-5: Principe van de toetsingsmethode voor de beoordeling van de veiligheid, (bron: TAW, Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering, 1984) | 28 |
| Figuur 3-6: Definitieschets ontwerpafslag, (bron: TAW, Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering, 1984) | 29 |
| Figuur 3-7: Afmetingen van het grensprofiel, (bron: TAW, Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering, 1984) | 31 |
| Figuur 4-1; Meetstations voor wind, waterstand en golf (bron: Roskam, A.P. , e.a., 2000) | 36 |
| Figuur 4-2; Stormrichtingsverdeling alle stormen | 37 |
| Figuur 4-3; Stormrichtingsverdeling opzet genererende stormen | 37 |
| Figuur 4-4; 2D-dataset, richting 270, waterstand vs. golfhoogte | 39 |
| Figuur 4-5; Overschrijdingsfrequenties van de 2D-dataset, richting 270, waterstand vs golfhoogte | 39 |
| Figuur 4-6; Verschuiving in exponentiële ruimte (blauw: originele data, roze: verschoven data) | 40 |
| Figuur 4-7; Verschuiving in de fysische ruimte, 2D dataset, richting 270, h vs H_{m0} .. | 41 |
| Figuur 4-8; Asymptotische afhankelijkheid en asymptotische onafhankelijkheid (bron: Van Marle, J.G.A., 2000)..... | 41 |
| Figuur 4-9; Controle asymptotische afhankelijkheid (bron:De Valk, C.F., 1996) | 42 |
| Figuur 4-10; Asymptotische afhankelijkheid, richting 270 | 43 |
| Figuur 4-11; Windsnelheid vs stormduur, richting 270..... | 44 |
| Figuur 4-12; Waterstand vs stormduur, richting 270 | 45 |
| Figuur 4-13; Sign. golfhoogte vs stormduur, 270..... | 45 |
| Figuur 4-14; Piekperiode vs stormduur, 270 | 45 |
| Figuur 4-15; Overschrijdingsfrequenties stormduur, richting 270 | 46 |
| Figuur 4-16; Weibull-verdeling stormduur, richting 270 | 47 |
| Figuur 4-17; Controle asymptotische afhankelijkheid stormduur, richting 270..... | 48 |
| Figuur 4-18; Extrapolatie in het faalgebied | 49 |
| Figuur 5-1; N2-grid, resolutie 500X500m ² | 54 |
| Figuur 5-2; K2-grid, (links), resolutie 100X100 m ² en N2-grid (rechts), resolutie 25X25 m ² | 54 |
| Figuur 5-3; JONSWAP-spectrum, opgegeven op de rekenrand | 55 |
| Figuur 5-4; Significante golfhoogte, richting 270, grove grid..... | 57 |

| | |
|---|----|
| Figuur 5-5; Variantiedissipatie, richting 270, grove grid | 58 |
| Figuur 5-6; Significante golfhoogteontwikkeling langs de Hollandse kust..... | 59 |
| Figuur 5-7; Significante golfhoogte (links) en Variantiedissipatie (rechts), richting 270..... | 60 |
| Figuur 5-8; Significante golfhoogte(rood) raai 409, richting 270, uitgezet tegen bodem (zwart, links) en golfrichting (zwart, rechts) | 61 |
| Figuur 5-9; Oriëntatie JARKUS-raaien | 62 |
| Figuur 5-10; Ontwikkeling significante golfhoogte in verschillende raaien bij verschillende stormen | 64 |
| Figuur 5-11; Invloed stormrichting op significante golfhoogte in een raai | 65 |
| Figuur 5-12; Invloed stormparameters op ondiep-water golfhoogte | 67 |
| Figuur 5-13; Invloed diep-water golfhoogte op ondiep-water golfhoogte | 67 |
| Figuur 5-14; Piekperiode, richting 270 | 68 |
| Figuur 5-15; Spectrumontwikkeling richting de kust, richting 270, raai 409..... | 69 |
| Figuur 6-1; Programma opzet DUROSTA (bron: Dijk, M., 2002) | 74 |
| Figuur 6-2; Getij Den Helder gedurende 1 maand (bron: internetsite Rijkswaterstaat: www.getij.nl) | 75 |
| Figuur 6-3; Stormvorm voor een storm van 50 uur | 76 |
| Figuur 6-4; Verloop van de waterstand, stormduur 150 uur, maximale waterstand 3,50 m. | 77 |
| Figuur 6-5; Quotiënt golfhoogte en waterdiepte..... | 78 |
| Figuur 6-6; Faseverschillen stormparameters (bron: Van Marle, J.G.A., 2000) | 80 |
| Figuur 6-7; Duinafslagprofielen klasse M stormen uit de richting 210, 240, 270, 300, 330..... | 83 |
| Figuur 6-8; Uitdrukking duinafslagkwantificering..... | 84 |
| Figuur 6-9; Frequentieverdeling duinteruggang JARKUS-raai 409..... | 85 |
| Figuur 6-10; Afslagfrequentie hoeveelheid duinmateriaal, JARKUS-raai 409..... | 86 |

Lijst van tabellen

| | |
|--|----|
| Tabel 3-1: Korreldiameters duinmateriaal, (bron: TAW, Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering, 1984) | 29 |
| Tabel 4-1; Weibull parameters stormduren, alle richtingen | 48 |
| Tabel 4-2; Diep water randvoorwaarden | 50 |
| Tabel 5-1; Stormen ter vergelijking van de invloed van de waterstand | 66 |
| Tabel 5-2; Stormen ter vergelijking van de invloed van de diep water golfhoogte..... | 68 |
| Tabel 5-3; Ondiep water randvoorwaarden | 70 |
| Tabel 5-4; Golfrichting per stormrichting en raai..... | 71 |
| Tabel 6-1; Quotiënt golfhoogte en waterdiepte | 78 |
| Tabel 6-2; Golfsteilheid per stormklasse en richting | 79 |
| Tabel 6-3; Locatieafhankelijke parameter 'B' per storm..... | 80 |
| Tabel 6-4; Diameter korrelmateriaal duin..... | 81 |
| Tabel 6-5: Overzicht invoer duinafslagberekeningen, 1. Marinevliegbasis De Kooy, 2. Den Helder, 3. t.p.v. duinprofiel, 4. JARKUS-meting..... | 82 |
| Tabel 6-6; Kwantificering van de duinafslag..... | 84 |

1. Inleiding

Achtergrondinformatie en probleemstelling

Duinveiligheid

Nederland ligt voor een groot deel onder de zeespiegel en dient derhalve tegen de zee beschermd te worden. De primaire zeeweringen zorgen ervoor dat schade als gevolg van overstromingen voorkomen wordt. In Nederland bestaat 72 % van de primaire zeeweringen uit duinen. Om de duinveiligheid te beoordelen is sinds 1984 de 'Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering' [TAW, 1984], in het vervolg aangeduid met 'leidraad', van toepassing. Deze leidraad bestaat uit een toetsmethode voor de duinbeheerder om het veiligheidsniveau van de duinwaterkering te bepalen, zodat vastgesteld kan worden of ingrijpen noodzakelijk is. Het gebruik van de leidraad kent zijn beperkingen. Onderzoek naar de hydraulische randvoorwaarden op de Noordzee in de afgelopen jaren heeft vergroot inzicht opgeleverd in het verloop van stormrandvoorwaarden in de tijd en de grootte in extreme situaties. Tevens heeft onderzoek naar de gevoeligheid van duinafslag voor verschillende stormparameters aan het licht gebracht dat piekperiode en stormduur van aanmerkelijke invloed zijn op de duinafslag. Deze parameters worden in de leidraadtoets maar heel summier meegenomen. Ook tijdsafhankelijke processen die van belang zijn voor de duinafslag, worden bij de leidraad niet als zodanig meegenomen. De resultaten van de toets uit de leidraad zijn daarom mogelijk niet representatief voor de duinafslag die onder extreme, maatgevende, condities optreedt.

Zeegat van Texel

In de kop van Noord-Holland (van Julianadorp tot Huisduinen, zie figuur 2-1) bestaat de primaire waterkering ook uit een duinenkust. Deze duinen worden, gelijk aan de rest van Nederland, volgens de vigerende leidraad getoetst. Het kustgebied ter plaatse wijkt echter af van de "standaard" kustvorm, zoals aangetroffen langs de rest van Noord-, en Zuid-Holland. Zeewaarts van de duinen in de kop van Noord-Holland is een uitgebreid platen en geulen gebied te onderscheiden, onderdeel van de buitendelta van het zeegat van Texel. Het zeegat van Texel is het grootste zeegat van de Nederlandse Waddenkust en de buitendelta van dit zeegat strekt zich zo'n 25 km langs de kust uit en zo'n 10 km zeewaarts. Golven die zich van diep water richting de kust voortplanten worden beïnvloed door de ligging van deze buitendelta door breking, refractie en diffractie. Stormen uit verschillende richtingen genereren verschillende randvoorwaarden op ondiep-water waardoor het mogelijk is dat stormen uit het noordwesten niet de maatgevende randvoorwaarden zullen genereren. Bij de toets volgens de leidraad wordt een diep water (NAP -20 m.) randvoorwaarde gebruikt om de duinafslag te berekenen. Deze berekening geschiedt langs een raai (1-dimensionaal) die tot ongeveer 800 m zeewaarts van de duinvoet loopt. De diep water randvoorwaarde wordt vervolgens aan de rand van de raai opgelegd. Deze benadering doet geen recht aan de complexe golfvoortplanting en golfontwikkeling op de buitendelta. In deze studie wordt een 2-dimensionaal golfmodel ingezet om de randvoorwaarden op de buitendelta te benaderen.

Falen door storm

Stormen treden een aantal malen per jaar op. Zware stormen treden enkele malen op per decennium. Extreme stormen waarop waterkeringen gedimensioneerd worden,

treten zelden op en zijn nooit gemeten. Om te kunnen dimensioneren op het voorkomen van een dergelijke storm moeten de extreme stormcondities benaderd worden.

Tijdens een storm neemt de windsnelheid toe en daarbij zal ook de waterstand toenemen indien er een aanlandige wind staat als gevolg van de windopzet. Een harde wind veroorzaakt ook hogere golven met grotere piekperioden. Van deze afhankelijkheid is in de methode 'De Haan' [Van Marle, J.G.A., 2000] gebruik gemaakt om een nieuwe toetsmethode voor dijken op te stellen. De basis voor deze methode is een dataset met simultaan gemeten stormparameters. Uitgaande van de bovenstaande afhankelijkheid tussen de parameters, gaat de methode ervan uit dat de stormdata geëxtrapoleerd mogen worden tot in het faalgebied van de constructie, zodat een dataset verkregen wordt met extreme stormen. Met de extreme stormen wordt de dijk getoetst en de faalkans wordt berekend. De methode 'De Haan' lijkt ook geschikt te zijn voor het berekenen van de faalkans van een duin. Om deze methode te gebruiken voor het toetsen van de duinen dient deze aangepast te worden voor het faalmechanisme van een duinwaterkering. Zo is bij voorbeeld voor het falen van een duin de stormduur van belang, die bij een berekening van een dijkbekleding niet aan de orde komt.

Doelstelling en werkwijze

Het doel van dit verslag is het uitwerken van de veiligheid van de duinen met behulp van de methode 'de Haan'. Daarnaast wordt het effect van de buitendelta op het golfveld berekend.

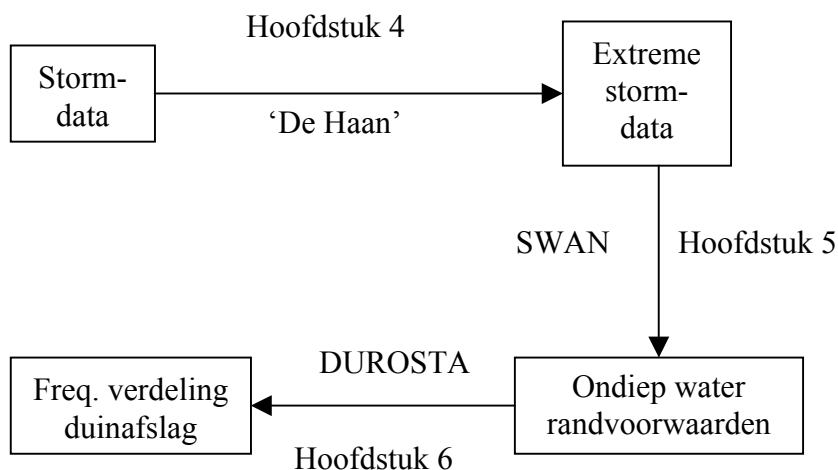
De uitwerking vindt plaats middels een case-studie waarbij het duinengebied bij de kop van Noord Holland, ter plaatse van het Zeegat van Texel uitgewerkt wordt. De invloed van de buitendelta van dit zeegat op het golfveld wordt meegenomen in de uitwerking alsmede de tijdsafhankelijkheid van de stormparameters, inclusief stormduur.

Structuurbeschrijving

In deze inleiding is de aanleiding en de doelstelling van het onderzoek beschreven. In hoofdstuk 2 wordt de gebiedsbeschrijving gegeven van de case-studie. De belangrijkste gebiedsgegevens komen aan de orde alsmede de morfodynamische ontwikkelingen van het gebied in het verleden. De gebiedsbeschrijving dient ter illustratie van de invloed van de bodem op golfvelden uit verschillende richtingen.

In hoofdstuk 3 wordt het huidige beleid met betrekking tot de duinveiligheid toegelicht. De duinen in het interessegebied worden onderworpen aan de huidige duintoets. Hieraan worden conclusies verbonden over de beperkingen van deze toets voor dit gebied.

In hoofdstuk 4,5 en 6 wordt vervolgens de uitwerking volgens de methode 'De Haan' beschreven. In onderstaande figuur is een stroomschema van deze uitwerking gegeven:



Figuur 1-1; Berekeningsstructuur

In hoofdstuk 4 wordt aan de hand van 18 jaar stormdata een dataset verkregen van extreme stormen. De extreme stormen worden in hoofdstuk 5 vanaf diep water met het golfmodel 'SWAN' (versie 40.11), [Holthuijsen, L.H., e.a., 2000] doorgerekend richting de kust. Hierdoor wordt de invloed van de buitendelta op het golfveld voor de kust duidelijk. De resultaten van de berekeningen met SWAN dienen als randvoorwaarden voor de duinafslagberekeningen met het tijdsafhankelijke duinafslagprogramma DUROSTA (versie 1.20), [Steetzel, H.J., 1993]. De duinafslagberekeningen worden in hoofdstuk 6 gepresenteerd. De uitkomsten van deze duinafslagberekeningen worden gebruikt voor het maken van een frequentieverdeling van de duinafslag.

Het rapport wordt afgesloten met conclusies, opmerkingen en aanbevelingen in hoofdstuk 7 en 8. In deze hoofdstukken wordt geconcludeerd of de duinen nabij het zeegat van Texel veilig zijn en worden aanbevelingen gegeven voor nader onderzoek.

In het rapport wordt regelmatig verwezen naar bijlagen. De bijlagen zijn achterin het rapport per hoofdstuk te vinden. Literatuurverwijzingen in het rapport worden als volgt weergegeven: [Auteur, jaartal]. De volledige literatuurlijst is achterin het rapport te vinden.

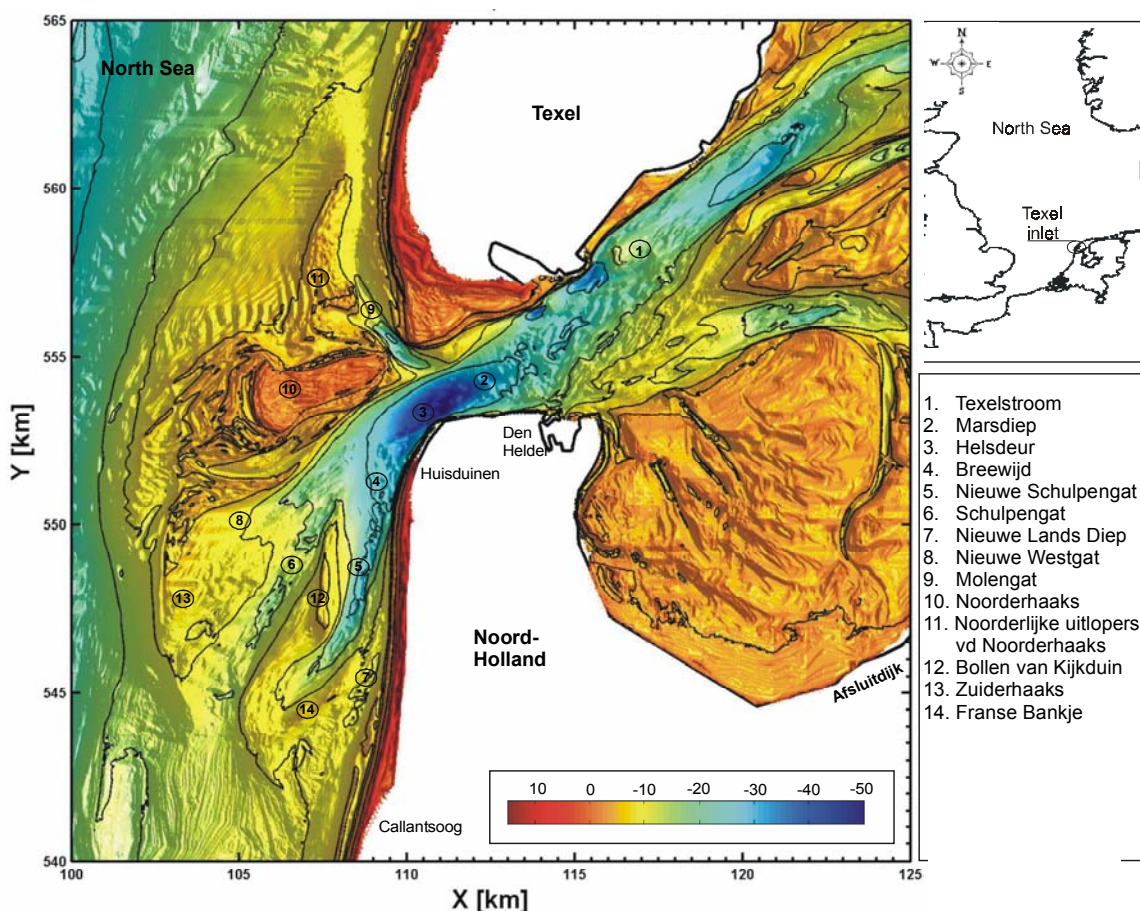
2. Gebiedsbeschrijving

2.1. *Inleiding*

De geometrie ter plaatse van het zeegat van Texel wijkt in vele opzichten af van de ‘standaard’ kustvorm van de Nederlandse kust. Daar waar de Hollandse kust geleidelijk overgaat van duinprofiel naar diep water is ter plaatse van het Zeegat van Texel een uitgebreid platen en geulenstelsel waar te nemen. Dit heeft grote gevolgen voor het golfveld in dit gebied. Door diffractie, refractie en golfbreking op de platen en in de geulen zijn de golven in ondiep water, ter plaatse van de kust, anders dan langs de uniforme Hollandse kust. Het complexe golfveld is niet te beschrijven aan de hand van de enkele diep water golfrandvoorwaarde, die gebruikt wordt in de huidige leidraad voor de berekening van duinafslag.

In dit hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van het interessegebied, de buitendelta van het Zeegat van Texel. In paragraaf 2.2 wordt de huidige geometrie besproken. Paragraaf 2.3 beschrijft de ontwikkeling vanaf 1900 tot op heden, waarbij facetten als initiatie van de veranderingen en de ontwikkelingen die de platen en geulen hebben ondergaan besproken worden. Tevens wordt de mogelijke interactie tussen de huidige buitendelta geometrie en de effecten op storm geïnduceerde golfvelden beschreven. Ten behoeve van de duinafslagberekeningen wordt een afbakening van het interessegebied gepresenteerd, met een beschrijving van een aantal representatieve JARKUS-raaien.

2.2. Beschrijving van het huidige zeegat van Texel.



Figuur 2-1: Overzicht platen en geulen van het zeegat van Texel (1997)

In figuur 2-1 is de bathymetrie van het studiegebied, het zeegat van Texel, afgebeeld. De figuur geeft een duidelijk beeld van de aanwezige platen en geulen op de buitendelta, in de keel en een deel van het achterliggende getijdebekken van het zeegat van Texel.

De keel van het zeegat wordt gevormd door het Marsdiep en is ongeveer 2,5 km breed met een maximale diepte van 53 m. Het Marsdiep verbindt de hoofdgeul (de Texelstroom) van het getijdebekken met de hoofdgeulen (Schulpengat en Nieuwe Schulpengat) op de buitendelta.

Het getij is dubbeldaags met een gemiddelde getijslag van 1,38 m in Den Helder en een gemiddeld getijprisma door het zeegat van $1 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ [Blok, M., Mol, J.W., 2001]. Zowel eb- als vloedstroomsnelheden bedragen ongeveer 1 m/s.

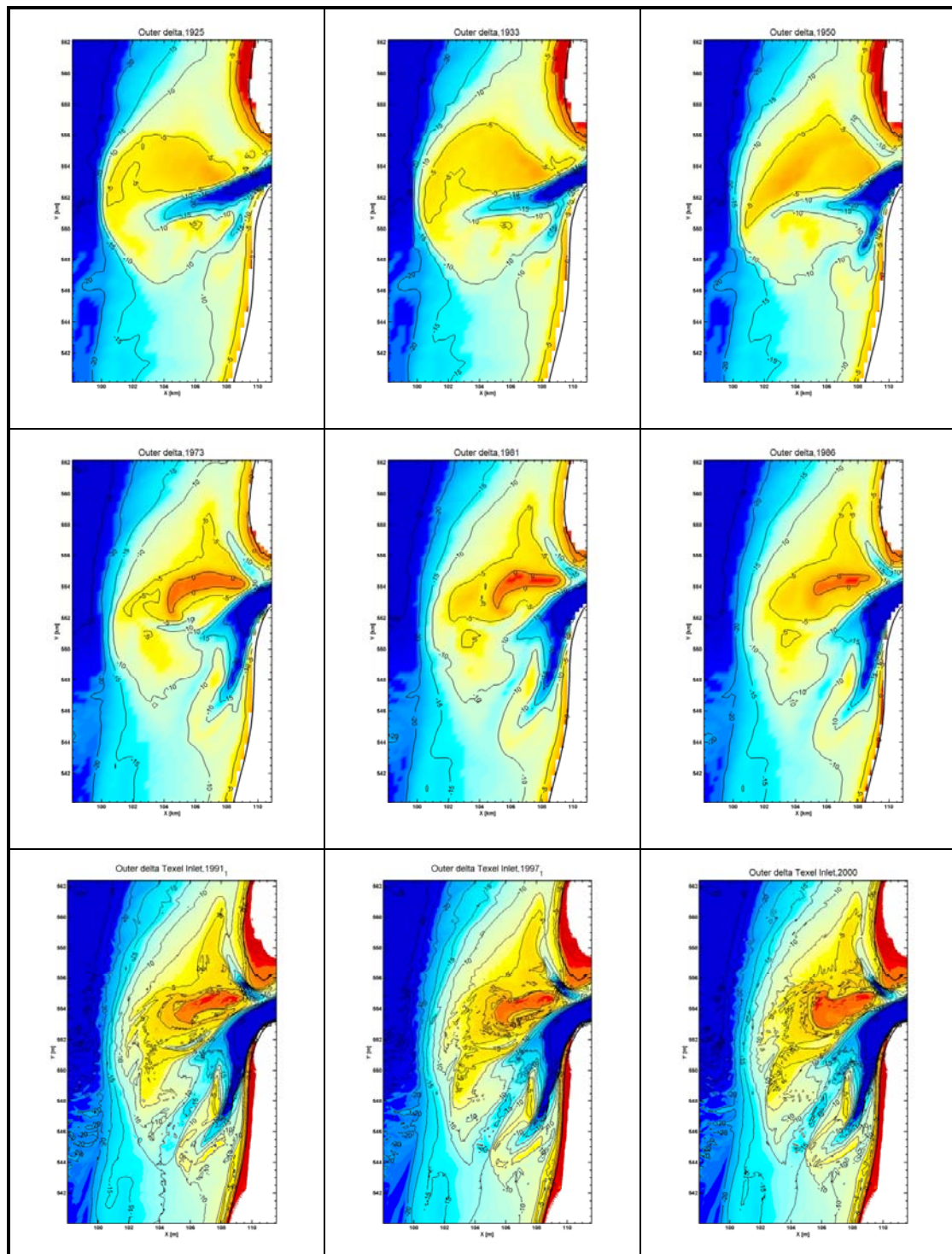
Voor de afsluiting van de Zuiderzee door de afsluitdijk in 1932 werd het getijdebekken gevormd door het westelijke gedeelte van de Waddenzee en de voormalige Zuiderzee. Het bekken strekte zich ongeveer 130 km landinwaarts uit en had een oppervlak van 4000 km^2 . Na afsluiting van de Zuiderzee werd het getijdebekken oppervlak sterk gereduceerd tot ongeveer 712 km^2 [Louters, T.,

Gerritsen, F., 1994]. De hoofdgeul in het bekken is de Texelstroom die zich uitstrekt langs Texel en ten oosten daarvan uitbuigt naar de Afsluitdijk.

De buitendelta strekt zich zo'n 10 km zeewaarts uit en 25 km in langsrichting langs de aanliggende kusten van Noord-Holland en Texel. De hoofdgeulen en platen op de buitendelta zijn:

- Het Marsdiep, dit vormt de keel van het zeegat.
- De Helsdeur, dit vormt het diepste meest zeewaarts gelegen gedeelte van het Marsdiep en is de uitstroomopening van de buitendelta.
- Het Breewijd verbindt de Helsdeur met het Schulpengat en het Nieuwe Schulpengat. Het Breewijd is een diepe, brede geul met een zeer diep landwaarts gedeelte en een ondiep zeewaarts gedeelte.
- Het Schulpengat en het Nieuwe Schulpengat zijn de twee grote getijgeulen in het zuidelijke gedeelte van de buitendelta. Het Nieuwe Schulpengat ligt direct langs de Noord-Hollandse kust. Zeewaarts en evenwijdig hieraan ligt het Schulpengat.
- De zandbank Bollen van Kijkduin scheidt de geulen Schulpengat en Nieuwe Schulpengat.
- De zandbank het Franse Bankje ligt ten zuiden van het Nieuwe Schulpengat.
- Tussen het Franse Bankje en de Noord-Hollandse kust bevindt zich een kleine ondiepe geul, het Nieuwe Lands Diep.
- De grootste zandbank is de Noorderhaaks, direct zeewaarts van het Marsdiep. De Noorderhaaks heeft een oppervlakte van ongeveer 4 km² boven GHW.
- De Zuiderhaaks wordt gevormd door het grote platengebied ten zuidwesten van de Noorderhaaks.
- De Noorder,- en Zuiderhaaks worden gescheiden door een kleine (zich ontwikkelende) geul, het Nieuwe Westgat.
- Aan de Noordkant van de Noorderhaaks ligt een zandbank in de vorm van een spit, de Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks.
- Het Molengat scheidt de Noordelijke uitlopers van de Noorderhaaks en de kust van Texel.

2.3. Ontwikkelingen in het verleden



Figuur 2-2: Overzicht ontwikkeling geometrie van de Buitendelta 1932-2000.

De geometrie van het zeegat van Texel is in de laatste eeuw sterk beïnvloed door menselijk ingrijpen, waarbij de meest ingrijpende de afsluiting van de Zuiderzee geweest is. Met de afsluiting van de Zuiderzee door aanleg van de Afsluitdijk (voltooid in 1932) zijn er grote veranderingen opgetreden in het zeegat [Elias, E.P.L., 2003a]. Niet alleen vond er een aanzanding plaats in het bassin, maar ook op de

buitendelta deden zich grote veranderingen voor. In figuur 2-2 is een overzicht gegeven van de grootschalige buitendelta-ontwikkeling, in de periode 1932-2000.

2.3.1. Periode voor Afsluiting

Voor afsluiting van de Zuiderzee waren de posities van de hoofdgeulen en platen relatief stabiel. Het zeegat verkeerde in een (dynamisch) evenwicht. Een typische dieptegeometrie voor die tijd is gegeven in figuur 2.2 (1925, 1933). De hoofd-ebgeul (het Westgat) is westwaarts gericht. Naast het Westgat bevinden zich nog twee kleine geulen langs de aanliggende kust: het Molengat langs de Texelse kust en het Schulpengat langs de Noord-Hollandse kust. De belangrijkste plaat is de Noorderhaaks, die zich vooral ten noorden van het Westgat heeft gevormd.

2.3.2. Periode na Afsluiting

In 1932 is de Afsluitdijk gereedgekomen en werd het dynamisch evenwicht waarin het systeem verkeerde abrupt verstoord. Ondanks de verkleining van het kombergingsgebied, nam het getijprisma door het zeegat en de getijamplitude toe [Thijssse, J.T, 1972]. Was er vòòr de afsluitdijk, ter plaatse van Den Helder, een getijamplitude van 1,20m, na de afsluiting nam dit toe tot gemiddeld 1,38 m.

Een tweede grote verandering trad op in de voortplantingsrichting van het getij in het getijdebekken. De stroming door de Texelstroom nam toe en dit resulteerde in een meer noordelijke (eb) aanstroming door de keel van het Zeegat. Hierdoor trad er een draaiing van de Helsdeur op die leidde tot een meer zuidwaarts gerichte ebstroming over de buitendelta.

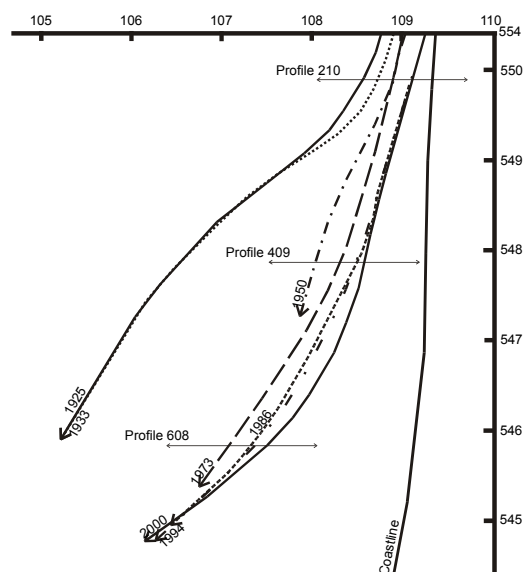
De toename van het getijprisma en de draaiing van de Helsdeur hebben grote veranderingen op de buitendelta geïnitieerd. De westwaarts gerichte hoofdgeul het Westgat is verdwenen, terwijl een nieuwe zuidelijk georiënteerde hoofd-ebgeul ontwikkelde: het Schulpengat. Initieel ontwikkelt het Schulpengat zich als een enkele geul, maar vanaf 1956 ontstaat er een twee geulensysteem: het Schulpengat en het Nieuwe Schulpengat.

Ook de Noorderhaaks was aan grote veranderingen onderhevig. De zeewaartse flank vertoonde een sterke landwaartse migratie met een toename van de plaathoogte en plaatoppervlakte boven de hoogwaterlijn. Hierdoor vindt er meer golfafscherming plaats en ontstaat er aan de landwaartse zijde van de plaat een luwte gebied waar sedimentatie kan plaatsvinden. Als gevolg van sedimentatieprocessen vindt er vervolgens een sterke plaatgroei plaats, direct voor de uitstroomopening van het zeegat. Het is mogelijk dat hierdoor de ebtransporten geblokkeerd en afgebogen zijn in een meer zuidelijk richting.

In de periode na 1975 lijkt er zich een nieuw dynamisch evenwicht te hebben ingesteld [Elias, E.P.L., e.a., 2003a]. De ligging van de geulen en platen is dan weer relatief stabiel.

Op het zuidelijke gedeelte van de buitendelta ontwikkelen de geulen zich tot ongeveer 1990. Na 1975 is de dominante geulontwikkeling een landwaartse verplaatsing van het Nieuwe Schulpengat, geïllustreerd in Figuur 2.3. Vooral het zuidelijke gedeelte van het Nieuwe Schulpengat (Y-RD< 548) laat een sterke kustwaartse verplaatsing zien ter plaatse van Jarkus-profiel 409. Het noordelijke gedeelte is stabiel door de aanwezigheid van kustbescherming (de Helderse zeewering en een teenconstructie in de vorm van steenbestortingen op het binnen geultalud). Een gedetailleerde analyse

van de ontwikkeling van het zuidelijk gedeelte van de buitendelta wordt gegeven in [Elias, E.P.L., Cleveringa, J., 2003b].



Figuur 2-3: Ligging van de geulas, 1925-2000

2.3.3. Effect van de buitendelta op het golfveld

De ondieptes van de buitendelta fungeren in principe als een grote golfbreker. Hierdoor zullen hoge golven op diep-water van de Noordzee nooit de achterliggende kustlijn bereiken. De maatgevende golfhoogte ter plaatse van de kust is daardoor lager dan langs de “ongestoorde” uniforme kust van Noord en Zuid-Holland en er zal dan ook minder duinafslag optreden.

Ter plaatse van de ongestoorde kust propageren de golven relatief uniform van diep naar ondiep water. Er is dus een relatief eenvoudig golfveld aanwezig van diep water tot aan de kust. Door diffractie, refractie en golfbreking op de platen en geulen van de buitendelta ontstaat er hier echter een gecompliceerd en variabel golfveld, waarbij de mate van dissipatie sterk afhankelijk is van de golfrichting.

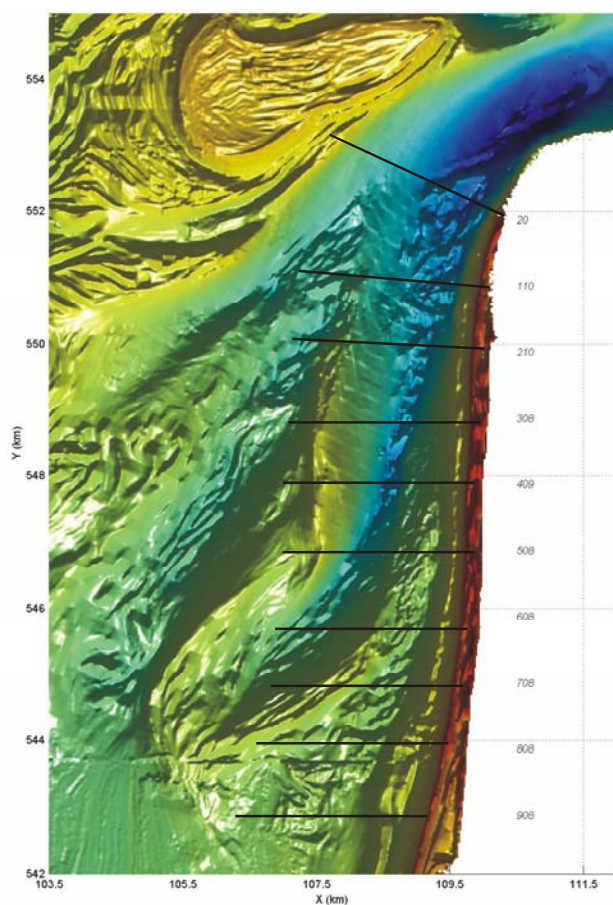
Ter illustratie; de Noorderhaaks vormt een grote zandbank die zich grotendeels boven water bevindt. Bij een noordwester storm ligt het zuidelijke gedeelte van de buitendelta in de luwte van de Noorderhaaks, daardoor is er een geringe golfhoogte bij de aanliggende kust aanwezig.

Bij zuidwester stormen vindt er dissipatie plaats op de Zuiderhaaks, het Franse Bankje en de Bollen van Kijkduin, maar er kan ook golfgeleiding optreden door de geulen. Door refractie kunnen golven het diepere gedeelte van de geul blijven volgen, waardoor minder diepte geïnduceerd breken optreedt zodat lokaal hogere golven de kust bereiken.

Samenvattend: De buitendelta zorgt voor een reductie van de golfhoogte. Toetsing van de duinveiligheid met de diepwater golfhoogte is niet realistisch. De geometrie van de buitendelta leidt tot een golfveld dat zeer gecompliceerd is

2.3.4. JARKUS-raaien

Voor de duinafslagberekeningen zijn een aantal representatieve dwarsprofielen geselecteerd. Hiervoor is gebruik gemaakt van de JARKUS-metingen. Dit zijn metingen van dwarsprofielen van de kust, waarin het duinprofiel opgenomen is. De JARKUS-metingen zijn beschikbaar voor de periode van 1965 tot op heden en worden elk jaar opgemeten. Deze metingen strekken zich zo'n 800 m. kustwaarts uit. Doorlodingen worden om de 5 jaar gemeten en zijn beschikbaar voor de periode van 1965 tot 1990. Doorlodingen worden tot op ongeveer drie km uit de kustlijn gemeten. Om de periode na 1990 aan te vullen is er gewerkt met vaklodingen die tot 2000 beschikbaar zijn. In de onderstaande figuur zijn de profielen weergegeven die in de studie gebruikt zijn.



Figuur 2-4: Overzicht JARKUS-raaien

Voor de duinafslagsommen zijn de Jarkus raaien 210, 308, 409, 508, 608 en 708 gebruikt. De oorspronkelijke metingen zijn met behulp van “Vaklodingen” verlengd tot ongeveer 6 km uit de kust, zodat een representatief gedeelte van de buitendelta wordt meegenomen. In bijlage 2.1 zijn de gebruikte dwarsprofielen weergegeven

Voor elke raai wordt in het kort een beschrijving gegeven:

- Profiel 210, gelegen in de overgang van het Breewijd naar het Nieuwe Schulpengat en het Schulpengat.
- Profiel 308, 409 en 508 doorsnijden het Nieuwe Schulpengat, de Bollen van Kijkduin en eindigen in het Schulpengat.
- Profiel 608 is ten zuiden van de Bollen van Kijkduin gelegen en doorsnijdt alleen het Nieuwe Schulpengat.

- Profiel 708 doorsnijdt het Nieuwe Westgat, het Franse Bankje en een klein gedeelte van het Nieuwe Schulpengat.

3. Duinbeheer en beleid

3.1. *Inleiding*

Een groot deel van de Nederlandse kust en het achterland wordt door duinen beschermd tegen de aanvallen vanuit zee. Deze duinen fungeren ter plaatse als primaire waterkering. De kustbeheerder onderhoudt de duinen met het doel om de functie als waterkering te waarborgen. De beheerder heeft een aantal instrumenten tot zijn beschikking om de waterkering te toetsen en maatregelen om de waterkering weer op het gewenste veiligheidsniveau te brengen, waar en wanneer dat nodig is.

Het doel van dit hoofdstuk is om inzicht te verschaffen in het beheer ter bescherming van de duinenkust. Daarbij wordt gekeken naar het onderhoud aan de basiskustlijn en de methode om te toetsen of de duinen aan de eisen, die gesteld zijn aan een duinenkust als waterkering, voldoen. Ook de beperkingen van de huidige duintoetsmethode worden beschreven. Naar aanleiding hiervan worden conclusies getrokken over deze methode.

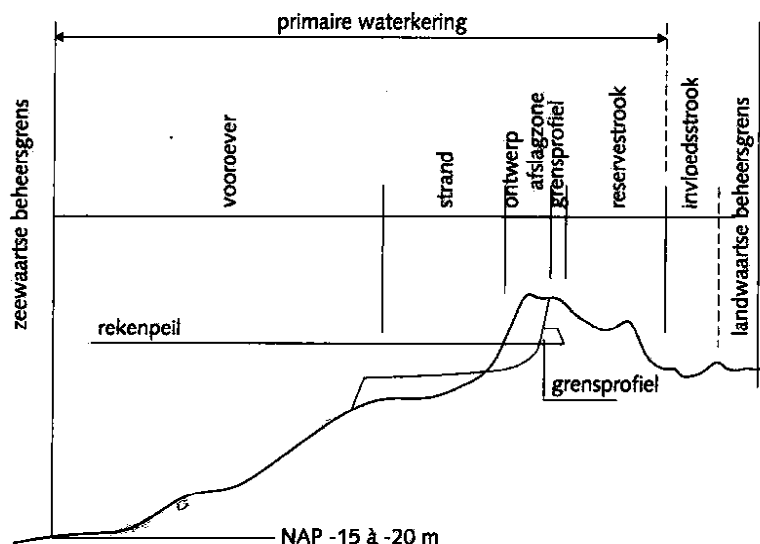
In paragraaf 3.2 wordt een korte introductie gegeven in het proces van duinafslag tijdens een storm. Paragraaf 3.3 beschrijft het kustbeleid dat betrekking heeft op de duinen. Paragraaf 3.4 geeft inzicht in de huidige duinveiligheidstoets. De duinen nabij het zeegat van Texel, tussen Julianadorp en Huisduinen worden daarbij getoetst. In de laatste paragraaf (3.5) worden de beperkingen van de huidige duinveiligheidstoets besproken.

3.2. *Duin- en kustbeheer*

In dit hoofdstuk wordt het gevoerde duinbeheer met betrekking tot de waterkerende functie toegelicht aan de hand van het ‘Basisrapport Zandige Kust’ [TAW, 1995]. Als eerste wordt het duin als waterkering nader gedefinieerd waarna de eisen genoemd worden die aan een duin gesteld worden. Ook het technisch beheer om aan de eisen te blijven voldoen wordt toegelicht.

3.2.1. Duinindeling

Een duin als primaire waterkering is door de kustbeheerder vastgelegd tussen beheersgrenzen. Tussen deze grenzen is het kustprofiel opgedeeld in verschillende deelgebieden. In figuur (3.2) is deze opdeling geschetst:



Figuur 3-1: Dwarsdoorsnede van een kustprofiel en indeling van beheersgebied, (bron: TAW, Basisrapport zandige kust, 1995)

De volgende elementen vallen te onderscheiden:

- de vooroever
- het strand
- de ontwerpafslagzone
- het grensprofiel
- de reservestrook
- de invloedstrook

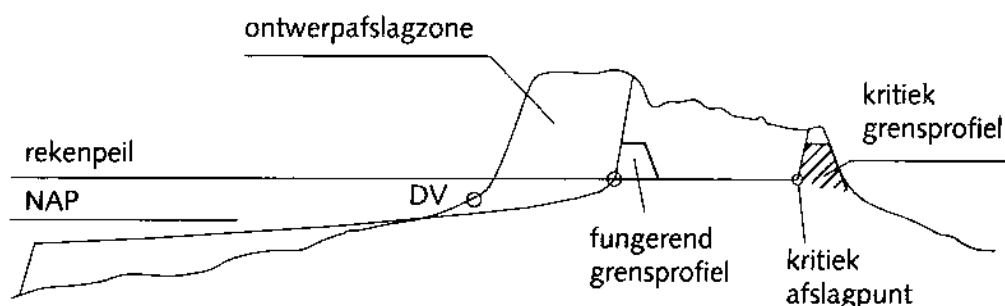
De primaire waterkering bestaat uit alle bovenstaande elementen, met uitzondering van de invloedstrook.

De zeewaartse grens van het kustprofiel wordt gevormd door de buitengrens van de vooroever. Deze wordt volgens afspraak gevormd door de NAP-20 m dieptelijs in geval van een regelmatig aflopende bodem. Indien zich voor de kust een diepe geul bevindt adviseert de TAW [Basisrapport Zandige Kust, 1995] om de gehele geul plus een deel van de achterliggende vlakte mee te betrekken bij de vooroever.

De landwaartse begrenzing van de duinenkust bestaat uit twee delen. De eerste bijdrage is die van de afslagzone en het daarbij behorende grensprofiel onder ontwerpomstandigheden. De tweede bijdrage komt van het feit dat de duinenkust de toekomstige situatie moet kunnen ondervangen. Daarbij wordt een periode van 200 jaar genoemd waarin het ontwerppeil onderhevig aan stijging is als gevolg van zeespiegelstijging. De maximale golfhoogte en de stormduur nemen naar verwachting de komende 200 jaar ook toe. Dit vertaalt zich op termijn in een extra afslagzone die gereserveerd wordt als reservestrook. De landwaartse grens van de primaire waterkering bestaat dan uit het optellen van het grensprofiel en de reservestrook.

3.2.2. Eisen aan het duin

De eisen die aan een duinenkering worden gesteld, zijn samengevat in figuur (3-3):



Figuur 3-2: Eisen aan een duinwaterkering, (bron: TAW, Basisrapport zandige kust, 1995)

De duinenkust wordt opgedeeld in een ontwerpafslagzone, een grensprofiel en een kritiek afslagpunt. Na een ontwerpafslag (als gevolg van de maatgevende stormvloed) dient er nog een zandprofiel te bestaan die garandeert dat de duinenkust nog niet bezweken is. Dit is het zogenaamde grensprofiel. Het kritieke afslagpunt geeft aan tot hoever de afslag tijdens een zware stormvloed mag voortschrijden, zonder dat er een duindoorbraak optreedt. Het dan resterende zandprofiel wordt het kritiek grensprofiel genoemd.

3.2.3. Technisch beheer

Het technisch beheer van de kust in Nederland valt op te delen in twee delen [TAW, Leidraad Zandige Kust, 1995]:

- de waarborging van de veiligheid
- de handhaving van de ligging van de kustlijn

De waarborging van de veiligheid

Een duin waarborgt de veiligheid van het achterland wanneer onder ontwerpomstandigheden geen overslag plaats vindt over het grensprofiel. De ontwerpomstandigheden zijn de ontwerpstormvloed en bijbehorende golfparameters voor het betreffend kustgedeelte waarbij de ontwerpafslag zal plaatsvinden. De frequentie van bezwijken speelt hierbij een rol. Er geldt dat een duinenkust fungerende als primaire waterkering, een bezwijkfrequentie heeft die kleiner is dan 10^{-1} * de gemiddelde jaarlijkse overschrijdingsfrequentie van het ontwerppeil. Het ontwerppeil verschilt langs de Nederlandse kust, het is het peil met een overschrijdingsfrequentie van $1 \cdot 10^{-4}$. De bezwijkfrequentie voor de waterkering nabij Julianadorp is 10^{-5} .

De ontwerpafslag van een duin wordt eens per 5 jaar getoetst door de waterkering-beheerder. Mocht het duin niet aan de eisen voldoen dan wordt er overgegaan tot suppletie of andere ingreep, zodat het duin weer aan de eisen voldoet.

Voor het beheer van de waterkering wordt de lange termijn ontwikkeling van het duinprofiel meegenomen, om een eventueel tijdstip te definiëren waarop de duinverdediging niet meer zal voldoen aan de eisen. Voor een veiligheidsbeoordeling wordt gebruik gemaakt van JARKUS-profielen van de laatste 15 jaar. Per profiel en per jaar worden vervolgens afslagberekeningen gemaakt (5-jaarlijks). Elk

dwarsprofiel in een kustsectie dient te voldoen aan de veiligheidseisen. De trend van de afslaglijn in de tijd wordt bepaald en er kan vervolgens een schatting gemaakt worden van het tijdstip waar de duinverdediging niet meer aan de eisen zal voldoet. In paragraaf 3.4 zal de rekenmethode worden toegelicht die voor de huidige toetsing gebruikt wordt.

Handhaving van de kustlijn

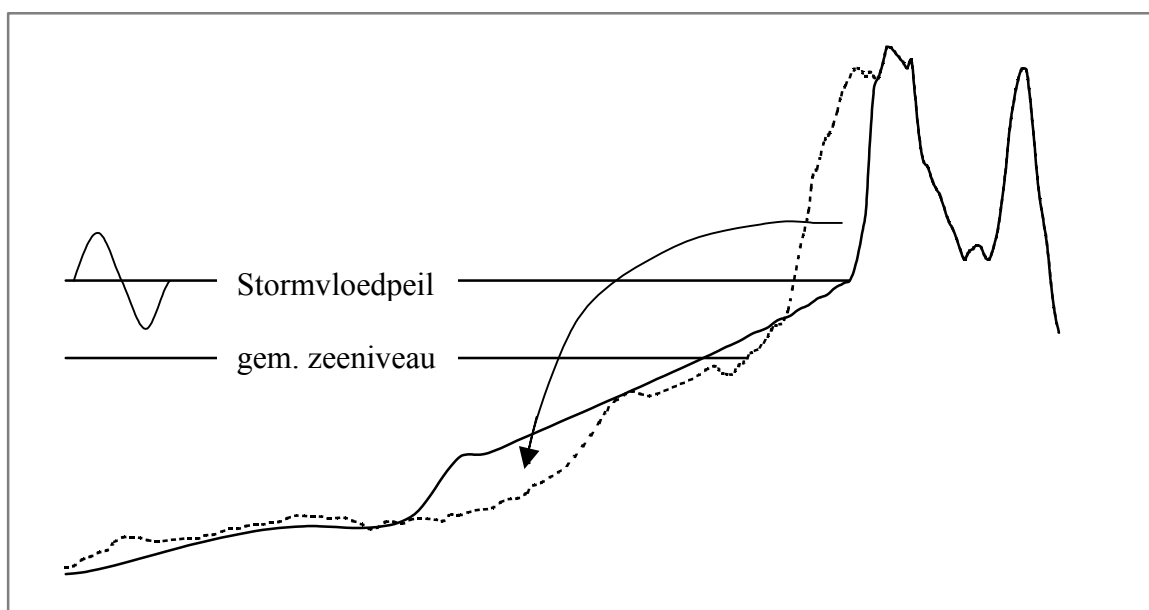
In 1990 is het wettelijk vastgelegd dat de kustlijn van 1990 wordt gehandhaafd [Hillen, R., e.a., 1991, 1993]. De kustlijn wordt door middel van zandsuppleties op zijn plaats gehouden, zodat structurele erosie langs de kust wordt bestreden. Om tot suppletie over te gaan is een norm opgesteld, de basiskustlijn (BKL). Deze is in principe de gemiddelde kustlijn van 1990 en vormt de norm. Indien de gemiddelde kustlijn zich landwaarts van de BKL bevindt is de norm overschreden en dient er ingegrepen te worden. Het zandvolume van de kustzone wordt weer op peil gebracht door een zandsuppletie.

Het effect van dit beheer is dat de vooroever binnen bepaalde grenzen blijft in de tijd. Hierdoor zullen bij gelijkblijvende hydraulische condities geen grote veranderingen optreden in de ontwerpduinafslag.

3.3. De duinafslagberekening.

3.3.1. Duinafslag

Een duinenkust is een dynamische kustverdediging die constant onderhevig is aan verandering als gevolg van wind, golven en stromingen. Tijdens extreme situaties zal er, als gevolg van een hoge waterstand en golfaanval, zand van de duinen afslaan dat wordt afgezet op de vooroever. Hierop breken de aankomende golven, zodat een volgende golf tot minder erosie leidt. In principe is het proces van duinafslag het aanpassen van het ene evenwichts(dwars)profiel naar het andere evenwichts(dwars)profiel. In figuur (3-1) wordt dit geschetst aan de hand van een voorbeeld. Het profiel voor de storm is aangegeven met een stippellijn en het profiel na de storm met een doorgetrokken lijn.

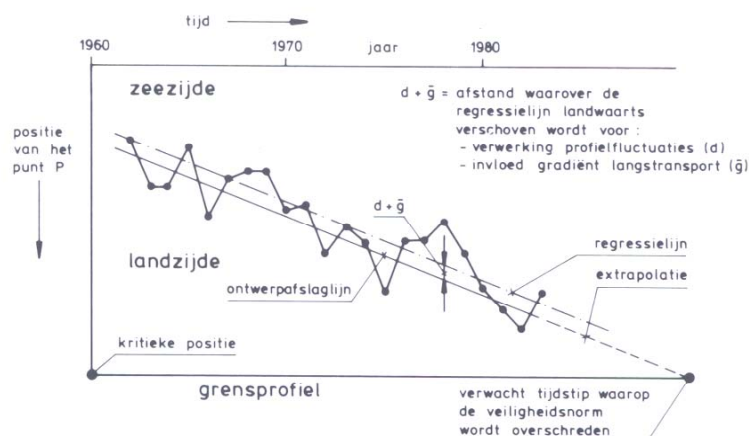


Figuur 3-3: Principe van duinafslag

3.3.2. Huidige duinafslag rekenmodel

De huidige kwantificering van de duinafslag tijdens ontwerpcondities is op een probabilistische methode gebaseerd [van de Graaff, J., 1984] en staat omschreven in [TAW, Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering, 1984]. De basis van de methode is, dat onder invloed van een combinatie van randvoorwaarden (waterstand, piekperiode en significante golfhoogte) een (evenwichts)dwarsprofiel ontstaat waarbij het zand in een dwarsdoorsnede van de duinen herverdeeld wordt. Het computermodel DUROS heeft de leidraad uit de TAW als basis. Dit model is opgezet na het uitvoeren van modelproeven in golfgoten en metingen in de natuur.

Het principe van de berekening is als volgt; Een dwarsprofiel van een kust is permanent onderhevig aan verandering als gevolg van invloeden van buitenaf. Het profiel heeft voor iedere combinatie van randvoorwaarden in principe een evenwicht. In tijden van ‘normale’ condities zijn de veranderingen aan het dwarsprofiel relatief klein. Tijdens extreme stormcondities veranderen de randvoorwaarden dusdanig dat er zich een compleet nieuw evenwichtsdwarsprofiel wil ontwikkelen. Het profiel dat zich na een extreme situatie heeft ingesteld is te modelleren volgens:



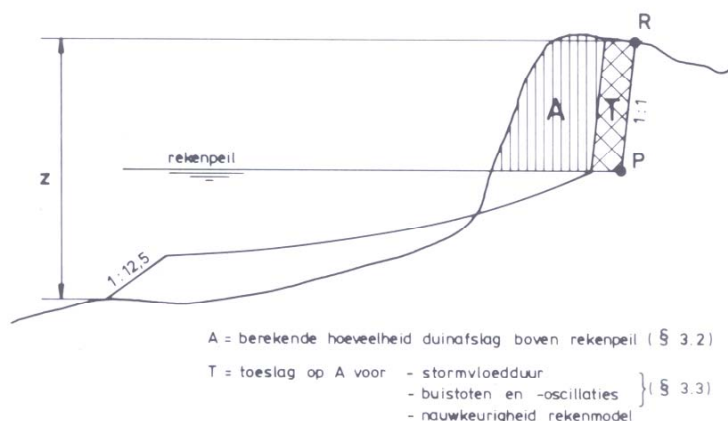
Figuur 3-5: Principe van de toetsingsmethode voor de beoordeling van de veiligheid, (bron: TAW, Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering, 1984)

Profielfluctuaties komen tot uiting in de gespreide ligging van de punten P rondom de regressielijn en wordt ingegeven door de JARKUS-raaien. Bij een veiligheidsbeoordeling in de toekomst wordt de onzekerheid van de ligging van het profiel meegenomen door de regressielijn van de afslag te transleren richting de kust als functie van de onzekerheid van de profielligging.

Voor kustprofielen waar rekening moet worden gehouden met een verlies van zand uit het dwarsprofiel als gevolg van een gradiënt in het langstransport wordt de regressielijn eveneens landwaarts verschoven. Voor het in rekening brengen van de gradiënt wordt een onderscheid gemaakt in kustkrommingsklassen. De kust zoals die er bij ligt ter plaatse van het zeegat van Texel valt in categorie 1 wat wil zeggen dat er niks in rekening gebracht hoeft te worden voor de gradiënt. De leidraad geeft aan dat voor gradiënten in het langstransport die veroorzaakt worden door andere processen dan kustkromming, de leidraad niet toereikend is voor de beoordeling van dergelijke kustvakken. De ligging van een geul in de vooroever met een groot transporterend vermogen kan derhalve niet als zodanig meegenomen worden in de berekening

3.3.3. Invoerspecificatie

Voor elke JARKUS-raai, gedefinieerd in paragraaf 2.3.4 wordt een afslagberekening gemaakt met behulp van het bovenstaande rekenmodel. Hierbij dienen specifieke rekenwaarden voor de parameters stormvloedpeil, significante golfhoogte en korreldiameter opgegeven te worden. Bij elke afslagberekening wordt een basisafslag (A) berekend. De berekende duinafslag wordt daarna vermeerderd met een toeslag (T), waarin rekening gehouden wordt met: de nauwkeurigheid van het rekenmodel, de bui-oscillaties en -stoten en de onzekerheid omtrent de tijd dat de waterstand rond het maximum verblijft. De toeslag uit zich in een extra teruggang van het steile duinfront. In figuur 3.6 staat het bovenstaande uitgewerkt. Punt P is het snijpunt van het verplaatste duinfront met het rekenpeil.



Figuur 3-6: Definitieschets ontwerpafslag, (bron: TAW, Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering, 1984)

Maximale waterstand:

Het rekenpeil (afgeleid van het stormvloedpeil) voor het kustvak bij Den Helder bedraagt 4,40 m + NAP. Deze waarde is ontleent aan [Hydraulische Randvoorwaarden 2001, RIKZ], waarin voor elke dijkkring in Nederland de hydraulische randvoorwaarden zijn beschreven.

De significante golfhoogte op diep water:

De significante golfhoogte benodigd voor de berekening is vastgesteld op 9,55 m [Hydraulische Randvoorwaarden 2001, RIKZ]. Een opmerking in de leidraad volgt voor de aanwezigheid van een eventueel platengebied voor de kust. De significante golfhoogte die gebruikt moet worden wordt bepaald net buiten de brekerzone van de kust. In de praktijk wordt hier ter plaatse van het zeegat van Texel geen rekening mee gehouden [quote; C. Maas, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, jan. 2003] en wordt de diep-waterconditie gebruikt in de berekeningen.

Korrel diameter van het duinzand:

De korrel diameter van het duinzand en de onzekerheid van de grootte van de diameter wordt in rekening gebracht door [TAW, Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering, 1984], de rekenwaarde van de korrel diameter te bepalen op de volgende wijze:

$$D_{\text{reken}} = \mu_{D_{50}} - 5 \frac{(\sigma_{D_{50}})^2}{\mu_{D_{50}}} \quad (3-4)$$

Deze waarden zijn langs de Nederlandse kust verschillend. Voor de van belang zijnde raaien zijn de korrelgegevens hieronder weergegeven in een tabel

| raai | $\mu_{D_{50}}$ [μm] | $\sigma_{D_{50}}$ [μm] | D_{reken} [μm] |
|------|----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 210 | 232 | 12 | 299 |
| 409 | 233 | 12 | 230 |
| 608 | 224 | 25 | 210 |
| 789 | 247 | 14 | 243 |

Tabel 3-1: Korrel diameters duinmateriaal, (bron: TAW, Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering, 1984)

Onzekerheden

Met behulp van de gespecificeerde parameters rekt het programma DUROS de basisafslag (A) uit. De toeslag (T), die de onzekerheden in rekening brengt wordt als volgt gespecificeerd, [TAW, Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering, 1984]:

- Voor de onzekerheid omtrent de tijd gedurende welke de waterstand rondom het maximum verblijft wordt 10% van de basisafslag in rekening gebracht
- Voor het effect van buistoten en buioscillaties wordt 5% van de basisafslag in rekening gebracht
- Voor de (on)nauwkeurigheid van het rekenmodel wordt 10% van de basisafslag in rekening gebracht, vermeerderd met 20 m³/m.

De totale toeslag komt daarmee op; $0,25 \cdot A + 20 \text{ m}^3/\text{m}$.

Indien nu landwaarts van de verschoven regressielijn (extrapolatie in de figuur 3-5) niet meer het grensprofiel aanwezig is, voldoet het betreffende profiel niet meer aan de gestelde veiligheidsnorm en dienen er maatregelen getroffen te worden om dit tegen te gaan.

Het grensprofiel dat nog aanwezig dient te zijn na een ontwerpafslag heeft de volgende afmetingen (zie figuur 3.7 en figuur 3-3):

Minimale kruinhoogte:

$$h_0 = RP + 0,12 \hat{T} \sqrt{H_{0s}} \quad [\text{m}] \text{ boven NAP} \quad (3-5)$$

of:

$$h_0 \geq RP + 2,5 \quad [\text{m}] \text{ boven NAP} \quad (3-6)$$

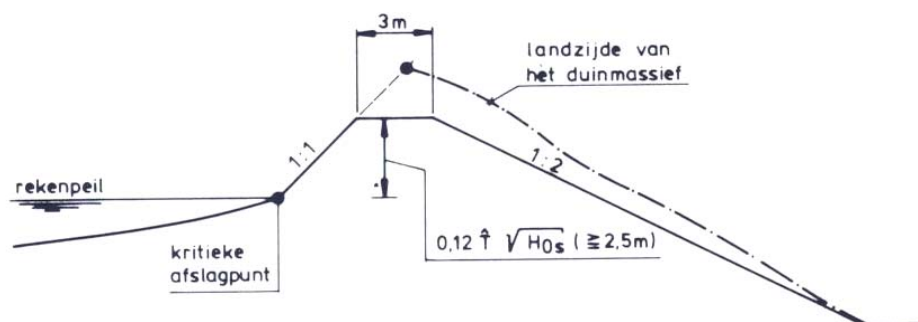
Hierin is:

RP = het rekenpeil in m boven NAP

\hat{T} = de piekperiode van het golfspectrum. Deze is ontleent aan [Hydraulische Randvoorwaarden 2001, RIKZ] en bedraagt 12 s.

H_{0s} = de verwachtingswaarde van de significante golfhoogte [m] behorende bij het rekenpeil.

De minimale breedte op kruinhoogte dient 3,0 m te bedragen.



Figuur 3-7: Afmetingen van het grensprofiel, (bron: TAW, Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering, 1984)

Voor de verschillende raaien die gespecificeerd zijn in hoofdstuk 2 zijn duinafslagberekeningen gemaakt. De resultaten van deze berekeningen staan in bijlage 3.1 gegeven, waar de eindprofielen getekend zijn. Uit de figuren valt op te maken dat de aanwezige duinen ter plaatse voldoende zand bevatten om in een extremere situatie nog niet te bezwijken. Het kritiek grensprofiel is in geen van de gevallen gelijk aan de ligging van het grensprofiel.

3.4. Beperkingen van de huidige leidraad

De huidige methode om de veiligheid van de duinen te toetsen is in 1984 opgesteld en sindsdien in gebruik.

In de voorgaande paragrafen zijn voor een aantal JARKUS-raaien in het interessegebied de ontwerpduinafslagen berekend volgens de huidige leidraad. In deze paragraaf wordt op een aantal punten commentaar gegeven op de toepassing van de leidraad in het algemeen en op het zeegat van Texel in het bijzonder.

- De leidraad gaat uit van een standaard afslagprofiel dat afhankelijk is van vaste waarden voor waterstand, significante golfhoogte en korreldiameter. Het gedefinieerde afslagprofiel komt voort uit empirische relaties tussen een standaard stormverloop van de parameters en het duinprofiel. Het effect van tijdsafhankelijke ontwikkelingen van de stormparameters wordt hierin niet meegenomen. Stormen met afwijkende waarden in de tijd zullen derhalve niet goed gemodelleerd worden.
- De variatie in de stormduur is in rekening gebracht door een toeslag op de basisafslag toe te passen. In [van de Graaff, J., 1984] komt naar voren dat deze toeslag de onzekerheid in de tijd in rekening brengt dat de waterstand zijn maximale waarde heeft. In werkelijkheid is echter het gehele verloop van de storm van belang. Het effect van sterk uiteenlopende stormduren mee te nemen in de afslaghoeveelheid is in de leidraad niet voldoende verdisconteerd.
- Bij het gebruik van de leidraad voor de kop van Noord Holland, wordt de aanwijzing in de leidraad om de randvoorwaarden te onttrekken net buiten de brekerzone, indien er een platen en geulengebied aanwezig is, niet meegenomen. Navraag bij de lokale beheerder leert dat gerekend wordt met de diep water condities. De gebruikte randvoorwaarden zijn dan te zwaar voor de afgeschermd locatie nabij de buitendelta van het zeegat.
- Bij het gebruik van de diep water randvoorwaarden wordt gerekend met een maatgevende storm met stormparameters zoals opgesteld in [Hydraulische

randvoorwaarden 2001, RIKZ]. De parameters zijn opgesteld aan de hand van de omnidirectionele stormdata: de data van alle stormrichtingen zijn bij elkaar genomen om de extreme waarden voor waterstand en golfhoogte te bepalen. Om het effect van de buitendelta op de stormparameters nabij de kust mee te nemen, dient de stormdata opgedeeld te worden in verschillende richtingen omdat stormen uit verschillende richtingen randvoorwaarden genereren, die niet in 1 storm te vatten zijn.

- De piekperiode komt alleen tot uiting in de afmetingen van het grensprofiel. De piekperiode heeft echter ook invloed op de mate van duinafslag [Steetzel, H.J., 1993, 1999]. In [de Ronde, J.G. e.a., 1995] en [Roskam, A.P. en Hoekema, J., 1996] komt naar voren dat de piekperiode van 12 seconden, afkomstig uit [Hydraulische randvoorwaarden 2001, RIKZ], aan de lage kant is en hogere waarden wellicht realistischer zijn voor de toetsing. Deze hogere waarden hebben bij gebruik van de leidraad geen effect op de duinafslag, wat niet realistisch is.
- De leidraad vertaalt de invloed van een gradiënt in het langstransport door het effect van een gekromde kust. Voor andere oorzaken voor een gradiënt wordt geen oplossing gegeven en voldoet de leidraad niet. In de noordelijke profielen van het interessegebied is de geul het Nieuwe Schulpengat vrij dicht onder de kust aanwezig. Tijdens een storm zou deze geul de oorzaak kunnen zijn van een gradiënt in het langstransport, omdat de geul niet evenwijdig aan de kust loopt. Een vertaling van deze gradiënt in de duinafslag wordt niet gemaakt volgens de leidraad.

3.4.1. Conclusie

De berekeningen, uitgevoerd in paragraaf 3.4, zijn in het licht van de bovenstaande beperkingen, niet realistisch. Als gevolg van het negeren van de buitendelta zal het golfklimaat dat de duinafslag bepaald milder zijn, met een verminderde duinafslag tot gevolg. Indien de buitendelta meegenomen wordt in de berekening dan dient een opdeling gemaakt te worden naar stormrichting. Stormen uit verschillende richtingen kunnen ook verschillende stormduren hebben zodat een tijdsafhankelijke berekening de voorkeur geniet. Tevens zijn de verlopen van de golfparameters, waaronder de golfperiode, van belang. Een berekening volgens de leidraad volstaat dus niet.

In de volgende hoofdstukken wordt een alternatieve aanpak gepresenteerd voor de toetsing van de duinveiligheid. Bij deze aanpak worden oplossingen gezocht voor de bovengenoemde beperkingen.

4. Diep-water randvoorwaarden

4.1. *Inleiding*

De aanwezigheid van de buitendelta van het zeegat van Texel beïnvloedt de golven tijdens extreme condities als stormen. Tijdens extreme stormen bewegen golven vanuit diep water richting de kust en veroorzaken daar duinafslag. De mate van duinafslag hangt daarbij af van de stormparameters als waterstand, golfhoogte, piekperiode en stormduur. Elke parameter heeft zijn eigen overschrijdingsverdeling. Tijdens een storm hebben de stormparameters op diep water extremere waarden. De aandrijvende kracht achter deze extremere waarden is de wind. Bij een hardere wind zijn er grotere golven en is de piekperiode groter. Bij aanlandige wind is ook de waterstand hoger. De stormparameters zijn afhankelijk van de windsnelheid. Voor het bepalen van extreme waarden voor de duinafslag wordt dan ook rekening gehouden met deze afhankelijkheid. De methode 'De Haan' [van Marle, J.G.A., 2000, de Valk, C.F., 1997, de Haan, L. en Resnick, S.I., 1977] is een voorbeeld van een rekenmethode die de afhankelijkheid in ogenschouw neemt. In dit hoofdstuk worden de extreme waarden berekend tijdens stormen op diep water nabij de buitendelta van het Zeegat van Texel volgens de methode 'De Haan'.

De opzet van dit hoofdstuk is als volgt: in paragraaf 4.2 wordt in het algemeen het principe van een faalkansberekening uitgelegd waarbij ook de verschillende rekenmethoden aan bod komen. In de paragraaf 4.3 wordt de berekeningsopzet in zijn geheel toegelicht. De methode 'De Haan' wordt uitgewerkt aan de hand van een voorbeeld. In paragraaf 4.4 komt het verschil aan de orde tussen het berekenen van dijken en duinen indien gebruik wordt gemaakt van 'De Haan'. In paragraaf 4.5 worden de randvoorwaarden gepresenteerd die gebruikt worden voor de berekening van de ondiep-water randvoorwaarden.

4.2. *Faalkansberekening*

De basis voor een faalkansberekening wordt gevormd door een betrouwbaarheidsfunctie. Betrouwbaarheid is de kans dat een grenstoestand niet wordt overschreden. Een grenstoestand is hierbij gedefinieerd als de toestand waarbij nog net geen falen optreedt. De betrouwbaarheidsfunctie ziet er als volgt uit:

$$Z = R - S \quad (4-1)$$

Hierin is R de weerstand tegen het falen en S de belasting die het falen bevordert. Indien $Z < 0$ is, is er falen van de waterkering opgetreden. De betrouwbaarheidsfunctie wordt gevormd door de stochastische variabelen van weerstand en belasting. De betrouwbaarheid is dus afhankelijk van de marge tussen weerstand tegen falen en belasting. De stochasten hebben allen een eigen verdeling voor de grootte.

De belasting (S) is opgebouwd uit waterstand, golfhoogte, piekperiode enzovoort. De sterkte (R) zal onder andere bestaan uit de hoeveelheid zand in het duin en de korrelgrootte van het duinzand.

De faalkans van een constructie (of een duin) is volgens [de Valk. C.F., 1996] gelijk aan:

$$P[z(s,r) < 0] = \int_{s \in S} \int_{r \in R} \lambda(z(s,r) < 0) dF_{S,R}(s,r) \quad (4-2)$$

Waarin $\lambda(z(s,r) < 0)$ een indicator is. Deze is gelijk aan nul indien er geen falen optreedt en gelijk aan 1 indien er falen optreedt. $F_{S,R}$ is de gezamenlijke verdelingsfunctie van de belasting en sterkte parameters.

Het berekenen van de faalkans kan geschieden met verschillende probabilistische methoden. De methoden verschillen in hun opzet door de manier op welke wijze de bovenstaande integraal benaderd wordt. In het kort worden de verschillende methoden hier toegelicht:

Niveau 3-methoden proberen om de bovenstaande meervoudige integraal te benaderen op een aantal discrete punten. Indien de dimensie van s en r niet klein is, is deze methode onpraktisch en vereist veel rekenwerk. Een andere methode om de integraal te benaderen is Monte Carlo integratie. Willekeurige variabelen worden getrokken uit de gezamenlijke kansdichtheidsverdeling $F_{S,R}$ en de fractie waarvoor geldt $z(s,r) < 0$ wordt bepaald. Echter, bij een geschatte faalkans van 10^{-4} dienen volgens [Voortman, H.G., 2002] 10^6 tot 10^7 berekeningen uitgevoerd te worden. De grote rekeninspanning zou beperkt kunnen worden door gebruik te maken van een techniek die onder de noemer Importance Sampling valt. Bij Importance Sampling wordt het aantal berekeningen beperkt door bij het maken van de berekeningen een voorkeur in te bouwen voor het berekenen van faalgebeurtenissen.

Niveau 2-methoden simplificeren het probleem door het lokaal te benaderen zodat het gemakkelijker op te lossen is: In de buurt van het ontwerppunt wordt de gezamenlijke kansdichtheidsfunctie $F_{S,R}$ benaderd door een multivariabele Gaussische verdeling. De betrouwbaarheidsfunctie wordt lokaal als lineair beschouwd. Het ontwerppunt wordt iteratief berekend en is het punt met de grootste waarschijnlijkheid.

Niveau 1-methoden zijn gebaseerd op een deterministische berekening waarbij een element voldoende betrouwbaar geacht wordt als er een marge aanwezig is tussen de representatieve waarde van de sterkte en de representatieve waarde van de belasting. De marge wordt geschapen door in het ontwerp met partiële veiligheidsfactoren rekening te houden.

Voor de berekening van de faalkans van de duinen zal gebruik worden gemaakt van de methode ‘De Haan’. De methode ‘De Haan’ kan gezien worden als een niveau 3 methode waarbij via een importance sampling methode, namelijk ‘extreme waardenschaling’ de faalgebeurtenissen gecreëerd worden.

4.3. Berekeningsopzet

Het berekenen van de faalkans voor de duinen omhelst het bepalen van de gezamenlijke kansdichtheidsfunctie van duinafslag. Duinafslag wordt door een aantal stochasten bepaald. Aan de belastingkant zijn daar onder meer de waterstand, golfhoogte, golfperiode en stormduur. Onder extreme condities met harde wind uit een bepaalde richting zullen de stochasten groter dan gemiddelde waarden laten zien,

waarbij een grote afhankelijkheid bestaat tussen de verschillende afslagbepalende stochasten die bepaald worden door de wind [Voortman, H.G., 2002]. De afhankelijkheid dient in rekening te worden gebracht bij de berekening daar dat zwaardere condities met zich meebrengt.

Een methode die gebaseerd is op het simultaan voorkomen van extreme waarden is de methode ‘De Haan’. Aan de hand van een dataset met simultane stormgegevens van waterstand, windsnelheid, windrichting, golfhoogte en piekperiode (allen gemeten op diep water, NAP –20 m.) worden extreme stormen gecreëerd door de afzonderlijke stochasten te verscalen. Dit verscalen gebeurt aan de hand van afzonderlijke extreme waarden statistiek van de stochasten. Het resultaat is een set van extreme stormdata voor diep water.

4.3.1. Methode De Haan

Bij de uitwerking voor de multivariabele extreme waarden statistiek is gebruik gemaakt van de methode ‘De Haan’. In onderstaande paragrafen zal deze methode toegelicht worden aan de hand van een voorbeeld.

De basis voor de methode wordt gevormd door een dataset van simultane storm waarnemingen op diep water. Dit zijn ‘normale’ stormcondities. Waarnemingen tijdens extreme stormcondities (10^{-4} – 10^{-5}) zijn niet gemeten. De extreme stormcondities worden verkregen door de gemeten stormparameters te extrapoleren. Er wordt van uitgegaan, dat de puntenwolk van de waarnemingen verschoven kan worden naar het extreme gebied zonder dat de puntenwolk uitwaaiert. Het verschuiven geschiedt in de exponentiële ruimte. Deze methode kan gebruikt worden mits de afzonderlijke parameters asymptotisch gecorreleerd zijn. Dit wil zeggen dat naarmate de verschillende stochasten extreme waarden aannemen, de correlatie tussen de stochasten behouden blijft. Er wordt bij de methode van een sterke mate van afhankelijkheid van de onderliggende stochasten uitgegaan. Er dient daarom getoetst te worden of deze afhankelijkheid bestaat. Zou deze (sterke) afhankelijkheid niet bestaan, dan leidt dit tot conservatieve uitkomsten oftewel een benadering aan de veilige kant.

De methode ‘De Haan’ bestaat uit vier stappen:

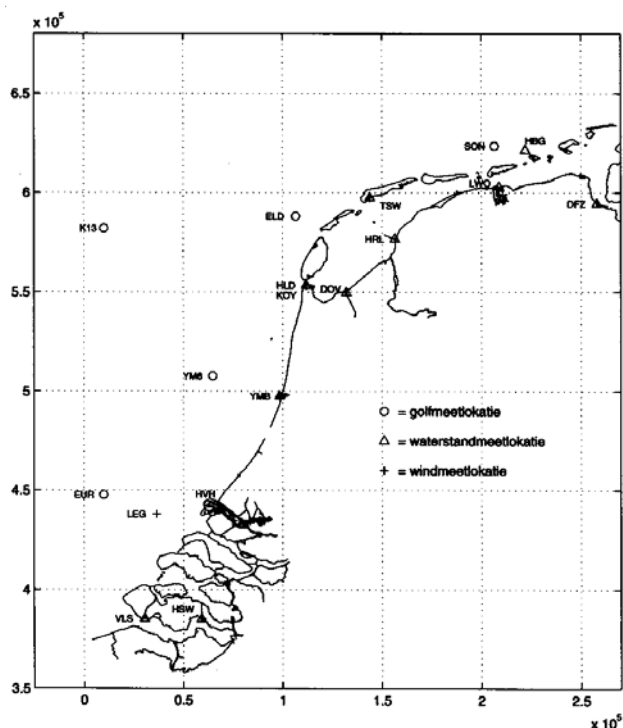
1. Het verzamelen van simultane stormparameters tijdens stormen
2. De bepaling van de extreme waarden statistiek van de afzonderlijke stochasten.
3. De extrapolatie van de correlatiestructuur van de simultaan waargenomen stochasten
4. De toetsing van de asymptotische afhankelijkheid.

In de volgende paragrafen wordt de berekening stap voor stap uitgewerkt en aan de hand van voorbeelden verhelderd.

4.3.2. Simultane stormparameters

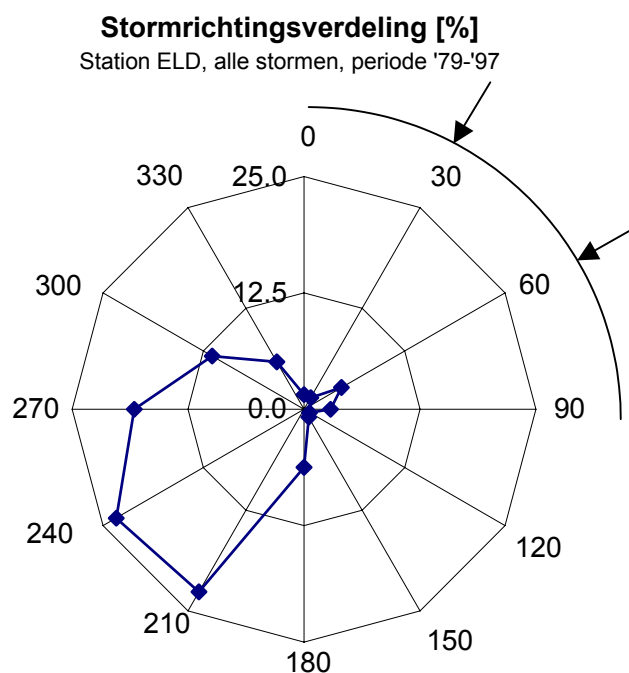
De meetreeksen waarbij simultaan de stormparameters gemeten zijn, zijn niet lang. In de periode van 1979 tot 1997 zijn er representatieve stormen geselecteerd (Voorwaarden van deze selectie: bijlage 4.1). De meetreeksen bestaan uit simultane waarnemingen van golfhoogte, piekperiode, waterstand, opzet, windsnelheid en windrichting. De waterstanden zijn gemeten nabij Den Helder (HLD), de golfcondities zijn gemeten op het station Eierland (ELD) en de windcondities zijn verkregen vanaf een meetstation aan de wal, De Kooy (KOY). De waarnemingen zijn

uurlijks opgeslagen. In onderstaande figuur zijn de meetstations opgenomen met hun afkortingen.



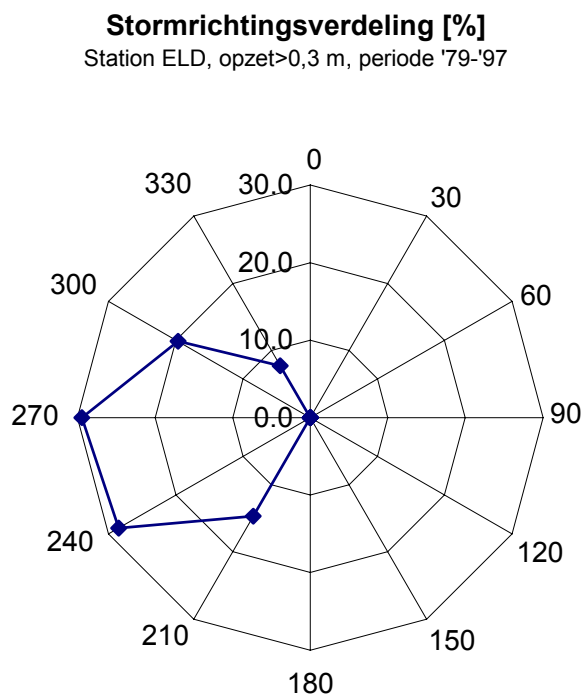
Figuur 4-1; Meetstations voor wind, waterstand en golf (bron: Roskam, A.P., e.a., 2000)

Per storm wordt uitgegaan van één representatieve waarde van golfhoogte, waterstand, piekperiode, windrichting en windsnelheid. Om deze waarden te verkrijgen is de dataset gefilterd. Van alle parameterwaarnemingen in een storm zijn de maxima bepaald die de storm kenmerken. Dit levert een dataset op met een waarde voor de waterstand, golfhoogte, piekperiode en windsnelheid. De stormduur wordt beschouwd als de totale periode van waarnemen van de storm. Omdat in een later stadium de extrapolatie onder meer plaatsvindt op basis van de stormrichting worden de stormen geselecteerd op windrichting. Deze is gebaseerd op de gemiddelde windrichting tijdens de stormduur. In onderstaande figuur is een verdeling gemaakt van het aantal stormen over de windrichting:



Figuur 4-2; Stormrichtingsverdeling alle stormen

In verband met de berekening van de duinafslag worden de stormen die een setdown of slechts een kleine set-up veroorzaken verwijderd uit de dataset. De drempel voor het meetellen van een storm in de dataset bedraagt 0,3 m opzet. In de onderstaande figuur staat de richtingsverdeling gegeven van de stormen die deze opzet of een hogere opzet genereren.



Figuur 4-3; Stormrichtingsverdeling opzet genererende stormen

Deze dataset bestaat uit verschillende stormen met elke storm een set van afhankelijke parameters. De volgende paragrafen geven een beschrijving, aan de hand van de extreme waarden statistiek, hoe gekomen wordt tot een dataset van extreme stormen.

4.3.3. Extreme waarden statistiek.

In de laatste jaren is er veel onderzoek gedaan naar de extreme waarden statistiek op diep water. Voor de verschillende parameters als waterstand, golfhoogte, piekperiode en windsnelheid zijn de afzonderlijke verdelingen per windrichting bekend voor verschillende meetpunten in de Noordzee. [Philippart, M.E., e.a., 1995, De Ronde, J.G., e.a., 1995, Roskam, A.P., e.a., 1996, 2000]. De frequentieverdelingen van de stochasten hebben allen dezelfde (conditionele Weibull) vorm, bepaald door middel van een Maximum Likelihood fit:

$$F(x) = p_c \cdot \exp\left(-\left(\frac{x}{\sigma}\right)^\alpha + \left(\frac{\omega}{\sigma}\right)^\alpha\right) \quad (4-3)$$

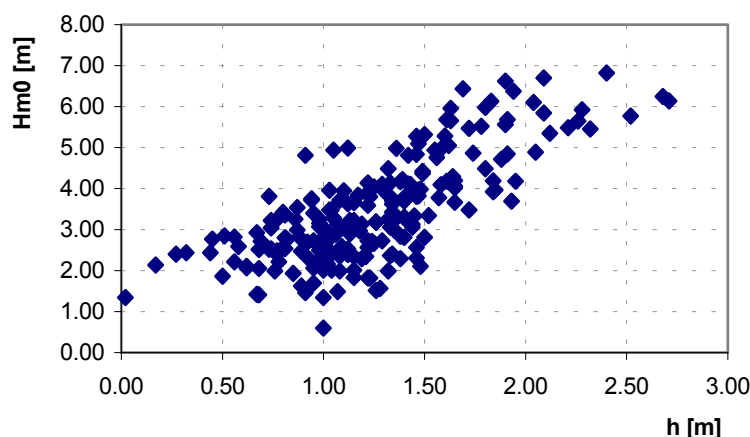
Hierin is:

| | | |
|--------------------|---|--------|
| x | = beschouwde stochast | [x] |
| F(T _s) | = frequentie van overschrijding van de stochast | [1/jr] |
| ω | = drempelwaarde (ondergrens) voor de stochast | [x] |
| p _c | = overschrijdingsfrequentie van de drempel ω | [1/jr] |
| σ | = schaalparameter van de verdelingsfunctie | [x] |
| α | = vormparameter van de verdelingsfunctie | [-] |

De conditionele Weibull verdeling wijkt af van de normale Weibull verdeling doordat deze laatste toegepast wordt op waarnemingen boven een bepaalde drempel. Dit komt tot uiting in de verdeling door de drempelwaarde en de overschrijdingsfrequentie van deze drempelwaarde. In bijlage 4.2 staat voor elke stormparameter de frequentieverdeling. De verdelingen hebben betrekking op de afzonderlijke statistiek van 1 parameter.

4.3.4. De extrapolatie van de correlatiestructuur.

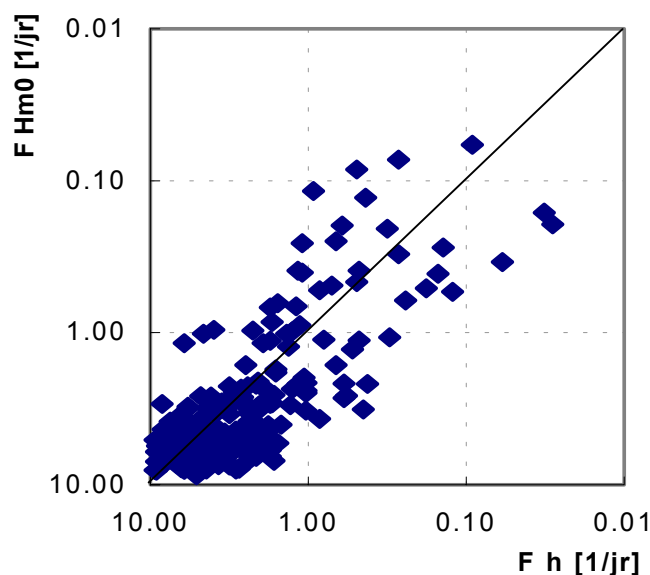
Bij de methode De Haan vindt de extrapolatie van de correlatiestructuur plaats door het verschuiven van de simultane waarnemingen naar de extreme waarden rond het faalgebied van een constructie. Dit geschied door de frequenties van de afzonderlijke waarnemingen te vermenigvuldigen met een schaalfactor, aan de hand van de extreme waarden statistiek van de afzonderlijke stochasten. Met behulp van de gedefinieerde verdelingen van de afzonderlijke stochasten worden nieuwe sets van extreme waarden gegenereerd. Hieronder staat een voorbeeld uitgewerkt met een tweedimensionale dataset van waterstand en golfhoogte, met wind uit de richting 270^o.



Figuur 4-4; 2D-dataset, richting 270, waterstand vs. golfhoogte

Elk puntje bestaat uit een waterstandswaarde en een (significante)golfhoogtewaarde. Met de afzonderlijke extreme waardenstatistiek (4.3) worden de bijbehorende frequenties van de waterstanden en de golfhoogten bepaald.

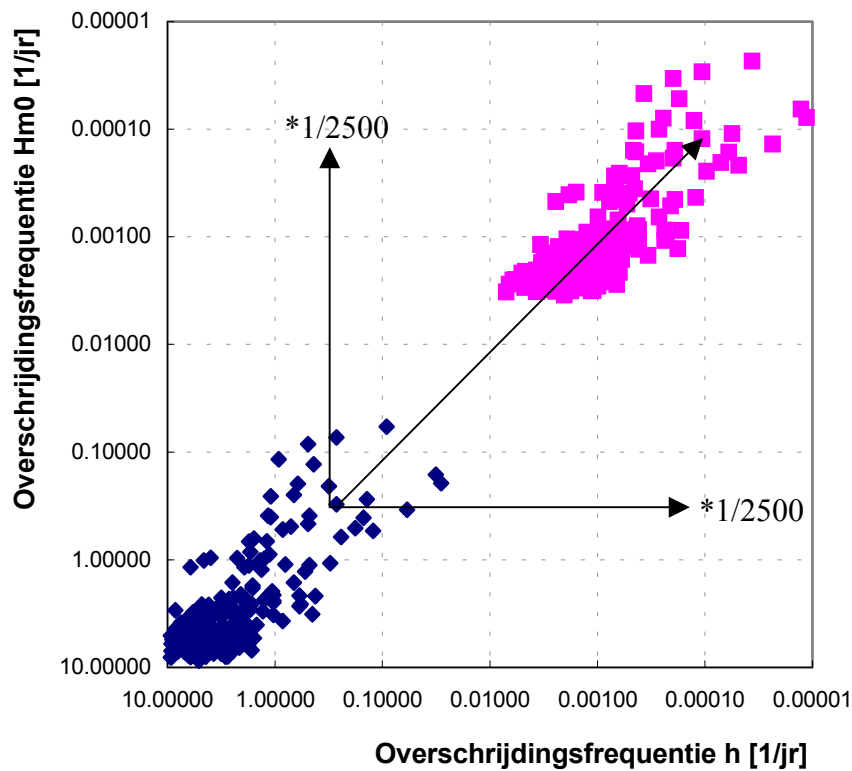
In onderstaande grafiek is het resultaat te zien van stormen met wind uit de richting 270^0 , F staat voor overschrijdingsfrequentie van de desbetreffende parameter.



Figuur 4-5; Overschrijdingsfrequenties van de 2D-dataset, richting 270, waterstand vs. golfhoogte

Voor het verkrijgen van extreme stormdata worden de frequenties verschaald door middel van het verschuiven van de simultane waarnemingen naar extreme waarden rond het faalgebied. Het faalgebied is in dit geval onbekend. Er wordt op een dergelijke manier verschoven dat er een aantal waarnemingen in het gebied ligt van 10^{-4} . Dit is volgens de huidige leidraad de overschrijdingsfrequentie is van de maatgevende waterstand. Dit wordt gerealiseerd met een schaalfactor van 2500. Dat wil zeggen dat alle frequenties van de oorspronkelijke dataset gedeeld worden door 2500.

In onderstaande frequentieverdeling staat de verschuiving van de oorspronkelijke dataset te zien:

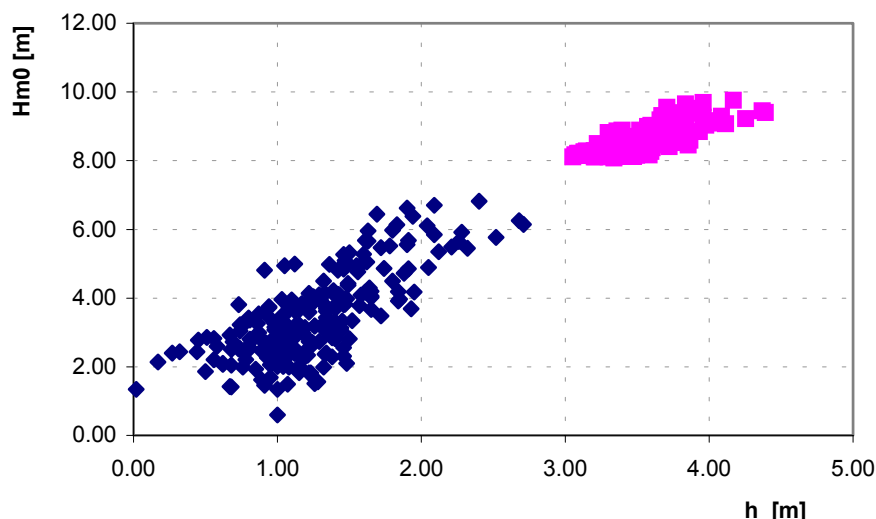


Figuur 4-6; Verschuiving in exponentiële ruimte (blauw: originele data, roze: verschoven data)

Als laatste stap wordt de verschuiving in de fysische ruimte gepresenteerd. Aan de hand van de extreme waarden verdelingen worden de extreme frequenties terugerekend naar fysische waarden van waterstand en golfhoogte met (4.3):

$$x = \sigma \cdot \sqrt[{\alpha}]{-\ln\left(\frac{F(x)}{p_c}\right) + \left(\frac{\omega}{\sigma}\right)^{\alpha}} \quad (4-4)$$

In onderstaande figuur is de oorspronkelijke dataset te zien alsmede de geëxtrapoleerde dataset:



Figuur 4-7; Verschuiving in de fysische ruimte, 2D dataset, richting 270, h vs H_{m0}

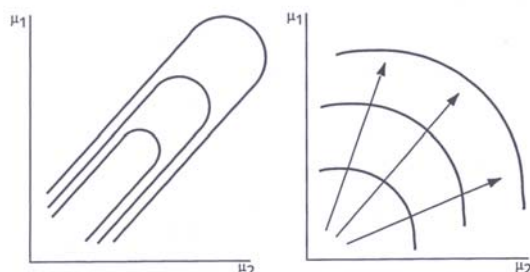
Uit de tekening valt op te maken dat de spreiding van de geëxtrapoleerde waarnemingen kleiner is. Het een en ander is afhankelijk van de vormparameter van de gebruikte Weibull-verdeling. Indien deze waarde groter is dan 1, dan neemt de spreiding in de geëxtrapoleerde waarnemingen af.

Van metingen in het veld is bekend dat de spreiding toe neemt naarmate er meer extremere combinaties gemeten worden. Dit spreekt dus het bovenstaande verkregen beeld tegen. Aanbevolen wordt om te onderzoeken hoe de vormparameter zo gekozen kan worden dat het natuurlijke verloop van de puntenwolk behouden blijft.

Bovenstaande bewerking gebeurt voor de gehele dataset van waterstand, golfhoogte, piekperiode en windsnelheid. In bijlage 4.3 staan de originele alsmede de geëxtrapoleerde waarden uitgezet voor elke richting. De piekperiode en de significante golfhoogte zijn beiden uitgezet tegen de waterstand.

4.3.5. Asymptotische afhankelijkheid

Een uitgangspunt van de methode ‘De Haan’ is de aanname van asymptotische afhankelijkheid. Dit wil zeggen dat de correlatiestructuur tussen de afzonderlijke stochasten behouden dient te blijven en niet uitwaaien bij extreme waarden (zoals in onderstaande figuur is te zien).



Figuur 4-8; Asymptotische afhankelijkheid en asymptotische onafhankelijkheid (bron: Van Marle, J.G.A., 2000)

De linker figuur geeft een voorbeeld van asymptotische afhankelijkheid en de rechter figuur een voorbeeld van asymptotische onafhankelijkheid.

Asymptotische afhankelijkheid kan worden getoetst door de conditionele kans uit te zetten in de lineair exponentiële ruimte. Indien de limiet van deze conditionele kans naar 0 gaat is er sprake van asymptotische onafhankelijkheid [De Valk, C.F., 1996].

In het geval van twee stochasten kan de conditionele kans als volgt uitgewerkt worden, met als voorbeeld de waterstand en de golfhoogte:

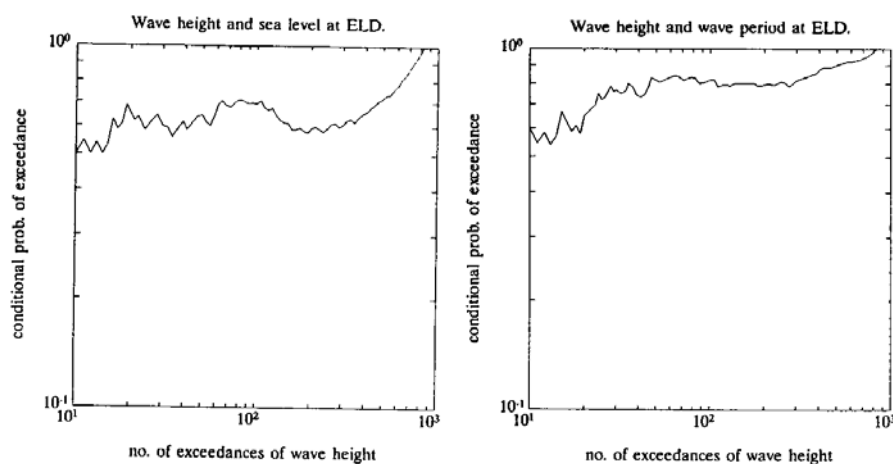
$$P[Hm_0 > a | h > a] \text{ is gelijk aan: } \frac{P[Hm_0 > a \cap h > a]}{P[h > a]} \quad \text{met: } P[h > a] = P[Hm_0 > a] \quad (4-5)$$

Als de limiet van deze conditionele kans voor a naar een positieve waarde gaat is er sprake van asymptotische afhankelijkheid, indien de limiet naar nul gaat van asymptotische onafhankelijkheid.

Bij volledig afhankelijke stochasten is de conditionele kans gelijk aan 1 (alle puntenparen liggen op de diagonaal). Bij gedeeltelijke afhankelijkheid kan de asymptotische afhankelijkheid aangetoond worden door middel van de helling ξ [De Valk, C.F. en Zitman, T.J., 1992]. Deze is gelijk aan:

$$\xi = \frac{\ln(P[Hm_0 > a | h > a])}{\ln(P[h > a])} \quad (4-6)$$

In geval van asymptotische afhankelijkheid zal de helling van ξ gelijk zijn aan nul. In het geval van asymptotische onafhankelijkheid zal de helling tussen een waarde 0 en 1 liggen. In onderstaande figuur zijn twee voorbeelden gegeven waaruit ξ op te maken is en waarbij asymptotische afhankelijkheid aangetoond lijkt.



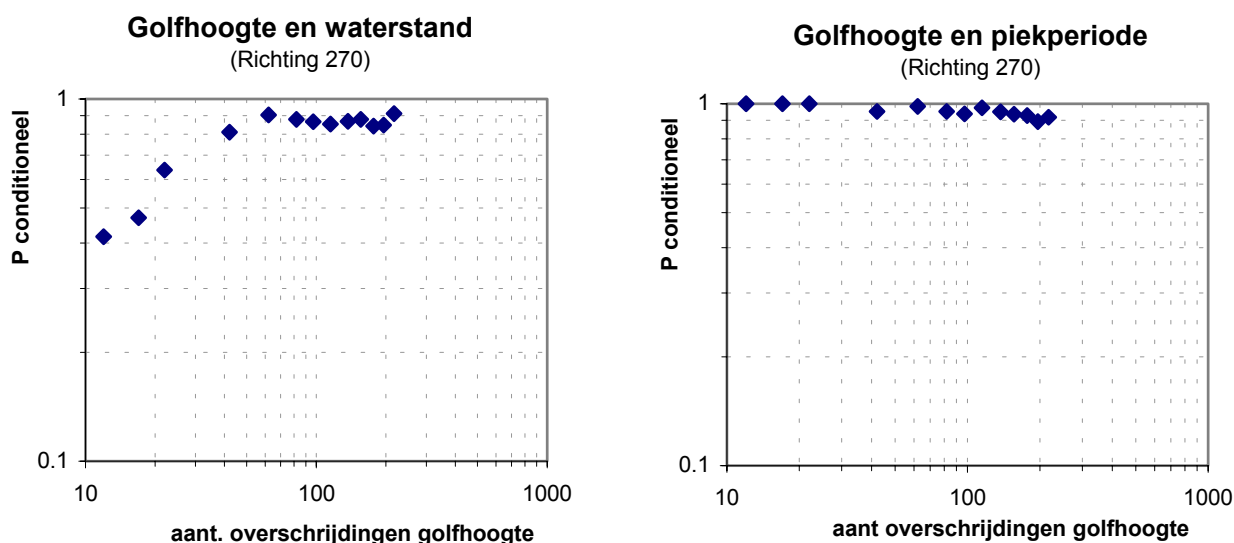
Figuur 4-9; Controle asymptotische afhankelijkheid (bron:De Valk, C.F., 1996)

De helling vertoont een grotere waarde voor hoge overschrijdingsfrequenties van de golfhoogte (lage golfhoogte) en daarna een grote fluctuatie over een groot gebied (aantal overschrijdingen tussen de 50 en 600) wat een helling gelijk aan nul

verondersteld. De helling ongelijk aan nul voor kleine overschrijdingsfrequenties (hoge golven) duidt op onnauwkeurigheid als gevolg van het kleine aantal waarnemingen bij dergelijke frequenties.

Bovenstaande tests zijn gedaan voor omnidirectionele stormdata (richtingsonafhankelijk). De resultaten van het toenmalig onderzoek waren bemoedigend wat wil zeggen dat de aanname van afhankelijkheid bevestigd werd. Het vermoeden was dat bij richtingsafhankelijke statistiek de afhankelijkheid (nog) duidelijker werd wat een afhankelijkheidsaanname voor de onderlinge stochasten aannemelijk maakt.

Aan de hand van de gepresenteerde (richtingsafhankelijke) stormdata zijn een aantal van deze afhankelijkheidsplots gemaakt. De nauwkeurigheid wordt daarbij beperkt door het (zeer) kleine aantal waarnemingen. Doordat er een opdeling is gemaakt over de richtingen blijven er na de opdeling datasets over met een grootte van 108, 206, 218, 139 en 56 punten (resp. richtingen 210, 240, 270, 300 en 330). Desalniettemin zullen de resultaten van de stormen uit de richting 270 worden gepresenteerd, de overige plots staan in bijlage 4.4 gegeven. Voor de richting 270 staat in de onderstaande figuur de combinaties golfhoogte en waterstand, en golfhoogte en piekperiode getekend:



Figuur 4-10; Asymptotische afhankelijkheid, richting 270

Uit de figuren blijkt dat aan de hand van vergelijking van figuur 1 en bovenstaande figuren de aanname van afhankelijkheid gerechtvaardigd lijkt. Als opmerking wordt in [Van Marle, J.G.A., 2000] genoemd dat bij een gering aantal overschrijdingen van de golfhoogte de uitkomsten onbetrouwbaar zijn. Het veronderstelde horizontale verloop in de curves in figuur 4.9 is gegeven voor aantallen overschrijdingen van de golfhoogten in het gebied tussen 50 en 600. Dit gebied is door het kleine aantal waarnemingen bij deze uitwerking beperkt gebleven tussen de 50 en 110, afhankelijk van de richting. Om een goede toetsing van de afhankelijkheid te krijgen zouden de datasets dus groter dienen te zijn.

Bij de verdere uitwerking is er van asymptotische afhankelijkheid uitgegaan voor wat betreft windsnelheid, waterstand, piekperiode en golfhoogte. Aanbevolen wordt om onderzoek te doen naar deze verbanden met langere meetreeksen zodat een grotere betrouwbaarheid van de veronderstellingen kan worden verkregen.

4.4. De Haan en duinafslag

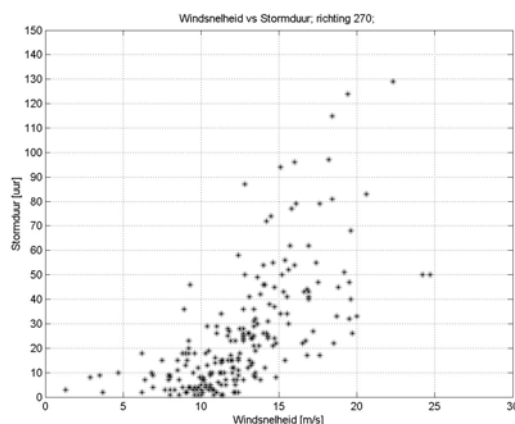
Het gebruik van de methode ‘De Haan’ voor de bepaling van de faalkans van de duinen stuit op een paar praktische problemen. De methode, zoals die in [Van Marle, J.M.A., 2000] beschreven staat, is ontwikkeld voor het berekenen van de faalkans van een dijkverdediging. Duinafslagberekeningen verschillen wezenlijk anders in een aantal aspecten.

In deze paragraaf komen de praktische problemen aan de orde, alsmede de aanpak die gevolgd is om te komen tot een oplossing voor deze problemen.. In paragraaf 4.4.1 en 4.4.2 wordt uitgewerkt hoe de stormduur met de methode De Haan meegenomen kan worden in de extrapolatie. Paragraaf 4.4.3 behandelt de aanpak die gevolgd is bij de extrapolatie van de dataset en hoe omgegaan is met de bepaling van de faalkans van de duinen.

4.4.1. Stormduur

Meer dan bij dijken geldt dat bij duinen de stormduur een belangrijke factor is voor het falen van de waterkering [Steetzel H.J., 1994,1999]. Tot op zekere hoogte geldt dat, hoe langer een storm duurt, des te meer duinafslag er zal plaatsvinden. In deze en de volgende paragraaf zal onderzocht worden of de stormduur ook meegenomen kan worden in de uitwerking volgens de methode ‘De Haan’. Aan de hand van de eerder gepresenteerde dataset (waarin ook stormduren opgenomen zijn) wordt naar een verdeling voor de stormduren gezocht zodat ook de extreme stormduren bepaald kunnen worden middels extrapolatie. Een toetsing van de afhankelijkheid van de stormduren is uitgevoerd om te onderzoeken of de stormduur volgens ‘De Haan’ berekend mag worden.

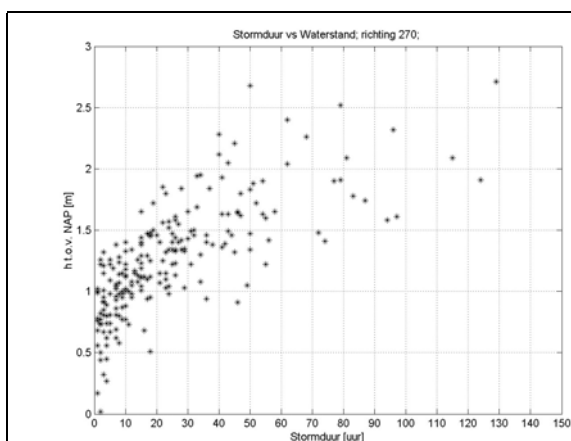
De dataset met stormen beslaan een periode van 18 jaar. Per storm is de stormduur opgenomen volgens het verschil van eindtijd notatie storm minus de begintijd notatie storm (zie bijlage 4.1 voor de voorwaarden van noteren van een storm). De stormperiode bevat dus het gehele stormverloop. In onderstaande figuur staan de stormduren tegen de (maximale) windsnelheden uitgezet voor de richting 270. Voor de overige richtingen wordt verwezen naar bijlage 4.5.



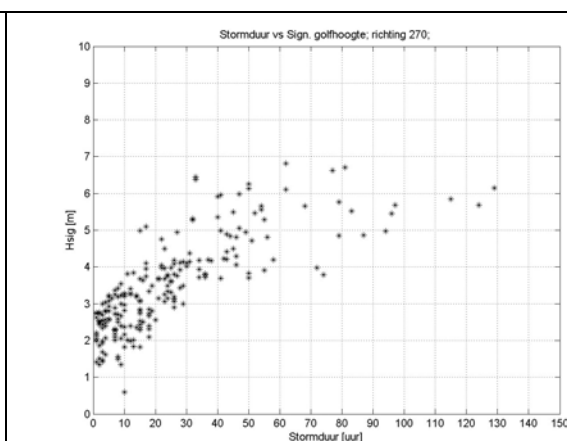
Figuur 4-11; Windsnelheid vs stormduur, richting 270

Het principe van de methode ‘De Haan’ is de afhankelijkheid van de afzonderlijke stormparameters met als motor de windsterkte. De stormduur zou dus meegenomen kunnen worden in de methode wanneer er een verband bestaat tussen de windsnelheid en de stormduur. De figuren in bijlage 4.5 laten een dergelijk verband zien, waarbij er wederom een opdeling in de richtingen is gemaakt. Duidelijk is wel dat er een verloop in de spreiding waar te nemen is. Voor de richting 210 en 330 is het de vraag of er genoeg datapunten zijn om van een verband te kunnen spreken. Aanbevolen wordt dan ook om nader onderzoek te doen met behulp van langere meetreeksen.

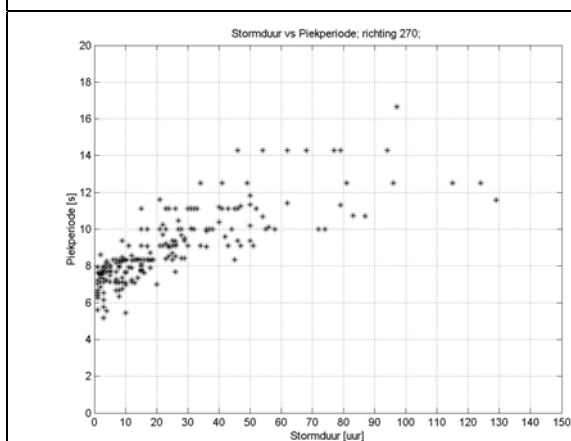
Vanuit een andere optiek zou echter de stormduur ook als motor kunnen werken. De verhoogde waarden voor waterstand, piekperiode en golfhoogte zijn dan het gevolg van een hoge windsnelheid en een lange stormduur. In onderstaande figuren staan de stormparameters uitgezet tegen de stormduur voor de richting 270.



Figuur 4-12; Waterstand vs stormduur, richting 270



Figuur 4-13; Sign. golfhoogte vs stormduur, 270

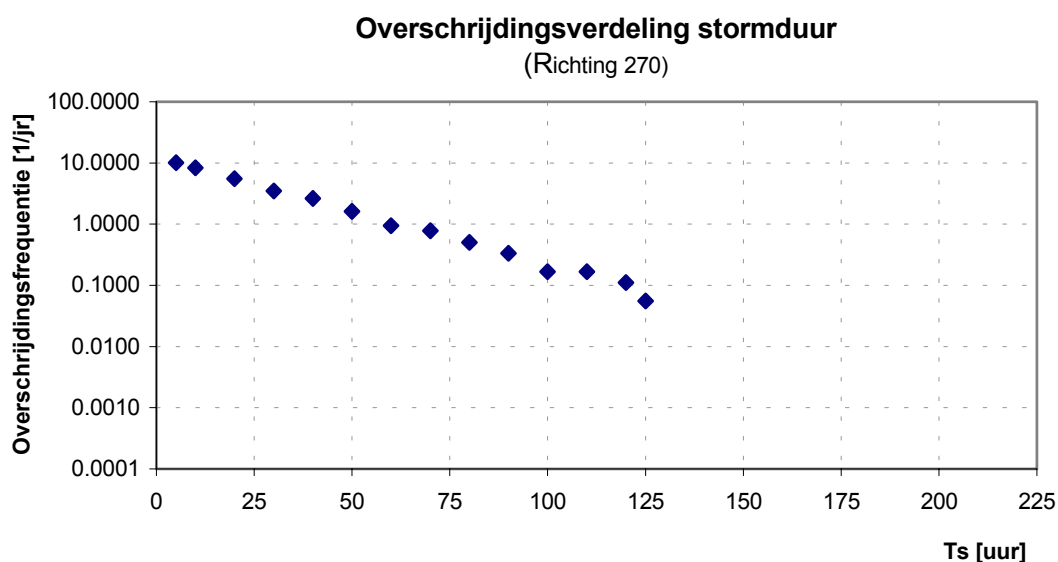


Figuur 4-14; Piekperiode vs stormduur, 270

Voor de andere richtingen dan 270 zijn deze figuren opgenomen in bijlage 4.6. Uit deze figuren valt op te maken dat er een aanmerkelijk verband bestaat tussen de stormduur en de overige parameters. Dit in tegenstelling tot eerdere onderzoeken die gedaan zijn naar verbanden tussen de stormduur en de waterstand. In [van Weerden, JJ, e.a., 1987] wordt geconcludeerd dat stormduur en opzet boven een drempel van 1,5 m onafhankelijk van elkaar zijn. In [De Valk, C.F. en Steetzel, H.J., 1997] wordt geconcludeerd dat stormduren en opzetten boven de 1,5 m niet geheel onafhankelijk

zijn. In deze onderzoeken is echter geen opdeling gemaakt over de richtingen zodat een grote spreiding het gevolg is.

Per richting zijn overschrijdingsfrequenties opgesteld van de stormduren welke in bijlage 4.7 opgenomen zijn. Als voorbeeld staat hieronder de (overschrijdings)-frequenties gegeven van de stormduren uit de richting 270:



Figuur 4-15; Overschrijdingsfrequenties stormduur, richting 270

Zoals duidelijk is, kan de duur van een extreme storm aanzienlijke waarden aannemen. De frequenties van de opgetreden maximale stormduren zijn als gevolg van de korte meetreeks beperkt gebleven tot 0,06 per jaar (eens in de 18 jaar).

4.4.2. Extreme stormduren

Om wat te kunnen zeggen over de extreme stormduren, worden deze aan de hand van de figuren van de overschrijdingsfrequenties van de stormduur, gefit aan een verdeling. De voorkeur voor een bepaalde verdeling ligt bij de (conditionele) Weibull-verdeling. Conditioneel slaat op het feit dat er een drempelwaarde is waarvoor de dataset gefilterd wordt. Deze verdeling is ook gebruikt om de richtingsafhankelijke afzonderlijke extreme waarden verdelingen van de golfhoogte, waterstand, piekperiode en windsnelheden te fitten (Bijlage 4.2).

De (frequentie)vorm van de verdeling ziet er als volgt uit:

$$F(T_s) = p_c \cdot \exp\left(-\left(\frac{T_s}{\sigma}\right)^\alpha + \left(\frac{\omega}{\sigma}\right)^\alpha\right) \quad (4-7)$$

Hierin is:

| | | |
|----------|---|--------|
| T_s | = stormduur | [uur] |
| $F(T_s)$ | = frequentie van overschrijding van de stormduur | [1/jr] |
| ω | = drempelwaarde (ondergrens) voor de stormduur | [uur] |
| p_c | = overschrijdingsfrequentie van de drempel ω | [1/jr] |
| σ | = schaalparameter van de verdelingsfunctie | [uur] |
| α | = vormparameter van de verdelingsfunctie | [-] |

Per richting is een conditionele Weibull-verdeling gefit. In onderstaande figuur staat het resultaat voor de stormduren gegeven voor de richting 270. De resultaten van de overige richtingen staan in bijlage 4.7. Een beperking van deze uitwerking is het kleine aantal waarnemingen per richting. Om een betere fit te maken van de verdelingen wordt aanbevolen om dezelfde exercitie met grotere meetreeksen over te maken. Dit houdt in dat er over een langere tijd gemeten dient te zijn.

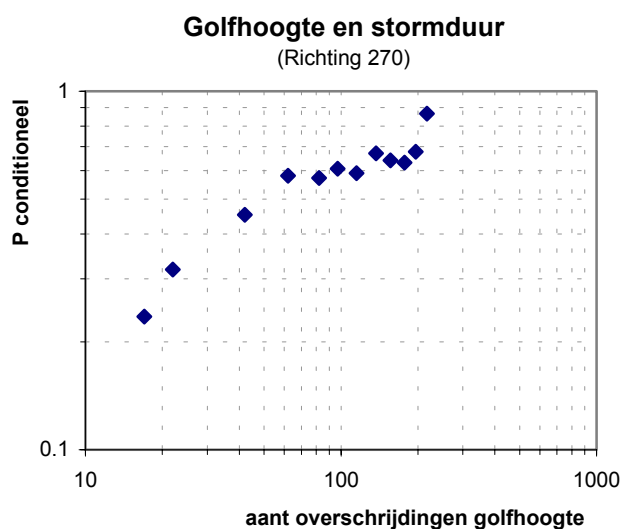
Figuur 4-16; Weibull-verdeling stormduur, richting 270

De parameterwaarden van de verschillende Weibull-verdelingen staan in onderstaande tabel weergegeven.:

| | Stormrichting | | | | |
|----------|---------------|-------|-------|-------|-------|
| | 210 | 240 | 270 | 300 | 330 |
| ω | 30,00 | 50,00 | 70,00 | 50,00 | 25,00 |
| | 0,72 | 0,78 | 0,78 | 0,83 | 0,94 |
| σ | 17,00 | 30,00 | 35,00 | 34,00 | 25,00 |
| α | 1,15 | 1,35 | 1,30 | 2,00 | 2,30 |

Tabel 4-1; Weibull parameters stormduren, alle richtingen

De bovenstaande verdelingen kunnen gebruikt worden om de extreme stormduren te bepalen bij de uitwerking volgens de methode ‘De Haan’. Naast de golfhoogte, waterstand en piekperiode zal dan ook de stormduur geëxtrapoleerd worden. Er dient dan echter wel getest worden op asymptotische afhankelijkheid. In onderstaande figuur staat de afhankelijkheidsplot gegeven voor de stormduur uit de richting 270, voor de overige richtingen wordt naar bijlage 4.8 verwezen.



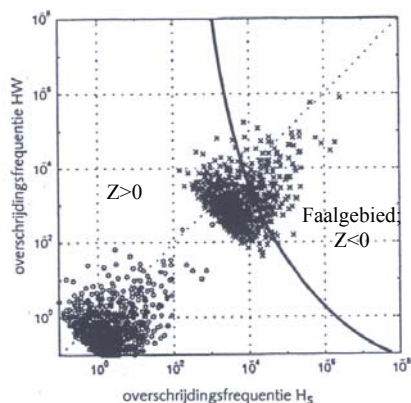
Figuur 4-17; Controle asymptotische afhankelijkheid stormduur, richting 270

Dezelfde conclusie als voor de afhankelijkheidsplots in paragraaf 4.3.5 wordt getrokken: De datasets zijn te klein om een goede uitspraak te doen over de afhankelijkheid van de stormduur. Een langere meetreeks zou uitkomst kunnen bieden. Voor de verdere uitwerking zal toch aangenomen worden dat de stormduur ook met de methode De Haan geëxtrapoleerd mag worden.

4.4.3. ‘De Haan’ voor duinafslag

Bij het toepassen van de methode ‘De Haan’ voor het bepalen van de faalkans van een dijkverdediging wordt de extrapolatie van de dataset gebaseerd op het faalgebied van de dijk. Er is volledige bekendheid over welke combinaties leiden tot het falen van de dijk. Bij de extrapolatie wordt daar rekening mee gehouden door er voor te zorgen dat er een 50-tal stormen in het faalgebied komen te liggen zodat er een betrouwbare

schatting gegeven kan worden omtrent de faalfrequentie. In de volgende figuur staat een extrapolatie getekend waarbij het faalgebied is opgenomen:



Figuur 4-18; Extrapolatie in het faalgebied

De faalfrequentie wordt vervolgens berekend met [De Valk, C.F., 1996]:

$$\mu = \frac{\kappa}{\Delta} \cdot \exp(-\lambda) \quad (4-8)$$

Hierin is:

| | | |
|-----------|--|--------|
| μ | = de faalfrequentie | [1/jr] |
| κ | = het aantal stormen dat in het faalgebied ligt | [-] |
| Δ | = de lengte van de periode van de waarnemingen (18 jaar) | [jr] |
| λ | = de verschuiving in het exponentiële domein | [-] |

Indien nu de methode op het falen van de duinkering betrokken wordt vormt zich een probleem. Ten eerste is het faalgebied onbekend. Er zijn per raai geen combinaties van stormparameters bekend die zullen leiden tot het falen van de duinenkering. Het bepalen van de verschuivingsfactor wordt hiermee dus bemoeilijkt. Ten tweede zal naar alle waarschijnlijkheid de faalfrequentie van de duinen kleiner zijn dan orde 10^{-5} . (In hoofdstuk 3 zijn volgens de huidige leidraad afslagsommen gemaakt waaruit blijkt dat de faalfrequentie kleiner is dan 10^{-5}) Het falen van het duin zal dus een kleinere frequentie hebben en is dus veiliger dan de leidraad eist. Om bovenstaande problemen het hoofd te bieden is voor de volgende aanpak gekozen:

Omdat de leidraad voorschrijft dat een duin als primaire waterkering in Noord Holland een faalfrequentie mag hebben van 1 maal per 100.000 jaar bij een waterstands overschrijdingsfrequentie van eens per 10.000 jaar wordt er na gestreefd om voor deze frequentie een zo goed mogelijke schatting te maken van de te verwachten duinafslag. Bij de extrapolatie van de dataset is een dermate grote verschuivingsfactor gebruikt zodat er een aanzienlijk aantal geëxtrapoleerde stormen een golfhoogte-waterstandscombinatie hebben die volgens de afzonderlijke extreme waarden statistiek een overschrijdingsfrequentie hebben van 10^{-4} per jaar. De toegepaste verschuivingsparameter bedraagt dan 2500.

Het aantal geëxtrapoleerde stormen bedraagt 727. Elk van deze stormen zal een duinafslag veroorzaken. Met behulp van de verschillende duinafslagen en van

vergelijking 4.8 en de verschuivingsfactor kan dan een frequentieverdeling van de duinafslag gemaakt worden waarbij een goede schatting van de duinafslag wordt verkregen bij overschrijdingsfrequenties waaraan de duinverdediging dient te voldoen. Een faalkans wordt dus niet berekend omdat de verschuivingsfactor hiervoor waarschijnlijk te klein zal zijn. Geen van de geëxtrapoleerde stormen zal dus tot het falen van een duin leiden.

4.5. Diep water randvoorwaarden

In bovenstaande paragrafen is uit de doeken gedaan hoe met de methode De Haan gekomen kan worden tot een dataset van extreme stormen. In het volgende hoofdstuk worden deze stormen doorgerekend naar de kust, zodat de invloed van de buitendelta meegenomen wordt in de randvoorwaarden voor de duinafslagberekeningen. Het is te tijdrovend om elke geëxtrapoleerde storm door te rekenen naar de kust toe (727 stormen). Er is er voor gekozen om per windrichting het aantal stormen op te delen in drie klassen om de rekentijd te beperken. Deze klassen worden opgesteld aan de hand van de afzonderlijke extreme waarden statistiek van de stormparameters. Zo worden bij voorbeeld de klasse M stormen gevormd door de stormen waarvan de parameters afzonderlijk allemaal een overschrijdingsfrequentie van 10^{-4} of kleiner hebben. Voor een klasse S storm geldt een overschrijdingsfrequentie van $0,5 \cdot 10^{-3}$ en voor een klasse E storm 10^{-3} . Elke klasse heeft dan een aantal stormen die in deze klasse vallen en een aantal stormen die parameters hebben, zodanig dat ze er buiten vallen. Deze opdeling voldoet in principe aan volledige afhankelijkheid van de onderlinge parameters. De uitwerking van deze exercitie staat uitgewerkt in bijlage 4.9 waar per klasse ook het aantal overschrijdingen opgenomen zijn van stormen met meer extreme stormparameters dan de klassengrenzen. In onderstaande tabel staat per windrichting de verschillende klassen opgenomen. Deze stormen zullen dus als invoer gaan dienen voor de berekening van de ondiep water randvoorwaarden.

| klasse | parameter | Stormrichting | | | | |
|--------|-----------|---------------|--------|--------|--------|--------|
| | | 210 | 240 | 270 | 300 | 330 |
| M | u [m/s] | 34.87 | 37.60 | 38.90 | 37.74 | 33.21* |
| | H | 6.95 | 8.61 | 9.32 | 9.45 | 9.67 |
| | Tp [s] | 12.54 | 14.22 | 15.5 | 16.47 | 16.87 |
| | h [m] | 1.99 | 3.04 | 3.97 | 4.22 | 4.2 |
| | | 134,65 | 176,68 | 227,87 | 113,74 | 68,47 |
| S | u [m/s] | 33.05 | 35.50 | 36.59 | 35.35 | 31.22 |
| | Hm0 [m] | 6.52 | 8.08 | 8.80 | 8.90 | 9.06 |
| | Tp [s] | 11.94 | 13.55 | 14.81 | 15.7 | 16.05 |
| | h [m] | 1.86 | 2.77 | 3.64 | 3.87 | 3.80 |
| | | 117,03 | 157,07 | 202,75 | 105,24 | 63,52 |
| E | u [m/s] | 32.21 | 34.53 | 35.53 | 34.25 | |
| | Hm0 [m] | 6.32 | 7.84 | 8.55 | 8.64 | |
| | Tp [s] | 11.67 | 13.24 | 14.49 | 15.35 | |
| | h [m] | 1.80 | 2.66 | 3.49 | 3.71 | |
| | | 83,06 | 117,96 | 153,20 | 101,36 | |

Tabel 4-2; Diep water randvoorwaarden

* Voor de richting 330 worden er twee klasse M sommen gemaakt, 1 som met een significante golfhoogte van 9,67 meter en een som met een significante golfhoogte van 9,06 meter.

5. Ondiep-water golfrandvoorwaarden

5.1. *Inleiding*

In hoofdstuk 4 zijn extreme stormen gegenereerd. De golfparameters van deze stormen hebben betrekking op diep water condities. Door de interactie van de golven met de buitendelta ontstaan nieuwe randvoorwaarden op ondiep water bij de kust. Daarbij verschillen de randvoorwaarden per storm in de JARKUS-raaien.

In dit hoofdstuk worden de extreme stormen met behulp van het golfmodel SWAN doorgerekend naar de kust, waarna de ondiep water randvoorwaarden bepaald worden. Er wordt daarbij een verklaring gezocht voor het effect van de buitendelta op het golfveld.

In paragraaf 5.2 wordt het gebruikte golfmodel ‘SWAN’ geïntroduceerd. In paragraaf 5.3 komt de gebruikte modelschematisatie en de validatie van het model aan de orde. In paragraaf 5.4 worden de modelresultaten gepresenteerd en er wordt een verklaring gegeven voor deze resultaten. In hoofdstuk 5.5 worden de randvoorwaarden die benodigd zijn voor de duinafslag-berekeningen gepresenteerd.

5.2. *SWAN*

Met behulp van het golfmodel SWAN, versie 40.11 (stationair), worden de diep water randvoorwaarden omgerekend naar de ondiep water randvoorwaarden. SWAN is een wiskundig rekenmodel en staat voor Simulating WAVes Nearshore. Het model berekent op een 2-dimensionaal rooster het golfveld waarbij het volledig spectraal is, in zowel richting als frequentie [Holthuijsen, L.H., e.a., 2000]. Het model is in staat realistische schattingen te maken van golfparameters voor kustgebieden, meren en estuaria bij gegeven wind-, bodem- en stromingscondities en golfcondities op de rekenranden. De golfparameters worden berekend in het frequentiedomein, de belangrijkste zijn: de significante golfhoogte H_s , de golfperiodes T_p en de gemiddelde golfrichting.

Het model is gebaseerd op de energiebalans. Deze bestaat uit een energiebron, energiedissipatie en herverdeling van energie over de verschillende frequenties.

Als energiebron is de overdracht van windenergie naar golfenergie door middel van de sommatie van lineaire [Phillips, O.M., 1957] en exponentiele [Miles, J.W., 1957] windgroei. De energie-input is afhankelijk van de golffrequentie, golfrichting, windfrequentie en windrichting.

Energiedissipatie wordt bewerkstelligd door ‘whitecapping’, bodemwrijving en diepte geïnduceerd breken.

- Energiedissipatie als gevolg van whitecapping wordt voornamelijk bepaald door de golfsteilheid en wordt beschreven door [Hasselman, K., 1974] waarin de dissipatie een functie is van de totale hoeveelheid energie in het golfveld en een constante die afhankelijk is van de golfsteilheid.
- Energiedissipatie als gevolg van diepte geïnduceerd breken is een functie van de totale hoeveelheid energie in het golfveld en de brekerindex [Battjes en Stive, 1985].
- Energiedissipatie als gevolg van bodemwrijving is afhankelijk van het bodemmateriaal en de snelheid van een waterdeeltje als gevolg van de orbitaalbeweging.

De volgende golfvoortplantingsprocessen zijn opgenomen in SWAN:

- golfvoortplanting in de geografische ruimte
- refractie door bodem- en stromingsvariaties
- shoaling door bodem- en stromingsvariaties
- blocking en reflectie van golven door stroming

DiffRACTie en reflectie van golven zijn niet in het programma opgenomen.

5.3. Modelschematisatie

In deze paragraaf wordt uiteengezet hoe de berekeningen met het golfmodel SWAN opgezet zijn. Er wordt aandacht besteed aan de vertaling van de bodemgeometrie in het model, de opgelegde randvoorwaarden per storm en de validatie van het model.

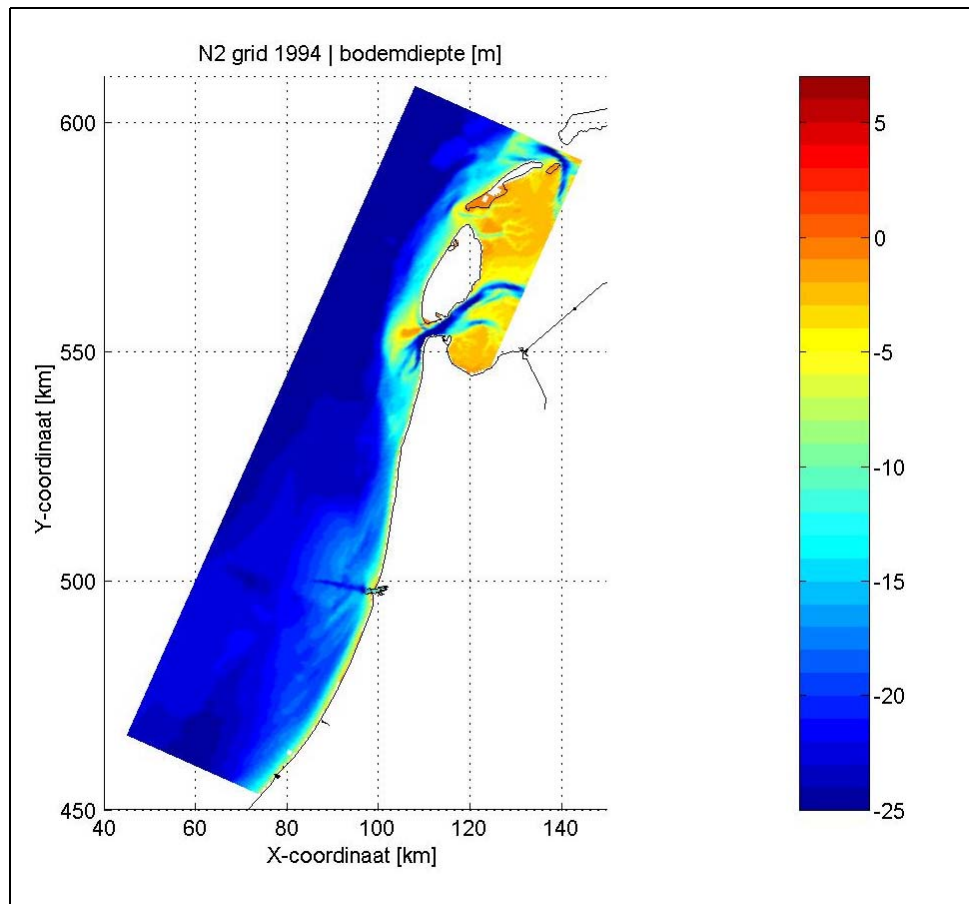
5.3.1. Bodemgeometrie en rekengrids

Het golfmodel SWAN maakt gebruik van bodemgrids en rekengrids. De resolutie van deze grids dient zodanig te zijn dat de mate van bodemveranderingen goed geschematiseerd kunnen worden door de rekengrids. In de uitwerking is voor elk rekenpunt 1 dieptepunt gegeven. Dus het rekengrid is even groot als het bodemgrid. In de verdere uitwerking zal dan ook gesproken worden over het grid.

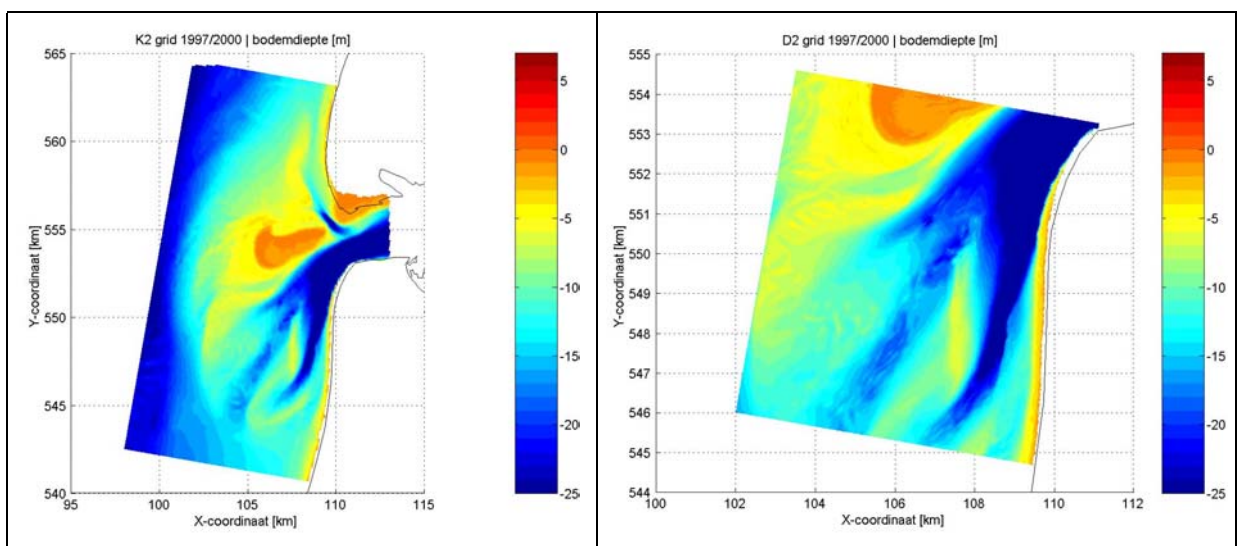
Het interessegebied aan de kust wordt begrensd door de JARKUS-raaien 210 t/m 708 (Bijlage 2.1). De randvoorwaarden die in het vorige hoofdstuk opgesteld zijn per storm, zijn opgelegd op diep water (NAP –20m). Om de rekestijd te beperken wordt er een ‘nestings’techniek gebruikt. Dit houdt in dat op plaatsen waar de geometrie vrij constant is (diep water), er gerekend wordt met een relatief grof grid. Op plaatsen waar de geometrie meer variabel is (interessegebied), wordt een rekenrooster met een fijner grid in het grove grid genest en wordt een nieuwe berekening gedaan waarbij de randvoorwaarden van deze berekening geleverd wordt door de uitkomsten van de berekening met het grove rekenrooster. De volgende schematisatie is toegepast:

Het grove grid heeft een resolutie van 500X500 m² en beslaat een groot deel van de Nederlandse kust (globaal van Vlieland tot Hoek van Holland). De golfparameters van de geëxtrapoleerde stormen worden op de zeewaartse randen opgelegd. Om de ondiepere gedeelten, waar meer variatie in de geometrie voorkomt, goed te modelleren wordt een rekenrooster met een resolutie van 100X100 m² gebruikt. Dit fijne grid wordt genest in het grove grid. In de nabijheid van de kust is een rekenrooster met een resolutie van 25X25 m² toegepast. Dit detailgrid wordt weer genest in het 100 m grid.

In de figuren 5-1 en 5-2 zijn de grids weergegeven met de bijbehorende bodems. De bodemgeometrie van het grove grid (N2 grid) is ontleend aan lodingen die uit 1994 stammen. Het fijne grid (K2 grid) beslaat een groot deel van de buitendelta en bestaat uit bodemgegevens die gemeten zijn in de periode 1997-2000. De dieptelijnen strekken zich uit tot ongeveer –15 m NAP. Het detailgrid (D2-grid) strekt zich zo’n zes km vanaf de kust uit en dekt het gebied van interesse af. De bodemgegevens van het detailgrid zijn ook ontleend aan metingen die uitgevoerd zijn in de jaren 1997-2000.



Figuur 5-1; N2-grid, resolutie 500X500m²



Figuur 5-2; K2-grid, (links), resolutie 100X100 m² en N2-grid (rechts), resolutie 25X25 m²

5.3.2. Randvoorwaarden

De inkomende golven op de modelrand van het grove grid worden (per klasse) opgegeven door middel van een golfspectrum. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen de diep-water-rand en de noord- en zuidrand van het rooster. Het golfspectrum op de diep water rand wordt opgelegd aan de hand van de geëxtrapoleerde stormparameters. De noord- en zuidrand van het rooster worden op diep water

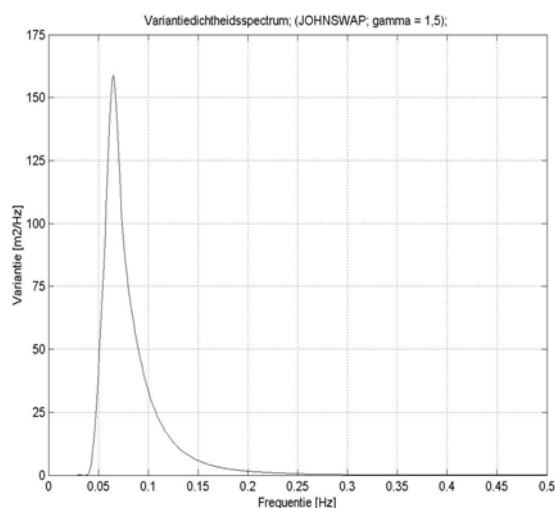
gemodelleerd met dezelfde waarden als de diep waterrand maar worden gereduceerd naar de kust toe. De piekperiode wordt daarbij niet gereduceerd omdat uit metingen blijkt dat de piekperiode nauwelijks afneemt naar de kust toe [Jacobse, J.J., 2000]. Het opgegeven golfspectrum is een JONSWAP-spectrum met een peak-enhancement factor (gamma) van 1,5. Deze waarde is voor Nederland gebruikelijk om het spectrum te beschrijven [expert judgement, Jacobse, J.J., Rijksinstituut voor Kust en Zee, 2003]. Dit spectrum heeft de volgende vorm:

$$E(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_{\text{piek}}}\right)^{-4}\right) \cdot \gamma \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{f - f_{\text{piek}}}{\sigma \cdot f_{\text{piek}}}\right)^2\right) \quad (5-1)$$

Hierin is:

| | | |
|-------------------|-----------------------------|--|
| $E(f)$ | = variantie dichtheid | $[m^2s]$ |
| α | = energieschaalcoëfficiënt | $[=0,0081]$ |
| g | = zwaartekrachtsversnelling | $[= 9,81 \text{ m/s}^2]$ |
| f | = frequentie | $[Hz]$ |
| f_{piek} | = piekfrequentie | $[= 0,1308 * g * 1/U_{10}]$ |
| σ | = piekbreedtecoëfficiënt | $[= 0,07 \text{ voor } f \leq f_{\text{piek}} \text{ en } 0,09 \text{ voor } f > f_{\text{piek}}]$ |
| γ | = gamma | $[=1,5]$ |

Het spectrum is in theorie alleen afhankelijk van de opgegeven windsnelheid, die verweven zit in f_{piek} . In SWAN wordt echter direct met de piekperiode van het spectrum gerekend. Deze wordt bij de berekeningen dus ontleend aan de geëxtrapolerde stormen. Het resultaat op de rand voor een storm uit de richting 270:



Figuur 5-3; JONSWAP-spectrum, opgegeven op de rekenrand

In de bijlage 5.1 staat voor elke storm het variantiedichtheidsspectrum gegeven die op de rekenrand is opgegeven. Bij de berekeningen is geen stromingsveld opgenomen. Hierdoor worden de fysische processen die het gevolg zijn van deze stromingen verwaarloosd.

5.3.3. Validatie van het (SWAN)model

Bij het gebruik van het model SWAN dient de betrouwbaarheid van het model in acht genomen te worden. Uitvoer van het programma dient vergeleken te worden met metingen in het veld. Echter, metingen in het veld zijn niet voorhanden in de nabijheid van het Zeegat van Texel.

Voor de validatie van het model wordt derhalve verwezen naar het onderzoek [Jacobse, J.J., e.a., 2002] waarin de betrouwbaarheid van de golfcondities, berekend met SWAN 40.11 wordt onderzocht aan de hand van metingen tijdens stormen in verschillende gebieden (Haringvliet, Friesche zeegat, Zeegat Norderney en meetsite Petten).

De belangrijkste resultaten van dit onderzoek staan hieronder gepresenteerd.

Significante golfhoogte (H_s):

Gemiddeld genomen wordt de significante golfhoogte voor de verschillende gebieden met SWAN goed berekend. De gemiddelde afwijking voor de significante golfhoogte wordt iets overschat (5 en 8 % voor resp. Haringvliet en Friesche zeegat). Voor de meetsite Petten wordt de significante golfhoogte onderschat (6%). Voor het Zeegat Norderney ligt de berekende waarde voor de significante golfhoogte echter 30 % hoger dan de gemeten waarde. De verklaring voor dit resultaat wordt gegeven in het feit dat het meetpunt achter een eiland ligt.

Piekperiode (T_p):

Voor gebieden waar enkeltoppige spectra aanwezig zijn (dit zijn vooral de diepere locaties op de Noordzee) lijkt SWAN de piekperioden redelijk te voorspellen. In gebieden waar meertoppige spectra aanwezig zijn wijken de berekende resultaten sterk af van de gemeten waarden. Er is een grote spreiding aanwezig. Meertoppige spectra komen voor in gebieden waar zowel deiningsgolven als lokaal opgewekte windgolven aanwezig zijn. Dit zou dus het geval zijn bij het zeegat van Texel waar de diep-water golven redelijk ver uit de kust breken op een delta en er zowel deining als windgroei in het spectrum aanwezig zijn.

SWAN 40.11 voor het zeegat van Texel

Indien we het bovengaand onderzoek betrekken op het gebruik van SWAN 40.11 voor de berekening van de golfvelden ter plaatse van het zeegat van Texel, met dezelfde instellingen als voor de berekeningen van de meetsite Petten, wordt er van uitgegaan dat de voorspelling van de significante golfhoogte voldoende zal zijn. Bij stormen komend uit de richting 330 (NW) zou er een overschatting van de voorspelde golfhoogte verwacht kunnen worden daar het interessegebied in de luwte ligt van de Noorderhaaks. De situatie is vergelijkbaar met Norderney.

De voorspelling van de piekperiode zal zwak zijn omdat op de voordelta een meertoppig spectrum zal ontstaan als gevolg van het lokale windveld alsmede de aanwezigheid van deiningsgolven.

5.4. Resultaten

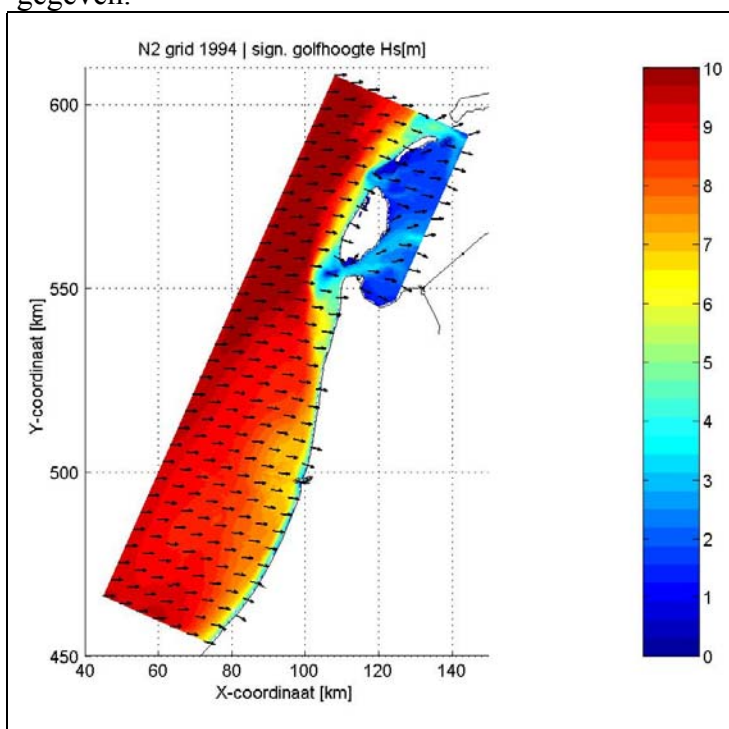
In deze paragraaf zullen de resultaten besproken worden van de berekeningen die met het golfmodel SWAN zijn gemaakt. De effecten van de buitendelta op het golfveld zullen zowel ruimtelijk gepresenteerd worden als lineair (langs een JARKUS-raai).

De resultaten worden van grof naar fijn gepresenteerd. Eerst zal aan de hand van de uitvoer van de grove grids de verschillen in de Nederlandse kust bekeken worden voor wat betreft golfaanval op de duinen. Vervolgens wordt de golfaanval ter plaatse van het Zeegat van Texel besproken aan de hand van het fijne grid. Als laatste wordt aan de hand van de uitvoer van het detail grid het golfveld besproken dat van belang zal zijn bij het uitwerken van de duinafslagberekeningen ofwel de randvoorwaarden van die berekeningen.

5.4.1. Golfaanval Nederlandse kust

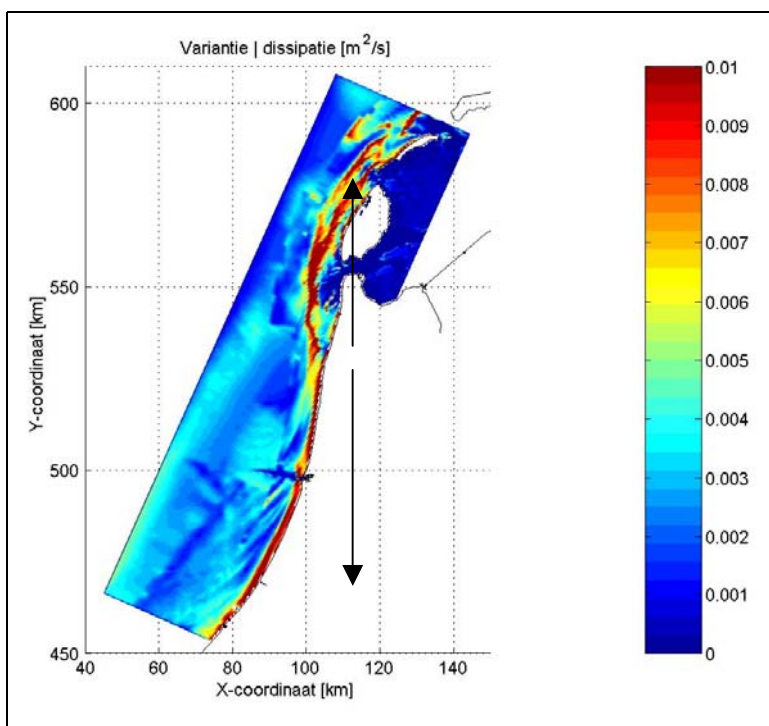
Het grove grid beslaat een groot deel van de Nederlandse kust. In bijlage 5.2 staan voor stormen uit verschillende richtingen de uitvoer gegeven van dit grove grid. De uitvoer van de berekeningen laat zien hoe de golfaanval voor stormen uit verschillende richtingen zich manifesteren.

Aan de hand van een storm zal nu de golfaanval op de Nederlandse kust besproken worden. In de onderstaande figuur staat de ruimtelijke ontwikkeling van de golfhoogte en golfrichting voor een klasse M storm uit de richting 270^0 (westenwind) gegeven.



Figuur 5-4; Significante golfhoogte, richting 270, grove grid

Bij deze berekening bedraagt de randvoorwaarde voor de significante golfhoogte in het grove grid 9,3 m. Deze golfhoogtes worden weergegeven door de rode kleur. Golfbreking gaat gepaard met energiedissipatie van het golfveld. De energiedissipatie van het golfveld kan gevisualiseerd worden door de variantiedissipatie uit te zetten in de ruimte. De variantie is recht evenredig met de golfenergie. Voor de bovenstaande berekening staat de variantiedissipatie ruimtelijk uitgezet in onderstaande figuur:



Figuur 5-5; Variantiedissipatie, richting 270, grove grid

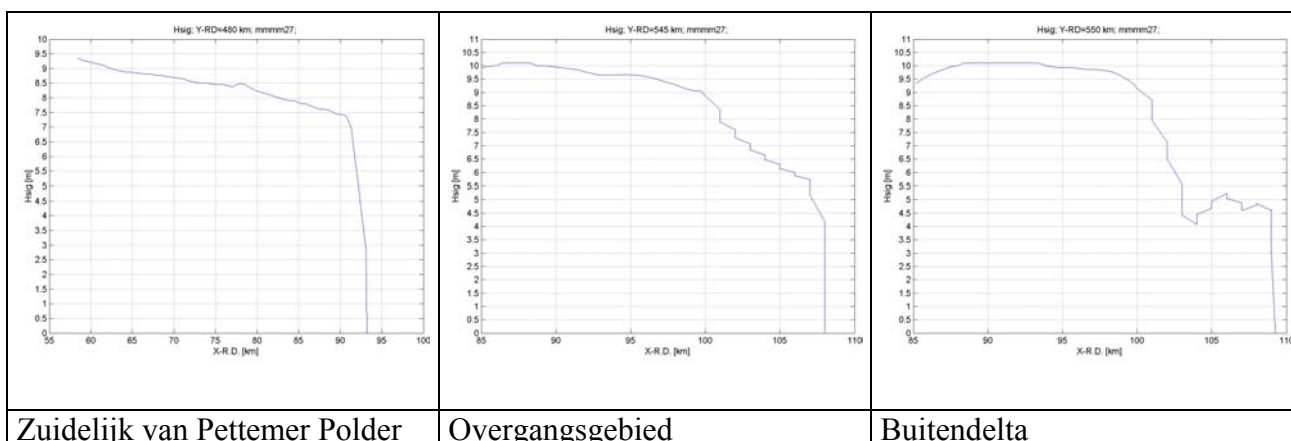
De variantiedissipatie laat een duidelijke scheiding in drie gebieden zien voor de Hollandse kust.

Het eerste gebied bevindt zich ten zuiden van de Pettemer polder (R.D coördinaat Y = 525 km), waar de invloed van de buitendelta nihil is, aangegeven met de zuidelijk gerichte pijl. In dit gebied vindt de meeste variantiedissipatie plaats in de brekerzone van het strand.

Het tweede gebied bevindt zich ter plaatse van de buitendelta en een deel van de Texelse kust, aangegeven met de noordelijk gerichte pijl. In dit gebied vindt de meeste variantiedissipatie plaats op de ondieptes enkele kilometers voor de kust. Zodoende zal de golfaanval op de duinen ter plaatse minder zijn. Er ligt als het ware een beschermende boog om de kustlijn die gevormd wordt door de buitendelta en de ondieptes voor de Texelse kust.

Het derde gebied ten slotte, is het overgangsgebied wat tussen de noordelijke en de zuidelijke pijl in ligt. De variantiedissipatie in dit gebied is dan ook een mengvorm van de twee andere gebieden, uitgedrukt in een geleidelijk verloop van de significante golfhoogte.

In onderstaande figuren zijn de resultaten van de ontwikkeling van de significante golfhoogte voor de verschillende gebieden uitgezet (als representatieve raaien voor de gebieden):



Figuur 5-6; Significante golfhoogteontwikkeling langs de Hollandse kust

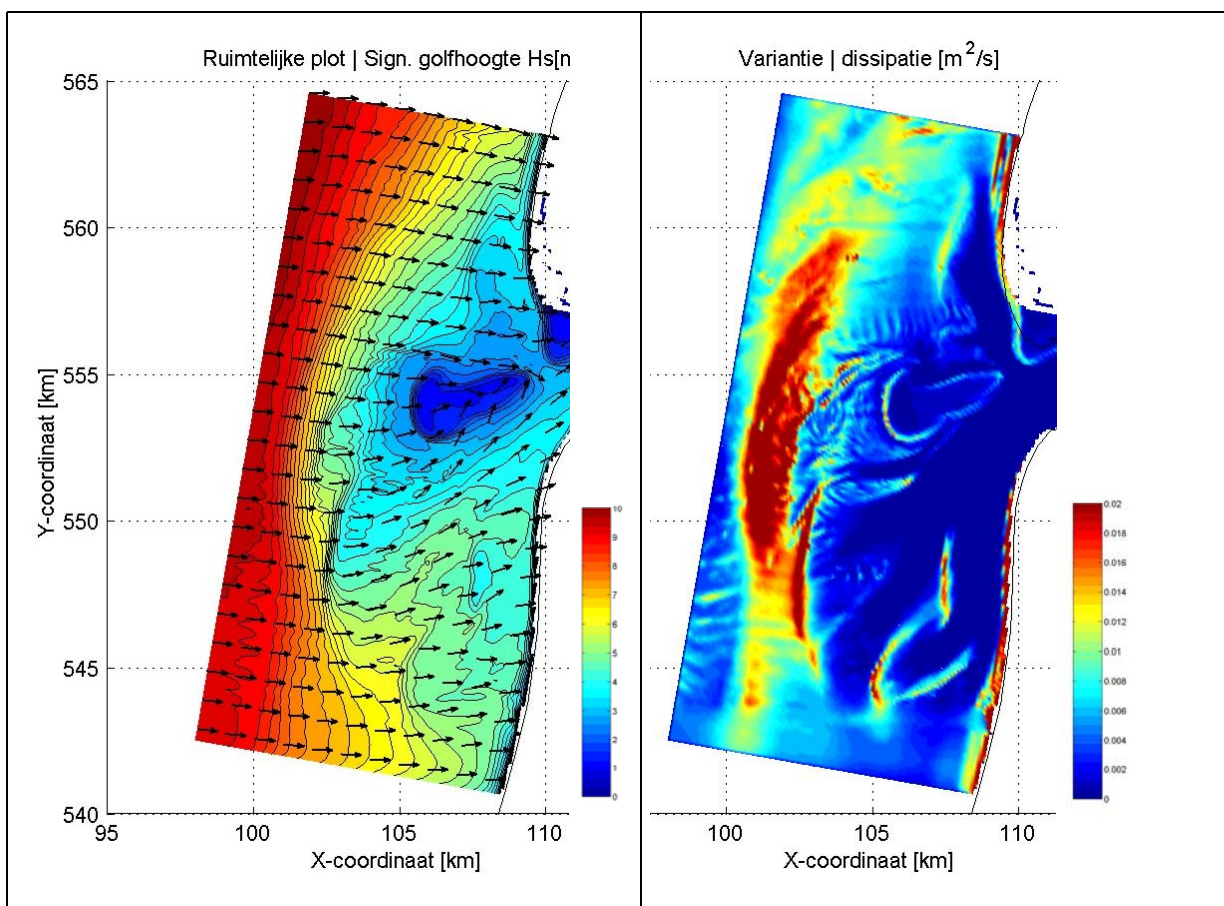
Duidelijk is dat ter plaatse van de buitendelta de golven al ver voor de kust over een relatief kleine afstand breken op de ondieptes. Op de voordelta bedraagt de significante golfhoogte in dit geval ongeveer 5 m. Onder de kust breken deze golven dan weer op het strand. Ter zuiden van de Pettemer Polder breken de meeste golven op het strand en daar vindt dan ook de meeste variantiedissipatie plaats. In het overgangsgebied neemt de significante golfhoogte op 7 km voor de kust geleidelijk af tot ongeveer 5 m ter plaatse van de brekerlijn. Het getrapte verloop in de figuren is het gevolg van de uitvoerpunten die 500 m uit elkaar liggen (grove grid).

5.4.2. Golfaanval buitendelta.

In de vorige paragraaf kwam naar voren dat in het gebied van de buitendelta de golven al ver voor de kust breken op de ondieptes. Achter deze platen worden echter ook weer nieuwe golven opgewekt als gevolg van het gedefinieerde windveld. De combinatie van windveld en geometrie van de bodem zal voor de verschillende stormrichtingen verschillende golfvelden genereren. De kust zal in geval van noordwester stormen bij voorbeeld meer beschermd worden als gevolg van de ligging van de Noorderhaaks dan in het geval met zuidwester stormen. Ook de ligging van de geulen speelt een belangrijke rol in het voortplantingsproces van de golven. Bij zuid westerstormen zullen het Nieuwe Schulpengat en het Schulpengat als golfgeleider werken omdat de oriëntatie van deze geulen dan dezelfde is als van de stormrichting. Hoge golven zullen zich dan tot dicht onder de kust kunnen voortplanten.

Voor alle stormrichtingen zijn de significante golfhoogtes en de variantiedissipatie in ruimtelijke plots getekend in bijlage 5.3. Uit deze ruimtelijke plots is op te maken dat het zeegat van Texel inderdaad als een grote golfbreker werkt. Ter plaatse van de kust is de golfhoogte met zo'n 40 % afgenomen (ten opzichte van de diep water golfhoogte).

In de onderstaande figuur staat de uitvoer gegeven van een storm uit de richting 270. Getekend zijn de significante golfhoogte en de variantiedissipatie. Uit de figuur met de significante golfhoogte valt op te maken dat ter plaatse van de buitendelta de significante golfhoogte niet meer bedraagt dan ongeveer 5 m.



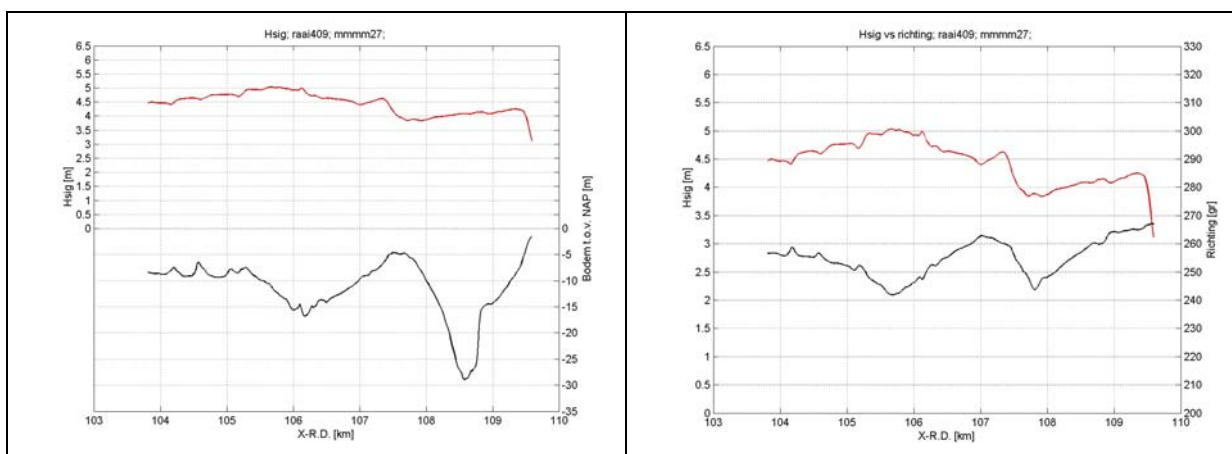
Figuur 5-7; Significante golfhoogte (links) en Variantiedissipatie (rechts), richting 270

Uit de figuur blijkt tevens dat als gevolg van refractieverschijnselen de getijdegeul het Schulpengat werkt als een golfgeleider. Dit is te zien aan de richting van de golven die in het Schulpengat gelijk zijn aan de richting van de as van het Schulpengat.

5.4.3. Golfveld in de JARKUS-raaien

Om de duinafslag te berekenen wordt de golfhoogteontwikkeling bekeken in de verschillende JARKUS-raaien van het interessegebied. De informatie is daarbij uit de uitvoer van het detail grid gehaald. De JARKUS-raaien zijn hierbij verlengd, van 900 m tot 6 km.

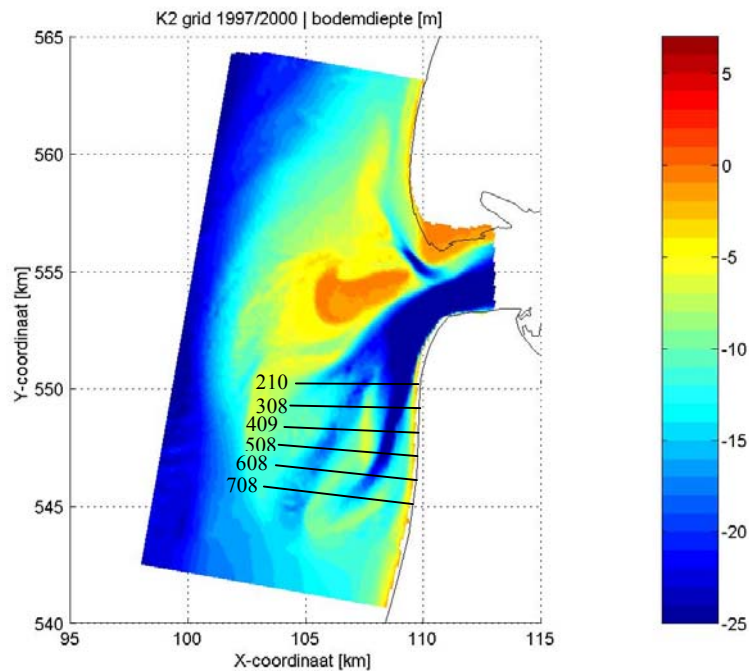
In de bijlage 5.4 en 5.5 staat per stormklasse de golfhoogte per raai en per stormrichting uitgezet met onderliggende bodem. Als voorbeeld staat hieronder het resultaat van de significante golfhoogte getekend voor een storm uit de richting 270 voor raai 409:



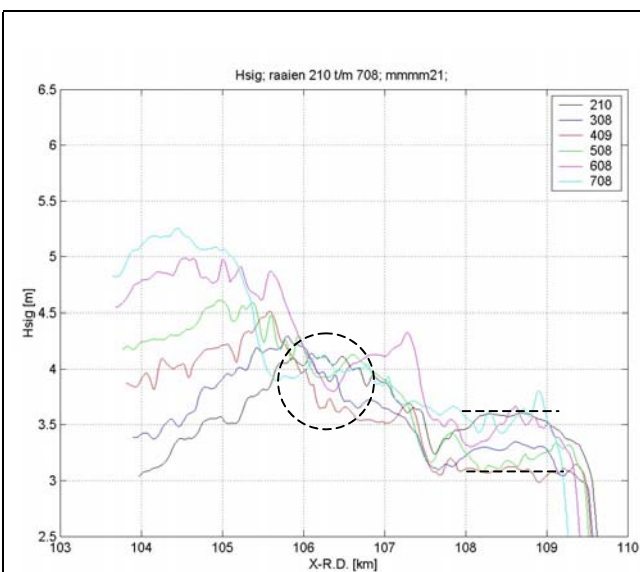
Figuur 5-8; Significante golfhoogte(rood) raai 409, richting 270, uitgezet tegen bodem (zwart, links) en golfrichting (zwart, rechts)

De zwarte lijn geeft respectievelijk het bodemprofiel en de richting weer. De rode lijn geeft de ontwikkeling van de significante golfhoogte weer richting de kust. Op de horizontale as staat de x-waarde van het profiel uitgezet in het RD-stelsel. De landwaartse begrenzing wordt gevormd door de RSP-lijn. De zeewaartse begrenzing is bepaald door de grootte van het detailgrid. Op de diep waterrand is in het grove grid een golfhoogte van 9,32 m opgegeven. Uit figuur 5-8 blijkt dat op zo'n 5 km uit de kust ($X(RD) = 104$ km) de significante golfhoogte zo'n 4,5 m bedraagt en een grillig verloop laat zien langs de raai. De golfhoogte in het Nieuwe Schulpengat vertoont een licht stijgende lijn richting de kust, dit als gevolg van bodemgeometrie en golfopwekking. Enkele honderden meters uit de kust breken de golven op het strand wat te zien is aan de plotseling sterk dalende lijn van de significante golfhoogte. Hier begint de brekerzone.

In onderstaande figuren staan de resultaten van de geëxtrapoleerde stormen gegeven voor alle richtingen. Per storm staat de significante golfhoogte uitgezet voor elke raai. Het doel van deze presentatie is het laten zien van de grote variatie van de significante golfhoogte in de langsrichting van de kust. Er zal ook gekeken worden op welke afstand uit de kust het mogelijk is om de randvoorwaarden voor de duinafslagberekeningen te nemen. Hieronder staan de raaien nog eens gegeven:



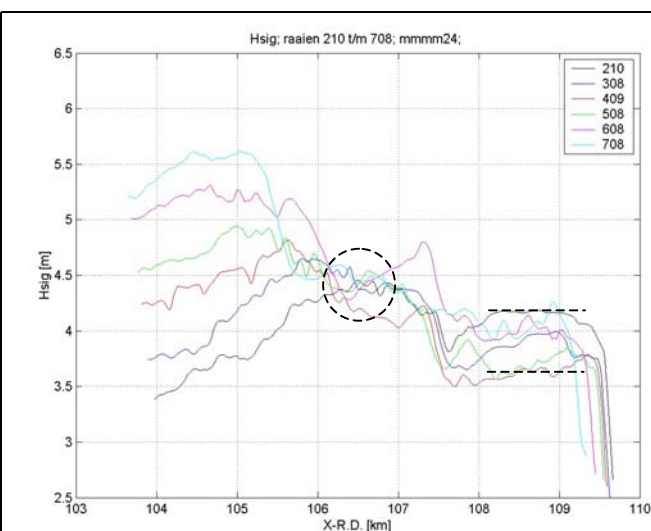
Figuur 5-9; Oriëntatie JARKUS-raaien



Stormrichting 210

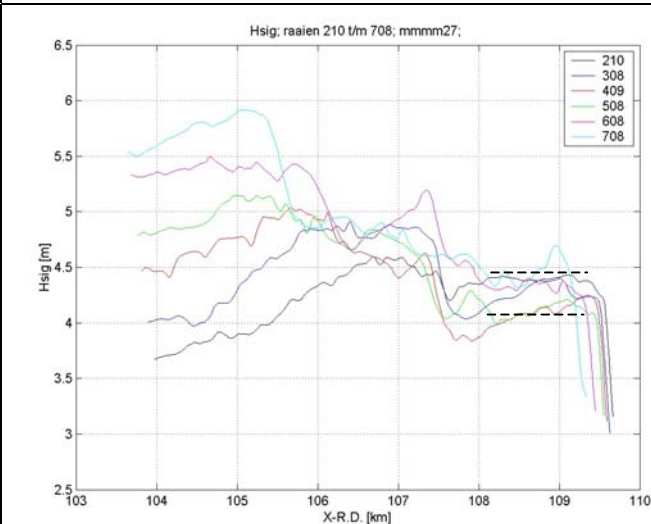
De ontwikkeling van de significante golfhoogte langs de kust voor een storm uit de richting 210 (ZZW). Tussen X-RD 108 en 109 bevindt de golfhoogte voor de verschillende raaien zich tussen een band van ongeveer een halve meter, aangegeven met een stippellijn. Opvallend is de ontwikkeling van de golfhoogte in profiel 210, waarin de golfhoogte t.p.v. het Nieuwe Schulpengat zo'n 40 cm hoger ligt dan op de voorliggende plaat. Dit zou het gevolg kunnen zijn van de golfgeleiding door het Nieuwe Schulpengat.

Ter plaatse van de cirkel ligt de golfhoogte binnen een smallere band. Dit als gevolg van de ligging van de Bollen van Kijkduin. Het algehele beeld is een grote variatie van de golfhoogte in de verschillende raaien.



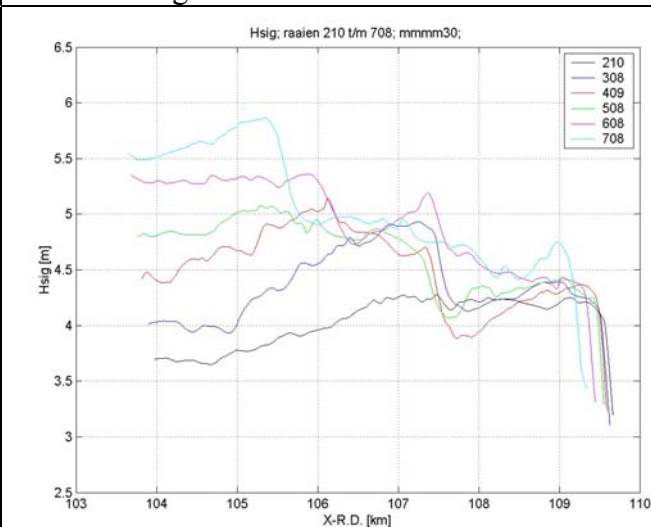
Stormrichting 240

De ontwikkeling van de significante golfhoogte langs de kust voor een storm uit de richting 240 (WZW). Er is weer een groot verloop te zien tussen de onderliggende raaien. Tussen 108 en 109 bedraagt het verschil zo'n 0,5 m. De golfhoogte vlak voor de kust is in raai 210 het hoogst, wat waarschijnlijk het gevolg is van de golfgeleidende werking van het Schulpengat. Ter plaatse van 106.5 is het verschil in golfhoogte weer minimaal. Daar heeft de golfhoogte in de raaien 608 en 708 een dalende trend omdat daar de overgang van geul naar plaat zich manifesteert. De golfhoogte in de raaien 210 t/m 408 vertonen een stijgende trend omdat t.p.v. 106.5 de overgang is van een plaat naar de geul.



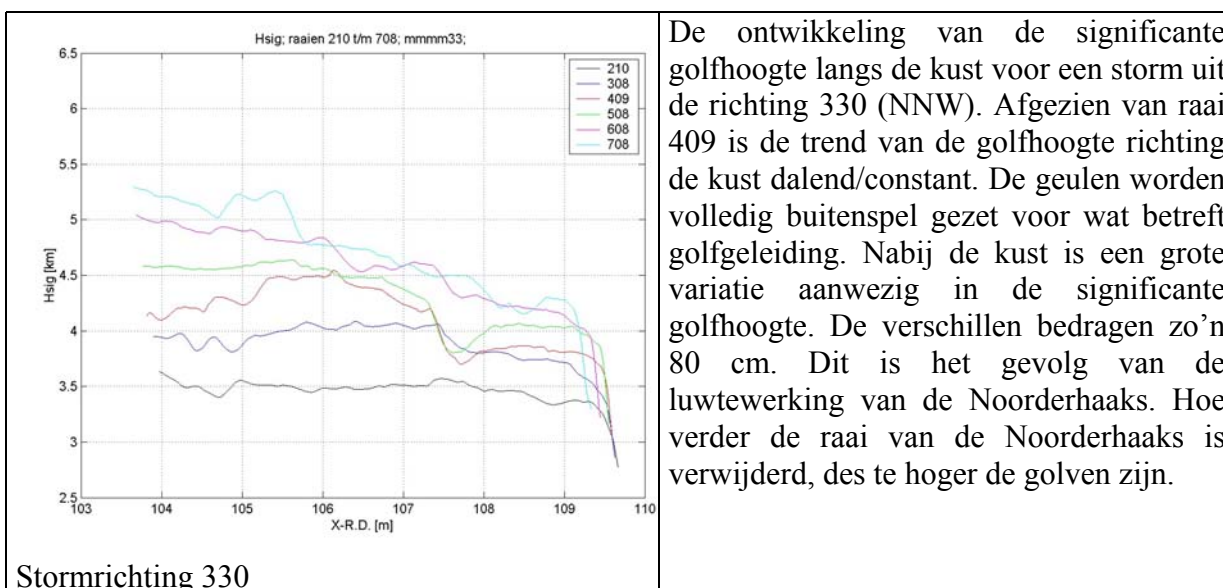
Stormrichting 270

De ontwikkeling van de significante golfhoogte langs de kust voor een storm uit de richting 270 (W). Het verloop van de golfhoogte nabij de kust (108-109) van de verschillende raaien is kleiner dan bij stormen uit de richting 210 en 240. Dit is waarschijnlijk het gevolg van de loodrechte ligging van de geulen op de windrichting waardoor de afschermende werking van de buitendelta beter tot zijn recht komt en er minder golfgeleiding door de geulen plaatsvindt. Raai 708 ligt buiten de band van een halve meter en vertoont nabij de kust nog een piekje in de golfhoogte.



Stormrichting 300

De ontwikkeling van de significante golfhoogte langs de kust voor een storm uit de richting 300 (WNW). Nabij de kust zijn de verschillen klein. Afgezien van raai 708 bevinden alle raaien zich in een band van 30 cm vlak voor de brekerzone. De afschermende werking van de buitendelta komt hier duidelijk naar voren. De geulassen worden afgeschermd zodat deze niet als golfgeleider fungeren.



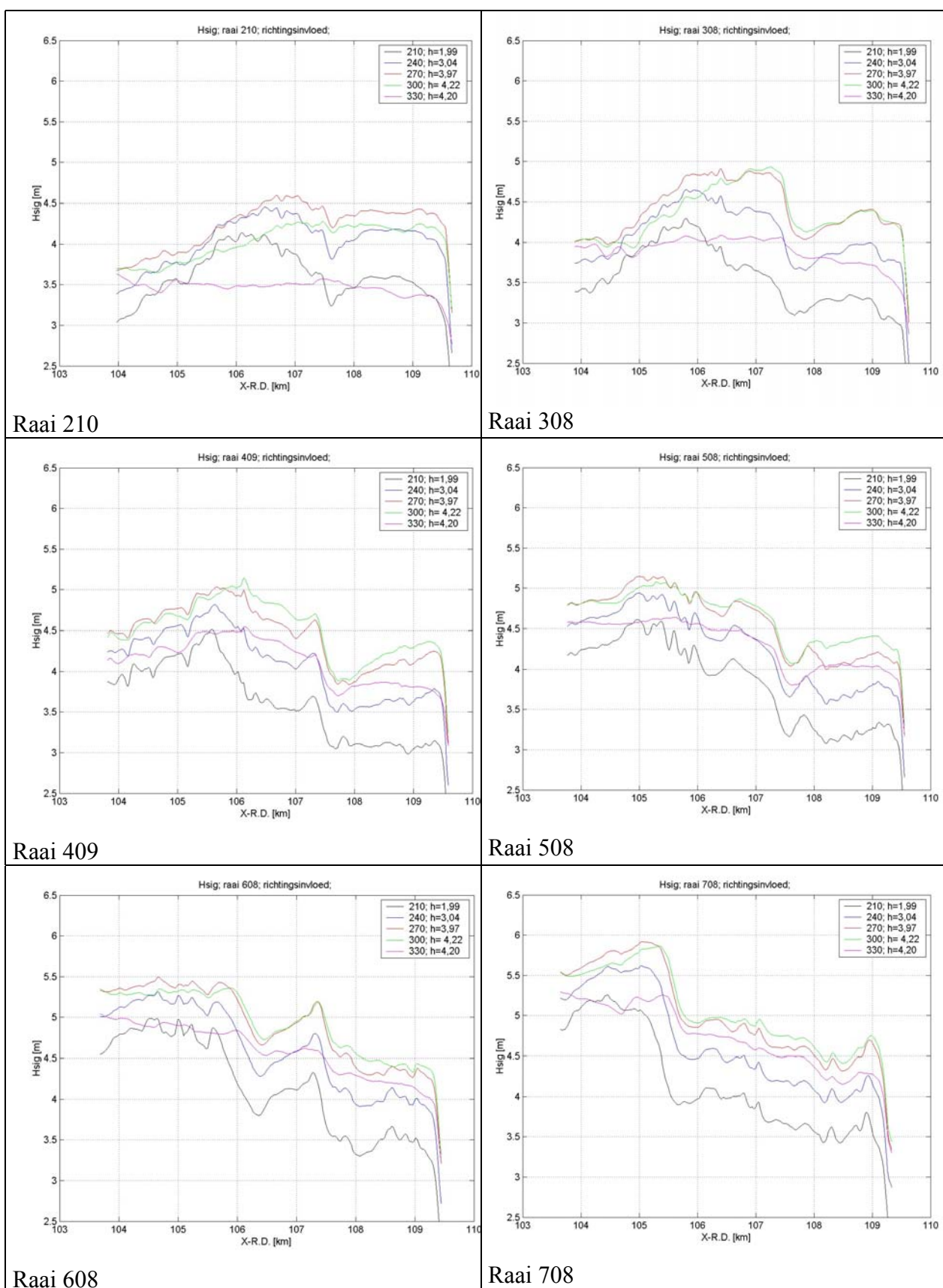
Figuur 5-10; Ontwikkeling significante golfhoogte in verschillende raaien bij verschillende stormen

De bovenstaande figuren maken duidelijk dat de ontwikkelingen van de significante golfhoogte voor de verschillende raaien langs de kust voor een zelfde storm sterk variëren. Afhankelijk van de stormrichting worden verschillende raaien verschillend belast. Bij stormen uit de richting NW worden de zuidelijke raaien het zwaarst getroffen. De Noorderhaaks werkt voor de noordelijke profielen als een golfreductor. Bij stormen uit de richting ZW kunnen de geulen een rol gaan spelen als golfgeleider, wat nadelig is voor de noordelijke raaien omdat daar de geulen relatief dicht onder de kust komen. Stormen uit de richting ZW hebben echter lagere waterstanden dan uit de richting NW zodat het golfgeleidend effect geen grote gevolgen heeft voor de aanliggende kust.

Voor de bepaling van de plaats van het onttrekken van de ondiep water randvoorwaarden geldt dat in het algemeen de variatie op zee ter hoogte van X-RD 104 het grootst is waarna de golfhoogten in de verschillende raaien iets convergeren. In de nabijheid van de brekerzone (X-RD- 108-109) blijft de variatie binnen een band van ongeveer 0,5 m met uitzondering van de storm uit NNW-richting. Deze variatie zal bij duinafslagberekeningen ook in beschouwing genomen moeten worden.

5.4.4. Invloed van geometrie op variatie in golfhoogte in een raai.

Stormen uit verschillende richtingen vormen allen een verschillend golfbeeld onder de kust. In onderstaande figuren is het effect van extreme stormen uit verschillende richtingen uitgezet voor de verschillende raaien. De opgelegde stormen zijn klasse M stormen, ze hebben allen dezelfde kans van voorkomen. Elke storm heeft derhalve een eigen waterstand die is opgegeven in de legenda.



Figuur 5-11; Invloed stormrichting op significante golfhoogte in een raai

Uit de bovenstaande figuren volgt per raai welke storm de meeste golfaanval zal veroorzaken in die raai. De Noorderhaaks en het Schulpengat spelen hierin een

belangrijke rol. Stormen uit de richting 330 sorteren weinig effect in de raaien 210 t/m 409. Deze raaien hebben duidelijk profijt van de luwtewerking van de Noorderhaaks. In het algemeen vormen de stormen uit de richting 270 en 300 de grootste belasting qua golfhoogte voor de raaien. Voor raai 210 speelt de richting 240 ook een belangrijke rol. Bij een waterstand die een meter lager is dan een storm uit de richting 300 is de significante golfhoogte nabij de kust bijna even hoog. Dit wordt veroorzaakt door de evenwijdige ligging van het Schulpengat aan de windrichting (240). Het Schulpengat werkt als golfgeleider door de grotere diepte in de geul. Zo kunnen relatief hoge golven de kust bereiken.

5.4.5. Gevoeligheid golfhoogte

De significante golfhoogte voor de brekerzone wordt bepaald door de geometrie en het opgelegde windveld en de golfkarakteristieken op diep water. Uit de vorige paragrafen bleek dat de golven ver voor de kust al breken ten gevolge van de ondieptes ter plaatse. De combinatie van bodemdiepte, waterstand en brekerindex bepalen dan de golfhoogte op de voordelta. De golfhoogte voor de brekerzone wordt dus voor een belangrijk deel bepaald door de waterstand. Om te kijken of de waterstand alleen verantwoordelijk is voor de golfhoogte voor de brekerzone zijn er een paar aanvullende berekeningen gedaan. In onderstaande tabel staan de parameters van die berekeningen:

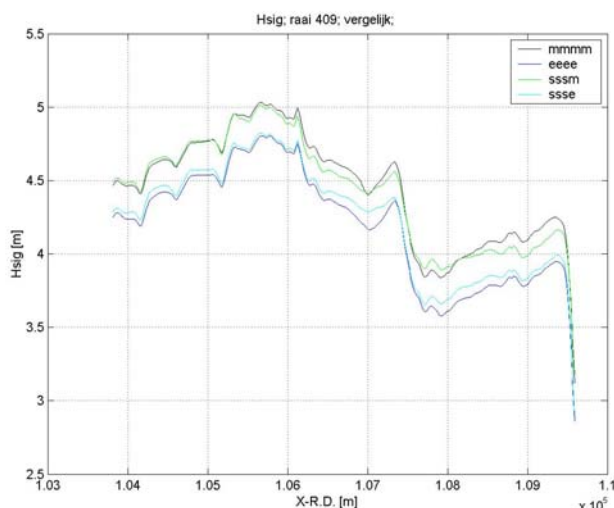
| Stormnr. | h [m] | T _{piek} | U _{wind} | H _{sig} |
|----------|-------|-------------------|-------------------|------------------|
| mmmm27 | 3,97 | 15,5 | 38,90 | 9,32 |
| sssm27 | 3,97 | 14,81 | 36,59 | 8,80 |
| eeee27 | 3,49 | 14,49 | 35,53 | 8,55 |
| ssse27 | 3,49 | 14,81 | 36,59 | 8,80 |

Tabel 5-1; Stormen ter vergelijking van de invloed van de waterstand

De opzet is als volgt; indien de waterstand zou gelden als enige bepalende factor tussen twee berekeningen, dan zouden de overige stormparameters geen invloed hebben en zou er geen verschil te zien zijn in de uitkomsten tussen de verschillende stormen indien er van dezelfde waterstand uitgegaan wordt.

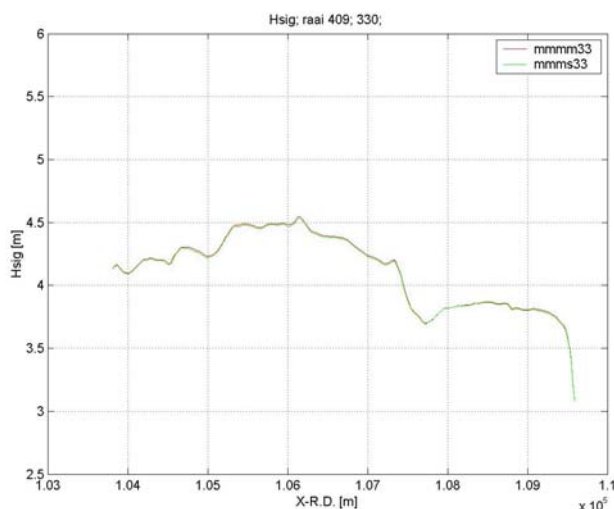
Als eerste worden de stormnummers sssm27 en ssse27 met elkaar vergeleken. Deze stormen hebben afgezien van de waterstand dezelfde stormparameters. Uit figuur 5.12 volgt dat het verschil in significante golfhoogte ongeveer 0,25 m bedraagt. Richting de kust neemt dit verschil iets af.

Om het effect van de overige parameters te bekijken worden vervolgens stormen met dezelfde waterstanden met elkaar vergeleken. Stormnummer mmmm27 en sssm27 worden met elkaar vergeleken en stormnummers eeee27 en ssse27.



Figuur 5-12; Invloed stormparameters op ondiep-water golfhoogte

Uit de figuur 5.12 blijkt dat de lijnen van mmmm27 en sssm27 niet over elkaar liggen. Dit geldt ook voor eeee27 en ssse27. Dit wil zeggen dat de overige parameters dan de waterstand ook van invloed zijn op de ondiep-water significante golfhoogte. Ter hoogte van km 104 liggen de verschillen niet ver uit elkaar. Vlak bij de brekerzone bedragen de verschillen zo'n 0,10 m. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de verschillen dus voornamelijk opgewekt worden door de verschillen in windsnelheid of piekperiode en niet door de opgegeven golfhoogte op diep water. Dit beeld wordt nog eens versterkt door alleen de resultaten te bekijken van twee stormen waarbij alleen de golfhoogte op de rand is veranderd. Het opgegeven verschil in significante golfhoogte (op diep water) bedraagt zo'n 0,60 m. In onderstaande figuur staat de uitvoer van twee stormen getekend uit de richting 330.



Figuur 5-13; Invloed diep-water golfhoogte op ondiep-water golfhoogte

De stormparameters staan in onderstaande tabel weergegeven:

| Stormnr. | h [m] | T _{piek} | U _{wind} | H _{sig} |
|----------|-------|-------------------|-------------------|------------------|
| mmmm33 | 4,20 | 16,87 | 33,21 | 9,67 |
| mmms33 | 4,20 | 16,87 | 33,21 | 9,06 |

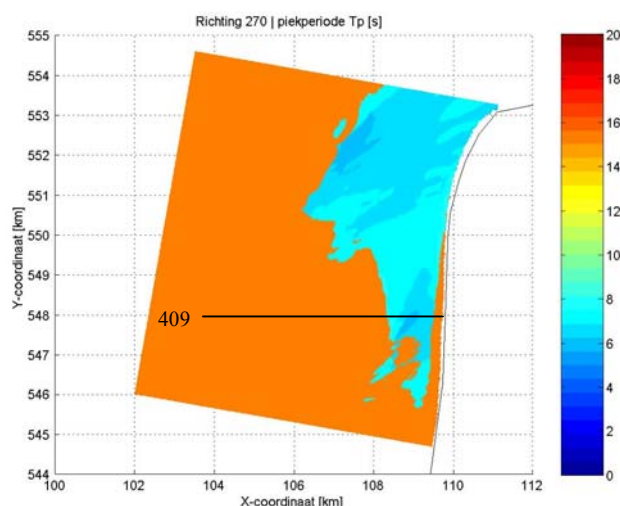
Tabel 5-2; Stormen ter vergelijking van de invloed van de diep water golfhoogte

De golfhoogte op de rand lijkt dus geen belangrijke rol te spelen voor de golfhoogte op ondiep water. Deze wordt dus bepaald door de waterstand, piekperiode en windsnelheid.

5.5. Piekperiode

De ontwikkeling van de piekperiode nabij de kust wordt behandeld aan de hand van het detailgrid waarna een verklaring voor de gevonden waarden gegeven wordt aan de hand van de spectrumontwikkeling in de verschillende raaien.

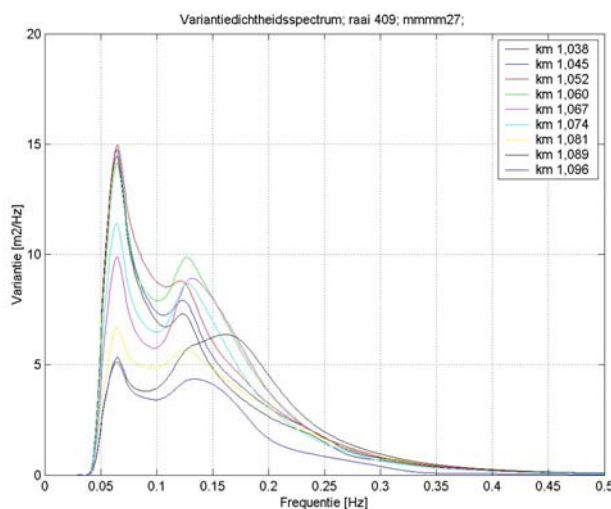
In de onderstaande figuur is de ruimtelijke verdeling weergegeven van de piekperiode in het detailgrid met een extreme storm uit de richting 270, in bijlage 5.6 staat voor elke M-klasse storm de ruimtelijke weergave van de piekperiode gegeven:



Figuur 5-14; Piekperiode, richting 270

De piekperiodeplot vertoont zeer abrupte veranderingen. Op enige afstand uit de kust is de piekperiode gelijk aan ongeveer 15,5 s. Dichter onder de kust verandert de piekperiode abrupt van 15 s naar 8 s, zonder overgang. Enkele honderden meters onder de kust is er een smalle strook aanwezig waar de piekperiode weer gelijk is aan 15 s. Een verklaring voor dit fenomeen zit in de definitie van de piekperiode. De piekperiode is gelijk aan de periode in het spectrum met de grootste variantie (zie figuur 5-15). In geval van een meertoppig spectrum wordt de piekperiode toegeschreven aan de hoogste top in het spectrum. Het gecombineerde spectrum van diep-watergolven en lokaal opgewekte windgolven geeft een twee-toppig spectrum. De diep-water golven zijn als gevolg van de geometrie van de buitendelta onderhevig aan energiedissipatie welke zich voornamelijk manifesteert als golfbreking. De piekperiode van dit diep-water spectrum blijft daarbij nagenoeg gelijk terwijl de totale hoeveelheid energie van het golfveld afneemt, het spectrum zakt als het ware in. De lokaal opgewekte windgolven hebben een lagere piekperiode dan de diep-water

golven. Wanneer de laagfrequente piek (deiningspiek) hoger is dan de hoogfrequente piek (lokaal windveld) zal de piekperiode worden gegeven door de diep watergolven (deining). Indien echter de hoog frequente piek boven de laag frequente piek komt zal dit de nieuwe piekperiode van het spectrum worden. Dit kan dus een abrupt verschijnsel zijn. In de volgende figuur wordt het een en ander duidelijk gemaakt:



Figuur 5-15; Spectrumontwikkeling richting de kust, richting 270, raai 409

In de figuur is de ontwikkeling van het golfspectrum uitgezet langs raai 409 voor een storm uit de richting 270. In bijlage 5.7 is voor elke M-klasse storm en elke raai de spectrum-ontwikkeling te zien. De verschillende kleuren van de spectra duiden op verschillende afstanden uit de kust (zie figuur 5.15). Uit de tekening is duidelijk de ontwikkeling van het tweetoppige spectrum waar te nemen. Op 6 km uit de kust (km 1.038) is een duidelijke laagfrequente piek aanwezig in het spectrum. Een klein hoog frequent piekje is aanwezig rond 0.13 Hz. Dichter onder de kust zakt de laagfrequente piek in en blijft de hoogfrequente piek tot op zekere afstand uit de kust nagenoeg gelijk. Op een bepaalde afstand uit de kust komt de hoog frequente piek boven de laag frequente piek waardoor de piekperiode verandert. Nog dichter onder de kust zakt ook deze hoog frequente piek in waardoor de laagfrequente piek weer de basis vormt voor de piekperiode. Dit verklaart ook de smalle band in figuur 5.14, waarin de piekperiode enkele honderden meters onder de kust weer 15,5 s is.

5.6. Randvoorwaarden duinafslagberekening

In paragraaf 5.4.3 is duidelijk gemaakt dat voor één storm de golfhoogte voor de verschillende raaien varieert. Bij het maken van duinafslagberekeningen wordt deze variatie meegenomen. De plaats van het onttrekken van de randvoorwaarden voor de duinafslagberekeningen met het programma DUROSTA, uit de uitvoer van het golfmodel SWAN, is aan verschillende beperkingen gebonden. SWAN is een twee dimensionaal golfmodel. Dit, in tegenstelling tot DUROSTA. DUROSTA is ook in staat om de golfvoortplanting en golfafname te berekenen maar doet dit in de 1-dimensionale ruimte, langs een raai. Het golfveld over de buitendelta uit SWAN is realistischer. Het is zaak SWAN zo in te zetten dat er zoveel mogelijk van de complexe bodemgeometrie meegenomen wordt. Voor de berekening van de duinafslag is het nodig dat de brekerzone in zijn geheel binnen de grens van het

DUROSTA-rekenrooster ligt omdat het breken van golven voor de duinafslag garant staat. De gekozen rand dient dus nabij de kust, maar buiten de brekerzone te liggen.

De randvoorwaarden die bij de duinafslagberekening gebruikt gaat worden zijn gebaseerd op de significante golfhoogte tussen X-RD 108 en de kust. Per raai en per storm wordt de hoogste waarde van de golfhoogte in dit interval gebruikt als randvoorwaarde (het verschil in golfhoogte is in dit interval per raai niet groot). Voor de ondiep-water-randvoorwaarde van de piekperiode is dezelfde randvoorwaarde als voor de diep-water piekperiode genomen. Omdat wordt verondersteld dat de piekperiode niet onderhevig is aan veranderingen richting de kust. Het verdient aanbeveling om onderzoek te doen naar voorspelling van spectra in gebieden met zowel een deiningspiek als een lokale golfpiek.

In de volgende tabel staan de ondiep water randvoorwaarden per storm aangegeven:

| Stormnr. | rich- ting [gr.] | H _{sig;diep} [m] | H _{sig;ondiep} raai 210 [m] | H _{sig;ondiep} raai 308 [m] | H _{sig;ondiep} raai 409 [m] | H _{sig;ondiep} raai 508 [m] | H _{sig;ondiep} raai 608 [m] | H _{sig;ondiep} raai 708 [m] | T _{piek} [s] |
|----------|------------------------|------------------------------|--|--|--|--|--|--|--------------------------|
| mmmm21 | 210 | 6,95 | 3,60 | 3,35 | 3,15 | 3,35 | 3,65 | 3,80 | 12,54 |
| ssss21 | 210 | 6,52 | 3,45 | 3,25 | 3,05 | 3,25 | 3,60 | 3,75 | 11,94 |
| eeee21 | 210 | 6,32 | 3,40 | 3,20 | 3,00 | 3,20 | 3,55 | 3,70 | 11,67 |
| mmmm24 | 240 | 8,61 | 4,20 | 4,00 | 3,80 | 3,85 | 4,15 | 4,25 | 14,22 |
| ssss24 | 240 | 8,08 | 3,95 | 3,80 | 3,60 | 3,65 | 3,90 | 4,15 | 13,55 |
| eeee24 | 240 | 7,84 | 3,85 | 3,70 | 3,50 | 3,55 | 3,85 | 4,05 | 13,24 |
| mmmm27 | 270 | 9,32 | 4,45 | 4,40 | 4,25 | 4,20 | 4,40 | 4,70 | 15,5 |
| ssss27 | 270 | 8,80 | 4,20 | 4,20 | 4,05 | 4,05 | 4,20 | 4,55 | 14,81 |
| eeee27 | 270 | 8,55 | 4,10 | 4,10 | 3,95 | 3,95 | 4,15 | 4,15 | 14,49 |
| mmmm30 | 300 | 9,45 | 4,25 | 4,40 | 4,35 | 4,40 | 4,50 | 4,75 | 16,47 |
| ssss30 | 300 | 8,90 | 3,95 | 4,15 | 4,15 | 4,20 | 4,30 | 4,50 | 15,70 |
| eeee30 | 300 | 8,64 | 3,80 | 4,00 | 4,00 | 4,10 | 4,20 | 4,40 | 15,35 |
| mmmm33 | 330 | 9,67 | 3,45 | 3,80 | 3,85 | 4,05 | 4,20 | 4,30 | 16,87 |
| mmms33 | 330 | 9,06 | 3,45 | 3,80 | 3,85 | 4,05 | 4,20 | 4,30 | 16,87 |
| ssss33 | 330 | 9,06 | 3,25 | 3,50 | 3,65 | 3,85 | 4,00 | 4,10 | 16,05 |

Tabel 5-3; Ondiep water randvoorwaarden

De golfrichting is in tabel 5.4 opgenomen. Deze wordt in DUROSTA opgegeven aan de rand van het rekenrooster als hoekverdraaiing ten opzichte van de oriëntatie van de desbetreffende raai. In de bijlage 5.4 staan naast de ontwikkeling van de golfhoogten ook de golfrichting gegeven (zie ook figuur 5.8). Uit de figuren blijkt dat als gevolg van refractie de golfrichting verandert. De in de tabel opgenomen waarde voor de golfrichting is onttrokken op dezelfde plaats als waar de golfhoogte onttrokken is, de nauwkeurigheid bedraagt 5 graden. In onderstaande tabel zijn alleen de stormen uit de klasse M opgenomen. De stormen uit de andere klassen (S en E-klasse) laten eenzelfde beeld zien met een afwijking die onder de 5 graden zit.

| Storm- richting [gr.] | Golf- richting raai 210 [gr] | Golf- richting raai 308 [gr] | Golf- richting raai 409 [gr] | Golf- richting raai 508 [gr] | Golf- richting raai 608 [gr] | Golf- richting raai 708 [gr] |
|-----------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 210 | 40 | 40 | 45 | 45 | 40 | 40 |
| 240 | 30 | 30 | 20 | 30 | 25 | 25 |
| 270 | 15 | 10 | 5 | 15 | 10 | 10 |
| 300 | 0 | -10 | -10 | -5 | -5 | -5 |
| 330 | -25 | -30 | -35 | -20 | -25 | -25 |

Tabel 5-4; Golfrichting per stormrichting en raai.

6. Duinafslag

6.1. Inleiding

In de vorige hoofdstukken is met behulp van de extreme waarden statistiek en het golfmodel SWAN gekomen tot een dataset van ondiep water randvoorwaarden. In dit hoofdstuk wordt aan de hand van die dataset tijdsafhankelijke duinafslagberekeningen gemaakt, met het programma DUROSTA. Vervolgens worden frequentieverdelingen van de duinafslag gemaakt voor de verschillende raaien, waarmee de duinafslag die eens per 100.000 jaar voorkomt bepaald wordt.

In paragraaf 6.2 zullen de belangrijkste processen die zich binnen de brekerzone afspelen besproken worden. In paragraaf 6.3 wordt het programma DUROSTA summier beschreven. De daaropvolgende paragraaf 6.4 behandelt de berekeningsopzet en de modellering van de fysische processen met het programma. Paragraaf 6.5 behandelt de resultaten van de afslagberekeningen alsmede de frequentieverdelingen van de duinafslag. In de laatste paragraaf 6.6 worden de mogelijke effecten van de aanwezigheid van een geul in de vooroever op de duinafslag besproken.

6.2. Processen in de brekerzone

Tijdens extreme situaties vindt er duinafslag plaats ten gevolge van brekende golven, in de brekerzone van de kust. Omdat de waterstand sterk verhoogd is, vindt de afslag hoog in het duinprofiel plaats. Naast het proces van brekende golven zijn er andere processen die een belangrijke rol spelen in de brekerzone. In deze paragraaf zullen deze hydrodynamische en morfologische processen worden beschreven.

6.2.1. Hydrodynamische processen

De belangrijkste hydrodynamische processen zijn te onderscheiden in lange en korte golven. De lange golven worden onder andere gevormd door het getij in het Noordzeebekken. Ter plaatse van Den Helder bedraagt de gemiddelde getijslag 1,38 m. Het getij werkt door in de tijdsafhankelijke waterstand en daarmee in de duinafslag.

De korte golven worden opgewekt door de wind. In het vorige hoofdstuk is uitvoerig besproken hoe de korte golven zich ter plaatse van de buitendelta manifesteren tijdens extreme stormen uit verschillende richtingen. Golven die de kust naderen breken bij een bepaalde combinatie van taludhelling, waterdiepte en golfhoogte. Het breken gaat gepaard met (golf)energiedissipatie. Omdat niet alle golven dezelfde golfhoogte hebben, breken ze op verschillende afstanden uit de kust. Op deze manier ontstaat er een brekerzone. In de brekerzone van een strand treedt een complex stromingsveld op. Als gevolg van de brekende golven treedt er een retourstroming op. Een ander effect in de brekerzone is dat er als gevolg van scheef invallende golven een gradiënt in de golfspanning optreedt, zodat een golfopzet ontstaat, loodrecht op de kustlijn. In de langsrichting resulteert dit in een langsstroming.

6.2.2. Morfologische processen

De sedimenttransporten bij duinafslag zijn het gevolg van (brekende)golven en stromingen. Het sedimenttransport is te verdelen in bodemtransport en suspensietransport. Het bodemtransport overheerst vooral in gebieden buiten de

brekerzone, waar de bodemwrijving overheersend is. Het suspensietransport neemt toe naarmate de turbulentie-gerelateerde mengcapaciteit van de stroming groter is. In de brekerzone is een hoge mate van turbulentie aanwezig als gevolg van het breken van golven. Hierdoor zal het sediment in suspensie gebracht worden en door de aanwezige stroming wordt getransporteerd. Een onderscheid is nog te maken in langs en dwarstransport:

Het dwarstransport van sediment treedt op als gevolg van (brekende) golven in de brekerzone. Het breken van de golven gebeurt over een relatief kleine afstand waarbij de energie dus ook over een korte afstand wordt gedissipeerd. Duinzand zal als gevolg daarvan in suspensie gebracht worden en als gevolg van de retourstroming weer worden afgezet op minder turbulente stukken zeewaarts van het duin. Het kustprofiel zal hierbij zeewaarts verhogen en verflauwen waardoor nieuwe golven over een langere afstand zullen worden gebroken. Een verminderde duinerosie is het gevolg. Dit proces gaat in theorie net zolang door totdat er een evenwichtsprofiel is ontstaan. In de praktijk is een storm met een verhoogde waterstand een tijdelijk fenomeen zodat het nieuwe evenwichtprofiel niet bereikt wordt. Nadat de storm geluwd is zal door de werking van wind en golven het afgeslagen duinprofiel zich weer gaan herstellen tot het oude evenwichtsprofiel bereikt is.

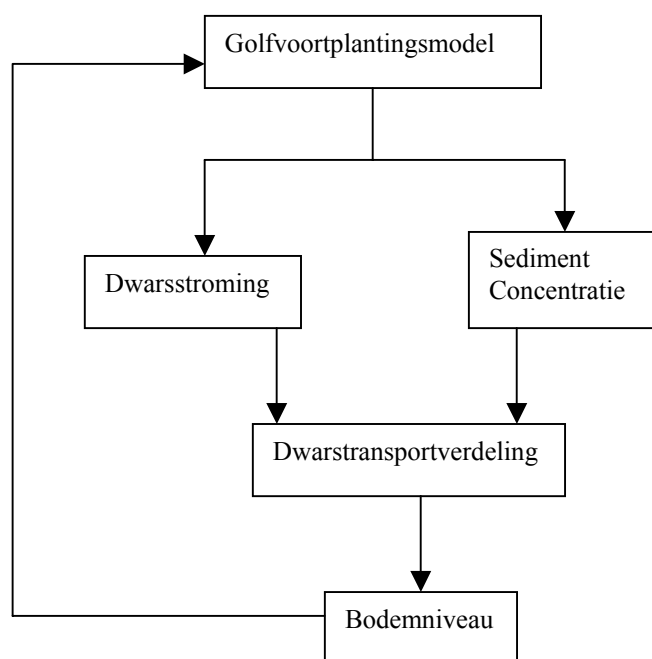
Het langstransport van sediment is het gevolg van langsstromingen. Gradiënten langs de kust in het langstransport kunnen voorkomen als gevolg van plaatselijke discontinuïteiten in het kustprofiel. Als gevolg van deze discontinuïteiten wordt de langsstroming beïnvloedt waardoor gradiënten in het langstransport ontstaan. Het gevolg van deze gradiënten is erosie dan wel aanzanding van het betreffende kustvak.

6.3. DUROSTA

6.3.1. Modelopzet

Het berekenen van de duinafslag aan de hand van de ondiep-water-randvoorwaarden die in het vorige hoofdstuk berekend zijn geschied met het programma DUROSTA (Versie 1.20).

In het programma DUROSTA wordt het resulterende dwarstransport onder de brekende golven beschreven door het dieptegeïntegreerde product van tijdgemiddelde stroomsnelheid en tijdgemiddelde concentratie. Dit is geldig voor de brekerzone. In de onderstaande figuur staat de opzet van het programma schematisch weergegeven.



Figuur 6-1; Programma opzet DUROSTA (bron: Dijk, M., 2002)

Het golfvoortplantingsmodel is gebaseerd op ENDEC (Energy DECay), dat gebaseerd is op de (golf)energie afname. Het wordt gebruikt om de golfhoogte en de golfopzet over het dwarsprofiel te berekenen. Het model is uitgebreid met een extra differentiaalvergelijking die het behoud van turbulente energie beschrijft. Er wordt van een Rayleigh-verdeling uitgegaan voor de invallende golven die afgekapt wordt in de brekerzone. Grote golven zullen breken en kleine golven vinden doorgang [Steetzel, H.J., 1993].

Het stromingsmodel gaat uit van een tijdsgemiddeld snelheidsprofiel dat is gebaseerd op de verticale verdeling van de tijdsgemiddelde schuifspanning onder een gemiddeld golfdal.

Het sedimenttransportmodel in het model verwaarloost het bodemtransport en brengt alleen het suspensietransport in rekening voor het dwarstransport. De hoeveelheid sediment die in suspensie is, is afhankelijk van fysische factoren als diffusiecoëfficiënt, dichtheid van het sediment en water, korreldiameter, de brekerindex en dissipatie van rollerenergie [Dijk, M., 2002].

Het berekende netto dwarstransport wordt opgedeeld in twee delen. Een deel boven het gemiddelde golfdal en het deel onder het gemiddelde golfdal. Het product van snelheid en concentratie levert in het bovenste deel een kustwaarts gericht transport en in het onderste deel een zeewaarts gericht transport.

Het bodemveranderingsmodel is gebaseerd op de continuïteitsvergelijking die een gradiënt in het dwarstransport gecompenseerd ziet in een bodemverhoging dan wel bodemverlaging.

6.3.2. Validatie

Voor de validatie van het model wordt verwezen naar [Steetzel, H.J., 1993] waarin, aan de hand van schaalmodellen en historische afslagen het model gekalibreerd wordt. Van belang voor de gepresenteerde stormparameters is dat de piekperiode in het model niet gevalideerd is voor waarden groter dan 12 s. Tevens is de piekperiode voor de kalibratie van het model afgeregeld op een diep water JONSWAP spectrum. Het is dus onbekend of de resultaten met een dubbeltoppig spectrum goed benaderd worden met het model. Onderzoek naar deze kwesties wordt aanbevolen.

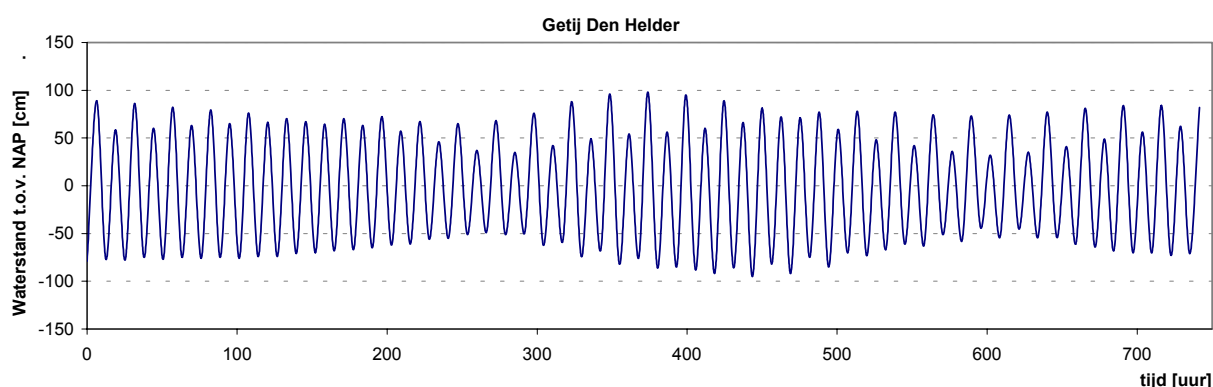
6.4. Berekeningsopzet

In deze paragraaf wordt aandacht besteed aan het stormverloop van de verschillende stormparameters en de overige parameters die gespecificeerd dienen te worden. De invoer bestaat uit de ondiep water randvoorwaarden uit het vorige hoofdstuk (tabel 5.3 en 5.4). Deze bestaan uit de golfparameters tijdens het maximum van een storm. In dit hoofdstuk worden onder andere aannames gedaan om het verloop van de significante golfhoogte en de piekperiode op ondiep water te modelleren.

Het totaal aantal door te rekenen stormen bedraagt 15 (5 stormrichtingen maal 3 stormklassen), voor alle 6 JARKUS-raaien, zodat het totaal aantal duinafslagberekeningen uitkomt op 90.

6.4.1. Getij nabij Den Helder

Het getij ter plaatse van Den Helder heeft de volgende vorm:



Figuur 6-2; Getij Den Helder gedurende 1 maand (bron: internetsite Rijkswaterstaat: www.getij.nl)

De bovenstaande figuur geeft de waterstand nabij Den Helder aan gedurende 1 maand. Op de horizontale as staan de verstreken uren. De maximale getijamplitude bedraagt ongeveer 0,84 m. Het getij zal tijdens een duinafslag gemodelleerd worden middels een sinus met een periode van 12 uur en een amplitude van 0,85 m. De langsstroming als gevolg van het getij wordt niet meegenomen in de berekeningen.

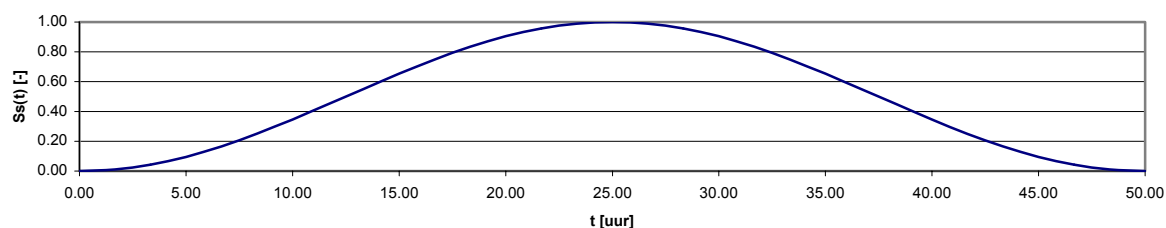
6.4.2. Stormverloop

In de tabellen 5.3 en 5.4 zijn de ondiep water randvoorwaarden opgenomen. De berekeningen met SWAN hebben alleen betrekking op de piek van de storm, waarbij de maximum waarden van de stormparameters samenvallen. Tijdens een storm, zullen de parameters in de tijd variëren en hoeven de pieken van de afzonderlijke stormparameters niet samen te vallen. De ontwikkeling in de tijd van de stormparameters wordt het stormverloop genoemd.

Verloop van de opzet

In [Van Weerden, J.J., e.a., 1987] wordt geconcludeerd dat de vorm van de opzet goed benaderd wordt met een cosinus kwadraat (\cos^2) verloop. In [Steetzel, H.J., 1999] is de invloed van de opzetvorm bekeken op de duinafslag. De basisvorm hierin was de \cos^2 vorm. Mogelijk andere vormen zijn een trapeziumvorm een triangelvorm of een scheve \cos^2 functie waarbij de top enigszins verschoven ligt. Uit de resultaten blijkt dat de verschillen in de achteruitgang van het duin tot 10 % kan variëren. De invloed van een dubbele top in het verloop van de opzet of andere vormen van opzet is niet onderzocht. In deze uitwerking wordt hiermee geen rekening gehouden en wordt zonder verder onderzoek het \cos^2 verloop van de opzet aangenomen met als stormduur de geëxtrapoleerde stormduren uit tabel 4.2.

De stormvorm voor de opzet wordt beschreven middels:



Figuur 6-3; Stormvorm voor een storm van 50 uur

$$S_s(t) = \cos^2\left(\frac{\pi \cdot t}{T_s} - \frac{\pi}{2}\right) \quad 6.1$$

Hierin is:

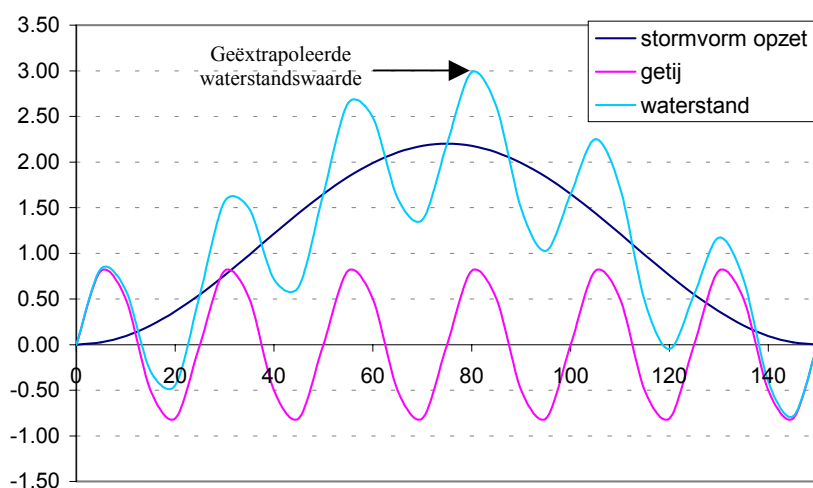
$S_s(t)$ = stormvormfunctie [-]
 T_s = stormduur [uur]

Het verloop van de waterstand in de tijd kan dan als volgt weergegeven worden:

$$h(t) = h_s \cdot S_s(t) \quad 6.2$$

Waarin h_s de maximale opzet is. De stormduur wordt hierbij gemodelleerd als het tijdstip van aanvang van de verhoging van de waterstand tot het tijdstip dat de waterstand zijn normale niveau weer heeft bereikt en wordt ontleent aan de geëxtrapoleerde stormen.

Het verloop van de waterstand bestaat uit het gecombineerd effect van de waterstand als gevolg van het getij nabij Den Helder en het stormverloop als gevolg van de windopzet. De maximaal te bereiken waterstand is gelijk aan de waterstand als gevolg van de opzet plus de getijamplitude. Deze maximale waterstand dient voor een storm dan weer gelijk te zijn aan de geëxtrapoleerde waterstand, gegeven in tabel 4.2. In figuur 6-4 wordt het een en ander duidelijk gemaakt:



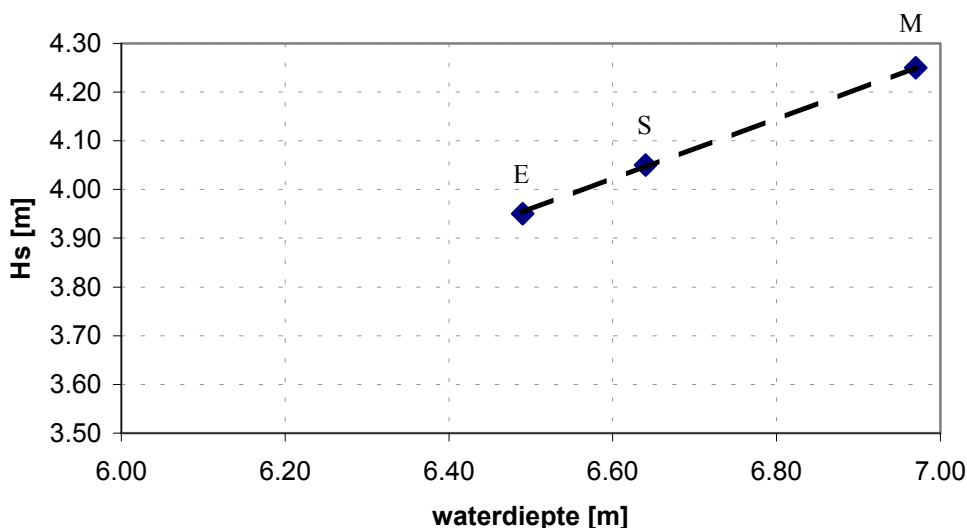
Figuur 6-4: Verloop van de waterstand, stormduur 150 uur, maximale waterstand 3,50 m.

Verloop van de golfhoogte

Meer dan op diep water wordt de golfhoogte op ondiep water bepaald door de waterstand. Om het stormverloop in de golfhoogte mee te nemen is gezocht naar verbanden tussen de waterstand en de golfhoogte op ondiep water.

Ter plaatse van onttrekken van de ondiep water randvoorwaarden uit de uitvoer van SWAN zijn de golven niet meer onderhevig aan golfbreking omdat de golven al veel verder uit de kust zijn gebroken en er een lokaal golfveld heerst. Om een schatting te maken voor het verloop van de golfhoogte is het quotiënt ter plaatse berekend van golfhoogte en waterdiepte.

Per stormrichting zijn er een drietal (in intensiteit verschillende) stormen doorgerekend, een M-, S- en een E-klasse storm. Per storm en per JARKUS-raai is het quotiënt berekend van golfhoogte en waterdiepte. Het blijkt dat de quotiënten per stormrichting en per JARKUS-raai nagenoeg gelijk waren zodat het verloop van de golfhoogte gekoppeld kan worden via de waterdiepte, aan de waterstand. In onderstaande figuur is de aanpak gevisualiseerd:



Figuur 6-5: Quotiënt golfhoogte en waterdiepte

De punten van de M-, S-, en E-klasse storm liggen nagenoeg op 1 lijn. Het quotiënt van golfhoogte en waterdiepte wordt gebruikt om het verloop van de golfhoogte aan het verloop van de waterstand te koppelen. In onderstaande tabel staan de gemiddelde quotiënten van de klassen gegeven per raai en per stormrichting.

| | Raainummer | | | | | |
|----------|------------|------|------|------|------|------|
| Richting | 210 | 308 | 409 | 508 | 608 | 708 |
| 210 | 0,71 | 0,67 | 0,63 | 0,67 | 0,74 | 0,77 |
| 240 | 0,68 | 0,65 | 0,62 | 0,63 | 0,68 | 0,71 |
| 270 | 0,63 | 0,63 | 0,61 | 0,61 | 0,63 | 0,67 |
| 300 | 0,57 | 0,60 | 0,60 | 0,61 | 0,62 | 0,66 |
| 330 | 0,48 | 0,52 | 0,54 | 0,56 | 0,58 | 0,60 |

Tabel 6-1; Quotiënt golfhoogte en waterdiepte

Verloop van de piekperiode.

De piekperiode van het spectrum is variabel in de tijd. Zie ook [Roskam, A.P. en Hoekema, J., 1996]. In het vorige hoofdstuk is aangenomen dat voor de duinafslag bij een tweetoppig spectrum, de periode gekozen wordt van de meest laagfrequentie piek. Deze is zodoende gelijk aan de diep-water golfhoogte. Voor de piekperiode van het spectrum wordt, onder aanname van een binnen nauwe marges variërende golfsteilheid, uitgegaan van een eenduidige relatie met de significante golfhoogte op diep water volgens de volgende uitdrukking:

$$T_p = \sqrt{\frac{2\pi H_s}{g S_g}} \quad 6.3$$

Hierin is:

| | | |
|-------|--|---------------------|
| T_p | = de piekperiode | [s] |
| H_s | = de significante golfhoogte op diep water | [m] |
| g | = de zwaartekrachtsversnelling | [m/s ²] |
| S_g | = de golfsteilheid = H_s/L_0 | [-] |
| L_0 | = de golflengte op diep water | [m] |

De golfsteilheid varieert hierbij langs de Nederlandse kust. Uit onderzoek [De Ronde, J.G., e.a., 1995] blijkt dat voor ontwerpcondities voor het meetpunt ELD, S_g een waarde heeft van 2,68%. De bandbreedte waartussen de golfsteilheid zich bevindt voor de verschillende meetstations langs de kust varieert van 2,14 % tot 3,43 %.

De combinaties van piekperiode en significante golfhoogte die verkregen zijn door extrapolatie laten de volgende steilheden zien op diep water:

| | Golfrichtingen | | | | |
|-------------|----------------|--------|--------|--------|--------|
| Stormklasse | 210 | 240 | 270 | 300 | 330 |
| M | 2,83 % | 2,72 % | 2,48 % | 2,23 % | 2,18 % |
| S | 2,92 % | 2,81 % | 2,57 % | 2,31 % | 2,25 % |
| E | 2,97 % | 2,86 % | 2,62 % | 2,34 % | 2,29 % |

Tabel 6-2; Golfsteilheid per stormklasse en richting

Voor de uitwerking van het verloop van de significante golfhoogte worden deze steilheden per storm als constant aangehouden in de tijd. Het piekperiodeverloop tijdens een geëxtrapoleerde storm wordt zodoende gevormd volgens (6.3). Het is daarbij van belang dat het verloop van de significante golfhoogte op diep water bekend is.

Het verband tussen waterstand en significante golfhoogte op diep water kan beschreven worden met [Steetzel, H.J., 1999]:

$$H_s = A + B(h_s)^C \quad 6.4$$

Hierin is:

| | | |
|-------|---|-----|
| H_s | = de significante golfhoogte op diep water | [m] |
| A | = significante golfhoogte bij afwezigheid van opzet | [m] |
| B | = locatieafhankelijke parameter | [-] |
| h_s | = de stormopzet | [m] |
| C | = parameter | [-] |

Voor de parameter A wordt aanbevolen om de waarde 0,63 te gebruiken. De parameter C heeft de waarde 0,55. De parameter B wordt gebruikt om de gemeten waarden te fitten per locatie langs de kust. In deze uitwerking wordt de parameter B gebruikt om de geëxtrapoleerde waarden van golfhoogte en opzet te fitten aan het veronderstelde verband (6.4). Per storm wordt dus een andere B -waarde gevonden. In onderstaande tabel staan de B -waarden per storm opgegeven:

| Stormklasse | Golfrichtingen | | | | |
|-------------|----------------|------|------|------|------|
| | 210 | 240 | 270 | 300 | 330 |
| M | 5,88 | 5,19 | 4,65 | 4,52 | 4,65 |
| S | 5,86 | 5,20 | 4,65 | 4,50 | 4,65 |
| E | 5,85 | 5,20 | 4,65 | 4,49 | 4,65 |

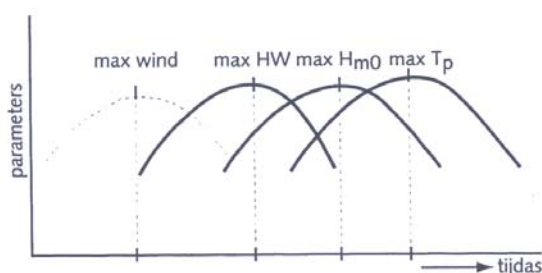
Tabel 6-3; Locatieafhankelijke parameter 'B' per storm

Het verloop van de significante golfhoogte op diep water wordt dus aan de hand van 6.4 gevonden. Met dit verloop kan vervolgens het verloop van de piekperiode verkregen worden met behulp van 6.3.

Invloed faseverschillen

Faseverschillen zijn in twee groepen op te delen. Ten eerste is er het faseverschil tussen het getij en de windopzet. De gevoeligheid van de duinafslag voor dit faseverschil is groter naarmate de duur van de storm relatief kort is. Wanneer de piek van de opzetkromme samenvalt met de hoogwaterpiek van het getij zal meer duinafslag optreden. Bij relatief lange stormen (enkele malen groter dan de getijperiode) wordt het effect van het faseverschil kleiner. Nog langere stormen sorteren helemaal geen effect meer. Het omslagpunt ligt bij een stormduur van 8 maal de getijperiode, oftewel een stormduur van circa 100 uur [De Valk, C.F., Steetzel, H.J., 1997]. Omdat de meeste geëxtrapoleerde stormen langer duren dan 100 uur, wordt er geen rekening gehouden met het faseverschil in getij en windopzet en wordt op $t=0$ voor zowel de opzet als het getij fase 0 aangehouden.

Ten tweede zijn er de faseverschillen tussen de verlopen van de stormparameters onderling. In het algemeen treden de maxima van de stormparameters op als de windsnelheid al weer aan het afnemen is [Van Marle, J.G.A., 2000]. In onderstaande figuur is schematisch weergegeven hoe de verlopen zich in het algemeen voordoen in de tijd:



Figuur 6-6; Faseverschillen stormparameters (bron: Van Marle, J.G.A., 2000)

In [Steetzel, H.J., 1999] is een overzicht gegeven van voorkomende faseverschuivingen. Het blijkt dat de maxima van de stormparameters vaak samenvallen of dat het faseverschil kleiner dan 1,5 uur is. In ieder geval blijven de verschuivingen beperkt tot orde 5 uur. In hetzelfde onderzoek is ook gekeken naar de gevoeligheid van de duinafslag bij faseverschillen kleiner dan 5 uur. Het bleek dat de invloed van de faseverschuivingen op de duinafslag verwaarloosbaar klein waren. In de verdere uitwerking wordt dan ook geen rekening gehouden met een faseverschil in de onderlinge stormparameters.

6.4.3. Duinmateriaal

Duinafslag is afhankelijk van de grootte van het korrelmateriaal van de duinen. De korrelgrootte van het duinmateriaal verschilt langs de kust. In tabel 3-1 is de variatie van de korrelgrootten aangegeven. Deze tabel is gebruikt om per JARKUS-raai de korrelgrootten te bepalen middels interpolatie. De korrelgrootten van de verschillende gespecificeerde JARKUS-raaien staan in onderstaande tabel gegeven. De korrelgrootten zijn verkregen door middel van interpolatie tussen de raaien uit tabel 3-1:

| | JARKUS-raai nummer | | | | | |
|-------------------------|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 210 | 308 | 409 | 508 | 608 | 708 |
| D _{reken} [μm] | 300 | 265 | 230 | 220 | 210 | 230 |

Tabel 6-4; Diameter korrelmateriaal duin

D_{reken} is hierin gespecificeerd als:

$$D_{reken} = \mu_{D50} - 5 \left(\frac{(\sigma_{D50})^2}{\mu_{D50}} \right) \quad 6.5$$

Hierin is:

μ_{D50} = de verwachtingswaarde van de D₅₀

σ_{D50} = de standaard afwijking van de D₅₀

6.4.4. Rekengrid, tijdstap en bodemgrid

Voor de berekening dient er een rekengrid opgegeven te worden alsmede een maximale tijdstap. Voor het gebruikte rekengrid is gebruik gemaakt van de optie in het programma om automatisch een niet uniform rekengrid aan te maken. Met deze optie wordt het rekengrid dezelfde als het bodemgrid. Het bodemprofiel is aan de hand van JARKUS- profielen ingevoerd waarbij de gridlengte 5 m bedraagt. Tevens dient er een maximale bodemverandering opgegeven te worden die zich in 1 tijdstap mag manifesteren. Het programma past de rekentijdstap aan indien de maximum bodemverandering overschreden wordt. De maximaal toe te laten bodemverandering per rekentijdstap wordt aangenomen op 0,1 m. De maximaal toe te laten rekentijdstap bedraagt 0,25 uur.

Gevoeligheid maximale tijdstap en maximale bodemverandering.

Om de invloed van de grootte van de maximaal toe te laten bodemverandering in een tijdstap te onderzoeken zijn er een aantal aanvullende berekeningen gedaan. Als referentieberekening is de storm met nummer mmmm27 gebruikt voor de JARKUS-raai 409. De X_d waarde (X-coördinaat ten opzichte van BKL van de insteek van het afgeslagen duinprofiel, zie figuur 6.6) van deze berekening bedraagt 228,5 m.

De maximale rekentijdstap is voor de (referentie)berekening 0,25 uur. Om het effect in kaart te brengen zijn er twee extra berekeningen uitgevoerd. Een berekening met een kleinere maximale rekentijdstap van 0,1 uur en een berekening met een grotere maximale van 0,4 uur. De resultaten laten voor de kleinere tijdstap een X_d zien van 227,5 meter en voor de grotere tijdstap een X_d van 229,5 meter. De X_d voor de referentieberekening bedraagt 228,5 meter. Het verschil is met een rekengrid van 5 meter dus klein te noemen.

De maximaal toe te laten bodemverandering voor de referentieberekening bedraagt 0,1 m. Om ook het effect van deze parameter in kaart te brengen zijn er drie aanvullende berekeningen gedaan. Eén berekening met een kleinere maximaal toelaatbare bodemverandering van 0,01m en twee berekeningen met een grotere maximaal toelaatbare bodemverandering van 0,2 en 1,0 m. De resultaten voor de kleinere bodemverandering laten een X_d waarde zien van 225 m en voor de grotere bodemveranderingen van 0,2 m een X_d waarde zien van 229 m. Voor de maximale waarde van de bodemverandering van 1,0 m wordt de X_d waarde berekend van 229 m. (Waarschijnlijk is de maximale bodemverandering van 1 meter bij een tijdstap van 0,25 uur iets aan de grote kant). Voor de basisberekening met een maximale waarde van de bodemverandering van 0,1 m is het verschil in X_d waarde van 225 m dan wel 228,5 m niet verontrustend bij een rekengridgrootte van 5 m.

6.4.5. Samenvatting invoer duinafslag

De invoer voor de duinafslagberekeningen met behulp van DUROSTA bestaat uit verschillende parameters die bepaald zijn aan de hand van verschillende methoden of metingen. In onderstaande tabel staat samenvattend weergegeven hoe deze parameters tot stand zijn gekomen:

| Fase in berekening | water-stand | piek-periode | golf-hoogte | storm-duur | wind-snelheid | getij | korrelgrootte duinmateriaal | dwars-profiel |
|-------------------------------|-------------|--------------|-------------|------------|----------------|----------------|-----------------------------|----------------|
| Op diep water gemeten | ○ | ○ | ○ | ○ | | | | |
| Elders gemeten | | | | | ○ ¹ | ○ ² | ○ ³ | ○ ⁴ |
| extrapolatie door 'De Haan' | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | |
| Ondiep-waterwaarde adhv. SWAN | | | ○ | | | | | |
| duinafslagberekening DUROSTA | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | ○ | ○ |

Tabel 6-5: Overzicht invoer duinafslagberekeningen, 1. Marinevliegbasis De Kooy, 2. Den Helder, 3. t.p.v. duinprofiel, 4. JARKUS-meting

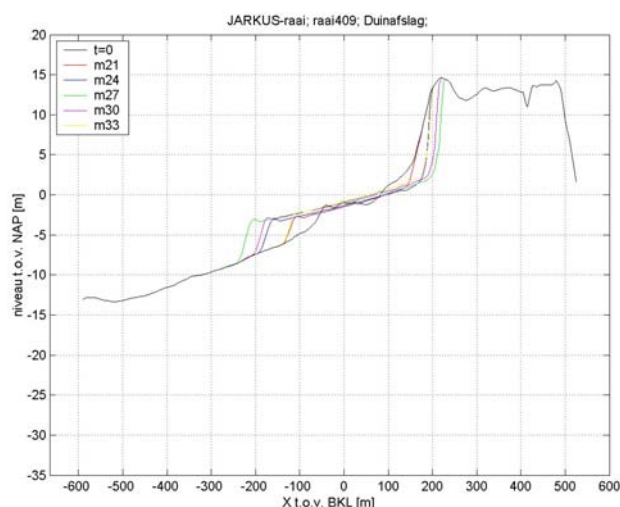
6.5. Resultaten duinafslag

In dit hoofdstuk zullen de resultaten gepresenteerd worden van de gemaakte duinafslagberekeningen. De resultaten zullen in paragraaf 6.5.1 gepresenteerd worden als de dwarsprofielen na afloop van de storm. In paragraaf 6.5.2 wordt de duinafslag bij verschillende stormen met elkaar worden vergeleken door zowel naar de achteruitgang van de insteek van het duin te kijken als de totale hoeveelheid afgeslagen duinvolume. In paragraaf 6.5.3 wordt per JARKUS-raai een overschrijdingsverdeling van de duinafslag gegeven.

6.5.1. Afslagprofielen

De resultaten van de duinafslagberekeningen komen tot uiting in de afslagprofielen. Dit zijn de profielen op het tijdstip dat de storm voorbij is. In onderstaande figuur is zowel het beginprofiel ($t=0$) als de eindprofielen van stormen uit verschillende

richtingen voor JARKUS-raai 409 weergegeven. De getekende eindprofielen zijn allen het effect van klasse M stormen. De resultaten voor de overige raaien zijn in bijlage 6.1 opgenomen.



Figuur 6-7; Duinafslagprofielen klasse M stormen uit de richting 210, 240, 270, 300, 330.

Uit de figuren in de bijlage 6.1 blijkt dat de stormen uit de richting 270 de grootste duinafslag genereren. Stormen uit de richting 210 het minste. Uit de figuren valt ook op te maken dat de aanwezige duinprofielen voldoende breed en hoog zijn om veel zwaardere stormen te keren.

6.5.2. Kwantificering duinafslag

Om de resultaten van de verschillende duinafslagberekeningen met elkaar te vergelijken kunnen verschillende duinafslaggrootheden bekeken worden.

In [Basisrapport zandige kust, TAW, 1995] wordt in principe twee methoden genoemd om de duinafslag te kwantificeren. Zo wordt de basisafslag beschreven als zijnde de totale afgeslagen hoeveelheid zand per meter duin boven het ontwerppeil. Het nadeel voor deze berekening zou zijn dat als gevolg van verschillende peilen per berekening de vergelijking van de duinafslagen volledig mank zou gaan. Ook wordt de positie van het afslagpunt genoemd. Dit is de horizontale afstand vanaf een referentiepunt tot aan de insteek van het nieuwe duinprofiel.

In [De Valk, C.F., Steetzel, H.J., 1997] wordt de duinafslag van een standaard duinprofiel gekwantificeerd als zijnde de hoeveelheid afgeslagen hoeveelheid zand boven een bepaald referentieniveau gedeeld door de hoogte van het duin boven het referentieniveau. Op deze manier wordt dus een kunstmatige afslagpunt verkregen.

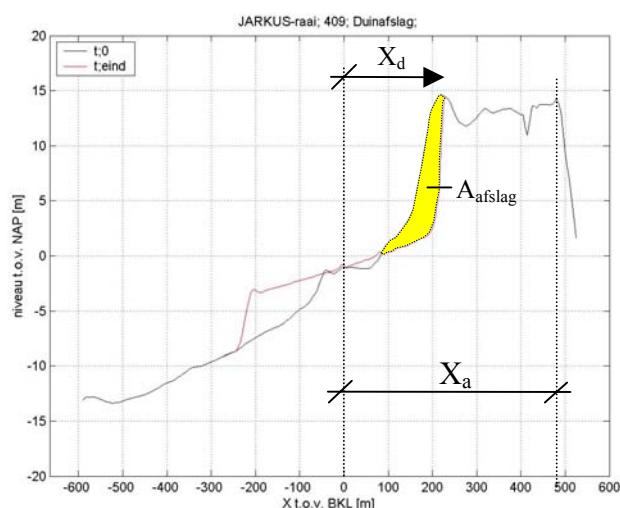
Met het oog op de reële duinachteruitgang en de benoeming van de betrouwbaarheidsfunctie, wordt in deze uitwerking de duinafslag uitgedrukt als de X coördinaat van de insteek van het nieuwe duinprofiel, aangeduid met X_d . Deze is dus gelijk aan het afslagpunt volgens [Basisrapport zandige kust, TAW, 1995]. De betrouwbaarheidsfunctie kan dan als volgt uitgedrukt worden:

$$Z = X_a - X_d$$

Hierin is :

X_a = de aanwezige 'duindikte' [m]

Indien X_d groter is dan X_a is het duin bezwaken aan duinafslag. Naast de duinterugging wordt tevens de totale hoeveelheid afgeslagen duinmateriaal weergegeven, aangegeven met A_{afslag} . Dit is in principe gelijk aan het totale afgezette hoeveelheid duinmateriaal op de vooroever (indien er geen gradiënt in het transport aanwezig is). In de volgende figuur wordt aan de hand van een voorbeeld afslag het een en ander verduidelijkt:



Figuur 6-8; Uitdrukking duinafslagkwantificering

In tabel 6.5 staat gegeven voor elke storm wat de X_d -waarde van een dergelijke storm is en de bijbehorende hoeveelheid duinafslag. Ook staat het aantal stormen gegeven die de desbetreffende klasse overschrijden (zie ook bijlage 4.9).

| Rich- ting | klas- se | aant. stormen | Raainummer | | | | | | | | | | | |
|---------------|-------------|------------------|--------------|------------------------------------|--------------|------------------------------------|--------------|------------------------------------|--------------|------------------------------------|--------------|------------------------------------|--------------|------------------------------------|
| | | | 210 | | 308 | | 409 | | 508 | | 608 | | 708 | |
| | | | X_d [m] | $A_{afsl.}$ [m ³ /m] | X_d [m] | $A_{afsl.}$ [m ³ /m] | X_d [m] | $A_{afsl.}$ [m ³ /m] | X_d [m] | $A_{afsl.}$ [m ³ /m] | X_d [m] | $A_{afsl.}$ [m ³ /m] | X_d [m] | $A_{afsl.}$ [m ³ /m] |
| 210 | M | 20 | 177 | 189,1 | 176 | 127,9 | 174 | 134,5 | 179 | 156,3 | 227 | 139,6 | 223 | 132,3 |
| | S | 32 | 157 | 150,7 | 167 | 104,6 | 168 | 116,6 | 174 | 130,0 | 219 | 115,4 | 214 | 109,0 |
| | E | 108 | 141 | 114,6 | 149 | 80,4 | 151 | 96,7 | 168 | 100,1 | 208 | 89,8 | 208 | 86,4 |
| 240 | M | 49 | 199 | 402,4 | 207 | 276,5 | 200 | 323,7 | 208 | 343,1 | 258 | 307,4 | 249 | 296,2 |
| | S | 102 | 190 | 316,3 | 199 | 218,7 | 194 | 262,8 | 199 | 274,8 | 248 | 241,1 | 240 | 229,1 |
| | E | 206 | 186 | 245,9 | 195 | 171,0 | 187 | 211,0 | 192 | 216,3 | 242 | 187,5 | 235 | 178,8 |
| 270 | M | 29 | 229 | 694,3 | 261 | 531,0 | 229 | 599,1 | 235 | 652,6 | 291 | 550,5 | 274 | 546,7 |
| | S | 62 | 215 | 540,0 | 230 | 421,0 | 215 | 472,1 | 225 | 520,3 | 278 | 434,2 | 264 | 430,7 |
| | E | 218 | 205 | 413,0 | 215 | 329,0 | 205 | 366,0 | 215 | 410,0 | 265 | 338,9 | 255 | 335,4 |
| 300 | M | 16 | 215 | 422,7 | 256 | 386,2 | 219 | 455,8 | 230 | 533,7 | 283 | 428,6 | 269 | 431,8 |
| | S | 42 | 205 | 331,7 | 220 | 306,9 | 210 | 365,4 | 220 | 428,4 | 270 | 342,0 | 259 | 339,9 |
| | E | 139 | 200 | 297,0 | 214 | 276,0 | 205 | 334,6 | 215 | 388,4 | 265 | 313,7 | 255 | 307,6 |
| 330 | M | 15 | 198 | 177,4 | 213 | 205,5 | 204 | 245,0 | 215 | 338,5 | 266 | 272,2 | 255 | 263,3 |
| | S | 52 | 190 | 132,0 | 205 | 153,3 | 195 | 188,0 | 205 | 261,7 | 256 | 209,1 | 247 | 198,8 |
| | E | 56 | 188 | 116,6 | 202 | 137,0 | 193 | 167,2 | 202 | 233,9 | 252 | 185,1 | 244 | 176,9 |

Tabel 6-6; Kwantificering van de duinafslag.

Het aantal stormen dat in de tabel aangegeven staat beschrijft het aantal stormen in die categorie met bijbehorende afslag of meer. Het zijn dus het aantal overschrijdingen van die afslag. Door nu per raai de cumulatieve aantallen stormen te beschouwen met

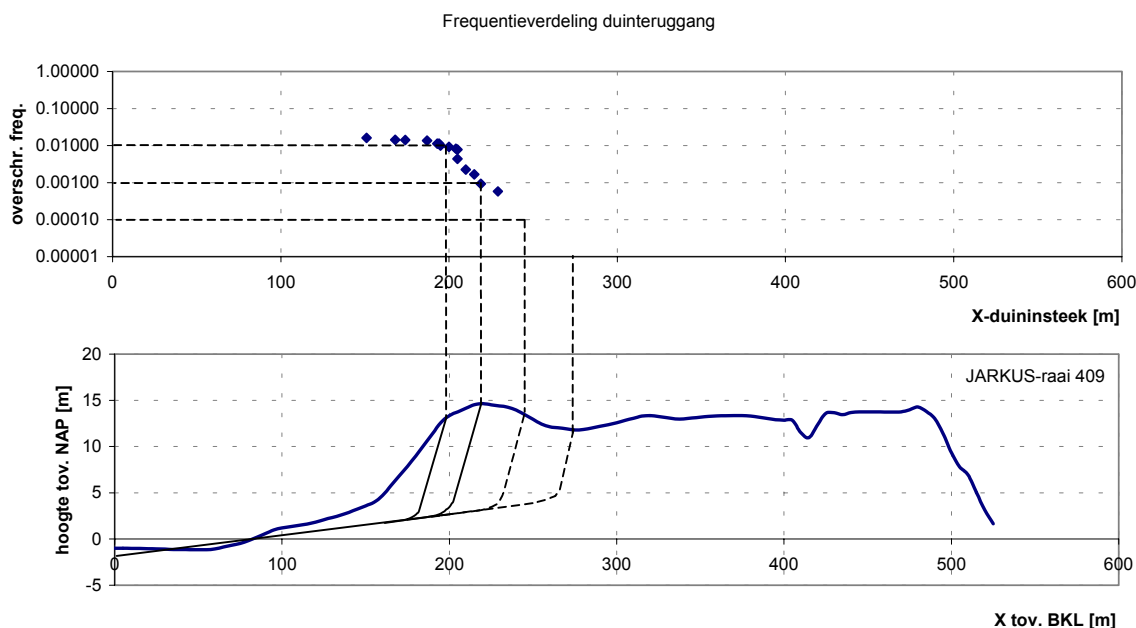
bijbehorende X_d dan wel oppervlakte van de afslag (A_{afsl}) kan een overschrijdingsverdeling gemaakt worden voor de afslag. Er wordt daarbij teruggegrepen naar formule 4.7. De frequentie van een bepaalde hoeveelheid duinafslag kan bepaald worden aan de hand van:

$$\mu = \frac{\kappa}{\Delta} \cdot \exp(-\lambda) \quad 4.7$$

Hierin is:

| | | |
|-----------|---|--------|
| μ | = de frequentie van de desbetreffende afslag | [1/jr] |
| κ | = het aantal stormen groter of gelijk aan desbetreffende afslag | [-] |
| Δ | = de lengte van de periode van de waarnemingen (18 jaar) | [jr] |
| λ | = de verschuiving in het exponentiële domein | [-] |

In onderstaande figuren is voor raai 409 de bovenstaande berekening uitgevoerd voor elke stormklasse en richting, de figuren voor de overige raaien staan in bijlage 6.2:

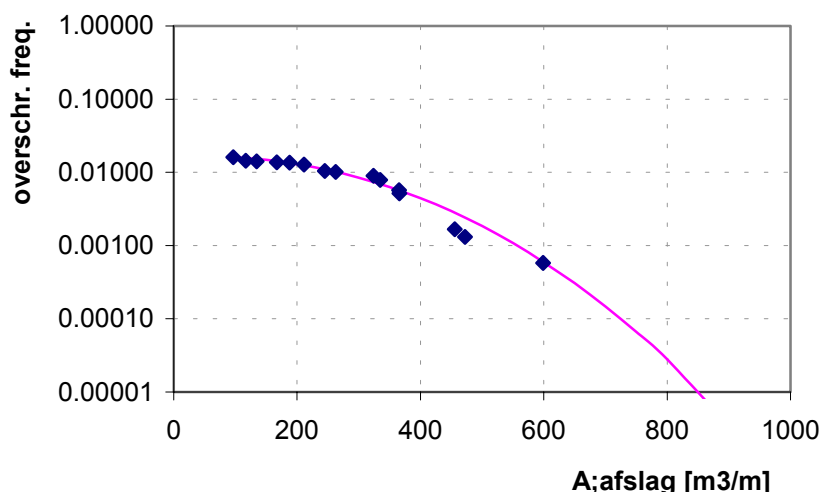


Figuur 6-9; Frequentieverdeling duinteruggang JARKUS-raai 409

De bovenste figuur geeft de frequentieverdeling van de duinteruggang weer. In de figuur daaronder staat het duinprofiel getekend met ter indicatie een mogelijk afslagprofiel (de berekende overschrijdingsfrequenties zijn alleen van toepassing op de achteruitgang van de insteek van het duin, het afslagprofiel is dan dus nog variabel).

Uit het bereik van de punten in de frequentieverdeling valt op te maken dat de verschuivingsfactor te klein is geweest om een goede schatting te maken van de duinteruggang met een frequentie van 10^{-4} en 10^{-5} . Met een grotere verschuivingsfactor kan het gewenste resultaat wel verkregen worden. Er wordt dan ook aanbevolen om de berekeningen nogmaals uit te voeren met andere verschuivingsfactoren. Een mogelijkheid om in deze situatie een goede schatting van de duinteruggang te maken is door middel van het doortrekken van de trend van de

puntenlijn naar een overschrijdingsfrequentie van interesse. Dit is in figuur 6.9 uitgevoerd. Indien de puntenlijn geëxtrapoleerd wordt valt op dat deze lijn niet continu is. Dat wordt veroorzaakt doordat de duinteruggang (X_d) afhankelijk is van het aanwezige duinprofiel. Deze is niet constant waardoor er een onregelmatig verloop van de frequentieverdeling verkregen wordt. Een mogelijke oplossing is het bekijken van de afgeslagen hoeveelheid duinmateriaal. Deze grootte is namelijk minder afhankelijk van het aanwezige duinprofiel. Wordt voor de bovenstaande berekening de overschrijdingsfrequenties van de afgeslagen hoeveelheid duin uitgezet dan wordt het volgende beeld verkregen:



Figuur 6-10; Afslagfrequentie hoeveelheid duinmateriaal, JARKUS-raai 409

(In bijlage 6.3 staan de overschrijdingsfrequenties van de overige raaien weergegeven)

In bovenstaande figuur is een lijn getrokken door de punten. Het verloop van de punten is minder onregelmatig dan wanneer de duinachteruitgang uitgezet wordt. Toch is de lijn nog niet geheel continu. Ook de afgeslagen hoeveelheid duinmateriaal is afhankelijk van het aanwezige duinprofiel.

6.6. Geulinvloed

Bij de berekeningen van de duinafslag is de getijdegeul het Nieuwe Schulpengat niet meegenomen als duinafslagbepalende factor. Uit de resultaten in de bijlage 6.2 valt op te maken dat in de meest noordelijke JARKUS profielen van het interessegebied het afgeslagen duinmateriaal zich afzet op de geulrand. De geul ligt niet evenwijdig aan de kustlijn. Onder normale condities is er in de geul een getijstrooming aanwezig. Het is dan maar de vraag of de modellering goed is voor wat betreft het berekende afslagprofiel. De mogelijkheid bestaat dat er door de strooming in de geul en door de niet-evenwijdige ligging van de geul aan de kustlijn, een gradiënt in het langstransport aanwezig is. Het gevolg hiervan kan zijn dat zand uit het dwarsprofiel verdwijnt. Zand dat uit het dwarsprofiel verdwijnt wordt niet aangewend om het afslagprofiel op te bouwen zodat de golfdempende werking verminderd en een grotere duinafslag is het gevolg.

Indien de invloed van een dergelijke geul meegenomen wordt in de berekening van de duinafslag dient er duidelijk te zijn hoe groot een dergelijke gradiënt is. Ten tijde van

storm en tijdens verschillende getijfasen dient het transporterend vermogen van de geul in kaart gebracht te worden. Vervolgens kunnen duinafslagberekeningen gemaakt worden waarbij het effect van de geul meegenomen wordt. Aanbevolen wordt dan ook om onderzoek te doen naar de mogelijke gradiënten in het langstransport als gevolg van de getijdegeul het Nieuwe Schulpengat.

7. Discussie

In dit hoofdstuk komen discussiepunten aan de orde die hun betrekking hebben op de uitwerking van de opdracht. Deze discussiepunten zullen vaak leiden tot aanbevelingen die hierin ook opgenomen zijn.

Methode

In de huidige praktijk voor de toetsing van de duinwaterkeringen wordt gebruik gemaakt van de leidraad. In de toekomst wordt deze leidraad wellicht vervangen door een nieuwe duintoets op basis van het tijdsafhankelijke model DUROSTA. Tijdens het uitvoeren van dit onderzoek is er in opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouw van Rijkswaterstaat, door Alkyon, Hydraulic Consultancy & Research, gewerkt aan een probabilistische rekenmethode rond het programma DUROSTA [Steetzel, H.J., 2003] ten bate van een nieuwe ‘duintoetsmethode’. De basis van deze schil is een niveau 2 berekening waarbij de verdelingsfuncties van de stochasten worden getransformeerd naar standaard normale variabelen. Een ‘testversie’ van dit programma is nu gereed. Dit is een andere benadering dan de hier gebruikte methode ‘De Haan’.

De methode ‘De Haan’ biedt echter ook een goed gereedschap om de duinen te toetsen. Indien de ‘normale’ Hollandse kust beschouwd wordt (zonder buitendelta), is het niet nodig om SWAN in te zetten voor de randvoorwaarden en kan gerekend worden met de diep-water randvoorwaarden. Indien een programma ontwikkeld wordt die het mogelijk maakt om de dataset automatisch te extrapoleren en deze geëxtrapoleerde stormen vervolgens door te rekenen met DUROSTA bestaat er een betrouwbaar duinbeheergereedschap. Het verdient aanbeveling om de methode ‘De Haan’ te vergelijken met de nieuwe ‘duintoetsmethode’.

Veiligheid

De huidige leidraad gaat uit van een faalkans van het duin van 10^{-1} maal de overschrijdingsfrequentie van de waterstand van 10^{-4} . De vereiste faalfrequentie van het duin bedraagt dan 10^{-5} . Deze factor 0,1 op de overschrijdingsfrequentie van de waterstand is te verklaren uit het feit dat de gebruikte waterstand in de duinafslagberekeningen bestaat uit een toeslag van 2/3 maal de decimeringshoogte. Deze toeslag, samen met het ontwerppeil wordt het rekenpeil genoemd. De afslag wordt als gevolg van onzekerheden in duinafslagbepalende factoren vermeerderd met een toeslag. De afslag vermeerderd met de toeslag levert de ontwerpafslag op met een overschrijdingsfrequentie van 10^{-5} . Indien alle onzekerheden meegenomen worden, is het niet nodig om met deze ‘veiligheids’factoren rekening te houden. Er zou (indien de huidige leidraad gebruikt zou worden) gerekend moeten worden met de waterstand met een overschrijdingsfrequentie van 10^{-5} .

De ‘nieuwe duintoets’ [Steetzel, H.J., 2003] berekend de duinafslag door voor elke duinafslagbepalende parameter een eigen frequentieverdeling op te stellen. De hierbij te berekenen duinafslag met een frequentie van 10^{-5} komt dus tot stand zonder extra toegepaste factoren.

De methode ‘De Haan’ is ook een volledige probabilistische methode zonder toeslagen op de berekende duinafslag. Door middel van de juiste extrapolatie kan de duinafslag behorende bij een overschrijdingsfrequentie van 10^{-5} gevonden worden. Een opmerking is op zijn plaats voor wat betreft de afslagbepalende parameters. Het falen van een constructie is afhankelijk van belasting én sterkte. In dit verslag is alleen

gerekend met de onzekerheid in de belasting. De onzekerheid in de sterkte is niet meegenomen en dient derhalve bekend te zijn. De onzekerheid van de sterkte zit onder meer in het vlak voor de storm aanwezige dwarsprofiel. De JARKUS-raaien zijn jaarlijkse momentopnamen, maar de profielen zijn gedurende een jaar onderhevig aan veranderingen. Deze onzekerheid in de ligging van de profielen dient meegenomen te worden in een volledige probabilistische beschouwing.

Grootte van de dataset

De gebruikte dataset bevat stormen uit de periode van '79-'97 (18 jaar), 727 stormen in totaal. De tijdreeks is te kort om een representatieve frequentieverdeling van de stormduren te maken omdat er dan te veel onzekerheid bestaat over de vorm van de staart van de verdeling. Daarnaast wordt de dataset onderverdeeld per stormrichting, en zijn de resulterende datasets te klein voor een nauwkeurige bepaling van de onderlinge verbanden tussen de stormparameters. Tevens is er slechts een beperkte mogelijkheid om de onderlinge afhankelijkheid te toetsen, welke wél vereist is bij een berekening volgens de methode de Haan.

De gebruikte meetreeks is de grootste beschikbare dataset van simultaan gemeten stormdata. Om de beperkingen van de te korte meetperiode en de te kleine dataset te niet te doen dient er beschikt te worden over grotere datasets over een langere meetperiode. Voor de bepaling van frequentieverdeling van de stormduren zou het mogelijk zijn om datasets te verzamelen over langere meetperioden. Echter grotere datasets van simultaan gemeten stormparameters zijn niet voorhanden en kunnen derhalve alleen verkregen worden door deze in de toekomst te blijven meten.

Extrapolatie correlatiestructuur

De methode 'De Haan' gaat uit van een asymptotische afhankelijkheid van de stormparameters. Indien dit niet het geval is en de methode wél wordt toegepast, dan leidt dit tot conservatieve uitkomsten voor de duinveiligheid.

Indien het verloop van de spreiding meegenomen wordt bij de extrapolatie dan is het mogelijk om een dataset van realistische extreme waarden te verkrijgen, ook indien er geen sprake is van asymptotische afhankelijkheid. De methode wordt dan breder toepasbaar en nauwkeuriger. Het verdient aanbeveling om naar een methode te zoeken die het verloop van de spreiding ook meeneemt in de extrapolatie.

Fysische beperking van extrapolatie

Het extrapoleren van de dataset is een volledig statistische benadering voor het bepalen van de extreme waarden. Terugkoppeling naar de fysica ontbreekt daarbij, er wordt geen controle uitgevoerd of de verkregen stormen door extrapolatie fysisch mogelijk zijn. Een methode die hier wel rekening mee houdt is de methode Bruinsma [Vrijling, J.K., en Bruinsma, J., 1980]. Aanbevolen wordt om onderzoek te doen naar de fysieke mogelijkheid van het naast elkaar voorkomen van de stormparameters in een geëxtrapoleerde storm.

Extrapolatie stormduren

De stormduur is voor de duinafslag een belangrijke factor [Steetzel, H.J., 1993] waarna relatief weinig onderzoek is gedaan. De onderzoeken die gedaan zijn hebben betrekking op omnidirectionele stormgegevens waarbij de conclusies uiteenlopen voor wat betreft de afhankelijkheid met andere stormparameters.

In dit rapport is een aanzet gegeven om de stormduur mee te nemen in de berekeningen. Een opdeling is gemaakt voor de stormrichtingen waarbij verbanden

met andere stormparameters aangetoond werden. De dataset waaraan deze conclusies zijn ontleend zijn van beperkte grootte en beperkte meetperiode.

Na deze opdeling in stormrichtingen zijn frequentieverdelingen opgesteld van de stormduur. Aan de hand van deze verdelingen zijn vervolgens extreme stormduren bepaald door middel van extrapolatie. Het extrapoleren van deze stormen kan in sommige gevallen leiden tot extreme stormduren van boven de 200 uur. Het verloop van de opzet is vervolgens aan de hand van deze stormduur opgesteld door middel van een \cos^2 -verloop van de opzet. De stormduur is daarbij gelijk aan het moment dat de opzet groter is dan 0 m. tot het moment dat de opzet weer is gedaald tot 0 m.

De uitwerking als zodanig is volledig gebaseerd op statistiek. De fysische mogelijkheid van extreme stormduren zijn niet meegenomen in deze uitwerking. Uitvoerig onderzoek is nog een vereiste voordat stormduren als zodanig meegenomen kunnen worden in de berekening.

In de uitwerking is er van uitgegaan dat de vorm van de opzet een \cos^2 -verloop heeft, een gemiddeld stormprofiel. Bij extreme stormduren is de vorm van de opzet wellicht afhankelijk van de stormduur en zou de stormvorm van de opzet misschien beschreven kunnen worden door een twee of drie toppig-verloop van de opzet. Grote onzekerheid bestaat hierover nog en er wordt dan ook aanbevolen om uitvoerig onderzoek te doen naar het voorkomen van extreme stormduren en de verbanden van deze stormduren met de stormvorm.

Invloed van de buitendelta op het golfveld

In de gepresenteerde uitwerking is voor de randvoorwaarden voor de duinafslagberekeningen rekening gehouden met de golfhoogtereducerende werking van de buitendelta. Uit de literatuur is bekend dat een kleine verandering van de golfhoogte weinig invloed heeft op de duinafslag [Steetzel, H.J., 1993]. Uit de berekeningen met SWAN blijkt dat ten opzichte van de golfhoogte op diep water de golfhoogte op de buitendelta met zo'n 50% is afgenomen. Dit is uiteraard van belang om mee te nemen in de duinafslagberekeningen. In de uitwerking blijkt dat de variatie van de golfhoogten langs de verschillende raaien groot is. Dit is het gevolg van de geometrie van het Zeegat van Texel. In de praktijk zou dit leiden tot één set met randvoorwaarden per raai. Om de invloed van de buitendelta mee te nemen maar niet te verzanden in te veel randvoorwaarden voor een kustsectie dient voor de kustsectie waarvoor de buitendelta van invloed is, een aparte randvoorwaarde opgesteld te worden als een reducerende factor op de diep-water randvoorwaarde voor de golfhoogte.

Stormverloop

Het stormverloop van de significante golfhoogte en de piekperiode is verkregen door middel van relaties met de waterstand, welke gemodelleerd is volgens een \cos^2 -verloop. Het werkelijke verloop van deze parameters is wellicht niet op een dergelijke manier afhankelijk van de waterstand. Aanbevolen wordt dan ook om te onderzoeken hoe het stormverloop van de parameters piekperiode en significante golfhoogte zich uiten bij een \cos^2 verloop van de opzet. Dit zou kunnen geschieden door vroegere tijdstippen, wanneer de intensiteit van de storm nog niet op zijn maximum is, door te rekenen met SWAN. Dit geldt ook voor de perioden dat de storm over zijn maximum heen is.

Stromingsveld

Voor het bepalen van de ondiep-water randvoorwaarden zijn de diep-water randvoorwaarden opgegeven en is de meest actuele dieptegeometrie toegepast. Het stromingsveld is hierbij niet meegenomen. Stroming is ook van invloed op het golfveld en zou meegenomen moeten worden bij het bepalen van de randvoorwaarden. Het verdient aanbeveling om te onderzoeken hoe het stromingsveld zich kan gedragen tijdens een extreme storm. Het onderzoek zou zich kunnen richten op modelsimulaties waarbij verschillende fasen van het getij bekeken wordt bij verschillende stormen. Daarnaast dient dan onderzocht te worden in welke mate een stromingsveld van invloed kunnen zijn op het golfveld.

Piekperiodevoorspelling

Bij het bepalen van de ondiep water randvoorwaarden is er voor de piekperioden aangenomen dat deze gelijk is aan de diep water piekperiode. Hierdoor bestaat de mogelijkheid dat er te zware randvoorwaarden op ondiep water opgelegd zijn. Er wordt dan ook aanbevolen om nader onderzoek te doen naar de voorspelling van de piekperiode over de ondiepten van de buitendelta.

Tijdsafhankelijke rekenmodel

Voor de berekening van de duinafslag is gebruik gemaakt van het tijdsafhankelijke model DUROSTA. Dit programma maakt het mogelijk om de stormduren mee te nemen in de berekeningen en om de afslagbepalende parameters tijdsafhankelijk mee te nemen zodat de realiteit beter benaderd wordt ten opzichte van een tijdsonafhankelijk model. Noodzaak daarbij is dat de tijdsafhankelijke parameters bekend zijn in de tijd. De stormverlopen voor de opzet zijn gemodelleerd met een \cos^2 verloop. De overige parameters zijn via fysische verbanden met de waterstand gemodelleerd. Het \cos^2 -verloop is een gemiddeld verloop van de opzet tijdens een storm. In de literatuur zijn ook andere stormverlopen beschreven. Het effect van een andere vorm is van invloed op de duinafslag. Elke storm heeft een afwijking op het gemiddelde verloop. Aanbevolen wordt dan ook om te onderzoeken hoe de stormvorm gemiddeld het best beschreven kan worden en of er een bepaalde afwijking kan worden berekend bij deze gemiddelde stormvorm. Tevens verdient het aanbeveling om te onderzoeken of de stormvorm afhankelijk is van de stormduur. Het is mogelijk dat langere stormen een andere vorm hebben dan relatief korte stormen.

Validatie piekperiode groter dan 12 s.

Bij het bepalen van de duinafslag zijn er berekeningen gemaakt waarbij de piekperiode van het golfspectrum groter is dan 12s. Het duinafslagmodel is niet gevalideerd voor piekperioden groter dan 12s [Steetzel, H.J., 1993]. Het is mogelijk dat dergelijke berekeningen geen betrouwbare resultaten opleveren. Aanbevolen wordt dan ook om onderzoek te doen naar de modellering van de duinafslag bij een piekperiode groter dan 12 s.

Effect tweetoppig spectrum

Uit de golfmodelberekeningen kwam naar voren dat de golfspectra die zich op de buitendelta voordeden tweetoppig zijn. Deze spectra zijn niet vergelijkbaar met een diep-water JONSWAP-spectrum. De duinafslag die wordt berekend met het duinafslagmodel DUROSTA gaat wel uit van dit spectrum. Aanbevolen wordt dan ook om te onderzoeken wat het effect is van de spectrumvorm op de duinafslag. Het

onderzoek zou zich kunnen toespitsen op het creëren van golfvelden met verschillende spectrumvormen.

Invloed getijdegeul

In de meest noordelijke duinprofielen komt de getijdegeul het Nieuwe Schulpengat dicht onder de kust. Bij de berekening van de duinafslag is geen rekening gehouden met een eventueel groot transporterend vermogen van de getijdegeul. De mogelijkheid bestaat dus dat de berekende duinafslagen een te mild karakter hebben en de duinafslag wellicht meer kan zijn. Aanbevolen wordt dan ook om te onderzoeken wat het eventueel transporterend vermogen van het Nieuwe Schulpengat is.

Faalmechanisme

Het faalmechanisme dat in dit rapport beschouwd is, is het falen van een duinwaterkering als gevolg van het eroderen van het duin door golfwerking bij een verhoogde waterstand. Andere faalmechanismen zijn daarbij niet onderzocht. Zeker in de noordelijke profielen bestaat de mogelijkheid van een instabiel talud als gevolg van de aanwezige getijdegeul. Aanbevolen wordt dan ook om te onderzoeken of er meerdere faalmechanismen zijn en voor het faalmechanisme dat kan ontstaan als gevolg van een steil talud te onderzoeken hoe groot de kans op falen is als gevolg van een dergelijk mechanisme.

8. Conclusies

De doelstelling van dit rapport is: Het uitwerken van de veiligheid van de duinen met behulp van de methode 'De Haan'. In tegenstelling tot de huidige toetsing van de duinveiligheid wordt de tijdsafhankelijkheid van de stormparameters meegenomen.

Dit is uitgewerkt aan de hand van een case-studie, waarbij de duinveiligheid van de Noord-Hollandse kust tussen Julianadorp en Den Helder is beschouwd. Voor dit studiegebied is gekozen, omdat er binnen de huidige leidraad nog veel onduidelijkheid bestaat omtrent de invloed van een buitendelta op de veiligheid van de achterliggende kust. Hierbij is vooral de invloed van de buitendelta op het golfveld beschouwd.

De gekozen methode, met een extrapolatie van een gemeten dataset naar extreme waarden, doorgerekend naar ondiep water waarmee vervolgens de duinafslag berekend wordt, is bruikbaar voor de toetsing van duinverdedigingen. Ook bij een complexe vooroever morfologie. De beschouwde kustsectie voldoet aan de eisen die gesteld zijn door de wet.

8.1. *Duinveiligheid*

Volgens de huidige leidraad voldoet de veiligheid van de duinen nabij het zeegat van Texel. Ook de toetsing met de methode 'De Haan' toont aan dat de duinen ruim voldoen aan de gestelde eis in de leidraad van een faalfrequentie van eens per 100.000 jaar. De duinprofielen bevatten genoeg zand om stormen te kunnen weerstaan met een frequentie kleiner dan 10^{-5} per jaar.

8.2. *Methode De Haan en invloed van de buitendelta*

8.2.1. Methode 'De Haan' voor duinafslag

De methode 'De Haan' voor het berekenen van de veiligheid van een duinwaterkering geeft een duidelijk beeld van de overschrijdingsfrequenties van de duinteruggang. Het stroomschema, zoals aangegeven in figuur 1-1 blijkt uitvoerbaar te zijn en levert aldus bruikbare resultaten op. Van belang is de keuze van de juiste verschuivingsfactor voor het extrapoleren van de stormdata naar extreme stormen. Indien het noodzakelijk is om een opdeling van de stormdata toe te passen, zoals in deze case-studie, dient er een voldoende aantal stormklassen geformuleerd te worden zodat er een voldoende resolutie in de afslagfrequentiefiguur verkregen wordt. Bij de onderverdeling in richtingen lijkt de afhankelijkheid tussen de stormparameters onderling toe te nemen. Tevens worden er verbanden gevonden die afhankelijkheid tussen de stormduur en de stormparameters aannemelijk maakt.

Een vereiste van methode 'De Haan' is de aanname van asymptotische afhankelijkheid. Bij het niet voldoen aan deze eis, wordt er een overschatting van de duinafslag verkregen. Het aantonen van deze afhankelijkheid vereist een voldoende grote dataset. Indien de dataset opgedeeld wordt over de stormrichtingen worden de datasets te klein om deze afhankelijkheid aan te tonen.

Het koppelen van de verschillende stappen zoals in het stroomschema in figuur 1-1

8.2.2. Invloed buitendelta op het golfveld

De invloed van de buitendelta op het golfveld is groot. Ten opzichte van diep water is de significante golfhoogte nabij de kust zo'n 50 % afgenomen. Het gebied onderscheidt zich daarmee van de 'normale' Hollandse kust waarbij de diep water

golfcondities nagenoeg gelijk zijn aan de golfcondities nabij de kust. Het is dan ook van belang dat deze invloed van de buitendelta meegenomen wordt in een beschouwing van de duinveiligheid.

Als gevolg van de geometrie van het zeegat van Texel kan tijdens een storm de significante golfhoogte in de verschillende raaien zo'n halve meter verschillen. De oorzaak van deze verschillen wordt gevormd door de oriëntatie van de geulen en platen in de buitendelta. Indien de stormrichting nagenoeg evenwijdig is aan de ligging van de geulas zullen, als gevolg van de grotere diepte in de geulen, de golven minder snel breken en zich tot vlak onder de kust voortplanten. Het effect van deze (locale) golfaanval valt in het niet bij de algehele golfhoogteafname van 50 %. De Noorderhaaks is ook van invloed op het golfveld. Indien er een noordwesten wind staat wordt een deel van het duinengebied afgeschermd voor golfaanvallen door de ligging van deze plaat. Dit is vooral te merken in de noordelijke raaien waar de golfhoogten duidelijk lager zijn dan in de zuidelijke raaien.

De ontwikkeling van de piekperiode is als gevolg van beperkingen van het model SWAN niet goed te berekenen. De piekperiode op ondiep water is daarom aangenomen als zijnde gelijk aan de piekperiode op diep water. Het golfspectrum dat zich aan de kust, op de buitendelta voordoet is een dubbeltoppig spectrum. Als gevolg van brekende golven op de ondiepten zakt de piek van het spectrum als het ware in, terwijl op de ondiepten een nieuw golfveld gevormd wordt als gevolg van het lokaal heersende windklimaat. De piekperiode van het lokale golfveld is lager zodat een dubbeltoppig spectrum het gevolg is.

De berekende golfhoogtes op ondiep water worden voornamelijk bepaald door de waterstand, de windsnelheid en de piekperiode die opgelegd zijn. De golfhoogte die op diep water opgegeven is, is hierin niet van belang.

8.2.3. Tijdsafhankelijke duinafslag

Doordat in de berekeningen gebruik is gemaakt van een tijdsafhankelijk model is het mogelijk om tijdsafhankelijke processen mee te nemen. Het is daarbij noodzaak dat deze tijdsafhankelijke processen wel bekend dienen te zijn in de tijd. Voor de stormverlopen van de opzet is van een gemiddeld stormverloop uitgegaan. De overige stormparameters zijn daar vervolgens aan gekoppeld via fysische relaties. Om de afslagbepalende parameter, de stormduur, mee te nemen is het onvermijdelijk om een tijdsafhankelijk model te gebruiken.

Doordat de stormen onderverdeeld zijn in verschillende stormrichtingen werden er verbanden aangetoond tussen de stormduur en de overige stormparameters. Het werd daarbij mogelijk om de stormduur volgens de methode 'De Haan' te extrapoleren en deze vervolgens in de duinafslagberekeningen mee te nemen.

Literatuurlijst

- Battjes, J.A. & Stive, M.J.F., 1985; Calibration and Verification of a dissipation model for random breaking waves, *J. Geophys. Res.*, 90, No. C5, 9159-9167
- Blok, M. & Mol, J.W., 2001; Debietmeting zeegat van Texel, Rijkswaterstaat directie Noord-Holland
- Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving/CUR, 1997; Kansen in de civiele techniek, Deel1: probabilistisch ontwerpen in theorie
- de Ronde, J.G., van Marle, J.G.A., Roskam, A.P., Andorka Gal, J.H., 1995; Golfvandvoorwaarden langs de Nederlandse kust op relatief diep water, Rijksinstituut van kust en zee/RIKZ
- deValk, C.F., 1996; Estimation of the frequencies of failure of coastal structures from offshore data of environmental loads, *Delft Hydraulics*
- de Valk, C.F. & Zitman, T.J., 1992; Determining statistics of multivariate storm extremes of the coast of the Netherlands- A pilot, *Delft Hydraulics*
- de Valk, C.F. & Steetzel, H.J., 1997; Modelling statistics of storm duration to assess the reliability of dunes as flood protection- preliminary investigation, Advisory and Research Group on Geo Observation Systems and Services/ ARGOSS
- de Valk C.F., 1997, Transformation of multivariate extreme value statistics from deep water toward the shore and calculation of failure frequencies for Pettemer Zeewering and Friesche Zeegat, ARGOSS, final report A 26.
- Dijk, M., 2010; Vergelijking UNIBEST-TC en DUROSTA, Twee tijdsafhankelijke dwarstransportmodellen (afstudeerverslag), Faculty of Civil Engineering and Geosciences/ TU Delft
- Elias, E.P.L. & Cleveringa, J., 2003b; Morfologische Analyse van de Ontwikkeling van het Nieuwe Schulpengat en de aangrenzende kust, Rijksinstituut voor kust en zee/RIKZ
- Elias, E.P.L., Stive, M.F., Bonekamp, J.G., Cleveringa, J., 2003a, Accepted for review, *Coastal Engineering Journal*.
- Gebruikershandleiding DUROSTA Versie 1.20, Tijdsafhankelijk duinafslagprogramma, 1995, *Delft Hydraulics*
- van de Graaff, J., 1984; Probabilistische methoden bij het duinontwerp, achtergrond van de TAW-leidraad 'duinafslag'.
- de Haan, L. en Resnick, S.I., 1977, Limit theory for multivariate sample extremes, *Z. Wahrscheinlichkeitstheorie verw. Gebiete* 40.
- Hasselmann, K., 1974; On the spectral dissipation of ocean waves due to whitecapping, *Bound.-layer Meteor.*, 6, 1-2, 107-127
- Hillen, R. & de Ruig, J.H.M., 1993, De Basiskustlijn, norm voor dynamisch handhaven, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Dienst Getijdewateren/RWS DGW
- Hillen, R., de Ruig, J.H.M., Roelse, P., Hallie, F.P., 1991; De basiskustlijn: een technisch/morfologische uitwerking, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Dienst Getijdewateren/RWS DGW
- Holthuijsen, L.H., Booij, N., Ris, R.C., Haagsma, I.J.G., Kieftenburg, A.T.M.M., Kreezi, E.E., 2000; SWAN user manual (not the short version).
- Hydraulische Randvoorwaarden 2001 voor het toetsen van primaire waterkeringen, 2001, Rijksinstituut voor kust en zee/RIKZ
- Jacobse, J.J., 2000; Validatie van het SWAN-model voor de Pettemer zeewering (concept), Rijksinstituut voor kust en zee/RIKZ

- Jacobse, J.J., Kieftenburg, A.T.M.M., den Heijer, F., 2002; Betrouwbaarheid golfcondities met SWAN, Rijksinstituut voor kust en zee/RIKZ
- Kragwijk, N.G., 2001, Aggregated scale modelling of tidal inlets in the Wadden Sea, Delft Hydraulics/Delft Cluster
- Louters, T. & Gerritsen, F., 1994; Het mysterie van de Wadden; Hoe een getijdesysteem inspeelt op de zeespiegelstijging, Rijksinstituut voor kust en zee/RIKZ
- van Marle, J.G.A., 2000; Basis HYDRA-K, Meerdimensionale extreme waardenstatistiek van belastingen en faalkansberekening, Rijksinstituut voor kust en zee/RIKZ
- Miles, J.W., 1957; On the generation of surface waves by shear flows, J. Fluid Mech., 3, 185-204
- Phillipart, M.E., Dillingh, D., Pwa, S.T., 1995; De basispeilen langs de Nederlandse kust, Rijksinstituut voor kust en zee/RIKZ
- Phillips, O.M., 1957; On the generation of waves by turbulent wind, J. of Fluid Mech., 2, 417-445
- Roskam, A.P., Hoekema, J., Seijffert, J.J.W., 2000; Richtingsafhankelijke extreme waarden voor HW-standen, golfhoogten en golfperioden, Rijksinstituut voor kust en zee/RIKZ
- Roskam, A.P. & Hoekema, J., 1996; Randvoorwaarden voor golfperioden langs de Nederlandse kust, Rijksinstituut voor kust en zee/RIKZ
- Steetzel, H.J., 2003; OntwikkelingDuinToets versie 0.0, Ontwikkeling en toetsing probabilistische schil rond duinafslagprogramma DUROSTA, Alkyon Hydraulic Consultancy & Research, opdrachtgever: Dienst Weg-en Waterbouwkunde
- Steetzel, H.J., 1993; Cross-shore Transport during Storm Surges, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen/ TAW
- Steetzel, H.J., 1999; Parameterinventarisatie en gevoeligheidsonderzoek DUROSTA-model (Concept), Alkyon Hydraulic Consultancy & Research, opdrachtgever: Dienst Weg-en Waterbouwkunde, in opdracht van TAW-C.
- Steetzel, H.J., 1987, Duinafslag bij steile vooroevers, oriënterend onderzoek naar de effecten van een diepe geul op de mate van duinafslag, Delft Hydraulics Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen/ TAW, Basisrapport zandige kust, 1995
- Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen/ TAW, Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering, 1984
- Thijsse, I.T., 1972, Een halve eeuw Zuiderzeewerken 1920-1970, Tjeenk Willink, Groningen, Nederland
- Voortman, H.G., 2002; Risk-based design of large-scale flood defence systems, Faculty of Civil Engineering and Geosciences/ TU Delft
- Vrijling J.K. and Bruinsma J., 1980. Hydraulic Boundary Conditions. In: Proceedings on HYDRAULIC ASPECTS OF COASTAL STRUCTURES; developments in hydraulic engineering related to the design of the Oosterschelde storm surge barrier in the Netherlands. Editors: A. Paape, J. Stuij, W.A. Venis, Delft University Press 1980, pp. 109 - 133, ISBN 90-6275-0540.
- van Weerden, J.J., Janssen, J.P.F.M., Vrijling, J.K., 1987; Effect variatie opzetduren op de hoogwaterstanden in het noordelijk deltabekken, Dienst Binnenwateren/ RIZA, Dienst Weg-en waterbouwkunde, directie sluizen en stuwen

Wieringa, J. & Rijkoort, P.J., 1983; Windklimaat van Nederland, Koninklijk
Nederlands Meteorologisch Instituut/ KNMI

Bijlagen

| | |
|---|----|
| Bijlagen hoofdstuk 2 | 2 |
| Bijlage 2.1: JARKUS-raaien | 3 |
| Bijlagen hoofdstuk 3 | 7 |
| Bijlage 3.1: Duinafslag volgens DUROS | 8 |
| Bijlagen hoofdstuk 4 | 11 |
| Bijlage 4.1: Voorwaarden van stormselectie | 12 |
| Bijlage 4.2: Frequentieverdelingen stormparameters | 13 |
| Bijlage 4.3: Extrapolatie van de correlatiestructuur | 15 |
| Bijlage 4.4: Controle asymptotische afhankelijkheid | 17 |
| Bijlage 4.5: Windsnelheid versus stormduur | 19 |
| Bijlage 4.6: Afhangelijkheid op basis van de stormduur | 20 |
| Bijlage 4.7: Overschrijdingsfrequenties stormduren | 25 |
| Bijlage 4.8: Afhangelijkheid stormduur | 28 |
| Bijlage 4.9: Klassenindeling van de geëxtrapoleerde stormen | 31 |
| Bijlagen hoofdstuk 5 | 37 |
| Bijlage 5.1: Golfspectra op de rekenrand | 38 |
| Bijlage 5.2: Uitvoer grove grid | 39 |
| Bijlage 5.3: Uitvoer fijne grid | 45 |
| Bijlage 5.4: Uitvoer detailgrid | 48 |
| Bijlage 5.5: Invloed van de stormklasse op de significante golfhoogte | 63 |
| Bijlage 5.6: Uitvoer van de piekperiode | 65 |
| Bijlage 5.7: Spectrum ontwikkeling langs een raai | 66 |
| Bijlagen hoofdstuk 6 | 71 |
| Bijlage 6.1: Resultaten duinafslag; eindprofielen | 72 |
| Bijlage 6.2: Frequentieverdeling duinteruggang | 73 |
| Bijlage 6.3: Frequentieverdeling afgeslagen hoeveelheid duinzand | 79 |

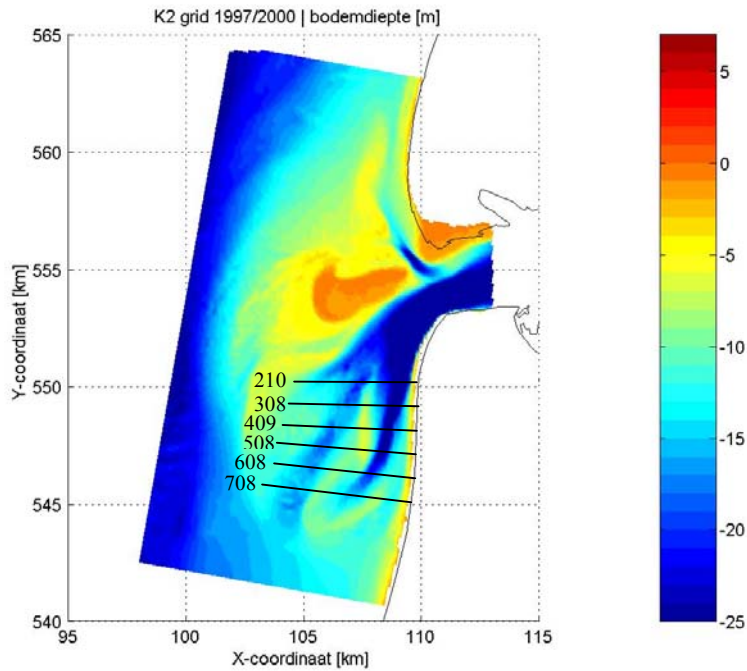
Bijlagen hoofdstuk 2

| | |
|----------------------------------|---|
| Bijlage 2.1: JARKUS-raaien | 3 |
|----------------------------------|---|

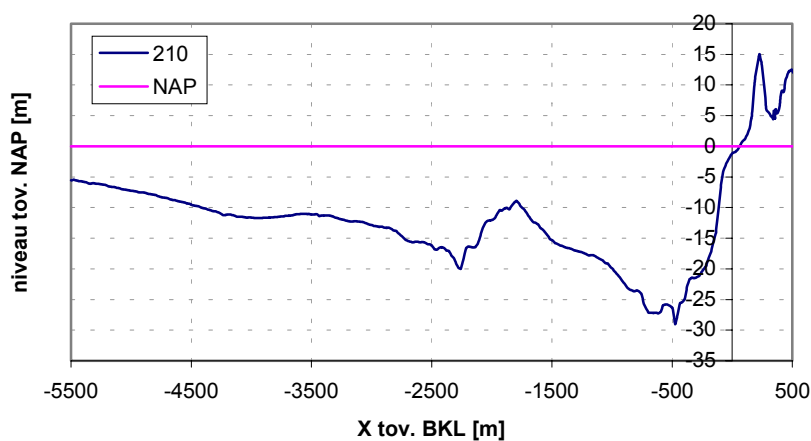
Bijlage 2.1: JARKUS-raaien

Algemeen

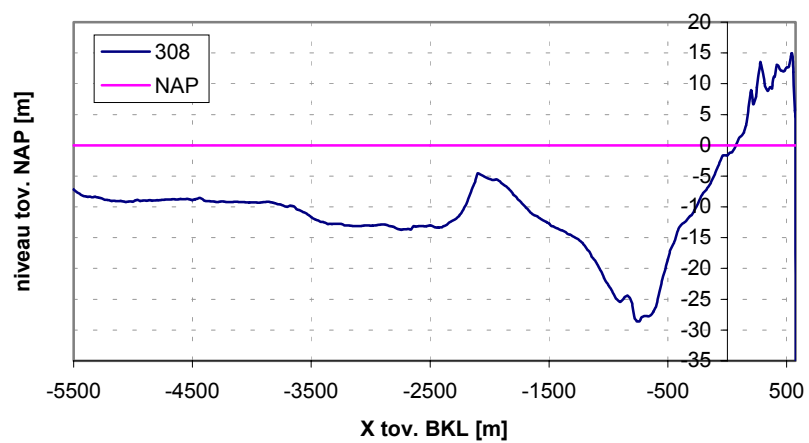
In onderstaande figuren zijn de JARKUS-raaien weergegeven die tot het onderzoeksgebied behoren. De eerste figuur laat een overzicht zien van waar de raaien zich bevinden:



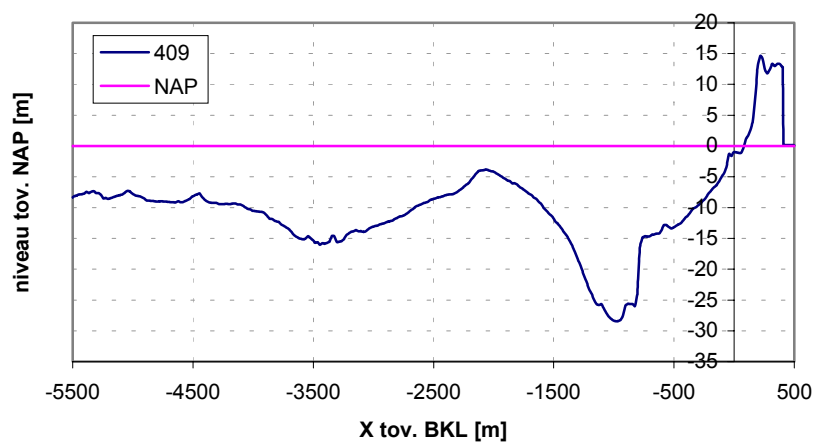
JARKUS-raai 210



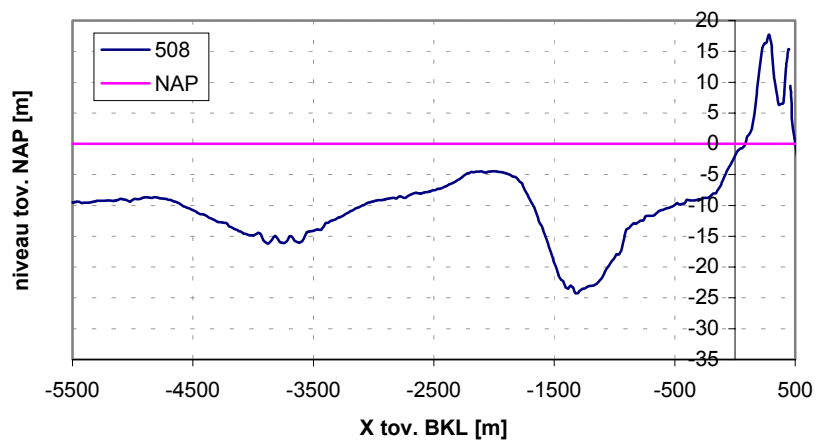
JARKUS-raai 308



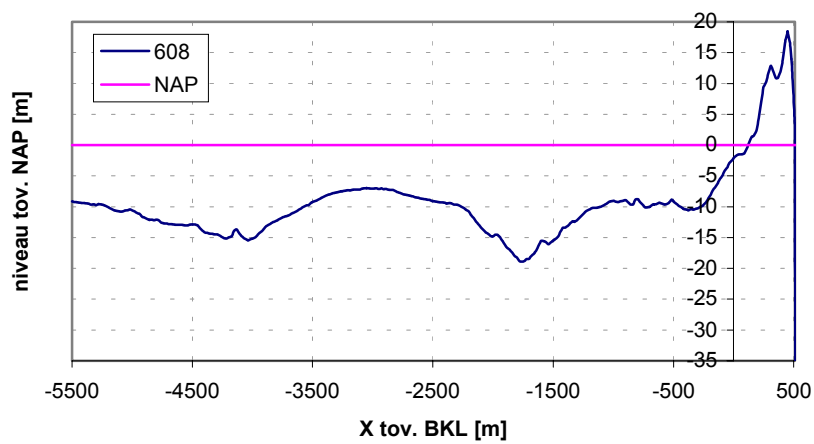
JARKUS-raai 409



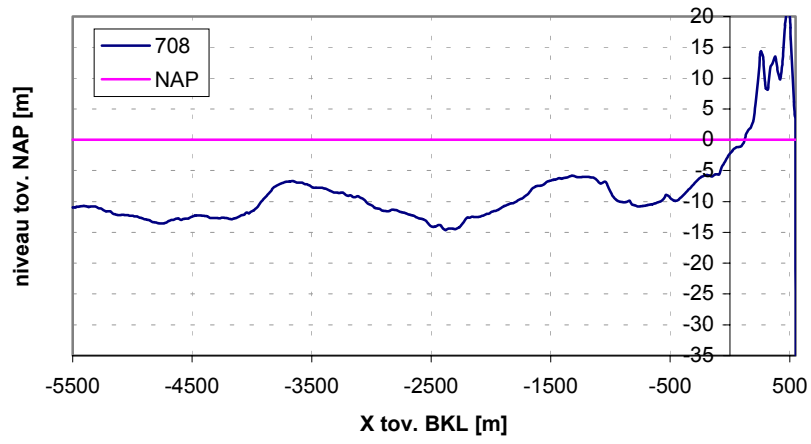
JARKUS-raai 508



JARKUS-raai 608



JARKUS-raai 708



Bijlagen hoofdstuk 3

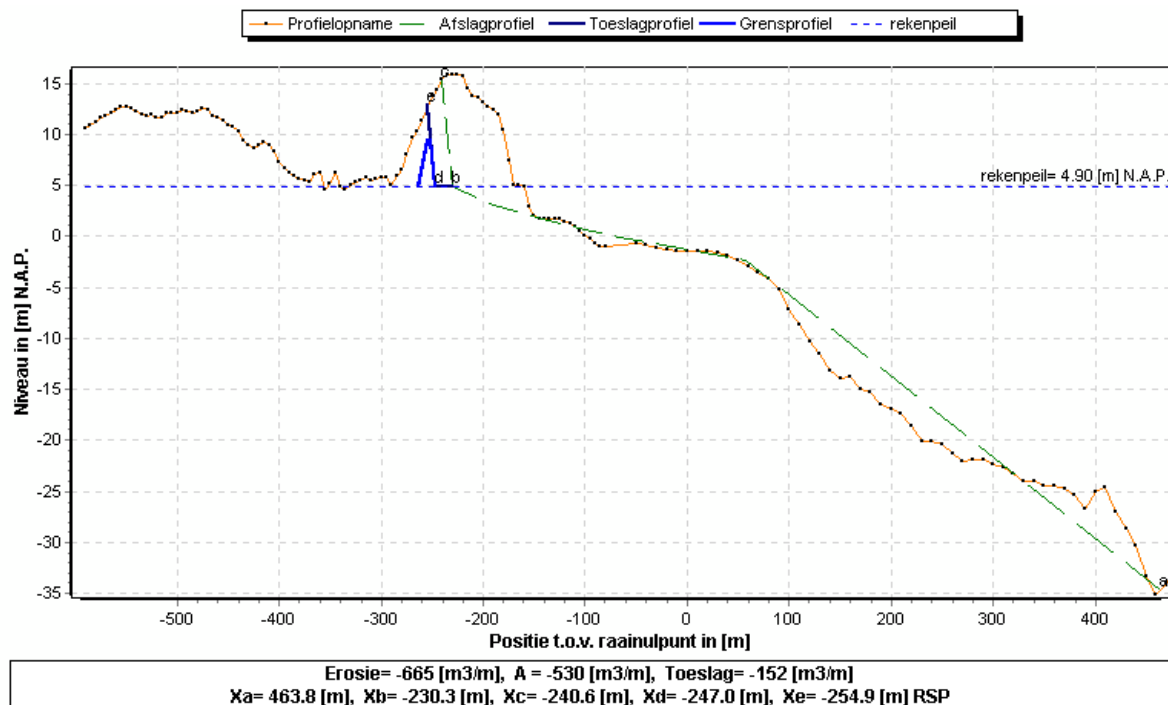
| | |
|--|---|
| Bijlage 3.1: Duinafslag volgens DUROS..... | 8 |
|--|---|

Bijlage 3.1: Duinafslag volgens DUROS

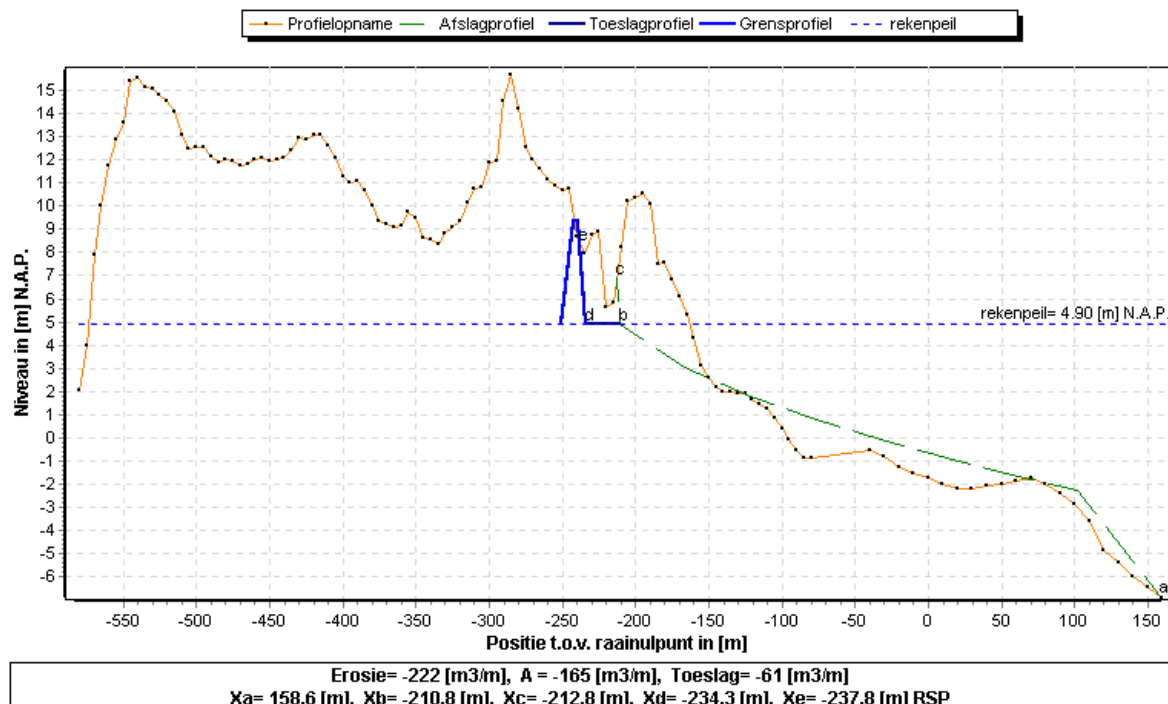
Algemeen

In onderstaande figuren zijn de eindprofielen getekend van de ontwerpafslagen in het gebied van interesse.

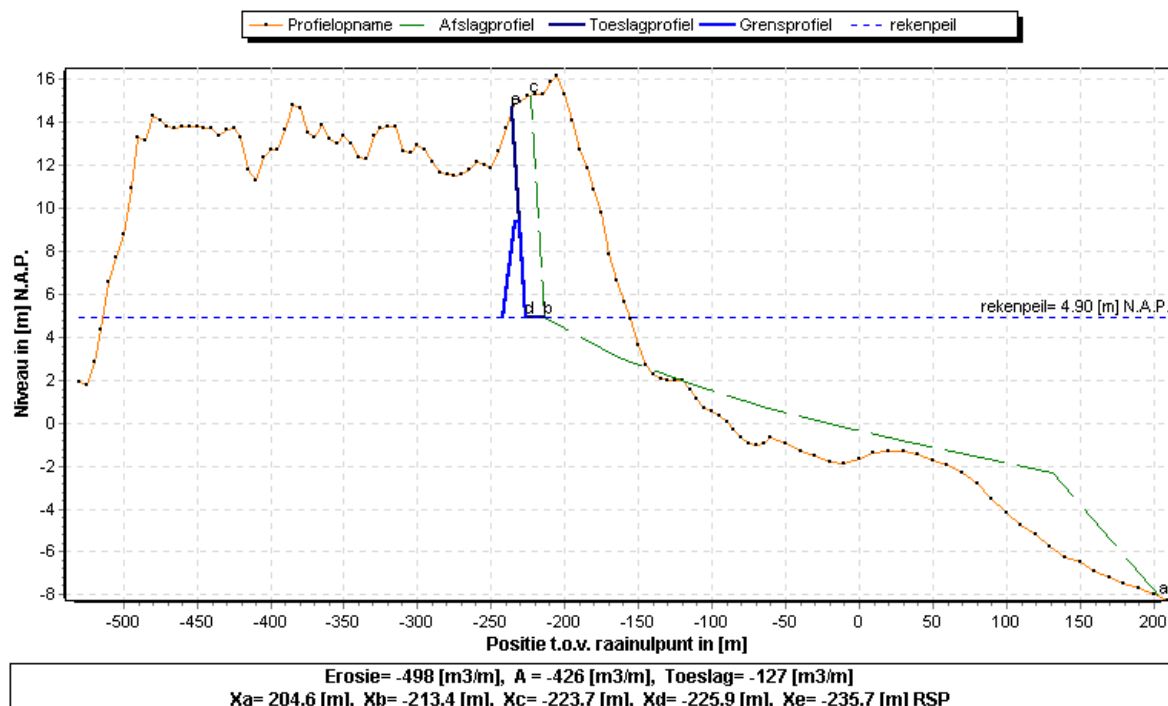
JARKUS-raai 210:



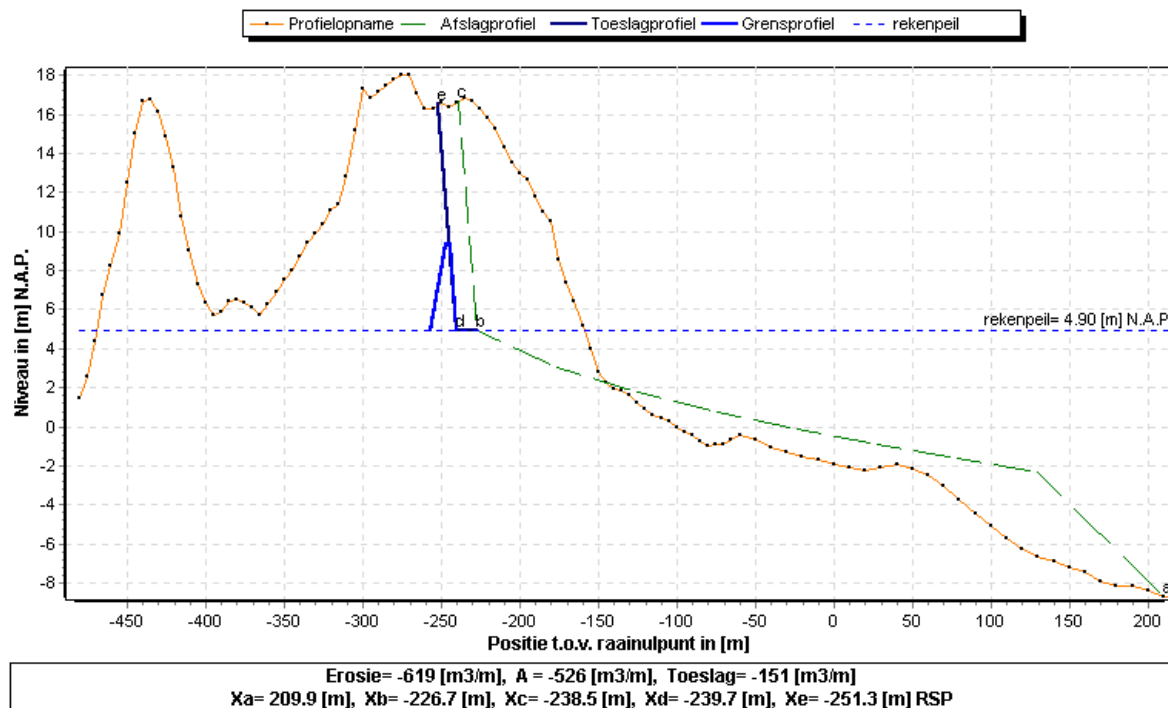
JARKUS-raai 308:



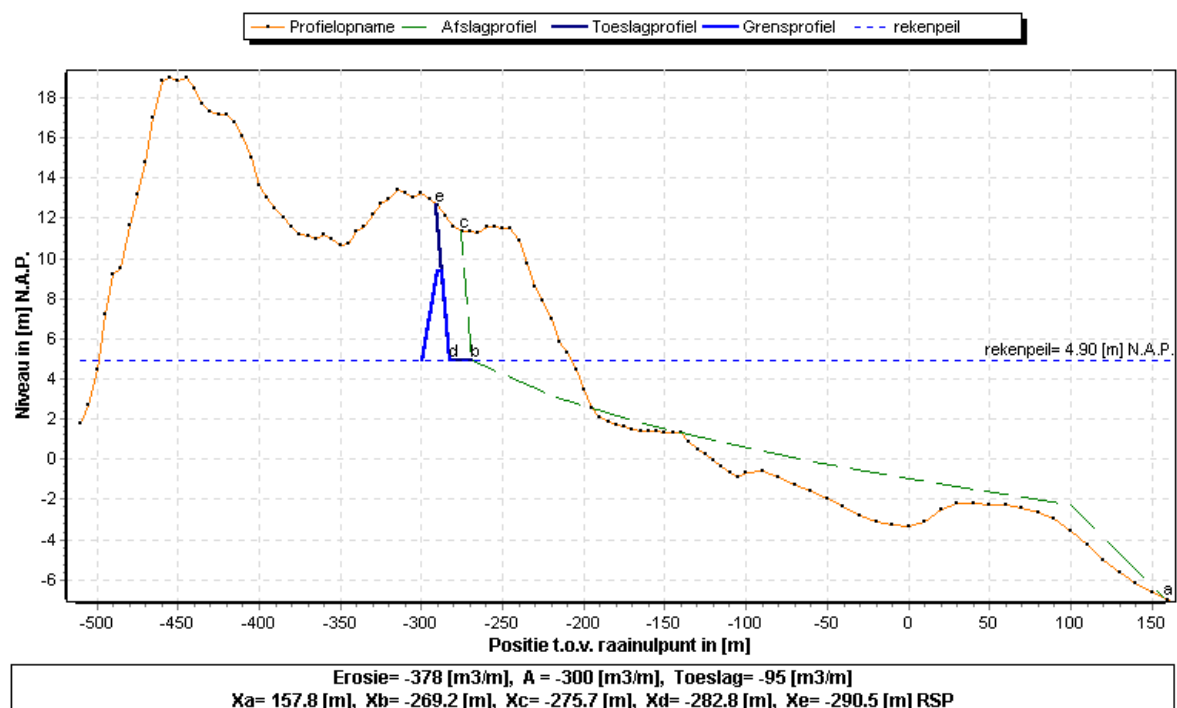
JARKUS-raai 409:



JARKUS-raai 508:



JARKUS-raai 608:



Bijlagen hoofdstuk 4

| | |
|---|----|
| Bijlage 4.1: Voorwaarden van stormselectie..... | 12 |
| Bijlage 4.2: Frequentieverdelingen stormparameters..... | 13 |
| Bijlage 4.3: Extrapolatie van de correlatiestructuur..... | 15 |
| Bijlage 4.4: Controle asymptotische afhankelijkheid | 17 |
| Bijlage 4.5: Windsnelheid versus stormduur | 19 |
| Bijlage 4.6: Afhangelijkheid op basis van de stormduur | 20 |
| Bijlage 4.7: Overschrijdingsfrequenties stormduren..... | 25 |
| Bijlage 4.8: Afhangelijkheid stormduur..... | 28 |
| Bijlage 4.9: Klassenindeling van de geëxtrapoleerde stormen | 31 |

Bijlage 4.1: Voorwaarden van stormselectie

Algemeen

De golfdata zijn onttrokken uit een stormdatabank [Productieversie HYDRA-K, 2002] met simultane stormgegevens over de periode 1979-1997 van de golfmeetstations SON, ELD, K13, YM6 en EUR. De voorwaarden voor het noteren van een storm in de databank staan hieronder gegeven.

Dataselectie

De eerste selectie van de stormperiodes vindt plaats door die periodes te selecteren, waarbij tenminste 1 van de 5 golfmeetstations 1 van de drempels voor golfhoogte, windsnelheid of waterstand wordt overschreden. Deze drempels zijn gebaseerd op 5% overschrijdingskansen.

Vervolgens worden deze selecties per meetstation aangepast. Daartoe worden eerst nieuwe drempels bepaald voor de golfhoogte, windsnelheid en de opzet, nu gebaseerd op 10% overschrijdingskansen. Perioden waarbij bij dat station binnen de beschouwde storm-periode geen enkele drempel wordt overschreden worden verwijderd en aan het begin en einde van de overgebleven stormperiode worden de reeksen weggehaald waarin geen enkele drempel wordt overschreden. Per station wordt op een dergelijke manier alleen de relevante data verkregen.

De golfreeksen bestaan uit uurlijkse waarnemingen die zijn gecontroleerd en waarin de hiaten zijn opgevuld met een neurale netwerk programma. De golf-, wind- en waterstandsopzetreeksen zijn licht glad gestreken (lopend middelen over drie waarden) om te voorkomen dat er teveel niet significante piekjes worden geselecteerd.

Bijlage 4.2: Frequentieverdelingen stormparameters

Algemeen

De frequentieverdelingen van de stormparameters voor het station ELD hebben volgens [Roskam, A.P., e.a., 2000] de conditionele Weibull vorm:

$$F(x) = p_c \cdot \exp\left(-\left(\frac{x}{\sigma}\right)^\alpha + \left(\frac{\omega}{\sigma}\right)^\alpha\right) \quad (4-1)$$

Hierin is:

| | | |
|--------------------|---|--------|
| x | = beschouwde stochast | [x] |
| F(T _s) | = frequentie van overschrijding van de stochast | [1/jr] |
| ω | = drempelwaarde (ondergrens) voor de stochast | [x] |
| p _c | = overschrijdingsfrequentie van de drempel ω | [1/jr] |
| σ | = schaalparameter van de verdelingsfunctie | [x] |
| α | = vormparameter van de verdelingsfunctie | [-] |

In onderstaande tabel staat per richting en per stormparameter de bijbehorende Weibull parameters gegeven:

Richting 210:

| Stormparameter | Weibull-parameter | | | |
|-------------------|-------------------|----------------|------|-------|
| | ω | p _c | α | σ |
| h | 1,55 | 0,018 | 1,54 | 0,324 |
| U _{wind} | 22,40 | 0,380 | 2,76 | 14,31 |
| T _p | 8,80 | 0,240 | 3,00 | 5,491 |
| H _{m0} | 4,00 | 0,282 | 2,62 | 2,85 |

Richting 240:

| Stormparameter | Weibull-parameter | | | |
|-------------------|-------------------|----------------|------|-------|
| | ω | p _c | α | σ |
| h | 1,55 | 0,397 | 1,39 | 0,463 |
| U _{wind} | 22,40 | 0,490 | 2,66 | 15,08 |
| T _p | 8,80 | 0,928 | 3,00 | 6,217 |
| H _{m0} | 4,00 | 0,940 | 2,62 | 3,501 |

Richting 270:

| Stormparameter | Weibull-parameter | | | |
|-------------------|-------------------|----------------|------|-------|
| | ω | p _c | α | σ |
| h | 1,55 | 1,369 | 1,65 | 0,877 |
| U _{wind} | 23,40 | 0,390 | 2,43 | 14,16 |
| T _p | 8,80 | 2,850 | 3,00 | 6,671 |
| H _{m0} | 4,00 | 2,530 | 2,62 | 3,686 |

Richtung 300:

| Stormparameter | Weibull-parameter | | | |
|----------------|-------------------|-------|----------|----------|
| | ω | p_c | α | σ |
| h | 1,55 | 1,046 | 1,80 | 1,110 |
| U_{wind} | 21,40 | 0,390 | 2,38 | 13,70 |
| T_p | 8,80 | 2,877 | 3,00 | 7,171 |
| H_{m0} | 4,00 | 1,970 | 2,62 | 3,777 |

Richtung 330:

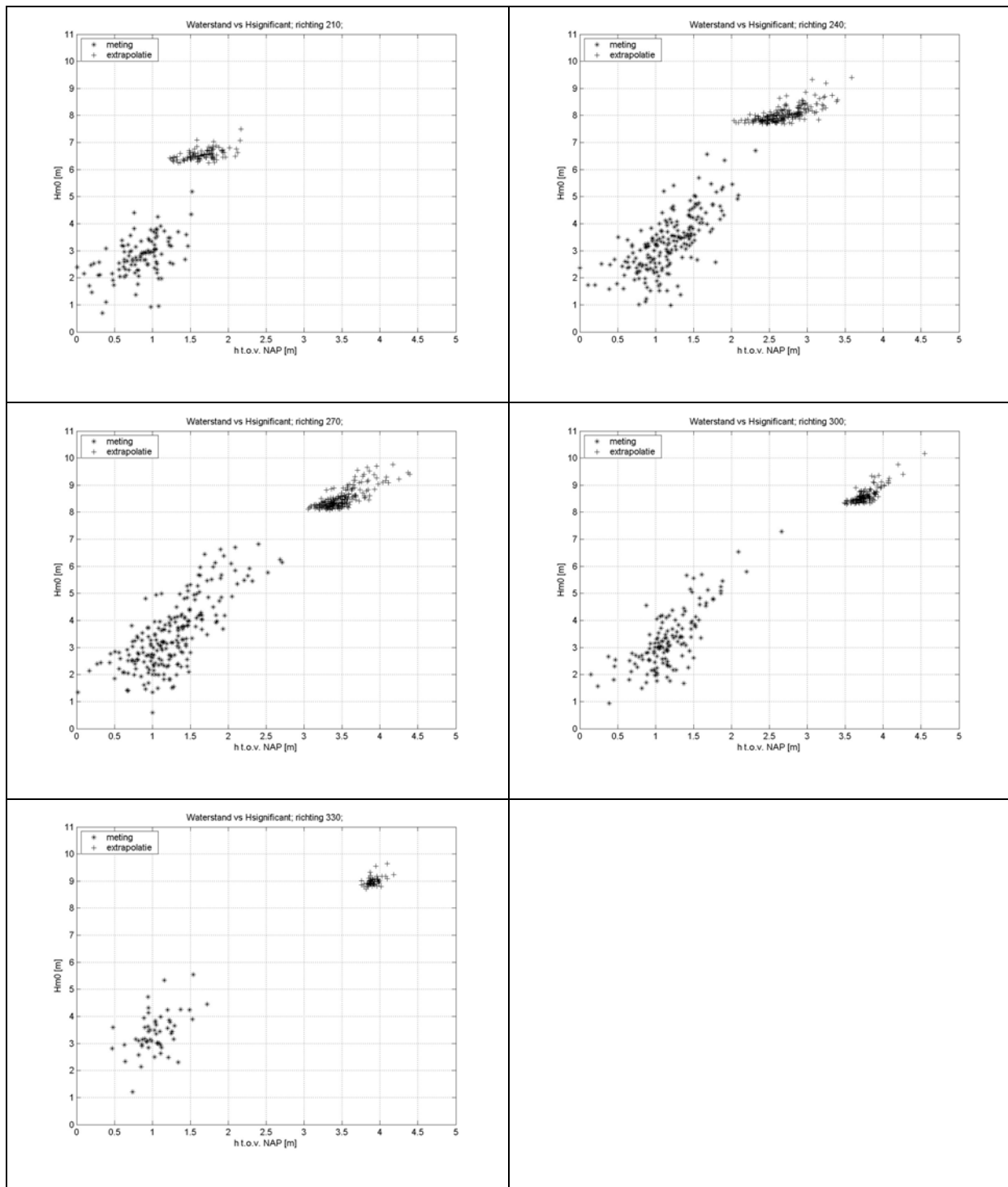
| Stormparameter | Weibull-parameter | | | |
|----------------|-------------------|-------|----------|----------|
| | ω | p_c | α | σ |
| h | 1,55 | 0,372 | 1,83 | 1,205 |
| U_{wind} | 19,40 | 0,450 | 2,42 | 12,08 |
| T_p | 8,80 | 2,010 | 3,00 | 7,465 |
| H_{m0} | 4,00 | 1,105 | 2,62 | 3,966 |

Bijlage 4.3: Extrapolatie van de correlatiestructuur

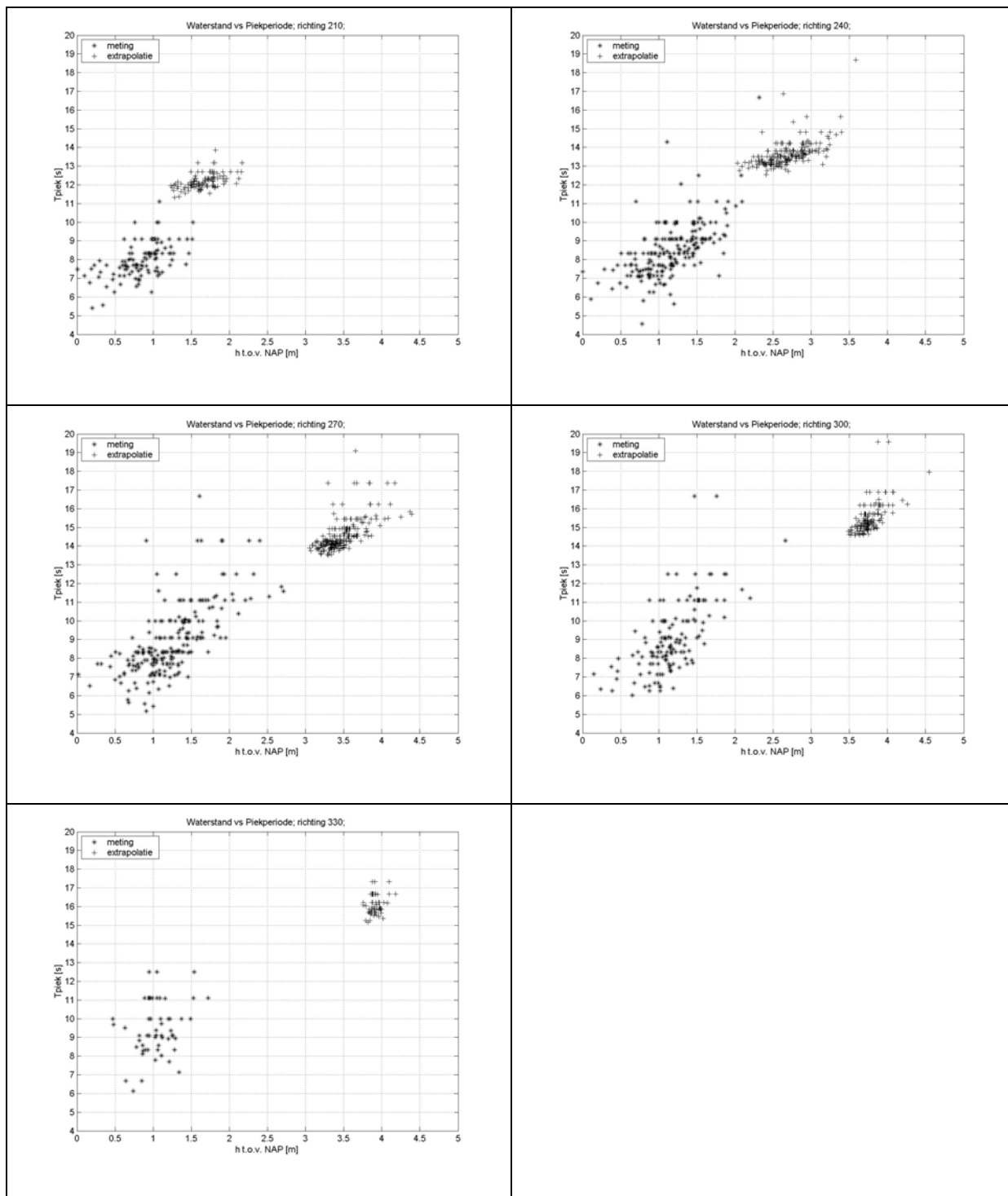
Algemeen

De geëxtrapoleerde datasets zijn te beschouwen als stormen met per storm een geëxtrapoleerde waarde voor de windsnelheid, waterstand, piekperiode en significante golfhoogte. In de onderstaande figuren staan de golfparameters uitgezet tegen de waterstand en opgedeeld in de stormrichtingen. De originele metingen staan ook gegeven.

Waterstand versus significante golfhoogte:



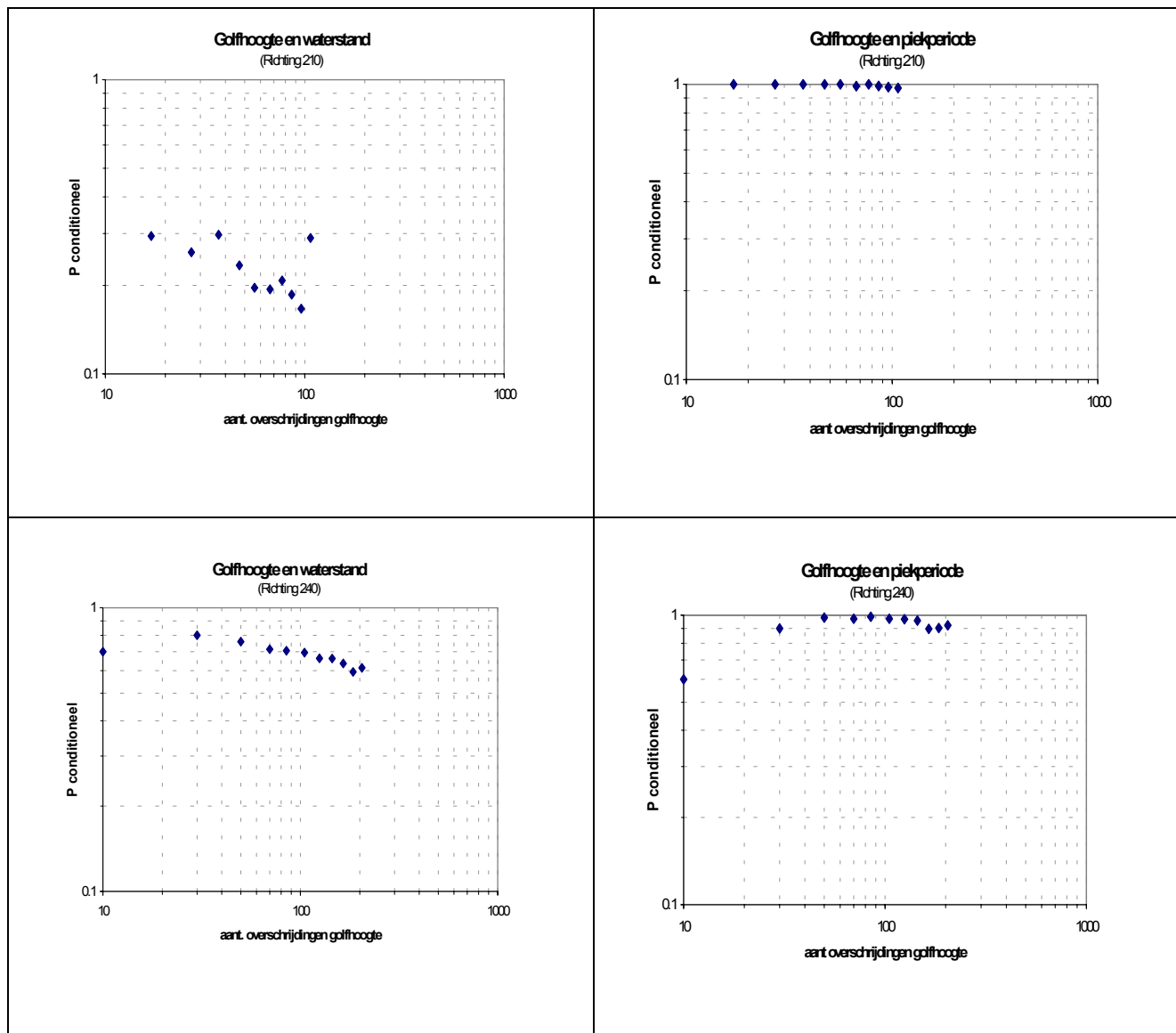
Waterstand versus piekperiode:

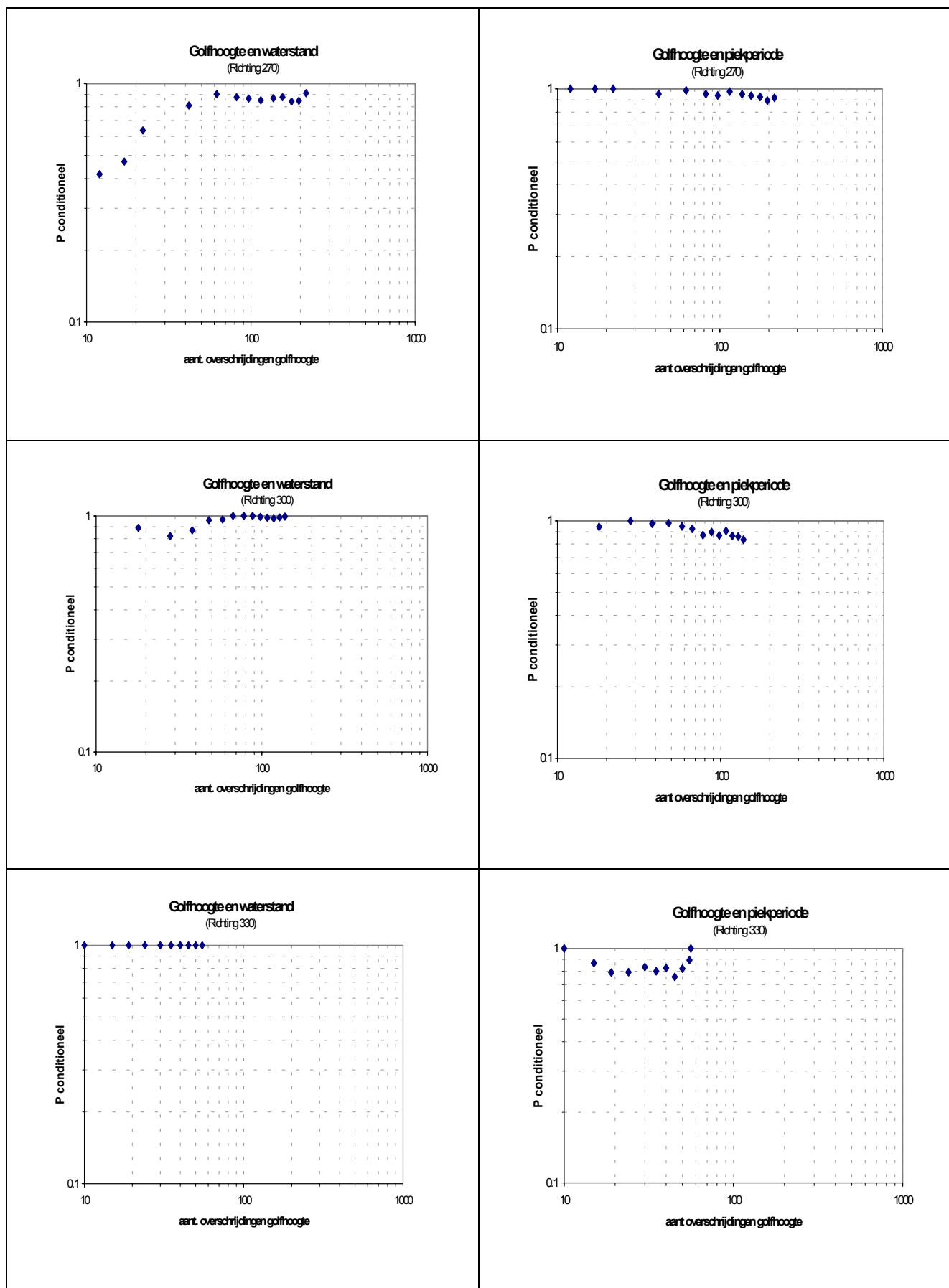


Bijlage 4.4: Controle asymptotische afhankelijkheid

Algemeen

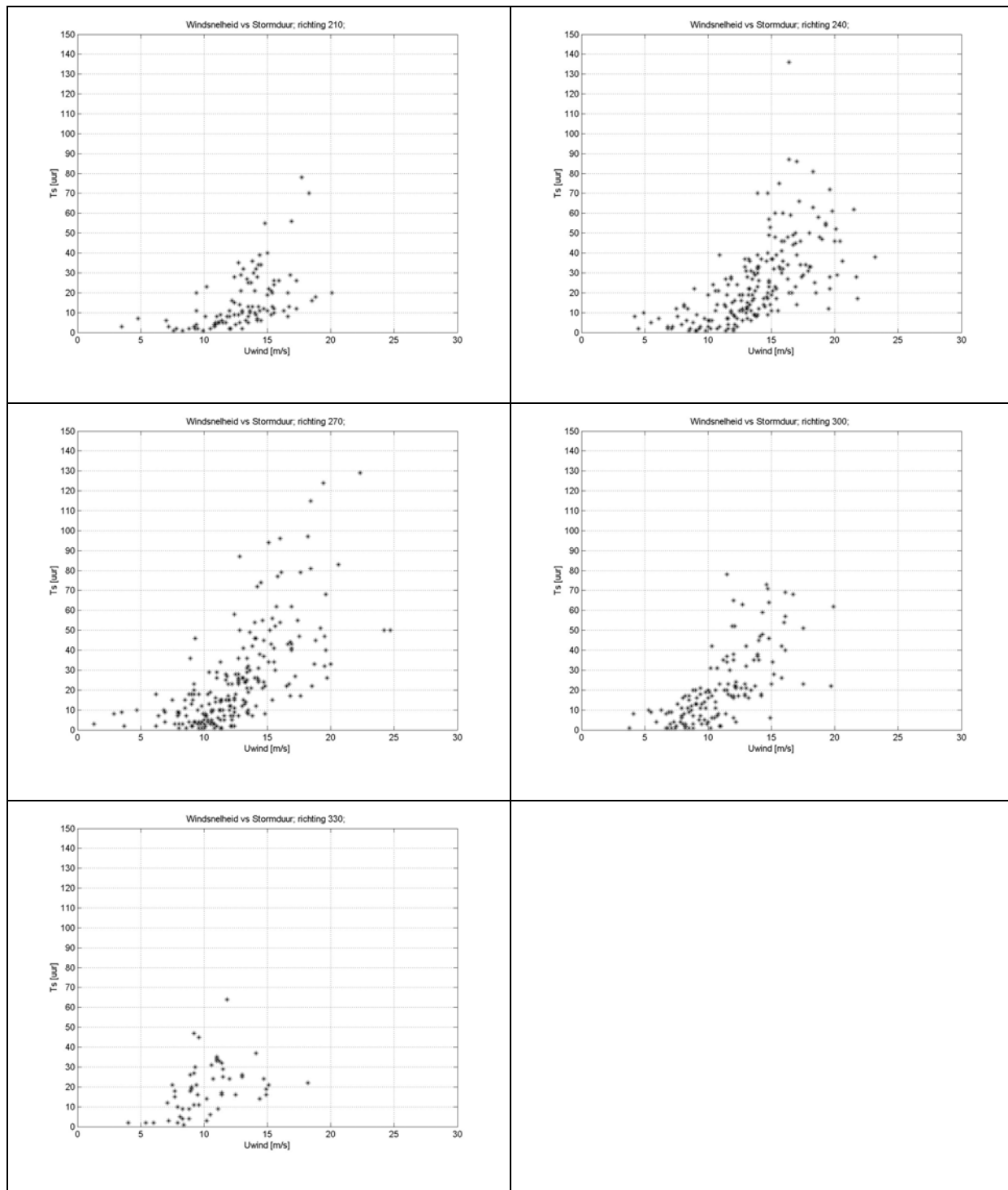
In onderstaande figuren staan (gelijk aan De Valk, C.F., 1996) de figuren die asymptotische afhankelijkheid aan dienen te tonen. De figuren zijn per stormrichting gegeven:





Bijlage 4.5: Windsnelheid versus stormduur

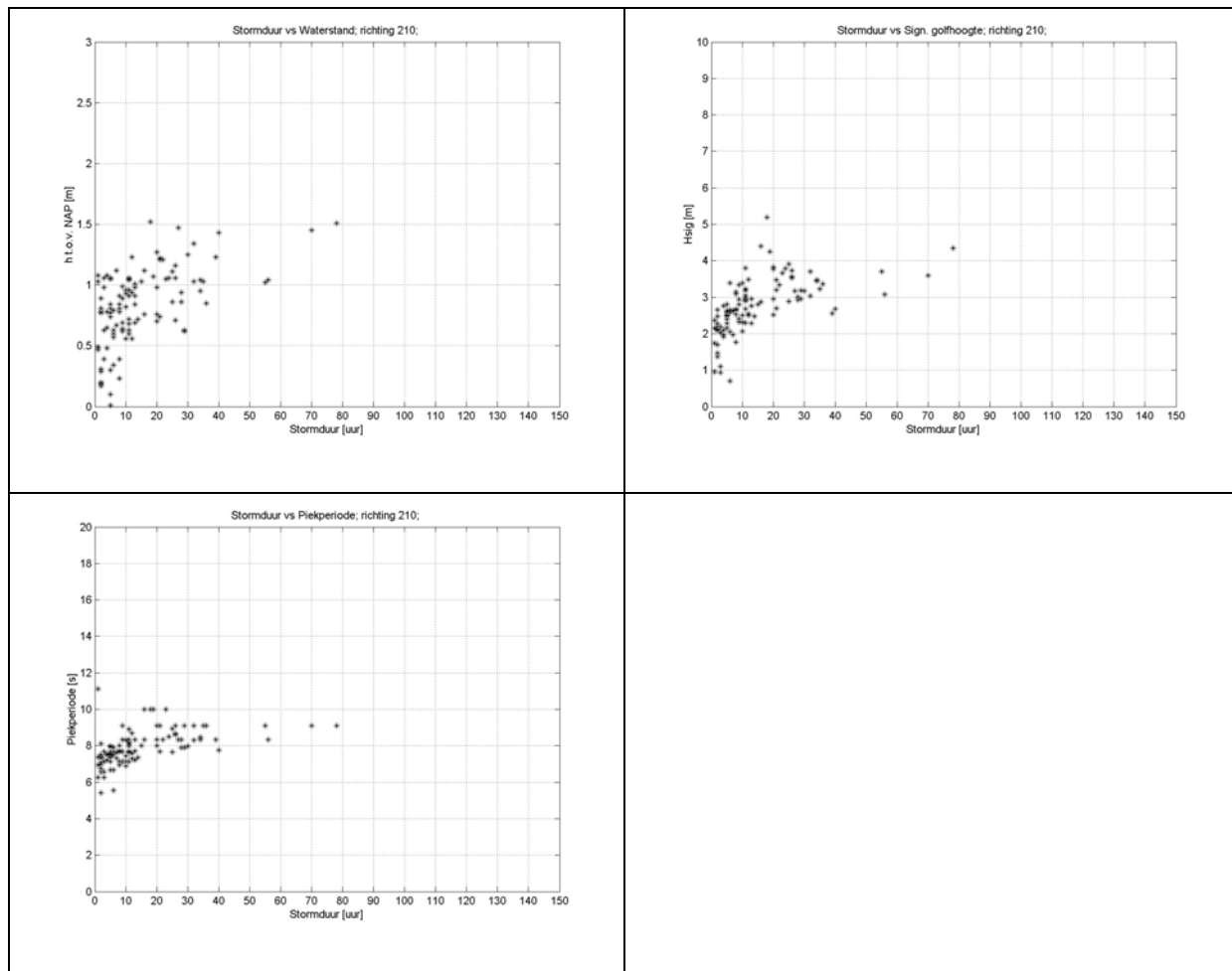
In onderstaande figuren staan voor elke richting de stormduren uitgezet tegen de windsnelheid:



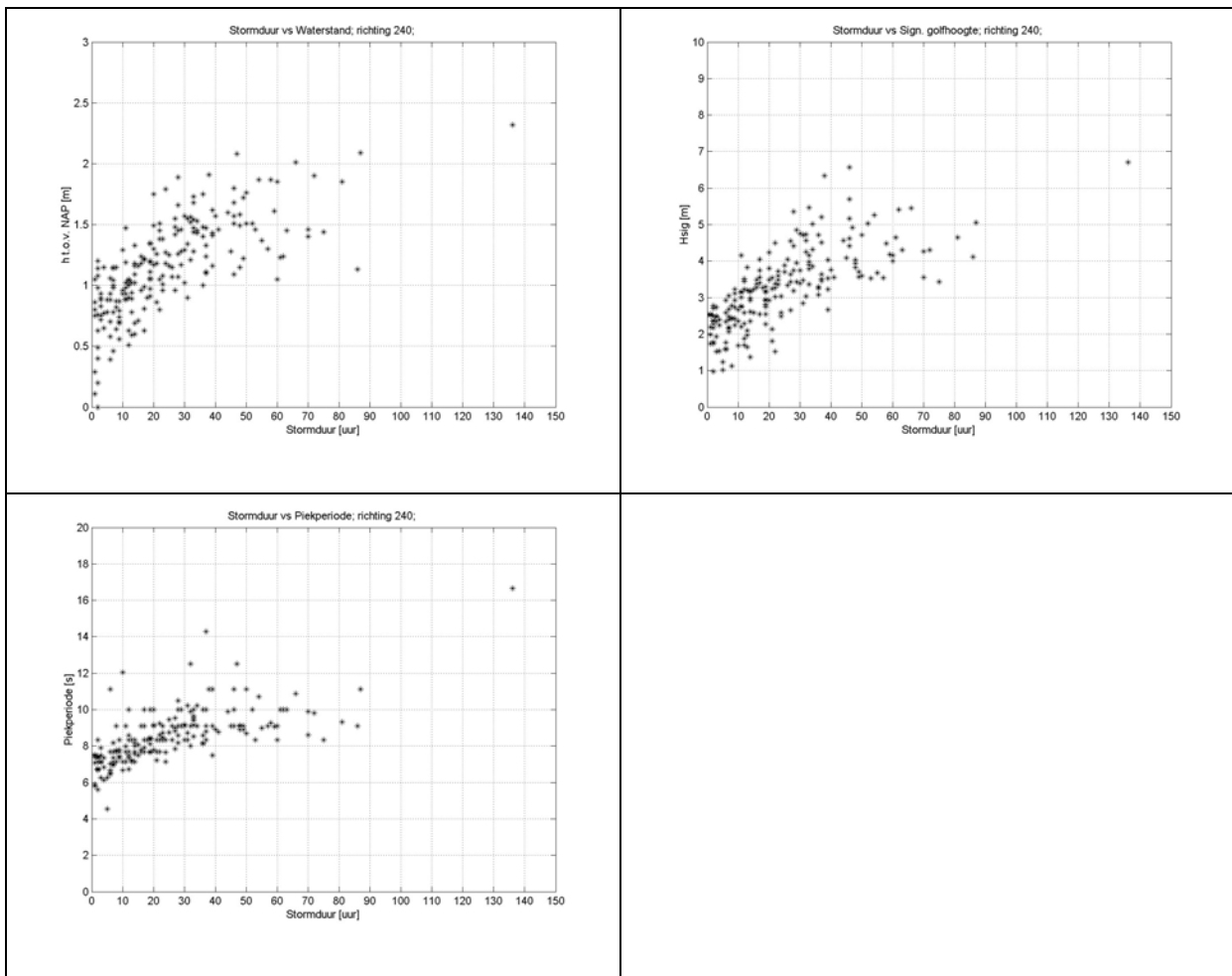
Bijlage 4.6: Afhankelijkheid op basis van de stormduur

In onderstaande figuren zijn de stormparameters waterstand, significante golfhoogte en piekperiode uitgezet tegen de stormduur. Er is een opdeling gemaakt naar richting.

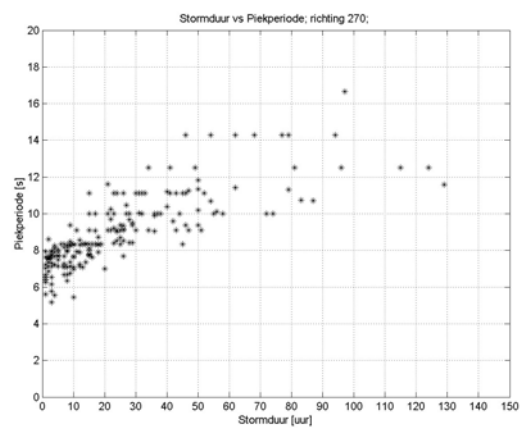
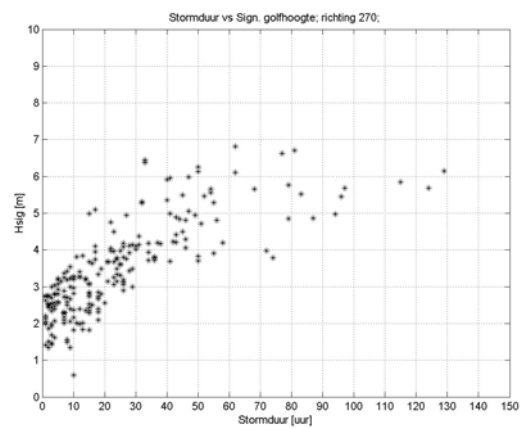
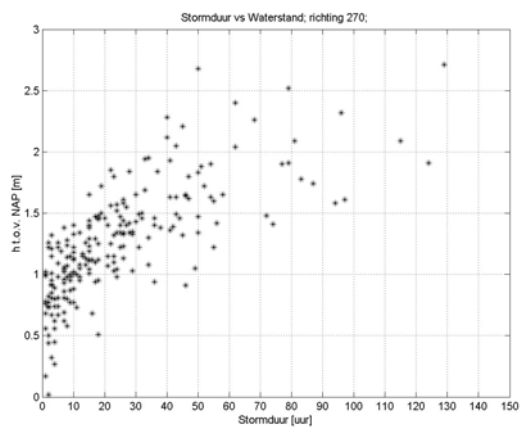
Richting 210:



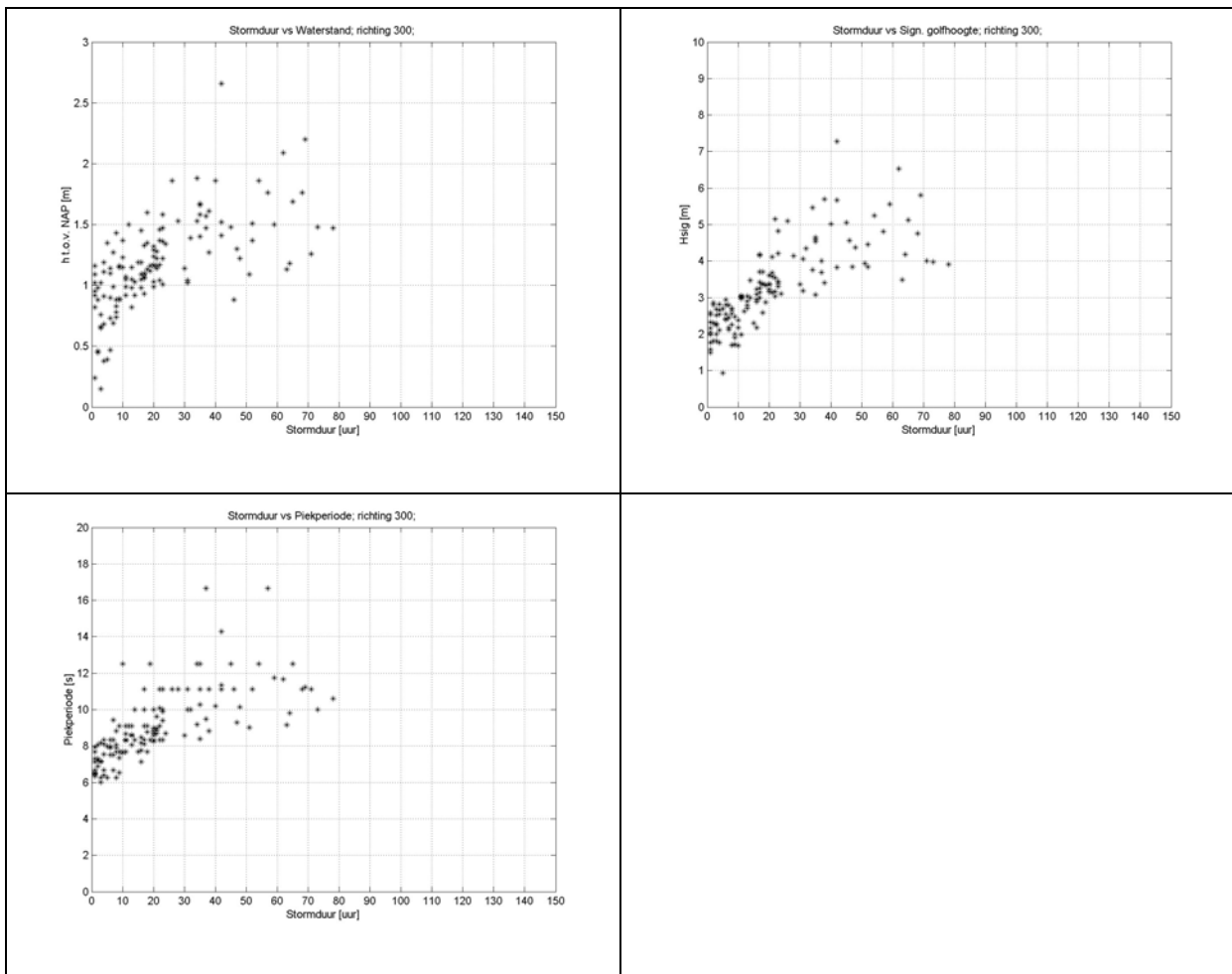
Richting 240:



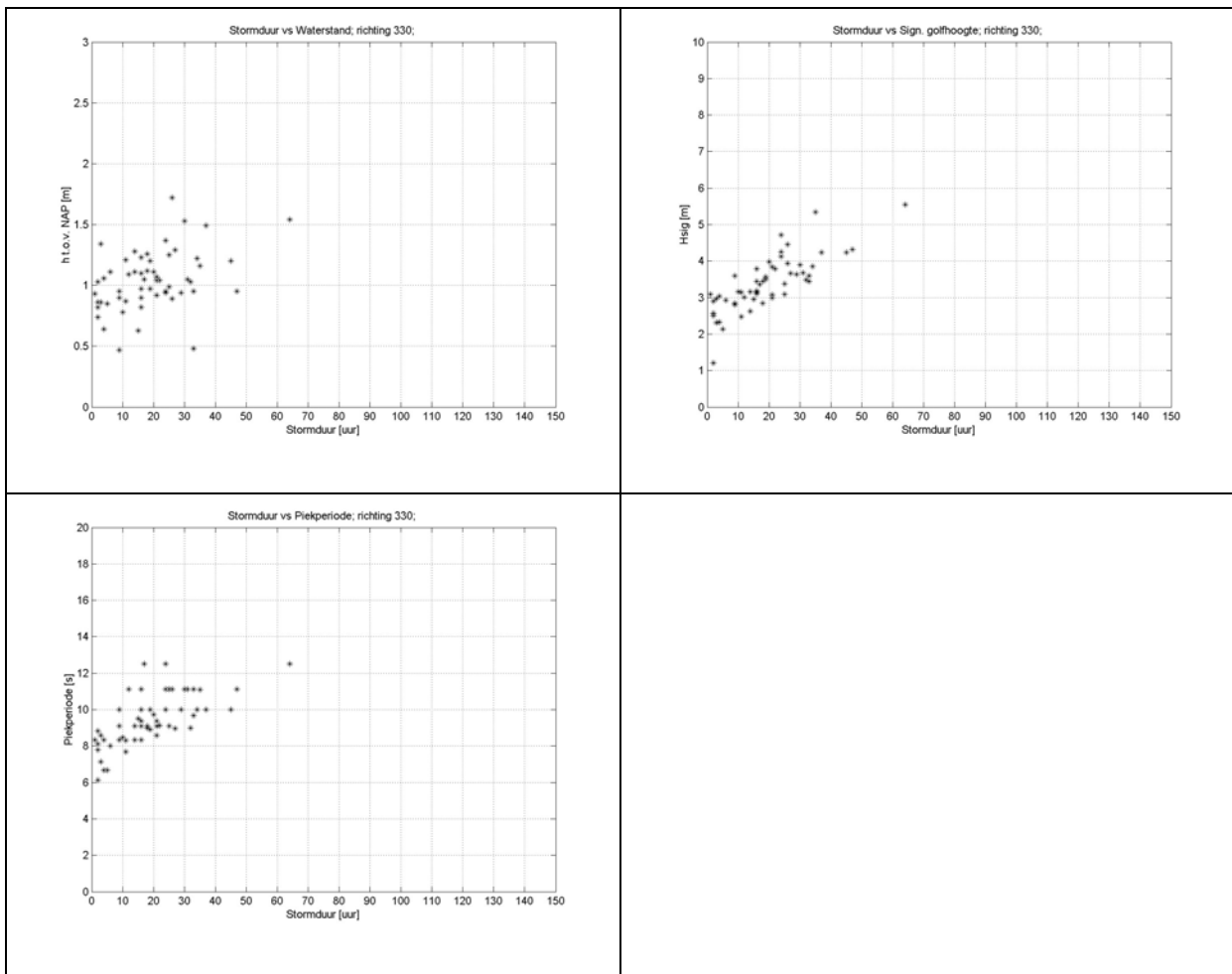
Richting 270:



Richting 300:



Richting 330:

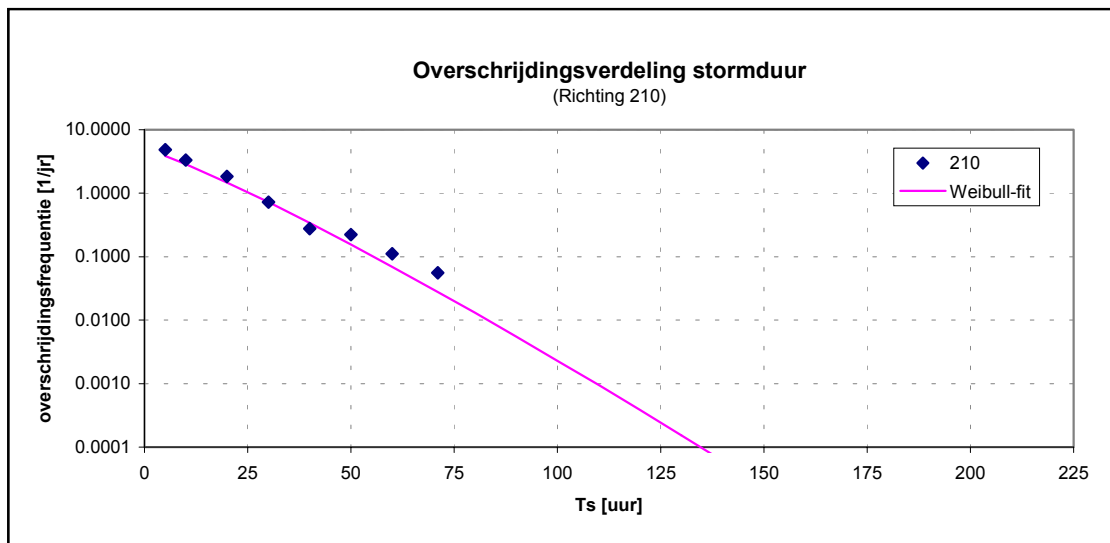


Bijlage 4.7: Overschrijdingsfrequenties stormduren

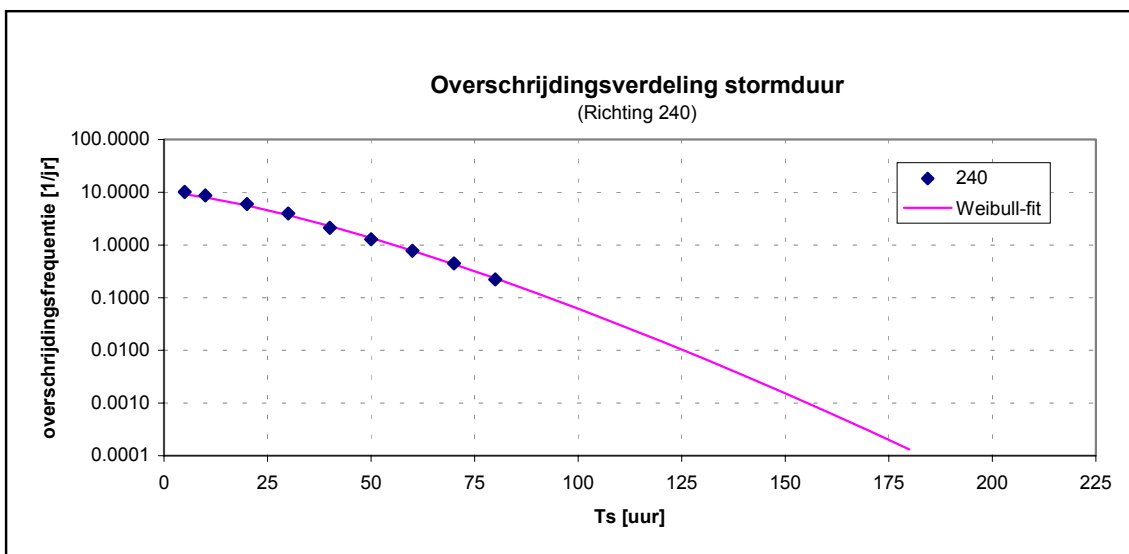
Algemeen

In onderstaande figuren zijn de overschrijdingsfrequenties van de stormduren uitgezet per richting. De punten in de grafieken zijn de waarnemingen. Omdat de waarnemingen 18 jaar beslaan dienen de stormduren met een overschrijdingsfrequentie kleiner dan eens per 18 jaar benaderd te worden. Door elke grafiek is door de puntenwolk een Weibull-verdeling gefit. Deze is zichtbaar gemaakt middels de doorgetrokken lijn.

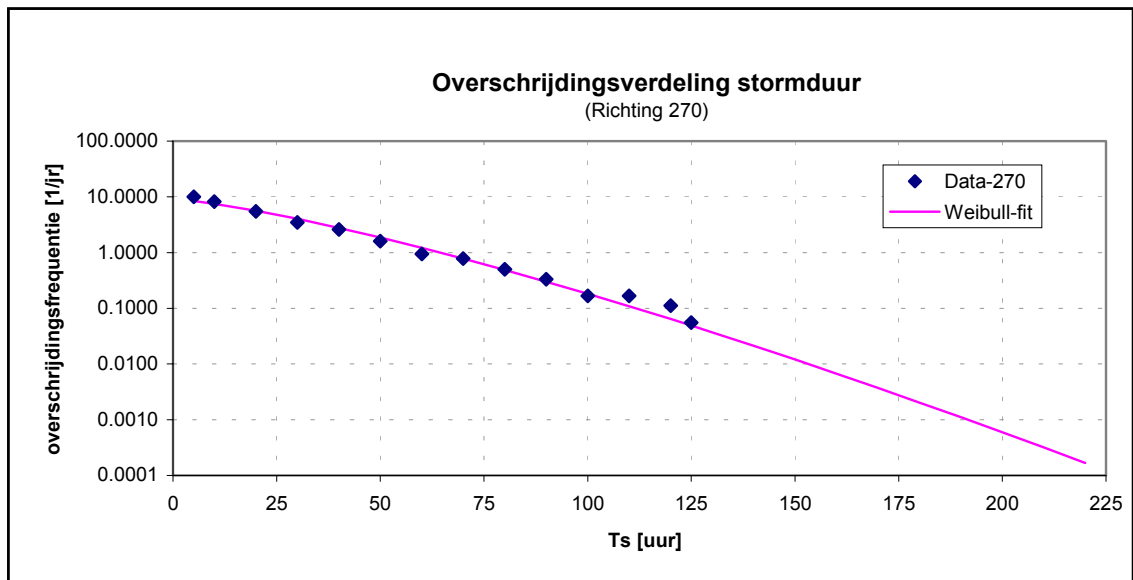
Richting 210:



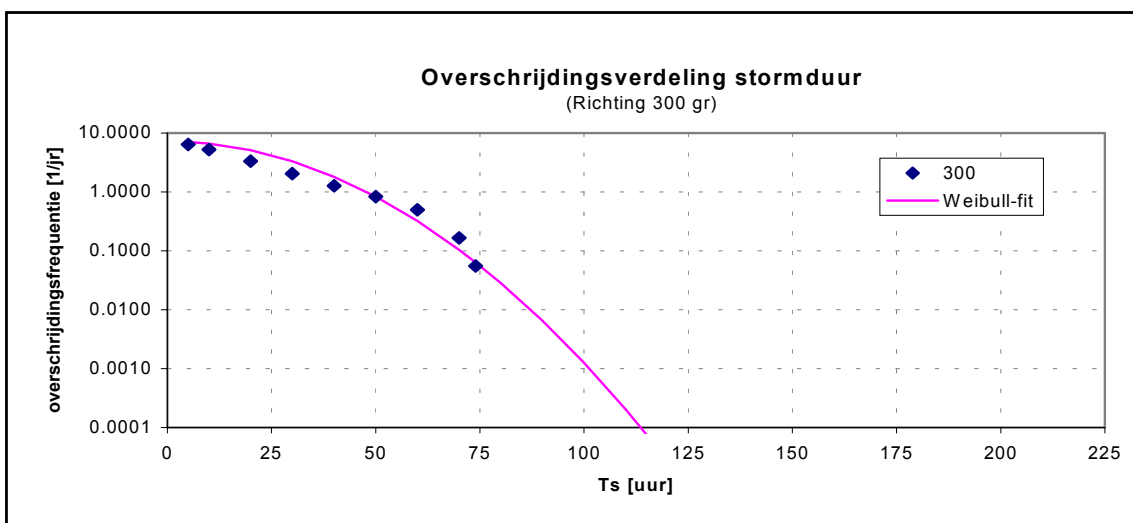
Richting 240:



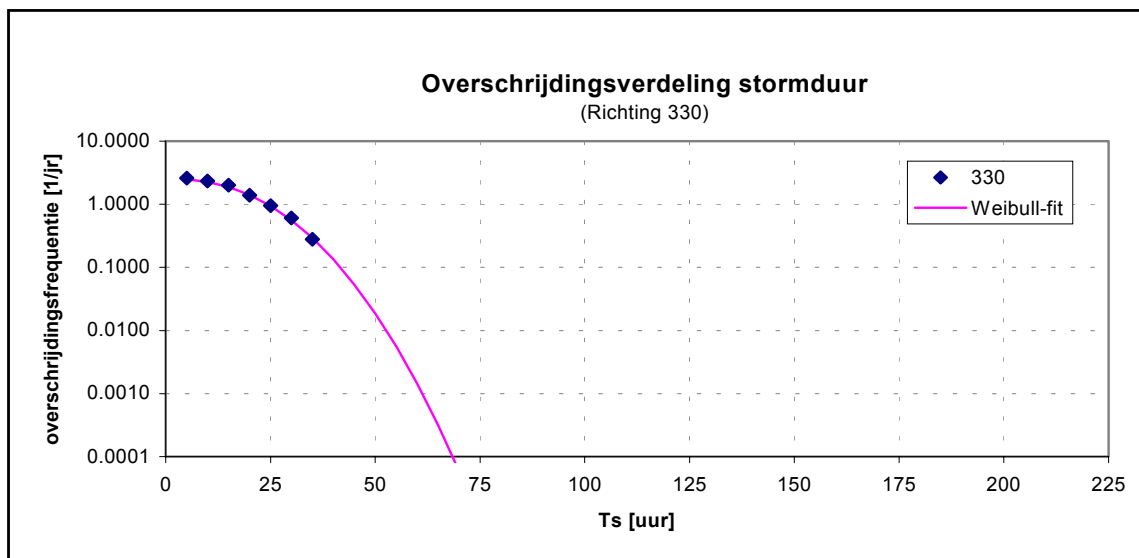
Richting 270:



Richting 300:



Richting 330:

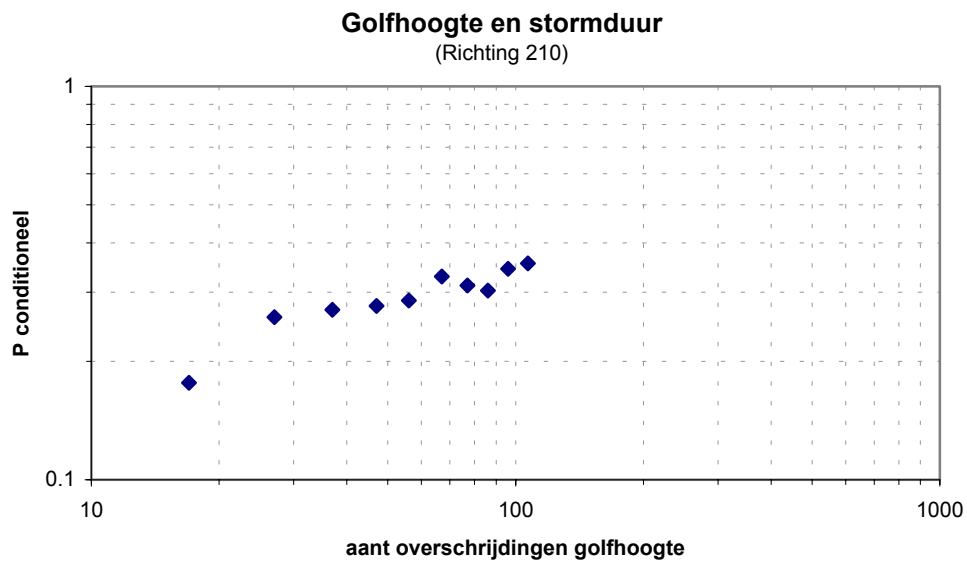


Bijlage 4.8: Afhankelijkheid stormduur

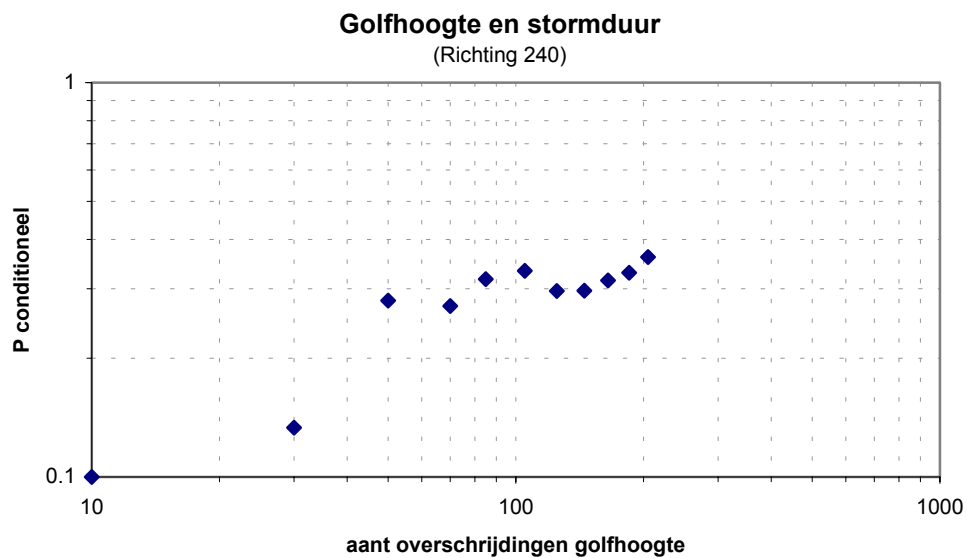
Algemeen

In onderstaande figuren staan “naar [De Valk, C.F., 1996, figuur 4.10]” de figuren die asymptotische afhankelijkheid aan dienen te tonen. De figuren zijn per richting gegeven:

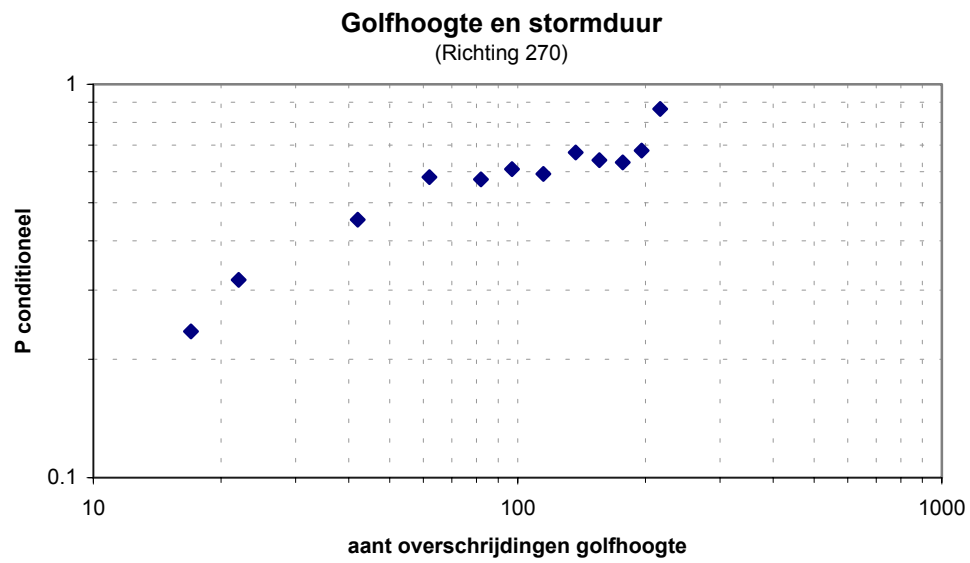
Richting 210:



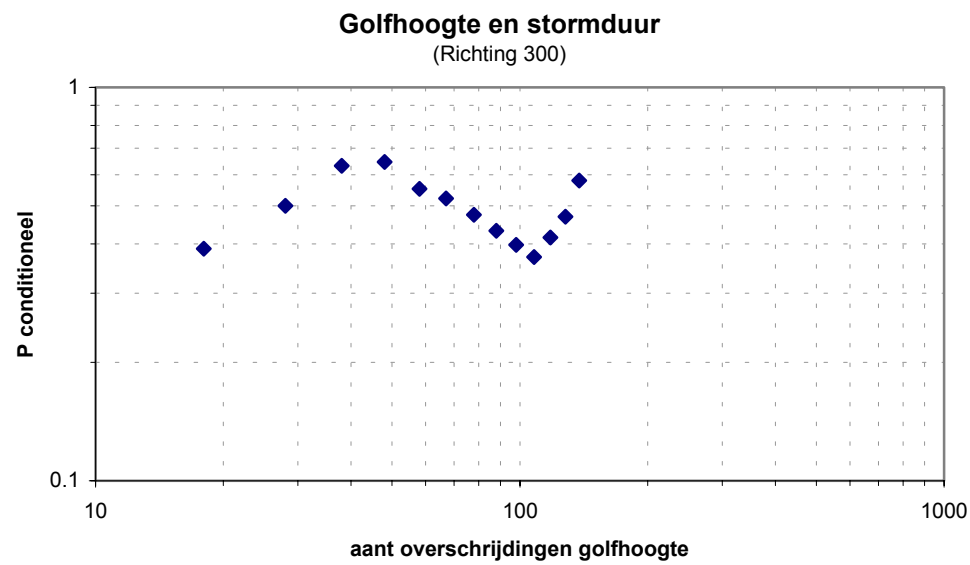
Richting 240:



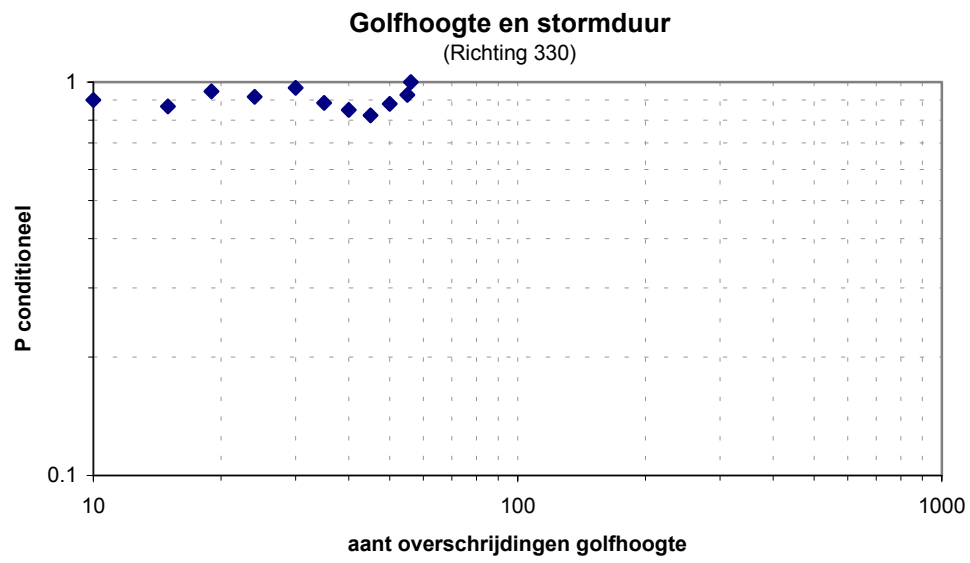
Richting 270:



Richting 300:



Richting 330:



Bijlage 4.9: Klassenindeling van de geëxtrapoleerde stormen

Aan de hand van de extreme waarden statistiek van de afzonderlijke stormparameters is een klassenindeling gemaakt. In onderstaande tabel staan de verschillende klassen gedefinieerd. Elk van de geëxtrapoleerde stormen zal in een klasse vallen.

| klasse | parameter | Stormrichting | | | | |
|--------|-----------|---------------|-------|-------|-------|--------|
| | | 210 | 240 | 270 | 300 | 330 |
| M | u [m/s] | 34.87 | 37.60 | 38.90 | 37.74 | 33.21* |
| | Hm0 [m] | 6.95 | 8.61 | 9.32 | 9.45 | 9.67 |
| | Tp [s] | 12.54 | 14.22 | 15.5 | 16.47 | 16.87 |
| | h [m] | 1.99 | 3.04 | 3.97 | 4.22 | 4.2 |
| S | u [m/s] | 33.05 | 35.50 | 36.59 | 35.35 | 31.22 |
| | Hm0 [m] | 6.52 | 8.08 | 8.80 | 8.90 | 9.06 |
| | Tp [s] | 11.94 | 13.55 | 14.81 | 15.7 | 16.05 |
| | h [m] | 1.86 | 2.77 | 3.64 | 3.87 | 3.80 |
| E | u [m/s] | 32.21 | 34.53 | 35.53 | 34.25 | |
| | Hm0 [m] | 6.32 | 7.84 | 8.55 | 8.64 | |
| | Tp [s] | 11.67 | 13.24 | 14.49 | 15.35 | |
| | h [m] | 1.80 | 2.66 | 3.49 | 3.71 | |

* Voor de richting 330 worden er twee klasse M sommen gemaakt, 1 som met een significante golfhoogte van 9,67 meter en een som met een significante golfhoogte van 9,06 meter.

Per richting staan in de tabellen op de volgende pagina's het aantal stormen dat in een klasse valt. Omdat in een later stadium met behulp van deze klassen overschrijdingsfrequenties van duinafslagen berekend gaan worden zijn in de laatste kolommen de cumulatieve aantallen stormen weergegeven. Per klasse wordt dan het aantal stormen weergegeven dat de bijbehorende stormparameters heeft dan wel het aantal stormen dat deze stormparameters overschrijdt.

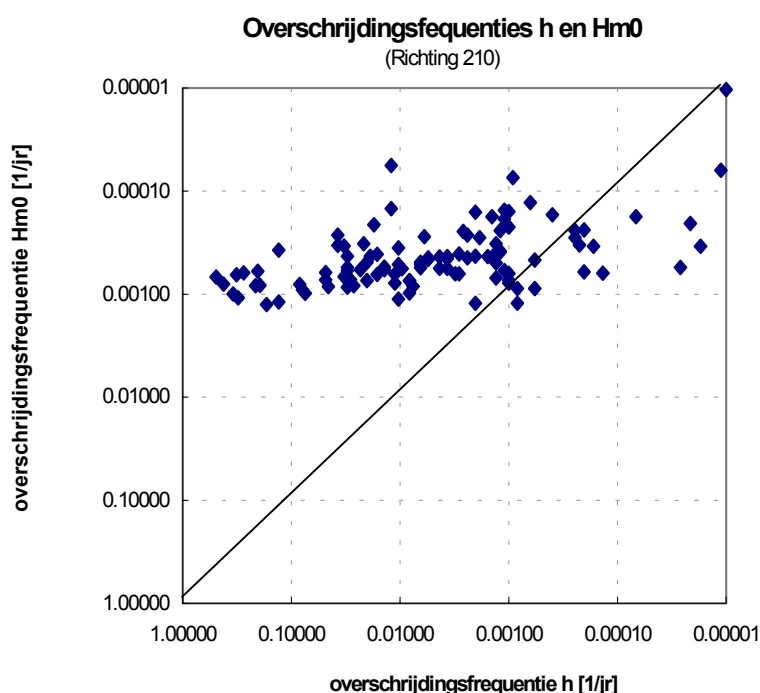
In het algemeen geldt dat voor stormen die niet eenduidig binnen een klasse vallen (bijvoorbeeld omdat de waterstand binnen klasse E zou vallen en de golfhoogte binnen klasse S) de waterstand maatgevend is. De storm wordt dan meegeteld als zijnde een storm die klasse E overschrijdt. De fout die hier mee gemaakt wordt is dat deze storm misschien meer afslag kan veroorzaken dan een klasse S storm terwijl hij als overschrijding van een klasse E storm meegerekend wordt. Als aanbeveling wordt dan ook meegegeven om het aantal klassen groter te maken zodat ook de stormen die veel afwijken van de aangegeven klassen nauwkeuriger meegenomen kunnen worden. In de tabellen op deze en volgende bladzijden volgen het aantal stormen die buiten de klassen liggen. Er is gekeken naar de combinatie van waterstand en golfhoogte. De piekperiode en de windsnelheid zijn in deze uitwerking niet meegenomen. Ook hiervoor geldt de aanbeveling om meer klassen te definiëren zodat er een nauwkeurige opdeling gemaakt kan worden in waterstand, golfhoogte, piekperiode en windsnelheid.

Richting 210

Voor stormen met richting 210° blijken maar een paar stormen binnen de klassengrenzen te liggen:

| Voorwaarde | aantal stormen | cumulatief |
|---|----------------|------------|
| $h < 1,80$ & $H_{mo} < 6,32$ (klasse E) | 3 | 108 |
| $h < 1,80$ & $6,32 < H_{mo} < 6,52$ | 36 | 105 |
| $h < 1,80$ & $6,52 < H_{mo} < 6,95$ | 35 | 69 |
| $h < 1,80$ & $H_{mo} > 6,95$ | 1 | 34 |
| $1,80 < h < 1,86$ & $H_{mo} < 6,32$ | 1 | 33 |
| $1,80 < h < 1,86$ & $6,32 < H_{mo} < 6,52$ (klasse S) | 5 | 32 |
| $1,80 < h < 1,86$ & $6,52 < H_{mo} < 6,95$ | 4 | 27 |
| $1,80 < h < 1,86$ & $H_{mo} > 6,95$ | 1 | 23 |
| $1,86 < h < 1,99$ & $6,32 < H_{mo} < 6,52$ | 2 | 22 |
| $1,86 < h < 1,99$ & $6,52 < H_{mo} < 6,95$ (klasse M) | 6 | 20 |
| $h > 1,99$ & $H_{mo} < 6,32$ | 3 | 14 |
| $h > 1,99$ & $6,32 < H_{mo} < 6,52$ | 5 | 11 |
| $h > 1,99$ & $6,52 < H_{mo} < 6,95$ | 4 | 6 |
| $h > 1,99$ & $T_p > 6,95$ | 2 | 2 |

Uit de tabel blijkt dat veel stormen voor de richting 210 niet binnen een klasse vallen. Veelal gaat het om waterstanden waarbij een golfhoogte hoort die een kleinere overschrijdingsfrequentie heeft dan die desbetreffende waterstand. Onderstaande figuur verduidelijkt het geheel:



De afhankelijkheidsplot in bijlage 4.4 liet al een dergelijk verband zien

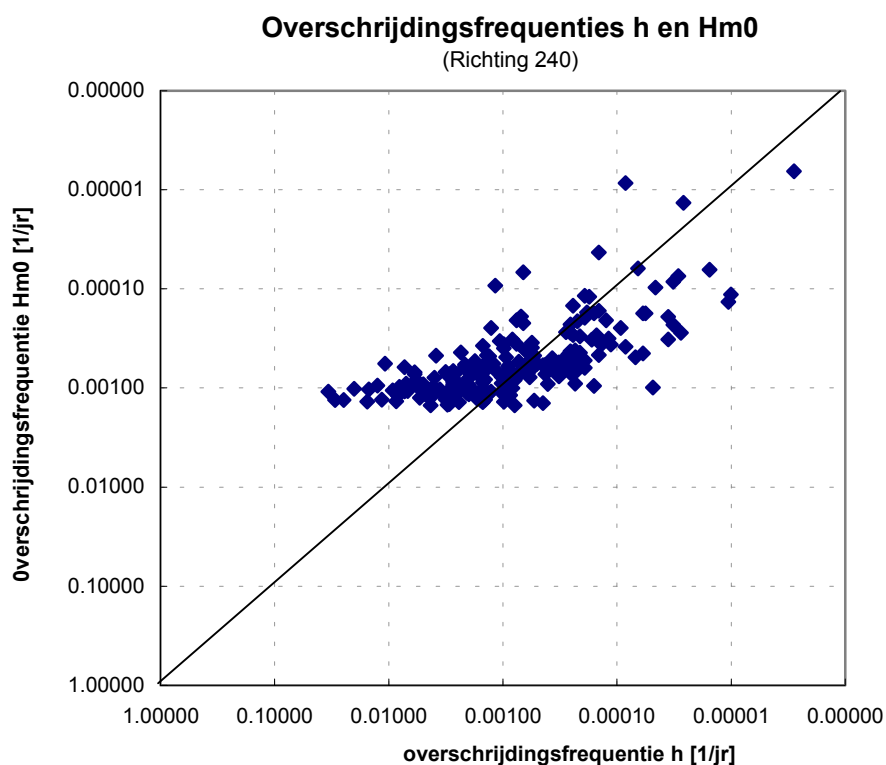
In de volgende tabel staan de waarden van de stormen die met SWAN doorgerekend worden. Het aantal stormen dat meer duinafslag zal veroorzaken staat erachter gegeven (aantal overschrijdingen).

| Klasse | aant. overschr | stormnummer | h [m.+NAP) | Uwind [m/s] | Tp [s] | Hmo [m] |
|--------|-------------------|-------------|---------------|----------------|-----------|------------|
| M | 20 | mmmm21 | 1,99 | 34,87 | 12,54 | 6,95 |
| S | 32 | ssss21 | 1.86 | 33,05 | 11,94 | 6,52 |
| E | 108 | eeee21 | 1,80 | 32,21 | 11,67 | 6,32 |

Richting 240

| Voorwaarde | aantal stormen | cumulatief |
|---|----------------|------------|
| $h < 2,66$ & $H_{m0} < 7,84$ (klasse E) | 47 | 206 |
| $h < 2,66$ & $7,84 < H_{m0} < 8,08$ | 41 | 159 |
| $h < 2,66$ & $8,08 < H_{m0} < 8,61$ | 7 | 118 |
| $h < 2,66$ & $H_{m0} > 8,61$ | 1 | 111 |
| $2,66 < h < 2,77$ & $H_{m0} < 7,84$ | 8 | 110 |
| $2,66 < h < 2,77$ & $7,84 < H_{m0} < 8,08$ (klasse S) | 16 | 102 |
| $2,66 < h < 2,77$ & $8,08 < H_{m0} < 8,61$ | 12 | 86 |
| $2,66 < h < 2,77$ & $H_{m0} > 8,61$ | 1 | 74 |
| $2,77 < h < 3,04$ & $H_{m0} < 7,84$ | 1 | 73 |
| $2,77 < h < 3,04$ & $7,84 < H_{m0} < 8,08$ | 23 | 72 |
| $2,77 < h < 3,04$ & $8,08 < H_{m0} < 8,61$ (klasse M) | 25 | 49 |
| $2,77 < h < 3,04$ & $H_{m0} > 8,61$ | 1 | 24 |
| $h > 3,04$ & $7,84 < H_{m0} < 8,08$ | 3 | 23 |
| $h > 3,04$ & $8,08 < H_{m0} < 8,61$ | 12 | 20 |
| $h > 3,04$ & $H_{m0} > 8,61$ | 8 | 8 |

De bijbehorende frequenties:



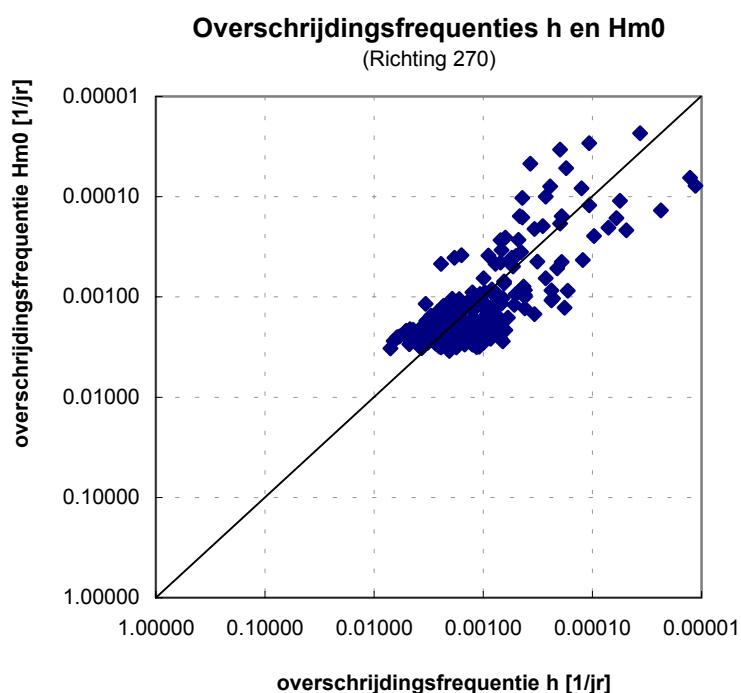
De volgende voorwaarden worden doorgerekend met SWAN voor de richting 240°:

| Klasse | aant. overschr | stormnummer | h [m.+NAP) | Uwind [m/s] | Tp [s] | Hmo [m] |
|--------|-------------------|-------------|---------------|----------------|-----------|------------|
| M | 49 | mmmm24 | 3,04 | 37,60 | 14,22 | 8,61 |
| S | 102 | ssss24 | 2,77 | 35,50 | 13,55 | 8,08 |
| E | 206 | eeee24 | 2,66 | 34,53 | 13,24 | 7,84 |

Richting 270

| Voorwaarde | aantal stormen | cumulatief |
|---|----------------|------------|
| $h < 3,49$ & $H_{m0} < 8,55$ (klasse E) | 117 | 218 |
| $h < 3,49$ & $8,55 < H_{m0} < 8,80$ | 3 | 101 |
| $h < 3,49$ & $8,80 < H_{m0} < 9,32$ | 3 | 98 |
| $h < 3,49$ & $H_{m0} > 9,32$ | 0 | 95 |
| $3,49 < h < 3,64$ & $H_{m0} < 8,55$ | 33 | 95 |
| $3,49 < h < 3,64$ & $8,55 < H_{m0} < 8,80$ (klasse S) | 9 | 62 |
| $3,49 < h < 3,64$ & $8,80 < H_{m0} < 9,32$ | 9 | 53 |
| $3,49 < h < 3,64$ & $H_{m0} > 9,32$ | 0 | 44 |
| $3,64 < h < 3,97$ & $H_{m0} < 8,55$ | 5 | 44 |
| $3,64 < h < 3,97$ & $8,55 < H_{m0} < 8,80$ | 10 | 39 |
| $3,64 < h < 3,97$ & $8,80 < H_{m0} < 9,32$ (klasse M) | 13 | 29 |
| $3,64 < h < 3,97$ & $H_{m0} > 9,32$ | 7 | 16 |
| $h > 3,97$ & $8,80 < H_{m0} < 9,32$ | 6 | 9 |
| $h > 3,97$ & $H_{m0} > 9,32$ | 3 | 3 |

De bijbehorende frequenties:



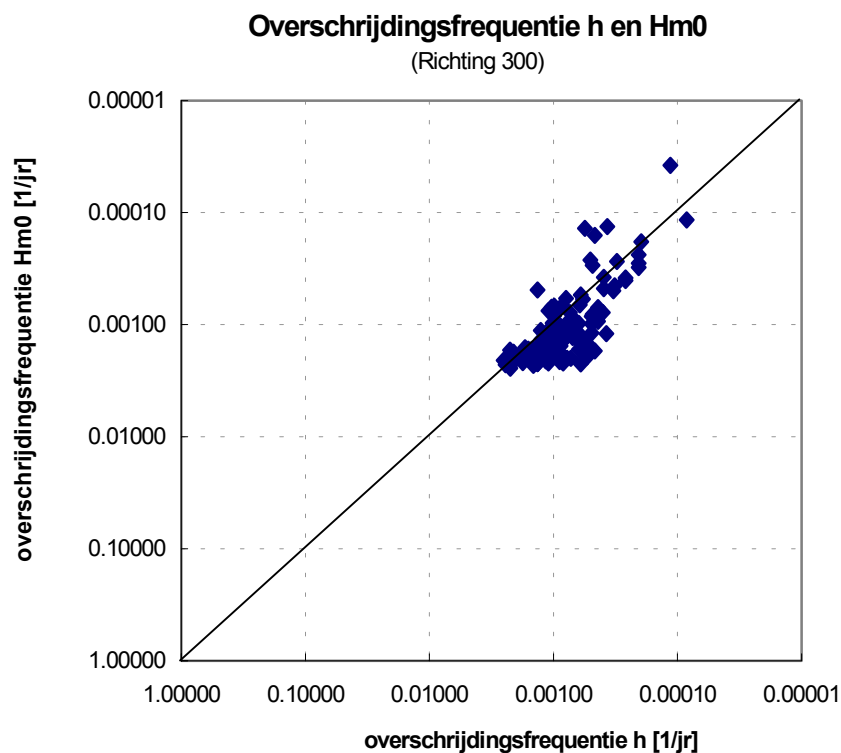
De volgende voorwaarden worden doorgerekend met SWAN voor de richting 270°:

| Klasse | aant. overschr | stormnummer | h [m.+NAP) | Uwind [m/s] | Tp [s] | Hmo [m] |
|--------|-------------------|-------------|---------------|----------------|-----------|------------|
| M | 29 | mmmm27 | 3,97 | 38,90 | 15,50 | 9,32 |
| S | 62 | ssss27 | 3,64 | 36,59 | 14,81 | 8,80 |
| E | 218 | eeee27 | 3,49 | 35,53 | 14,49 | 8,55 |

Richting 300

| Voorwaarde | aantal stormen | cumulatief |
|--|----------------|------------|
| $h < 3,71 \& H_{m0} < 8,64$ (klasse 3) | 52 | 139 |
| $h < 3,71 \& 8,64 < H_{m0} < 8,90$ | 3 | 87 |
| $h < 3,71 \& 8,90 < H_{m0} < 9,45$ | 1 | 84 |
| $3,71 < h < 3,87 \& H_{m0} < 8,64$ | 41 | 83 |
| $3,71 < h < 3,87 \& 8,64 < H_{m0} < 8,90$ (klasse 2) | 12 | 42 |
| $3,71 < h < 3,87 \& 8,90 < H_{m0} < 9,45$ | 2 | 30 |
| $3,71 < h < 3,87 \& H_{m0} > 9,45$ | 0 | 28 |
| $3,87 < h < 4,22 \& H_{m0} < 8,64$ | 3 | 28 |
| $3,87 < h < 4,22 \& 8,64 < H_{m0} < 8,90$ | 9 | 25 |
| $3,87 < h < 4,22 \& 8,90 < H_{m0} < 9,45$ (klasse 1) | 13 | 16 |
| $3,87 < h < 4,22 \& H_{m0} > 9,45$ | 1 | 3 |
| $h > 4,22 \& 8,90 < H_{m0} < 9,45$ | 1 | 2 |
| $h > 4,22 \& H_{m0} > 9,45$ | 1 | 1 |

De bijbehorende frequenties:



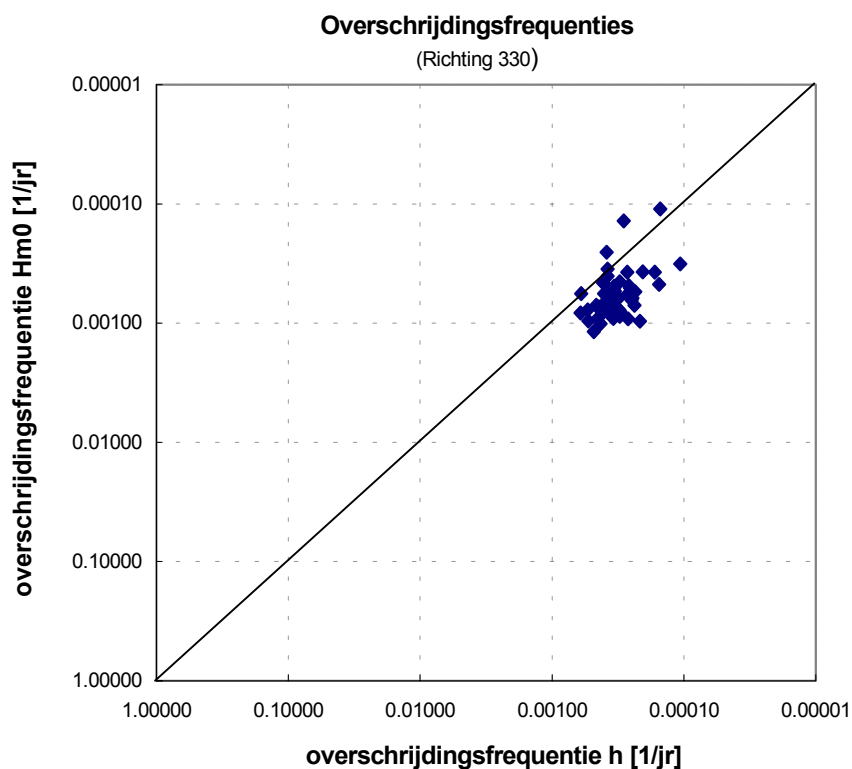
De volgende voorwaarden worden doorgerekend met SWAN voor de richting 300°:

| Klasse | aant. overschr | stormnummer | h [m.+NAP) | Uwind [m/s] | Tp [s] | Hmo [m] |
|--------|-------------------|-------------|---------------|----------------|-----------|------------|
| M | 16 | mmmm30 | 4,22 | 37,74 | 16,47 | 9,45 |
| S | 42 | ssss30 | 3,87 | 35,35 | 15,70 | 8,90 |
| E | 139 | eeee30 | 3,71 | 34,25 | 15,35 | 8,64 |

Richting 330

| Voorwaarde | aantal stormen | cumulatief |
|---|----------------|------------|
| $3,62 < h < 3,80$ & $8,78 < H_{m0} < 9,06$ (klasse S) | 4 | 56 |
| $3,80 < h < 4,20$ & $8,78 < H_{m0} < 9,06$ | 37 | 52 |
| $3,80 < h < 4,20$ & $9,06 < H_{m0} < 9,67$ (klasse M) | 15 | 15 |

De bijbehorende frequenties:



De volgende voorwaarden worden doorgerekend met SWAN voor de richting 330°:

| Klasse | aant. overschr | stormnummer | h [m.+NAP) | Uwind [m/s] | Tp [s] | Hmo [m] |
|--------|-------------------|-------------|---------------|-------------|--------|---------|
| M | 15 | mmmm33 | 4,20 | 33,21 | 16,87 | 9,67 |
| M2 | 52 | mmms33 | 4,20 | 33,21 | 16,87 | 9,06 |
| S | 56 | ssss33 | 3,80 | 31,22 | 16,05 | 9,06 |

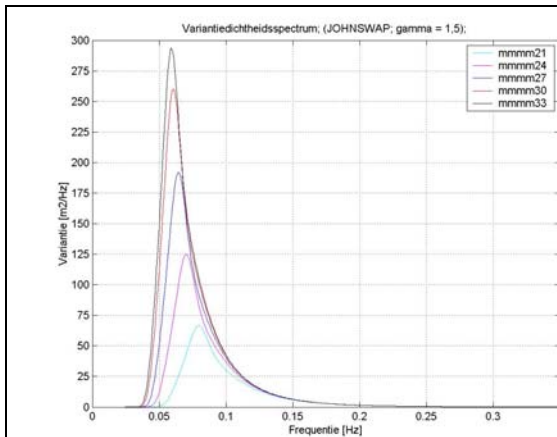
Bijlagen hoofdstuk 5

| | |
|--|----|
| Bijlage 5.1: Golfspectra op de rekenrand | 38 |
| Bijlage 5.2: Uitvoer grove grid | 39 |
| Bijlage 5.3: Uitvoer fijne grid | 45 |
| Bijlage 5.4: Uitvoer detailgrid..... | 48 |
| Bijlage 5.5: Invloed van de stormklasse op de significante golfhoogte..... | 63 |
| Bijlage 5.6: Uitvoer van de piekperiode..... | 65 |
| Bijlage 5.7: Spectrum ontwikkeling langs een raai | 66 |

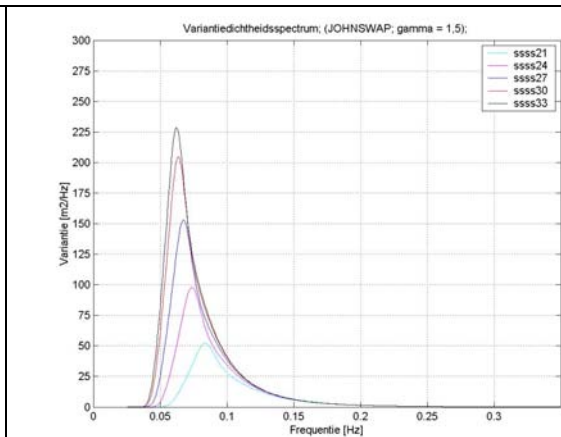
Bijlage 5.1: Golfspectra op de rekenrand

Algemeen

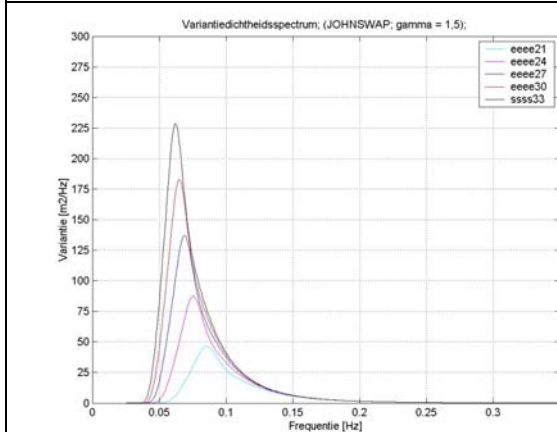
Voor elke storm die met SWAN doorerekend wordt is een variantiedichtheidsspectrum opgegeven op de rekenrand. In onderstaande figuren staan per stormklasse (M,S of E) de verschillende spectra weergegeven per stormrichting:



Klasse M-stormen



Klasse S-stormen



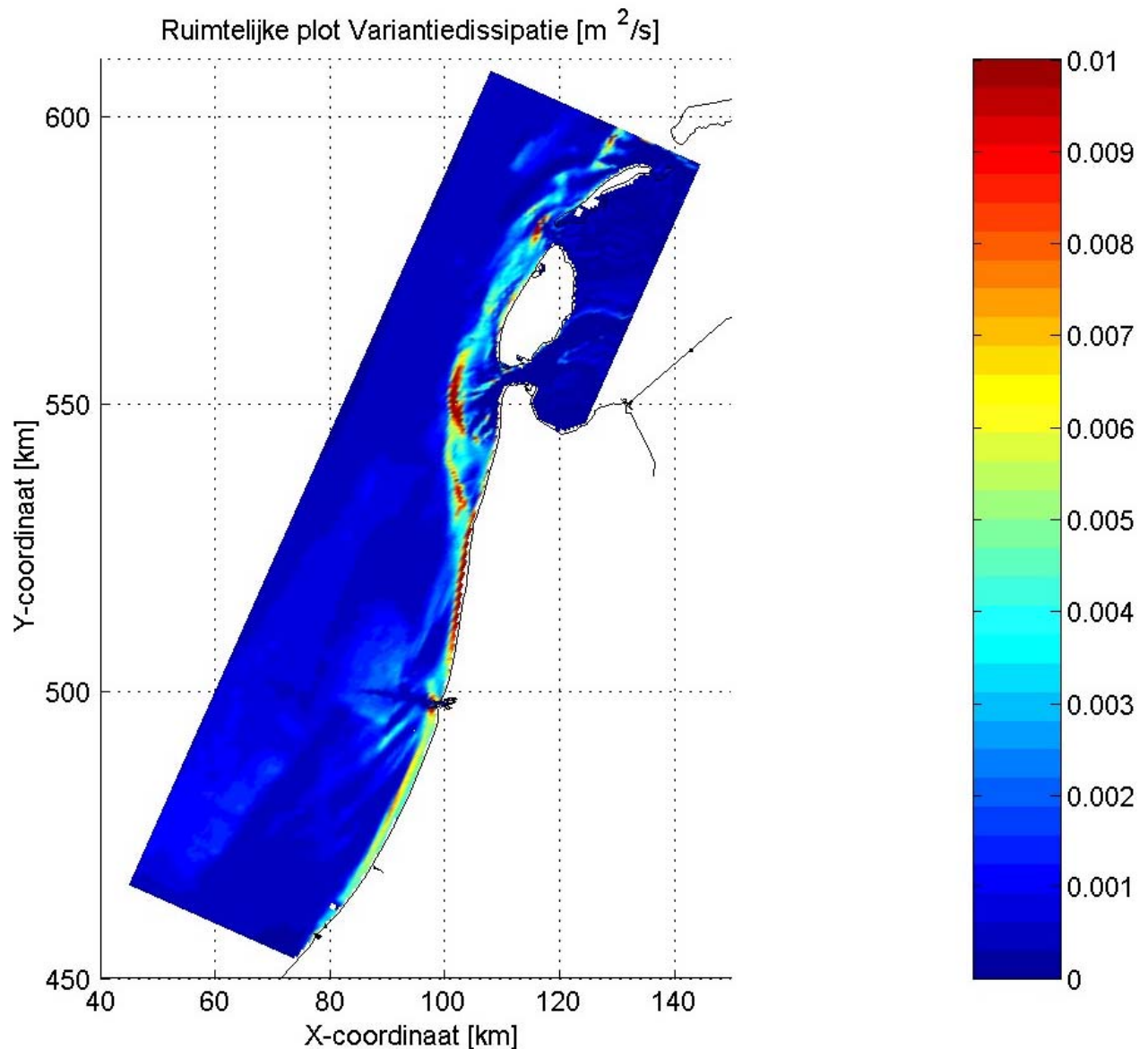
Klasse E-stormen

Bijlage 5.2: Uitvoer grove grid

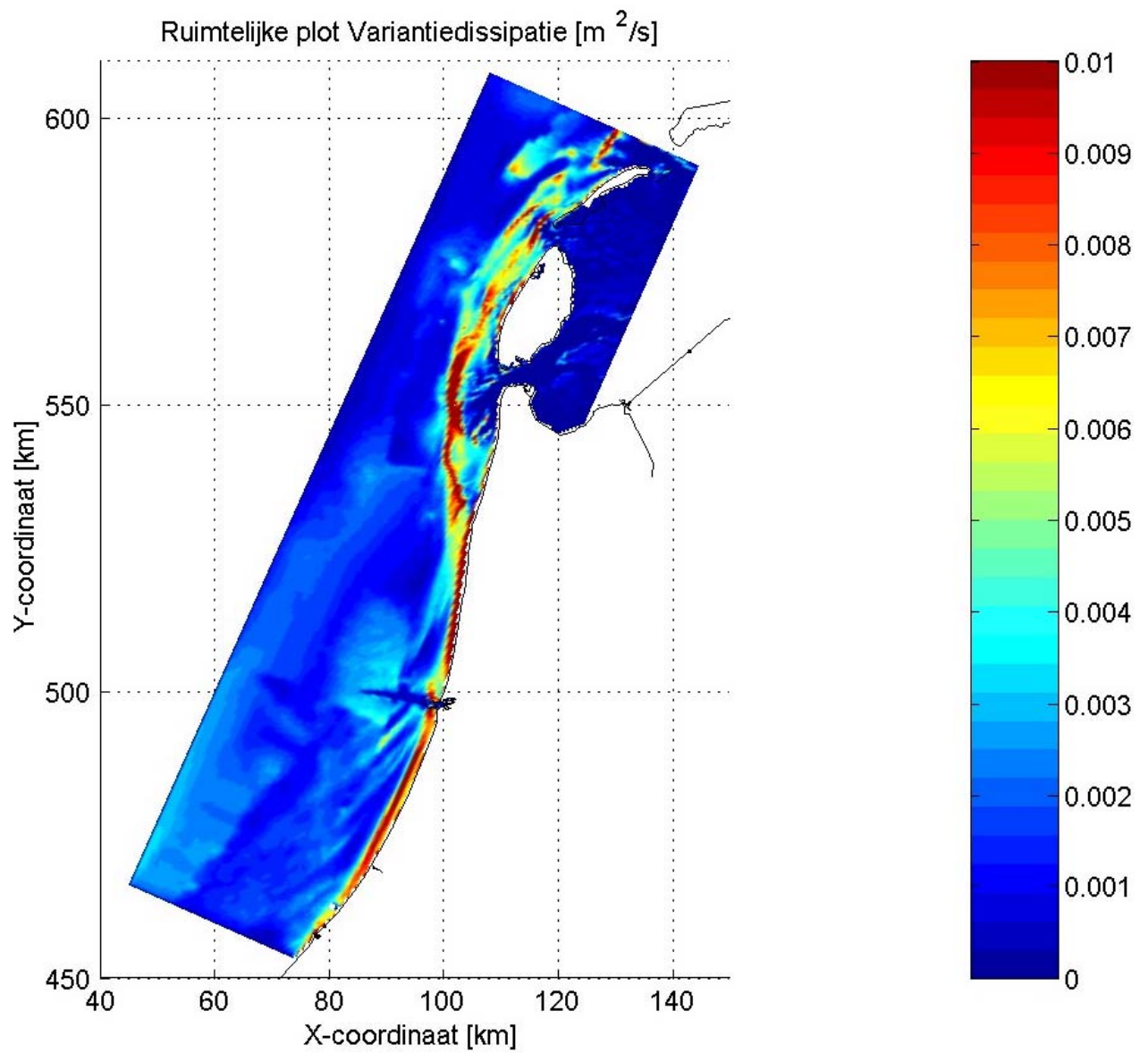
Algemeen

Om het effect van de verschillende stormrichtingen op de golfhoogte te laten zien zijn in onderstaande figuren de ruimtelijke verdelingen van de variantiedissipatie en de significante golfhoogte voor het grove grid (resolutie 500X500 m²) weergegeven. De verschillende gebieden die in paragraaf 5.4.1 gedefinieerd zijn komen hierin tot uitdrukking. De gepresenteerde uitvoer heeft alleen betrekking op de M-klassen stormen.

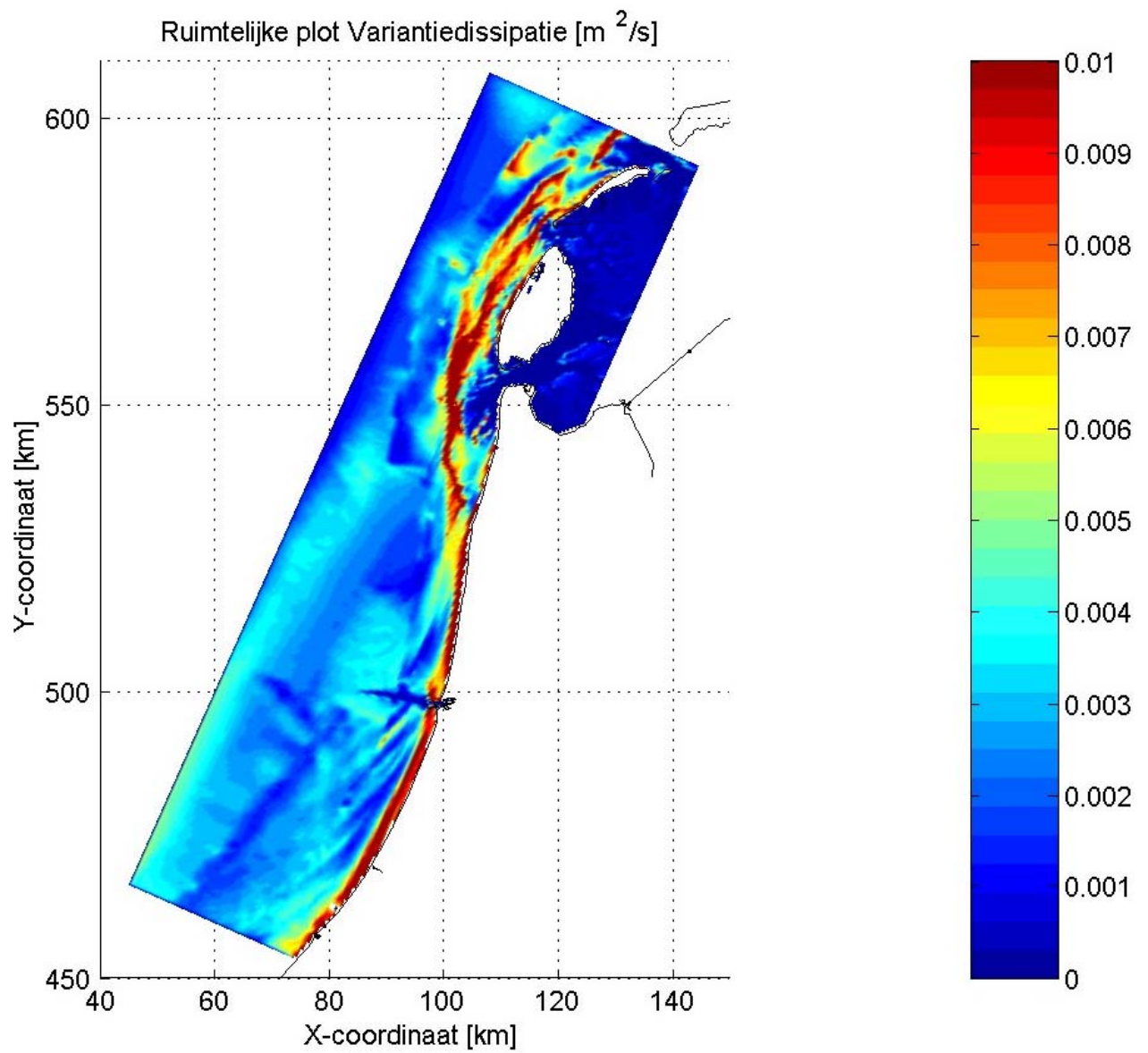
Ruimtelijke plots van de variantiedissipatie



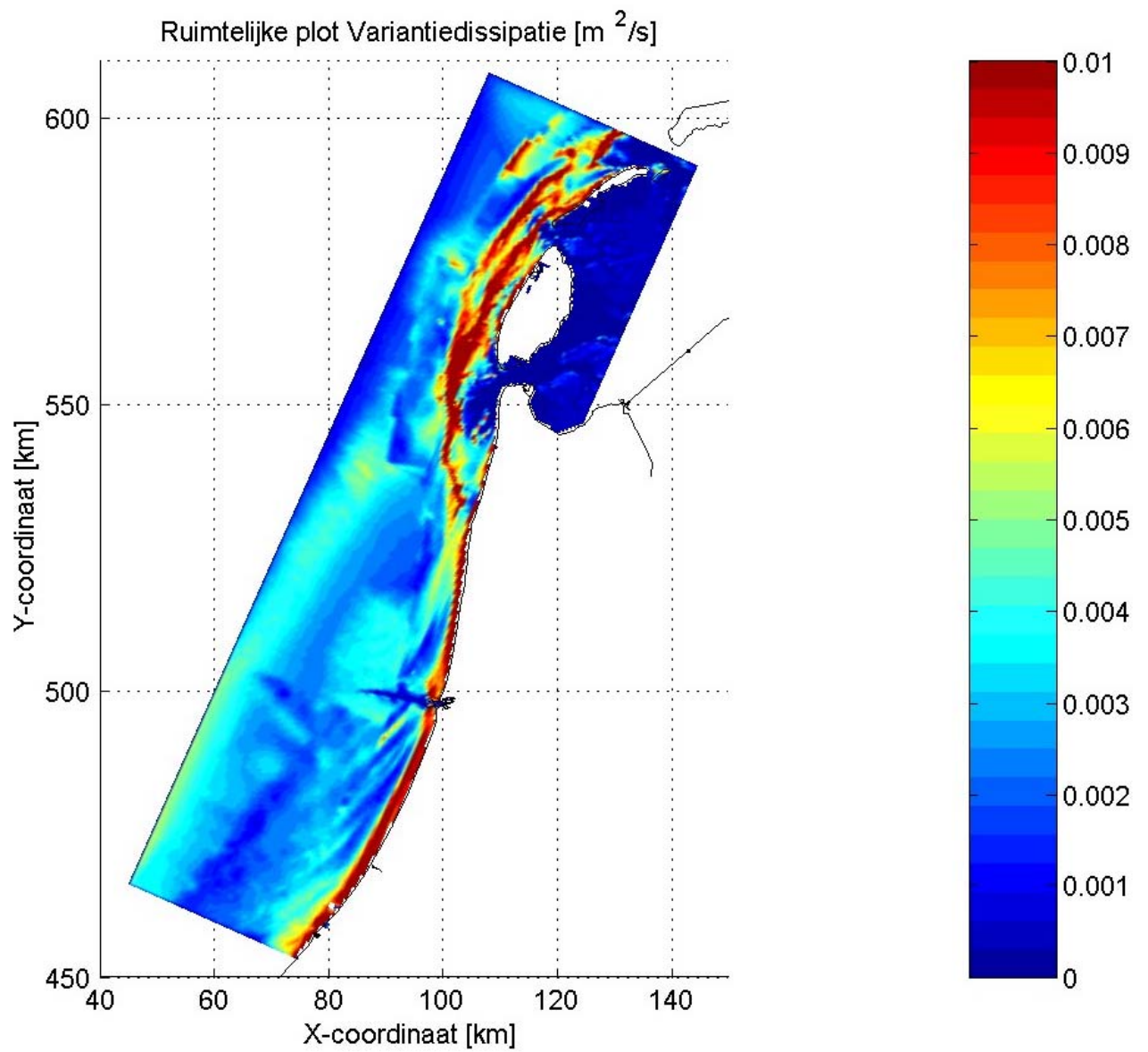
Stormnr. mmmm21 (richting 210)



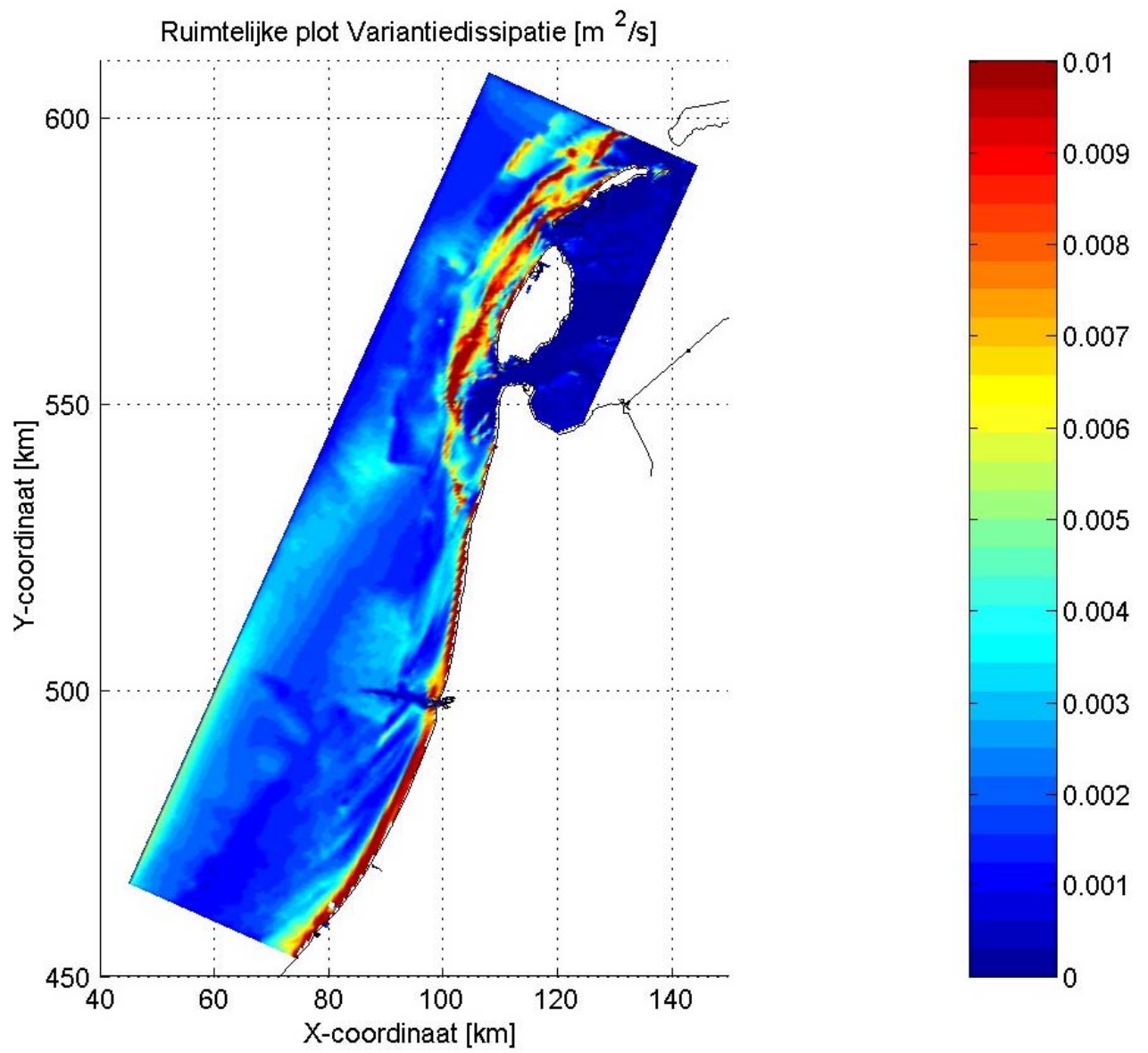
Stormnr. mmmm24 (richting 240)



Stormnr. mmmm27 (richting 270)

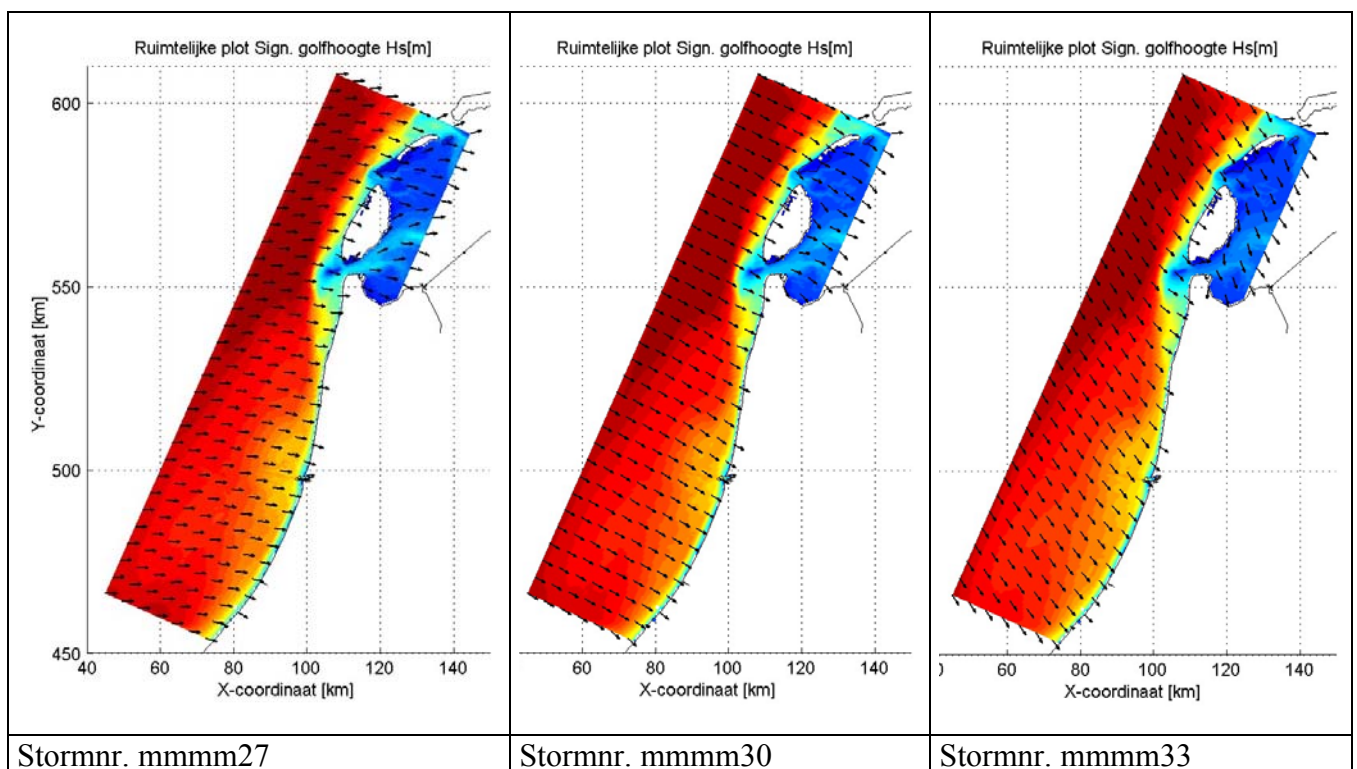
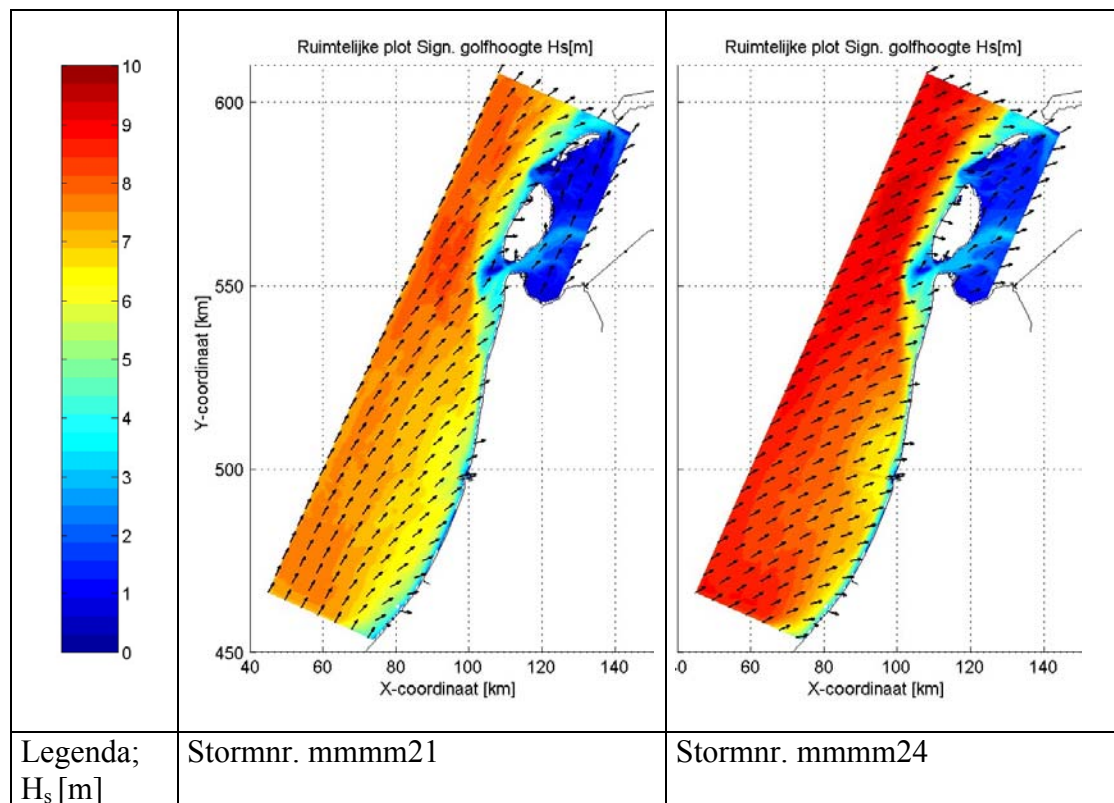


Stormnr. mmmm30 (richting 300)



Stormnr. mmmm33 (richting 330)

Ruimtelijke plots van de significante golfhoogte.

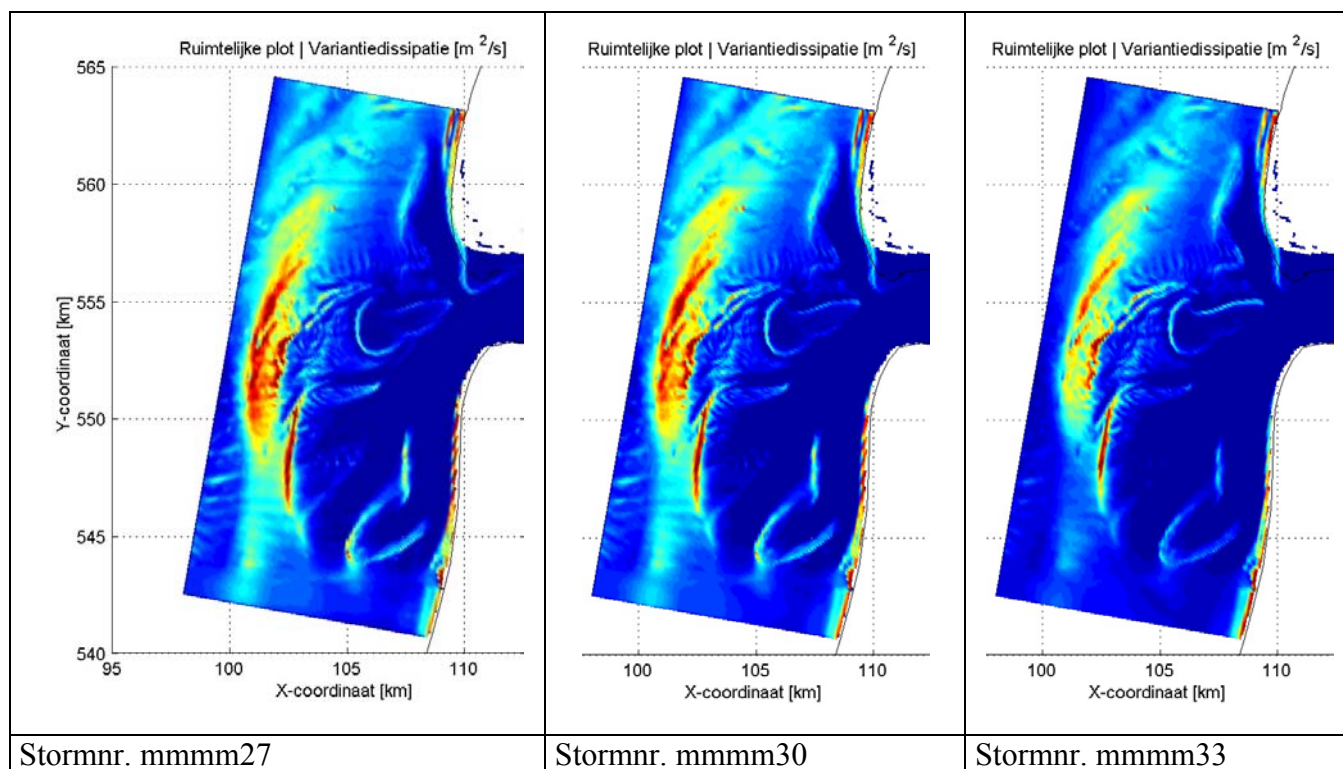
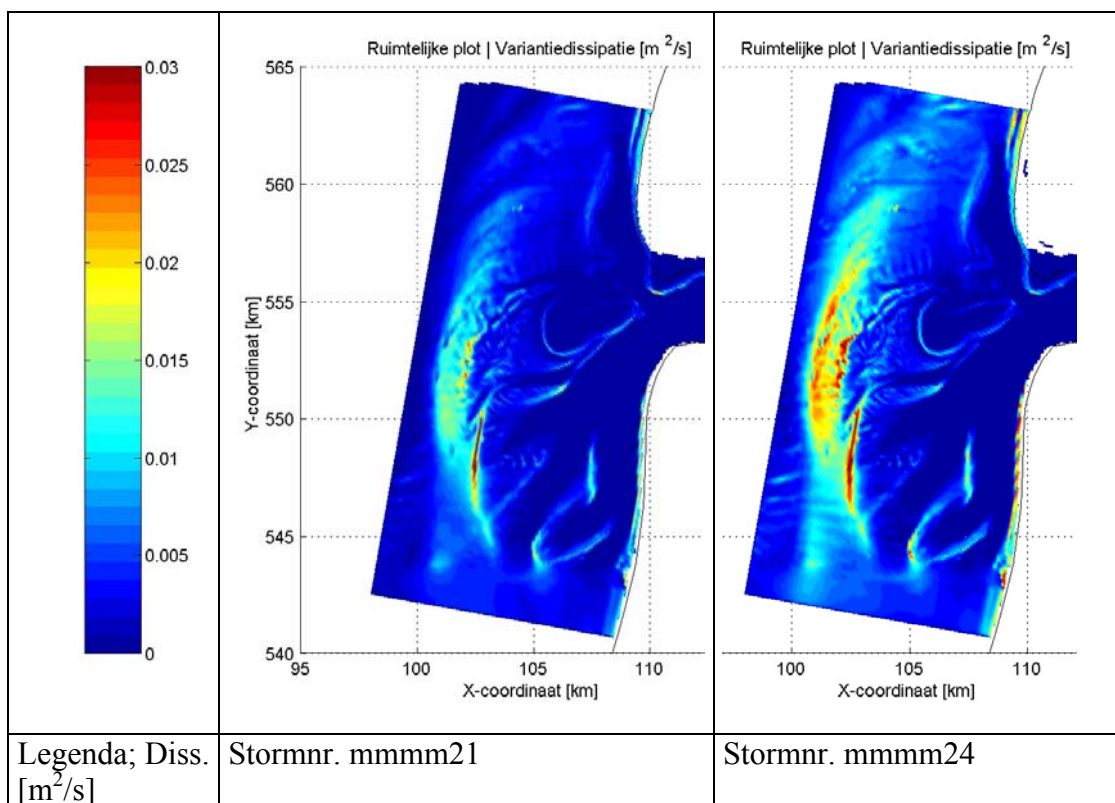


Bijlage 5.3: Uitvoer fijne grid

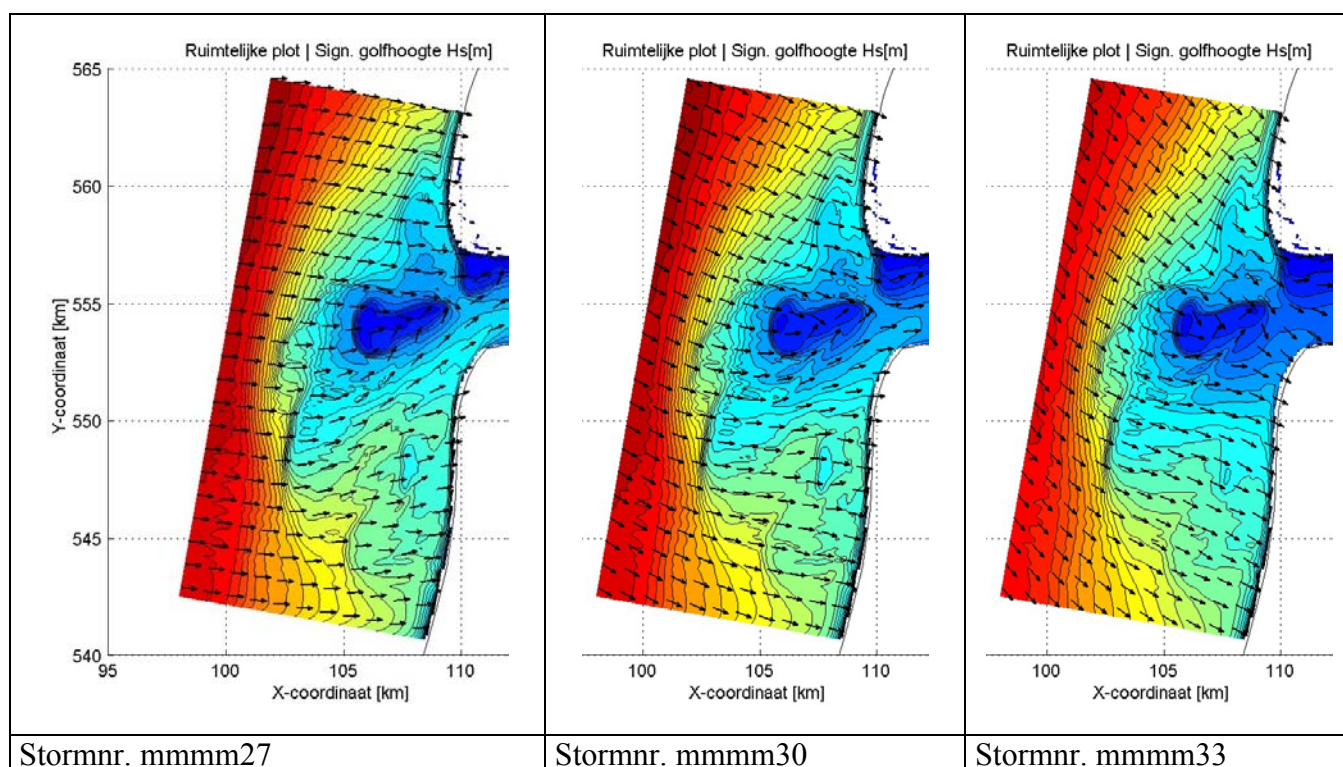
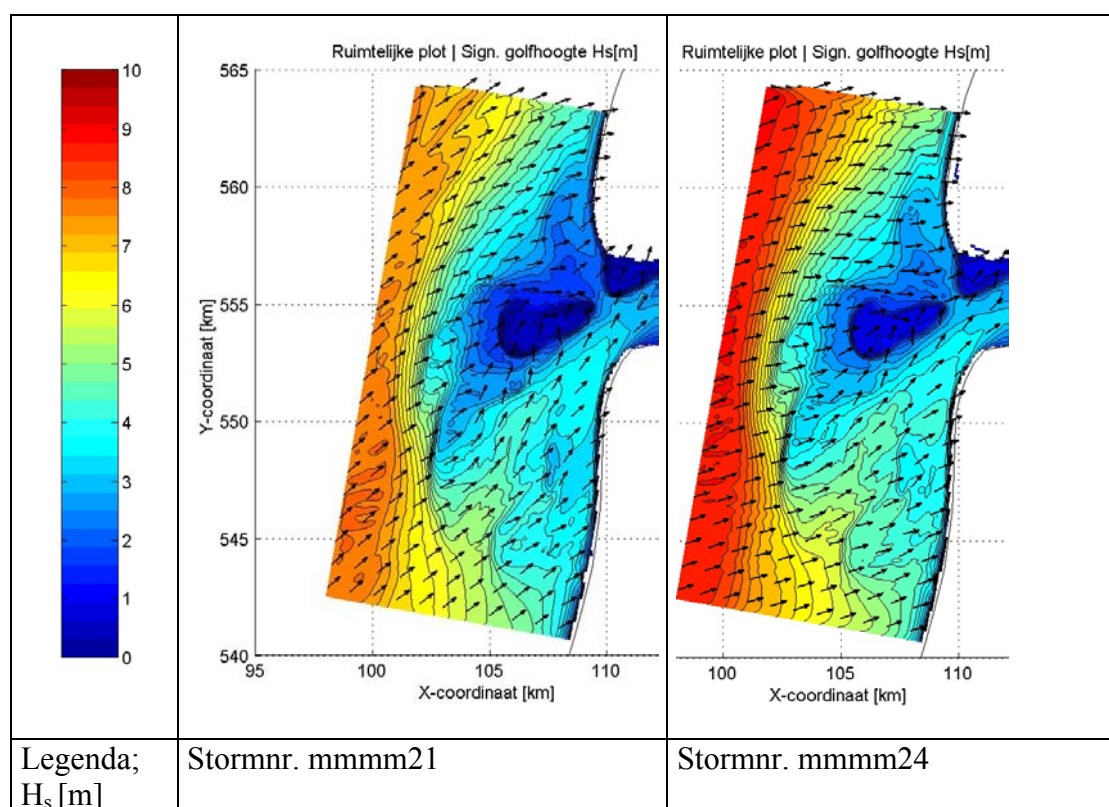
Algemeen

In de onderstaande figuren is de uitvoer van het fijne grid gegeven (100X100 m²). De variantiedissipatieplots zijn weergegeven alsmede de significante golfhoogteplots. De schaalverdeling is aangepast voor de variantiedissipatieplots in vergelijking met de uitvoer van het grove grid. In de figuren voor de significante golfhoogte zijn isolijnen toegevoegd. Deze lijnen maken bij een zuid westelijke wind de golfgeleiding door de geulen zichtbaar.

Ruimtelijke plots van de variantiedissipatie



Ruimtelijke plot van de significante golfhoogte



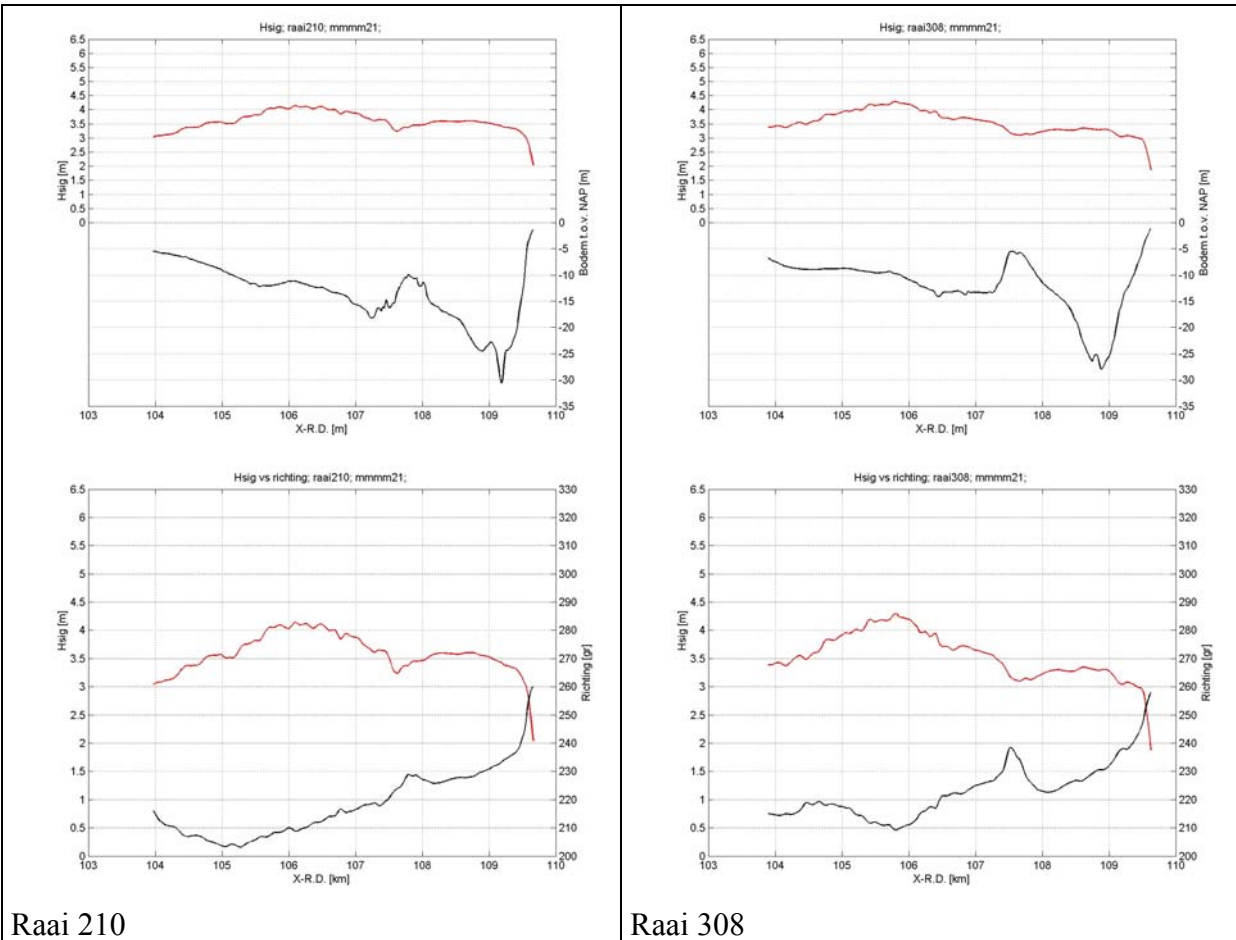
Bijlage 5.4: Uitvoer detailgrid

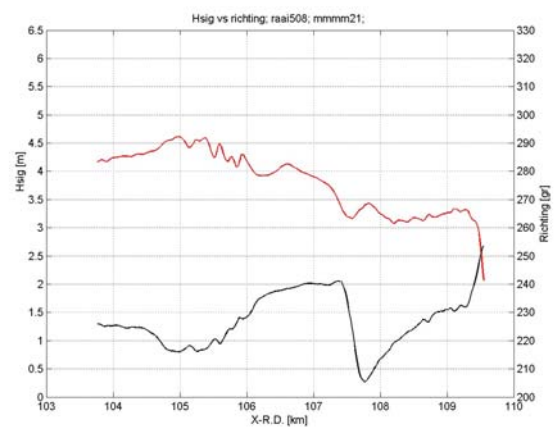
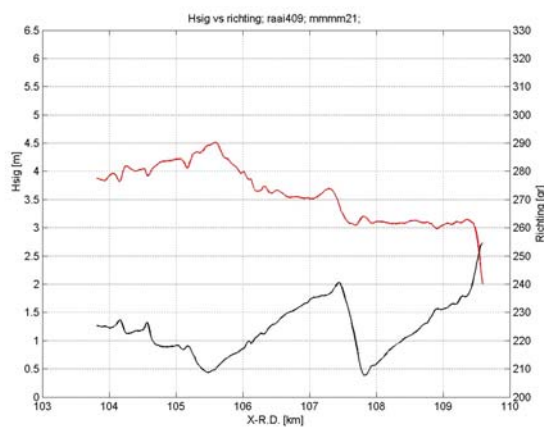
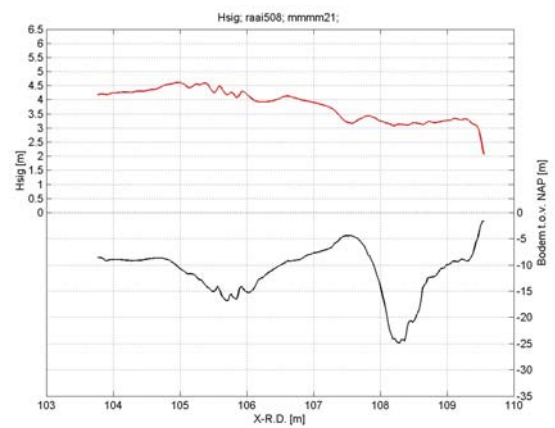
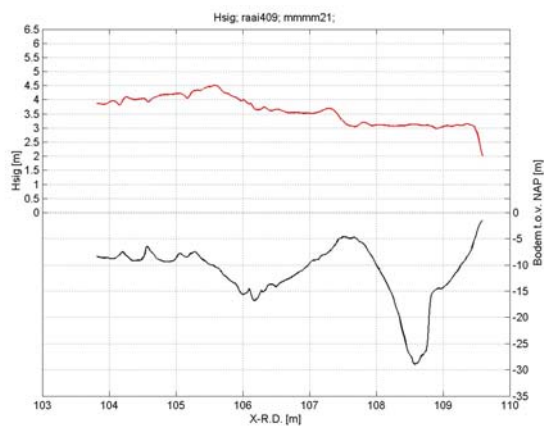
Algemeen

In deze bijlage wordt per (M-klasse) storm de uitvoer gegeven van de significante golfhoogte langs de verschillende raaien. De significante golfhoogte is hierin uitgezet tegen de bodem diepte en de golfrichting.

Stormrichting 210

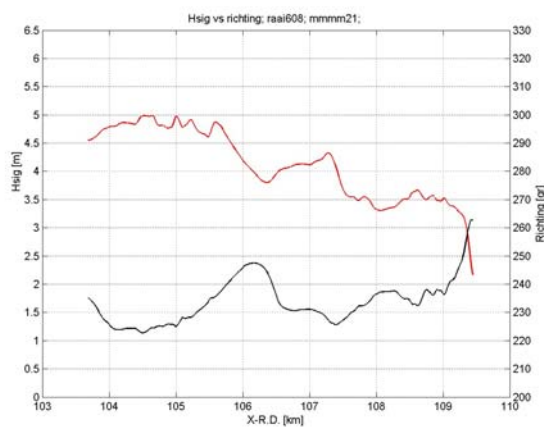
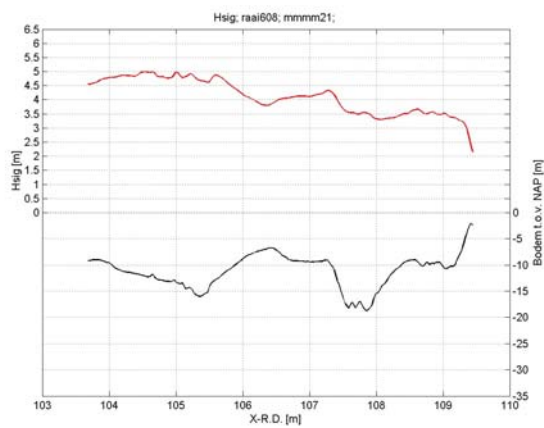
De raaiplots van de significante golfhoogte tijdens een storm uit de richting 210, onttrokken uit de resultaten van het D2 grid (resolutie: 25x25 m²)



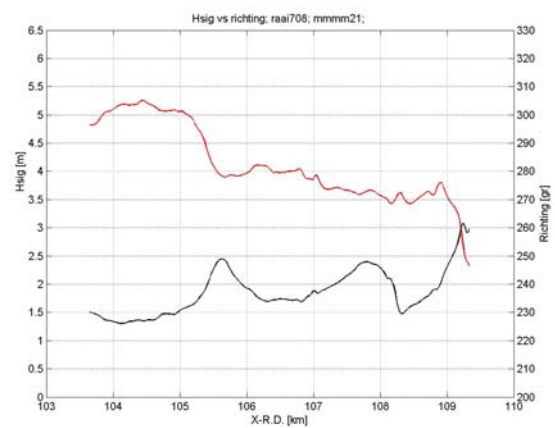
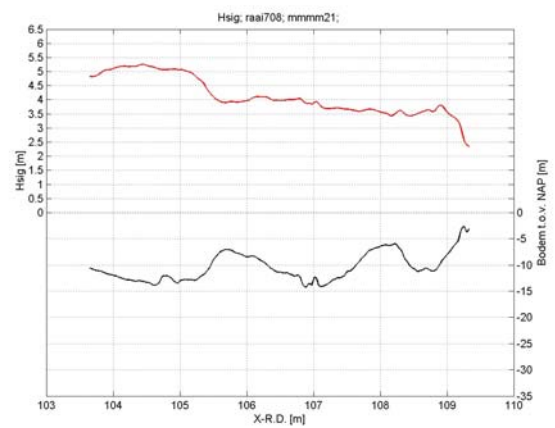


Raai 409

Raai 508



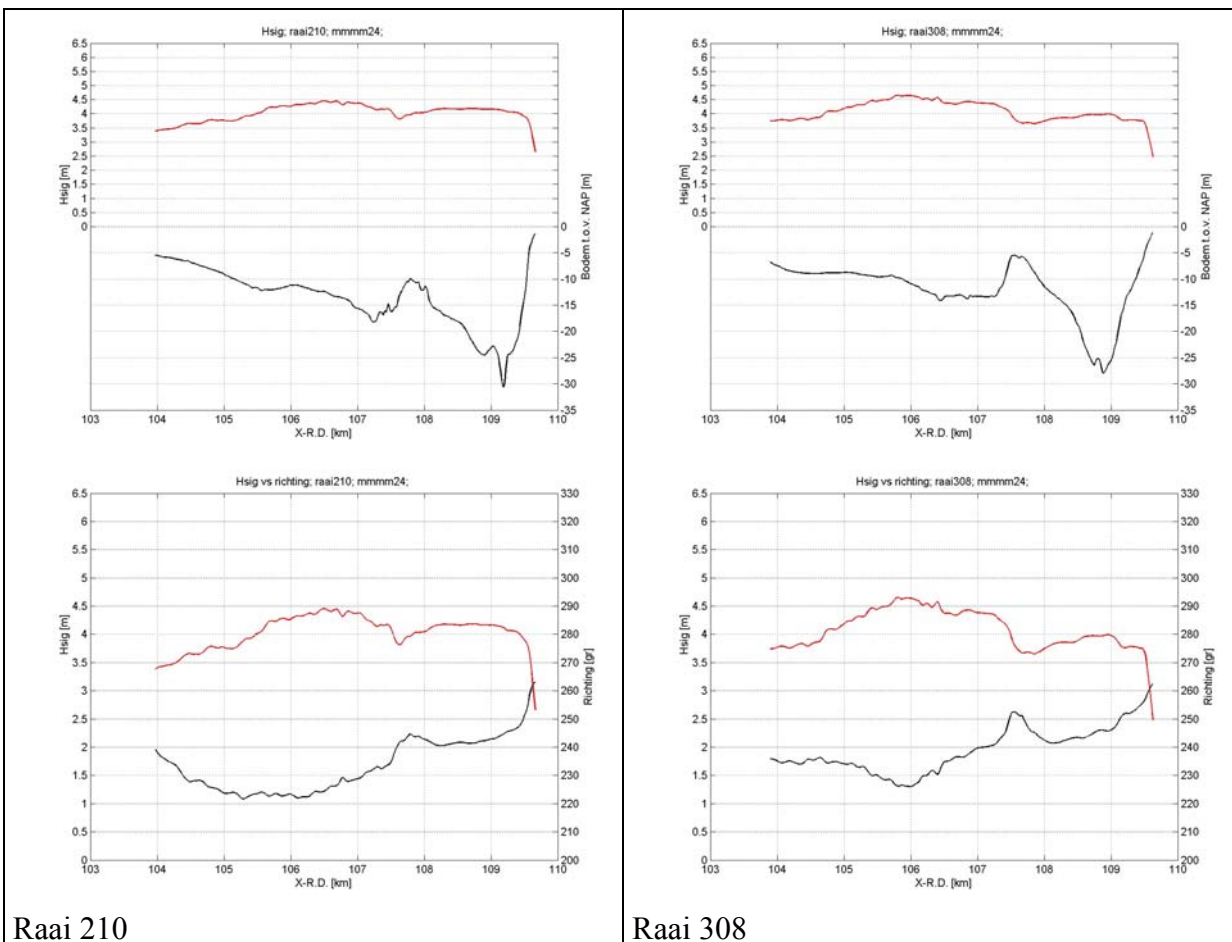
Raai 608



Raai 708

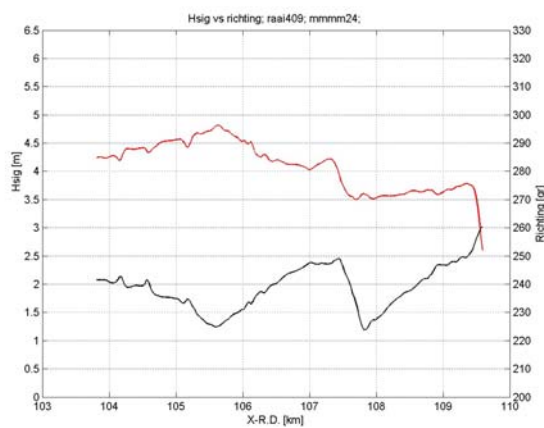
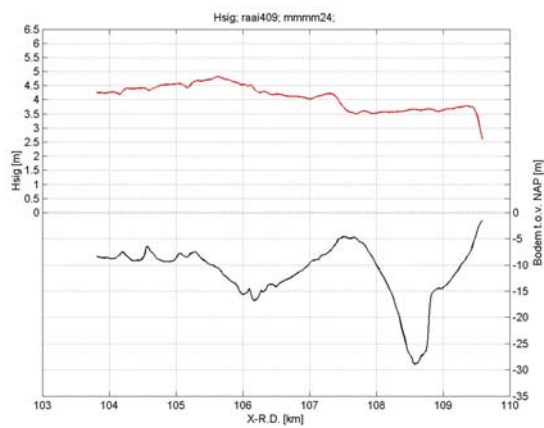
Stormrichting 240

De raaiplots van de significante golfhoogte tijdens een storm uit de richting 240, onttrokken uit de resultaten van het D2 grid (resolutie: 25x25 m²).

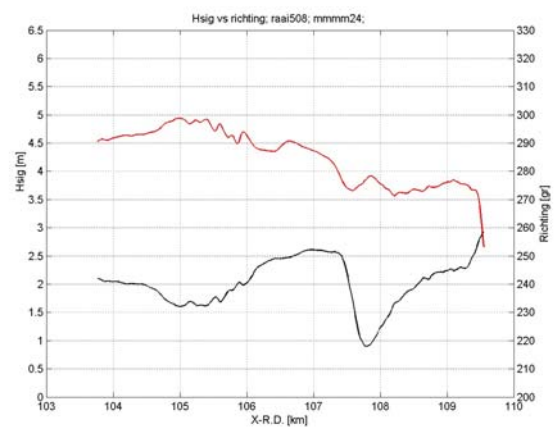
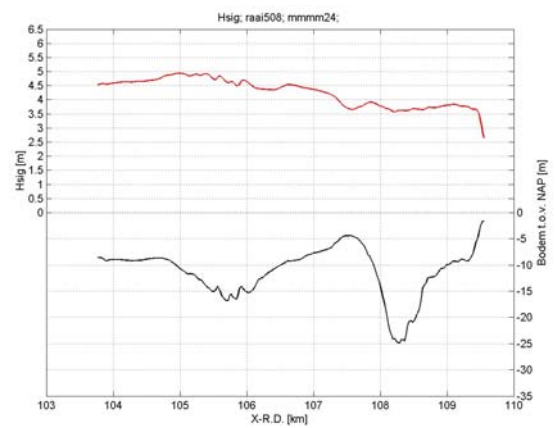


Raai 210

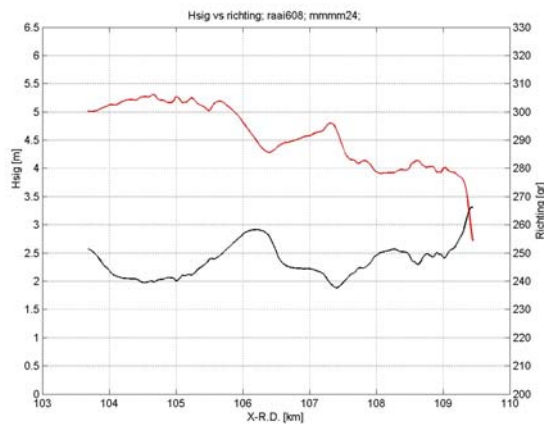
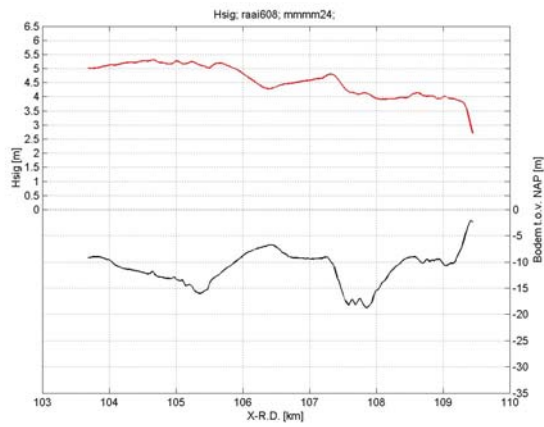
Raai 308



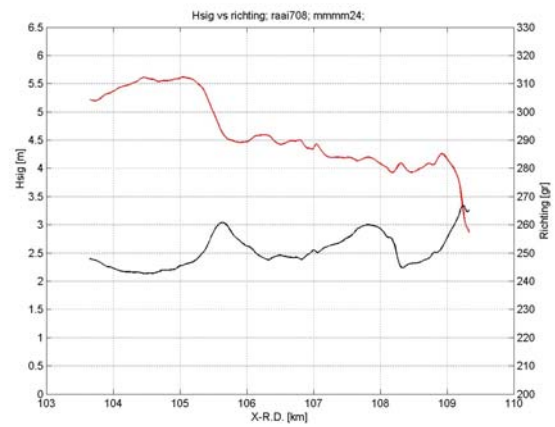
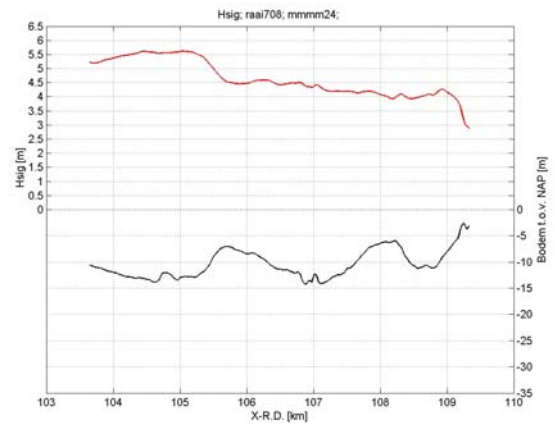
Raai 409



Raai 508



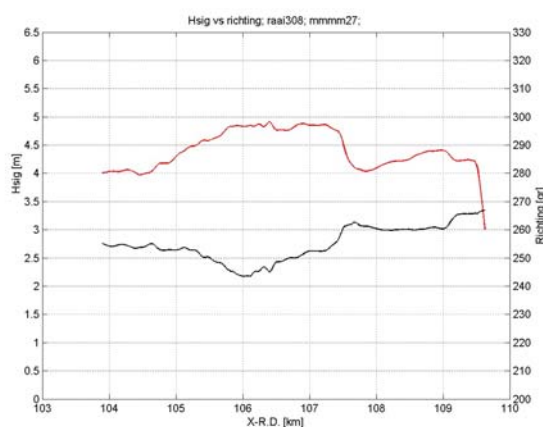
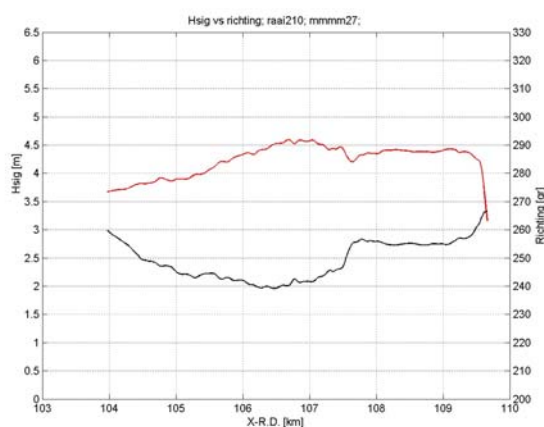
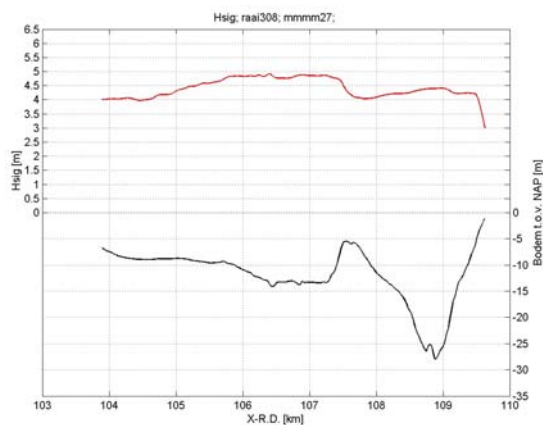
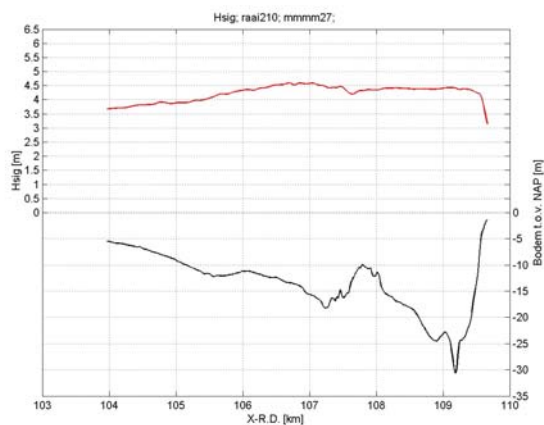
Raai 608



Raai 708

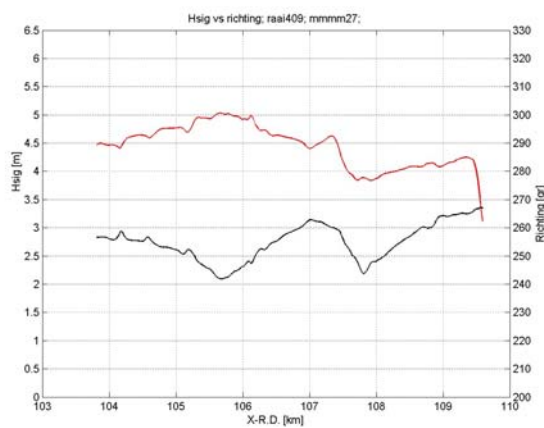
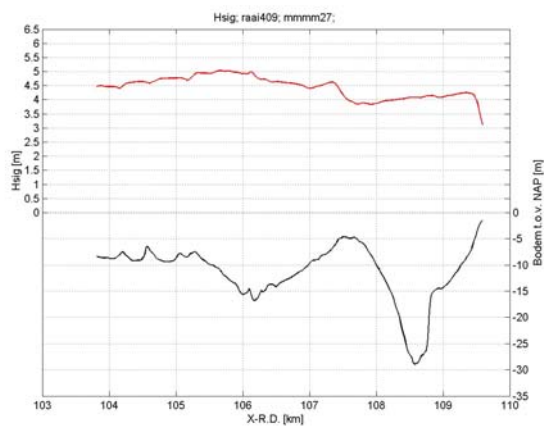
Stormrichting 270

De raaiplots van de significante golfhoogte tijdens een storm uit de richting 270, onttrokken uit de resultaten van het D2 grid (resolutie: 25x25 m²).

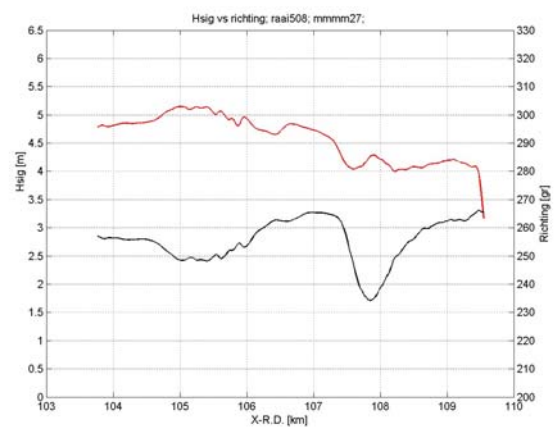
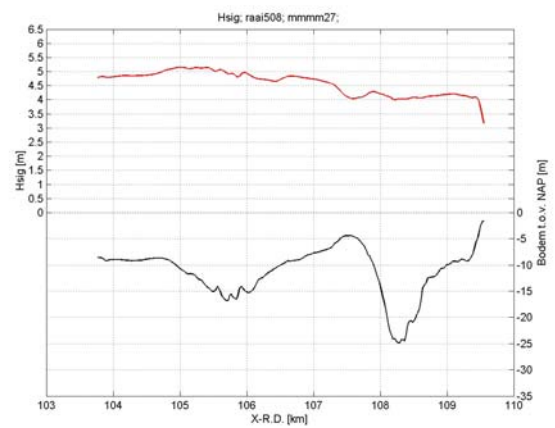


Raai 210

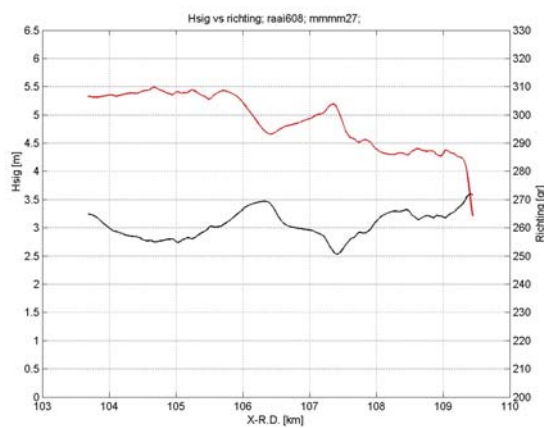
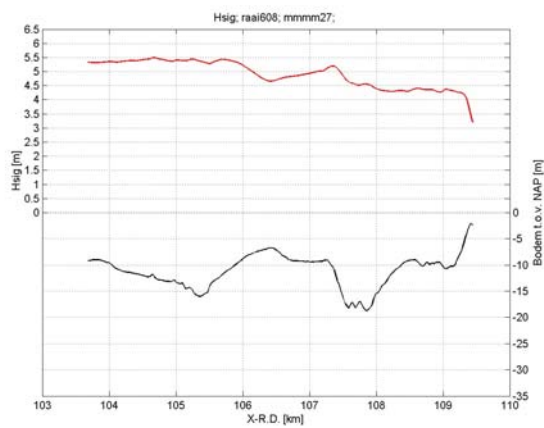
Raai 308



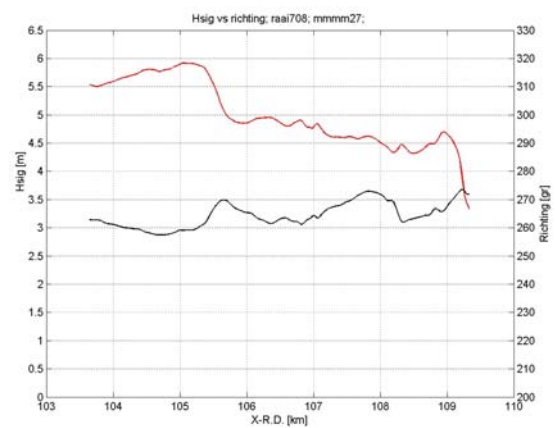
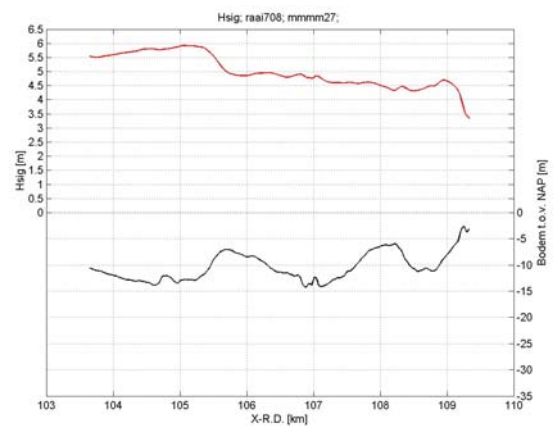
Raai 409



Raai 508



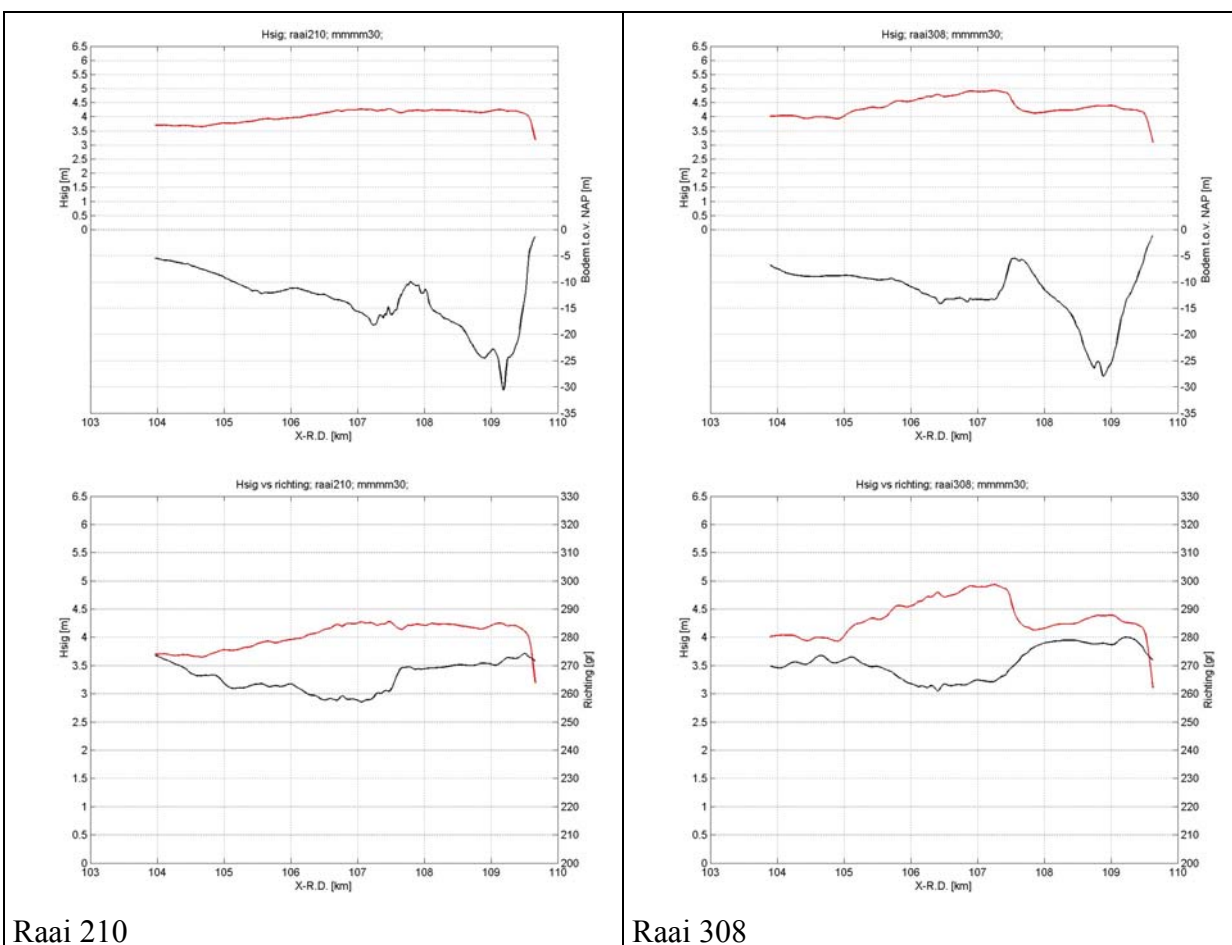
Raai 608



Raai 708

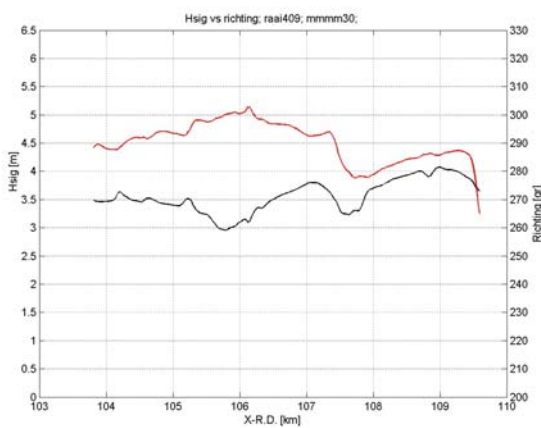
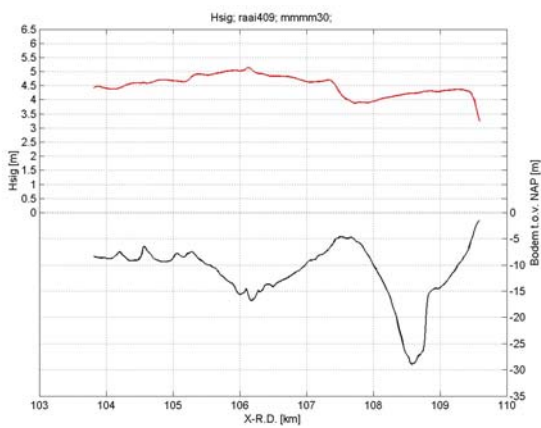
Stormrichting 300

De raaiplots van de significante golfhoogte tijdens een storm uit de richting 300, onttrokken uit de resultaten van het D2 grid (resolutie: 25x25 m²).

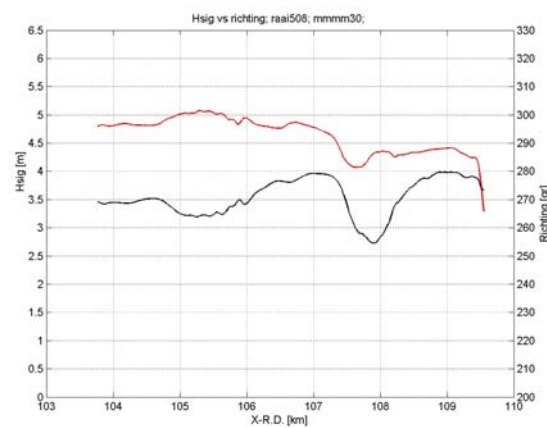
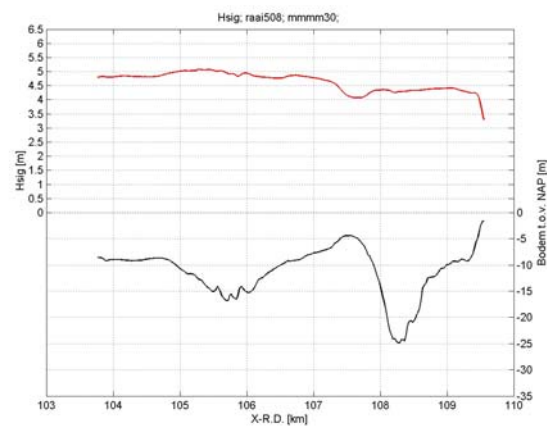


Raai 210

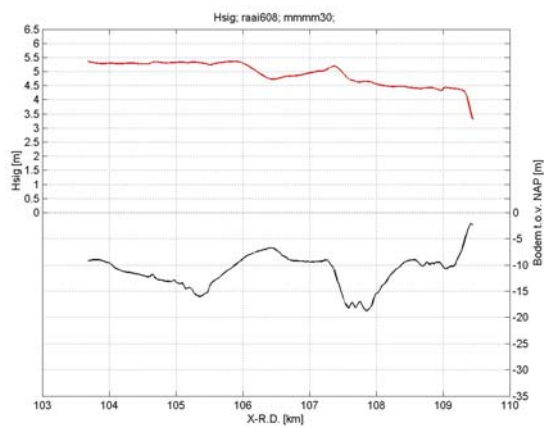
Raai 308



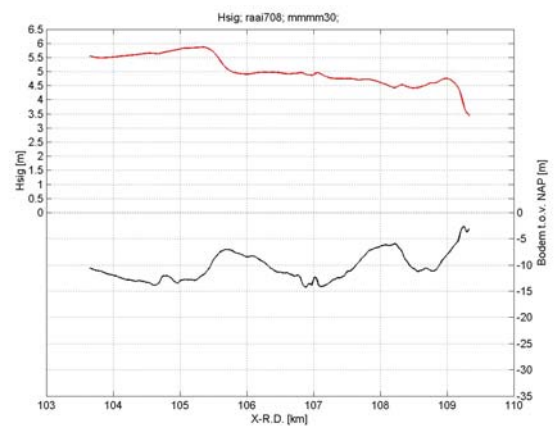
Raai 409



Raai 508



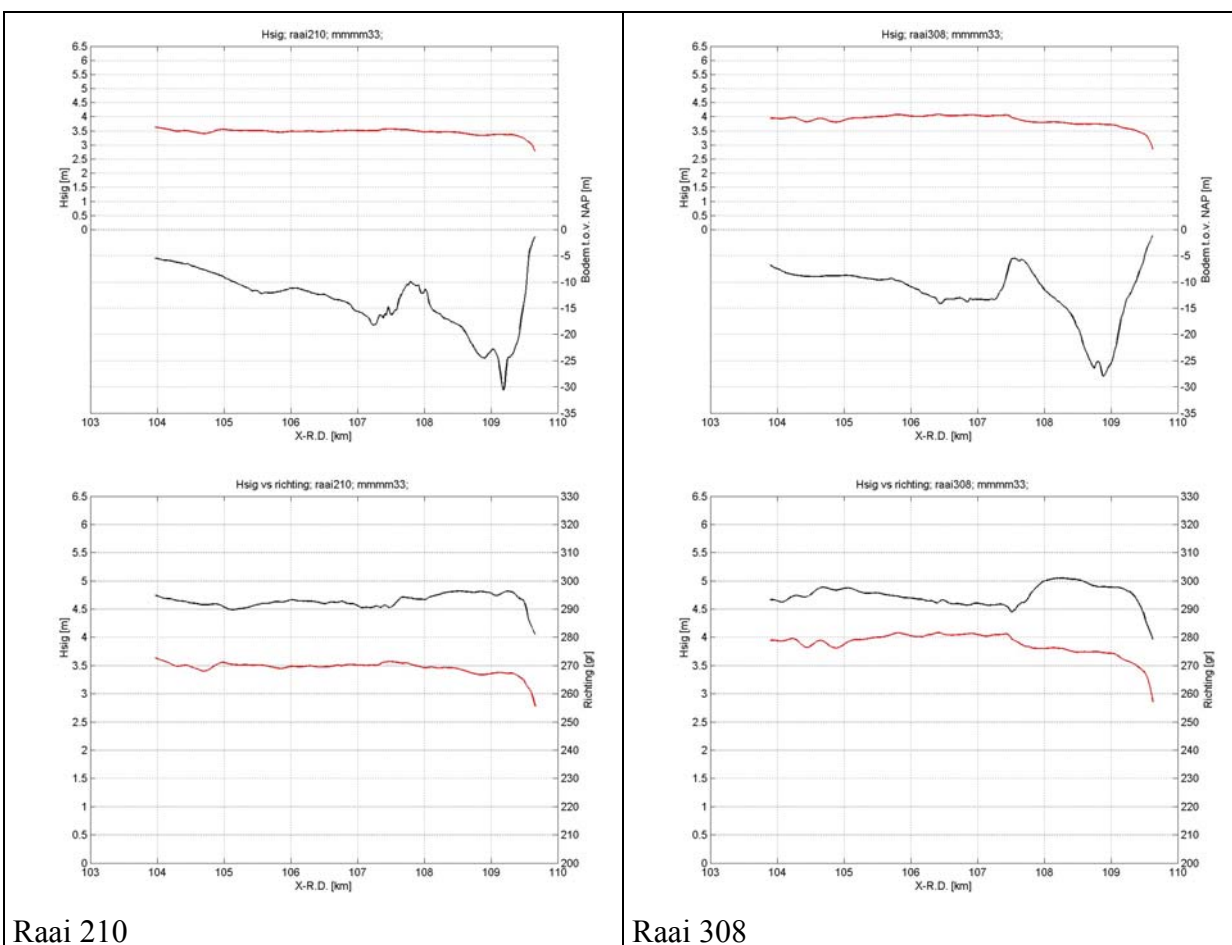
Raai 608



Raai 708

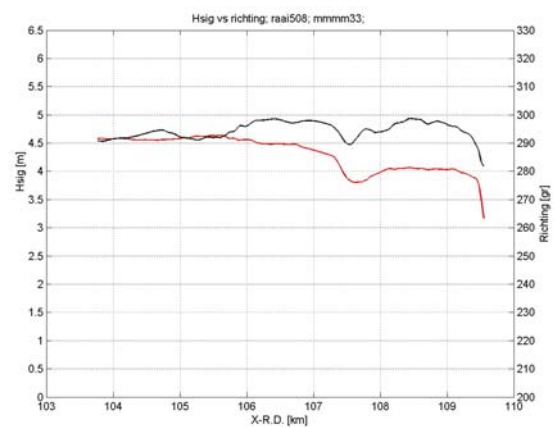
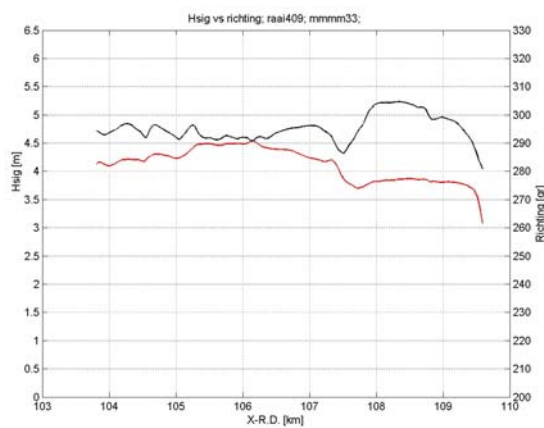
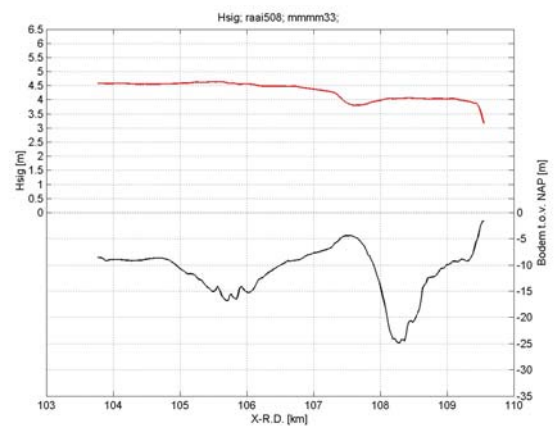
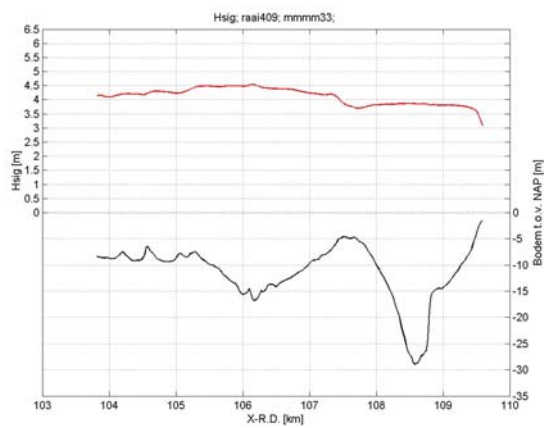
Stormrichting 330

De raaiplots van de significante golfhoogte tijdens een storm uit de richting 330, onttrokken uit de resultaten van het D2 grid (resolutie: 25x25 m²).



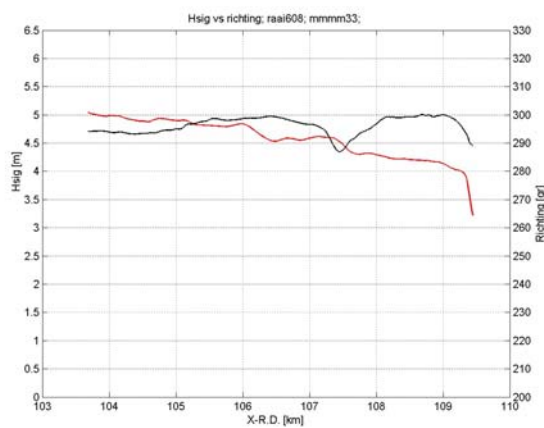
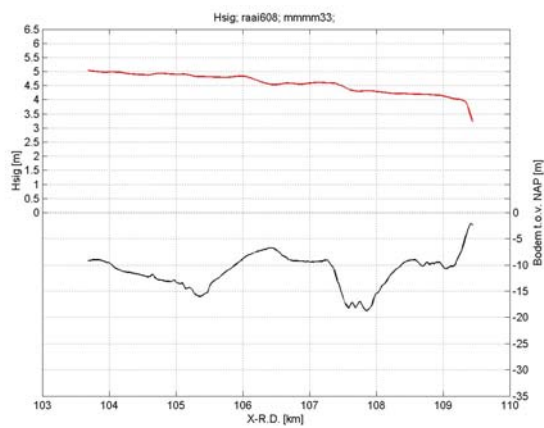
Raai 210

Raai 308

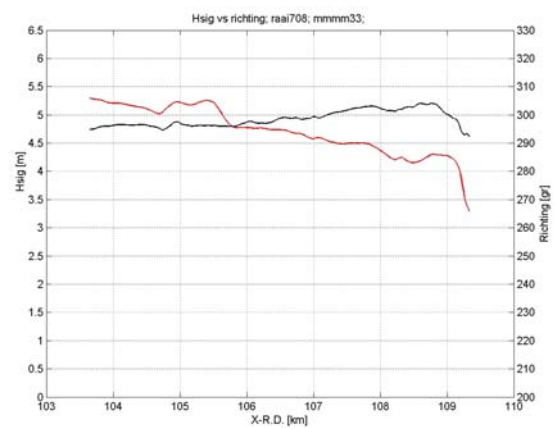
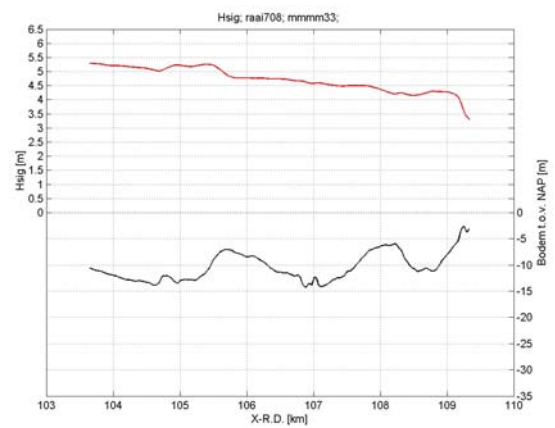


Raai 409

Raai 508



Raai 608

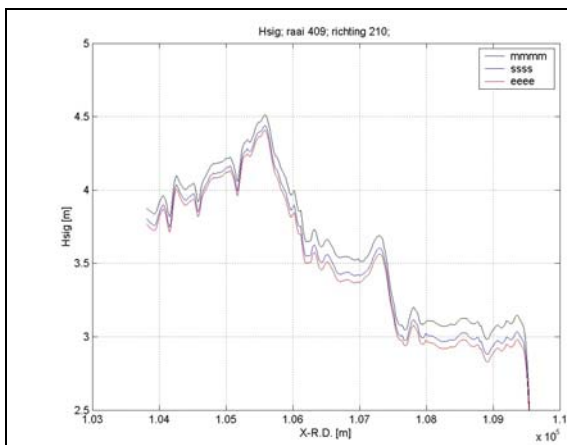


Raai 708

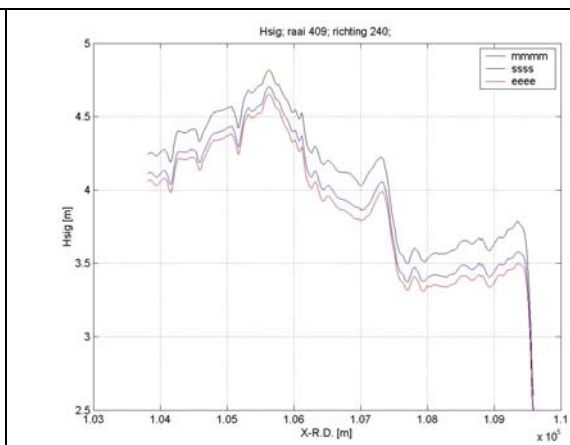
Bijlage 5.5: Invloed van de stormklasse op de significante golfhoogte

Algemeen

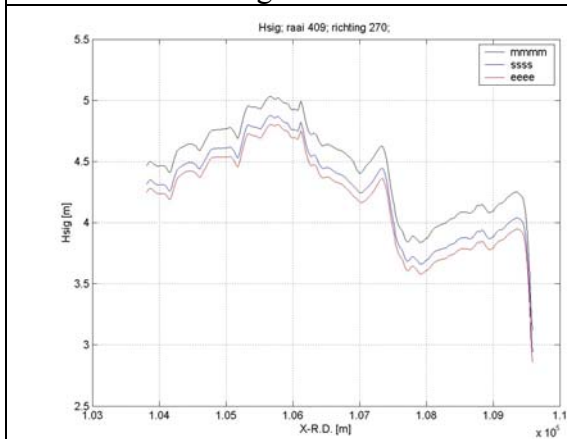
In voorgaande bijlagen is de uitvoer beschreven aan de hand van de M-klasse stormen. De uitvoer van de S en E-klasse stormen zijn niet gepresenteerd. De reden dat alleen de M-klasse stormen zijn gepresenteerd is dat aan de hand van deze klassen al duidelijk gemaakt kan worden wat de invloed van de voordelta is op het golfveld. De uitvoer van de S en E-klasse laat geen onverwacht beeld zien. De golfhoogte is lager als gevolg van het mildere stormklimaat. In de onderstaande figuren is de uitvoer van de significante golfhoogte van de verschillende klassen te zien per stormrichting. Deze zijn onttrokken uit de resultaten van het D2-grid. (25x25 m²).



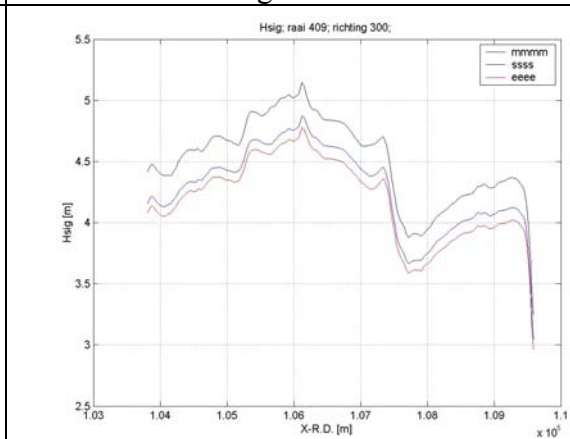
Stormen uit richting 210



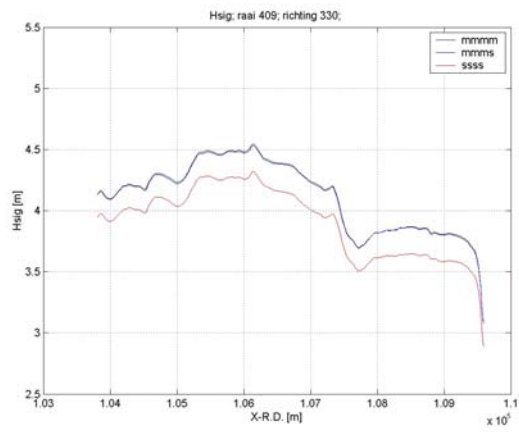
Stormen uit richting 240



Stormen uit richting 270



Stormen uit richting 300

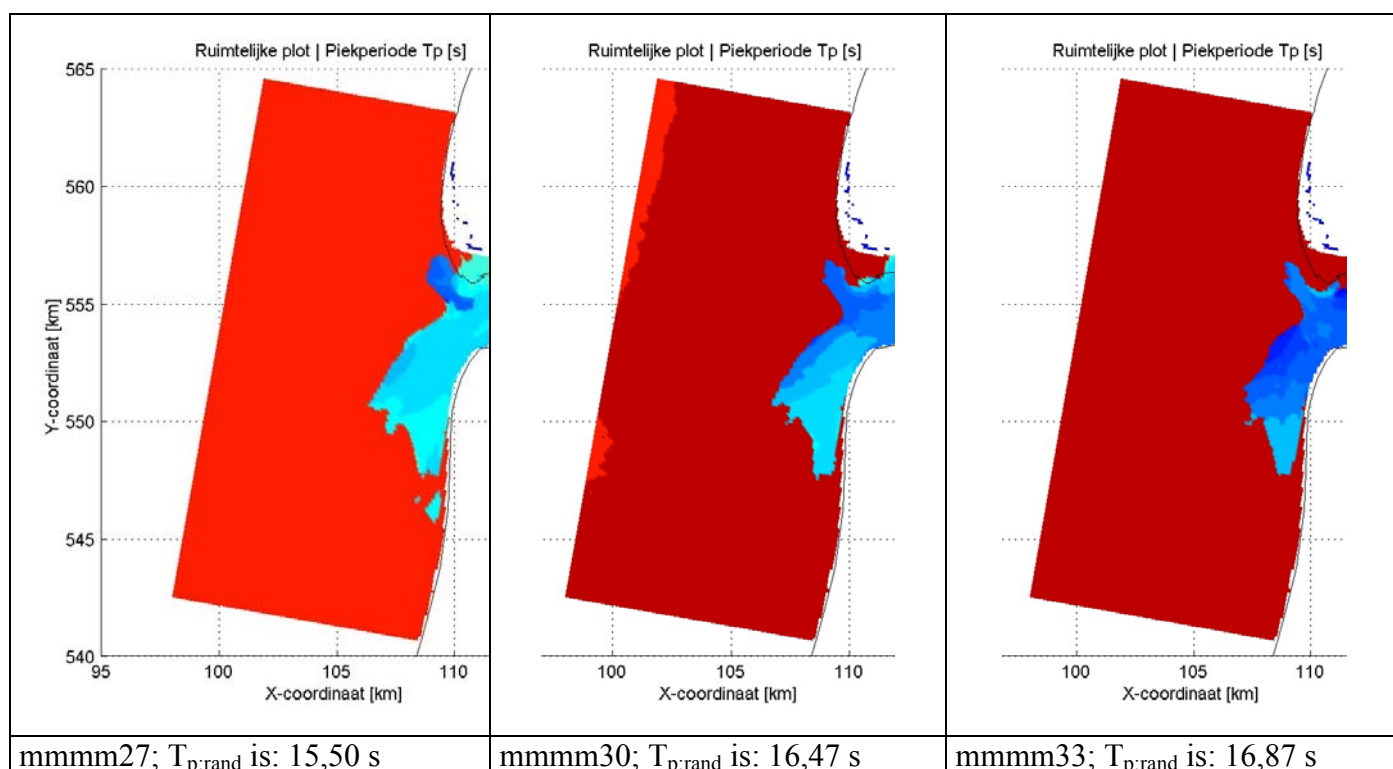
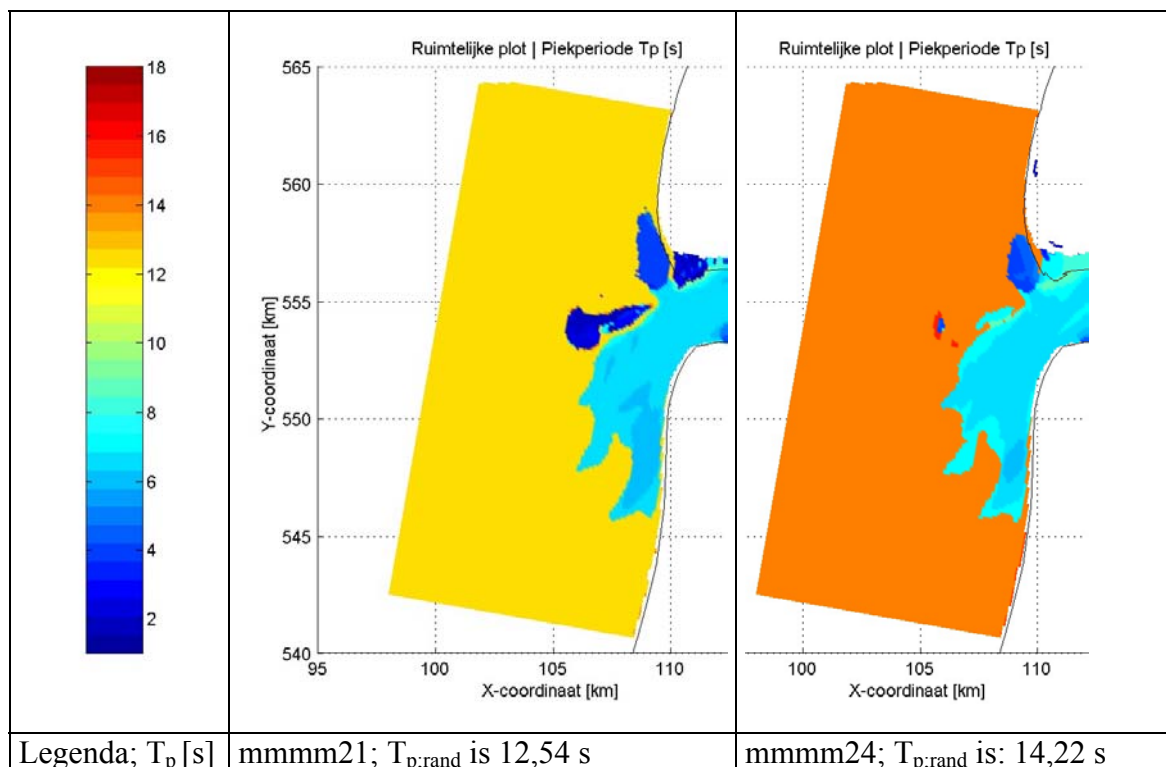


Stormen uit richting 330

Bijlage 5.6: Uitvoer van de piekperiode

Algemeen

In de onderstaande figuren is aan de hand van de uitvoer van het fijne grid (resolutie $100 \times 100 \text{ m}^2$) de piekperiode geplot. De figuren geven de ruimtelijke verdeling van de piekperiode weer voor elke (M-klasse) storm. Onder de figuren staat ook de piekperiode die is opgegeven op de rand van het grove grid.



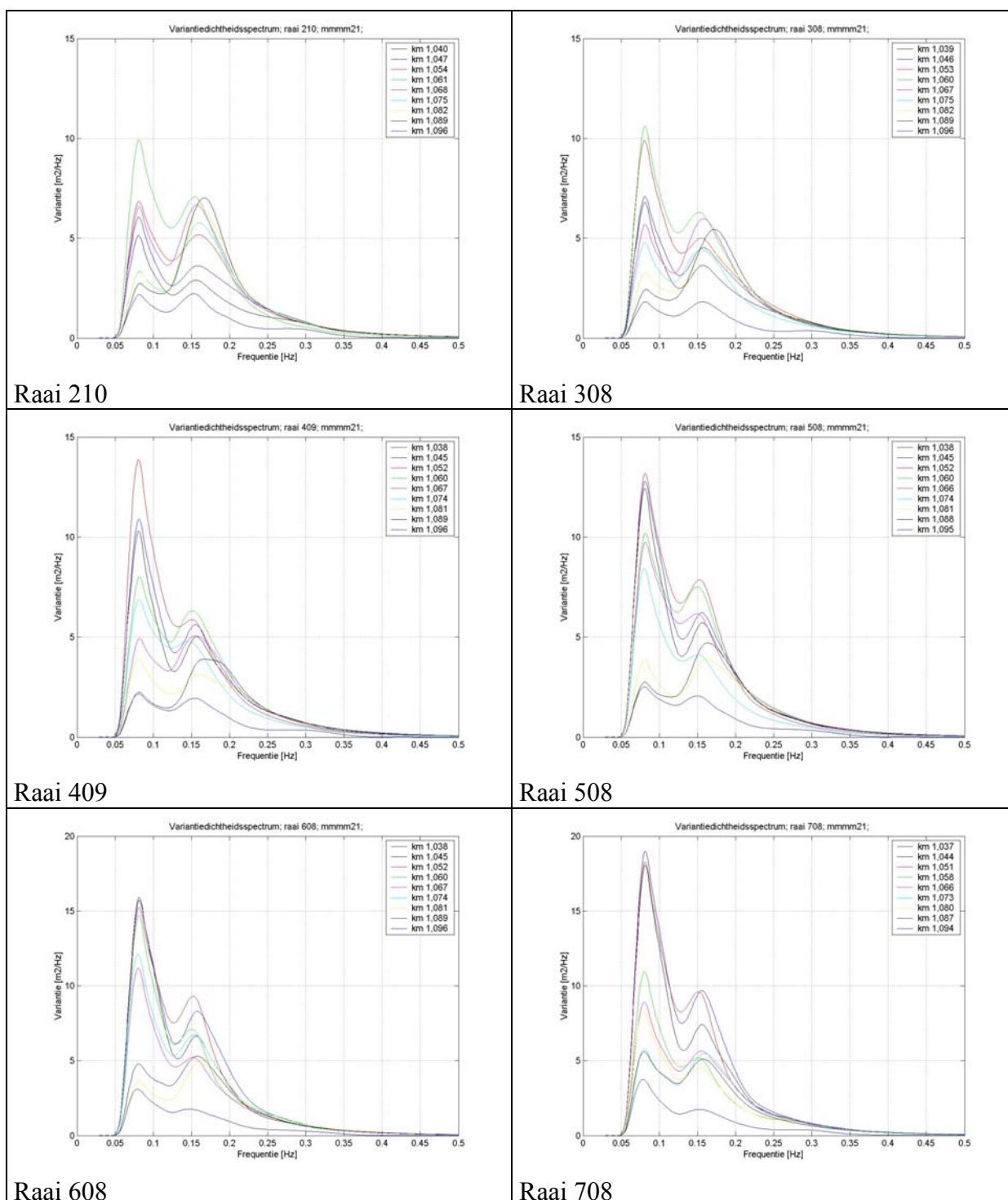
Bijlage 5.7: Spectrum ontwikkeling langs een raai

Algemeen

In deze bijlage wordt per (M-klasse) stormrichting de uitvoer gegeven van de ontwikkeling van de variantiedichtheidsspectra richting de kust per per raai.

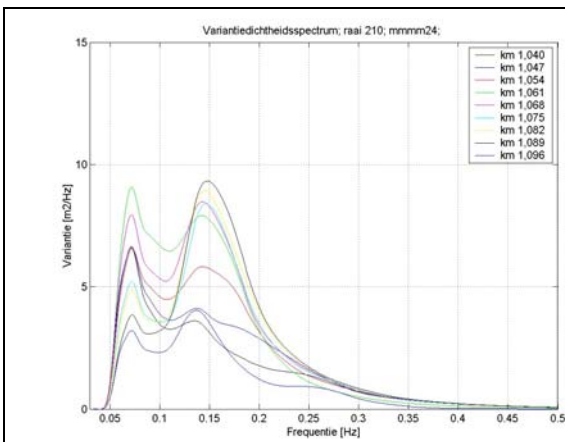
Stormrichting 210

De ontwikkeling van het spectrum richting de kust voor de verschillende raaien tijdens een storm uit de richting 210, onttrokken uit de resultaten van het D2 grid (resolutie: 25x25 m²)

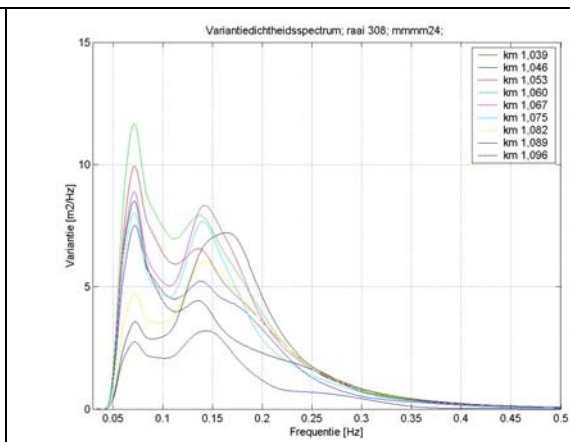


Stormrichting 240

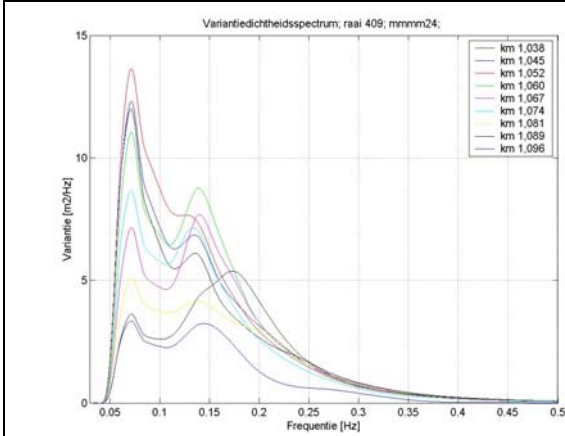
De ontwikkeling van het spectrum richting de kust voor de verschillende raaien tijdens een storm uit de richting 240, onttrokken uit de resultaten van het D2 grid (resolutie: 25x25 m²)



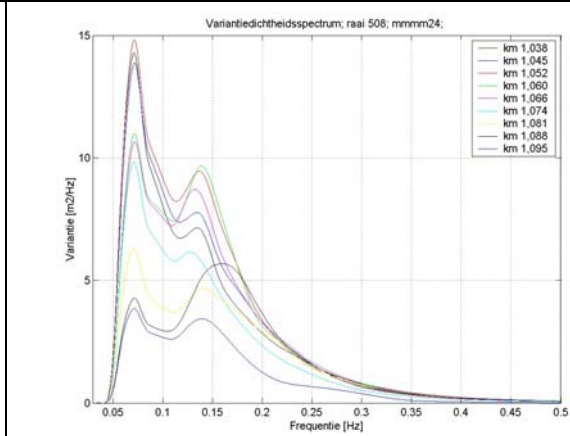
Raai 210



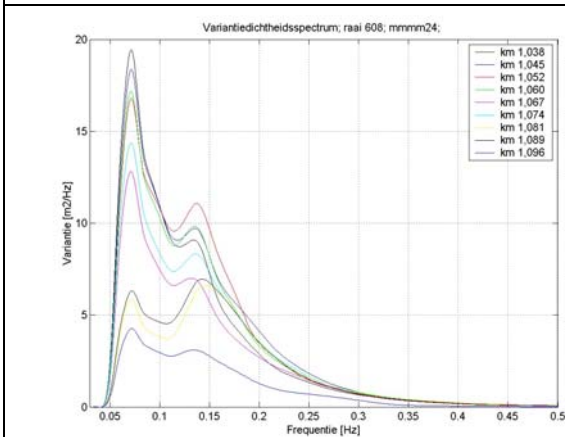
Raai 308



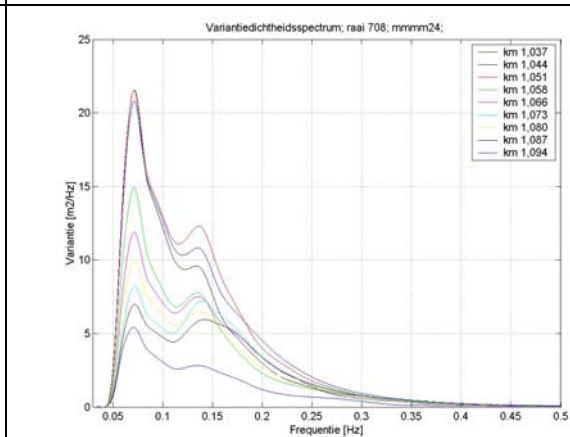
Raai 409



Raai 508



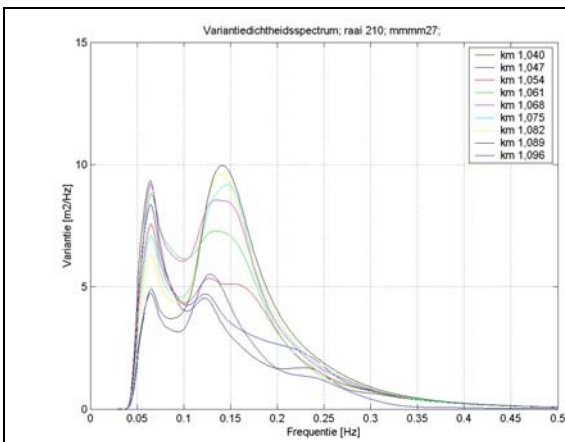
Raai 608



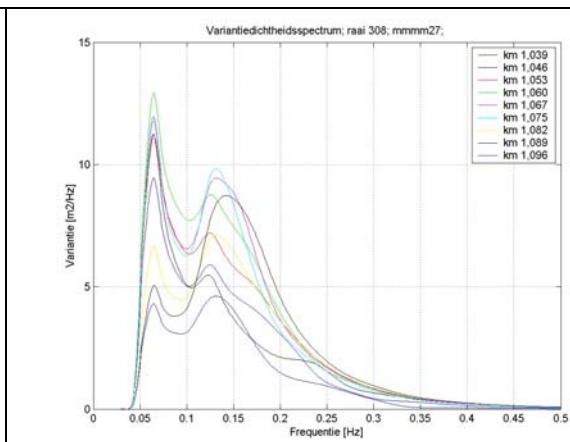
Raai 708

Stormrichting 270

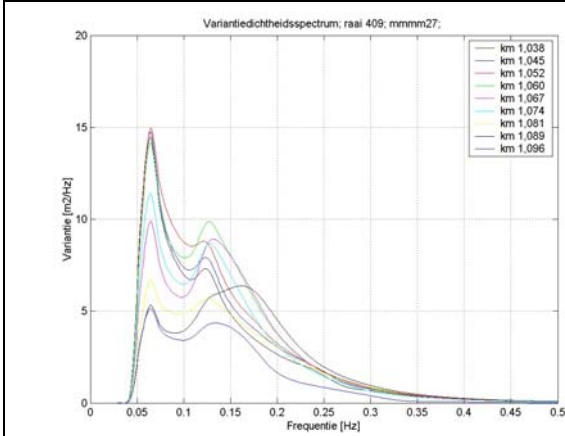
De ontwikkeling van het spectrum richting de kust voor de verschillende raaien tijdens een storm uit de richting 270, onttrokken uit de resultaten van het D2 grid (resolutie: 25x25 m²)



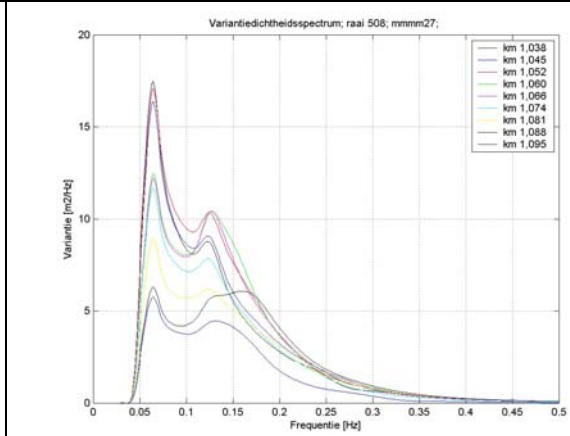
Raai 210



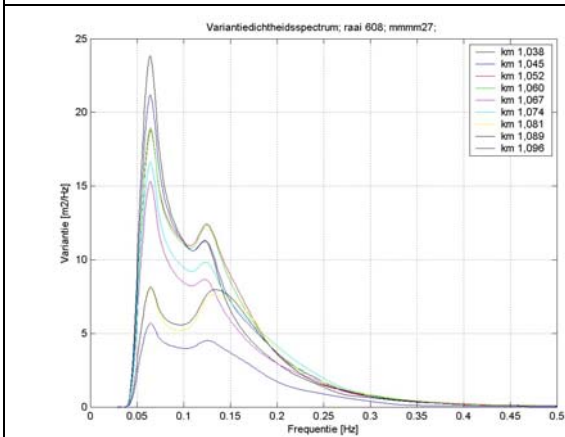
Raai 308



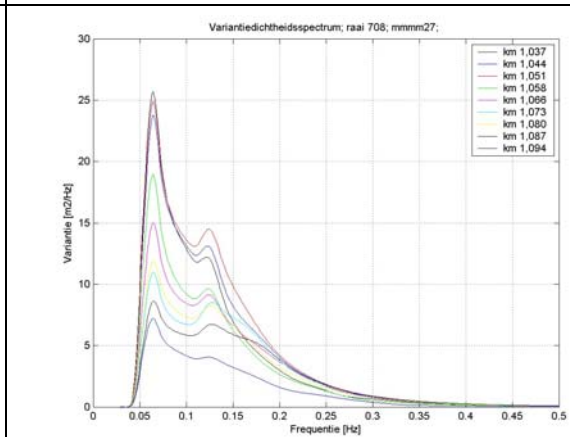
Raai 409



Raai 508



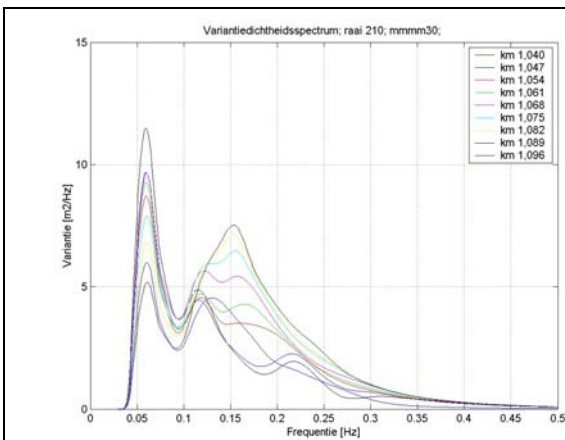
Raai 608



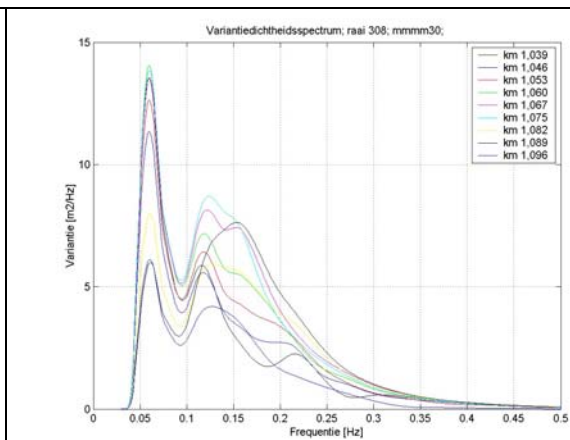
Raai 708

Stormrichting 300

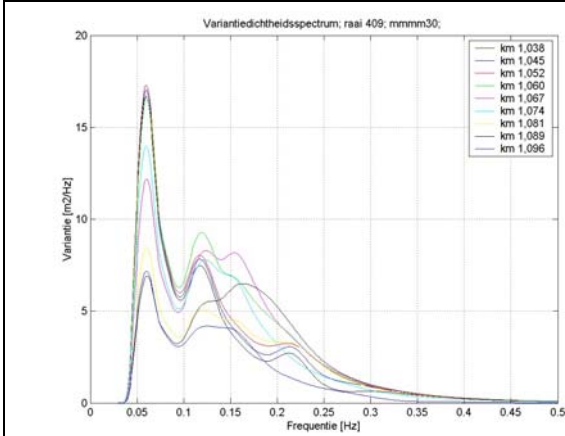
De ontwikkeling van het spectrum richting de kust voor de verschillende raaien tijdens een storm uit de richting 300, onttrokken uit de resultaten van het D2 grid (resolutie: 25x25 m²)



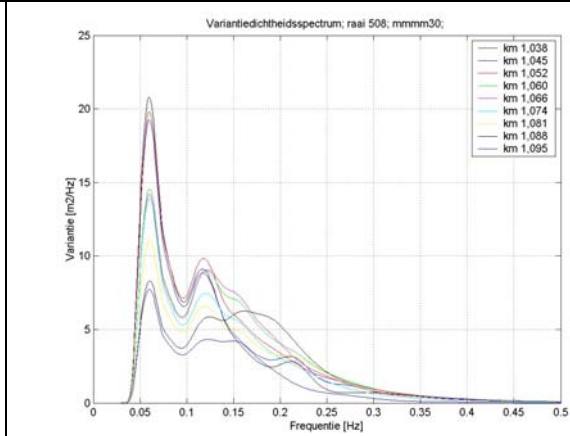
Raai 210



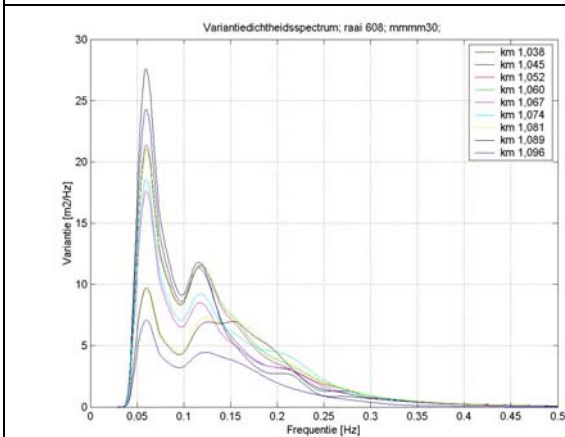
Raai 308



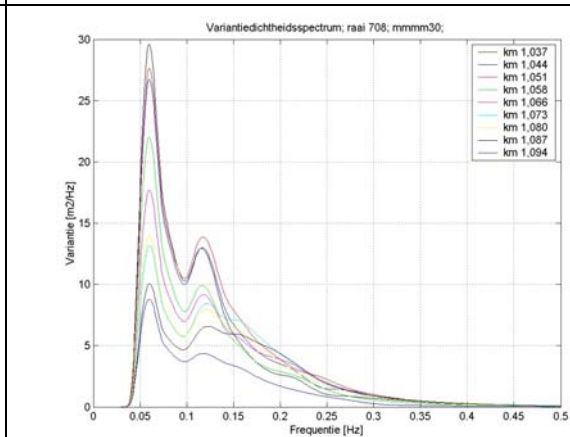
Raai 409



Raai 508



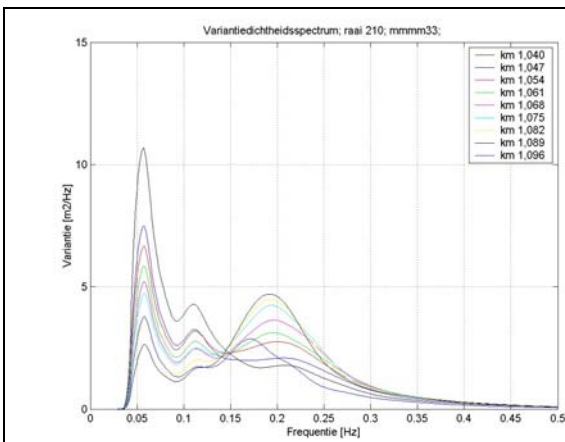
Raai 608



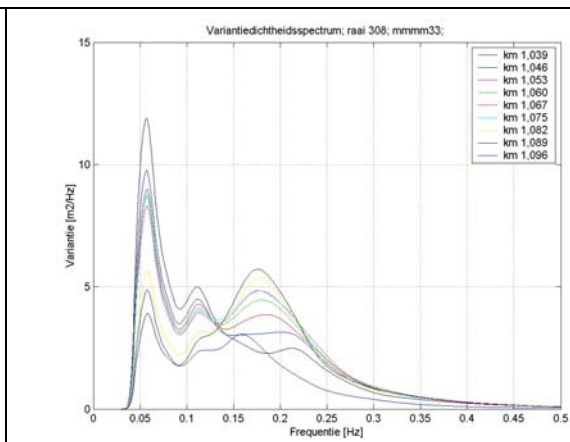
Raai 708

Stormrichting 330

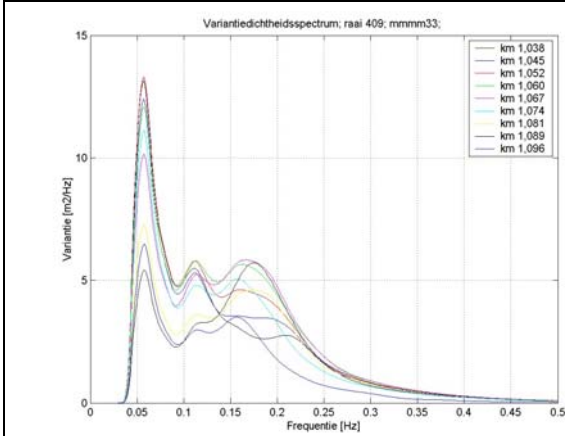
De ontwikkeling van het spectrum richting de kust voor de verschillende raaien tijdens een storm uit de richting 330, onttrokken uit de resultaten van het D2 grid (resolutie: 25x25 m²)



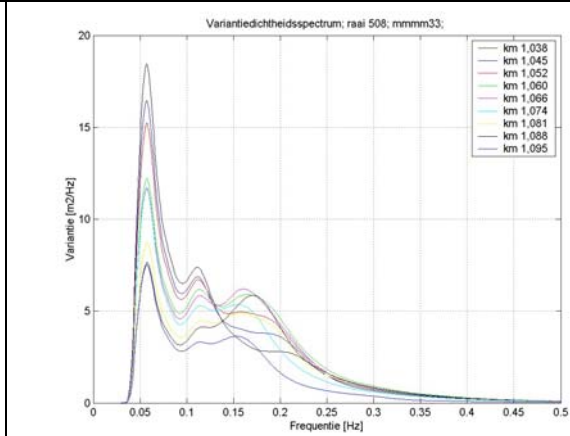
Raai 210



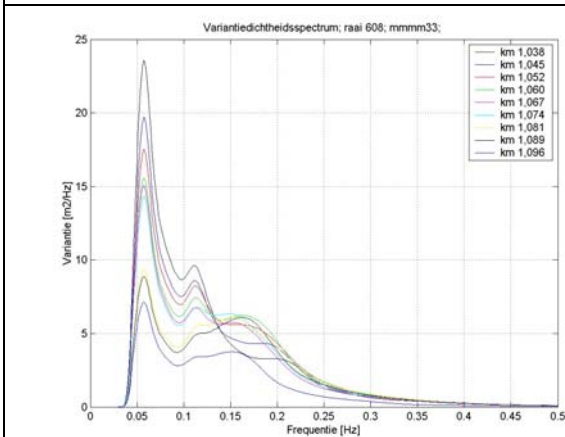
Raai 308



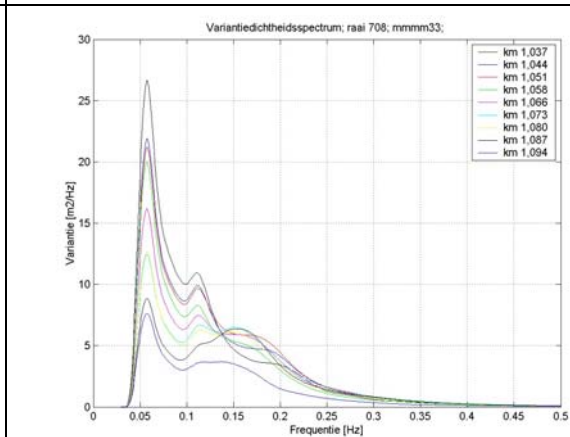
Raai 409



Raai 508



Raai 608



Raai 708

Bijlagen hoofdstuk 6

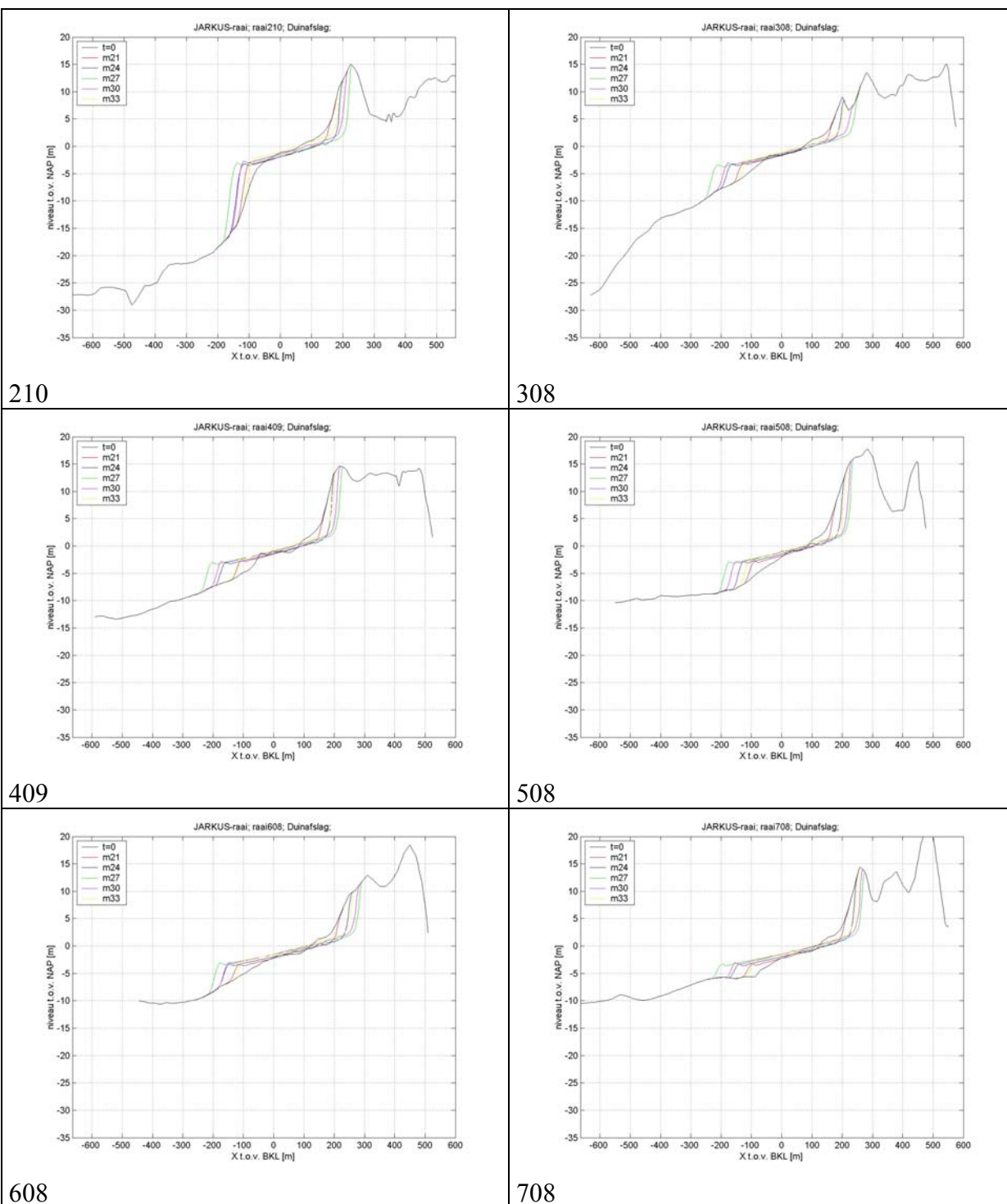
| | |
|--|----|
| Bijlage 6.1: Resultaten duinafslag; eindprofielen | 72 |
| Bijlage 6.2: Frequentieverdeling duinteruggang..... | 73 |
| Bijlage 6.3: Frequentieverdeling afgeslagen hoeveelheid duinzand | 79 |

Bijlage 6.1: Resultaten duinafslag; eindprofielen

Algemeen

In totaal zijn er 90 duinafslagberekeningen gemaakt, opgebouwd uit 5 stormrichtingen en 3 stormklassen in 6 JARKUS-raaien. In de onderstaande figuren zijn alleen de eindprofielen geschetst van de M-klasse stormen voor alle JARKUS-raaien.

Duinafslag bij stormen van klasse M

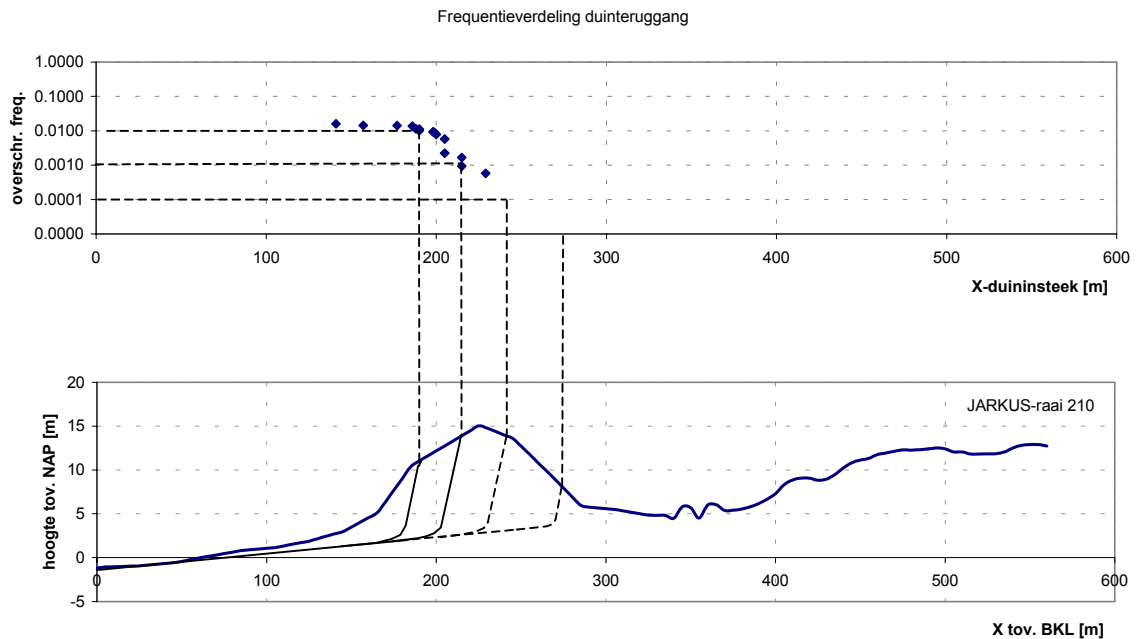


Bijlage 6.2: Frequentieverdeling duinteruggang

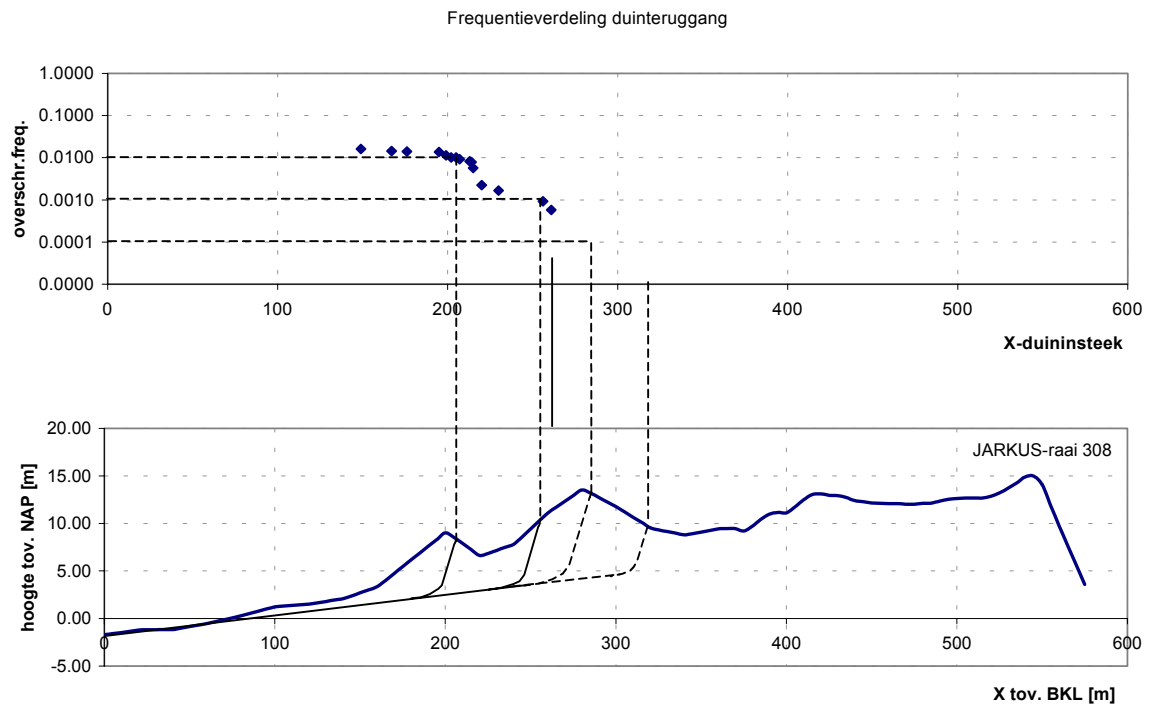
Algemeen

In onderstaande figuren zijn voor elke JARKUS-raai de overschrijdingsfrequenties van de duinteruggang gegeven. Deze teruggang wordt tevens gevisualiseerd door er een (fictief) duinafslagprofiel onder te tekenen. Deze afslagprofielen dienen alleen om de plaats van de insteek aan te geven welke berekend is. Het getekende afslagprofiel kan dus afwijken. In de figuren is de 10^{-4} en de 10^{-5} afslag bepaald aan de hand van het doorzetten van de trend van de frequentieverdeling.

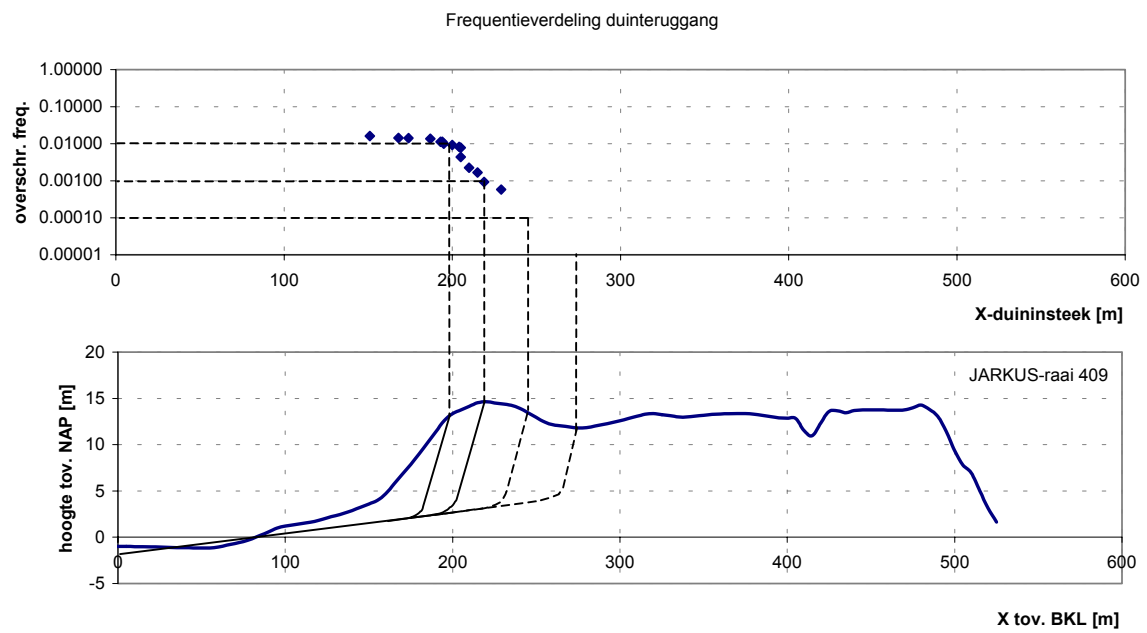
JARKUS-raai 210:



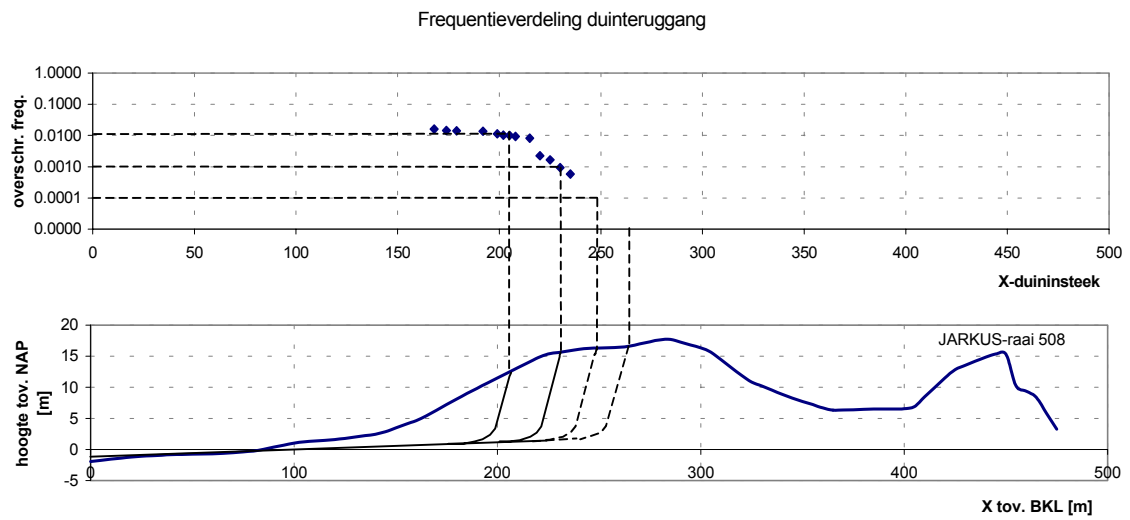
JARKUS-raai 308:



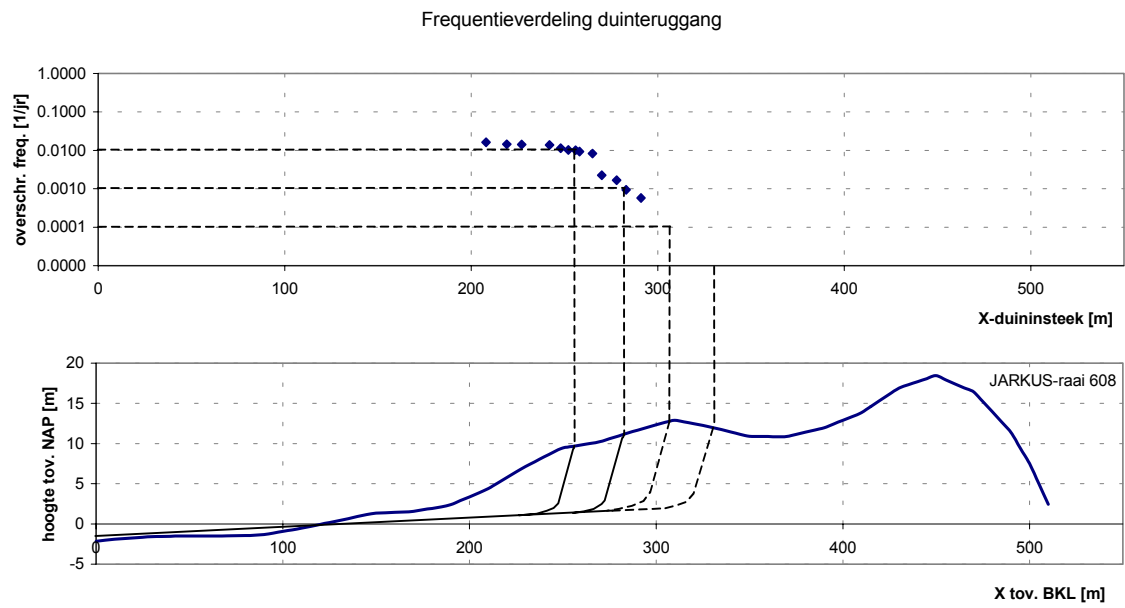
JARKUS-raai 409:



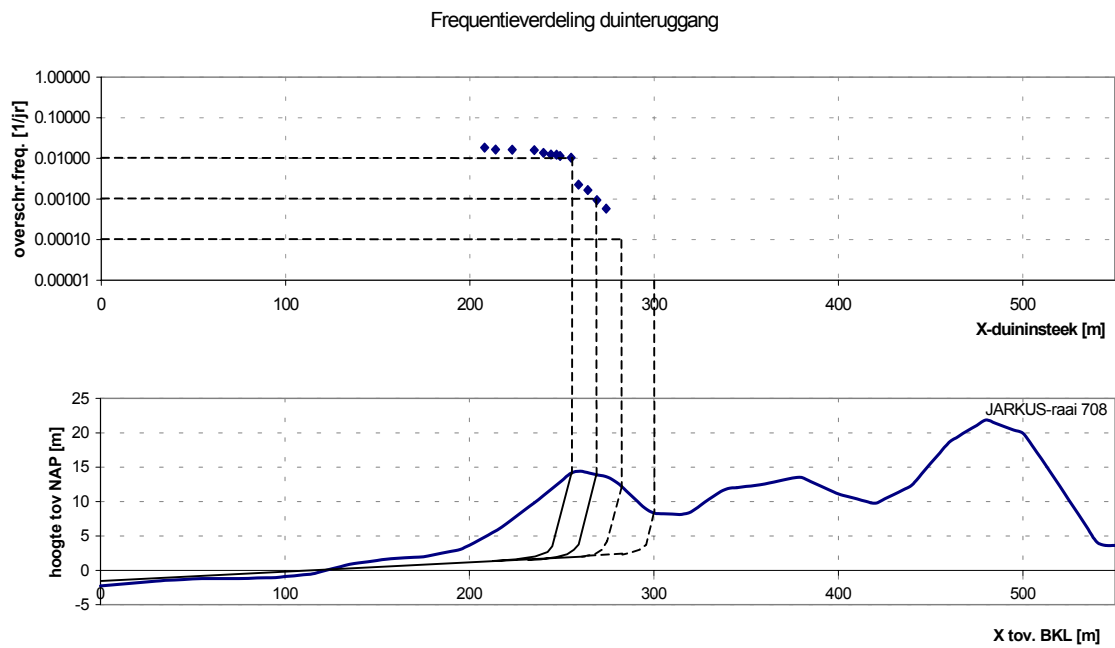
JARKUS-raai 508:



JARKUS-raai 608:



JARKUS-raai 708:

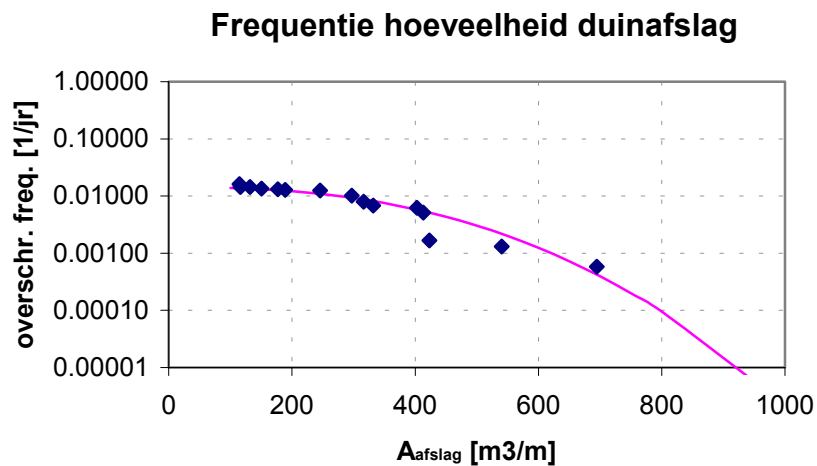


Bijlage 6.3: Frequentieverdeling afgeslagen hoeveelheid duinzand

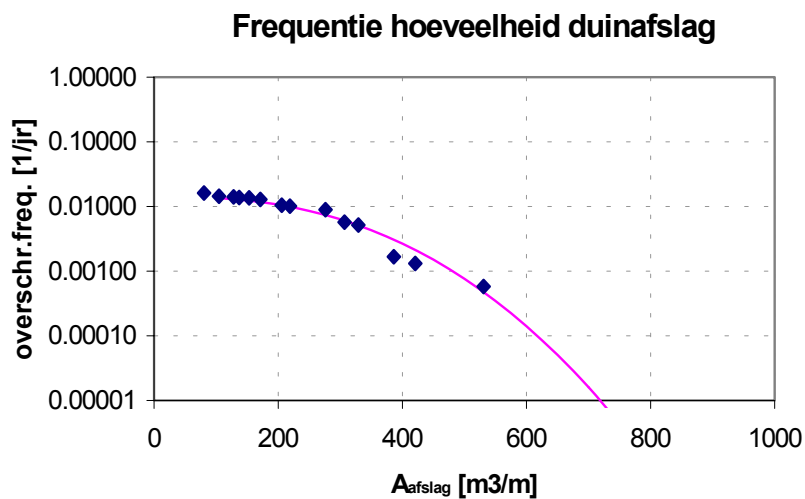
Algemeen

In onderstaande figuren staan de frequenties weergegeven van de afgeslagen hoeveelheid duinmateriaal (A_{afslag}). Per raai zijn de berekende punten weergegeven alsmede een fit om een schatting te geven van de afslaghoeveelheid in extremere situaties.

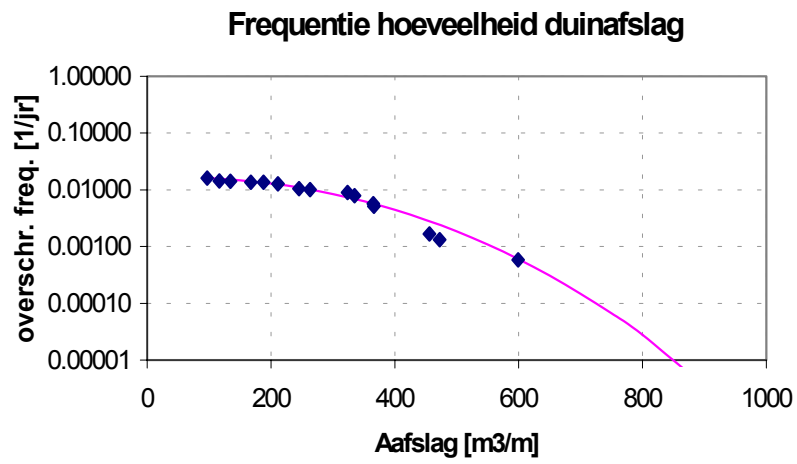
JARKUS-raai 210:



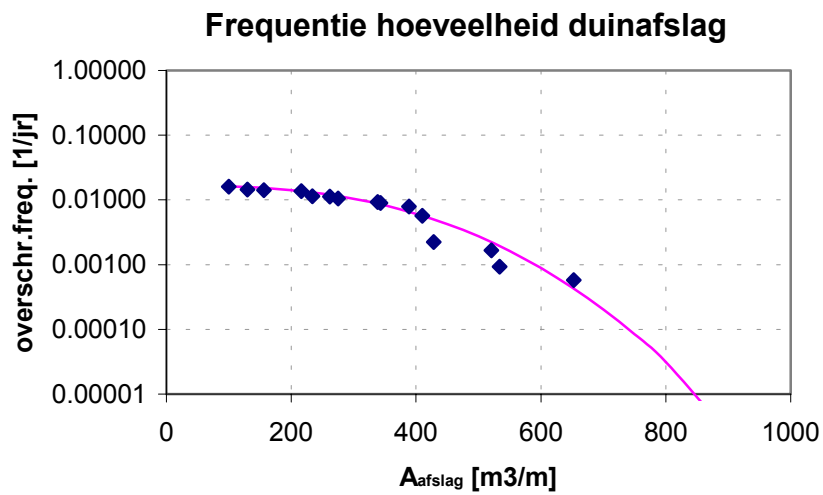
JARKUS-raai 308:



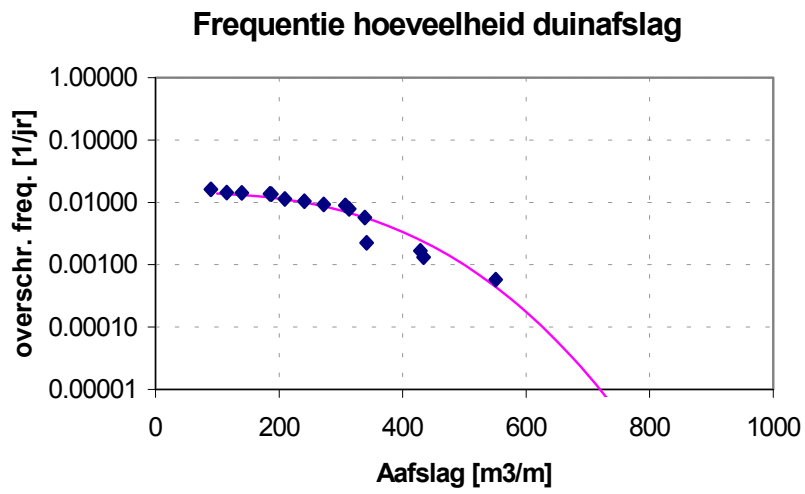
JARKUS-raai 409:



JARKUS-raai 508:



JARKUS-raai 608:



JARKUS-raai 708:

