

EINDRAPPORT AFSTUDEERONDERZOEK

**FAALKANSANALYSE
VAN HET ZEETRANSPORT
VAN TUNNELEMENTEN**

D.S.J. van Elsdingen

AFSTUDEERCOMMISSIE:
Prof. drs. ir. J.K. Vrijling
ir. W. Meermans
Dr. ir. L.H. Holthuijsen

VOORWOORD

Voor U ligt het eindrapport van mijn afstudeeronderzoek dat als titel heeft:
"Faalkansanalyse van het zeetransport van tunnelementen"

Na lang nagedacht te hebben wat mijn afstudeeronderzoek precies moest gaan inhouden, heeft het dan uiteindelijk vorm gekregen. Ik heb er met veel plezier aan gewerkt en kon er mijn enthousiasme volop in kwijt.

Het onderzoek omvat de volgende hoofdpunten:

- een statistische verwerking van golfgegevens om daarmee het golfklimaat op de Noordzee voor de Nederlandse kust vast te leggen;
- een simulatie waarin golfvoorspellingen aan vertrekcriteria worden getoetst en de golfbelastingen, die tijdens transport optreden, via overdrachtsfuncties worden omgezet tot belastingen in het tunnelement;
- een beslissingscriterium ten aanzien van het te bepalen optimale vertrekriterium.

Mijn dank gaat uit naar ir. R.J.H. Stive van het architecten- en ingenieursbureau bv De Weger die mij in de beginfase heeft geholpen met het omschrijven van het onderzoek. Ook wil ik ir. W. Meermans bedanken bij wie ik altijd langs kon gaan en die mij raad gaf over het oplossen van kleine simpele maar ook grote ingewikkelde problemen. Tenslotte wil ik Professor Vrijling bedanken voor de vruchtbare besprekingen die ik met hem had waardoor mijn onderzoek op de rails bleef.

D.S.J. van Elsdingen
8 januari 1997

SAMENVATTING

Het wordt steeds moeilijker voor een tunnelproject een locatie te vinden voor het bouwdok voor de tunnelementen. Het is daarom aantrekkelijk een bestaand bouwdok te gebruiken en de tunnelementen over langere afstand te vervoeren, desnoods over zee. Om het transport van een tunnelement over zee te bewerkstelligen zijn een aantal facetten belangrijk te onderzoeken.

Als eerste is gekeken naar wat voor golfhoogten in de zomerperiode, te weten mei, juni, juli en augustus, voorkomen op de Noordzee voor de Nederlandse kust. Dit is gedaan door golfhoogte- en golfperioden-waarnemingen van 13 jaar, verkregen bij het RIKZ, van het meetstation IJmuiden, te ordenen. De waargenomen significante golfhoogten zijn gescheiden in significante golfhoogten van zeegang en van deining. Door lineaire regressie toe te passen op de gescheiden waarnemingen, namelijk met behulp van de Kleinste Kwadraten Methode, zijn de "best fits" verkregen van de kansverdelingen voor zowel de significante golfhoogten van zeegang en van deining als voor de piekperioden en golfsteilheden van zeegang. De kansverdelingen bleken voor de significante golfhoogte van zeegang Gumbel verdeeld te zijn, voor de significante golfhoogte van deining Fréchet verdeeld, voor de piekperiode van zeegang Gaussisch en voor de golfsteilheid ook Gaussisch verdeeld.

Daarna is onderzocht hoe en op welke manier het tunnelement bezwijkt onder golfbelastingen. Het ontwerp-tunnelement bezwijkt doordat wringende momenten en verticale dwarskrachten te groot worden. Het element bezwijkt dan doordat de belastingen de sterkte van een dilatatievoeg overschrijden.

Het sleeptransport kan dus plaats vinden als gedurende het zeetransport niet te grote belastingen optreden. Dit is in een programma gesimuleerd door voor alle variabelen, dit zijn de significante golfhoogten van zeegang en van deining alsmede de piekperiode van zeegang, waarden te trekken uit de lange termijn verdelingen. Als deze kunstmatige golfvoorspelling, een transportduur vooruit, voldoet aan een gekozen vertrek- of vaarcriterium worden de optredende belastingen in het tunnelement berekend. Op deze manier kan met het simulatieprogramma een gehele zomerperiode worden doorlopen. Gedurende de simulatie worden ook de wachttijden bijgehouden. Per vertrek criterium worden daarna de belastingsverdelingen bepaald. Gegeven de ontwerpsterkte zijn via deze belastingsverdelingen de faalkansen per criterium te berekenen.

Vervolgens wordt met behulp van een beslissingscriterium het optimale vertrek criterium bepaald waarbij het tunnelement getransporteerd kan worden zodat de acceptabele faalkans gedurende het sleeptransport niet wordt overschreden. Dit optimale vertrek criterium wordt verkregen door de verwachte schadekosten, die ontstaan door te transporteren, en de verwachte wachtkosten tegen elkaar af te wegen.

INHOUDSOPGAVE

1. Inleiding en probleemomschrijving.....	1
1.1 Inleiding.....	1
1.1.1 De afzinkmethode	1
1.1.2 Het bouwdok	1
1.1.3 Het zeetransport.....	1
1.2 Probleemomschrijving.....	1
1.2.1 Probleemanalyse.....	1
1.2.2 Probleemstelling.....	2
1.2.3 Doelstelling.....	2
1.2.4 Randvoorwaarden.....	2
1.2.5 Uitgangspunten	2
2. Het golfklimaat	4
2.1 Inleiding.....	4
2.1.1 Waarom moet het golfklimaat bepaald worden?	4
2.1.2 Hoe moet een golfklimaat bepaald worden?	4
2.1.3 Het bepalen van het golfklimaat op de Noordzee.	4
2.2 Deining.....	5
2.2.1 Deining op de Noordzee.....	5
2.2.2 Definitie deining.....	7
2.3 Zeegang.....	8
2.3.1 Definitie zeegang	8
2.3.2 Zeegang op de Noordzee	8
2.4 Relaties tussen de verschillende variabelen	9
2.4.1 Significante golfhoogten van deining en van zeegang.....	9
2.4.2 Significante golfhoogte van zeegang en piekperiode.....	10
2.4.3 Significante golfhoogte van zeegang en golfsteilheid	11
2.4.4 Golfsteilheid en piekperiode.....	12
2.4.5 Uitgangspunten voor de beschrijving van het golfklimaat	13
2.5 Vastleggen van het golfklimaat m.b.v. kansverdelingen	13
2.5.1 Resultaten van de kansverdelingen voor deining.....	14
2.5.2 Resultaten van de kansverdelingen voor zeegang.....	15
2.5.3 Resultaten van de kansverdelingen voor de piekperiode.....	16
2.5.4 Resultaten van de kansverdelingen voor de golfsteilheid	16
2.5.5 Controle van de kansverdelingen.....	17

3. Bezijken van het tunnelement	18
3.1 Inleiding.....	18
3.2 Bezijkmechanismen.....	18
3.3 Belastingmodel	20
3.4 Sterktemodel.....	20
3.5 Overdrachtsfuncties	21
3.5.1 Overdrachtsfuncties in het algemeen.....	21
3.5.2 Overdrachtsfuncties voor de tunnelementen van de Piet Hein tunnel....	22
3.6 Krachten in het tunnelement	22
3.7 De betrouwbaarheidsfunctie	23
4. De transportduur	25
4.1 Inleiding.....	25
4.2 De route van het transport op de Noordzee.....	25
4.3 Points of no return.....	25
4.4 De transportduur	25
4.5 De transportcyclus	26
4.6 De sleepbootconfiguratie	26
5. Golfvoorspelling	27
5.1 Inleiding.....	27
5.2 De modelleren van de golfvoorspelling	27
5.2.1 De basis van de golfvoorspelling.....	27
5.2.2 De fout in de golfvoorspelling.....	27
5.2.3 Het model van de golfvoorspelling.....	28
6. Het simulatieprogramma	30
6.1 Inleiding.....	30
6.2 De implementatie	30
6.2.1 De golfvoorspelling.....	30
6.2.2 De beslissing.....	30
6.2.3 De belastingen tijdens transport.....	31
6.2.4 De wachttijden.....	31
6.2.5 De simulatietijd	31
6.3 De resultaten van de simulatie	31
6.3.1 De belastingsverdelingen als functie van de vertrekcriteria.....	31
6.3.2 De faalkansen voor verschillende vertrekcriteria	32
6.3.3 De belastingsverdelingen als functie van een variërende transportduur ..	32
6.3.4 De faalkansen voor een variërende transportduur	33
6.3.5 De gemiddelde wachttijd per transport.....	33
6.3.6 Het aantal mogelijke transporten.....	34
6.3.7 De kans op transport als functie van de vertrekcriteria.....	34

6.3.8 Toepassing wel of geen golfvoorspelling	35
6.4 Benodigde sterkte bij acceptabele faalkans.....	35
7. Het beslissingscriterium	37
7.1 Inleiding.....	37
7.2 Foutenboom voor het falen van het zeetransport	37
7.2.1 Bomen in het algemeen	37
7.2.2 Risico-analyse	37
7.2.3 De foutenboom.....	38
7.3 Beslissingsboom voor het vertrek van het zeetransport.....	39
7.3.1 Beslissingstheorie in het algemeen.....	39
7.3.2 Een beslissing op grond van verwachtingswaarden.....	39
7.3.3 Verwachtingswaarde van kosten aan schade t.g.v. transport	41
7.3.4 Verwachtingswaarde van kosten t.g.v. wachten.....	42
7.3.5 Analytische uitwerking van optimaal vertrekcriterium	42
8. Conclusies en aanbevelingen.....	44
8.1 Conclusies	44
8.1.1 Conclusies m.b.t. het golfklimaat.....	44
8.1.2 Conclusies m.b.t. de resultaten van het simulatieprogramma	44
8.1.3 Conclusies m.b.t. het beslissingscriterium.....	45
8.1.4 Eindconclusies.....	45
8.2 Aanbevelingen	45
8.2.1 Aanbevelingen m.b.t. het golfklimaat	45
8.2.2 Aanbevelingen m.b.t. de simulatie	46
8.2.3 Aanbevelingen m.b.t. het beslissingscriterium.....	46

Literatuurlijst
Bijlagen

LIJST VAN FIGUREN

- Figuur 2.1 Enkele voorbeelden van spectrumvormen met deining.
- Figuur 2.2 Cumulatieve frequentieverdeling van de significante golfhoogte van deining op de Noordzee t.p.v. meetstation IJmuiden in de maand augustus voor de periode 1979-1991.
- Figuur 2.3 Scatterplot van de significante golfhoogten van zeegang en H_{m0} t.p.v. meetstation IJmuiden voor de zomerperioden 1979-1991 in cm.
- Figuur 2.4 Scatterplot van de significante golfhoogten van deining en van zeegang t.p.v. meetstation IJmuiden voor de zomerperioden 1979-1991 in cm.
- Figuur 2.5 Scatterplot van de waargenomen significante golfhoogten van zeegang en de berekende piekperioden t.p.v. meetstation IJmuiden voor de zomerperioden van 1979-1991 met daarin verschillende golfsteilheden.
- Figuur 2.6 Scatterplot van de waargenomen significante golfhoogten van zeegang en de berekende golfsteilheden t.p.v. meetstation IJmuiden voor de zomerperioden van 1979-1991 met daarin piekperioden.
- Figuur 2.7 Scatterplot van golfsteilheden en piekperioden van de waargenomen significante golfhoogten van zeegang t.p.v. meetstation IJmuiden voor de zomerperioden van 1979-1991 met daarin verschillende significante golfhoogten.
- Figuur 3.1 Overzicht krachtswerking en dilatatievoegen in het tunnelelement.
- Figuur 3.2 Verticale dwarskracht op tandconstructies in dak en vloer t.p.v. dilatatievoeg.
- Figuur 3.3 Spectrale beschouwing van krachtsoverdracht.
- Figuur 3.4 De grenstoestand van een bezwijkmechanisme.
- Figuur 5.1 Overzicht van het model van golfvoorspelling voor een transportduur van ca. 22 uur vooruit, d.w.z. vier zeetoestanden.
- Figuur 7.1 De foutenboom voor het falen van het tunneltransport.
- Figuur 7.2 De beslissingsboom voor het zeetransport-probleem.
- Figuur 7.3 Verschillende kansdichtheden van de belasting als functie van vertrekcriteria en de kostenfunctie uitgezet tegen de belasting.
-

LIJST VAN TABELLEN

- Tabel 2.1 Overzicht meetstations.
- Tabel 2.2 Gemiddelde parameters, gemiddelde waarden en standaard deviaties van de Fréchet verdeling van de significante golfhoogten van deining over de zomerperioden 1979-1991, in cm.
- Tabel 2.3 Gemiddelde parameters, gemiddelde waarden en standaard deviaties van de Gumbel verdeling van de significante golfhoogten van zeegang over de zomerperioden 1979-1991, in cm.
- Tabel 2.4 Gemiddelde waarden en standaard deviaties van de Gaussische verdeling van de piekperiode van zeegang over de zomerperioden 1979-1991, in seconden.
- Tabel 2.5 Gemiddelde waarden en standaard deviaties van de Gaussische verdeling van de golfsteilheid van zeegang over de zomerperioden 1979-1991, in procenten.
- Tabel 2.6 Controle van de verdelingen van de significante golfhoogte van zeegang m.b.v. nivo II Mean Value Approach.
- Tabel 5.1 De gemiddelde waarde en de standaard deviatie van de normaal verdeelde fout in de golfvoorspelling, in cm.
- Tabel 6.1 De gemiddelde parameters van de Gumbel belastingsverdelingen als functie van de vertrekcriteria voor de verwachtingswaarde van de transportduur van 34 uur.
- Tabel 6.2 Faalkansen voor de verschillende vertrekcriteria voor de verwachtingswaarde van de transportduur van 34 uur.
- Tabel 6.3 De gemiddelde parameters van de Gumbel belastingsverdelingen als functie van de vertrekcriteria voor verschillende duren van transport met als vertrek criterium voor deining $H_s \leq 100$ cm.
- Tabel 6.4 Faalkansen als functie van de vertrekcriteria voor drie verschillende transportduren met als vertrek criterium voor deining $H_s \leq 100$ cm.
- Tabel 6.5 De gemiddelde aaneengesloten wachttijden per transport in uren per vertrek criterium voor de verwachtingswaarde van de transportduur van 34 uur.
- Tabel 6.6 Het aantal mogelijke transporten als functie van verschillende vertrekcriteria voor de verwachtingswaarde van de transportduur van 34 uur.
- Tabel 6.7 De parameters van de Gumbel verdeling van de belastingen met en zonder golfvoorspelling.
- Tabel 6.8 De benodigde sterkte van het tunnelement per vertrek criterium in kN/m' bij een acceptabele faalkans van $1,25 \cdot 10^{-5}$, als gebruik gemaakt wordt van een golfvoorspelling.
- Tabel 7.1 De verwachte totale schadekosten door transporteren in guldens per vertrek criterium.
- Tabel 7.2 De verwachte kosten door wachten in guldens per vertrek criterium.
-

1. Inleiding en probleemomschrijving

1.1 Inleiding

1.1.1 De afzinkmethode

Bij het aanleggen van wegverbindingen onder waterwegen wordt in Nederland veel gebruik gemaakt van afgezonken tunnelementen, die als ze aan elkaar gekoppeld zijn een zogenoemde zinktunnel vormen. Deze benaming heeft betrekking op de manier van bouwen. Bij de oevers van de waterweg worden de toeritten van de tunnel in bouwputten geconstrueerd. De tunnel zelf is opgebouwd uit geprefabriceerde elementen die tussen deze toeritten in een uitgebaggerde sleuf in de bodem van de waterloop worden geplaatst. Daartoe worden die elementen drijvend tot boven hun uiteindelijke positie gesleept en vervolgens afgezonken, waarna ze onderstroomd en afgedekt worden met zand. Deze methode wordt de afzinkmethode genoemd.

1.1.2 Het bouwdok

De tunnelementen worden bij voorkeur gebouwd in een dok dat dicht bij de afzinklocatie ligt. In elk geval moeten de vaarwegen en de sluizen tussen het bouwdok en de afzinkplaats diep en breed genoeg zijn voor het transport. Soms is het nodig om een speciaal bouwdok te graven in de nabijheid van de tunnellocatie. Dit wordt echter een kostbare zaak indien de grondwaterstanden niet beïnvloed mogen worden. In dat geval zijn zeer kostbare voorzieningen vereist, zoals waterremmende schermen en bodemafsluitingen. Er kan dan uitgeweken worden naar een bestaand bouwdok dat groot genoeg is om alle elementen in één keer te bouwen en de elementen over een grotere afstand te vervoeren. Dit was het geval bij de Piet Heintunnel, waarvan de tunnelementen gebouwd zijn in het bouwdok in de Linkeroever Haven bij Antwerpen en uiteindelijk afgezonken werden in een voormalig havenbekken in het oostelijke deel van de IJ-boulevard te Amsterdam. De tunnelementen zijn versleept via de Schelde, de Westerschelde, de Noordzee, het Noordzeekanaal en het IJ naar de afzinklocatie. In het verdere onderzoek zal dit tunnelproject als uitgangspunt dienen.

1.1.3 Het zeetransport

Dit betekent echter dat er een nieuwe dimensie aan het O.T.A.O.-proces (Opdrijven, Transporteren, Afzinken en Onderstromen) wordt toegevoegd. Waar voorheen over de binnenwateren werd getransporteerd wordt nu (een stuk) over zee getransporteerd. Daarop zijn de elementen niet primair ontworpen, zodat hun zeewaardigheid beperkt is. Transport kan dus alleen doorgang vinden bij golfcondities die niet leiden tot belastingen op een element die het maximum toelaatbare overschrijden.

1.2 Probleemomschrijving

1.2.1 Probleemanalyse

Er moet dus eerst onderzoek verricht worden naar de grenzen aan de golfcondities die tijdens transport op zee kunnen worden geaccepteerd, m.a.w. op welke wijze zal het element bezwijken of schade oplopen? Voorafgaand aan het transport van een element

over zee zal moeten worden beoordeeld of de te verwachten golfcondities gedurende het zeetransport acceptabel zijn of niet. Die beoordeling is van groot belang omdat er nauwelijks mogelijkheden zijn om het transport te onderbreken als onderweg blijkt dat de golfcondities de grenzen van het toelaatbare overschrijden. Als de golfvoorspelling aan het vertrek criterium voldoet wordt er besloten om het element te transporteren, anders moet er gewacht worden. Uiteindelijk moeten de transportperioden bepaald worden waarin er één of meer transporten plaats kunnen vinden. Samengevat bestaat het probleem uit de volgende punten:

- Hoe zijn de golfcondities op de Noordzee voor de Nederlandse kust? M.a.w. hoe ziet het golfklimaat eruit?
- Wat zijn de bezwijkmechanismen van het element onder golfbelasting? M.a.w. op wat voor manieren kan het tunnelelement bezwijken?
- Hoe wordt een golfvoorspelling, een transportduur vooruit, gemaakt op het punt van wel of niet vertrekken vanuit Vlissingen?
- Hoe ziet het beslissingscriterium eruit om wel of niet te vertrekken met het sleeptransport van een tunnelelement?
- Hoeveel sleeptransporten met een tunnelelement zijn er mogelijk tijdens de zomerperiode waarin getransporteerd mag worden?

1.2.2 Probleemstelling

Het probleem dat in dit afstudeerwerk onderzocht zal worden, wordt als volgt geformuleerd:

Onder wat voor zeecondities kan een tunnelelement getransporteerd worden in de zomerperiode over de Noordzee van Vlissingen naar IJmuiden, waarbij de aangenomen acceptabele faalkans niet wordt overschreden.

1.2.3 Doelstelling

Het doel dat in dit onderzoek nagestreefd zal worden is:

Het bepalen van het aantal transportperioden in de zomerperiode waarin de golfcondities zódanig zijn, dat de overschrijdingskans van de golfbelasting op een tunnelelement, gedurende het zeetransport van Vlissingen naar IJmuiden, kleiner is dan de aangenomen acceptabele faalkans.

1.2.4 Randvoorwaarden

Voor het onderzoek gelden de volgende randvoorwaarden:

- De verzekeraar van het transport stelt grenzen aan de periode van mogelijk transport, te weten de maanden mei, juni, juli en augustus. Deze periode zal in het vervolg van dit onderzoek de zomerperiode genoemd worden.
- Het golfklimaat voor de Nederlandse kust is het golfklimaat dat langs de transportroute heerst.
- De transportroute is van Vlissingen naar IJmuiden.

1.2.5 Uitgangspunten

De uitgangspunten voor het onderzoek zijn de volgende:

- er moeten acht elementen getransporteerd worden;
- alle acht elementen zijn hetzelfde: recht en 160 meter lang, 32 meter breed en 8 meter hoog;

- de diepgang tijdens transport bedraagt ongeveer 99 % van de uitwendige hoogte, dat wil zeggen een vrijboord van ongeveer 8 cm;
- de gemiddelde sleepduur van een element, onder normale omstandigheden, van Vlissingen naar IJmuiden is 34 uur, dat wil zeggen een gemiddelde vaarsnelheid van circa 4 knopen;
- de gemiddelde cyclusduur (slepen, loskoppelen, terugvaren en aankoppelen) is 72 uur;
- de maximaal te accepteren kans op falen van het zeetransport van één tunnelement van Vlissingen naar IJmuiden is $1,25 \cdot 10^{-5}$.

2. Het golfklimaat

2.1 Inleiding

2.1.1 Waarom moet het golfklimaat bepaald worden?

Het bepalen van het golfklimaat is nodig om ten eerste te weten wat voor golfhoogten, golfperiodes en golfrichtingen zoal voorkomen, zowel van deining als van zeegang. Dit gebeurt op een tijdschaal van jaren. Er wordt gekeken naar de verzameling golfsystemen die zich daarin voordoen.

Ten tweede is het noodzakelijk deze lange termijn golfhoogte-waarnemingen te kennen in verband met het uitvoeren van werken op zee, waarvoor in de ontwerpfase statistische informatie nodig is omtrent de te verwachten tijdsduren van werkbare omstandigheden.

Beide punten zullen ter sprake komen in dit onderzoek.

2.1.2 Hoe moet een golfklimaat bepaald worden?

Een golfklimaat kan bepaald worden door golfgegevens, waargenomen op een tijdschaal van jaren, te ordenen. Deze golfgegevens komen via visuele waarnemingen, instrumentele waarnemingen of via afleidingen uit waarnemingen van de wind tot stand. Visuele waarnemingen komen vooral van mensen op schepen. Golfhoogte, golfperiode en golfrichting worden geschat en onderscheiden naar zeegang en deining, waarop later wordt teruggekomen. Instrumentele waarnemingen komen van meetboeien of platforms. Waarnemingen afgeleid van wind komen voort uit het combineren van windgegevens en golfverwachtingsmethoden. Door de golfgegevens te ordenen op grootte kunnen er kansverdelingen van gemaakt worden waarin een kans van voorkomen af te lezen is van bijvoorbeeld een golfhoogte of een golfperiode, van zowel zeegang als deining.

2.1.3 Het bepalen van het golfklimaat op de Noordzee.

Om het golfklimaat op de Noordzee voor de Nederlandse kust te bepalen zijn langjarige golfgegevens onderzocht van drie-uurlijkse waarnemingen van 1 januari 1979 00:00 uur tot en met 31 december 1991 21:00 uur. De gegevens zijn afkomstig van het RIKZ en gaan over meetstation Lichteiland Goeree (LEG), Platvorm Euro-O (EUR), Meetpost Noordwijk (MPN) en IJmuiden (YM6). Deze stations liggen alle op het transporttraject. Deze golfgegevens bevatten onder meer:

- H_{m0} : de significante golfhoogte gebaseerd op het gehele variantiedichtheidsspectrum;

In het algemeen geldt: $m_n = \int_0^{\infty} f^n \cdot E_{\eta\eta}(f) df$ voor $n = 0, 1, 2, \dots$ hetgeen staat voor het n^e

orde moment van het variantiedichtheidsspectrum $E_{\eta\eta}$. m_0 is nu het oppervlak van dat

spectrum binnen het frequentie-gebied van 0,03 tot 0,5 Hz: $m_0 = \int_{0,03}^{0,5} E_{\eta\eta}(f) df$.

De significante golfhoogte is nu: $H_s = H_{m0} = 4 \cdot \sqrt{m_0}$;

- $H_{1/3}$: het gemiddelde van het hoogste 1/3 gedeelte van de golfhoogten; deze is gelijk aan de significante golfhoogte H_s mits $H_{1/3}$ Rayleigh verdeeld is;
- H_{E10} : de laagfrequente golfhoogte gebaseerd op het variantiedichtheidsspectrum. Het laagfrequente deel wordt op dezelfde wijze berekend als H_{m0} maar dan met m_0 als

oppervlak van het spectrum dat ligt tussen de frequenties 0,03 en 0,1 Hz:

$$m_0 = \int_{0,03}^{0,1} E_{\eta\eta}(f) df . \text{ Dus de laagfrequente golfhoogte is: } H_{E10} = \sqrt{m_0} ;$$

- T_{m02} : de gemiddelde nuldoorgangs-golfperiode d.w.z. dat de verwachtingswaarde van opeenvolgende opgaande of neergaande nuldoorgangen $E\{\square\}$ gelijk is aan T_{m02} , ofwel

$$E\{\square\} = T_{m02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} ; T_{m02} \text{ wordt ook wel geschreven als } T_z \text{ (de index z staat voor zero),}$$

$$\text{met: } m_0 = \int_{0,03}^{0,5} E_{\eta\eta}(f) df \text{ en } m_2 = \int_{0,03}^{0,5} f^2 \cdot E_{\eta\eta}(f) df .$$

In tabel 2.1 staat een overzicht van de betreffende meetstations waar het station ligt, met wat voor meetinstrument gemeten wordt, op welke diepte het instrument ligt en hoe het meetstation in het verdere vervolg van het onderzoek afgekort wordt, zie [1].

stationsnaam	afkorting	coördinaten NB en OL		diepte	sensor
		° ' "	° ' "		
IJmuiden	YM6	52 33 00	04 04 00	21 m	waverider/wavec
Meetpost Noordwijk	MPN	52 16 26	04 17 26	18 m	stappenbaak/wavec
Platform Euro-0	EUR	51 59 55	03 16 35	32 m	stappenbaak/wavec
Lichteiland Goeree	LEG	51 55 05	03 40 02	21 m	stappenbaak

tabel 2.1

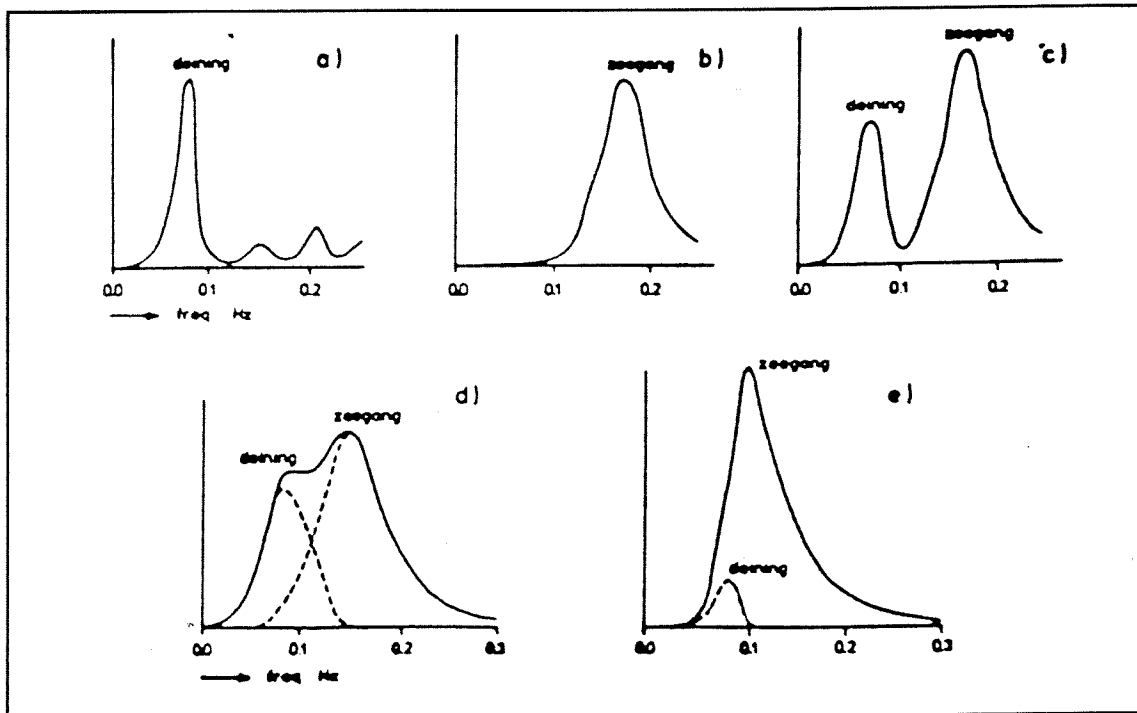
Overzicht meetstations

Het blijkt dat op meetstation IJmuiden, het meest noordelijke station van de vier, de grootste golfhoogten worden waargenomen, zie ook [1]. De waarnemingen van dit station zijn dan ook een bovengrens van voorkomende golfhoogten op het transporttraject en derhalve als maatgevend voor het hele transporttraject voor dit onderzoek aangenomen.

2.2 Deining

2.2.1 Deining op de Noordzee

Op de Noordzee komt deining voornamelijk uit de NW- tot N- richting. Deining en zeegang kunnen in allerlei combinaties in het spectrum voorkomen en zijn soms wel, en soms niet van elkaar te onderscheiden. In figuur 2.1 zijn enkele voorbeelden geschetst.



figuur 2.1 Enkele voorbeelden van spectrumvormen met deining.

- Figuur 2.1^a toont een spectrum met vrijwel uitsluitend deining, dit komt echter zelden voor.
- Figuur 2.1^b toont een spectrum met vrijwel uitsluitend zeegang. Dit komt vaker voor. Er is lang niet altijd meetbare deining.
- Figuur 2.1^c laat een spectrum zien waarin deining en zeegang van dezelfde orde van grootte zijn, in dit geval duidelijk gescheiden.
- Figuur 2.1^d toont opnieuw een spectrum waarin deining en zeegang van dezelfde orde van grootte zijn maar nu in elkaar overlopend.
- In figuur 2.1^e is een spectrum te zien met zeer hoge zeegang en dus een lage piekfrequentie $f_p \approx 0,10$ Hz. Een flink deel van de zeegangsenergie valt dus in het laagfrequente gebied. Het laagfrequente deel zou eventueel ook voor een (klein) deel uit deining kunnen bestaan.

Het is dus vrij moeilijk te zeggen, kijkend naar een spectrum, welk stukje oppervlak onder de spectrumkromme precies tot de variantie, d.i. een maat voor de energie, van deining behoort en welke tot zeegang. Vandaar de scheiding middels de grensfrequentie van 0,1 Hz, hetgeen vermeld werd in paragraaf 0. Als uitgangspunt voor dit onderzoek zal de laagfrequente golfhoogte H_{E10} als significante golfhoogte van de deining gebruikt worden. Voor de piekperiode van deining is gekozen voor een deterministische periode van 11 seconden.

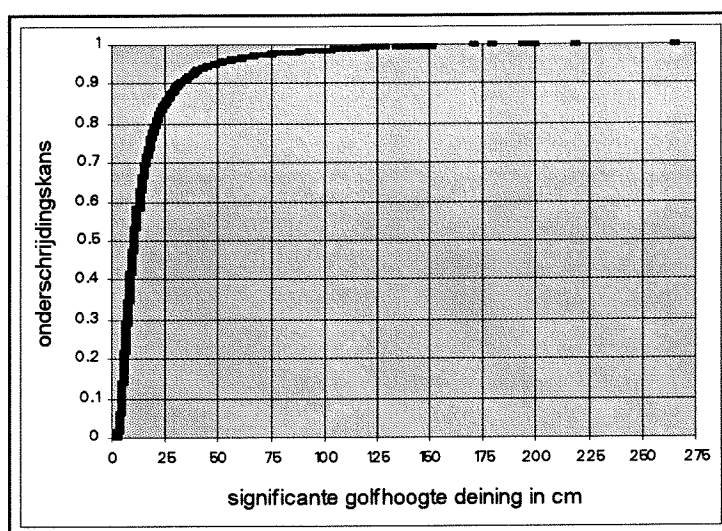
Afhankelijk van de hoogte van H_{E10} is het volgende op te merken, zie [1]:

- zeer lage H_{E10} , tot ca. 0,1 meter. Dit betekent meestal dat er geen (meetbare) deining is. De energie is dan afkomstig van ruis, spectrale lek of onvoldoende getijfiltering.
- Lage H_{E10} , ca. 0,1 tot 0,5 meter. Dit is vaak echte deining, maar kan ook geheel of gedeeltelijk bestaan uit zeegangsenergie, afkomstig uit de linkerflank van een zeegangsspectrum met een piekperiode van zes à negen seconden.
- Middelhoge H_{E10} , ca. 0,5 tot 2 meter. Zo'n H_{E10} bestaat bijna altijd voor tenminste een deel uit zeegangsenergie. Echte deining met een hoogte van meer dan ca. 1,5 meter is zeer zeldzaam;

- hoge H_{E10} , meer dan 2 meter. Deze bestaat geheel of grotendeels uit zeegangsenergie. In een spectrum met veel laagfrequente zeegangsenergie kan ook deining onzichtbaar aanwezig zijn, zie figuur 2.1°. Dus hoewel het spectrum er uitziet als een volledig zeegangsspectrum kan er eventueel een aanzienlijke echte deining in verborgen zijn. Deze deining kan alleen worden onderkend als er een richtingsspectrum wordt gemeten en ook dan alleen nog maar als de zeegangsrichting aanzienlijk verschilt van de deiningrichting.

Met dit alles zal duidelijk zijn dat het klimaat voor laagfrequente golfhoogten slechts een grove benadering is voor het deiningklimaat. In figuur 2.2 zijn de waargenomen laagfrequente golfhoogten H_{E10} , vanaf nu deining of ook wel $H_{s;deining}$ genoemd, van de maand augustus van 1979 tot en met 1991 in een cumulatief scatterdiagram geplot met als

ordinaat:

$$y_i = \frac{i}{N+1}$$


figuur 2.2
Cumulatieve frequentieverdeling van de significante golfhoogte van deining op de Noordzee t.p.v. meetstation IJmuiden in de maand augustus voor de periode 1979-1991.

In deze figuur is te zien dat bijvoorbeeld deining van 50 cm of lager ongeveer 96 % van de tijd in augustus op de zuidelijke Noordzee t.p.v. IJmuiden voorkomt. Dit ziet er ongeveer hetzelfde uit voor de maanden mei, juni en juli, zie ook bijlage II.

2.2.2 Definitie deining

Deining is een golfveld dat niet langer onder invloed staat van het windveld waardoor het is opgewekt. Het golfveld heeft bijvoorbeeld het windveld verlaten doordat de fasesnelheid van de golven groter is dan de lokale windsnelheid, of het windveld bestaat niet meer, of de windsnelheid is afgenomen. Het golfveld zal dan vrij oud zijn. Laagfrequente golven ontlenen hun richting aan het samenspel tussen het "diep water-golfklimaat" en de geometrie van de bodem voor de kust, aan stromingen en aan al aanwezige oude golfenergie. Deze definitie zelf geeft weinig houvast om bij golfmetingen deining te onderscheiden van zeegang. Het is daarom logisch om deining en zeegang te onderscheiden op basis van een grensfrequentie in het spectrum. In de praktijk is gebleken dat deze grensfrequentie op ca. 0,1 Hz ligt, zie [1]. Daarom wordt ook voor dit verdere onderzoek de grensfrequentie tussen deining en zeegang eenduidig vastgelegd op 0,1 Hz.

Dit mede omdat het RIKZ de golfgegevens die gebruikt worden voor dit onderzoek ze op dezelfde manier gescheiden heeft.

2.3 Zeegang

2.3.1 Definitie zeegang

Op het scheidingsvlak van water en lucht die met verschillende snelheden ten opzichte van elkaar stromen, ontstaan golven. De hoogte en de lengte van zeegolven nemen in principe toe met de windsnelheid. De wind draagt energie over aan het wateroppervlak, waardoor de golven groeien en sneller gaan lopen totdat de loopsnelheid even groot is als de windsnelheid. Het niet verder groeien van golven kan veroorzaakt worden doordat de wind afneemt. Soms legt de waterdiepte een beperking op aan de loopsnelheid en/of de hoogte. Het golfbeeld onder invloed van wind wordt zeegang genoemd. De frequenties van windgolven liggen volgens de definitie van deining, zoals in paragraaf 2.2.2 beschreven is, boven de grensfrequentie van 0,1 Hz.

2.3.2 Zeegang op de Noordzee

Om een beeld te krijgen wat voor golfhoogten van zeegang er voorkomen op de Noordzee voor de Nederlandse kust, is het nodig een kansverdeling te bepalen van de significante golfhoogten van zeegang. Hoewel de significante golfhoogte van zeegang niet als variabele bij de waarnemingen gegeven is, is deze toch te bepalen via een energievergelijking:

$$E_{\text{totaal}} = E_{\text{zeegang}} + E_{\text{deining}} \quad (2.1)$$

De totale hoeveelheid energie bestaat uit deiningenergie en zeegangsenergie. Omdat in de golfenergie de golfhoogte in het kwadraat voorkomt, zie formule 2.1 volgt dan ook voor de significante golfhoogten:

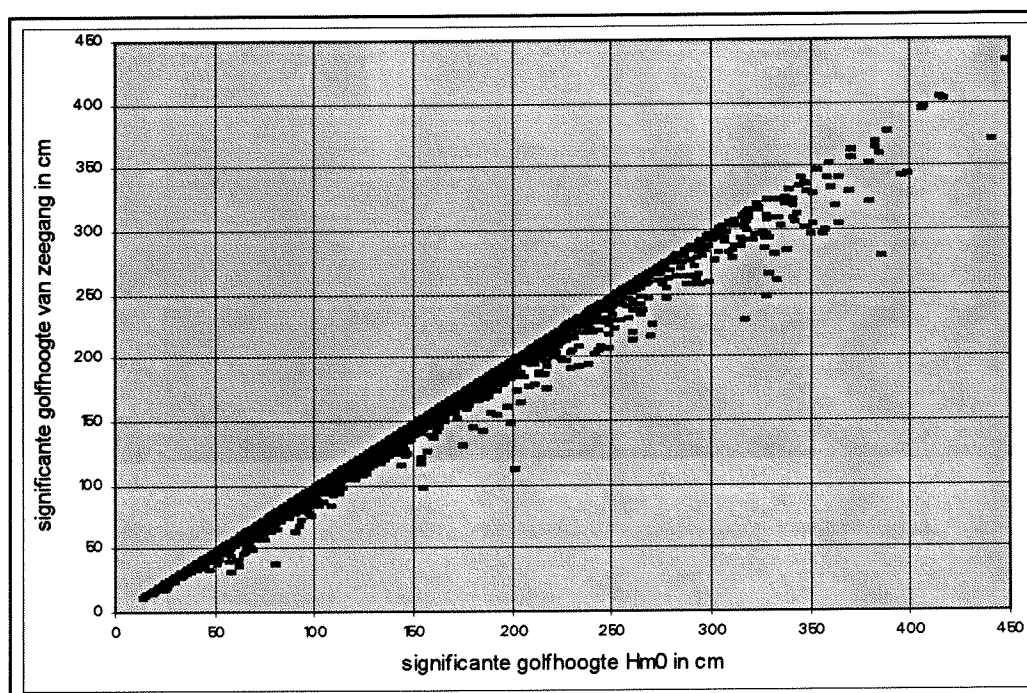
$$H_{m0}^2 = H_{s,\text{zeegang}}^2 + H_{s,\text{deining}}^2 \quad (2.2)$$

waarin:

$$H_{s,\text{deining}} = H_{E10}$$

Op deze manier kan de significante golfhoogte van zeegang uit de significante golfhoogten H_{m0} en de laagfrequente golfhoogten H_{E10} , c.q. de significante golfhoogten van deining, gefilterd worden. Zo is in figuur 2.3 te zien dat de significante golfhoogten van zeegang over het algemeen vrijwel gelijk zijn aan de significante golfhoogten H_{m0} . De deining is in de zomerperiode zodanig laag dat deze maar een klein aandeel heeft in de totale energie.

De conclusie die getrokken kan worden is dat golven die lokaal opgewekt worden, de zo genoemde zeegang, meer energie bezitten dan golven die ergens anders zijn opgewekt, dit geldt tenminste voor de zomermaanden mei, juni, juli en augustus. Dit wil nog niet zeggen dat ze meer invloed hebben dan deining op het te transporteren element. Hiervoor is namelijk ook de frequentie van belang.



figuur 2.3

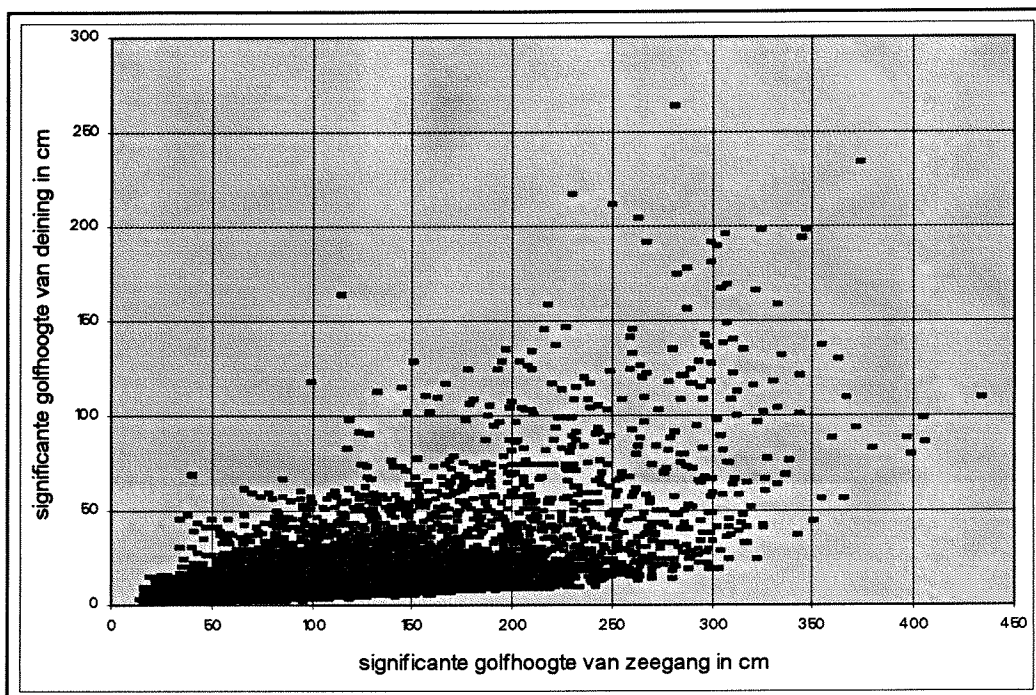
Scatterplot van de significante golfhoogten van zeevang en H_{m0} t.p.v. meetstation IJmuiden voor de zomerperioden 1979-1991 in cm.

2.4 Relaties tussen de verschillende variabelen

2.4.1 Significante golfhoogten van deining en van zeevang

Om te controleren of de significante golfhoogten van deining en van zeevang onafhankelijk van elkaar zijn, worden de historische waarnemingen tegen elkaar uitgezet en moet er nagegaan worden of deze waarnemingen fysisch verklaarbaar zijn. In figuur 2.4 staan de waarnemingen van significante golfhoogten van deining en van zeevang tegen elkaar uitgezet voor de zomerperioden van 1979 tot en met 1991. Te zien is dat er geen correlatie is tussen de significante golfhoogten van deining en zeevang. Dit is namelijk te zien aan een vrij losse wolk van waarnemingen in dat gebied. Maar ook hier is geen duidelijk verband tussen beide significante golfhoogten.

De conclusie die uit figuur 2.4 getrokken kan worden is dat de aanname van onafhankelijkheid tussen de significante golfhoogte van deining en de significante golfhoogte van zeevang voor dit onderzoek gerechtvaardigd is. Het is ook echter zo dat beide soorten golven op een totaal andere locatie zijn opgewekt.



figuur 2.4

Scatterplot van de significante golfhoogten van deining en van zeegang t.p.v. meetstation IJmuiden voor de zomerperioden 1979-1991 in cm.

2.4.2 Significante golfhoogte van zeegang en piekperiode

Het verband tussen de significante golfhoogte van zeegang en de piekperiode, dit is de periode waarbij het variantiedichtheidsspectrum maximaal is, zie figuur 2.1, ligt vast middels de golfsteilheid via:

$$s_p = \frac{H_s}{g \cdot T_p^2} = \frac{2 \cdot \pi}{g} \cdot \frac{H_s}{T_p^2} \quad \Rightarrow \quad H_s = C \cdot T_p^2 \quad \text{met } C = \frac{g \cdot s_p}{2 \cdot \pi} \quad (2.3)$$

waarin:

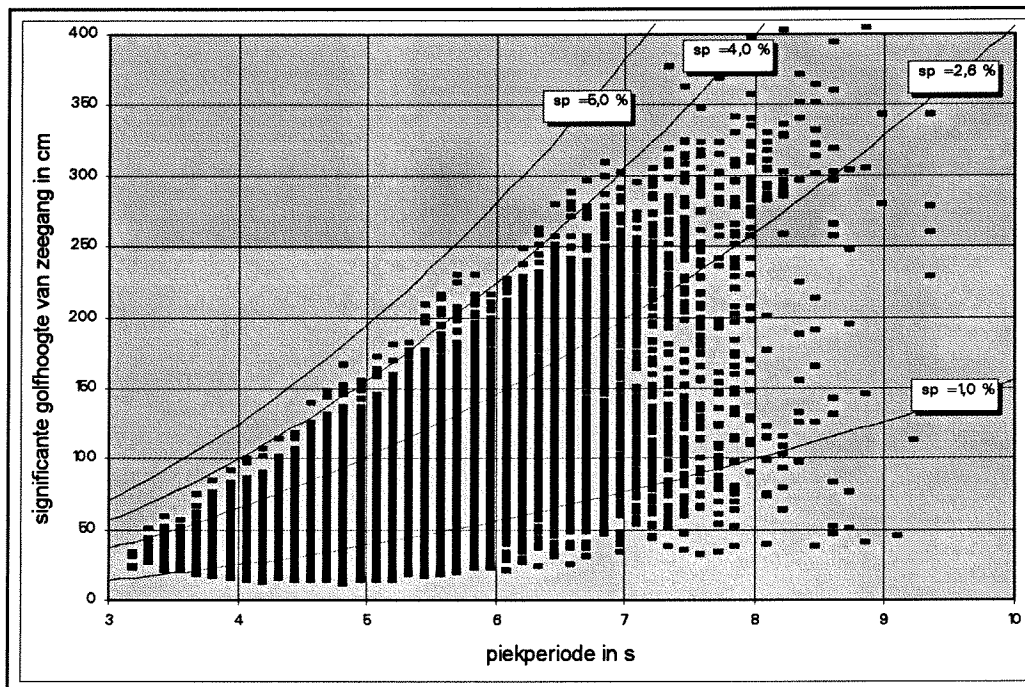
- s_p = golfsteilheid van windgolven [%]
- H_s = significante golfhoogte van zeegang[m]
- T_p = piekperiode van windgolven[s]
- g = zwaartekrachtversnelling [m/s^2]

De significante golfhoogte van zeegang H_s en de piekperiode T_p zijn afhankelijk van elkaar. Ze zijn gecorreleerd wegens het feit dat hoge golven meestal lange perioden hebben en lage golven meestal korte perioden. Dit is ook te zien in figuur 2.5, waarin de waarnemingen, in de zomerperioden van 1979 tot en met 1991, van de significante golfhoogten van zeegang en de piekperioden tegen elkaar uitgezet zijn. Ook zijn in deze figuur golfsteilheden aangegeven. Omdat de gegevens van het RIKZ alleen de gemiddelde nuldoorgangperiode T_{m02} bevatten en niet de piekperiode T_p is er een uit de praktijk ervaren verhouding¹ tussen beide gebruikt om de omzetting te realiseren. De verhouding is als volgt:

¹ Artikel "General Wave Spectrum" van prof. drs. ir. J.K. Vrijling, september 1990

$$\frac{T_p}{T_{m02}} = 1,26 \quad \text{voor zeegang in ontwikkeling} \quad (2.4)$$

In bijlage I staat een scatterplot met waarnemingen van de significante golfhoogten H_{m0} en de gemiddelde nuldoorgangs-perioden T_{m02} van de zomerperioden van 1979-1991 ter plaatse van meetstation IJmuiden.



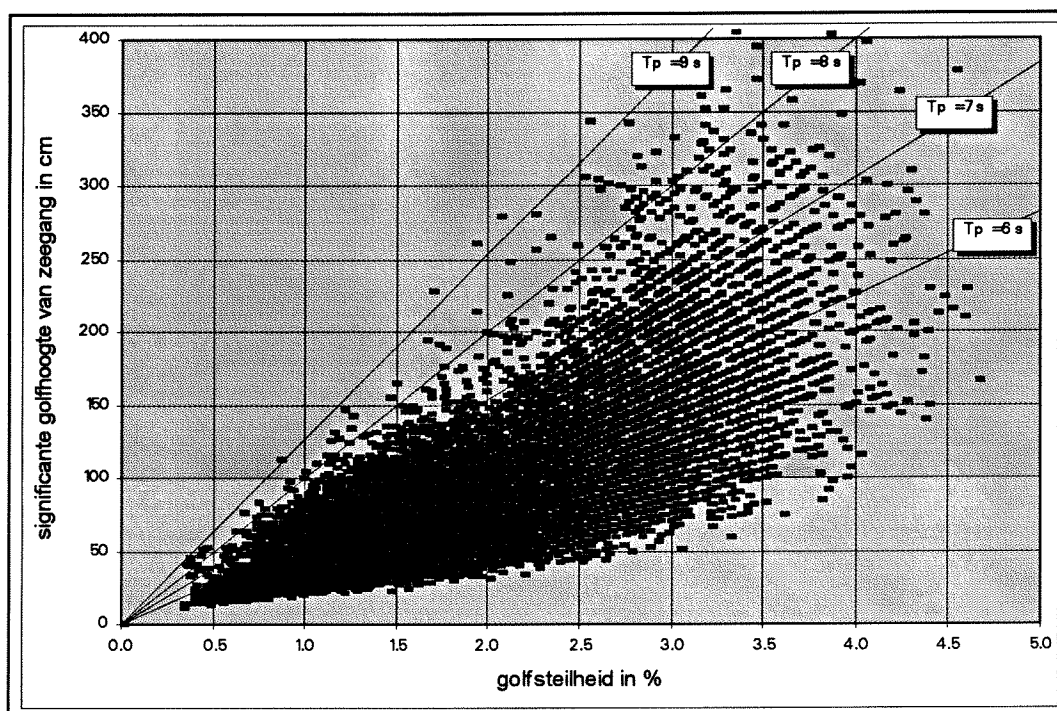
figuur 2.5

Scatterplot van de waargenomen significante golfhoogten van zeegang en de berekende piekperioden t.p.v. meetstation IJmuiden voor de zomerperioden van 1979-1991 met daarin verschillende golfsteilheden.

Een golfsteilheid van 1 % of minder typeert voornamelijk deining die van een ver verwijderde brongebied afkomstig is. Daarentegen komen in de natuur golven met een steilheid van 5 à 6 % niet of nauwelijks voor. Golven van deze steilheid zullen namelijk breken.

2.4.3 Significante golfhoogte van zeegang en golfsteilheid

In figuur 2.6 staan de significante golfhoogten van zeegang en de daarbij berekende golfsteilheden tegen elkaar uitgezet. Hier geldt dat de significante golfhoogte van zeegang en de golfsteilheid afhankelijk zijn van elkaar. De spreiding in de golfsteilheid neemt in eerste instantie toe naarmate de significante golfhoogte van zeegang toeneemt en neemt bij hogere significante golfhoogten, vanaf ca. 250 cm, weer af. Hoge significante golfhoogten van zeegang zijn steiler dan lage significante golfhoogten.



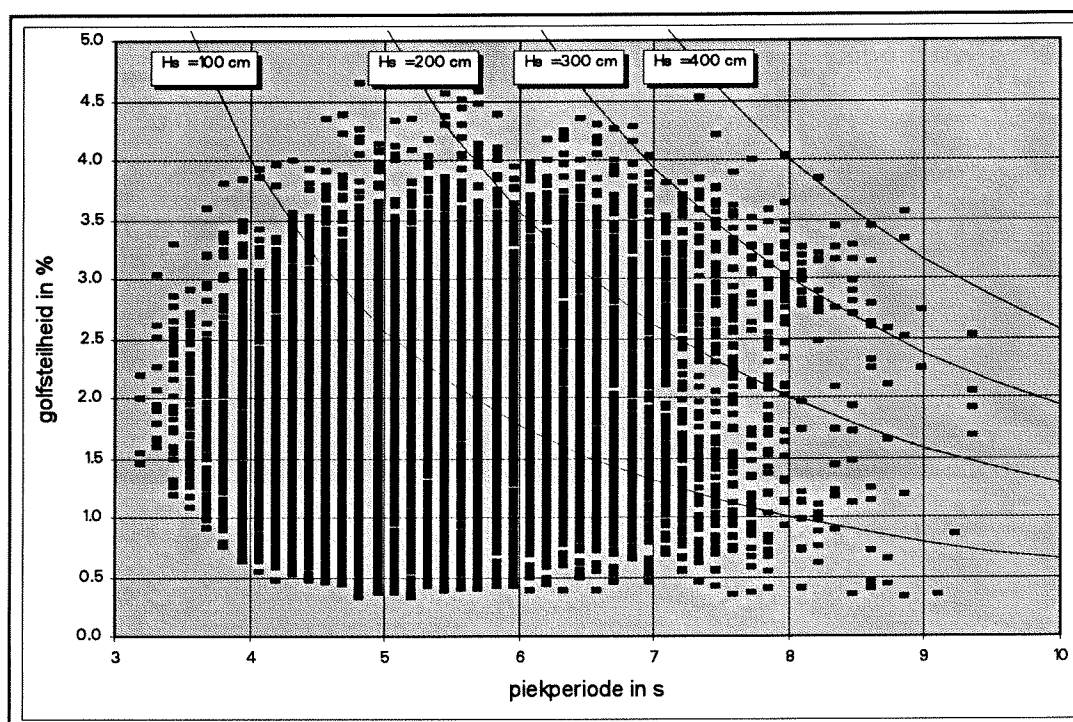
figuur 2.6

Scatterplot van de waargenomen significante golfhoogten van zeevang en de berekende golfsteilheden t.p.v. meetstation IJmuiden voor de zomerperioden van 1979-1991 met daarin piekperioden.

2.4.4 Golfsteilheid en piekperiode

In figuur 2.7 staan golfsteilheden en piekperioden van de waargenomen significante golfhoogten van zeevang tegen elkaar uitgezet. Hierin is vrij duidelijk een "ronde" puntenwolk te zien hetgeen impliceert dat deze twee variabelen, te weten de golfsteilheid en de piekperiode van de significante golfhoogte van zeevang, onafhankelijk van elkaar zijn, in welk te beschouwen gebied dan ook. Wel is het zichtbaar dat naarmate de significante golfhoogte van zeevang toeneemt de piekperiode alsmede de golfsteilheid toenemen.

Het is even waarschijnlijk dat een golf een steilheid heeft van bijvoorbeeld 2 % bij een piekperiode van 4 seconden als bij een piekperiode van 7 seconden.



figuur 2.7

Scatterplot van golfsteilheden en piekperioden van de waargenomen significante golfhoogten van zeeegang t.p.v. meetstation IJmuiden voor de zomerperioden van 1979-1991 met daarin verschillende significante golfhoogten.

2.4.5 Uitgangspunten voor de beschrijving van het golfklimaat

In § 2.2.2 is al beschreven dat de significante golfhoogte van deining $H_{s;deining}$ gelijk gekozen wordt aan de hoogte van laagfrequente golven H_{E10} . Ook is daar al besproken dat de piekperiode van de deining gelijk gesteld wordt aan 11 seconden.

Vervolgens bleek uit figuur 2.4 dat de significante golfhoogte van deining onafhankelijk is van de significante golfhoogte van zeeegang. De significante golfhoogte van zeeegang is daarentegen wel afhankelijk van de piekperiode en is ook afhankelijk van de golfsteilheid.

Uit figuur 2.7 is gebleken dat de golfsteilheid en de piekperiode van de significante golfhoogte van zeeegang onafhankelijk zijn.

Concluderend uit de voorgaande paragrafen zijn de volgende uitgangspunten aangenomen om het golfklimaat te beschrijven:

- de laagfrequente golfhoogte H_{E10} is gelijk aan de significante golfhoogte van de deining $H_{s;deining}$;
- de deining heeft een piekperiode van 11 seconden;
- de significante golfhoogte van deining is onafhankelijk van de significante golfhoogte van zeeegang.

2.5 Vastleggen van het golfklimaat m.b.v. kansverdelingen

Om overschrijdingskansen te bepalen van golfhoogten, hetzij van deining hetzij van zeeegang, golfperioden of golfsteilheden zijn kansverdelingen nodig. Hiervoor zijn voor elke maand mei, juni, juli en augustus van 1979 tot en met 1991 (d.w.z. 13 maanden voor mei en juni en 12 maanden voor juli en augustus omdat er van 1981 geen waarnemingen van die twee maanden zijn) de waarnemingen van zowel de significante golfhoogten van

zeegang $H_{s,zeegang}$, de (laagfrequente) significante golfhoogten van de deining als de berekende piekperiodes van zeegang als dataset in het programma "Linear Statistical Distribution Fit"² gestopt. Dit programma bepaalt een "best fit" verdeling door de waarnemingen, nadat ze indien nodig getransformeerd zijn, op basis van de Kleinste Kwadraten Methode. Deze fit wordt bepaald uit één van de volgende mogelijke verdelingen:

- uniforme verdeling,
- exponentiële verdeling,
- Weibull verdeling,
- lognormale verdeling.
- normaal verdeling,
- Gumbel verdeling,
- Fréchet verdeling,

De Kleinste Kwadraten Methode gaat er vanuit dat de som van de kwadraten van de afwijkingen van de verwachtingswaarden voor de parameters van de gekozen verdeling geminimaliseerd wordt, zie [2]:

$$X^2 = \min_{\theta \rightarrow \hat{\theta}} \sum_{i=1}^N \{y_i - (A + B \cdot x)\}^2 \tag{2.5}$$

Voor een minimum moet dan gelden:

$$\frac{\partial X^2}{\partial A} = 0 \quad \text{en} \quad \frac{\partial X^2}{\partial B} = 0 \tag{2.6}$$

De schatters van de parameters zijn op deze wijze "zo goed mogelijk" in die zin, dat ze normaal verdeeld verondersteld zijn, met de gevraagde parameters A en B als verwachtingswaarden en met de kleinst mogelijke varianties.

2.5.1 Resultaten van de kansverdelingen voor deining

Voor de kansverdelingen van deining werd op bovenstaande manier voor elke zomermaand, t.w. mei, juni, juli en augustus, een Fréchet verdeling gevonden die er als volgt uit ziet:

$$F_{H_s}(H) = e^{-\left(\frac{H-A}{B}\right)^C} \tag{2.7}$$

waarin:

- A = drempelwaarde parameter [m]
- B = schaalparameter [m]
- C = vormparameter [-]

De parameters van de kansverdelingen zijn gemiddelden over 12 of 13 maanden. In tabel 2.2 staan ze vermeld samen met de gemiddelde waarde μ en de standaard deviatie σ .

	mei	juni	juli	augustus
A	-2.88	-3.22	-3.79	-3.26
B	10.00	9.80	9.50	9.93
C	2.01	1.90	2.19	1.86
$\mu_{Fréchet}$	15.0	15.3	11.9	15.9
$\sigma_{Fréchet}$	29.1	34.4	20.9	37.4

tabel 2.2

Gemiddelde parameters, gemiddelde waarden en standaard deviaties van de Fréchet verdeling van de significante golfhoogten van deining over de periode 1979-1991, in cm

² Een programma geschreven door prof. drs. ir. J.K. Vrijling, Technische Universiteit Delft, april 1988

Te zien is dat de parameter A negatief is, hetgeen zou betekenen dat dat negatieve golfhoogten zouden zijn. In tabel 2.2 staan echter de parameters die voortkomen uit het programma "Linear Statistical Distribution Fit". De gemiddelde waarde van de verdeling kan bepaald worden via:

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} H \cdot f_{H_z}(H) dH \quad (2.8)$$

waarin:

μ = de gemiddelde waarde van de verdeling,

$$f_{H_z}(H) = \frac{\partial}{\partial H} F_{H_z}(H).$$

Dit wordt ook wel het eerste orde moment van de verdeling genoemd. Het tweede orde moment van de verdeling is gelijk aan de variantie van de verdeling:

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (H - \mu)^2 \cdot f_{H_z}(H) dH \quad (2.9)$$

waarin:

σ^2 = de variantie van de verdeling.

De standaard deviatie van de verdeling, σ , kan dan berekend worden uit de variantie.

In bijlage II staan de kansverdelingen alsmede de transformaties van de deining. De transformatie van de waarnemingen sluit op het eerste gezicht niet erg goed op de getransformeerde verdeling aan, maar aangezien het in dit onderzoek gaat om de werkbaarheid van te transporteren tunnelementen gaat de interesse uit naar de lagere significante golfhoogten van deining, tot ca. één meter, en niet de extreme waarden!

2.5.2 Resultaten van de kansverdelingen voor zeegang

Zo zijn de significante golfhoogten van zeegang voor elke zomermaand te beschrijven met een Gumbelverdeling, die er als volgt uitziet:

$$F_{H_z}(H) = e^{-e^{-\frac{H-A}{B}}} \quad (2.10)$$

waarin:

A = drempelwaarde parameter [m]

B = schaalparameter [m]

De gemiddelde parameters, de gemiddelde waarden en de standaard deviaties van de maanden mei, juni, juli en augustus staan in tabel 2.3 vermeld.

	mei	juni	juli	augustus
A	67,00	74,28	70,77	74,95
B	45,36	43,41	42,38	52,63
μ_{Gumbel}	93,3	99,4	95,3	105,5
σ_{Gumbel}	57,0	55,3	53,9	65,9

tabel 2.3

Gemiddelde parameters, gemiddelde waarden en standaard deviaties van de Gumbelverdeling van zeegang over de periode 1979-1991, in cm

De gemiddelde waarde en de standaard deviatie van een Gumbelverdeling kan op dezelfde manier afgeleid worden via respectievelijk formule 2.8 en 2.9.

In bijlage III zijn de verdelingen van zeeegang te zien alsmede de transformaties, dubbellogaritmisch, tot rechte lijnen. Te zien is dat de getransformeerde Gumbelverdelingen van mei en augustus de waarnemingen van ca. 150 tot 325 cm iets overschatten en vanaf 325 cm de hogere golfhoogten redelijk onderschatten. Voor juni echter onderschat de getransformeerde de waarnemingen vanaf golfhoogten groter dan 320 cm en voor juli overschat de getransformeerde de waarnemingen vanaf golfhoogten van ongeveer 160 cm.

2.5.3 Resultaten van de kansverdelingen voor de piekperiode

De piekperioden van de significante golfhoogten van zeeegang zijn voor elke zomermaand te beschrijven met een normaalverdeling:

$$F_{T_p}(T) = \frac{1}{\sigma_{T_p} \cdot \sqrt{2\pi}} \int_0^T e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{T - \mu_{T_p}}{\sigma_{T_p}} \right)^2} dT \quad (2.11)$$

waarin:

μ_{T_p} = de gemiddelde waarde van de piekperiode [s]

σ_{T_p} = de standaard deviatie van de piekperiode [s]

In tabel 2.4 staan de waarden van de parameters van de normaalverdelingen van de betreffende maanden.

	mei	juni	juli	augustus
μ_{T_p}	5,32	5,47	5,35	5,36
σ_{T_p}	1,03	0,99	1,01	1,05

tabel 2.4

Gemiddelde waarden en standaard deviaties van de Gaussische verdeling van de piekperiode van zeeegang over de periode 1979-1991, in seconden

Deze verdelingen zijn in bijlage IV te zien.

2.5.4 Resultaten van de kansverdelingen voor de golfsteilheid

Ook de golfsteilheden voor zeeegang zijn voor elke zomermaand te beschrijven met een normaalverdeling:

$$F_{s_p}(s) = \frac{1}{\sigma_{s_p} \cdot \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^s e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{s - \mu_{s_p}}{\sigma_{s_p}} \right)^2} ds \quad (2.12)$$

waarin:

μ_{s_p} = de gemiddelde waarde van de golfsteilheid [%]

σ_{s_p} = de standaard deviatie van de golfsteilheid [%]

In tabel 2.5 staan de waarden van de parameters van de normaalverdelingen van de betreffende maanden.

	mei	juni	juli	augustus
μ_{s_p}	1,90	2,02	2,03	2,12
σ_{s_p}	0,83	0,87	0,88	0,89

tabel 2.5

Gemiddelde waarden en standaard deviaties van de Gaussische verdeling van de golfsteilheid van zeegang over de periode 1979-1991, in procenten.

Deze kansverdelingen zijn in bijlage V te zien.

2.5.5 Controle van de kansverdelingen

Een simpele doch eenvoudige manier om te controleren of er rekenfouten zijn gemaakt, bij het bepalen van de verdelingen van de significante golfhoogten van zeegang, kan met behulp van een nivo II Mean Value Approach, zie [3]. Deze methode gaat uit van de gemiddelde waarde - eerste orde - tweede moment. Hiervoor wordt formule 2.4 geschreven als:

$$H_s = C \cdot T_p^2 \cdot s_p \quad (2.13)$$

waarin:

$$C = \frac{g}{2 \cdot \pi} \approx 1,56$$

De significante golfhoogte van zeegang H_s wordt gezien als functie van twee onafhankelijke variabelen, namelijk de piekperiode T_p en de golfsteilheid s_p . De Mean Value Approach-methode beschrijft dat de gemiddelde waarde van de significante golfhoogte van zeegang dan als volgt gecontroleerd kan worden door:

$$\mu(H_s) = C \cdot \mu^2(T_p) \cdot \mu(s_p) \quad (2.14)$$

De standaard deviatie van de significante golfhoogte van zeegang kan gecontroleerd worden door:

$$\sigma(H_s) = \sqrt{\left(\frac{\partial H_s}{\partial T_p} \cdot \sigma(T_p)\right)^2 + \left(\frac{\partial H_s}{\partial s_p} \cdot \sigma(s_p)\right)^2} \quad (2.15)$$

hetgeen geschreven kan worden als:

$$\sigma(H_s) = \sqrt{\left(2 \cdot C \cdot \mu(T_p) \cdot \mu(s_p) \cdot \sigma(T_p)\right)^2 + \left(C \cdot \mu^2(T_p) \cdot \sigma(s_p)\right)^2} \quad (2.16)$$

De resultaten van de controle van de gemiddelde waarden en de standaard deviaties van de significante golfhoogte van zeegang staan in tabel 2.6.

	mei	juni	juli	augustus
μ_{H_s}	84,0	94,4	90,7	95,1
σ_{H_s}	49,0	53,1	52,2	54,6

tabel 2.6

Controle van de verdeling van de significante golfhoogte van zeegang m.b.v. nivo II Mean Value Approach.

Het blijkt dat de Mean Value Approach de waarden iets onderschat, vergelijk tabel 2.6 met tabel 2.3. Toch is het een eenvoudige controle op de gekozen verdelingen die bepaald zijn uit de waarnemingen.

3. Bezwijken van het tunnelement

3.1 Inleiding

Nu het golfklimaat bekend is door de verschillende variabelen, significante golfhoogte H_s , piekperiode T_p en golfsteilheid s_p , vast te leggen met behulp van kansverdelingen, is het van belang te weten wat voor golfbelasting het tunnelement kan ondergaan gedurende het zeetransport voordat het bezwijkt.

Een object dat maritiem getransporteerd wordt heeft altijd een aantal bezwijkmechanismen, waarvan er een of meer maatgevend zijn. Er zijn daarbij drie variabelen die van belang zijn, te weten de significante golfhoogte, golfperiode en golfrichting. Deze variabelen vormen tezamen de golfbelasting en veroorzaken een respons in het tunnelement. De respons van het tunnelement kan bepaald worden met behulp van overdrachtsfuncties. Voor een veilig transport over zee moeten de belastingen in het element gedurende het zeetransport ten alle tijde kleiner zijn dan de sterkte van het tunnelement. De mate van veiligheid of betrouwbaarheid kan vastgesteld worden middels de betrouwbaarheidsfunctie.

3.2 Bezwijkmechanismen

Het tunnelement kan door golfbelasting tijdens het zeetransport op verschillende wijzen bezwijken, dit worden bezwijkmechanismen genoemd. Deze verschillende bezwijkmechanismen zijn onderzocht door De Weger, architecten- en ingenieursbureau bv uit Rotterdam, zie [9]. Bij het ontwerp van de Piet Hein tunnel, dat als uitgangspunt is aangenomen voor dit onderzoek, zijn de elementen met een lengte van 160 meter opgedeeld in moten van circa 26 meter. In figuur 3.1 staat een element afgebeeld met bijbehorend hoofdassenstelsel en met krachten en momenten in elke richting. Ook staat daarin een dwarsdoorsnede van het tunnelement aangegeven. De conclusie van het onderzoek van De Weger was dat er drie mogelijke bezwijkmechanismen voor de dilatatievoegen bestaan, waarbij ieder mechanisme gekoppeld bleek te zijn aan een specifieke voeg:

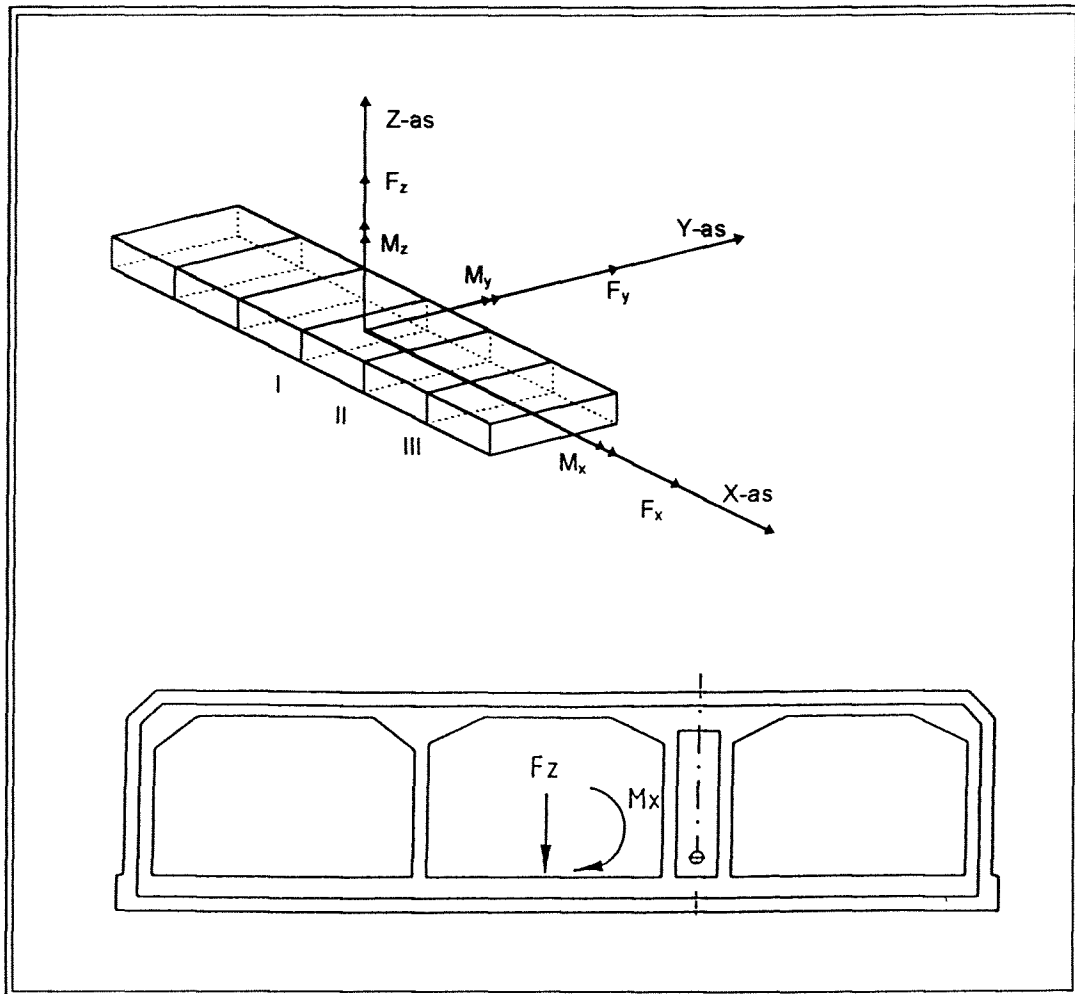
- 1A het bezwijken van de voerspankabels in de middelste voeg (voeg I) onder invloed van buigende langsmomenten (M_y);
- 1B het openen van de middelste voeg (voeg I) tot maximaal 15 mm;
- 2 het bezwijken van de tandverbinding in de buitenwanden onder invloed van de horizontale dwarskrachten (F_y) in voeg III;
- 3 het bezwijken van de tandverbinding onder invloed van het wringend moment (M_x) en de verticale dwarskracht (F_z) in voeg II.

De achtergrond van het onderscheid in mechanisme 1A en 1B is dat mechanisme 1A uitgaat van een veilige overtocht, waarbij een geringe herstelbare schade mag zijn opgetreden, terwijl mechanisme 1B uitgaat van een veilige schadevrije overtocht.

De horizontale dwarskracht F_y , optredend bij mechanisme 2, wordt opgenomen door de tandconstructie in de beide buitenwanden, waarbij de tandconstructie in de ene buitenwand tegengesteld werkt aan die in de andere buitenwand.

Het wringend moment M_x optredend bij mechanisme 3 wordt opgenomen door zowel de tanden in de vloer en het dak als door de tanden in de buitenwanden. Het aandeel van de buitenwanden is echter zeer gering. Daarom wordt dat aandeel van de buitenwanden verwaarloosd en wordt het volledige wringende moment opgenomen door de tandconstructies in de vloer en in het dak. Ook de verticale dwarskracht F_z wordt opgenomen door de tandconstructie in de vloer en het dak, waarbij die in de vloer

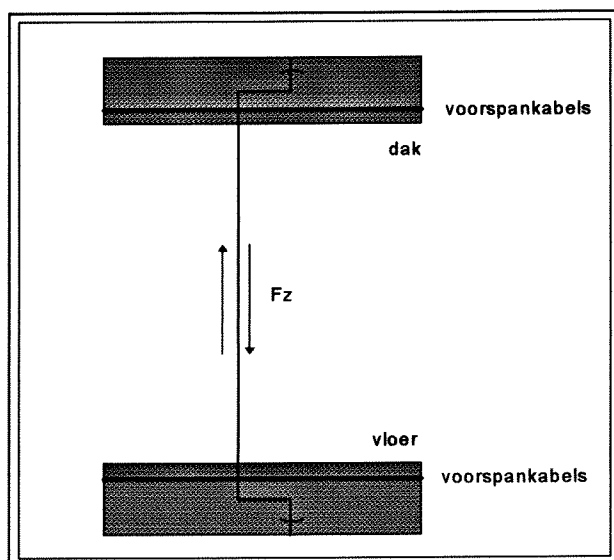
tegengesteld werkt aan die in het dak. Met andere woorden, afhankelijk van de richting van de dwarskracht werkt of de tand in de vloer of die in het dak. Bij de in figuur 3.2 aangegeven richting van de dwarskracht werkt dus alleen de tand in de vloer.



figuur 3.1
Overzicht krachtswerking en dilatatievoegen in het tunnelelement

Uit het onderzoek van De Weger, zie [9], is gebleken dat bezwijkmechanisme 3 het maatgevende mechanisme is. Om deze reden is dit mechanisme gebruikt als het faalmechanisme in dit onderzoek.

Het maatgevende bezwijkmechanisme treedt dus op bij een combinatie van belastingen, te weten de verticale dwarskracht c.q. schuifkracht F_z en het wringend moment M_x .



figuur 3.2
Verticale dwarskracht op de tandconstructies in dak en vloer t.p.v. dilatatievoeg.

3.3 Belastingmodel

De belasting op het tunnelement bij het maatgevend bezwijkmechanisme bestaat uit wringende momenten en uit dwarskrachten, beide veroorzaakt door zowel windgolven als deiningsgolven. Dit zijn de stochastische dynamische belastingen. Er zijn ook wringende momenten en dwarskrachten die veroorzaakt worden door de statische drijfbelasting. Deze worden verondersteld deterministisch te zijn, evenals de verdelingsparameters van de belasting. De totale belasting op het tunnelement ziet er dan als volgt uit:

$$S = \frac{M_{x,dyn} + M_{x,stat}}{b} + \frac{F_{z,dyn} + F_{z,stat}}{c} \quad [\text{N/m}'] \quad (3.1)$$

waarin:

- $M_{x,dyn}$ = optredend wringend moment t.g.v. dynamische golfbelasting in Nm;
- $M_{x,stat}$ = optredend wringend moment t.g.v. statische drijfbelasting in Nm;
- $F_{z,dyn}$ = optredende verticale dwarskracht t.g.v. dynamische golfbelasting in N;
- $F_{z,stat}$ = optredende verticale dwarskracht t.g.v. statische drijfbelasting in N;
- b, c = parameters afhankelijk van de aangenomen belastingsverdeling over de doorsnede, respectievelijk in m^2 en m' .

3.4 Sterktemodel

De sterkte van het tunnelement tijdens transport is afhankelijk van veel factoren zoals bijvoorbeeld de betondruksterkte, de staalwapeningssterkte en de voerspanningssterkte. Al deze factoren zorgen voor een spreiding in de algehele sterkte van het element. Het is gebruikelijk deze sterkte als normaal verdeeld te veronderstellen. De vraag is dan hoe groot de gemiddelde waarde van en de spreiding in de sterkte zijn. Het gemiddelde μ_R van de sterkte gaat uit van de ontwerpwaarden van het ontwerp van de Piet Hein tunnel. De ontwerpwaarden van de krachten en de parameters van de belastingsverdeling over de doorsnede die berekend zijn door De Weger, zie [9], zijn:

$$M_{x,dyn} = 59 \text{ MNm} \quad b = 151,0 \text{ m}^2$$

$$M_{x,stat} = 20 \text{ MNm}$$

$$\begin{aligned} F_{z,dyn} &= 8 \text{ MN} \\ F_{z,stat} &= 2 \text{ MN} \end{aligned}$$

$$c = 20,8 \text{ m}$$

De gemiddelde sterkte μ_R volgt dan uit formule 3.1 en is 1,00 MN/m'. Vervolgens is voor het onderzoek gekozen voor een variatiecoëfficiënt,

$$V_R = \frac{\sigma_R}{\mu_R} \quad (3.2)$$

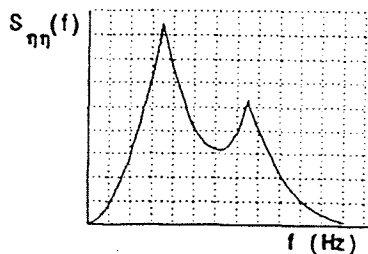
die gelijk is aan 0,05. De spreiding van de sterkte wordt dan $\sigma_R = 0,05 \text{ MN/m'}$.

3.5 Overdrachtsfuncties

3.5.1 Overdrachtsfuncties in het algemeen

Als een systeem belast wordt zal dat systeem reageren d.m.v. een respons, dat kunnen bijvoorbeeld zijn verplaatsingen, vervormingen, spanningen maar ook dwarskrachten en momenten. Deze respons is afhankelijk van de overdracht en van de excitatie. Om te weten wat voor invloed golfbelasting op een constructie heeft, moeten de krachten door de golfbelasting op deze constructie bepaald worden. Het krachten- of belastingenspectrum $S_{KK}(f)$ wordt gevonden door het golfspectrum $S_{\eta\eta}(f)$ en het kwadraat van de overdrachtsfunctie $R_{\eta K}(f)$ te vermenigvuldigen:

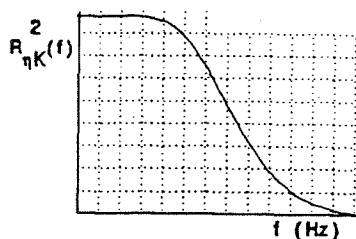
$$S_{\eta\eta}(f) \cdot R_{\eta K}^2(f) = S_{KK}(f) \quad (3.3)$$



Het golfspectrum, d.i. de golfamplitude in het kwadraat per frequentiebandje.

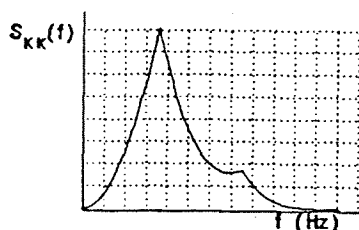
Het oppervlak onder de spectrumkromme is m_0 .

De significante golfhoogte wordt, bij een Rayleigh verdeling zie §2.1.3, $H_s = 4 \cdot \sqrt{m_0}$.



Het kwadraat van de overdrachtsfunctie.

De geschetste overdrachtsfunctie is kenmerkend voor een quasi-statisch reagerende constructie. De constructie is zo stijf en traag dat hij zelf niet dynamisch reageert op de golfbelasting.



Het krachten- of belastingenspectrum.

Uit het belastingenspectrum blijkt in dit voorbeeld, dat een tweede (hogere frequente) piek in het golfspectrum niet of nauwelijks "doorwerkt" in het belastingenspectrum.

figuur 3.3
Spectrale beschouwing van krachtsoverdracht.

Wegens de lineaire theorie zijn de krachten ook weer Rayleigh verdeeld. De significante kracht is te berekenen volgens $K_s = 2 \cdot \sqrt{m_0}$, maar nu is m_0 het oppervlak onder de kromme van het krachtenspectrum, zie [2].

3.5.2 Overdrachtsfuncties voor de tunnelementen van de Piet Hein tunnel

In het geval van het transport van de tunnelementen van de Piet Hein tunnel over zee bestaat de excitatie uit twee belastingen, namelijk golven van zeegang en deining.

Aangezien een golfspectrum gebaseerd is op waarnemingen gedurende 15 à 20 minuten beschrijft het het korte-termijn golfbeeld en zijn de golfhoogten verdeeld volgens een korte-termijn verdeling die aangenomen mag worden als een Rayleigh verdeling. Deze Rayleigh verdeling ziet er als volgt uit:

$$F_{H_s}(H) = 1 - e^{-2\left(\frac{H}{4\sqrt{m_0}}\right)^2} = 1 - e^{-2\left(\frac{H}{H_s}\right)^2} \quad (3.4)$$

waarin:

H_s = de significante golfhoogte welke gelijk is aan $4\sqrt{m_0}$ [m];

m_0 = het oppervlak onder het variantie- of energiedichtheidsspectrum [m²].

Ook voor het krachtenspectrum mag, omdat het systeem lineair is, een Rayleigh verdeling aangenomen worden die er idem dito uitziet:

$$F_{K_s}(F) = 1 - e^{-2\left(\frac{F}{2\sqrt{m_0}}\right)^2} = 1 - e^{-2\left(\frac{F}{K_s}\right)^2} \quad (3.5)$$

waarin:

K_s = de significante kracht welke gelijk is aan $2\sqrt{m_0}$ [N];

m_0 = het oppervlak onder het krachten- of belastingenspectrum [N²].

Typerend voor een Rayleigh verdeling is dat ca. 13,5 % van de golven de significante golfhoogte of kracht overschrijdt. Om van de Rayleigh golfbelastingsverdeling naar de Rayleigh krachtenverdeling te komen is een zekere overdracht nodig. Het Maritiem Instituut te Wageningen, het MARIN, heeft onderzoek verricht naar de belastingen op het element. De resultaten ervan, te weten de zogenoemde overdrachtsfuncties, staan in bijlage VI. Hierin staan de meest waarschijnlijke maximum waarden voor het wringend moment M_x en de verticale dwarskracht F_z uitgezet tegen respectievelijk de piekperiode en de significante golfhoogte voor zowel excitatie door zeegang als door deining. Deze meest waarschijnlijke maximum waarden zijn gerelateerd aan de meest ongunstige hoek van inval van de golven. Er is alleen gekeken naar het maatgevende bezwijkmechanisme, zie mechanisme 3 in § 3.2.

3.6 Krachten in het tunnelement

Het blijkt dat de respons op golfbelastingen, dat zijn de wringende momenten en de verticale dwarskrachten in het tunnelement, lineair afhankelijk is van de significante golfhoogte. Voor zeegang geldt bijvoorbeeld, zie bijlage VI, dat bij een gegeven significante golfhoogte en golfperiode de meest waarschijnlijke maximum waarde voor het wringende moment en de verticale dwarskracht bepaald kan worden. De gevonden waarde stelt een moment of kracht voor die als meest waarschijnlijke maximumwaarde zal optreden in het tunnelement tijdens een drie-uurlijkse zeetoestand onder de voorwaarde dat deze gegeven combinatie van significante golfhoogte en piekperiode ook optreedt. Voor zeegang blijkt te gelden, zie bijlage VI:

$$M_{x,MPM,zeegang} = 2 \cdot H_{s,zeegang} \cdot T_p \quad (3.6)$$

$$F_{z,MPM,zeegang} = f(T_p) \cdot H_{s,zeegang} \quad (3.7)$$

waarin:

$M_{x,MPM,zeegang}$ = de meest waarschijnlijke maximum waarde voor het wringende moment t.g.v. zeegang [MNm];

$F_{z,MPM,zeegang}$ = de meest waarschijnlijke maximum waarde voor de verticale dwarskracht t.g.v. zeegang [MN];

$f(T_p)$ = een "best fit" als functie van de piekperiode T_p voor de overdrachtskromme van de verticale dwarskracht t.g.v. zeegang.

Voor deining geldt, zie bijlage VI:

$$M_{x,MPM,deining} = 11,35 \cdot H_{s,deining} \quad (3.8)$$

$$F_{z,MPM,deining} = 2,5 \cdot H_{s,deining} \quad (3.9)$$

waarin:

$M_{x,MPM,deining}$ = de meest waarschijnlijke maximum waarde voor het wringende moment t.g.v. deining [MNm];

$F_{z,MPM,deining}$ = de meest waarschijnlijke maximum waarde voor de verticale dwarskracht t.g.v. deining [MN].

In het vervolg zal de index MPM, dat staat voor Most Probable Maximum ofwel meest waarschijnlijke maximum waarde, weggelaten worden. Het totale wringende moment in het tunnelement als gevolg van de dynamische golfbelasting kan nu als volgt geschreven:

$$M_{x,dyn} = \sqrt{M_{x,zeegang}^2 + M_{x,deining}^2} \quad (3.10)$$

waarin:

$M_{x,dyn}$ = het optredend wringend moment t.g.v. de dynamische golfbelasting;

$M_{x,zeegang}$ = het optredend wringend moment t.g.v. zeegang;

$M_{x,deining}$ = het optredend wringend moment t.g.v. deining.

Zo geldt ook voor de totale verticale dwarskracht in het tunnelement als gevolg van de dynamische golfbelasting:

$$F_{z,dyn} = \sqrt{F_{z,zeegang}^2 + F_{z,deining}^2} \quad (3.11)$$

waarin:

$F_{z,dyn}$ = de optredende verticale dwarskracht t.g.v. de dynamische golfbelasting;

$F_{z,zeegang}$ = de optredende verticale dwarskracht t.g.v. zeegang;

$F_{z,deining}$ = de optredende verticale dwarskracht t.g.v. deining.

De totale respons van het tunnelement, als gevolg van de dynamische- en statische golfbelasting, volgt uit formule 3.1.

3.7 De betrouwbaarheidsfunctie

Het tunneltransport zal falen als gedurende het transport de belasting groter is dan de sterkte van het te beschouwen Piet Hein tunnelement. De veiligheid of betrouwbaarheid van het zeetransport van de tunnelementen kan via de zogenoemde betrouwbaarheidsfunctie bepaald worden:

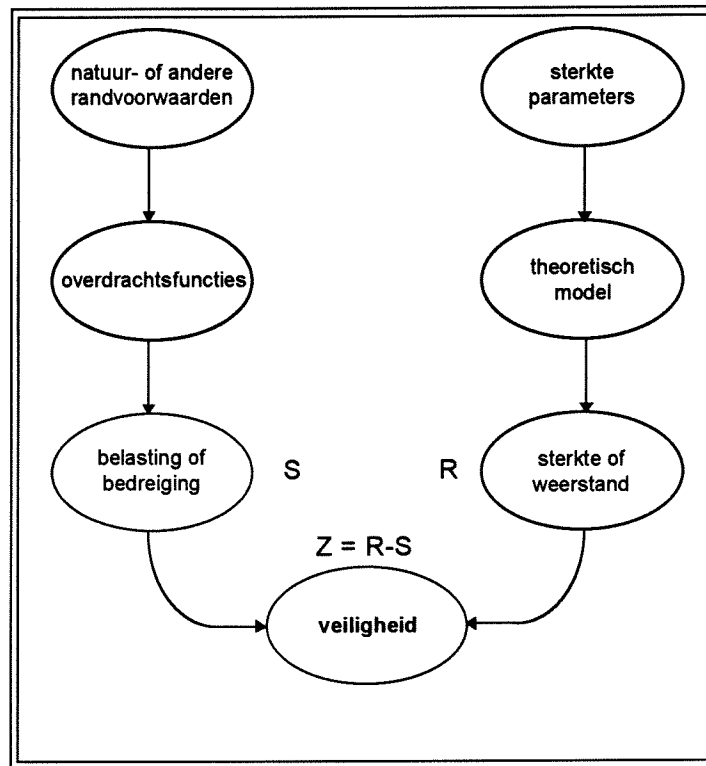
$$Z = R - S \quad (3.12)$$

waarin:

R = sterkte

S = belasting

In heel algemene zin ziet de grenstoestand van een bezwijkmechanisme eruit als in figuur 3.4, waarin de belasting bestaat uit golven en de sterkte afhankelijk is van verschillende factoren.



figuur 3.4
De grenstoestand van een bezwijkmechanisme.

Met behulp van de betrouwbaarheidsfunctie Z zijn nu het veilige gebied, het onveilige gebied en de daartussen liggende bezwijkgrens aan te geven:

- $Z > 0$ veilig gebied
- $Z = 0$ bezwijkgrens
- $Z < 0$ onveilig gebied

Omdat er sprake is van een stochastische sterkte en stochastische belastingen, waarbij de spreiding in de sterkte aanzienlijk kleiner is dan de spreiding in de belasting, is de betrouwbaarheidsfunctie Z ook stochastisch: $Z = R - S$. De onderstreping geeft aan dat het een stochastische variabele betreft. Door substitutie van formule 3.10 en 3.11 in formule 3.1 volgt dat de belasting S een functie is van de significante golfhoogte van zeeegang, de significante golfhoogte van deining en de piekperiode van zeeegang. Zo is de betrouwbaarheidsfunctie Z een functie van de sterkte R en de drie bovenvermelde parameters: $Z = f(R, H_{s;zeegang}, H_{s;deining}, T_p)$. De betrouwbaarheidsfunctie staat uitgeschreven in bijlage VII.

4. De transportduur

4.1 Inleiding

De transportroute, en daarmee ook de transportduur, is eigenlijk het meest essentiële deel van het "ontwerp". Hoe langer de transportduur des te groter de kans op bezwijken van het tunnelement. De kans op hogere en gevaarlijke golven wordt dan groter. De lengte van de sleeproute is vrijwel niet variabel, zeg deterministisch, in tegenstelling tot de duur van het transport.

4.2 De route van het transport op de Noordzee

De sleeproute van Vlissingen naar IJmuiden is ongeveer 120 nautische mijlen, ongeveer 223 km. Het traject op de Noordzee loopt vanaf Vlissingen via het Scheur tot aan de uiterboei in de Wielingen en vandaar kustwaarts van het Noordzee-scheepvaartkanaal tot in IJmuiden, zie bijlage VIII. Op de route die gevaren wordt varieert de diepte van 20 tot 30 meter.

4.3 Points of no return

Tijdens het sleeptransport zou er eventueel uitgeweken kunnen worden naar een veiliger oord mocht er onverhoopt een ruwe zee met te hoge golven opkomen, bijvoorbeeld door het opsteken van een storm. Ook zou het kunnen gebeuren dat er plotseling uitgeweken moet worden in verband met een noodgeval. Er kan een voorspankabel gebroken zijn of een pomp die het lekwater uit het tunnelement pompt is defect geraakt zodanig dat er teveel lekwater in het element binnenkomt. Bij dit soort calamiteiten zou het transport uit kunnen wijken naar de Eurogeul. Als er tussen Vlissingen en Rotterdam iets gebeurt kan men besluiten of terug te varen naar Vlissingen of door te varen naar de Eurogeul. Dit besluit is afhankelijk van de dan optredende schade, d.i. schade aan het tunnelement en/of schade door vertraging van het transport. Hetzelfde geldt als er iets mocht gebeuren tussen Rotterdam en IJmuiden. De keuze ligt dan tussen terug te varen naar de Eurogeul of door te varen naar het eindpunt van het Noordzee-traject, de Noordersluis van IJmuiden. Deze twee opties worden in dit onderzoek echter niet meegenomen.

4.4 De transportduur

De gemiddelde sleepsnelheid zal tussen de 3 à 4 knopen liggen [Bron: telefoongesprek met Smit-Tak], dat is ongeveer tussen de 1,5 en 2,1 meter per seconde. De maximale snelheid die bereikt kan worden ligt rond de vijf knopen. Onder normale weersomstandigheden zal het maritiem transport gemiddeld ongeveer 34 uur duren. Dit is natuurlijk afhankelijk van de toestand van de zee, de windrichting en de stormingen die voorkomen gedurende het transport. Als er tijdens het transport bijvoorbeeld een stevige wind opsteekt zal het transport langer gaan duren omdat de sleepsnelheid zal afnemen doordat de windgolven hoger worden en er meer weerstand wordt ondervonden bij het slepen. Deze variaties rondom de transportduur worden in het vervolg van het onderzoek meegenomen door een aantal transportduren door te rekenen om zodanig de gevoeligheid van de transportduur aan te duiden. De transportduur heeft een fysisch beperkte ondergrens en deze minimale transportduur is ongeveer gelijk aan de transportroute van 120 nautische mijlen gedeeld door de maximale vaarsnelheid van 5,5 knopen, hetgeen ongeveer 22 uur oplevert. Deze

minimale transportduur treedt dus alleen op als gevaren wordt met maximale snelheid, hetgeen wel een groter brandstofverbruik met zich meebrengt. Voor de bovengrens wordt vrij arbitrair voor een transportduur van 46 uur gekozen.

De onder- en bovengrens van de transportduur alsmede de gemiddelde transportduur worden in dit onderzoek verder meegenomen om te kijken wat voor invloed de transportduur heeft op de faalkans en op de wachttijden.

4.5 De transportcyclus

De transportcyclus is de tijd die ervoor nodig is voor de twee sleepboten om:

- van Vlissingen naar IJmuiden te varen met het tunnelelement,
- de Noordersluizen te passeren en het element daar tijdelijk af te meren,
- weer terug naar Vlissingen te varen en het volgende element klaar te maken voor vertrek.

Voor deze cyclus wordt een tijd aangehouden die twee maal de transportduur is, d.i. varen met het tunnelelement over het zeetraject, plus vier extra uren. Dit komt neer op een ondergrens voor de transportcyclus van 48 uur, een gemiddelde transportcyclus van 72 uur en een bovengrens van 96 uur.

4.6 De sleepbootconfiguratie

Onder de sleepbootconfiguratie wordt verstaan het aantal sleepboten en de wijze waarop deze sleepboten het element voortslepen. Voor het transport op de Noordzee worden twee sleepboten gebruikt, elk met een trekkracht van 60 ton en een vermogen van ongeveer 5400 pk. Zij zullen naast elkaar voor het element varen, zie [11].

Voor het sleeptransport wordt verondersteld dat er gebruik gemaakt wordt van één stel van twee sleepboten.

5. Golfvoorspelling

5.1 Inleiding

Om in de ontwerpfase een idee te krijgen wat voor soort golfcondities zich een aantal jaren later voordoen als de tunnelelementen daadwerkelijk getransporteerd moeten worden, dient een golfvoorspelling een transportduur vooruit toegepast te worden.

De sleper van de tunnelelementen zal een maximaal acceptabele golfconditie kiezen waaronder nog verantwoord met de sleep gevaren kan worden. Juist door toepassing van zo'n golfvoorspelling kan vrij nauwkeurig worden afgeschat of dit vaarcriterium gedurende de geplande sleepduur zal worden overschreden. Een beslissing tot vertrek kan dus beter worden onderbouwd door toepassing van een golfvoorspelling.

5.2 Het modelleren van de golfvoorspelling

5.2.1 De basis van de golfvoorspelling

Een golfvoorspelling maken in de ontwerpfase voor een zomerperiode kan door gebruik te maken van de historische golfhoogtewaarnemingen, zie hoofdstuk 2. Met behulp van een Monte Carlo benadering, zie [3], of randomgenerator kan de basis van de golfvoorspelling uit de lange-termijn golfhoogte verdeling worden afgeleid. Ook kan dit gedaan worden voor de piekperiode van zeegang. Voor elke zeetoestand gedurende het zeetransport wordt een waarde getrokken uit de lange-termijn significante golfhoogteverdeling, zowel voor zeegang en een daarbij behorende piekperiode als voor deining. Om deze kunstmatige voorspelde significante golfhoogten zit een voorspelfout en deze voorspelfout wordt verondersteld normaal verdeeld te zijn.

5.2.2 De fout in de golfvoorspelling

Hoe goed men ook kan voorspellen, er zal hierbij altijd een fout gemaakt worden. Deze fout in de voorspelling wordt de voorspelfout genoemd. Het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, het KNMI, heeft onderzoek gedaan naar voorspelfouten over verschillende tijdspannen door significante golfhoogten een aantal uren vooruit te voorspellen en ze daarna waar te nemen, zie [10]. Het KNMI heeft golfvoorspellingen gedaan voor het Platform Euro-0 en meetstation IJmuiden. In tabel 5.1 staan de bepaalde voorspelfouten, alsmede de in het onderzoek aangenomen gemiddelde voorspelfout van 0 cm i.p.v. de gemiddelde voorspelfout van het KNMI, omdat het KNMI deze overschat.

uren vooruit	$\mu_{\text{voorspelfout}}$ [cm]	$\sigma_{\text{voorspelfout}}$ [cm]	aangenomen $\mu_{\text{voorspelfout}}$ [cm]
0	-9	28	0
12	-10	31	0
24	-12	38	0
36	-29	45	0
48	-35	68	0

tabel 5.1

De gemiddelde waarde en de standaard deviatie van de normaal verdeelde fout in de golfvoorspelling van het KNMI en de aangenomen gemiddelde voorspelfout, in cm.

Uit deze tabel blijkt, dat naarmate men een aantal uren verder vooruit voorspelt de fout in de voorspelling groter wordt. De voorspelfout wordt dus verondersteld normaal verdeeld te zijn, met gemiddelde μ_{vsf} en standaard deviatie σ_{vsf} , en deze verdeling zal in het vervolg als volgt beschreven worden:

$$F_{\text{voorspelfout}}(u) = N(u; \mu_{vsf}, \sigma_{vsf}) \quad (5.1)$$

waarin:

- u = de lopende variabele, deze geeft aan hoeveel uren vooruit voorspeld wordt;
- N = geeft de normaal verdeling aan van een stochast;
- μ_{vsf} = het gemiddelde van de stochastische voorspelfout en is gelijk aan 0;
- σ_{vsf} = de standaard deviatie van de stochastische voorspelfout

5.2.3 Het model van de golfvoorspelling

Het toe te passen golfvoorspellingsmodel ziet er in zijn totaliteit dan als volgt uit:

$$F_{H_s}(u) = H_s + N(u; \mu_{vsf}, \sigma_{vsf}) \quad (5.2)$$

waarin:

- H_s = de basisvoorspelling van de significante golfhoogte, zie § 5.2.1;
- $N(u; \mu_{vsf}, \sigma_{vsf})$ = de normaal verdeelde voorspelfout, zie § 5.2.2.

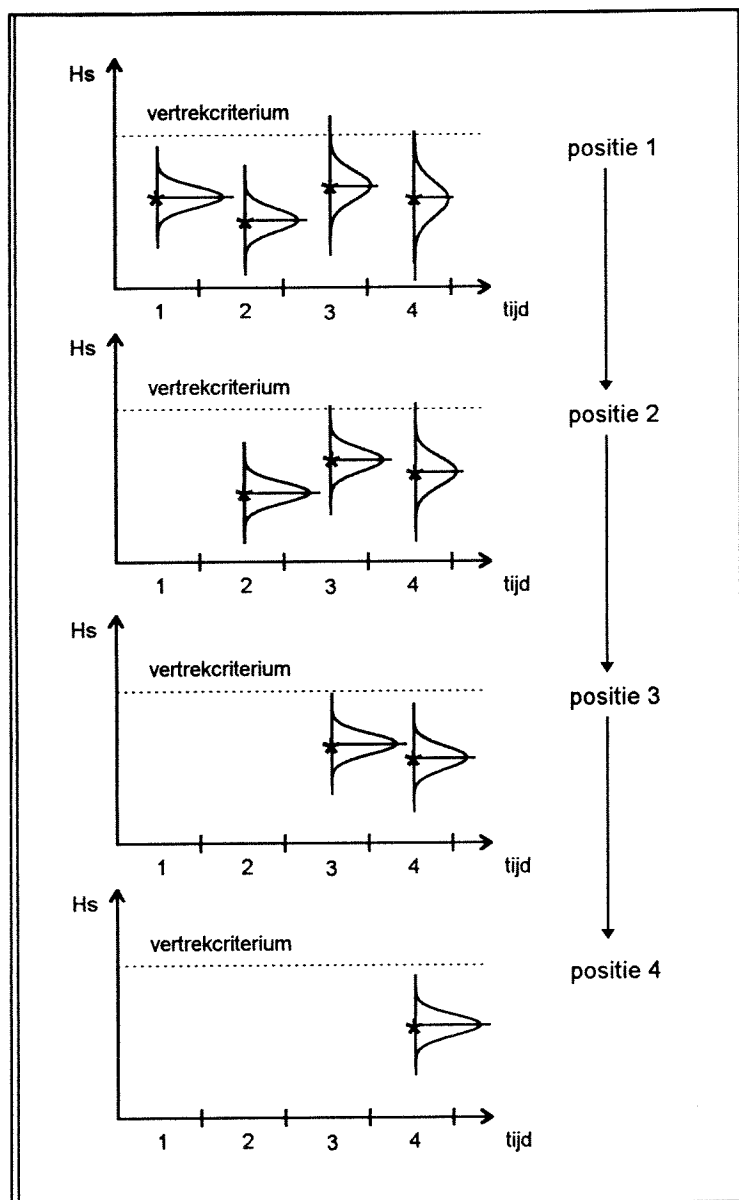
In figuur 5.1 staat een golfvoorspelling schematisch weergegeven voor een transportduur van 22 uur. Verondersteld wordt dat vanwege persistentie van de golven de waarnemingen om de zes uur onafhankelijk zijn in plaats van om de drie uur, zoals eerder vermeld. In het geval van figuur 5.1 zal het transport vier zeetoestanden moeten doorstaan. In de figuur duiden de sterretjes de basisvoorspelling H_s aan, d.w.z. dit is de Monte Carlo simulatie van de lange-termijn verdeling, die gedurende de voorspelling op hun plaats blijven liggen. De Gaussische klok om deze basisvoorspelling duidt de normaal verdeelde voorspelfout aan. Het is te zien dat naarmate verder vooruit voorspeld wordt dat de Gaussische klok kleiner en breder wordt. Het oppervlak onder een kansdichtheidskromme dient immers één te zijn. In figuur 5.1 is ondermeer te zien dat een golfvoorspelling voor de duur van het zeetransport getoetst kan worden aan een vertrek criterium. Dit geldt zowel voor de significante golfhoogten van zeegang als voor deining.

Resumerend worden er significante golfhoogten een transportduur vooruit voorspeld, lees een significante golfhoogte zowel voor zeegang als voor deining voor iedere zes uur durende zeetoestand, waarbij iedere significante golfhoogte per zeetoestand een bekende standaard deviatie van de normaal verdeelde voorspelfout heeft, zie tabel 5.1. Het aantal kunstmatige voorspellingen voor een transportduur van 22 uur in een simulatie wordt dan:

- vier basisvoorspellingen voor elke zeetoestand;
- positie 1: vier voorspellingen voor zeetoestanden 1 t/m 4;
- positie 2: drie voorspellingen voor zeetoestanden 2 t/m 4;
- positie 3: twee voorspellingen voor zeetoestanden 3 t/m 4;
- positie 4: een voorspelling voor zeetoestand 4;

Dit levert in zijn totaliteit op dat er vier trekkingen voor de basisvoorspellingen gedaan worden en daarna nog eens tien trekkingen worden gedaan uit de "bekende" stochastische voorspelfouten.

Voor de gemiddelde transportduur van 34 uur, met zes zeetoestanden, geeft dat respectievelijk zes plus éénentwintig trekkingen en voor de maximale transportduur van 46 uur, met acht zeetoestanden, respectievelijk acht plus zesendertig trekkingen.



figuur 5.1
 Overzicht van het model van golfvoorspelling voor een transportduur van ca. 22 uur vooruit, d.w.z. vier zeetoestanden.

6. Het simulatieprogramma

6.1 Inleiding

Door toepassing van een golfvoorspelling kan zoals eerder vermeld vrij nauwkeurig worden afgeschat of een vaarcriterium c.q. vertrek criterium gedurende de geplande sleepduur zal worden overschreden. Daarom is een computerprogramma geschreven in Turbo Pascal 7.0 waarin het gebruik van een golfvoorspelling en de toetsing aan het vaarcriterium is geïntegreerd. De listing van het simulatie-programma staat in bijlage IX. Nadat een golfvoorspelling is gedaan wordt deze getoetst aan het gekozen vertrek criterium. Voldoet de golfvoorspelling niet dan wordt er gewacht en wordt er een nieuwe golfvoorspelling gedaan, een wachtperiode later. Voldoet de golfvoorspelling echter wel aan het vertrek criterium dan worden de meest waarschijnlijke maximum belastingen per zeetoestand, die tijdens het zeetransport optreden, berekend. Op deze wijze kan voor verschillende vertrek criteria de belastingsverdeling bepaald worden op basis van de kleinste kwadraten methode, zie § 2.5. De faalkans kan, als zowel de belasting op als de sterkte van het tunnelontwerp eenmaal bekend is, berekend worden. Tevens houdt het programma bij hoe lang de aaneengesloten wachttijden zijn bij een gekozen vertrek criterium. Zo kan de wachttijdverdeling per vertrek criterium verkregen worden.

6.2 De implementatie

6.2.1 De golfvoorspelling

Zoals in hoofdstuk 5 al werd beschreven bestaat de golfvoorspelling uit twee delen, te weten de zogenoemde basisvoorspelling en de normaal verdeelde voorspelfout hier omheen.

De basisvoorspellingen worden afgeleid uit de lange-termijn verdelingen voor de significante golfhoogten, zie hoofdstuk 2, zowel voor zeegang en de daarbij behorende piekperiode als voor deining. Voor zeegang is dat voor elke zomermaand een Gumbel verdeling, voor deining een Fréchet verdeling en voor de piekperiode van zeegang een normaal verdeling. De normaal verdeelde voorspelfout is gegeven voor het aantal uren dat vooruit voorspeld wordt.

De uiteindelijke golfvoorspelling, zie ook figuur 5.1, komt als volgt tot stand:

1. voor het aantal zeetoestanden, d.w.z. de naar boven afgeronde gehele waarde van de te verwachten transportduur gedeeld door de duur van een zeetoestand, d.i. zes uur, worden voor zowel de significante golfhoogten van zeegang als van deining waarden getrokken uit de lange-termijn verdeling door middel van een Monte Carlo simulatie;
 2. voor elke zeetoestand wordt uit de bijbehorende stochastische voorspelfout, deze is normaal verdeeld met een gemiddelde waarde van nul, een waarde getrokken door middel van een randomgenerator;
 3. de uiteindelijke golfvoorspelling is de som van de bovenstaande trekkingen.
- Bovenstaande punten zijn ook zichtbaar in formule 5.2.

6.2.2 De beslissing

De beslissing die genomen dient te worden, nadat een golfvoorspelling voor de duur van het zeetransport vooruit gedaan is, is:

Kan het zeetransport schadevrij uitgevoerd worden of kan er beter gewacht worden tot de zee wat kalmer is?

Een golfvoorspelling voldoet aan de toets als ná het doorlopen van de voorspelling, zie figuur 5.2, alle significante golfhoogten beneden het gekozen vaar- of vertrek criterium liggen. Dit moet gelden voor significante golfhoogten van zeegang en deining. Als aan deze toets niet voldaan wordt, wordt er gewacht. Na deze periode, hetzij een transportcyclus later als wel voldaan wordt aan de toets of een wachtperiode later als niet wordt voldaan aan de toets, wordt opnieuw een golfvoorspelling gedaan. Op deze manier wordt een gehele zomerperiode doorlopen.

6.2.3 De belastingen tijdens transport

Als een golfvoorspelling voor een sleepduur vooruit voldoet aan een vertrek criterium, wordt de meest waarschijnlijke maximale waarde van de belasting per zeetoestand bepaald en wel als volgt:

- Met behulp van de significante golfhoogten en bijbehorende piekperiodes van zeegang en de significante golfhoogte van deining worden via de overdrachtsfunctie de MPM waarden van de belasting bepaald voor een drie-uurlijkse zeetoestand. Deze waarden worden omgezet tot MPM waarden voor een zes-uurlijkse zeetoestand;
- De grootste MPM waarden van de belasting per zeetoestand worden daarna bepaald.

In dit onderzoek wordt verondersteld dat de golfvoorspelling eerst getoetst moet worden aan een gekozen vertrek criterium om op deze manier dusdanige risico's uit de weg te gaan. Wat zou er echter gebeuren als er altijd zou worden getransporteerd, ongeacht het vertrek criterium t.a.v de golfvoorspelling?

6.2.4 De wachttijden

Om inzicht te krijgen in het verschil in wachttijden is de simulatie gedaan voor drie verschillende transportduren. De wachttijden worden bepaald als functie van de vertrek criteria door de duur van de aaneengesloten wachttijd te analyseren. De resulterende verdeling van de wachtperiodes geeft de kansverdeling van de wachttijd per transport als functie van de transportduur.

6.2.5 De simulatietijd

De totale simulatietijd bestrijkt de zomerperiode van 00.00 uur van 1 mei tot 00.00 uur van 31 augustus. De simulatie wordt in stappen van twaalf uur, dit is overeenkomstig met de wachtperiode, en in stappen van een transportcyclus doorlopen. Soms zal deze simulatietijd iets worden overschreden door hetzij een laatste transport hetzij een laatste keer wachten.

6.3 De resultaten van de simulatie

6.3.1 De belastingsverdelingen als functie van de vertrek criteria

Om de faalkans te berekenen bij een zeker vertrek criterium, is het nodig de meest waarschijnlijke maximale belastingen die gedurende het zeetransport optreden te berekenen. Door deze belastingen te ordenen kan weer een "best fit" verdeling bepaald worden, zie § 2.5, zodat de belastingsverdeling als functie van het vertrek criterium bekend is. Deze belastingsverdelingen zijn allemaal te beschrijven met een Gumbel verdeling. De parameters van de Gumbel verdeling zijn verkregen door het gemiddelde te nemen van 10 runs van het simulatieprogramma. In tabel 6.1 staan deze gemiddelde parameters van de Gumbel verdelingen voor de verwachtingswaarde van de transportduur van 34 uur.

vertrek- criterium	vertrekriterium deining [cm]							
	25		50		75		100	
zeegang [cm]	A	B	A	B	A	B	A	B
200	336,52	54,49	346,25	53,83	347,86	53,72	346,79	54,08
250	342,51	61,06	351,92	60,69	353,80	61,10	354,25	62,48
300	342,12	64,50	354,71	65,85	356,65	66,16	355,90	66,63
350	-----	-----	355,92	67,73	356,50	69,32	356,04	69,66
400	-----	-----	-----	-----	356,00	69,93	357,76	71,38

tabel 6.1

De gemiddelde parameters van de Gumbel belastingsverdelingen als functie van de vertrekriteria voor de verwachtingswaarde van de transportduur van 34 uur.

In deze tabel valt te zien dat de parameter A in iets mindere mate toeneemt dan parameter B bij het toenemen van het vertrekriterium voor zeegang. Parameter A heeft ook praktisch geen invloed op de te berekenen faalkans, aangezien deze de drempelwaarde aangeeft, d.i. de verschuiving of translatie van de kansdichtheid. Parameter B heeft daarentegen meer invloed op de faalkans omdat dit de schaal en dus als het ware de spreiding van de Gumbel verdeling aangeeft.

6.3.2 De faalkansen voor verschillende vertrekriteria

Met behulp van een nivo II verfijnde methode, te weten AFDA hetgeen staat voor Approximate Full Distribution Approach dat niet-normale verdelingen lokaal benadert door normale verdelingen, wordt de feitelijke faalkans berekend. Nu de verdeling van zowel de totale belasting per vertrekriterium als de verdeling van de sterkte (van het aangenomen ontwerp-tunnelelement van de Piet Hein tunnel) bekend is, is de faalkans eenvoudig te berekenen door middel van de betrouwbaarheidsfunctie in te voeren in AFDA. In onderstaande tabel 6.2 staan de faalkansen per vertrekriterium weergegeven voor de verwachtingswaarde van de transportduur van 34 uur. Zij staan ook in bijlage X.

vertrekriterium zeegang [cm]	vertrekriterium deining [cm]			
	25	50	75	100
200	$7,69 \cdot 10^{-6}$	$8,03 \cdot 10^{-6}$	$8,08 \cdot 10^{-6}$	$8,53 \cdot 10^{-6}$
250	$2,89 \cdot 10^{-5}$	$3,17 \cdot 10^{-5}$	$3,50 \cdot 10^{-5}$	$4,39 \cdot 10^{-5}$
300	$4,94 \cdot 10^{-5}$	$7,28 \cdot 10^{-5}$	$7,82 \cdot 10^{-5}$	$8,25 \cdot 10^{-5}$
350	-----	$9,57 \cdot 10^{-5}$	$1,19 \cdot 10^{-4}$	$1,23 \cdot 10^{-4}$
400	-----	-----	$1,27 \cdot 10^{-4}$	$1,56 \cdot 10^{-4}$

tabel 6.2

Faalkansen voor de verschillende vertrekriteria voor de verwachtingswaarde van de transportduur van 34 uur.

De vertrekriteria zijn uitgedrukt in significante golfhoogten. Deze faalkansen zijn grafisch weergegeven in bijlage X.

De faalkans neemt sterker toe bij het toenemen van het vertrekriterium voor zeegang dan bij het toenemen van het vertrekriterium voor deining.

6.3.3 De belastingsverdelingen als functie van een variërende transportduur

Op dezelfde manier als in paragraaf 6.3.1 beschreven is, zijn de belastingsverdelingen voor drie verschillende uren van transport, te weten 22, 34 en 46 uur, middels hun parameters vastgelegd. Ook deze belastingsverdelingen zijn te beschrijven met een Gumbel verdeling. De parameters staan in tabel 6.3.

vertrek- criterium	transportduur [uren]					
	22		34		46	
zeegang [cm]	A	B	A	B	A	B
200	342,61	53,43	346,79	54,08	357,25	54,10
250	346,19	60,87	354,25	62,48	363,05	62,91
300	349,12	65,88	355,90	66,63	364,16	68,08
350	351,46	69,07	356,04	69,66	364,89	71,07
400	351,83	71,17	357,76	71,38	365,90	72,58

tabel 6.3

De gemiddelde parameters van de Gumbel belastingsverdelingen als functie van de vertrekcriteria voor verschillende uren van transport met als vertrek criterium voor deining $H_s \leq 100$ cm.

Ook hier geldt dat parameter A minder toeneemt bij het toenemen van het vertrek criterium voor zeegang dan parameter B.

6.3.4 De faalkansen voor een variërende transportduur

Om te zien wat voor invloed de transportduur heeft op de faalkans is er ook gekeken naar de uren van transport van 22, 34 en 46 uur. In tabel 6.4 staan deze faalkansen per vertrek criterium voor zeegang, voor het vertrek criterium voor deining is hier gesteld dat de significante golfhoogte kleiner of gelijk is aan een meter, aangegeven. In bijlage XI staan de faalkansen als functie van de diverse vertrekcriteria grafisch weergegeven.

vertrek criterium zeegang [cm]	transportduur [uren]		
	22	34	46
200	$6,88 \cdot 10^{-6}$	$8,53 \cdot 10^{-6}$	$1,04 \cdot 10^{-5}$
250	$2,98 \cdot 10^{-5}$	$4,39 \cdot 10^{-5}$	$5,39 \cdot 10^{-5}$
300	$6,71 \cdot 10^{-5}$	$8,25 \cdot 10^{-5}$	$1,13 \cdot 10^{-4}$
350	$1,07 \cdot 10^{-4}$	$1,23 \cdot 10^{-4}$	$1,66 \cdot 10^{-4}$
400	$1,40 \cdot 10^{-4}$	$1,56 \cdot 10^{-4}$	$2,00 \cdot 10^{-4}$

tabel 6.4

Faalkansen als functie van de vertrekcriteria voor drie verschillende transportduren met als vertrek criterium voor deining $H_s \leq 100$ cm.

Te zien valt in deze tabel dat de faalkans ca. 1,6 maal groter wordt als de transportduur verdubbelt.

6.3.5 De gemiddelde wachttijd per transport

Aangezien de transportduur invloed zal hebben op de wachttijden en natuurlijk op het aantal transporten is er gekeken naar de wachttijden voor de drie eerder vermelde verschillende uren van transport. Tijdens de simulatie wordt er bijgehouden hoe vaak en hoe lang er gewacht moet worden om zo een inzicht te krijgen in de wachtpriodes. Na de gegevens geordend te hebben, zijn de "best fits" bepaald, op basis van de methode der kleinste kwadraten, die allemaal exponentieel verdeeld bleken te zijn volgens:

$$F(w) = e^{-\frac{w}{A}} \quad (6.1)$$

waarin:

w = de variabele aaneengesloten wachttijd;

A = de parameter van de exponentiële verdeling en is tevens de gemiddelde waarde.

De gemiddelde waarde van de exponentiële verdeling wordt dus gevonden door de parameter te bepalen. Hiermee is direct de gemiddelde wachttijd per transport afgeleid. De resultaten staan in bijlage XII. In tabel 6.5 staan de gemiddelde waarden voor de verwachtingswaarde van de transportduur van 34 uur.

vertrek- criterium	vertrekcriterium deining [cm]			
	25	50	75	100
zeegang [cm]	A	A	A	A
200	1001	33	23	20
250	588	19	12	8
300	410	14	9	6
350	-----	14	8	5
400	-----	-----	5	3

tabel 6.5

De gemiddelde aaneengesloten wachttijden per transport in uren per vertrekcriterium voor de verwachtingswaarde van de transportduur van 34 uur.

Opvallend in deze tabel is, dat de aaneengesloten wachttijd bij de overgang van het vertrekcriterium voor deining van 25 cm naar 50 cm enorm afneemt.

6.3.6 Het aantal mogelijke transporten

Het aantal mogelijke transporten, bij een gekozen vertrekcriterium, valt af te leiden uit de gemiddelde aaneengesloten wachttijd. Dit gebeurt door de totale simulatietijd te delen door de gemiddelde wachttijd per transport plus de transportcyclus, behorende bij de betreffende transportduur, en dit getal naar beneden af te ronden. In tabel 6.6 staat het aantal mogelijke transporten als functie van de verschillende vertrekcriteria voor de verwachtingswaarde van de transportduur van 34 uur, d.i. een transportcyclus van 72 uur.

vertrekcriterium	vertrekcriterium deining [cm]			
	25	50	75	100
zeegang [cm]				
200	2	28	31	32
250	4	32	35	36
300	6	34	36	37
350	--	34	36	38
400	--	--	38	39

tabel 6.6

Het aantal mogelijke transporten als functie van verschillende vertrekcriteria voor de verwachtingswaarde van de transportduur van 34 uur.

In bijlage XII staan ook het aantal mogelijke transporten voor een transportduur van 22 en 46 uur.

Vrij duidelijk te zien is, dat het aantal mogelijke transporten afhankelijk is van de aaneengesloten wachttijd (vergelijk tabel 6.5 met tabel 6.6).

6.3.7 De kans op transport als functie van de vertrekcriteria

Nu het verwachte aantal mogelijke transporten per vertrekcriterium bekend is alsmede het verwachte aantal keren wachten, de gemiddelde wachttijd is immers bekend, kan de kans op transport en dus de complementaire kans op wachten afgeleid worden via de binomiale kansverdeling. De binomiale kansdichtheidsverdeling ziet er als volgt uit:

$$f(t; n; p) = \binom{n}{t} \cdot p^t \cdot (1-p)^{n-t} \quad (6.2)$$

waarin:

- n = het totale aantal onafhankelijke beslissingen;
- t = het aantal keren transport;
- $n-t$ = het aantal keren wachten;
- p = de kans op succes, hier transport;
- $1-p$ = de kans op geen succes, hier wachten.

Daar waar de cumulatieve kansverdeling, dat is bij een binomiale verdeling een sommatie omdat er met gehele waarden gewerkt wordt, circa 0,5 is valt de kans op transport af te lezen. Dit is ook daar waar de kansdichtheid zijn maximale waarde heeft. De kansen op transport als functie van de vertrekcriteria staan in bijlage XII vermeld voor de verschillende duren van transport.

6.3.8 Toepassing wel of geen golfvoorspelling

Of het zinvol is een golfvoorspelling te doen voor significante golfhoogten die tijdens het zeetransport optreden en deze te toetsen, alvorens een beslissing te nemen om te transporteren of te wachten, blijkt pas als ook het als het ware nul-alternatief (hiermee wordt bedoeld dat er altijd getransporteerd wordt ongeacht de golfvoorspelling) wordt uitgewerkt. Hieruit komt dan naar voren of de optredende belastingen groter, kleiner dan wel gelijk zijn aan de belastingen die zullen optreden tijdens transport onder voorwaarde dat de golfvoorspelling van tevoren getoetst is. Om de belastingsverdeling vast te leggen met behulp van een kansverdeling zijn 10 runs uitgevoerd met het simulatieprogramma en zijn daarna de gemiddelden van de parameters berekend. Deze staan in tabel 6.7.

parameters	met golfvoorspelling	zonder golfvoorspelling
A	350,54	360,44
B	63,99	79,55

tabel 6.7

De parameters van de Gumbel verdeling van de belastingen met en zonder golfvoorspelling.

In bijlage XII staan beide kansdichtheden van de belastingsverdelingen, zowel met als zonder golfvoorspelling, weergegeven. Ook staan daarin de kansverdelingen en hun transformaties. Duidelijk is te zien dat de kansdichtheidsverdeling zonder golfvoorspelling een grotere spreiding heeft en dat de kansdichtheid met golfvoorspelling een soort afgeknotte versie is van de kansdichtheid zonder golfvoorspelling. Dit is goed zichtbaar in de staart van de verdeling en in de transformatie van de kansverdelingen.

6.4 Benodigde sterkte bij acceptabele faalkans

In paragraaf 6.3.1, in tabel 6.1, zijn de belastingsverdelingen bepaald voor elke combinatie van vertrekcriteria. De benodigde sterkte van het tunnelement tijdens transport per vertrek criterium kan nu berekend worden bij een acceptabele faalkans van $1,25 \cdot 10^{-5}$. In tabel 6.8 staan de benodigde sterkten van het tunnelement per vertrek criterium. De ontwerpsterkte van de Piet Hein tunnelementen is 1000 kN/m'. Te zien is dat, als voor een vertrek criterium voor de significante golfhoogte van zeegang beneden 2,5 meter gekozen wordt, deze ontwerpsterkte iets aangepast kan worden, ofwel dat het tunnelement iets lichter gedimensioneerd kan worden.

vertrek criterium	vertrek criterium deining [cm]			
zeegang [cm]	25	50	75	100
200	952	954	954	957
250	1032	1037	1044	1060
300	1070	1098	1104	1108
350	-----	1121	1139	1142
400	-----	-----	1146	1164

tabel 6.8

De benodigde sterkte van het tunnelement per vertrek criterium in kN/m' bij een acceptabele faalkans van $1,25 \cdot 10^{-5}$, als gebruik gemaakt wordt van een golfvoorspelling.

Zo kan, bij bijvoorbeeld een vertrek criterium voor zeegang van 2,0 meter en een vertrek criterium voor deining van 50 centimeter, 4,6 % ((1000-954)/1000) lichter gedimensioneerd worden.

7. Het beslissingscriterium

7.1 Inleiding

Voordat het sleeptransport zou kunnen vertrekken vanuit Vlissingen richting IJmuiden wordt de beslissing tot vertrek genomen op basis van een golfvoorspelling een transportduur vooruit. Als deze golfvoorspelling voldoet aan een gekozen vertrek criterium wordt er besloten uit te varen met het tunnelement. Is dit niet het geval dan wordt er een periode gewacht, totdat er een golfvoorspelling wel voldoet aan het vertrek criterium. Op deze manier is gekeken hoe vaak een tunnelement getransporteerd zou kunnen worden in een zomerperiode. De vraag is hoe het optimale vertrek criterium er uitziet, waarbij de acceptabele faalkans gedurende het transport niet overschreden wordt. Hoe milder het vertrek criterium des te hoger is de gemiddelde wachttijd. Bij een streng vertrek criterium is de gemiddelde wachttijd lager, maar is de kans op averij groter. De afweging om tot het optimale vertrek criterium te komen wordt gemaakt door de verwachtingswaarden van het risico op zowel wachten als transporteren te bepalen. Het risico is in dit geval de kans op kosten, hetzij door wachten hetzij door schade tijdens het transport, vermenigvuldigd met het gevolg, dit zijn de kosten.

7.2 Foutenboom voor het falen van het zeetransport

7.2.1 Bomen in het algemeen

De veiligheid van een technisch systeem wordt bedreigd door het potentiële optreden van verschillende bezwijkmechanismen. Ten einde te beoordelen in hoeverre het optreden van bepaalde grenstoestanden de veiligheid van het totale systeem in gevaar brengt, zijn er risico-analytische methoden ontwikkeld waaraan men de naam "bomen" geeft. Zo zijn er bijvoorbeeld gebeurtenissenbomen en foutenbomen als instrumenten van de risico-analyse.

7.2.2 Risico-analyse

De risico-analyse bestaat uit een aantal fasen die achtereenvolgens doorlopen worden. In de eerste fase vindt een beschrijving van de constructie als systeem plaats. De mate van gedetailleerdheid van de beschrijving wordt bepaald door de vereiste diepgang van de risico-analyse.

In de tweede fase tracht men door middel van brainstorm-technieken zicht te krijgen op alle mogelijke ongewenste begingebourtenissen die de goede werking van het systeem zouden kunnen beïnvloeden. De normale analyses van alle grenstoestanden maar ook ervaring met andere soortgelijke problemen kan een steun zijn. Geheel volledig wordt het overzicht natuurlijk niet, daarvoor zijn bepaalde oorzaken als bijvoorbeeld oorlog of sabotage er niet bij inbegrepen. Tevens onderzoekt men in deze fase alle mogelijke reacties van het systeem op elke ongewenste begingebourtenis, de zogenaamde respons. Het instrument hiervoor is de gebeurtenissenboom, die op logische wijze het verband vastlegt tussen één begingebourtenis en alle mogelijke daaropvolgende reacties van het systeem.

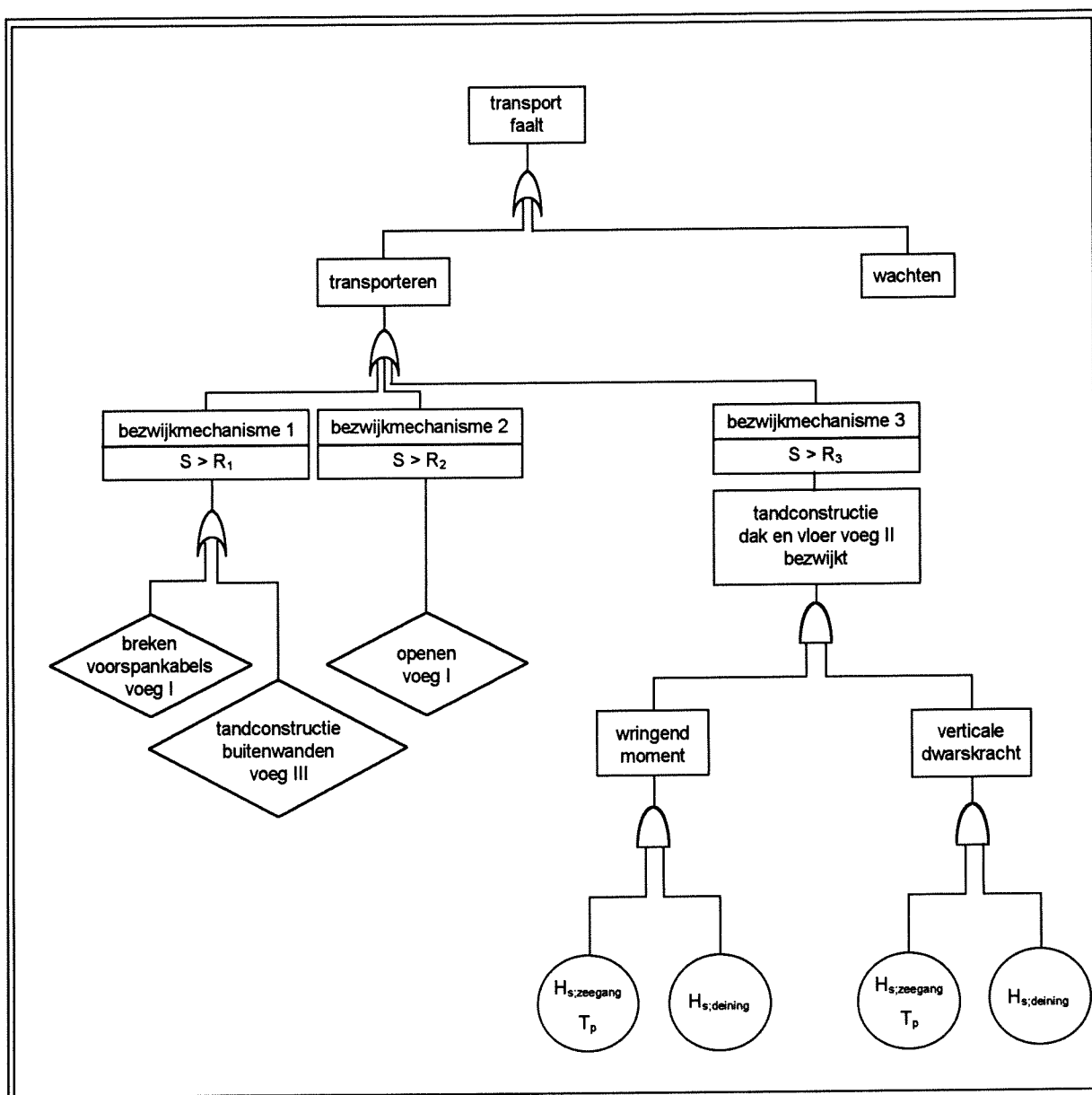
In de derde fase wordt bestudeerd op welke wijzen de meeste ongewenste reacties van het systeem tot stand kunnen komen. In feite worden de meest ongunstige takken van de gebeurtenissen verenigd tot één boom: de foutenboom is dus een schematische weergave van de logische opeenvolging van alle gebeurtenissen, die leiden tot één zeer ongewenste reactie van het systeem, bijvoorbeeld falen. Deze ongewenste reactie staat meestal boven

aan de boom en wordt "topgebeurtenis" genoemd. Voor iedere topgebeurtenis dient dus een aparte foutenboom te worden opgesteld.

In de laatste fase van de risico-analyse tracht men de kans op het optreden van de ongewenste topgebeurtenis te berekenen. Daartoe worden eerst de kansen op het optreden van diverse begingebourtenissen vastgesteld. Dit gebeurt door middel van niveau II of III berekeningen. Tot slot wordt middels de waarschijnlijkheidsleer de kans op falen van het gehele systeem vastgesteld, zie [3].

7.2.3 De foutenboom

In figuur 6.1 staat de foutenboom met als topgebeurtenis het falen van het tunneltransport, d.w.z. dat het transport òf moet wachten òf doorgaat maar er gebeurt wat onderweg. De foutenboom is hier een instrument voor een faalkans-analyse, een a.h.w. beperkte faalkans-analyse daar niet alle mogelijke optredende gebeurtenissen meegenomen zijn.



figuur 7.1
De foutenboom voor het falen van het tunneltransport.

De basisgebeurtenissen of begingebuurtenissen zijn het simultaan optreden van golfhoogten, èn van zeegang met bijbehorende piekperiode èn van deining met een vast gekozen periode. Deze basisgebeurtenissen leveren twee samengestelde gebeurtenissen op, het optreden van wringende momenten en verticale dwarskrachten. Als deze krachten een zekere waarde overschrijden zal het tunneltransport falen. Deze krachten veroorzaken het maatgevende bezwijkmechanisme 3, het bezwijken van de tandverbinding in het dak en de vloer. Dit bezwijkmechanisme is één van de mechanismen die kan optreden. De andere twee mechanismen worden zoals eerder vermeld buiten beschouwing gelaten.

7.3 Beslissingsboom voor het vertrek van het zeetransport

7.3.1 Beslissingstheorie in het algemeen

Men ontmoet vaak een probleem dat uit een aantal mogelijke acties, handelwijzen, ontwerpen e.d. er één moet worden gekozen. Deze keuze moet meestal al gemaakt worden terwijl men nog in onzekerheid verkeert omtrent de omstandigheden waaronder de gekozen actie dient te worden ondernomen. Het resultaat van de gekozen actie is mede afhankelijk van de omstandigheden waaronder de actie wordt ondernomen. Bij de analyse van een beslissingsprobleem kan men de volgende bouwstenen onderscheiden:

1. De acties waarvan de besluitvormer er één moet kiezen.
2. De omstandigheden waaronder de actie ten uitvoer wordt gebracht. Op het moment dat de besluitvormer zijn actie kiest is hij niet precies op de hoogte van de toestand van de natuur. Deze omstandigheden worden later pas bekend.
3. De uitkomst van het te nemen resultaat. De uitkomst wordt bepaald door de gekozen actie en de heersende omstandigheden, de toestanden van de natuur. De besluitvormer probeert zijn actie zodanig te kiezen dat de uitkomst zo aantrekkelijk mogelijk is.

De besluitvormer moet in staat zijn zijn voorkeur tussen de diverse mogelijke uitkomsten uit te spreken. Zijn voorkeur wordt gemeten op een numerieke schaal, het nut. Vaak wordt hier de voorkeur uitgedrukt op basis van hun geldwaarde.

7.3.2 Een beslissing op grond van verwachtingswaarden

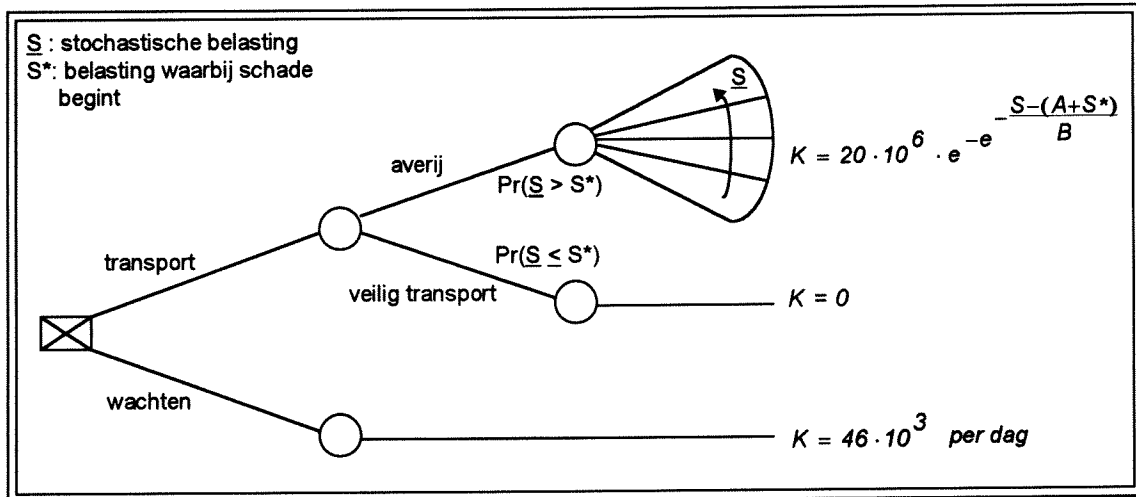
Om in een situatie een rationeel besluit te kunnen nemen moeten naast de alternatieve acties, de reacties van de natuur en een numerieke maat voor de uitkomst ook de kansen op de toestanden der natuur gegeven zijn. Er kan van elke tak van de beslissingsboom de verwachtingswaarde worden berekend. Vervolgens kan door van achteren af "takken te kappen" de verwachtingswaarde van elk alternatief besluit worden vastgesteld. Intuïtief is duidelijk dat men kiest voor het alternatief met het hoogste verwachte resultaat. In figuur 6.2 staat de beslissingsboom met als acties:

- transporteren;
- wachten.

De reacties van de natuur zijn:

- golven die leiden tot te hoge belastingen, waardoor schade ontstaat;
- golven die niet leiden tot te hoge belastingen.

Lang niet altijd zijn de mogelijke toestanden van de natuur beperkt tot een eindig aantal discrete waarden, zoals hier het geval is. De reactie van de natuur is namelijk een continue toestand. De onzekerheid rond de stochastische belasting S wordt aangeduid met het feit dat deze belasting een kansverdeling heeft. Nu is het zaak een vertrek criterium te bepalen zodanig dat er een optimum verkregen wordt tussen de verwachte schadekosten en de wachtkosten.



figuur 7.2
De beslissingsboom voor het zeetransport-probleem.

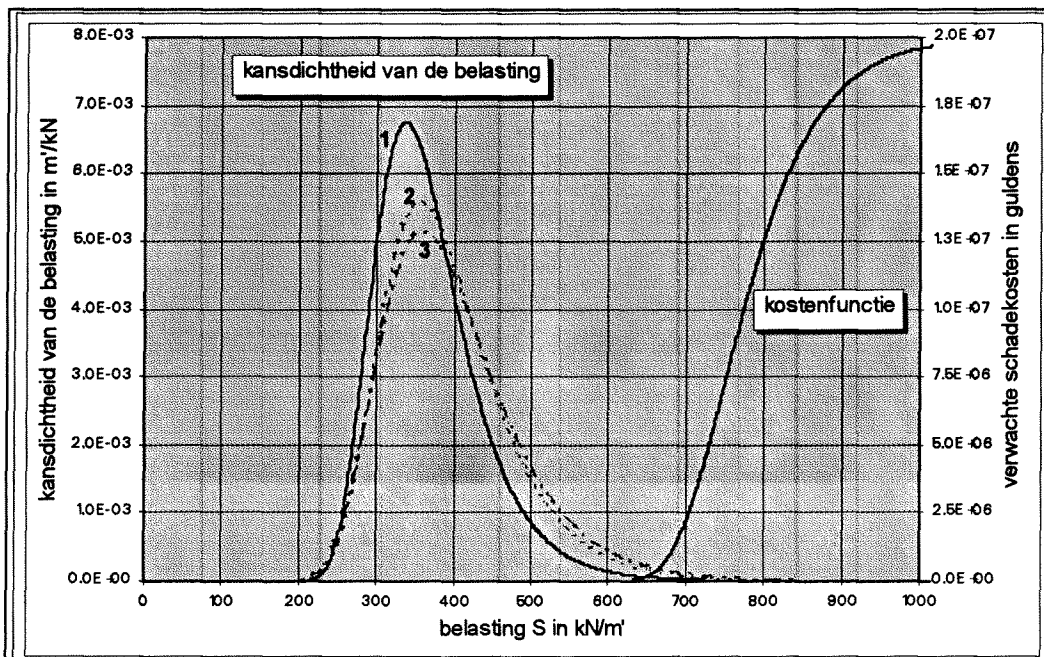
De verwachtingswaarde van de transportkosten, dit zijn extra kosten door het oplopen van schade tijdens het zeetransport doordat de belasting S groter is dan een zekere belasting S^* waarbij het begin van schade wordt gedefinieerd, is als volgt te berekenen:

$$E\{K\} = \int_{S^*}^{\infty} f_{crit}(S) \cdot K(S) dS \tag{7.1}$$

waarin:

- $f_{crit}(S)$ = de Gumbel kansdichtheidsverdeling van de belasting als functie van het vertrek criterium;
- $K(S)$ = de kosten aan schade tijdens transport als functie van de belasting S .

In figuur 7.3 is de integraal uit formule 7.1 grafisch afgebeeld, met daarin de belastingsverdelingen van verschillende vertrekcriteria.



figuur 7.3

Vershillende kansdichtheden van de belasting als functie van vertrekcriteria en de kostenfunctie uitgezet tegen de belasting. Met:

1. Vertrek criterium zeegang ≤ 200 cm en vertrek criterium deining ≤ 25 cm;
2. Vertrek criterium zeegang ≤ 300 cm en vertrek criterium deining ≤ 50 cm;
3. Vertrek criterium zeegang ≤ 400 cm en vertrek criterium deining ≤ 100 cm.

In deze figuur is te zien dat naarmate het vertrek criterium strenger wordt, van 3 naar 1, dat de top van de belastingsverdeling naar links verschuift en de spreiding van de belastingen afneemt.

De verwachtingswaarde van de wachtkosten is gelijk aan de huurkosten van de twee sleepboten, die moeten wachten tot er wel vertrokken kan worden.

7.3.3 Verwachtingswaarde van kosten aan schade t.g.v. transport

De verwachte schadekosten, die ontstaan doordat er tijdens transport te hoge golven en dus te hoge belastingen optreden, zijn te berekenen met behulp van de integraal van formule 7.1. Een probleem dat hierbij onstaat zijn de exacte kosten aan schade als functie van de optredende belastingen tijdens transport. Uitgangspunt is dat het begin van schade ligt bij een S^* van 400 kN/m'. De schade zal maximaal de totale kosten van het tunnelelement bedragen plus de kosten door vertraging van het project. Hier is globaal twintig miljoen gulden voor aangenomen. Maximale schade wil zeggen dat het element op dat moment volledig bezweken c.q. verloren is. Deze schadekosten lopen bij lage belastingen langzaam op en nemen daarna, vanaf circa 700 kN/m', vrij snel toe. De schadekosten-functie is een constant getal maal de kans op schade als functie van de belastingen, die tijdens transport kunnen optreden. Deze schadeverdeling is dezelfde als de belastingsverdeling (Gumbel verdeling) waarvan de parameters staan in paragraaf 6.3.8, tabel 6.7 onder de kop "wel toepassing van golfvoorspelling". De kostenfunctie wordt dan:

$$K(S) = 20 \cdot 10^6 \cdot e^{-e^{-\frac{S-(A+400)}{B}}} \quad (7.2)$$

waarin:

- S = de totale belasting tijdens transport in het tunnelement in kN/m';
 A = parameter van de Gumbel verdeling van de belastingen met golfvoorspelling (350,54 kN/m', zie tabel 6.7);
 B = parameter van de Gumbel verdeling van de belastingen met golfvoorspelling (63,99 kN/m', zie tabel 6.7).

De kostenvergelijking is voordelig aangezien er pas schadekosten zullen zijn wanneer de belasting groter is dan de belasting waarbij schade begint, ofwel geldt formule 7.2 voor $S > S^*$.

7.3.4 Verwachtingswaarde van kosten t.g.v. wachten

De kosten die het gevolg zijn van het niet doorgaan van het transport op een tijdstip zijn de wachtkosten. Deze wachtkosten zijn constante kosten per tijdseenheid. De aanname is dat de wachtkosten de huurkosten zijn van twee sleepboten, elk met 60 ton trekkracht. Eén sleepboot kost per dag ongeveer fl. 23.000,- inclusief brandstof en bemanning (Bron: telefoongesprek met Smit-Tak). Dit komt in totaal neer op fl. 46.000,- per dag of op ca. fl. 1917,- per uur dat er gewacht moet worden.

7.3.5 Analytische uitwerking van optimaal vertrek criterium

Om tot het optimale vertrek criterium te komen, waarbij het zeetransport van een tunnelement door kan gaan, moet voor elk vertrek criterium de beslissingsboom doorlopen worden. Per vertrek criterium moet het risico van transport versus het risico van wachten uitgezet worden. Risico staat in dit geval voor de verwachte totale kosten:

- het risico van transport is, zie ook formule 7.1:

$$r_{transport} = \int_{S^*}^{\infty} f_{crit}(S) \cdot K(S) dS \quad (7.3)$$

- het risico van wachten is:

$$r_{wachten} = w \cdot WK \quad (7.4)$$

waarin:

w = de aaneengesloten wachttijd.

In tabel 7.1 en 7.2 staan de verwachte totale kosten per vertrek criterium van respectievelijk transporteren en wachten weergegeven. In bijlage XIII staan de risico's tegen elkaar uitgezet in grafieken. Hierin is te zien dat naarmate het vertrek criterium voor deining toeneemt van 25 cm tot 100 cm het punt waarbij de wachtkosten gelijk zijn aan de schadekosten door te transporteren naar links verschuift, hetgeen wil zeggen dat bij deze toename van het vertrek criterium voor deining het vertrek criterium voor zeegang afneemt.

vertrek criterium zeegang [cm]	vertrek criterium deining [cm]			
	25	50	75	100
200	10890	11970	12170	12490
250	25540	28720	30850	35480
300	35360	48300	51020	52490
350	-----	57420	65600	66910
400	-----	-----	68280	77890

tabel 7.1 De verwachte totale schadekosten door transporteren in guldens per vertrek criterium.

vertrek criterium zeegang [cm]	vertrek criterium deining [cm]			
	25	50	75	100
200	1918583	63250	44083	38333
250	1127000	36417	23000	15333
300	785833	26833	17250	11500
350	-----	26833	15333	9583
400	-----	-----	9583	5750

tabel 7.2 De verwachte kosten door wachten in guldens per vertrek criterium.

In de tabellen 7.1 en 7.2 is te zien dat bij een vertrek criterium van zeegang kleiner of gelijk aan 2,0 meter de verwachte totale schadekosten door transport altijd lager zijn dan de verwachte wachtkosten, mits het vertrek criterium natuurlijk kleiner is dan 1,0 meter.

8. Conclusies en aanbevelingen

8.1 Conclusies

8.1.1 Conclusies m.b.t. het golfklimaat

Het golfklimaat is voor alle relevante variabelen, te weten de significante golfhoogte van zeegang, de significante golfhoogte van deining en de piekperiode van zeegang, vastgelegd door kansverdelingen te bepalen middels het fitten van de lange termijn waarnemingen. Deze kansverdelingen zijn vastgelegd door verdelingsparameters, die geschat zijn met behulp van lineaire regressie.

De "best fits" voor de significante golfhoogten van deining voldoen op het eerste gezicht niet goed, zie bijlage II. Dit komt ook direct tot uiting in de transformaties van de gefitte verdelingen. Er wordt voor dit onderzoek echter gekeken naar de werkbaarheid, en niet naar de extreme waarden. In die zin zijn de grote afwijkingen van de best fits voor de golfhoogte-waarnemingen voor hoge significante golfhoogten van deining, dit zijn de golfhoogten groter dan 1,0 meter, niet zozeer van belang.

De "best fits" voor de significante golfhoogten van zeegang voldoen op het eerste gezicht wel redelijk, zie bijlage III. Bij de maanden mei, augustus maar vooral juli overschatten de gekozen verdelingen de golfhoogte-waarnemingen enigszins.

De "best fits" voor de piekperioden van zeegang voldoen ook redelijk, zie bijlage IV. De gekozen verdelingen overschatten de lagere piekperioden in het gebied tot ca. 4,5 seconden en bij de maanden mei en augustus de hogere piekperioden in het gebied van 6 tot ca. 8 seconden.

Voor de Monte Carlo simulatie voor het random genereren van waarden uit deze verdelingen zijn de best fits goed te gebruiken.

8.1.2 Conclusies m.b.t. de resultaten van het simulatieprogramma

Een aantal conclusies met betrekking tot de faalkansen die volgen uit de resultaten van het simulatieprogramma zijn:

- Als gekeken wordt naar het overschrijden van de acceptabele faalkans voor verschillende vertrekcriteria, zie bijlage X^A en X^B , moet het vertrek criterium qua zeegang tussen de 2,10 en 2,20 meter liggen.
- Als naar de transportduur gekeken wordt, zie bijlage X^C , ligt het vertrek criterium voor zeegang tussen 2,05 en 2,20 meter, mits het vertrek criterium voor deining kleiner of gelijk is aan 1,0 meter.
Als de transportduur circa twee maal zo lang wordt neemt de faalkans met een factor van ca. 1,6 toe.

Conclusies met betrekking tot de wachttijden bij verschillende transportduren zijn:

- De gemiddelde wachttijd per transport neemt toe naarmate de transportduur langer wordt, zoals te verwachten was.
- De kans op wachten neemt toe naarmate het vertrek criterium strenger wordt.

Conclusies die getrokken kunnen worden uit het gemiddeld aantal transporten zijn:

- Het minimaal benodigd aantal transporten van acht transporten kan eenvoudig behaald worden als voor een vertrek criterium voor deining van 50 cm of meer wordt gekozen. Dit

geldt voor zowel de gemiddelde transportduur als voor de te verwachten minimale en maximale transportduur.

Conclusies met betrekking tot de ontwerpsterkte:

- De ontwerpsterkte van het Piet Hein tunnelelement tijdens transport zou nog iets aangepast kunnen worden tot een sterkte van minimaal 952 kN/m', als gekozen wordt te vertrekken bij een golfvoorspelling voor de significante golfhoogte van zeegang van 2,0 meter en voor een significante golfhoogte van deining van 0,25 meter, zie § 6.4.

8.1.3 Conclusies m.b.t. het beslissingscriterium

Conclusies die uit het beslissingscriterium getrokken worden zijn:

- Op basis van de vergelijking tussen de verwachtingswaarden van de totale schadekosten en de wachtkosten blijkt dat bij een vertrek criterium voor de significante golfhoogte van deining dat kleiner of gelijk is aan 0,25 meter het tunnelelement altijd getransporteerd zou kunnen worden, zie bijlage XIII. Bij een vertrek criterium voor deining van 0,50 meter geldt dat het maximale vertrek criterium voor de significante golfhoogte van zeegang maximaal circa 2,60 meter mag bedragen. Bij een vertrek criterium voor deining van 0,75 meter geldt dat het maximale vertrek criterium voor zeegang maximaal circa 2,40 meter mag bedragen, en bij een vertrek criterium voor deining van 1,00 meter geldt dat het maximale vertrek criterium voor zeegang maximaal circa 2,30 meter mag bedragen, zie ook bijlage XIII.

8.1.4 Eindconclusies

Uit het gehele onderzoek kunnen de volgende eindconclusies getrokken worden:

- Door een golfvoorspelling van 34 uur vooruit toe te passen wordt bij een vaarvenster van 2,00 meter significante golfhoogte voor zeegang en circa 50 centimeter significante golfhoogte voor deining de acceptabele faalkans van $1,25 \cdot 10^{-5}$ tijdens het maritiem transport onderschreden, namelijk $8,0 \cdot 10^{-6}$, en zijn er ongeveer 28 transporten met een tunnelelement mogelijk. Deze tunnelelementen hebben dan een ontwerpsterkte van 1000 kN/m', gelijk aan het Piet Hein tunnelontwerp, zie bijlage X^A en XI^B.
- Men zou ook de voorkeur kunnen hebben voor hetzelfde vaarvenster maar met een "exacte" faalkans van $1,25 \cdot 10^{-5}$, zodat de sterkte van het tunnelelement gedurende het transport maar maximaal 954 kN/m' hoeft te bedragen. Hierdoor kan de ontwerpsterkte met circa 4,6 % verlaagd worden.

8.2 Aanbevelingen

8.2.1 Aanbevelingen m.b.t. het golfklimaat

- Voor het vastleggen van het golfklimaat op de Noordzee vlak voor de Nederlandse kust zijn golfgegevens gebruikt van het meetstation IJmuiden omdat deze een bovengrens levert voor de optredende golven langs de transportroute. Het zou nuttig kunnen zijn een evaluatie te maken voor de andere meetstations, die op de transportroute liggen, om te kijken of er inderdaad enig verschil is in de waarnemingen.
- Er zijn meetgegevens gebruikt van dertien jaar opeenvolgend, meer jaren zullen uiteindelijk een nog beter beeld geven.
- Om de piekperiode te bepalen is een factor gebruikt van 1,26 maal de nuldoorgangperiode. Onderzocht zou kunnen worden of deze factor invloed heeft op de optredende belastingen tijdens transport.

- De statistische onzekerheid van de berekende verdelingsparameters is in dit onderzoek niet meegenomen. Ook naar deze onzekerheid kan nader onderzoek gedaan worden.

8.2.2 Aanbevelingen m.b.t. de simulatie

- In het simulatieprogramma is de verdeling van de transportduur niet meegenomen maar zijn voor drie verschillende duren van transport de faalkansen en wachttijden berekend. Het is vrij eenvoudig om een randomgenerator voor de transportduur te implementeren in het simulatieprogramma, echter de verdeling van de transportduur moet dan wel bekend zijn. Dit zal dus nader geanalyseerd moeten worden.
- Tevens dient er nader onderzoek verricht te worden naar de persistentie van de golven. In dit onderzoek is aangenomen dat de golfhoogte-waarnemingen om de zes uur onafhankelijk zijn. De vraag is wat er gebeurt als men kiest voor onafhankelijke zeetoestanden van drie uur.
- De betrouwbaarheidsfunctie, die voor een nivo II methode (AFDA) wordt gebruikt, zie § 3.7, dient nader geanalyseerd te worden op zowel de sterkte als de belasting. Voor de verdeling van de aangenomen ontwerpsterkte is in dit onderzoek een standaard deviatie van 50 kN/m' aangenomen. Voor het bepalen van de belastingsverdeling zijn 10 runs gedaan met het simulatieprogramma. Wat voor invloed zou het hebben op de verdelingsparameters van de belasting als nog eens tien runs gedaan zouden worden of als meer runs in één keer gedaan zouden worden? Heeft dit uiteindelijk veel of weinig invloed op de faalkans?

8.2.3 Aanbevelingen m.b.t. het beslissingscriterium

- Voor het bepalen van het optimale vertrekcriterium is een begin van schade aangenomen c.q. gedefinieerd. Wanneer treedt schade precies op en wat wordt onder schade aan het tunnelelement tijdens transport verstaan? Het verdient aanbeveling om hier verder naar te kijken.
- Ook moet er gekeken worden naar wat de totale schadekosten zullen zijn bij volledig verlies van een tunnelelement. Deze zullen enorm zijn aangezien een nieuw tunnelelement gefabriceerd moet worden en ook de vertraging van het totale bouwproject hierin meegenomen moet worden.

LITERATUURLIJST

- [1] Nota GWAO-88.046 "Golfklimaten voor de Nederlandse kust" van A.P. Roskam, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, 21 november 1988.
 - [2] Dictaat F30 "Probabilistisch ontwerpen in de waterbouwkunde" van Prof. drs. ir. J.K. Vrijling, Faculteit der Civiele Techniek T.U. Delft, Vakgroep Waterbouwkunde, Sectie Waterbouwkunde, voorlopige uitgave november 1995.
 - [3] Dictaat B3 "Probabilistisch ontwerpen" van ir. A.C.W.M. Vrouwenvelder en Ir. J.K. Vrijling, Faculteit der Civiele Techniek T.U. Delft, Vakgroep Mechanica en Constructies, Sectie Toegepaste Mechanica, 5^e herdruk september 1987.
 - [4] Dictaat B78 "Windgolven" van Prof. dr. ir. J.A. Battjes, Faculteit der Civiele Techniek T.U. Delft, Vakgroep Waterbouwkunde, november 1992.
 - [5] Dictaat B76 "Korte Golven", Faculteit der Civiele Techniek, T.U. Delft, Vakgroep Waterbouwkunde, januari 1993.
 - [6] Werkdocument "De opbouw van datafiles voor golfklimatologie in HYDRA" van A.P. Roskam, nummer RIKZ/OS-94.152x, 21 december 1994.
 - [7] General Wave Spectrum Model, Prof. drs. ir. J.K. Vrijling, Rijkswaterstaat Bouwspeurwerk, BSW nr. 90-13, september 1990.
 - [8] Dictaat A 106 "Statistiek en Operationele Analyse" van dr. T. Bedford, cursusjaar 1993-1994.
 - [9] Appendix 2 "Failure mechanisms of a tunnel element due to wave induced loads" van De Weger Architects and Consulting Engineers, november 1993.
 - [10] "Offshore transport Piet Hein tunnel elements; Risk of failure due to wave action at North Sea" van De Weger Architects and Consulting Engineers, project nr. 902, december 1994.
 - [11] Symposium "Zeetransport zinkelementen Wijker- en Piet Heintunnel" van het KIVI, afdeling Tunneltechniek en Ondergrondse Werken, 10 oktober 1995.
 - [12] Afstudeeronderzoek "Transport van tunnelelementen over zee" van R.R. Kuiper, april 1993, Faculteit der Civiele Techniek, Vakgroep Waterbouwkunde, Sectie Waterbouwkunde.
-

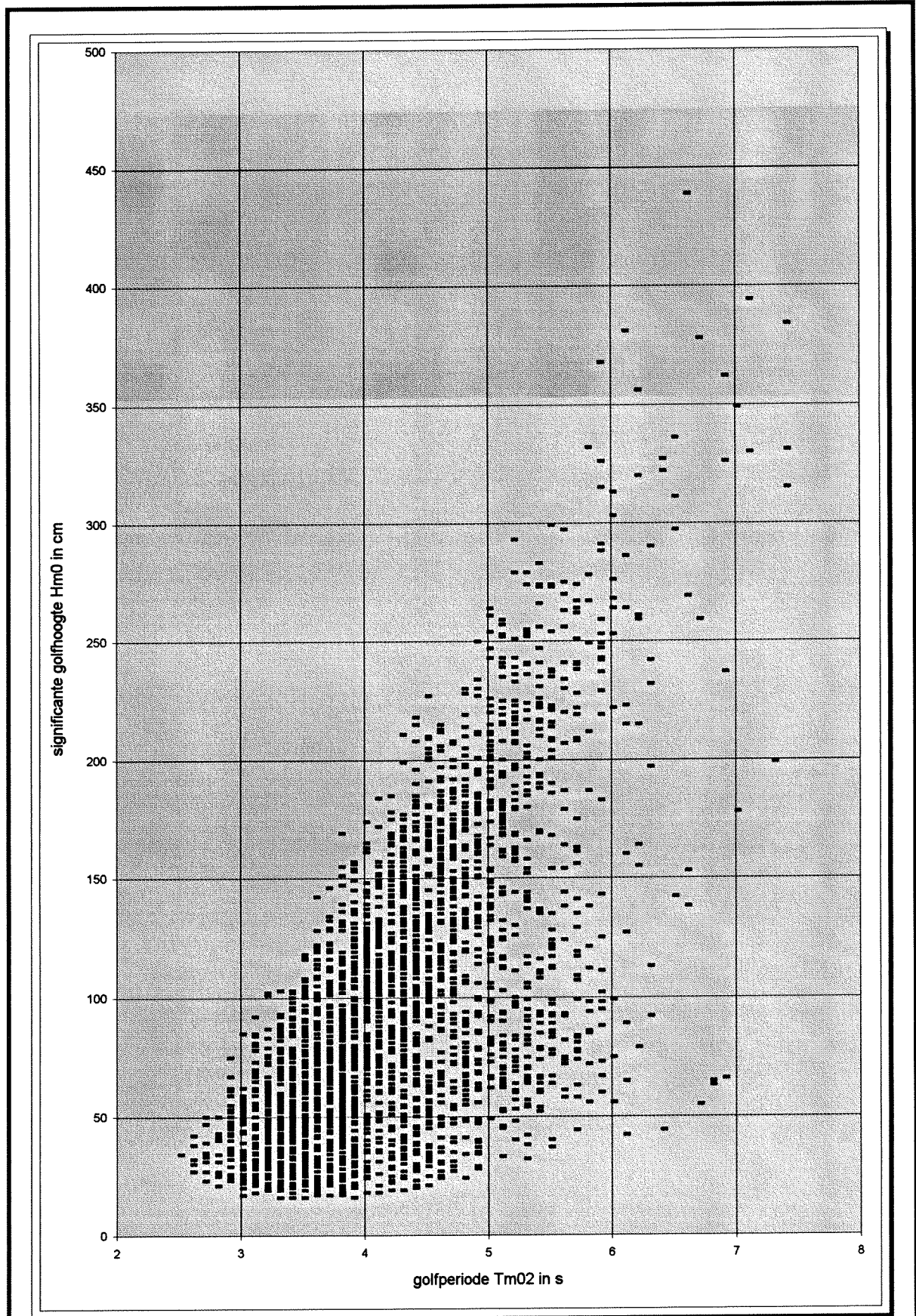


BIJLAGEN

- I Scatterplot van de significante golfhoogte H_{m0} versus golfperiode T_{m02} .
 - II^A Kansverdelingen en transformaties van deining van de maanden mei en juni.
 - II^B Kansverdelingen en transformaties van deining van de maanden juli en augustus.
 - III^A Kansverdelingen en transformaties van zeegang van de maanden mei en juni.
 - III^B Kansverdelingen en transformaties van zeegang van de maanden juli en augustus.
 - IV Kansverdelingen van de piekperiode van de zomermaanden.
 - V Kansverdelingen van de piek golfsteilheid van de zomermaanden.
 - VI De overdrachtsfuncties.
 - VII De betrouwbaarheidsfunctie Z.
 - VIII De transportroute over de Noordzee.
 - IX Het simulatieprogramma.
 - X^A Faalkansen en parameters.
 - X^B Faalkansen voor verschillende vertrekcriteria.
 - X^C Faalkansen voor verschillende transportduren.
 - XI^A Wachtijd-analyse: transportduur van 22 uur.
 - XI^B Wachtijd-analyse: transportduur van 34 uur.
 - XI^C Wachtijd-analyse: transportduur van 46 uur.
 - XII Verdelingen van de belastingen met en zonder golfvoorspelling.
 - XIII Beslissing op basis van de totale verwachte kosten.
-

BIJLAGE I

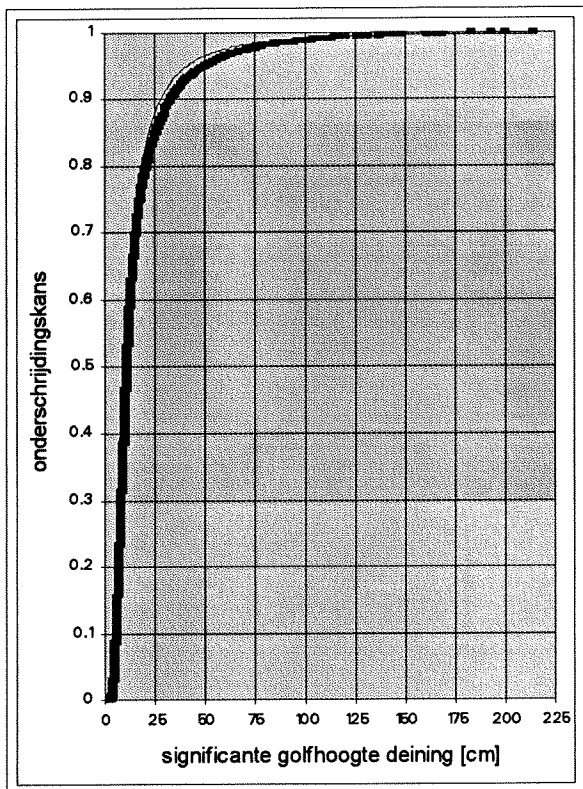
Scatterplots van de significante golfhoogte Hm0 versus de golfperiode Tm02



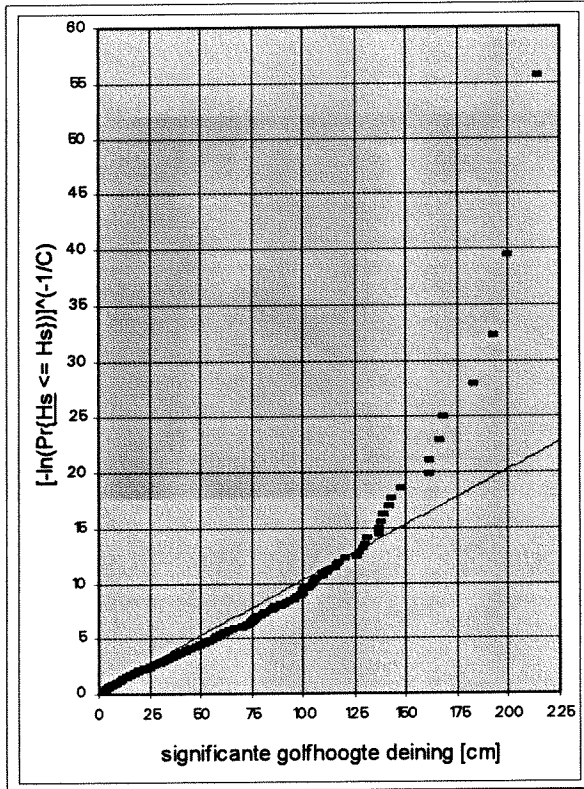
Scatterplot van de significante golfhoogte Hm0 versus de nuldoorgangs-golfperiode Tm02 van mei t/m augustus 1979-1991

BIJLAGE II^A

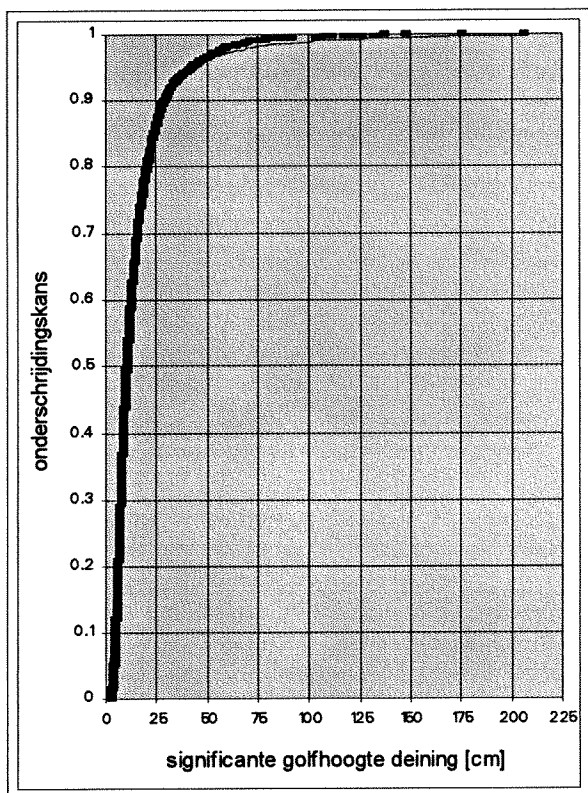
Kansverdelingen en transformaties van deining van de maanden mei en juni



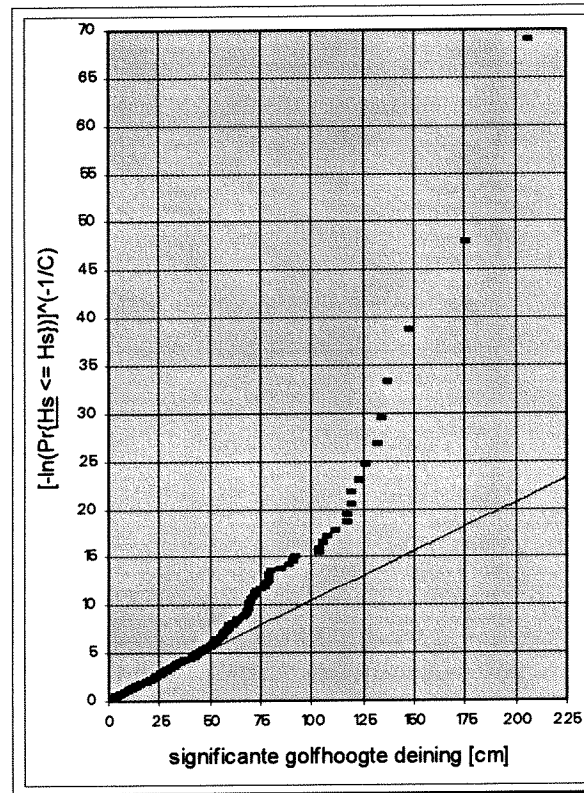
Frechet verdeling van de maand mei
 parameters: A = -2,88 cm
 B = 10,00 cm
 C = 2,01



Transformatie Frechet verdeling mei
 Gemiddelde = 15,0 cm
 Standaard deviatie = 29,1 cm



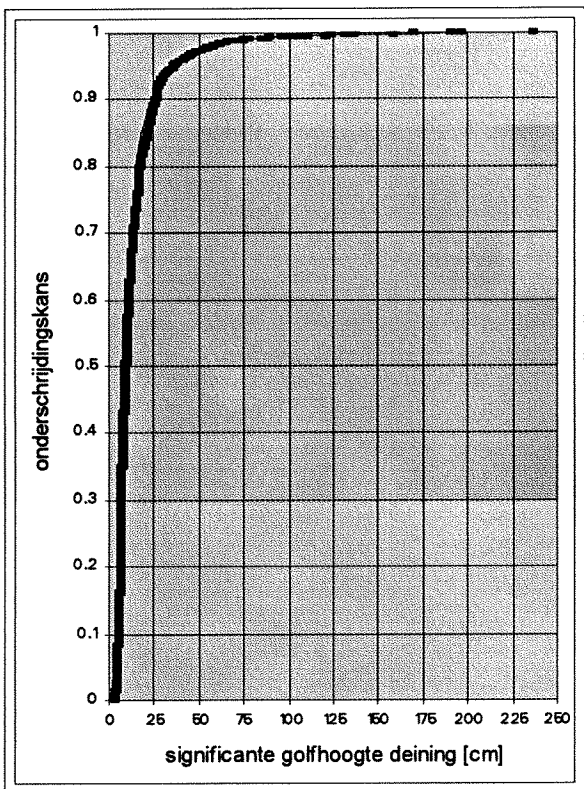
Frechet verdeling van de maand juni
 parameters: A = -3,22 cm
 B = 9,80 cm
 C = 1,90



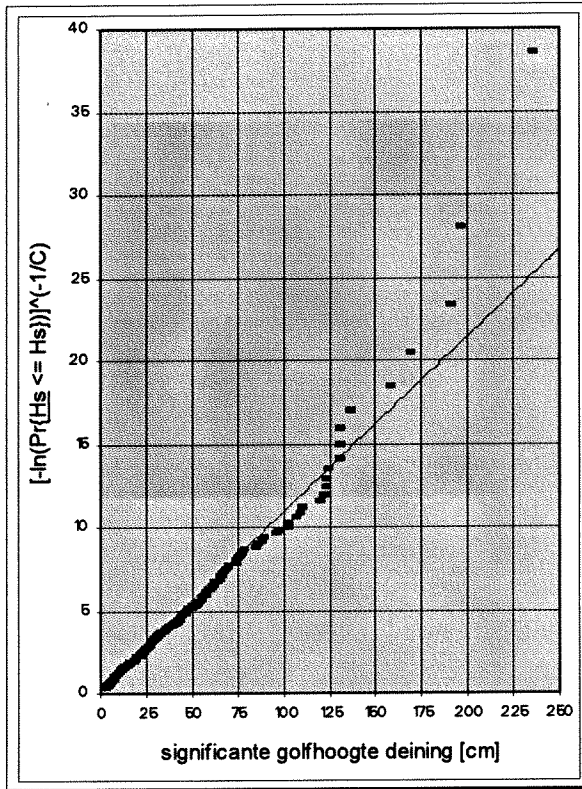
Transformatie Frechet verdeling juni
 Gemiddelde = 15,3 cm
 Standaard deviatie = 34,4 cm

BIJLAGE II^B

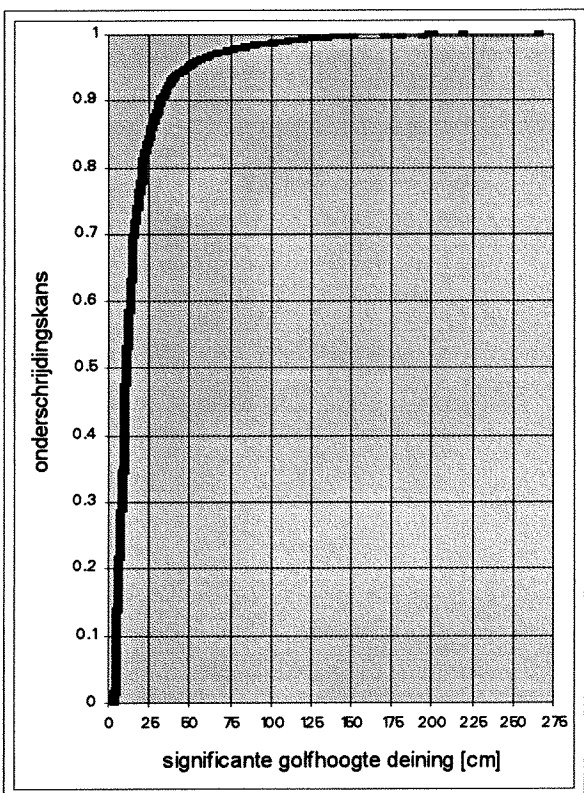
Kansverdelingen en transformaties van deining van de maanden juli en augustus



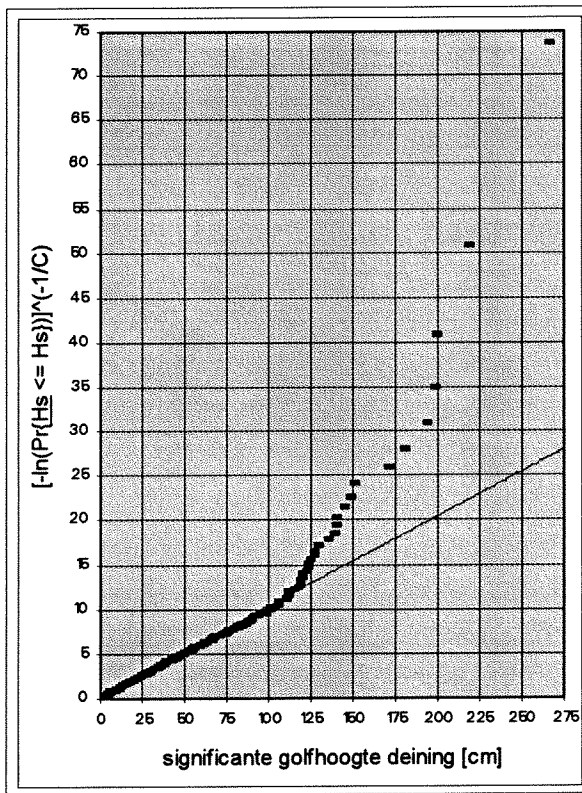
Frechet verdeling van de maand juli
parameters: A = -3,79 cm
B = 9,50 cm
C = 2,19



Transformatie Frechet verdeling juli
Gemiddelde = 11,9 cm
Standaard deviatie = 20,9 cm



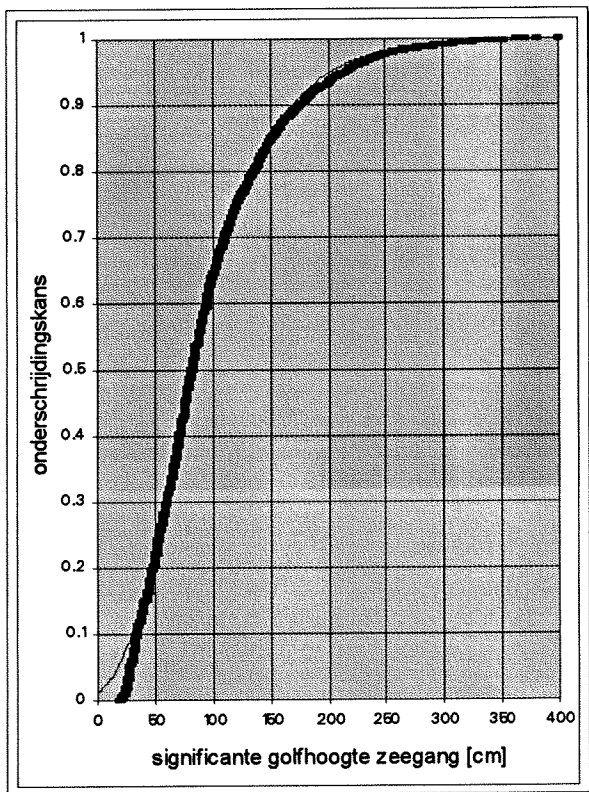
Frechet verdeling van de maand augustus
parameters: A = -3,26 cm
B = 9,93 cm
C = 1,86



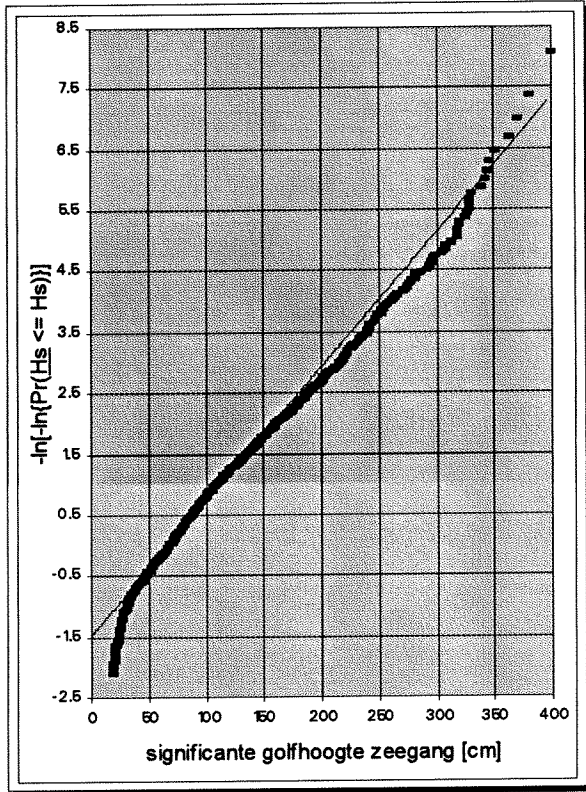
Transformatie Frechet verdeling augustus
Gemiddelde = 15,9 cm
Standaard deviatie = 37,4 cm

BIJLAGE III^A

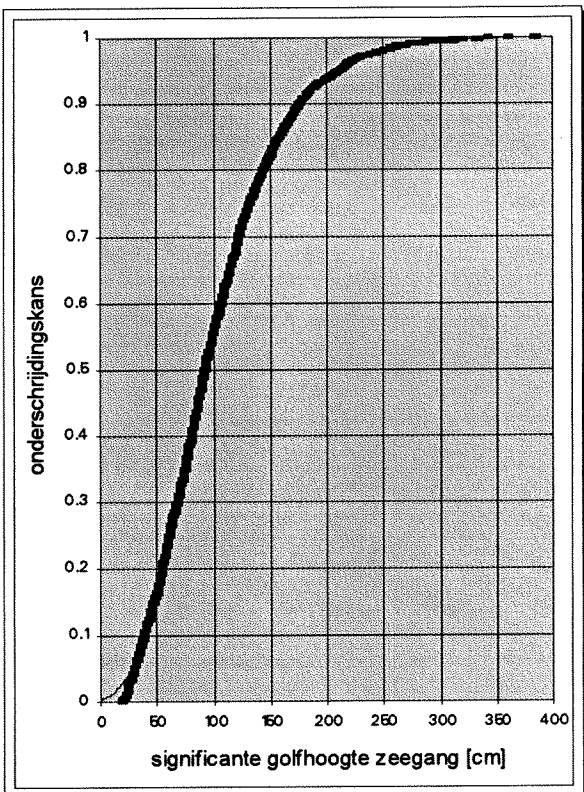
Kansverdelingen en transformaties van zeegang van de maanden mei en juni



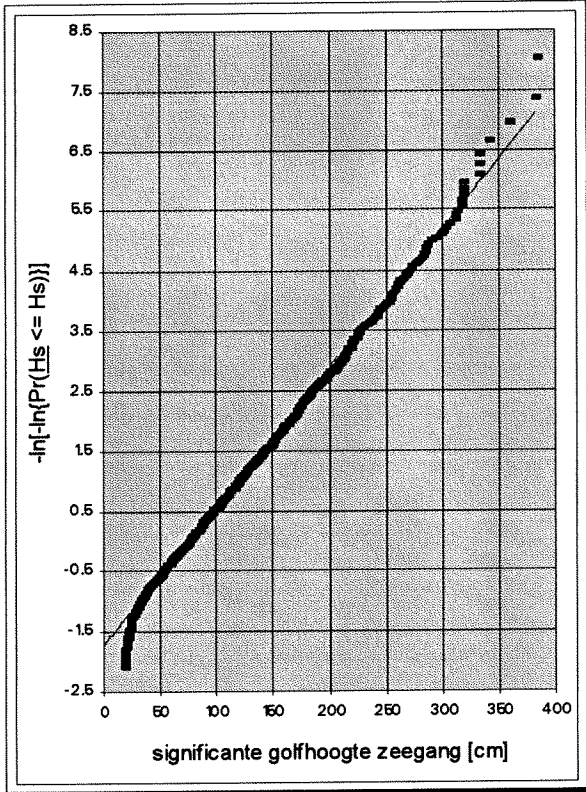
Gumbelverdeling van de maand mei
parameters: A = 67,00 cm
B = 45,36 cm



Transformatie Gumbelverdeling van mei
Gemiddelde = 93,3 cm
Standaard deviatie = 57,0 cm



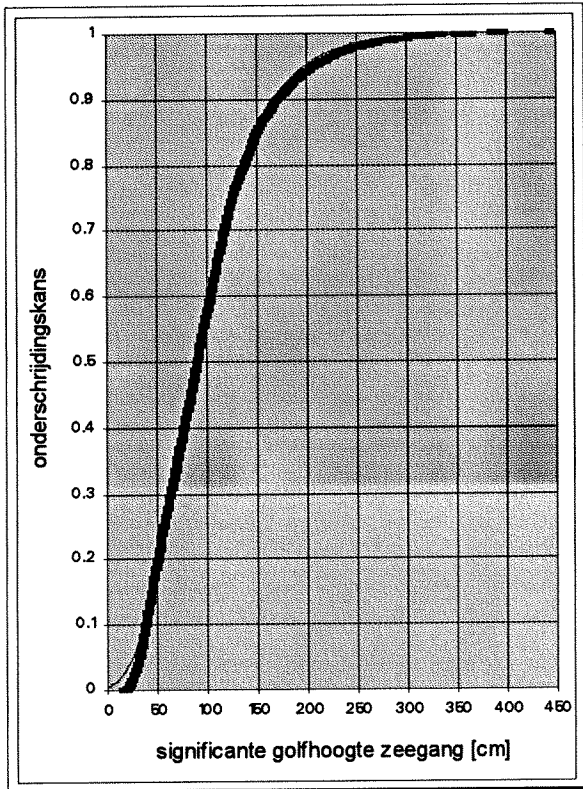
Gumbelverdeling van de maand juni
parameters: A = 74,28 cm
B = 43,41 cm



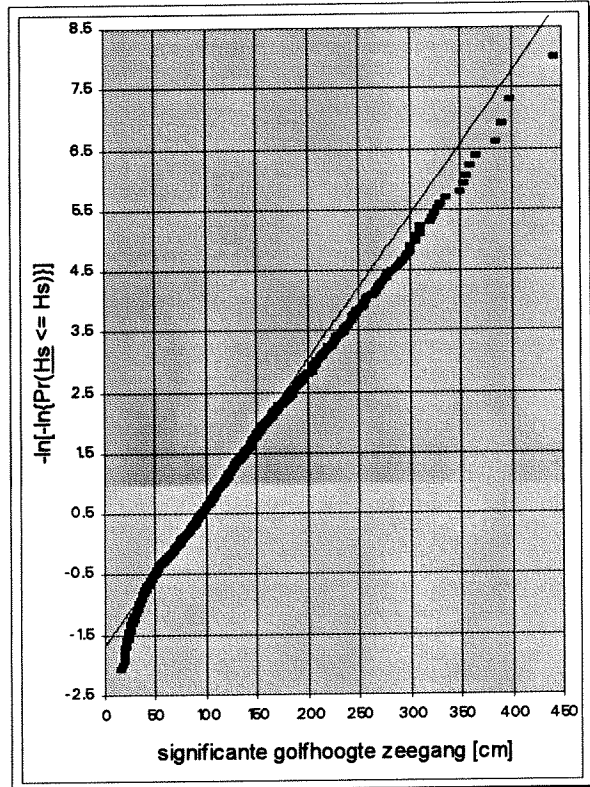
Transformatie Gumbelverdeling van juni
Gemiddelde = 99,4 cm
Standaard deviatie = 55,3 cm

BIJLAGE III^B

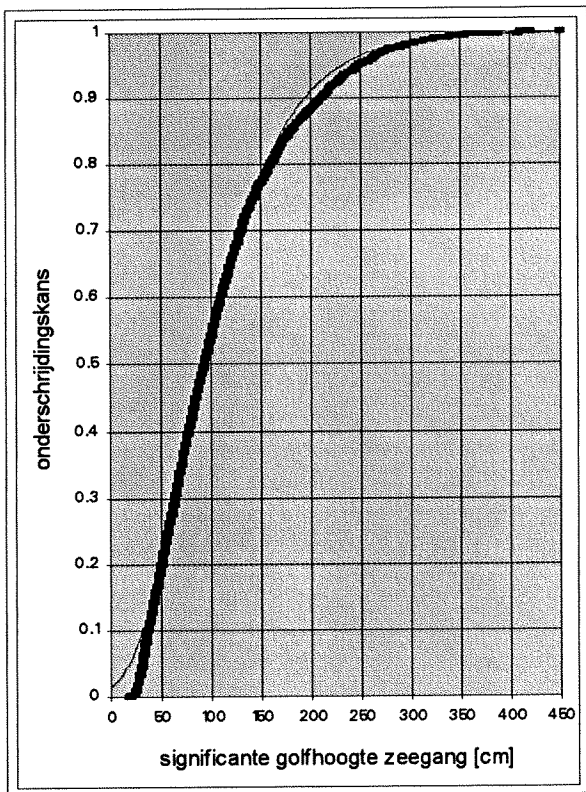
Kansverdelingen en transformaties van zeegang van de maanden juli en augustus



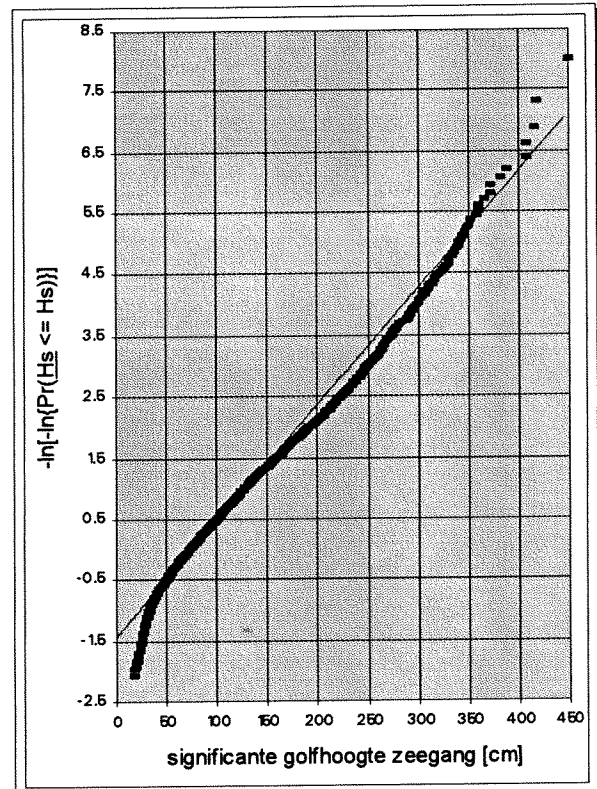
Gumbelverdeling van de maand juli
parameters: A = 70,77 cm
B = 42,38 cm



Transformatie Gumbelverdeling van juli
Gemiddelde = 95,3 cm
Standaard deviatie = 53,9 cm



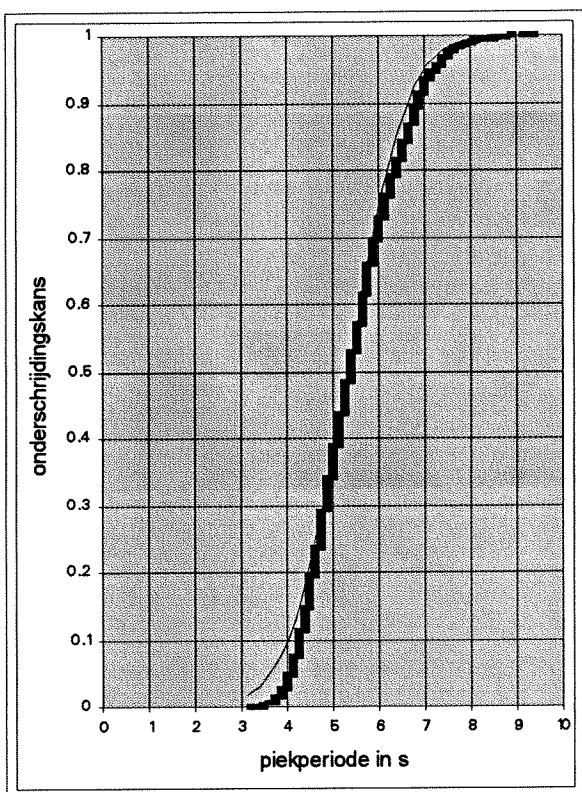
Gumbelverdeling van de maand augustus
parameters: A = 74,95 cm
B = 52,63 cm



Transformatie Gumbelverdeling van augustus
Gemiddelde = 105,5 cm
Standaard deviatie = 65,9 cm

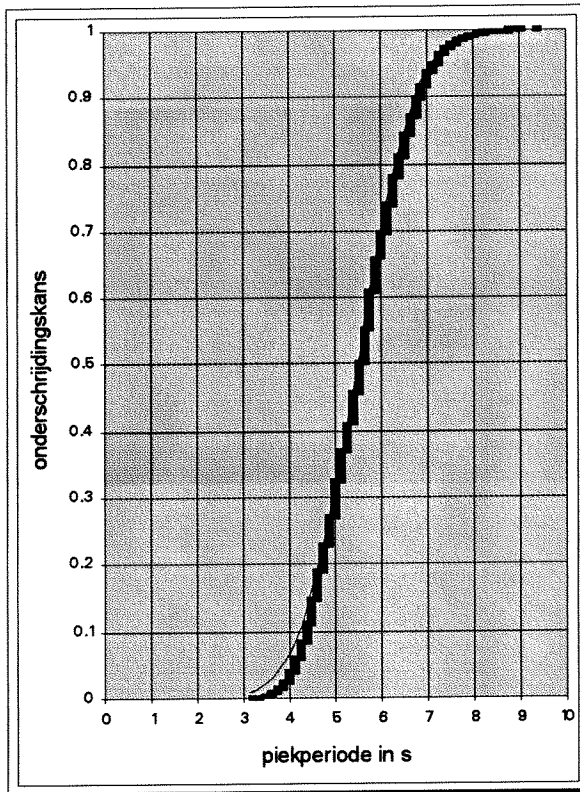
BIJLAGE IV

Kansverdelingen van de piekperiode van de zomermaanden



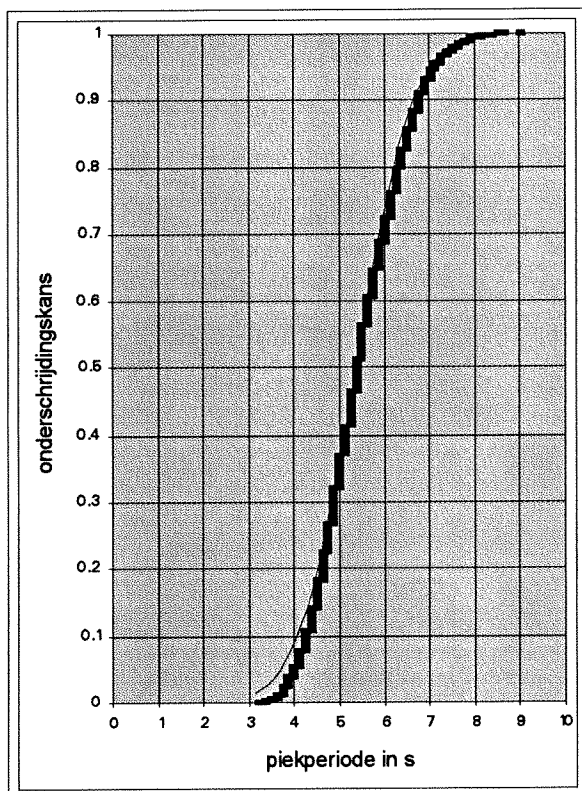
Normaal verdeling van de maand mei
parameters:

Gemiddelde = 5,32 s
Standaard deviatie = 1,03 s



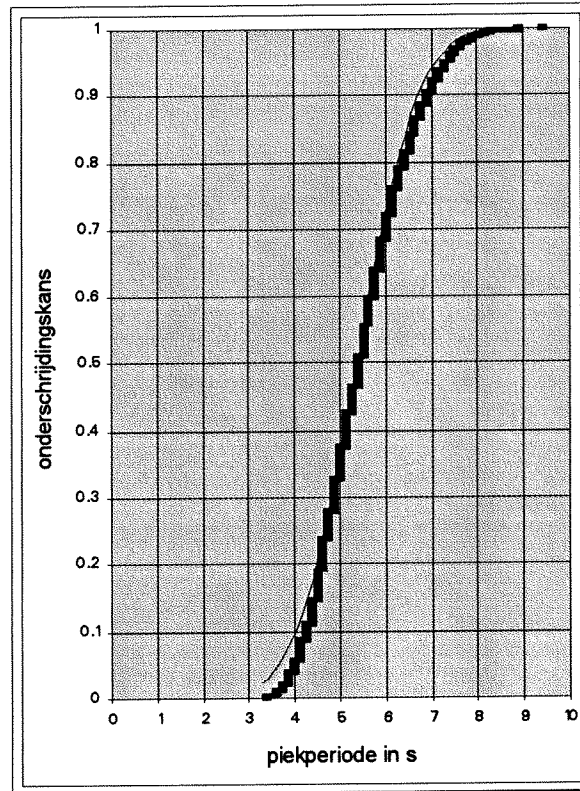
Normaal verdeling van de maand juni
parameters:

Gemiddelde = 5,47 s
Standaard deviatie = 0,99 s



Normaal verdeling van de maand juli
parameters:

Gemiddelde = 5,35 s
Standaard deviatie = 1,01 s

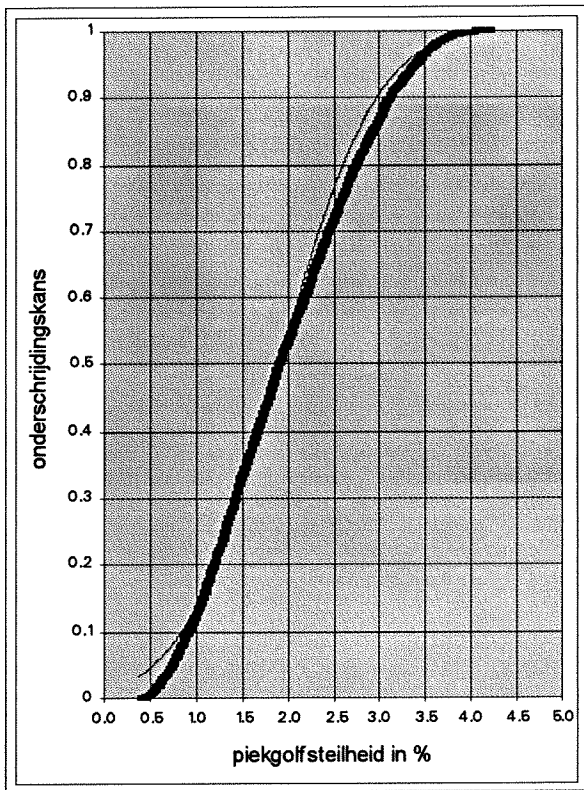


Normaal verdeling van de maand augustus
parameters:

Gemiddelde = 5,36 s
Standaard deviatie = 1,05 s

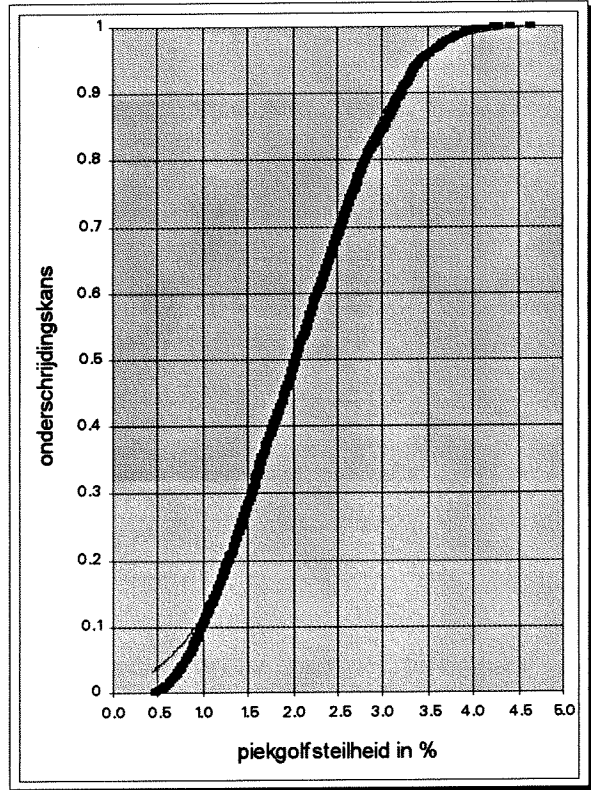
BIJLAGE V

Kansverdelingen van de piek golfsteilheid van de zomermaanden



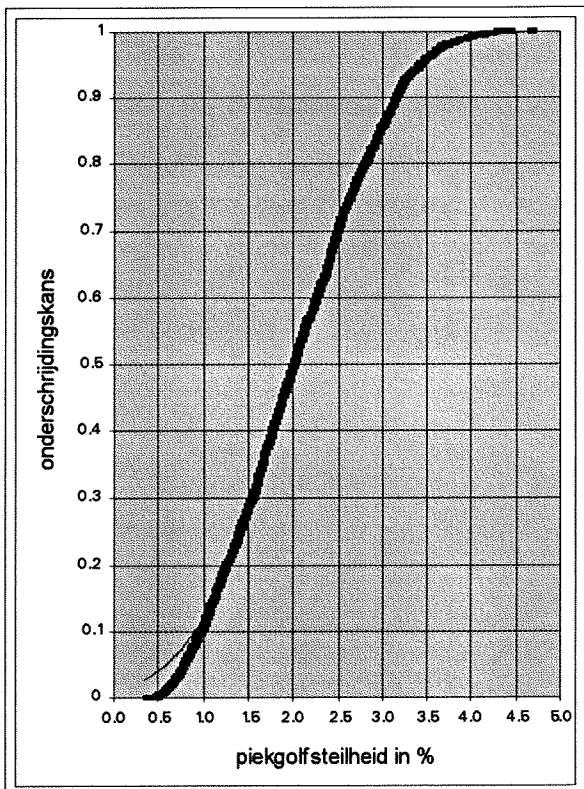
Normaal verdeling van de maand mei
parameters:

Gemiddelde = 1,90 %
Standaard deviatie = 0,83 %



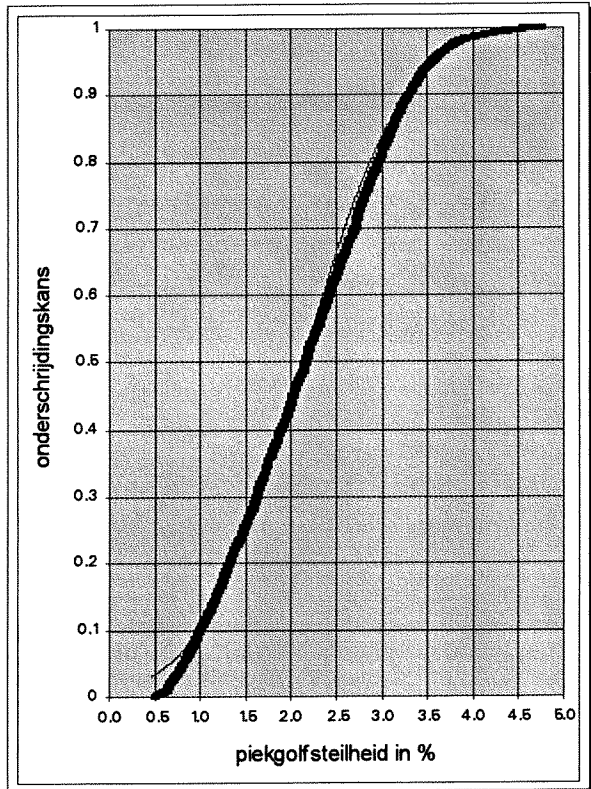
Normaal verdeling van de maand juni
parameters:

Gemiddelde = 2,02 %
Standaard deviatie = 0,87 %



Normaal verdeling van de maand juli
parameters:

Gemiddelde = 2,03 %
Standaard deviatie = 0,88 %

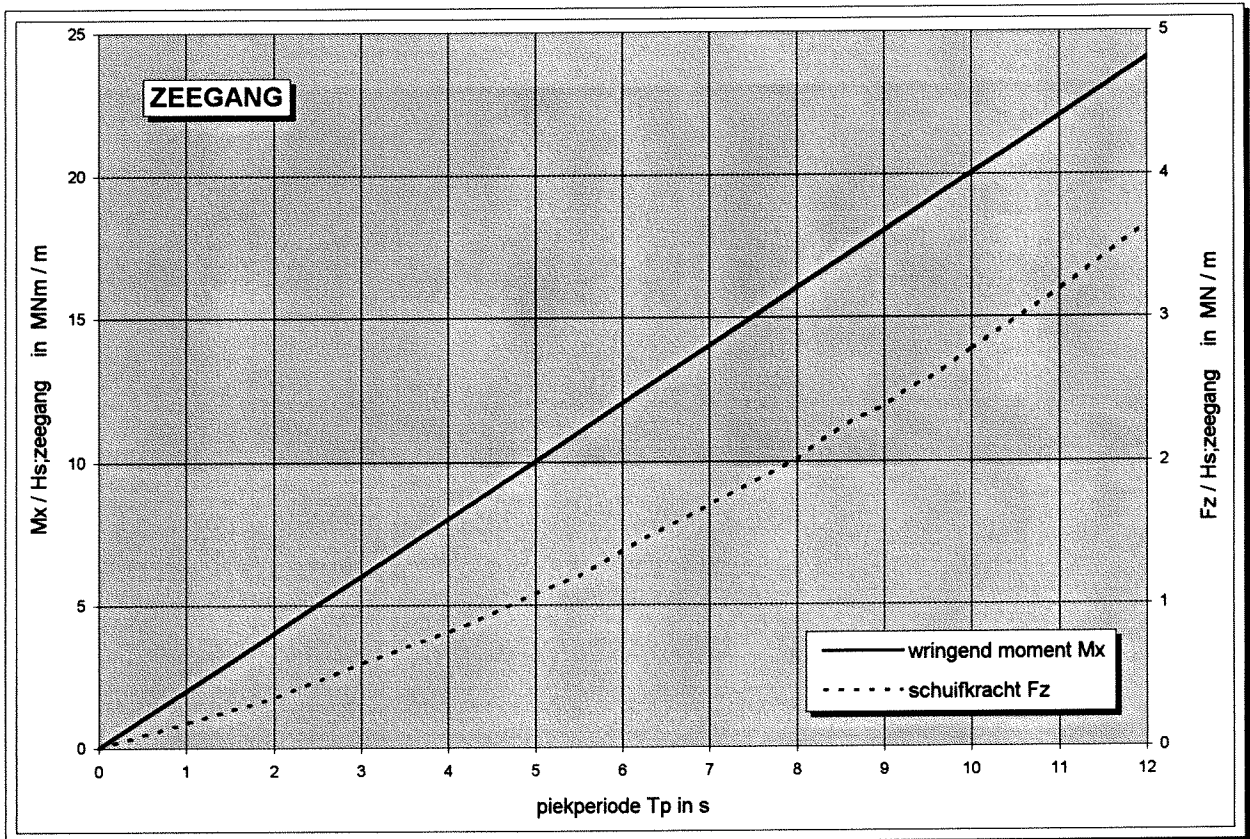


Normaal verdeling van de maand augustus
parameters:

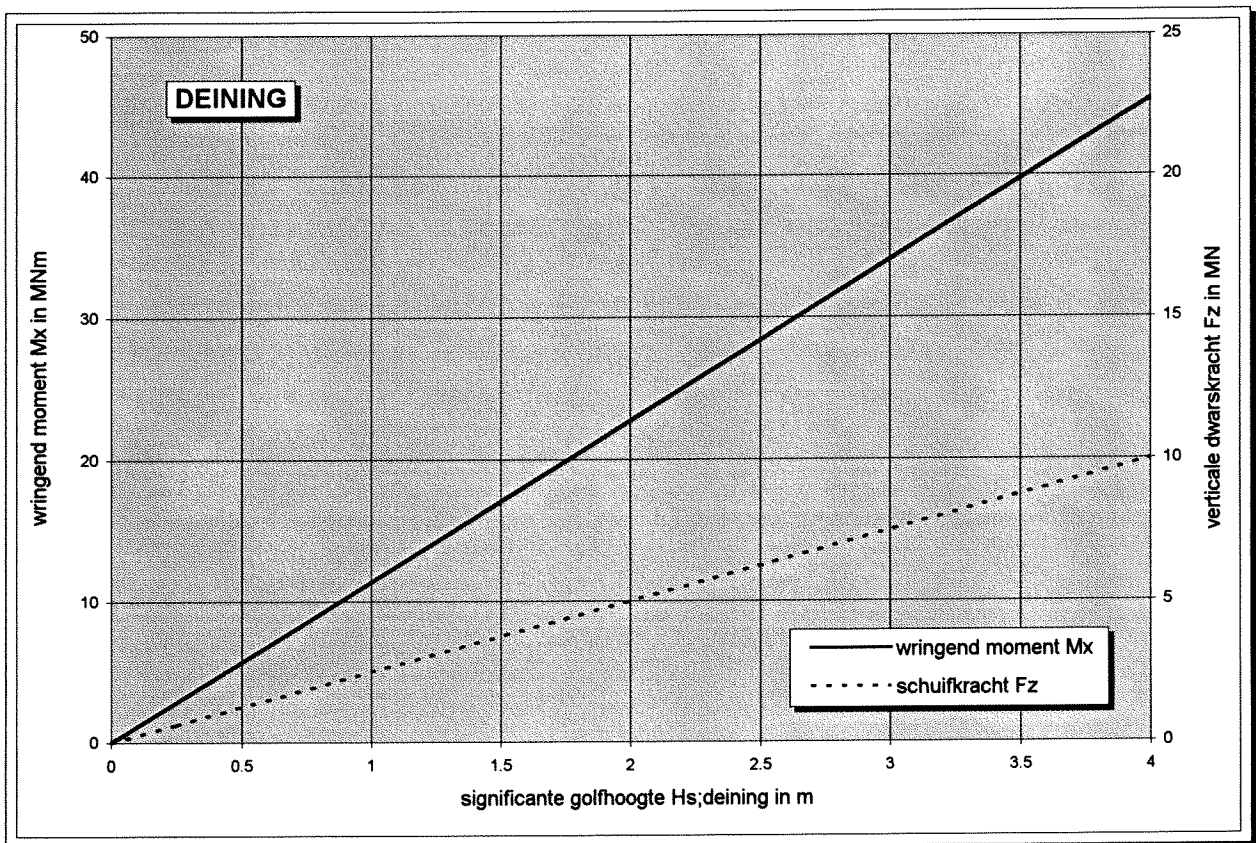
Gemiddelde = 2,12 %
Standaard deviatie = 0,89 %

BIJLAGE VI

De overdrachtsfuncties



Meest waarschijnlijke maximum waarden van de belasting in drie uur a.g.v. zeevang.



Meest waarschijnlijke maximum waarden van de belasting in drie uur a.g.v. deining, met piekperiode $T_p = 11$ s voor deining.

BIJLAGE VII
De betrouwbaarheidsfunctie Z

$$Z = R - S: \quad 1$$

waarin:

R = de sterkte van het tunnelement tijdens transport

S = de belastingen in het tunnelement tijdens transport

$$R = \mathcal{M}(1.00, 0.05): \quad 2$$

d.w.z. dat de sterkte van het tunnelement normaal verdeeld is met:

gemiddelde waarde 1,00 MN/m' en

standaard deviatie 0,05 MN/m'

$$S = \frac{M_{x,dyn} + M_{x,stat}}{b} + \frac{F_{z,dyn} + F_{z,stat}}{c} : \quad 3$$

de functie van de belastingen bestaat uit dynamische- (index dyn) en statische belastingen (index stat)

$$M_{x,dyn} = \sqrt{M_{x,MPM;zeegang;6}^2 + M_{x,MPM;deining;6}^2} : \quad 4$$

het totaal dynamisch wringend moment bestaat uit wringende momenten veroorzaakt door een combinatie van zeegang en deining

$$F_{z,dyn} = \sqrt{F_{z,MPM;zeegang;6}^2 + F_{z,MPM;deining;6}^2} : \quad 5$$

de totale dynamische verticale dwarskracht bestaat uit verticale dwarskrachten veroorzaakt door een combinatie van zeegang en deining

$$M_{x,MPM;zeegang;6} = \frac{M_{x,MPM;zeegang}}{\xi_3} \cdot \xi_6 : \quad 6$$

met:

$$M_{x,MPM;zeegang} = 2 \cdot T_p \cdot H_{s,zeegang}$$

$$\xi_3 = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \ln(N_3)} \quad \text{en} \quad \xi_6 = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \ln(N_6)}$$

$$N_3 = \left(\frac{3 \cdot 60 \cdot 60}{T_p} \right) \quad \text{en} \quad N_6 = \left(\frac{6 \cdot 60 \cdot 60}{T_p} \right)$$

het meest waarschijnlijke maximale wringende moment veroorzaakt door zeegang in een zes-uurlijkse zeetoestand kan bepaald worden m.b.v. de overdrachtsfunctie, waaruit de drie-uurlijkse MPM-waarde afgelezen kan worden, waarbij de factoren ξ_i afhankelijk zijn van het aantal golven en de lengte van de zeetoestand

BIJLAGE VII
De betrouwbaarheidsfunctie Z

$$M_{x,MPM;deining} = \frac{M_{x,MPM;deining}}{\zeta_3} \cdot \zeta_6 \quad 7$$

met $M_{x,MPM;deining} = 11.35 \cdot H_{s,deining}$

$$\zeta_3 = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \ln(L_3)} \quad \text{en} \quad \zeta_6 = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \ln(L_6)}$$

$$L_3 = \left(\frac{3 \cdot 60 \cdot 60}{T} \right) \quad \text{en} \quad L_6 = \left(\frac{6 \cdot 60 \cdot 60}{T} \right)$$

met de deterministische periode voor deining: $T = 11$ sec
het meest waarschijnlijke maximale wringende moment veroorzaakt door deining in een zes-uurlijkse zeetoestand kan bepaald worden m.b.v. de overdrachtsfunctie, waaruit de drie-uurlijkse MPM-waarde afgelezen kan worden, waarbij de factoren ζ_i afhankelijk zijn van het aantal golven en de lengte van de zeetoestand

$$F_{z,MPM;zeegang} = \frac{F_{z,MPM;zeegang}}{\xi_3} \cdot \xi_6 \quad 8$$

met $F_{z,MPM;zeegang} = (\alpha \cdot T_p + \beta \cdot T_p^\gamma) \cdot H_{s,zeegang}$

en $\alpha = 0.093257$; $\beta = 0.039677$; $\gamma = 1.67$ volgens "best fit"
de meest waarschijnlijke maximale verticale dwarskracht veroorzaakt door zeegang in een zes-uurlijkse zeetoestand kan bepaald worden m.b.v. de overdrachtsfunctie, waaruit de drie-uurlijkse MPM-waarde afgelezen kan worden, waarbij de factoren ξ_i afhankelijk zijn van het aantal golven en de lengte van de zeetoestand, zie formule 6

$$F_{z,MPM;deining} = \frac{F_{z,MPM;deining}}{\zeta_3} \cdot \zeta_6 \quad 9$$

met $F_{z,MPM;deining} = 2.5 \cdot H_{s,deining}$

de meest waarschijnlijke maximale verticale dwarskracht veroorzaakt door deining in een zes-uurlijkse zeetoestand kan bepaald worden m.b.v. de overdrachtsfunctie, waaruit de drie-uurlijkse MPM-waarde afgelezen kan worden, waarbij de factoren ζ_i afhankelijk zijn van het aantal golven en de lengte van de zeetoestand, zie formule 7

$$M_{x,stat} = 20 \text{ Mnm}; \quad F_{z,stat} = 2 \text{ MN}; \quad b = 151.0 \text{ m}^2; \quad c = 20.8 \text{ m}; \quad 10$$

BIJLAGE VII
De betrouwbaarheidsfunctie Z

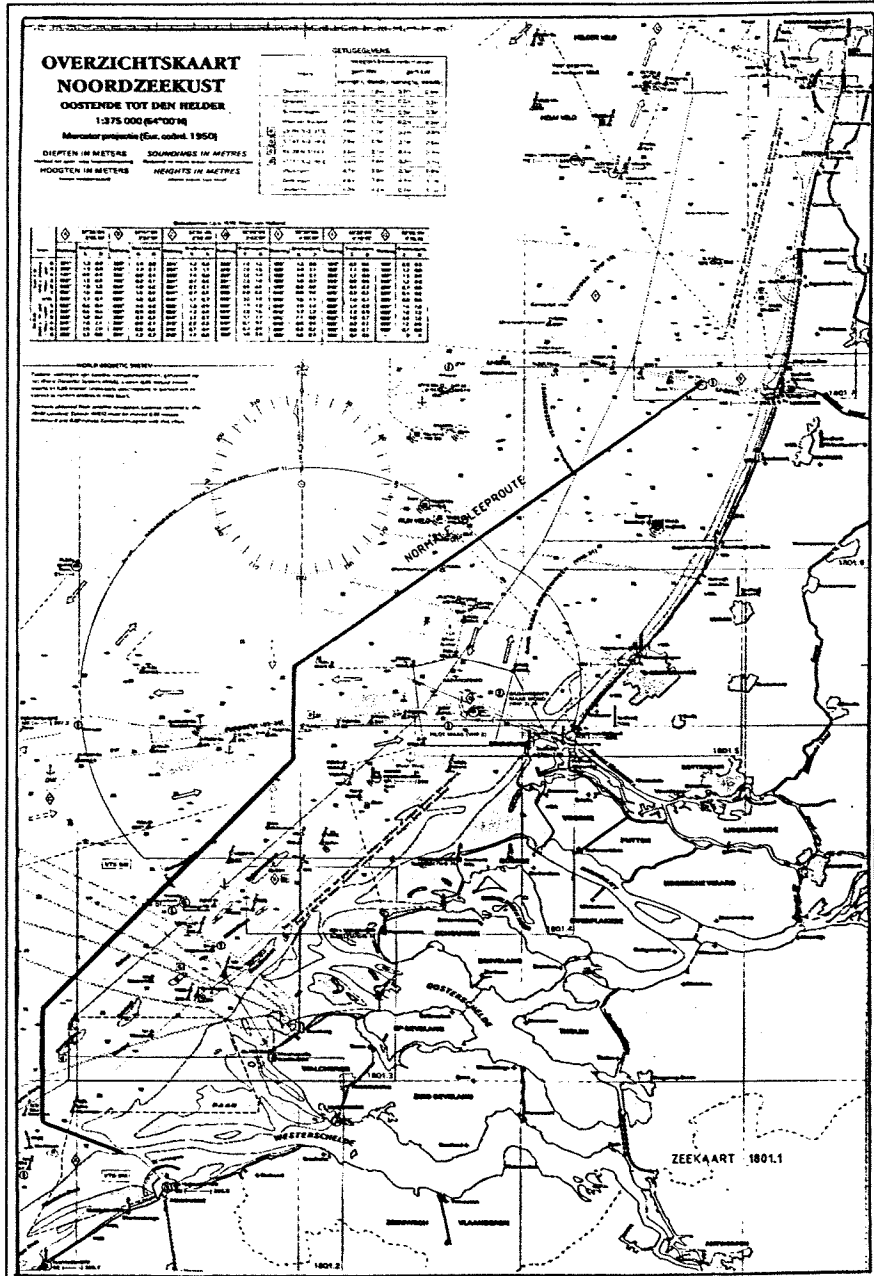
Na substitutie van formules 2 tot en met 10 in formule 1 volgt uiteindelijk:

$$Z = R - \frac{\sqrt{\left[\frac{2 \cdot T_p \cdot H_{s,zeegang}}{\xi_3} \cdot \xi_6 \right]^2 + \left[\frac{11.35 \cdot H_{s,deining}}{\zeta_3} \cdot \zeta_6 \right]^2} + [M_{x,stat}]}{b}$$

$$\frac{\sqrt{\left[\frac{(\alpha \cdot T_p + \beta \cdot T_p') \cdot H_{s,zeegang}}{\xi_3} \cdot \xi_6 \right]^2 + \left[\frac{2.5 \cdot H_{s,deining}}{\zeta_3} \cdot \zeta_6 \right]^2} + [F_{z,stat}]}{c}$$

BIJLAGE VIII

De transportroute over de Noordzee



BIJLAGE IX

Het simulatieprogramma

{Dit simulatieprogramma is geschreven door D.S.J. van Elsdingen in het kader van zijn afstudeeropdracht "Faalkansanalyse van het zeetransport van tunnelelementen". Met dit programma wordt getracht de belastingen te berekenen op een tunnelelement tijdens het zeetransport. Door toepassing van een golfvoorspelling kan vrij nauwkeurig worden afgeschat of gedurende de geplande sleepduur een gekozen vertrek criterium c.q. vaarcriterium zal worden overschreden. In dit programma is het gebruik van een golfvoorspelling en de toetsing aan het vertrek criterium geïntegreerd.}

Program Golfvoorspelling_simulatie;
USES Dos,crt,Statlib;

CONST

```
WachtTijd = 12;           {de wachttijd in uren}
TotSimulatieTijd = 2952; {de mogelijke transportperiode in uren}
Max_aant_transport = 65; {dus d.i. de zomerperiode }
max_vspfout = 12;
Max_aant_handelingen = 250;
Aant_criteria = 28;
mei = 744; juni = 720; juli = 744; augustus = 744;
uit48 = 'C:\daan\uit48.xls';
uit72 = 'C:\daan\uit72.xls';
uit96 = 'C:\daan\uit96.xls';
uit = 'C:\daan\uit.xls';
wachttijden = 'C:\daan\wachten.xls';
```

TYPE

```
Aant_seastates=1..8;Aant_transport=1..Max_aant_transport;
Aant_par=1..3;
Vsp = array [0..max_vspfout,1..3] of REAL;
Voorspelling = array [Aant_seastates,Aant_seastates,Aant_par] of REAL;
Belastingen = array [Aant_seastates,Aant_seastates] of REAL;
Max_belasting = array [Aant_transport,Aant_seastates] of REAL;
Wachten = array [-1..8] of REAL;
Volgorde = array [1..Max_aant_handelingen] of CHAR;
Wijzer = ^Gegevens;
Gegevens = RECORD
    belasting_serie : Max_belasting;
    wachttijd : Wachten;
END;
```

```
Criterion = array [1..Aant_criteria] of Wijzer;
```

VAR

```
data : Criterion;
V,H : Voorspelling; B : Belastingen; Q : Volgorde;
Y,P : Vsp; Mb,hulp : Max_belasting; U : Wachten;
maximum : REAL;
GesimuleerdeTijd,At,Tel,crit,sx,sy,qt,max_wt : INTEGER;
Besluit,tonen : BOOLEAN;
filenaam : STRING;
gaan,niet_gaan,antwoord : CHAR;
zeeteller,deinteller:INTEGER;
Vertrek_crit_zeegang:INTEGER;
Vertrek_crit_deining:INTEGER;
uitfile : TEXT; uitfile2 : TEXT;
ChCyclus:char;
Transport_cyclus :INTEGER;
Max_aant_seastates :INTEGER;
```

```
{ Indeling array Voorspelling }
{ nr. van positie }
{      |      1      |      2      |      3      | }
{      |Hs,zeegang| Hs,deining| Tp | }
{ 1:   seastate 1| }
{ 2:   seastate 2| }
}
```

=>

```

{ 3:   seastate 3|   }
{ 4:   seastate 4|   }
{ aantal seastates |   }
{-----}
{ Indeling array Wachten           uren wachten           }
{ -1           0           1           2           3           4           5           6           7           8           }
{ tot. aant. uren wachten|tot. aant. keer | 0-12 | 12-24 | 24-36 | 36-48 | 48-60 | 60-72 | 72-84 | 84-96           }
{ |                               |         |         |         |         |         |         |         |         |         }
{-----}
{ Indeling array Vsp c.q. de bekende voorspelfouten           }
{ |           1           |           2           |           3           }
{ totale vspfout | vspfout zeegang | vspfout deining }
{ 0 vsp 0 uur vooruit           }
{ 1 vsp 6 uur vooruit           }
{ 2 vsp 12 uur vooruit           }
{ 3 vsp 18 uur vooruit           }
{ N vsp N*6 uur vooruit           }
{-----}
{ Indeling array van belastingen           }
{ seastate | 1 | 2 | 3 | 4 | N }
{ totale belasting |           }
{-----}
{ Indeling array maximale belastingen voor:           }
{ | 1 | 2 | 3 | 4 | N seastates }
{ transport 1 |           }
{ transport 2 |           }
{ transport At |           }
{-----}

```

```

PROCEDURE Leegmaken(VAR U:Wachten;VAR Q:Volgorde;VAR Mb:Max_belasting);
VAR                               {procedure waarin alle arrays, records e.d.}
    al,bl,cl,klasse : INTEGER;    {worden "leeggemaakt"           }
BEGIN
    FOR klasse:=-1 TO 8 DO U [klasse]:=0;
    FOR al:=1 TO Max_aant_handelingen DO Q [al]:='O';
    FOR bl:=1 TO Max_aant_transport DO
        BEGIN
            FOR cl:=1 TO Max_aant_seastates DO
                BEGIN
                    Mb [bl,cl]:=0;
                END;
            END;
        END;
    END;
END;

```

```

PROCEDURE Variabelen_leggen(VAR V,H:Voorspelling;VAR B:Belastingen;VAR P:Vsp);
VAR
    seastate,positie,laatste_seastate,laatste_positie,
    par,kl,g,al,bl : INTEGER;
BEGIN
    laatste_positie:=Max_aant_seastates;
    laatste_seastate:=Max_aant_seastates;
    FOR positie:=1 TO laatste_positie DO
        BEGIN
            FOR seastate:=1 TO laatste_seastate DO
                BEGIN
                    B [positie,seastate]:=0;
                    FOR par:=1 TO 3 DO
                        BEGIN
                            V [positie,seastate,par]:=0;
                            H [positie,seastate,par]:=0;
                        END;
                    END;
                END;
            END;
        END;
    FOR kl:=0 TO Max_vspfout DO
        BEGIN

```

=>

```

FOR g:=1 TO 3 DO
  BEGIN
    P [kl,g]:=0;
  END;
END;
al:=0;bl:=0;
END;

```

PROCEDURE Uitgangspunt(VAR V : Voorspelling);

{procedure waarin de basis van de golfvoorspelling wordt afgeleid voor de gehele zomerperiode door trekkingen uit de betreffende verdelingen}

VAR

Hs_zee,Hs_dei,Tp,A,B,C,D,E,F,G : REAL;

seastate,positie,laatste_seastate,laatste_positie : INTEGER;

BEGIN

laatste_seastate:=Max_aant_seastates;

Hs_zee:=0;Hs_dei:=0;Tp:=0;seastate:=0;positie:=0;

A:=0;B:=0;C:=0;D:=0;E:=0;F:=0;G:=0;

IF GesimuleerdeTijd<mei

THEN BEGIN

A:=67.00;B:=45.36;C:=-2.88;D:=10.00;E:=2.01;F:=5.32;G:=1.03

END

ELSE IF (GesimuleerdeTijd>=mei) AND (GesimuleerdeTijd<mei+juni)

THEN BEGIN

A:=74.28;B:=43.41;C:=-3.22;D:=9.80;E:=1.90;F:=5.47;G:=0.99

END

ELSE IF (GesimuleerdeTijd>=mei+juni) AND (GesimuleerdeTijd<mei+juni+juli)

THEN BEGIN

A:=70.77;B:=42.38;C:=-3.79;D:=9.50;E:=2.19;F:=5.35;G:=1.01

END

ELSE IF (GesimuleerdeTijd>=mei+juni+juli)

THEN BEGIN

A:=74.95;B:=52.63;C:=-3.26;D:=9.93;E:=1.86;F:=5.36;G:=1.05

END;

FOR seastate:=1 TO laatste_seastate DO

BEGIN

Hs_zee:=-ln(-ln(Random))*B+A;

Hs_dei:=power(-ln(Random),(-1/E))*D+C;

Tp:=F+((Random+Random+Random+Random)/4-0.5)*6.9282*G;

FOR positie:=1 TO seastate DO

BEGIN

V [positie,seastate,1]:=Hs_zee;

V [positie,seastate,2]:=Hs_dei;

V [positie,seastate,3]:=Tp;

END;

END;

END;

PROCEDURE Voorspelfout(VAR P : Vsp);

{procedure waarin voor zeegang en deining de voorspelfouten worden afgeleid}

VAR

uren_vooruit,laatste_positie : INTEGER;

CONST

alpha = 2;

BEGIN

P [0,1]:=28; P [1,1]:=29.5; P [2,1]:=31; P [3,1]:=34.5;

P [4,1]:=38; P [5,1]:=41.5; P [6,1]:=45; P [7,1]:=56.5;

P [8,1]:=68; P [9,1]:=69.3; P [10,1]:=70.5; P [11,1]:=71.8;

P [12,1]:=73;

laatste_positie:=Max_aant_seastates;

FOR uren_vooruit:=0 TO laatste_positie DO

BEGIN

P [uren_vooruit,2]=(alpha/(SQRT(SQR(alpha)+1)))*P [uren_vooruit,1];

P [uren_vooruit,3]=(1/(SQRT(SQR(alpha)+1)))*P [uren_vooruit,1];

⇒

```

END;
END;

```

```

PROCEDURE GolfVoorspelling(P : Vsp; V : Voorspelling; VAR H : Voorspelling);
{procedure waarin de gehele golfvoorspelling, d.w.z. basisvoorspelling plus
trekking uit bijbehorende voorspelfout, wordt afgeleid voor elke positie}

```

```

VAR
  fHs_zee,fHs_dei,Hs_zee_vsp,Hs_dei_vsp : REAL;
  seastate,positie,laatste_seastate,laatste_positie : INTEGER;
BEGIN
  laatste_positie:=Max_aant_seastates;
  laatste_seastate:=Max_aant_seastates;
  H:=V;fHs_zee:=0;fHs_dei:=0;Hs_zee_vsp:=0;Hs_dei_vsp:=0;
  FOR positie:=1 TO laatste_positie DO
    BEGIN
      FOR seastate:=positie TO laatste_seastate DO
        BEGIN
          fHs_zee:=((Random+Random+Random+Random)/4-0.5)*6.9282*P [seastate-positie,2];
          Hs_zee_vsp:=H [positie,seastate,1]+fHs_zee;
          IF Hs_zee_vsp<0 THEN Hs_zee_vsp:=0;
          H [positie,seastate,1]:=Hs_zee_vsp;    {voorspelling van zeegang}
          fHs_dei:=((Random+Random+Random+Random)/4-0.5)*6.9282*P [seastate-positie,3];
          Hs_dei_vsp:=H [positie,seastate,2]+fHs_dei;
          IF Hs_dei_vsp<0 THEN Hs_dei_vsp:=0;
          H [positie,seastate,2]:=Hs_dei_vsp;    {voorspelling van deining}
        END;
      END;
    END;
  END;

```

```

PROCEDURE Wacht_op_vertrek(Tel,At:INTEGER;Q:Volgorde;VAR U:Wachten;VAR max_wt:INTEGER);
{procedure waarin de wachttijden worden verzameld en geordend}

```

```

VAR
  Aant_keer_wachten,dl,wachtteller : INTEGER;
BEGIN
  Aant_keer_wachten:=Tel-At;
  U [0]:=Aant_keer_wachten;
  U [-1]:=Aant_keer_wachten*WachtTijd;
  dl:=1; max_wt:=0;
  REPEAT
    wachtteller:=0;
    IF Q [dl]='W' THEN
      REPEAT
        wachtteller:=wachtteller+1;
        IF wachtteller>max_wt THEN max_wt:=wachtteller;
        dl:=dl+1;
      UNTIL (Q [dl]='T') OR (dl=Tel+1)
    ELSE dl:=dl+1;
    IF wachtteller>7 THEN U [8]:=U [8]+1
    ELSE
      CASE wachtteller OF
        1: U [1]:=U [1]+1;
        2: U [2]:=U [2]+1;
        3: U [3]:=U [3]+1;
        4: U [4]:=U [4]+1;
        5: U [5]:=U [5]+1;
        6: U [6]:=U [6]+1;
        7: U [7]:=U [7]+1;
      END;
    UNTIL dl>=Tel;
    max_wt:=max_wt*WachtTijd;
  END;

```

```

PROCEDURE Transport(H:Voorspelling;VAR B:Belastingen);
{procedure waarin de optredende MPM waarden van de belastingen voor
een zes-uurlijkse seastate worden afgeleid}
VAR
  seastate,positie,laatste_seastate,laatste_positie : INTEGER;
  Factor_dei_3,Factor_dei_6,Factor_zee_3,Factor_zee_6,Aant_golven_3,
  Aant_golven_6,Mom_MPM_zee_3,Mom_sig_zee_3,Mom_MPM_zee_6,Mom_MPM_dei_3,
  Mom_sig_dei_3,Mom_MPM_dei_6,Mom_tot,Kracht_MPM_zee_3,
  Kracht_sig_zee_3,Kracht_MPM_zee_6,Kracht_MPM_dei_3,Kracht_sig_dei_3,
  Kracht_MPM_dei_6,Kracht_tot,Belasting_statisch,Belasting_dynamisch,
  Belasting_totaal,Best_fit : REAL;
CONST
  a = 0.093257; bs = 0.039677; c = 1.67;d = 151.0; e = 20.8;
  T_deining=11;Drie_uur=10800;Zes_uur=21600;Mom_statisch=20;Kracht_statisch=2;
BEGIN
  laatste_positie:=Max_aant_seastates;
  laatste_seastate:=Max_aant_seastates;
  FOR positie:=1 TO laatste_positie DO
  BEGIN
    FOR seastate:=positie TO laatste_seastate DO
    BEGIN
      Factor_dei_3:=SQRT(0.5*LN(Drie_uur/T_deining));
      Factor_dei_6:=SQRT(0.5*LN(Zes_uur/T_deining));
      Aant_golven_3:=Drie_uur/H [positie,seastate,3];
      Aant_golven_6:=Zes_uur/H [positie,seastate,3];
      Factor_zee_3:=SQRT(0.5*LN(Aant_golven_3));
      Factor_zee_6:=SQRT(0.5*LN(Aant_golven_6));
      Mom_MPM_zee_3:=(2/100)*H [positie,seastate,3]*H [positie,seastate,1];
      Mom_sig_zee_3:=Mom_MPM_zee_3/Factor_zee_3;
      Mom_MPM_zee_6:=Factor_zee_6*Mom_sig_zee_3;
      Mom_MPM_dei_3:=(11.35/100)*H [positie,seastate,2];
      Mom_sig_dei_3:=Mom_MPM_dei_3/Factor_dei_3;
      Mom_MPM_dei_6:=Factor_dei_6*Mom_sig_dei_3;
      Mom_tot:=SQRT(SQR(Mom_MPM_zee_6)+SQR(Mom_MPM_dei_6));
      Best_fit:=a*H [positie,seastate,3]+bs*power(H [positie,seastate,3],c);
      Kracht_MPM_zee_3:=(Best_fit/100)*H [positie,seastate,1];
      Kracht_sig_zee_3:=Kracht_MPM_zee_3/Factor_zee_3;
      Kracht_MPM_zee_6:=Factor_zee_6*Kracht_sig_zee_3;
      Kracht_MPM_dei_3:=(2.5/100)*H [positie,seastate,2];
      Kracht_sig_dei_3:=Kracht_MPM_dei_3/Factor_dei_3;
      Kracht_MPM_dei_6:=Factor_dei_6*Kracht_sig_dei_3;
      Kracht_tot:=SQRT(SQR(Kracht_MPM_zee_6)+SQR(Kracht_MPM_dei_6));
      Belasting_statisch:=(Mom_statisch/d)+(Kracht_statisch/e);
      Belasting_dynamisch:=(Mom_tot/d)+(Kracht_tot/e);
      Belasting_totaal:=Belasting_statisch+Belasting_dynamisch;
      B [positie,seastate]:=1000*Belasting_totaal;
    END;
  END;
END;

```

```

PROCEDURE Maximale_Belasting(At:INTEGER;B:Belastingen;VAR Mb:Max_belasting);
{procedure waarin de maximale MPM waarden van de belastingen voor elke
seastate worden bepaald}
VAR
  seastate,positie : INTEGER;
  Max : REAL;
BEGIN
  FOR seastate:=1 TO Max_aant_seastates DO
  BEGIN
    Max:=0;
    FOR positie:=1 TO seastate DO
    BEGIN
      IF B [positie,seastate]>Max THEN
      BEGIN
        Max:=B [positie,seastate];

```

⇒

```

        Mb [At,seastate]:=B [positie,seastate];
    END;
END;
END;
END;

```

PROCEDURE Beslissing(H:Voorspelling);
 {procedure waarin de gehele golfvoorspelling wordt getoetst aan het gekozen
 vertrek criterium}

```

VAR
    al,bl : INTEGER;
BEGIN
    al:=1;Tel:=Tel+1;
    WHILE al<=Max_aant_seastates DO
    BEGIN
        bl:=1;
        WHILE bl<=Max_aant_seastates DO
        BEGIN
            IF (H [al,bl,1]<=Vertrek_crit_zeegang) AND (H [al,bl,2]<=Vertrek_crit_deining)
            THEN BEGIN
                Besluit:=TRUE;
                bl:=bl+1;
                IF (bl=Max_aant_seastates+1) THEN al:=al+1
            END
            ELSE BEGIN
                Besluit:=FALSE;
                al:=Max_aant_seastates+1;
                bl:=al
            END
        END;
    END;
    IF Besluit=TRUE
    THEN BEGIN
        Transport(H,B);
        At:=At+1;
        gaan:='T';
        Q [Tel]:=gaan;
        Maximale_Belasting(At,B,Mb);
        GesimuleerdeTijd:=GesimuleerdeTijd+Transport_cyclus
    END
    ELSE BEGIN
        niet_gaan:='W';
        Q [Tel]:=niet_gaan;
        GesimuleerdeTijd:=GesimuleerdeTijd+WachtTijd
    END
END;

```

```

PROCEDURE Vraag;
BEGIN
    clrscr;
    gotoxy(2,8);
    WRITELN(' Wilt U dat de belastingen,die tijdens het transport optreden,vertoond worden?');
    WRITELN;
    WRITELN;
    WRITELN('                J/N                ');
    gotoxy (25,15); WRITE ('Geef antwoord: ');
    REPEAT
        read(antwoord);
    UNTIL (antwoord='j') OR (antwoord='J') OR (antwoord='n') OR (antwoord='N');
    IF (antwoord='j') OR (antwoord='J') THEN tonen:=TRUE
    ELSE tonen:=FALSE;
    clrscr;
END;

```

⇒

```

PROCEDURE Schermuitvoer(Mb:Max_belasting;At:INTEGER);
VAR
  l : REAL;
  n,rij,positie,seastate,k,par,t,x,s,i : INTEGER;
  mx : CHAR;
BEGIN
  WRITELN;
  WRITELN ('          Belastingen tijdens transport voor vertrekcriteria');
  WRITELN ('          voor zeegang:', vertrek_crit_zeegang);
  WRITELN ('          voor deining:', vertrek_crit_deining);
  WRITELN;
  WRITELN;
  WRITELN ('          Meest Waarschijnlijke Maximale belasting in seastate: ');
  WRITELN ('Transportnr.  1  2  3  4  5  6  7  8 ');
  IF At>15
  THEN BEGIN
    FOR n:=1 TO 15 DO
      BEGIN
        rij:=n+8;i:=0;
        gotoxy(5,rij);write(n:2);
        FOR seastate:=1 TO Max_aant_seastates DO
          BEGIN
            l:=Mb [n,seastate];
            gotoxy(17+8*i,rij);write(l:4:1);
            i:=i+1;
          END;
        END;
        gotoxy(7,25);writeln('Er zijn ', At, ' transporten');
      END
    ELSE BEGIN
      FOR n:=1 TO At DO
        BEGIN
          rij:=n+8;i:=0;
          gotoxy(5,rij);write(n:2);
          FOR seastate:=1 TO Max_aant_seastates DO
            BEGIN
              l:=Mb [n,seastate];
              gotoxy(17+8*i,rij);write(l:4:1);
              i:=i+1;
            END;
          END;
        END;
        gotoxy(65,22); WRITE ('<DRUK SPATIE>');
        REPEAT
          mx:=READKEY;
        UNTIL (mx=' ');
        clrscr;
      END;

```

```

PROCEDURE FileUitvoer(Mb:Max_belasting;At:INTEGER;ChCyclus:Char);
VAR
  n,a : INTEGER;
  s : REAL;
BEGIN
  clrscr;
  CASE ChCyclus OF
    'A':BEGIN
      WRITELN ('De gegevens worden bewaard in ',uit48);
      APPEND (uitfile);
    END;
    'B':BEGIN
      WRITELN ('De gegevens worden bewaard in ',uit72);
      APPEND (uitfile);
    END;
  END;

```

⇒


```

        'C':BEGIN
            WRITELN ('De gegevens worden bewaard in ',uit96);
            APPEND (uitfile);
        END;
    END;
    FOR n:=1 TO At DO
    BEGIN
        FOR a:=1 TO Max_aant_seastates DO WRITELN (uitfile,Mb[n,a]:4:1);
    END;
{   CLOSE (uitfile);   }
END;

```

```

PROCEDURE FileUitvoer2(At:INTEGER;{max_wt:INTEGER;}U:Wachten;qt:INTEGER);
VAR
    n,ru :INTEGER;
BEGIN
    clrscr;
    gotoxy (0,qt);
    WRITELN(uitfile2,U[1]:3,',',U[2]:3,',',U[3]:3,',',U[4]:3,',',U[5]:3,
            ',U[6]:3,',',U[7]:3,',',U[8]:3,',',max_wt:4,',',At:2);
END;

```

```

{#####}
{#####          HOOFDPROGRAMMA          #####}
{#####}

```

```

BEGIN
    window(20,20,60,60);Textbackground(blue);Textcolor(white);clrscr;
    Vraag;
    {De simulatie gaat nu beginnen}
    Randomize; crit:=0;
{   ASSIGN (uitfile,uit);
    REWRITE (uitfile);   }
    ASSIGN (uitfile2,wachttijden);
    REWRITE (uitfile2);
    FOR qt:=1 TO 10 DO
    BEGIN
        FOR ChCyclus:='A' TO 'C' DO
        BEGIN
            CASE ChCyclus OF
                'A': BEGIN
                    Transport_cyclus := 48;
                    Max_aant_seastates := round((Transport_cyclus/2)/6);
                    {   ASSIGN (uitfile,uit48);
                        REWRITE (uitfile);   }
                    END;
                'B': BEGIN
                    Transport_cyclus := 72;
                    Max_aant_seastates := round((Transport_cyclus/2)/6);
                    {   ASSIGN (uitfile,uit72);
                        REWRITE (uitfile);   }
                    END;
                'C': BEGIN
                    Transport_cyclus := 96;
                    Max_aant_seastates := round((Transport_cyclus/2)/6);
                    {   ASSIGN (uitfile,uit96);
                        REWRITE (uitfile);   }
                    END;
            END;
        END;
        FOR zeeteller:=1 TO 6 DO
        BEGIN
            Vertrek_crit_zeegang:=zeeteller*50+100;
            FOR deinteller:=1 TO 4 DO
            BEGIN

```

⇒

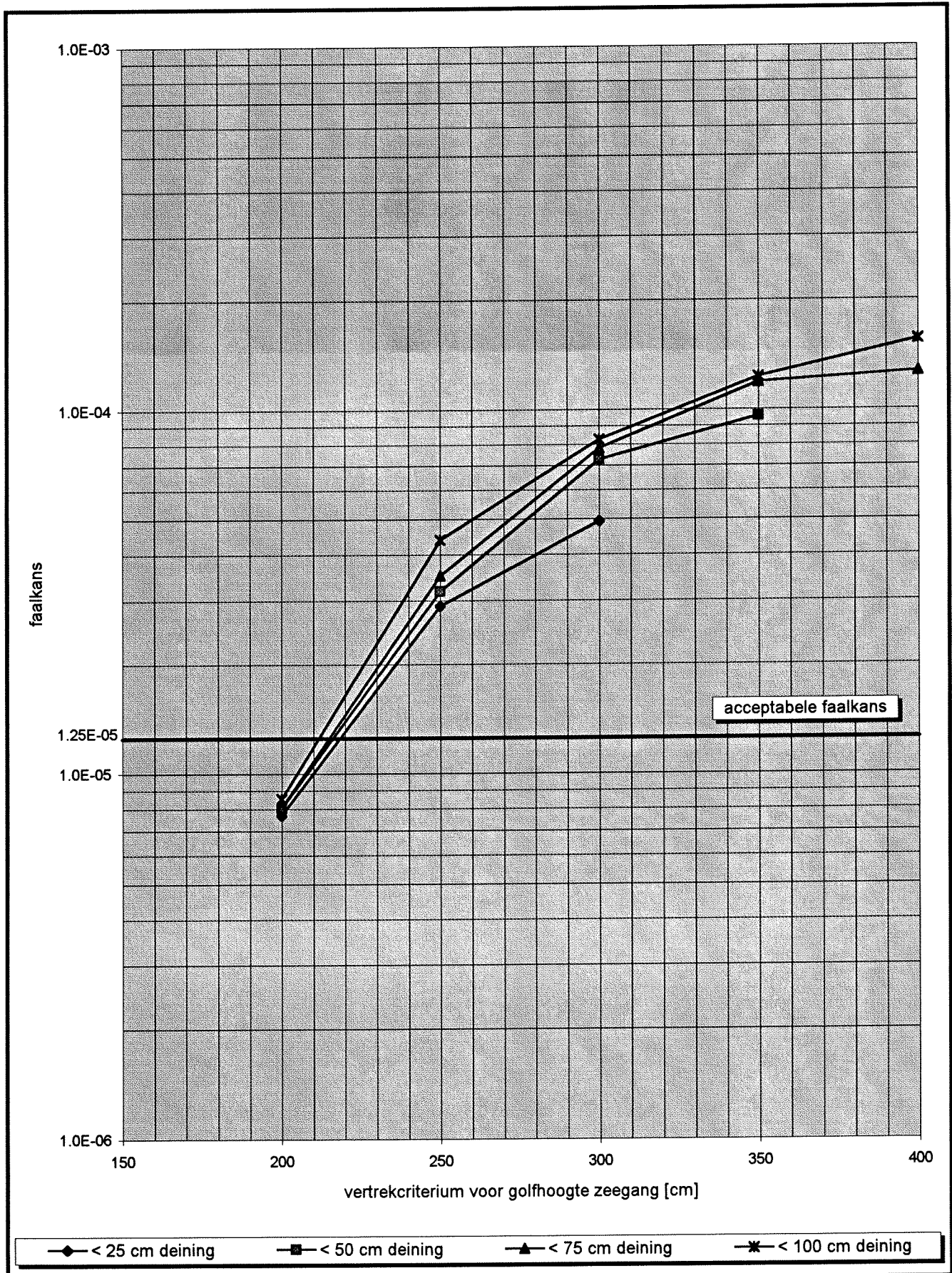
```
Vertrek_crit_deining:=deinteller*25;
At:=0;Tel:=0;GesimuleerdeTijd:=0;
crit:=crit+1;
Leegmaken(U,Q,Mb);
REPEAT
  Variabelen_legen(V,H,B,P);
  Uitgangspunt(V);
  Voorspelfout(P);
  Golfvoorspelling(P,V,H);
  Beslissing(H);
UNTIL GesimuleerdeTijd>=TotSimulatieTijd;
Wacht_op_vertrek(Tel,At,Q,U,max_wt);
{ IF tonen=TRUE THEN Schermuitvoer(Mb,At); }
{ data [crit]:=NIL;
  NEW(data [crit]);
  data [crit]^belasting_serie:=Mb; }
{ FileUitvoer(Mb,At,ChCyclus); }
  FileUitvoer2(At,{max_wt,}U,qt);
END;
END;
END;
END;
{ CLOSE (uitfile); }
  CLOSE (uitfile2);
END.
{#####} Einde van het simulatieprogramma {#####}
```

BIJLAGE X^A
Faalkansen en parameters

Parameters van de Gumbel verdelingen voor verschillende vertrekcriteria						
		vertrekriterium deining [cm]				
		25	50	75	100	
vertrekriterium zeegang [cm]	200	A	336.53	346.25	347.86	346.79
		B	54.49	53.83	53.72	54.08
	250	A	342.51	351.92	353.80	354.25
		B	61.06	60.69	61.10	62.48
	300	A	342.12	354.71	356.65	355.90
		B	64.50	65.85	66.16	66.63
	350	A	-----	355.92	356.50	356.04
		B	-----	67.73	69.32	69.66
	400	A	-----	-----	356.00	357.76
		B	-----	-----	69.93	71.38
Faalkansen voor verschillende vertrekcriteria						
		vertrekriterium deining [cm]				
		25	50	75	100	
vertrekriterium zeegang [cm]	200	7.69E-06	8.03E-06	8.08E-06	8.53E-06	
	250	2.89E-05	3.17E-05	3.50E-05	4.39E-05	
	300	4.94E-05	7.28E-05	7.82E-05	8.25E-05	
	350	-----	9.57E-05	1.19E-04	1.23E-04	
	400	-----	-----	1.27E-04	1.56E-04	
Parameters van de Gumbel verdelingen voor verschillende transportduren						
		vertrekriterium deining < 100 cm				
transportduur:		22 uur	34 uur	46 uur		
vertrekriterium zeegang [cm]	200	A	342.61	346.79	357.25	
		B	53.43	54.08	54.10	
	250	A	346.19	354.25	363.05	
		B	60.87	62.48	62.91	
	300	A	349.12	355.90	364.16	
		B	65.88	66.63	68.08	
	350	A	351.46	356.04	364.89	
		B	69.07	69.66	71.07	
	400	A	351.83	357.76	365.90	
		B	71.17	71.38	72.58	
Faalkansen voor verschillende transportduren						
		vertrekriterium deining < 100 cm				
		transportduur				
		22 uur	34 uur	46 uur		
vertrekriterium zeegang [cm]	200	6.88E-06	8.53E-06	1.04E-05		
	250	2.98E-05	4.39E-05	5.39E-05		
	300	6.71E-05	8.25E-05	1.13E-04		
	350	1.07E-04	1.23E-04	1.66E-04		
	400	1.40E-04	1.56E-04	2.00E-04		

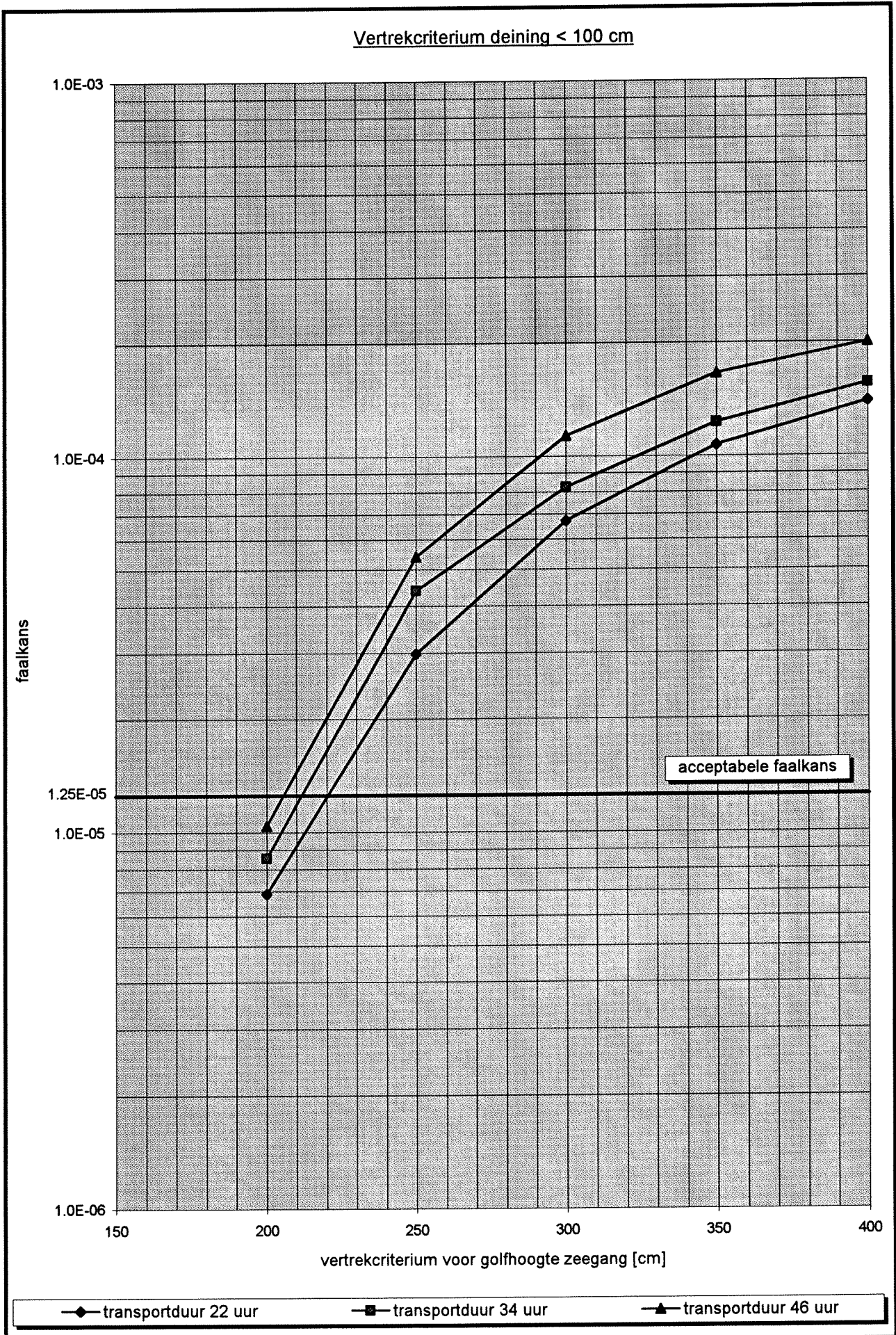
BIJLAGE X^B

Faalkansen voor verschillende vertrekcriteria



BIJLAGE X^c

Faalkansen voor verschillende transportduren



BIJLAGE XI^A
 Wachtijd-analyse
 transportduur van 22 uur

overschrijdingskans wachtijd van 24 uur in procenten	deining in cm			
zeegang in cm	25	50	75	100
200	72	25	17	16
250	67	10	6	1
300	68	9	3	0
350	-----	4	0	0
400	-----	-----	0	0
overschrijdingskans wachtijd van 48 uur in procenten	deining in cm			
zeegang in cm	25	50	75	100
200	53	8	3	3
250	52	1	0	0
300	47	0	0	0
350	-----	1	0	0
400	-----	-----	0	0
overschrijdingskans wachtijd van 72 uur in procenten	deining in cm			
zeegang in cm	25	50	75	100
200	40	1	1	0
250	35	0	0	0
300	34	0	0	0
350	-----	0	0	0
400	-----	-----	0	0
Gemiddelde wachtijd per transport in uren	deining in cm			
zeegang in cm	25	50	75	100
200	75	16	13	12
250	69	11	8	7
300	65	9	6	5
350	-----	7	5	4
400	-----	-----	4	3
Gemiddeld aantal transporten	deining in cm			
zeegang in cm	25	50	75	100
200	24	46	48	49
250	25	50	52	53
300	26	51	54	55
350	-----	53	55	56
400	-----	-----	56	57
Kans op transport	deining in cm			
zeegang in cm	25	50	75	100
200	0.54	0.66	0.72	0.72
250	0.53	0.75	0.84	0.86
300	0.54	0.77	0.88	0.91
350	-----	0.80	0.91	0.92
400	-----	-----	0.91	0.94

BIJLAGE XI^B
 Wachtijd-analyse
 transportduur van 34 uur

overschrijdingskans wachtijd van 24 uur in procenten	deining in cm			
zeegang in cm	25	50	75	100
	200	100	52	36
	250	100	25	14
	300	97	16	6
	350	-----	18	8
	400	-----	2	0
				0
overschrijdingskans wachtijd van 48 uur in procenten	deining in cm			
zeegang in cm	25	50	75	100
	200	95	23	13
	250	94	10	2
	300	90	4	0
	350	-----	1	0
	400	-----	0	0
				0
overschrijdingskans wachtijd van 72 uur in procenten	deining in cm			
zeegang in cm	25	50	75	100
	200	93	10	5
	250	87	2	1
	300	83	1	0
	350	-----	0	0
	400	-----	0	0
				0
Gemiddelde wachtijd per transport in uren	deining in cm			
zeegang in cm	25	50	75	100
	200	1001	33	23
	250	588	19	12
	300	410	14	8
	350	-----	14	9
	400	-----	5	3
				3
Gemiddeld aantal transporten	deining in cm			
zeegang in cm	25	50	75	100
	200	2	28	31
	250	4	32	35
	300	6	34	36
	350	-----	34	36
	400	-----	38	38
				39
Kans op transport	deining in cm			
zeegang in cm	25	50	75	100
	200	0.42	0.57	0.63
	250	0.45	0.66	0.75
	300	0.54	0.70	0.81
	350	-----	0.72	0.87
	400	-----	0.89	0.89
				0.92

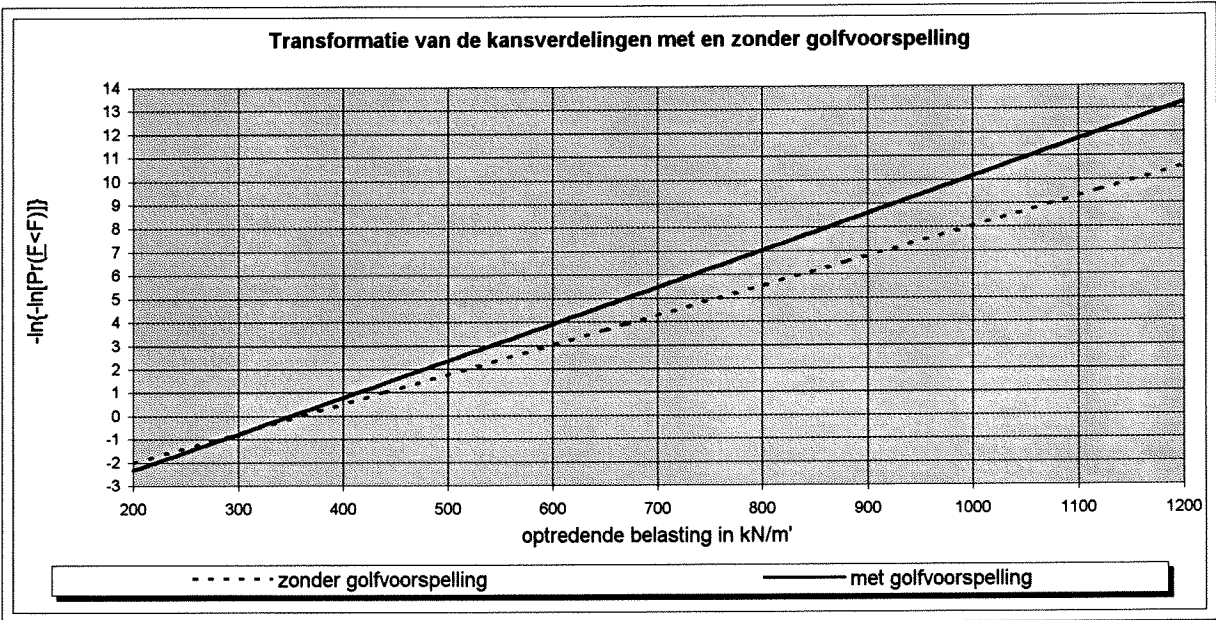
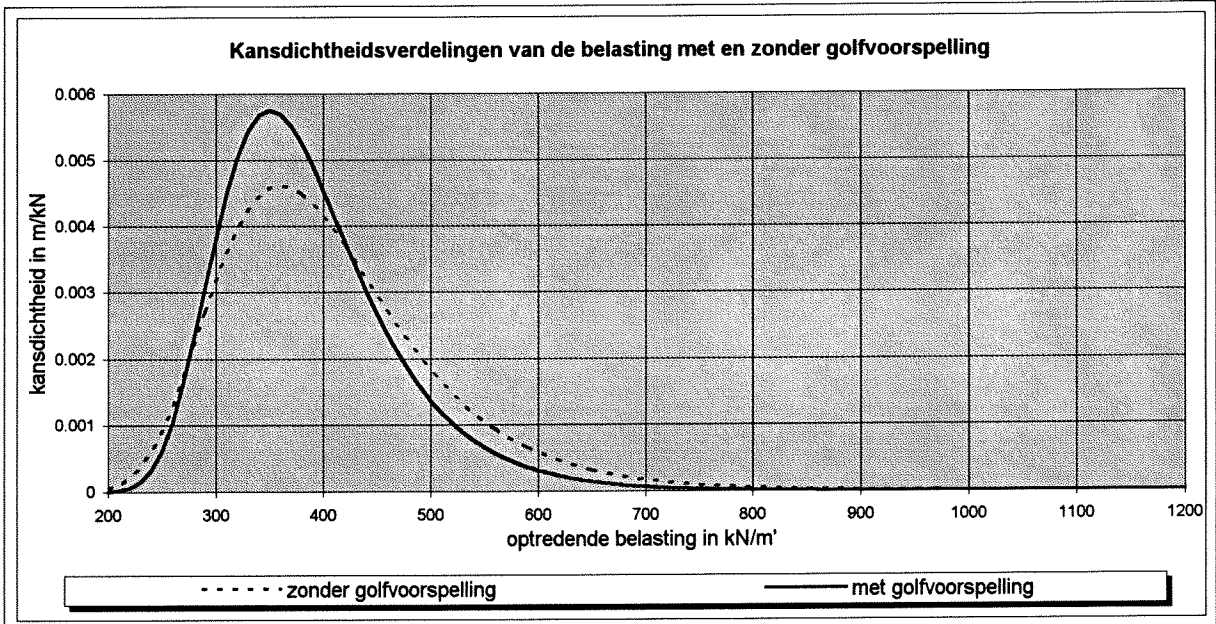
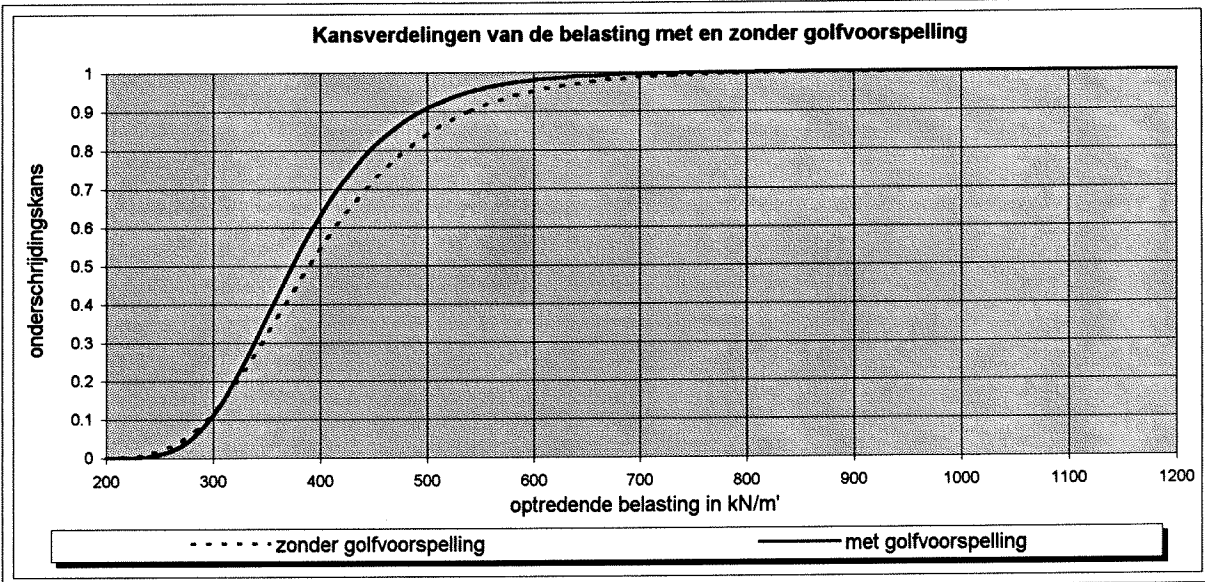
BIJLAGE XI^c

Wachttijd-analyse
transportduur van 46 uur

<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; background-color: #e0e0e0;">overschrijdingskans wachttijd van 24 uur in procenten</div>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th colspan="4" style="text-align: center;">deining in cm</th> </tr> <tr> <th colspan="2"></th> <th style="text-align: center;">25</th> <th style="text-align: center;">50</th> <th style="text-align: center;">75</th> <th style="text-align: center;">100</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: right;">200</td> <td style="text-align: center;">zeegang in cm</td> <td style="text-align: center;">100</td> <td style="text-align: center;">71</td> <td style="text-align: center;">54</td> <td style="text-align: center;">44</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">250</td> <td></td> <td style="text-align: center;">100</td> <td style="text-align: center;">49</td> <td style="text-align: center;">22</td> <td style="text-align: center;">16</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">300</td> <td></td> <td style="text-align: center;">100</td> <td style="text-align: center;">38</td> <td style="text-align: center;">7</td> <td style="text-align: center;">3</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">350</td> <td></td> <td style="text-align: center;">-----</td> <td style="text-align: center;">31</td> <td style="text-align: center;">7</td> <td style="text-align: center;">4</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">400</td> <td></td> <td style="text-align: center;">-----</td> <td style="text-align: center;">-----</td> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> </tbody> </table>			deining in cm						25	50	75	100	200	zeegang in cm	100	71	54	44	250		100	49	22	16	300		100	38	7	3	350		-----	31	7	4	400		-----	-----	0	0
		deining in cm																																									
		25	50	75	100																																						
200	zeegang in cm	100	71	54	44																																						
250		100	49	22	16																																						
300		100	38	7	3																																						
350		-----	31	7	4																																						
400		-----	-----	0	0																																						
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; background-color: #e0e0e0;">overschrijdingskans wachttijd van 48 uur in procenten</div>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th colspan="4" style="text-align: center;">deining in cm</th> </tr> <tr> <th colspan="2"></th> <th style="text-align: center;">25</th> <th style="text-align: center;">50</th> <th style="text-align: center;">75</th> <th style="text-align: center;">100</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: right;">200</td> <td style="text-align: center;">zeegang in cm</td> <td style="text-align: center;">100</td> <td style="text-align: center;">47</td> <td style="text-align: center;">29</td> <td style="text-align: center;">20</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">250</td> <td></td> <td style="text-align: center;">100</td> <td style="text-align: center;">22</td> <td style="text-align: center;">6</td> <td style="text-align: center;">2</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">300</td> <td></td> <td style="text-align: center;">100</td> <td style="text-align: center;">13</td> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">350</td> <td></td> <td style="text-align: center;">-----</td> <td style="text-align: center;">10</td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">400</td> <td></td> <td style="text-align: center;">-----</td> <td style="text-align: center;">-----</td> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> </tbody> </table>			deining in cm						25	50	75	100	200	zeegang in cm	100	47	29	20	250		100	22	6	2	300		100	13	0	0	350		-----	10	2	0	400		-----	-----	0	0
		deining in cm																																									
		25	50	75	100																																						
200	zeegang in cm	100	47	29	20																																						
250		100	22	6	2																																						
300		100	13	0	0																																						
350		-----	10	2	0																																						
400		-----	-----	0	0																																						
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; background-color: #e0e0e0;">overschrijdingskans wachttijd van 72 uur in procenten</div>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th colspan="4" style="text-align: center;">deining in cm</th> </tr> <tr> <th colspan="2"></th> <th style="text-align: center;">25</th> <th style="text-align: center;">50</th> <th style="text-align: center;">75</th> <th style="text-align: center;">100</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: right;">200</td> <td style="text-align: center;">zeegang in cm</td> <td style="text-align: center;">100</td> <td style="text-align: center;">32</td> <td style="text-align: center;">15</td> <td style="text-align: center;">10</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">250</td> <td></td> <td style="text-align: center;">100</td> <td style="text-align: center;">15</td> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">300</td> <td></td> <td style="text-align: center;">93</td> <td style="text-align: center;">6</td> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">350</td> <td></td> <td style="text-align: center;">-----</td> <td style="text-align: center;">4</td> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">400</td> <td></td> <td style="text-align: center;">-----</td> <td style="text-align: center;">-----</td> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> </tbody> </table>			deining in cm						25	50	75	100	200	zeegang in cm	100	32	15	10	250		100	15	1	0	300		93	6	0	0	350		-----	4	0	0	400		-----	-----	0	0
		deining in cm																																									
		25	50	75	100																																						
200	zeegang in cm	100	32	15	10																																						
250		100	15	1	0																																						
300		93	6	0	0																																						
350		-----	4	0	0																																						
400		-----	-----	0	0																																						
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; background-color: #e0e0e0;">Gemiddelde wachttijd per transport in uren</div>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th colspan="4" style="text-align: center;">deining in cm</th> </tr> <tr> <th colspan="2"></th> <th style="text-align: center;">25</th> <th style="text-align: center;">50</th> <th style="text-align: center;">75</th> <th style="text-align: center;">100</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: right;">200</td> <td style="text-align: center;">zeegang in cm</td> <td style="text-align: center;">> 1500</td> <td style="text-align: center;">65</td> <td style="text-align: center;">39</td> <td style="text-align: center;">30</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">250</td> <td></td> <td style="text-align: center;">> 1500</td> <td style="text-align: center;">34</td> <td style="text-align: center;">16</td> <td style="text-align: center;">12</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">300</td> <td></td> <td style="text-align: center;">1279</td> <td style="text-align: center;">24</td> <td style="text-align: center;">9</td> <td style="text-align: center;">7</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">350</td> <td></td> <td style="text-align: center;">-----</td> <td style="text-align: center;">20</td> <td style="text-align: center;">7</td> <td style="text-align: center;">6</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">400</td> <td></td> <td style="text-align: center;">-----</td> <td style="text-align: center;">-----</td> <td style="text-align: center;">6</td> <td style="text-align: center;">2</td> </tr> </tbody> </table>			deining in cm						25	50	75	100	200	zeegang in cm	> 1500	65	39	30	250		> 1500	34	16	12	300		1279	24	9	7	350		-----	20	7	6	400		-----	-----	6	2
		deining in cm																																									
		25	50	75	100																																						
200	zeegang in cm	> 1500	65	39	30																																						
250		> 1500	34	16	12																																						
300		1279	24	9	7																																						
350		-----	20	7	6																																						
400		-----	-----	6	2																																						
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; background-color: #e0e0e0;">Gemiddeld aantal transporten</div>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th colspan="4" style="text-align: center;">deining in cm</th> </tr> <tr> <th colspan="2"></th> <th style="text-align: center;">25</th> <th style="text-align: center;">50</th> <th style="text-align: center;">75</th> <th style="text-align: center;">100</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: right;">200</td> <td style="text-align: center;">zeegang in cm</td> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">18</td> <td style="text-align: center;">21</td> <td style="text-align: center;">23</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">250</td> <td></td> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">22</td> <td style="text-align: center;">26</td> <td style="text-align: center;">27</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">300</td> <td></td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">24</td> <td style="text-align: center;">28</td> <td style="text-align: center;">28</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">350</td> <td></td> <td style="text-align: center;">-----</td> <td style="text-align: center;">25</td> <td style="text-align: center;">28</td> <td style="text-align: center;">28</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">400</td> <td></td> <td style="text-align: center;">-----</td> <td style="text-align: center;">-----</td> <td style="text-align: center;">28</td> <td style="text-align: center;">30</td> </tr> </tbody> </table>			deining in cm						25	50	75	100	200	zeegang in cm	0	18	21	23	250		0	22	26	27	300		2	24	28	28	350		-----	25	28	28	400		-----	-----	28	30
		deining in cm																																									
		25	50	75	100																																						
200	zeegang in cm	0	18	21	23																																						
250		0	22	26	27																																						
300		2	24	28	28																																						
350		-----	25	28	28																																						
400		-----	-----	28	30																																						
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; background-color: #e0e0e0;">Kans op transport</div>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th colspan="4" style="text-align: center;">deining in cm</th> </tr> <tr> <th colspan="2"></th> <th style="text-align: center;">25</th> <th style="text-align: center;">50</th> <th style="text-align: center;">75</th> <th style="text-align: center;">100</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: right;">200</td> <td style="text-align: center;">zeegang in cm</td> <td style="text-align: center;">0.00</td> <td style="text-align: center;">0.53</td> <td style="text-align: center;">0.57</td> <td style="text-align: center;">0.59</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">250</td> <td></td> <td style="text-align: center;">0.00</td> <td style="text-align: center;">0.58</td> <td style="text-align: center;">0.70</td> <td style="text-align: center;">0.72</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">300</td> <td></td> <td style="text-align: center;">0.61</td> <td style="text-align: center;">0.60</td> <td style="text-align: center;">0.79</td> <td style="text-align: center;">0.83</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">350</td> <td></td> <td style="text-align: center;">-----</td> <td style="text-align: center;">0.62</td> <td style="text-align: center;">0.81</td> <td style="text-align: center;">0.86</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">400</td> <td></td> <td style="text-align: center;">-----</td> <td style="text-align: center;">-----</td> <td style="text-align: center;">0.81</td> <td style="text-align: center;">0.92</td> </tr> </tbody> </table>			deining in cm						25	50	75	100	200	zeegang in cm	0.00	0.53	0.57	0.59	250		0.00	0.58	0.70	0.72	300		0.61	0.60	0.79	0.83	350		-----	0.62	0.81	0.86	400		-----	-----	0.81	0.92
		deining in cm																																									
		25	50	75	100																																						
200	zeegang in cm	0.00	0.53	0.57	0.59																																						
250		0.00	0.58	0.70	0.72																																						
300		0.61	0.60	0.79	0.83																																						
350		-----	0.62	0.81	0.86																																						
400		-----	-----	0.81	0.92																																						

BIJLAGE XII

Verdelingen van de belastingen met en zonder golfvoorspelling



BIJLAGE XIII

Beslissing op basis van de totale verwachte kosten

