

ANALYSE VAN VERMOEIINGSGEDRAG MET METHODE SHEN & CARPENTER

Natascha Poeran
Boskalis Nederland Infra

Berwich Sluer
Boskalis Nederland Infra

Mohamad Mohajeri
Boskalis Nederland Infra

Samenvatting

In de huidige vermoeiingsanalyse (RAW proef 62) wordt asfalt als bezweken beschouwd op het moment dat de stijfheid is gereduceerd tot de helft van de initiële stijfheid. Hoewel dit faalcriterium als valide wordt beschouwd voor asfalt met penetratiebitumen is uit ervaring gebleken dat sommige asfaltmengsels, met name polymeer gemodificeerd asfalt, na een relatief sterke initiële daling van de stijfheid aan het begin van een vermoeiingsproef, nog een zeer groot aantal lastherhalingen tot het moment van bezwijken kunnen ondergaan. De werkelijke potentie van polymeer gemodificeerd asfalt wordt met het huidige criterium voor het einde van een vermoeiingsproef derhalve niet benut. De in 2007 gepubliceerde methode van Shen & Carpenter voor het karakteriseren van de vermoeiingseigenschappen op basis van gedissipeerde energie lijkt een goede basis te vormen voor een betrouwbaardere analyse van vermoeiingsgedrag van bitumineuze mengsels in de Nederlandse praktijk.

Door Shen & Carpenter wordt het vermoeiingsgedrag van asfalt beschreven op basis van de RDEC, Ratio of Dissipated Energy Change, de energie die tijdens een vermoeiingsproef daadwerkelijk bijdraagt aan schadeontwikkeling in het proefstuk. Aan de hand van de RDEC is objectief te bepalen op welk moment microscheurvorming over gaat in macroscheurvorming en het einde van de vermoeiingslevensduur is bereikt. Voor vier asfaltmengsels worden de vermoeiingseigenschappen bepaald op de 'klassieke' wijze en op basis van de methodiek van Shen & Carpenter met elkaar vergeleken en worden aanbevelingen gedaan voor de analyse van vermoeiingsproeven in de praktijk.

Shen & Carpenter claimen overigens dat middels hun benadering met de RDEC de fundamentele vermoeiingseigenschappen van een bitumineus mengsel worden bepaald. Dit betekent dat zolang de energiedissipatie tijdens een vermoeiingsproef in een proefstuk op dezelfde wijze verloopt er, ongeacht de keuze voor de proefopstelling, voor een bepaald

mengsel gelijke vermoeiingsresultaten worden gevonden. Middels vergelijking van de resultaten van onderzoek met de vierpuntsbuigproef (4PB) en de cyclische indirecte trekproef (CY-ITT) voor een laag temperatuur asfalt is de claim van Shen & Carpenter geverifieerd en worden de resultaten gepresenteerd.

Vermoeiing, Gedissipeerde energie, RDEC, Functioneel Verifiëren

1. **Introductie**

Vermoeiing kan worden beschreven als incrementele en gelokaliseerde schade die optreedt in een materiaal onderworpen aan een cyclische belasting, die (veel) lager ligt dan de uiterste belastinggrens. De schade concentreert zich in de zwaarst belaste doorsnede. In asfaltverhardingen is vermoeiing een maatgevend schadebeeld. De herhaalde belasting veroorzaakt door passerende voertuigen wekt onderin de asfaltverharding een horizontale rek op. Na een bepaald aantal lastherhalingen is het materiaal niet meer in staat de opgelegde rek op te nemen en bezwijkt, ofwel scheurt. Het aantal lastherhalingen dat een mengsel kan ondergaan tot bezwijken bij een gedefinieerde rek wordt omschreven als de *vermoeiingsweerstand*. De vermoeiingsweerstand wordt gebruikelijk weergegeven in de vorm van een vermoeiingslijn, de N, ϵ -relatie.

Sinds de invoering van het functioneel specificeren wordt elk asfaltmengsel onderworpen aan een type test, een serie proeven waarmee functionele eigenschappen van het mengsel wordt bepaald. Functionele eigenschappen worden beschouwd als materiaaleigenschappen maatgevend voor verhardingsontwerp. De vermoeiingsweerstand maakt deel uit van deze set functionele eigenschappen en dient samen met de *stijfheid* als invoer voor dimensioneringsberekeningen. De berekende optredende rek in een verharding wordt vertaald naar een aantal toelaatbaar lastherhalingen met behulp van de in de type test bepaalde vermoeiingsrelatie.

De bepaling van de vermoeiingsrelatie is gedefinieerd in Proef 62 (Standaard RAW) en NEN-EN 12697-24 Annex D. Deze methode schrijft voor dat een prismatisch proefstuk met afmetingen 50mmx50mmx450mm in een vierpuntsbuigopstelling wordt belast met een cyclisch opgelegde rek. Tot op heden wordt een proefstuk beschouwd als bezweken op het moment dat de stijfheid van het proefstuk de helft van de initiële stijfheid bereikt, $N_{0,5G^*}$. Dit faalcriterium is gebaseerd op de aanname dat de zwaarst belaste doorsnede bij een halvering van de stijfheid zodanig verzwakt is door microscheurvorming dat elke opvolgende lastherhaling een macroscheur kan veroorzaken. Het faalcriterium heeft zich in de afgelopen jaren bewezen voor standaard asfaltmengsels met penetratiebitumen. Echter, in de voorgaande jaren is het gebruik van polymeer gemodificeerde bitumen (PMB) als bindmiddel in asfaltmengsels sterk toegenomen. De ervaring leert dat asfalt met PMB na een stijfheidsreductie van 50% weldegelijk (rest)levensduur bezit. De werkelijke levensduur van asfalt met PMB wordt zodoende onderschat. Bij dimensionering kan dit leiden tot een onnodig conservatief verhardingsontwerp. De noodzaak voor een analysemethode die óók vermoeiing van asfalt met PMB nauwkeurig beschrijft is evident.

Een analysemethode die een goede basis lijkt te vormen voor een betrouwbaardere analyse van vermoeiingsgedrag van bitumineuze mengsels, in het bijzonder asfalt met PMB, is de methode gebaseerd op gedissipeerde energie geïntroduceerd door Shen & Carpenter in 2007 [1]. Hoewel ook in deze methode wordt uitgegaan van het faalcriterium 50% stijfheidsreductie is de vermoeiingskarakteristiek niet uitgedrukt in het aantal lastherhalingen tegen rek, maar tegen de zogenaamde *RDEC*, *ratio of dissipated energy change*, bij $N_{0,5G^*}$.

De waarde van de RDEC bij $N_{0,5G^*}$ wordt in deze studie de *Plateau Value, PV* genoemd. Volgens Shen & Carpenter wordt bewezen geacht dat de PV een fundamentele materiaalparameter is waarmee het vermoeiingsgedrag van asfalt kan worden beschreven. In plaats van een $N_{0,5G^*}, \varepsilon$ -relatie wordt de vermoeiingsweerstand van asfalt dus uitgedrukt in een $N_{0,5G^*}, PV$ -relatie. Voor een gedetailleerder beschrijving van de methode wordt verwezen naar sectie 2, RDEC – De theorie, van dit artikel.

Indien de bewering van Shen & Carpenter klopt, betekent dit dat vermoeiing van asfaltmengsels, ongeacht proefopstelling, proefcondities en belastingcondities, betrouwbaar en relatief kan worden beoordeeld op basis van de PV. Dit betekent tevens dat er belastingcondities kunnen worden opgesteld voor vierpuntsbuig (4PB) en cyclische indirecte trek (CY-ITT) proeven, zodanig dat de resultaten van beide betrouwbaar ten opzichte van elkaar kunnen worden beoordeeld. Deze vorm van vermoeiingsanalyse zou op deze manier Functioneel Verifiëren mogelijk maken.

In dit artikel wordt de bewering van Shen & Carpenter aangaande de PV als fundamentele vermoeiingsparameter geverifieerd. Na een toelichting van de originele Shen & Carpenter theorie wordt een aanpassing van de methode voorgesteld. Deze aanpassing maakt het mogelijk de vermoeiingsweerstand van zowel standaard asfaltmengsels met penetratiebitumen, als asfaltmengsels met PMB nauwkeurig en betrouwbaar te bepalen en eenduidig te beoordelen. In sectie 3, RDEC – De verificatie, wordt voor een drietal asfaltmengsels de vermoeiingsrelatie bepaald volgens de conventionele wijze, met de methode van Shen & Carpenter en met de aangepaste methode van Shen & Carpenter. Op basis van de vergelijking worden aanbevelingen gedaan voor de analyse van vermoeiingsproeven in de praktijk. Ook in sectie 3, RDEC – De verificatie, wordt middels vergelijking van de resultaten van onderzoek met de vierpuntsbuigproef (4PB) en de cyclische indirecte trekproef (CY-ITT) voor een standaard mengsel de claim van Shen & Carpenter geverifieerd.

2. RDEC – De theorie

2.1 Originele theorie Shen & Carpenter [1]

In 2007 is door Shen & Carpenter een analysemethode ontwikkeld waarmee het vermoeiingsgedrag van asfalt kan worden beschreven op basis van de RDEC, *Ratio of Dissipated Energy Change*. De RDEC is een parameter die voortkomt uit een rekenkundige bewerking van de gedissipeerde energie en wordt bepaald met formule 1.

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

$$DE = \pi \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot \sin(\delta) \quad (2)$$

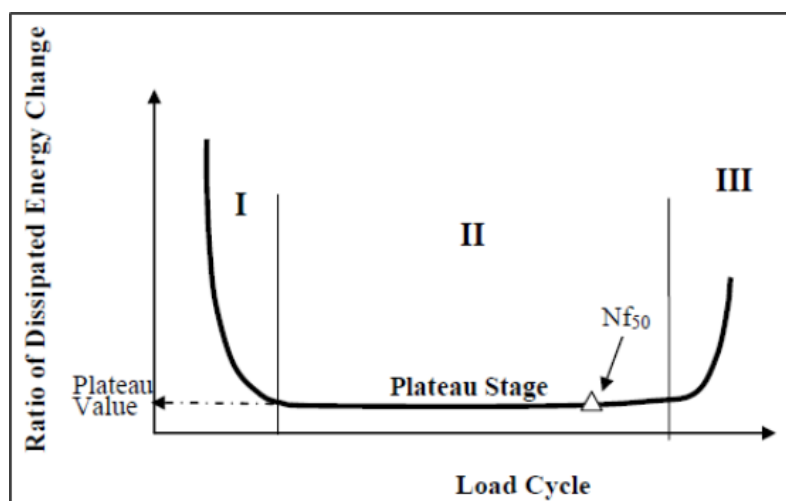
DE_n = gedissipeerde energie in lastcyclus n [kPa]

DE_{n+1} = gedissipeerde energie in lastcyclus n+1 [kPa]

N = aantal lastherhalingen

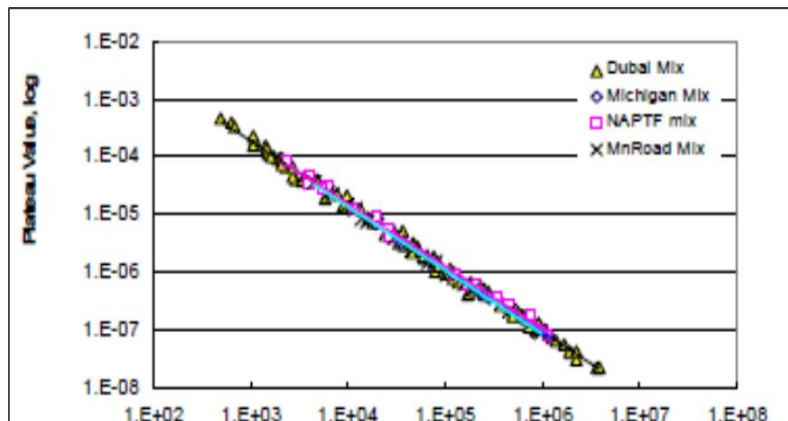
Tijdens een vermoeiingsproef wordt een materiaal herhaaldelijk belast en ontlast. Bij het aanbrengen van de belasting wordt een bepaalde energie het materiaal in gebracht. Tijdens het ontlasten wordt echter niet alle ingebrachte energie terug omgezet. Een deel van de energie verlaat het materiaal in de vorm van warmte, arbeid of schade. Dit verschijnsel wordt ook wel hysteresis genoemd. Het verlies aan energie in een lastcyclus wordt gedefinieerd als gedissipeerde energie. De gedissipeerde energie in een willekeurige lastcyclus is afhankelijk van de dissipatie in de voorgaande cyclus, maar deze zijn niet per definitie gelijk

Feitelijk beschrijft de RDEC het verschil in gedissipeerde energie tussen opeenvolgende lastcycli. Volgens Shen & Carpenter is dit verschil in energie tussen lastcycli de belangrijkste oorzaak voor het ontstaan van vermoeiing(schade). Gedissipeerde energie die geen schadevorming veroorzaakt, wordt in de bepaling van RDEC geëlimineerd. Uit de waarde van de RDEC kan dus worden opgemaakt wat voor invloed elke opvolgende lastherhaling heeft op schadevorming. De RDEC vertoont bij plotten een specifiek verloop, bestaande uit drie uitgesproken fases, zie figuur 1.



Figuur 1: Karakteristiek verloop RDEC [1]

In fase II, de plateau fase, is de waarde van RDEC nagenoeg constant. Er wordt daarom een constante hoeveelheid energie per lastcyclus omgezet in schade. Binnen fase II, is een zogenaamde plateau waarde PV, gedefinieerd. De PV is de waarde van RDEC bij het aantal lastherhalingen waar de stijfheidsreductie van het asfalt 50% is, $N_{0.5G^*}$, figuur 1. Deze PV is een materiaalkarakteristiek die afhankelijk is van het type mengsel en belasting. Volgens Shen & Carpenter [1] bestaat er een unieke relatie tussen PV en $N_{0.5G^*}$ die onafhankelijk is van mengseltype en belasting, zie figuur 2. De PV- $N_{0.5G^*}$ relatie wordt geconstrueerd door in het verloop van de gedissipeerde energie van elke individuele meting een exponentiele functie te fitten met de hoogst mogelijke R^2 . De k-waarde verkregen uit de gefitte functie dient vervolgens als input voor de berekening van de PV-waarde volgens formule 3.



Figuur 2: $N(0,5G^*), PV$ -relatie gevonden door Shen & Carpenter [1]

$$PV = \frac{1 - \left(1 + \frac{100}{N_{0,5G^*}}\right)^k}{100} \quad (3)$$

In de derde fase gaat de RDEC over van een constante waarde in een constant toenemende waarde. Deze overgang wordt geassocieerd met de propagatie van microscheuren naar macroscheuren. Na een bepaald aantal lastherhalingen bereikt de RDEC een maximum. Aan dit moment wordt het faalcriterium breuk verbonden. De RDEC kan daarom ook omschreven worden als een parameter die beschrijft met welke snelheid scheurvorming zich manifesteert.

Over het algemeen wordt gesteld dat een materiaal met hogere PV meer schade ondervindt van herhaalde belasting dan een materiaal met lagere PV. De ondervonden schade zal naarmate het aantal lastherhalingen toeneemt sneller groeien dan in materialen met lagere PV. Bovendien duidt een relatief hoge PV doorgaans aan dat de weerstand tegen vermoeiing, d.i. het optreden van vermoeiingsscheuren, lager is. Bovendien kan uit het verloop van de RDEC in de plateaufase worden waargenomen of de vermoeiingsproef volgens de gestelde procedures is verlopen. Een incidentele afwijking van de evenwichtswaarde voor RDEC kan bijvoorbeeld duiden op een imperfectie in het proefstuk.

2.2 Discussie van methode Shen & Carpenter; Voorstel tot wijziging

De methode van Shen & Carpenter vormt een goede basis voor een nauwkeuriger analyse van de vermoeiing van asfalt met PMB. Voornamelijk omdat de analyse is gebaseerd op de RDEC; een parameter die door Shen & Carpenter als objectief wordt betiteld. Echter, ook in deze methode wordt 50% stijfheidsreductie als faalcriterium aangemerkt, terwijl reeds is vastgesteld dat dit geen passend faalcriterium is voor asfalt met PMB. De methode is in haar huidige vorm dus niet geschikt voor een vermoeiingsanalyse van asfalt met PMB. Het faalcriterium zal gewijzigd moeten worden.

Om een passend bezwijkmoment aan te voeren, wordt herinnerd aan de aanname die ten grondslag ligt van het huidige faalcriterium, zoals besproken in sectie 1, Introductie. Immers, deze aanname lijkt gegrond voor mengsels met penetratiebitumen. Het feit dat mengsels met PMB als bindmiddel nog (rest)levensduur bezitten na halvering van de stijfheid betekent dat de zwaarst belaste doorsnede nog niet zodanig verzwakt is dat elke volgende lastherhaling

een significante propagatie van de vermoeiingsschade ofwel scheurvorming veroorzaakt. Een meer passend faalcriterium lijkt daarom de propagatie van vermoeiingsschade van microschaal naar macroschaal.

Omdat de RDEC de toename in scheurvorming beschrijft kan bovenstaande als volgt in termen van RDEC worden uitgedrukt: ‘De vermoeiingsschade in asfalt met PMB bevindt zich na een halvering van de stijfheid nog ‘veilig’ in de plateauzone. Scheurvorming manifesteert zich op dat moment enkel op microschaal en beïnvloedt in minimale mate de prestatie van het asfalt op macroschaal. Een meer passend faalcriterium lijkt daarom de overgang van constante RDEC naar toenemende RDEC.’

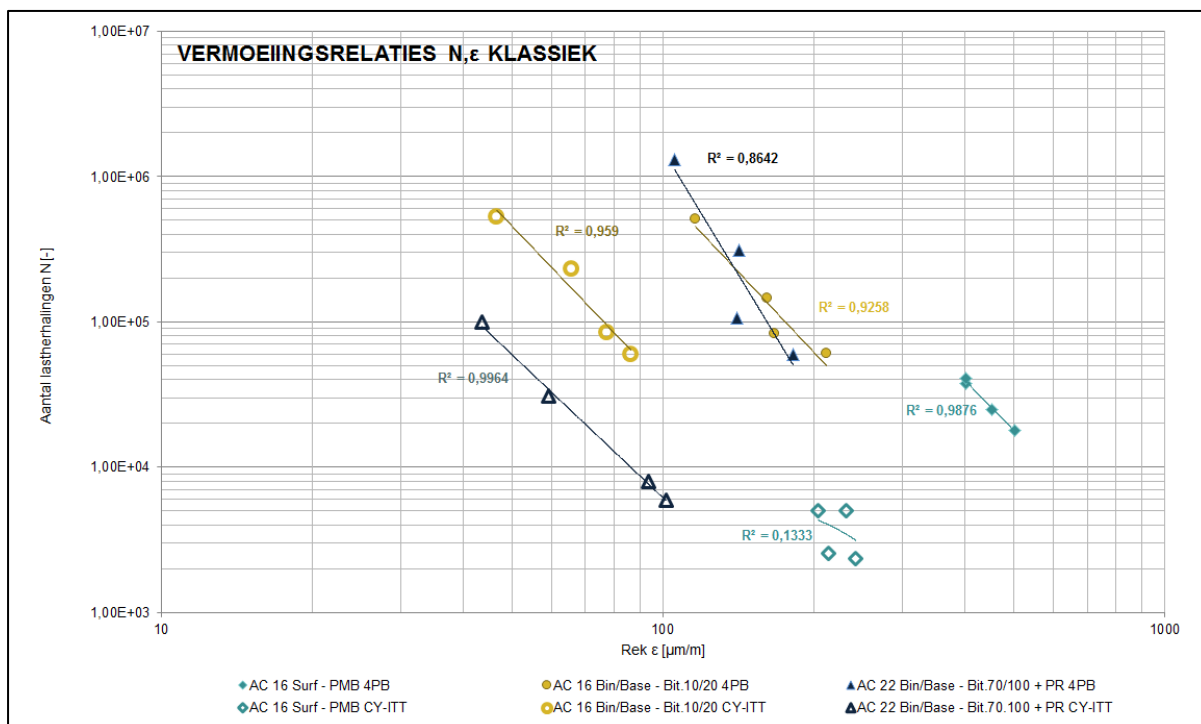
Het aantal lastherhalingen op de overgang tussen fase II en fase III, $N_{f,micro}$, is dan de nieuwe maat voor de weerstand tegen vermoeiing. Overigens moet dit faalcriterium ook de asfaltmengsels met penetratiebitumen passen. In theorie moeten voor dergelijke mengsels $N_{0,5G^*}$ en $N_{f,micro}$ (bijna) gelijk zijn. In het geval dat $N_{f,micro} > N_{0,5G^*}$ zal de vermoeiingsrelatie minder conservatief zijn. In het tegenovergestelde geval wordt de kans op daadwerkelijke scheurvorming gedurende de levensduur van een verharding verkleind. Belangrijk gevolg van deze wijziging is dat vermoeiingsproeven altijd tot duidelijke breuk moeten worden doorgezet.

3. RDEC – De verificatie

3.1 $N_{f,micro}$: Een uniform faalcriterium voor vermoeiingsproeven op asfaltmengsels

Om de originele theorie van Shen & Carpenter te valideren, is van een drietal asfaltmengsels de vermoeiingsweerstand bepaald. De vermoeiingslijnen zijn opgesteld op basis van de conventionele vermoeiingsanalyse, de originele theorie van Shen & Carpenter en de aangepaste theorie van Shen & Carpenter. Voor alle mengsels is een vermoeiingsrelatie afgeleid uit zowel resultaten van 4PB, als CY-ITT proeven. Tabel 1 geeft een overzicht van de beschouwde mengsels, proefcondities en numerieke resultaten volgend uit de vermoeiingsanalyse.

In figuur 3 zijn de vermoeiingslijnen bepaald met de klassieke analysemethodes weergegeven. Voor een 4PB proef is het faalcriterium in de klassieke methode een halvering van de stijfheid. Voor CY-ITT wordt het aantal lastherhalingen bij het maximum van de vermenigvuldiging tussen gedissipeerde energie en aantal lastherhalingen maximaal, N_{ERmax} , beschouwd einde levensduur. Uit figuur 3 en tabel 1 volgt dat het vermoeiingsgedrag gemeten met 4PB en CY-ITT niet onderling te vergelijken is.

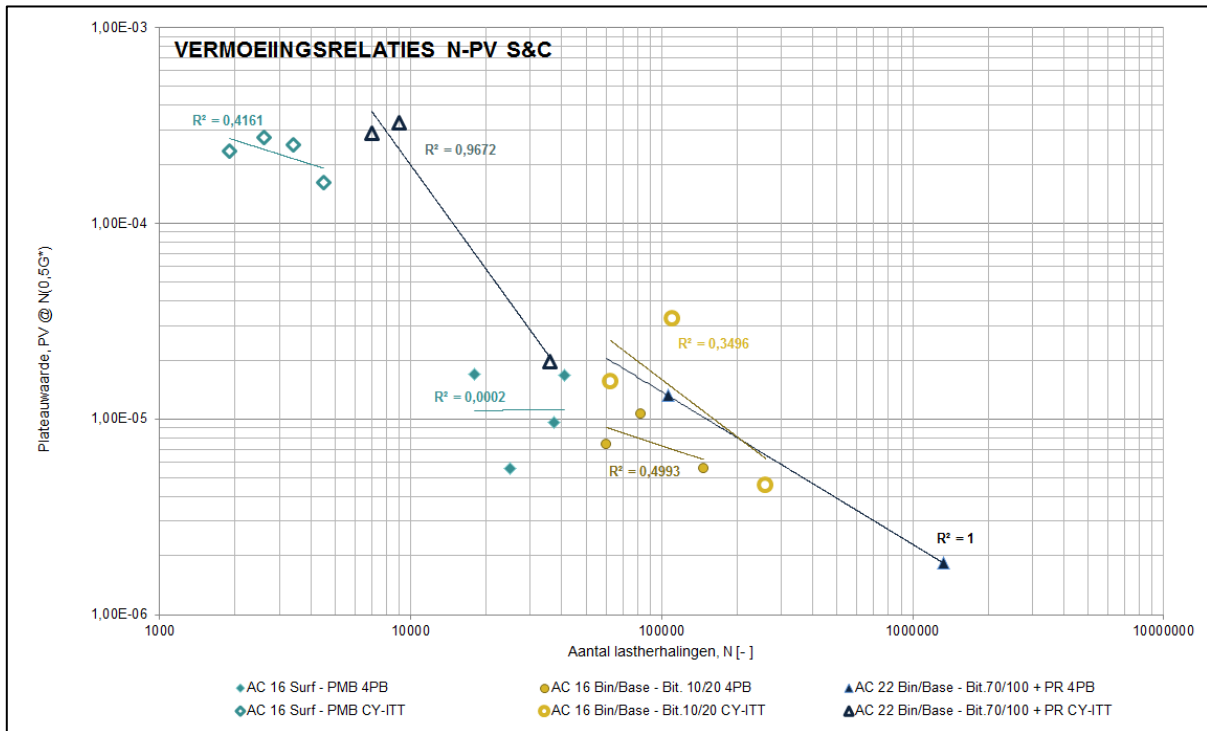


Figuur 2: Vermoeiingsrelaties bepaald met conventionele analysemethode voor vermoeiing

De reden hierachter is simpel. In de conventionele vermoeiingsanalyse wordt de gemeten levensduur, $N_{0,5G^*}$, uitgezet tegen rek. Het verschil in de aard van de 4PB proef en de CY-ITT, verplaatsinggestuurd versus krachtgestuurd, maakt dat de rek geen representatieve parameter is voor het vergelijken van de vermoeiingsduren. In een 4PB proef is het rekniveau gedurende de gehele proef constant, terwijl in een CY-ITT de spanning constant is en de rek als gevolg verloopt. Eerder is besproken dat de RDEC wellicht een objectieve en fundamentele parameter is voor vermoeiingsanalyse van bitumineuze mengsels. Figuur 4 toont daarom de vermoeiingslijnen geconstrueerd met behulp van de originele Shen & Carpenter vermoeiingsanalyse.

Tabel 1: Numerieke resultaten van de klassieke, S&C en aangepaste S&C vermoeiingsanalyses uitgevoerd voor drie asfaltmengsels

MENGSELTYPE & BINDMIDDEL	4PB						CY-ITT					
	Klassiek		S&C		S&C aangepast		Klassiek		S&C		S&C aangepast	
	$N_{0,5G^*}$ [-]	ϵ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	$N_{0,5G^*}$ [-]	PV [-]	$N_{f,\text{micro}}$ [-]	PV [-]	$N_{ER\text{max}}$ [-]	ϵ_{ini} [$\mu\text{m}/\text{m}$]	$N_{0,5G^*}$ [-]	PV [-]	$N_{f,\text{micro}}$ [-]	PV [-]
AC16Surf PMB	37440	401,6	37440	9,61E-06	140345	5,18E-06	2551	213,2	2600	2,74E-04	-	-
	41110	401,2	41110	1,68E-05	64642	1,84E-05	2361	242,3	1898	2,35E-04	2100	2,45E-04
	24920	451,2	24920	5,57E-06	52838	1,86E-05	5000	231,9	3400	2,53E-04	4000	2,32E-04
	18000	501,2	18000	1,70E-05	-	-	5000	203,5	4500	1,62E-04	3900	1,49E-04
AC16Bin/Base Bit.10/20	510253	116,1	-	-	110000	8,98E-07	525000	46,6	-	-	-	-
	146480	160,8	146480	5,59E-06	135000	3,44E-06	230852	65,6	260000	4,56E-06	240000	3,66E-06
	82820	166,4	82820	1,06E-05	42500	2,19E-06	84924	77,3	110000	3,24E-05	72500	5,78E-06
	60490	211,5	60490	7,46E-06	62500	8,23E-06	59394	86,1	62500	1,55E-05	57500	1,44E-05
AC22Bin/Base Bit.70/100+PR	60160	181,6	60160	-	-	-	5941	101,3	7000	2,88E-04	5750	1,35E-04
	1321290	105,5	1321290	1,84E-06	1150000	3,02E-07	30898	59,0	36000	1,96E-05	30000	2,56E-05
	105650	140,2	105650	1,32E-05	90000	3,96E-06	7915	93,5	9000	3,26E-04	8250	1,73E-04
	310282	141,4	-	-	190000	1,42E-06	99469	43,6	-	-	100000	8,62E-06



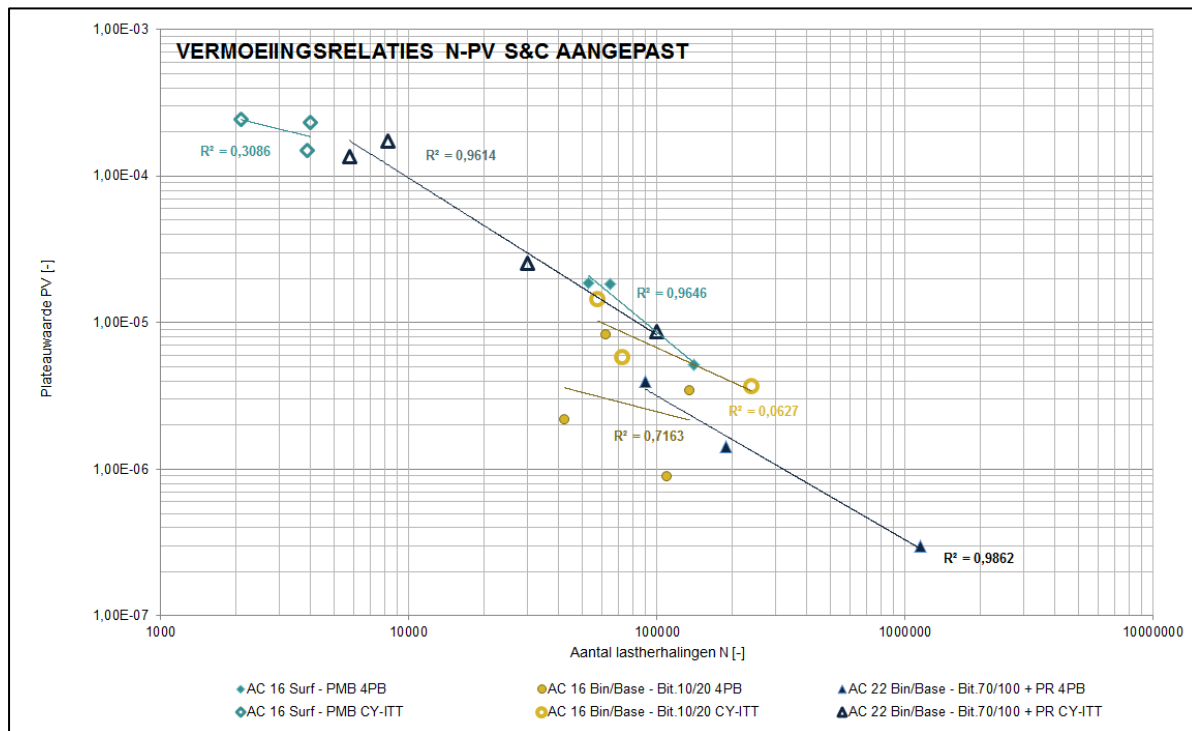
Figuur 4: Vermoeingsrelaties bepaald met de originele Shen & Carpenter analysemethode voor vermoeing

Uit figuur 4 blijkt dat een beoordeling van de vermoeingsweerstand met de originele methode van Shen & Carpenter ook leidt tot relaties lineair op log-log schaal. Tijdens een vergelijking van figuur 4 met figuur 3 is een opvallende observatie gedaan. De datapunten lijken per mengsel gerangschikt te zijn. De relatief ‘korte’ proeven bevinden zich linksboven in de grafiek en de relatief ‘lange’ proeven rechtsonder. Of deze verschuiving ook onafhankelijk is van de proefopstelling is uit figuur 4 niet af te leiden. Immers, de kortere levensduren zijn veelal het resultaat van CY-ITT metingen en de lange van de 4PB metingen. Desalniettemin, lijkt de bewering van Shen & Carpenter op basis van de meetdata en analyse gevalideerd. De PV is in tegenstelling tot de rek wel geschikt als parameter ter objectieve en eenduidige beoordeling van de vermoeingsweerstand van alle asfaltmengsels. Het faalcriterium, $G^* = 0.5 \cdot G^*_{INI}$, daarentegen is aangetoond ongeschikt voor asfaltmengsels met PMB. Uit tabel 1 is af te leiden dat het AC 16 Surf mengsel met PMB na een halvering van de stijfheid een (rest)levensduur bezit die een factor 1.5 tot 3.5 groter is dan de conventionele levensduur, $N_{0.5G^*}$. Overigens lijkt een stijfheidsreductie van 50% ook voor CY-ITT geen valide faalcriterium. Voor de mengsels met penetratiebitumen daarentegen is uit tabel 1 af te leiden dat de levensduur niet significant veranderd bij een verlegging van het faalcriterium. Een stijfheidsreductie van 50% is daarmee wel aantoonbaar geschikt voor de beoordeling van het vermoeingsgedrag van asfalt met penetratiebitumen.

In figuur 5 zijn daarom de vermoeingslijnen afgeleid volgens de aangepaste Shen & Carpenter methode weergegeven. De PV is uitgezet tegen $N_{f,micro}$ in plaats van tegen $N_{0.5G^*}$. Overigens is de definitie van de PV als gevolg van de wijziging in faalcriterium enigszins veranderd; de PV is in de aangepaste analysemethode gelijk aan de waarde van de RDEC bij

$N_{f,micro}$. Theoretisch gezien zou de waarde van de PV bij $N_{0,5G^*}$ en $N_{f,micro}$ elkaar niet veel moeten ontlopen. De fase is niet zonder reden *plateaufase* gedoopt.

Uit figuur 5 is concluderen dat ook de PV, $N_{f,micro}$ -relatie een lineaire relatie is op log-log schaal. Ook de verschuiving in schikking van datapunten per mengsel is intact gebleven. Aanvullend kunnen van zowel de mengsels met PMB, als de mengsels met penetratiebitumen nauwkeurige bezwijkmomenten worden uitgezet waaruit de vermoeiingsrelatie wordt afgeleid. Belangrijker nog is dat het gekozen faalcriterium voor asfaltmengsels met penetratiebitumen én PMB en voor asfalt beproefd met 4PB én CY-ITT eenduidig toepasbaar is en dus vergelijking mogelijk maakt. Overigens is de bewering van Shen & Carpenter hiermee opnieuw gevalideerd.



Figuur 5: Vermoeiingsrelaties bepaald met de aangepaste Shen & Carpenter analysemethode voor vermoeiing

3.2 Plateauwaarde PV; De sleutel tot Functioneel Verifiëren?

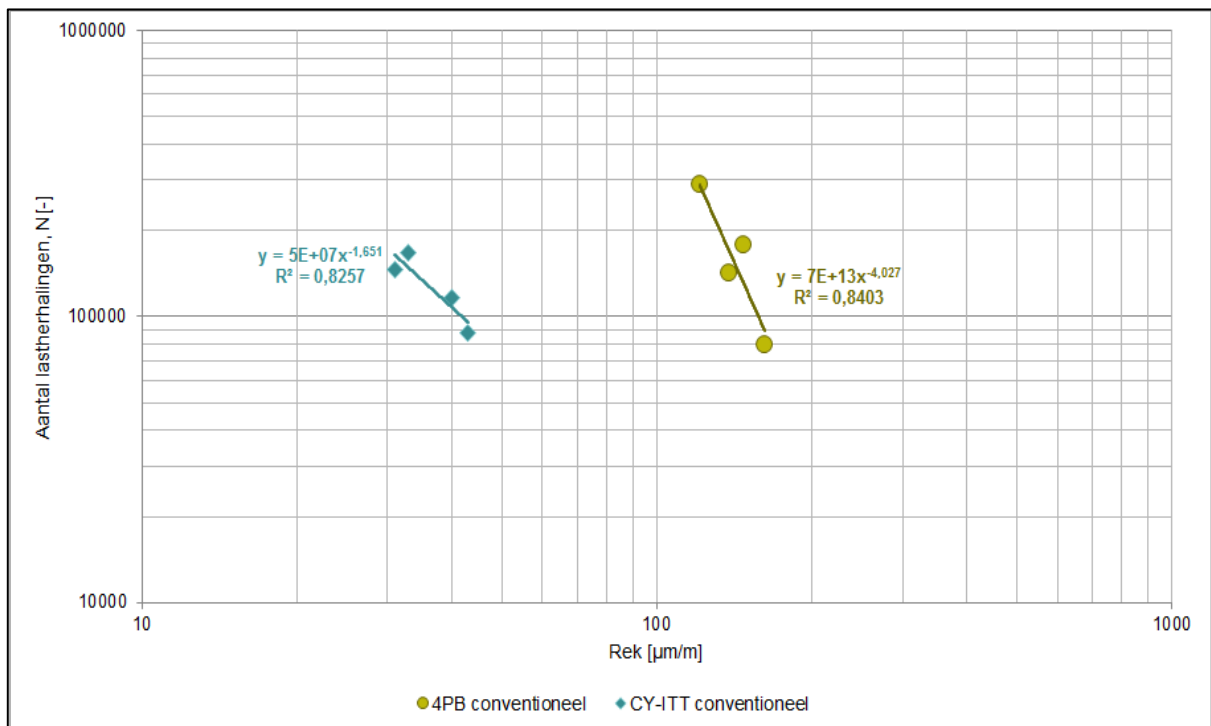
De analyses besproken in de voorgaande sectie 3.1 hebben het vermoeden bevestigd dat vermoeiing van asfaltmengsels, ongeacht proefopstelling, proefcondities en belastingcondities, betrouwbaar en relatief kan worden beoordeeld op basis van de PV. Terug redenerend betekent dit dat de belastingcondities in 4PB en CY-ITT zodanig op elkaar afstemmen zijn dat de gemeten levensduur voor hetzelfde mengsel in beide proeven elkaar sterk benaderd. Ofwel, de waarde van de PV blijft gelijk, mits voor hetzelfde mengsel, in beide proeven dezelfde levensduur wordt gemeten.

Om de validiteit van deze redenering te bewijzen, is voor een aanvullend asfaltmengsel een set belastingcondities voor 4PB en CY-ITT bepaald die moet resulteren in gelijke

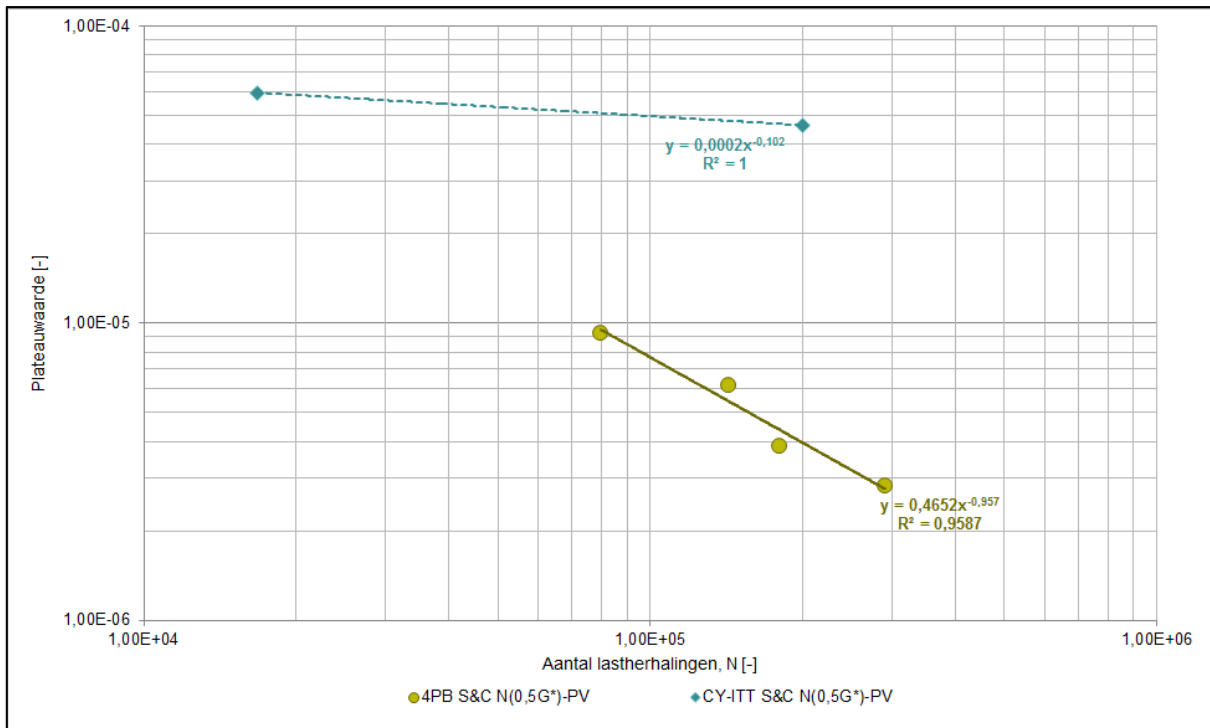
levensduur/gelijke PV. Het beproefde mengsel is een lage temperatuur asfalt (LTA). In beide proefopstellingen is van 4 proefstukken de vermoeiingsweerstand bepaald. De data is opnieuw uitgewerkt met behulp van de drie beschouwde analysemethodes; de conventionele, de originele S&C en de aangepaste S&C. Het resultaat van deze uitwerkingen is respectievelijk weergegeven in figuur 6, figuur 7 en figuur 8.

Tabel 2: Numerieke resultaten van de klassieke, S&C en aangepaste S&C vermoeiingsanalyses uitgevoerd voor LTA

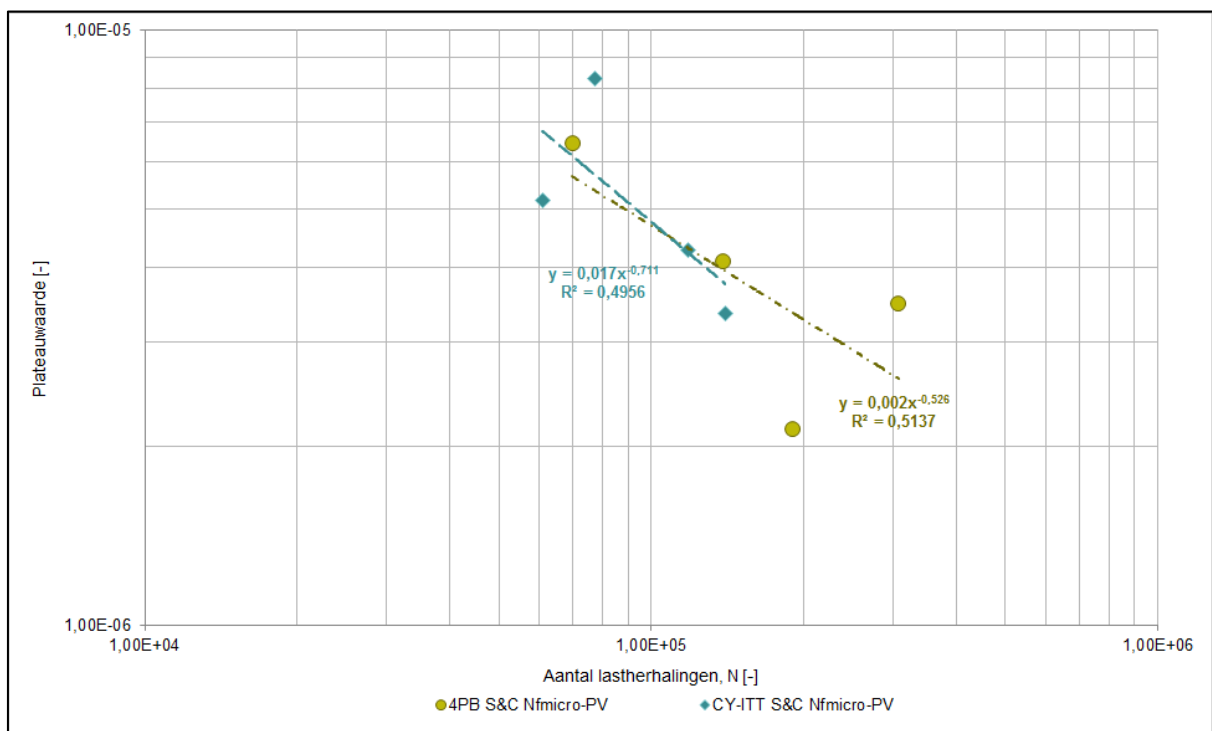
LTA						
	Klassiek		S&C		S&C aangepast	
	N _{0,5G*} [-]	ε [μm/m]	N _{0,5G*} [-]	PV [-]	N _{f,micro} [-]	PV [-]
4PB	142480	138	142480	6,21E-06	138624	4,10E-06
	290970	121	290970	2,83E-06	307106	3,47E-06
	179390	147	179390	3,85E-06	189518	2,14E-06
	79780	162	79780	9,32E-06	69913	6,45E-06
CY-ITT	88237	43	-	-	77500	8,29E-06
	167866	33	200000	4,64E-05	140000	3,34E-06
	116254	40	-	-	60993	5,18E-06
	146177	31	16711	5,98E-05	118364	4,27E-06



Figuur 6: Vermoeiingsrelaties bepaald met conventionele analysemethode voor vermoeiing – LTA



Figuur 7: Vermoeiingsrelaties bepaald met originele S&C analysemethode voor vermoeiing – LTA



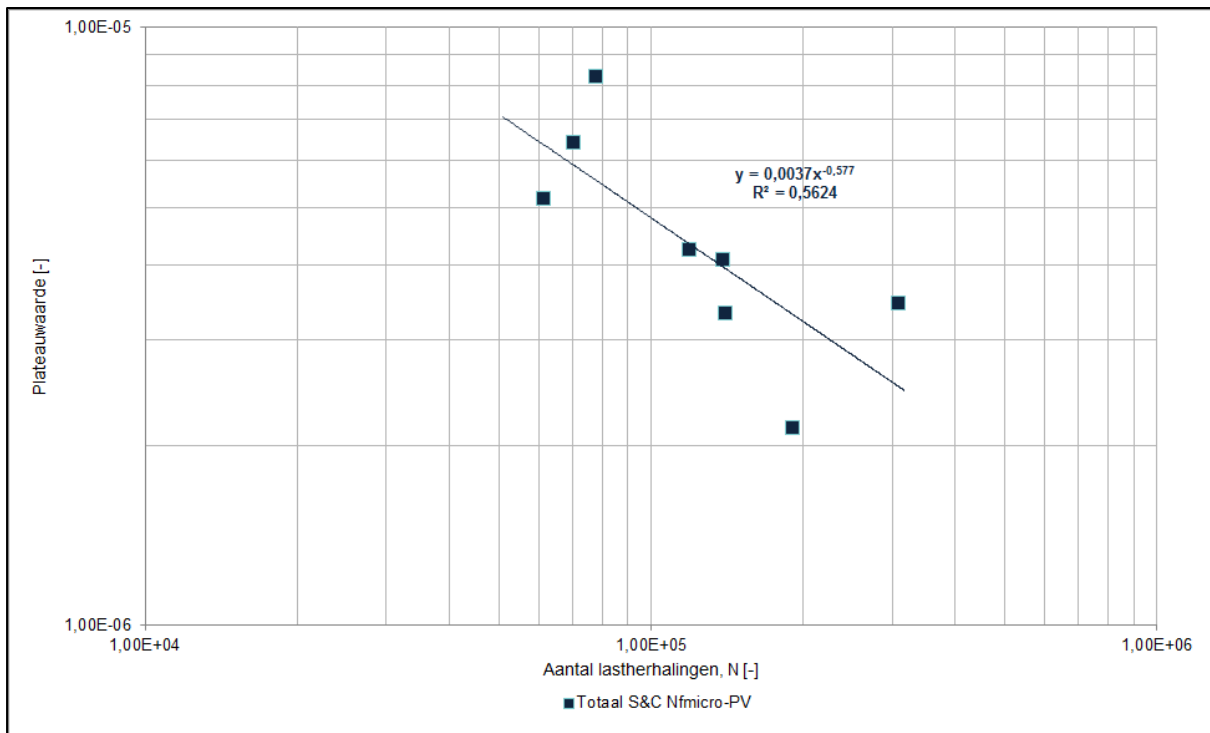
Figuur 8: Vermoeiingsrelaties bepaald met aangepaste S&C analysemethode voor vermoeiing – LTA

Figuur 6 en figuur 7 tonen duidelijk dat de rek geen representatieve parameter is voor vermoeiingsbeoordeling en dat een halvering van de mengselstijfheid niet mag worden beschouwd als betrouwbaar faalcriterium. Opvallend gegeven uit figuur 8 is dat naast de schikking van korte en lange proeven er een aantal proeven, 4PB en CY-ITT, zijn uitgevoerd die inderdaad een vergelijkbare levensduur hebben opgeleverd. De PV waarden van deze proefstukken benaderen elkaar goed en zijn in ieder geval van dezelfde orde grootte.

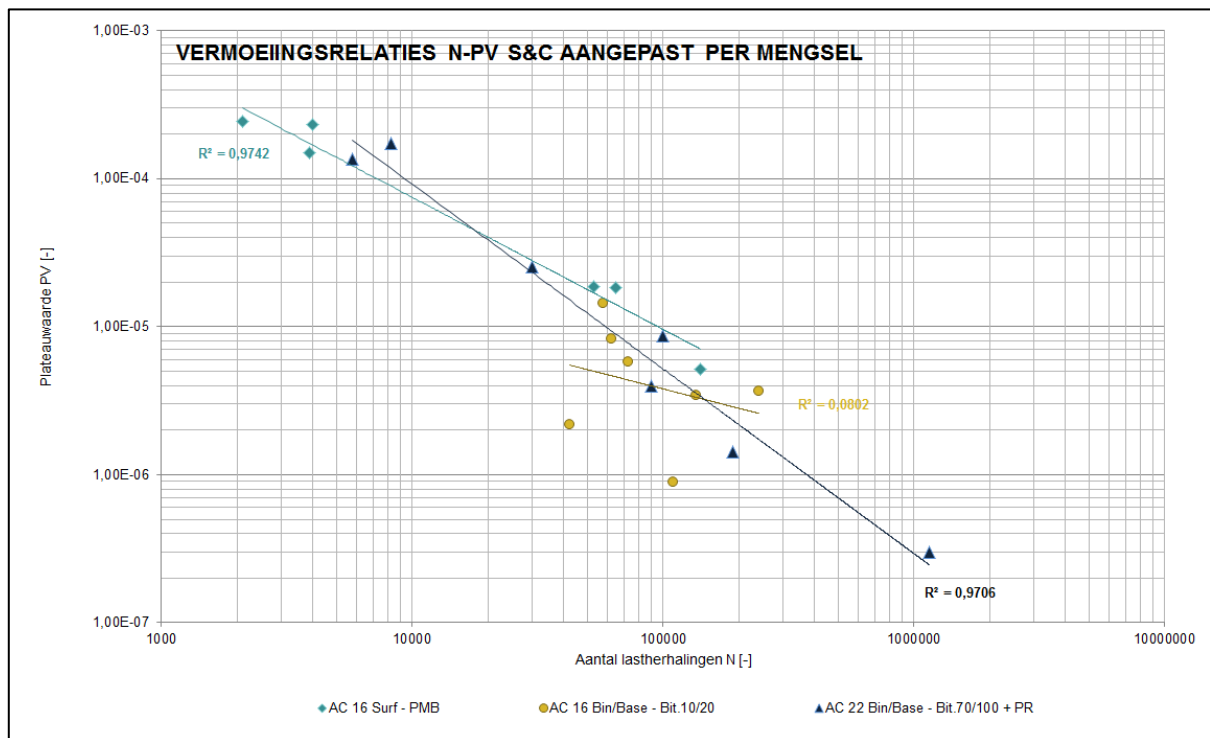
Naar aanleiding van deze resultaten is tevens bekeken of de vermoeiingsdata uit 4PB en CY-ITT voor het LTA als één dataset kan worden beschouwd. In figuur 9 zijn alle PV - $N_{f,micro}$ datapunten bepaald voor het LTA uitgezet. De vermoeiingsrelatie in figuur 9 staat in schril contrast met die weergegeven in figuur 6. De ruwe meetdata waarop analyse uitgevoerd is, is echter voor beide relaties gelijk. In figuur 9 lijkt de data uit 4PB en CY-ITT één dataset te vormen waardoor slechts één vermoeiingslijn kan worden bepaald. De trendlijn door alle meetpunten heeft een R^2 van 0,56. Deze is niet zo hoog om de volgende redenen:

- De spreiding in de originele data is relatief groot. De vermoeiingslijnen geconstrueerd op de conventionele manier hebben een R^2 kleiner dan 0,9.
- Vanwege de krachtsgestuurde belasting en de continue voortgang van scheurvorming is de RDEC van de CY-ITT grillig ten opzichten van 4PB. Zelfs na smoothing blijft de spreiding groot.
- De beschouwde dataset is relatief klein. Een toename in het aantal datapunten zal leiden tot een lagere spreiding in de regressie.

Overigens is ook voor de drie mengsels beschouwd in sectie 3.1 de dataset, enkel geselecteerd op mengselsoort, geplot in figuur 10. Ook in deze figuur is duidelijk zichtbaar dat de meetpunten verkregen met 4PB proeven en CY-ITT per mengselsoort een mooi lineair verloop vertonen op log-log schaal en niet te onderscheiden zijn van elkaar. De AC 16 met harde penetratiebitumen vertoont een opmerkelijk grotere spreiding dan de twee andere asfaltmengsels. Deze spreiding is afkomstig uit de spreiding in de RDEC voor het betreffende AC 16 Surf mengsel met bitumen 10/20.



Figuur 9: Vermoeiingsrelaties bepaald met de aangepaste Shen & Carpenter analysemethode voor vermoeiing LTA - GEEN onderscheid in proefmethode



Figuur 10: Vermoeiingsrelaties bepaald voor mengfels uit sectie 3.1 met de aangepaste Shen & Carpenter analysemethode voor vermoeiing – GEEN onderscheid in proefmethode

4. Conclusies & aanbevelingen

4.1 Conclusies

De aangepaste Shen & Carpenter analysemethode voor de vermoeiing van asfaltmengsels blijkt zeer geschikt voor de beoordeling van de vermoeiingsweerstand van zowel asfalt met penetratiebitumen, als asfalt met PMB. De bewering van Shen & Carpenter is op basis van meetdata en analyse gevalideerd. Uit deze analyse volgt dat de PV een fundamentele materiaalparameter is waarmee het vermoeiingsgedrag van asfalt kan worden beschreven, ongeacht proefopstelling, proefcondities en belastingcondities. De PV is in tegenstelling tot de rek om deze reden wel geschikt als parameter ter objectieve en eenduidige beoordeling van de vermoeiingsweerstand van alle asfaltmengsels.

Een aanpassing ten opzichte van de originele S&C methode is de herdefiniëring van het faalcriterium op basis van de RDEC. De huidige maat voor bezwijken, een stijfheidsreductie van 50%, wordt vervangen door het moment waarop de RDEC de plateau fase verlaat en elke volgende lastherhaling meer schade veroorzaakt dan de voorgaande cyclus. Het resultaat hiervan is dat de levensduur van een asfaltmengsel niet meer wordt beschreven met $N_{0,5G^*}$, maar met $N_{f,micro}$. $N_{f,micro}$ bevindt zich op de overgang tussen fase II en fase III en kan worden beschouwd als de laatste lastherhaling die niet meer schade veroorzaakt dan zijn voorganger. In andere woorden, $N_{f,micro}$ is het aantal lastherhalingen vanaf welke microscheurvorming zich begint te propageren tot macroscheurvorming. Op deze manier wordt verzekerd dat de staat van degradatie van asfaltmengsels, onafhankelijk van de mengselsamenstelling, ten tijde van bezwijken vergelijkbaar is. De aanpassing is succesvol gebleken, want ook het vermoeiingsgedrag van asfalt PMB is met behulp van deze methode betrouwbaar en realistisch beschreven.

Een belangrijke observatie gedaan tijdens de analyse is de herschikking van proefresultaten. In de conventionele uitwerking is het verschil in de aard van de proeven maatgevend voor de geconstrueerde $N_{0,5G^*,\epsilon}$ -vermoeiingsrelatie. Een uitwerking van dezelfde data met de aangepaste S&C methode leidt tot een $PV, N_{f,micro}$ -relatie waarbinnen de data zich onafhankelijk van proefmethode, maar wel afhankelijk van het type bindmiddel ordent. De data verkregen uit 4PB en CY-ITT kunnen op deze manier worden samengevoegd tot één dataset met één fundamentele vermoeiingskarakteristiek, die onafhankelijk is van proefopstelling, proef-, en belastingcondities. Dit betekent tevens dat het mogelijk is op basis van de RDEC belastingcondities in 4PB en CY-ITT zodanig af stemmen dat in beide proeven, uitgevoerd op hetzelfde mengsel, eenzelfde hoeveelheid energie per cyclus dissipeert als gevolg van schade. Ook dit vermoeden is aan de hand van data en data-analyse gevalideerd. Deze specifieke toepassing van de RDEC kan een sleutelrol spelen in de implementatie van Functioneel Verifiëren.

4.2 *Aanbevelingen*

Op basis van de gerapporteerde onderzoeksresultaten wordt aanbevolen:

- De aangepaste S&C methode in te voeren als standaard analysemethode voor de vermoeiing van asfaltmengsels. Hierbij moet worden opgemerkt deze methode vermoeiingsproeven tot breuk verlangt.
- Meer data te verzamelen om zodoende de analysemethode te perfectioneren en bij voorkeur de analyse te kunnen automatiseren. Dit komt tevens de spreiding in de data verkregen met behulp van de methode ten goede.
- Om met de aangepaste S&C methode zo snel mogelijk met de implementatie van Functioneel Verifiëren te beginnen.

Enkele suggesties voor vervolgonderzoek:

- Verken of er een directe relatie af te leiden is tussen de PV en de rek, zodat de karakteristieke PV,Nf;micro-relatie ook kan worden ingepast in de huidige ontwerpmethodieken voor asfaltverhardingen.

5. *Referenties*

- [1] **Shen, S. & Carpenter, S.**, *Dissipated energy concepts for HMA performance: fatigue and healing*, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois, Maart 2007, Urbana (IL)