



InfraQuest

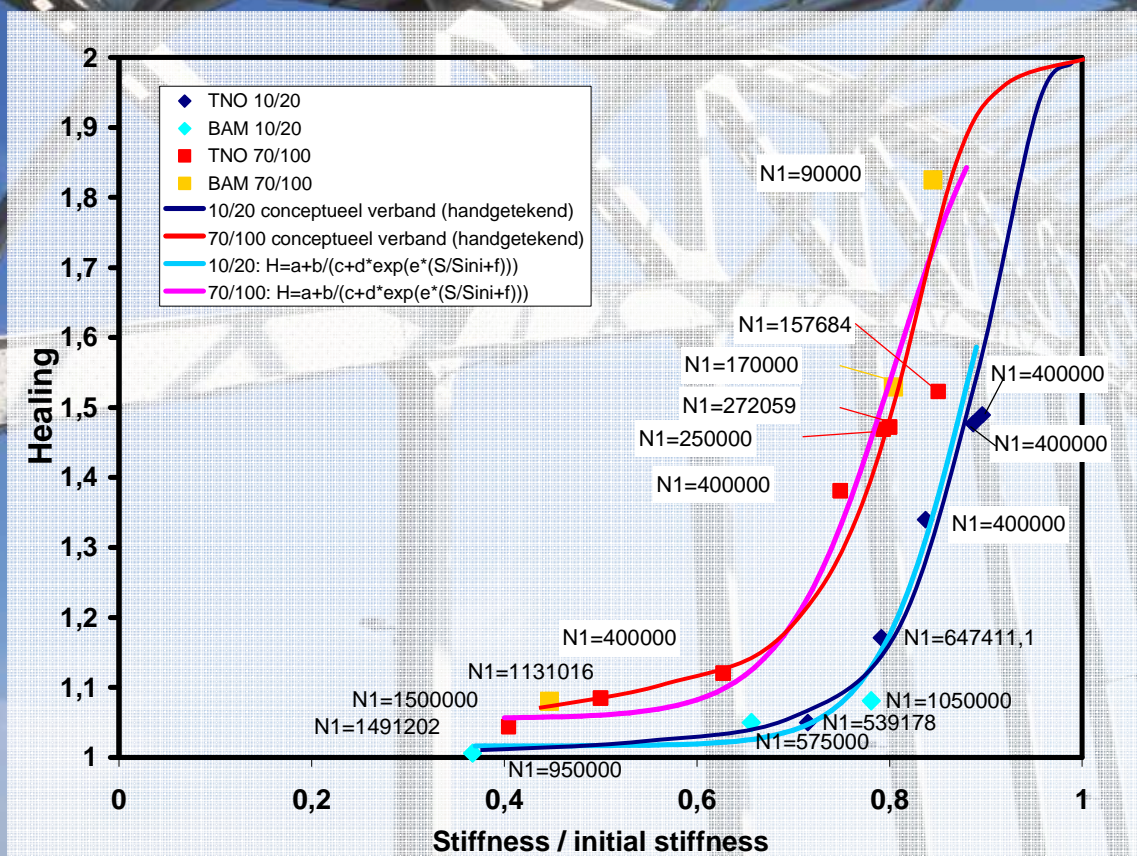
COMPETENCE CENTRE FOR ROADS & STRUCTURES

Healing van Asfaltmengsels

-onderzoek naar een pragmatische proefmethode-

Wegen

InfraQuest-2010-...



Colofon

Uitgegeven door	InfraQuest Competence centre for roads and structures Postbus 49, 2600 AA Delft
Informatie	Martien op 't Hof, programmamanager
Telefoon	0031653845011
Auteurs	S.M.J.G. Erkens..... A.C. van Dommelen..... D. van Vliet G.A. Leegwater.....
Datum	Februari 2014
Status	definitief
Versie	4.0

Copyright © 2014

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd, in geautomatiseerde bestanden opgeslagen en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm, geluidsband of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van InfraQuest – Competence Centre for Roads & Structures. In overeenstemming met artikel 15a van het Nederlandse auteursrecht is het toegestaan delen van deze publicatie te citeren, daarbij gebruik makend van een duidelijke referentie naar deze publicatie.

Aansprakelijkheid

Hoewel uiterste zorg is besteed aan de inhoud van deze publicatie aanvaarden InfraQuest – Competence Centre for Roads & Structures, de partijen die deel uitmaken van deze samenwerking, noch de auteurs van deze publicatie enige aansprakelijkheid voor onvolledigheid, onjuistheid of de gevolgen daarvan. Gebruik van de inhoud van deze publicatie is voor de verantwoordelijkheid van de gebruiker.

InfraQuest is een samenwerkingsverband van

Inhoud

INHOUD	3
SAMENVATTING	5
1 INLEIDING	6
1.1 WAAROM ONDERZOEK NAAR HEALING?	6
1.2 HEALINGS HISTORIE	7
1.2.1 <i>Healing in onderzoek</i>	7
1.2.2 <i>Healing in de praktijk</i>	10
1.3 PROJECTORGANISATIE	12
1.4 LEESWIJZER	12
2 DOEL VAN HET ONDERZOEK	14
2.1 WAT IS HET PROBLEEM?	14
2.2 ONDERZOEKSDOEL EN HYPOTHESE	14
3 ONDERZOEKSOPZET EN BEPALING HEALINGSFACTOR	15
3.1 ONDERZOEKSOPZET	15
3.1.1 <i>Fase 1: ontwikkel het protocol op extreme mengsels</i>	15
3.1.2 <i>Fase 2: toets vertrouwen protocol op gebruikelijke mengsels</i>	20
3.2 MENGSELS FASE 1	20
3.2.1 <i>Probleem met de gebruikte bitumen</i>	22
3.2.2 <i>Continue proeven</i>	23
3.3 PROEVEN 70/100 MENGSEL	23
3.4 CONTINUE PROEVEN 10/20 MENGSEL	26
3.5 BEPALING ϵ_6	31
4 OORSPRONKELIJKE BENADERING DISCONTINUE PROEVEN	36
4.1 OORSPRONKELIJKE PROEFCONDITIES DISCONTINUE PROEVEN	36
4.2 OORSPRONKELIJKE BEPALING HEALING: MET MODELLEN	36
4.3 DISCONTINUE PROEVEN EN HET TOEPASSEN VAN DE MODELLEN	37
4.3.1 <i>Het PH model</i>	37
4.3.2 <i>Het eenvoudige model</i>	39
4.4 DISCONTINUE PROEVEN EN DE MODELBEANADERING VOOR HET 10/20 MENGSEL	41
4.4.1 <i>P1_B5_1020</i>	41
4.4.2 <i>P3_B19_1020</i>	43
4.4.3 <i>P1_B6_1020</i>	44
4.4.4 <i>P1_B1_1020, 115um, onbedoeld continue proef</i>	46
4.5 DISCONTINUE PROEVEN EN DE MODELBEANADERING VOOR HET 70/100 MENGSEL	48
4.5.1 <i>P2_B11_70100 102um</i>	48
4.5.2 <i>P4_B27_70100 102um</i>	50
4.5.3 <i>Aanpassing proefcondities</i>	51

4.5.4	<i>P1_B6_70100 bij 102με en verkorte proefduur</i>	52
4.6	CONCLUSIES EN AANPASSING AANPAK OP GROND VAN DE EERSTE RESULTATEN	55
5	KOERSWIJZIGING NAAR EEN MEER PRAGMATISCHE BENADERING	57
5.1	OPZET VAN EEN MEER PRAGMATISCHE BENADERING	57
5.2	RESULTATEN PRAGMATISCHE BENADERING	59
5.3	ALTERNATIEVE BESCHOUWING VAN DE DATA	64
6	CONCLUSIES	74
6.1	CONCLUSIES	74
6.2	AANBEVELINGEN	75
7	LITERATUUR	77
	BIJLAGE A. PRESENTATIES TECHNOLOGEN DAGEN 2007	79
1.01	PRESENTATIE WIM VAN DEN BERGH	79
1.02	BIJDRAGE ARTHUR VAN DOMMELEN	94
	BIJLAGE B. HET PH-MODEL	108
2.01	THEORY OF THE PH MODEL	108
2.02	REST PERIOD	112
2.03	SECOND LOAD PERIOD	113
2.04	CALCULATION OF THE REVERSIBLE & IRREVERSIBLE DAMAGES DURING A REST PERIOD	113
2.05	APPLICATION OF THE PH MODEL IN 4PB FATIGUE TESTS WITH REST PERIODS	114
	BIJLAGE C. HET EENVOUDIGE MODEL IN DE (DIS)CONTINUE PROEVEN	115
	BIJLAGE D. OVERZICHT PROEFSTUKKEN	116
4.01	10/20 MENGSEL	116
4.02	70/100 MENGSEL	117
	BIJLAGE E. DELRON	118
	BIJLAGE F. BEPALING W_{DISS} EN RDEC UIT DE VERMOEIINGSPROEVEN	120
	BEPALING RDEC VOOR TWEE PROEFSTUKKEN	120
	10/20 MENGSELS	125
	70/100 MENGSELS	128

Samenvatting

Het zelfherstellend vermogen, of de healingscapaciteit, van asfaltmengsels wordt in de meeste ontwerpmethoden voor wegverhardingen meegenomen. De kennis over dit zelfherstellend vermogen is gebaseerd op ervaringen en onderzoeken uit het verleden en de werkelijke mechanismen erachter zijn niet bekend. Hierdoor is het moeilijk om voor nieuwe materialen een realistische healingscapaciteit te bepalen. Een te hoge waarde leidt tot onverwachte, dure, schade aan wegen en een te lage waarde benadeelt een nieuw product. Het is, zeker met de huidige druk op grondstoffen en de daarmee samenhangende snelle veranderingen in de gebruikte materialen van groot belang de healingscapaciteit objectief te kunnen bepalen.

Uit eerder onderzoek aan de TU Delft (Pronk et al, 2009) kwam naar voren dat de combinatie van de in Nederland gebruikelijk vierpuntsbuig vermoeiingsproeven met rustperioden en het partial healing model het mogelijk maakten om op een enkel proefstuk een indicatie van healing te bepalen. Dat de bepaling op een proefstuk gedaan kan worden is van belang omdat de verschillen tussen proefstukken van een mengsel in vermoeiingsonderzoek zodanig zijn dat dit de bepaling van een healingswaarde lastig maakt. In dit onderzoek wordt gekeken of de benadering met proeven en modellen voor twee volumetrisch gelijke mengsels met bitumen van verschillende hardheden (penetratie 10/20 en 70/100) de verwachte resultaten geeft. Die verwachtingen zijn gebaseerd op empirie: zachte bitumen geeft meer healing dan harde. Indien dit met deze benadering ook gevonden zou worden, kan de benadering ook op andere materialen worden toegepast. Naast het partial healing model werd ook een eenvoudiger model gebruikt om te bepalen of dit voordelen zou bieden in robuustheid.

De toepassing van de modellen bleek helaas niet te werken omdat deze te gevoelig waren voor de vorm van de proefsignalen om robuuste voorspellingen te geven. Er is daarom op een meer pragmatische manier naar de data gekeken, waarbij er nog steeds een healingswaarde per proefstuk werd verkregen. Zonder de modellen waren deze waarden noodgedwongen gekoppeld aan een andere stijfheidsafname dan de 50% stijfheidsreductie die als einde levensduur gebruikt wordt in de vermoeiingsproef en dat maakt de koppeling van de gemeten data aan een levensduurverlenging en daarmee het bepalen van een healingscapaciteit lastig.

Het verloop van de healingscapaciteit over de stijfheid voor beide onderzochte mengsels verschilde sterk, wat een goede basis leek voor een healingsindicator. Helaas was ook het verschil in stijfheidsverloop in de vermoeiingsproef heel verschillend en als beide effecten gecombineerd worden om een verloop van healing over de levensduur te vinden, valt het verschil vrijwel weg. Hierdoor werd er nauwelijks verschil gevonden tussen beide mengsels en blijkt deze benadering niet geschikt voor het bepalen van de healingscapaciteit van asfaltmengsels.

Doordat er bij proefstukproductie een fout is gemaakt, was het verschil tussen beide bitumina niet zo groot als bij de opzet werd beoogd. Voor de volledigheid zouden proeven met het beoogde 10/20 bitumen gedaan moeten worden. Aangezien de healing altijd groter dan 1 moet zijn en de voor het zachte mengsels gevonden waarden al weinig boven de 1 liggen, zullen deze proeven niet leiden tot nieuwe inzichten over de bruikbaarheid van de benadering.

In die uitwerking van de resultaten is gekeken naar het gebruik van de (verandering) in energie dissipatie gedurende de proef als een alternatief schade criterium voor de halvering van de stijfheid. Hieruit lijkt te komen dat het afwijken van de gedissipeerde energie van de quasi-lineaire ontwikkeling in fase II van de vermoeiingsproef een bruikbare indicator zou zijn. De ratio (RDEC) heeft geen meerwaarde voor de hier geanalyseerde materialen en test condities. Het gebruik van de afwijking van de de gedissipeerde energie van de steady state als indicator van de vermoeiingslevensduur kan achteraf makkelijk worden toegepast, mits de data doorloopt tot in fase III. Het implementeren in de proefsoftware heeft meer voeten in aarde, omdat gedurende de proef de indicator voor steady state verloop bepaald moet worden, waarbij het de vraag is hoe groot het interval voor de bepaling moet zijn en hoe groot de afwijking moet worden om te stellen dat fase III is begonnen.

1 Inleiding

1.1 Waarom onderzoek naar healing?

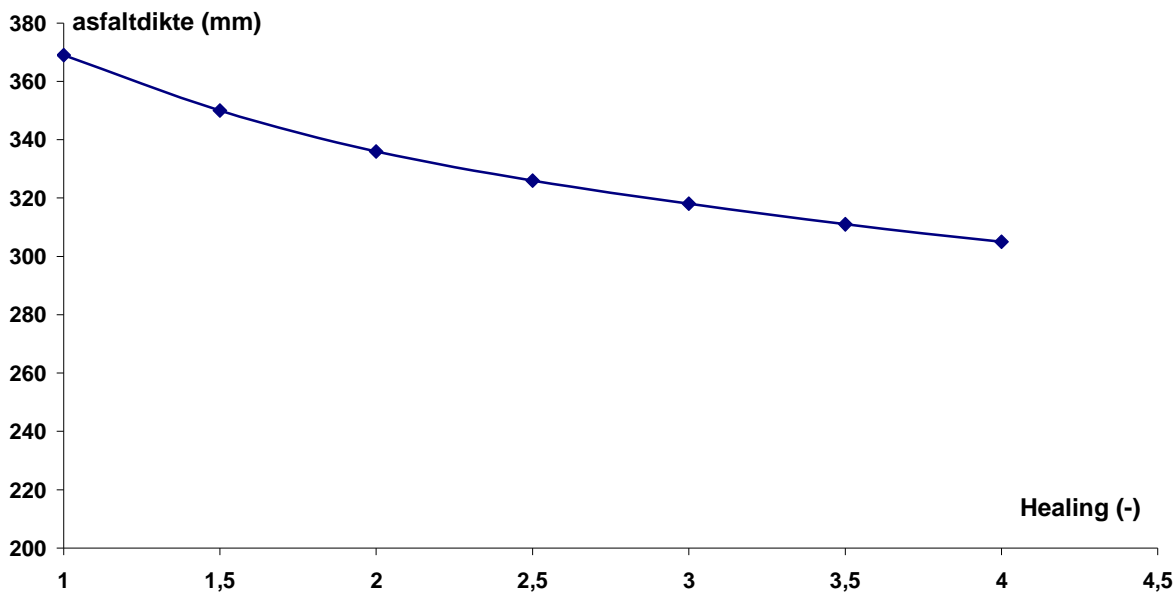
De belangstelling voor healing, het zelfherstellend vermogen van materialen, is de afgelopen jaren enorm toegenomen. Zo financiert het Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie via SenterNovem/Agentschap-NL een innovatiegericht Onderzoeksprogramma (IOP) bij de TU Delft op het gebied van Self Healing Materialen (home.tudelft.nl/.../self-healing-materialen/iop-programma/). Logisch, want als bouwmaterialen in navolging van bomen en botten zichzelf zouden herstellen scheelt dat enorm in de onderhoudskosten en, als ze dat herstellen slim en snel doen, ook in de hinder voor gebruikers. In veel constructiematerialen moeten speciale voorzieningen getroffen worden om de self healing mogelijk te maken, maar in de wegebouw heeft bitumen de eigenschap van nature. Dat is dus een zeer relevante eigenschap voor ontwerpers en wegbeheerders.

Helaas is het ook een eigenschap die zeer complex is en waar daardoor moeilijk de vinger achter te krijgen is. Globaal weten we dat mengsels met meer of zachtere bitumen beter healen. Toch wordt er in veel ontwerpmethoden wel mee gerekend (COST 333). In de Specificaties Ontwerp Asfaltverhardingen van Rijkswaterstaat (Rijkswaterstaat) wordt gesproken van een "praktijk-shiftfactor of healings-factor". Deze factor beschrijft het verschil tussen gedrag waargenomen in het laboratorium en dat in de praktijk en omvat meer aspecten dan enkel de healingscapaciteit. Wat er precies allemaal een rol speelt in die shift factor weten we niet, als dat bekend was hoefden ze immers niet allemaal in een shift-factor verwerkt te worden. Dat healing er deel van uitmaakt blijkt wel uit het feit dat de te gebruiken factor afhankelijk wordt gesteld van de bovengenoemde invloeden: bitumen gehalte en hardheid (Tabel 1.1).

		penetratie (0,1 mm)					
		10/20	15/25	20/30	30/45	40/60	50/70 en hoger
bitumen gehalte (%m/m)	4	1,1	1,3	1,5	2,4	3,8	4,0
	4,5	1,2	1,3	1,6	2,6		
	5	1,2	1,4	1,6	2,7		
	5,5	1,2	1,4	1,7	2,9		
	6	1,2	1,5	1,8	3,1		

Tabel 1.1: Healings- of shiftfactor uit de Ontwerp Specificaties Asfaltverhardingen

Bij verder gelijke omstandigheden en eigenschappen, geeft een mengsel met een hogere healings- of shiftfactor een dunnere constructie. Voor een standaard snelwegconstructie geeft dit een dikte reductie van ca. 6,5 cm. Uitgaande van een breedte van 11,80 m en 1,5 euro per centimeter dikte (ca 60 euro/ton) voor een vierkante meter asfalt, geeft dit een besparing van ruim 100.000 euro op een kilometer snelweg.



Figuur 1.1: Invloed healingsfactor op de dikte van het asfaltpakket

De belangen die gemoeid zijn met een juiste weergave van de healingscapaciteit zijn groot, als de healing wordt onderschat wordt er nodeloos dik geconstrueerd. Dat betekent dat producenten hun mengsels moeilijker kwijt kunnen, omdat de kosten hoger uitvallen en dat als een mengsel wordt toegepast, de constructie te duur uitvalt. Bij het overschatten van de healingscapaciteit ontstaan er in extreme gevallen kostbare schades in de garantieperiode en anders voldoet de constructie zeker niet aan de beoogde levensduur met als gevolg hogere kosten voor de wegbeheerder. Het is dus in het belang van alle betrokken partijen en, met het oog op verspilling van publieke middelen en beperkt voorradige grondstoffen, de maatschappij als geheel dat healing goed kan worden bepaald.

1.2 Healings historie

Gezien het grote belang van de healingscapaciteit van een asfaltmengsel in het wegontwerp, heeft het onderwerp altijd veel aandacht getrokken. Bij de Technologen dagen in 2007 zijn de achtergrond en historische ontwikkeling van healing in de wegenbouw toegelicht door Wim van den Bergh (Bergh, van der (2007) en BIJLAGE A) en Arthur van Dommelen (Dommelen, van (2007) en BIJLAGE A). Deze paragraaf maakt gebruik van die toelichtingen.

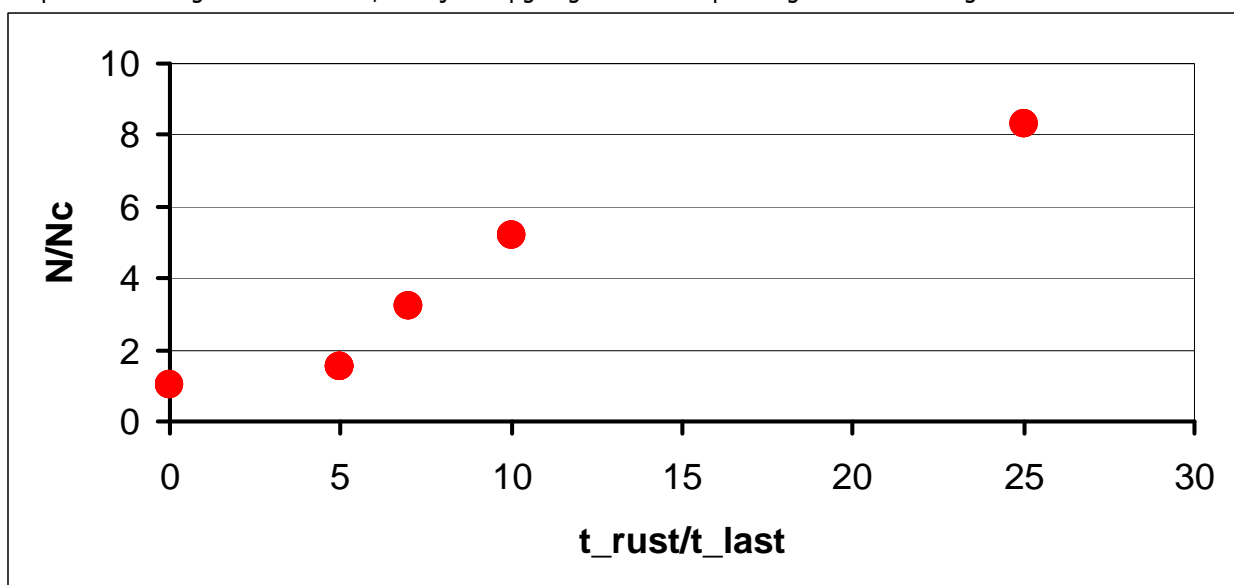
1.2.1 Healing in onderzoek

In onderzoek is grofweg op twee manieren naar healing gekeken, ten eerste het effect van rustperiodes op sterkte herstel in monotone proeven tot bezwijken en ten tweede de toename in het aantal lastherhalingen tot bezwijken na rustperiodes in cyclische proeven. De eerste publicatie waarin over healing in asfalt wordt gesproken (Bazin et al., 1967) combineert beide benaderingen. Krachtsherstel wordt uitgedrukt in de ratio van de treksterkte na rust en die van het originele proefstuk in een verplaatsingsgestuurde directe trekproef (belastingssnelheid 2mm/s). De rustperiodes varieerden van 3 tot ruim 300 dagen bij verschillende temperaturen. Bij 25°C was de sterkte na drie dagen tot 90% hersteld, na een maand was het herstel volledig. De cyclische proeven gebruikt in dit onderzoek zijn krachtsgestuurde tweepuntsbuigproeven op trapeziumvormige proefstukken. De opstelling werd automatisch gestopt als de verplaatsing van het vrije proefstukeinde een vooraf ingestelde waarde bereikte. Voor het healingsonderzoek werd deze beveiliging gebruikt om de proef te stoppen als de verplaatsing sterk begin toe te nemen. Op deze manier werd de proef net voor bezwijken gestopt. Na de rustperiode werd de proef doorgezet tot het proefstuk brak, de healing werd bepaald door het aantal lastherhalingen in deze proef te delen door het aantal in de oorspronkelijke proef. Dit zou logischerwijs healingswaarden van maximaal 1 (aantal lastherhalingen na rust /aantal lastherhalingen voor rust) geven, dat komt immers overeen met volledig herstel. In de tegenwoordig meer gebruikelijke uitdrukking voor healing: totaal aantal lastherhalingen voor en na rust/aantal lastherhalingen voor rust, zou dit een healingsfactor van twee geven. De in het onderzoek gevonden waarden liggen veel hoger, meestal boven de 10 en vaak hoger. Het kan zijn dat het afslag criterium erg conservatief was, maar wat hier waarschijnlijk door heen speelt is besterving van de monsters gedurende de rustperiodes, die in dit onderzoek oplopen tot bijna een jaar (ca 300

dagen). Dit zou er dan op wijzen dat veroudering meer effect heeft op de stijfheid dan op de sterkte. Dit is ook het onderzoek waaruit de aanwijzing komt dat een (lichte) druk op het proefstuk een positieve invloed heeft op healing. Proefstukken die ze op hun kant zetten zodat de microscheuren door het eigen gewicht van het proefstuk werden belast, vertoonden bij dezelfde rusttijd een sterker herstel. Het onderzoek van Bazin was vooral een vermoeiingsonderzoek, slechts een klein deel ging in op healing. Er zijn hierbij dan ook maar twee mengsels gebruikt, een zandasfalt en een dicht asfalt, beiden met 180/220 pen bitumen. Dit maakt het direct gebruiken van de gevonden getallen lastig, de waarde zit hem meer in de benadering.

Veel werk aan healing en vermoeiing van asfalt is gedaan door onderzoekers van Shell (Bonnaure et al, 1982) en met name door van Dijk (Dijk, van et al (1972), Dijk, W. (1975) en Dijk, van et al (1977)). De eerste twee publicaties van van Dijk kijken naar vermoeiingsgedrag. Doel hierbij is vooral de labbepaalde levensduren en schadepatronen koppelen aan die uit de wielspoorproef, over healing wordt hier niks gemeld. Wel wordt er hier aangegeven dat krachtsgestuurde vermoeiingsproeven, in vergelijking met de wielspoorproeven, met name de schade initiatie fase beschrijven en verplaatsingsgestuurde proeven de initiatie en propagatiefase. In de derde publicatie wordt het energie concept uitgelegd. Met dit concept koppelt van Dijk krachts- en verplaatsingsgestuurde proeven in verschillende configuraties aan elkaar. Het is nog steeds de basis voor veel energiebenaderingen (Shen et al. (2007)). In het healingsonderzoek is een onderlaagmengsel met bitumen 40/60 gebruikt, de vermoeiingsproeven werden uitgevoerd in twee- en driepuntsbuigproeven, verplaatsingsgestuurd. Uit de bijdrage is niet duidelijk of voor het healingsonderzoek de twee- of driepuntsbuigproeven zijn gebruikt. Het gekozen rekniveau is bepaald uit de vermoeiingsproeven, gericht op een vermoeiingslevensduur van 3×10^5 cycli (rek ca $330 \mu\epsilon$). De proefcondities ware 40Hz en 20°C. Van Dijk verwijst naar ander onderzoek waaruit blijkt dat een verhouding tussen lastperiode en rustperiode van 0,1 tot maximale healing leidt (Raithby et al. (1972)). Bij 40Hz duurt een cyclus 25ms, dus een rustperiode van 250ms zou volledige healing moeten geven. In het onderzoek zijn rustperiodes van 125, 175, 250 en 625 ms gebruikt. Hoewel de healing na 250 ms nog toenam, vlakke deze wel af (Figuur 1.2).

Aanvullend onderzoek op een dicht deklaag en onderlaagmengsel uit de Nederlandse praktijk met 80/100 en 40/60 bitumen (Bonnaure et al, 1982) laat zien dat het hier om driepuntsbuigproeven ging. Voor de Nederlandse mengsels wordt de optimale healing gevonden bij rust periodes van 25 keer de last periode en zachtere bitumen en hogere temperaturen vergroten het effect, terwijl de opgelegde rek- en spanningsniveau's weinig invloed hebben.



Figuur 1.2: Healing als functie van de rustperiode (Dijk, van et al. 1977), met N het totaal aantal cycli tot falen, in proeven met rustperiode voor en na de rust en Nc het aantal cycli tot falen in de continue proef (geen rust).

Uit bovenstaande overzicht blijkt dat er veel studies gedaan zijn, bij een grote variatie in condities en met ook zeer variabele resultaten. Van den Bergh zette in zijn verhaal voor de Technologen dagen in 2007 vele onderzoeken naar healing op een rijtje (BIJLAGE A1.01). Hierbij keek hij onder andere naar de gevonden healingsfactoren in combinatie

met de gebruikte proefmethoden, condities en materialen. Deze overzichten zijn gereproduceerd in Tabel 1.2 en Tabel 1.3.

Onderzoeksgroep	Methode	Healingfactor
Bonnaure, Huibers, Boonders, Van Dijk en Visser	3-pt, verplaatsingsgestuurd DAB 0/16 80/100 en 45/60	H= Ni/Nc 1,5 tot 11
Westera, OCW, OWL	verplaatsing/kracht GAB 0/16 45/60, 15°C 2-, (56Hz) Force/Displ. 3-, (30Hz) F/D 4pt, (55Hz) F 4pt, (30 Hz) F/D	H= Ni/Nc 7,4 / 4,3 3,8 / 2,8 4,5 4,3 / 1
Landa et al	4pt, verpl. StAB 0/16 29,3 Hz 30°C Rustperiode (0,3 en 6 cycl.)	H= Ni/Nc 1 tot 4

Tabel 1.2: Overzicht van healingfactoren uit verschillende onderzoeken –met N_i de levensduur in aantallen cycli in de proef met rustperiodes (interrupted) en N_c de levensduur in de continue proef(vd Bergh, 2007)

References	Type of test	Mode	Fatigue shift factors			
			Healing	Crack Propagation	Traffic Wander	Total
Asphalt Institute						18,4
Nottingham Pell	Rotating Bending	F	5	20	1	100
Nottingham Brown	Rotating Bending	F	20	20	1,1	440
NRA-Dublin Golden 1988	Rotating Bending	F				230
DWW			4			
SHELL SPDM 78	Variable	D	5	1	2	10
LCPC	2 pt bending	D				1,6 to 3,7
SHRP A-003 Von Quintus 94						10-13
BRRC V 74	2 pt bending	F	7,1	3	1 - 2,5	7,1

Tabel 1.3: Overzicht van shiftfactoren uit verschillende onderzoeken (vd Bergh, 2007)

Zoals uit de tabellen blijkt, wordt er een grote range aan factoren gevonden. Doordat er ook een uitgebreid scala aan verschillende proeven met variërende condities worden ingezet en ook de onderzochte materialen variëren, is het vaak lastig daar wat zinnigs over te zeggen. In zijn bijdrage op de Technologendagen in 2007 geeft van den Bergh (2007 en BIJLAGE A1.01) de volgende trends aan:

Het type levensduur criterium (bijvoorbeeld de in Nederland gebruikelijke halvering van de initiële stijfheid) maakt niet veel uit.

- In buigproeven wordt meer healing gevonden bij krachtsgestuurde dan bij verplaatsingsgestuurde proeven (Tabel 1.2)
- In buigproeven wordt meer healing gevonden in de 2 puntsproef dan in de 3 punts en daarin weer meer dan in de 4puntsbuigproef (Tabel 1.2)
- Bij lagere rekniveaus wordt meer healing gevonden.
- Een zachter bindmiddel geeft over het algemeen meer healing, hoewel er ook studies blijken te zijn die het tegengestelde tonen.

Over het algemeen geven asfaltmengsels met steenslag betere healingswaarden dan gelijke mengsels met grind, maar ook hier zijn er studies die juist het tegengestelde aan tonen.

Van den Bergh geeft aan dat de grote variatie in resultaten ermee samenhangt dat healing een fenomeen is dat zich afspeelt op sub-micron/moleculair niveau, waarbij verschillen in samenstellende materialen, verhoudingen, een verschil in veroudering en variatie in de proefcondities logischer wijs tot verschillen in gedrag zullen leiden. Dit geeft meteen ook het spanningsveld duidelijk aan, want het gaat uiteindelijk om de healingscapaciteit van een asfaltmengsel en de manier waarop deze in het ontwerp kan worden meegenomen. Daarom wordt in dit onderzoek toch gekeken naar een benadering op asfaltmengsel niveau, waarbij gezocht wordt naar mogelijkheden om de healingscapaciteit te bepalen op asfalt in dezelfde proef die gebruikt wordt om de de vermoeiingsweerstand van asfalt te bepalen. Op deze manier zijn de healingspotentie en de vermoeiingsweerstand van het mengsel die in het ontwerp worden gebruikt, gebaseerd op gelijke condities.

1.2.2 Healing in de praktijk

Veel van de kennis over effecten van materiaal- en constructie effecten in de wegenbouw is ervaringskennis. Dat geldt ook voor de healingswaarde. Kijkend naar de geschiedenis van het Nederlandse snelwegen net, zien we dat dit is aangelegd sinds halverwege de jaren dertig van de vorige eeuw. Hierbij waren de gebruikte asfaltmengsels, zeker in de onderlagen, in eerste instantie vetter (bevatten meer bindmiddel) dan de huidige zoals die vanaf 1978 worden toegepast.

In de warme zomers van 1975 en 1976 gaf dat aanleiding tot veel schade door spoorvorming. In een reactie hierop werden de asfalt mengsels aangepast in de Eisen 1978 (Rijkswaterstaat, 1978) , waarbij ze schraler werden, wat inhoudt dat er minder en hardere bitumen in werd toegepast.

In dezelfde periode werd het mechanistisch-empirische wegontwerp volgens de Shell Pavement Design Manual (Shell, 1978) ingevoerd. Met deze ontwerpmethodode viel de asfaltdikte bij gelijke belastingen en ontwerplevensduur ca 10 cm dunner uit dan met de daarvoor gebruikte Shell Design Charts. Rijkswaterstaat heeft deze reductie van ontwerpdikten niet geheel gevolgd door voor de zekerheid een extra toe te voegen aan de constructiedikte uit de SPDM. Dit hield per saldo toch nog een afname in van de ontwerpdikte met ca. 5 cm.

Ten derde werd in deze periode het toepassen van meer marginale, ongebonden steenmengsels als funderingsmateriaal gebruikelijk zoals lava, silex en stol, waarbij de stijfheid en daarmee de bijdrage van deze funderingen aan de draagkracht van de wegconstructie, behoorlijk werd overschat.

Deze drie zaken bij elkaar, schralere asfaltmengsels, dunnere wegen en minder sterke funderingen, leidden begin jaren tachtig ondanks de met de extra asfaltlaag ingebouwde veiligheid tot onverwachte structurele schade aan snelwegen aangelegd in of na 1978 (Figuur 1.3). Begin jaren tachtig is daarom voor circa honderd miljoen gulden gerepareerd en versterkt. Daarbij is ook de ontwerpmethodiek voorlopig aangepast door een reductiefactor op de vermoeiingslevensduur te zetten. Hierbij werd de F_2 karakteristiek uit de SPDM door 5 gedeeld, waarmee feitelijk de hele dikte reductie van de SPDM werd weggewerkt en constructies weer een dikte kregen zoals die ook met design charts werd gevonden.

Miljoenenstrop door bezuiniging op wegeaanleg

door Bert Voorthuijsen
DEN HAAG, zaterdag

De nieuwe funderingen van autosnelwegen, die de laatste jaren uit bezuinigingsoverwegingen zijn toegepast, hebben Rijkswaterstaat voor ernstige problemen geplaatst. Door deze verkeerde bezuiniging is een strop ontstaan van vele miljoenen gulden.

Het herstellen van het wegdek van een 10 kilometer lang traject, dat ruim twee jaar geleden is aangelegd tussen Utrecht en de nieuwe brug over de Lek (rijksweg 27), gaat alleen al een bedrag van f 7 tot f 10 miljoen kosten. Het wegdek vertoont grote scheuren in de toplaag en dreigt voor het wegverkeer levensgevaarlijk te worden.

De ernstige problemen worden veroorzaakt doordat bij de aanleg van nieuwe wegen lavasteen als fundering is gebruikt, in plaats van slakken van de Hoogovens. De besparing met lavasteen zou 210.000 gulden per kilometer bedragen.

De hoofddirectie van Rijkswaterstaat heeft deze week alle regionale directies gesignaleerd over de problemen.

Geadviseerd wordt uiterst zorgvuldig de wegfundering te selecteren en voorlopig geen of terughoudend te zijn met het gebruik van lavasteen. De hoofddirectie in Den Haag wil eerst de resultaten afwachten van een onderzoek dat in verschillende delen van het land op autosnelwegen wordt gehouden.

Ingenieur J.W. Antes, hoofd van het laboratorium

van de stichting Noordelijk Wegenbouwlaboratorium in Groningen, zegt dat de problemen met de lavasteenfundering mogelijk te wijten is aan een drietal factoren:

■ Er is de laatste jaren een tendens gaande om een steeds dunner fundering en toplaag aan te brengen, mede uit kostenoverwegingen;

■ Een mogelijke misrekening wat betreft de eigenschappen van lavasteen in onze bodem;

■ Een verkeerde samenstelling van het asfaltmengsel dat is gebruikt voor de bovenste laag, want daar is de laatste 15 jaar ook verandering in gekomen. Na de grote problemen van de warme zomers toen toplagen begonnen te smelten, is geëxperimenteerd met nieuwe asfaltmengsels.

Schaarste

Volgens de heer Antes kan mogelijk ook de schaarste in Hoogovenslakken mede van invloed zijn geweest op het toenemend gebruik van lavasteen.

Naast rijksweg 27, waar op dit moment hard wordt gewerkt om het wegdek weer in orde te maken, zijn er ook scheuren ontdekt in rijksweg 6 bij Lelystad en op andere autosnelwegen.

De hoofddirectie van Rijkswaterstaat heeft aan de regionale directies om gegevens gevraagd over de conditie van wegen die zijn aangelegd met lavasteen als fundering. De wegenbouwkundige dienst van Rijkswaterstaat in Delft en het Studiecentrum Wegenbouw in Arnhem hopen binnen afzienbare tijd duidelijkheid te krijgen over de omvang van de moeilijkheden.

Zaterdag 7 april 1984

De Telegraaf

Figuur 1.3: Media aandacht begin jaren '80 naar aanleiding van onverwachte schade aan snelwegen aangelegd na 1978

In 1986 werden ook de eisen voor deklagen in verkeersklasse 3 bijgesteld omdat de Eisen 78 inderdaad goed werkten qua spoorvorming maar de verdichtbaarheid en duurzaamheid daar te veel onder leden. In dat jaar zijn ook de stijfheids- en vermoeiingseigenschappen van de Eisen 78 (Geysendorpher, 1986) asfaltmengsels uitgebreid onderzocht. Daarbij is vastgesteld dat de vermoeiingseigenschappen, zoals gevreesd, inderdaad aanzienlijk slechter waren dan die volgens de in het verleden voor de vettere mengsels aangehouden Shell - karakteristieken. In 1987 verscheen de eerste versie van de Handleiding Wegenbouw - Ontwerp Verhardingen, die was geënt op de Eisen 78 -

eigenschappen en die qua ontwerpdikten aansloot bij de voorlopige aanpassing van de ontwerpmethodiek van begin jaren 80. In deze ontwerphandleiding was ook een healingsfactor opgenomen. Deze is empirisch ingevuld op grond van de verschillen tussen de laboratorium levensduur en de ervaringen met dezelfde mengsels in de praktijk. Dit is de bekende RWS healingsfactor van 4. Deze factor beschrijft voor de vertrouwde mengsels de shift tussen lab en praktijk, maar het is onbekend hoeveel ervan daadwerkelijk healing is en hoeveel samenhangt met andere factoren.

De afgelopen jaren zijn er steeds meer niet-standaard mengsels op de markt gekomen, zoals bijvoorbeeld EME. Op grond van onderzoek in Frankrijk (waar het mengsel ontwikkeld is), stelt Rijkswaterstaat de healingscapaciteit van dit materiaal met harde bitumen op 1 (la Roche et al., 1994). Tot het uitkomen van de nieuwe Specificaties Ontwerp Verhardingen in 2011 (Rijkswaterstaat, 2011) werd voor de bekende RAW mengsels een healingsfactor 4 aangehouden en voor EME-achtige mengsels 1. In de nieuwe Specificaties worden deze twee getallen als uitersten gebruikt en wordt daar tussen in geïnterpoleerd op basis van bitumen gehalte en hardheid van de bitumen. Deze interpolatie tabel berust ook weer op ervaringskennis, maar is niet onderbouwd met onderzoek.

Met de overstap naar de Europese asfaltnormen, waarbij de onder- en tussenlaag mengsels opgaan in de grote verzamelklasse "asfaltbeton" (Asphalt Concrete, AC) worden de grenzen voor deze mengsels ruimer, waardoor er steeds meer mengsels komen die afwijken van de vertrouwde. Zo neemt het gehalte aan PR toe en wordt geëxperimenteerd met de mengselsamenstelling. Hierdoor zullen ook deze vertrouwde mengsels gaan veranderen. Onderzoek dat in het kader van de overgang naar de Europese regelgeving werd uitgevoerd naar de vermoeiings- en stijfheidseigenschappen van de bekende mengsels wees er al op dat ook binnen de vertrouwde kaders de afgelopen decennia verschuivingen in stijfheid zijn opgetreden (Dommelen, van et al, 2008). Dit effect zal door de ruimere grenzen alleen maar versterkt worden. Dat is op zich geen probleem, maar het betekent wel dat de relatie tussen de vermoeiingseigenschappen en de prestatie in de weg, cruciaal voor het wegontwerp, onzeker wordt. Er zal altijd een shiftfactor tussen lab en praktijk overblijven, maar als we de healingscomponent daaruit kunnen halen en deze in het lab kunnen bepalen, wordt het mogelijk de zelfherstellende capaciteit van een mengsel te waarderen in het ontwerp. Dat is het doel van dit onderzoek.

1.3 projectorganisatie

Dit project is een initiatief van Rijkswaterstaat naar aanleiding van en in overleg met VBW Asfalt. Het project is uitgevoerd door InfraQuest, expertice centrum voor wegen en constructies. InfraQuest is een samenwerkingsverband van Rijkswaterstaat, de Technische Universiteit Delft en TNO. De inbreng van de begeleiders, dhr. E. de Jong, dhr. I. Stuiver, ir. B. Sluer, dr.ir. M. Jacobs en ir. A. Bos in de begeleiding van het project wordt zeer op prijs gesteld.

1.4 leeswijzer

In hoofdstuk 1 wordt beschreven waarom onderzoek naar healing relevant is en wordt de ervaring met healing in de praktijk en in onderzoek beschreven.

Het doel, de probleemstelling en hypothese worden gegeven in het tweede hoofdstuk.

De onderzoeksopzet en de gebruikte mengsels worden in het begin van hoofdstuk drie beschreven. Hierbij komt de gefaseerde opzet van het onderzoek aan de orde en ook worden de resultaten van de continue proeven en de bepaling van de vermoeiingsweerstand voor de onderzochte mengsels in dit hoofdstuk gegeven.

De resultaten van de discontinue proeven worden in hoofdstuk vier gegeven en hier wordt ook de oorspronkelijke benadering met de fit door middel van modellen beschreven. De gebruikte modellen worden toegelicht en het gebruik ervan in combinatie met de resultaten van de discontinue proeven komt aan de orde.

Omdat de toepassing van de modellen op de discontinue data uit hoofdstuk vier niet blijkt te werken, wordt in hoofdstuk 5 een alternatieve benadering beschreven en toegepast op de data. Dit geeft duidelijke verschillen voor de healingsfactoren als functie van de relatieve stijfheid, maar doordat de stijfheid als functie van de levensduur ook

sterk verschilt heffen deze effecten elkaar op. Hierdoor wordt er uiteindelijk nauwelijks verschil gevonden tussen de mengsels. In dit hoofdstuk wordt ook een benadering op basis van gedissipeerde energie bekeken, maar deze blijkt uiteindelijk niet toepasbaar op de in dit onderzoek gebruikte discontinue signalen. Aangezien de meerwaarde van deze benadering voor de continue proeven ook discutabel is, wordt dit verder niet uitgewerkt.

In hoofdstuk zes worden de conclusies op een rijtje gezet en wordt een voorzet gedaan voor mogelijk vervolg onderzoek in de vorm van aanbevelingen.

2 Doel van het onderzoek

2.1 Wat is het probleem?

Het probleem dat we in dit onderzoek proberen op te lossen is dat, ondanks het belang van healing voor de wegenbouw zoals geschetst in het vorig hoofdstuk, er heel veel onbekend is. De shiftfactor tussen lab en praktijk voor de klassieke Nederlandse mengsels is weliswaar bekend, maar het is onduidelijk welk deel hiervan healing is en welk deel een verzameling van alle andere grote en kleine verschillen tussen lab en praktijk. Daar komt bij dat de klassieke mengsels al langere tijd aan het veranderen zijn, met meer hergebruik en andere grondstoffen (steenslag, vulstof). Dit kan de praktijk calibratie beïnvloeden. Sinds 2008 zijn bovendien de Europese asfaltnormen ingevoerd waardoor in Nederland asfaltbetonmengsels functioneel gespecificeerd worden. Hoewel dit op termijn veel voordelen biedt, is het nadeel dat niet meer duidelijk is of het een klassiek mengsel betreft of niet. Zo niet, dan is niet duidelijk wat de healingspotentie van het mengsel is. Deze healingpotentie is van grote invloed op de levensduur en moet dus correct in het ontwerp worden meegenomen. Aanhouden van de standaard healingsfactor voor niet – standaard mengsels levert grote risico's op. Aanhouden van een veilige waarde voor niet – standaard mengsels, zoals nu wordt gedaan, kan echter betekenen dat nieuwe materialen ten onrechte op achterstand worden gezet.

Kortom: het ontbreekt aan inzicht in en objectieve bepalingmethoden voor de healingspotentie van wegenbouwmaterialen.

2.2 Onderzoeksdoel en hypothese

De hypothese in dit onderzoek is dat het mogelijk is om met de vierpuntsbuigproef proeven met een of meerdere langere rustperioden (dus niet een puls gevolgd door een aantal seconden rust) te doen en daaruit een indicatie te krijgen van de healingspotentie van het mengsel. Hierbij worden twee sterk verschillende straight-run bitumenia (10/20 reps 70/100 van dezelfde leverancier) als uitgangspunt gebruikt in een asfalt mengsel dat verder qua samenstelling precies hetzelfde is. Deze mengsels moeten een duidelijk verschillende healingspotentie geven, waarbij de healingscapaciteit van het viskeuzere 70/100 mengsel groter zal zijn dan dat van 10/20.

"het is mogelijk om met beperkte aanpassingen aan de standaard vierpuntsbuigproef voor vermoeiing deze proef uit te voeren met een of meerdere langere rustperioden en uit deze discontinue proef een indicatie voor de healingspotentie van een asfaltmengsel te bepalen op een enkele balk.

Voor twee asfaltmengsels met respectievelijk 10/20 en 70/100 bitumen moet die potentie voor de eerste aanzienlijk kleiner zijn dan voor de tweede".

Indien dit blijkt te werken, zullen de proefcondities en de data-analyse methode worden vastgelegd in een proefprotocol dat ook op minder extreme mengsels kan worden toegepast. Indien ook de voor die mengsels verkregen resultaten vertrouwen geven in de zeggingskracht van de bepaalde healingspotentie, kan het protocol formeel vastgesteld worden voor het gebruik van de bepaling van de healingspotentie door opdrachtgevers en –nemers in de Nederlandse wegenbouw.

3 Onderzoeksopzet en bepaling healingsfactor

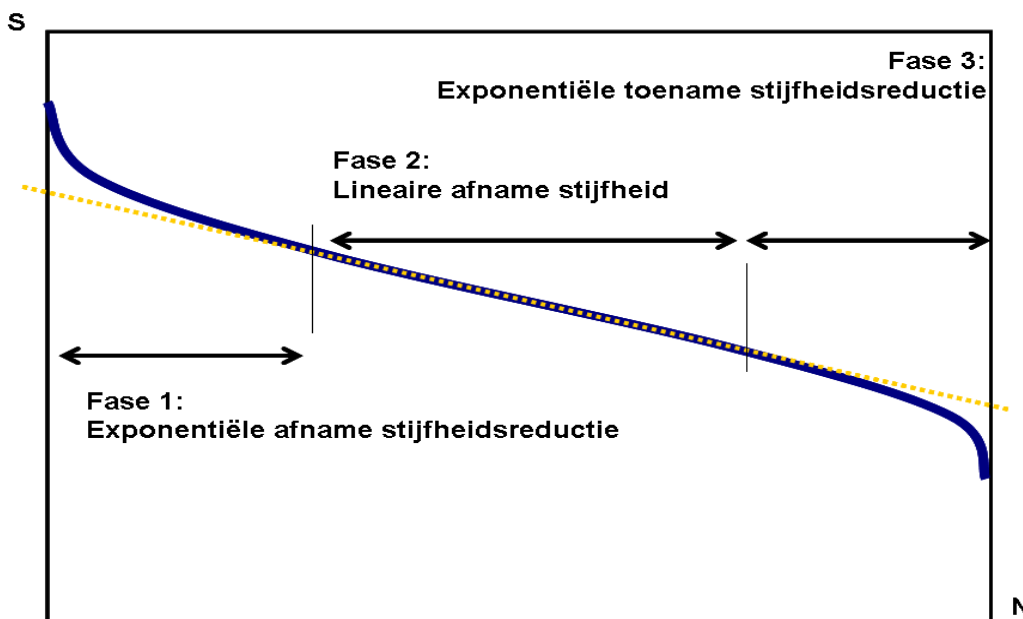
3.1 Onderzoeksopzet

Omdat inzicht in healing of zelfs in welk deel van de healingsfactor daadwerkelijk healing betreft ontbreekt, is er geen objectief beoordelingskader. Het is dus zaak om op een andere manier vooraf goed te formuleren wanneer het resultaat van de proeven acceptabel is en wanneer niet. Het onderzoek is daarom in twee fasen opgezet:

3.1.1 Fase 1: ontwikkel het protocol op extreme mengsels

In Fase 1 worden 2 mengsels beproefd waarvan alleen de penetratie van de bitumen verschilt. Uitgangspunt van het onderzoek is dat de zachtere bitumen een significant hogere healing moet geven dan de harde. Aan de hand van proeven met een of enkele langere rustperioden op de twee verschillende materialen wordt nagegaan of de verwachte ranking in healing wordt verkregen. Hierbij wordt een vast protocol toegepast voor de beproeving en de data - analyse. Indien het onderzoek niet de verwachte ranking oplevert zal nagegaan worden of verbetering mogelijk is door aanpassen van de proefmethode en/of de analysemethode. Indien dit laatste geen verbetering oplevert zal geconcludeerd worden dat de onderzoekshypothese niet bevestigd is en ongewijzigde voortzetting van het onderzoek niet zinvol is.

Hierbij wordt met "protocol" de combinatie van proefvoorschrift en data-analyse voorschrift bedoeld. In eerste instantie wordt voor de data-analyse gekeken naar het Partial Healing model (Pronk et al., 2009 en BIJLAGE B). Dit model is ontwikkeld om het gedrag van asfalt in de vierpuntbuigproef te beschrijven en beschrijft de evolutie van de stijfheid en fasehoek in deze proef. Hierdoor kan bij de bepaling van de healingscapaciteit volstaan worden met de S-N en ϕ -N curven zoals gebruikelijk in het rapporteren van vierpuntsbuigvermoeiingsonderzoek. Een typisch verloop van de stijfheid met het aantal lastherhalingen in een vermoeiingsproef is gegeven in . Het verloop kan worden opgedeeld in drie fasen, de eerste of initiële fase waar de stijfheid van een oorspronkelijk snelle afname langzaam stabliseert, de tweede of secundaire fase waar de stijfheidsafname continue is en de derde of tertiaire fase waarin de stijfheidsafname snel toeneemt. In verreweg de meeste gevallen ligt het einde van een vermoeiingsproef (halvering van de stijfheid) in de tweede, lineaire, fase van stijfheids afname. Het PH-model beschrijft dan ook alleen de eerste en tweede fase van het hier getoonde gedrag, het progressief bezwijkgedrag uit de derde fase zit er niet in.



Figuur 3.1: Principe verloop stijfheidsreductie in vermoeiing, drie fasen waarvan alleen 1 en 2 in een typische vermoeiingsproef optreden

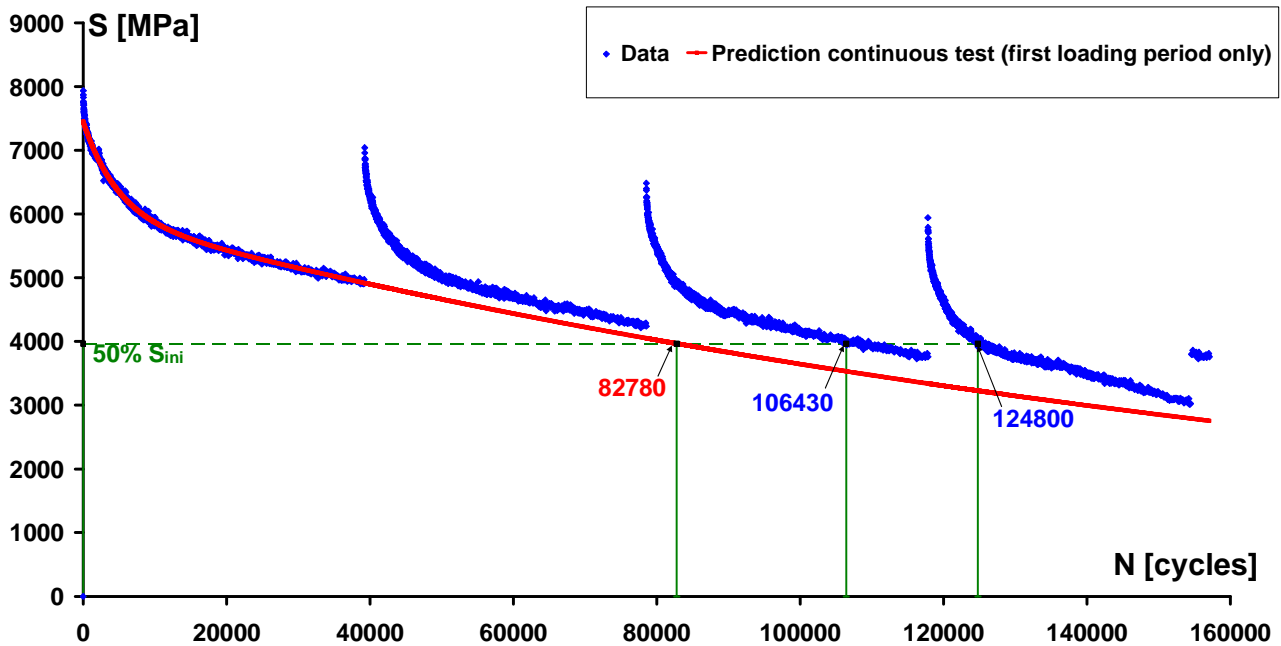
In het PH model zit, zoals de naam reeds zegt, een zekere mate van healing. De door het model voorspelde, of beschreven, healing dekt slechts een gedeelte van het stijfheidsherstel dat optreedt bij rustpauzes in de daadwerkelijke proefresultaten. De veronderstelling in dit onderzoek is dat het deel van de stijfheidsherstel dat het

model beschrijft viskeus gedrag is, mogelijk ten gevolge van het temperatuur verloop in de balk tijdens de proef. Dit sluit aan bij bevindingen in ander onderzoek, in dat geval aan tweepuntsbuigproeven (Breyse et al., 2003). Het deel van het stijfheidsherstel dat **niet** door het model wordt beschreven zou dan de daadwerkelijke levensduurverlening en daarmee de hier gezochte healing zijn.

De insteek van dit onderzoek is dat de wiskundige vergelijkingen van het model gebruikt worden om de data van de eerste lastperiode van een discontinue vierpuntsbuigproef te beschrijven en te extrapoleren, en om de data van alle lastperioden vervolgens te fitten zonder verdere theoretische basis. Door een fit op de eerste lastperiode wordt feitelijk een indicatie van de continue proef gekregen. Deze methodiek heeft als voordeel dat de healing factor afgeschat wordt aan de hand van 1 balkje. Door de grote spreiding in het gedrag van balkjes in een vermoeiingsproef, geeft het bepalen van de healing uit een continue proef en een discontinue proef grote problemen.

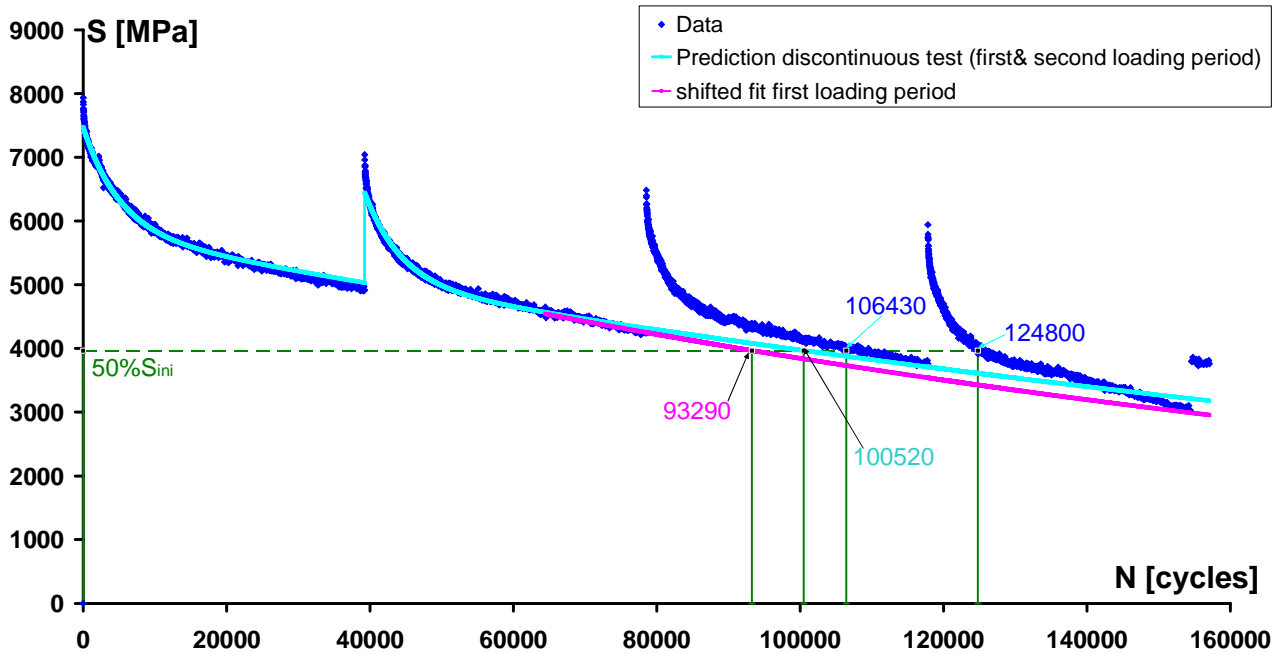
In Figuur 3.2 is het PH model gefit op alleen de 1^e belastingsperiode van een discontinue vierpuntsbuigproef. De figuur toont de meet resultaten van een discontinue 4PB proef bij 20°C en 5 Hz. Hierbij worden 40,000 belastingscycli (= 1belastingsperiode) afgewisseld met 400,000 cycli zonder belasting (=1 rustperiode). Deze rust periode van 400,000 cycli is niet in de figuur weergegeven. Het effect op de stijfheid van het proefstuk is wel zichtbaar, door de rustperiode ligt de stijfheid aan het begin van een nieuwe lastperiode hoger dan aan het eind van de periode daarvoor. Op grond van de fit op de eerste lastperiode voorspelt het PH model het verdere verloop van de stijfheid modulus (rode lijn). Deze lijn geeft het verwachte stijfheidsverloop in een continue vermoeiingsproef.

De initiële stijfheid bij in de proef en de 50%-waarde daarvan zijn met horizontale lijnen in de figuur aangegeven. Bij een gegeven stijfheidsafname is af te lezen bij hoeveel cycli die waarde wordt bereikt in de continue proef (extrapolatie van de eerste belastingperiode en de daadwerkelijke proefdata. In de hier getoonde proef (Pronk et al, 2009) is de initiële stijfheid 7935 MPa en de halve stijfheid, het bezwijkcriterium in de vermoeiingsproef, ligt dan dus op 3968 MPa. In de voorspelling van de continue proef wordt deze waarde als eerste bereikt, na 82780 lastherhalingen. Dit is aangegeven met de vierkantjes in Figuur 3.2. Kijkend naar de proefdata blijkt dat hier de halve stijfheid zowel in de derde (N=106430) als de vierde (N=124800) belastingperiode wordt bereikt. Hieruit blijkt dat de te vinden healingswaarden niet alleen afhangen van het criterium dat wordt gekozen voor de stijfheidsreductie, maar ook van het aantal van de rustperioden. Ook de lengte van rust- en belastingperioden zal vermoedelijk invloed hebben, evenals de proeftemperatuur. De gevonden waarde is dan ook geen materiaaleigenschap die onder alle omstandigheden geldig is, maar een indicatie van de healingscapaciteit onder de gekozen omstandigheden. Vandaar dat en protocol, met eenduidige afspraken over de te gebruiken condities cruciaal is om op vergelijkbare data uit te komen. Door zo dicht mogelijk bij de condities van de vermoeiingsproef te blijven, zal de relatie tussen de healingscapaciteit en de vermoeiingsweerstand zo groot mogelijk zijn.



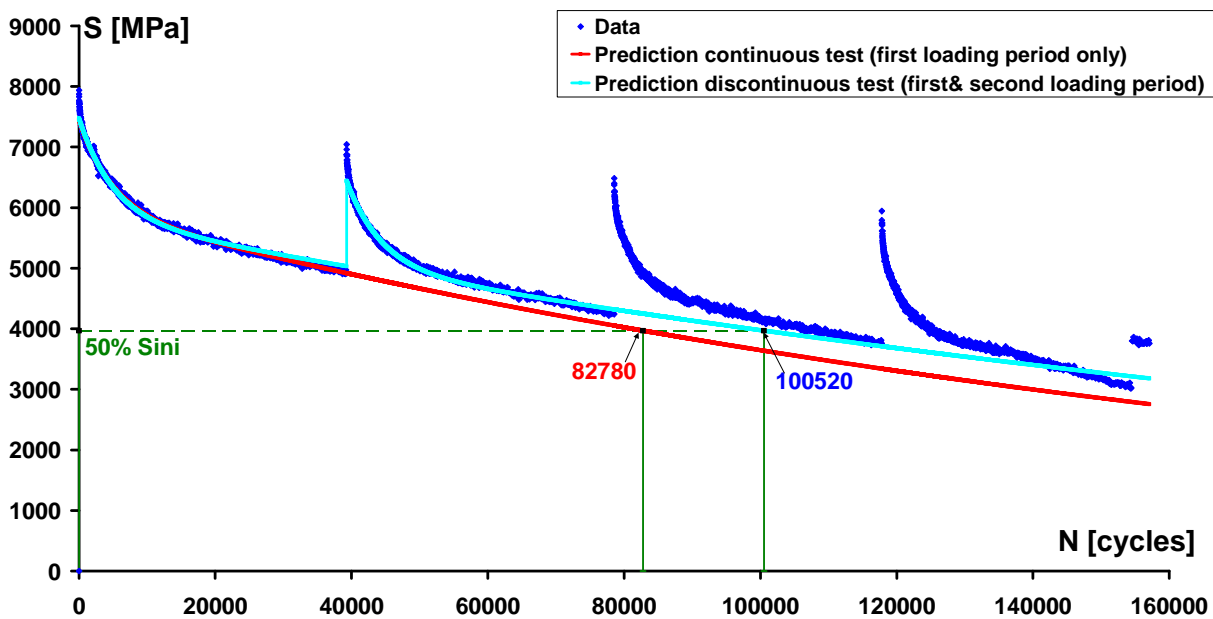
Figuur 3.2: Stijfheidsverloop in een discontinue vermoeiingsproef, metingen en PH fit op de eerste lastperiode

Door het PH-model te fitten op twee belastingperiodes, wordt een indicatie van het herstel in de rustpauze gekregen en meegenomen in het voorspelde gedrag. Dit wordt in Figuur 3.3 getoond. Het effect van de rustpauze op de fit is dat de lineaire tak wat hoger komt te liggen en minder schuin loopt. Als gevolg hiervan, kruist hij de lijn van de halve stijfheid later ($N=100520$) dan de fit op de eerste last periode, maar eerder dan de proefdata. Die proefdata zijn dan ook verkregen na twee en drie rustperioden. Uit de figuur is te zien dat de fit aan het einde van de tweede last periode aan de bovenkant van de data ligt. Het lineaire deel van de voorspelling ligt dus iets hoger dan de data. Hierdoor wordt de N waarbij halve stijfheid wordt bereikt wat overschat. Dat is te zien door de lineaire licht blauwe tak te vergelijken met de extrapolatie van de donkerblauwe meetpunten. Die extrapolatie wordt gegeven door magenta lijn aan het einde van de tweede lastperiode, wat leidt tot een N van 93290 cycli. Doordat de fit op de twee cycli wat hoger ligt, sluit deze ook nog redelijk aan bij de derde en vierde last periode. Pas waar de vierde lastperiode progressief gaat dalen ontstaat een afwijking. Kennelijk is het effect van de rustpauze en het effect van de belasting in de tussenliggende periode redelijk constant. Omdat de fit ook de volgende lastperioden redelijk meeneemt, wordt in dit onderzoek een fit op de eerste twee lastperioden gezien als een indicatie van het healingseffect in algemene zin en niet als een exacte beschrijving van de eerste twee periodes.



Figuur 3.3: Stijfheidsverloop in discontinue vermoeingsproef en fit PH model op de eerste en tweede belastingsperiode

Door nu zowel een fit op de eerste belastingperiode (Figuur 3.2) als op de eerste twee belastingperiodes (Figuur 3.3) uit te voeren en dit te combineren ontstaat Figuur 3.4. Hierbij beschijft de fit op de eerste lastperiode het te verwachten gedrag in de continue proef terwijl de fit op de eerste twee lastperiodes een indicatie geeft van het effect van healing. Door nu bij 50%- S_{ini} beide fits af te lezen wordt gevonden: $N_1=82750$ $N_2=100470$ en $H=N_2/N_1=1,21$. Daarmee wordt een healingsindicatie gevonden op grond van een discontinue proef op 1 balkje, waardoor de grote spreiding in vierpuntsbuigdata geen rol meer speelt. Bovendien hoeft de proef slechts twee belasting periodes en een rust periode te beslaan. Een waarde van 1,21 lijkt weliswaar laag, maar het proefstuk dat gebruikt is om deze theorie te ontwikkelen was een restant van eerder onderzoek. De verwachting was daarom dat deze relatief weinig healing meer zou vertonen.

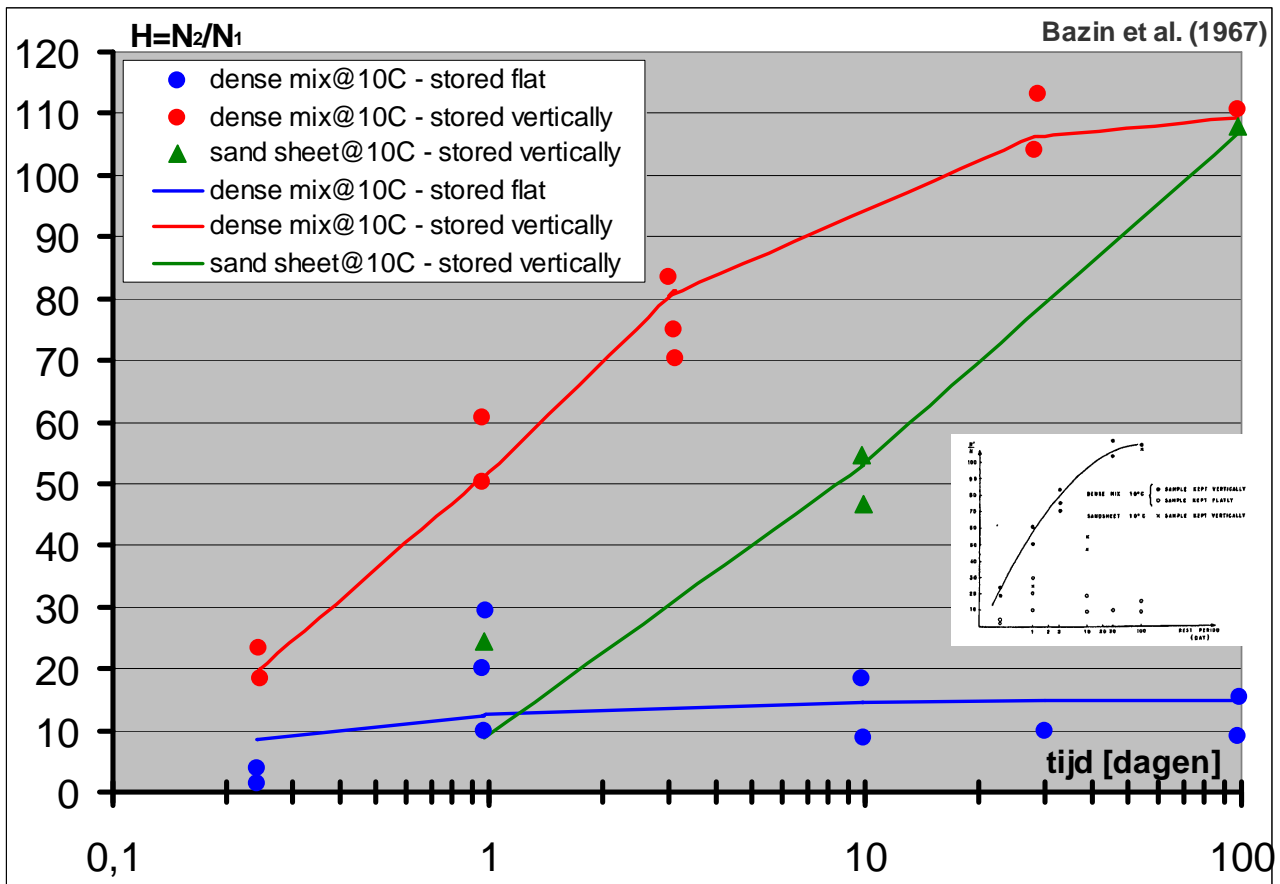


Figuur 3.4: Combinatie van fit op de eerste en op de eerste twee belastingperiodes

De hierboven beschreven analyse van de testdata van Pronk (Pronk et al. 2009) leidt dus tot een benadering waarbij vierpuntsbuigproeven met een rustperiode worden uitgevoerd en de data voor en voor en na de rustperiode aan de

hand van modellen wordt geëxtrapoleerd tot 50% stijfheid om te bepalen wanneer ze de 50% Sini bereiken, Uit die gegevens kan dan een healingswaarde bepaald worden. Om aan te sluiten bij de vermoeiingsproef (EN 12697-24/26), wordt de vierpuntsbuigproef bij de gebruikelijke temperatuur van 20°C en frequentie 30 Hz uitgevoerd. De rust periode van 400.000 cycli komt neer op ca 22 hr. Omdat het voor het herstel gaat om de rusttijd en de gemeten healing al relatief klein was, is in het in dit rapport beschreven onderzoek de rustperiode dicht bij die 22 uur gekozen, namelijk op 24 uur.

Voor het aantal cycli in een belasting periode wordt er gekeken naar de resultaten van de continue proeven, het aantal cycli wordt zodanig gekozen dat dit in het lineaire deel van het signaal ligt. Dus genoeg cycli om verwijderd te zijn van het instel fenomeen aan het begin, maar niet te zoveel dat er mogelijk progressieve schade optreedt. Voor de eerste discontinue proeven wordt het aantal cycli dus uit de resultaten van de continue proeven bepaald. Het zelfde geldt voor de rek, de continue proeven leveren de ϵ_6 op en de discontinue proeven worden vanwege de relatie met de vermoeiingseigenschappen bij dit rekniveau uitgevoerd. De rustperiode is 24 uur. Andere onderzoekers hebben aangetoond dat een dergelijke rusttijd voldoende zou zijn om healing te vinden (Pronk et al., 2009 en Bazin et al., 1967). Het werk van Bazin is het eerste onderzoek naar healing in asfalt. Zijn proeven bevatten ook veel langere rustperioden dan 1 dag (zie Figuur 3.5, geproduceerd op grond van de data van Bazin, de originele figuur is ingevoegd). In alle gevallen werd na een dag echter al aanzienlijke healing gemeten ($H > 10$) en hoewel de plateaus dan nog niet bereikt waren is er vanwege uitvoerbaarheid van de proeven toch in eerste instantie voor een rustperiode van 24 uur gekozen. Op grond van de resultaten van de eerste discontinue proeven kunnen nieuwe rustperioden (korter/langer) worden gekozen. Er is gekozen voor het variëren van de rustperioden en niet de aantallen cycli in de belastingperiode omdat de verwachting is dat de healing vooral afhangt van de rustperiode en deze periode ook bepalend is voor de duur van de proef. Het ideaal is een zo kort mogelijke rust periode waarbij toch nog significante healing wordt gemeten.



Figuur 3.5: Healing tegen rusttijd, gereproduceerd uit Bazin et al. (1967)

3.1.2 Fase 2: toets vertrouwen protocol op gebruikelijke mengsels

Als Fase 1 het verwachte resultaat oplevert (een significant hogere healing voor het mengsel met zachtere bitumen) zullen in fase twee verdere mengselvariëaties worden meegenomen. Zo kan gedacht worden aan het variëren van bitumengehalte bij eenzelfde penetratiewaarde en het variëren van beide parameters. De verwachting is dat hier als trend wordt gevonden dat de healingsfactor toeneemt met zowel penetratie als bitumengehalte. TNO, TUD en DVS zullen in deze fase van het InfraQuest project 3 verdere mengsels beproeven en tegelijkertijd kunnen ook marktpartijen met de methodiek aan de slag gaan en resultaten inbrengen.

3.2 Mengsels fase 1

Door BAM zijn twee AC 16 base (STAB -) mengsels beschikbaar gesteld waarvan alleen de penetratie van de bitumen verschilt, namelijk 10/20 en 70/100. Het bitumengehalte en alle verdere samenstellingsgegevens en bouwstoffen zijn hetzelfde. Op deze manier wordt het effect van de bitumen eigenschappen op de healing geïsoleerd. Dit voorkomt discussie over de, versturende, invloed van bitumenpercentage (EME heeft veelal een hoger bitumenpercentage dan Stab) en andere samenstellingsgegevens of grondstofeigenschappen. De gebruikte mengsels hebben nu dezelfde volumetrische samenstelling, maar verschillende bitumina (70/100 respectievelijk 10/20, beide straight run). Normaal gesproken wordt in een mengsel met zachte bitumen minder (4,3%) en met de harde bitumen meer (5,6%) bitumen gebruikt. In dit geval is een gelijk bitumengehalte genomen zodat de verschillen enkel gekoppeld zouden zijn aan de hardheid van het bindmiddel. Het gevolg is dat het bitumengehalte aan de hoge kant is voor een normale STAB, maar niet ongewoon hoog. Voor een EME - mengsel is het bitumengehalte echter zeer laag en het 10/20 mengsel mag dan ook niet als EME worden gezien.

De mengselgegevens zijn opgenomen in Figuur 3.6 en Figuur 3.7.

Healing Van Asfalt Mengsels

BAM Wegen
Winthontlaan 28
3526 KV Utrecht

Telefoon 030-2876876
Fax 030-2876928
EMail



ATS MO09	Mengselontwerp Nummer TT002-A	Typetest TT002-A	blad 1 14-01-10
--------------------	---	------------------	--------------------

Omschrijving : AC 16 bin/base 70/100 Schots Vastgesteld op :
 Mengseleis : AC 16 base/bin max 7% H.R.
 Mengselcodering :
 Mengselaanduiding: AC 16 bin/base
 Beproevinglab : BAM Utrecht Centraal Laboratorium

Korrelverdeling :					Bouwstoffen :		
Zeef	Wens	Door min	Door max	Door doel	Bouwstof		percentage
	(% m/m)	(% m/m)	(% m/m)	(% m/m)			
C 22,4		100.0		100.0	102-0	Bitumen 70/100	4.50
C 16	97.6	94.0	100.0	97.6	202-5	Wigras 40K	5.41
C 8	69.0	55.0	75.0	69.0	210-6	Productiestof	0.96
2 mm	43.0	40.0	46.0	43.0	302-0	Natuurlijk zand Putman	34.47
125 µm				8.0	521-0	Schots Graniet 2/8	23.36
63 µm	6.0	6.0	8.0	6.0	522-0	Schots Graniet 8/16	31.30

kenmerk	waarde	min	max	Waarde op cert
Bindmiddelgehalte (% in m/m)	Totaal 4.5	$B_{min4,4}$		
	Oplosbaar 4.5			
Penetratie mengsel (0.1 mm)	90			
Dichtheid mengsel berekend (kg/m ³)	2468			
Dichtheid mengsel vastgesteld (water) (kg/m ³)				
Dichtheid mengsel vastgesteld (oplosmiddel) (kg/m ³)				
Streefdichtheid (kg/m ³)	2360			
Aantal gyraties bij proefstukvervaardiging				
Holle ruimte (% V/V)	NPD	NPD		
Mengseltemperatuur (°C)	140	180		
Watergevoeligheid (%)	NPD			
Stijfheid (MPa)	NPD	NPD		
Weerstand tegen vermoeing (µm/m)	NPD			
Weerstand tegen permanente vervorming in triaxiale drukproef (µm/m/n)			NPD	
Weerstand tegen afslijting door spijkerbanden (ml)			NPD	
Reactie bij brand	A1fl			

Figuur 3.6: Mengsel met normale bitumen ("70/100 mengsel")

Healing Van Asphalt Mengsels

BAM Wegen
Winthontlaan 28
3526 KV Utrecht

Telefoon 030-2876876
Fax 030-2876928
EMail



ATS M009	Mengselontwerp Nummer TT002-B	Typetest TT002-B	blad 1 14-01-10
--------------------	---	------------------	--------------------

Omschrijving : AC 16 bin/base 70/100 Schots Vastgesteld op :
 Mengseleis : AC 16 base/bin max 7% H.R.
 Mengselcodering :
 Mengselaanduiding: AC 16 bin/base
 Beproevinglab : BAM Utrecht Centraal Laboratorium

Korrelverdeling :					Bouwstoffen :		
Zeef	Wens	Door min	Door max	Door doel	Bouwstof		percentage
	(% m/m)	(% m/m)	(% m/m)	(% m/m)			
C 22,4		100.0		100.0	129-0	Bitumen 10/20	4.50
C 16	97.6	94.0	100.0	97.6	202-5	Wigras 40K	5.41
C 8	69.0	55.0	75.0	69.0	210-6	Productiestof	0.96
2 mm	43.0	40.0	46.0	43.0	302-0	Natuurlijk zand Putman	34.47
125 µm				8.0	521-0	Schots Graniet 2/8	23.36
63 µm	6.0	6.0	8.0	6.0	522-0	Schots Graniet 8/16	31.30

kenmerk		waarde	min	max	Waarde op cert
Bindmiddelgehalte (% in m/m)	Totaal	4.5	$B_{min4,4}$		X
	Oplosbaar	4.5			
Penetratie mengsel (0.1 mm)		14			
Dichtheid mengsel berekend (kg/m ³)		2472			
Dichtheid mengsel vastgesteld (water) (kg/m ³)					
Dichtheid mengsel vastgesteld (oplosmiddel) (kg/m ³)					
Streedichtheid (kg/m ³)		2365			
Aantal gyraties bij proefstukvervaardiging					
Holle ruimte (% V/V)			NPD	NPD	
Mengseltemperatuur (°C)			160	200	
Watergevoeligheid (%)			NPD		
Stijfheid (MPa)			NPD	NPD	
Weerstand tegen vermoeing (µm/m)			NPD		
Weerstand tegen permanente vervorming in triaxiale drukproef (µm/m/n)				NPD	
Weerstand tegen afslijting door spijkerbanden (ml)				NPD	
Reactie bij brand			A1fl		

Figuur 3.7: Mengsel met harde bitumen ("10/20 mengsel")

BAM heeft de mengsels zelf geproduceerd en hier platen en vervolgens proefstukken van gemaakt. Een overzicht van de proefstukken is opgenomen in BIJLAGE D.

3.2.1 Probleem met de gebruikte bitumen

Zoals hiervoor beschreven hebben de in het onderzoek gebruikte mengsels dezelfde volumetrische samenstelling, maar verschillende bitumina, zodat de verschillen enkel gekoppeld zouden zijn aan de hardheid van het bindmiddel. De samenstelling van beide mengsels is gegeven in Tabel 1.

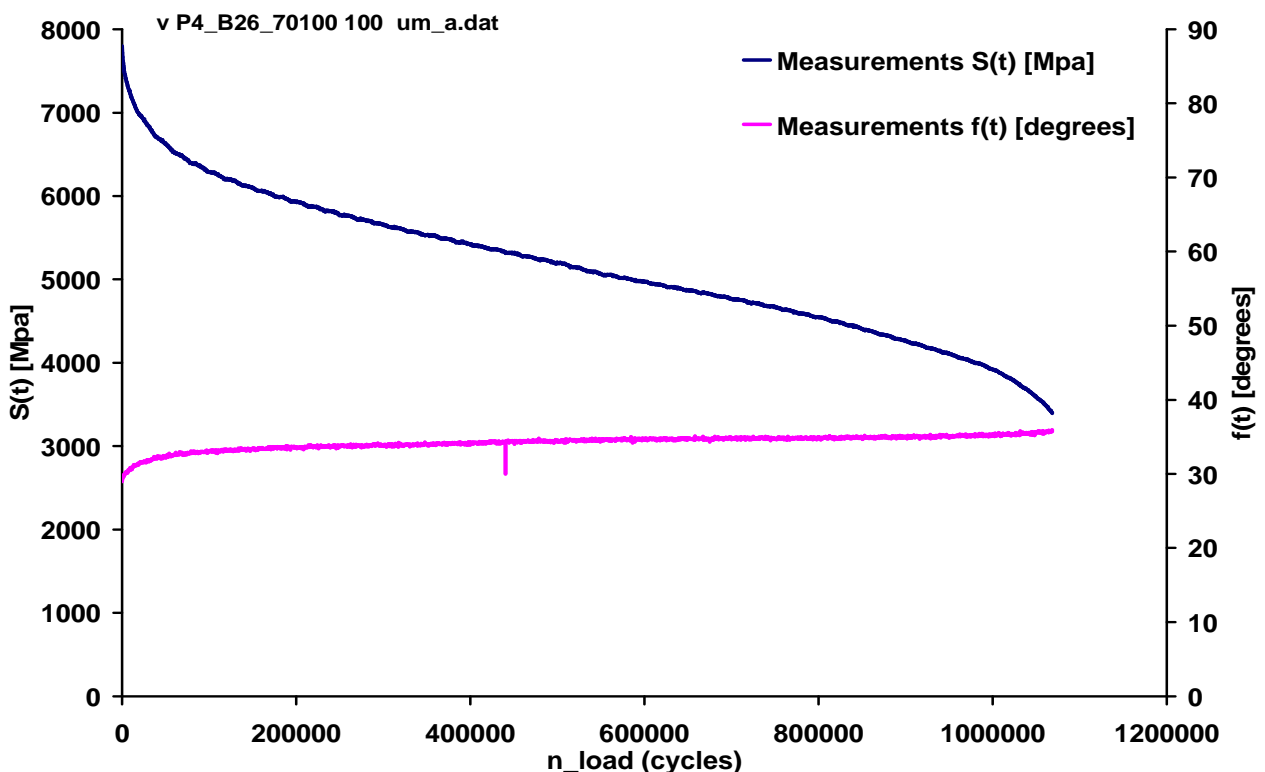
Het was de bedoeling om voor beide mengsels te kiezen voor straight run bitumen van dezelfde bitumen leverancier. In de periode dat de proefplaten gemaakt moesten worden waren de hardere bitumina van de beoogde leverancier echter niet beschikbaar. Bij de productie van de proefplaten is vervolgens gebruik gemaakt van een 10/20 bitumen van een andere leverancier, die bovendien niet straight run was. Dit bleek helaas pas achteraf. Hierdoor is de opzet van het onderzoek ernstig verstoord omdat de aanname dat het vergelijkbare bitumen met alleen een andere hardheid betrof, niet meer juist hoeft te zijn. Zoals later in het rapport blijkt, maakt dat het trekken van conclusies erg lastig.

3.2.2 Continue proeven

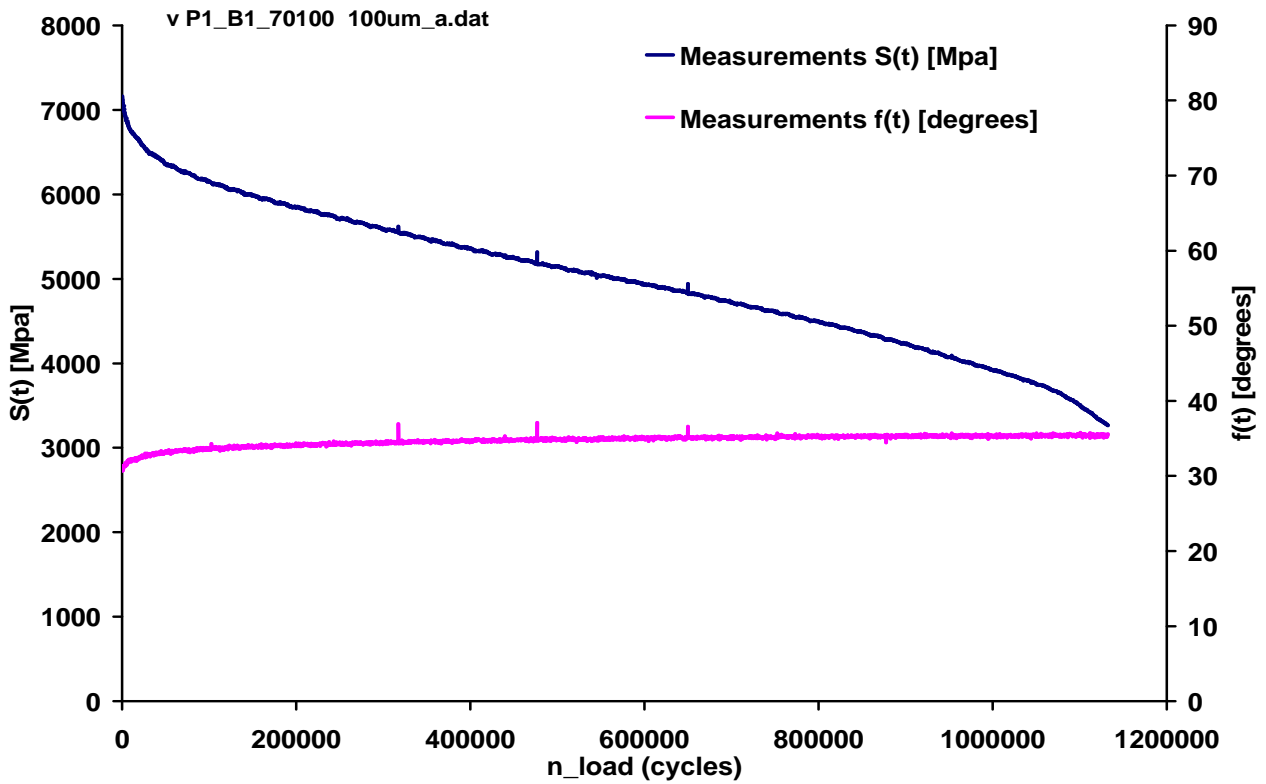
Op balkjes van beide mengsels zijn eerst continue vermoeiingsproeven gedaan. Dit had tot doel de ε_6 van beide mengsels te bepalen. Bij dit rekniveau zullen de discontinue proeven dan worden uitgevoerd. Dat betekent dat de healingsproeven voor een mengsel met hogere vermoeiingsweerstand bij een hoger rek niveau worden uitgevoerd. Dit is wenselijk omdat een dergelijk mengsel ook in een dünnere constructie zal worden toegepast. Daarnaast geven de continue proeven een indruk van het verloop van de stijfheidsmodulus tijdens de proef. Dit is nodig om een goede keuze te kunnen maken voor het punt waarop in de discontinue proef de eerste rust periode wordt gekozen, kortom het aantal cycli in de eerste belastingperiode. Dit punt moet voldoende ver in het lineaire gebied liggen om de lineaire tak van de regressiemodellen voldoende betrouwbaar te kunnen fitten, maar niet te dicht bij de 'derde tak' (progressieve schade ontwikkeling) in het stijfheidsverloop om te vermijden dat na de rustperiode geen lineair gedeelte meer wordt gevonden. Als kort na de rustperiode progressieve schade optreedt, kan er immers geen healingspotentie meer bepaald worden.

3.3 Proeven 70/100 mengsel

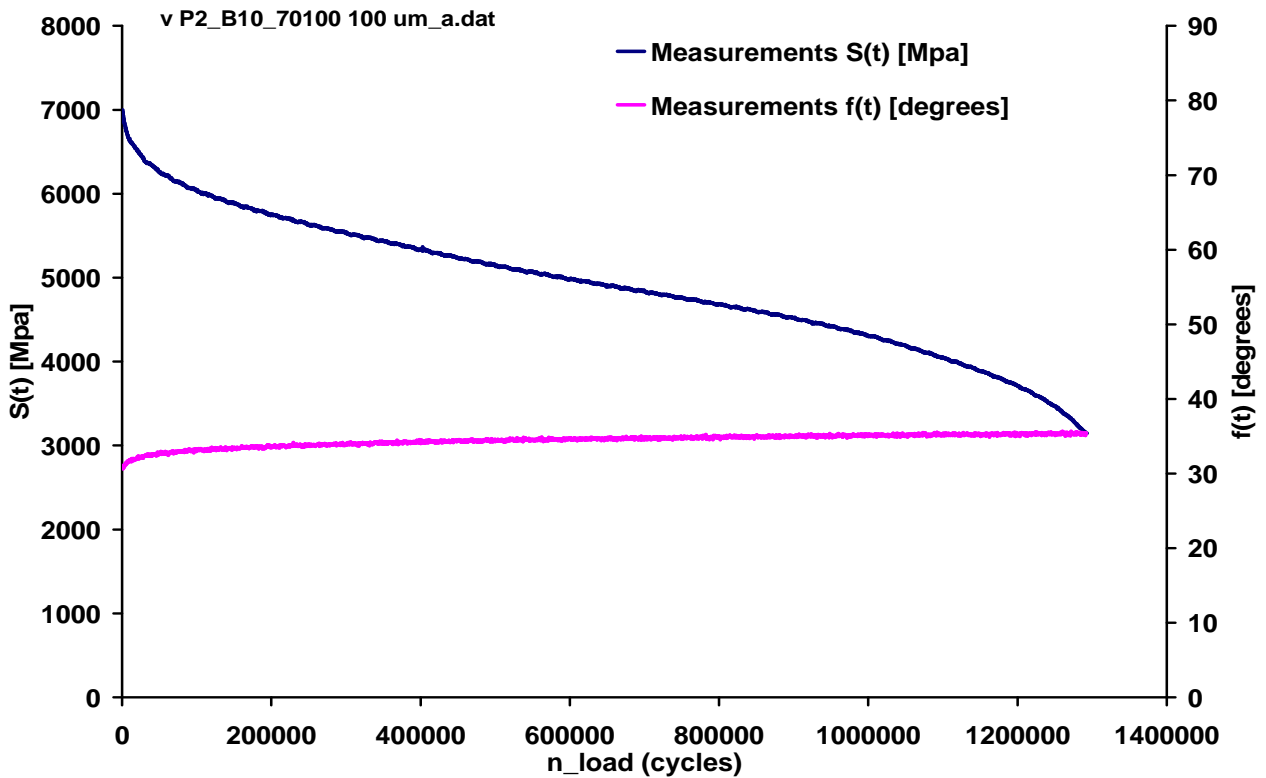
De continue proeven op het 70/100 mengsel zijn uitgevoerd bij 20°C en 30 Hz (EN 13697-24) en bij rekniveaus van 100 en 150 $\mu\varepsilon$. De verwachting is dat het rekniveau waarbij het materiaal 1 miljoen (de zogenaamde ε_6) lastherhalingen kan verdragen tussen deze twee rekniveaus in ligt. In de figuren op de volgende pagina's zijn de resultaten van de continue proeven op het 70/100 mengsel weer gegeven. In de grafieken staat op de rechter verticale as de fasehoek uit, dit is de magenta (roze-rode) lijn onder in de grafieken. Op de linker verticale as staat de stijfheid uit en het verloop in de tijd is gegeven door de donker blauwe lijn boven in de grafieken.



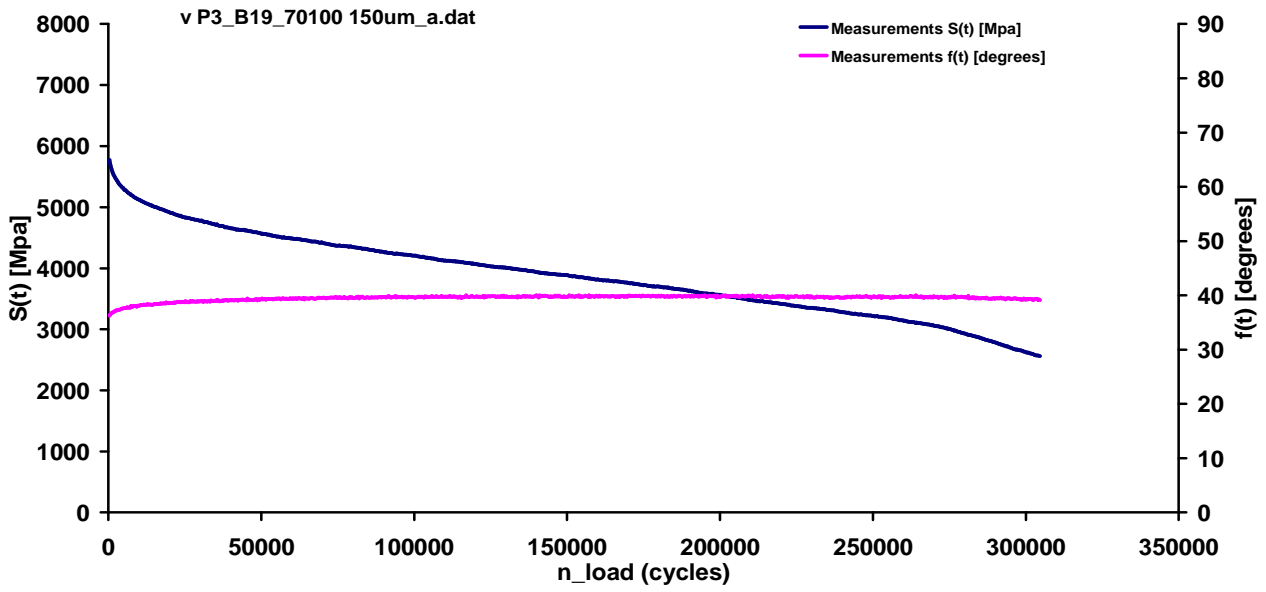
Figuur 3.8: Proeven 70/100 mengsel bij lag rekniveau (100 $\mu\varepsilon$) - 1



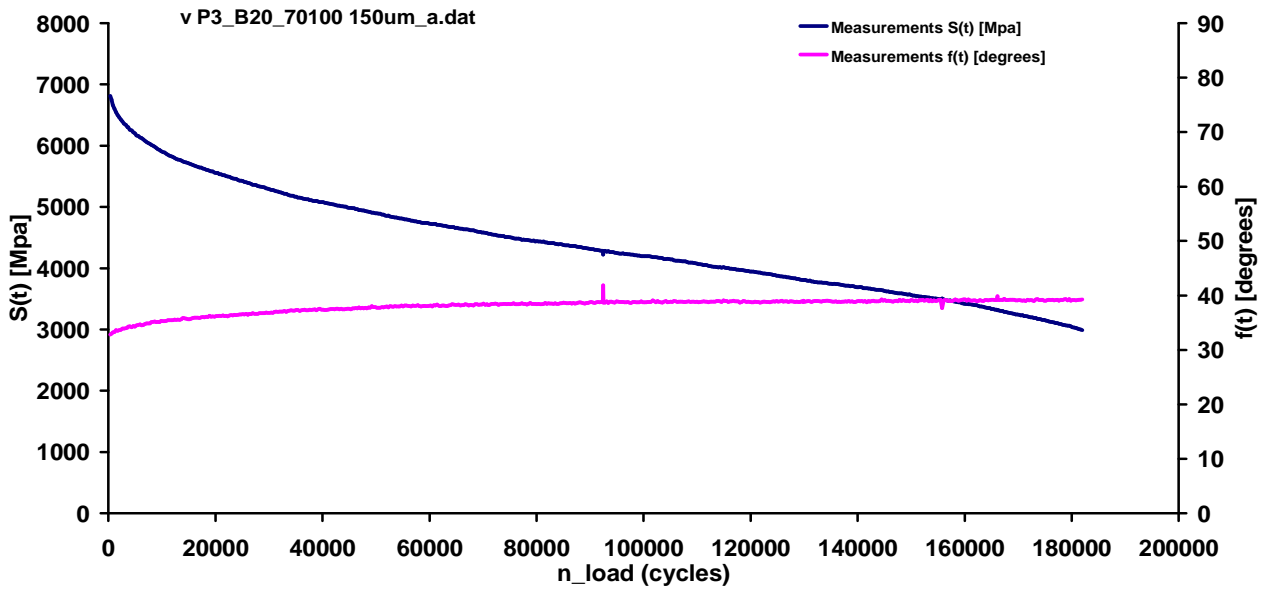
Figuur 3.9: Proeven 70/100 mengsel bij laag rekniveau (100 $\mu\epsilon$) - 2



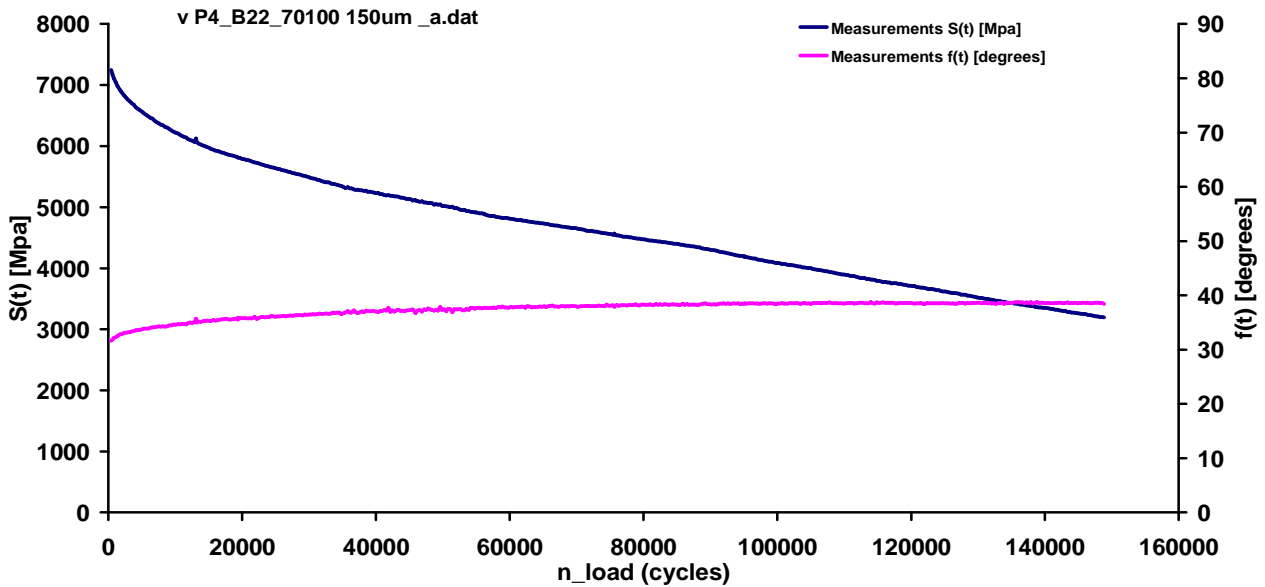
Figuur 3.10: Proeven 70/100 mengsel bij laag rekniveau (100 $\mu\epsilon$)-3



Figuur 3.11: Proeven 70/100 mengsel bij hoog rekniveau (150 μE)-3



Figuur 3.12: Proeven 70/100 mengsel bij hoog rekniveau (150 μE)-3

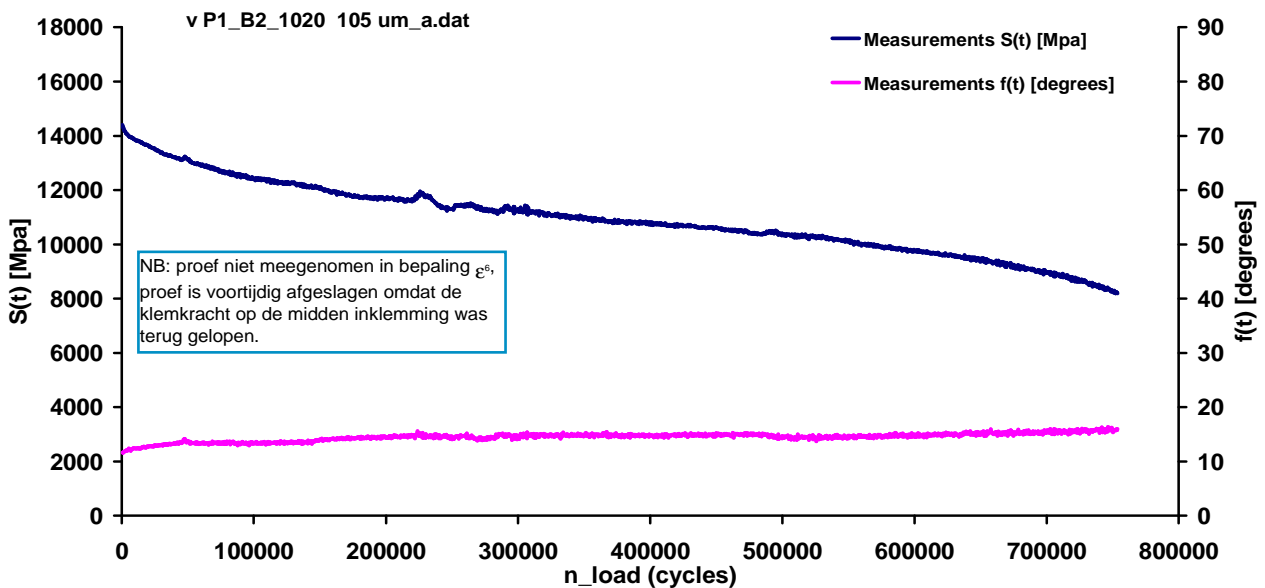


Figuur 3.13: Proeven 70/100 mengsel bij hoog rekniveau (150 $\mu\epsilon$)-3

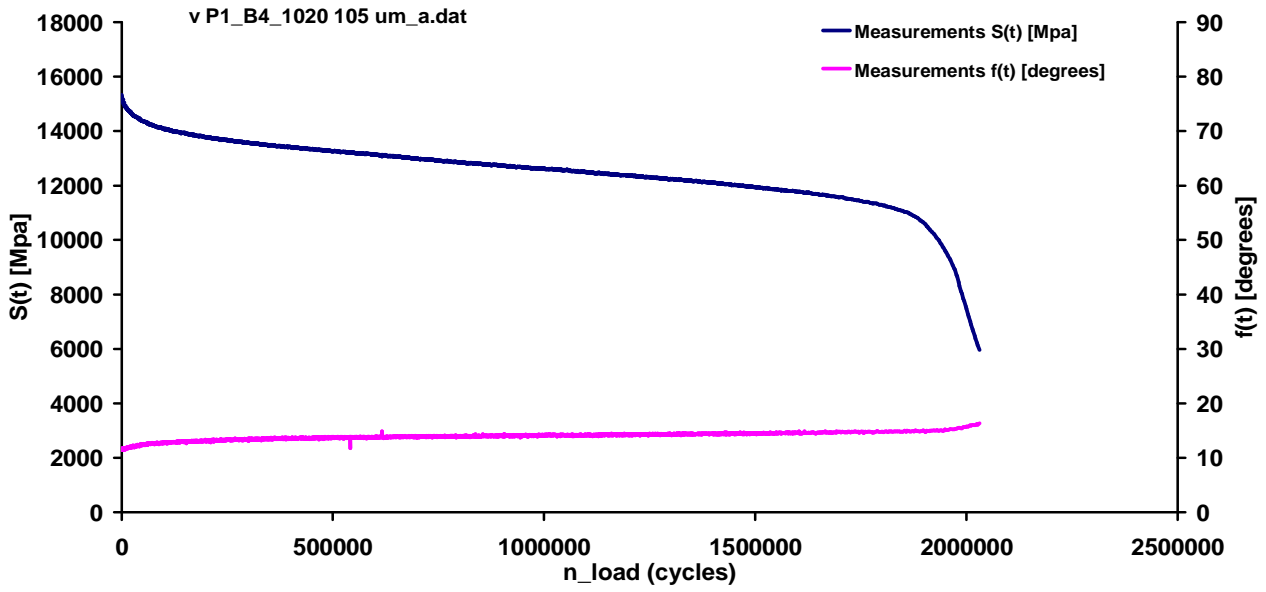
Uit de grafieken blijkt dat het lage rekniveau (100 $\mu\epsilon$) dicht in de buurt bij de ϵ_6 ligt, want het afbreekpunt van die proeven ligt net voorbij de 1×10^6 lastherhalingen. De bepaling van de exacte ϵ_6 wordt beschreven in paragraaf 3.5.

3.4 Continue proeven 10/20 mengsel

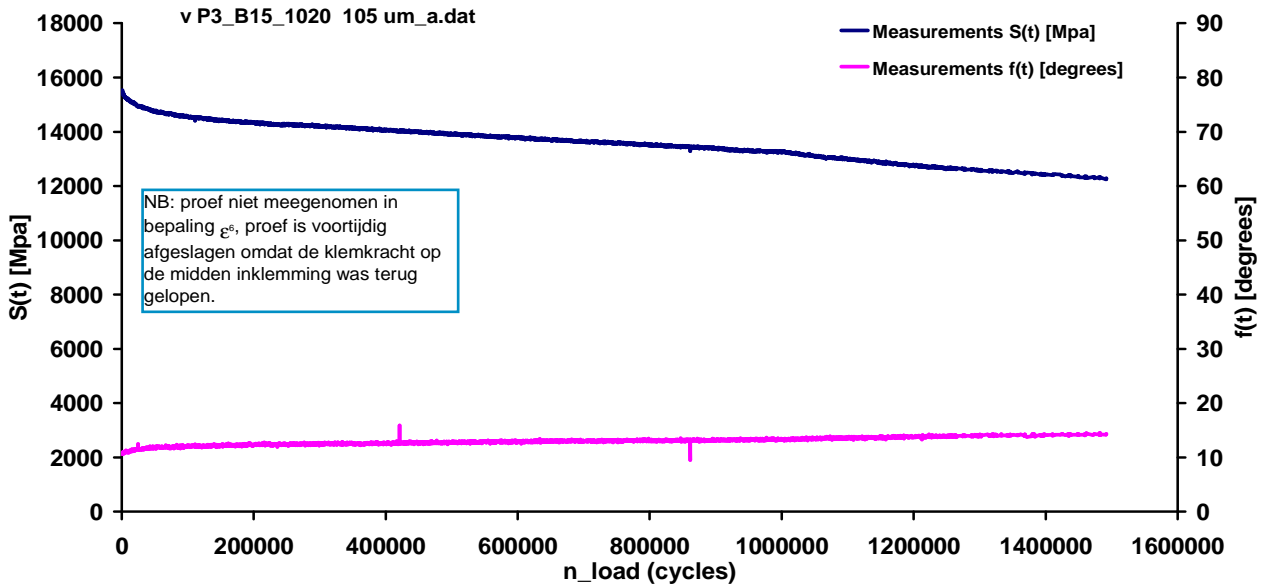
De grafieken voor de continue proeven op het 10/20 mengsel zijn vergelijkbaar met die van het 70/100 mengsel. De proeven zijn echter bij andere rekniveaus (namelijk 105, 115, 140 en 150 $\mu\epsilon$) uitgevoerd. Omdat bij dit mengsel een paar proeven mislukt zijn, zijn hier extra proeven uitgevoerd om de ϵ_6 -waarde goed te kunnen bepalen. In de grafieken is aangegeven of de betreffende proef gebruikt is in de bepaling van ϵ_6 .



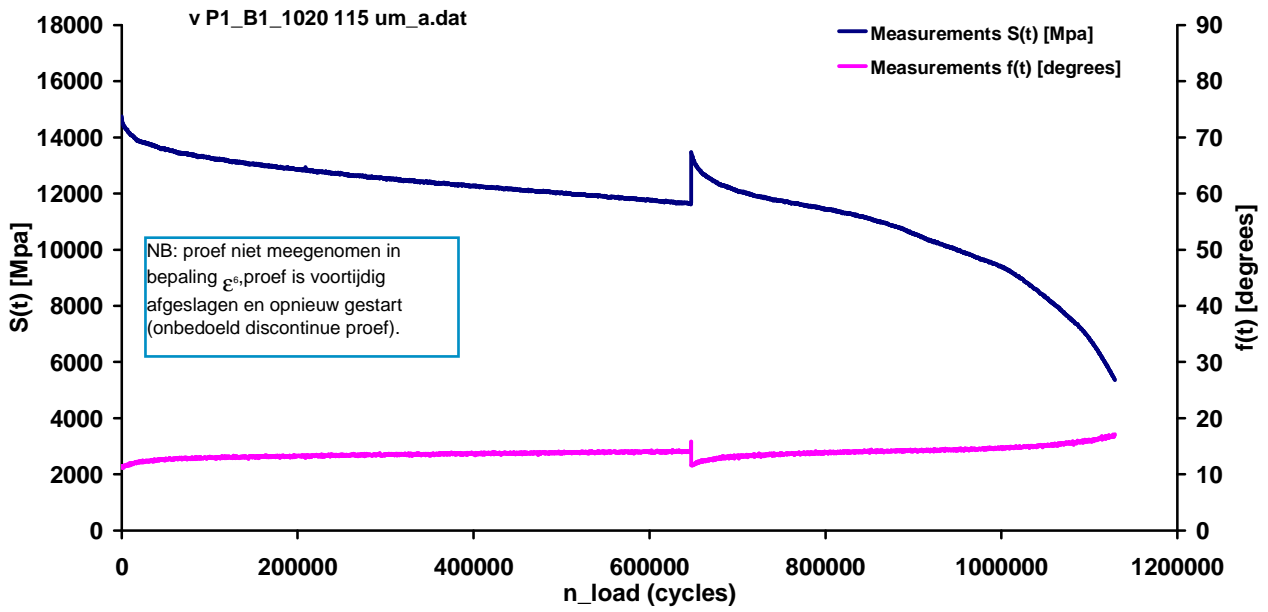
Figuur 3.14: Proeven 10/20 mengsel bij laag rekniveau (105 $\mu\epsilon$)-1



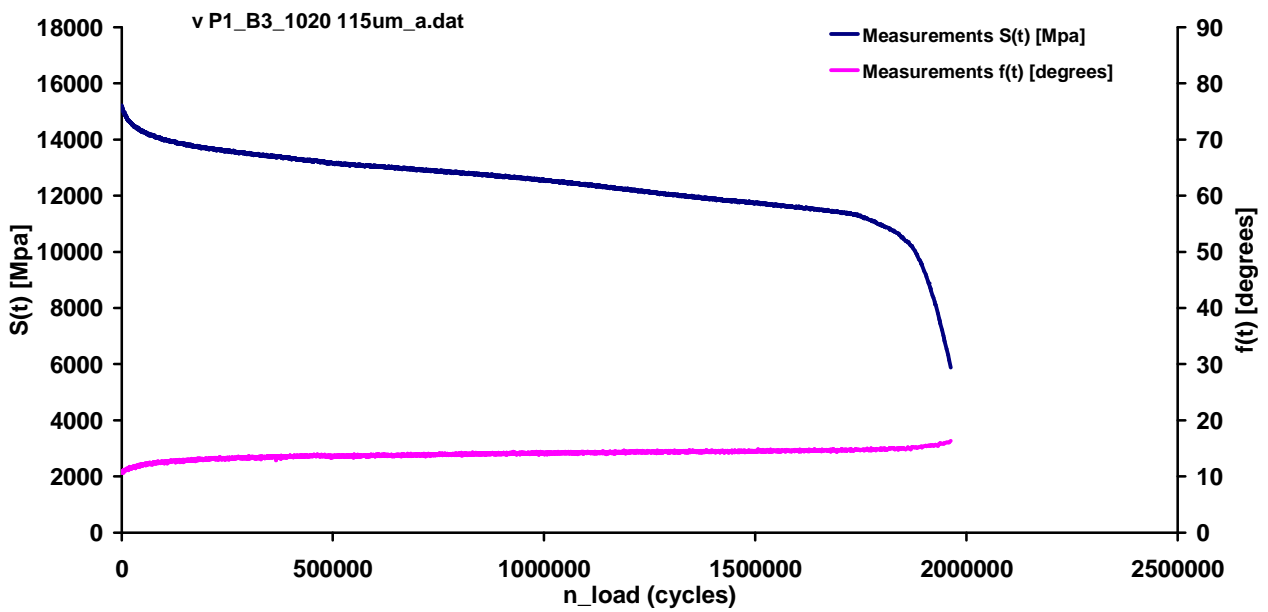
Figuur 3.15: Proeven 10/20 mengsel bij laag rekniveau (105 $\mu\epsilon$) -2



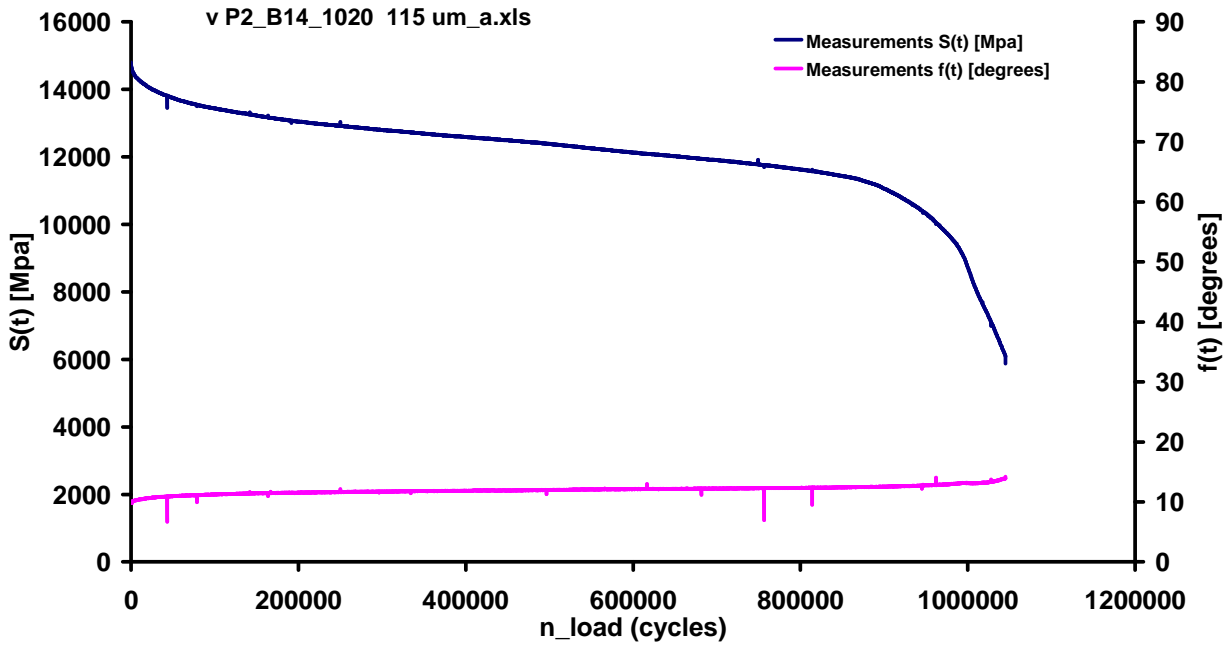
Figuur 3.16: Proeven 10/20 mengsel bij laag rekniveau (105 $\mu\epsilon$) -3



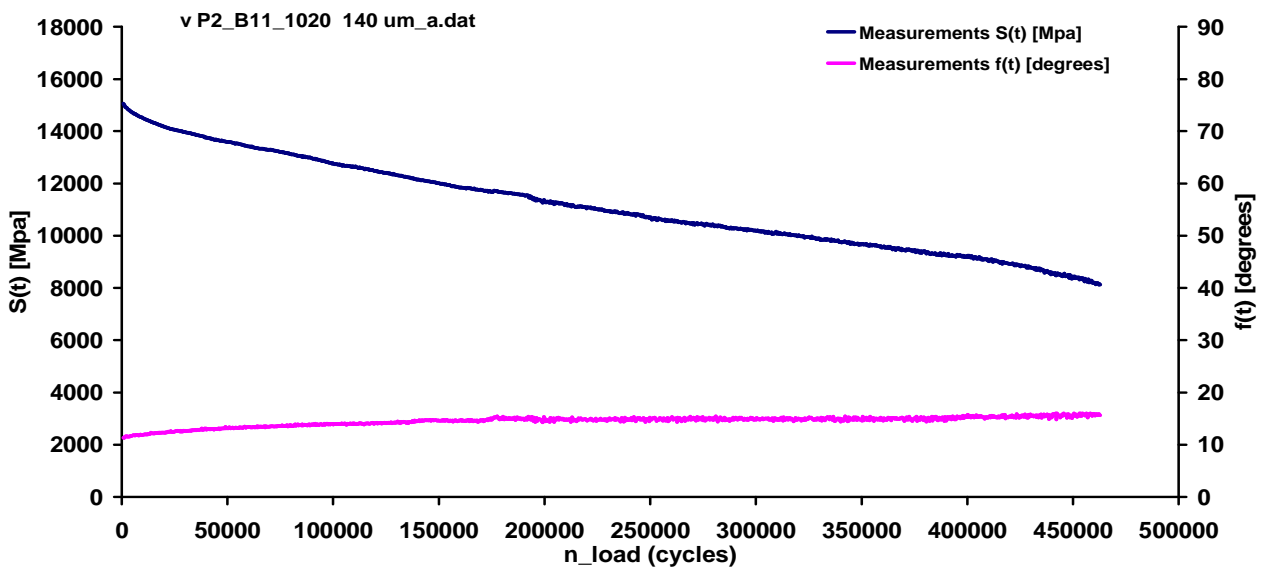
Figuur 3.17: Proeven 10/20 mengsel bij rekniveau 115 $\mu\epsilon$ -1



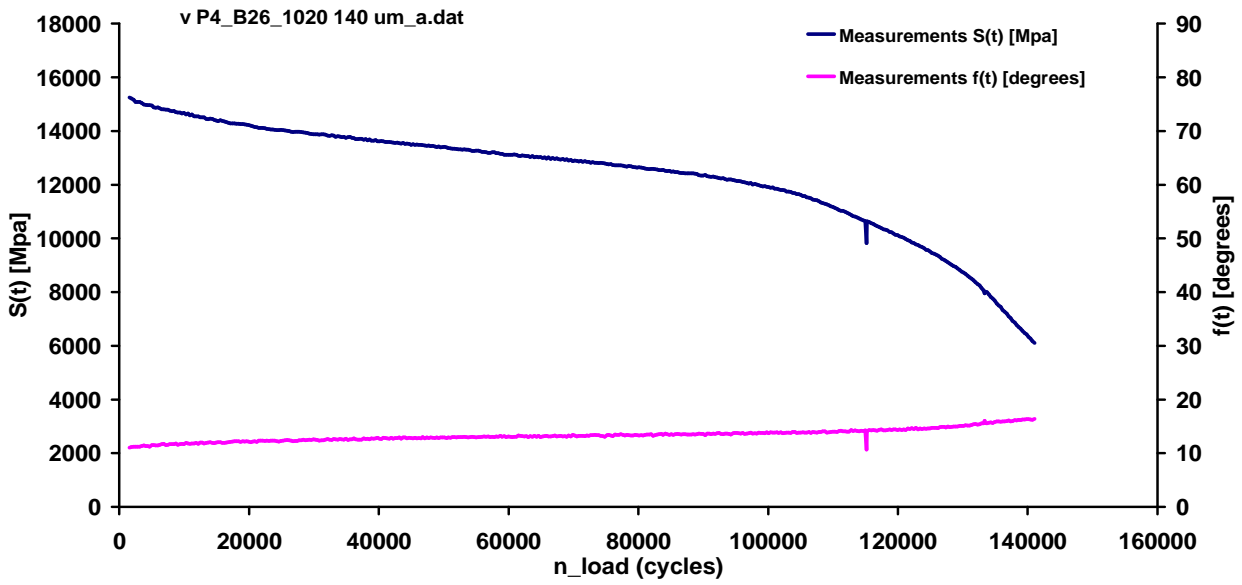
Figuur 3.18: Proeven 10/20 mengsel bij rekniveau 115 $\mu\epsilon$ -2



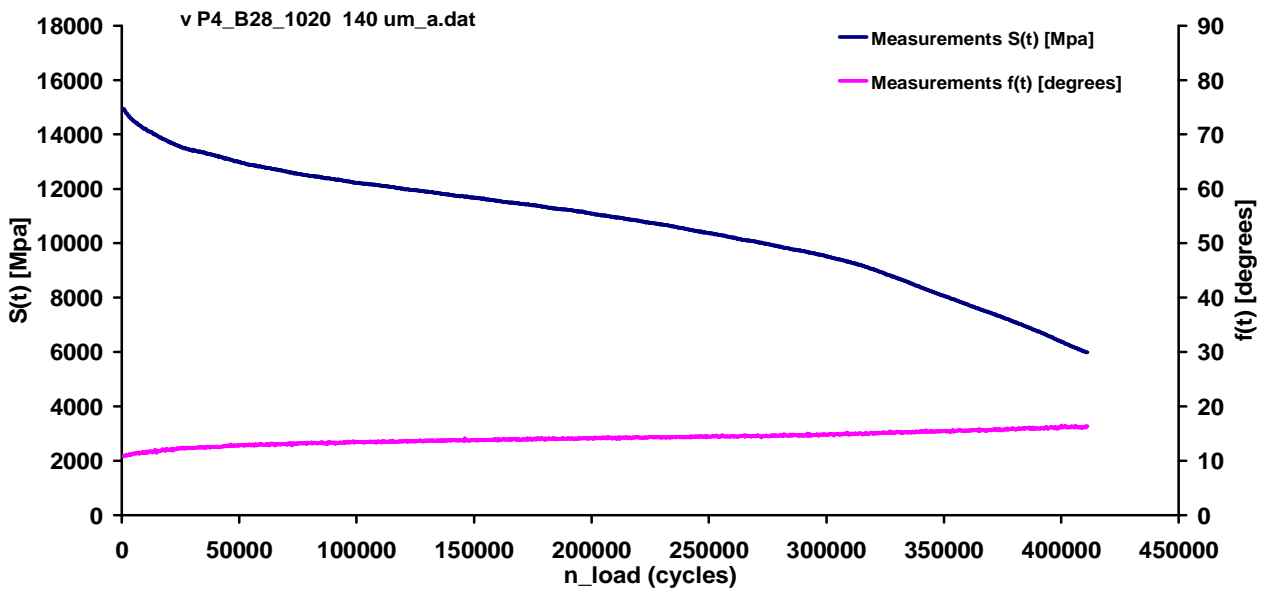
Figuur 3.19: Proeven 10/20 mengsel bij rekniveau 115 μE -3



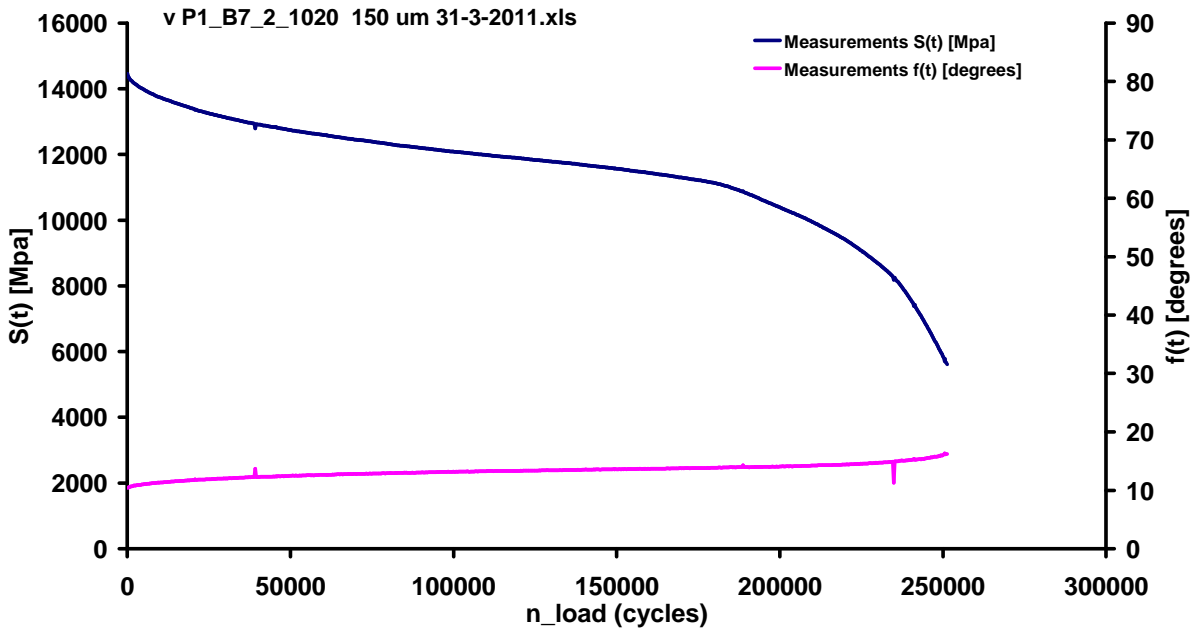
Figuur 3.20: Proeven 10/20 mengsel bij rekniveau 140 μE -1



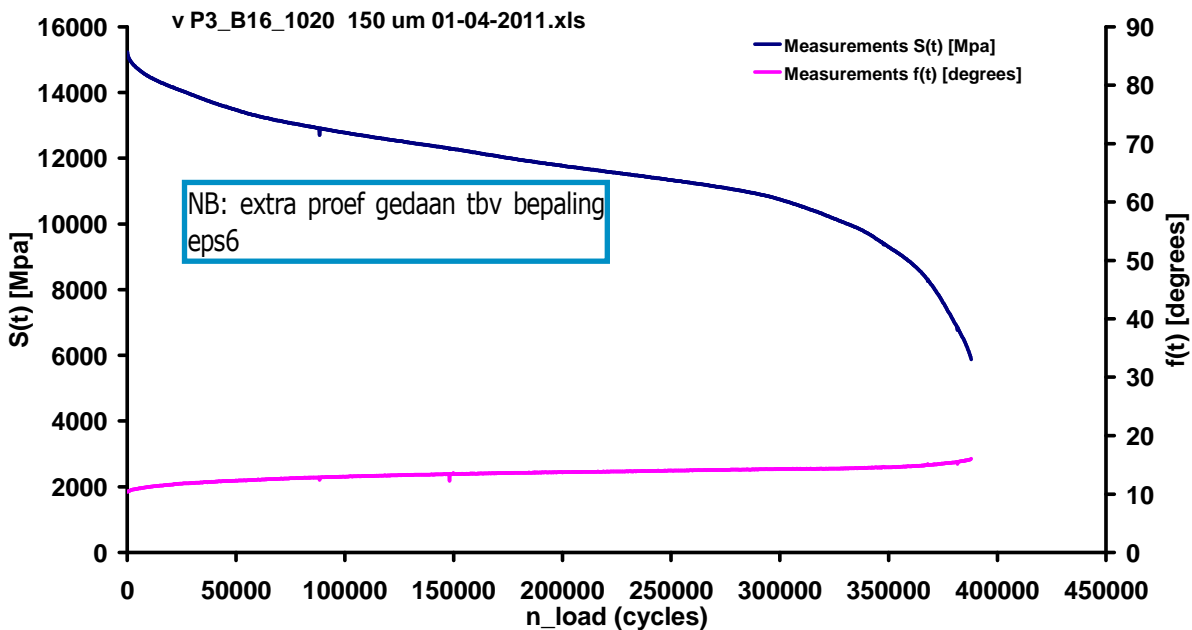
Figuur 3.21: Proeven 10/20 mengsel bij rekniveau 140 μE -2



Figuur 3.22: Proeven 10/20 mengsel bij rekniveau 140 μE -3



Figuur 3.23: Proeven 10/20 mengsel bij hoog rekniveau (150 $\mu\epsilon$)-1



Figuur 3.24: Proeven 10/20 mengsel bij hoog rekniveau (150 $\mu\epsilon$)-2

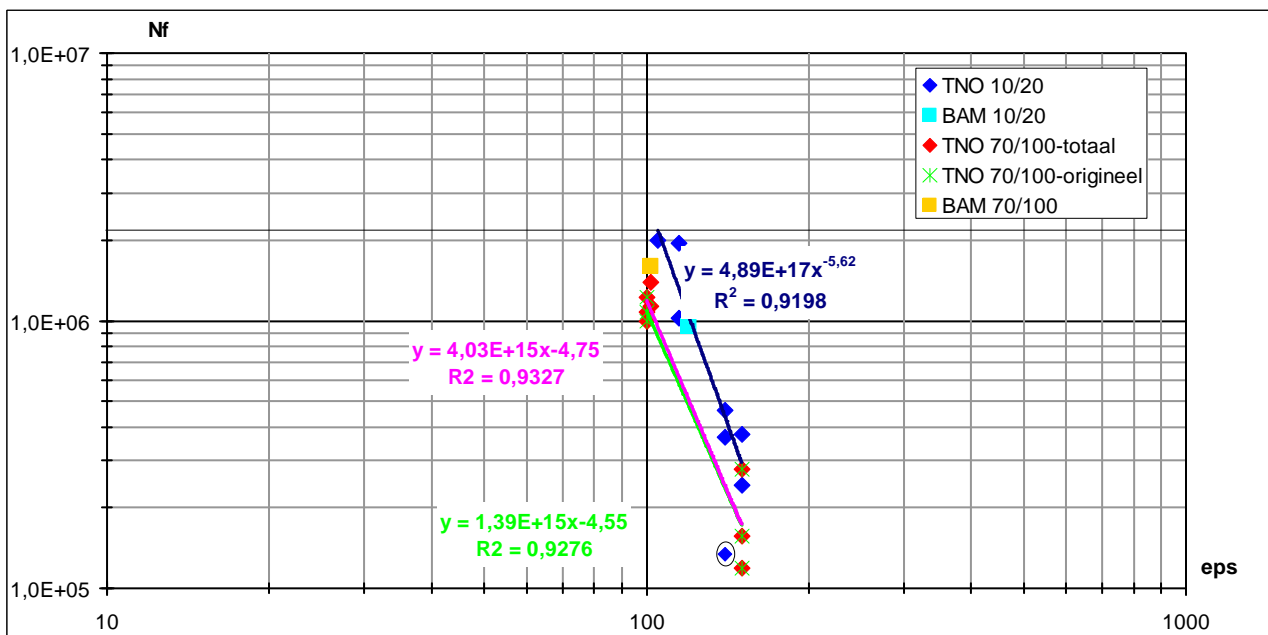
3.5 Bepaling ϵ_6

Voor beide mengsels is de ϵ_6 bepaald op grond van de resultaten van de continue proeven. In Tabel 3.1 zijn de resultaten van de proeven opgenomen en in Figuur 3.25 zijn ze grafisch weergegeven inclusief de gefitte vermoeiingslijnen waaruit ϵ_6 is bepaald. Van de N-e relaties zijn de formules opgenomen in de grafiek. Zoals uit de data blijkt zijn de proeven in twee verschillende laboratoria uitgevoerd (BAM en TNO). Zoals te zien is, zijn de vermoeiingsresultaten van beide labs goed vergelijkbaar. De verschillen in de gevonden stijfheden waren groter, op grond daarvan is er een vergelijkend onderzoek gedaan op een delron kalibratie balk. De resultaten daarvan zijn opgenomen in BIJLAGE E.

proefstuk	pen	rekniveau	gebruikt voor eps 6? Reden
P1B1	70/100	100	J
P2B10	70/100	100	J
P4B26	70/100	100	J
P3B19	70/100	150	J
P3B20	70/100	150	J
P4B22	70/100	150	J
P1B2	10/20	105	N- afgeslagen, midden inklemming teruggelopen
P1B4	10/20	105	J
P3B15	10/20	105	N- afgeslagen, midden inklemming teruggelopen naar 100 N
P2B14	10/20	115	J
P1B1	10/20	115	N- afgebroken en weer gestart (onbedoelde discontinue proef)
P1B3	10/20	115	J
P2B11	10/20	140	J
P4B26	10/20	140	J
P4B28	10/20	140	J
P1B7	10/20	150	J
P3B16	10/20	150	J- aanvullend voor eps 6

Tabel 3.1: Resultaten continue proeven

De onderstaande figuur maakt zichtbaar dat bij het hoge rekniveau een balk (P4B26) van het 10/20 mengsel als uitbijter beschouwd moet worden. De betreffende N waarde ligt niet alleen ver verwijderd van de overige 4 resultaten op dit rekniveau, het ligt zelfs lager dan de 70/100 vermoeiingslijn. Weglaten van dit punt in de regressie levert een vermoeiingslijn die meer conform verwachting is en een veel betere R² heeft (0,92) dan met medeneming van dit punt (R²=0,77). In de grafiek is het betreffende punt niet in de regressielijn meegenomen, maar wel geplot met een cirkel eromheen.



Figuur 3.25: Vermoeiingslijnen continue proeven

De uit de regressie bepaalde ε₆ waarden zijn 102 με voor het 70/100 mengsel (originele dataset) en 121 με voor het 10/20 mengsel. Bij de bepaling zijn de regressie constanten uit de Excel regressielijnen gebruikt:

Healing Van Asfalt Mengsels

$$N = A\varepsilon^b \Leftrightarrow$$

$$\varepsilon = 10^{\frac{\log(N) - \log(A)}{b}} \Leftrightarrow$$

$$\varepsilon_6 = 10^{\frac{\log(1e^6) - \log(A)}{b}}$$

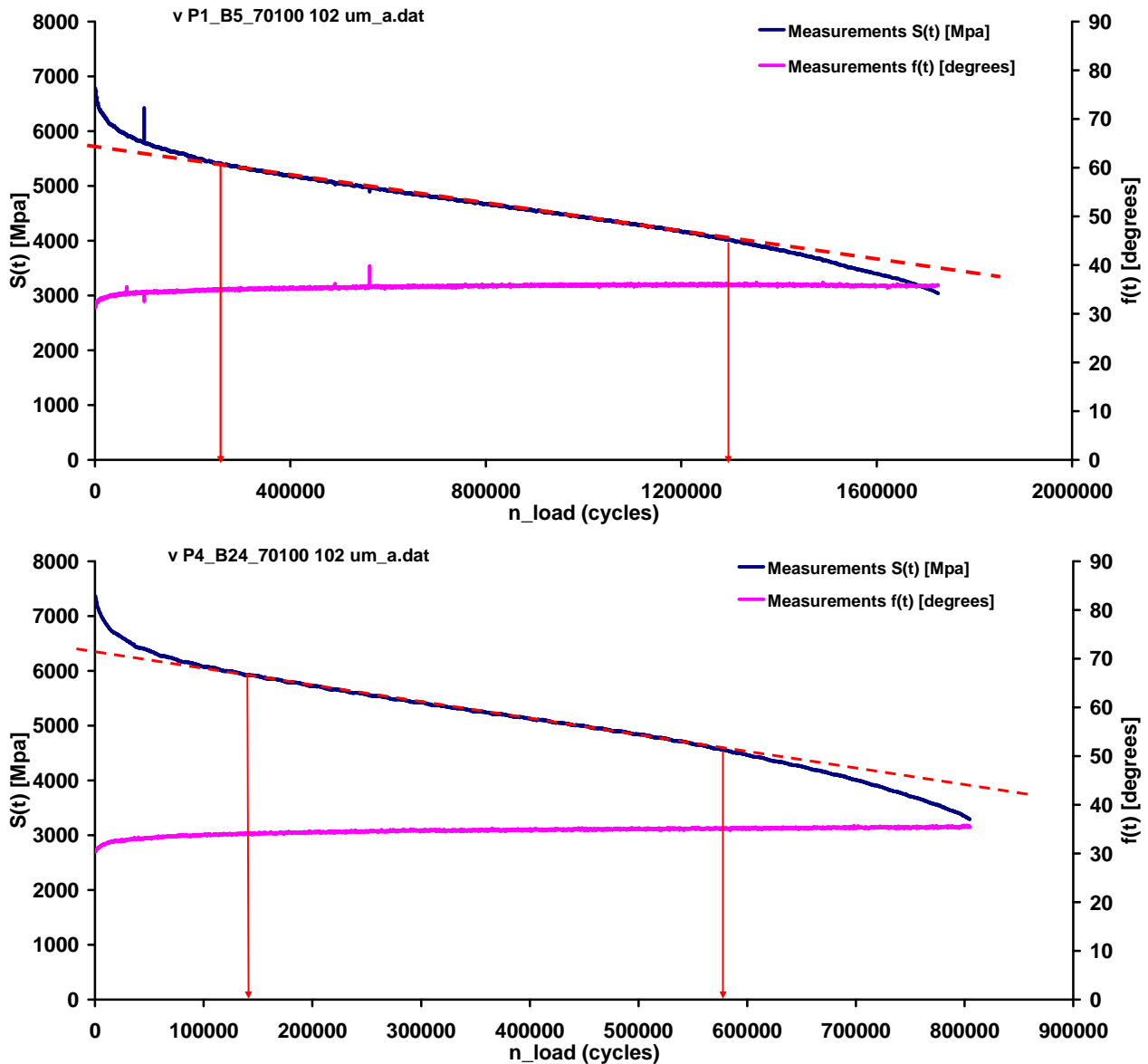
En dat geeft de volgende regressie constanten en vermoeiingsweerstand:

mengsel	bron	A	b	R ²	ε_6
10/20	TNO	4,89E+17	-5,62	0,9198	121
10/20	TNO&BAM	3,96E+17	-5,57	0,920	120
70/100	TNO-origineel	1,39E+15	-4,55	0,9276	102
70/100	TNO-orig&aanvullend	4,03E+15	-4,76	0,9327	104
70/100	TNO-totaal & BAM	8,00E+15	-4,91	0,9256	105

Tabel 3.2: Regressie constanten voor de vermoeiingsrelatie en waarden voor ε_6

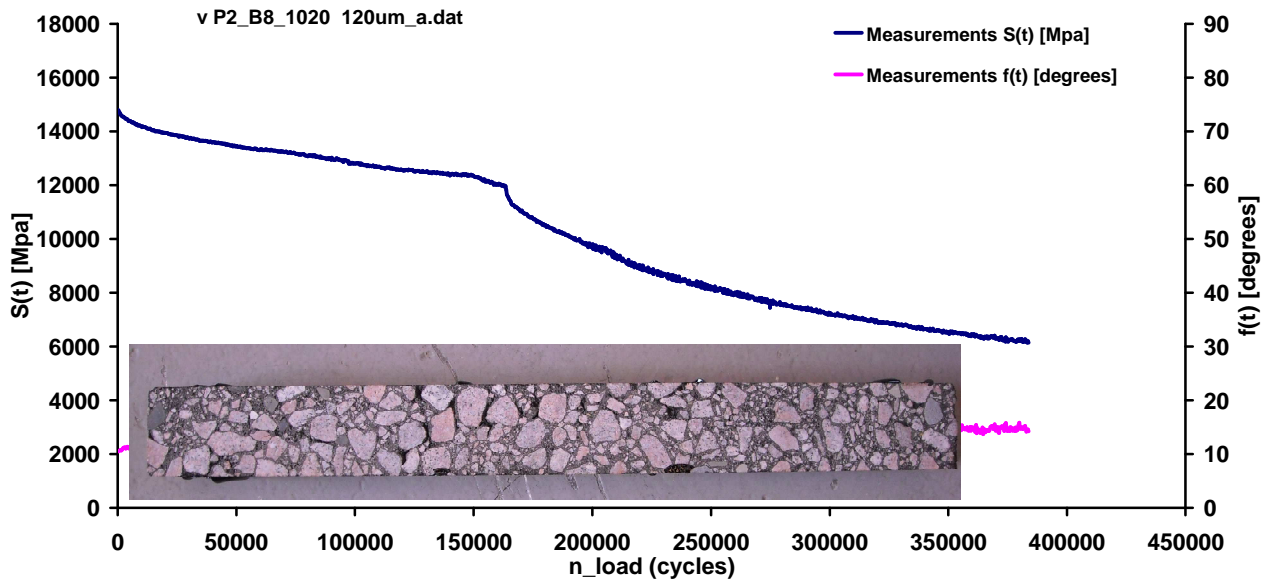
Er staan in deze tabel verschillende waarden voor elk van de mengsels omdat de precieze fit en bijbehorende ε_6 waarde variëren als de data sets veranderen. De ε_6 waarden zijn aan het begin van het onderzoek bepaald aan de hand van een set continue proeven in het TNO-Bouwlab. Later zijn er ook proeven, continue en discontinue, gedaan bij BAM. Tussen deze proevenseries zat ongeveer een half jaar. Om in de vergelijking tussen beide laboratoria het effect van het besterven van het mengsel uit te sluiten, zijn gelijktijdig met de proeven bij de BAM ook extra proeven in het TNO lab gedaan, voor het 70/100 mengsel naast discontinue ook continue proeven. In bovenstaande tabel zijn, naast de originele data sets, ook de gegevens voor de aanvullende proeven opgenomen. Het effect op de ε_6 waarden is beperkt. De vetgedrukte, originele waarden zijn de rekniveaus waarmee de discontinue proeven zijn uitgevoerd.

Om een indicatie te krijgen van het stijfheidsverloop bij deze rekniveaus, als tussenstap om het aantal belastingscycli in een belastingsperiode in de discontinue proef te bepalen, zijn er eerst ook nog continue proeven bij deze ε_6 - waarden gedaan. De resultaten staan hieronder.



Figuur 3.26: Continue proeven 70/100 mengsel bij ϵ_s (102 $\mu\epsilon$)

De curves voor het 70/100 mengsel lijken op het eerste gezicht aardig op elkaar, maar bij het bepalen van het lineaire deel (bij de eerste proef tussen ca 250.000 en 1.300.000 cycli, bij de tweede proef tussen ca 150.000 en 575.000 cycli) blijkt weer eens dat de variatie in de vierpuntsbuigproef groot is. Dit maakt het lastig om een standaard afbreekpunt te bepalen. In dit geval moet dit punt ergens tussen de 250.000 en 575.00 cycli liggen.



Figuur 3.27: Proef 10/20 mengsel bij ϵ_6 met een foto van het proefstuk

Het proefstuk van het 10/20 mengsel dat is onderzocht bij ϵ_6 liet een grillig stijfheidsverloop zien. Mogelijk heeft dat te maken met inhomogeniteit van het proefstuk (zie de in de grafiek opgenomen foto). Het maakt het lastig om te bepalen wat in dit geval een goede keuze voor het aantal cycli in een belastingperiode zou zijn. Toch is er geen extra proef bij ϵ_6 uitgevoerd, aangezien het totaal aantal beschikbare proefstukken door problemen met loslatende beugels in het begin van het onderzoek al was gekrompen. Om te voorkomen dat er onvoldoende proefstukken beschikbaar zouden zijn voor de discontinue proeven, is ervoor gekozen het aantal cycli in de lastperiode te bepalen aan de hand van de al beschikbare data en geen extra proef uit te voeren.

Het aantal cycli is vastgesteld op 400.000 en is, om een vergelijking mogelijk te maken, natuurlijk voor beide mengsels gelijk.

4 Oorspronkelijke benadering discontinue proeven

4.1 Oorspronkelijke proefcondities discontinue proeven

Op grond van de resultaten van de continue proeven in het vorige hoofdstuk is ervoor gekozen om een belastingperiode van 400.000 cycli te gebruiken. Dit valt net voor de helft van het aantal cycli, uitgaande van N ca 1×10^6 . De proefcondities voor de eerste discontinue proeven komen daarmee op:

Pen in het mengsel	10/20	70/100
Belastingperiode	400.000 cycli	400.000 cycli
Rustperiode	24 uur	24 uur
Rekniveau (ϵ_6)	121 $\mu\epsilon$	102 $\mu\epsilon$
Temperatuur	20°C	20°C
Frequentie	30 Hz	30 Hz

Tabel 4.1: *Conditie eerste discontinue proeven*

In principe zijn alle condities voor beide mengsels gelijk. Omdat de ϵ_6 per mengsel anders is, is het ingestelde rekniveau dat ook. Op grond van de resultaten in de eerste discontinue proeven worden de condities voor het vervolg bepaald. De mate waarin healing zich manifesteert hangt grotendeels af van de rustperiode. Natuurlijk speelt de mate van schade ook een rol: een vrijwel bezwaken proefstuk zal in dezelfde rustperiode minder ver herstellen dan een proefstuk dat nauwelijks beschadigd is. Uitgaande van een zich geleidelijk ontwikkelende schade in het lineaire deel van de vermoeiingsproef is de variatie in schade niveau echter niet groot. De rustperiode is ook bepalend voor de duur van de proef: 400.000 lastherhalingen bij 30 Hz duurt 3 hr 45min, dat is minder dan 1/6 van de rustperiode van 24uur. Dat maakt variaties in de rustperiode van cruciaal belang voor de uitvoerbaarheid van de proef.

4.2 Oorspronkelijke bepaling healing: met modellen

De oorspronkelijk benaderingswijze bestond hieruit dat healing proeven zouden worden uitgevoerd bestaande uit tenminste twee belastingperioden van elk enkele honderdduizenden cycli met daartussen rustperioden. De resultaten (verloop van stijfheid) zou worden gefit met een model. Hierbij zou het model eerst op de eerste belastingperiode worden gefit om een continue proef te representeren en vervolgens op de beide belastingcycli om het effect van de rust periode mee te nemen. Uit het verschil in het aantal cycli tot wanneer de "continue fit" en de "fit met rustperiode" de helft van de initiële stijfheid zouden bereiken, kan dan een waarde voor de healing worden bepaald. In 3.1.1 is dit uitgelegd aan de hand van het Partial Healing model (Pronk et al. 2009). In deze paragraaf wordt, vanwege de complexiteit van dit model, ook een eenvoudiger model op deze manier toegepast.

De werkwijze voor beide modellen is gelijk en wordt hieronder stapsgewijs beschreven en grafisch weergegeven in Figuur 4.1, een figuur die ook is gebruikt in paragraaf 3.1.1 waar dit meer in detail is beschreven.

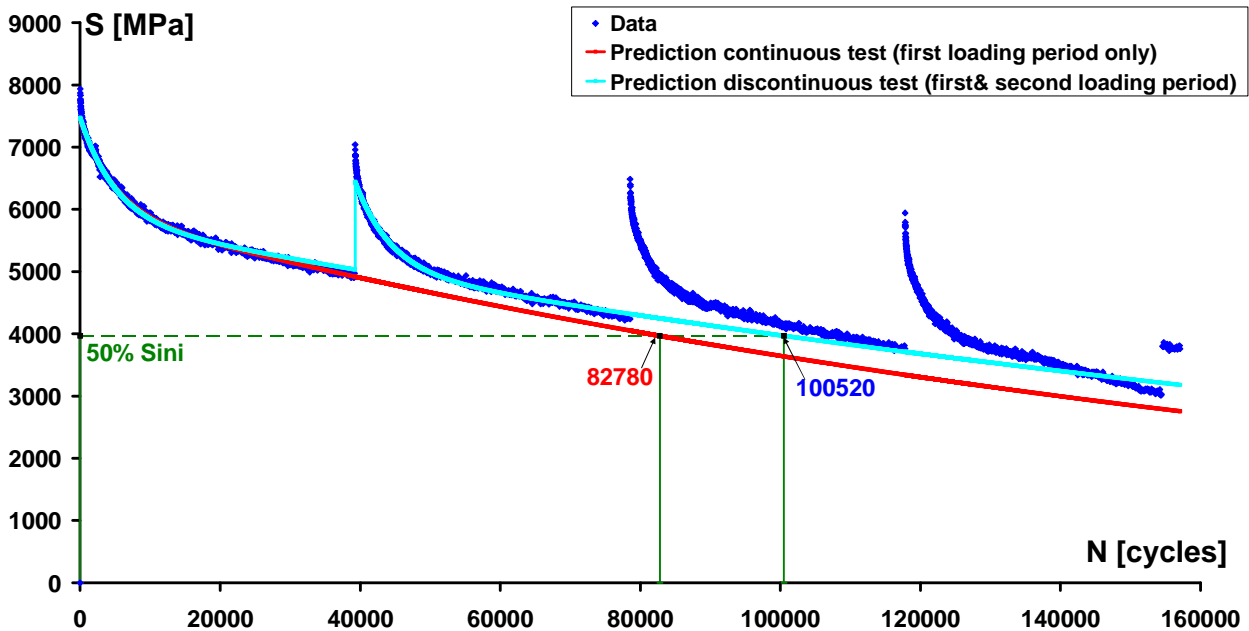
Alleen de eerste belastingperiode wordt gefit met een model (rode lijn in Figuur 4.1) bestaande uit een afname volgens een negatieve e-macht plus een lineair dalende tak.

De eerste twee belastingperioden samen worden gefit met een model (lichtblauwe lijn in de Figuur 4.1) dat in principe ook bestaat uit een negatieve e-macht plus een lineair dalende tak. Aan dit model wordt echter een extra component toegevoegd die een stijfheidherstel in de rustperiode en een vernieuwde stijfheidsval (weer volgens een negatieve e-macht) na de rustperiode beschrijft. Daarbij wordt voor het stijfheidsverloop voor en na de rustperiode dezelfde lineaire tak aangehouden

De healingfactor wordt bepaald uit het aantal belastingherhalingen dat volgens beide modellen behoort bij een (te kiezen) stijfheidsafname.

Voor de data in de figuur geeft dit $N_1 = 82780$ en $N_2 = 100520$ cycli en daarmee komt de healingsfactor op en $H = N_2/N_1 = 1,21$. Dat lijkt niet veel, maar in deze voorbereidende proef aan de TUD is gebruik gemaakt van een

overgebleven balk van eerder onderzoek. De balk is dus al ouder en het materiaal verouderd, waardoor de healingsfactor zelf niet zoveel zegt.



Figuur 4.1: Oorspronkelijke aanpak bepaling healingsfactor

4.3 Discontinue proeven en het toepassen van de modellen

De meetresultaten uit de proef, het verloop van de stijfheid (en fasehoek bij gebruik PH model), wordt beschreven met modellen. De parameters van de modellen worden bepaald door middel van regressie analyse. In de volgende paragrafen wordt dit beschreven voor het PH-model en het eenvoudige model.

4.3.1 Het PH model

De regressie met het PH model houdt in dat we de wiskundige vergelijkingen achter dit model (BIJLAGE B) gebruiken om het verloop van de stijfheid en fasehoek als functie van het aantal lastherhalingen te beschrijven. We doen dit iteratief, gebruik makend van de Solver of Oplosser functie in Excel. Dit betekent dat we beginnen met de vergelijkingen van het PH model en beginwaarden, eerste benaderingen, van de constanten hierin. Excel past die beginwaarden vervolgens binnen de opgegeven grenzen aan om de berekende stijfheid zo dicht mogelijk bij de gemeten stijfheid te krijgen. De oplossing die over alle meetpunten het minste afwijkt, wordt de regressie met het PH-model.

Nu beschrijft het model zowel het verloop van de stijfheid als dat van de fasehoek. Daardoor wordt niet de S_{mix} direct beschreven, maar zijn reële en imaginaire componenten, de zogenaamde loss ($\hat{S}\{t\} \sin(\phi\{t\})$) en storage ($\hat{S}\{t\} \cos(\phi\{t\})$) modulus.

Storage modulus:

$$G\{t\} = \hat{S}\{t\} \cos(\phi\{t\}) =$$

$$G\{t\} = G_0 - F_0 \left(\frac{\alpha_2}{C} e^{-B \cdot t} \sinh\{C \cdot t\} + \frac{\gamma_2}{\gamma_1} (1 - e^{-B \cdot t} (\cosh\{C \cdot t\} + E \sinh\{C \cdot t\})) \right)$$

Loss modulus:

$$F\{t\} = \hat{S}\{t\} \sin(\phi\{t\}) =$$

$$F\{t\} = F_0 e^{-B \cdot t} (\cosh\{C \cdot t\} + D \sinh\{C \cdot t\})$$

Met:

$$\alpha_1 = \delta \pi \varepsilon^2 f \alpha_1^*$$

$$\alpha_2 = \delta \pi \varepsilon^2 f \alpha_2^*$$

$$\gamma_1 = \delta \pi \varepsilon^2 f \gamma_1^*$$

$$\gamma_2 = \delta \pi \varepsilon^2 f \gamma_2^*$$

$$B = \frac{\alpha_1 + \beta^* \varepsilon^2 + \gamma_1}{2}$$

$$C = \sqrt{B^2 - (\beta^* \varepsilon^2) \gamma_1}$$

$$D = \frac{\beta^* \varepsilon^2 - B}{C}$$

$$E = \frac{B - \gamma_1}{C}$$

Hierbij is G_0 de startwaarde (waarde aan het begin van de proef) van de storage modulus en F_0 die van de loss modulus. De constanten $\alpha_1, \alpha_2, \beta, \gamma_1, \gamma_2$ zijn parameters van het model. In totaal zijn er dus 7 parameters die worden gebruikt in de fit op de meetdata. Daarnaast zitten er constanten in de formules, gekoppeld aan de proefcondities. Dit zijn de proeffrequentie (f) en de daaruit te bepalen tijdwaarde tijdens de proef ($t[s]=N / f$ [Hz]) en het rekniveau (ε).

Bij het fitten wordt het verschil tussen de berekende en gemeten loss en storage modulus geminimaliseerd door de constanten iteratief aan te passen.

De S_{mix} wordt vervolgens berekend uit de voorpelde lstorage en loss modulus door:

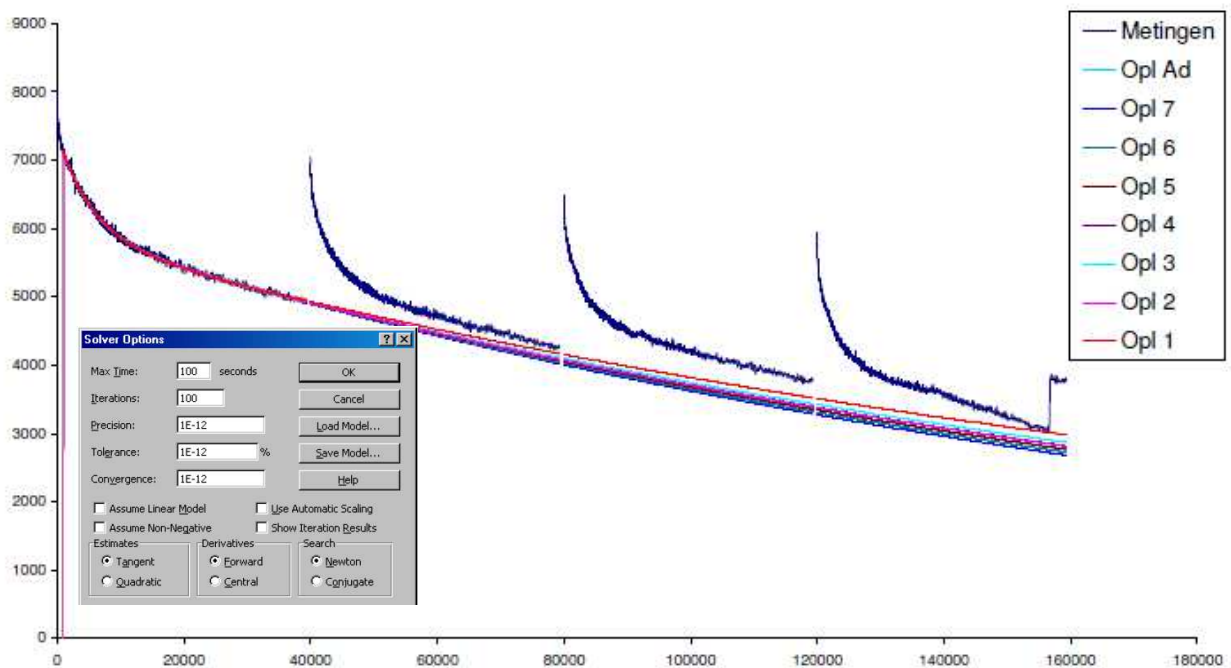
$$S_{mix}(t) = \sqrt{\{\widehat{S}(t)\cos(\phi(t))\}^2 + \{\widehat{S}(t)\sin(\phi(t))\}^2}$$

De fasehoek is te berekenen door de arctan van de loss gedeeld door de storage modulus te bepalen. In de regressie wordt voor elk meetpunt de loss modulus en storage modulus bepaald aan de hand van de startwaarden voor de 7 constanten. Dan worden S_{mix} en fasehoek berekend. Vervolgens wordt het verschil tussen de berekende en de gemeten waarde van alle vier deze eigenschappen bepaald en dit verschil wordt gekwadrateerd en opgeteld voor alle meetpunten. De som van deze totale verschillen tussen meting en voorspelling over de vier eigenschappen wordt vervolgens zo klein mogelijk gemaakt door de waarden van de 7 regressie parameters te variëren. Deze iteratie wordt in de Solver automatisch uitgevoerd, waarbij wel bepaalde instellingen voor de iteraties en randvoorwaarden voor het variëren van de regressie parameters worden meegegeven (BIJLAGE B). Hoewel deze exercitie als de formules eenmaal goed geprogrammeerd zijn dus grotendeels automatisch is, zal het duidelijk zijn dat bovenstaande procedure niet eenvoudig te doorzien is.

Toen bij het proefdraaien bleek dat de gevonden resultaten afhangen van de gekozen startwaarden van de parameters, gaf dit enige zorgen over de praktische toepasbaarheid van de methode. Het scherper zetten van de instellingen van de Excel solver (zie inzet in Figuur 4.2 voor de gebruikte instellingen) heeft de afhankelijkheid van de startwaarden wel verminderd maar niet geheel weggenomen. Dit is te zien in Tabel 4.2 en Figuur 4.2. Het probleem was vooral dat de constante β_c^* (BIJLAGE B) behalve bij oplossing 2, nauwelijks van zijn plaats kwam in de regressie; de eindwaarden zijn nagenoeg gelijk aan de gekozen startwaarden. De oplossingen liggen in R^2 dicht bij elkaar en in alle gevallen is de R^2 hoog. De ongemarkeerde oplossing 3 heeft de hoogste R^2 en is in voorgaande analyses gebruikt.

	Opl 1	Opl 2	Opl 3	Opl 4	Opl 5	Opl 6	Opl 7	Opl Ad
$F_{0,c} =$	3747,583	3755,130	3752,445	3754,806	3757,140	3759,423	3761,674	3757,397
$G_{0,c} =$	6352,051	6391,623	6377,387	6389,965	6402,459	6414,902	6427,283	6404,458
$\alpha^*_{1,c} =$	218,9527	232,4817	227,4949	231,8779	236,3519	240,8820	245,4861	236,9586
$\alpha^*_{2,c} =$	848,0952	912,9642	888,9598	910,1320	931,7548	953,8414	976,3735	935,3126
$\gamma^*_{1,c} =$	61,80869	64,46996	63,55808	64,36602	65,13186	65,86217	66,55898	65,26409
$\gamma^*_{2,c} =$	99,95008	109,1035	105,9605	108,7370	111,3780	113,8958	116,3005	111,8008
$\beta^*_c =$	30001,07	33132,26	31999,45	32998,73	33997,78	34996,89	35996,05	34162,00
$R^2 =$	0,995414	0,995508	0,995510	0,995510	0,995480	0,995422	0,995337	0,995472

Tabel 4.2: Invloed startwaarden op resultaat PH-model (zie Figuur 4.2 voor invloed op de fit)



Figuur 4.2: Invloed startwaarden op resultaat PH-model (legenda verwijst naar Tabel 4.2)

De variatie in resultaten is weliswaar niet groot, maar voor een robuust protocol is het van belang dat bij het invoeren van een gegeven dataset, iedereen altijd op dezelfde resultaten uitkomt. Als dat niet het geval is, afhankelijk van de gekozen start waarden kan dat discussie geven over de gevonden healingswaarde. Dit speelt zeker omdat de healingswaarde bepaald wordt door N_1 en N_2 op elkaar te delen. Beide waarden worden gevonden door het extrapoleren van de fit van het model. Al liggen de oplossingen dicht bij elkaar, de lijnen waaiëren uit. Hierdoor neemt het verschil bij het voorspellen van de N waarde waarbij de halve stijfheid wordt bereikt, snel toe. Dit heeft direct invloed op de bepaalde healingswaarde.

Bovenstaande omschrijft het fitten van de eerste belastingperiode, dus feitelijk de voorspelling van de continue proef. Om het effect van de rustperiodes mee te nemen, worden ook de eerste en tweede belasting periode tezamen gefit op soortgelijke wijze, waarbij de start waarde voor de stijfheid in de tweede belastingperiode berekend wordt uit het herstel in de rustperiode. Voor meer details, zie BIJLAGE B paragraaf 2.03.

4.3.2 Het eenvoudige model

Vanwege de zorgen in de vorige paragraaf beschreven zorgen over de praktische toepasbaarheid van het PH-model, is er in de analyse ook een eenvoudigere benadering meegenomen. Hierbij wordt het verloop van de stijfheid beschreven door:

$$S_{mix}(t) = C_1 + C_2 * t + C_3 * e^{C_4 * t}$$

Hierbij zijn C1 tot en met C4 de regressieparameters en t net als hierboven het tijdstip in de proef waarop gemeten wordt. Deze tijd is gekoppeld aan het aantal cycli via de proeffrequentie. Naast de eenvoudigere formule heeft deze benadering als voordeel dat startwaarden voor de regressieconstanten relatief eenvoudig bepaald kunnen worden. Dit is geïllustreerd in Figuur 4.3:

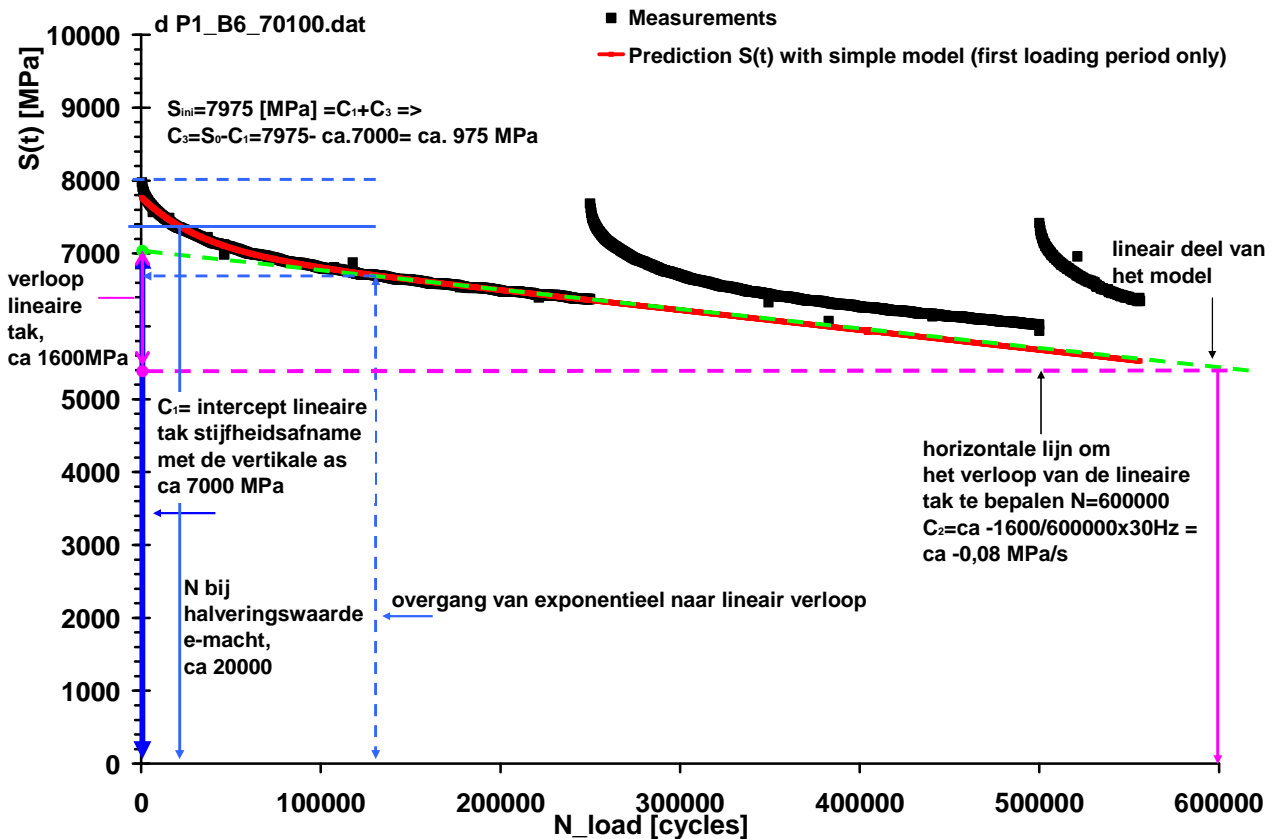
Op t=0 is $e^{C_4 * t} = 1$ en geldt dus dat $S_{mix}(0) = C_1 + C_3$; ca 7975 MPa

C_4 is een negatief getal, waardoor de e-macht daalt. Voor hogere waarde van t gaat de e-macht naar nul. Dan blijft er dus een lineair dalende tak over (het model beschrijft alleen fase 1 en 2 van de proef). Dat betekent dat C_1 de intercept van de lineaire tak met de verticale as geeft, ca 7000. C_3 is dan ook eenvoudig in te schatten (7975-ca. 7000 = ca. 975 MPa).

C_2 geeft de helling van de lineaire afname, ca $-1600 \text{ MPa} / (600000 \text{ cycli} \times 30 \text{ Hz}) = \text{ca } -0,08$

C_4 geeft de snelheid van de afname van de e-macht en kan geschat worden uit de halveringstijd van de exponentiële component, $\exp(C_4 * t) = 0,5$, de orde grootte van C_4 is $10^{-3} - 10^{-6}$. In dit geval wordt de halve waarde van de exponent bereikt bij ongeveer 20000 cycli, dus $C_4 = \ln(0,5) / t = \ln(0,5) / (N/f) = \ln(0,5) / (20 \times 10^3 \times 30) = 1,2 \times 10^{-6}$.

C_4 kan worden. Met deze startwaarden kan de Solver gevoed worden zodat hij tot een optimale oplossing kan komen.



Figuur 4.3: Betekenis van de parameters in het eenvoudige model (P1_B6_70100)

Ook hier geldt dat bovenstaande de fit op de eerste last periode beschrijft, voor de formules voor het fitten van de eerste en tweede last periode geldt dat deze eigenlijk hetzelfde zijn, behalve dat er onderscheid gemaakt moet worden tussen de eerste en tweede belasting periode. Verder wordt een soortgelijke fit uitgevoerd, met een nieuwe set parameters (BIJLAGE C).

In de volgende paragrafen worden beide modellen toegepast op de gemeten data in de discontinue proeven.

4.4 Discontinue proeven en de modelbenadering voor het 10/20 mengsel

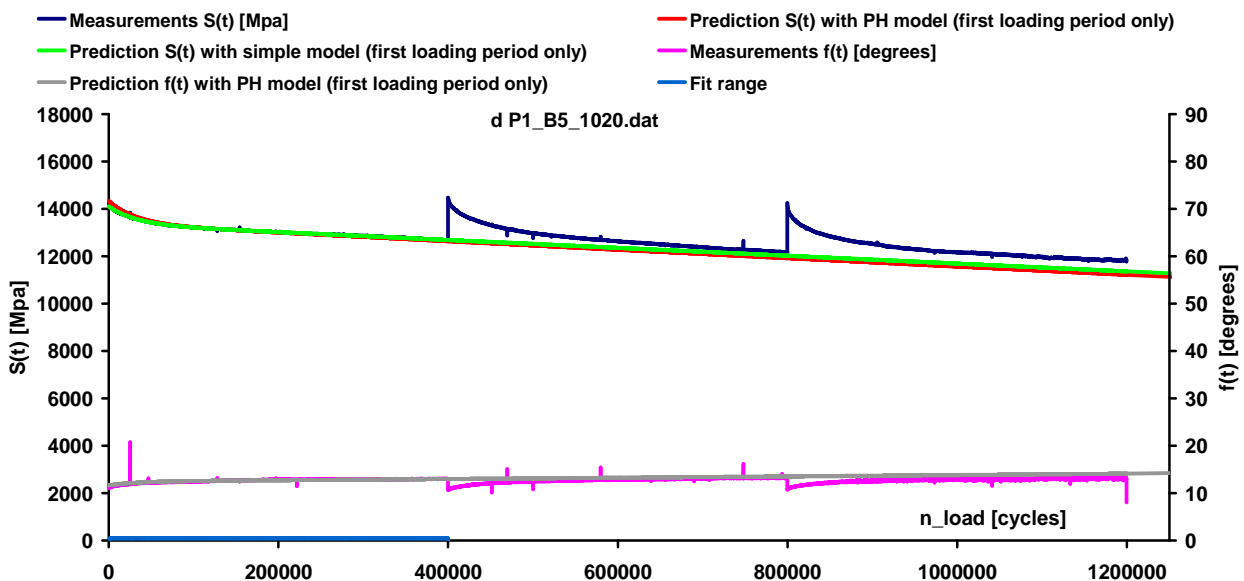
Er zijn vier proefstukken van het 10/20 mengsel discontinue beproefd, P1-B5 (balkje nr 5 uit plaat 1), P3-B19, P1-B6 en P1-B1. De eerste drie waren bedoeld als discontinue proeven en zijn beproefd bij $120 \mu\epsilon$, wat aansluit bij de in paragraaf 3.5 bepaalde ϵ_c waarde voor dit mengsel: $121 \mu\epsilon$. De verdere condities zijn 30Hz, 20°C , twee belastingsperioden van 400.000 belastingcycli elk en 24 uur rust tussen de twee belastingperiodes. De proef op P1-B1 was eigenlijk als een continue proef bedoeld, maar sloeg tussentijds af. Aan het eind van deze paragraaf wordt gekeken of er toch bruikbare informatie uit deze proef kan worden gehaald.

In de volgende paragrafen worden steeds 3 grafieken per proefstuk getoond, een voor de meetresultaten voor stijfheid en fasehoek, een voor de regressie en bepaling healingsfactor met PH model en een voor de regressie en bepaling healingsfactor met eenvoudig model.

4.4.1 P1_B5_1020

De proefresultaten zijn opgenomen in Figuur 4.4, inclusief de fit met beide modellen op de eerste belastingperiode. Dit maakt het mogelijk het verschil tussen beiden modellen en de wijze waarop ze de proefresultaten beschrijven te beoordelen. De donderblauwe lijn geeft de meetdata voor de stijfheid (de roze voor de fasehoek), deze lijnen geven ook de tweede rustperiode en de derde belastingperiode weer.

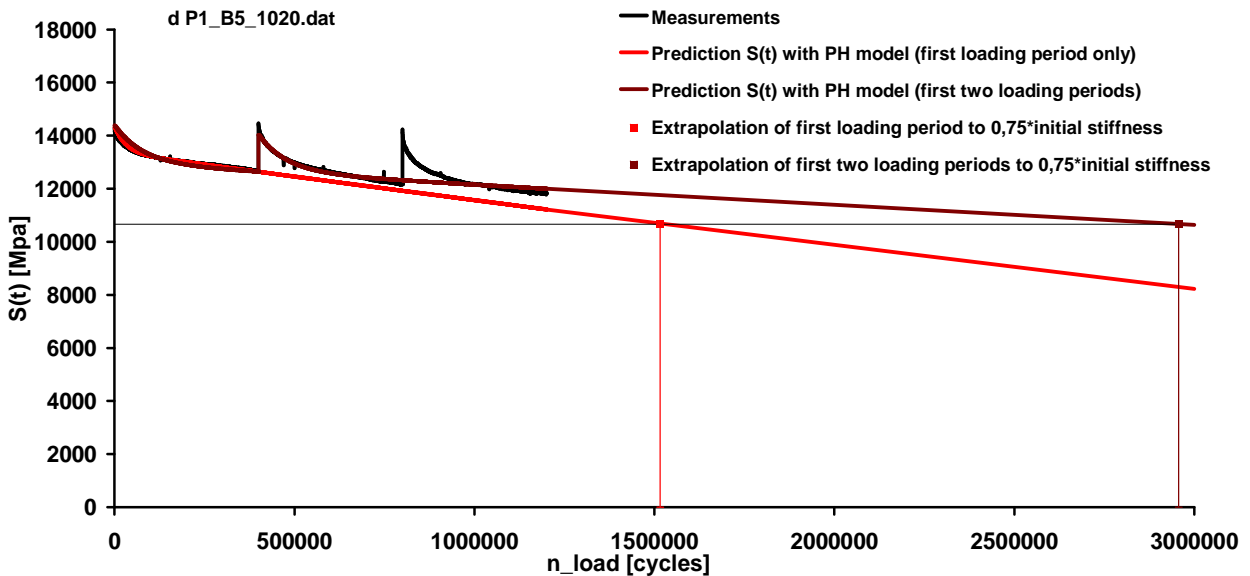
De modellen doen dat niet, die worden alleen op de eerste eerste last periode gefit (zie legenda). De rode lijn ("voorspelling discontinue proef") geeft de voorspelling van het PH model, de groene ("voorspelling eenvoudig model") geeft die van het eenvoudige model weer. Voor beide modellen levert de regressie een oplossing op die redelijk aansluit bij de data. Hierbij hebben beide modellen moeite met het begin van de proef, het PH model overschat de stijfheid bij aanvang en daalt in eerste instantie te langzaam om vervolgens iets door te schieten. Het eenvoudige model onderschat de start waarde wat, maar sluit daarna aardig aan.



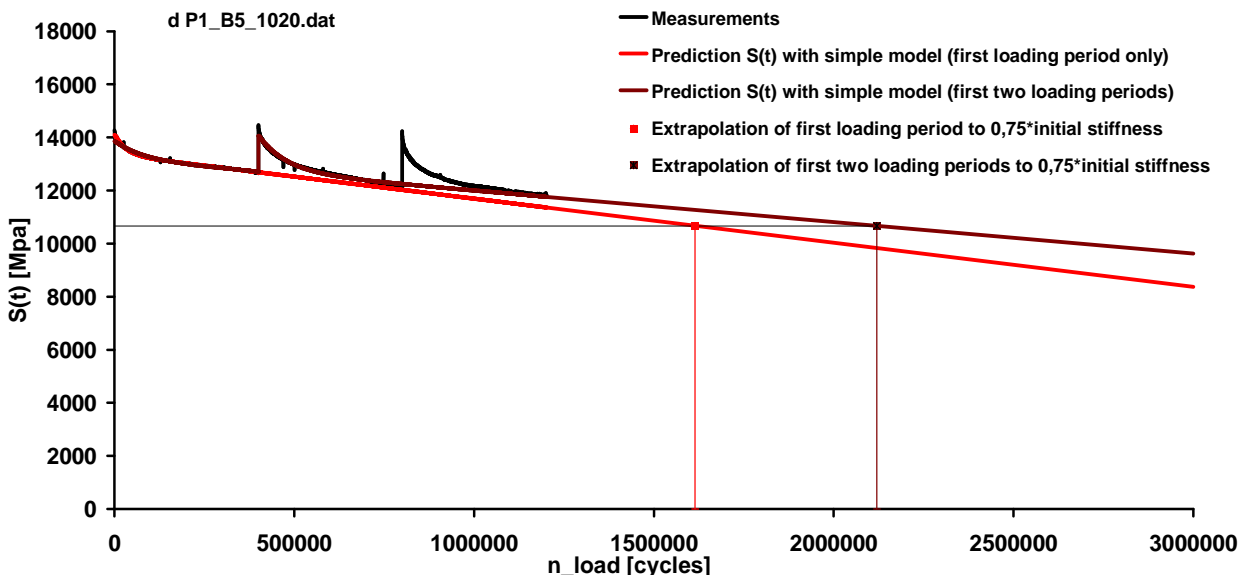
Figuur 4.4: P1_B5_1020, 120 μm , test datum 28-01-2011, meetresultaten en fit beide modellen

Aangezien beide modellen een redelijke fit opleveren, kan voor beide de healing bepaald worden. Dit is weergegeven in Figuur 4.5 voor het PH-model en Figuur 4.6 voor het eenvoudige model. In deze figuren zijn de modellen eerst alleen op de eerste belasting periode gefit om het verloop van de continue proef te simuleren. Vervolgens zijn ze op de eerste en tweede lastherhaling gefit. Van beide fits wordt bepaald bij welk aantal lastherhalingen de stijfheid gedaald is tot 75% van de oorspronkelijke waarde. Dit wijkt af van het eerder besproken voorbeeld (Figuur 4.1) waarin gekeken werd naar de bij de vermoeingsproef gebruikelijke daling tot 50%. Er is voor een afwijkende stijfheidswaarde gekozen omdat bij deze proef op valt dat er in 400.000 lastherhalingen weinig schade lijkt te ontstaan. Hierdoor moeten beide fits flink geëxtrapoleerd worden om 75% stijfheid te bereiken. Als we dit vergelijken met het voorbeeld in Figuur 4.1, dan liggen de punten voor de bepaling van de healingsfactor (gebaseerd op 50% ipv

75% stijfheid, dus een grotere mate van beschadiging) in die proef kort na de tweede last periode. In de in deze paragraaf beschreven proef zouden deze punten, als de proef was doorgezet, in of voorbij die vierde belastingperiode (die in deze proef ligt na $4 \times 400.000 = 1.600.000$ cycli) liggen. Dit is af te lezen uit onderstaande figuur. Indien was gekeken naar 50% stijfheidsreductie, zou er nog verder geëxtrapoleerd moeten worden en zouden de punten voorbij de drie miljoen cycli hebben gelegen. Hoewel de modellen een redelijke beschrijving van het gedrag geven, is deze niet exact. Hierdoor wordt bij verder extrapoleren het risico steeds groter dat de modellen iets voorspellen dat niet aansluit bij de realiteit. Omdat risico te beperken is gekozen voor een beperking van de stijfheidsval tot 75% in de healingsbepaling. Uit beide fits wordt afgelezen bij welk aantal cycli die 75% van de initiële stijfheid wordt bereikt. Door deze aantallen op elkaar te delen wordt de levensduurverlenging (healing) ten gevolge van de rustperiode gevonden.



Figuur 4.5: P1_B5_1020, 120 um, test datum 28-01-2011, healingfactor uit het PH model



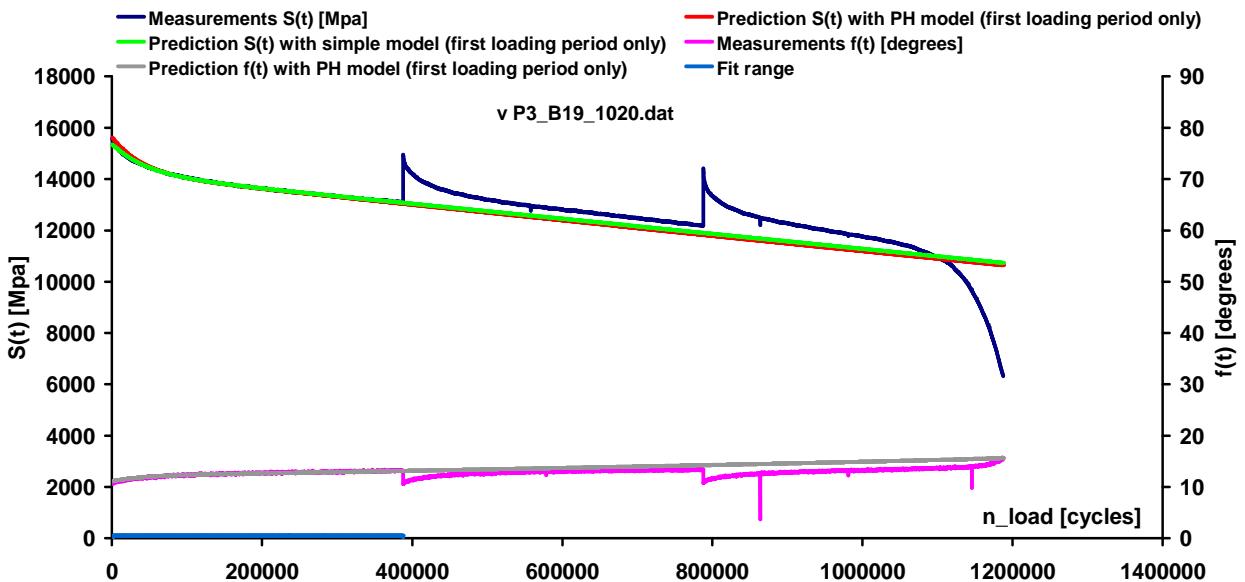
Figuur 4.6: P1_B5_1020, 120 um, test datum 28-01-2011, healingfactor eenvoudig model

De gevonden N-waarden zijn $N_1 = 1516113$ en $N_2 = 2956711$ voor het PH model en $N_1 = 1614468$ en $N_2 = 2119749$ voor het eenvoudige model. Daarmee komt de healingfactor voor het PH-model op 1,95 en voor het eenvoudige model op 1,31. Dit is een aanzienlijk verschil. Kijkend naar de fits van beiden modellen valt op dat het PH-model voor de fit op de eerste lastperiode de helling van de lineaire tak overschat, de rode lijn ligt hier onderlangs de zwarte data. De fit

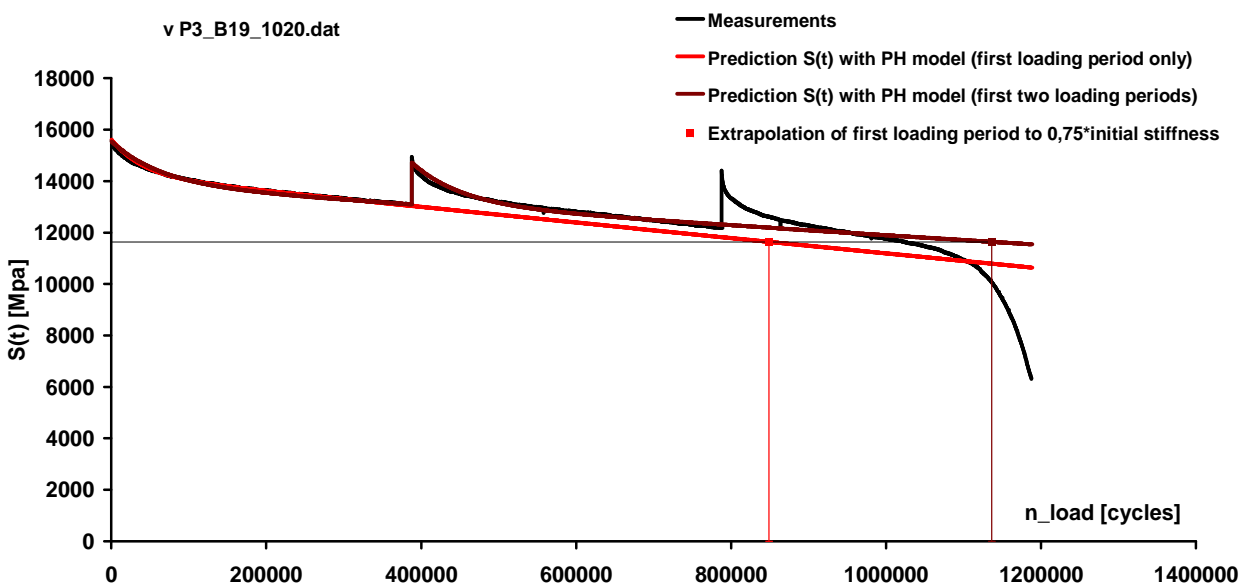
op twee last perioden vertoont het omgekeerde effect en is juist vlakker dan de data (de bruine lijn ligt boven de data). Dit laatste is te verwachten, omdat het model zoals eerder aangegeven een soort "gemiddelde" healing na rust perioden geeft. De mate waarin dit bij het PH-model het geval is, is echter groter dan bij het eenvoudige model. Doordat het PH-model in de fit op de eerste periode juist aan de lage kant ligt, wordt het effect van rustperioden in dit geval overschat. Voor het eenvoudige model geldt dat in beide gevallen de fit aan de onderkant van de data ligt. Bij de fit op de eerste lastperiode is dit verschil zo klein dat het nauwelijks te zien is, bij de fit op de tweede is het duidelijker. In beide gevallen wordt de schade dus overschat, maar omdat dit effect bij de fit op twee lastperioden groter is dan bij die op de eerste lastperiode zal de healing in dit geval wat onderschat worden. Door de extrapolatie wordt het verschil tussen beide modellen versterkt, waardoor healing in het PH-model wordt overschat en in het eenvoudige model onderschat. De werkelijke waarde zal dus tussen deze twee waarden liggen, waarschijnlijk dichterbij de 1,31 dan bij de 1,95.

4.4.2 P3_B19_1020

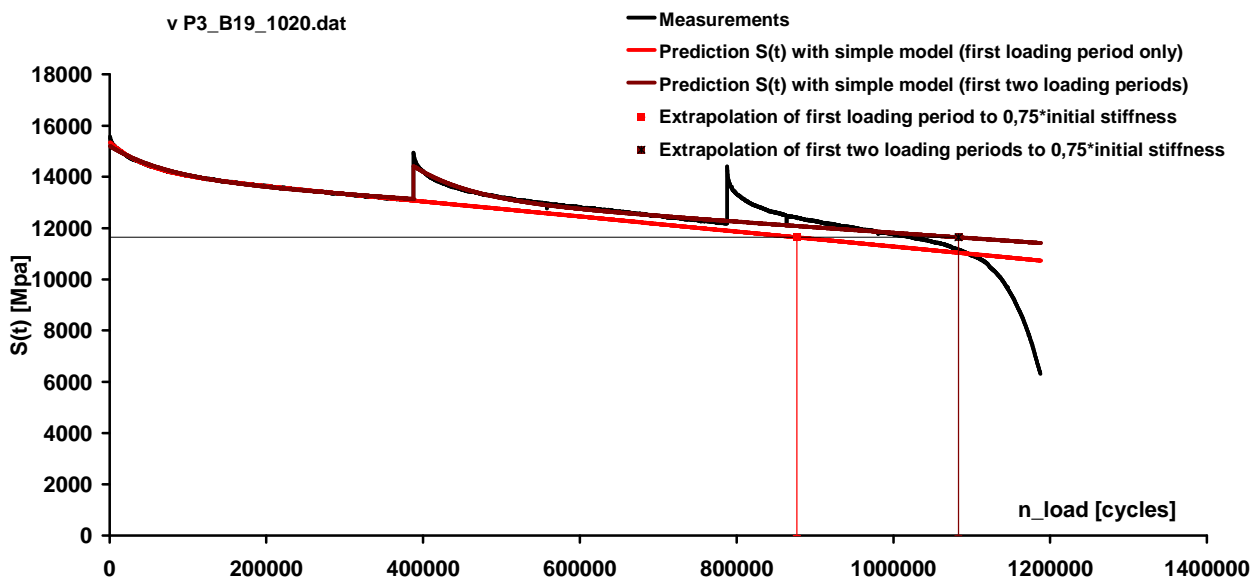
Het verloop van de data in combinatie met de fit lijkt in deze proef meer op het voorbeeld in Figuur 4.1. Beide modellen geven weer een redelijke fit van de data. Ook hier valt echter op dat het PH-model het eerste deel van de stijfheidsval moeilijk kan beschrijven.



Figuur 4.7: P3_B19_1020, 120 um, proefresultaten en fit beide modellen



Figuur 4.8: P3_B19_1020, 120 healingfactor PH model

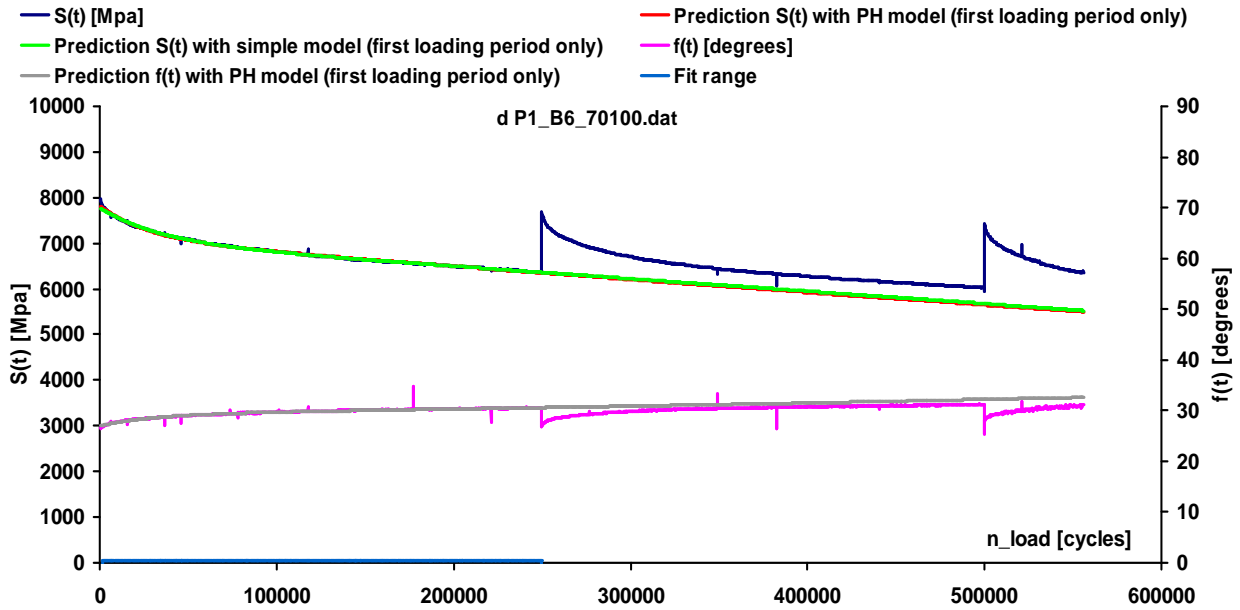


Figuur 4.9: P3_B19_1020, 120 um, healingfactor eenvoudig model

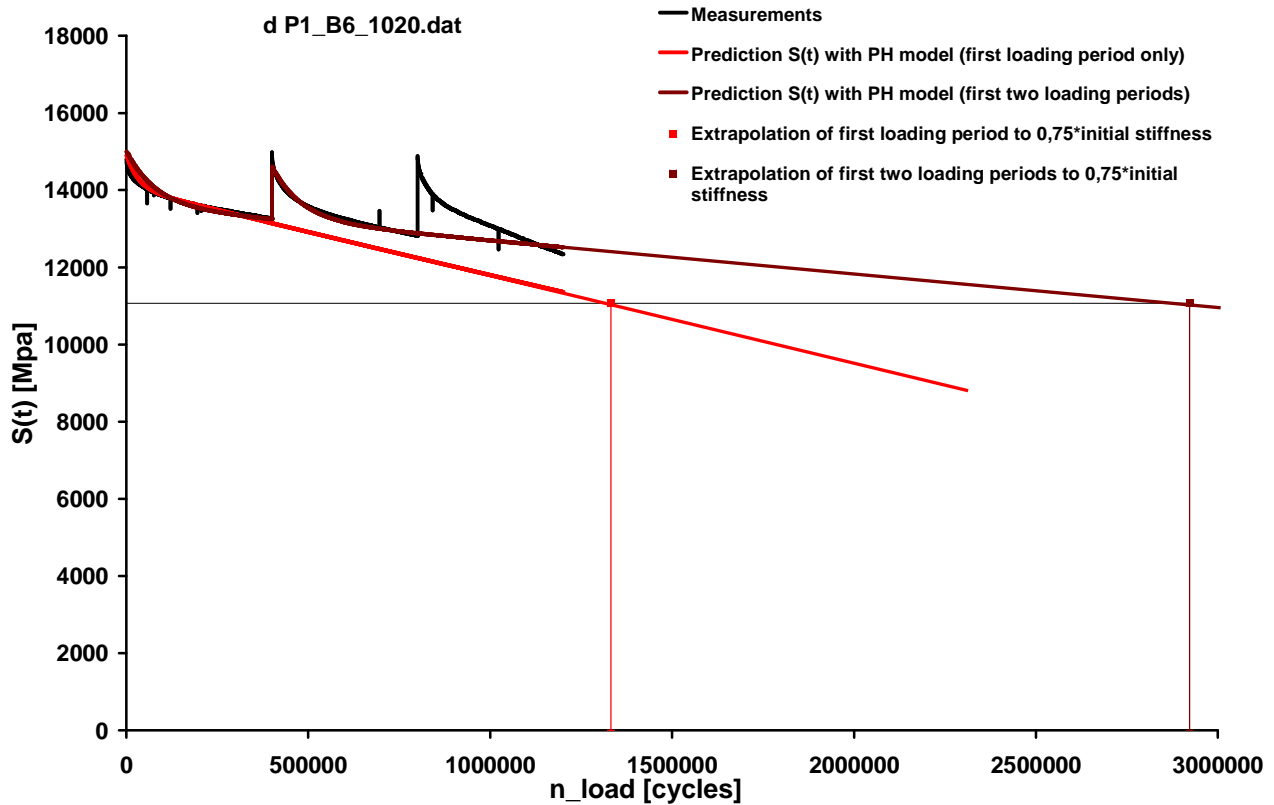
Deze resultaten hoeven minder ver geëxtrapoleerd te worden om 75% stijfheid te bereiken dan die uit de proef in de vorige paragraaf. In dit geval overschatten beide modellen de helling bij de fit op de eerste periode, hierdoor lopen de fits wat steiler (grotere negatieve helling) af dan de data. Dit is te zien doordat de rode lijnen in beide figuren langs de onderkant van de meetdata in de eerste belastingperiode lopen. Daarnaast onderschatten beide modellen de helling bij het fitten op twee belastingperioden. Hier lopen de fits dus juist vlakker dan de data, waardoor de bruine lijnen de zwarte in de tweede lastperiode aan de bovenzijde raken. Door het steilere verloop in de simulatie van de continue proef en het vlakkere in de fit op het verloop met rustperiode, overschatten beide modellen het effect van de rustperiode. Ze overschatten daardoor ook beide de healing. Omdat dit in deze proef voor beide modellen geldt en het niet zo is als in de vorige proef dat het ene model het effect van rust overschat en het andere het onderschat, is het verschil in de de N-waarden waarbij 75% stijfheid wordt bereikt in deze proef voor de twee modellen meer vergelijkbaar, waardoor de healingsfactoren elkaar minder ontkopen: $N_1=848705$ en $N_2=1136436$ ($H=1,33$) voor het PH-model. Voor het eenvoudige model is het $N_1= 876806$ en $N_2=1082797$ ($H=1,23$). Deze waarden voor de healingsfactor liggen rond de ondergrens voor het vorige proefstuk, terwijl dat een onderschatting was en deze waarden beiden een overschatting geven. Dit wijst erop dat de spreiding in healingscapaciteit voor balkjes van een gegeven mengsel aanzienlijk kan zijn.

4.4.3 P1_B6_1020

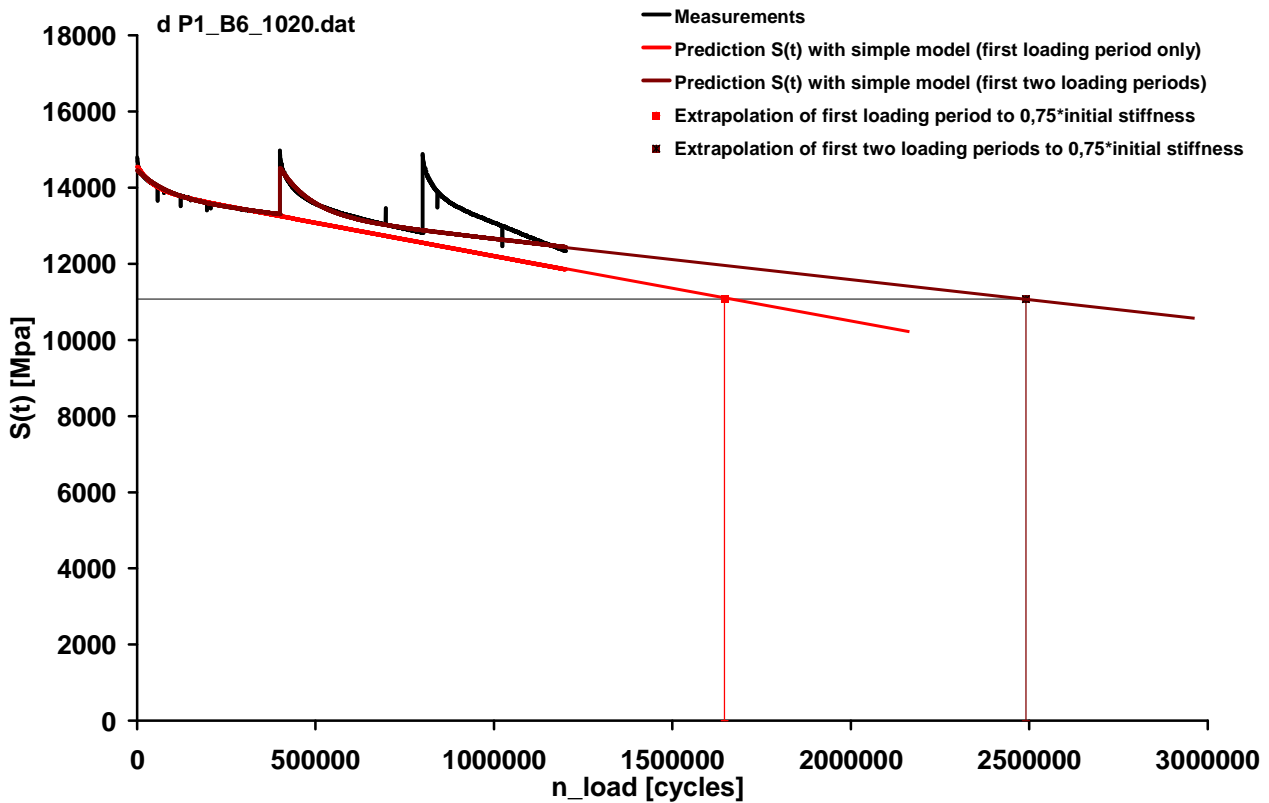
Ook bij deze proef geven de modellen beide redelijke oplossingen. Wel valt het op dat ook hier het PH-model de afname in de eerste belastingperiode niet goed lijkt te kunnen inschatten, het begint te hoog, gaat dan in eerste instantie te traag omlaag om vervolgens steiler te dalen dan het lineaire deel. Het eenvoudige model beschrijft deze lastperiode wat beter, maar ook dit model daalt wat te stijf in de lineaire tak. In de tweede lastperiode lijken beide modellen de stijfheidsafname in het lineaire deel te onderschatten. De combinatie van overschatten van de afname in het eerste lineaire deel en het overschatten ervan in het tweede leidt tot overschatting van het healingseffect, bij het PH model wat meer dan in het eenvoudige model. De healingsfactoren bedragen 2,2 voor het PH-model ($N_1=1331715$, $N_2=2923181$) en 1,5 voor het eenvoudige model ($N_1=1646124$, $N_2=2490804$).



Figuur 4.10: P1_B6_1020, 120 um, beproefingsdatum 03-01-2011, meetdata en fits



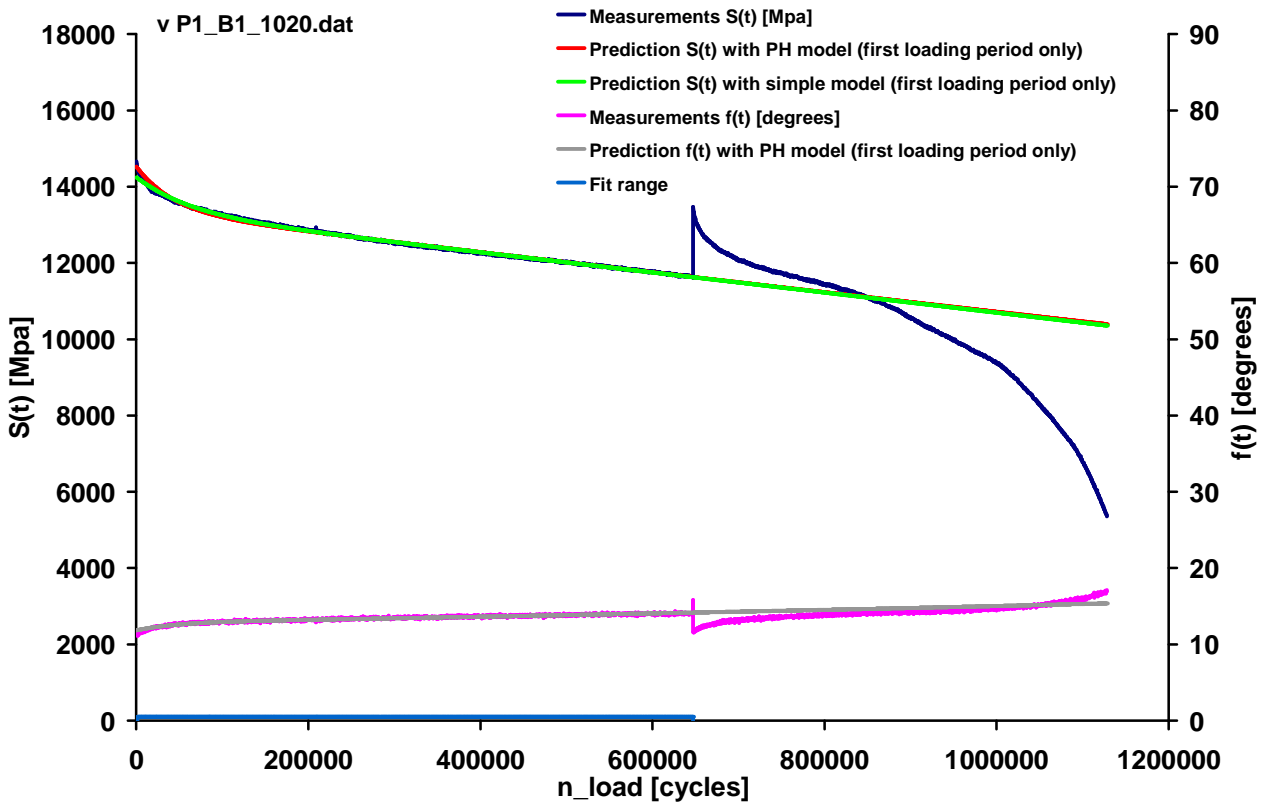
Figuur 4.11: P1_B6_1020, 120 um, beproefingsdatum 03-01-2011, healingfactor PH model



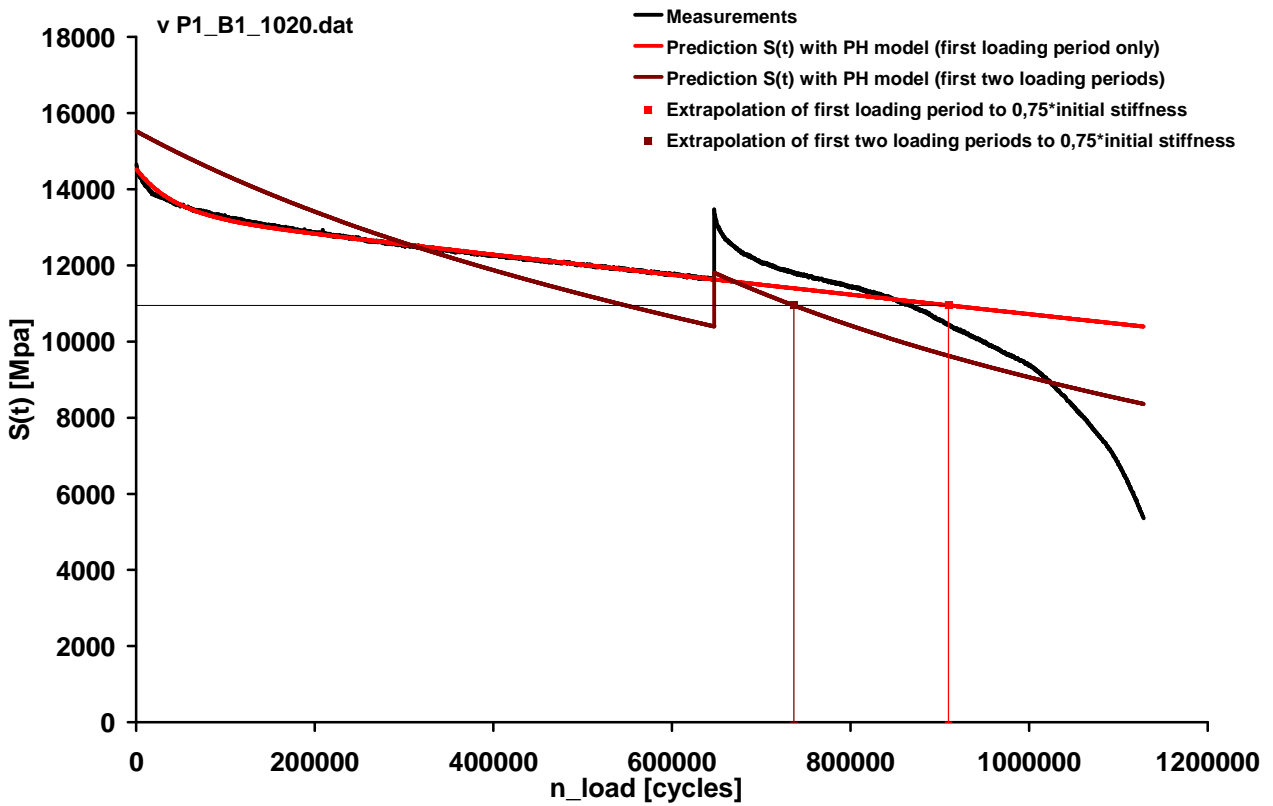
Figuur 4.12: P1_B6_1020, 120 um, beproefingsdatum 03-01-2011, healingfactor eenvoudig model

4.4.4 P1_B1_1020, 115um, onbedoeld discontinue proef

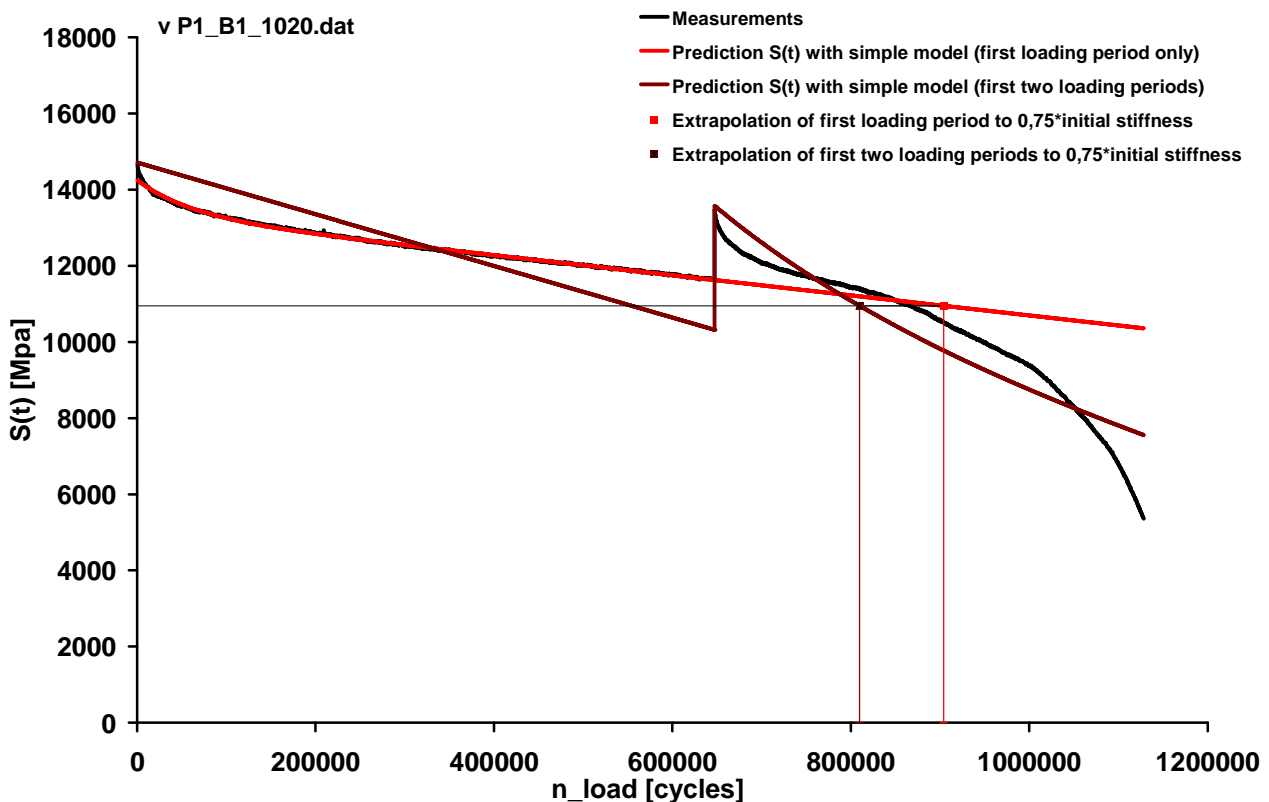
Deze proef was als continue bedoeld, maar sloeg af en is vervolgens opnieuw aangezet (paragraaf 3.5). Hoewel het signaal voor het afslaan nog lineair lijkt te zijn (zie ook de fits van de modellen), buigt het na herstarten al snel scherp af. Het is dan ook niet uit te sluiten dat de balk bij het afslaan beschadigd is geraakt. Door de onbedoelde late rustperiode en vooral het ontbreken van een lineair traject na de rust periode, passen de modellen voor de discontinue proef slecht en is de healingfactor niet zinvol te bepalen (healingfactoren < 1). In de pragmatische analyse die wordt beschreven in hoofdstuk 5 kan de data van deze proef wel gewoon gebruikt worden. Vandaar dat hij ondanks dat hij met de modellen niet te analyseren is, toch in de rapportage is meegenomen.



Figuur 4.13: v P1_B1_1020 115um_dat.xls onbedoeld discontinu



Figuur 4.14v P1_B1_1020 115um_dat.xls healingfactor PH model (healingfactor < 1)



Figuur 4.15v P1_B1_1020 115um_dat.xls healingfactor eenvoudig model (healingfactor < 1)

Door de slechte fit op vooral beide lastperiodes, neemt de stijfheid hier sneller af dan in de fit op alleen de eerste lastperiode. Hierdoor valt N_2 voor beide modellen lager uit dan N_1 , met als gevolg healingswaarden onder de 1 (PH-model 0,8 en eenvoudig model 0,9). Het is duidelijk dat dit geen reële getallen zijn, dit is puur het gevolg van het feit dat het verloop na de rustperiode buiten het toepassingsgebied van de modellen ligt.

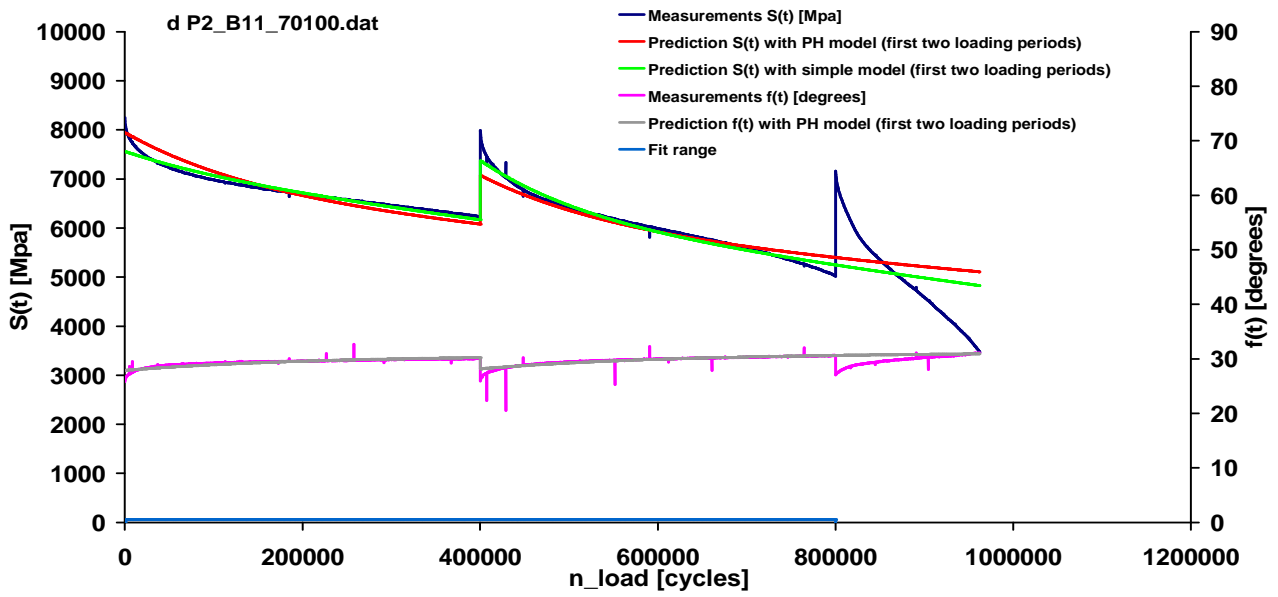
4.5 Discontinue proeven en de modelbenadering voor het 70/100 mengsel

In de volgende paragrafen worden de resultaten van de discontinue proeven op de 70/100 mengsels getoond. Het zijn drie proefstukken, waarvan twee bij de de in paragraaf 3.5 bepaalde ϵ_6 waarde voor dit mengsel: 102 $\mu\epsilon$, en verder bij 30Hz, 20°C, twee belastingsperiodes van 400.000 belastingcycli elk en 24 uur rust tussen de twee belastingsperiodes. Omdat deze beiden lastig te fitten bleken, is de derde bij een kleiner aantal lastherhalingen onderzocht, 250.000 in plaats van 400.000.

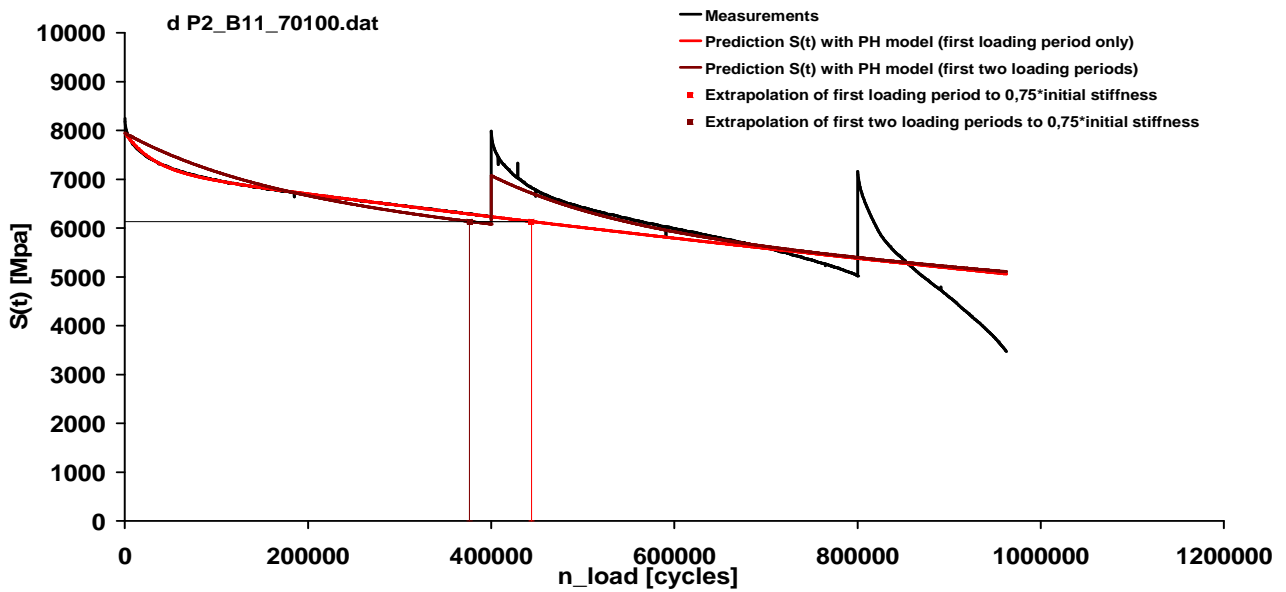
4.5.1 P2_B11_70100 102um

Balkje B11 uit plaat P2 is discontinue beproefd bij de ϵ_6 -waarde van het 70/100 mengsel. Er zijn 400000 lastherhalingen opgelegd bij 20°C en 30 Hz en na een rustperiode van 24 uur is dat nogmaals herhaald. Dat leverde onderstaande stijfheidsverloop op.

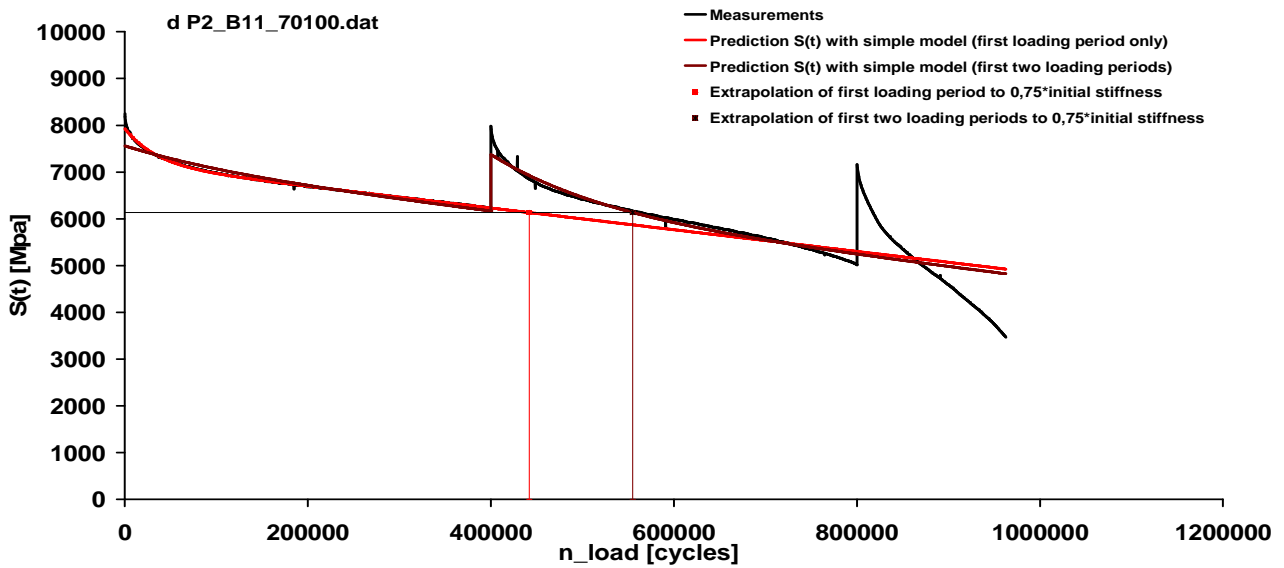
Het probleem hier is, zoals blijkt uit de grafieken, dat de proef al in de eerste belastingsperiode bijna onder de 75% stijfheid duikt en in de tweede belastingsperiode al behoorlijk naar beneden afbuigt (tertiere fase). Hiermee komen we buiten de grenzen van de modellen die alleen de eerste en tweede fase van de proef beschrijven: de exponentiële (fase 1) en lineaire (fase 2) afname in stijfheid. Het gevolg is dat de fits van de modellen, net als bij de onbedoeld discontinue proef in de vorige paragraaf, niet erg goed zijn. Zo komt bij het PH model het bezwijkpunt in de discontinue proef voor dat in de continue proef te liggen (negatieve healing). Voor het eenvoudige model is dat niet zo, maar het scheelt niet veel en ook hier heeft hetgeen het model beschrijft niet veel meer te maken met wat er in de proef gebeurt. De uit deze proef bepaalde healingpotentie (0,8 voor het PH-model ($N_1=443810$, $N_2=376368$) en 1,3 voor het eenvoudige model ($N_1=441904$, $N_2=555010$)) is dan ook niet betrouwbaar.



Figuur 4.16: P2_B11_70100 102um, proefdatum 25-01-2011, meetdata en fits



Figuur 4.17: P2_B11_70100 102um, proefdatum 25-01-2011, healingfactor PH model

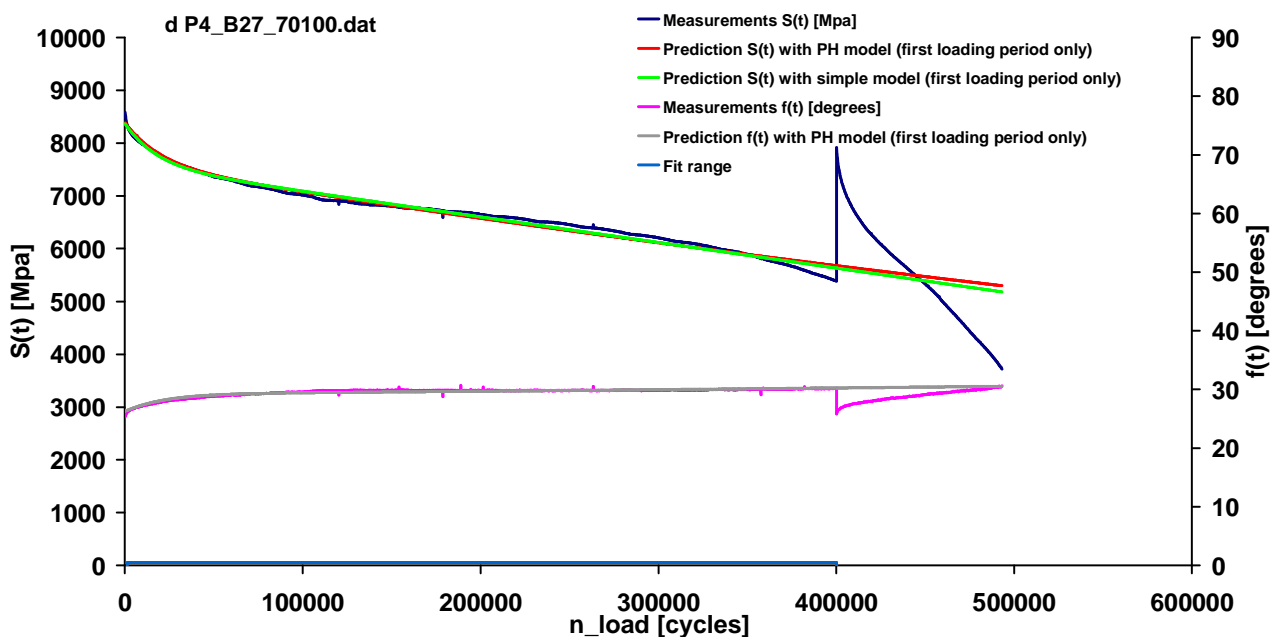


Figuur 4.18: P2_B11_70100 102um, proefdatum 25-01-2011, healingfactor eenvoudig model

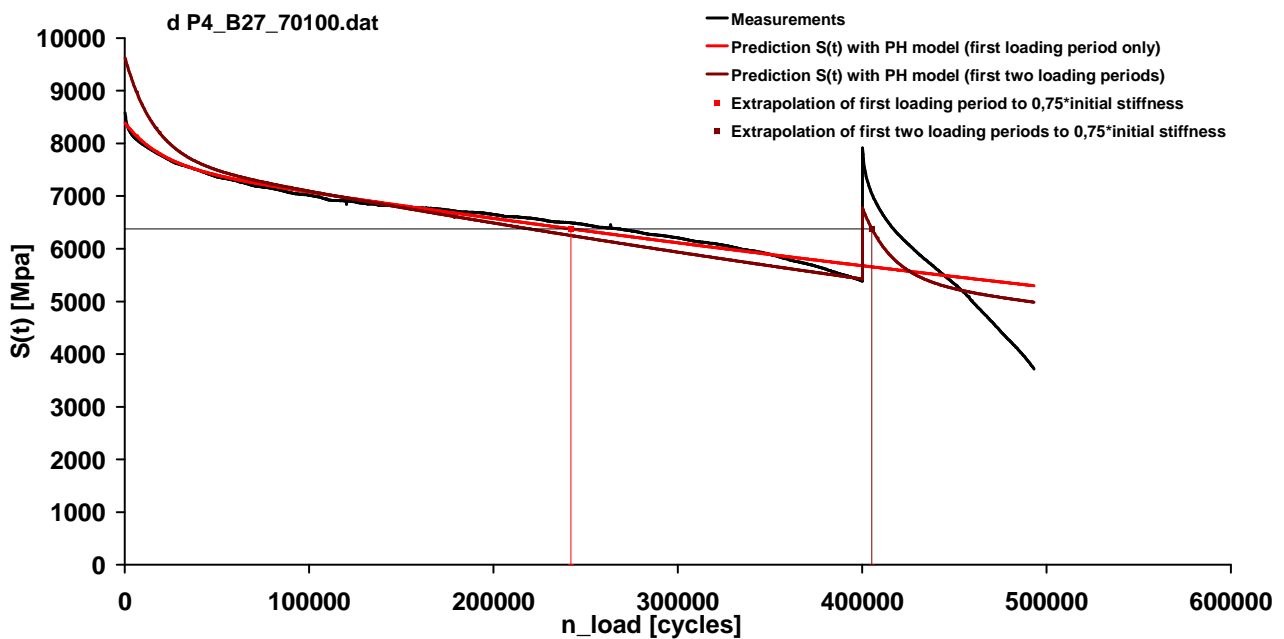
4.5.2 P4_B27_70100 102um

Bij deze proef zien we het effect uit de vorige proef nog sterker terug. De proef duikt al in de eerste belastingsperiode onder de 75% stijfheid en hij buigt in deze eerste belastingsperiode al behoorlijk naar beneden af (tertiair gedrag). Deze balk heeft in ieder geval een slechte levensduur, want als hij al voor de 400.000 cycli fase 3 van de proef in gaat en zelfs met rustperiode de 500.000 lastherhalingen niet haalt, is de kans dat hij de 1×10^6 lastherhalingen zou hebben gehaald in de continue proef verwaarloosbaar. Beide modellen kunnen het progressief faalgedrag in fase drie niet beschrijven, ze bevatten alleen de primaire (exponentieel dalende) en secundaire (lineair dalende) fase. Het resultaat hiervan is dat de modellen dit soort proefresultaten met ook tertiair gedrag niet kunnen beschrijven. Worden ze er toch op gefit, dan geeft dit een slecht resultaat waarbij de discontinue proef eerder de halve stijfheid bereikt dan de continue (Figuur 4.20).

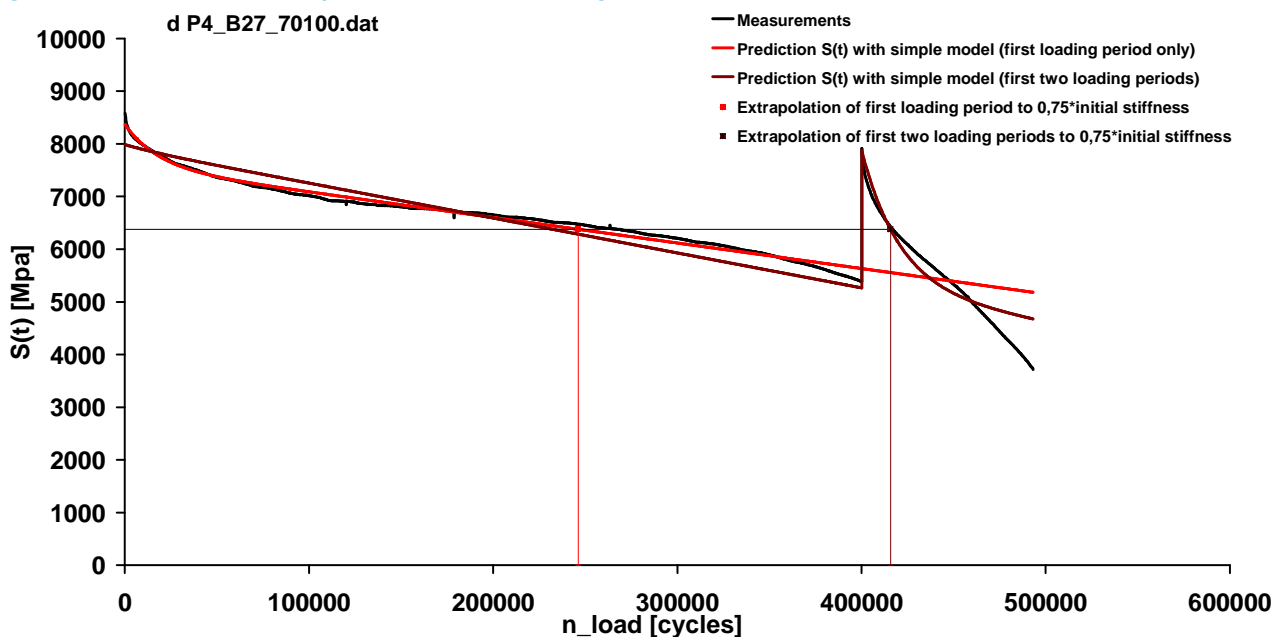
Ook uit deze proef is dus geen betrouwbare bepaling van de healingspotentie mogelijk omdat het mengsel na 400.000 cycli al te dicht bij bezwijken bleek te zitten. Daarom is in de volgende proef een kleiner aantal lastherhalingen gebruikt.



Figuur 4.19: P4_B27_70100 102um proefdatum 31-01-2011, data en fits



Figuur 4.20: P4_B27_70100 102um proefdatum 31-01-2011, healingfactor PH model



Figuur 4.21: P4_B27_70100 102um proefdatum 31-01-2011, healingfactor eenvoudig model

4.5.3 Aanpassing proefcondities

Doordat beide proeven teveel schade op lijken te lopen in de eerste belasting periode, buigen beiden al af in die eerste last periode. De eerste test doorloopt 2,5 belastingperiode voordat de proef wordt beëindigd vanwege een te lage stijfheid. De tweede test doorloopt nog geen 1,5 belastingperiode voordat de test wordt beëindigd. Door het afbuigen in de eerste en het ontbreken van een lineair deel in de tweede belasting periode kunnen de modellen dit verloop niet beschrijven. Dit geeft problemen voor de bepaling van de healingfactor, deze wordt 'negatief: een healingsfactor kleiner dan 1 waardoor rustperiodes tot een kortere levensduur zouden leiden. Met de huidige condities ($N = 400.000$; $R = 24$) kan de healingsfactor voor 70/100 proefstukken dus niet goed worden bepaald.

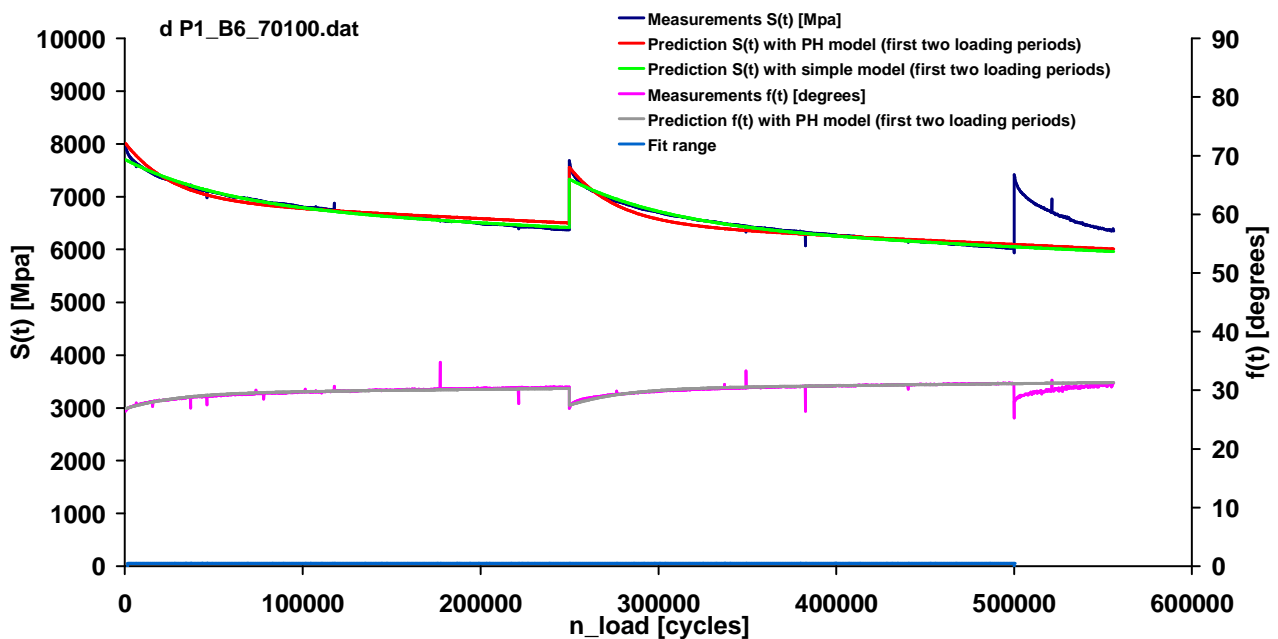
Opvallend hierbij is dat het proefstuk van de tweede test komt uit plaat 4, de proefstukken bij de continue test laten allemaal lagere N-waarden zien voor proefstukken uit plaat 4. Toch voldoen de proefstukken uit plaat 4 aan alle criteria. De afmetingen, dichtheid of holle ruimte percentages wijken niet af ten opzichte van proefstukken uit andere platen. Het is dus een aandachtspunt dat er afwijkend mechanisch gedrag kan plaatsvinden tussen platen, ondanks

dat deze platen/proefstukken aan de specificaties voldoen. Omdat ook het eerste proefstuk, uit plaat 2, niet geschikt bleek voor het bepalen van de healingsfactor bij deze condities worden voor de derde discontinue proef op een 70/100 proefstuk de condities aangepast.

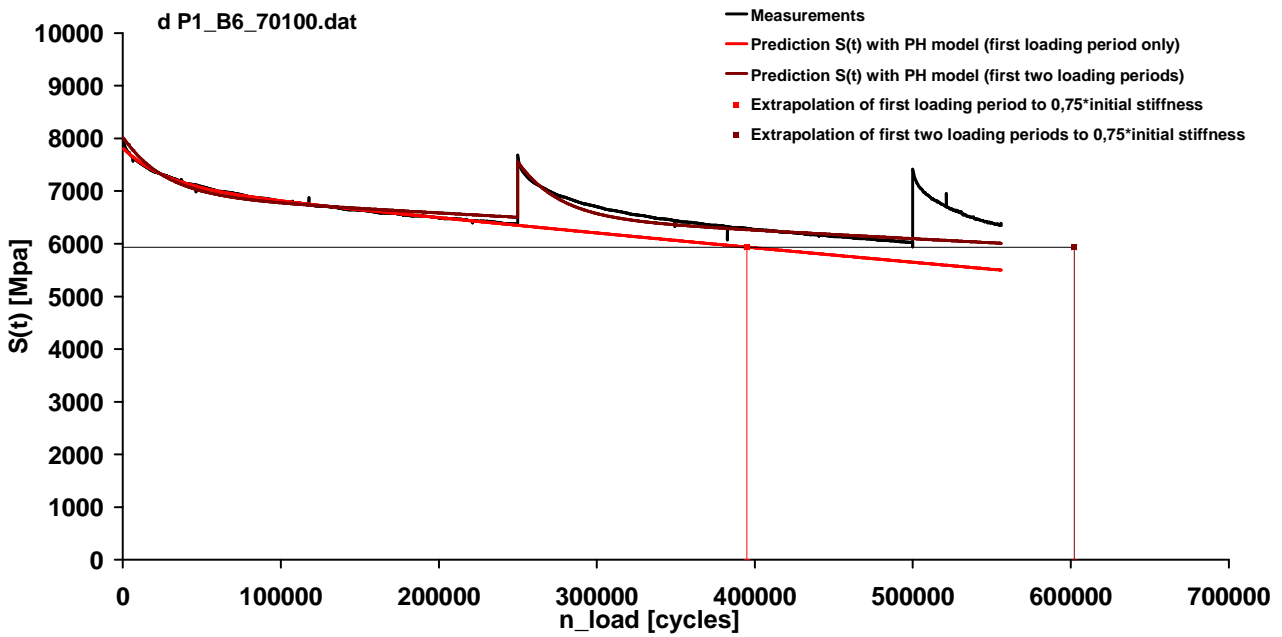
In de aangepaste proef wordt de belastingperiode ingekort zodat het stijfheidsverval minder groot zal zijn bij de rustperiode. De belastingperiode wordt nu 250.000 in plaats van 400.000 last herhalingen. De rustperiode zal gelijk blijven: 24 uur. Er wordt hiervoor een proefstuk gebruikt uit een andere plaat dan plaat 4. Als de verkorte proef wel succesvol blijkt, zal er een proefstuk afkomstig uit plaat 4 voor het 70/100 mengsel worden beproefd conform de nieuwe condities. Hiermee kan worden bepaald of het eveneens mogelijk is om met de gekozen testcondities de healingsfactor te bepalen voor proefstukken met afwijkend mechanisch gedrag. Als de kortere belasting periode voor 70/100 mengsels wel blijkt te werken, wordt ten behoeve van de vergelijking met de 10/20 mengsels ook een proefstuk 10/20 beproefd conform de nieuwe condities. Op basis van de reeds beproefde proefstukken worden hier geen problemen in voorzien.

4.5.4 P1_B6_70100 bij 102µε en verkorte proefduur

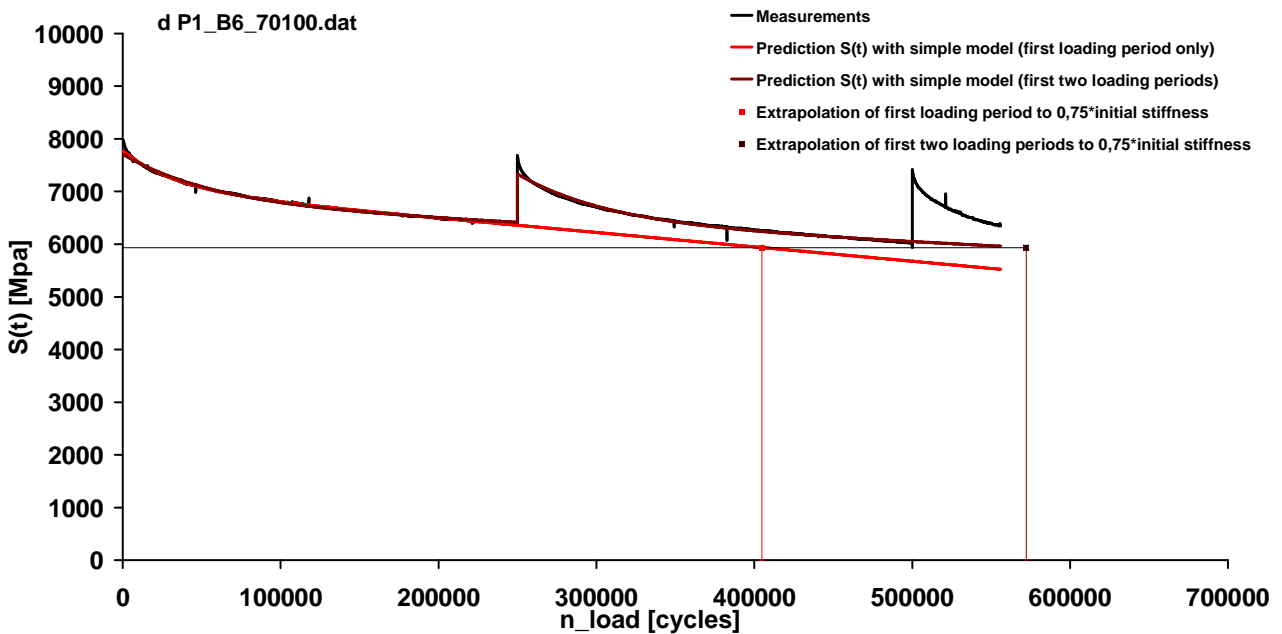
In deze proef is zoals hierboven beschreven gebruik gemaakt van 250.000 lastherhalingen in plaats van 400.000 om te zorgen dat de lineaire tak nog niet af aan het buigen is, zodat er een betere fit kan worden verkregen. Zoals uit onderstaande figuren (Figuur 4.22 tot en met Figuur 4.24) blijkt, kunnen er nu wel healingsfactoren worden bepaald. De gevonden N-waarden zijn $N_1 = 394991$ en $N_2 = 602208$, met $H = 1,5$ voor het PH-model en $N_1 = 404770$, $N_2 = 572329$ en $H = 1,4$ voor het eenvoudige model.



Figuur 4.22: P1_B6_70100 102µm proef datum 14-02-2011, meetdata en fits

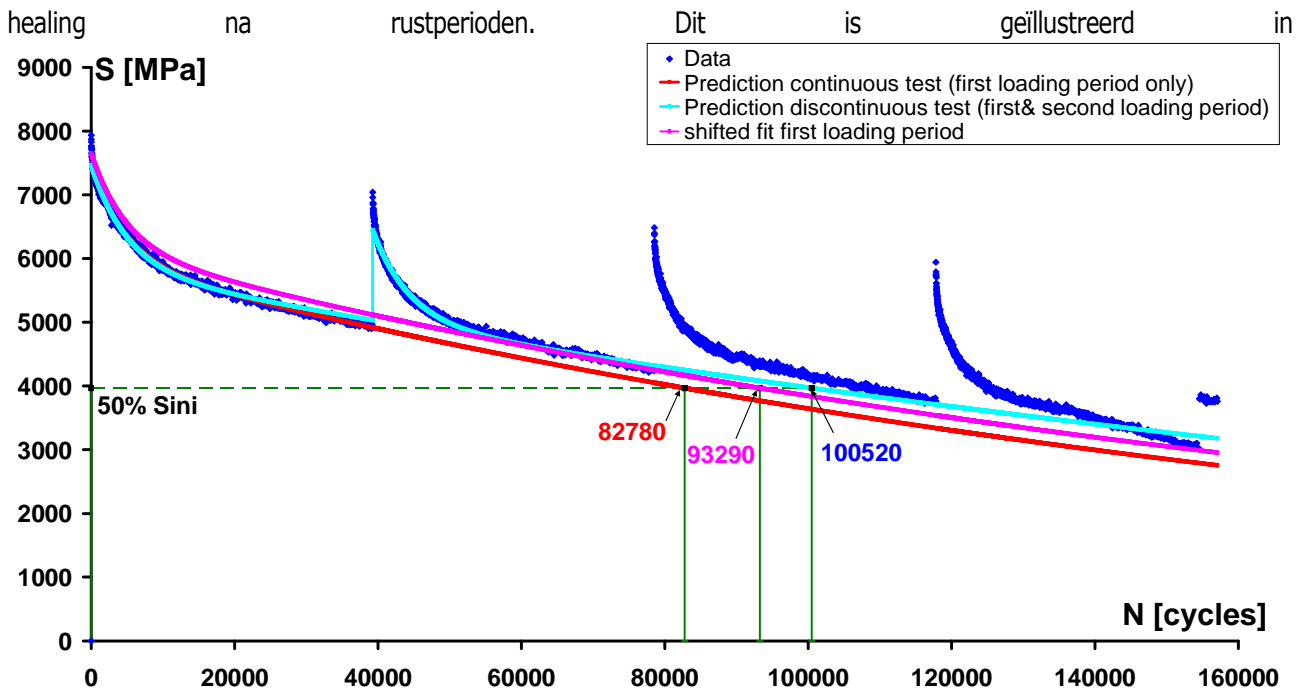


Figuur 4.23: P1_B6_70100 102um proef datum 14-02-2011, healingfactor PH model



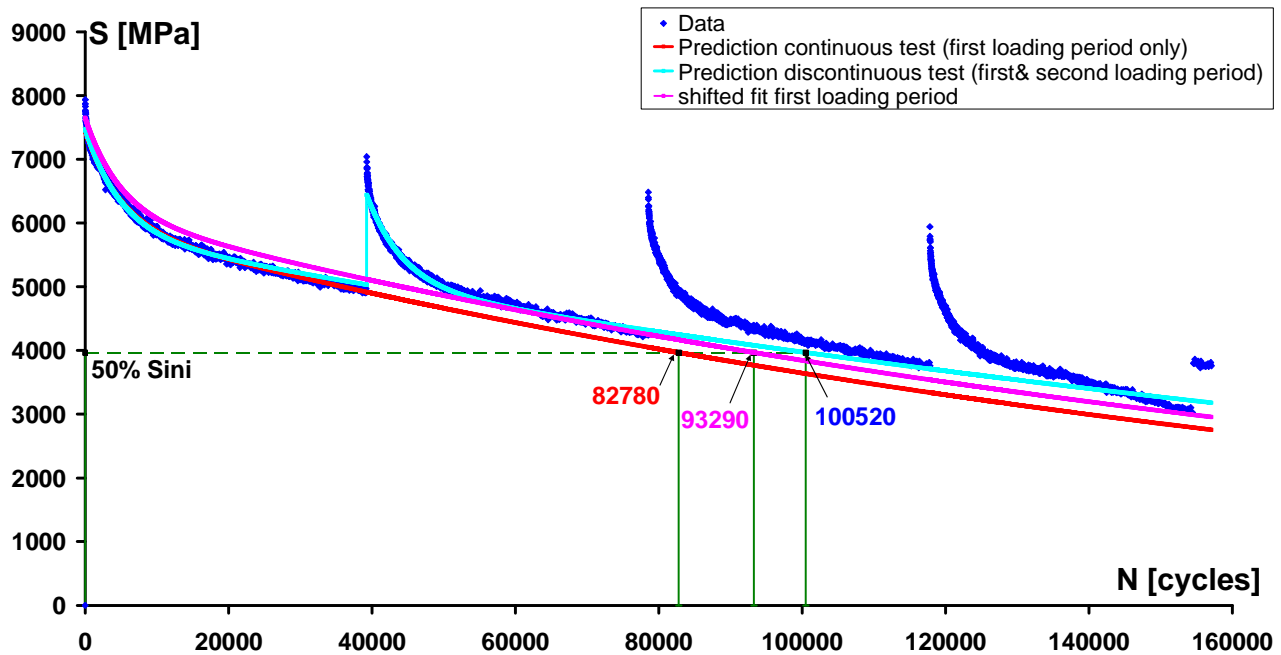
Figuur 4.24: P1_B6_70100 102um proef datum 14-02-2011, healingfactor eenvoudig model

Uit de voorgaande figuren blijkt dat, hoewel er healingsfactoren te bepalen zijn, ook in deze proef de lineaire tak na rust niet goed wordt gefit. Deels komt dit doordat de datapunten veel exponentiële en weinig lineaire daling bevatten, maar ook de opzet van de modellen zelf speelt een rol. Die gaan er namelijk vanuit dat de lineaire tak na de rust periode in het verlengde ligt van die voor de rustperiode. In werkelijkheid gaat de data wel naar dezelfde helling terug, maar op een iets hoger stijfheidsniveau. Hierdoor ligt de lineaire tak na de rustperiode niet in het verlengde van die van voor de rustperiode, maar iets hoger parallel aan de originele lijn. Het lijkt net of de raaklijn aan het eerste lineaire deel iets naar rechts is verschoven. Door dat de modellen die twee parallelle lijnen beschrijven met één lineaire relatie wordt de lijn omhoog getrokken door de tweede belastingperiode. Dit is de reden dat de fit op twee perioden geen exacte beschrijving van de tweede lastperiode geeft maar een indicatie van de "gemiddelde"



Figuur 4.25, een figuur die eerder in dit rapport (hoofdstuk 3 en paragraaf 4.2) is gebruikt om het principe van het PH-model uit te leggen.

De figuur illustreert aan de hand van het eerder gebruikte voorbeeld voor het PH-model hoe de beide modellen omgaan met de lineaire takken in de data. De rode en licht blauwe lijn geven de fit van het model op de eerste (rood) en de eerste twee belasting perioden (lichtblauw). Het is duidelijk te zien dat de lineaire takken van de data in de eerste drie belastingperiodes parallel lopen aan de rode lijn. Voor de eerste lastperiode ligt de lineaire tak ook op hetzelfde niveau, de tweede en derde liggen er boven. Doordat het model bij de fit op twee lastperioden beide takken met één lijn beschrijft, wordt deze omhoog getrokken waardoor de lichtblauwe lijn vlakker loopt dan de rode. Hierdoor wordt het effect van de eerste rustperiode automatisch overschat, maar wordt een indicatie gekregen van "gemiddeld" healingsgedrag doordat de lichtblauwe lijn zowel de tweede, derde als de vierde lastperiode vlak voor bezwijken redelijk beschrijft. Voor de data van de in dit hoofdstuk beschreven proeven is de afwijking tussen de data en de fit met de modellen aanzienlijk groter dan voor het voorbeeld van Pronk (Pronk et al. 2009). Dit geeft het risico, zeker met de voor het bepalen van de healingswaarde benodigde extrapolatie, dat het model bepalender wordt voor de healingsfactor dan de data. Dat is natuurlijk niet de bedoeling, vandaar dat de conclusie is getrokken dat het niet mogelijk is om voor deze twee mengsels proefcondities te vinden waaronder beiden beproefd kunnen worden en waarbij de data vervolgens met de hier gebruikte modellen geanalyseerd kunnen worden.



Figuur 4.25: De modellen fitten bij de fit op twee belastingperioden 1 lineaire lijn door de beide parallele hellingen van de belastingperioden

4.6 Conclusies en aanpassing aanpak op grond van de eerste resultaten

De hiervoor besproken resultaten van de discontinue proeven laten zien dat voor de 70/100 mengsels het stijfheidsverlies na 400.000 lastherhalingen al 75% is, het lijkt erop dat op dat moment fase 3 al is ingetreden. Om deze reden is ervoor gekozen om een proef voor 70/100- mengsels uit te voeren met een kleiner aantal lastherhalingen tot de rustperiode, namelijk 250.000 zodat de eerste rustperiode plaatsvindt terwijl de balk zich nog in fase 2 bevindt. De proef laat zien dat bij een rustperiode na 250.000 lastherhalingen de balk zich inderdaad nog in fase 2 bevindt.

Zoals uit paragraaf 4.4 blijkt hebben de 10/20-mengsels een iets ander verloop van de stijfheid over het aantal lastherhalingen. Hierdoor bevinden deze mengsels zich na 400.000 lastherhalingen nog in fase 2. De testresultaten laten dus een duidelijk te onderscheiden fase 2 zien, waarop de analyse met beide modellen goed kan worden uitgevoerd. In twee van de drie proeven lijkt het eenvoudige model een betere fit te geven dan het PH model, bij de derde proef geven beide modellen ongeveer dezelfde resultaten.

Kijkend naar de fits blijkt dat, hoewel het verloop voor proeven zonder tertiaire fase redelijk beschreven wordt, de fits niet perfect zijn. Dat geldt voor zowel de exponentiële als de lineaire tak. Omdat die laatste tak geëxtrapoleerd wordt om de healingsfactor te bepalen, is het van belang dat die fit goed is, zeker als er over grotere afstand geëxtrapoleerd moet worden want anders neemt de fout in de bepaling sterk toe.

Indien de uitgevoerde analyses op de 10/20-mengsels worden vergeleken met de 70/100-mengsels (Tabel 4.3) blijkt dat de op deze wijze bepaalde healingsfactor voor de 10/20-mengsels in de regel hoger is, dan voor de 70/100-mengsels (indien de 250.000 lastherhalingen buiten beschouwing wordt gelaten). Dit komt niet overeen met het uitgangspunt van dit onderzoek, namelijk dat we een proefprotocol en analysemethode zoeken die aansluit bij de praktijkervaring dat 70/100-mengsels meer healing vertonen dan 10/20-mengsels.

Op basis van het bovenstaande is duidelijk dat het fitten van modellen op de gemeten data en daaruit healingsfactoren bepalen problemen geeft, van de zes bewust discontinue proeven worden er door de modellen 4 a 5 niet goed beschreven. Daarom is ervoor gekozen de modellen niet verder te gebruiken en te zoeken naar betere criteria voor het beoordelen van de healingscapaciteit. Hierbij wordt de healingsfactor direct uit de gemeten data bepaald, zonder tussenkomst van modellen. De reden hiervoor is dat het dan voldoende is om in het lineaire deel van de curve te zitten. Doordat er geen model gefit hoeft te worden, maakt het niet uit of het meetpunt aan het

Healing Van Asfalt Mengsels

begin of het einde van dat lineaire deel valt en hoeft er niet geëxtrapoleerd te worden. Deze nieuwe aanpak wordt beschreven in het volgende hoofdstuk.

Mengsel	Rekniveau [µε]	proefstuk	PH-model			Eenvoudig model		
			N ₁ [cycli]	N ₂ [cycli]	H	N ₁ [cycli]	N ₂ [cycli]	H
10/20	120	P1_B5	1516113	2956711	2,0 ⁺	1614468	2119749	1,3 ⁻
		P3_B19	848705	1136436	1,3	876806	1082797	1,2
		P1_B6	1331715	2923181	2,2	1646124	2490804	1,5
10/20	115	P1_B1*	909918	736459	0,8 [*]	903957	809665	0,9 [*]
70/100	102	P2_B11	443810	376368	0,8 ^x	441904	555010	1,3 ^x
		P4_B27	241969	405258	1,7 ^x	246140	415727	1,7 ^x
		P1_B6	394991	602208	1,5 ⁺	404770	572329	1,4

Tabel 4.3: Overzicht healingswaarden uit gefitte discontinue proeven (*:overschat, -:onderschat; ^xslechte fit, ⁺onbedoeld discontinue test)

5 Koerswijziging naar een meer pragmatische benadering

5.1 Opzet van een meer pragmatische benadering

Uit het vorige hoofdstuk wordt duidelijk dat de modelmatige analyse veel problemen opleverde. De twee belangrijkste oorzaken daarvan zijn:

Het extrapoleren van de eerste belastingsfase is weinig robuust. Voor het gefitte model worden oplossingen gevonden die qua fit op het meetgebied zeer dicht bij elkaar liggen maar in de extrapolatie belangrijk kunnen verschillen

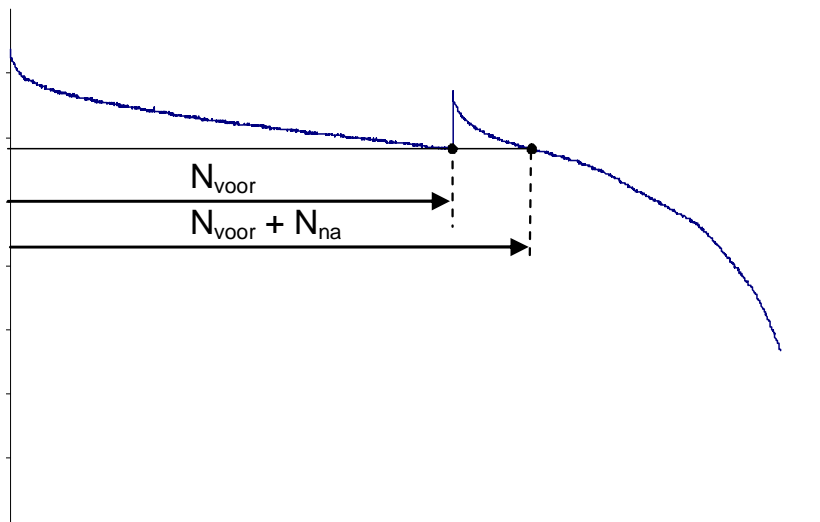
Het stijfheidsverloop is in praktijk aanzienlijk grilliger dan het conceptuele verloop waarop de modellering is gebaseerd. Hierdoor wordt bij veel proeven geen redelijke beschrijving van de meetwaarden verkregen zonder handmatig bijsturen op basis van subjectieve keuzen.

Gezien deze problemen is besloten na te gaan of het mogelijk is de healingsfactor direct uit de meetdata te bepalen, zodanig dat geen extrapolaties nodig zijn. Hiervoor werden twee mogelijkheden gezien:

De eerste was de belasting na de eerste rustperiode doorzetten tot 50% van de stijfheid wordt bereikt en dan het totaal aantal lastherhalingen tot bezwijken van de discontinue proef vergelijken met de continue proef. In de tweede benadering wordt gekeken naar de verhouding tussen het aantal lastherhalingen totdat X% van de stijfheid wordt bereikt in de eerste en tweede belastingsperiode.

Bij de eerste benadering wordt de healingsfactor niet langer bepaald op een enkel proefstuk. Dit geeft het probleem dat de gebruikelijke aanzienlijke spreiding in de vierpuntsbuigproef een rol gaat spelen in de bepaling. Om dit te ondervangen is een groot aantal bepalingen nodig en dat maakt de benadering minder praktisch. Vooralsnog wordt dit niet als een bruikbare optie gezien.

Bij de tweede mogelijkheid is het de bedoeling een rustperiode in te stellen waarna de belasting wordt hervat en wordt bepaald wanneer de stijfheid weer is afgenomen tot de waarde aan het begin van de rustperiode (zie Figuur 5.1).



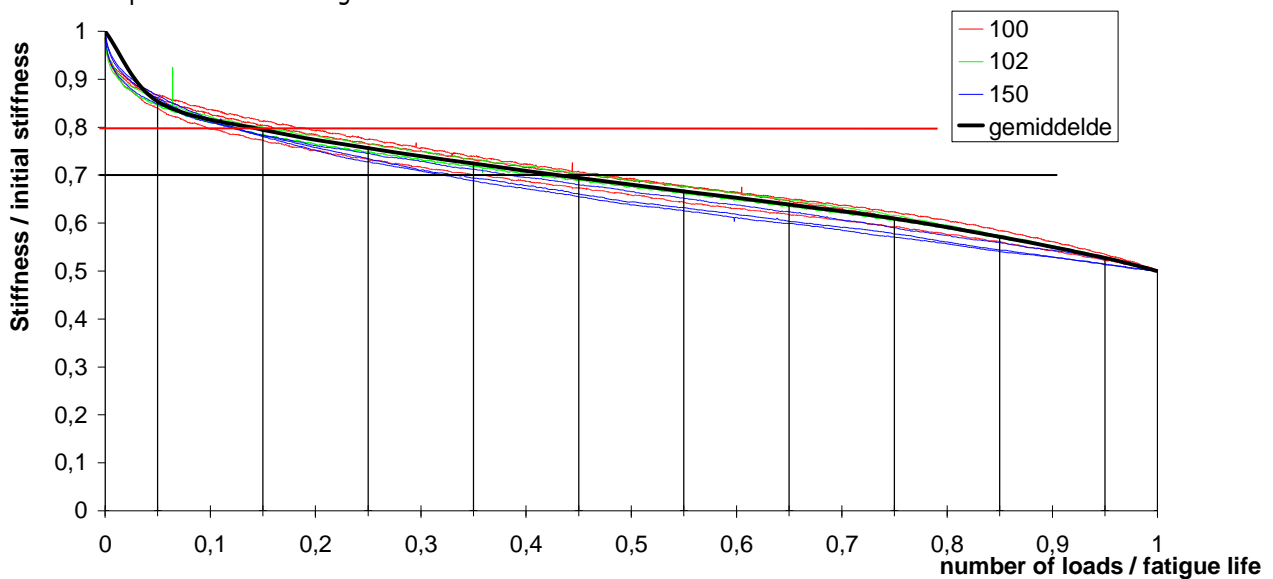
Figuur 5.1: Pragmatische bepaling healingsfactor

De verhouding tussen het totaal aantal belastingcycli tot dit moment en het aantal belastingcycli tot het begin van de rustperiode wordt gezien als mogelijke indicator voor de healingsfactor. In formulevorm:

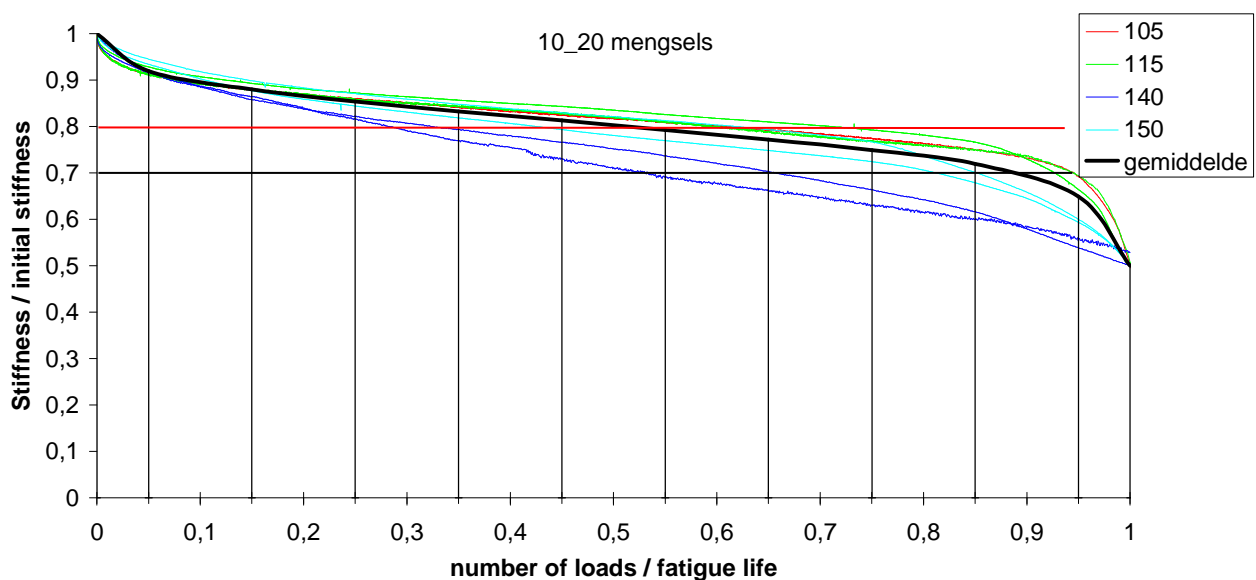
$$H = \frac{N_{voor} + N_{na}}{N_{voor}} \quad (5.1)$$

Probleem hierbij is de keuze van de start van de rustperiode. Hiervoor kan worden gedacht aan een vast aantal belastingcycli, bijvoorbeeld 400.000 cycli, of voor een vaste waarde voor de stijfheidsafname, bijvoorbeeld $80\%S_{ini}$. De vraag is dan of het mogelijk is een waarde te kiezen die voor diverse materialen hanteerbaar is én healingfactoren oplevert die vergeleken kunnen worden.

Een vaste keuze voor de stijfheidsafname is in elk geval lastig te hanteren omdat het stijfheidsverloop afhangt van het rekniveau en mogelijk ook van het mengsel. Figuur 5.2 en Figuur 5.3 geven dit verloop voor het 70/100 mengsel en het 10/20 mengsel uit fase 1 van dit onderzoek. Duidelijk is dat het stijfheidsverloop in deze proeven in mindere (70/100) of meerdere (10/20) mate afhangt van het rekniveau (bij lagere rekniveaus blijft de stijfheid langer hoog) en dat de stijfheid voor het 10/20 mengsel langer hoog blijft dan voor het 70/100 mengsel. Dit blijkt heel duidelijk uit het moment waarop b.v. 70% stijfheid wordt bereikt, de zwarte lijn in de figuren. Voor het 10/20 mengsel gebeurt dat meestal pas na het lineaire gebied.



Figuur 5.2: Stijfheidsverloop in proeven 70 / 100 monsters



Figuur 5.3: Stijfheidsverloop in proeven 10 / 20 monsters

De afhankelijkheid van het stijfheidsverloop van het rekniveau per materiaal wordt ondervangen doordat de healingproeven bij eps6 worden uitgevoerd. Dat betekent dat het ene materiaal bij een hogere rek wordt onderzocht dan het andere materiaal. Dit is terecht omdat met een materiaal met een hogere ϵ_g de verharding

navenant dunner zal worden ontworpen en in praktijk dus ook aan hogere rekken zal worden onderworpen. Een verschil in stijfheidsverloop over de levensduur voor diverse materialen wordt hiermee echter niet weggenomen.

Een verkeerd gekozen stijfheidsafname (zwarte lijnen in Figuur 5.2 en Figuur 5.3) kan er daardoor toe leiden dat we appels met peren vergelijken doordat de materialen zich in verschillende fasen van gedrag bevinden. Zo valt 70% stijfheidsafname (zwarte lijn) bij het 70/100 mengsel ongeveer midden in het lineaire traject, terwijl dit bij het 10/20 mengsel in de tertiaire fase ligt. Het 10/20 mengsel zit dan in de proeffase die wordt gezien als het ontstaan van grotere scheurtjes, waarbij healing minder effectief is dan in de fase van lineaire stijfheidsafname en dat maakt het vergelijken van de materialen niet reëel.

Aan de andere kant zit bij een stijfheidsafname van 80% (de rode lijnen in Figuur 5.2 en Figuur 5.3) het 10/20 mengsel wel in de lineaire fase, terwijl het 70/100 mengsel nog in de exponentieel dalende tak in het begin van de proef zit. In die primaire fase stelt zich naar wordt verondersteld een temperatuurgradiënt in. Ook dit is niet wenselijk voor een goede vergelijking, we zoeken naar het effect van een rustperiode in het lineaire deel van de proef waar het effect van healing het meest aanwezig zal zijn. Dit geeft echter een zeer beperkte keuze in in te stellen stijfheidsniveaus. Aangezien het ook meettechnisch lastig blijkt om uit te gaan van een stijfheidsafname, is er gekozen voor het werken met een vast aantal belastingcycli tot de rustperiode. De in de volgende paragrafen beschreven ervaringen met proeven bij een vast aantal belastingcycli laten zien dat door de grote spreiding in levensduur ook dan proeven af en toe in de derde tak terecht kunnen komen en dat er een grote spreiding aan healingsfactoren wordt gevonden.

5.2 Resultaten pragmatische benadering

In de vorige paragraaf is de pragmatische benadering geschetst. Doordat hierbij niet uitgegaan wordt van modellen, kan deze benadering ook worden toegepast op de al uitgevoerde proeven. Dit is opgenomen in onderstaande tabel (Tabel 5.1). Hierin staan zowel de data die in het vorige hoofdstuk zijn gebruikt (TNO-org) als extra proeven uitgevoerd in het laboratorium van BAM (BAM) en extra proeven uitgevoerd bij TNO (TNO-xtra). Die laatste proeven zijn gelijktijdig met de BAM proeven uitgevoerd om het effect van het besterven van de proefstukken op eventuele verschillen uit te kunnen sluiten.

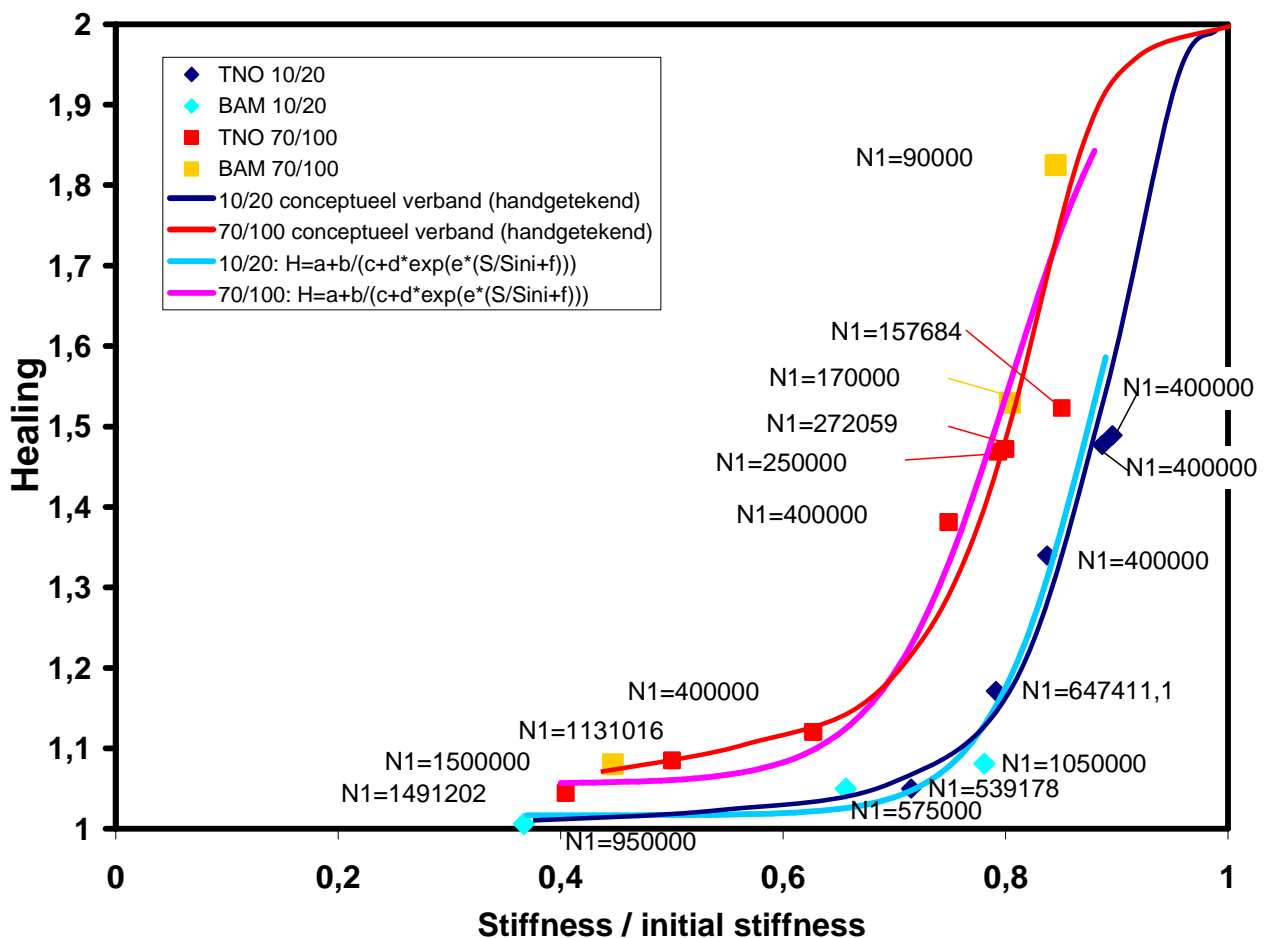
Mengsel	Rek niveau [µε]	Data set	proefstuk	modelbenadering		Pragmatische benadering			
				PH-model	Eenvoudig model	S/Sini	N1 [cycli]	N2 [cycli]	H
10/20	120	TNO-org	P1_B5	2,0	1,3	0,89	399891	590657	1,48
10/20	120	TNO-org	P3_B19	1,3	1,2	0,84	387854	519618	1,34
10/20	120	TNO-org	P1_B6	2,2	1,5	0,90	399998	595630	1,49
10/20	115	TNO-org	P1_B1*	0,8	0,9	0,79	647411	758214	1,17
10/20	120	BAM	P3_B21			0,66	575000	603587	1,05
10/20	120	BAM	P3_B17			0,37	950000	955750	1,01
10/20	120	BAM	P4_B27			0,78	1050000	1135000	1,08
70/100	102	TNO-org	P2_B11	0,8	1,3	0,75	400151	552566	1,38
70/100	102	TNO-org	P4_B27	1,7	1,7	0,62	400115	448156	1,12
70/100	102	TNO-org	P1_B6	1,5	1,4	0,79	249939	367066	1,47
70/100	102	TNO-xtra	P2_B14			0,40	1491202	1556863	1,04
70/100	102	TNO-xtra	P2_B9			0,85	157684	240161	1,52
70/100	102	TNO-xtra	P4_B28			0,5	1131016	1227135	1,08
70/100	102	TNO-xtra	P4_B23			0,8	272059	400441	1,47
70/100	102	BAM	P1_B17			0,85	90000	164253	1,83
70/100	102	BAM	P2_B13			0,45	1500000	1620000	1,08
70/100	102	BAM	P3_B18			0,8	170000	260000	1,53

Tabel 5.1: Overzicht discontinue proeven in de pragmatische benadering

In Figuur 5.4 is een overzicht gegeven van de healingsfactoren verkregen volgens de pragmatische benadering. De gevonden factoren zijn uitgezet tegen hun stijfheidsval bij de start van de rustperiode. In de grafiek is per datapunt het aantal lastherhalingen in de belastingperiode weergegeven.

De tabel (Tabel 5.1) laat zien dat de gevonden healingfactoren niet significant van elkaar verschillen. Voor beide mengsels liggen ze tussen 1,01 en 1,83. Opvallend hierbij is dat er uit de grafiek wel een duidelijk verband blijkt tussen stijfheidsval en healingsfactor (zie Figuur 5.4). Dat de mate van healing afhankelijk is van de schade en dus van de stijfheidsafname lag in de lijn der verwachtingen. Echter de resultaten in Figuur 5.4 wijzen er op dat dit een sterk verband is dat consequent wordt teruggevonden bij verschillende balkjes, ook al vertonen die balkjes onderling nogal wat spreiding in stijfheid en levensduur. Andersom betekent dit ook dat de keuze om de healingsfactor per balk te bepalen een goede is geweest, omdat de spreiding tussen balkjes daardoor grotendeels wordt geëlimineerd. Overigens zijn de bepalingen uit Figuur 5.4 gebaseerd op bepalingen in twee verschillende laboratoria, maar de relaties blijven desondanks duidelijk. Tussen beide laboratoria is ook een vergelijkend onderzoek uitgevoerd (BIJLAGE E).

De healingsfactor (althans zoals gedefinieerd in Figuur 5.1) zal bij een rustperiode bij de helft van de initiële stijfheid nog beperkt groter dan 1 zijn en zal bij nog lagere stijfheden naar 1 naderen (steeds minder levensduurverlenging na rustperiode). Als de stijfheid bij rust nog dicht bij de initiële stijfheid zit (na een klein aantal belastingen en dus bij weinig schade) zal de healingsfactor (althans zoals gedefinieerd in dit hoofdstuk) naar 2 moeten naderen: het aantal lastherhalingen waarbij na de rust weer dezelfde beperkte stijfheidsval wordt bereikt zal nagenoeg gelijk zijn als het aantal cycli waarna hij voor de rust werd bereikt¹.



Figuur 5.4: Conceptueel aangegeven verloop healingsfactoren over gehele stijfheidsrange

¹ Merk op dat de healingsfactor volgens deze definitie dus nooit meer dan 2 kan zijn!

Uit de data blijkt een duidelijk verschil in het verloop voor de beide mengsels, zoals ook verwacht werd. Aan de andere kant is ook het stijfheidsverloop over de levensduur erg verschillend en ook dat moet worden meegewogen. De grote vraag is dus hoe op een eenduidige manier healingswaarden te bepalen uit de data. Er zijn drie verschillende methoden bekeken:

Aflezen healingswaarde op $S/S_{ini}=0,5$

bepalen healingsfactor door de healing te integreren of middelen over $S=S_{ini}$ tot $S=0,5S_{ini}$

bepalen gewogen healingsfactor door via de healingsfactor over stijfheidsverloop en stijfheidsverloop over aantal lastherhalingen een relatie tussen healingsfactor en aantal lastherhalingen te bepalen en die te integreren of middelen

ad 1 aflezen healingswaarde op $S/S_{ini}=0,5$,

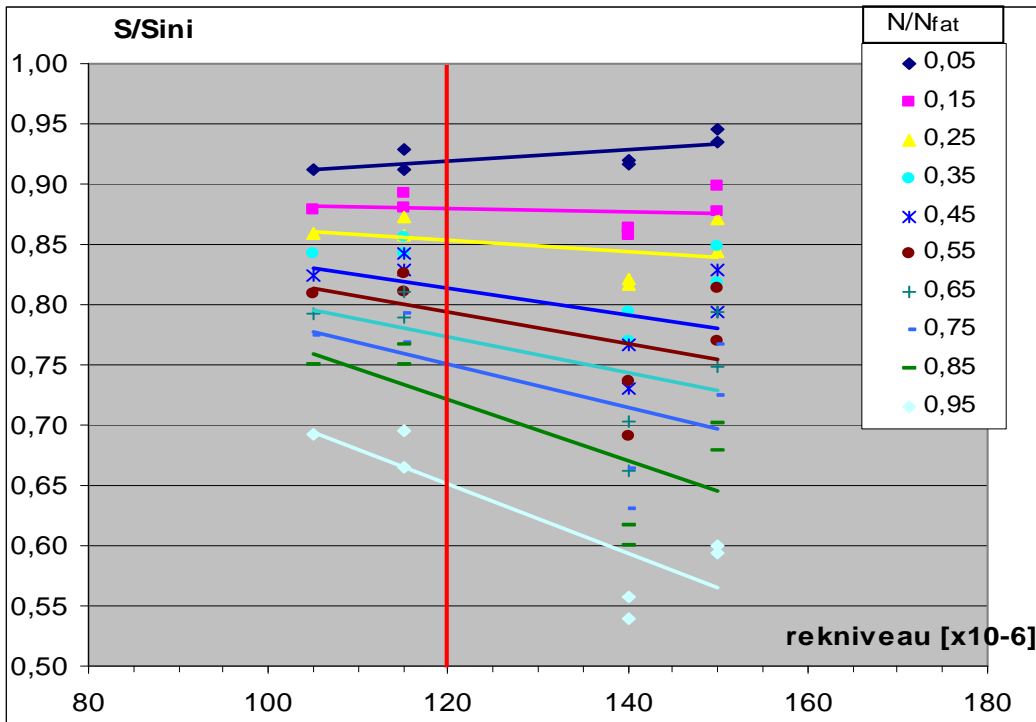
Het bereiken van de halve initiële stijfheid is het bezwijkcriterium uit de vermoeiingsproef. Ook als het materiaal op dat moment geen restlevensduur meer heeft, zal de werkelijke levensduur in de weg nog langer zijn omdat daar rustperiodes op treden en in de proef niet. De mate waarin het materiaal door rustperiodes herstelt en daardoor langer mee gaat, wordt door deze waarde feitelijk niet weergegeven. Wel geeft het een indicatie van de resterende healingscapaciteit in het materiaal op het moment dat dit in de vermoeiingsproef als bezweken wordt beschouwd. Dit is een indicatie voor de mate waarin een materiaal op het ontwerpcriterium nog over healingscapaciteit beschikt, een restant-healing als het ware. Hoewel ook deze waarde van belang kan zijn voor het ontwerp, immers hoe hoger de rest-healingscapaciteit, des te langer zal het materiaal blijven herstellen bij voortgaande belasting. Het effect van rustperiodes op de levensduur in de proef zit hier echter niet in, waardoor het een onvolledig beeld zou geven.

Ad 2 integreren of middelen over $S=S_{ini}$ tot $S=0,5S_{ini}$

Op deze manier wordt het verloop van de healingscapaciteit als functie van de stijfheid gedurende de proef meegenomen en niet alleen de resterende healing bij het bereiken van het bezwijkcriterium. Wat in deze bepaling niet wordt meegenomen, is dat het verloop van de stijfheid gedurende de proef ook materiaalafhankelijk is, zoals duidelijk te zien is in Figuur 5.2 en Figuur 5.3. Bij healing gaat het uiteindelijk om een verlenging in levensduur, niet om de relatieve stijfheid waar dat bij gebeurt. Door het verloop van de stijfheid over de levensduur niet mee te nemen, wordt de healingswaarde niet direct aan een levensduurverlenging gekoppeld. Daarmee kun je er in het ontwerp weinig mee.

Ad 3 Gewogen integreren of middelen over $N=1$ tot N_{falen}

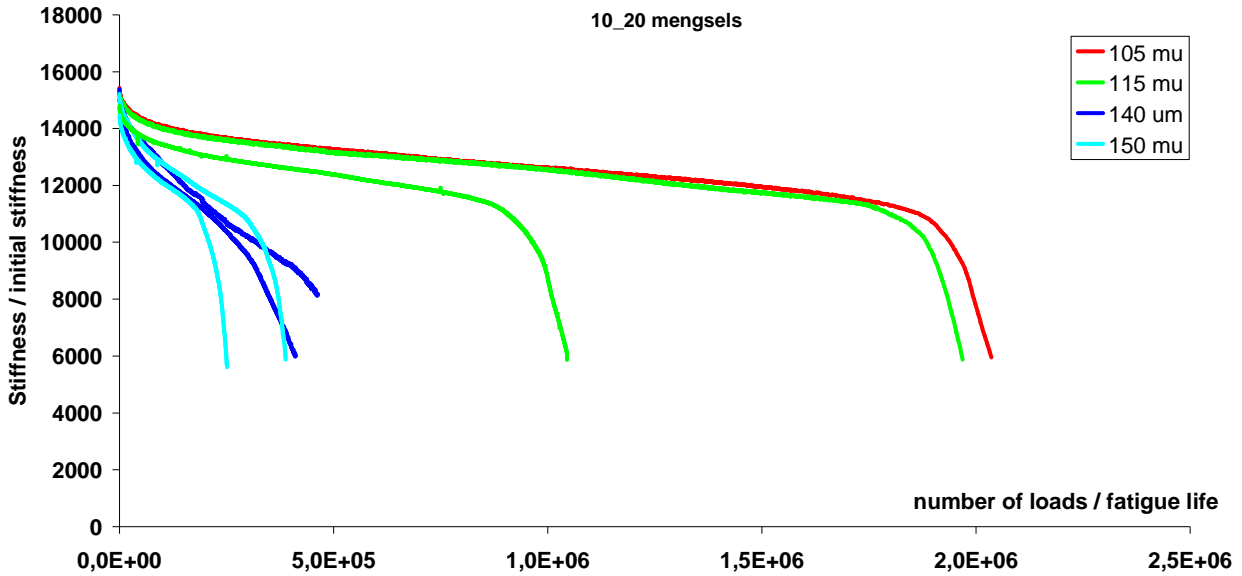
Bij deze benadering wordt zowel het verloop van healing over de stijfheid als het verloop van de stijfheid over het aantal lastherhalingen mee gewogen. Resultaat is dat de healing over het aantal lastherhalingen wordt gemiddeld. Hiervoor wordt het verloop van de relatieve levensduur (N/N_{fat}) in tien stappen verdeeld ($N/N_{fat}=0,05; 0,15; \dots; 0,95$). Dan wordt voor elke continue proef bepaald wat de stijfheid is bij elk van deze N/N_{fat} waarden. Met behulp van de initiële stijfheid in elk proef kan dan ook de relatieve stijfheid bij die relatieve levensduur bepaald worden. Omdat de continue proeven bij verschillende rekniveaus zijn uitgevoerd, kunnen de relatieve stijfheden bij elke N/N_{fat} waarde niet simpelweg gemiddeld worden. De mate van stijfheidsreductie bij een gegeven N/N_{fat} wordt namelijk mede bepaald door het rekniveau waarbij de proef is uitgevoerd. Voor het 10/20 mengsel is dit weergegeven in Figuur 5.5. Dit is dezelfde data als in Figuur 5.3. In Figuur 5.3 de relatieve stijfheid uitstaat tegen het aantal lastherhalingen, met verschillende lijnen voor de verschillende rekniveaus. Figuur 5.5 geeft de relatieve stijfheid als functie van het rekniveau, met verschillende kleuren voor het relatieve aantal lastherhalingen.



Figuur 5.5: Relatieve stijfheid als functie van het rekniveau voor verschillende relatieve levensduren

In bovenstaande figuur is te zien dat aan het begin van de proef (lage N/N_{fat} waarde) een hoog rek niveau gunstig uitpakt, in de zin dat de stijfheidsreductie nog laag is. Dit lijkt onlogisch omdat hoge reksniveaus sneller tot bezwijken leiden, maar bij het relatief maken van de levensduur en stijfheidsval worden de hoge reksniveaus "uitgesmeerd" en de lage "in elkaar gedrukt". Een relatieve levensduur van 0,05 valt dan bij 10/20 bij circa 10.000 lastherhalingen bij een rekniveau van 150×10^{-6} en bij een rek van 105×10^{-6} zit het rond de 100.000 herhalingen.

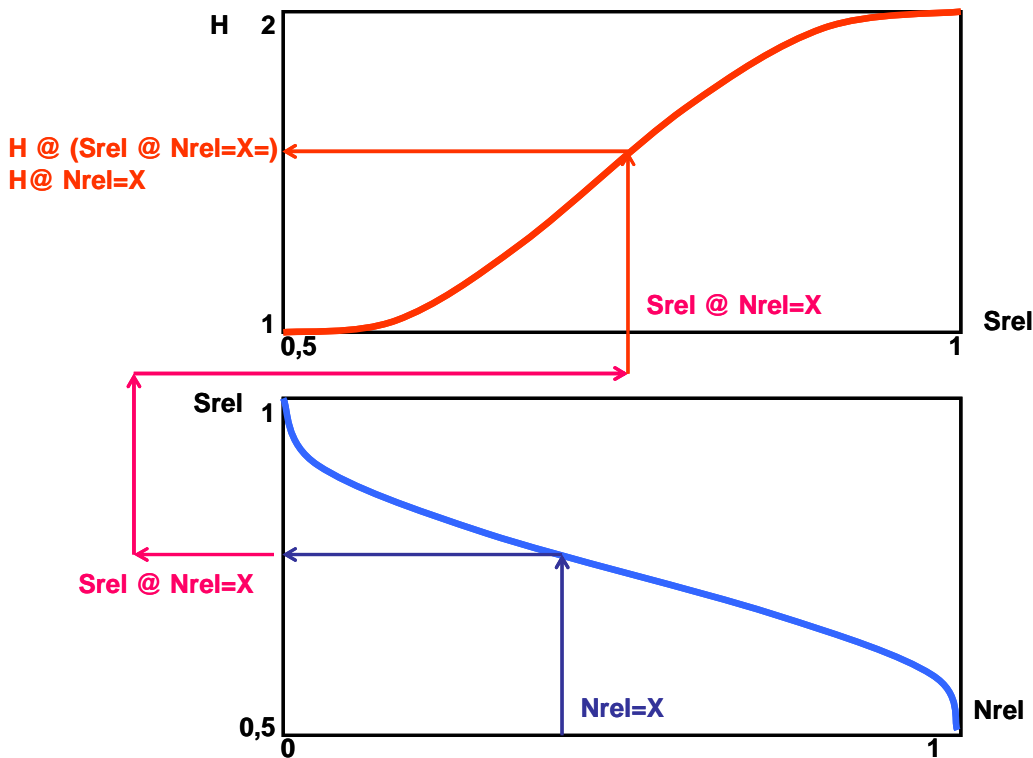
Dit effect van het relatief maken van de resultaten is goed zichtbaar als de absolute vermoeiingsresultaten (Figuur 5.6) vergeleken worden met de relatieve (Figuur 5.3). Bij de hogere rekniveau's is de lineaire, tweede, fase relatief kort, de eerste fase duurt langer en de derde begint eerder. Hierdoor slaat met toenemende N/N_{fat} het effect van rekniveau om en is de stijfheidsreductie voor hoge rekniveaus lager bij kleine N/N_{fat} en groter bij grote N/N_{fat} . In Figuur 5.5 is te zien dat de stijfheidsreductie bij een rekniveau van 140×10^{-6} steeds lager ligt/de stijfheidsreductie sneller verloopt dan bij 150×10^{-6} . Uit Figuur 5.6 blijkt ook dit deels het gevolg van het relatief maken: het verloop van beide rekniveaus ligt dicht bij elkaar, maar voor de hogere rek verloopt de vermoeiing toch iets sneller, met een iets korter lineair traject dan voor de proeven bij 140×10^{-6} . Door het relatief maken worden de grafieken voor 150×10^{-6} wat verder opgerekt, waardoor in de relatieve overzichten (Figuur 5.3 en Figuur 5.5) de grafieken met het hogere rekniveau minder snel stijfheid verliezen.



Figuur 5.6: Absoluut verloop vermoeiingsproeven 10/20 mengsels (vergelijk met relatieve in Figuur 5.3)

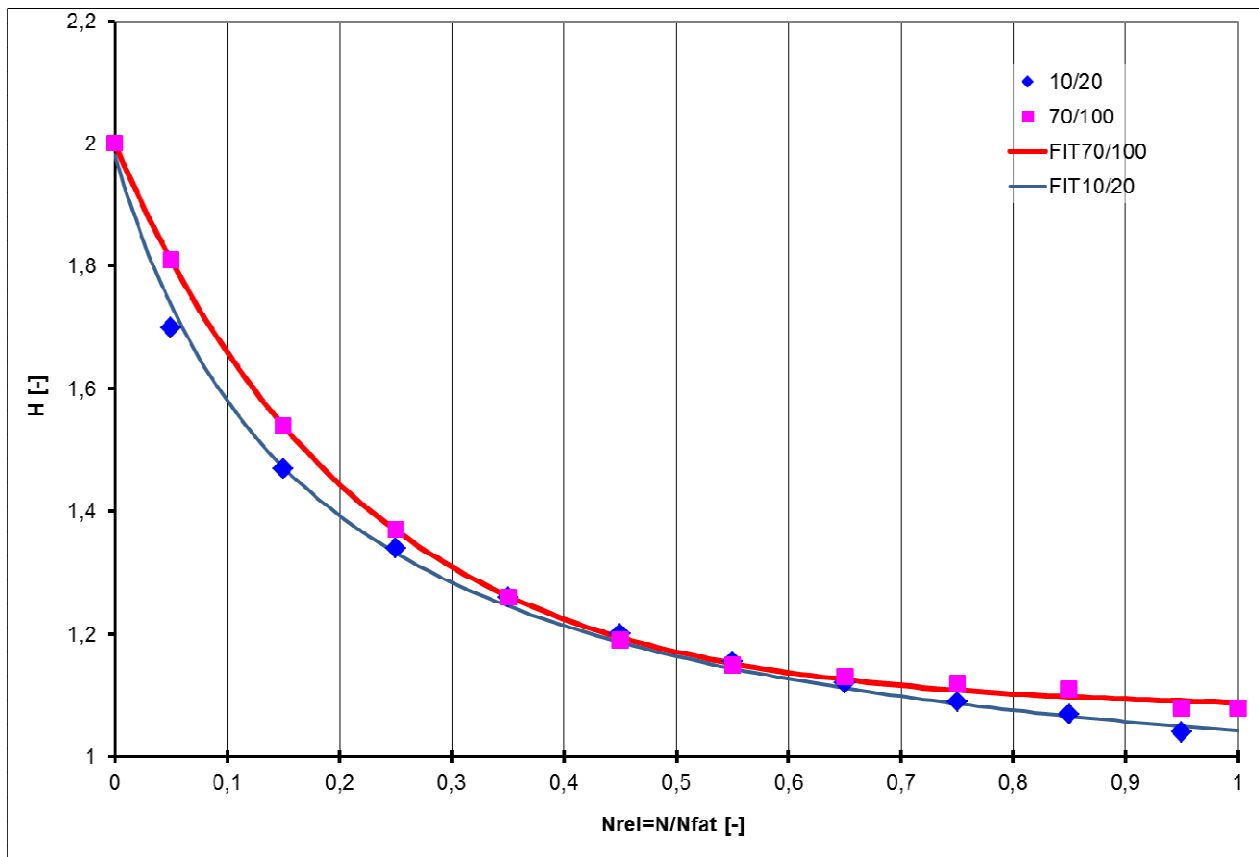
Om te komen tot een gemiddeld stijfheidsverloop bij de ϵ_6 (120×10^{-6}) is het effect van het rekniveau uit Figuur 5.5 meegewogen. Per relatieve N-waarde is er een lineaire relatie gefit op de relatieve stijfheid als functie van het rekniveau. Deze relaties zijn weergegeven als rechte lijnen in Figuur 5.5. Uit die relaties wordt per relatieve N-waarde de relatieve stijfheid bij een rekniveau van 120×10^{-6} bepaald. Zo is het gemiddelde verloop van stijfheid als functie van de levensduur zoals getoond in Figuur 5.3 verkregen.

Uit Figuur 5.4 is per relatieve stijfheid ook de healingsfactor af te lezen. Door dit te doen voor de relatieve stijfheden die horen bij relatieve levensduren van 0,05 tot en met 0,95 kan de healingsfactor als functie van de relatieve levensduur bepaald worden. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 5.7.



Figuur 5.7: Schematische weergave van het bepalen van $H=f(Nrel)$ uit $Srel=f(Nrel)$ en $H=f(Srel)$

Als we de healingswaarden plotten tegen de relatieve N-waarden die op deze manier gevonden worden, wordt Figuur 5.8 verkregen.



Figuur 5.8: Healing als functie van de relatieve levensduur

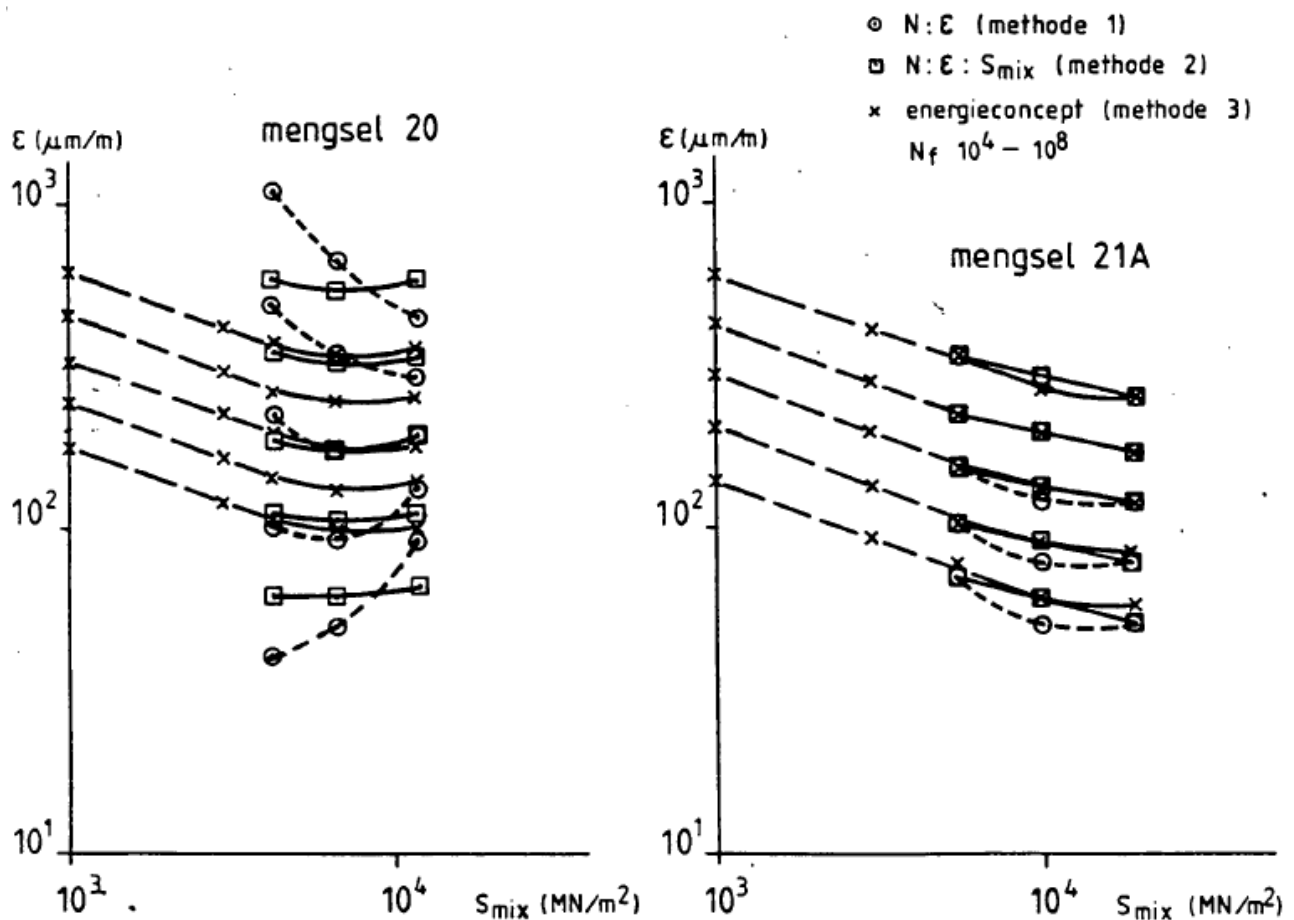
Uit deze figuur (Figuur 5.8) blijkt dat, als ook het verloop van de stijfheid over de levensduur wordt mee gewogen, het gevonden verloop van healing over de levensduur voor beide mengsels elkaar nauwelijks ontloopt. Dat is op zich logisch, want hoewel de healing als functie van de stijfheid een duidelijk verschil laat zien, wordt dit opgeheven door het bijna even grote, tegengestelde effect van het verloop van de stijfheid over het aantal lastherhalingen. De gemiddelde healingsfactor over de levensduur kan nu worden bepaald door de datapunten (de markers in Figuur 5.8) te middelen. Dit geeft een healingsfactor van 1,24 voor het 10/20 mengsel en 1,27 voor het 70/100 mengsel.

Hoewel de methode robuust blijkt en de data veelbelovend, wordt er dus nauwelijks verschil in healingscapaciteit gevonden tussen de twee mengsels. Dat is strijdig met de hypothese, aangezien de gebruikte bitumina wel verschillen. Nadere beschouwing van de gebruikte bitumina liet, zoals aangegeven in 3.2.1, zien dat door een fout bij de proefstukproductie de gebruikte 10/20 bitumen geen gewone bitumen is maar een met een verhoogde vermoeiingsweerstand. Hierdoor gaat de originele hypothese over het verschil tussen beide mengsels niet meer op. Aan de andere kant gaat het bij deze fout om het hardere materiaal. Het 70/100 mengsel bevat wel de beoogde bitumen, maar de healingsfactor hiervan ligt maar net boven de 1. Aangezien healingswaarden altijd boven de 1 moeten liggen, kan er ook bij het vergelijken met de juiste harde bitumen nooit een groot verschil gevonden worden.

5.3 Alternatieve beschouwing van de data

Uit de voorgaande analyse blijkt dat de in dit onderzoek gebruikte manier om een indicatie voor de healingscapaciteit te bepalen, niet aansluit bij de verwachte trends. Omdat de data zelf er robuust en reproduceerbaar uit zien, is er gekeken of er geen andere manier is om uit deze data toch een bruikbare indicatie van de healingscapaciteit te krijgen. Uit de in paragraaf 1.2.1 genoemde onderzoeken komt telkens naar voren dat een gedissipeerde energie benadering de meest robuuste is omdat deze niet beïnvloed wordt door verschillen in proefcondities (soort proef, rek/spanningsgestuurd, rek/spanning niveau). Eerder in dit onderzoek werd ondanks deze voordelen niet voor de

energie benadering gekozen omdat deze bewerkelijk is en omdat eerdere ervaringen met de energie benadering van vermoeiingsweerstand niet goed aansloten bij de resultaten van de in Nederland gebruikelijke rekgestuurde vierpuntsbuigproeven (Geysendorfer, 1986). In dit onderzoek zijn 3 en 4puntsbuigproeven gedaan en op drie manieren geanalyseerd. In de eerste methode door per temperatuur te kijken naar de gemeten N-eps waarden bij de gemiddelde stijfheid, dat sluit aan bij de huidige Europese normen waarbij het effect van temperatuur en frequentie niet wordt mee genomen. De tweede methode neemt de stijfheid wel mee, door de data voor alle meettemperaturen gezamenlijk te fitten met een polynoom dat de vermoeiingslevensduur beschrijft als functie van rek en stijfheid Het energie concept ontwikkeld door van Dijk et al (1977) is de derde methode die is toegepast. Uit het onderzoek blijkt dat het energie concept in sommige gevallen de gevoeligheid van de vermoeiingsweerstand voor het rekniveau slechter beschrijft dan de beide andere methoden. Extrapolatie kan in die gevallen tot grote verschillen leiden. Vooral in de linkerfiguur is goed te zien dat de lijnen bij toepassing van het energie concept veel dichter bij elkaar liggen dan bij de beide andere methoden.



Figuur 5.9: Analyses vermoeiingsdata op verschillende manieren (Geysendorfer, 1986)

Bovengenoemde beschrijving van het vermoeiingsgedrag aan de hand van energiedissipatie is ten tijde van de ontwikkeling van het Shell Pavement Design Manual door Visser (Dijk, van et al (1977)). Sinds die tijd zijn veel andere onderzoekers ook met energiedissipatie als criterium aan de slag gegaan (Shen et al. (2007)). Uitgangspunt hierbij is altijd de oorspronkelijk claim dat de energie dissipatie een mengsel eigenschap is, onafhankelijk van de proefuitvoering en het belastingniveau. Dit werd door van Dijk (Dijk, van, 1972) in de volgende relatie tussen energie dissipatie en aantal lastherhalingen tot bezwijken: $W_f = AN_f^2$, of te wel als de gedissipeerde energie bij bezwijken een materiaal parameter is, kan een signaal kan een materiaal meer lastherhalingen opnemen als de per lastherhaling ingebrachte energie kleiner is.

Onderzoek van Pronk (Pronk et al. 2009) heeft ook laten zien dat de resultaten van de twee- en vierpuntsbuigproef ook met een analyse op grond van energie dissipatie niet aan elkaar te koppelen zijn. Dat is niet verwonderlijk, want zelfs als de hoeveelheid energie die nodig is om schade te veroorzaken een (constante) materiaal eigenschap is, gaat een deel van de energie die in het materiaal wordt gebracht zitten in het opwarmen van de proefstukken en (vertraagd) elastische vervorming. Dus niet alle in het proefstuk gebrachte energie draagt bij aan schade ontwikkeling. Bij een gegeven proefuitvoering is het goed mogelijk twee materialen die niet teveel van elkaar verschillen te vergelijken aan de hand van hun energie dissipatie en het bijbehorende aantal cycli tot bezwijken. Maar onder andere condities kan zowel de mate waarin de materialen energie om kunnen zetten in warmte en vervorming, als de mate waarin energie wordt omgezet in schade veranderen. Denk aan de signalen over het gedrag van polymeer gemodificeerd asfalt in de vierpuntsbuigproef, het lijkt erop dat de huidige proefuitvoering en interpretatie niet geschikt is voor deze materialen.

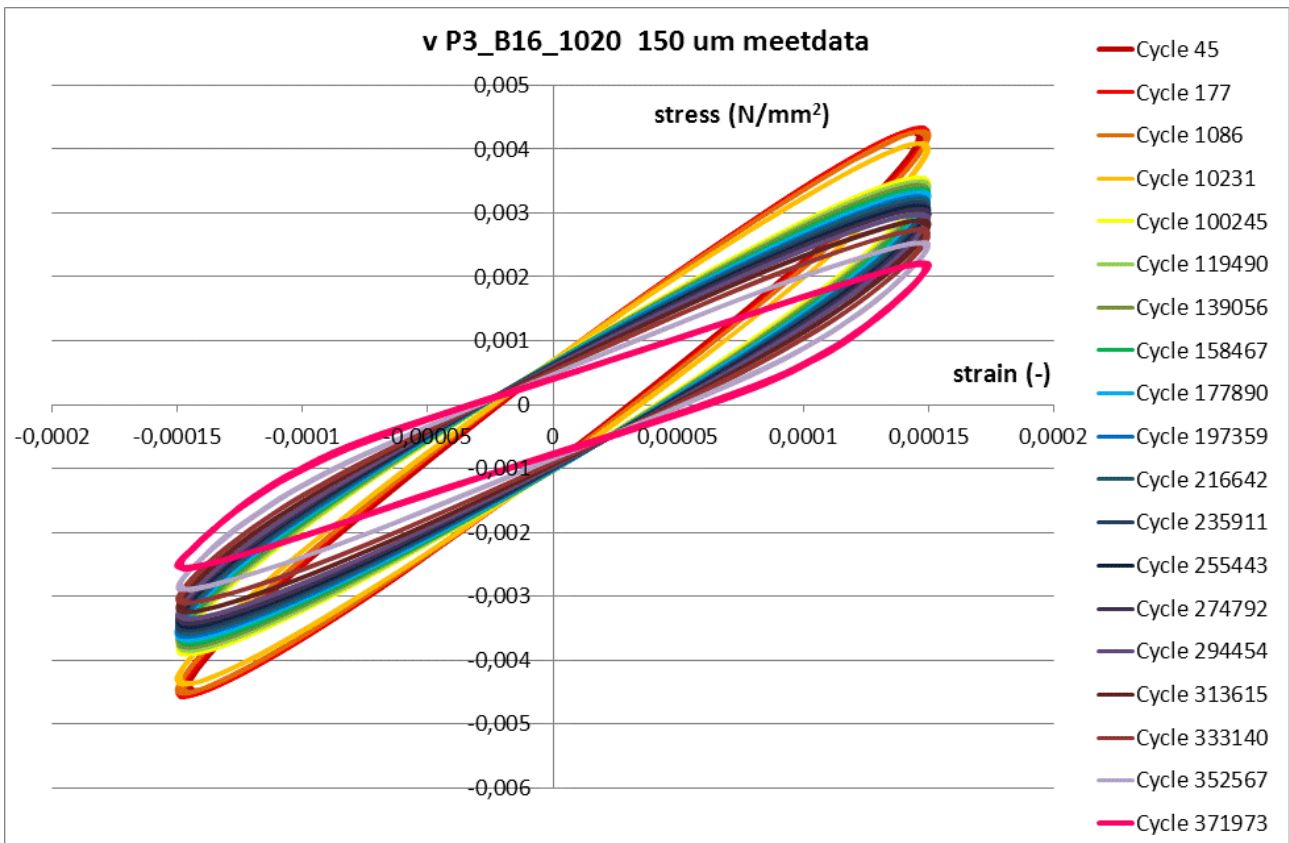
De slag van een meting naar een algemene materiaal parameter of het voorspellen van gedrag, is daardoor complex. Toch blijft het zoeken naar een relatie tussen schade en energiedissipatie bij het ontstaan daarvan, onverminderd populair. Logisch, want een dergelijke relatie maakt het mogelijk de resultaten van verschillende proeven te vergelijken en proefresultaten te koppelen aan gedrag in de weg. De afgelopen jaren is hier met name vanuit de VS het nodige aan gedaan, waarbij het werk van Carpenter en zijn collega's (Shen et al. (2007)) waarbij een plateau waarde (plateau value, PV) wordt gehanteerd die niet alleen een universele indicatie van de vermoeiingsweerstand zou geven, maar die bovendien gekoppeld kan worden aan het gebruikelijke einde levensduur criterium ($N_{f,50}$) mogelijkheden lijkt te bieden. In het vervolg van deze paragraaf wordt nader op deze methode in gegaan.

De gedissipeerde energie benadering is erop gebaseerd dat bij het belasten en vervormen van materialen energie in het materiaal wordt gebracht. Lineair-elastische materialen geven die energie weer terug bij ontlasten, hun ontlastingspad in het spanning-rek diagram ligt bovenop het belastingspad. Niet-lineair-elastische materialen hebben dat niet, zo geven visco-elastische materialen bij een cyclische proef met een sinusvormig signaal een ellips in de spanning-rek ruimte. Het oppervlak binnen deze ellips is een maat voor de energie die in die sinus is gedissipeerd. Vergelijking 5.2 geeft de uitdrukking voor de initiële gedissipeerde energie in een dergelijke proef (uitgaande van een zuiver sinusvorming spannings- en rekverloop).

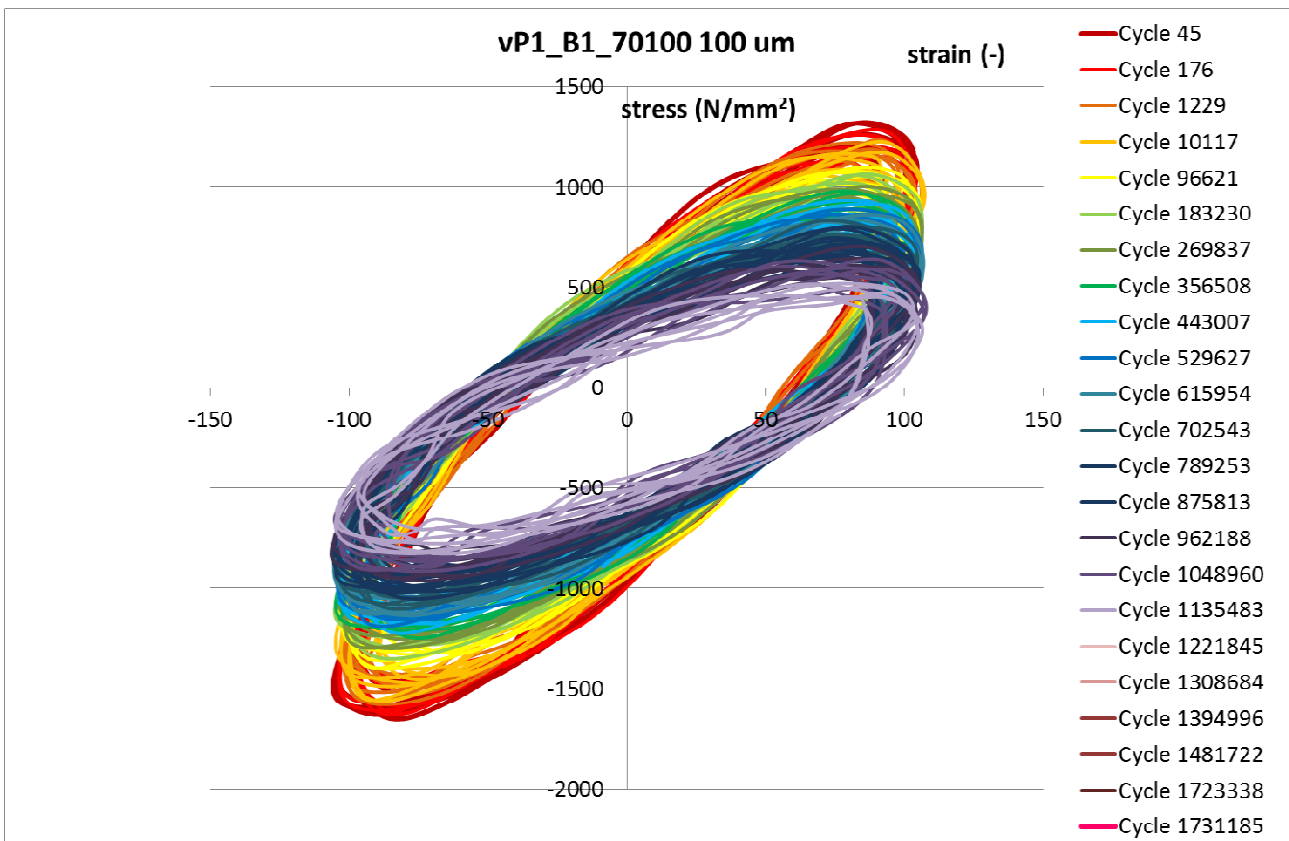
$$W_{dss,0} = \sigma_0 \times \varepsilon_0 \times \pi \times \sin(\phi_0) \quad (5.2)$$

Met: $W_{dss,0}$, σ_0 , ε_0 , ϕ_0 de energie dissipatie, spanning, rek en fasehoek bij het begin van de proef

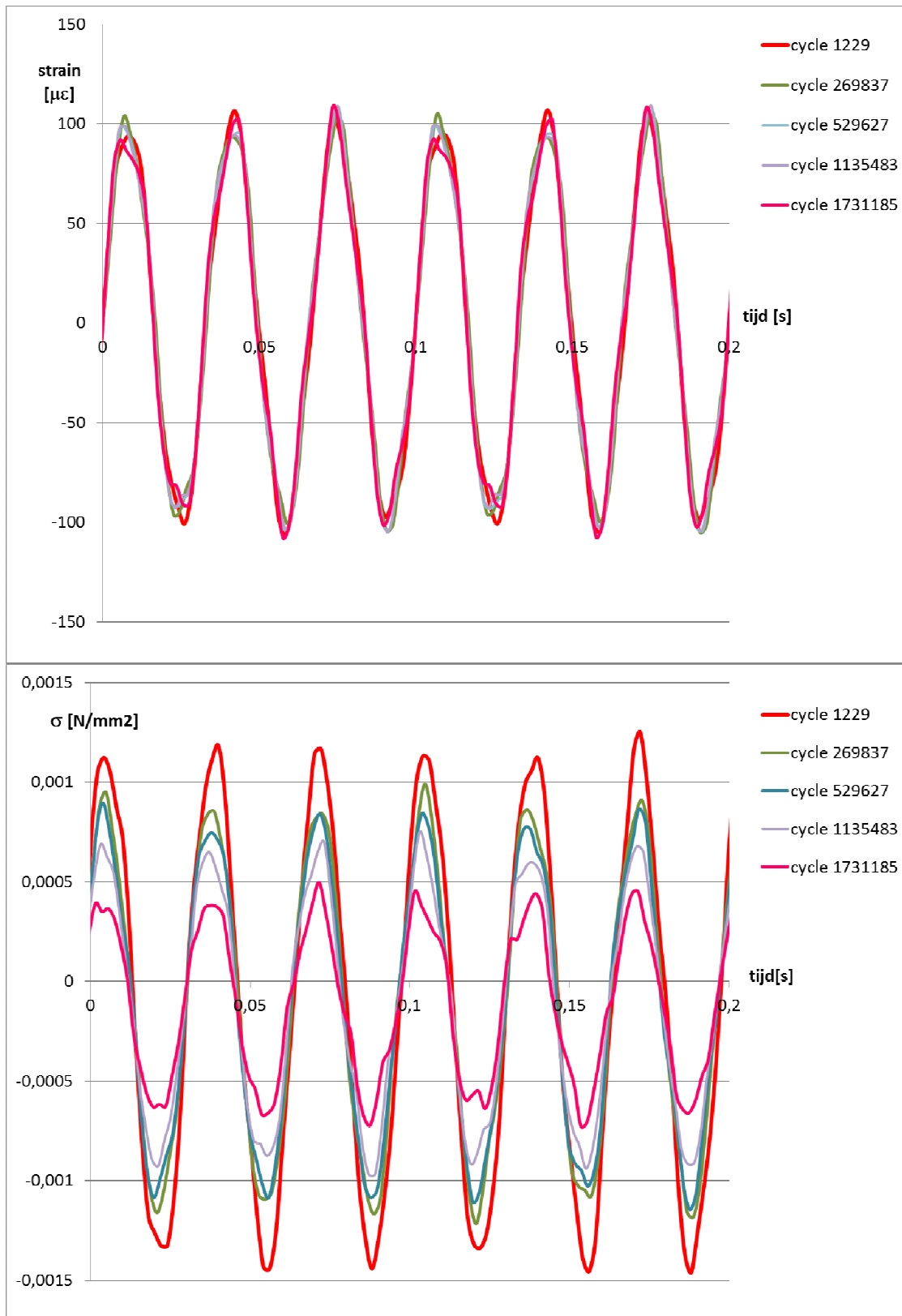
Gedurende de proef verlopen de signalen (stijfheid en fase hoek) echter. Daarmee verandert, zoals in Figuur 5.10 en Figuur 5.11 te zien is, ook de orientatie van de elips. Bovendien zijn de signalen ook niet langer zuiver sinusvormig (Figuur 5.12). Daardoor is de ellips ook niet meer geheel zuiver van vorm.



Figuur 5.10: Energiedissipatie en de verandering van de elips in de spanning-rekruimte voor een 10/20 proefstuk



Figuur 5.11: Energiedissipatie en verandering van de elips in de spanning-rekruimte voor een 70/100 proefstuk



Figuur 5.12: Rek (boven) en spanningssignalen voor 70/100 bitumen in verschillende cycli

De energie dissipatie kan uit verschillende delen bestaan, de inwendige opwarming ten gevolge van de optredende belastingen, het ontstaan van scheuren en het optreden van blijvende vervormingen. Carpenter verwijst naar verschillende onderzoeken die laten zien dat bij belastingen met een kleine amplitude wel energie wordt gedissipeerd, maar geen schade optreedt. Hij stelt daarom dat niet de energie dissipatie, maar de verandering in energie dissipatie van belang is, als signaal dat er schade onstaat. Indien er geen schade optreedt, is de situatie in

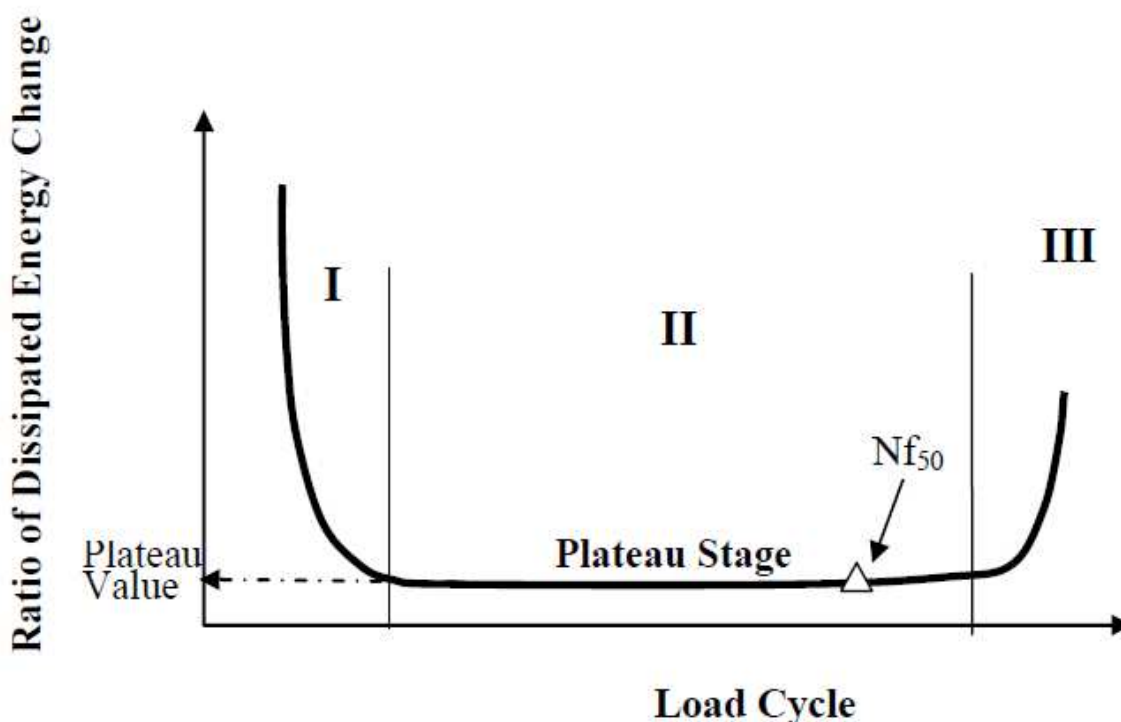
evenwicht en zal de energie dissipatie constant zijn. Bij schade ontwikkeling neemt de energie dissipatie echter toe en het is die verandering (toename) in energie dissipatie die gekoppeld is aan vermoeiing en healing. Overigens is de energie dissipatie in cyclische proeven in het begin niet constant, maar in die fase neemt hij niet toe, maar af. Dit wordt veelal verondersteld samen te hangen met het opwarmen ten gevolge van interne demping in het materiaal. Nadat een evenwicht bereikt is, is de energie dissipatie dan constant tot deze (snel) toe neemt. Dat is wanneer er schade ontstaat.

Oorspronkelijk gebruikte Carpenter de verandering in gedissipeerde energie tussen cycli ($DE_{n+1} - DE_n$) als een maat voor schade, maar later maakte hij er de relatieve verandering in gedissipeerde energie (RDEC, zie vergelijking 6.3) van. Hij verklaart dit deels door een vergelijking met damage modellen en deels doordat de energie dissipatie in een stap afhangt van de voorgaande stappen, het is dus pad afhankelijk. Hij vult dit in door de verandering in gedissipeerde energie te delen door de gedissipeerde energie in de vorige stap. Dat is niet helemaal consistent met damage modellen, want daar wordt een eigenschap in stap n vergeleken met diezelfde eigenschap bij aanvang. Het is ook geen echte pad-afhankelijkheid want dan moeten alle voorgaande stappen worden meegenomen en nu is dat er maar een. Het lijkt dan ook meer een pragmatische dan een fundamentele keuze voor het meenemen van dit effect.

$$RDEC = \frac{DE_{n+1} - DE_n}{DE_n} \quad (5.3)$$

Het verloop van de RDEC volgt dat van de verandering in energie dissipatie, met drie afzonderlijke stadia (Figuur 5.13): in fase I neemt de RDEC af, in fase II neemt RDEC lineair toe en in Fase drie neemt hij steeds sterker toe.

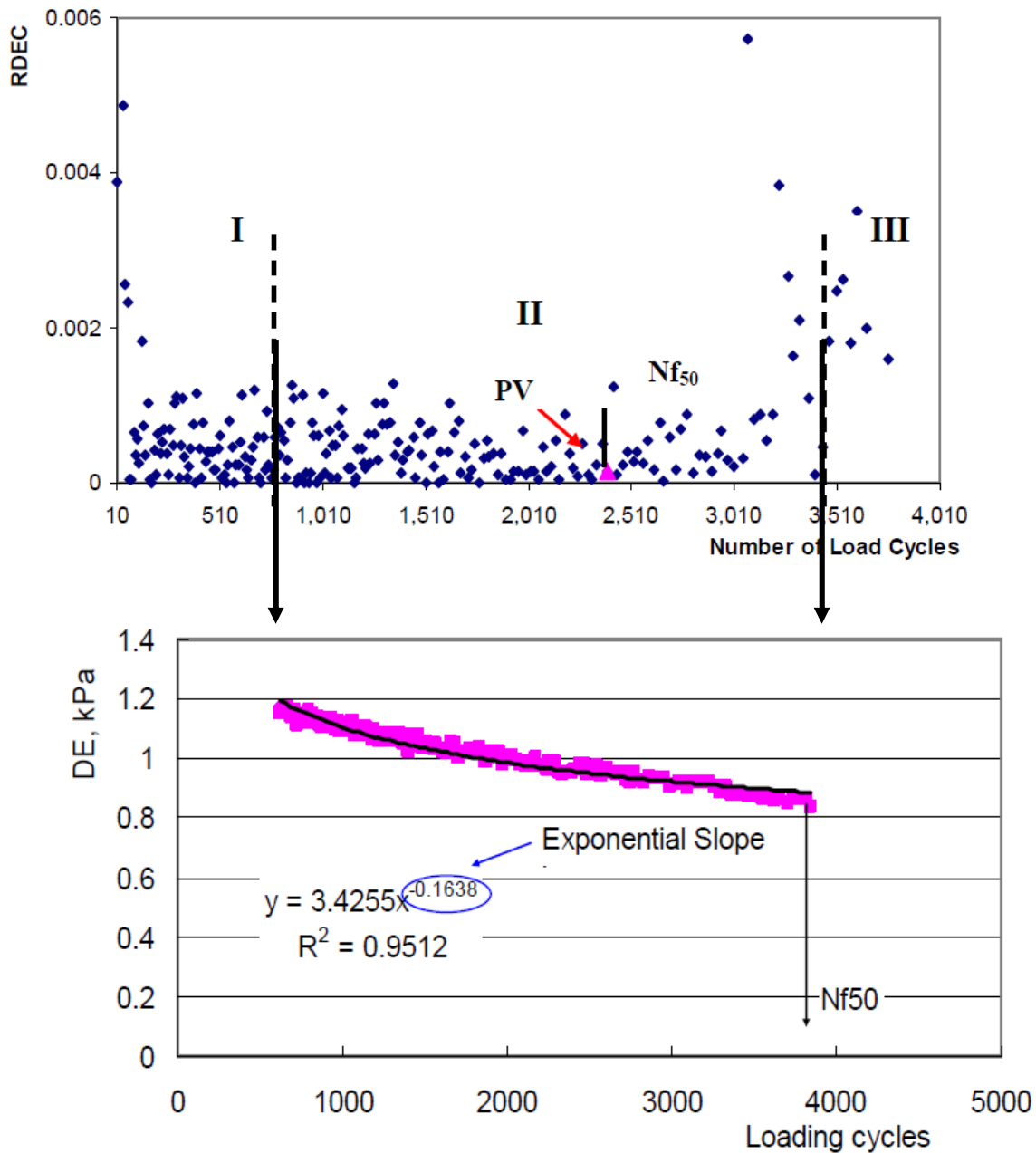
Zoals ook uit Figuur 5.13 blijkt, is het plateau geen echt plateau, de waarde verloopt nog steeds met het aantal lastherhalingen, maar wel veel minder dan in de rest van de proef.



Figuur 5.13: Voorbeeld van de typerende RDEC plot volgens Carpenter (Shen et al., (2007))

Het bepalen van de plateau value (PV) gebeurt niet uit de RDEC plot zelf, want de verschillen tussen de meetdata zijn groot in verhouding tot de data zelf (veel ruis). Daarom wordt er een relatie gefit op de data van de gedissipeerde energie tegen het aantal lastherhalingen. De relatie $DE = A N^k$ wordt gefit op het deel van N waar het

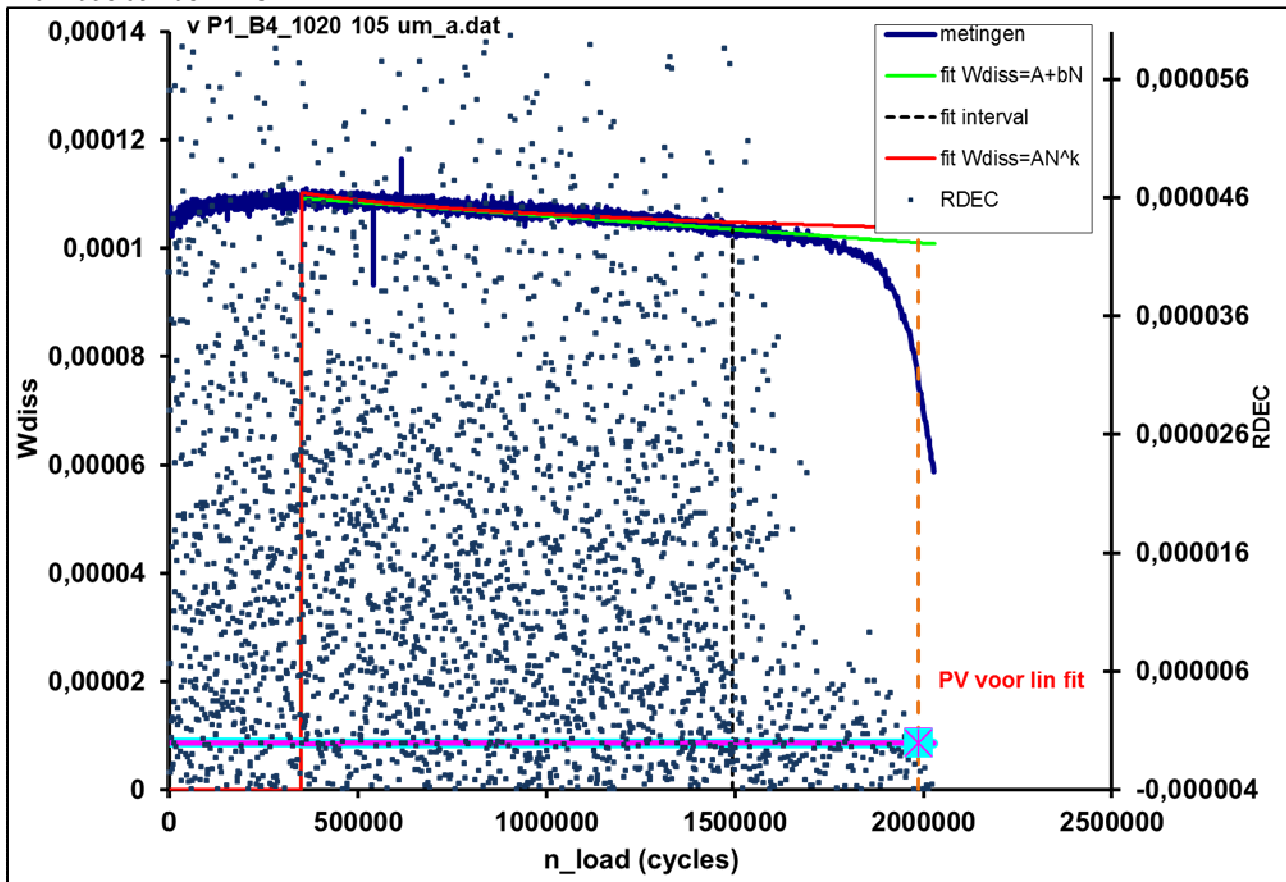
plateau wordt verwacht. De grenswaarden van N worden bepaald uit de RDEC-N plot. Figuur 5.14 laat dit zien voor de waarden uit het onderzoek van Shen en Carpenter (Shen et al. 2007).



Figuur 5.14: bepaling van het deel waarover DE-N wordt gefit (Shen et al., 2007)

Deze methode is ook toegepast op twee vermoeiingsproeven uit dit onderzoek (**Error! Reference source not found.** en BIJLAGE F). Hierbij is de gedissipeerde energie voor alle proefstukken bepaald en de RDEC voor twee, een van elk mengsel. De bepaling van de RDEC kan ook voor de data uit dit onderzoek niet direct op de meet data gebeuren, omdat het signaal verdrinkt in de ruis. Het bepalen van een PV waarde uit de RDEC plot is dan ook niet mogelijk aan de hand van de meetdata. Het is wel mogelijk om door de quasi- lineaire delen van de W_{diss} curves een curve te fitten, daaruit een RDEC te bepalen en vervolgens de RDEC bij N_f te bepalen. Dat is voor deze twee proeven ook gedaan (BIJLAGE F), waarbij zowel een rechte lijn (met een constante plateau waarde) als een machtsrelatie zoals Shen en Carpenter aangeven, gebruikt is. Voor de data uit dit onderzoek, werkt de lineaire fit beter dan de machtsrelatie. Belangrijker is dat de RDEC in beide gevallen geen meerwaarde heeft ten opzicht van de

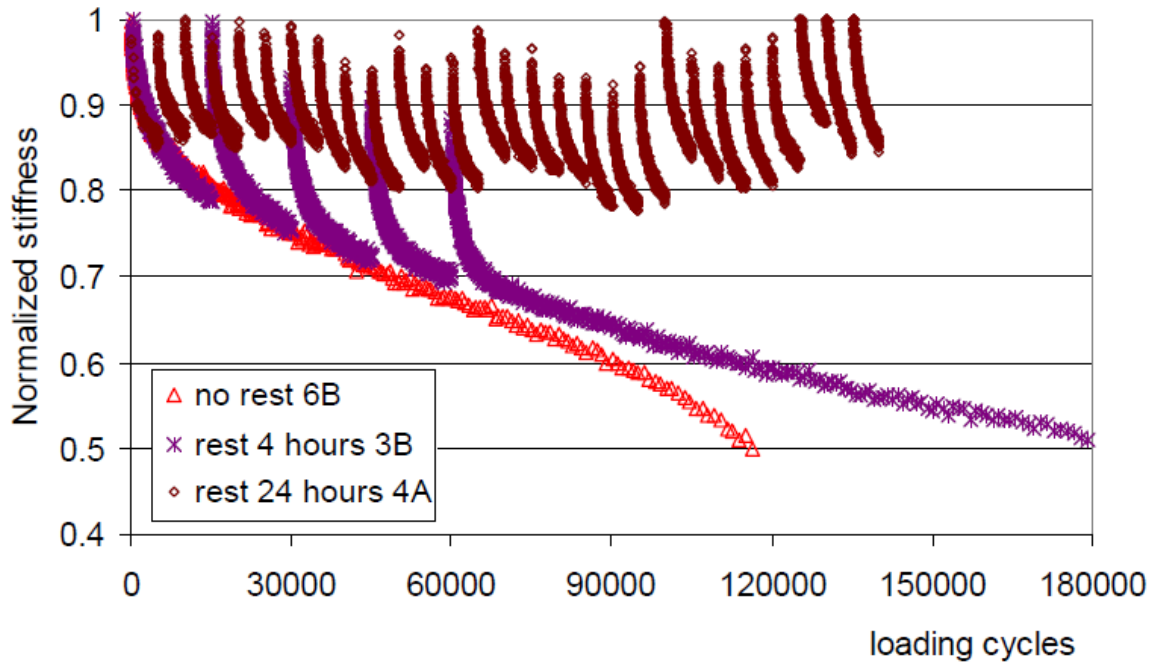
gedissipeerde energie zelf. Het punt waarop W_{diss} gaat afwijken van de gefitte machts- of lineaire relatie geeft meer informatie dan de RDEC.



Figuur 5.15: Plot van de gedissipeerde energie uit de data (blauwe lijn, uitgezet op linker as), gefit met een machts- en lineaire relatie en de RDEC (blauwe punten, uitgezet op de rechteras), met de uit de fit afgeleide waarden en de plateau waarden bepaald bij $N_f/50$

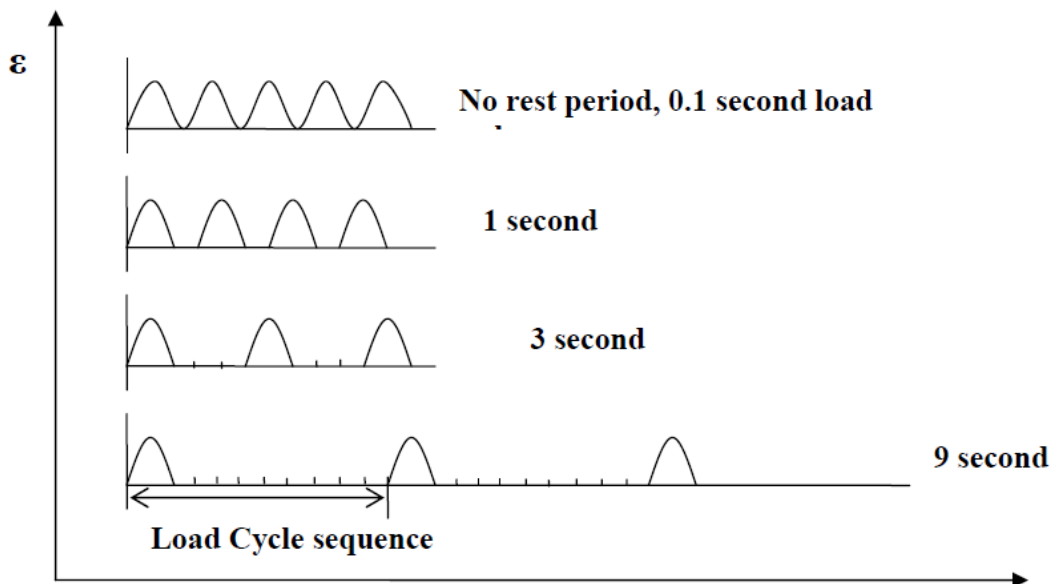
Zoals uit bovenstaande figuren blijkt, kan de de RDEC plateau waarde bepaald worden uit fit op de gedissipeerde energie, maar er lijkt geen meerwaarde van de RDEC ten opzichte van de gedissipeerde energie te zijn. In het hierboven uitgewerkte voorbeeld voor een 10/20 mengsel, valt de variatie in RDEC waarde op een gegeven moment terug. Dit moment valt min of meer samen met het aantal lastherhalingen dat de fit op de gedissipeerde energie af gaat wijken van de gedissipeerde energie waarden en het optreden van fase III van de vermoeingsproef. Het fitten van de gedissipeerde energie in fase II en het gebruiken van het moment dat dit gaat afwijken van de meetwaarden, zou dan ook een alternatieve manier kunnen zijn om de vermoeingslevensduur te bepalen. Mogelijk dat dit ook werkt voor PMB's. De RDEC is hier echter niet voor nodig. Voor de hier uitgewerkte proeven lijkt een lineaire fit op het verloop van de gedissipeerde energie in fase II beter te passen dan een machtsrelatie. Dit kan samenhangen met het feit dat de vermoeingsproeven in de VS bij veel hogere rekniveaus's gedaan worden. Omdat de N_f in deze proeven in fase III valt, zou het bepalen van de levensduur aan de hand van het afwijken van de gedissipeerde energie van de fit op fase II tot een kortere levensduur leiden.

Carpenter en Shen gebruiken de PV benadering ook voor healingskarakterisering en in het vervolg van deze paragraaf is bekeken of deze benadering mogelijk bruikbaar is voor dit onderzoek. Zij zijn op zich inderdaad begonnen met een vergelijkbare aanpak als in dit onderzoek, met continue proeven en soortgelijke proeven die na een gegeven aantal lastherhalingen onderbroken werden voor rustperioden. Zij hanteerden rust en last perioden van verschillende lengtes (Figuur 5.16).



Figuur 5.16: Originele proeven voor healing door Shen en Carpenter (2007)

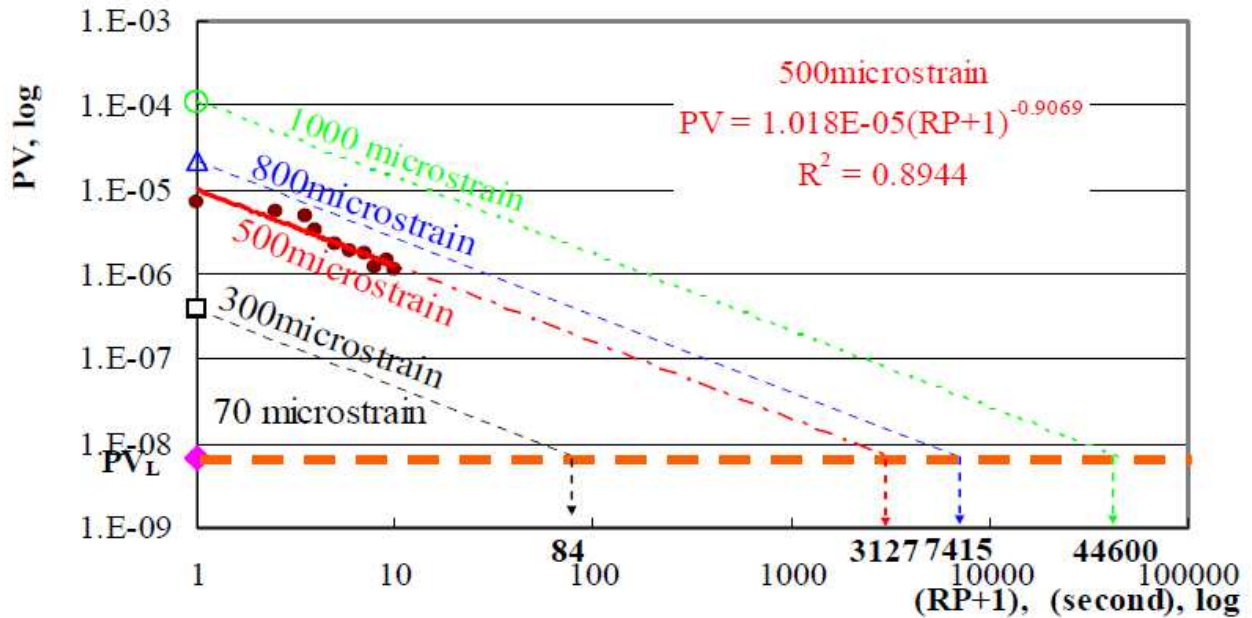
De proefcondities waren 20°C, 10 Hz en 300 me, rekgestuurd in een haversine (AASHTO T321). Zij constateerden naar aanleiding van deze proeven dat bij rustperiodes van 24 uur geen bezwijken zou optreden, omdat de healing volledig was. Uit onze resultaten weten we dat dat misschien in combinatie met een beperkt aantal lastherhalingen (bij hen 15000) zo is, maar niet bij langere belastingen. Zij geven aan dat deze proeven weliswaar het effect van healing goed laten zien, maar dat het bepalen van de mate van healing lastig is. Daarom zijn ze overgestapt naar gebruik van de RDEC benadering, maar daarbij konden ze met deze signalen niet uit de voeten. Er zijn hiervoor volgens Shen en Carpenter continue signalen nodig. Ze bereiken die continue signalen zoals getoond in Figuur 5.17, waarbij de puls inclusief de rustperiode tot de volgende puls wordt gezien als een lastherhaling.



Figuur 5.17: Belastingensignalen voor het vervolg healingsonderzoek in Shen and Carpenter (2007)

Ze geven aan dat nu per load cycle sequence de gedissipeerde energie bepaald kan worden, maar het is niet duidelijk hoe dat gebeurt. Het kan zijn dat ze dezelfde formule (6.2) gebruiken, maar aangezien het geen continue signaal meer is, zou dat een foute benadering zijn. Het kan ook zijn dat ze de signalen (numeriek) integreren, maar

dit is niet uit de hier gebruikte publicatie te halen. Uiteindelijk worden de resultaten weergegeven als in Figuur 5.18, als functie van het aantal rustperioden. Dat ziet er goed uit, maar het lijkt niet logisch dat het gaat om het aantal rustperioden en niet om de verhouding rust-belasting. Ook wordt het verloop van de PV waarde met het aantal rustperioden voor alle rekniveaus gelijk genomen, terwijl er maar een werkelijk is onderzocht. Dat is een erg grote aanname.



Figuur 5.18: Healingspotentie in relatie tot PV (Shen et al, 2007)

Het zal duidelijk zijn dat de in dit onderzoek geproduceerde data niet gebruikt kan worden voor een dergelijke benadering van de healingscapaciteit. Om te verkennen of deze benadering mogelijkheden biedt, zullen er dus nieuwe proeven gedaan moeten worden. Het is, zeker gezien de vragen bij de hele benadering rond de plateau waarde (PV) de vraag of dat de moeite waard is. Aan de andere kant is het bepalen van healing uit proeven met een enkele lastherhaling afgewisseld met rust iets dat zeker voordelen biedt door de "puurheid" van het signaal.

6 Conclusies

6.1 Conclusies

Dit onderzoek was erop gericht een pragmatische bepaling van de healingscapaciteit van asfaltmengsels te vinden. Hierbij werd gebruik gemaakt van de vierpuntsbuigvermoeiingsproef bij de condities voor het bepalen van de in het wegontwerp gebruikte vermoeiingsweerstand. De proeven werden uitgevoerd op twee volumetrisch gelijke mengsels die alleen verschilden in de hardheid van de gebruikte bitumen. Hierdoor kon de bestaande empirische kennis die aangeeft dat zachte bitumen aanzienlijk meer healing vertoont dan harde, gebruikt worden om de resultaten te beoordelen. Om de bepaling van de healingscapaciteit niet te verstoren door de grote variatie in vermoeiingseigenschappen tussen proefstukken van het zelfde mengsel, werd de healing op een enkel proefstuk bepaald. Oorspronkelijk werden modellen gebruikt om aan de hand van de gemeten data zowel het continue gedrag (vermoeiingsproef) als het gedrag bij rustperioden te beschrijven. De healingscapaciteit zou dan uit de verschillen tussen bieden volgen.

Deze oorspronkelijke benadering, gebaseerd op modelmatige extrapolatie, bleek in de praktijk niet hanteerbaar. De modelmatige beschrijving geeft een te grote onbetrouwbaarheid van de extrapolatie en de modellen kunnen niet goed overweg met het in praktijk vaak grillige verloop van de stijfheidsmodulus. Dit geldt zowel voor het PH-model als voor het eenvoudige model. Het PH-model is daarnaast erg gevoelig voor de keuze van de startwaarden.

In plaats van het extrapoleren met modellen, is per proefstuk een healingswaarde bepaald door de proef na de rustperiode door te zetten tot de stijfheid opnieuw de waarde bereikte aan het eind van de eerste belastingperiode. De verhouding tussen de som van de lastherhalingen in beide lastperioden en de lastherhalingen in de eerste last periode geeft een maat voor de healing.

De op deze wijze uit de proeven bepaalde healingswaarden vertonen een duidelijke relatie met de stijfheidsval waarbij de rustperiode wordt ingezet. Deze relatie ligt voor het 10/20 mengsel duidelijk anders dan voor het 70/100 mengsel, ondanks de verschillende stijfheidsniveaus en bepalingen in twee verschillende laboratoria. Daarbij moet in aanmerking genomen worden dat ook het stijfheidsverloop tijdens de proef voor beide mengsels sterk verschild.

Ondanks dat de nu verkende pragmatische methode voor de bepaling van de healingsfactor robuust is, in tegenstelling tot de eerdere modelmatige benaderingen, en rekening houdt met het verschillende stijfheidsverloop van verschillende mengsels, levert deze geen sterk verschillende healingsfactoren op voor het 70/100 en 10/20 mengsel uit fase 1. De voorwaarde voor inzetten fase 2 van het onderzoek was dat fase 1 wel duidelijk verschillende healingsfactoren moest opleveren. Hoewel bij nadere analyse bleek dat de gebruikte 10/20 bitumen geen gewone bitumen was, wat wel het uitgangspunt van het onderzoek was, liggen de voor de zachte bitumen gevonden healingswaarden zodanig dicht bij 1 dat ook bij "echte"10/20 bitumen geen grote verschillen gevonden kunnen worden. Fase 2 zal dus niet worden ingezet zoals deze gepland was.

De data van de continue proeven zijn uiteindelijk ook nog geanalyseerd conform de "plateau value" analyse van Carpenter, waarbij de energie dissipatie in de proef wordt gebruikt. Hoewel er nog enige vragen zijn over de toepassing van deze benadering in discontinue proeven, lijkt de meerwaarde ervan beperkt. Het gebruiken van de gedissipeerde energie in fase II van de proef om te bepalen wanneer fase III begint, lijkt wel kansen te bieden. Dit overgangspunt zou een alternatieve bepaling voor de vermoeiingslevensduur kunnen worden. Achteraf is dit eenvoudig te realiseren, indien de proef gestopt moet worden voordat, of op het moment dat, fase III begint moet de software de helling van hetzij het gedissipeerde energie signaal of de stijfheid, als indicator, bepalen. Er moet dan een bruikbaar interval gespecificeerd worden en een criterium om te bepalen wanneer er sprake is van een verandering. Dat zal nog de nodige ontwikkeling vergen en is daarom op dit moment nog niet geschikt als een alternatief stop criterium voor de hier uitgevoerde healingsproeven. Daarnaast verdient het aanbeveling om te bezien of de door de Amerikanen gebruikte proefopzet, met een enkele puls gevolgd door een rust periode van variabele lengte, tot nieuwe inzichten leidt.

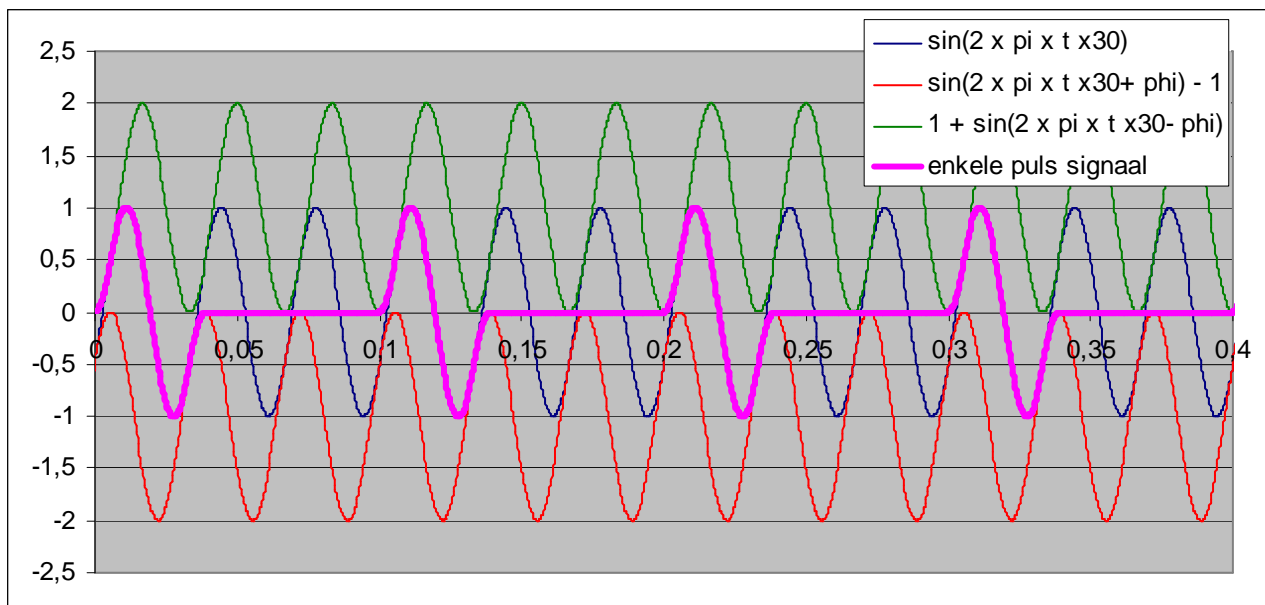
6.2 Aanbevelingen

Vanwege de afwijking van het uitgangspunt is het niet juist om op grond van de resultaten het onderzoek direct stop te zetten. Wel moet worden geconstateerd dat deze benadering, ook bij verder aanvullende data, niet het beoogde duidelijke verschil tussen 70/100 en 10/20 mengsels zal geven. Toch blijft het voor een goede afronding van dit onderzoek aan te bevelen een deel van de proeven te herhalen, zowel met 70/100 als met de juiste 10/20 bitumen. Dit voorkomt gespeculeer over het effect van de gebruikte 10/20 bitumen en plaatst alle resultaten in een bruikbaar referentie kader.

Daarnaast is het aan te bevelen bij vervolg onderzoeken allereerst met bitumen proeven verschillen in healing vast te stellen. Indien een bepaalde temperatuur en rusttijd of verhouding rust-belasting voor bitumen geen duidelijk onderscheid geeft, zal dat ook voor asfalt met die bitumen niet het geval zijn. Andersom hoeft onderscheid tussen bitumina niet in asfalt terug gevonden te worden, maar het lijkt een verstandige eerste fase voor het vast stellen van proefcondities op mengsels.

De benadering van Shen en Carpenter met de RDEC en plateau waarde lijkt geen meerwaarde te hebben voor deze mengsels en de Nederlandse proefcondities. Het verdient echter wel aanbeveling om het fitten van de energie dissipatie in fase II en het gebruiken daarvan om initiatie van fase III te bepalen, nader te onderzoeken. Dit zou aanknopingspunten kunnen bieden voor vermoeiingonderzoek op PMB's, waar het criterium van halve stijfheid niet lijkt te werken.

Ook ligt het voor de hand om in de toekomst proeven met enkele pulsen en rustperiodes uit te voeren om een directe relatie tussen levensduur(verlenging) rustperiodes of de verhouding belast/rust te vinden. Hoewel dit voor de Amerikanen, vanwege hun haversine signaal, eenvoudiger is dan voor ons met een volledige sinus, kan een combinatie van een sinus met haversinussen gebruikt worden om tot een geleidelijke verlopend signaal te komen (Figuur 6.1). Dat geleidelijke verloop is van belang voor het goed aan kunnen sturen van de opstellingen, bij plotselinge overgangen in de rek- of belastingsnelheid wijkt het werkelijke signaal af van het beoogde en dat is zeker bij een enkele puls onwenselijk.

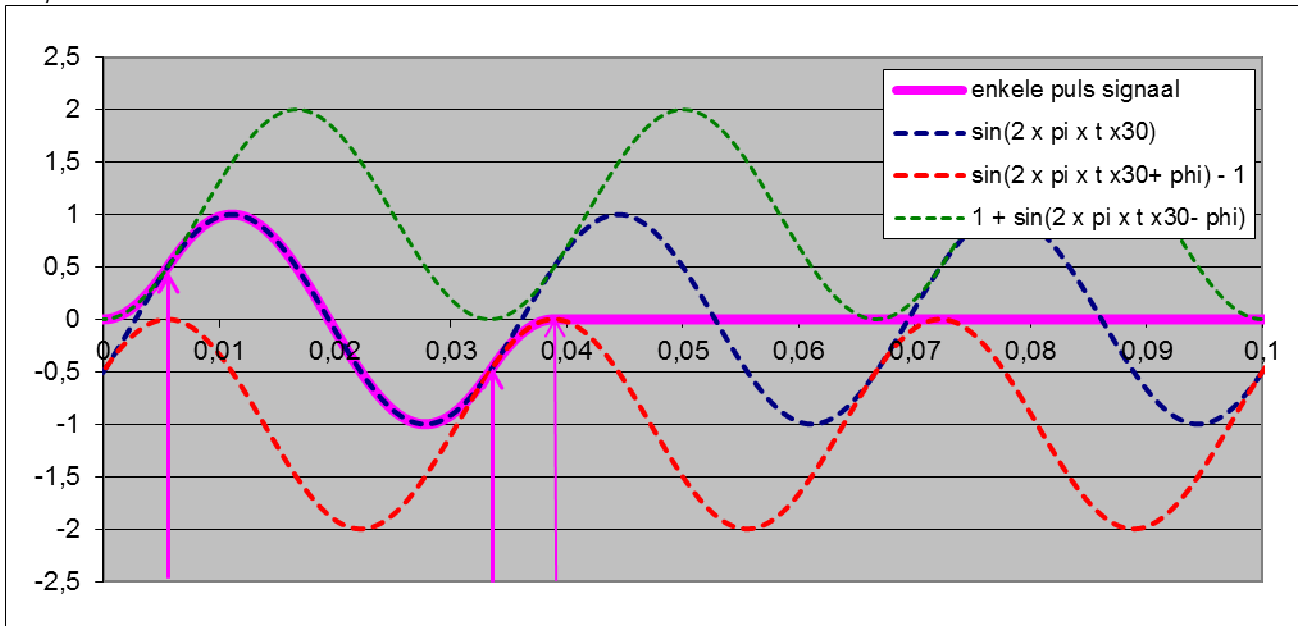


Figuur 6.1: Combinatie van een sinus met zijn beide (omlaag en omhoog verschoven) haversine signalen tot een signaal van een enkele puls met rustperiode zonder grote versnellingen

In bovenstaande figuur is een sinus met amplitude 1 en frequentie 30 Hz gecombineerd met de $\pi/3$ naar rechts geschoven, omhooggeschoven haversine voor het begin en $\pi/3$ naar links verplaatste, omlaaggeschoven haversine

voor het einde van de puls. Bij de overgangen op $\pi/3$ zijn zowel de signalen als hun afgeleiden gelijk, wat een soepele overgang mogelijk maakt. In de onderstaande figuur zijn de overgangen tussen de sinussen en het pulssignaal in detail weergegeven.

Op $t=0s$ wordt het signaal gevormd door de omhoog geschoven haversine (groene stippellijn). Bij de eerste overgang (roze pijl) gaat het signaal over op de gewone sinus (blauwe stippellijn), deze wordt gevolgd tot het einde van de eerste periode van de sinuspulsen (tweede roze pijl). Hier gaat het over op de omlaag geschoven haversine (rode stippellijn). Het gecombineerde signaal heeft dus een wat langere pulsduur dan de originele sinussen. De laatste overgang volgt als de omlaaggeschoven haversine zijn piek bereikt (derde pijl). Nu blijft het signaal op nul tot $t=0,1s$ en dan start het van voor af aan.



Figuur 6.2: gedetailleerde weergave van de overgangen in het enkele puls signaal

Een dergelijk signaal kan worden gebruikt bij proeven op asfalt in de vierpuntsbuigproef, maar ook bij proeven op mortel, mastiek of bitumen. Opstellingen met een programmeerbare functiegenerator of, zoals tegenwoordig gebruikelijk, aansturing via een computer zouden dit soort signalen op moeten kunnen leggen. Dit is nog niet uitgetoet binnen dit project.

Aangezien bij het stijfheidsherstel ook een temperatuur effect mee lijkt te spelen, lijkt het zinvol de combinatie van sterkte en stijfheidsherstel samen te onderzoeken. Door dit te doen voor bitumen 70/100 en 10/20. na het herhalen van de in dit onderzoek uitgevoerde proeven met "echte" 10/20 bitumen, kan de relatie met dit onderzoek gelegd worden. De bitumen kan dan onderzocht worden in DSR vermoeiingsproeven en directe trekproeven tot breuk op bitumen cillinders. In beide gevallen zal de lengte van de rustperiode gevarieerd worden. De proeven tot breuk geven aan in welke mate herstel mogelijk is na het ontstaan van macro schade, vermoeiingsproeven geven aan hoe healing de schade ontwikkeling kan vertragen of doen omkeren. Indien de proeven op bitumen wel de verwachte verschillen laten zien, kan dit langzaam worden opgeschaald door toevoegen van vulstof, vulstof en zand om te bepalen of het gaat om verschillen die verloren gaan tussen bitumen en het asfalt, of dat de beperkte verschillen in dit onderzoek vooral samenhangen met de proefcondities.

7 literatuur

Bazin, P. and Saunier, J.B., "deformability, Fatigue and Healing Properties of Asphalt Mixes", proceedings of the second Int. Conf. On the Structural Design of Asphalt pavements, Ann Arbor, Michigan, 1967, pp.553-569

Bergh, W. van der, "*Zelfherstellend vermogen van asfaltmengsels: "Healing"*", presentatie op de Technologedag 8 november 2007.

Bonnaure, F.P., Huibers, A.H.J.J. and Boonders, A., "a laboratory investigation of the influence of restperiods on the fatigue characteristics of bituminous binders", shell research bv publication, 1982

Breyse, D., Roche, C. de la, Domee, V. and Chauvin, J.J., (2003) "Influence of Rest time on Recovery and Damage during Fatigue Tests on Bituminous Composites", Proceedings 6th RILEM symposium PTEBM' 03, Zurich

COST333, European Communities, Transport Research, *Cost 333: Development of New Bituminous Pavement Design Method*, ISBN 92-828-6796-X

Daniel, J.S. (1996), "Rate Dependent Stiffnesses of Asphalt Concrete used for Field to Laboratory prediction and Fatigue and Healing Evaluation", MSc-thesis, North Carolina State University, Raleigh, NC

Dommelen, A.E. van, "*healing in de dimensionering*", presentatie op de Technologedag 8 november 2007

Dommelen, A.E. van, Vliet, D. van en Telman, J. "Omgaan met vermoeiings- en stijfheidseigenschappen van asfaltbeton onder de CE-markering", CROW Ifradagen 2008

Dijk, W. van, Moreaud, H., Quedeville, A. and Ugé, P., "the fatigue of bitumen and bituminous mixtures", proceedings of the International Society of Asphalt Pavement technologists, pp354, 1972

Dijk, W. van, "Practical fatigue characterisation of bituminous mixtures", Asphalt Paving Technology, pp. 38-74, vol 44, 1975

Dijk, W. van and Visser, W., "the energy approach to fatigue for pavement design", Asphalt Paving Technology, pp.1-40, vol. 46, 1977

Geysendorpher, F., (1986), Vermoeiingseigenschappen van grindasfaltbeton "Eisen 1978", DWW rapport MAO-R-86003, Rijkswaterstaat (in Dutch)

Kringos N., Pauli T., Scarpas A. and Robertson R. (2009), "*A Thermodynamical Approach to Healing in Bitumen*", In: 7th RILEM Conference on Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials, May 2009, Rhodes, Greece

Little, D.N., Lytton, R.L. et al, (1999), "An Analysis of the mechanism of Micro damage healing based on the of micro mechanics first principles of fracture and healing", AAPT Vol 68, 1999, pg 501-542

Pronk, A.C. and Cocurullo, A., Investigation of the PH model as a prediction tool in Fatigue bending tests with Rest Periods, in Advanced Testing and Characterisation of Bituminous Materials, Loizos, Partl, Scarpas and Al-Qadi (eds), ISBN 978-0-415-55854-9, Taylor & Francis Group, London, 2009

Raithby, K. D. and Sterling, A.B., "*some effects of loading history on the performance of rolled asphalt*", Transport and Road research laboratory, TRRL report LR 496, 1972

Rijkswaterstaat, "Eisen door de rijkswaterstaat gesteld aan bouwstoffen voor de wegenbouw", 1978

Healing Van Asfalt Mengsels

Rijkswaterstaat (RWS), "*Specificaties Ontwerp Asfaltverhardingen*", Rijkswaterstaat, 2011

Shell International Petroleum Company, "Shell Pavement Design Manual: Asphalt Pavements and Overlays for Road Traffic", 1978

Specificaties ontwerp asfaltverhardingen, Rijkswaterstaat, 2009

Shen, S. and Carpenter, S.H., (2007) "Dissipated Energy Concepts for HMA Performance: Fatigue and Healing", Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ of Illinois at Urbana-Champaign, Advanced Transportation Research and Engineering Laboratory (ATREL)

Westera, G.E., "review healing, ten behoeve van het Technisch Wetenschappelijk Asfaltonderzoek (TWAO) van de Dienst Weg en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat", Oostelijk wegenbouwlaboratorium Twello, 89.532-1, 1989

Westera G.E. and Bouman, S.R., "Studie over healing ten behoeve van het project ASFALT/TWAO; nadere beschouwing van het fenomeen healing bij asfalt"KOAC-WMD, rapport 94.0002, 1994 (in Dutch)

Roche, Ch. de la, Odeon, H., Simoncelli, J.P. Spagnol, A., "Study of the Fatigue of Asphalt Mixes Using the circular Test Track of the Laboratoire Central des Ponts et Chaussées in Nantes, France", Transportation Research Record 1436, Transportation Research Board, 1994

BIJLAGE A. PRESENTATIES TECHNOLOGEN DAGEN 2007

1.01 Presentatie Wim van den Bergh

Technologedag 8 november 2007

Zelfherstellend vermogen van asfaltmengsels: "Healing"



Wim Van den bergh
Hogeschool Antwerpen
TU Delft
W.Vandenbergh@ha.be


1

Situering

Situering
Fysico-
chemisch
Mechanisch
aB³
Conclusie

Wat is "healing"- zelfherstellend vermogen?

- Situering
- Fysico-chemische benadering
 - Healing actoren en bedreigingen
- Een voorbeeld: aB³
- Standpunt



Technologedag 8-11-2007

2

Situering "healing"

In de natuur vervormen, vermoeien en herstellen materialen zich geheel of gedeeltelijk onder invloed van interne en/of externe factoren.

Definitie "healing":

Zelfherstellend vermogen van een materiaal waarbij schade afgeremd en/of hersteld wordt ten voordele van de levensduur

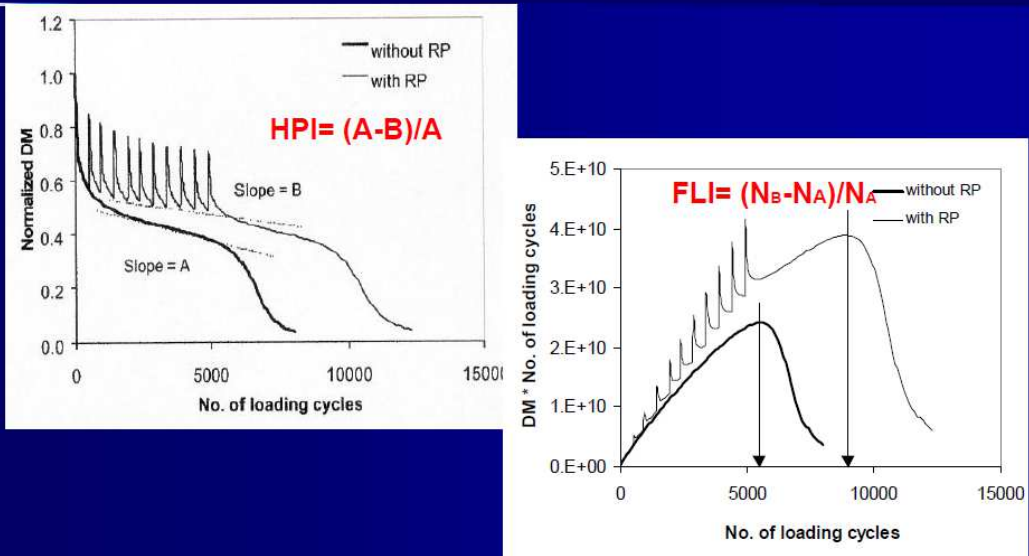
Waarneembaar (meetbaar) fenomeen

Situering "healing"

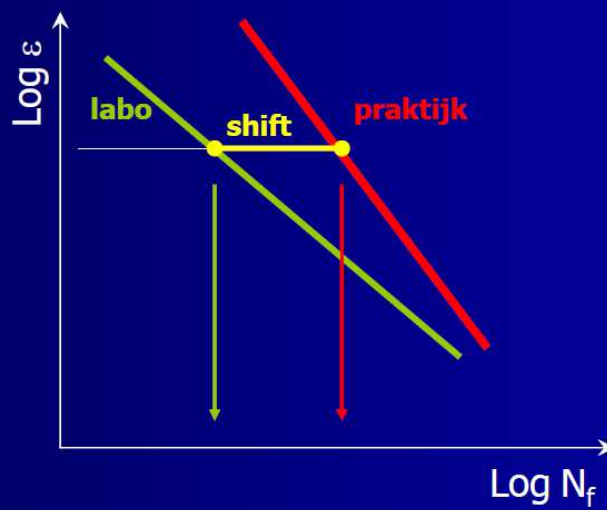
Asfalttechnologische benadering:

- discrepantie levensduur labo – praktijk
 - $\text{Levensduur praktijk} = \text{vermoeiingslevensduur labo} \times \text{factor}$
- Meetbaar op stijfheidsherstelling en verlenging vermoeiingslevensduur na discontinue belasting
 - Meettechniek: invloed op grootte healingfactor

Situering "healing"



Situering "healing"



Situering "healing"

- Rilem [Di Benedetto TG3]
 - 11 Types van vermoeiingstesten
 - 10Hz en 10°C ϵ_6 (Nf=E6)

T/C	100
2pt	120 - 150
4pt	120 - 175
ITT	35

- Type proefopstelling is bepalend voor resultaat Nr

Situering "healing"

Onderzoeksgroep	Methode	Healingfactor
Bonnaure, Huibers, Boonders, Van Dijk en Visser	3-pt, verplaatsingsgestuurd DAB 0/16 80/100 en 45/60	H= Ni/Nc 1,5 tot 11
Westera, OCW, OWL	verplaatsing/kracht GAB 0/16 45/60, 15°C 2-, (56Hz) Force/Displ. 3-, (30Hz) F/D 4pt, (55Hz) F 4pt, (30 Hz) F/D	H= Ni/Nc 7,4 / 4,3 3,8 / 2,8 4,5 4,3 / 1
Landa et al	4pt, verpl. StAB 0/16 29,3 Hz 30°C Rustperiode (0,3 en 6 cycl.)	H= Ni/Nc 1 tot 4

Situering "healing"

Mengselstijfheid, Bitumen (gehalte/eigenschappen), Holle ruimte, Filmdikte	
type levensduurcriterium	gering
Buigproef	kracht > verplaatsing en 2pt > 3 pt > 4pt
Rekniveau	Lager rekniveau geeft meer healing
Rustperiode	langere rustperiodes geeft meer healing
viscositeit binder	zachter bm geeft meer healing (* tegendeel ook bewezen)
Aggregaten	steenslag geeft betere healing dan rolgrind (*)

Situering "healing"

References	Type of test	Mode	Fatigue shift factors			Total
			Healing	Crack Propagation	Traffic Wander	
Asphalt Institute						18,4
Nottingham Pell	Rotating Bending	F	5	20	1	100
Nottingham Brown	Rotating Bending	F	20	20	1,1	440
NRA-Dublin Golden 1988	Rotating Bending	F				230
DWW			4			
SHELL SPDM 78	Variable	D	5	1	2	10
LCPC	2 pt bending	D				1,6 to 3,7
SHRP A-003 Von Quintus 94						10-13
BRRC V 74	2 pt bending	F	7,1	3	1 - 2,5	7,1

Situering "healing"

Deze shift factor werkt de discrepantie weg tussen de vermoeiingslevensduur bepaald in het labo en de werkelijke levensduur in de praktijk

vanuit economisch, contractueel, duurzaamheids en research oogpunt van belang

Healing maakt grootste deel uit van deze shiftfactor!

Situering "healing"

Healing physico-chemisch kunnen beschrijven
= mengseltechnologisch ingrijpen
→ rechtstreekse beïnvloeding levensduur praktijk
mogelijk door voorafgaandelijke selectie

Healing kunnen meten
= mengsels met elkaar kunnen vergelijken
→ beïnvloeding levensduur labo door selectie na
beproevingen

Situering "healing"

- Healing kan gemeten worden op
 - Polymeren [overzicht Kim 1988]
 - Bitumen
 - Mastiek / mortel
 - Asfaltmengsel
- Healing vertaald van bitumen naar asfalt
 - * in relatie met een vermoeiings/schadekarakter
 - * in bindmiddelfilm (cohesie) of aan rand (adhesie)
 - * in relatie met mengselfactoren (samenstelling)

Physico-Chemische benadering healing bij bitumineuze bindmiddelen

Vermoeiing: fysische wisselwerkingen op sub-micron schaal worden zwakker en afgebroken waardoor de weerstand tegen vervorming vermindert

Reactie van het materiaal na een belasting: naar voordeligste energetische toestand overgaan middels een heroriëntatie of een verplaatsing van deeltjes

Mogelijkheden heroriëntatie en/of verplaatsing bepalend "healing"

Physico-Chemische benadering healing bij bitumineuze bindmiddelen

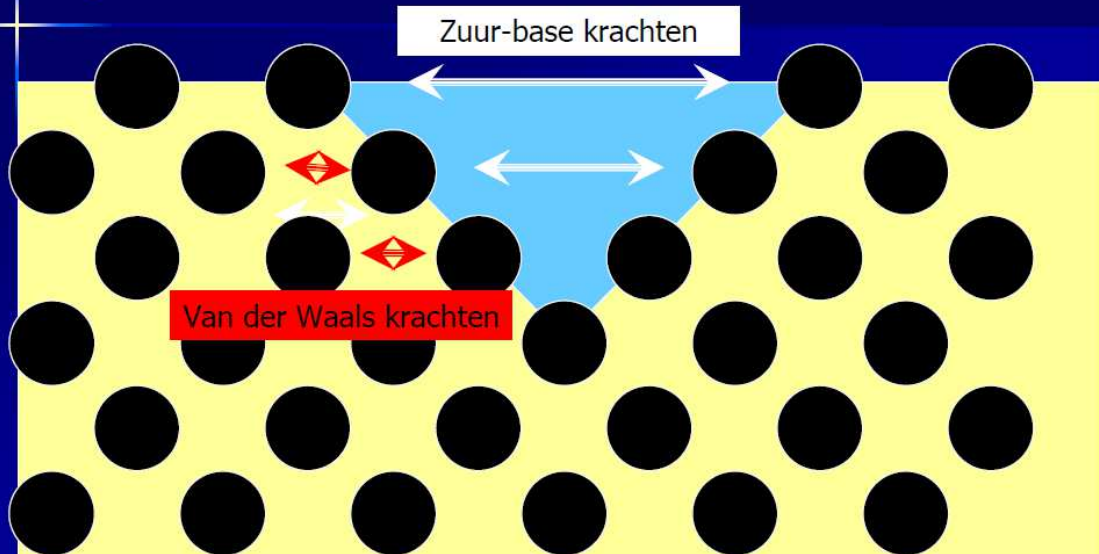
“Moleculair niveau”

Oppervlakte energie: energie om een oppervlakte-eenheid van een materiaaloppervlak te maken of te herstellen

fysische binding door apolaire component: Lifshitz-van der Waals

chemische binding door polaire component: zuur base

Physico-Chemische benadering healing bij bitumineuze bindmiddelen



Physico-Chemische benadering healing bij bitumineuze bindmiddelen

Lytton, Cheng et al (1992, 2002):

- Oppervlakte energie van bindmiddelen en aggregaten zijn meetbaar en kunnen geëvalueerd worden naar healing
 - Aantrekkingskrachten
 - Afstoting (overlapping elektronenorbitalen)
- Cohesieve en adhesieve bindingen
 - Bindmiddelen hebben positieve cohesiewaarden
 - Adhesiewaarden bitumen-aggregaat positief
 - Verouderde bindmiddelen hebben verminderde waarden
 - Water hoogste adhesiewaarde

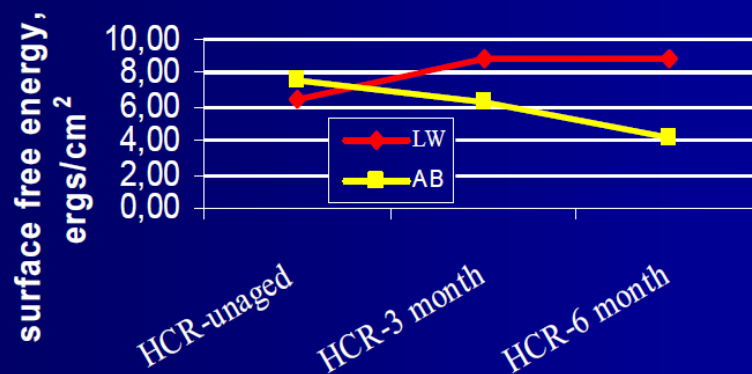
Physico-Chemische benadering healing bij bitumineuze bindmiddelen

Lytton, Cheng et al (1992, 2002):

- Healing: is functie van korte-termijnhealing en lange termijn
 - Korte termijnhealing: $f(1/L-VdW)$
 - Lange termijnhealing: $f(Z-B)$
- Healing potentie wordt bevorderd door
 - Verminderde L-VdW waarde
 - Verhoogde Z-B waarde
- Correlatie aangetoond d.m.v. bindmiddeltesten (oppervlakte-energie) en healingtesten op asfaltmengsels

Physico-Chemische benadering healing bij bitumineuze bindmiddelen

Lytton, Cheng et al (1992, 2002):



Physico-Chemische benadering healing bij bitumineuze bindmiddelen

- Mechanisme healing
 - Vermoeiing(schade) op sub-micron schaal
 - Verstoring bindende krachten (dipool-dipool, vanderWaals)
 - Streven naar energetisch meest voordelige situatie
 - Verdraaiing deeltje of micelle
 - Belang van viscositeit (temperatuur), rust, oppervlaktespanning
- Bedreiging healing:
 - Verhogen van de viscositeit (hardheid bindmiddel/mastiek)
 - verminderen van de mogelijkheden verdraaien deeltjes
 - Verminderen van aantal deeltjes
 - Verlagen oppervlaktespanning

Physico-Chemische benadering healing bij bitumineuze bindmiddelen

- Wanneer we RAP gebruiken:
 - Verhoogt de viscositeit? Hoeft niet.
 - Verminderen de mogelijkheden voor het verdraaien van de deeltjes?
Kans is groot van wel: verouderd bindmiddel bevat grote geoxideerde molecuulgroepen die minder beweeglijk zijn
 - Vermindert het aantal deeltjes (werkende bindmiddelfilm dikte)?
Kans van wel: zal alle bindmiddel van RAP meewerken? Bij mengselontwerp nemen wij alle bindmiddelhoeveelheid in rekening. RAP-aggregaten bevatten geabsorbeerd oud bitumen. Zone met verminderde healingmogelijkheid.
 - Verlaagt de oppervlaktespanning? Ja voor verouderd bindmiddel

Mechanische benadering healing bij bitumineuze bindmiddelen

Healing van bitumina:

- DSR(Lu, Soenen,...): Vergelijking healing potentie
- Local Fracture Test (F, LCPC)
 - akoestische emissie: scheurinitiatie en –propagatie voor adhesieve en cohesieve scheurvorming
 - Ultrasonengolfmethode: Healing en scheurpropagatie

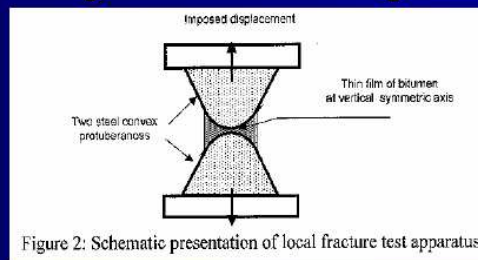


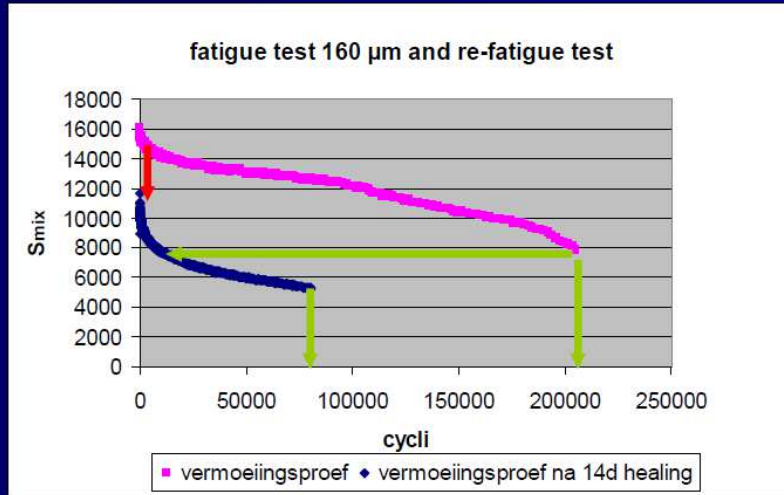
Figure 2: Schematic presentation of local fracture test apparatus

Nadeel: bitumen wordt in asfalt gewijzigd

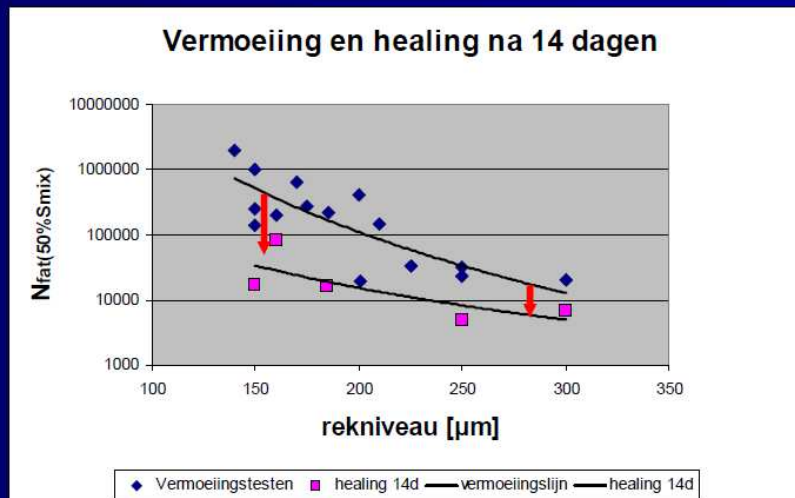
Mechanische benadering healing bij bitumineuze bindmiddelen

- **Bedenkingen betreffende healing testen:**
 - Op welk materiaal gaan we healing testen uitvoeren?
 - Bitumen, Mastiek, Asfalt ?
 - Verouderd of niet-verouderd?
 - Indien representatief, liefst zo eenvoudig mogelijke proefopstelling
 - In relatie met vermoeiingslijn
 - Dient er een onderscheid gemaakt te worden in cohesieve en adhesieve healing?

aB³



aB³



Standpunt healing

- Aantoonbaar en terecht gebruikt als deelfactor in shift lab-praktijk omwille van rustperiodes
- maar (nog) geen bewezen healing formule voor grootte
- cohesieve en adhesieve healing
- Effect van RAP (bindmiddel en mastiek) voorlopig onbekend op healing
- Eerder materialen vergelijken en steeds in relatie met vermoeiingslijn
- Proefmateriaal: nieuw + na veroudering

Hartelijke dank
voor uw aandacht

1.02 Bijdrage Arthur van Dommelen

Healing in de dimensionering

Arthur van Dommelen
Dienst Verkeer en Scheepvaart



Rijkswaterstaat

Inhoud presentatie

- ▶ Wat is het probleem
- ▶ Historische achtergrond
- ▶ Hoe zit het nu in het ontwerp
- ▶ Hoe moet het worden, wat zijn de opties
- ▶ Conclusies



Rijkswaterstaat

2

Healing - wat is het probleem

- ▶ De zuivere definitie is gegeven door Wim van den Bergh:
“Zelfherstellend vermogen van een materiaal waarbij schade afgeremd en/of hersteld wordt ten voordele van de levensduur”
- ▶ Handleiding Wegenbouw – Ontwerp Verhardingen omschrijft de healingsfactor als: *“Een empirische correctiefactor voor het verschil in theoretisch en praktijkgedrag”*
- ▶ De tweede definitie is dus verwaterd, het is een shiftfactor waar veel meer in zit dan alleen het zelfherstellend effect van asfalt

Healing - wat is het probleem

- ▶ Andere aspecten die kunnen bijdragen aan verschil theorie – praktijk:
 - Al dan niet bewuste verwaarlozingen in de ontwerpmethodiek (b.v. alleen uniaxiale rek nemen, temperatuurweging gebaseerd op ondergrondstuik,)
 - Tekortkomingen van materiaalmodellen (b.v. verwaarlozing verouderingseffecten)
 - Tekortkomingen van de mechanica - modelleringen
 - Enz....

Healing - wat is het probleem

- ▶ Bij invoering Handleiding Wegenbouw was er enige historische kennis over healingonderzoek, met name in België en bij Shell
- ▶ Echter toen reeds werd aangenomen dat deze kennis niet meer actueel was vanwege aanpassingen in de asfaltmengsels (Eisen 78)
- ▶ Uiteindelijk is de shiftfactor empirisch vastgesteld als sluitpost in de dimensionering
- ▶ m.n. is leidend geweest een aantal ernstige schadegevallen in begin jaren 80



Healing - wat is het probleem

- ▶ Probleem is dus dat we nu voor conventioneel asfalt
 - Wel weten welke shiftfactor we moeten aanhouden
 - Niet weten hoeveel daarvan healing is
- ▶ Voor niet – conventioneel asfalt weten we nog minder:
 - We weten niet hoeveel de healing anders wordt
 - We weten ook niet of de rest van de shiftfactor anders wordt



Healing - wat is het probleem

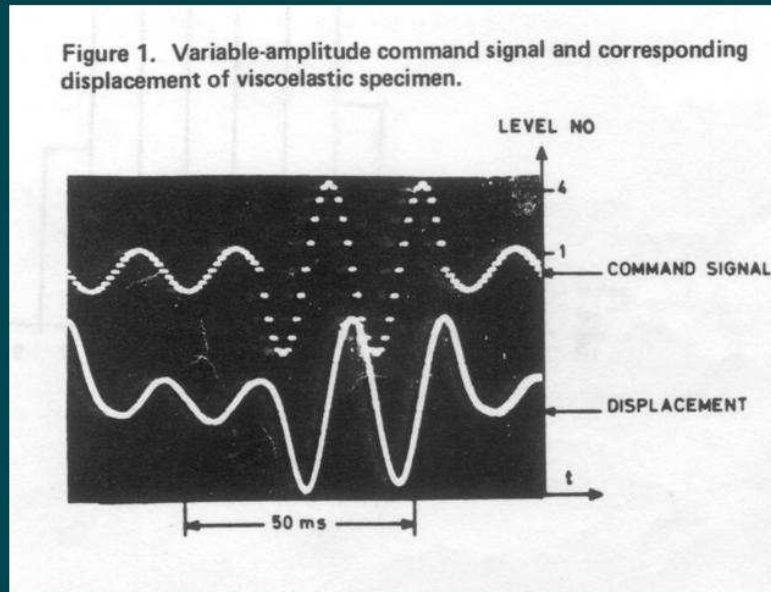
- ▶ Er komt / is in de nieuwe bestekken ruimte voor niet - standaard asfaltbeton (standaard asfaltbeton zal straks zelfs niet meer bestaan)
- ▶ Met de niet – standaard mengsels (inclusief hun specifieke shiftfactor) zal ontworpen moeten kunnen worden
- ▶ Gedeeld belang opdrachtnemer en opdrachtgever: economisch optimaal dimensioneren

Healing - wat is het probleem

- ▶ Specifiek belang opdrachtnemer:
 - 'aan de bak' kunnen met niet standaard asfaltmengsel
 - afdekken van risico's gedurende de garantie- of onderhoudstermijn
- ▶ Specifiek belang opdrachtgever:
 - Gewenste lange levensduur krijgen (veel langer dan gangbare garantietermijnen)
- ▶ Daardoor is het risico van een verkeerde inschatting van de shiftfactor voor opdrachtgever aanzienlijk groter

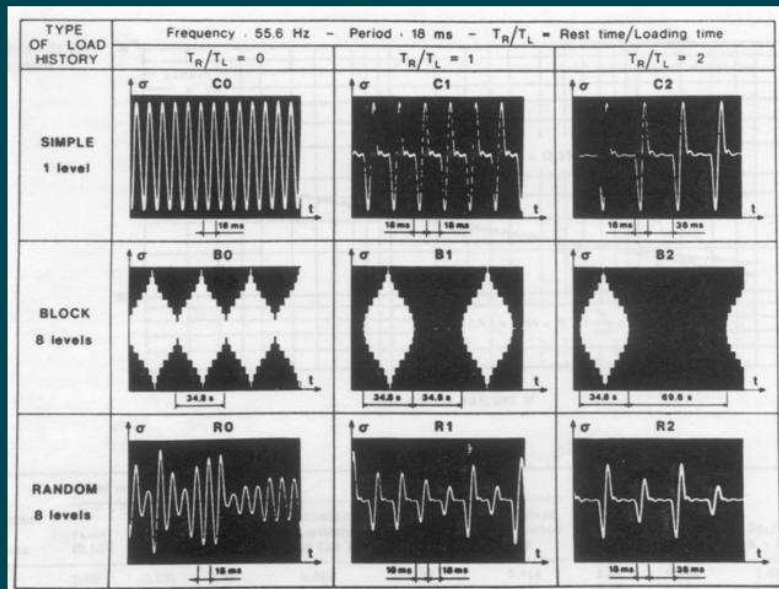
Healing - historische achtergrond

Onderzoek
OCW eind jaren
70 met diverse
signalen op 1
mengsel
(Belgische
dichte deklaag
met 8% bitumen
pen 40/50



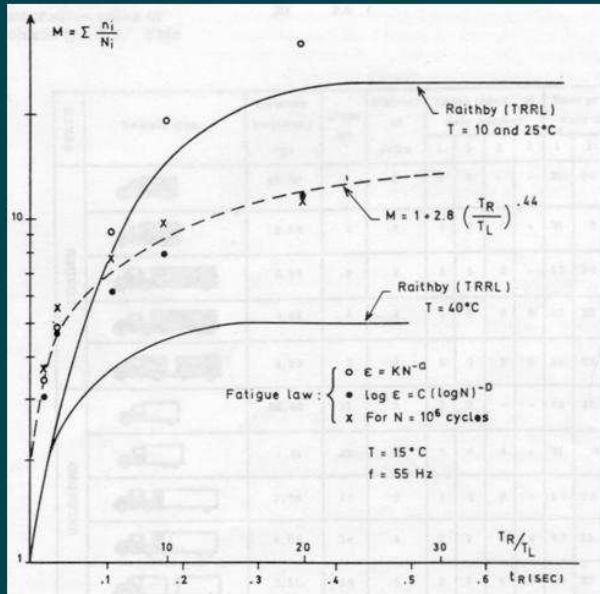
Healing - historische achtergrond

Onderzoek
OCW eind jaren
70 met diverse
signalen op 1
mengsel
(vervolg)



Healing - historische achtergrond

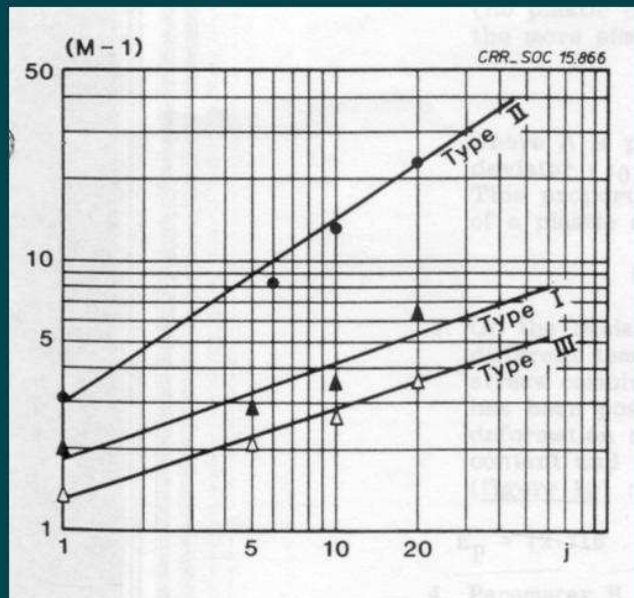
Onderzoek OCW eind jaren 70 met diverse signalen op 1 mengsel (vervolg)



Healing - historische achtergrond

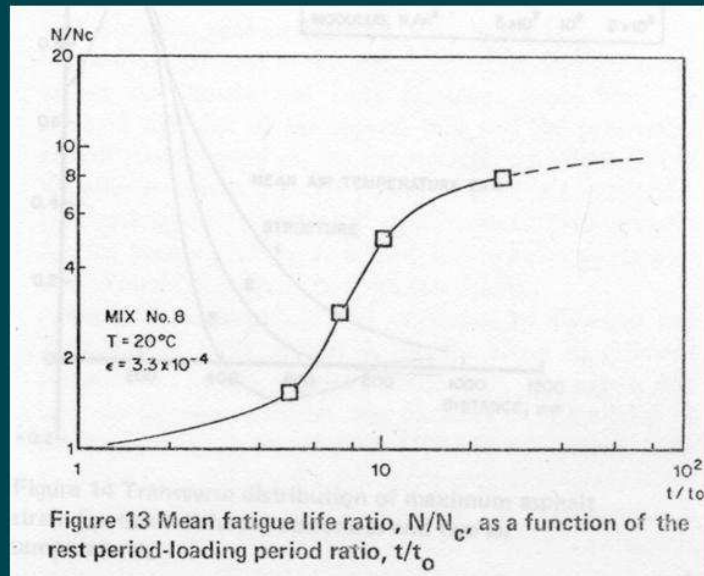
Onderzoek OCW in jaren 80 op 3 mengsels:

- ▶ Type I: "Dense bituminous concrete", 6% bitumen pen 58
- ▶ Type II: "Stone filled sand sheet", 8,6% bitumen pen 47
- ▶ Type III: "Base course asphalt concrete", 5% bitumen pen 57



Healing - historische achtergrond

Onderzoek van Dijk voor SPDM (op een enkel mengsel: "rolled asphalt base course mix", 6.4% bitumen 40/60)



Healing - historische achtergrond

- ▶ In de SPDM werd gerekend met een effect van healing en rustperiodes van 2 ("open lean mixes") tot 10 ("dense/rich mixes")
- ▶ Dit werd gecombineerd met een correctie voor de gebrekkige temperatuurnormalisatie en met een correctie voor versporing tot een shiftfactor van 10 tot 20
- ▶ In de SPDM werd niet met interventiecriteria en veiligheidsfactoren gewerkt

Healing - hoe zit het nu in het ontwerp

De ontwerpberekeningen moeten voldoen aan het volgende:

$$\frac{\text{Verkeersbelasting}}{\text{Vermoeings sterkte} \cdot \text{'Healing'} \cdot \text{Versporing}} = \frac{M_{\text{toel}}}{F_r}$$

<i>Verkeersbelasting:</i>	behoeft geen uitleg
<i>Vermoeingssterkte:</i>	levensduur asfalt vlgs vierpuntbuigproeven
<i>Versporing:</i>	constructie-afhankelijke correctiefactor
<i>'Healing':</i>	empirische shiftfactor
M_{toel} :	interventieniveau voor vermoeiingsschade
F_r :	veiligheids- of betrouwbaarheidsfactor ivm onzekerheden ontwerp

Healing - hoe zit het nu in het ontwerp

- ▶ De versporingsfactor, interventieniveau en veiligheid zijn intussen dus afzonderlijk benoemd
- ▶ De 'healing' is nog steeds een empirische shiftfactor voor alle discrepanties tussen theorie en praktijk

Healing - hoe moet het worden

In elk geval zal de 'zuivere' healing apart moeten worden benoemd:

$$\frac{\text{Verkeersbelasting}}{\text{Vermoeings sterkte} \cdot \text{Healing} \cdot E_m \cdot \text{Versporing}} = \frac{M_{\text{toel}}}{F_r}$$

- ▶ *De winst hiervan:* een gedeelte van de empirische shiftfactor wordt aan een onderscheiden verschijnsel toegekend dat we materiaalspecifiek kunnen (proberen te) bepalen
- ▶ *behoud van ellende:* we houden een empirische rest – shiftfactor E_m , waarvan we niet weten of die ook materiaalspecifiek is

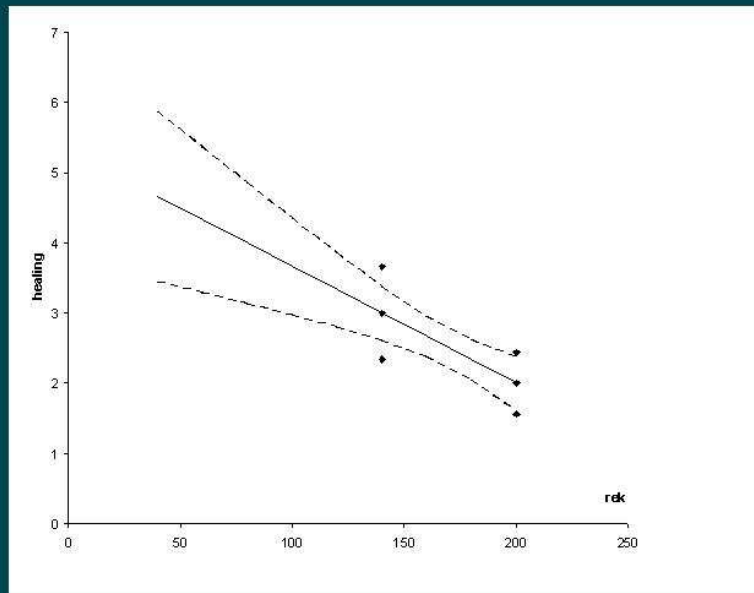
Healing - hoe moet het worden

Vervolgens proberen de (nu apart benoemde) healingsfactor op een of andere manier materiaalafhankelijk te bepalen. Opties:

- ▶ Proeven met hoge rekken doen, extrapoleren naar normale rekken
- ▶ Versnelde bepaling via modelmatige benadering
- ▶ Een benadering op basis van samenstellingsparameters
- ▶ Full scale tests (vgl aanpak LCPC)
- ▶ ?

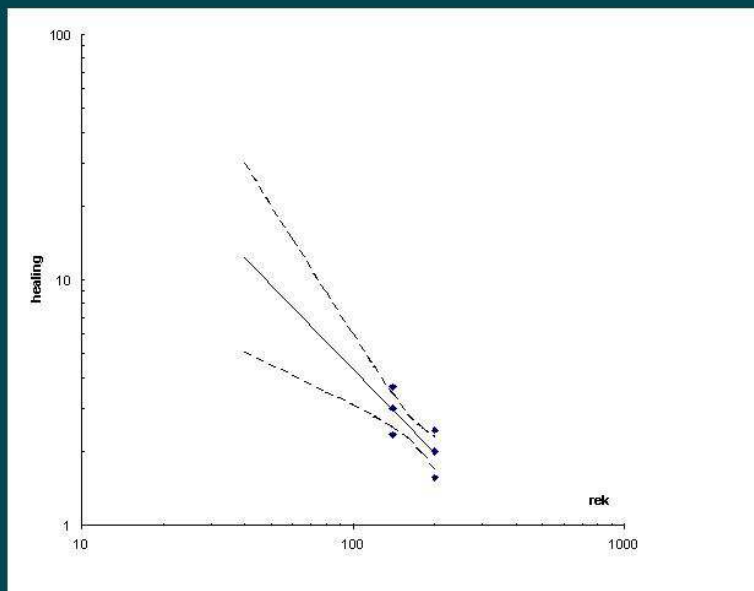
Healing - hoe moet het worden

Optie: proeven bij hoge rekken en extrapoleren naar normale rekken (hier op lineaire schaal)



Healing - hoe moet het worden

Optie: proeven bij hoge rekken en extrapoleren naar normale rekken (hier op logaritmische schaal)



Healing - hoe moet het worden

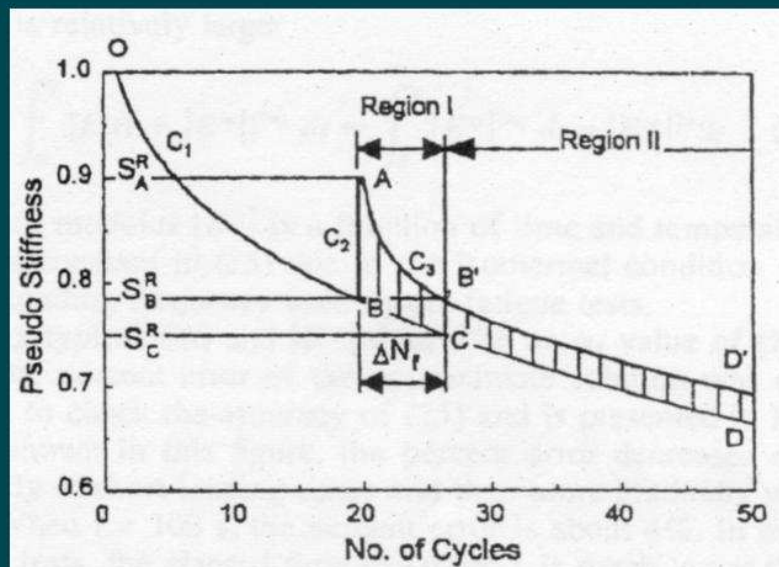
Discussie proeven bij hoge rekken en extrapoleren :

- ▶ Zeer gevoelig voor de (onbekende) relatie tussen rek en healing
- ▶ Kan daardoor leiden tot onrealistische uitkomsten (zoals healingsfactoren kleiner dan 1 of zelfs negatief)
- ▶ Leidt tot brede onzekerheidsband bij geëxtrapoleerd rekniveau
- ▶ Kan dus tevens tot zeer arbitraire resultaten leiden

Healing - hoe moet het worden

Optie: versnelde methode Kim & Little (o.a. voorgesteld in CROW – werkgroep FEA)

Zie bijdrage Piet Hopman



Healing - hoe moet het worden

Optie: versnelde methode Partial Healing theorie Ad Pronk:

- ▶ Elke belasting veroorzaakt irreversibele en reversibele schade met als gevolg: verlaging storage modulus en loss modulus
- ▶ Reversibele schade wordt in de tijd teniet gedaan vlg's exponentieel verloop; herstel van aanwezige schade gaat altijd door
- ▶ Schade per cyclus te relateren aan visceuze energie - dissipatie

Parameters te bepalen uit proeven zonder rustperioden



Rijkswaterstaat

23

Healing - hoe moet het worden

Discussie versnelde methoden

- ▶ Moeilijk te bepalen welk model gekozen moet worden. Beoordelen van de theorie leidt alleen tot academische discussies, niet tot antwoorden
- ▶ Hoe toets je het model aan 'echte' healingsproeven, dwz proeven met realistische rustperioden
- ▶ Bij welke condities en met hoeveel herhalingen moeten we de versnelde proeven doen om een bepaalde statistische betrouwbaarheid te krijgen



Rijkswaterstaat

24

Healing - hoe moet het worden

Optie: voorspelling op basis van samenstellingsparameters / eigenschappen bouwstoffen

- ▶ Zie bijdrage Wim van den Bergh

Healing - hoe moet het worden

Optie: Full scale tests

- ▶ Voordelen:
 - Zeer geschikt om theorie en gedrag in de weg te vergelijken
 - Ook sommige andere (mogelijk materiaalafhankelijke) discrepanties theorie – praktijk kunnen aan het licht komen
- ▶ Nadelen:
 - Duur en tijdrovend; testen op vermoeiing is een moeizame zaak
 - Moeilijk om diverse proefherhalingen te doen
 - Aspecten als veroudering zitten er nog steeds niet in

Healing - conclusies

- ▶ Kunnen bepalen van healingsgedrag is van groot belang, zowel voor opdrachtgevers als opdrachtnemers
- ▶ Risico verkeerde inschatting is voor opdrachtgever veel groter
- ▶ Nodig: in het ontwerp loskoppelen van overige empirische correcties
- ▶ Opties voor bepaling: extrapolatie uit hoge rekniveaus, modelmatige voorspelling, materiaaltechnologische voorspelling of ALT – proeven
- ▶ Behoud van ellende: er zal een empirische shiftfactor resteren waarvan onbekend blijft of deze ook materiaalspecifiek is



BIJLAGE B. HET PH-MODEL

2.01 Theory of the PH model

The dissipated energy per cycle ΔW_{tot} for the specimen (by integration over the specimen volume: $\iiint dVolume$) in a test (calculated from the applied force P, the obtained deflection W and the phase lag φ^* between force and deflection) can be divided into three parts:

- System losses per cycle ΔW_{syst}
- Visco-Elastic losses per cycle $\iiint \Delta W_{dis} dVolume$
- Fatigue consumption per cycle $\iiint \Delta W_{fat} dVolume$

If good equipment is used the system losses ΔW_{syst} can be ignored.

$$\left. \begin{aligned} V_s\{x\} &= \frac{FL^3}{12EI} \frac{A}{L} \frac{(1+\mu)}{\alpha} \frac{H^2}{L^2} & A < x < L/2 \\ V_B\{x\} &= \frac{FL^3}{12EI} \frac{A}{L} \left[3\frac{x}{L} - 3\frac{x^2}{L^2} - \frac{A^2}{L^2} \right] & A < x < L/2 \end{aligned} \right\} \rightarrow \frac{V_s\left\{\frac{L}{2}\right\}}{V_B\left\{\frac{L}{2}\right\}} = \frac{4(1+\mu)H^2}{\alpha(3L^2 - 4A^2)}$$

The visco-elastic losses per cycle ΔW_{dis} for a unit volume dVolume are represented by the well-known formula for sinusoidal loadings:

$$\Delta W_{dis} = \pi \sigma \varepsilon \sin(\varphi)$$

This amount of dissipated energy is completely transformed into heat and is responsible for a small part of the decrease in stiffness modulus in the first part of the fatigue test. Equilibrium in temperature distribution is normally reached within 10.000 load cycles.

An expression for the fatigue damage ΔW_{fat} during the fatigue test (e.g. the initiation phase) is not known and is not taken into account in the processing formulas for the calculations of strains and stresses. Both the applied force and deflection are assumed to be solely responsible for the bending of the beam. Therefore the calculated strains and stresses are in principal wrong (overestimated) but the mistake made is very small.

In the PH model it is assumed that next to the decrease in fatigue strength (remaining fatigue life) the fatigue consumption ΔW_{fat} is also responsible for the decrease in the stiffness modulus and the increase in the phase lag during the fatigue test. Furthermore the fatigue consumption ΔW_{fat} is taken equal to a small portion (δ) of the visco-elastic losses ΔW_{dis} . In the original PH model this parameter was assumed to be a constant. Based on uni-axial push-pull (UPP) tests recent research shows that this parameter is probably not a constant but depend on the applied strain (low endurance limit). However, for this healing project the equations of the original PH model can be used.

The next step is the introduction of a stiffness damage term Q which is directly related to the fatigue consumption ΔW_{fat} per cycle ($T = 1/f$).

$$Q \Rightarrow \Delta W_{fat} \Rightarrow \Delta W_{dis} \Rightarrow \frac{d}{dt} Q = \frac{d}{dt} \delta \cdot W_{dis} \approx \delta \frac{\Delta W_{dis}}{\Delta T} = \delta f \Delta W_{dis}$$

The last step is the assumption that the stiffness damage Q effects both the imaginary part (Loss Modulus) $F = S \cdot \sin(\varphi)$ and the real part (Storage Modulus) $G = S \cdot \cos(\varphi)$ of the complex stiffness modulus.

$$F\{t\} = S_{mix} \sin\{\varphi\} \quad ; \quad G\{t\} = S_{mix} \cos\{\varphi\}$$

$$F\{t\} = F_o - \int_0^t \frac{dQ\{\tau\}}{d\tau} \left[\alpha_1^* e^{-\beta^* \varepsilon_0^2 (t-\tau)} + \gamma_1^* \right] d\tau$$

$$G\{t\} = G_o - \int_0^t \frac{dQ\{\tau\}}{d\tau} \left[\alpha_2^* e^{-\beta^* \varepsilon_0^2 (t-\tau)} + \gamma_2^* \right] d\tau$$

The damage caused by a load cycle at time t_1 will vanish with time for the terms with the parameters α_1^* and α_2^* according to the time decay $\beta^* \varepsilon_0^2$ and will remain for the terms with the parameter γ_1^* and γ_2^* .

In case of strain controlled mode (ε_0) the fatigue damage rate is given by the following equation in which δ is a constant and f is the frequency.

$$\frac{dQ\{\tau\}}{d\tau} \approx \frac{\delta \cdot \Delta W_{dis}}{T} = \frac{\delta \int_0^T \sigma \frac{d\varepsilon}{d\tau} d\tau}{T} = \delta \pi \varepsilon_0^2 S\{\tau\} \sin(\varphi\{\tau\}) f$$

For convenience the following abbreviations are used from here on.

$$\alpha_{1,2} = \delta \pi \varepsilon_0^2 f \alpha_{1,2}^* \quad \& \quad \gamma_{1,2} = \delta \pi \varepsilon_0^2 f \gamma_{1,2}^* \quad \& \quad \beta = \beta^* \varepsilon_0^2$$

$$\text{Loss modulus } F\{t\} = F_o - \int_0^t \left[F\{\tau\} (\alpha_1 e^{-\beta(t-\tau)} + \gamma_1) \right] d\tau$$

$$\text{Storage modulus } G\{t\} = G_o - \int_0^t \left[F\{\tau\} (\alpha_2 e^{-\beta(t-\tau)} + \gamma_2) \right] d\tau$$

These two coupled integral equations can be solved by using the Laplace transform. First of all the first derivatives are determined for both equations by using Leibniz's rule:

$$H\{t\} = \int_{m\{t\}}^{n\{t\}} P\{t, \tau\} d\tau \quad \rightarrow$$

$$\frac{d}{dt} H\{t\} = \int_{m\{t\}}^{n\{t\}} \frac{d}{dt} P\{t, \tau\} d\tau + P\{t, n\{t\}\} \frac{d}{dt} n\{t\} - P\{t, m\{t\}\} \frac{d}{dt} m\{t\}$$

This leads to:

$$\frac{d}{dt} F\{t\} = +\beta \int_0^t [F\{\tau\} \alpha_1 e^{-\beta(t-\tau)}] d\tau - [F\{t\}(\alpha_1 + \gamma_1)]$$

The first term on the right hand is a convolution integral of which the Laplace transform is given by:

$$\mathcal{L} \left[\int_0^t f\{\tau\} g\{t-\tau\} d\tau \right] = \mathcal{L}[f\{t\}] \mathcal{L}[g\{t\}]$$

So, the Laplace transform $\mathcal{L}[F\{t\}] = X\{s\}$ can already be applied, leading to:

$$s X\{s\} - F_0 = \beta \alpha_1 \mathcal{L}[F\{t\}] \mathcal{L}[e^{-\beta t}] - (\alpha_1 + \gamma_1) X\{s\} \rightarrow$$

$$s X\{s\} - F_0 = \beta \alpha_1 X\{s\} \frac{1}{s + \beta} - (\alpha_1 + \gamma_1) X\{s\} \rightarrow$$

$$X\{s\} = F_0 \frac{s + \beta}{s^2 + (\alpha_1 + \beta + \gamma_1)s + \beta\gamma_1}$$

The denominator can be written as:

$$s^2 + (\alpha_1 + \beta + \gamma_1)s + \beta\gamma_1 = \left(s + \frac{\alpha_1 + \beta + \gamma_1}{2} \right)^2 + \beta\gamma_1 - \left(\frac{\alpha_1 + \beta + \gamma_1}{2} \right)^2$$

Using the abbreviations $B = \frac{\alpha_1 + \beta + \gamma_1}{2}$ and $C = \sqrt{(B^2 - \beta\gamma_1)}$ the Laplace transform can be expressed as:

$$X\{s\} = F_0 \frac{s + \beta}{(s + B)^2 - C^2} = F_0 \left(\frac{(s + B)}{(s + B)^2 - C^2} + \frac{(\beta - B)}{(s + B)^2 - C^2} \right)$$

Knowing that

$$\mathcal{L}^{-1} \left[\frac{m}{(s + n)^2 - m^2} \right] = e^{-nt} \text{Sinh}\{mt\} \quad \& \quad \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{s + n}{(s + n)^2 - m^2} \right] = e^{-nt} \text{Cosh}\{mt\}$$

And with the abbreviation $D = (\beta - B) / C$ the back transformation leads to

$$F\{t\} = F_0 e^{-Bt} [\text{Cosh}\{Ct\} + D \text{Sinh}\{Ct\}]$$

The same procedure is applied for the storage modulus $G\{t\}$:

$$\frac{d}{dt}G\{t\} = +\beta \int_0^t [F\{\tau\} \alpha_2 e^{-\beta(t-\tau)}] d\tau - [F\{t\}(\alpha_2 + \gamma_2)] \Rightarrow$$

$$sY\{s\} - G_0 = \alpha_2 \beta X\{s\} \frac{1}{s + \beta} - (\alpha_2 + \gamma_2) X\{s\} \rightarrow$$

$$sY\{s\} - G_0 = \alpha_2 \beta F_0 \frac{s + \beta}{(s + B)^2 - C^2} \frac{1}{s + \beta} - (\alpha_2 + \gamma_2) F_0 \frac{s + \beta}{(s + B)^2 - C^2} \rightarrow$$

$$sY\{s\} = G_0 - F_0 \frac{\alpha_2 s + \gamma_2 s + \gamma_2 \beta}{(s + B)^2 - C^2} \rightarrow Y\{s\} = \frac{G_0}{s} - F_0 \left(\frac{\alpha_2 s + \gamma_2 s + \gamma_2 \beta}{s \left((s + B)^2 - C^2 \right)} \right)$$

The last terms can be split up in the following way:

$$\frac{\gamma_2 s + \gamma_2 \beta}{s \left((s + B)^2 - C^2 \right)} = \frac{K_1}{s} + \frac{K_2 (s + B) + K_3 C}{(s + B)^2 - C^2} \rightarrow$$

$$K_1 \left((s + B)^2 - C^2 \right) + K_2 s (s + B) + K_3 C s = (\gamma_2 s + \gamma_2 \beta) \rightarrow$$

$$K_2 = -K_1 \quad \& \quad K_1 2B - K_1 B + K_3 C = \gamma_2 \quad \& \quad K_1 \beta \gamma_1 = \beta \gamma_2 \rightarrow$$

$$K_1 = \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \quad \& \quad K_2 = -\frac{\gamma_2}{\gamma_1} \quad \& \quad K_3 = \frac{\gamma_2 - B \frac{\gamma_2}{\gamma_1}}{C} = \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \cdot \frac{\gamma_1 - B}{C}$$

Denoting $E = (B - \gamma_1) / C$ the following solution is obtained for the storage modulus

$$G\{t\} = G_0 - F_0 \left[\begin{array}{l} \frac{\alpha_2}{C} e^{-Bt} \text{Sinh}\{Ct\} + \\ \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \left(1 - e^{-Bt} [\text{Cosh}\{Ct\} + E \text{Sinh}\{Ct\}] \right) \end{array} \right]$$

Note that only the start values of the loss and storage modulus are needed.

A nice kind of control of the solution is possible by taking the limit of the product of s times the Laplace transform for s goes to infinity:

$$f\{0\} = \lim_{s \rightarrow \infty} [s F\{s\}]$$

More interesting is the limit of the same product for s goes to nil. This limit value is equal to the function value for t goes to infinity.

$$f\{\infty\} = \lim_{s \rightarrow 0} [s F\{s\}]$$

Interesting is also the Laplace transformation of a periodic function f with period time T :

$$F\{s\} = \frac{1}{1 - e^{-sT}} \int_0^T f\{t\} e^{-st} dt$$

2.02 Rest period

During a rest period no energy will be dissipated and therefore the function $F\{\tau\}$ equals zero during the time of the rest period. After time t_1 no load is applied, than the following equations are valid for loss and storage modulus.

$$\begin{aligned} F\{t\} &= F_0 - \int_0^{t_1} \alpha_1 F\{\tau\} e^{-\beta(t-\tau)} d\tau - \int_0^{t_1} \gamma_1 F\{\tau\} d\tau = \\ &= F_0 - e^{-\beta(t-t_1)} \int_0^{t_1} \alpha_1 F\{\tau\} e^{-\beta(t_1-\tau)} d\tau - \int_0^{t_1} \gamma_1 F\{\tau\} d\tau \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G\{t\} &= G_0 - \int_0^{t_1} \alpha_2 F\{\tau\} e^{-\beta(t-\tau)} d\tau - \int_0^{t_1} \gamma_2 F\{\tau\} d\tau = \\ &= G_0 - e^{-\beta(t-t_1)} \int_0^{t_1} \alpha_2 F\{\tau\} e^{-\beta(t_1-\tau)} d\tau - \int_0^{t_1} \gamma_2 F\{\tau\} d\tau \end{aligned}$$

The second terms in the right hand of the equations above represent the reversible damages $e^{-\beta(t-t_1)} R_{L1}$ & $e^{-\beta(t-t_1)} R_{S1}$ and the third terms the non recoverable (irreversible) damages P_{L1} & P_{S1} . The numeric index indicates the number of the load-rest period.

The irreversible damages P_{L1} and P_{S1} are the accumulations for the irreversible damages of the loss and storage modulus per cycle over the whole loading period from 0 to t_1 .

$$P_{L1} = \gamma_1 \int_0^{t_1} F\{\tau\} d\tau \quad \& \quad P_{S1} = \gamma_2 \int_0^{t_1} F\{\tau\} d\tau$$

The reversible damages $e^{-\beta(t-t_1)} R_{L1}$ and $e^{-\beta(t-t_1)} R_{S1}$ are given by:

$$e^{-\beta(t-t_1)} \int_0^{t_1} \alpha_1 F\{\tau\} e^{-\beta(t_1-\tau)} d\tau = e^{-\beta(t-t_1)} R_{L1}$$

$$e^{-\beta(t-t_1)} \int_0^{t_1} \alpha_2 F\{\tau\} e^{-\beta(t_1-\tau)} d\tau = e^{-\beta(t-t_1)} R_{S1}$$

Due to the exponential time function the reversible damage at the end of the load period ($t = t_1$) will vanish in time. Similar equations are obtained for the storage modulus. So, the PH model calculates a permanent decrease in the stiffness modulus and a temporarily decrease which will vanish in time in an exponential way.

2.03 Second load period

After the first rest period a second load period starts at $t = t_2$ and will end at $t = t_2 + t_1 = t_2 + \Delta t_L$. By moving the origin of the time scale to $t = t_2$ the same equations are obtained as for the first load period ($t^* = t - t_2$).

$$F\{t^*\} = F_0^* - \int_0^{t^*} \left[F\{\tau\} \left(\alpha_1 e^{-\beta(t^*-\tau)} + \gamma_1 \right) \right] d\tau \text{ for } 0 < t^* < \Delta t_L$$

$$G\{t^*\} = G_0^* - \int_0^{t^*} \left[F\{\tau\} \left(\alpha_2 e^{-\beta(t^*-\tau)} + \gamma_2 \right) \right] d\tau \text{ for } 0 < t^* < \Delta t_L$$

The only differences are the start values for the loss modulus $F\{t\}$ and the storage modulus $G\{t\}$ at the beginning of the (second) load period. Therefore the same solutions with shifted time scales can be used for all following load and rest periods. So, the evolutions in the second and following load periods will have the same form in the PH model. The start values for F_0^* and G_0^* are determined by the accumulation of the irreversible fatigue damage (in the first load period) and the recovery of the reversible damage (during the rest period).

2.04 Calculation of the reversible & irreversible damages during a rest period

As shown in the last chapter the solutions for the evolutions of the loss (F) and storage (G) modulus in the second load period are similar to those in the first load period but instead of the initial values F_0 and G_0 the values F_0^* and G_0^* at the start of the second load period have to be used. It seems odd but the recovery of the reversible damage in the rest period is easier to calculate than the accumulated irreversible damage at the end of the first load period.

The reversible damages at the end of the first load period ($t=t_1$) are given by:

$$R_{L1} = \int_0^{t_1} \alpha_1 F\{\tau\} e^{-\beta(t_1-\tau)} d\tau \quad \& \quad R_{S1} = \int_0^{t_1} \alpha_2 F\{\tau\} e^{-\beta(t_1-\tau)} d\tau$$

By taken the first derivative of the modulus in the first period the following equations are obtained:

$$\frac{d}{dt} F\{t\} = \beta \int_0^t \left[F\{\tau\} \alpha_1 e^{-\beta(t-\tau)} \right] d\tau - (\alpha_1 + \gamma_1) F\{t\}$$

$$\frac{d}{dt} G\{t\} = \beta \int_0^t \left[F\{\tau\} \alpha_2 e^{-\beta(t-\tau)} \right] d\tau - (\alpha_2 + \gamma_2) F\{t\}$$

Therefore it yields:

$$\int_0^t \left[F\{\tau\} \alpha_1 e^{-\beta(t-\tau)} \right] d\tau = \frac{1}{\beta} \left(\frac{d}{dt} F\{t\} + (\alpha_1 + \gamma_1) F\{t\} \right)$$

$$\int_0^t \left[F\{\tau\} \alpha_2 e^{-\beta(t-\tau)} \right] d\tau = \frac{1}{\beta} \left(\frac{d}{dt} G\{t\} + (\alpha_2 + \gamma_2) F\{t\} \right)$$

The reversible damage at $t = t_1$ can now be expressed as:

$$R_{L1} = \frac{1}{\beta} \left[\frac{d}{dt} F\{t\} \Big|_{t=t_1} + (\alpha_1 + \gamma_1) F\{t_1\} \right]$$

$$R_{S1} = \frac{1}{\beta} \left[\frac{d}{dt} G\{t\} \Big|_{t=t_1} + (\alpha_2 + \gamma_2) F\{t_1\} \right]$$

The irreversible damage P_{L1} and P_{S1} are now given by:

$$P_{L1} = F_0 - F\{t_1\} - R_{L1} \quad \& \quad P_{S1} = G_0 - G\{t_1\} - R_{S1}$$

The solutions for the loss and storage modulus in the first load period are known and therefore the first derivatives at $t = t_1$ can easily be calculated:

$$\frac{d}{dt} F\{t\} = F_0 e^{-Bt} \left[(C - BD) \text{Sinh}\{Ct\} - (CD + B) \text{Cosh}\{Ct\} \right]$$

$$\frac{d}{dt} G\{t\} = -F_0 e^{-Bt} \left[\left(-\frac{\alpha_2 B}{C} + \frac{\gamma_2}{\gamma_1} (BE - C) \right) \text{Sinh}\{Ct\} + \left(-\alpha_2 + \frac{\gamma_2}{\gamma_1} (B - CE) \right) \text{Cosh}\{Ct\} \right]$$

The values for the loss (F_0^*) and storage G_0^* modulus at the start of the second load period can be calculated as follows:

$$F\{t_2\} = F_0^* = F_0 - P_{L1} - R_{L1} e^{-\beta(t_2-t_1)} \quad \& \quad G\{t_2\} = G_0^* = G_0 - P_{S1} - R_{S1} e^{-\beta(t_2-t_1)}$$

This procedure can be repeated for all following rest and load periods.

2.05 Application of the PH model in 4PB fatigue tests with rest periods

VERVANGEN DOOR BIJLAGE 2 UIT ARTHUR ZIJN NOTITIE "ERVARINGEN MET HET PH-MODEL" HEB IK ALLEEN IN PDF EN IK HEB GEEN ZIN ALLE FORMULES OVER TE MOETEN TIKKEN!!!!

BIJLAGE C. HET EENVOUDIGE MODEL IN DE (DIS)CONTINUE PROEVEN

OPNEMEN BIJLAGE 1 UIT ARTHUR ZIJN NOTITIE "ERVARINGEN MET HET PH-MODEL" HEB IK ALLEEN IN PDF

BIJLAGE D. OVERZICHT PROEFSTUKKEN

4.01 10/20 mengsel

10/20	Check	Lengte	Hoogte	Breedte	Dichtheid opmeten		Dichtheid "water"	
	proefstuk				Opmeten	Holle R.	"Water"	Holle R.
Nauwkeurigheid	Afkeur?	0 dec	1-dec	1-dec	0 dec	1-dec	0 dec	1-dec
Eenheid		[mm]	[mm]	[mm]	[kg/m ³]	[%]	[kg/m ³]	[%]
P1B1		449	50,1	50,1	2352	4,9	2380	3,8
P1B2		450	50,1	49,8	2355	4,8	2377	3,9
P1B3		450	50,0	50,0	2355	4,8	2375	4,0
P1B4		450	49,3	49,9	2353	4,9	2370	4,2
P1B5		449	49,3	49,9	2355	4,8	2373	4,1
P1B7		450	49,3	49,4	2355	4,8	2373	4,1
P2B8		450	49,5	49,3	2345	5,2	2371	4,1
P2B9		450	49,3	49,1	2367	4,3	2379	3,8
P2B11		450	49,3	49,2	2366	4,3	2381	3,7
P2B14		450	50,0	49,8	2372	4,1	2380	3,8
P3B15		449	50,1	49,8	2359	4,6	2374	4,0
P3B16		450	49,3	49,8	2381	3,7	2380	3,8
P3B17		450	49,2	49,7	2377	3,9	2380	3,8
P3B19		451	49,1	49,8	2381	3,7	2380	3,8
P3B20		451	49,2	49,6	2377	3,9	2377	3,9
P3B21		451	49,1	49,7	2364	4,4	2377	3,9
P4B22		450	49,9	49,7	2364	4,4	2372	4,1
P4B26		451	49,1	49,1	2366	4,3	2374	4,0
P4B27		451	49,0	49,2	2353	4,9	2372	4,1
P4B28		451	49,7	49,8	2348	5,1	2368	4,3
Watertemperatuur:		19	[°C]	Gem.	2362	4,5	2376	4,0
Dichtheid water:		998,5	[kg/m ³]	St.afw.	11	0,5	4	0,2

4.02 70/100 mengsel

70/100	Check	Lengte	Hoogte	Breedte	Dichtheid opmeten		Dichtheid "water"	
	proefstuk				Opmeten	Holler.	"Water"	Holler.
Nauwkeurigheid	Afkeur?	0 dec	1-dec	1-dec	0 dec	1-dec	0 dec	1-dec
Eenheid		[mm]	[mm]	[mm]	[kg/m ³]	[%]	[kg/m ³]	[%]
P1B1		450	49,8	49,8	2371	3,9	2380	3,6
P1B4		450	50,0	49,9	2365	4,2	2380	3,6
P1B5		450	49,9	49,8	2357	4,5	2375	3,8
P1B6		450	49,9	49,8	2358	4,5	2377	3,7
P1B7		450	49,8	50,4	2367	4,1	2379	3,6
P2B9		450	49,7	50,3	2352	4,7	2372	3,9
P2B10		450	49,8	49,9	2356	4,5	2373	3,9
P2B11		450	49,6	49,7	2361	4,3	2373	3,9
P2B13		450	49,6	49,6	2369	4,0	2378	3,6
P2B14		450	49,6	49,5	2360	4,4	2377	3,7
P3B18		450	49,6	50,2	2367	4,1	2380	3,6
P3B19		450	49,6	49,5	2374	3,8	2378	3,6
P3B20		450	49,6	49,6	2357	4,5	2378	3,6
P4B22		451	49,7	49,7	2360	4,4	2374	3,8
P4B23		450	49,6	49,6	2367	4,1	2376	3,7
P4B24		450	49,7	49,5	2364	4,2	2379	3,6
P4B25		449	49,8	49,8	2368	4,1	2380	3,6
P4B26		449	49,7	49,7	2367	4,1	2380	3,6
P4B27		449	49,7	49,6	2373	3,9	2380	3,6
P4B28		449	49,6	49,5	2358	4,5	2373	3,9
Watertemperatuur:		19	[°C]	Gem.	2364	4,2	2377	3,7
Dichtheid water:		998,5	[kg/m ³]	St.afw.	6	0,3	3	0,1

BIJLAGE E. DELRON

Naar aanleiding van de verschillen gevonden in stijfheid tussen BAM en TNO is op éénzelfde asfaltbalk, P3B18 met 10/20 bitumen, een frequency sweep uitgevoerd ter bepaling van de stijfheid van de asfaltbalk. In onderstaande tabel staan de resultaten.

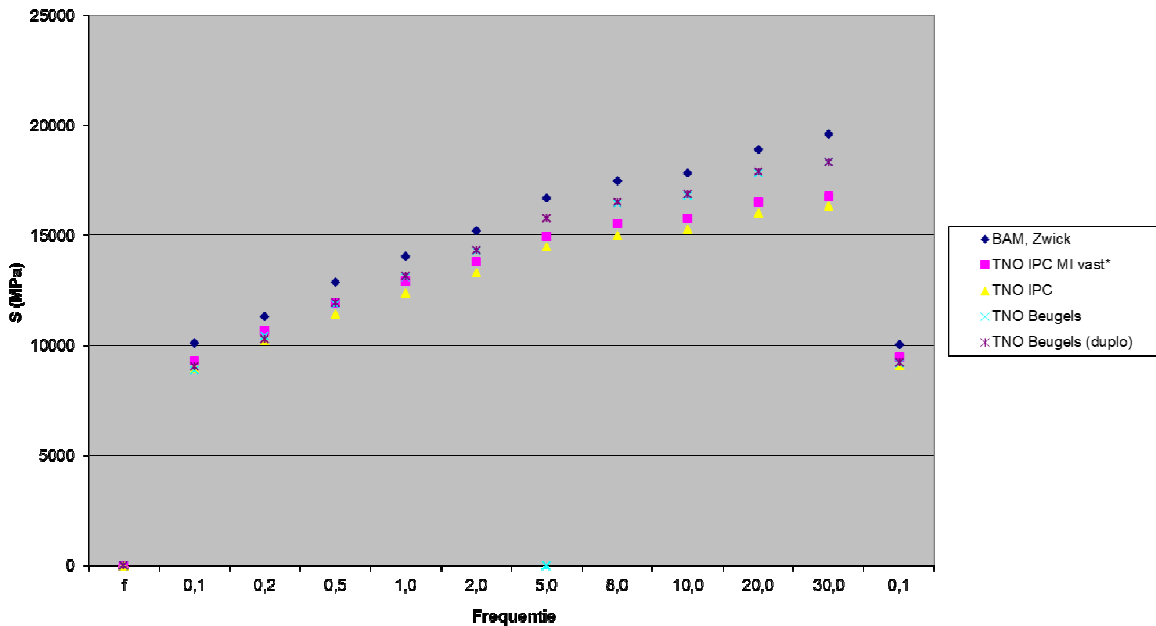
Tabel 1 – Overzicht resultaten frequency sweep

Laboratorium	BAM	TNO	TNO	TNO	TNO
Inklemming	Zwick	IPC	IPC	Beugels	Beugels
Uitvoerdatum	14-2-2012	15-2-2012	15-2-2012	20-2-2012	20-2-2012
Inklemkracht	100 N per inklemming **	500 N buitenste inklemming; 300 N binnenste inklemming***	500 N buitenste inklemming; 300 N binnenste inklemming***	1000 N buitenste inklemming; 500 N binnenste inklemming*** 200 cNm buitenste inklemming; 150 cNm binnenste inklemming	1000 N buitenste inklemming; 500 N binnenste inklemming*** 200 cNm buitenste inklemming; 150 cNm binnenste inklemming
Inklemmoment	NB	NB	NB		
	BAM, Zwick	TNO IPC MI vast*	TNO IPC	TNO Beugels	TNO Beugels (duplo)
Frequentie (Hz)	Stijfheid (MPa)	Stijfheid (MPa)	Stijfheid (MPa)	Stijfheid (MPa)	Stijfheid (MPa)
0,1	10099	9261	8926	8851	9019
0,2	11297	10658	10187	10407	10271
0,5	12857	11911	11399	11878	11925
1,0	14007	12888	12364	13095	13135
2,0	15189	13767	13284	14266	14312
5,0	16690	14950	14435	N/A	15773
8,0	17451	15508	14993	16443	16503
10,0	17801	15764	15260	16774	16858
20,0	18882	16499	16010	17802	17874
30,0	19575	16770	16324	18303	18296
0,1	10033	9445	9052	9184	9212

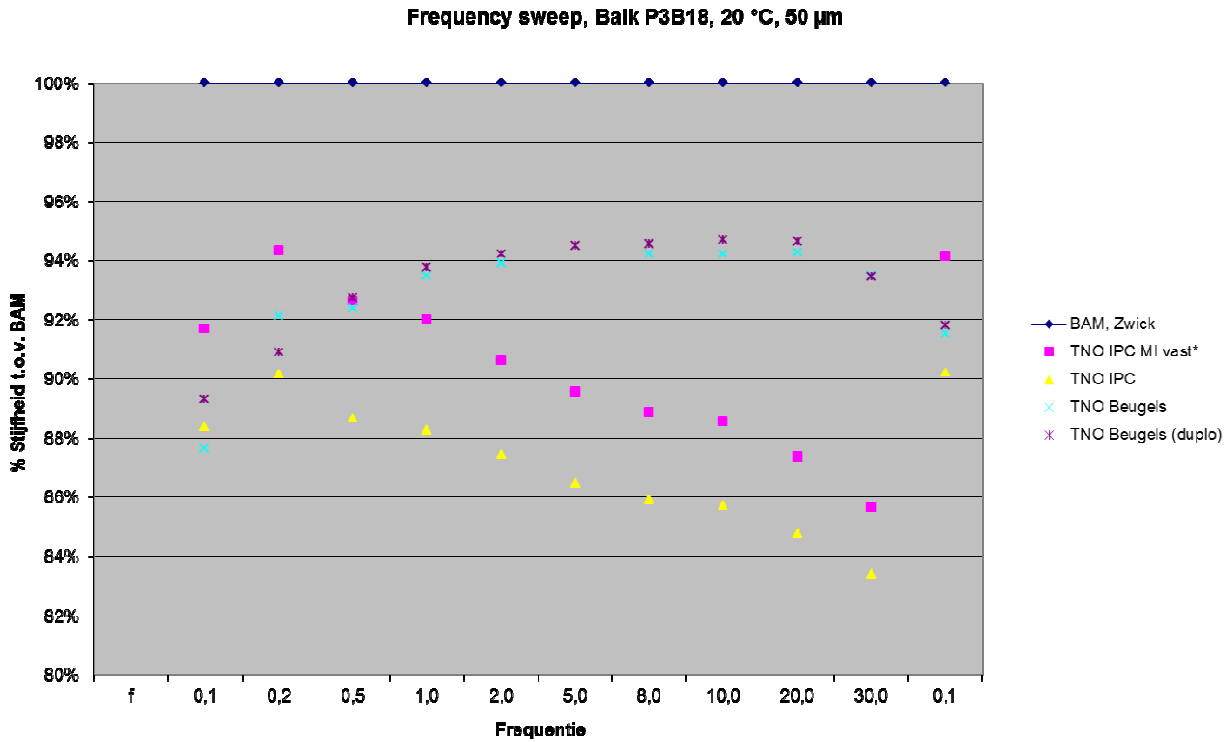
* Scharniering van de middeninklemming gefixeerd
 ** Opgegeven door BAM
 *** Inklemkracht corresponderend met inklemmoment, deze kracht is dmv drukdoos onder de beugel later apart gemeten (zonder asfalt)

De gegevens zijn uitgezet in onderstaande figuur.

Frequency sweep, Balk P3B18, 20 °C, 50 µm



De stijfheid van de diverse metingen van TNO is uitgezet tegen de stijfheid van de meting van BAM.



Het verschil tussen de conventionele beugel inklemming en de Zwick direct inklemming ligt voor de hogere frequenties (1 tot 30 Hz) in de orde grootte van 6%. Dit betekent dat er met de beugels een 6% lagere stijfheid wordt gemeten dan met de directe inklemming. De IPC inklemming laat nog grotere verschillen zien, die ook toenemen met toenemende frequentie. De gemeten inklemkrachten zijn hier kleiner dan bij de gemeten inklemkrachten bij de beugels, hetgeen een verklaring voor de lagere stijfheden kan zijn. Opgemerkt dient te worden dat deze IPC inklemming niet voor het pragmatisch healing onderzoek is gebruikt. Het geeft wel een beeld wat inklemmingen en inklemkrachten kunnen doen.

BIJLAGE F. BEPALING W_{diss} EN RDEC UIT DE VERMOEIINGSPROEVEN

Bepaling RDEC voor twee proefstukken

In deze paragraaf wordt voor twee proefstukken (1x 70/100, 1x 10/20) de RDEC bepaald volgens de benadering van Carpenter (Shen et al., 2007). In onderstaande figuren wordt voor beide proefstukken eerst de originele W_{diss} plot gegeven die hiervoor ook al getoond is. Uit deze plot zijn handmatig de pieken verwijderd en vervolgens is de RDEC bepaald volgens vergelijking (5.2):

$$RDEC = (W_{diss, j} - W_{diss, i}) / W_{diss, i} \quad (1)$$

Of, als de metingen niet voor elke N_i beschikbaar zijn:

$$RDEC = (W_{diss, j} - W_{diss, i}) / (W_{diss, i}^{*(j-i)}) \quad (2)$$

In eerste instantie wordt dit rechtstreeks gedaan, maar dan ontstaat er vooral een puntenwolk, iets dat Shen en Carpenter ook rapporteren. Zij fitten daarom een macht door $W_{diss, i} = AN_i^k$, ze berekenen de RDEC plateau waarde dan uit die fit.

In de berekening daarvan (in bijlage A bij het rapport van Shen en Carpenter) is een fout geslopen, de twee termen in teller van vergelijking 5.3 hierboven zijn in de bijlage omgedraaid. In hoofdstuk 3 van het rapport staat de formule wel goed. Het gevolg is dat waar Shen en Carpenter uitkomen op:

$$RDEC_a = (1 - (b/a)^k) / (b - a),$$

met b, a aantal lastherhalingen waarbij $b > a$ en k de exponent uit de fit op W_{diss} .
De werkelijke formule voor $RDEC_a$ moet zijn:

$$RDEC_a = ((b/a)^k - 1) / (b - a), \quad (3)$$

Indien $b - a = 100$, zoals Shen en Carpenter gebruiken wordt dit:

$$RDEC_a = ((1 + 100/a)^k - 1) / 100 \text{ in plaats van } (1 - (1 + 100/a)^k) / 100.$$

De in rood weergegeven formules zijn degenen met de fout.

Bij het toepassen van de benadering van Shen en Carpenter op de resultaten van dit onderzoek, doet zich de vraag voor waarom er een machtsrelatie op de gedissipeerde energie wordt gefit. Het gaat immers over het deel van de curve waar de energie dissipatie vrijwel lineair verloopt, dus een lineair verband lijkt logischer.

De gedissipeerde energie per cyclus is:

$$W_{diss, 0} = \sigma_0 \times \epsilon_0 \times \pi \times \sin(\phi_0) \quad (4)$$

In de vermoeiingsproef is de opgelegde rek constant, de stijfheid neemt in fase II lineair af en de fase hoek loopt lineair op. Daarmee zal de gedissipeerde energie in fase II ook min of meer lineair verlopen.

Dit is in de onderstaande figuur geïllustreerd. Linksboven zijn de stijfheid en fasehoek uitgezet tegen het aantal lastherhalingen. Daarnaast staat de stijfheid en op de rechter verticale as de gedissipeerde energie als functie van het aantal lastherhalingen. Hierin is te zien dat het lineaire deel van de stijfheidsafname samenvalt met een min of

meer lineair deel in de grafiek voor de gedissipeerde energie. Aan de hand van de stijfheidsgrafiek is het interval van het lineaire deel bepaald (dunne lijnen in beide bovenste grafieken). Het daarwerkelijke interval dat gebruikt is om te fitten is hierbinnen gekozen en is aangegeven met de gestippelde zwarte lijnen. De oranje stippellijn in de grafiek rechtsboven (die in de onderste vier grafieken terug komt) geeft $N_{f,50}$, de vermoeiingslevensduur gebaseerd op halvering van de stijfheid, aan.

In de onderste vier grafieken staat de gedissipeerde energie, berekend uit de meet data, uit op de linker verticale as, het is de ruwe blauwe lijn. De RDEC berekend uit deze gedissipeerde energie staat op de rechteras. Deze data wordt weergegeven door de kleine blauwe markers en zoals uit de figuur blijkt zit daar heel veel spreiding op.

In de middelste twee grafieken zijn relaties gefit op de gedissipeerde energie. In de linker grafiek is dit een lineaire relatie, in de rechter een macht zoals Sheng en Carpenter gebruiken. De bijbehorende relaties:

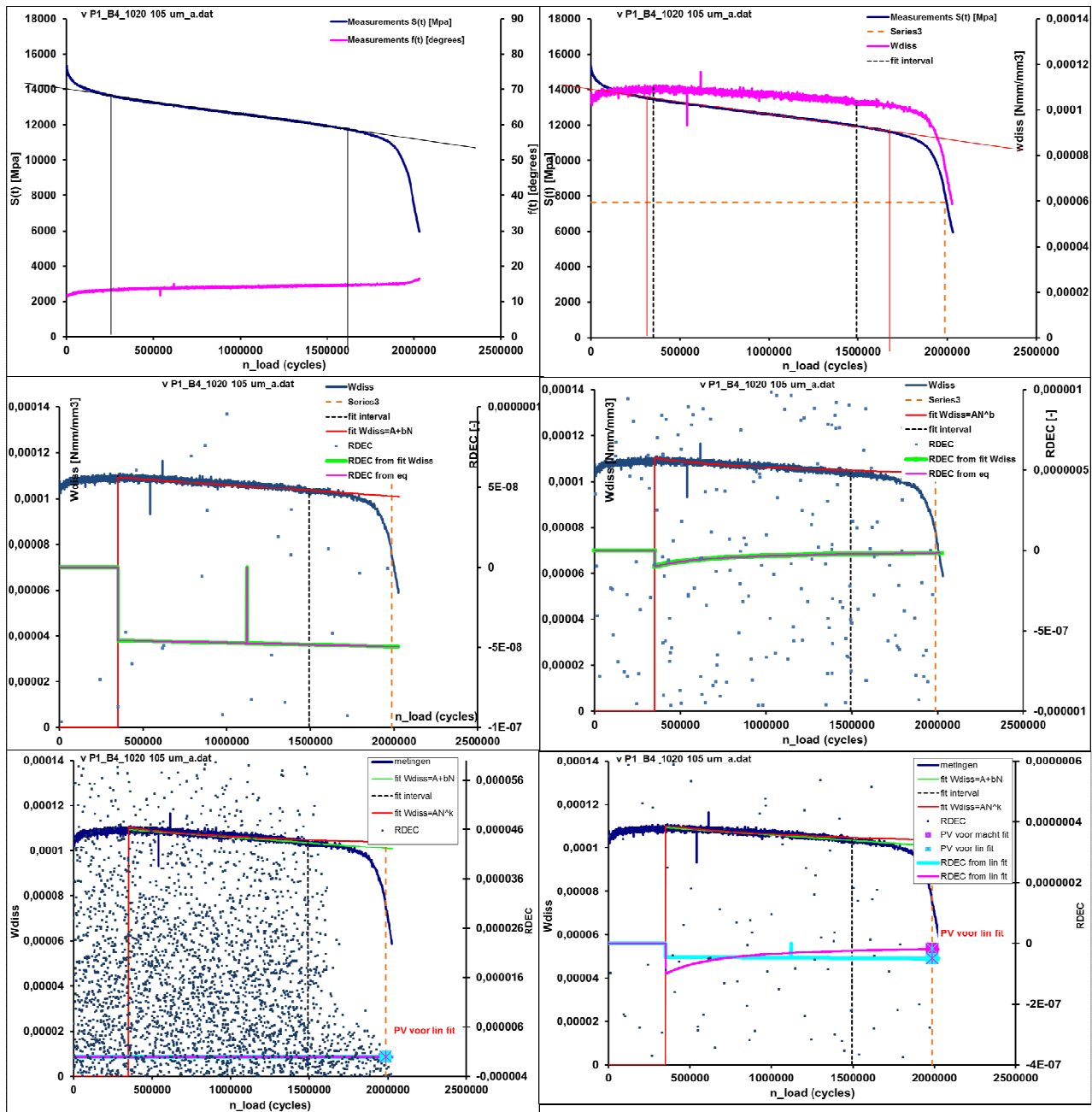
$$\text{Lineaire fit: } W_{\text{diss},i} = A + BxN_i, \quad \text{met RDEC}_i = B / (A + BxN_i) \quad (5a,b)$$

$$\text{Machtrelatie: } W_{\text{diss},i} = AxN_i^k, \quad \text{met RDEC}_i = ((N_j/N_i)^k - 1) / (N_j - N_i) \quad (6a,b)$$

De RDEC is in beide middelste grafieken uitgezet op de rechter verticale as.

De onderste twee grafieken geven beide fits (5a, 6a) op W_{diss} en op RDEC (5b, 6b) weer. In de linker grafiek is uitgezoomd, zodat de grote variatie in RDEC datapunten zichtbaar is. De beide uit de W_{diss} fit berekende RDEC relaties lijken geen meerwaarde te bieden. Wel valt in deze grafiek op dat het punt waarop W_{diss} afwijkt van de beide fits redelijk overeenkomt met het punt waarop de variatie in RDEC sterk afneemt en met het punt dat fase III in de proef start. De grafiek rechtsonder is de ingezoomde variant van de grafiek linksonder, in deze figuur zijn de op grond van $N_{f,50}$ bepaalde plateau waarden voor de RDEC (vergelijking 5b en 6b) op grond van de fits op W_{diss} opgenomen. Deze $N_{f,50}$ is groter dan de N waarbij de gedissipeerde energie veranderd, wat logisch is omdat $N_{f,50}$ pas in de derde fase van de proef optrad.

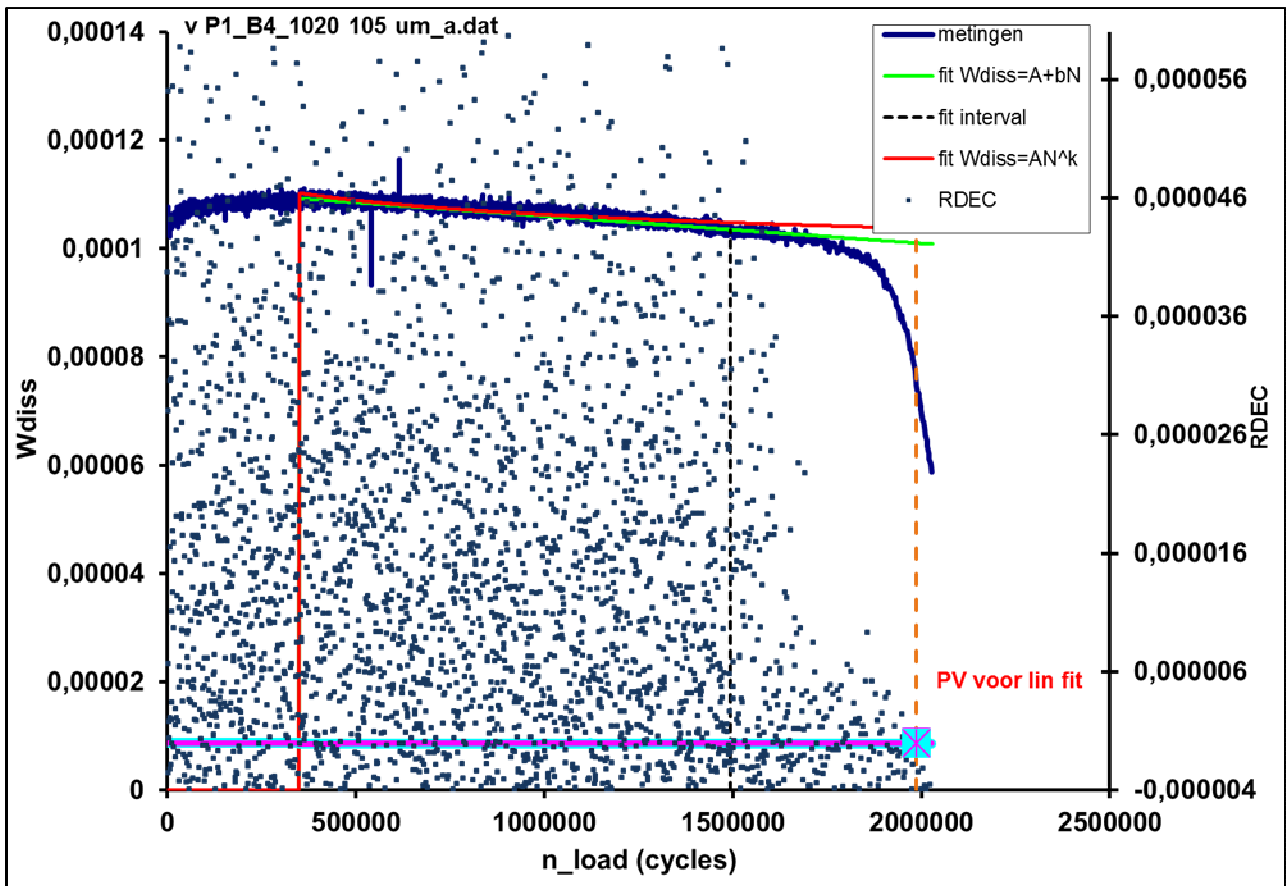
Healing Van Asphalt Mengsels



Figuur: Zes stadia van de uitwerking van de RDEC, Wdiss zegt meer dan RDEC en een lineaire fit voor Wdiss lijkt voldoende voor onze condities

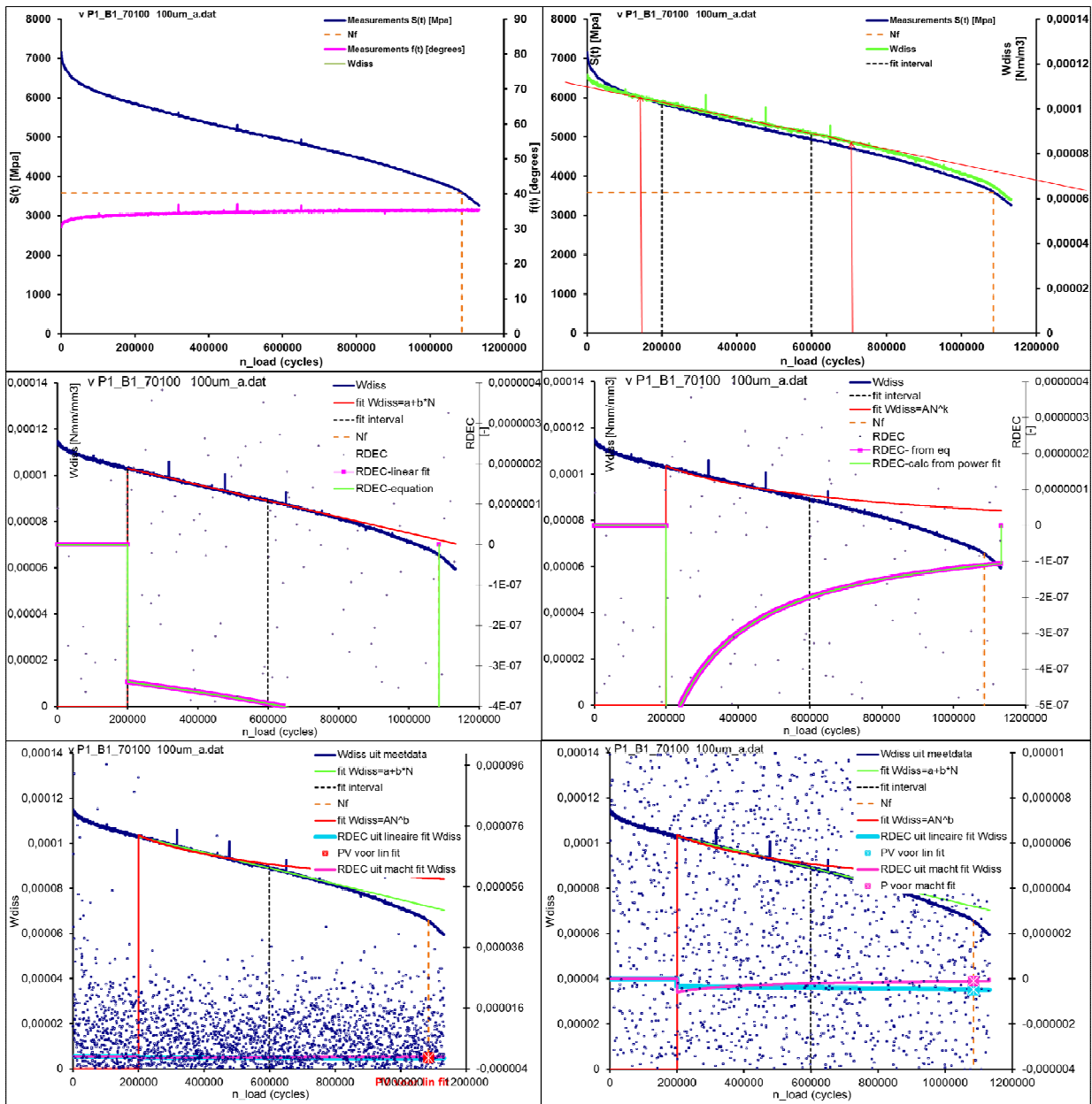
Uit de figuur links onder, hieronder groter weergegeven, is te zien dat voor deze data de lineaire fit voor Wdiss inderdaar prima werkt. Het fit zelfs beter dan de machtsrelatie van Shen en Carpenter. Dat geldt ook voor het 70/100 voorbeeld dat is uitgewerkt. Die grafieken zijn na de onderstaande figuur opgenomen.

Voor de Nederlandse mengsels en proefcondities lijkt een lineaire fit op Wdiss om het punt te bepalen waarop de gemeten denergie dissipatie van het quasi-lineaire deel gaat afwijken, te volstaan. Mogelijk dat dit een beter bruikbaar criterium is voor het einde van de vermoeiingsproef dan $N_f,50$, maar omdat vast te stellen zullen er meer voorbeelden uitgewerkt moeten worden. Het zal interessant zijn om te bepalen of dit criterium ook werkt voor PMB's. Overigens kan het zo zijn dat bij de Amerikaanse proefcondities, waarbij veel hogere rekken worden opgelegd, een machtsrelatie beter past dan een lineaire.



Figuur: Uitvergroete weergaven van de grafiek rechtsonder uit de vorige figuur: lineaire fit op W_{diss} is voldoende voor deze proef

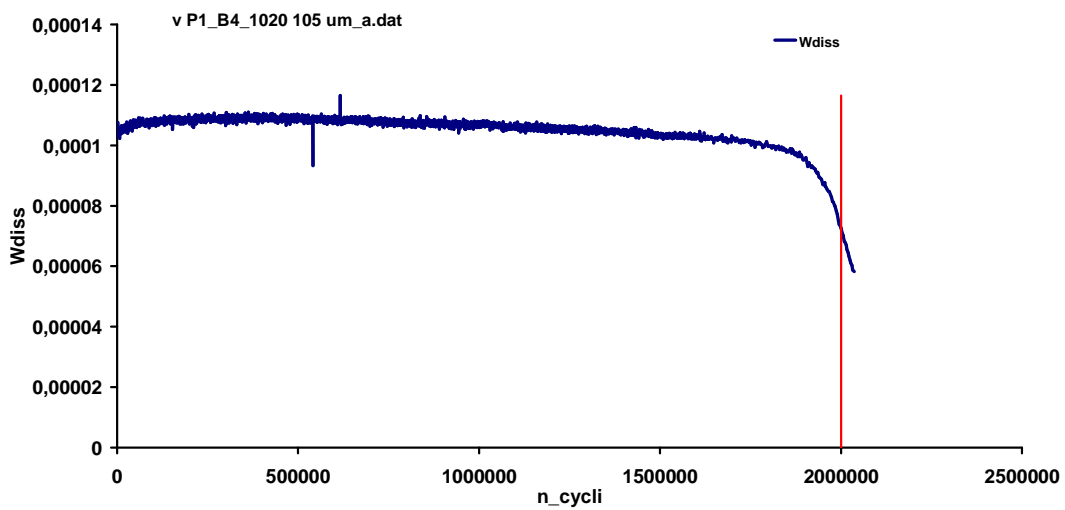
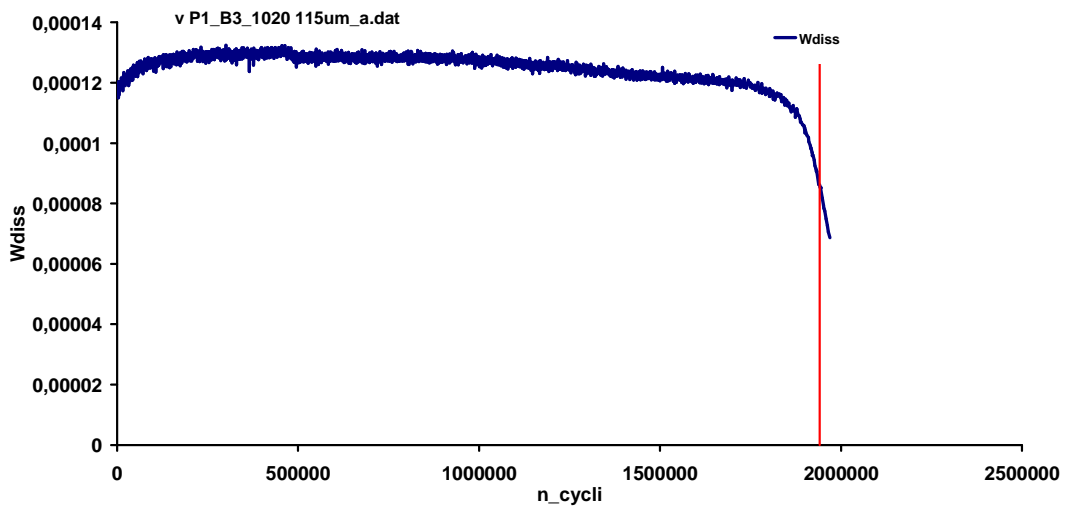
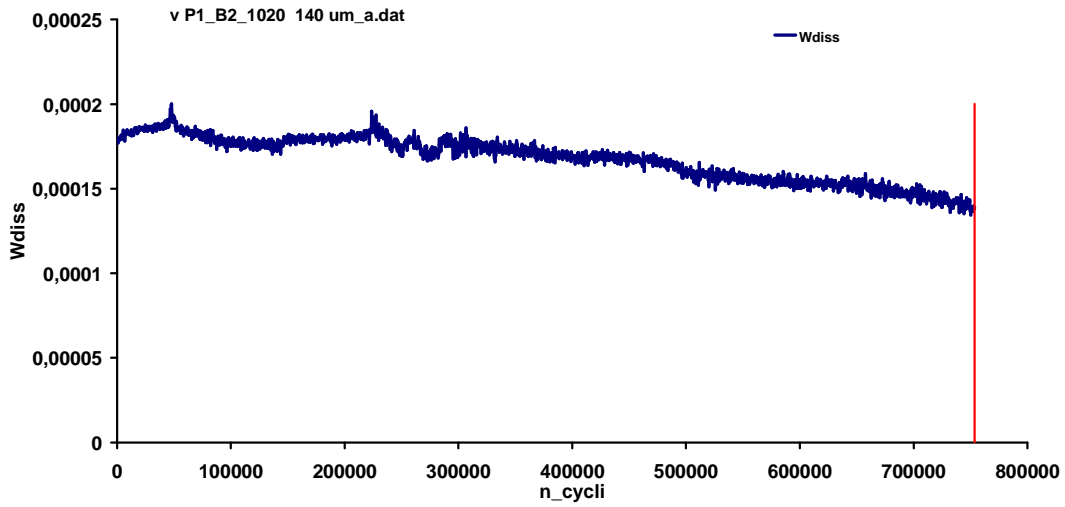
Healing Van Asfalt Mengsels



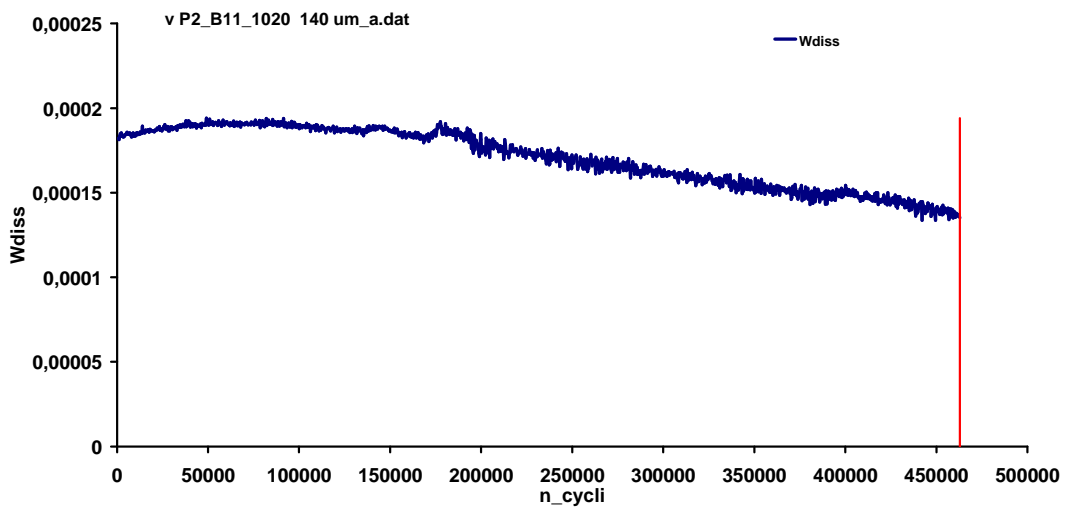
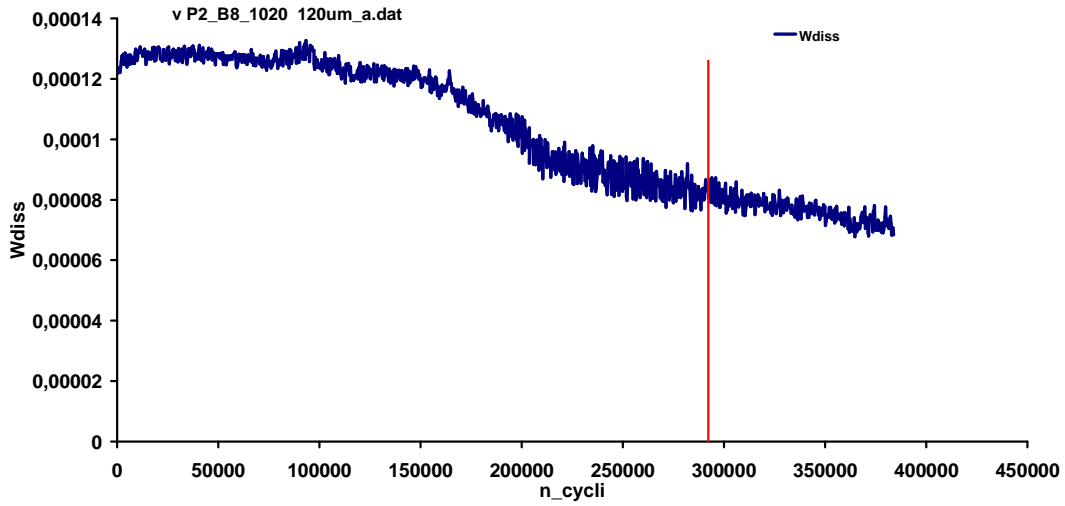
Figuur: Uitwerking RDEC in zesstappen voor een 70/100 proefstuk

Aangezien de uitwerking in RDEC geen meerwaarde heeft voor deze data, is voor de andere resultaten alleen de gedissipeerde energie bepaald. Deze zijn hierna opgenomen. Het kan interessant zijn om de fit voor de lineaire delen van de grafieken te bepalen en te bepalen wanneer de data gaan afwijken, om op die manier de levensduur te bepalen. Omdat het niet met terugwerkende kracht te gebruiken is om healingsproeven te doen, is dit hier echter niet gedaan.

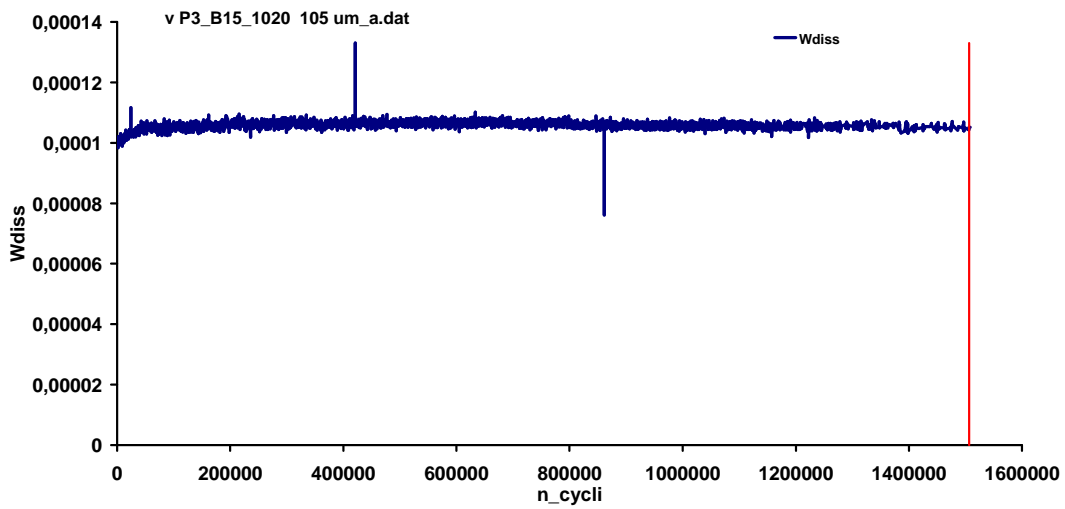
10/20 mengsels



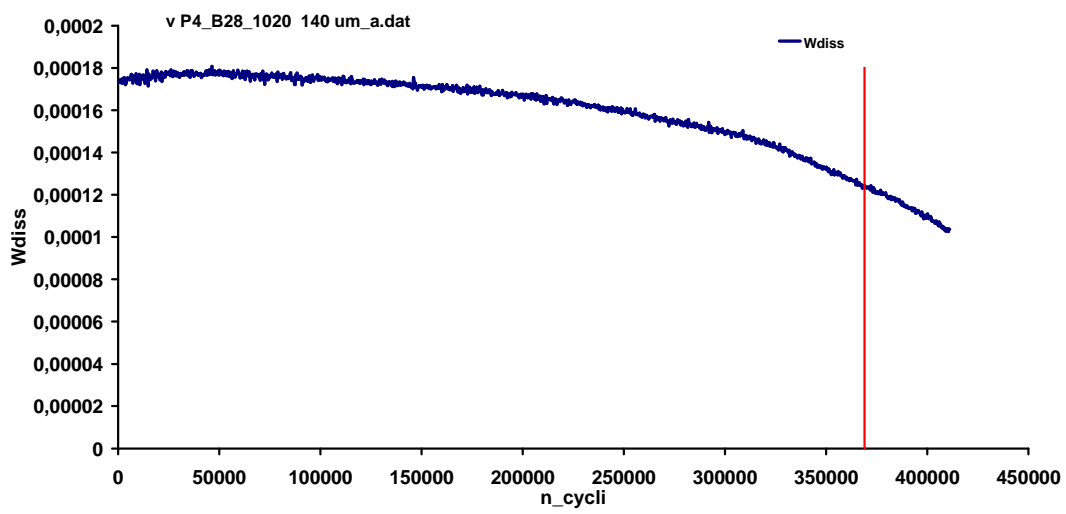
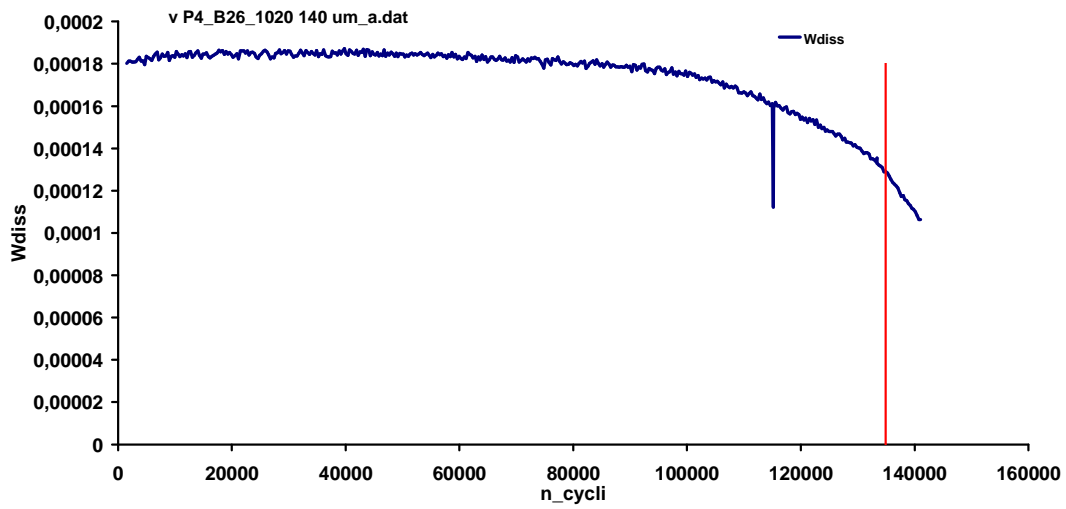
Healing Van Asphalt Mengsels



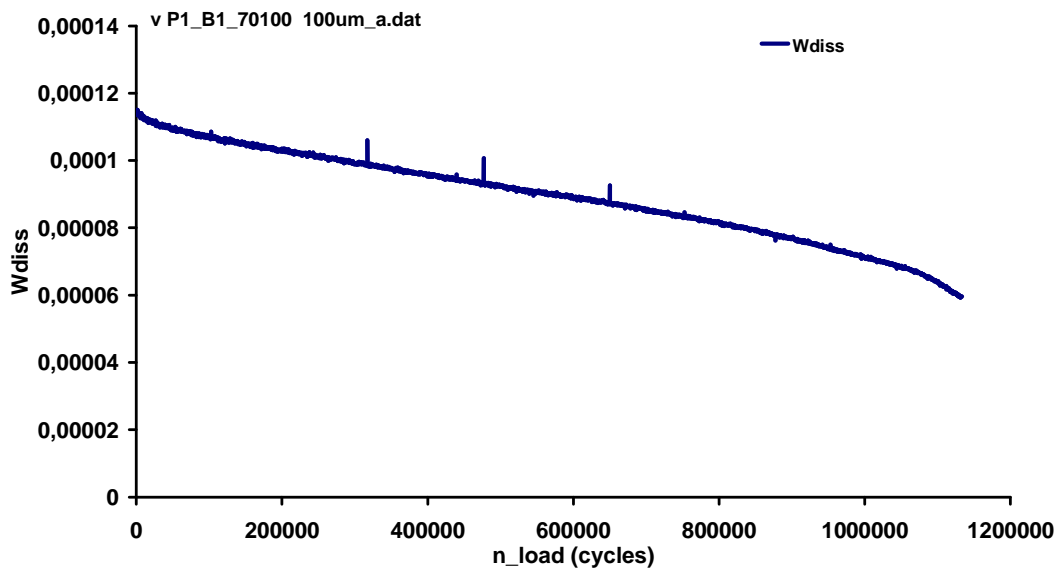
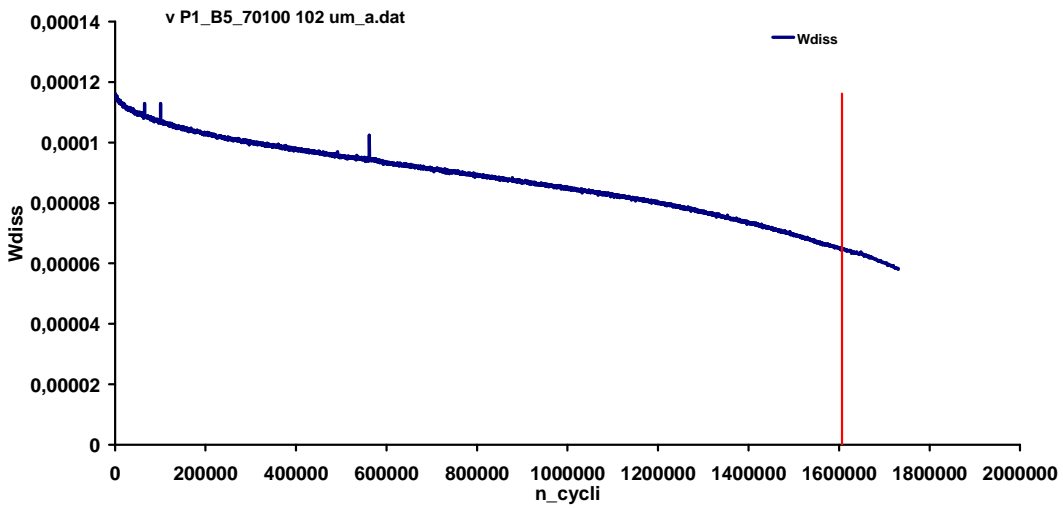
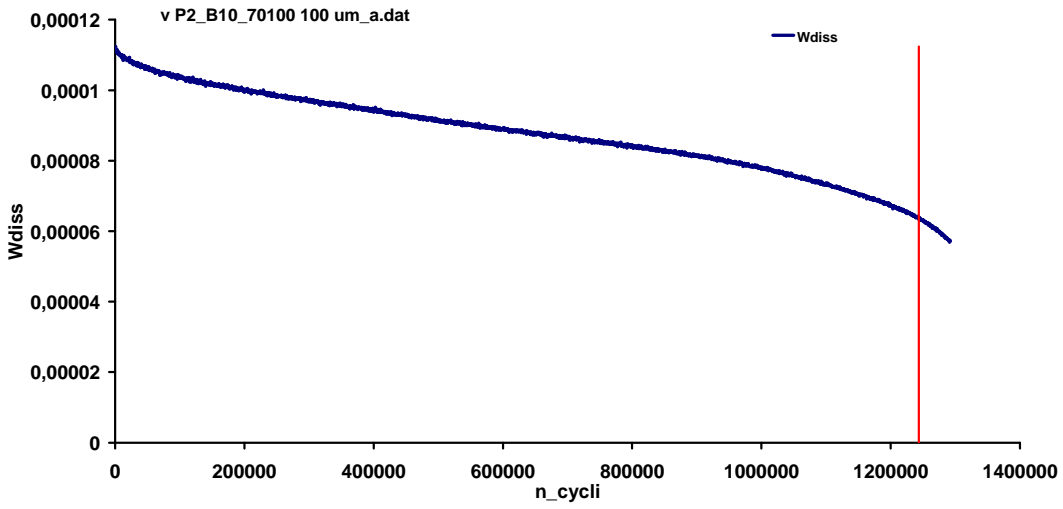
10/20 mengsels



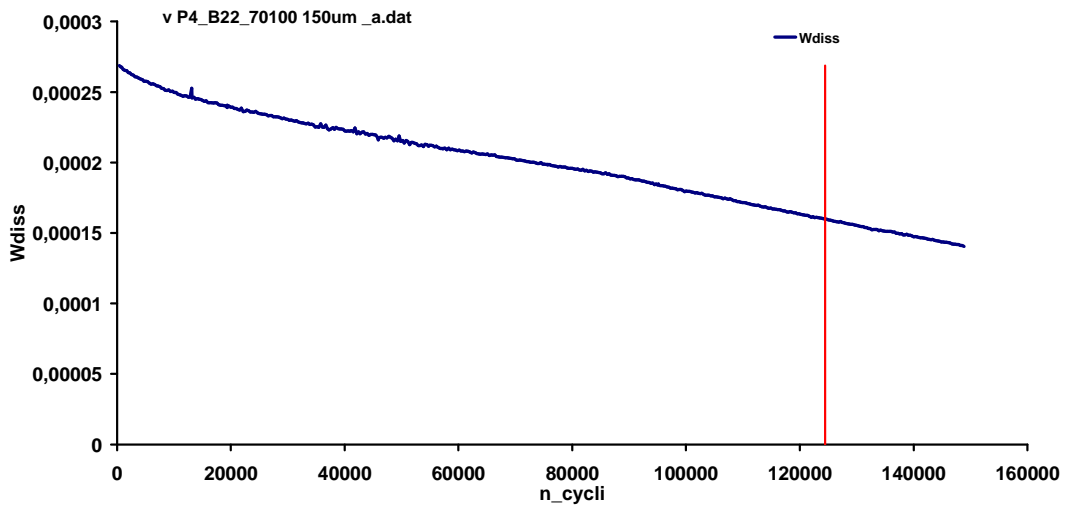
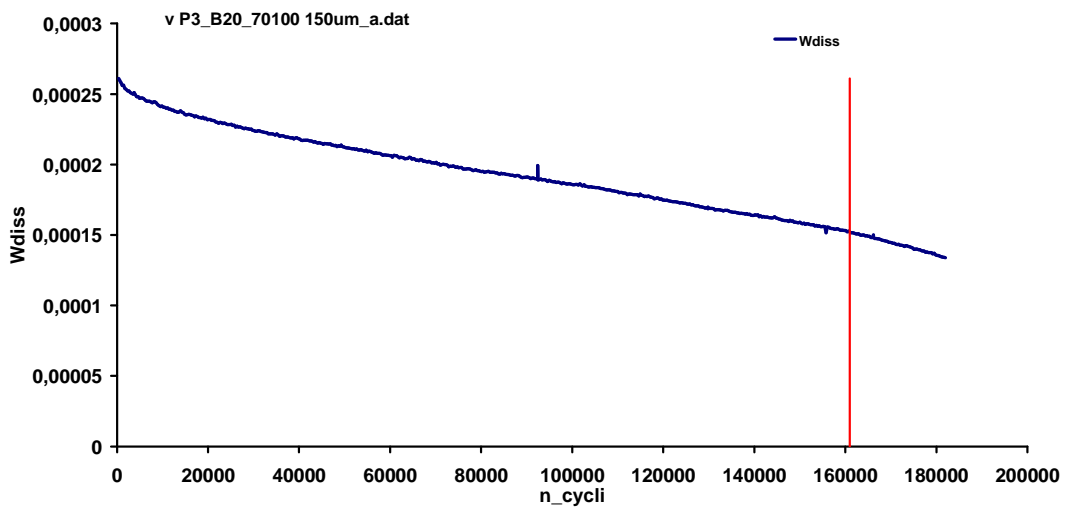
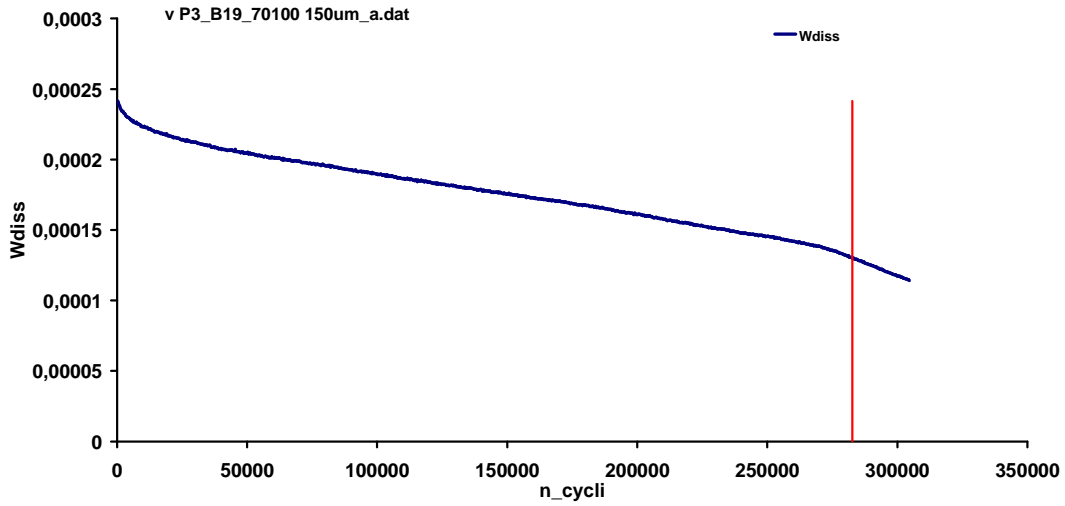
Healing Van Asphalt Mengsels



70/100 mengsels



Healing Van Asphalt Mengsels



Healing Van Asphalt Mengsels

