

e0700962-2

Vaststellen ontwerpparameters van GeoCrete

Projectnummer : e0700962-2
Offertenummer en datum : o070360/av/maw d.d. 6 april 2007
Titel rapport : Vaststellen ontwerpparameters van GeoCrete
Status rapport : Definitief

Naam opdrachtgever : RWS Directie Zeeland Projectbureau Zeeweringen
Adres : Postbus 1000
Plaats : 4330 ZW MIDDELBURG
Naam contactpersoon : de heer ing. Y. Provoost
Datum opdracht : 10 april 2007
Kenmerk opdracht : AWA29

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

Rapportage

Naam: Ing. M. Weijers

Handtekening:

Datum: 7 augustus 2007

Autorisatie

Naam: Ing. A.K. de Looff

Handtekening:

Datum: 7 augustus 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	5
1.3	Opzet van het rapport	6
2	Vooronderzoek	7
2.1	Inleiding	7
2.2	Korrelverdeling (areometerproef).....	7
2.3	Korrelverdeling	7
2.4	Gehalte aan deeltjes < 20 µm	8
2.5	Gloeiverlies.....	8
2.6	Vochtgehalte	8
2.7	Bepaling van het gehalte aan humus.....	8
3	Standaard onderzoek.....	9
3.1	Inleiding	9
3.2	Visuele inspectie van de kernen	9
3.3	Lengte van de boorkernen	9
3.4	Zagen proefstukken	9
3.5	Dichtheid proefstuk	9
3.6	Bevindingen	10
4	Proefopstelling driepuntsbuigproef.....	11
5	Breuksterkte onderzoek	13
5.1	Inleiding	13
5.2	Resultaten	13
5.3	Bevindingen	14
6	Frequency sweeps	16
6.1	Inleiding	16
6.2	Resultaten	16
6.3	Energiedissipatie.....	17
6.4	Bevindingen	20
7	Dynamische elasticiteitsmodulus	21
7.1	Inleiding	21
7.2	Resultaten	21
7.3	Bevindingen	22
8	Vermoeiingsonderzoek.....	23
8.1	Inleiding	23
8.2	Resultaten	23
8.3	Bevindingen	24
8.4	Relatie tussen stijfheid en dichtheid.....	25

9	Ontwerp en toetsing van GeoCrete als dijkbekleding.....	27
9.1	Principe van het ontwerp op golfklappen	27
9.2	Dataverzameling	29
9.3	Andere ontwerpoverwegingen	30
10	Conclusies en aanbevelingen.....	32

Bijlagen

1	Foto's van de Kernen
2	Gegevens kerninspectie en laagdikte bepaling
3	Resultaten dichtheidproefstuk
4	Resultaten breuksterkte
5	Kracht-verplaatsingsgrafieken (breuksterkte)
6	Resultaten dynamische elasticiteitsmodulus

1 Inleiding

1.1 Probleemstelling en doel

Op het haventerrein nabij Kats ligt een proefvak van een GeoCrete bekleding. Van het Geocrete is echter niet bekend wat het materiaalgedrag (gevoelig voor vermoeiing of breuk) is. Om het materiaalgedrag en de ontwerpparameters vast te stellen is dit onderzoek uitgevoerd.

Het doel van het onderzoek is het vaststellen van het materiaalgedrag (vermoeiing of breuk) van GeoCrete. Dit houdt in dat wordt vastgesteld of het GeoCrete zal bezwijken ten gevolge van vermoeiing of een eenmalige externe belasting. Afhankelijk van het materiaalgedrag zal een ontwerpmethodode worden opgezet voor toepassing als dijkbekleding.

1.2 Aanpak

De volgende werkzaamheden worden uitgevoerd:

- Bepalen van de laagdikte.
Van de kernen is de laagdikte bepaald door 8x te meten en hiervan het gemiddelde te bepalen.
- Zagen proefstukken.
Uit de onderzijde van 8 kernen zijn schijven gezaagd waaruit proefstukken (balkjes 220x50x50 mm³) zijn gezaagd.
- Laboratoriumonderzoek.
In het laboratorium zijn de proefstukken onderzocht:
 - Bepalen van de dichtheid van de proefstukken door middel van meten en wegen (16x)
 - Bepalen van de breuksterkte bij een constante belastingssnelheid (0,35 mm/s) bij 5 °C.
 - Bepalen van de elasticiteitsmodulus bij drie temperaturen en frequenties variërend van 0,1 Hz tot 30 Hz (frequency sweeps).
 - Bepalen van de vermoeiingseigenschappen bij een herhaalde belasting.
- Vaststellen ontwerpparameters.
De ontwerpmethodode is afhankelijk van het materiaalgedrag. Uitgangspunt is dat een bekleding van dit materiaal zich gedraagt als een plaat en dat de optredende spanningen in de plaat ten gevolge van golfklappen de bezwijkspanning van het materiaal niet mogen overschrijden. Dit is het maatgevende criterium dat bij het opstellen van de ontwerpmethodode zal worden gehanteerd. Als blijkt dat het materiaal gevoelig is voor vervorming, worden ontwerpparameters bepaald voor het gebruik in het computerprogramma Golfklap 1.2. Als een eenmalige belasting maatgevend blijkt te zijn zal een ontwerpmethodode worden opgesteld om de breuksterkte te kunnen toetsen aan de optredende spanningen in de bekleding.

1.3 Opzet van het rapport

Het rapport is in de volgende hoofdstukken opgedeeld. In hoofdstuk 2 is een vooronderzoek van GeoCrete opgenomen. Het standaardonderzoek is besproken in hoofdstuk 3. De proefopstelling is uitgelegd in hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 zijn de resultaten van het breuksterkte onderzoek opgenomen. De uitvoering van de frequency sweep is uitgelegd en besproken in hoofdstuk 6. Het bepalen van de dynamische elasticiteitsmodulus is opgenomen in hoofdstuk 7. Hoofdstuk 8 bestaat uit het vermoeiingonderzoek inclusief een uitgebreide verklaring van het materiaalgedrag. In hoofdstuk 9 zijn de ontwerpmethodene en toetsingsmethode van GeoCrete als dijkbekleding opgenomen. De conclusie van het onderzoek is beschreven in hoofdstuk 10.

2 Vooronderzoek

2.1 Inleiding

In 2006 is onderzoek uitgevoerd op de grond afkomstig van hetzelfde proefvak als de kernen GeoCrete van dit project. De resultaten zijn reeds gerapporteerd in KOAC·NPC rapport “Beproevingcertificaat fundering” met referentie Iv06.0912/kv/wma d.d. 9 januari 2007. Dit onderzoek is uitgevoerd op aangeleverd materiaal. De volgende proeven zijn uitgevoerd:

- Korrelverdeling (areometerproef), RAW 2005 proef 1
- Korrelverdeling, RAW 2005 proef 6.0
- Gehalte aan deeltjes < 20 µm, RAW 2005 proef 9
- Gloeiverlies, RAW 2005 proef 124
- Vochtgehalte, NEN-EN 1097-5
- Bepaling van het gehalte aan humus, NEN-EN 1744-1 art. 15.1

In de volgende paragrafen is een opsomming van de resultaten van het onderzoek opgenomen.

2.2 Korrelverdeling (areometerproef)

In tabel 2.1 zijn de resultaten van de areometerproef opgenomen.

Tabel 2.1: Resultaten areometerproef

Fractie < 2 µm [%m/m]	0,3
Standaard deviatie [%m/m]	0,3
Aantal	3

2.3 Korrelverdeling

In tabel 2.2 t/m 2.4 zijn de resultaten van de korrelverdeling opgenomen.

Tabel 2.2: Resultaten korrelverdeling > 2 mm

Fractie > 2 mm [%m/m]	0,0 ¹⁾
Standaard deviatie [%m/m]	0,0
Aantal	3

¹⁾ In de boorkernen van het in dit rapport beschreven kernen is wel degelijk materiaal aanwezig > 2 mm. Zie foto's bijlage 1.

Tabel 2.3: Resultaten korrelverdeling 2 mm – 63 µm

Fractie 2 mm – 63 µm [%m/m]	90,7
Standaard deviatie [%m/m]	5,6
Aantal	3

Tabel 2.4: Resultaten korrelverdeling < 63 µm

Fractie < 63 µm [%m/m]	9,3
Standaard deviatie [%m/m]	5,6
Aantal	3

2.4 Gehalte aan deeltjes < 20 µm

In tabel 2.5 zijn de resultaten van de gehalte < 20 µm opgenomen.

Tabel 2.5: Resultaten gehalte < 20 µm

Fractie < 20 µm [%m/m]	3,7
Standaard deviatie [%m/m]	1,6
Aantal	3

2.5 Gloeiverlies

In tabel 2.6 zijn de resultaten van de bepaling van het gloeiverlies opgenomen.

Tabel 2.6: Resultaten gloeiverlies

Gloeiverlies [%m/m]	0,5
Standaard deviatie [%m/m]	0,2
Aantal	3

2.6 Vochtgehalte

In tabel 2.7 zijn de resultaten van de bepaling van het vochtgehalte bij aanlevering opgenomen.

Tabel 2.7: Resultaten vochtgehalte bij aanlevering

Vochtgehalte [%m/m]	21,3
Standaard deviatie [%m/m]	3,6
Aantal	3

2.7 Bepaling van het gehalte aan humus

In tabel 2.8 zijn de resultaten van de bepaling van het gehalte fulvozuur (gehalte aan humus) opgenomen.

Tabel 2.8: Resultaten gehalte fulvozuur

Kleur licht dan standaardkleurplaatje	A
Aantal	3

3 Standaard onderzoek

3.1 Inleiding

Er zijn 8 kernen GeoCrete met een diameter van 250 mm geboord uit een proefvak op het haventerrein nabij Kats. De kernen zijn aangeleverd bij KOAC·NPC te Vught.

3.2 Visuele inspectie van de kernen

De kernen zijn allemaal gefotografeerd. De foto's zijn opgenomen in bijlage 1. In bijlage 2 zijn de bevindingen van de inspectie van de kernen opgenomen.

3.3 Lengte van de boorkernen

Voor bepaling van de laagdikte van de kern is de lengte van de kern 8x gelijk verdeeld over de omtrek gemeten. Hiervan is per kern het gemiddelde bepaald. Een uitgebreide set van gegevens is in bijlage 2 opgenomen. In tabel 3.1 zijn de gegevens van de laagdikte opgenomen.

Waarschijnlijk zijn de aangeleverde kernen bij het boren gebroken en is de aanwezige laagdikte dus groter dan hier bepaald.

Tabel 3.1: Gegevens laagdikte

Gemiddelde laagdikte [mm]	292
Standaard deviatie [mm]	61
Aantal	8

De laagdikte varieert van 214 mm tot 370 mm.

3.4 Zagen proefstukken

Uit de onderzijde van elke kern is een schijf (A) gezaagd en uit elke schijf zijn 2 balkjes (220x50x50 mm³) gezaagd. Als reserve is een extra schijf (B) gezaagd direct boven de onderste schijf.

Op de aangeleverde kernen is geen markering aangebracht waaruit kan worden afgeleid wat de boven- en wat de onderkant van de kern is. Het is daarom niet uit te sluiten dat een proefstuk uit de bovenzijde van een kern afkomstig is.

3.5 Dichtheid proefstuk

Door middel van wegen en meten van alle balkjes (16 stuks) is de dichtheid proefstuk bepaald. De balkjes zijn gedroogd tot constante massa. In bijlage 3 zijn alle gegevens van de dichtheidsmetingen opgenomen. In tabel 3.2 is een samenvatting van de gegevens opgenomen.

Tabel 3.2: Gegevens dichtheid proefstuk

Gemiddelde dichtheid proefstuk [kg/m³]	1845
Standaard deviatie [kg/m³]	117
Aantal	16

De dichtheid proefstuk varieert van 1775 kg/m³ tot 2024 kg/m³.

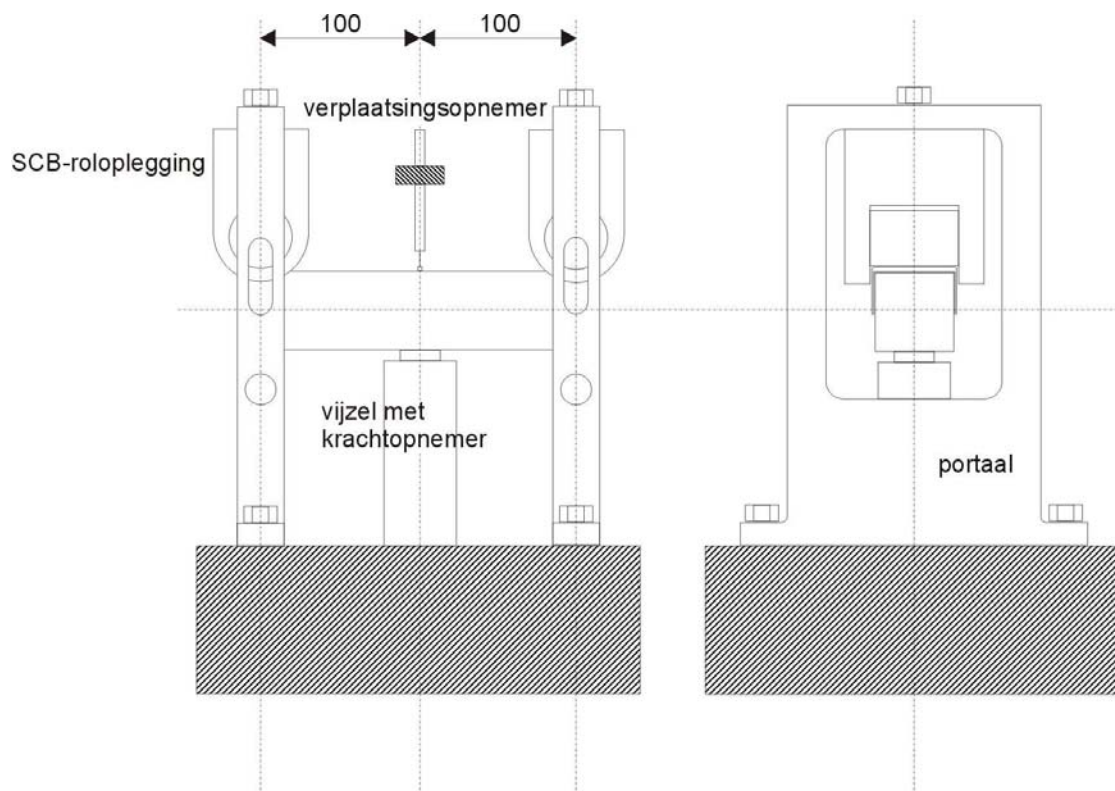
3.6 Bevindingen

De spreiding in laagdikte en dichtheid is hoog. De spreiding in de dichtheid wordt voornamelijk veroorzaakt door het verschil in holle ruimte. De gevonden spreiding in de laagdikte en dichtheid van GeoCrete wordt verklaard doordat het materiaal “mix in place” is aangelegd.

4 Proefopstelling driepuntsbuigproef

Voor het uitvoeren van een driepuntsbuigproef zijn balkvormige proefstukken nodig van $220 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$. De balken zijn uit kernen met een diameter van 250 mm gezaagd. De balkjes zijn uit het onderste gedeelte van de kern gezaagd omdat deze bij golfaanval het meest op buiging wordt belast. De kwaliteit van de onderlaag is dus maatgevend. De balkjes zijn in de driepuntsbuig opstelling geplaatst en belast. De belasting en registratie zijn afhankelijk van het soort onderzoek (breuksterkte, frequency sweep, elasticiteitsmodulus of vermoeiing) dat wordt uitgevoerd. In het onderzoek zijn twee verschillende portalen gebruikt. De breuksterkte is bepaald met SCB-rolopleggingen omdat in deze opstelling ongehinderd grote verplaatsingen kunnen optreden. De overige proeven zijn met vierpuntsbuigportalen uitgevoerd omdat er bij de SCB-roloplegging relatief grote verplaatsingen optreden waardoor de elasticiteitsmodulus niet goed kan worden bepaald.

In figuur 4.1 is een schematische weergave van de proefopstelling met SCB-roloplegging gegeven.



Figuur 4.1: Schematische weergave van de driepuntsbuigproef opstelling met SCB-roloplegging

In figuur 4.2 is een foto opgenomen van de gebruikte opstelling voor de driepuntsbuigproef met 4-puntsbuigportalen.



Figuur 4.2: Opstelling driepuntsbuigproef met 4-puntsbuigportalen

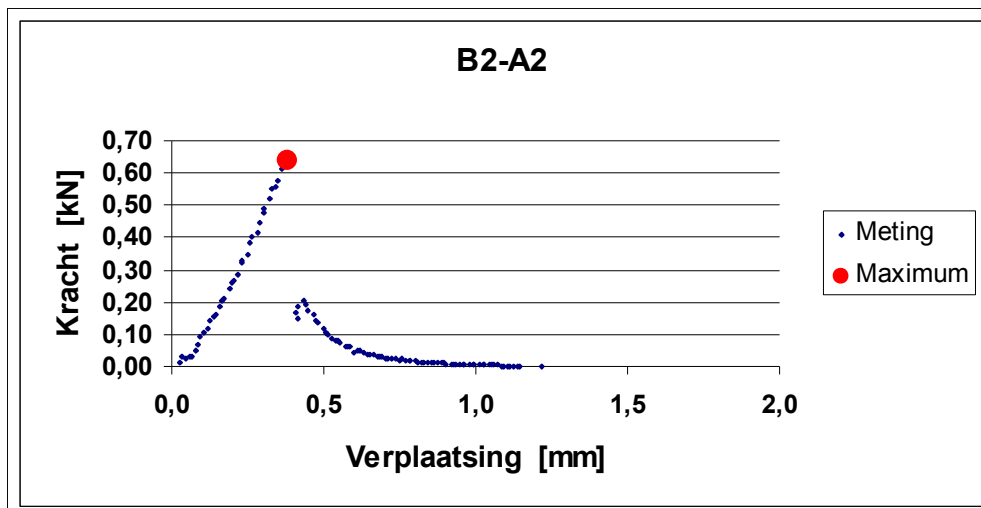
5 Breuksterkte onderzoek

5.1 Inleiding

De breuksterkte is bepaald in de driepuntsbuigopstelling bij 5°C. Er is gebruik gemaakt van de SCB-portalen. De opgelegde kracht en de verplaatsingen zijn gemeten door de opnemer in de vijzel. De proef is uitgevoerd bij een constante belastingsnelheid van 0,35 mm/s. De proefstukken zijn belast tot bezwijken. De resultaten van het breuksterkte onderzoek zijn gebruikt om het krachtniveau bij de vermoeiingsproeven in te schatten.

5.2 Resultaten

In bijlage 4 zijn de resultaten opgenomen. In tabel 5.1 is een samenvatting van de gegevens opgenomen. Figuur 5.1 geeft grafisch het verloop van de proef weer. Alle 15 grafieken zijn opgenomen in bijlage 5.

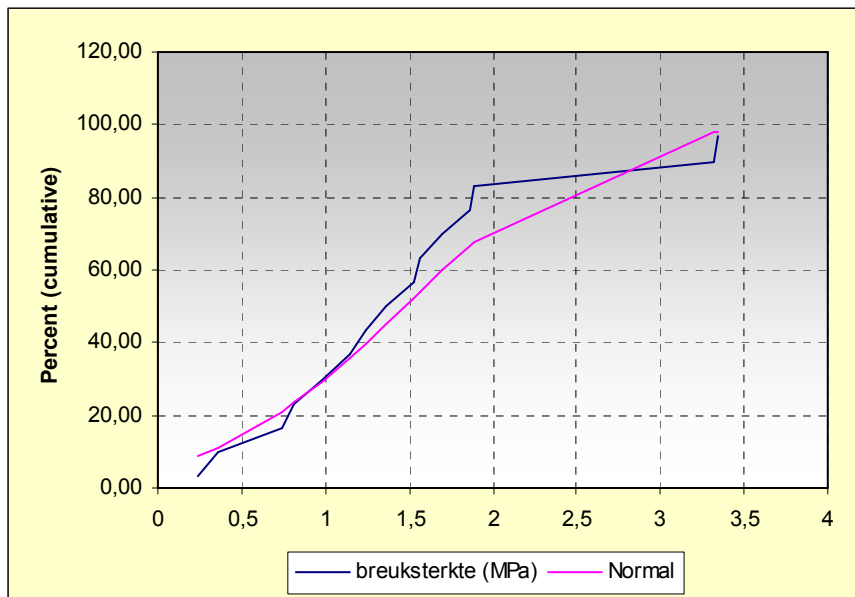


Figuur 5.1: Kracht-verplaatsingsgrafiek

Tabel 5.1: Gemiddelde en standaard deviatie van de breuksterkte

Gemiddelde breuksterkte (σ_{breuk}) [MPa]	1,47
Standaarddeviatie [MPa]	0,90
Aantal waarnemingen [-]	15

De breuksterkte van het materiaal is vrij laag en de spreiding in de waarnemingen is groot. De breuksterkte varieert van 0,24 MPa tot 3,34 MPa. De breuksterkte is niet standaard normaal verdeeld. Daarom is de cumulatieve frequentieverdeling van de breuksterkte bepaald om karakteristieke waarden van de breuksterkte te kunnen schatten. De cumulatieve frequentieverdeling is gegeven in figuur 5.2. Hierin is tevens de best fit van de normale verdeling gegeven (roze lijn).



Figuur 5.2: cumulatieve frequentieverdeling van de breuksterkte

Een karakteristieke ondergrens van de breuksterkte van 0,24 MPa wordt door circa 3,3% van de waarnemingen onderschreden.

De rek bij breuk is een indicator voor de taaigheid van het materiaal. In tabel 5.2 zijn het gemiddelde en de standaardafwijking van de rek bij breuk gegeven.

Tabel 5.2: Gemiddelde en standaard deviatie van de breukrek

Gemiddelde breukrek (ϵ_{breuk}) [$\mu\text{m/m}$]	958
Standaarddeviatie [MPa]	207
Aantal waarnemingen [-]	15

De rek bij breuk varieert van 703 tot 1325 $\mu\text{m/m}$.

5.3 Bevindingen

In eerste instantie is er 8x de breuksterkte bepaald. Tijdens het uitvoeren van de vermoeiingsproeven bleek echter dat het materiaal niet gevoelig is voor vermoeiing. Hieruit is geconcludeerd dat de breuksterkte dominant is over de vermoeiing en dus het bezwijkingsmechanisme bepaald. Om deze reden zijn maar 2 vermoeiingsproeven uitgevoerd (zie hoofdstuk 8) en is het restant van de balkjes gebruikt voor bepaling van de breuksterkte.

De breuksterkte van het materiaal is vrij laag (gemiddeld minder dan 1,5 MPa). Het valt op dat er een grote spreiding in de resultaten aanwezig is. Dit resulteert in een grote standaard deviatie ten opzichte van het gemiddelde.

De afwijkende eigenschappen ten opzichte van andere cementgebonden materialen worden zichtbaar bij de breukrek. De breukrek is een indicator voor de taaigheid van het materiaal. Deze

is van GeoCrete (700-1300 $\mu\text{m}/\text{m}$) beduidend hoger dan van bijvoorbeeld zandcement (80-100 $\mu\text{m}/\text{m}$) of AGRAC (140-180 $\mu\text{m}/\text{m}$). Geocrete is dus minder bros dan een vergelijkbaar zandcement en heeft een hogere scheurtaaiheid.

6 Frequency sweeps

6.1 Inleiding

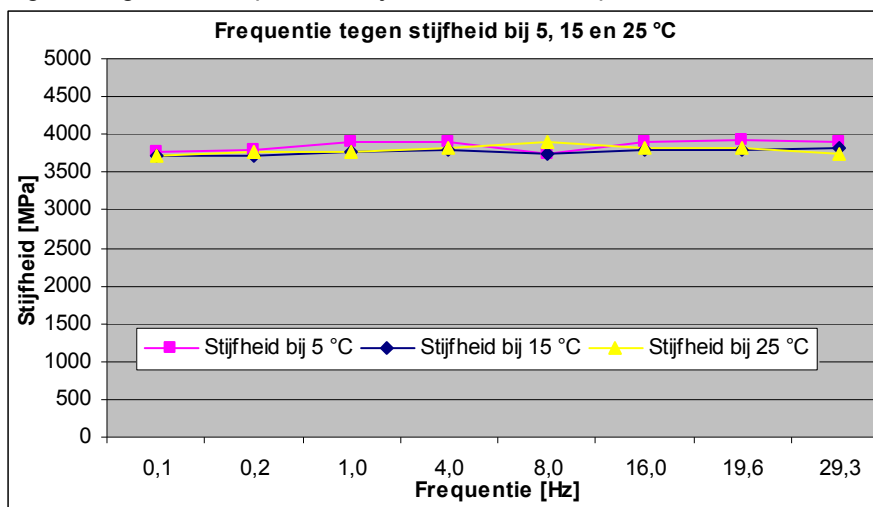
Bij een frequency sweep wordt een proefstuk bij een laag krachtniveau belast en wordt de relatie tussen de belasting en de rek in het materiaal (=stijfheids- of elasticiteitsmodulus) vastgelegd. Dit wordt uitgevoerd bij verschillende belastingfrequenties en temperaturen om de afhankelijkheid van de elasticiteitsmodulus van de belastingtijd en de temperatuur vast te stellen.

De frequency sweep is uitgevoerd op het tweelingbalkje van de van het balkje met de gemiddelde breuksterkte (B1-A2). Hierbij is de elasticiteitsmodulus bepaald bij drie temperaturen (5, 15 en 25 °C) en frequenties variërend van 0,1 tot 30 Hz.

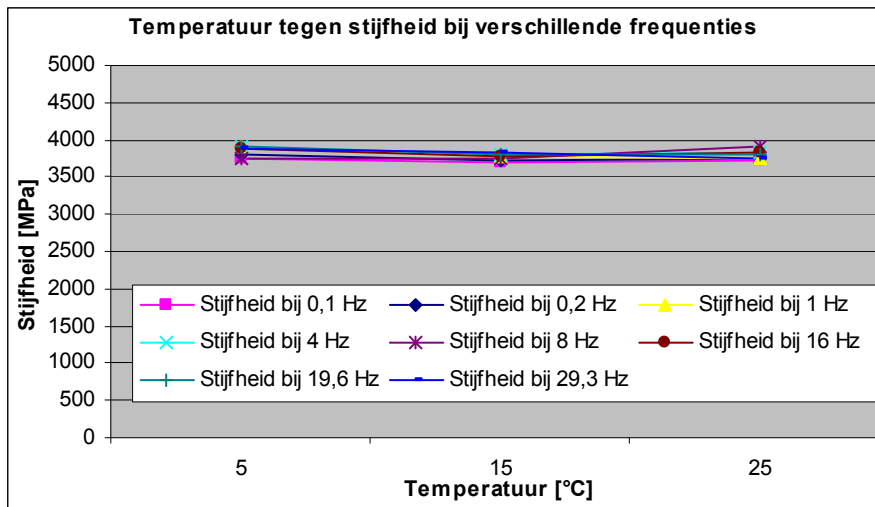
Bij asfalt is de elasticiteitsmodulus sterk afhankelijk van de belastingtijd en temperatuur, bij beton niet.

6.2 Resultaten

De resultaten van de frequency sweep zijn in de figuren 6.1 en 6.2 weergegeven. In figuur 6.1 is de stijfheid uitgezet tegen de frequentie bij drie temperaturen. In figuur 6.2 is de stijfheid uitgezet tegen de temperatuur bij verschillende frequenties.



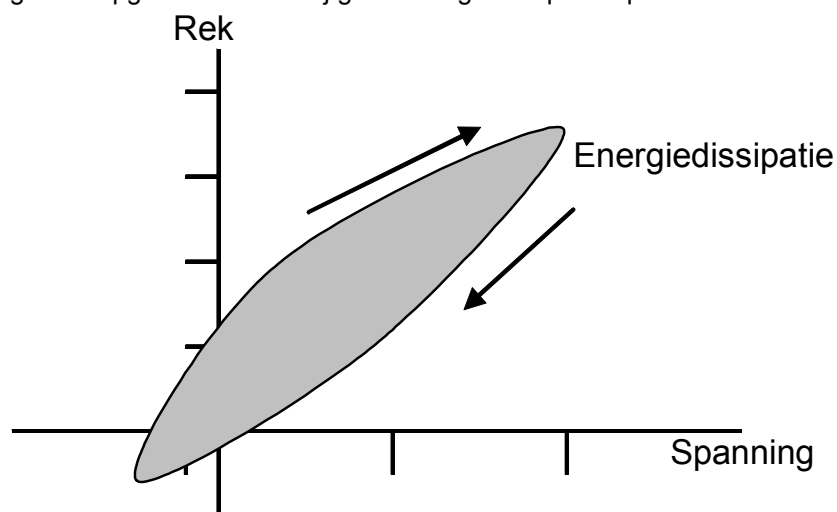
Figuur 6.1: Stijfheid tegen de frequentie



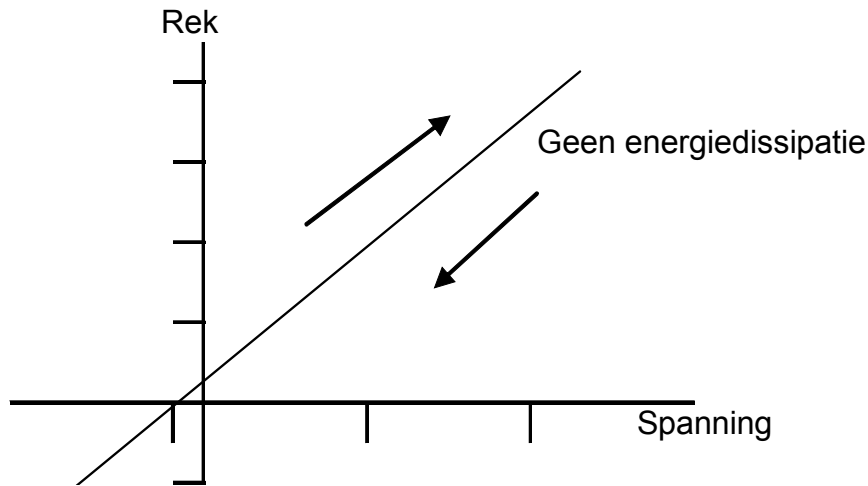
Figuur 6.2: Stijfheid tegen de temperatuur

6.3 Energiedissipatie

Vanwege het visco-elastische karakter van vermoeiingsgevoelig materiaal bestaat er een tijdsverschil tussen de opgelegde belasting en de daarmee samenhangende vervorming; het materiaal reageert vertraagd (vandaar de naam vertraagd elastisch). Dit betekent dat een gedeelte van de mechanische energie die tijdens het belasten op het materiaal is overgedragen in het materiaal achterblijft. Dit wordt dissipatie genoemd. Een deel van deze verloren energie zal worden omgezet in warmte, de rest is gerelateerd aan de permanente vervorming en het ontstaan van inwendige schade. Dus naarmate een materiaal vermoeiingsgevoeliger is zal het een grotere energiedissipatie (W_{dis}) hebben. Deze energiedissipatie is grafisch weer te geven als het ingesloten oppervlak van een spannings-rek grafiek die tijdens het uitvoeren van een proef met een cyclische belasting plaatsvindt zoals opgenomen in figuur 6.3. In figuur 6.4 is een grafiek opgenomen waarbij geen energiedissipatie optreedt.



Figuur 6.3: Grafische weergave van energiedissipatie (opgenomen energie)



Figuur 6.4: Spannings-rek grafiek van een proef waarbij geen energiedissipatie optreedt

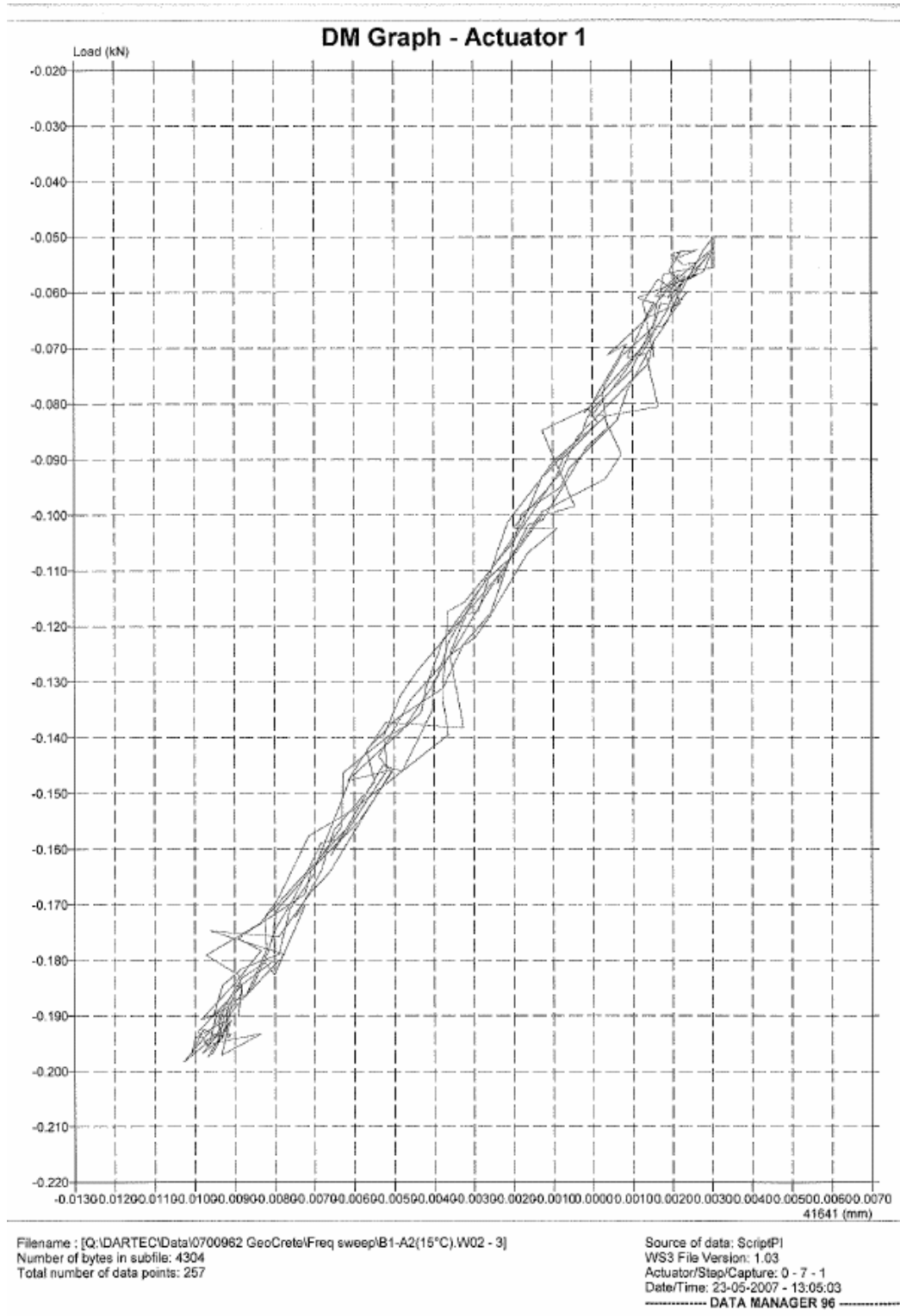
De energiedissipatie wordt als volgt beschreven:

$$W_{dis} = \pi \cdot \varepsilon^2 \cdot S_{mix} \cdot \sin \phi$$

Waarin: W_{dis} : gedissipeerde energie
 S_{mix} : stijfheid van het mengsel
 ε : rek
 π : faseverschil

Hieruit blijkt dat een lage rek en een klein faseverschil, zoals het GeoCrete laat zien, resulteert in een zeer kleine hoeveelheid dissipatie energie. GeoCrete is dus niet of nauwelijks vermoeiingsgevoelig. Voor een vergelijking: waterbouwasfaltbeton heeft bij 15 ° een fasehoek van ca. 14 -15 tegen 3 – 4 bij het vermoeiingsonderzoek van GeoCrete.

In figuur 6.5 is een Lissajous grafiek opgenomen van een van metingen van GeoCrete. Hierin is zichtbaar dat het GeoCrete nauwelijks vertraagt reageert. De grafiek laat geen oppervlak zien m.b.t. energiedissipatie. Het grillige verloop is ruis van de meting.

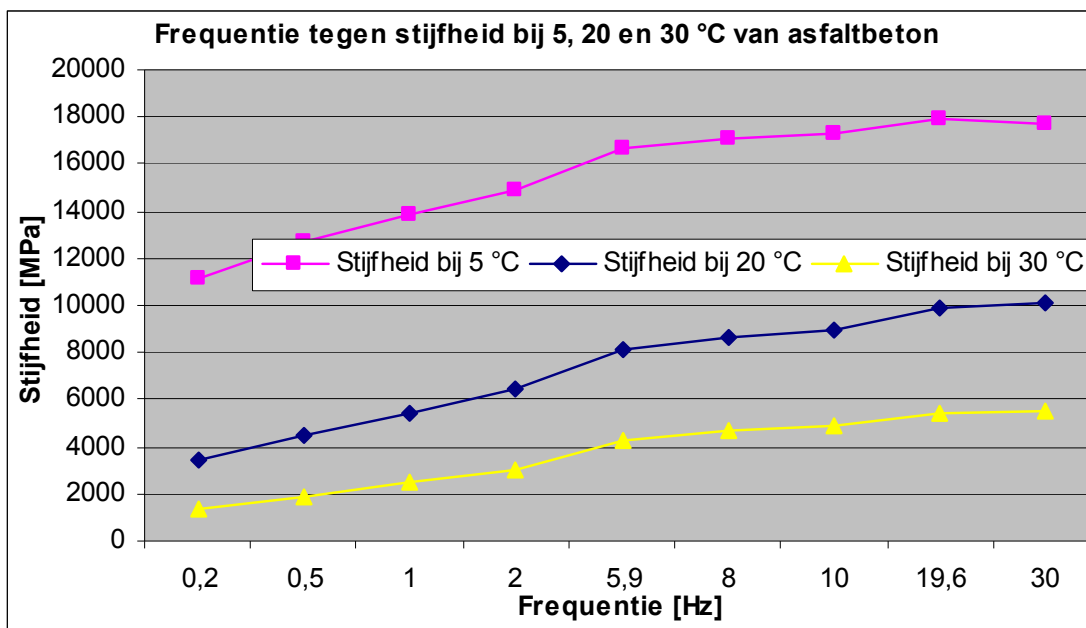


Figuur 6.5: Lissajous grafiek van GeoCrete

6.4 Bevindingen

Zoals zichtbaar is in de figuren 6.1 en 6.2 is de stijfheid niet of nauwelijks afhankelijk van de temperatuur of van de frequentie. Alle waarden van de frequency sweep liggen tussen 3709 MPa en 3920 MPa met een standaard deviatie van 67 MPa. Een maximaal verschil van 211 MPa en een spreiding van 67 MPa is verwaarloosbaar klein gezien het soort onderzoek, de reproduceerbaarheid en orde grootte van getallen.

Ter vergelijking is in figuur 6.6 een grafiek van asfalt opgenomen. Hierin is duidelijk een verband met de frequentie zichtbaar. Dit zelfde geldt voor temperatuur.



Figuur 6.6: Stijfheid tegen frequentie van asfalt

7 Dynamische elasticiteitsmodulus

7.1 Inleiding

De elasticiteitsmodulus is bepaald op 7 proefstukken. Proefstuk B5-A2 is bezweken tijdens het inbouwen. De elasticiteitsmodulus is een maat voor de stijfheid. De elasticiteitsmodulus is bepaald in de driepuntsbuigopstelling bij 5 °C. De opgelegde belasting is een sinusvormige sprongbelasting met een voorspanning van 50 N en een frequentie van 10 Hertz.

7.2 Resultaten

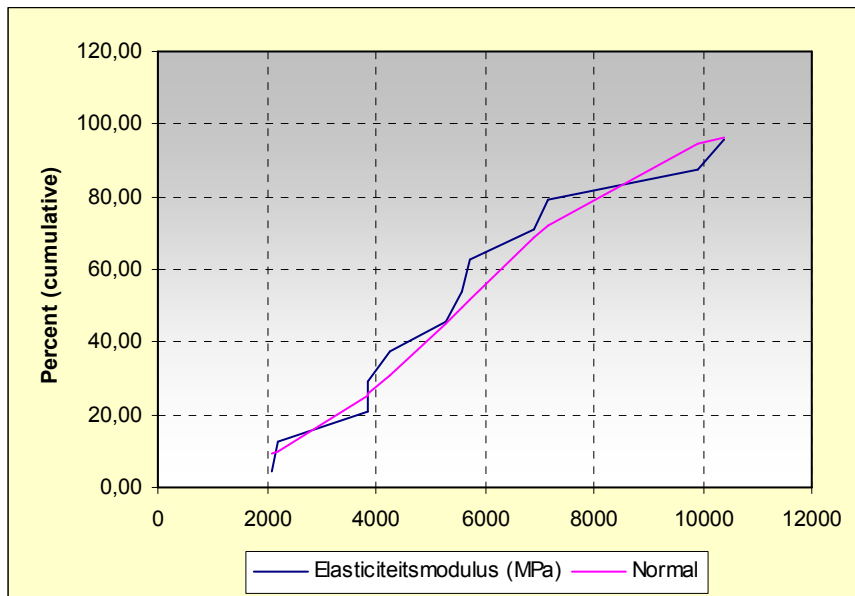
In bijlage 6 zijn gemiddelde stijfheden per proefstuk opgenomen. In tabel 7.1 is een samenvatting van de gegevens weergegeven.

Tabel 7.1: Gemiddelde en standaard deviatie van de dynamische elasticiteitsmodulus

Gemiddelde stijfheid [MPa]	5478
Standaarddeviatie [MPa]	2564
Aantal waarnemingen [-]	7

De stijfheid varieert van 2154 MPa tot 10149 MPa.

Van de elasticiteitsmodulus is een cumulatieve frequentieverdeling bepaald. Deze is gegeven in figuur 7.1. Hierin is tevens de best fit van de normale verdeling gegeven (roze lijn).



Figuur 7.1: cumulatieve frequentieverdeling van de elasticiteitsmodulus

Uit figuur 7.1 volgt dat een karakteristieke bovengrens van de elasticiteitsmodulus van 10.000 MPa door circa 95% van de waarnemingen wordt onderschreden. Een karakteristieke ondergrens van de elasticiteitsmodulus van 2100 MPa wordt door circa 5% van de waarnemingen onderschreden. Bij ontwerp en toetsing wordt doorgaans gerekend met een

karacteristieke bovengrens van de elasticiteitsmodulus ($E_{95\%}$) omdat een hoge stijfheid resulteert in hogere spanningen in de constructie.

7.3 Bevindingen

Het valt op dat de spreiding zeer groot is. Dat balkje B5-A2 bezwijkt tijdens het inbouwen zegt iets over de slechte kwaliteit van deze kern. Van deze kern is dan ook geen dynamische elasticiteitsmodulus bepaald. Kern 5 geeft tevens de laagste dichtheid en laagste breuksterkte.

Uit de proeven blijkt dat de fasehoek van GeoCrete zeer klein is. Dit houdt in dat er geen energie door het proefstuk wordt gedissipeerd. Ook is er nauwelijks verschil in de elasticiteitsmodulus bij verschillende rekken wat inhoudt dat de metingen in het lineair elastisch reageert. De elasticiteitsmodulus is dus constant bij verschillende rekniveaus. Dit betekent dat de hier bepaalde elasticiteitsmoduli kunnen worden gebruikt indien de golfbelasting resulteert in hogere of lagere spanningen en rekken in de constructie.

8 Vermoeiingsonderzoek

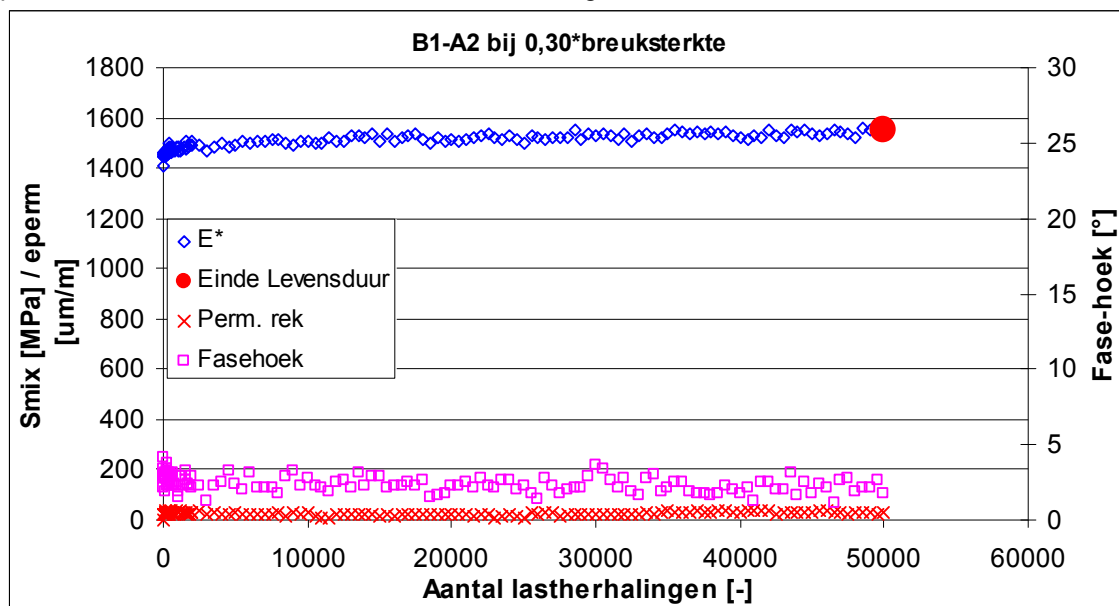
8.1 Inleiding

De vermoeiingseigenschappen zijn bepaald in de driepuntsbuigopstelling bij 5°C en 1 Hz. Elk balkje is belast tot bezwijken. De proef is bij verschillende belastingniveaus uitgevoerd om ernaar te streven dat de balkjes bezwijken bij circa 100-1.000 lastherhalingen (korte proef) en bij circa 10.000 lastherhalingen (lange proef).

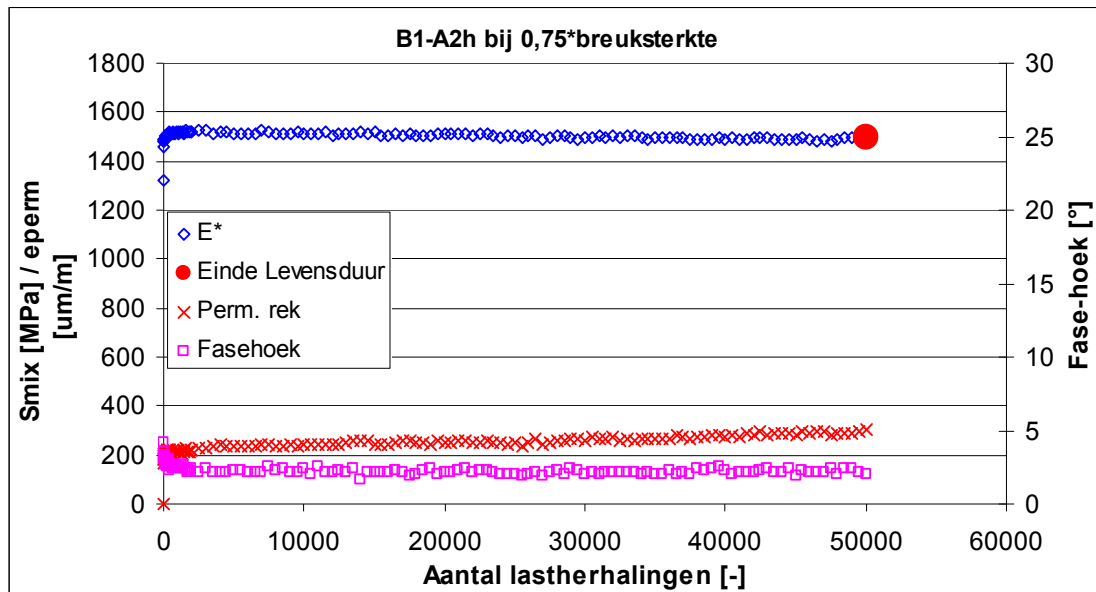
Het idee was om op de 4 korte en 4 lange proeven uit te voeren. Er zijn echter maar 2 proeven uitgevoerd omdat bleek dat het materiaal niet vermoeiingsgevoelig is (zie paragraaf 8.3). De proeven zijn uitgevoerd bij twee verschillende krachtniveaus die gerelateerd zijn aan de breuksterkte van het tweelingbalkje. Bij een vermoeiingsgevoelig materiaal zal het proefstuk wanneer het cyclisch wordt belast met een kracht van 0,75 maal de breuksterkte na een gering aantal lastherhalingen bezwijken.

8.2 Resultaten

Figuur 8.1 en figuur 8.2 geven grafisch het verloop van de proef weer. Hierin is zichtbaar dat het proefstuk niet is bezweken na 50.000 lastherhalingen.



Figuur 8.1: Vermoeiingsgrafiek $0,30 \times \sigma_{breuk}$



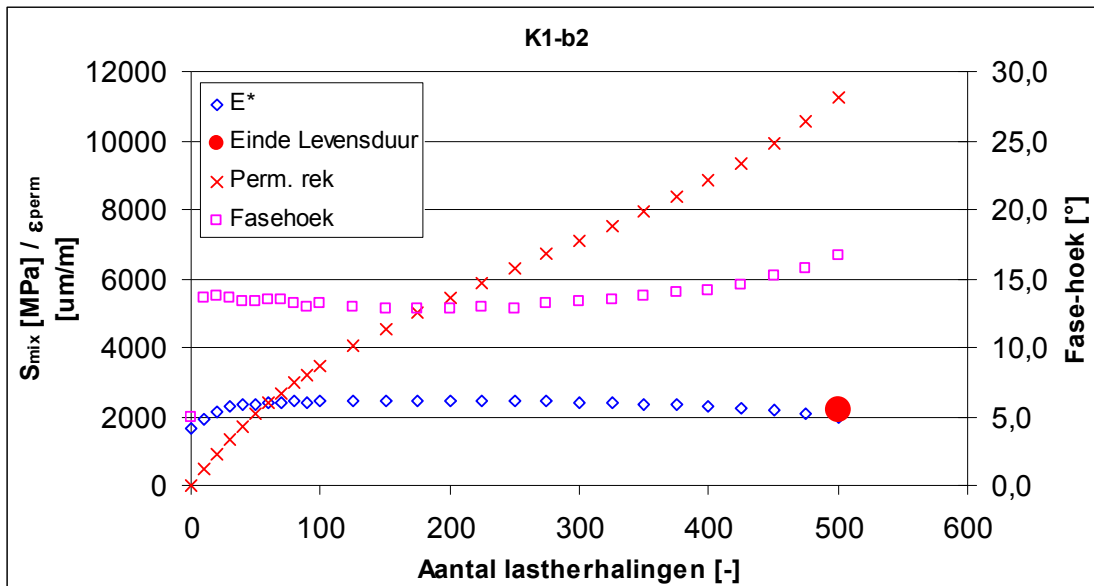
Figuur 8.2: Vermoeingsgrafiek $0,75 \times \sigma_{\text{breuk}}$

8.3 Bevindingen

Uit de vermoeingsgrafieken is op te maken dat het GeoCrete niet (of nauwelijks) vermoeingsgevoelig is. Bij een hogere belasting (figuur 8.2.) is wel zichtbaar dat de permanente rek hoger ligt (maar niet toeneemt) dan bij een lagere belasting (figuur 8.1). Tijdens belasten is de fase-hoek vrijwel nul en daarmee vindt geen energiedissipatie plaats.

Omdat het proefstuk bij beide belastingsniveaus niet is bezweken zijn geen vermoeingsonderzoeken meer uitgevoerd. In plaats hiervan is van de resterende balkjes de breuksterkte bepaald (zie hoofdstuk 5).

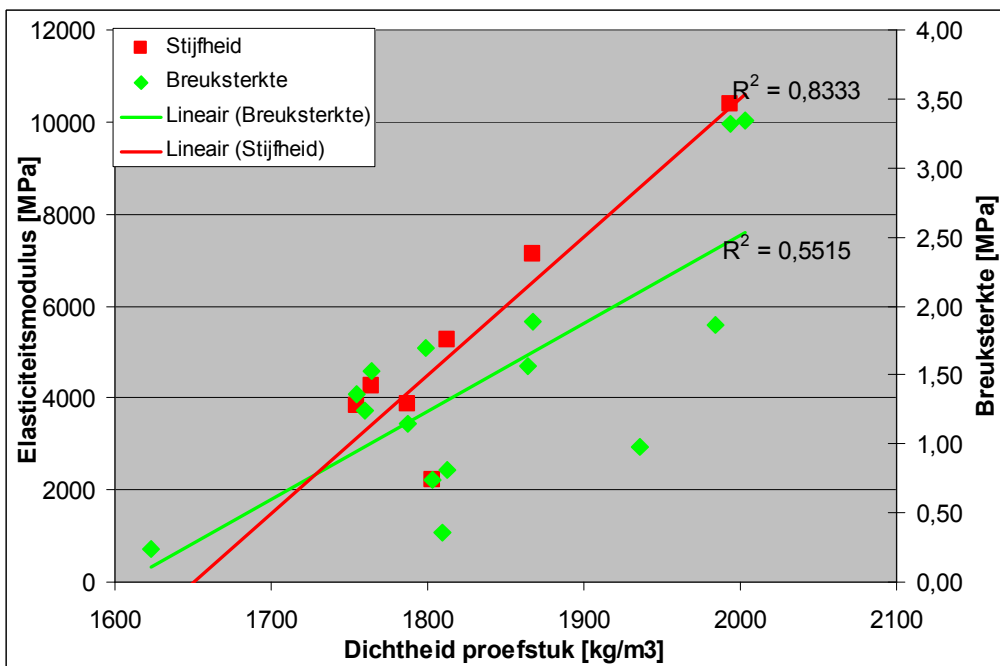
Ter vergelijking is in figuur 8.3 een vermoeingsgrafiek van waterbouwasfaltbeton opgenomen .



Figuur 8.3: Vermoeingslijn van waterbouwasfaltbeton.

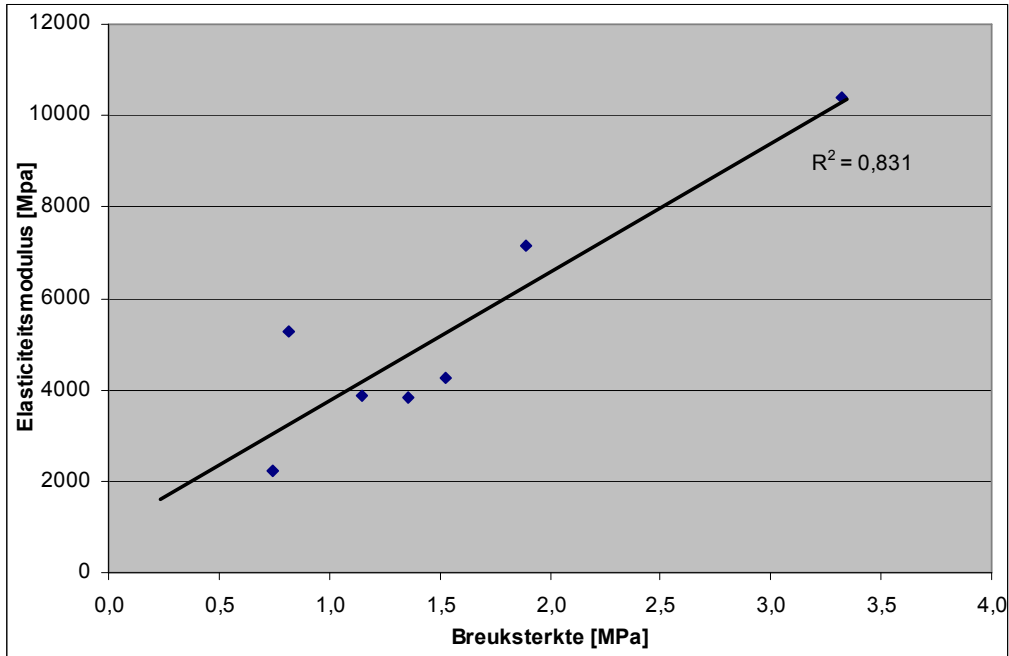
8.4 Relatie tussen stijfheid en dichtheid

Om vast te stellen of er een relatie tussen de dichtheid, stijfheid en breuksterkte aanwezig is, is in figuur 8.4 de dichtheid uitgezet tegen de stijfheid en de breuksterkte.



Figuur 8.4: Dichtheid tegen de stijfheid en breuksterkte.

In figuur 8.5 is een grafiek opgenomen waarin de elasticiteitsmodulus is uitgezet tegen de breuksterkte.



Figuur 8.5: grafische weergave van de relatie tussen stijfheid en sterkte

Uit figuur 8.5 blijkt dat er een min of meer lineair verband bestaat tussen de stijfheid en de sterkte van GeoCrete. Dit heeft als voordeel dat aan de hand van stijfheden, bijvoorbeeld bepaald met een valgewicht-deflectiemeter, potentieel “zwakke” plekken kunnen worden geselecteerd voor het boren van de kernen voor sterkteonderzoek. Met andere woorden; er kan dus selectief worden geboord waardoor het aantal boringen dat nodig is om een uitspraak te doen over de minimaal aanwezige sterkte, beperkt kan blijven.

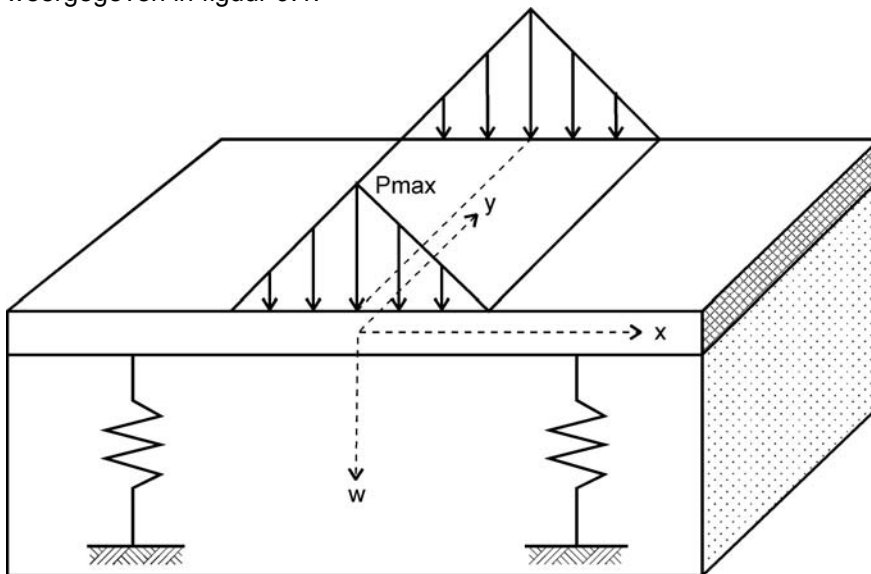
9 Ontwerp en toetsing van GeoCrete als dijkbekleding

9.1 Principe van het ontwerp op golfklappen

Uit dit onderzoek is gebleken dat voor het onderzochte GeoCrete de breuksterkte dominant is over vermoeiing. Dit houdt in dat er ontworpen moet worden op het bezwijken ten gevolge van één extreme (golf)belasting met een geringe kans op voorkomen en niet op vermoeiing door herhaalde belastingen.

Het ontwerpen en toetsen van GeoCrete als dijkbekleding moet, analoog aan de methodiek voor asfaltbekledingen, plaatsvinden door middel van het berekenen van de maximaal optredende trekspanning aan de onderzijde van het GeoCrete.

Uitgangspunt van dimensionering is dat golfklappen buiging in een plaat veroorzaken en dat de optredende spanning ten gevolge van het buigend moment de bezwijkspanning van de asfaltplaat niet mag overschrijden. De bekleding en ondergrond zijn geschematiseerd tot een elastisch ondersteunde ligger. De golfklap is geschematiseerd tot een driehoeksbelasting. Dit is weergegeven in figuur 9.1.



Figuur 9.1: schematisatie van het systeem

Deze maximaal optredende trekspanningen (voor $x=0$) worden met behulp van de volgende formule berekend:

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

met

$$\beta = 4 \sqrt{\frac{3 c (1 - \nu^2)}{E d^3}} \quad (2)$$

Hierin is:

σ	optredende trekspanning aan de onderzijde van de bekleding [MPa]
p_{\max}	maximale drukstoot [MPa]
d	laagdikte [m]
z	halve breedte driehoeksbelasting [=0,5H]
c	beddingsconstante van de ondergrond [MPa/m]
E	Elasticiteitsmodulus van het GeoCrete [MPa]
ν	constante van Poisson van het GeoCrete [-]

De maximale drukstoot (P_{\max}) wordt bepaald met de onderstaande formule:

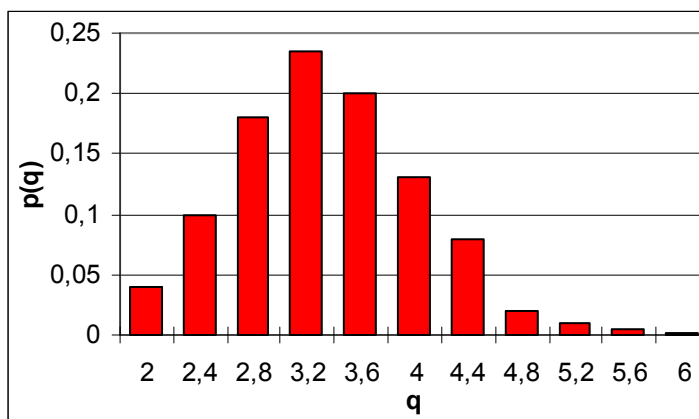
$$p_{\max} = \rho_w g q H_s$$

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]

P_{\max} wordt berekend met de significante golfhoogte en niet met de maximale golfhoogte. Variaties in het golfveld zijn verdisconteerd in de stootfactor.

De stootfactoren zijn afhankelijk van de taludhelling. Bij een taludhelling van 1:4 is de verdeling van de stootfactoren gegeven in figuur 9.1.



Figuur 9.1: Kansverdeling stootfactoren

Hieruit volgt dat de maximale stootfactor bij een taludhelling van 1:4 circa 6 bedraagt. De stootfactoren kunnen worden omgerekend afhankelijk van de werkelijke taludhelling met behulp van de volgende formule:

$$q_{\alpha} = \frac{\tan(\alpha)}{0,25} * q_r$$

- q_{α} stootfactor bij een talud met hellingshoek α [-]
 $\tan(\alpha)$ tangens van de taludhelling [-]
0,25 tangens van een talud met helling 1:4 [-]
 q_r stootfactor bij een talud met helling 1:4 [-]

Voor bermen wordt gerekend met de stootfactor behorend bij het onderliggende talud. Voor een toelichting op de modellering wordt verwezen naar het Technisch Rapport Asfalt voor Waterkeren, bijlage 6.

De aldus bepaalde optredende spanning kan worden getoetst aan de breuksterkte van het materiaal.

9.2 Dataverzameling

Om de optredende spanningen in de bekleding te bepalen zijn de volgende gegevens benodigd:

- Golfrandvoorwaarden
- Elasticiteitsmodulus van de bekleding
- Beddingsconstante van de ondergrond
- Laagdikte van de bekleding

Indien de voor dit onderzoek uitgevoerde proefresultaten representatief zijn voor nog aan te leggen constructies, kan de elasticiteitsmodulus van de nieuwe constructie veilig worden geschat op basis van de huidige proefresultaten. Complicatie hierbij is dat een hogere stijfheid leidt tot hogere spanningen in de constructie volgens formule (1) maar dat een hogere stijfheid tegelijkertijd een hogere sterkte representeert.

Voor een veilig ontwerp kunnen karakteristieke onder- of bovengrenzen van de relevante parameters worden gehanteerd. Op basis van het uitgevoerde onderzoek zijn de volgende ontwerpparameters bepaald:

Breuksterkte: 0,24 MPa

Elasticiteitsmodulus: 10.000 MPa

Voor de beddingsconstante van de ondergrond kunnen, analoog aan de ontwerpmethode voor asfaltbekledingen, de volgende waarden worden gehanteerd:

- Ondergrond van zand: 100 MPa/m
- Ondergrond van klei: 30 MPa/m

Rekenvoorbeeld

Door de lage breuksterkte is met de hier gepresenteerde ontwerpmethode slechts een geringe golfaanval toelaatbaar. Bij een laagdikte van 0,5 m en een taludhelling van 1:3 is bij een

ondergrond van klei een significante golfhoogte van 0,6 m acceptabel om scheurvorming in het materiaal te voorkomen. Bij een ondergrond van zand is een significante golfhoogte van 0,75 m acceptabel.

Gezien de grote spreiding in de onderzochte parameters en de onzekerheid over de bereiken sterkte en stijfheid bij volgende werken met andere grond ter plaatse, verdient het aanbeveling om als controle op een volgend werk valgewicht-deflectiemetingen (VGD), radarmetingen (GPR) en SCB-proeven voor de oplevering uit te voeren. Met VGD en GPR worden de stijfheid en de laagdikte en hun variatie bepaald. Met SCB-proeven kan op eenvoudige wijze de breuksterkte worden bepaald. Met deze gegevens kan het ontwerp worden gecontroleerd en kan de ontwerpmethodede mogelijk worden aangescherpt.

9.3 Andere ontwerpoverwegingen

GeoCrete vormt een dichte plaat waaronder in principe wateroverdrukken kunnen optreden. Als GeoCrete hoger op de dijklichaam wordt toegepast (boven de maatgevende grondwaterstand op circa 2,5 tot 3,0 m + N.A.P.) is dit mechanisme niet relevant en hoeft hier niet op te worden gedimensioneerd.

Het is goed denkbaar dat de maatgevende belasting in bepaalde gevallen wordt veroorzaakt door zwaar onderhoudsmaterieel en niet door een extreme golfklap. Daarom verdient het aanbeveling om eveneens een ontwerpberekening uit te voeren voor cementbetonnen wegverhardingen.

Een conservatieve aanname in de hier gepresenteerde ontwerpmethodede is dat wordt gerekend met een lage karakteristieke breuksterkte en een hoge karakteristieke elasticiteitsmodulus (omdat een hoge elasticiteitsmodulus hoge spanningen in de constructie oplevert). Er is echter een verband tussen de breuksterkte en de elasticiteitsmodus (zie figuur 8.5); bij een lage breuksterkte hoort een lage elasticiteitsmodulus.

Met de in dit hoofdstuk gegeven ontwerpmethodede wordt bepaald of het materiaal zal scheuren ten gevolge van een gegeven belasting. Een scheur in de bekleding leidt echter nog niet tot falen van de bekleding, zeker niet indien het materiaal niet op het talud maar op een horizontaal vlak wordt toegepast. Deze reststerkte in het materiaal is op dit moment nog niet te kwantificeren.

Als GeoCrete op een berm wordt aangelegd is het denkbaar dat een bepaald percentage scheuren wordt geaccepteerd. Een gescheurde bekleding is dan wel bezwaken, erosie van het onderliggende dijklichaam zal nog niet optreden. Hiervoor moet de scheurwijdte zodanig toenemen dat de grond hierdoor kan uittreden. Daarnaast is er een hoge freatische lijn nodig voor transport van de grond door de scheur. De freatische lijn zal naar verwachting niet tot het niveau van de buitenberm stijgen waardoor het aandrijvend mechanisme voor uitspoeling van de ondergrond ontbreekt. Als een bepaald percentage scheuren wordt geaccepteerd, kan met een hogere ontwerpwaarde voor de breuksterkte worden gerekend.

Op dit moment voert KOAC-NPC in opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde een studie uit naar de definitie van de extreme golfklap voor ontwerp en toetsing op breuksterkte.

Aanbevolen wordt de resultaten van dit onderzoek af te wachten voordat de definitieve ontwerpmethode wordt vastgesteld. De resultaten van dit onderzoek worden in het laatste kwartaal van 2007 bekend. De in dit rapport gepresenteerde ontwerpmethode is in ieder geval een conservatieve benadering.

10 Conclusies en aanbevelingen

Conclusie onderzoek ontwerpparameters

Uit het onderzoek blijkt dat het materiaal GeoCrete zich gedraagt als een cementgebonden materiaal. De stijfheid van het materiaal is temperatuur en frequentie onafhankelijk. Verder blijkt dat GeoCrete bezwijkt ten gevolge van een eenmalige (maximale) belasting en eigenlijk ongevoelig is voor vermoeiing (herhaalde belastingen met een opgelegde spanning op 70% van de maximale breuksterkte).

Conclusies materiaaleigenschappen

Geocrete onderscheidt zich van vergelijkbare cementgebonden materialen zoals zandcement door de hoge rek bij breuk hetgeen een maat is voor de taaiheid van het materiaal. Op basis van deze eigenschap is het de verwachting dat het materiaal een aanzienlijk betere weerstand tegen scheurvorming, bijvoorbeeld ten gevolge van krimp bij koude, heeft dan traditionele cementgebonden materialen.

Daarnaast is geconstateerd dat het GeoCrete op de onderzochte locatie te Kats een redelijk grote spreiding vertoont qua laagdikte en dichtheid. Deze spreiding wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de “mix in place” aanleg. Hierdoor is de aan te brengen laagdikte en homogeniteit van je materiaal moeilijker in de hand te houden dan bijvoorbeeld bij een “mix in plant” uitvoering. De spreiding in laagdikte is ongunstig gezien het feit dat bij bezwijken van het materiaal de optredende spanning sterk afhankelijk zal zijn van de lokale laagdikte. Daarnaast leidt de spreiding in dichtheid tot een grote spreiding in breuksterkte en stijfheid van het materiaal waarbij een lage dichtheid samenvalt met een lage breuksterkte en stijfheid. Aangezien grote spreidingen in materiaaleigenschappen leiden tot lage karakteristieke waarden voor de materiaaleigenschappen zal dit leiden tot een grote benodigde laagdikte. Door de spreiding in de materiaaleigenschappen terug te brengen kan de benodigde laagdikte bij dezelfde uitgangspunten qua golfbelasting, taludhelling en golfhoogte (sterk) gereduceerd worden.

Aandachtspunt ten aanzien van scheuren

Naast het bepalen van de ontwerpparameters zijn de kernen visueel geïnspecteerd. Bij deze visuele inspectie is bij 1 kern een scheur geconstateerd onderin de bekleding. Het is onduidelijk of deze scheur is ontstaan door het boren van de kernen of reeds in de GeoCrete aanwezig waren. Indien na aanleg van de constructie reeds scheuren onderin de bekleding aanwezig zijn wordt verwacht dat de verharding gevoeliger zal zijn voor doorscheuren. Een cementgebonden materiaal zal namelijk brosse breuk vertonen wat inhoudt dat na introductie van de scheur er weinig energie (kracht/spanning) meer nodig is om de rest van het materiaal door te laten scheuren.

Aanbeveling ten aanzien van de ontwerpmethod

Op dit moment voert KOAC-NPC in opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde een studie uit naar de definitie van de extreme golfklap voor ontwerp en toetsing op breuksterkte. Aanbevolen wordt de resultaten van dit onderzoek af te wachten voordat de definitieve ontwerpmethod wordt vastgesteld.

Bijlage 1

Foto's van de kernen



Alle kernen 1.jpg



Alle kernen 2.jpg



Kern 1.jpg



Kern 2.jpg



Kern 3.jpg



Kern 4.jpg



Kern 5.jpg



Kern 6.jpg



Kern 6-2.jpg



Kern 6-3.jpg



Kern 7.jpg



Kern 8.jpg



Kern 8-1.jpg

Bijlage 2

Gegevens kerninspectie en laagdikte bepaling

kern nr.	Dikte H1 [mm]	Dikte H2 [mm]	Dikte H3 [mm]	Dikte H4 [mm]	Dikte H5 [mm]	Dikte H6 [mm]	Dikte H7 [mm]	Dikte H8 [mm]	Gem. H [mm cum]	Laagdikte [mm]	Opmerking
1	375	377	373	367	364	360	370	374	370		
2	370	354	358	341	350	370	378	365	361		
3	240	242	238	234	228	230	230	235	235		opp beh.
4	215	208	205	215	210	220	224	218	214		opp beh.
5	233	232	227	230	225	222	220	220	226		opp beh.
6	15	17	18	0	0	0	14	15	10	10	laagscheiding te zien
6	375	370	345	285	275	300	335	365	331	321	
7	75	71	80	70	55	50	50	60	64	64	"grof "
7	325	320	305	290	297	310	315	330	312	248	
8	295	295	285	285	295	277	275	293	288		verticale scheur (110 mm)

opp beh. staat voor oppervlakte behandeling

Gemiddelde laagdikte 292 mm
Standaard deviatie van de laagdikte 61 mm

Bijlage 3

Gegevens bepaling dichtheid proefstuk

Balkcode											Dichtheid water		998 [kg/m ³]					
	Hoogte 1 t/m 4				Breedte 1 t/m 4				Lengte 1 t/m 2		Dr.mas.	On. wat.	Bv. wat.	Breedte	Hoogte	Lengte	Dichth.	
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	gr	gr	gr	mm	mm	mm	kg/m ³	
B1-A1	49,9	50,1	50,0	49,8	50,2	50,0	49,9	49,8	221	221	972,5	526,4	1071,2	50,0	49,9	221,27	1781	
B1-A2	49,6	49,5	49,6	49,5	50,1	50,1	50,0	49,9	221	221	962,6	519,7	1060,9	50,0	49,6	221,4	1775	
B2-A1	49,4	49,7	50,3	50,8	50,1	50,1	50,0	49,8	221	221	989,9	538,8	1087,2	50,0	50,1	221,27	1801	
B2-A2	50,7	50,5	50,0	49,6	50,1	50,1	50,0	49,9	221	222	980,6	537,2	1086,9	50,0	50,2	221,47	1780	
B3-B1	51,0	50,7	50,7	50,4	50,0	50,0	50,0	49,9	221	221	1015,2	548,0	1103,2	50,0	50,7	221,18	1825	
B3-B2	50,0	50,3	50,8	50,9	50,1	50,0	50,0	49,9	221	221	1003,9	549,7	1104,3	50,0	50,5	221,255	1807	
B4-B1	49,1	50,0	50,3	50,7	50,1	50,0	50,0	49,9	221	221	1001,8	541,7	1090,7	50,0	50,0	221,315	1821	
B4-B2	50,8	50,3	50,0	49,1	50,1	50,0	49,9	49,9	221	221	997,5	545,2	1095,1	50,0	50,0	221,21	1810	
B5-A1	48,9	49,3	50,0	50,9	50,1	50,0	50,0	50,0	221	221	893,4	480,4	1022,3	50,0	49,8	221,16	1645	
B5-A2	50,9	50,1	49,4	49,1	50,0	49,9	49,9	49,9	221	221	899,9	489,6	1034,5	49,9	49,9	221,07	1648	
B6-A1	49,6	49,9	50,3	50,2	50,2	50,1	50,2	49,9	221	221	1033,7	566,6	1106,0	50,1	50,0	221,38	1913	
B6-A2	50,1	50,1	49,8	49,6	50,1	50,1	49,8	49,6	221	221	1029,1	567,4	1108,1	49,9	49,9	221,285	1899	
B7-A1	49,9	50,0	50,1	50,0	50,2	50,1	49,9	49,8	221	222	1108,7	604,5	1151,3	50,0	50,0	221,45	2024	
B7-A2	50,5	50,5	50,4	50,2	50,2	50,1	50,0	49,8	221	221	1111,7	612,4	1164,0	50,0	50,4	221,32	2011	
B8-A1	50,2	50,6	49,7	50,0	50,2	50,2	50,1	49,9	221	221	1076,2	594,2	1139,7	50,1	50,1	221,27	1969	
B8-A2	50,2	50,0	50,9	50,6	50,2	50,2	50,1	49,9	221	221	1110,0	621,1	1173,2	50,1	50,4	221,315	2006	

Gemiddelde dichtheid proefstuk 1845 kg/m³
 Standaard deviatie van dichtheid proefstuk 117 kg/m³

Bijlage 4

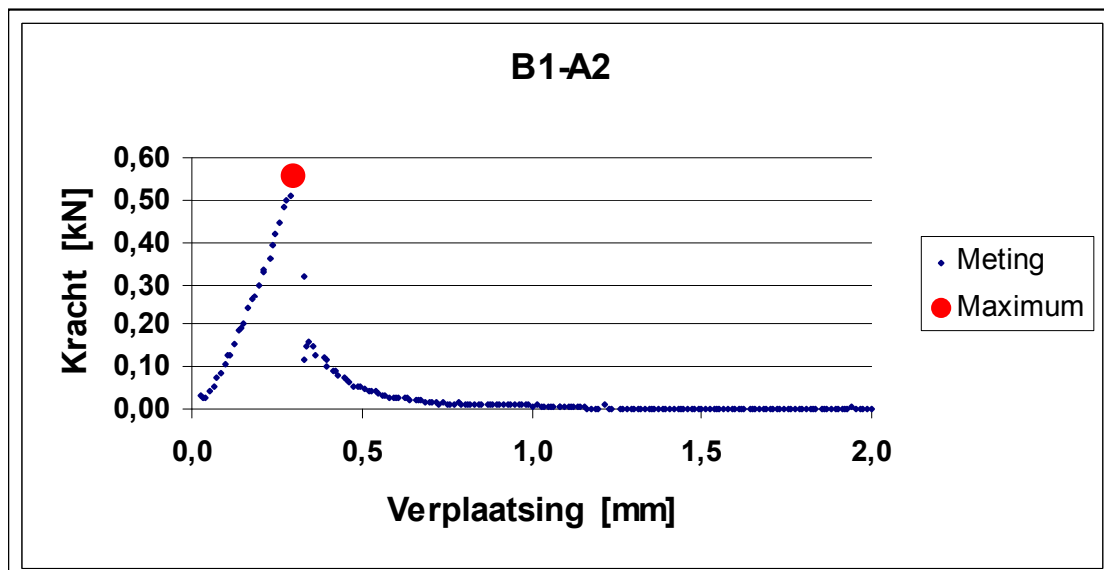
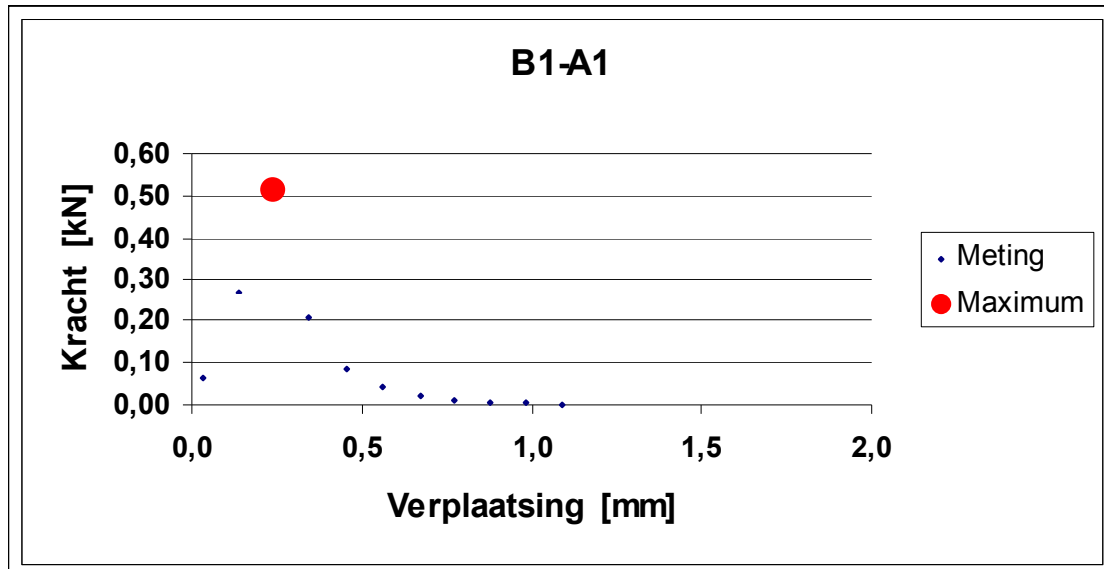
Resultaten breuksterkte

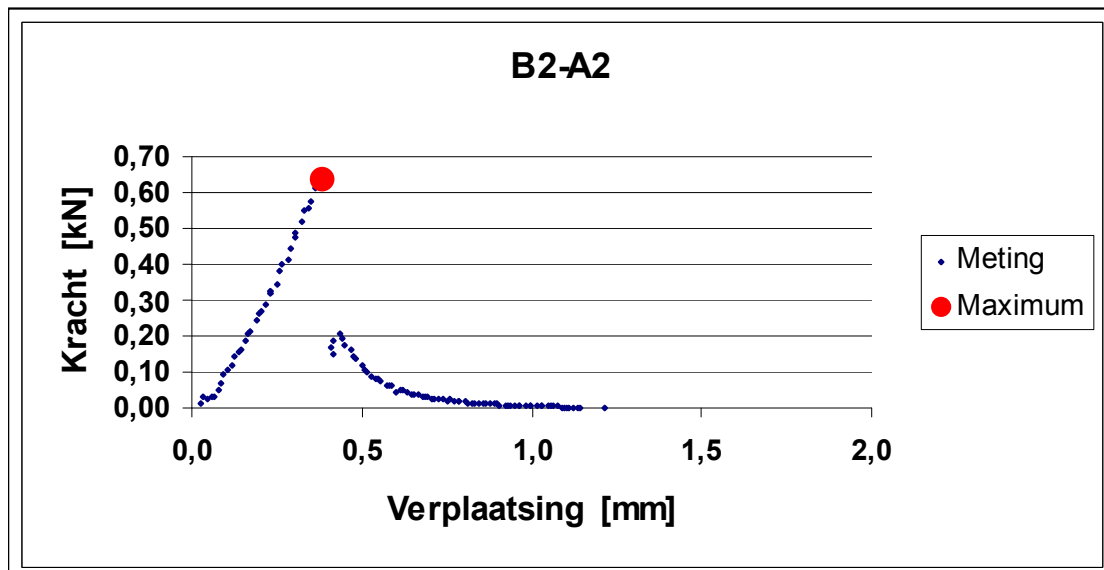
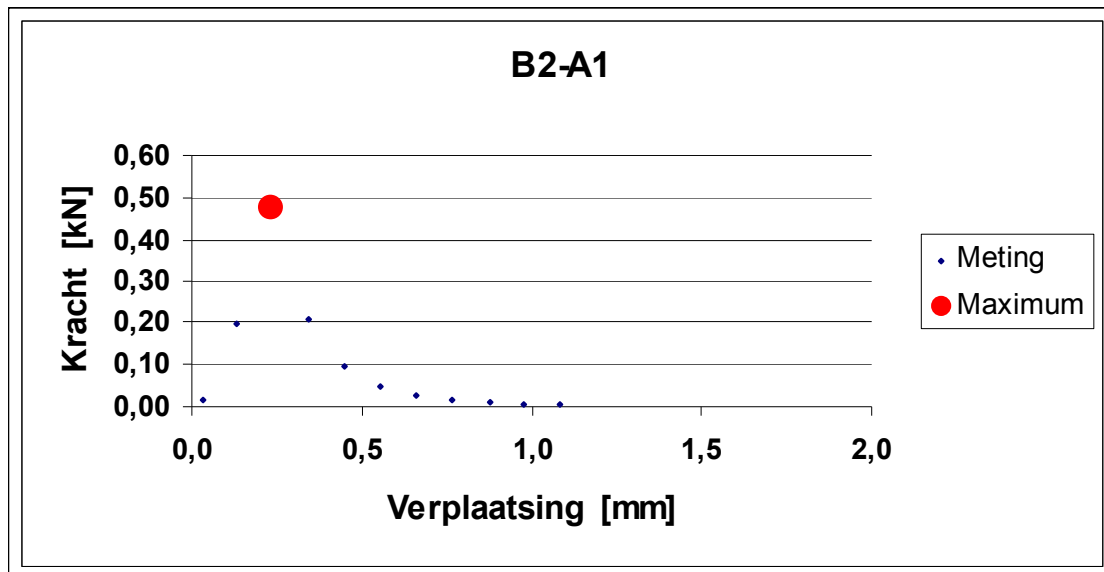
Proefstuk	Temp. [°C]	Hoogte [mm]	Breedte [mm]	Lengte [mm]	Massa [g]	Dichtheid (gemeten) [kg/m ³]	Dichtheid (gewogen) [kg/m ³]	Breuk- sterkte [kN]	Breuk- sterkte [MPa]	Rek bij breuk [mu/m]
B1-A1	5	49,9	50	221,3	972,5	1760	1781	0,51	1,24	756
B1-A2	5	49,6	50	221,4	962,6	1754	1775	0,56	1,36	1019
B2-A1	5	50,1	50	221,3	989,9	1787	1801	0,48	1,15	748
B2-A2	5	50,2	50	221,5	980,6	1765	1780	0,64	1,53	1325
B3-B1	5	50,7	50	221,2	1015,2	1813	1825	0,35	0,82	852
B3-B2	5	50,5	50	221,3	1003,9	1799	1807	0,72	1,70	1246
B4-B1	5	50,0	50	221,3	1001,8	1810	1821	0,15	0,36	773
B4-B2	5	50,0	50	221,2	997,5	1803	1810	0,31	0,74	945
B5-A1	5	49,8	50	221,2	893,4	1623	1645	0,10	0,24	784
B6-A1	5	50,0	50,1	221,4	1033,7	1864	1913	0,65	1,56	908
B6-A2	5	49,9	49,9	221,4	1029,1	1868	1899	0,78	1,89	887
B7-A1	5	50,0	50	221,5	1108,7	2004	2024	1,39	3,34	1290
B7-A2	5	50,4	50	221,3	1111,7	1993	2011	1,41	3,32	1138
B8-A1	5	50,1	50,1	221,3	1076,2	1936	1969	0,41	0,98	703
B8-A2	5	50,4	50,1	221,3	1110,0	1984	2006	0,79	1,87	1002

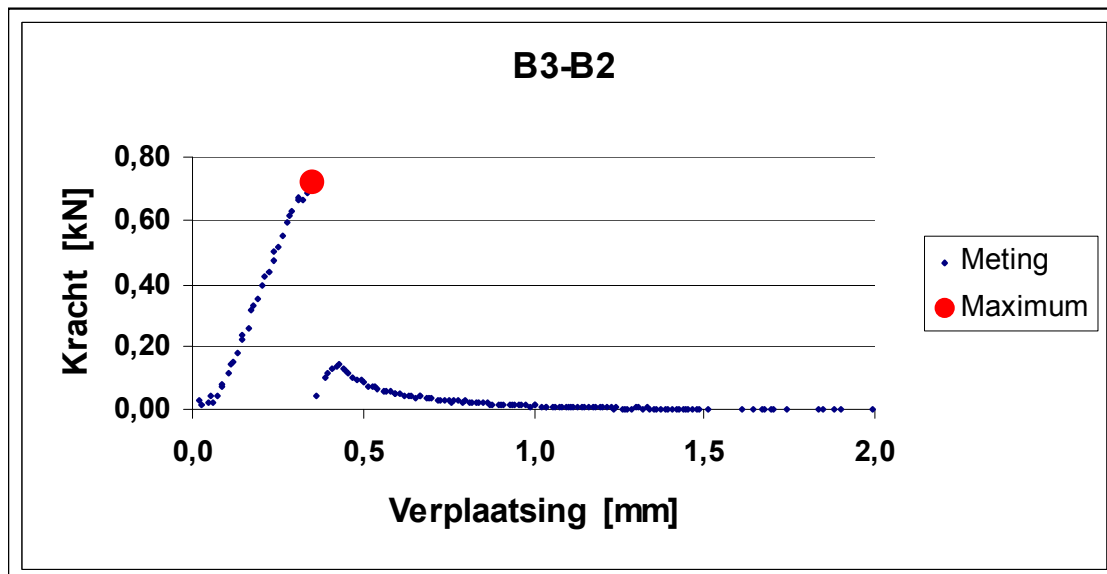
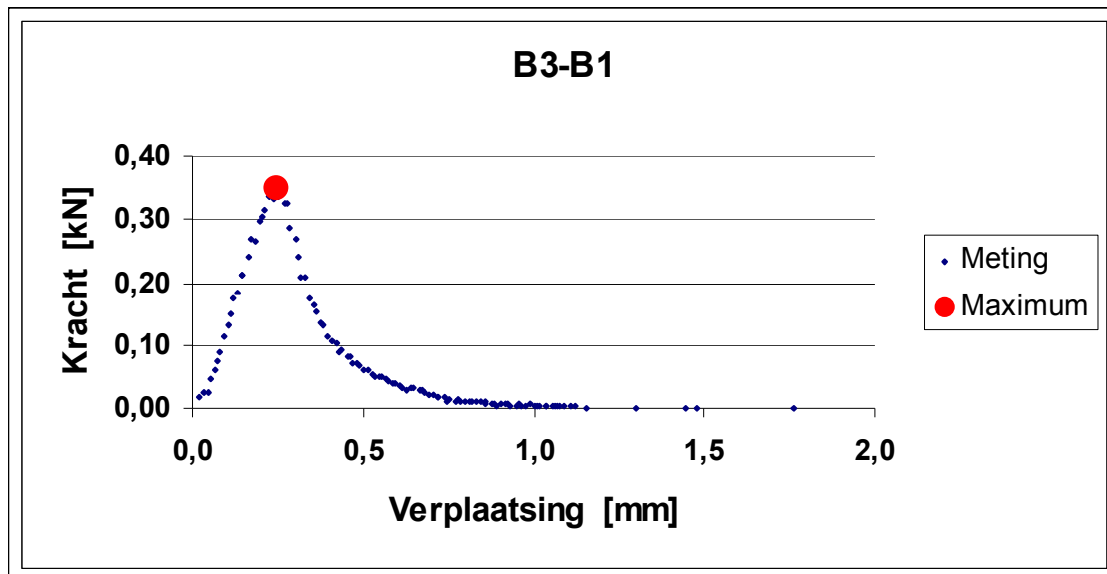
B5-A2: bezweken tijdens inbouwen tbv E-dyn

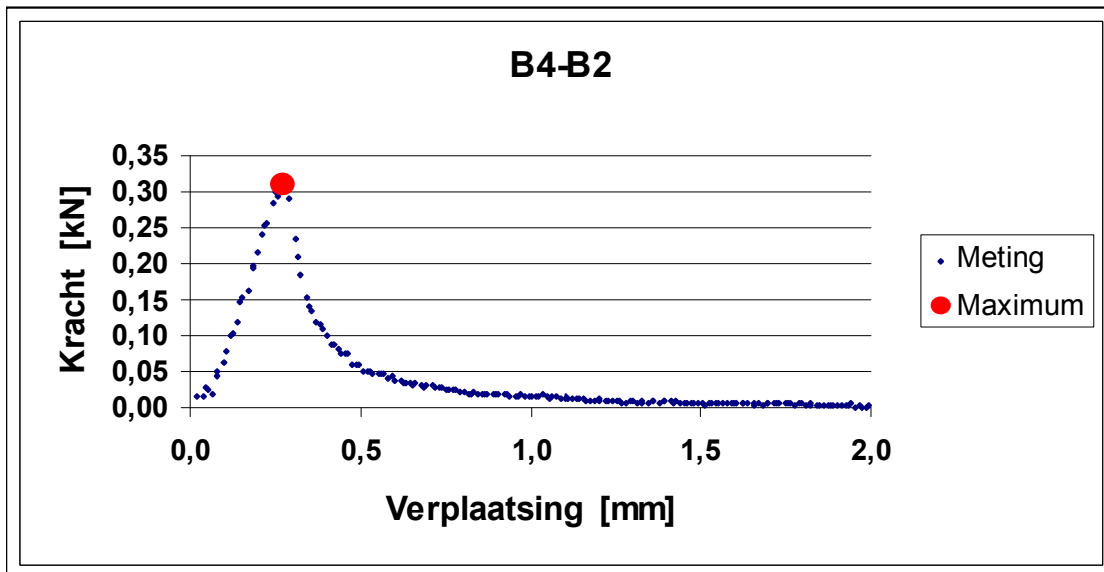
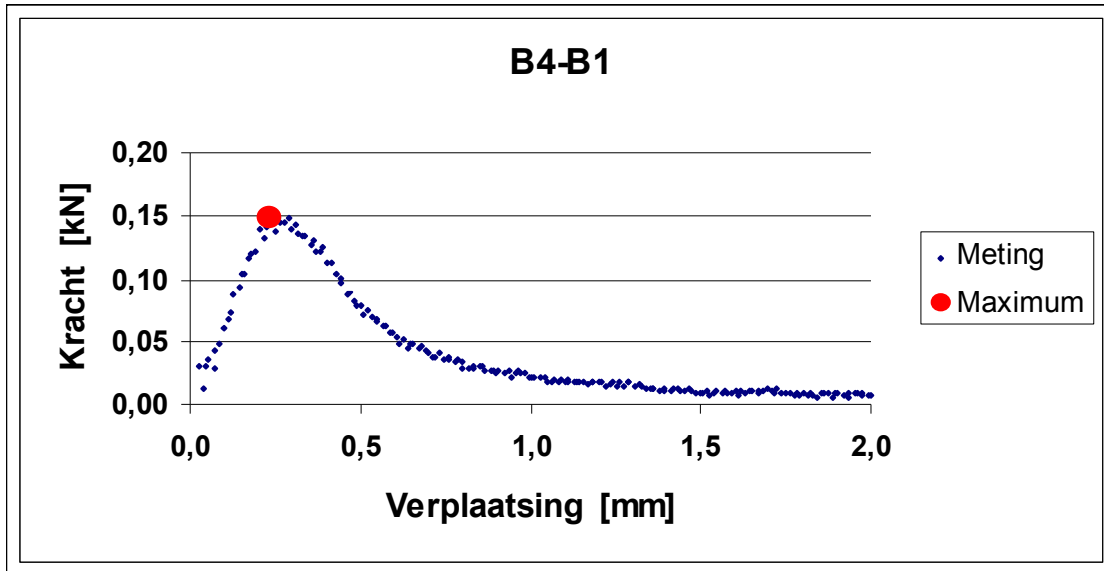
Bijlage 5

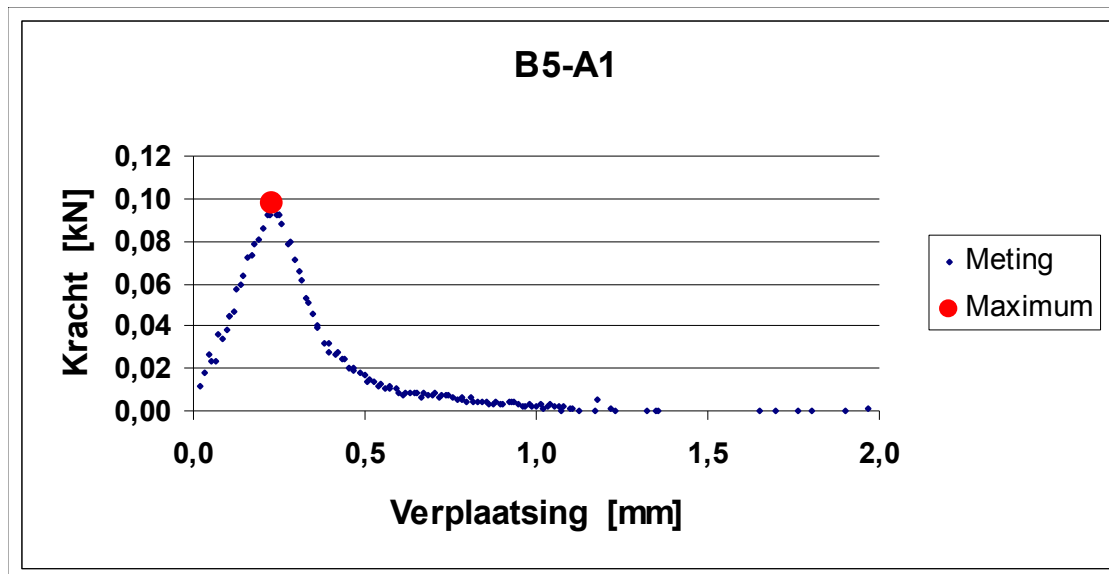
Kracht-verplaatsingsgrafieken (breuksterkte)

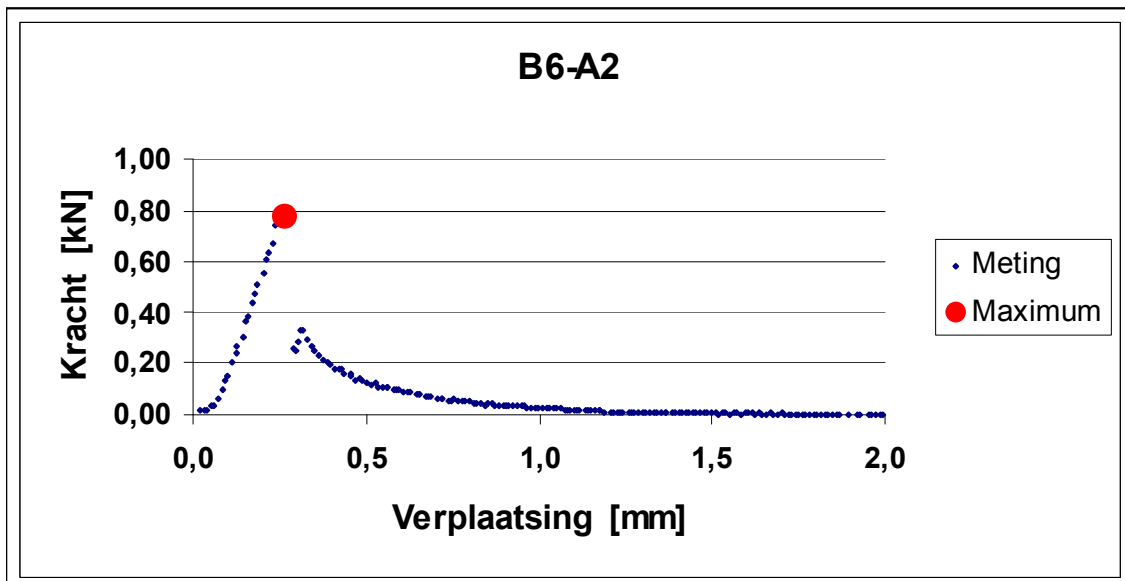
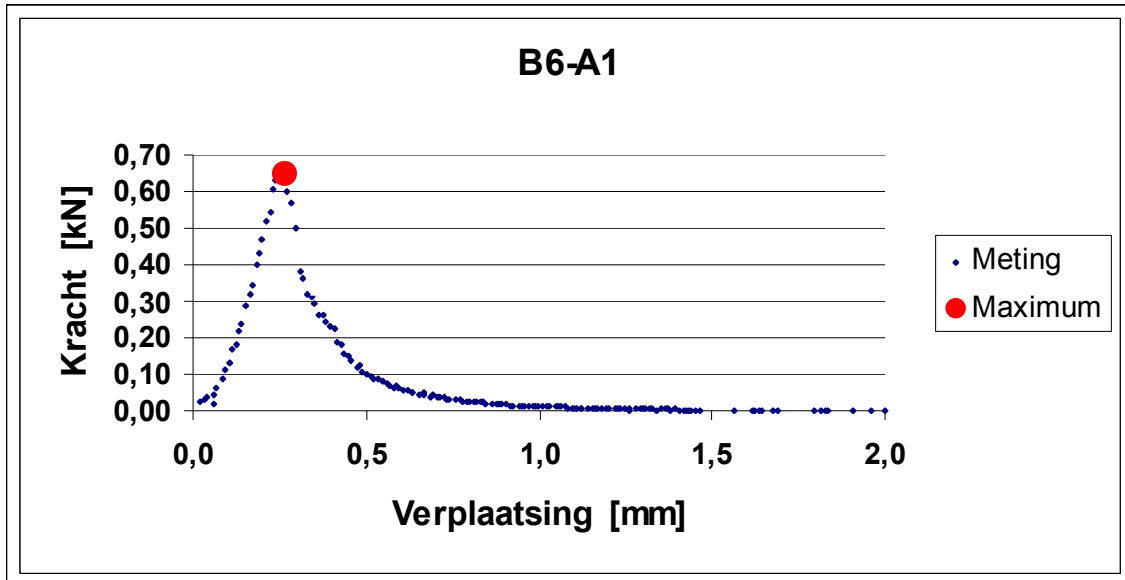


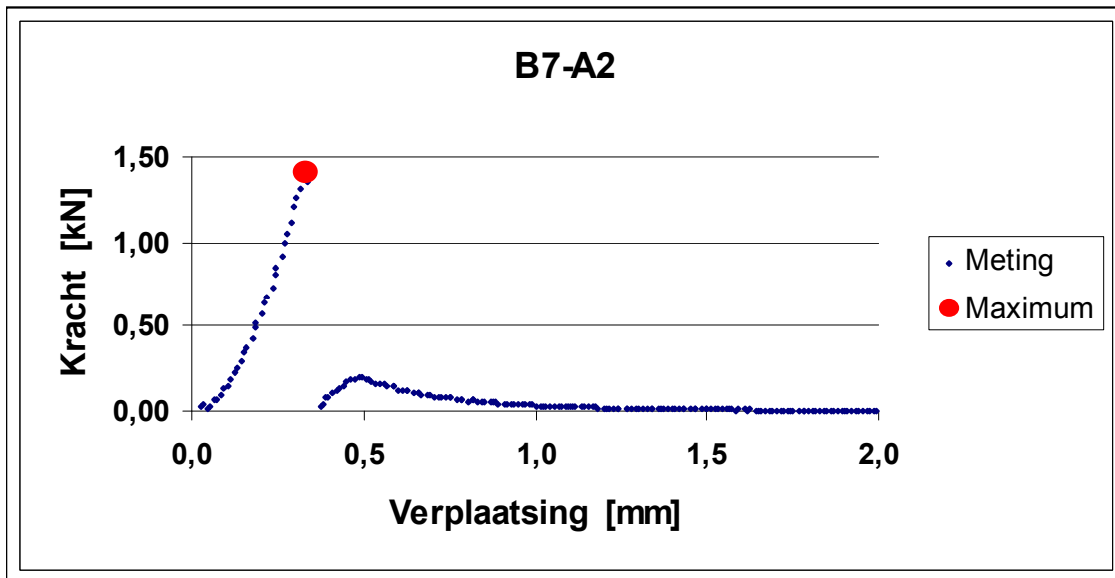
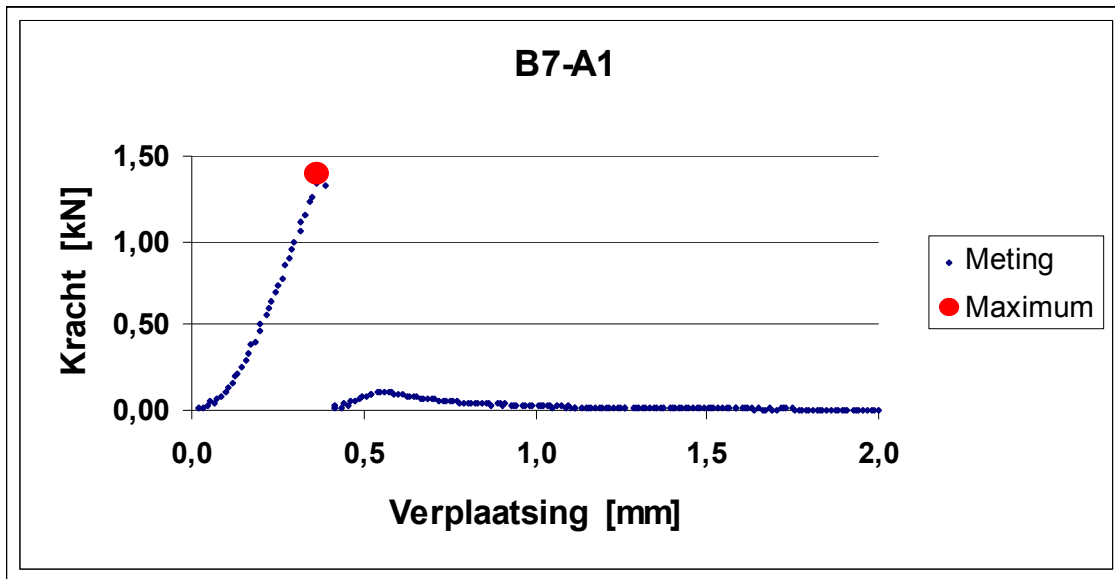


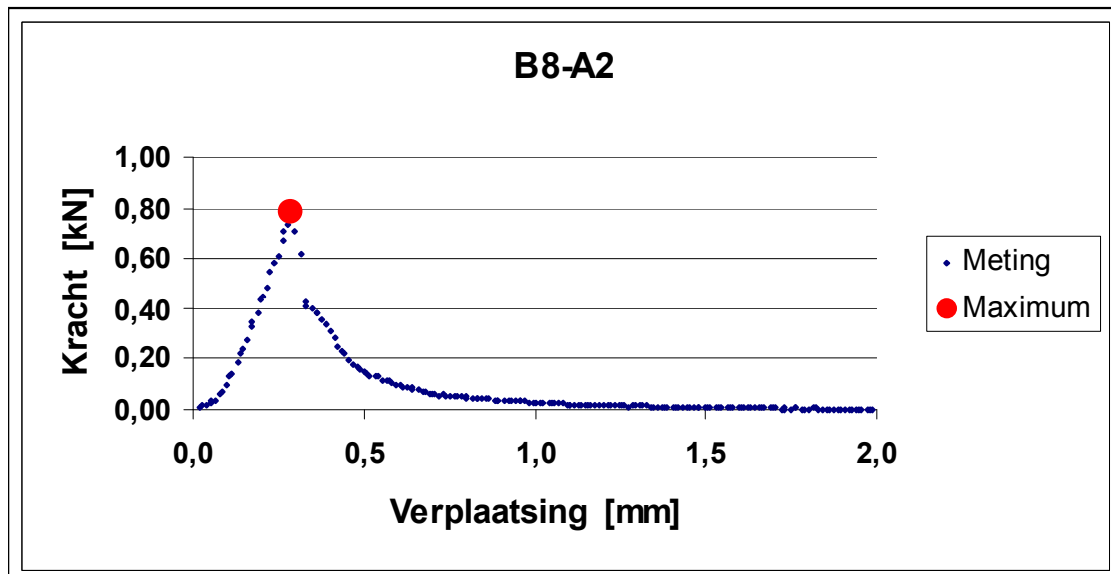
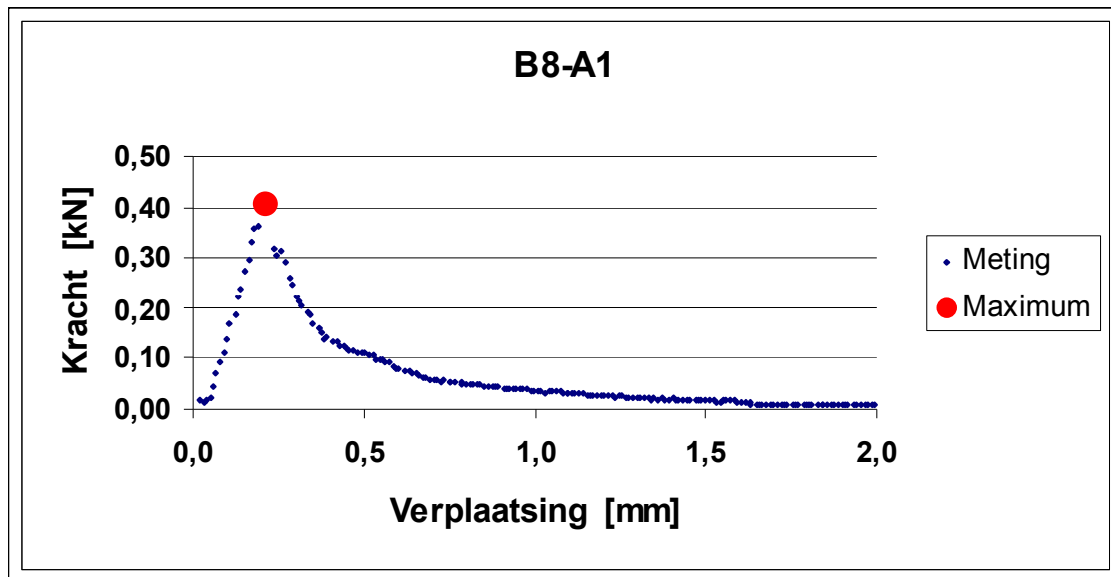












Bijlage 6

Resultaten dynamische elasticiteitsmodulus

Proefstuk	Temp. [°C]	Frequentie [Hz]	Rek [μm/m]	Stijfheid [Mpa]	Gem. Stijfheid [Mpa]	Fase-hoek [°]
B1-A2	5	10	53	3843	3852	1,6
B1-A2h	5	10	56	3860		1,5
B2-A2	5	10	46	4263	4263	2,5
B3-B2	5	10	42	5267	5267	4,4
B4-B2	5	10	31	2216	2151	6,5
B4-B2h	5	10	63	2085		6,5
B6-A2	5	10	30	7143	7013	4,4
B6-A2h	5	10	41	6882		3,4
B7-A2	5	10	29	10402	10149	4,7
B7-A2h	5	10	42	9895		4,4
B8-A2h	5	10	34	5723	5651	4,1
B8-A2h2	5	10	43	5578		3,5

B5-A2: bezwaken tijdens inbouwen tbv E-dyn

Toevoeging h wil zeggen dat de proef opnieuw is uitgevoerd, eventueel met een hogere rek