

e0701828

Analyse ten behoeve van definitie extreme
golflap in verband met de implementatie van de
breuksterkte in GOLFKLAP

Versie december 2007

Projectnummer : e0701828
Offertenummer en datum : o070663/au/adl d.d. 17 juli 2007
Titel rapport : Definitie extreme golfklap
Status rapport : concept

Naam opdrachtgever : DWW - STOWA
Adres : Postbus 5044
Plaats : 2600 GA DELFT
Naam contactpersoon : mw. dr. B.G.H.M. Wichman (DWW)
ir. R. 't Hart (DWW)
ir. L.R. Wentholt (STOWA)

Datum opdracht : 23 juli 2007
Kenmerk opdracht : 2007-0619-LRW-451163-BGH

Contactpersoon KOAC·NPC : ing. A.K. de Looff
Auteur(s) rapport : ing. A.K. de Looff

Rapportage

Naam: A.K. de Looff

Handtekening:

Autorisatie

Naam: F. Tolman

Handtekening:

Datum: 14 december 2007

Datum: 14 december 2007

Zonder schriftelijke toestemming van KOAC·NPC mag het rapport (of certificaat) niet anders dan in zijn geheel worden gereproduceerd.

Inhoudsopgave

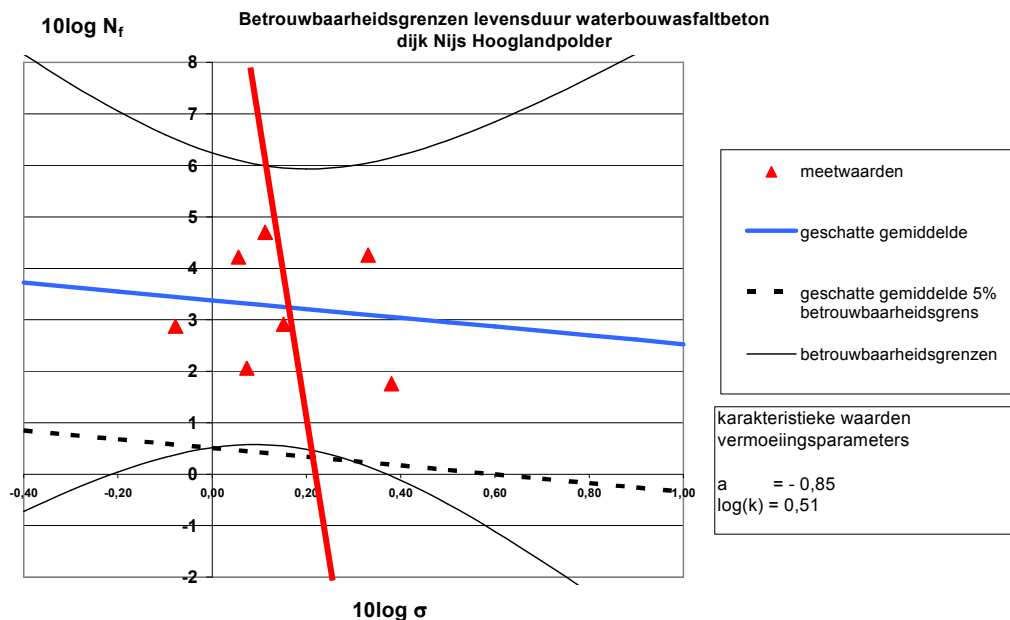
1	Inleiding.....	5
1.1	Probleemstelling en doel.....	5
1.2	Aanpak	6
2	Model	8
2.1	Bezwijkfunctie	8
2.2	Bepaling van de optredende spanning	8
2.3	Relatie tussen Elasticiteitsmodulus en breuksterkte.....	9
2.4	Toetscriterium	11
3	Verdelingen.....	12
3.1	Stootfactor en golfbreedte.....	12
3.2	Laagdikte, elasticiteitsmodulus en bedingsconstante	13
3.3	Breuksterkte van het asfalt.....	13
3.3.1	Algemeen	13
3.3.2	Houtribdijk	13
3.3.3	Helderse zeewering	16
3.3.4	Veersedam	18
4	Opzet Monte Carlosimulaties.....	21
4.1	Algemeen	21
4.2	Invoerparameters ter bepaling van de optredende spanning	21
4.2.1	Elasticiteitsmodulus van het asfalt	21
4.2.2	Laagdikte van het asfalt	22
4.2.3	Beddingsconstante van de ondergrond	23
4.2.4	Stootfactor	24
4.2.5	Golfbreedte.....	25
4.3	Controle van de optredende spanningen.....	26
5	Probabilistische berekeningen.....	28
5.1	Inleiding	28
5.2	Houtribdijk	28
5.2.1	Invoerparameters simulatie.....	28
5.2.2	Resultaten simulatie met breuksterkte onafhankelijk van de elasticiteitsmodulus	29
5.2.3	Resultaten simulatie met een breuksterkte afhankelijk van de elasticiteitsmodulus .	33
5.3	Helderse zeewering	35
5.3.1	Invoerparameters simulatie.....	35
5.3.2	Resultaten simulatie met breuksterkte onafhankelijk van de elasticiteitsmodulus	36
5.3.3	Resultaten simulatie met een breuksterkte afhankelijk van de elasticiteitsmodulus .	38
5.4	Veersedam	39
5.4.1	Invoerparameters simulatie.....	39
5.4.2	Resultaten simulatie met breuksterkte onafhankelijk van de elasticiteitsmodulus	40
5.4.3	Resultaten simulatie met een breuksterkte afhankelijk van de elasticiteitsmodulus .	42

6	Berekeningen met GOLFKLAP	44
7	Conclusies en aanbevelingen.....	45
7.1	Conclusies.....	45
7.2	Aanbevelingen	46
8	Referenties.....	47
Bijlage 1: verdelingen parameters van de simulaties waarbij de optredende spanning de breuksterkte overschrijdt		48

1 Inleiding

1.1 Probleemstelling en doel

Naarmate asfalt ouder wordt, wordt het brosser. Hierdoor wordt de sterkte van het asfalt beïnvloed. Het vermoeden bestaat dat ouder asfalt, naast dat het ten gevolge van vermoeiing kan bezwijken, ook door één extreme golfklap kan bezwijken doordat door deze extreme belasting direct de breuksterkte van het asfalt wordt overschreden. Daarnaast is bij verschillende in de afgelopen jaren uitgevoerde veiligheidsbeoordelingen gebleken dat het tot nu toe gehanteerde model de vermoeiingseigenschappen van oud asfalt met een variabele kwaliteit niet goed beschrijft. In deze gevallen resulteert lineaire regressie door de proefresultaten in een vermoeiingslijn met een zeer kleine richtingscoëfficiënt (vaak kleiner dan 2). Een voorbeeld hiervan is gegeven in figuur 1.1



Figuur 1.1 Voorbeeld van een vermoeiingslijn van een oude bekleding met een variabele asfaltkwaliteit

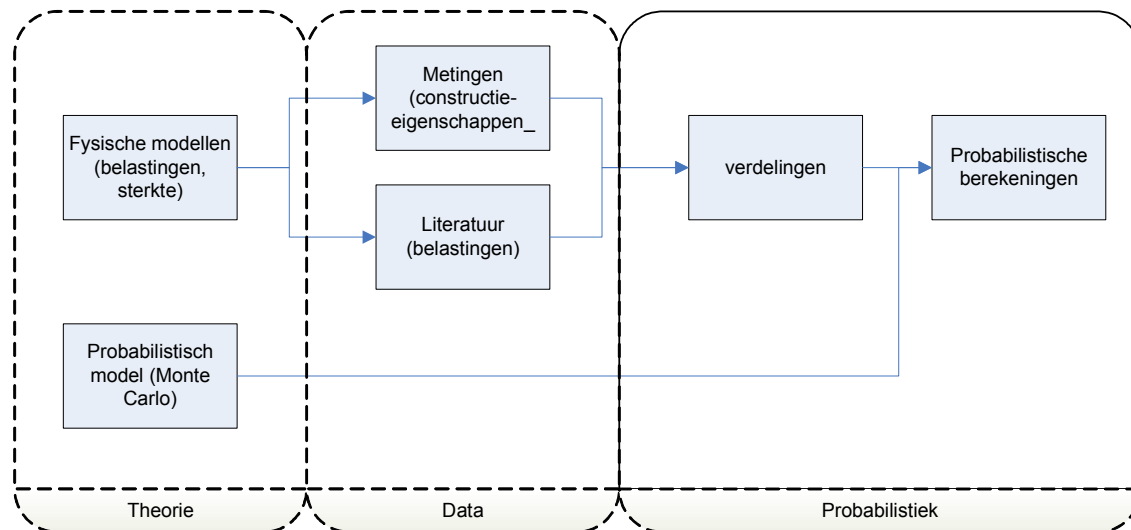
Het probleem wordt mede veroorzaakt doordat de proefstukken geen constante slechte kwaliteit hebben, een deel van de proefstukken heeft een betere kwaliteit. Een betere beschrijving van het gedrag van de proefstukken met een slechte kwaliteit is gegeven door de rode lijn in figuur 1.1. Deze proefstukken vertonen in bezwijkproeven een gedrag dat vergelijkbaar is met beton; het materiaal kan door een vrijwel oneindig aantal lastherhalingen mits een kritische spanning niet wordt overschreden. Deze kritische spanning kan worden gekarakteriseerd door de breuksterkte bij 1 lastherhaling. Deze kan worden bepaald door een proefstuk bij een constante snelheid te belasten tot breuk.

Voor dit project zijn 2 doelstellingen geformuleerd:

- In dit rapport wordt nagegaan of het, onder extreme omstandigheden die langs de Nederlandse kust kunnen voorkomen, mogelijk is dat een dijkbekleding van waterbouwasfaltbeton kan bezwijken doordat de breuksterkte van het asfalt wordt overschreden door de optredende buigtrekspanning in de bekleding ten gevolge van een extreme golfklap.
- Een vergelijking van de resultaten hierboven beschreven analyse met een berekening met GOLFKLAP is gewenst. Daarom zullen er daarnaast berekeningen met GOLFKLAP voor hetzelfde materiaal worden uitgevoerd. Doel is om op basis van deze analyse na te gaan of een aanpassing van het computermodel GOLFKLAP noodzakelijk is.

1.2 Aanpak

Om na te gaan hoe groot de kans is dat de breuksterkte wordt overschreden door de optredende spanning in een asfaltbekleding ten gevolge van optredende golfbelastingen zijn Monte Carlosimulaties uitgevoerd. Een overzicht van de aanpak is gegeven in figuur 1.2.



Figuur 1.2: aanpak van de uitgevoerde Monte Carlosimulaties

Het fysische model is gebaseerd op het computermodel GOLFKLAP. De belasting en de constructie zijn op dezelfde wijze gemodelleerd. In hoofdstuk 2 wordt hier nader op ingegaan.

Voor de volgende parameters zijn verdelingen afgeleid op basis van zowel metingen (constructie-eigenschappen) als de literatuur (belastingen):

- Laagdikte van het asfalt
- Elasticiteitsmodulus van het asfalt
- Breuksterkte van het asfalt
- Beddingsconstante van de ondergrond
- Stootfactor van het golfveld
- Golfbreedte

In Excel zijn 30.000 simulaties uitgevoerd waarbij per simulatie voor elk van de hierboven genoemde variabelen een trekking is uitgevoerd onder de voorwaarde dat de parameter de opgelegde verdeling heeft. De volgende verdelingen zijn gehanteerd:

- Normale verdeling voor de laagdikte, elasticiteitsmodulus, breuksterkte en beddingsconstante
- Lognormale verdeling voor de stootfactor zoals bepaald door Führböter [Führböter, 1966]
- Rayleigh-verdeling voor de golfbreedte zoals aangenomen door Meijers [Meijers, 1993]

De gebruikte verdeling van de stootfactor en de golfbreedte komen overeen met de in GOLFKLAP gebruikte verdelingen.

Op basis van de gegevens van 3 in Nederland gelegen dijkvakken verdelingen van breuksterktes en van optredende spanningen in de bekleding bepaald. Van de volgende dijkvakken zijn de relevante gegevens gebruikt:

- Houtribdijk langs het IJsselmeer
- Helderse zeewering te Noord-Holland
- Veersedam te Zeeland

In hoofdstuk 3 zijn de gebruikte verdelingen voor de verschillende parameters gegeven.

De opzet van de Monte Carlosimulaties is verder uitgewerkt in hoofdstuk 4. Hier is tevens de correcte werking nagegaan.

In hoofdstuk 5 zijn de probabilistische berekeningen gerapporteerd. Voor de 3 hierboven genoemde dijkvakken zijn berekeningen uitgevoerd met een significante golfhoogte van 3, 4 en 5m.

In hoofdstuk 6 zijn berekeningen met GOLFKLAP voor dezelfde dijkvakken gepresenteerd. Hierbij is een vergelijking gemaakt met de resultaten van de Monte Carlosimulaties.

In hoofdstuk 7 zijn de conclusies naar aanleiding van de hier uitgevoerde berekeningen opgenomen.

2 Model

2.1 Bezwijkfunctie

De gehanteerde bezwijkfunctie luidt als volgt:

$$g = \sigma_c - \sigma$$

Hierin is:

- g bezwijkfunctie
- σ optredende trekspanning aan de onderzijde van de bekleding (MPa)
- σ_c breuktrekspanning (MPa)

De wijze waarop de optredende spanning wordt bepaald, is beschreven in paragraaf 2.2. Voor elk dijkvak zijn 2 typen Monte Carlosimulaties uitgevoerd:

1. voor de breuktrekspanning zijn ad random trekkingen uitgevoerd onder de voorwaarde dat deze parameter de in hoofdstuk 3 bepaalde verdeling heeft
2. de breuktrekspanning is bepaald op basis van een uit laboratoriumproeven afgeleide relatie tussen de elasticiteitsmodulus en de breuksterkte.

In paragraaf 2.3 is een beschrijving gegeven van de relatie tussen de elasticiteitsmodulus en de breuksterkte.

2.2 Bepaling van de optredende spanning

Voor deze 3 dijken zijn de verdelingen van de optredende spanningen (maximale buigtrekspanning midden onder de last) en de breuksterktes met elkaar vergeleken. Deze spanning is bepaald met de volgende formules:

$$\sigma = \frac{p_{\max}}{4 \beta^2 \beta z} [1 - e^{(-\beta z)} (\cos(\beta z) + \sin(\beta z))] \frac{6}{h^2}$$

met

$$\beta = 4 \sqrt{\frac{3 c (1 - \nu^2)}{S h^3}}$$

Hierin is:

- σ optredende trekspanning aan de onderzijde van de bekleding (MPa)
- $p_{\max}$ maximale drukstoot (MPa)
- h laagdikte, bepaald met GPR-metingen (m)
- z halve breedte driehoeksbelasting (=0,5H)
- c beddingsconstante van de ondergrond, berekend uit VGD-metingen (MPa/m)
- S stijfheidsmodulus van het asfalt, berekend uit VGD-metingen (MPa)

ν dwarscontractiecoëfficiënt van het asfalt (-)

Gerekend is met een dwarscontractiecoëfficiënt van 0,35. De maximale drukstoot ($P_{\max}$) is bepaald met de onderstaande formule:

$$P_{\max} = \rho_w g q H_s$$

hierin is:

ρ_w dichtheid water (kg/m^3)
 g versnelling van de zwaartekracht = $9,81 \text{ m/s}^2$
 q stootfactor afhankelijk van de taludhelling (-)
 H_s significante golfhoogte (m)

2.3 Relatie tussen Elasticiteitsmodulus en breuksterkte

Tot nu toe worden de stijfheid en de sterkte bij veiligheidsbeoordelingen als onafhankelijke variabelen gezien. Dit is een conservatieve aanname; asfalt met een lagere sterkte zal ook een lagere stijfheid hebben hetgeen de optredende spanningen in de bekleding onder belastingen reduceert. (Bij berekeningen met GOLFKLAP wordt zelfs gerekend met een karakteristieke ondergrens voor de vermoeiingseigenschappen en een karakteristieke bovengrens voor de laagdikte). Om na te gaan wat de invloed is van de correlatie tussen de elasticiteitsmodulus en de breuksterkte zijn ook simulaties uitgevoerd waarbij rekening is gehouden met deze relatie. De volgende relatie tussen de elasticiteitsmodulus en de breuksterkte is gebruikt:

$$\sigma_c = a E_{dyn} + b$$

Hierin is:

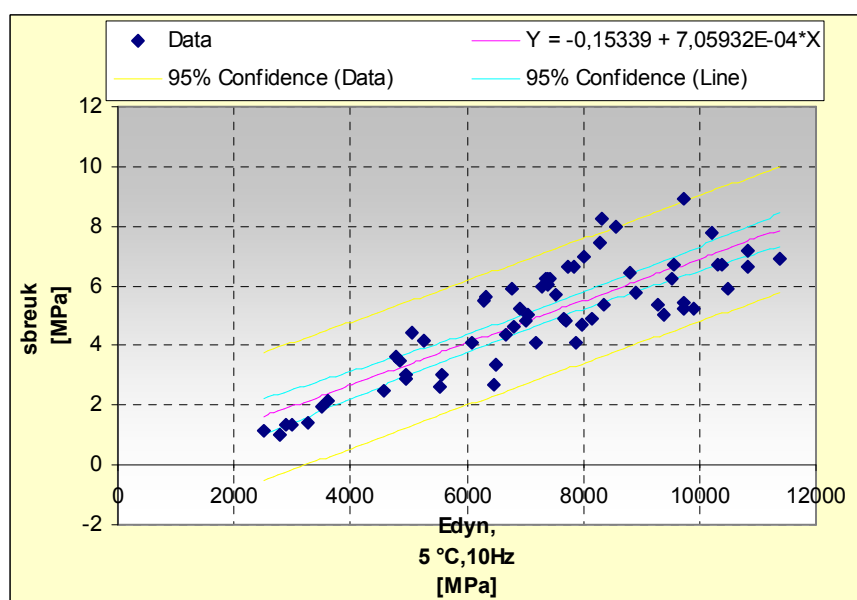
σ_c breuktrekspanning (MPa)
 E_{dyn} stijfheidsmodulus van het asfalt bepaald in het laboratorium (MPa)
 a, b coëfficiënten

Om een bruikbare relatie tussen de elasticiteitsmodulus en de breuksterkte te verkrijgen zijn de resultaten van verschillende in het verleden uitgevoerde breuksterkteproeven gebruikt. Een overzicht van de projecten waarvan de proefresultaten zijn gebruikt is gegeven in tabel 2.1. Alle proeven zijn uitgevoerd in een driepuntsbuigopstelling bij een temperatuur van 5 graden Celsius en een belastingsnelheid van 0,085 mm/s. Van alle balkjes is vooraf de elasticiteitsmodulus bij 5 graden Celsius en 10 Hz. bepaald. De elasticiteitsmodulus (bij 5 graden Celsius en 10 Hz.) is uitgezet tegen de breuksterkte (bij 5 graden Celsius en een belastingsnelheid van 0,085 mm/s).

Tabel 2.1: overzicht projecten waarvan proefresultaten zijn gebruikt

Oorsprong proefstukken	jaar van uitvoering proef	projectnummer KOAC-NPC	aantal proefstukken
Noordzeedijken Noord-Holland	2004	048304	24
Flauwe werk	2006	0601831	8
Westhoek – Zwarte Haan	2005	0500543	16
Koehool - Westhoek	2006	0603066	16

In figuur 2.1 is de Elasticiteitsmodulus (bij 5 graden Celsius en 10 Hz.) uitgezet tegen de breuksterkte (bij 5 graden Celsius en een belastingsnelheid van 0,085 mm/s).



Figuur 2.1 Elasticiteitsmodulus versus de breuksterkte

	N	A	B	R	R-Square
<u>Y = A + B*X</u>	63	-0,153398386	0,000705932	0,839607565	0,704940864

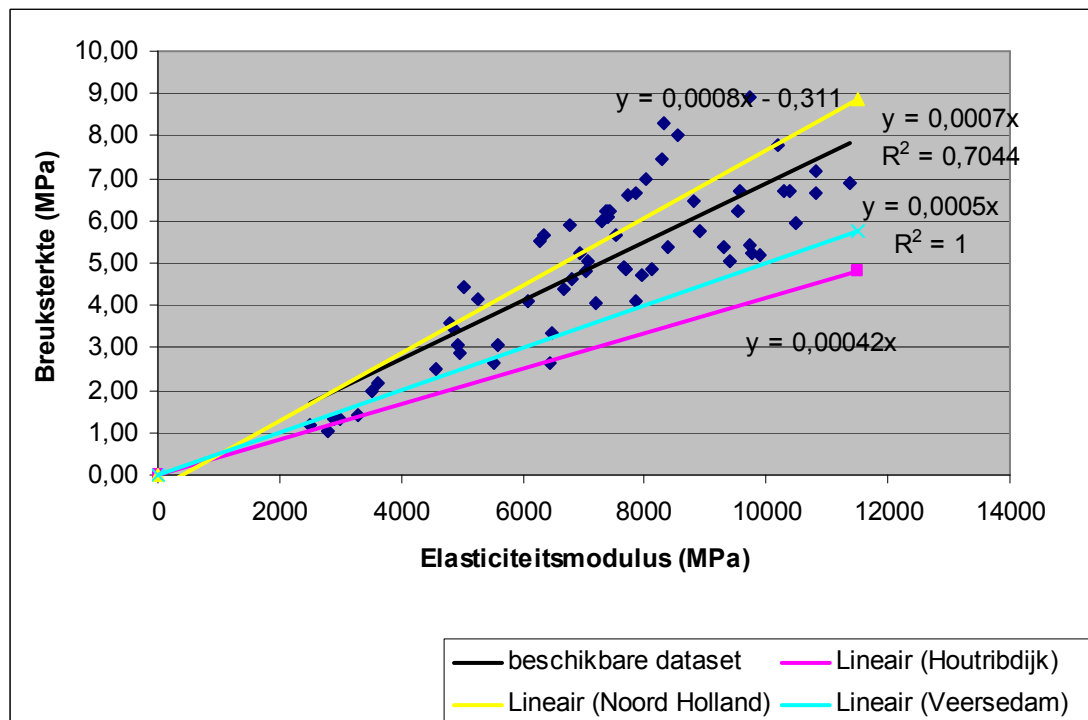
Van de dijkvakken Koehool-Westhoek en Westhoek – Zwarte Haan is circa 50% van de proefstukken afkomstig uit door vocht aangetast asfalt. De lage breuksterktes zijn uit deze dijkvakken afkomstig.

Voor de drie hier beschouwde dijkvakken zijn relaties waarmee een breuksterkte kan worden opgesteld op basis van een gegeven elasticiteitsmodulus. De relaties zijn zodanig opgesteld dat:

- de relatie valt binnen de bandbreedte van de in figuur 2.1 gegeven waarnemingen;
- het gemiddelde en de standaardafwijking van de op deze wijze verkregen verdeling van de breuksterkte overeenkomen met de in paragraaf hoofdstuk 3 afgeleide verdelingen voor de dijkvakken.

De relaties zijn verkregen door de functie te bepalen door de volgende punten: (E_{gem} , $\sigma_{breuk,gem}$) en (E_{max} , $\sigma_{breuk,max}$), afkomstig uit de datasets met 30.000 waarnemingen. Waar nodig zijn deze datasets enigszins aangepast om het verschil tussen de beoogde en gerealiseerde dataset te verkleinen. De karakteristieken van de beoogde en gerealiseerde datasets zijn opgenomen in de tabellen 3.3, 3.9 en 3.12.

Gebleden is dat voor de Houtribdijk en de Helderse zeewering op deze wijze een acceptabele relatie is opgesteld, dat wil zeggen: de verschillen tussen de beoogde en gerealiseerde datasets zijn hier klein. Voor de Veerse dam is dit niet het geval. De gehanteerde relaties zijn gepresenteerd in figuur 2.2.



Figuur 2.2: gehanteerde relaties voor bepaling van de breuksterkte op basis van de elasticiteitsmodulus

Een mogelijke correlatie tussen de elasticiteitsmodulus van het asfalt en de beddingsconstante van de ondergrond is bij de hier uitgevoerde simulaties buiten beschouwing gelaten.

2.4 Toetscriterium

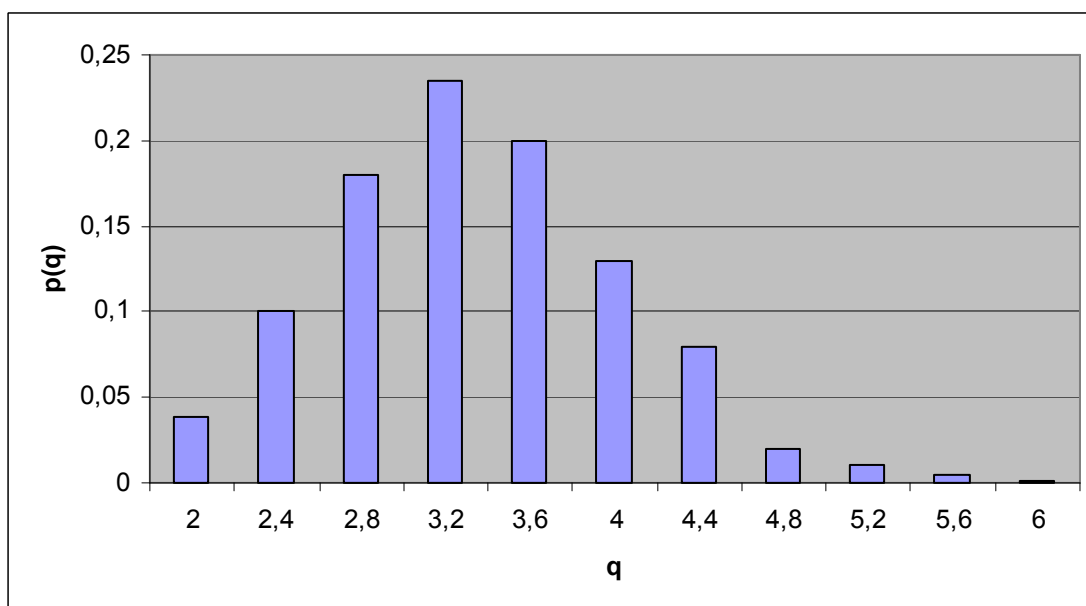
Met behulp van de hier uitgevoerde Monte-Carlosimulatie wordt een kans op overschrijden van de breuksterkte door de optredende spanning bepaald bij een opgelegde golfbelasting. In overleg met de Dienst Weg- en Waterbouwkunde zijn de volgende criteria bepaald waarop zal worden getoetst:

$P \leq 1/1.000$	goedkeuren
$1/1.000 > P \geq 1/100$	twijfelachtig
$P > 1/100$	afkeuren

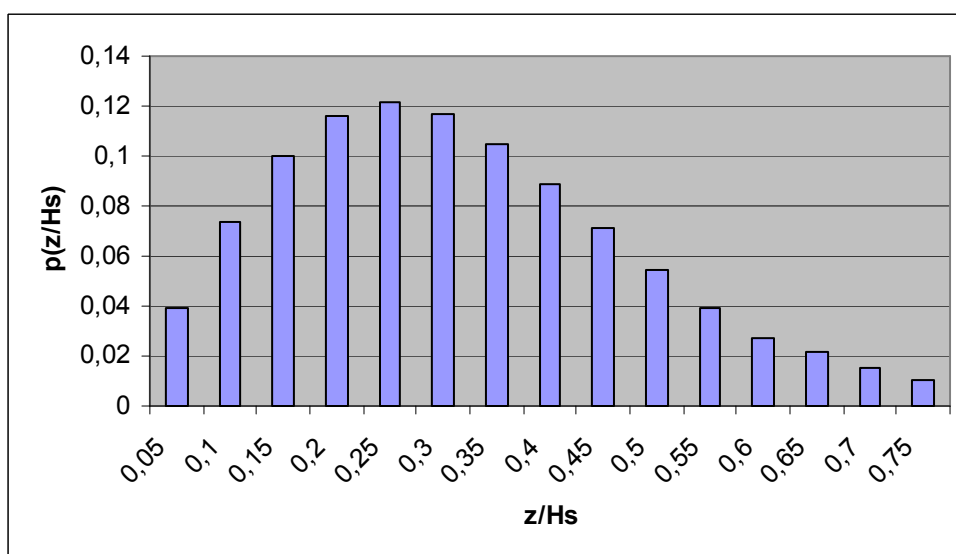
3 Verdelingen

3.1 Stootfactor en golfbreedte

De verdelingen voor de golfbreedte en de stootfactor zijn afkomstig uit de literatuur. Bij de hier uitgevoerde simulaties zijn de verdelingen gebruikt zoals deze ook in GOLFKLAP zijn geïmplementeerd. De kansdichtheidsfunctie van deze verdelingen is opgenomen in de figuren 3.1 en 3.2.



Figuur 3.1 Kansdichtheidsfunctie stootfactor q



Figuur 3.2 Kansdichtheidsfunctie golfbreedte z/Hs

3.2 Laagdikte, elasticiteitsmodulus en bedingsconstante

Doordat voor veel veiligheidsbeoordelingen veldmetingen (grondradarmetingen ter bepaling van de laagdikte en valgewicht-deflectiemetingen ter bepaling van de elasticiteitsmodulus van het asfalt en de beddingsconstante van de ondergrond) zijn uitgevoerd, zijn er voldoende grote datasets beschikbaar waarvan de verdeling kan worden vastgesteld. Het blijkt dat de genoemde parameters veelal normaal verdeeld kunnen worden verondersteld. Bij de simulaties zijn normale verdelingen voor de genoemde parameters gehanteerd.

3.3 Breuksterkte van het asfalt

3.3.1 Algemeen

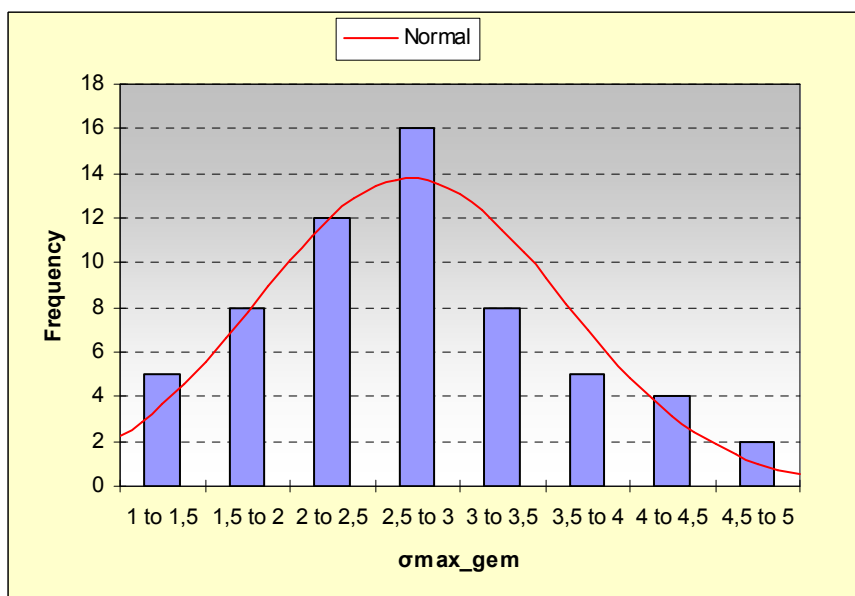
In tegenstelling tot de andere parameters zijn van de breuksterkte slechts weinig datasets beschikbaar en zijn de beschikbare datasets van veel geringere omvang. Om een goede vergelijking te kunnen maken tussen de optredende spanning in de bekleding en de breuksterkte van het asfalt zijn voor de breuksterkte verdelingen geproduceerd met eenzelfde omvang als de verdeling van de optredende spanningen (verdelingen met 30.000 waarnemingen). Hierbij is als volgt te werk gegaan:

Van een beschikbare dataset is met behulp van de Kolmogorov-Smirnovtest nagegaan of de betreffende set normaal verdeeld is. Als dit het geval is zijn van de dataset gemiddelde en standaardafwijking bepaald en zijn random 30.000 waarnemingen gegenereerd, zodanig dat de verdeling van de breuksterkte overeenkomt met de vooraf bepaalde vorm en dimensies van de verdeling.

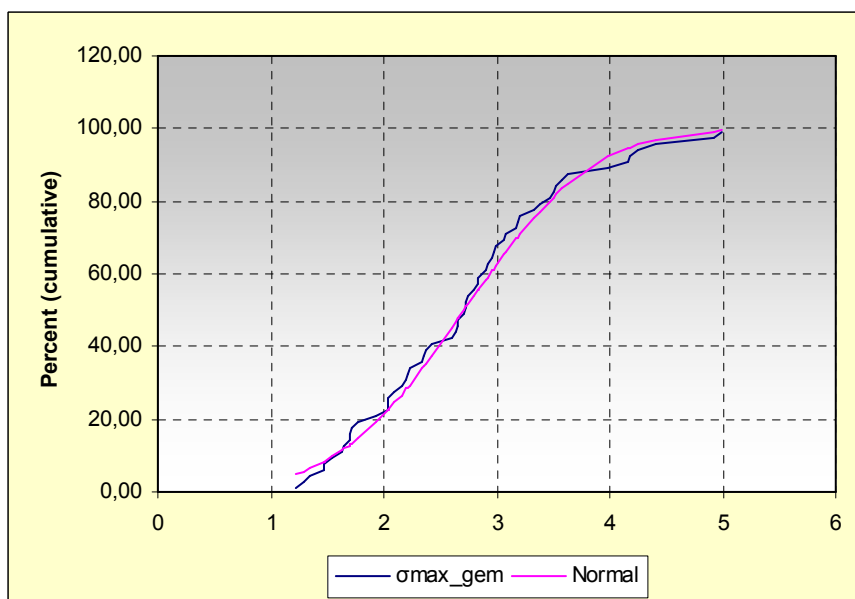
Er zijn analyses uitgevoerd op basis van gegevens van 3 dijkvakken. De gehanteerde verdelingen van de breuksterktes zijn hieronder verder uitgewerkt.

3.3.2 Houtribdijk

Van de Houtribdijk is de grootste dataset beschikbaar. Voor toetsing van de Houtribdijk is in een SCB-opstelling 60 maal de breuksterkte bepaald bij 5 graden Celsius en een belastingsnelheid van 0,085 mm/s. De gegevens zijn afkomstig uit [KOAC-NPC, 2005-1]. Het histogram van de dataset is gegeven in figuur 3.3, de cumulatieve frequentieverdeling in figuur 3.4.



Figuur 3.3 Histogram van de breuksterkte (Houtribdijk)



Figuur 3.4 Cumulatieve frequentieverdeling van de breuksterkte (Houtribdijk)

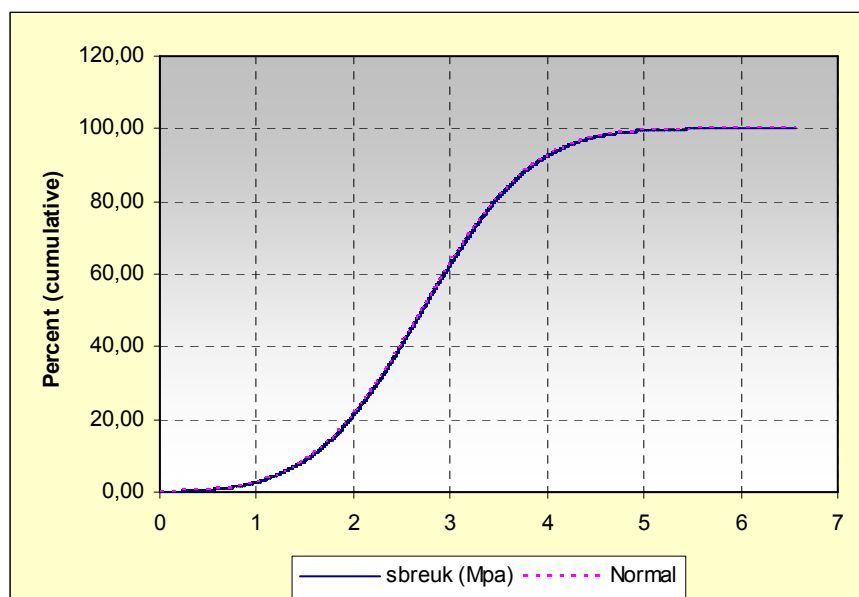
In tabel 3.1 zijn de parameters van de Kolmogorov-Smirnovtest samengevat.

Tabel 3.1 Resultaten Kolmogorov-Smirnovtest

	N	D	P
σ_{max_gem}	60	0,060405224	0,980874951

In tabel 3.1 is N het aantal waarnemingen, D de grootste verticale afstand tussen de actuele cumulatieve frequentiecurve en de best-fit normale verdeling en P de kans dat de D-waarde wordt overschreden bij random trekking van een waarde uit een normaal verdeelde populatie. Bij een $P > 0,05$ mag worden aangenomen dat de populatie normaal is verdeeld.

Op basis van de resultaten van de Kolmogorov-Smirnovtest uit tabel 3.1 wordt aangenomen dat de dataset normaal is verdeeld. Van de dataset zijn de gemiddelde waarde en de standaardafwijking bepaald. Hiermee is een dataset gegenereerd waarvan de cumulatieve frequentieverdeling is gegeven in figuur 3.5. Als ondergrens is een breuksterkte van 0 aangehouden. Een breuksterkte van 0 komt bij 3 uitgevoerde simulaties met ieder 30.000 trekkingen 32, 27 en 29 maal voor.



Figuur 3.5 Cumulatieve frequentieverdeling gegenereerde dataset

In tabel 3.2 zijn de karakteristieken van beide datasets samengevat.

Tabel 3.2 Karakteristieken datasets

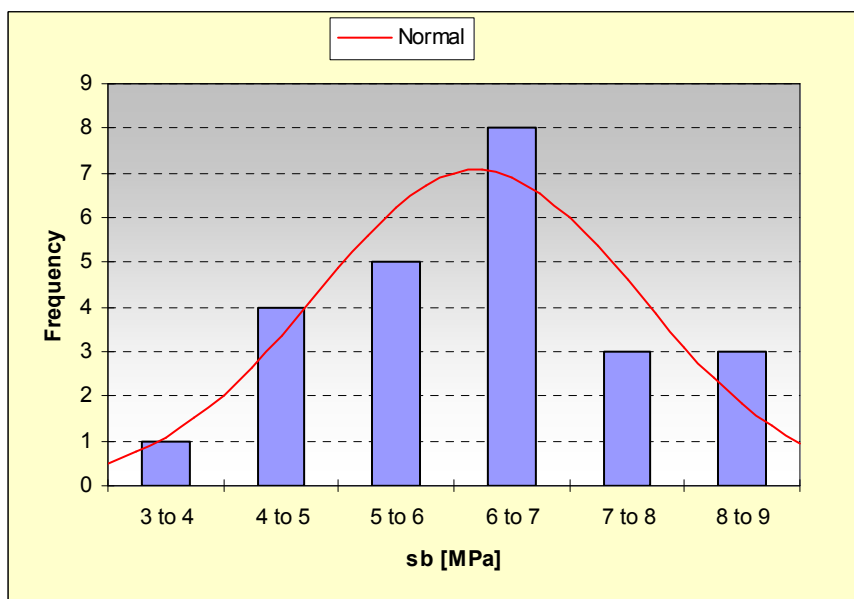
	laboratoriumresultaten	beoogde dataset	gerealiseerde dataset
gemiddelde	2,71	2,71	2,71
standaardafwijking	0,90	0,90	0,90
min	1,23	0,00*	0,00
max	4,99	6,31*	6,20
aantal	60	30000	30000

* Een minimum of een maximum kan niet worden bepaald op basis van tabellen van de standaard normale verdeling, wel een kans op onderschrijding en overschrijding van een bepaalde waarde. De kans op onderschrijding / overschrijding van $X_{\text{gem}} \pm 4\sigma = 0,00003 = 1/33.3333$. Als beoogd maximum is daarom de gemiddelde waarde + 4 x de

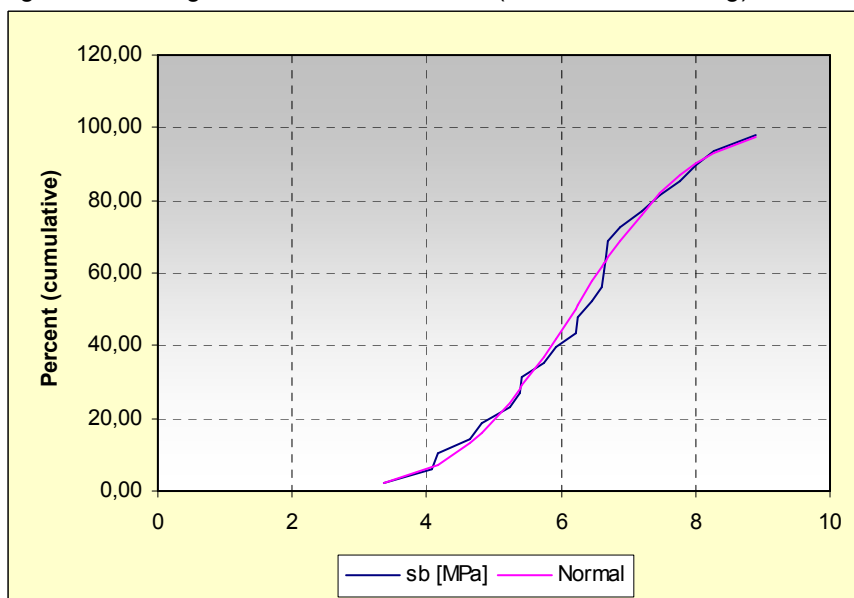
standaardafwijking gepresenteerd. Als beoogd minimum is 0 aangehouden omdat een breuksterkte < 0 fysisch niet mogelijk is.

3.3.3 Helderse zeewering

Voor toetsing van de Helderse, Pettemer en Hondsbossche zeewering is in een driepunts-buigopstelling 24 maal de breuksterkte bepaald bij 5 graden Celsius en een belastingsnelheid van 0,085 mm/s. Voor deze analyse zijn de gegevens van de 3 dijkvakken samengevoegd. De gegevens zijn afkomstig uit [KOAC-NPC, 2005-2]. Het histogram van de dataset is gegeven in figuur 3.6, de cumulatieve frequentieverdeling in figuur 3.7.



Figuur 3.6 Histogram van de breuksterkte (Helderse zeewering)



Figuur 3.7 Cumulatieve frequentieverdeling van de breuksterkte (Helderse zeewering)

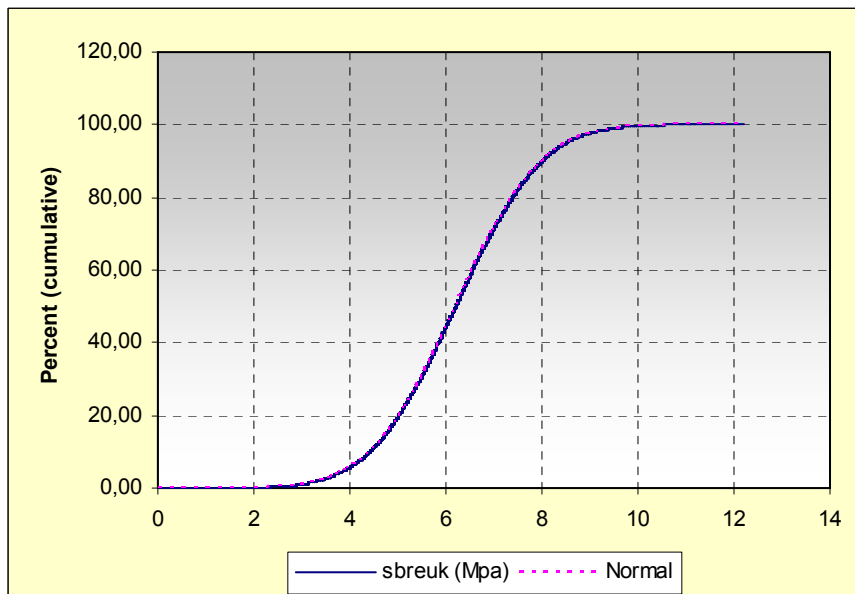
In tabel 3.3 zijn de parameters van de Kolmogorov-Smirnovtest samengevat.

Tabel 3.3 Resultaten Kolmogorov-Smirnovtest

	N	D	P
sb [MPa]	24	0,085596087	0,994635707

In tabel 3.3 is N het aantal waarnemingen, D de grootste verticale afstand tussen de actuele cumulatieve frequentiecurve en de best-fit normale verdeling en P de kans dat de D-waarde wordt overschreden bij random trekking van een waarde uit een normaal verdeelde populatie. Bij een $P > 0,05$ mag worden aangenomen dat de populatie normaal is verdeeld.

Op basis van de resultaten van de Kolmogorov-Smirnovtest uit tabel 3.3 wordt aangenomen dat de dataset normaal is verdeeld. Van de dataset zijn de gemiddelde waarde en de standaardafwijking bepaald. Hiermee is een dataset gegenereerd waarvan de cumulatieve frequentieverdeling is gegeven in figuur 3.8. Als ondergrens is een breuksterkte van 0 aangehouden. Een breuksterkte van 0 komt bij 3 uitgevoerde simulaties met ieder 30.000 trekkingen geen enkele keer voor.



Figuur 3.8 Cumulatieve frequentieverdeling gegenereerde dataset

In tabel 3.4 zijn de karakteristieken van beide datasets samengevat.

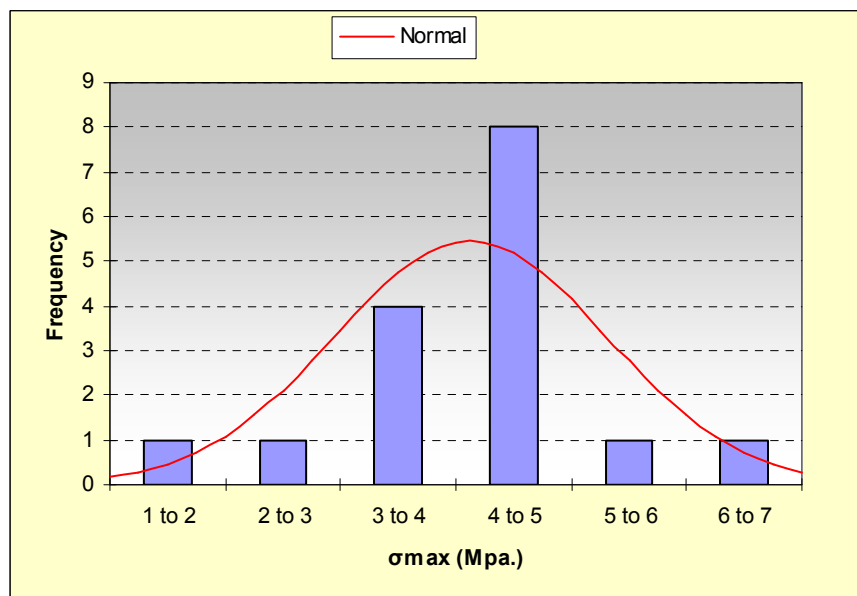
Tabel 3.4 Karakteristieken datasets

	laboratoriumresultaten	beoogde dataset	gerealiseerde dataset
gemiddelde	6,20	6,20	6,19
standaardafwijking	1,40	1,40	1,40
min	3,37	0,60*	0,22
max	8,91	11,80*	12,21
aantal	24	30.000	30.000

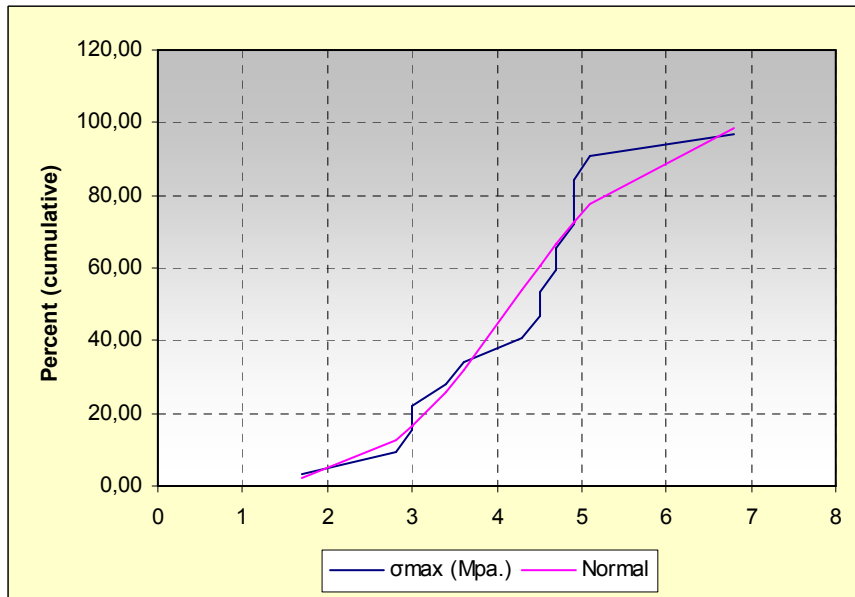
* Een minimum of een maximum kan niet worden bepaald op basis van tabellen van de standaard normale verdeling, wel een kans op onderschrijding en overschrijding van een bepaalde waarde. De kans op onderschrijding / overschrijding van $X_{\text{gem}} \pm 4 \cdot \sigma = 0,00003 = 1/33.3333$. Als beoogd maximum en minimum is daarom de gemiddelde waarde $\pm 4 \times$ de standaardafwijking gepresenteerd.

3.3.4 Veersedam

Voor een onderzoek naar de sterkte van asfalt onder grondbermen is in een SCB-opstelling 16 maal de breuksterkte bepaald bij 5 graden Celsius en een belastingsnelheid van 0,085 mm/s. De gegevens zijn afkomstig uit [KOAC-NPC, 2004]. Het histogram van de dataset is gegeven in figuur 3.9, de cumulatieve frequentieverdeling in figuur 3.10.



Figuur 3.9 Histogram van de breuksterkte (Veersedam)



Figuur 3.10 Cumulatieve frequentieverdeling van de breuksterkte (Veersedam)

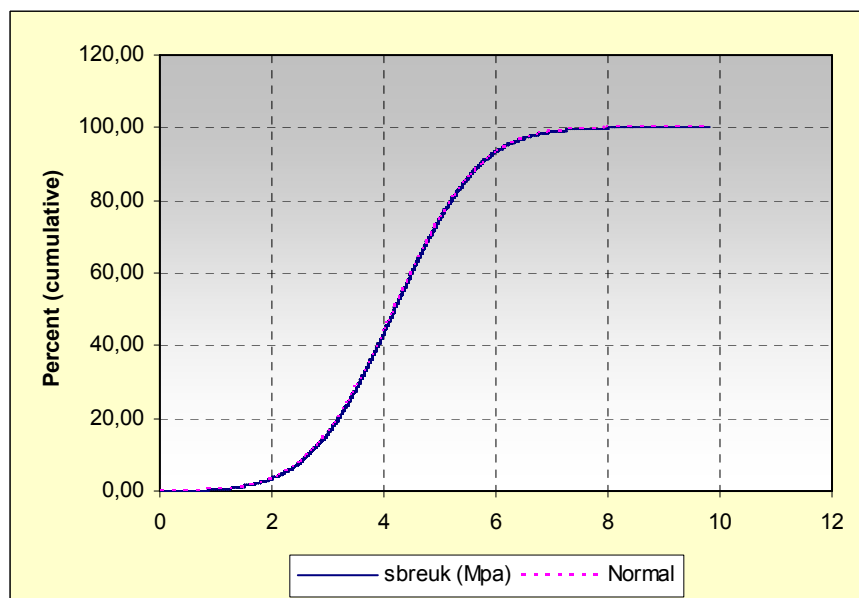
In tabel 3.5 zijn de parameters van de Kolmogorov-Smirnovtest samengevat.

Tabel 3.5 Resultaten Kolmogorov-Smirnovtest

	N	D	P
$\sigma_{\max}$ (Mpa.)	16	0,168737649	0,752427669

In tabel 3.5 is N het aantal waarnemingen, D de grootste verticale afstand tussen de actuele cumulatieve frequentiecurve en de best-fit normale verdeling en P de kans dat de D-waarde wordt overschreden bij random trekking van een waarde uit een normaal verdeelde populatie. Bij een $P > 0,05$ mag worden aangenomen dat de populatie normaal is verdeeld.

Op basis van de resultaten van de Kolmogorov-Smirnovtest uit tabel 3.5 wordt aangenomen dat de dataset normaal is verdeeld. Van de dataset zijn de gemiddelde waarde en de standaardafwijking bepaald. Hiermee is een dataset gegenereerd waarvan de cumulatieve frequentieverdeling is gegeven in figuur 3.11. Als ondergrens is een breuksterkte van 0 aangehouden. Een breuksterkte van 0 komt bij 3 uitgevoerde simulaties met ieder 30.000 trekkingen 12, 6 en 8 maal voor.



Figuur 3.11 Cumulatieve frequentieverdeling gegenereerde dataset

In tabel 3.6 zijn de karakteristieken van beide datasets samengevat.

Tabel 3.6 Karakteristieken datasets

	laboratoriumresultaten	beoogde dataset	gerealiseerde dataset
gemiddelde	4,18	4,18	4,19
standaardafwijking	1,21	1,21	1,21
min	1,70	0,00*	0,00
max	6,80	9,02*	9,82
aantal	16	30000	30000

* Een minimum of een maximum kan niet worden bepaald op basis van tabellen van de standaard normale verdeling, wel een kans op onderschrijding en overschrijding van een bepaalde waarde. De kans op onderschrijding / overschrijding van $X_{\text{gem}} \pm 4.\sigma = 0,00003 = 1/33.3333$. Als beoogd maximum is daarom de gemiddelde waarde + 4 x de standaardafwijking gepresenteerd. Als beoogd minimum is 0 aangehouden omdat een breuksterkte < 0 fysisch niet mogelijk is.

4 Opzet Monte Carlosimulaties

4.1 Algemeen

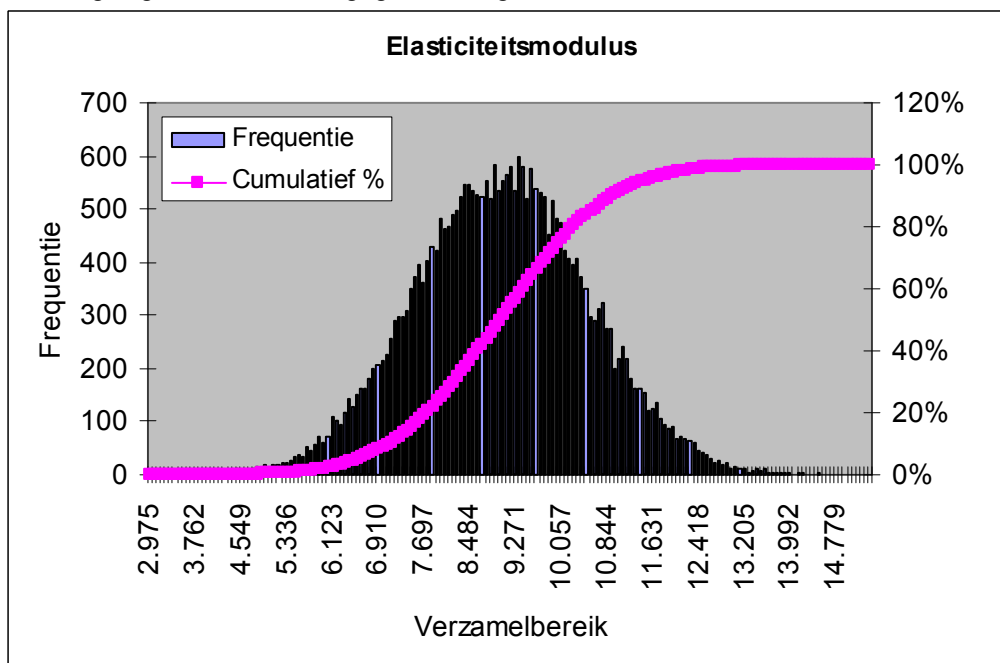
Voor elke variabele is ad random een groot aantal malen een waarde getrokken, onder de voorwaarde dat de parameter de opgelegde verdeling heeft. Dit is in paragraaf 4.2 verder toegelicht en gecontroleerd.

Voorwaarde voor de goede werking van het rekenblad is dat het voldoende stabiel is, dat wil zeggen dat de bepaalde optredende spanningen met een zeer geringe kans op voorkomen bij verschillende berekeningen met dezelfde uitgangswaarden voor de parameters leidt vergelijkbaar zijn. Gebleken is dat het rekenblad bij 30.000 trekkingen per variabele leidt tot acceptabele resultaten. In paragraaf 4.3 is dit verder nagegaan.

4.2 Invoerparameters ter bepaling van de optredende spanning

4.2.1 Elasticiteitsmodulus van het asfalt

Voor de opzet en controle van het rekenblad is 30.000 maal een waarde getrokken voor de elasticiteitsmodulus onder de voorwaarde dat de verdeling een gemiddelde waarde heeft van 9.000 MPa en een standaardafwijking van 1.500 MPa. Dit zijn representatieve waarden voor de stijfheid bij 5 graden Celsius en 10 Hz. van een asfaltbekleding met een gemiddelde tot goede kwaliteit. Het histogram en de cumulatieve frequentieverdeling van deze dataset, waarmee de verdeling is gecontroleerd, is gegeven in figuur 4.1.



Figuur 4.1 histogram en cumulatieve frequentieverdeling elasticiteitsmodulus

De karakteristieken van deze dataset zijn samengevat in tabel 4.1

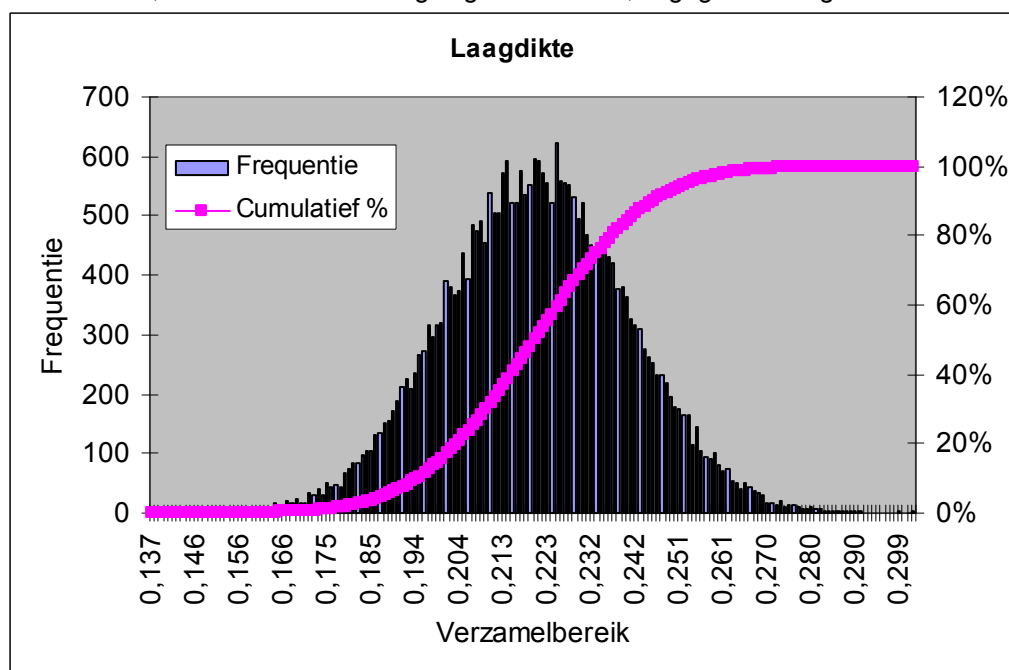
Tabel 4.1 karakteristieken verdeling elasticiteitsmodulus (MPa)

	beoogd	gerealiseerd
gemiddelde	9000	8995
standaardafwijking	1500	1501
min	3000*	2975
max	15000*	15352
aantal	30000	30000

* Een minimum of een maximum kan niet worden bepaald op basis van tabellen van de standaard normale verdeling, wel een kans op onderschrijding en overschrijding van een bepaalde waarde. De kans op onderschrijding / overschrijding van $X_{\text{gem}} \pm 4\sigma = 0,00003 = 1/33.3333$. Als beoogd maximum en minimum is daarom de gemiddelde waarde ± 4 x de standaardafwijking gepresenteerd.

4.2.2 Laagdikte van het asfalt

Voor de opzet en controle van het rekenblad is 30.000 maal een waarde getrokken voor de laagdikte onder de voorwaarde dat de verdeling een gemiddelde waarde heeft van 0,22 m en een standaardafwijking van 0,02m. Het histogram en de cumulatieve frequentieverdeling van deze dataset, waarmee de verdeling is gecontroleerd, is gegeven in figuur 4.2.



Figuur 4.2 histogram en cumulatieve frequentieverdeling laagdikte

De karakteristieken van deze dataset zijn samengevat in tabel 4.2

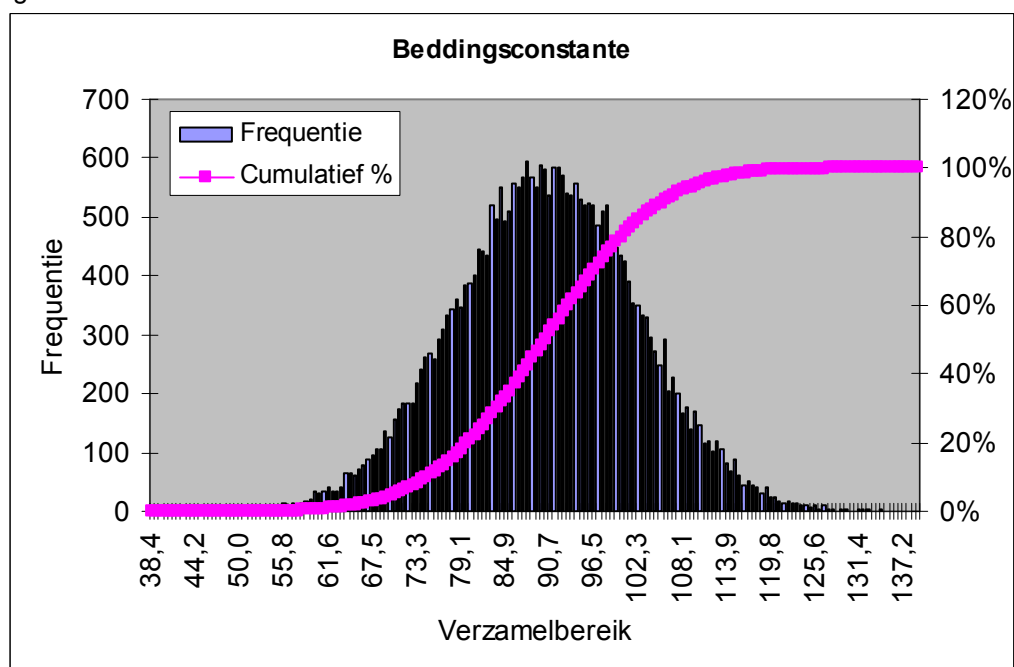
Tabel 4.2 karakteristieken verdeling laagdikte (m)

	beoogd	gerealiseerd
gemiddelde	0,220	0,220
standaardafwijking	0,020	0,020
min	0,140*	0,137
max	0,300*	0,302
aantal	30000	30000

* Een minimum of een maximum kan niet worden bepaald op basis van tabellen van de standaard normale verdeling, wel een kans op onderschrijding en overschrijding van een bepaalde waarde. De kans op onderschrijding / overschrijding van $X_{\text{gem}} \pm 4\sigma = 0,00003 = 1/33.3333$. Als beoogd maximum en minimum is daarom de gemiddelde waarde ± 4 x de standaardafwijking gepresenteerd.

4.2.3 Beddingsconstante van de ondergrond

Voor de opzet en controle van het rekenblad is 30.000 maal een waarde getrokken voor de beddingsconstante onder de voorwaarde dat de verdeling een gemiddelde waarde heeft van 90 MPa/m en een standaardafwijking van 12 MPa/m. Het histogram en de cumulatieve frequentieverdeling van deze dataset, waarmee de verdeling is gecontroleerd, is gegeven in figuur 4.3.



Figuur 4.3 histogram en cumulatieve frequentieverdeling beddingsconstante

De karakteristieken van deze dataset zijn samengevat in tabel 4.3

Tabel 4.3 karakteristieken verdeling beddingsconstante (MPa/m)

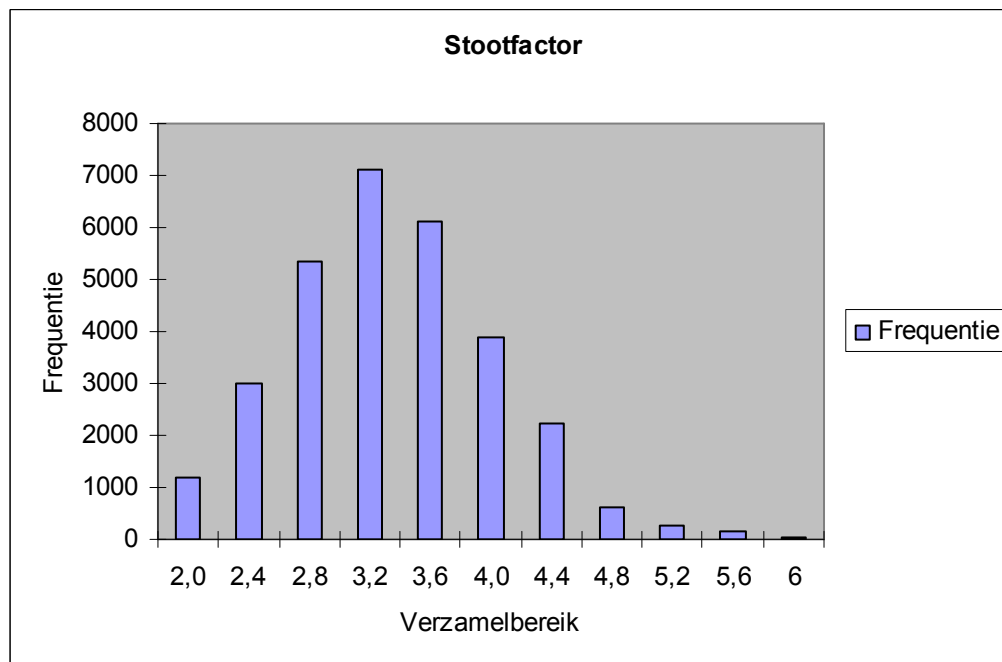
	beoogd	gerealiseerd
gemiddelde	90	90
standaardafwijking	12	12
min	42	38
max	138	139
aantal	30000	30000

* Een minimum of een maximum kan niet worden bepaald op basis van tabellen van de standaard normale verdeling, wel een kans op onderschrijding en overschrijding van een bepaalde waarde. De kans op onderschrijding / overschrijding van $X_{\text{gem}} \pm 4\sigma = 0,00003 = 1/33.3333$. Als beoogd maximum en minimum is daarom de gemiddelde waarde ± 4 x de standaardafwijking gepresenteerd.

4.2.4 Stootfactor

Voor de stootfactor is een kansdichtheidsfunctie gehanteerd zoals bepaald door Führböter [Führböter, 1966]. Analoog aan GOLFKLAP is de kansdichtheidsfunctie verdeeld in 11 klassen waarbij per klasse de kans op voorkomen is bepaald. Voor de opzet en controle van het rekenblad is 30.000 maal een waarde getrokken voor de stootfactor onder de voorwaarde dat de verdeling overeenkomst met de kansdichtheidsfunctie zoals gegeven in paragraaf 3.1.

In figuur 4.4 is het resultaat van de 30.000 trekkingen in een histogram gegeven. Hiermee is de verdeling gecontroleerd.



Figuur 2.4 Histogram van de stootfactor

In tabel 4.4 zijn de voor bepaling van de dataset gebruikte kansen per klasse vergeleken met de achteraf bepaalde kans per klasse.

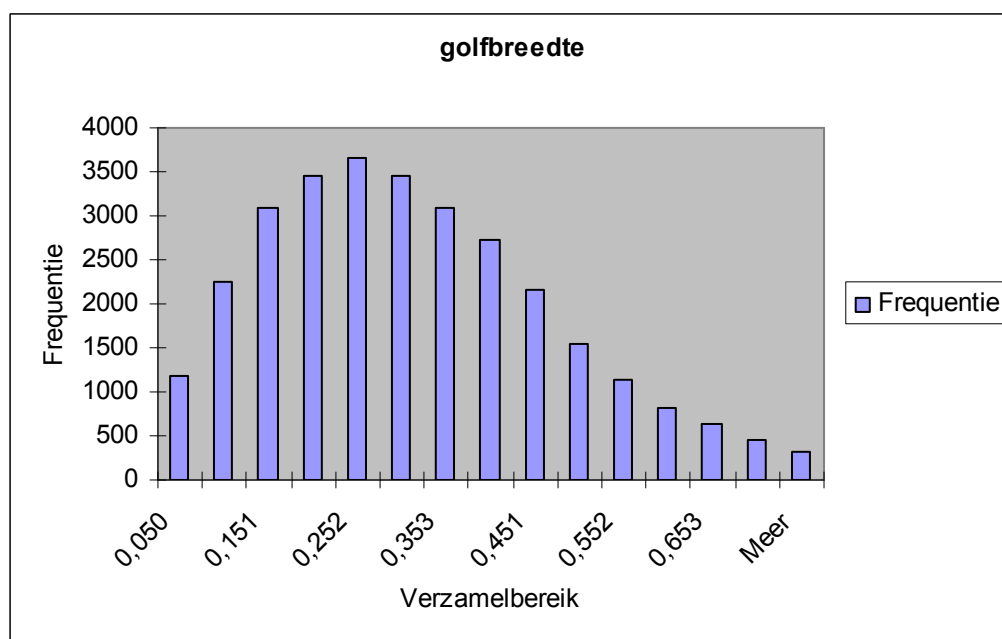
Tabel 4.4 controle van de kansdichtheidsfunctie van de stootfactor

Verzamelbereik	Frequentie	p(q)	p(q, origineel)	verschil
2,0	1185	0,0395	0,039	-0,05%
2,4	3007	0,100233	0,1	-0,02%
2,8	5346	0,1782	0,18	0,18%
3,2	7128	0,2376	0,235	-0,26%
3,6	6131	0,204367	0,2	-0,44%
4,0	3881	0,129367	0,13	0,06%
4,4	2249	0,074967	0,08	0,50%
4,8	603	0,0201	0,02	-0,01%
5,2	286	0,009533	0,01	0,05%
5,6	155	0,005167	0,005	-0,02%
Meer	29	0,000967	0,001	0,00%
som	30000	1,0000	1,0000	

4.2.5 Golfbreedte

Voor de golfbreedte is een kansdichtheidsfunctie gehanteerd zoals aangenomen door Meijers [Meijers, 1993]. Analooq aan GOLFKLAP is de kansdichtheidsfunctie verdeeld in 15 klassen waarbij per klasse de kans op voorkomen is bepaald. Voor de opzet en controle van het rekenblad is 30.000 maal een waarde getrokken voor de golfbreedte onder de voorwaarde dat de verdeling overeenkomst met de kansdichtheidsfunctie zoals gegeven in paragraaf 3.1.

In figuur 4.5 is het resultaat van de 30.000 trekkingen in een histogram gegeven. Hiermee is de verdeling gecontroleerd.



Figuur 4.5 Histogram van de golfbreedte

In tabel 4.5 zijn de voor bepaling van de dataset gebruikte kansen per klasse vergeleken met de achteraf bepaalde kans per klasse.

Tabel 4.5 controle van de kansdichtheidsfunctie van de golfbreedte

<i>Verzamelbereik</i>	<i>Frequentie</i>	<i>p(z)</i>	<i>p(z, origineel)</i>	<i>verschil</i>
0,050	1186	0,039533	0,0392	-0,03%
0,103	2247	0,0749	0,0738	-0,11%
0,151	3097	0,103233	0,1002	-0,30%
0,204	3445	0,114833	0,1162	0,14%
0,252	3648	0,1216	0,1213	-0,03%
0,301	3460	0,115333	0,1168	0,15%
0,353	3102	0,1034	0,1051	0,17%
0,402	2738	0,091267	0,089	-0,23%
0,451	2164	0,072133	0,0712	-0,09%
0,503	1548	0,0516	0,0541	0,25%
0,552	1146	0,0382	0,0391	0,09%
0,600	809	0,026967	0,0269	-0,01%
0,653	644	0,021467	0,0216	0,01%
0,701	446	0,014867	0,015	0,01%
Meer	320	0,010667	0,0105	-0,02%
	30000	1	1	

4.3 Controle van de optredende spanningen

Om na te gaan of het rekenblad voldoende nauwkeurig is zijn 5 berekeningen uitgevoerd met dezelfde invoerwaarden. De resulterende verdelingen van de optredende spanningen zijn met elkaar vergeleken in tabel 2.6.

Tabel 2.6 beschrijvende statistiek van de 5 uitgevoerde berekeningen

	berekening 1	berekening 2	berekening 3	berekening 4	berekening 5	gemiddelde
Valid cases	30000	30000	30000	30000	30000	30000
Mean	0,922	0,916	0,921	0,920	0,920	0,920
Std. error of mean	2,44E-03	2,43E-03	2,43E-03	2,41E-03	2,44E-03	2,43E-03
Variance	0,178	0,177	0,176	0,174	0,179	0,177
Std. Deviation	0,422	0,421	0,420	0,417	0,423	0,421
Variation Coefficient	0,458	0,459	0,456	0,453	0,460	0,457
rel. V.coefficient(%)	0,264	0,265	0,263	0,262	0,265	0,264
Skew	0,494	0,520	0,492	0,498	0,530	0,507
Kurtosis	0,150	0,214	0,127	0,191	0,238	0,184
Minimum	0,078	0,091	0,082	0,078	0,093	0,084
Maximum	3,262	3,209	3,079	3,249	3,090	3,178
Range	3,184	3,118	2,997	3,171	2,998	3,094
Sum	27657	27489	27636	27605	27612	27600
1st percentile	0,163	0,162	0,164	0,165	0,162	0,163
5th percentile	0,285	0,285	0,284	0,292	0,282	0,286
10th percentile	0,393	0,394	0,397	0,399	0,395	0,395
25th percentile	0,612	0,606	0,613	0,616	0,610	0,611
Median	0,891	0,880	0,886	0,888	0,885	0,886
75th percentile	1,193	1,187	1,193	1,187	1,187	1,189
90th percentile	1,486	1,481	1,483	1,480	1,482	1,482
95th percentile	1,670	1,661	1,662	1,658	1,677	1,666
99th percentile	2,035	2,024	2,033	2,006	2,055	2,030
99,9th percentile	2,510	2,510	2,510	2,500	2,540	2,514
99,99th percentile	2,970	3,150	3,010	3,050	2,800	2,996
Geom. mean	0,814	0,809	0,814	0,815	0,812	0,813

Uit tabel 2.6 volgt dat de verdelingen vrijwel gelijk zijn tot het 99,9 percentielpunt (kans van 1/1.000) en dat er hierna verschillen gaan ontstaan. De afwijking van het gemiddelde blijft ook bij het 99,99 percentielpunt onder de 10%. Hiermee wordt de nauwkeurigheid van het rekenblad voldoende geacht.

5 Probabilistische berekeningen

5.1 Inleiding

Voor het bepalen van de optredende spanning in een asfaltbekleding wordt gebruik gemaakt van de formules zoals onder meer beschreven in [De Looft et. al, 2006]. Bepaling van de optredende spanning gebeurt in GOLFKLAP op dezelfde wijze. De benodigde gegevens voor het bepalen van de optredende spanningen zijn afkomstig uit veiligheidsbeoordelingen die in de afgelopen jaren zijn uitgevoerd. Steeds is van 1 representatief geacht dijkvak de data gebruikt om de verdeling van de optredende spanningen te bepalen. In hoofdstuk 3 is aangegeven hoe de verdeling van de breuksterkte tot stand is gekomen. In dit hoofdstuk zijn de verdelingen van de optredende spanning en de breuksterkte voor de 3 dijken en voor 3 belastinggevallen ($H_s = 3, 4$ en 5 m) met elkaar vergeleken.

De toetsing van de breuksterkte aan de optredende spanning heeft steeds plaatsgevonden op basis van 30.000 een simulatie met 30.000 berekeningen. Bij elke berekening is voor elke parameter een trekking gedaan uit vastgestelde verdelingen. Toetsing van de optredende spanning aan de breuksterkte heeft op 2 manieren plaatsgevonden.

In de eerste plaats is voor elke gepaarde waarneming van optredende spanning en breuksterkte nagegaan of de optredende spanning de breuksterkte overschrijdt. Nagegaan is bij hoeveel van de 30.000 uitgevoerde berekeningen dit het geval is. Dit levert de kans op dat de breuksterkte wordt overschreden door de optredende spanning.

In de tweede plaats is de breuksterkte bepaald uit de relatie tussen elasticiteitsmodulus en breuksterkte zoals aangegeven in paragraaf 2.3. Toetsing van de breuksterkte aan de optredende spanning heeft op dezelfde wijze plaatsgevonden.

Op deze wijze is de kans bepaald dat een willekeurig vakje asfalt met homogene eigenschappen (van bijvoorbeeld 1 m^2) zal bezwijken ten gevolge van 1 golfbelasting uit het gehele golfveld.

5.2 Houtribdijk

5.2.1 Invoerparameters simulatie

Voor bepaling van de verdeling van de optredende spanningen zijn de gemiddelde waarde en standaardafwijking van de laagdikte, elasticiteitsmodulus en beddingsconstante van vak 3 van de Houtribdijk gebruikt [KOAC-NPC, 2005-1]. De volgende waarden zijn gehanteerd:

Tabel 5.1 Gehanteerde waarden voor bepaling van de verdeling van de optredende spanning

Variabele	gemiddelde	st dev	eenheid
Elasticiteitsmodulus	6661	1792	Mpa
Beddingsconstante	71	20	Mpa/m
Laagdikte	0,304	0,021	m

Bij gebruik van de in figuur 2.2 gepresenteerde relatie tussen elasticiteitsmodulus en breuksterkte, wijzigt de verdeling van de breuksterkte iets. In tabel 5.2 zijn de karakteristieken van de beoogde (de verdeling zoals vastgesteld in paragraaf 3.3.2) en gerealiseerde verdelingen (het resultaat van de simulaties) van de breuksterkte gegeven.

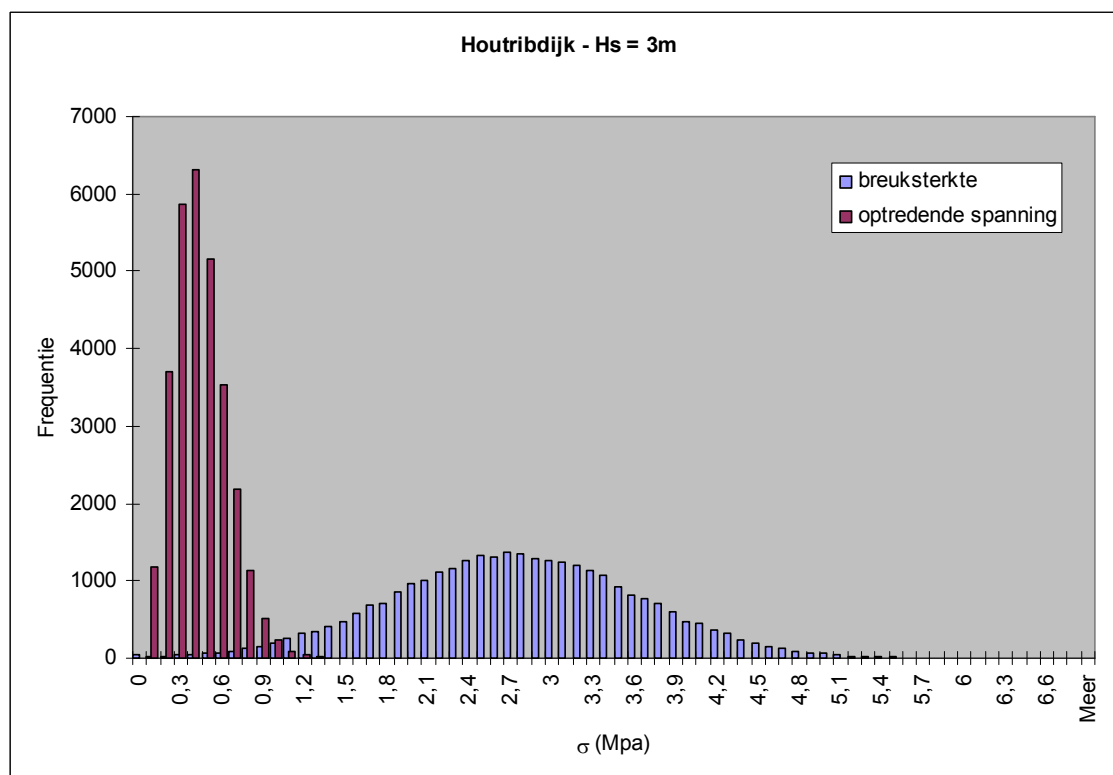
Tabel 5.2: Beoogde en gerealiseerde verdeling van de breuksterkte van 1 van de simulaties

	beoogde dataset	gerealiseerde dataset	
		zonder relatie $E-\sigma_b$	met relatie $E-\sigma_b$
gemiddelde	2,71	2,71	2,80
standaardafwijking	0,90	0,90	0,75
min	0,00*	0,00	0,21
max	6,31*	6,14	5,73
aantal	30000	30000	30000

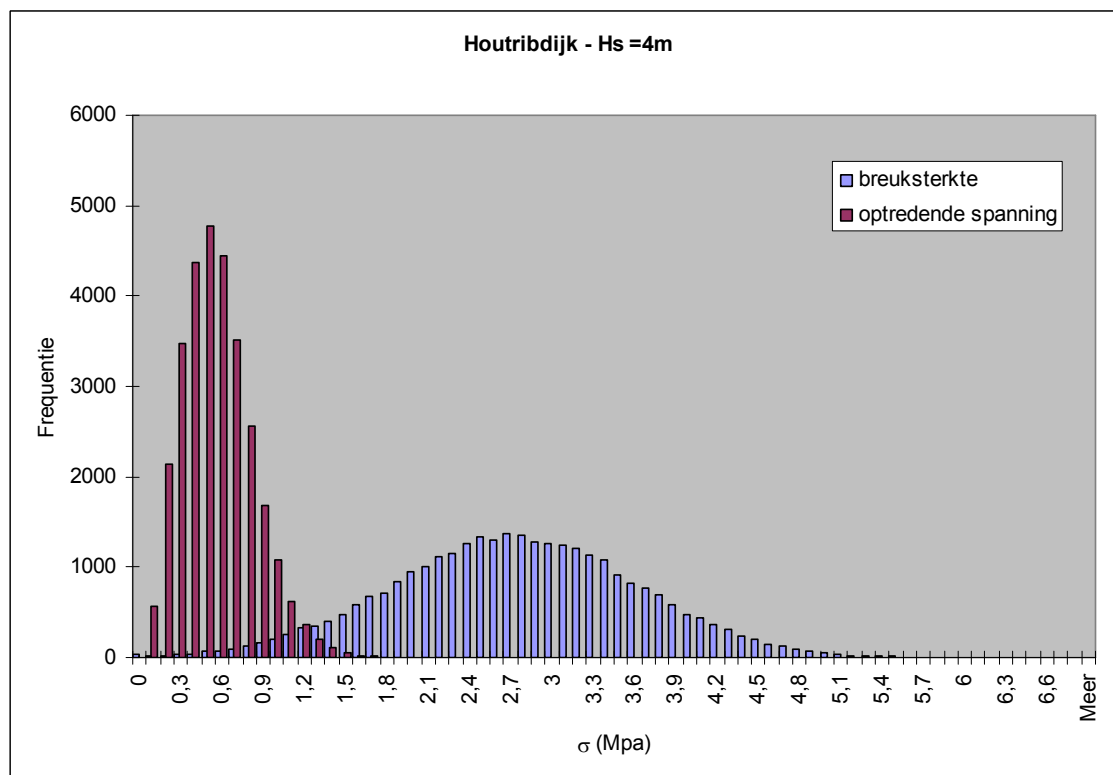
- * Een minimum of een maximum kan niet worden bepaald op basis van tabellen van de standaard normale verdeling, wel een kans op onderschrijding en overschrijding van een bepaalde waarde. De kans op onderschrijding / overschrijding van $X_{\text{gem}} \pm 4 \cdot \sigma = 0,00003 = 1/33.333$. Als beoogd maximum is daarom de gemiddelde waarde + 4 x de standaardafwijking gepresenteerd. Als beoogd minimum is 0 aangehouden omdat een breuksterkte < 0 fysisch niet mogelijk is.

5.2.2 Resultaten simulatie met breuksterkte onafhankelijk van de elasticiteitsmodulus

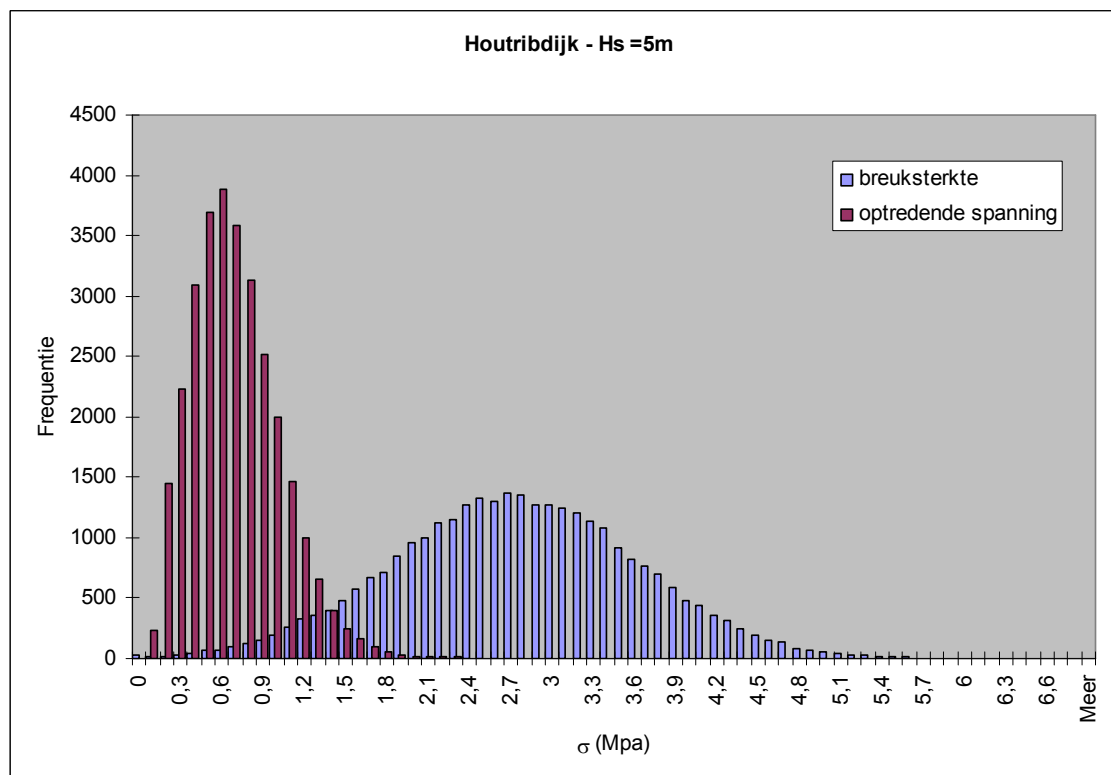
In de figuren 5.2 t/m 5.4 is de verdeling van de optredende spanning voor een significante golfhoogte van 3, 4 en 5 m en de verdeling van de breuksterkte zoals bepaald in hoofdstuk 2 gegeven. De figuren illustreren het niveau en de spreidingsbreedte van de beide verdelingen.



Figuur 5.2 Verdeling van de breuksterkte en optredende spanning bij $H_s = 3$ m



Figuur 5.3 Verdeling van de breuksterkte en optredende spanning bij $H_s = 4$ m



Figuur 5.4 Verdeling van de breuksterkte en optredende spanning bij $H_s = 5$ m

Door middel van een gepaarde toetsing is de kans op het overschrijden van de breuksterkte door de optredende spanning bepaald. Om de nauwkeurigheid van het rekenblad te testen is de berekening voor een golfhoogte van 5 m drie maal uitgevoerd. De resultaten zijn samengevat in tabel 5.3.

Tabel 5.3: Resultaten simulatie met een breuksterkte onafhankelijk van de elasticiteitsmodulus

simulatie nr.	H_s	aantal malen breuksterkte	overschrijding	overschrijdingskans breuksterkte
1	5	466		0,0155 (1/64)
2	5	490		0,0163 (1/61)
3	5	470		0,157 (1/64)
4	4	294		0,010 (1/102)
5	3	187		0,006 (1/160)

Nagegaan is welke parameters leiden tot overschrijding van de breuksterkte door de optredende spanning. Van de simulaties waar dit het geval is zijn de karakteristieken van de verdelingen opgenomen in tabel 5.4.

Tabel 5.4: Karakteristieken van de verdelingen van parameters die leiden tot een overschrijding van de breuksterkte door de optredende spanning (voor 1 simulatie met 30.000 trekkingen met $H_s = 5\text{m}$)

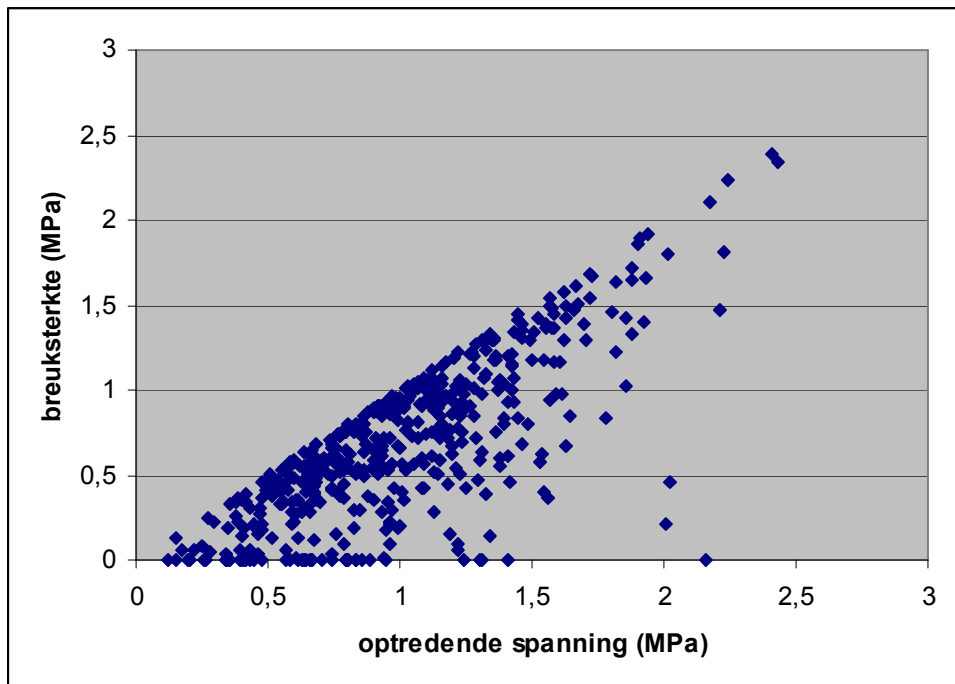
	E (Mpa)	c (Mpa/m)	d (m)	q (-)	z (m)	σ_{optr} (MPa)	σ_b (Mpa)
gemiddelde	7038	64,1	0,301	3,7	0,432	1,002	0,684
standaardafwijking	1827	21,3	0,020	0,8	0,164	0,427	0,460
min	1951	15,0	0,249	2,0	0,050	0,124	0,000
max	12811	131,4	0,359	6,0	0,750	2,429	2,385
aantal	466	466	466	466	466	466	466

In bijlage 1 zijn voor deze simulatie van de betreffende parameters de histogrammen met verdelingen opgenomen.

Het volgende valt op:

- De elasticiteitsmodulus is normaal verdeeld, het gemiddelde van de dataset van parameters die leiden tot overschrijding van de breuksterkte (7.038 MPa) is hoger dan het gemiddelde van de totale dataset (6.661 MPa, vergelijk tabel 3.2 met tabel 3.5). Dit is conform de verwachting omdat een hogere elasticiteitsmodulus van het asfalt leidt tot hogere buigtrekspanningen in de bekleding.
- De beddingsconstante is normaal verdeeld, het gemiddelde van de dataset van parameters die leiden tot overschrijding van de breuksterkte (64,1 MPa/m) is lager dan het gemiddelde van de totale dataset (71 MPa/m, vergelijk tabel 3.2 met tabel 3.5). Dit is conform de verwachting omdat een lagere beddingsconstante van de ondergrond leidt tot hogere buigtrekspanningen in de bekleding.
- De laagdikte is normaal verdeeld, de gemiddelden van beide datasets zijn vergelijkbaar (0,304 en 0,301 m).
- Uit een vergelijking tussen de frequentieverdelingen van de stootfactor (vergelijk tabel 2.4 en tabel B1.1) blijkt bij de dataset van parameters die leiden tot overschrijding van de breuksterkte dat stootfactoren van 4 en groter vaker voorkomen dan bij de totale dataset. Dit is conform de verwachting omdat een hogere stootfactor leidt tot hogere buigtrekspanningen in de bekleding.
- Uit een vergelijking tussen de frequentieverdelingen van de golfbreedte (vergelijk tabel 2.5 en tabel B1.2) blijkt bij de dataset van parameters die leiden tot overschrijding van de breuksterkte dat golfbreedten van 0,45 en groter vaker voorkomen dan bij de totale dataset.

In figuur 5.5 is de breuksterkte uitgezet tegen de optredende spanning van de simulaties waarbij de optredende spanning de breuksterkte heeft overschreden. In de grafiek zijn de resultaten opgenomen van 1 serie berekeningen met $H_s = 5\text{ m}$.



Figuur 5.5: optredende spanning versus de breuksterkte van de simulaties waarbij de optredende spanning de breuksterkte heeft overschreden

Uit figuur 5.5 blijkt dat zowel hoge als lage breuksterktes door de optredende spanning worden overschreden. Overschrijding van de breuksterkte door de optredende spanning wordt echter relatief vaak veroorzaakt door een lage breuksterkte. Dit blijkt ook uit de gemiddelde waarde van de breuksterktes die door de optredende spanning zijn overschreden (zie tabel 5.4). De gemiddelde breuksterkte van de simulaties waarbij de optredende spanning de breuksterkte heeft overschreden is beduidend lager dan de gemiddelde breuksterkte van de volledige dataset. Met andere woorden, de breuksterkte is de meest dominante parameter.

5.2.3 Resultaten simulatie met een breuksterkte afhankelijk van de elasticiteitsmodulus

Op dezelfde wijze is door middel van een gepaarde toetsing de kans op overschrijden van de breuksterkte door de optredende spanning nagegaan.

Om de nauwkeurigheid van het rekenblad te testen is de berekening voor een golfhoogte van 5 m drie maal uitgevoerd. De resultaten zijn samengevat in tabel 5.5.

Tabel 5.5: Resultaten simulatie met een breuksterkte afhankelijk van de elasticiteitsmodulus

simulatie nr.	Hs	aantal malen overschrijding breuksterkte	overschrijdingskans breuksterkte
1	5	43	$1,43 \cdot 10^{-3}$ (1/698)
2	5	41	$1,37 \cdot 10^{-3}$ (1/731)
3	5	38	$1,27 \cdot 10^{-3}$ (1/789)
4	4	13	$4,33 \cdot 10^{-4}$ (1/2.308)
5	3	0	0

Uit het vergelijken van de resultaten in tabel 5.5 met de resultaten in tabel 5.3 blijkt dat het in beschouwing nemen van de relatie tussen de elasticiteitsmodulus en de breuksterkte bij het toetsen van de breuksterkte aan de optredende spanningen leidt tot een afname van de overschrijdingskans van de breuksterkte met ruim een factor 10.

Nagegaan is welke parameters leiden tot overschrijding van de breuksterkte door de optredende spanning. Van de simulaties waar dit het geval is zijn de karakteristieken van de verdelingen opgenomen in tabel 5.6.

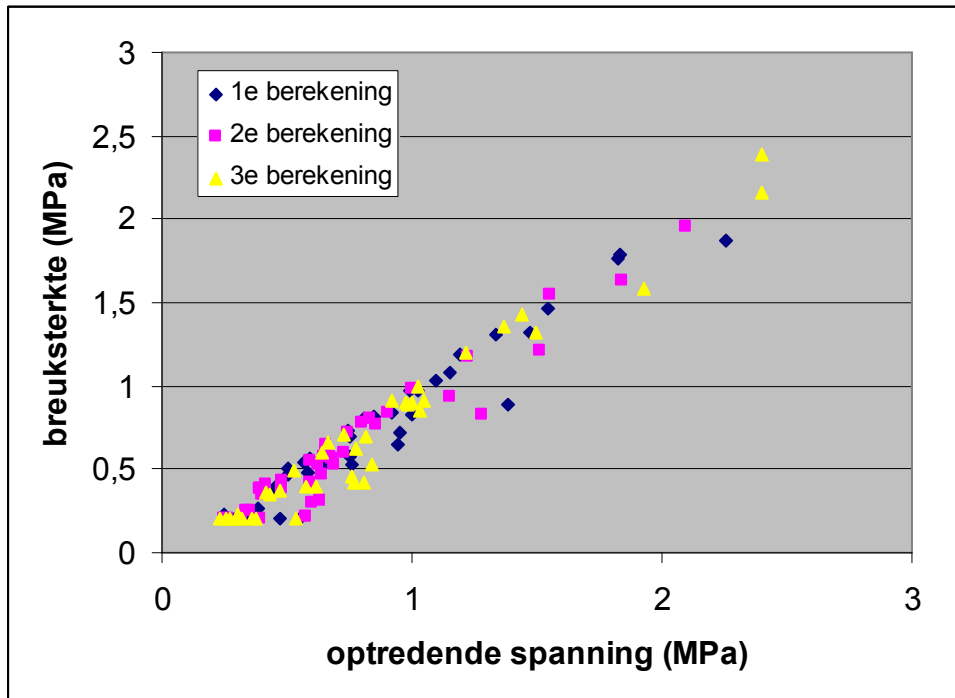
Tabel 5.6: Karakteristieken van de verdelingen van parameters die leiden tot een overschrijding van de breuksterkte door de optredende spanning (voor 1 simulatie met 30.000 trekkingen met $H_s = 5\text{m}$)

	E (Mpa)	c (Mpa/m)	d (m)	q (-)	z (m)	$\sigma_{\text{opt}} \text{ (MPa)}$	$\sigma_b \text{ (Mpa)}$
gemiddelde	1669	53,767	0,302	3,935	0,502	0,811	0,701
standaardafwijking	1091	23,919	0,024	0,809	0,137	0,474	0,458
min	500	15,000	0,255	2,400	0,250	0,247	0,210
max	4446	107,728	0,347	6,000	0,750	2,258	1,867
aantal	43	43	43	43	43	43	43

Voor het bepalen van de invloed van het in beschouwing nemen van de relatie tussen de elasticiteitsmodulus en de breuksterkte zijn tabel 5.4 en 5.6 met elkaar vergeleken. Het volgende valt op:

- Indien rekening wordt gehouden met de relatie tussen de elasticiteitsmodulus en de breuksterkte, is de elasticiteitsmodulus van het asfalt in de gevallen dat de breuksterkte wordt overschreden door de optredende spanning beduidend lager (1.669 MPa in plaats van 7.038 MPa). Dit is begrijpelijk omdat een locatie met een lage elasticiteitsmodulus nu tevens een lage breuksterkte heeft.
- Indien rekening wordt gehouden met de relatie tussen de elasticiteitsmodulus en de breuksterkte, is de beddingsconstante van de ondergrond gemiddeld lager (53,8 MPa/m in plaats van 64,1 MPa/m)
- Indien rekening wordt gehouden met de relatie tussen de elasticiteitsmodulus en de breuksterkte, is de optredende buigtrekspanning in de bekleding gemiddeld lager (0,81 MPa in plaats van 1,0 MPa). Dit wordt veroorzaakt door de lagere elasticiteitsmoduli.

In figuur 5.6 is de breuksterkte uitgezet tegen de optredende spanning van de simulaties waarbij de optredende spanning de breuksterkte heeft overschreden. De resultaten van de 3 series berekeningen met $H_s = 5$ m zijn in de grafiek opgenomen.



Figuur 5.6: optredende spanning versus de breuksterkte van de simulaties waarbij de optredende spanning de breuksterkte heeft overschreden

Voor individuele punten blijkt nu het verschil tussen de optredende spanning en de breuksterkte geringer. De breuksterkte is nog steeds de meest dominante parameter.

5.3 Helderse zeewering

5.3.1 Invoerparameters simulatie

Voor bepaling van de verdeling van de optredende spanningen zijn de gemiddelde waarde en standaardafwijking van de laagdikte, elasticiteitsmodulus en beddingsconstante van vak 2 van de Helderse zeewering gebruikt [KOAC-NPC, 2005-2]. De volgende waarden zijn gehanteerd:

Tabel 5.7 Gehanteerde waarden voor bepaling van de verdeling van de optredende spanning

Variabele	gemiddelde	st dev	eenheid
Elasticiteitsmodulus	8023	1714	Mpa
Beddingsconstante	106	24	Mpa/m
Laagdikte	0,339	0,025	m

Bij gebruik van de in figuur 2.2 gepresenteerde relatie tussen elasticiteitsmodulus en breuksterkte, wijzigt de verdeling van de breuksterkte iets. In tabel 5.8 zijn de karakteristieken

van de beoogde (de verdeling zoals vastgesteld in paragraaf 3.3.3) en gerealiseerde verdelingen (het resultaat van de simulaties) van de breuksterkte gegeven.

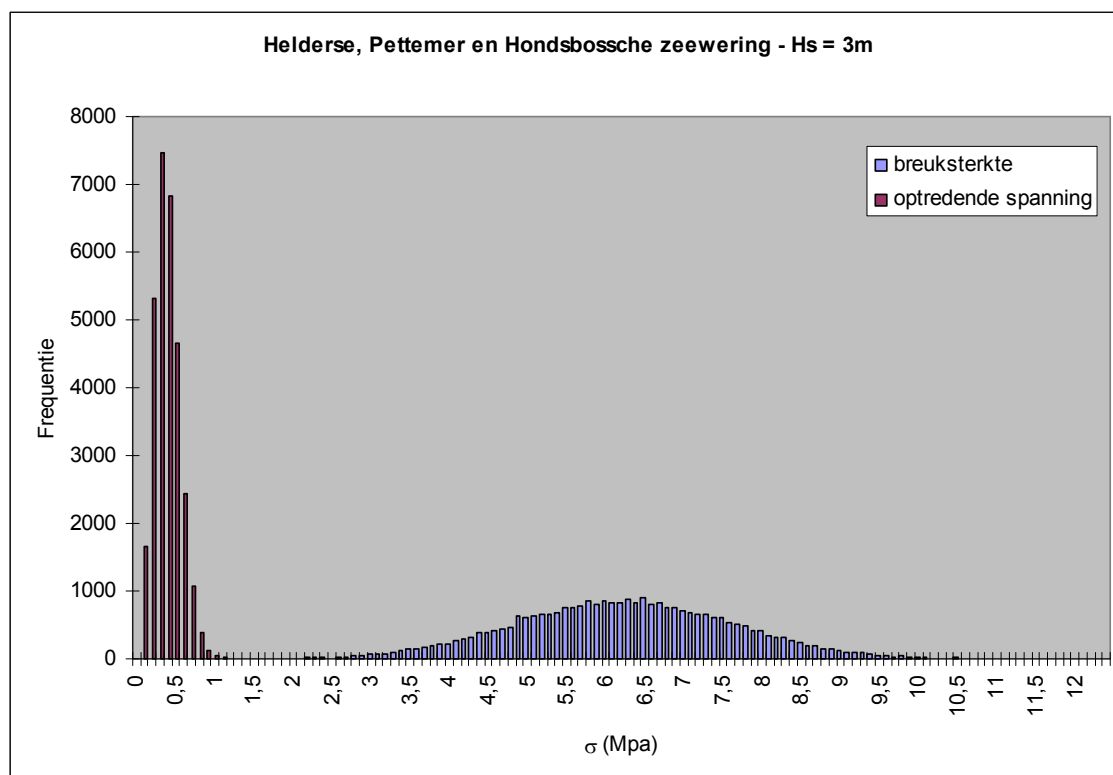
Tabel 5.8: Beoogde en gerealiseerde verdeling van de breuksterkte van 1 van de simulaties

	beoogde dataset	gerealiseerde dataset	
		zonder relatie $E-\sigma_b$	met relatie $E-\sigma_b$
gemiddelde	6,20	6,19	6,12
standaardafwijking	1,40	1,40	1,38
min	0,60*	0,57	0,09
max	11,80*	11,63	12,27
aantal	30.000	30000	30000

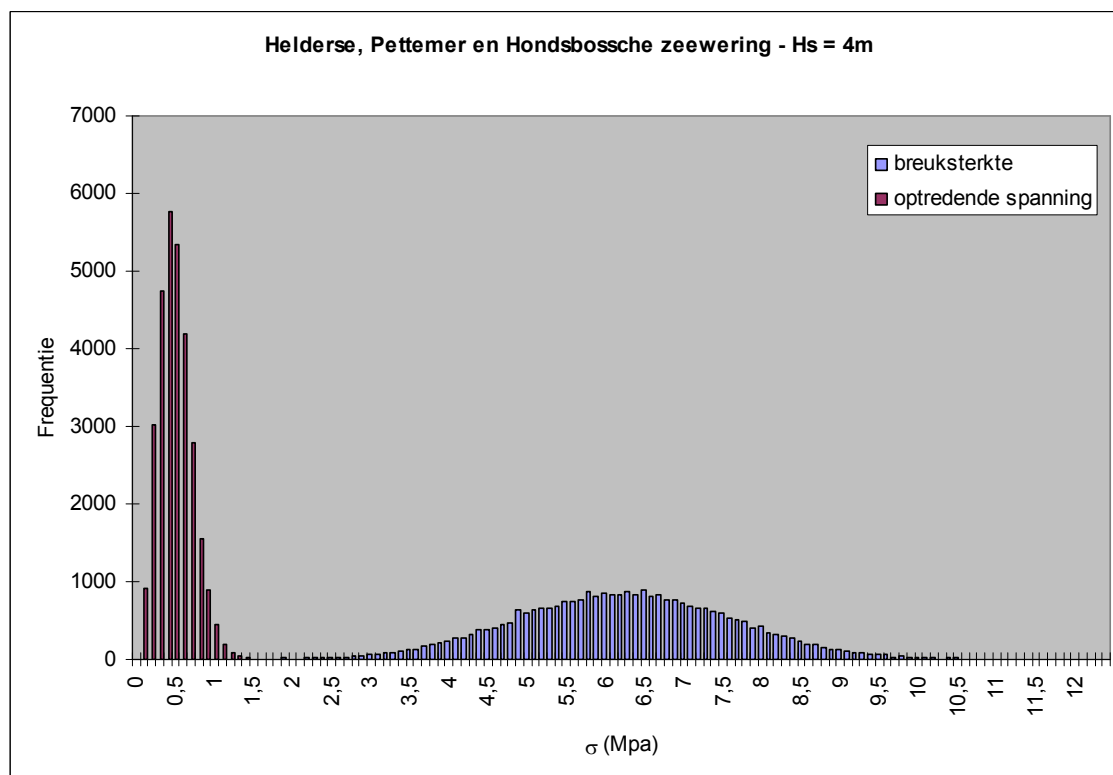
* Een minimum of een maximum kan niet worden bepaald op basis van tabellen van de standaard normale verdeling, wel een kans op onderschrijding en overschrijding van een bepaalde waarde. De kans op onderschrijding / overschrijding van $X_{\text{gem}} \pm 4 \cdot \sigma = 0,00003 = 1/33.333$. Als beoogd maximum en minimum is daarom de gemiddelde waarde $\pm 4 \times$ de standaardafwijking gepresenteerd.

5.3.2 Resultaten simulatie met breuksterkte onafhankelijk van de elasticiteitsmodulus

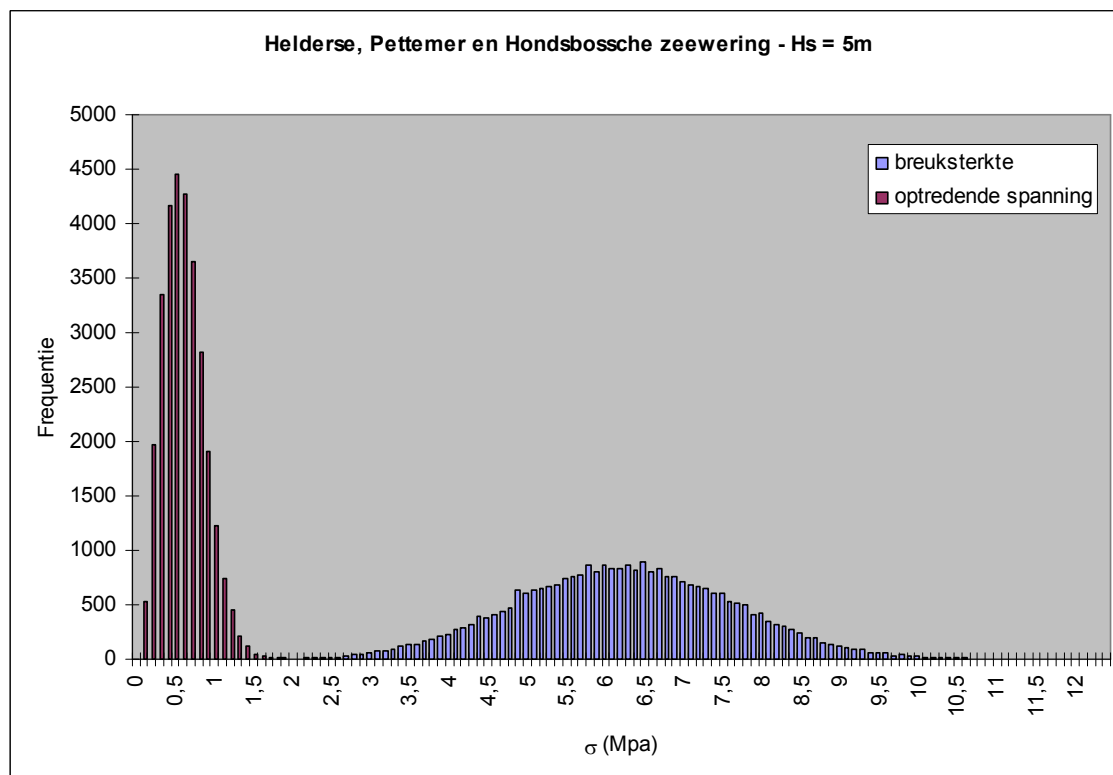
In de figuren 5.7 t/m 5.9 is de verdeling van de optredende spanning voor een significante golfhoogte van 3, 4 en 5 m en de verdeling van de breuksterkte zoals bepaald in hoofdstuk 2 gegeven. De figuren illustreren het niveau en de spreidingsbreedte van de beide verdelingen.



Figuur 5.7 Verdeling van de breuksterkte en optredende spanning bij $H_s = 3\text{ m}$



Figuur 5.8 Verdeling van de breuksterkte en optredende spanning bij $H_s = 4\text{ m}$



Figuur 5.8 Verdeling van de breuksterkte en optredende spanning bij $H_s = 5\text{ m}$

Door middel van een gepaarde toetsing is de kans op het overschrijden van de breuksterkte door de optredende spanning bepaald. De resultaten zijn samengevat in tabel 5.9.

Tabel 5.9: Resultaten simulatie met een breuksterkte onafhankelijk van de elasticiteitsmodulus

simulatie nr.	H_s	aantal malen breuksterkte	overschrijding	overschrijdingskans breuksterkte
1	3	0		0
2	4	0		0
3	5	2		$6,7 \cdot 10^{-5}$ (1/15.000)

De kans op overschrijding van de breuksterkte door de optredende buigtrekspanning ten gevolge van golfklappen is bij een asfaltbekleding met eigenschappen zoals die van de Helderse zeewering verwaarloosbaar klein.

5.3.3 Resultaten simulatie met een breuksterkte afhankelijk van de elasticiteitsmodulus

De simulaties waarbij rekening is gehouden met de relatie tussen de elasticiteitsmodulus en de breuksterkte leiden bij de hier gehanteerde eigenschappen niet tot overschrijding van de breuksterkte door de optredende spanning.

5.4 Veersedam

5.4.1 Invoerparameters simulatie

Voor bepaling van de verdeling van de optredende spanningen zijn de gemiddelde waarde en standaardafwijking van de laagdikte, elasticiteitsmodulus en beddingsconstante van vak Plaat van Onrust van de Veersedam gebruikt [KOAC-NPC, 2005-3]. De volgende waarden zijn gehanteerd:

Tabel 5.10 Gehanteerde waarden voor bepaling van de verdeling van de optredende spanning

Variabele	gemiddelde	st dev	eenheid
Elasticiteitsmodulus	6694	4037	Mpa
Beddingsconstante	69,8	30	Mpa/m
Laagdikte	0,245	0,02	m

Bij gebruik van de in figuur 2.2 gepresenteerde relatie tussen elasticiteitsmodulus en breuksterkte, wijzigt de verdeling van de breuksterkte iets. In tabel 5.11 zijn de karakteristieken van de beoogde (de verdeling zoals vastgesteld in paragraaf 3.3.4) en gerealiseerde verdelingen (het resultaat van de simulaties) van de breuksterkte gegeven.

Tabel 5.11: Beoogde en gerealiseerde verdeling van de breuksterkte van 1 van de simulaties

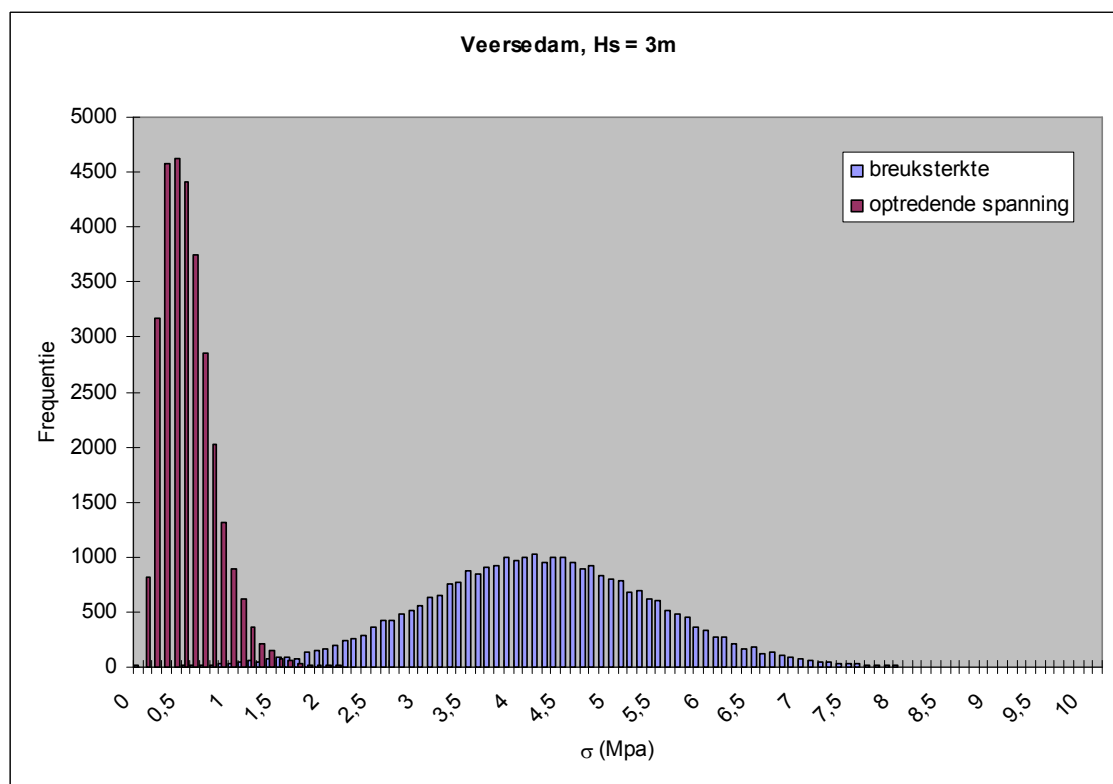
	beoogde dataset	gerealiseerde dataset	
		zonder relatie $E-\sigma_b$	met relatie $E-\sigma_b$
gemiddelde	4,18	4,19	3,40
standaardafwijking	1,21	1,21	1,90
min	0,00*	0,00	0,25
max	9,02*	9,37	11,67
aantal	30000	30000	30000

- * Een minimum of een maximum kan niet worden bepaald op basis van tabellen van de standaard normale verdeling, wel een kans op onderschrijding en overschrijding van een bepaalde waarde. De kans op onderschrijding / overschrijding van $X_{\text{gem}} \pm 4\sigma = 0,00003 = 1/33.333$. Als beoogd maximum is daarom de gemiddelde waarde + 4 x de standaardafwijking gepresenteerd. Als beoogd minimum is 0 aangehouden omdat een breuksterkte < 0 fysisch niet mogelijk is.

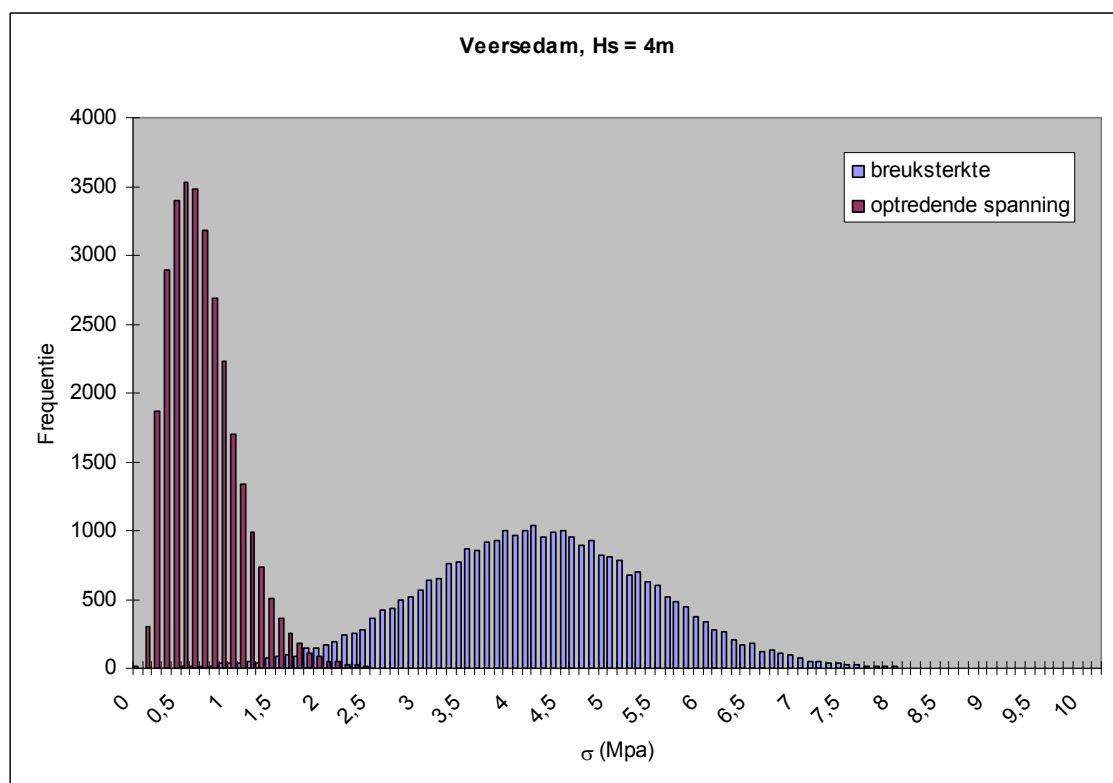
De gebruikte relatie tussen de elasticiteitsmodulus en de breuksterkte leidt in dit geval tot een dataset die wat meer afwijkt van de beoogde dataset.

5.4.2 Resultaten simulatie met breuksterkte onafhankelijk van de elasticiteitsmodulus

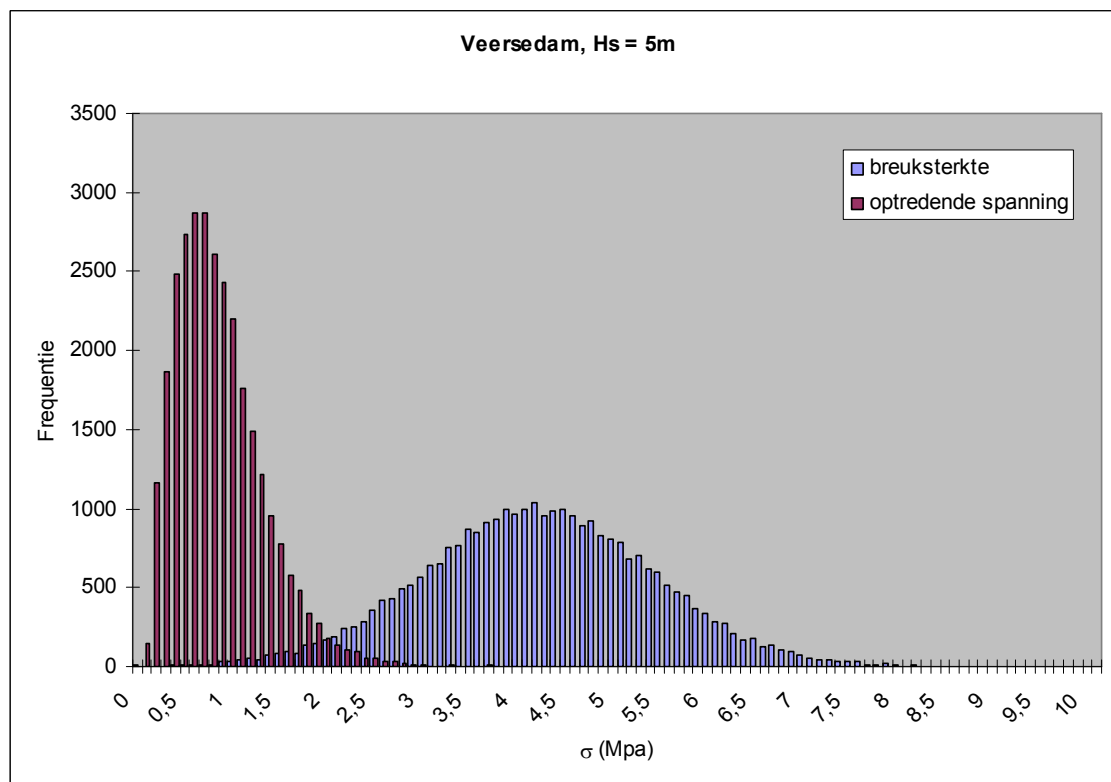
In de figuren 5.10 t/m 5.12 is de verdeling van de optredende spanning voor een significante golfhoogte van 3, 4 en 5 m vergeleken met de verdeling van de breuksterkte zoals bepaald in hoofdstuk 2. De figuren illustreren het niveau en de spreidingsbreedte van de beide verdelingen.



Figuur 5.10 Verdeling van de breuksterkte en optredende spanning bij $H_s = 3\text{ m}$



Figuur 5.11 Verdeling van de breuksterkte en optredende spanning bij $H_s = 4\text{ m}$



Figuur 5.12 Verdeling van de breuksterkte en optredende spanning bij H_s = 5 m

Door middel van een gepaarde toetsing is de kans op het overschrijden van de breuksterkte door de optredende spanning bepaald. De resultaten zijn samengevat in tabel 5.12.

Tabel 5.12: Resultaten simulatie met een breuksterkte onafhankelijk van de elasticiteitsmodulus

simulatie nr.	H _s	aantal malen breuksterkte	overschrijding	overschrijdingskans breuksterkte
1	3	54		$1,8 \cdot 10^{-3}$ (1/555)
2	4	98		$3,3 \cdot 10^{-3}$ (1/306)
3	5	199		$6,6 \cdot 10^{-3}$ (1/151)

5.4.3 Resultaten simulatie met een breuksterkte afhankelijk van de elasticiteitsmodulus

Op dezelfde wijze is door middel van een gepaarde toetsing de kans op overschrijden van de breuksterkte door de optredende spanning nagegaan. De resultaten zijn samengevat in tabel 5.13.

Tabel 5.13: Resultaten simulatie met een breuksterkte afhankelijk van de elasticiteitsmodulus

simulatie nr.	H_s	aantal malen overschrijding breuksterkte	overschrijdingskans breuksterkte
1	3	539	$1,8 \cdot 10^{-2}$ (1/56)
2	4	1203	$4,0 \cdot 10^{-2}$ (1/25)
3	5	1968	$6,6 \cdot 10^{-2}$ (1/15)

6 Berekeningen met GOLFKLAP

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies

Invloed van de parameters op de toetsing

Uit de simulaties blijkt dat zowel hoge als lage breuksterktes door de optredende spanning worden overschreden. Ook parameters die leiden tot relatief lage spanningen kunnen bijdragen aan het overschrijden van de breuksterkte. Overschrijding van de breuksterkte door de optredende spanning wordt echter relatief vaak veroorzaakt door een lage breuksterkte. Dit blijkt ook uit de gemiddelde waarde van de breuksterktes die door de optredende spanning zijn overschreden. De gemiddelde breuksterkte van de simulaties waarbij de optredende spanning de breuksterkte heeft overschreden is beduidend lager dan de gemiddelde breuksterkte van de volledige dataset. Met andere woorden, de breuksterkte is de meest dominante parameter.

Invloed relatie elasticiteitsmodulus-breuksterkte

Uit de simulaties blijkt dat het in beschouwing nemen van de relatie tussen de elasticiteitsmodulus en de breuksterkte bij het toetsen van de breuksterkte aan de optredende spanningen leidt tot een afname van de overschrijdingskans van de breuksterkte met ruim een factor 10 voor de Houtribdijk. Voor de andere 2 dijkvakken kon geen goed beeld worden verkregen van de invloed van deze relatie; voor de Helderse zeewering omdat de breuksterkte niet of nauwelijks door de optredende spanning werd overschreden, voor de Veersedam omdat hier geen betrouwbare relatie tussen de elasticiteitsmodulus en de breuksterkte kon worden opgesteld.

Relevantie mechanisme

Uit een analyse van de uitgevoerde berekeningen blijkt dat er in het geval van een oudere bekleding (Veersedam) of een relatief jonge bekleding met een slechte aanlegkwaliteit (Houtribdijk) een reële kans is dat de breuksterkte door een zware golfklap met een geringe kans op voorkomen wordt overschreden. Voor beoordeling van de relevantie van het mechanisme zijn de berekeningen met de parameters van de Houtribdijk het meest interessant omdat hier de invloed van de relatie tussen de elasticiteitsmodulus en de breuksterkte kon worden beschouwd. De kans op overschrijding van de breuksterkte is circa 1/60 bij een significante golfhoogte van 5 m. Indien de invloed van de relatie tussen de elasticiteitsmodulus en de breuksterkte wordt meegenomen is de overschrijdingskans circa 1/700 bij een significante golfhoogte van 5 m.

Verschillen tussen Monte Carlosimulaties en GOLFKLAP

1. vermoeiing wordt als sterktereductie ingevoerd in GOLFKLAP (opm. de keuze van x en y in de fitprocedure van de data moet ook nader bekeken worden, zie figuur 1.1)
2. in GOLFKLAP varieert de impactlocatie door SWL(t) en de driehoekige golfvorm i.p.v. 1 locatie in de Monte Carlosimulaties
3. in GOLFKLAP wordt het bezwijken berekend als bezwijken van 1 punt = gehele bekleding; in de Monte Carlosimulaties bezwijkt 1 vakje met arbitraire afmeting en locatie, waarna onduidelijk is wanneer de gehele bekleding als bezwijken wordt gezien.

Een vergelijking tussen GOLFKLAP en de Monte Carlosimulaties zonder dit eerst te hebben opgelost is speculatie, omdat de modellen verschillen. Het ligt niet voor de hand dat beide modellen een constante factor verschillen en dus is er ook empirisch waarschijnlijk niet veel te vinden.

7.2 Aanbevelingen

- Aanbevolen wordt om de breuksterkte in GOLFKLAP te implementeren. Het heeft de voorkeur om separaat een beoordeling op breuksterkte, vermoeiing en een combinatie van beiden in GOLFKLAP mogelijk te maken.
- Nagegaan moet worden of een beoordeling op breuksterkte bij oude bekledingen van slechte kwaliteit de voorkeur verdient boven de beoordeling op vermoeiing.
- De keuze van x en y in de fitprocedure van de data moet ook nader bekeken worden, zie figuur 1.1. Indien er veel spreiding aanwezig is in de resultaten van het vermoeiingsonderzoek, leidt de fitprocedure tot een vrijwel horizontale lijn. De regressielijn wordt bepaald door het kwadraat van de afstand van het punt tot de lijn in de y -richting te minimaliseren. Met de spanning op de x -as en het aantal lastherhalingen op de y -as leidt dit dus tot een model waarbij het aantal lastherhalingen bij bezwijken vrijwel onafhankelijk is van het spanningsniveau. Dit is volstrekt in tegenspraak met het materiaalgedrag. Het wissel van de parameters op de assen (zoals gebruikelijk in de wegenbouw) lost dit probleem op en zorgt ervoor dat ook bij veel spreiding in de resultaten van vermoeiingsproeven een vermoeiingslijn bepaald wordt die het materiaalgedrag goed beschrijft.

8 Referenties

[Führböter, 1966]

Führböter, A., Der Druckschlag durch Brecher auf Deichböschungen, Mitt. Franzius-Institut, Technische Universität Hannover, Heft 28, Hannover, 1966.

[KOAC-NPC, 2004]

Onderzoek naar de sterkte van asfaltbekledingen onder grondbermen, 038399, KOAC-NPC, Utrecht, juli 2004.

[KOAC-NPC, 2005-1]

Veiligheidsbeoordeling asfaltbetonbekleding Houtribdijk, projectnummers: 038364, 048163, 048291, KOAC-NPC, Utrecht, februari 2005.

[KOAC-NPC, 2005-2]

Veiligheidsbeoordeling asfaltbetonbekleding Helderse, Pettemer en Hondsbossche zeewering, projectnummer 048304, KOAC-NPC, Utrecht, december 2005.

[KOAC-NPC, 2005-3]

Gedetailleerde veiligheidsbeoordeling van de asfaltbekleding Veersedam, projectnummer 048456, KOAC-NPC, Utrecht, september 2005.

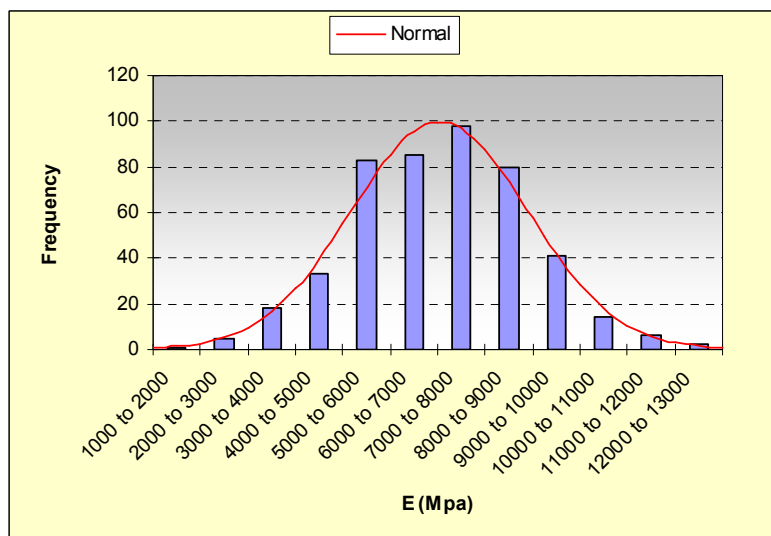
[De Looff, et al, 2006]

De Looff, A.K., 't Hart, R., Montauban, K., Van de Ven, M.F.C., GOLFKLAP a model to determine the impact of waves on dike structures with an asphaltic concrete layer, Proceedings ICCE 2006, volume 5, pg. 5106-5115.

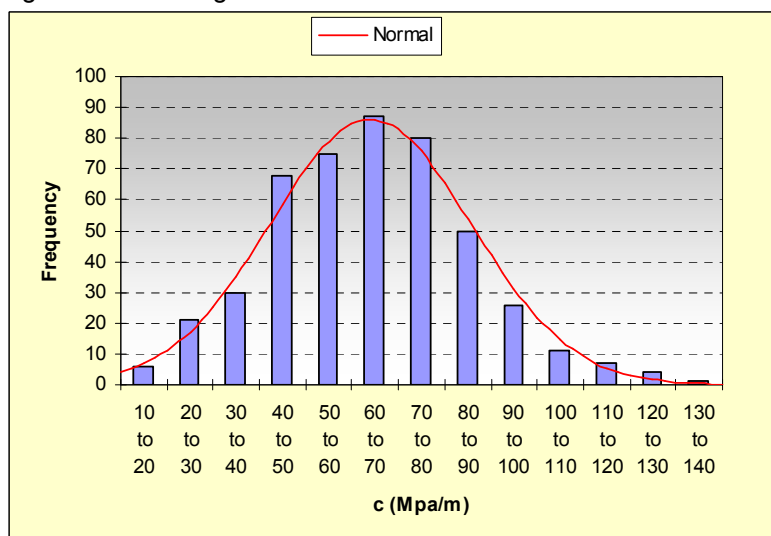
[Meijers, 1993]

Meijers, P., Ontwerpmethodiek bepaling asfaltdikte taluds onder golfbelasting – fase 2, Grondmechanica Delft, Delft, mei 1993.

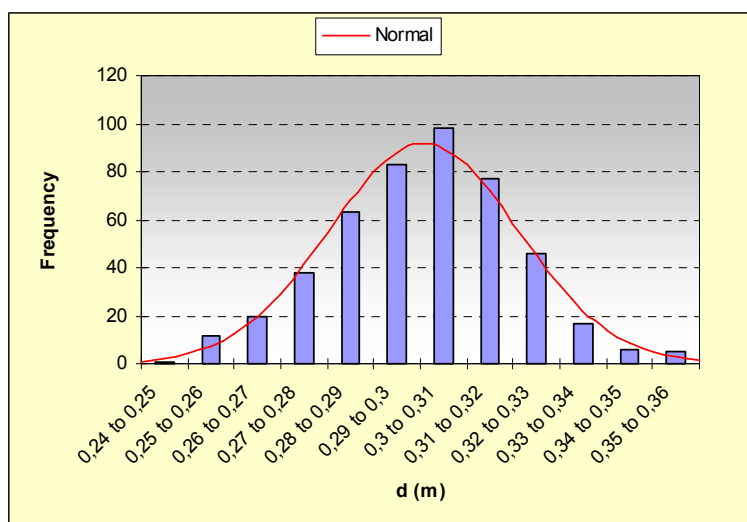
Bijlage 1: verdelingen parameters van de simulaties waarbij de optredende spanning de breuksterkte overschrijdt



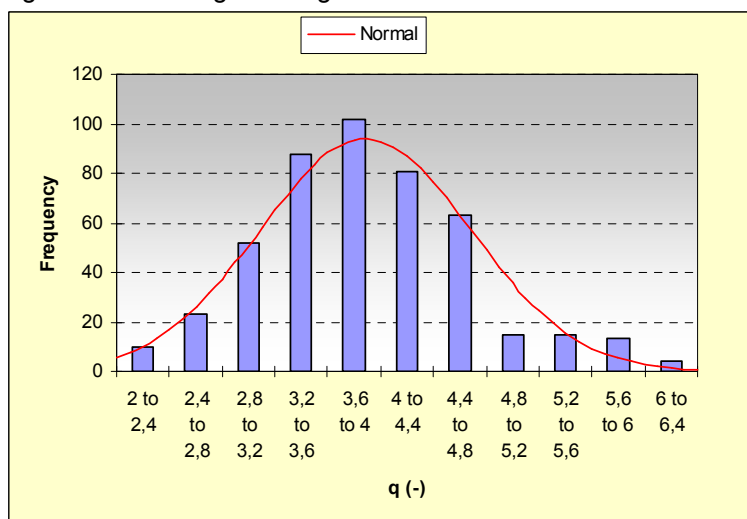
Figuur B1.1: Histogram elasticiteitsmodulus



Figuur B1.2: Histogram beddingsconstante



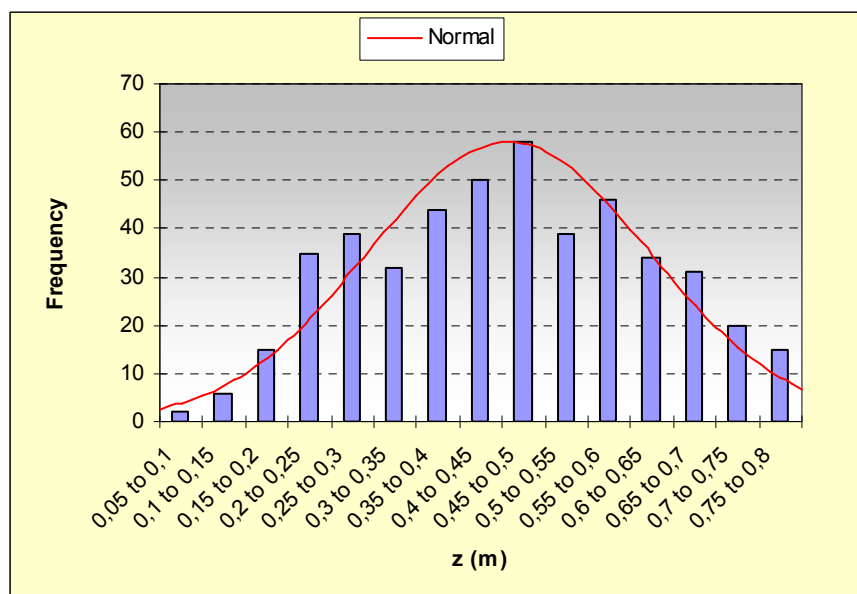
Figuur B1.3: Histogram laagdikte



Figuur B1.4: Histogram stootfactor

Tabel B1.1: Frequentieverdeling stootfactor

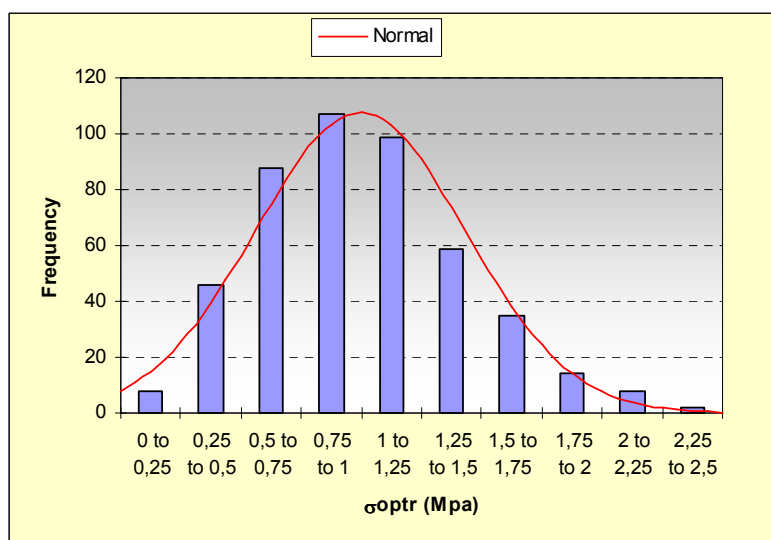
	Frequency	Percent	Cumulative Percent
q (-)			
2 to 2,4	10	2,15	2,15
2,4 to 2,8	23	4,94	7,08
2,8 to 3,2	52	11,16	18,24
3,2 to 3,6	88	18,88	37,12
3,6 to 4	102	21,89	59,01
4 to 4,4	81	17,38	76,39
4,4 to 4,8	63	13,52	89,91
4,8 to 5,2	15	3,22	93,13
5,2 to 5,6	15	3,22	96,35
5,6 to 6	13	2,79	99,14
6 to 6,4	4	0,86	100,00



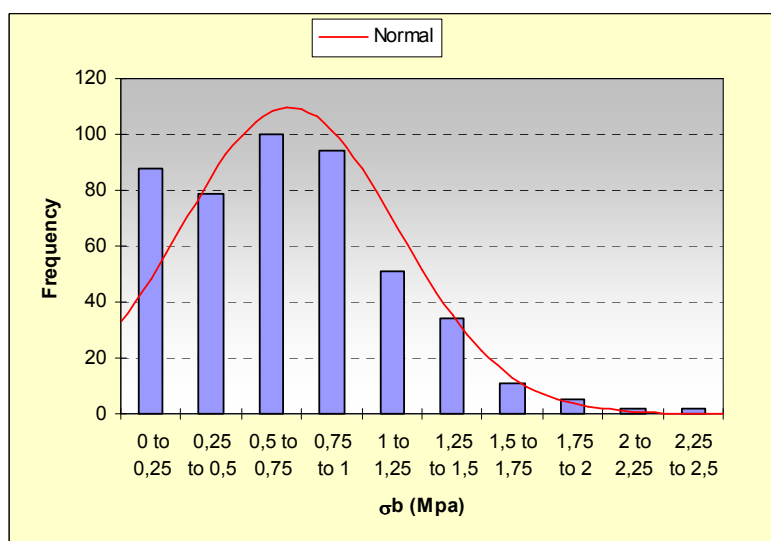
Figuur B1.5: Histogram golfbreedte

Tabel B1.2: Frequentieverdeling golfbreedte

	Frequency	Percent	Cumulative Percent
z (m)			
0,05 to 0,1	2	0,43	0,43
0,1 to 0,15	6	1,29	1,72
0,15 to 0,2	15	3,22	4,94
0,2 to 0,25	35	7,51	12,45
0,25 to 0,3	39	8,37	20,82
0,3 to 0,35	32	6,87	27,68
0,35 to 0,4	44	9,44	37,12
0,4 to 0,45	50	10,73	47,85
0,45 to 0,5	58	12,45	60,30
0,5 to 0,55	39	8,37	68,67
0,55 to 0,6	46	9,87	78,54
0,6 to 0,65	34	7,30	85,84
0,65 to 0,7	31	6,65	92,49
0,7 to 0,75	20	4,29	96,78
0,75 to 0,8	15	3,22	100,00



Figuur B1.6: Histogram optredende spanning



Figuur B1.7: Histogram breuksterkte