

VAN FUNCTIONEEL VERIFIËREN NAAR FUNCTIONEEL OPLEVEREN

Natascha Poeran
Boskalis Nederland

Berwich Sluer
Boskalis Nederland

Jan Telman
Q-Consult Progress Partners

Samenvatting

Nu inmiddels 10 jaar geleden is in Nederland voor het Functioneel Specificeren van asfalt gekozen. De eigenschappen van asfaltmengsels worden zodoende sinds 2008 bepaald middels een typeonderzoek dat bestaat uit een vaste set functionele proeven. De resulterende eigenschappen worden vermeld op een CE prestatieverklaring. Het verhardingsontwerp en de mengselkeuze worden op basis van deze, bij het typeonderzoek bemeten, functionele eigenschappen bepaald. De laatste schakel in het aanlegproces, het keuringskader, is bij de functionele benadering volledig buiten beschouwing gelaten. Het keuren van gerealiseerd asfalt wordt ook nu nog steeds gedaan door het beschouwen van empirische eigenschappen, zoals korrelverdeling en bitumengehalte. In 2014 is daarom het voorstel gedaan te starten met Functioneel Verifiëren [4]. Het voorstel bediscussieerde vier levensvatbare methodieken. Het verifiëren van de asfaltkwaliteit door het uitvoeren van dezelfde functionele proeven als in het typeonderzoek op materiaal uit het werk verdiende hierbij de voorkeur. Boskalis Nederland heeft zich vanaf 2014 intensief gewijd aan het opstellen en inrichten van het functionele keuringskader op basis van de voorkeursmethodiek. Na jaren van onderzoek en ontwikkeling is een set proeven en analysemethoden geselecteerd, die vervolgens in de praktijk is toegepast. Het resultaat van deze eerste verkenning is gepresenteerd bij de CROW Infradagen 2016 [1,5]. De resultaten van dit verkennende onderzoek waren dusdanig veelbelovend dat de oproep is gedaan aan alle geïnteresseerden om deel te nemen aan de doorontwikkeling van de methodiek en het Pilotproject Functioneel Verifiëren met als doel het optuigen van een database. De in deze database verzamelde data kan, na analyse, dienen als input voor definitieve protocollen in contractrelaties. Inmiddels hebben geïnteresseerde deelnemers zich aangediend en is gestart met het pilotproject, waarvan de eerste resultaten in deze paper worden gedeeld.

Steekwoorden

Asfalt, functioneel, verifiëren, opleveren, kwaliteit, contracten

1. Achtergrond

1.1 Aanleiding

De type test bestaat uit een vaste verzameling proeven die specifiek per mengseltype zijn geselecteerd. Nederland heeft, in 2008 bij de invoering van de CE-markering, de keuze gemaakt deze mengselspecificaties functioneel te benaderen. Asphalt wordt sindsdien derhalve gespecificeerd op basis van mechanische eigenschappen die representatief zijn voor het werkelijke gedrag van het materiaal in de weg. Deze functionele eigenschappen, volgend uit de type test, zijn inmiddels directe input voor het verhardingsontwerp (CROW-OIA). Als gevolg daarvan zijn verhardingsdimensies volledig afgestemd op de eigenschappen van het toegepaste asphalt en dus (kosten)efficiënter.

De ontbrekende schakel in het geheel is de relatie tussen de gemeten mechanische/functionele eigenschappen die in het ontwerp zijn toegepast en de daadwerkelijk gerealiseerde asfalteigenschappen in het werk. Informatie over verschillen tussen gerealiseerde en laboratoriumeigenschappen is enerzijds belangrijk voor het vaststellen van ontwerpveiligheden en anderzijds biedt het de mogelijkheid om feitelijk aan te tonen dat de ontworpen en gerealiseerde constructie binnen de gestelde veiligheden en toleranties minstens aan elkaar gelijk zijn. De huidige controle van de kwaliteit van het verwerkte asphalt is nog grotendeels gebaseerd op empirische in plaats van functionele eigenschappen, waardoor discussies bij de oplevering van werken nog te veel gaan over waarden die helemaal niet meer relevant hoeven te zijn voor de kwaliteit van het werk.

Mede door grootschalige toepassing van asphaltgranulaat, composietvulstoffen, gemodificeerde bindmiddelen en allerhande toeslagstoffen in asphalt heeft de huidige kwaliteitscontrole aan de hand van samenstelling en mate van verdichting nog maar weinig zeggingskracht over de functionele kwaliteit van verwerkt asphalt. Opdrachtgevers roeren zich dan ook steeds meer over twijfels of het geleverde product wel de prestaties zal leveren die contractueel zijn overeengekomen. De ontwikkeling, en bovenal praktische implementatie, van Functioneel Verifiëren is daarom noodzaak.

1.2 Doel Functioneel verifiëren

Functioneel Verifiëren houdt in dat op basis van functionele proeven op het asphalt na verwerking wordt beoordeeld of het geleverde product, binnen nader te stellen toleranties, voldoet aan de specificaties overeenkomstig de type test.

2. Methodiek voor Functioneel Verifiëren

In 2014 bespraken Sluer & Stigter een viertal levensvatbare methodieken voor Functioneel Verifiëren. Het verifiëren van de asfaltkwaliteit door het uitvoeren van dezelfde functionele proeven in het typeonderzoek op materiaal uit het werk verdiende hierbij de voorkeur. Voor het Functioneel verifiëren van verwerkt asphalt zijn daarom relevante eigenschappen en geschikte proeven geselecteerd. Tabel 2.1 toont een overzicht van de gekozen eigenschappen en proeven.

Tabel 2.1: Proeven ten behoeve van functionele specificatie en verificatie van asfaltbeton

EIGENSCHAP	TYPE TEST	FUNCTIONEEL VERIFIËREN
	PROEF	PROEF
Doelsamenstelling	--	Extractie
Streefdichtheid	Boven- en onderwater weging	Boven- en onderwater weging
Sterkte/Watergevoeligheid	Statische Indirecte Trekproef	Statische Indirecte Trekproef
Vervormingsweerstand	Triaxiaalproef	Triaxiaalproef
Vermoeiingsweerstand	Vierpuntsbuigproef	Cyclische Indirecte Trekproef
Stijfheidsmodulus @20°C & 8Hz	Vierpuntsbuigproef	Cyclische Indirecte Trekproef
Mastercurve stijfheid mastiek	Frequency Sweep	DSR

Een van de belangrijke voordelen van de gekozen methodiek is dat deze een directe vergelijking van functionele eigenschappen mogelijk maakt. Immers, de proefopstellingen, proefstukafmetingen en proefcondities zijn gelijk. Uit tabel 2.1 volgt dat met uitzondering van de vermoeiingsweerstand en de stijfheidsmodulus een directe vergelijking kan worden gemaakt tussen de gespecificeerde en de gerealiseerde asfaltkwaliteit. Enkel de eigenschappen bepaald middels de vierpuntbuigproef worden vergeleken met diezelfde eigenschappen, maar dan bepaald middels de Cyclische ITT proef. Het is namelijk zeer onpraktisch en zelfs onwenselijk uit gerealiseerd werk balkjes te zagen ter beproeving in het laboratorium. De bepaling van de stijfheidsmodulus en de vermoeiingsweerstand vereisen in deze context enige bijzondere aandacht.

De stijfheidsmodulus en de vermoeiingsweerstand van asfalt worden in de type test bepaald door beproeving middels de vierpuntsbuigproef (4PB). De proeven worden uitgevoerd op prismatische proefstukken (balkjes) met afmetingen 50x50x450mm. Bij voorkeur wordt stijfheid- en vermoeiingsonderzoek op gerealiseerd asfalt uitgevoerd op cilindrische proefstukken, welke kunnen worden vervaardigd uit boorkernen. Sinds twee jaar is daarom ervaring opgedaan met het bepalen van de stijfheidsmodulus en de vermoeiingsweerstand van asfalt met de cyclische indirecte trekproef (CY-ITT) op cilindrische proefstukken Ø 100-150 mm.

Diverse onderzoeksresultaten tonen dat de stijfheidsmodulus van asfalt bepaald met CY-ITT op cilindervormige proefstukken goede overeenkomsten vertoont met de stijfheidsmodulus bepaald op balkjes in de 4PB proef. Verschillen tussen CY-ITT en 4PB stijfheid beperken zich structureel tot gemiddeld +10%. Aannemelijk is daarom dat een groot deel van dit verschil is toe te schrijven aan de verschillen in proefkarakter, maar dat deze verschillen zijn te vatten in een zogenaamde conversiefactor. Aanvullend onderzoek is hiervoor noodzakelijk.

Een directe vergelijking van de CY-ITT vermoeiingsweerstand en die gemeten middels 4PB proeven gedurende de type test was echter niet mogelijk. De huidige, conventionele analysemethode van vermoeiingsproeven staat dat niet toe, omdat deze is gebaseerd op het verloop van mechanische parameters als stijfheid en rek tijdens de vermoeiingsproef voor de definiëring van schade in het proefstuk. Het effect van de verschillen in proefkarakter, verplaatsinggestuurd (4PB) en krachtgestuurd (CY-ITT), maakt dat deze mechanische parameters enkel representatief zijn voor de schadeontwikkeling binnen de specifieke condities van de proef.

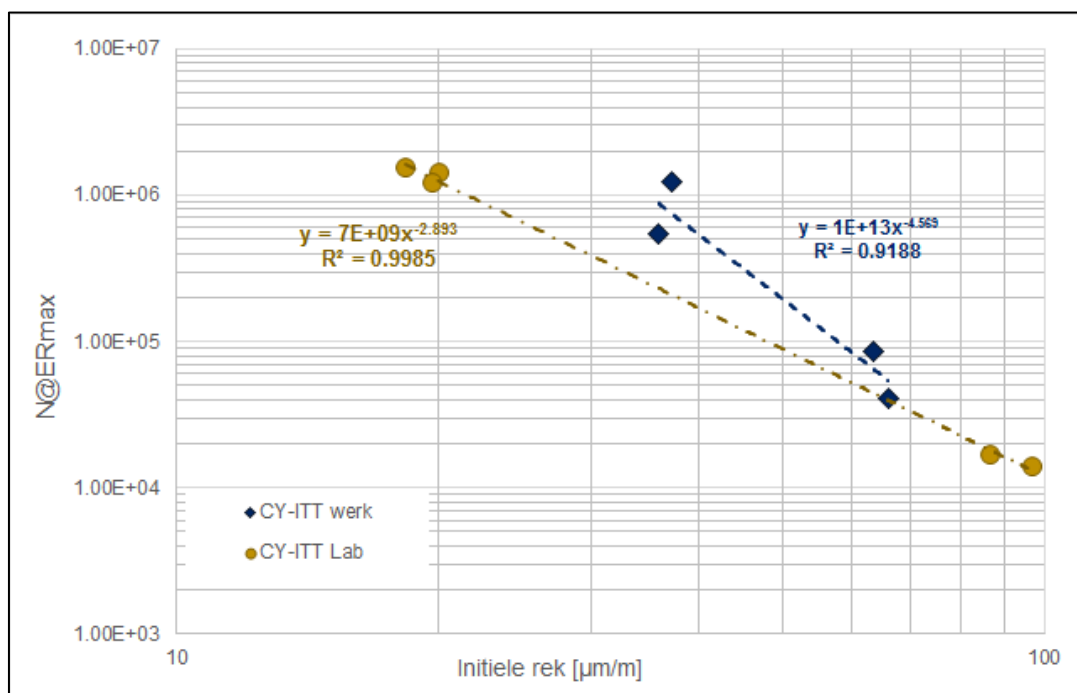
Boskalis Nederland heeft om deze reden onderzoek gedaan naar alternatieve analysemethoden voor de weerstand tegen vermoeiing. De bevindingen van dit onderzoek tonen dat de toepassing van energieconcepten een geschiktere grond is voor de beoordeling van vermoeiing [8]. Met name de theorie van Shen & Carpenter [2], waarin de *Ratio of Dissipated Energy Change* (RDEC) wordt beschouwd als schade-indicator, is een goede basis gebleken voor de ontwikkeling van een vermoeiingsanalyse die de directe vergelijking van 4PB en CY-ITT vermoeiingsproeven wèl faciliteert [1,5]. Deze vorm van vermoeiingsanalyse zou op deze manier Functioneel Verifiëren mogelijk maken.

Functioneel Verifiëren kan nu volgens twee strategieën worden ingezet. De resultaten van het CY-ITT onderzoek op boorkernen uit het werk kan worden vergeleken met:

- Een referentiebepaling van CY-ITT stijfheid en vermoeiingsweerstand in de type test op basis van de conventionele vermoeiingsanalyse.
- De resultaten van het 4PB stijfheid- en vermoeiingsonderzoek conform proef 62 uit de Standaard RAW Bepalingen 2015 middels een vermoeiingsanalyse op basis van gedissipeerde energie, QRS-RDEC.

2.1 Bepalen referentie CY-ITT stijfheid en vermoeiing in type test

Aan het Functioneel Specificeren (type test) kan de bepaling van stijfheid en vermoeiingsweerstand middels CY-ITT worden toegevoegd. Deze bepaling maakt directe vergelijking van proefresultaten van cilindrische labvervaardigde proefstukken en boorkernen mogelijk, figuur 2.1. Deze strategie heeft niet de voorkeur, omdat deze leidt tot een uitbreiding van het typeonderzoek en dus ook tot hogere kosten. Bovendien kunnen de eigenschappen van het gerealiseerde werk niet worden vertaald naar (rest)levensduurberekeningen, ook niet door middel van conversiefactoren. Een voordeel van deze methode is dat de relatie tussen de gemeten CY-ITT en 4PB stijfheden kan worden uitgediept.



Figuur 2.1: Directe vergelijking CY-ITT vermoeiingsresultaat Lab vs. Werk

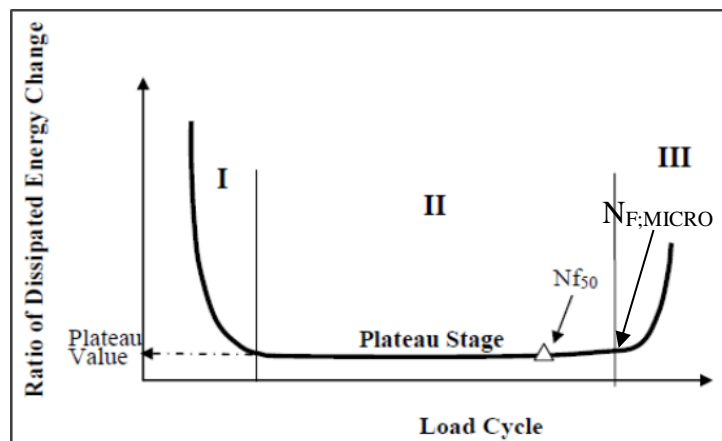
2.2 Directe vergelijking van CY-ITT en 4PB met QRS-RDEC analyse

In deze strategie dienen de 4PB stijfheid en vermoeiingsweerstand, zoals bepaald in de type test, als referentie voor de verificatie van het gerealiseerd werk. Een dergelijke directe vergelijking van de 4PB en CY-ITT vermoeiingsweerstand is mogelijk door de analyse van de data uit te voeren op basis van het verloop van de gedissipeerde energie gedurende een vermoeiingsproef. Omdat in dit scenario een uitbreiding van de type test overbodig is, verdient dit de voorkeur boven de eerder omschreven strategie.

De zoektocht naar alternatieve analysemethoden voor vermoeiing van bitumineus gebonden mengsels is een aantal jaar geleden ingezet. De huidige methode toonde in de praktijk namelijk herhaaldelijk ongeschikt te zijn voor toepassing op mengsels met PMB. Inmiddels is door Boskalis Nederland een analysemethodiek ontwikkeld, *QRS-RDEC*, waarmee het vermoeiingsgedrag van mengsels met penetratiebitumen en PMB, ongeacht proefopstelling en belastingcondities op een objectieve en uniforme wijze kan worden beoordeeld. Met deze methode is het mogelijk om de gerealiseerde vermoeiingseigenschappen van een asfaltmengsel in een werk aan de hand van vermoeiingsonderzoek op boorkernen direct te beoordelen ten opzichte van de vermoeiingseigenschappen die in het typeonderzoek zijn vastgesteld. Aan de methode ligt de theorie van Shen & Carpenter betreffende de *Ratio of Dissipated Energy Change*, RDEC, ten grondslag. Voor een uitgebreider uiteenzetting en toepassing van de theorie van Shen & Carpenter wordt verwezen naar [1,2,5].

2.2.1 Originele theorie Shen & Carpenter [2]

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. Feitelijk beschrijft de RDEC de snelheid waarmee de gedissipeerde energie verandert 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, figuur 2.2.



Figuur 2.2: RDEC[Shen&Carpenter, 2007]

Na een aanloopfase I komt de proef in de plateau fase II, waarin de waarde van RDEC nagenoeg constant is. Er wordt een constante hoeveelheid energie per lastcyclus omgezet in schade in de vorm van warmte en microscheuren. De waarde van RDEC gedurende deze fase is de zogenaamde plateauwaarde, PV. Deze PV is een materiaalkarakteristiek die afhankelijk is van het mengselontwerp en de opgelegde belasting. Volgens Shen & Carpenter wordt bewezen geacht dat de PV een fundamentele materiaalparameter is waarmee het vermoeiingsgedrag van asfalt kan worden beschreven, onafhankelijk van proefopstelling en belasting. In fase III gaat de RDEC over van een constante waarde in een snel 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.

Volgens Shen & Carpenter bestaat er voor asfaltmengsels een lineaire relatie op log-log schaal tussen de vermoeiingslevensduur en de PV. Einde levensduur is door Shen & Carpenter aangemerkt als het aantal lastherhalingen bij een stijfheidsreductie van 50%, $N_{0,5G^*}$. De PV is de waarde van RDEC bij $N_{0,5G^*}$. In plaats van een $N_{0,5G^*}, \epsilon$ -relatie wordt de vermoeiingsweerstand van asfalt dus uitgedrukt in een $N_{0,5G^*}, PV$ -relatie. In [3] is nader gemotiveerd waarom de keuze voor een $N_{0,5G^*}, PV$ -relatie gerechtvaardigd zou zijn.

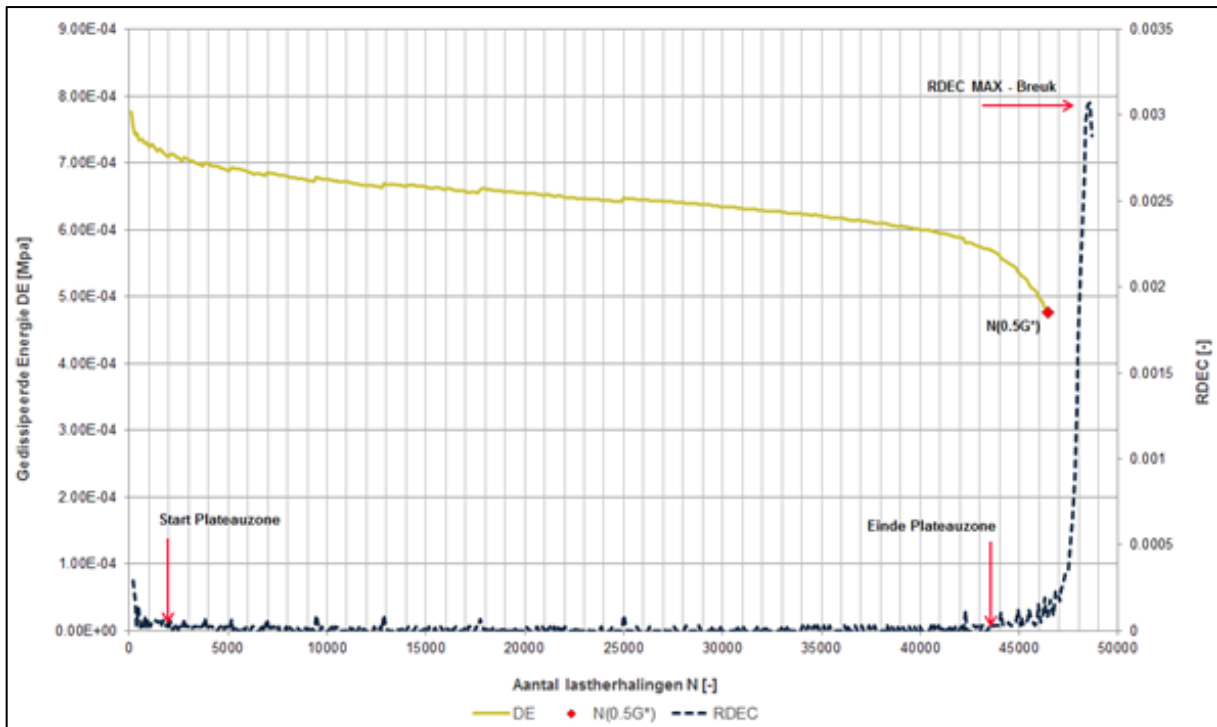
In het algemeen wordt gesteld dat een materiaal met hogere PV meer schade ondervindt van herhaalde belasting dan een materiaal met lagere PV. De ondervonden schade zal naarmate het aantal lastherhalingen toeneemt sneller groeien dan in materialen met lagere PV. Bovendien duidt een relatief hoge PV doorgaans aan dat de weerstand tegen vermoeiing, d.i. het optreden van vermoeiingsscheuren, lager is.

2.2.2 Verschuiving van het criterium einde levensduur - $N_{F, MICRO}$

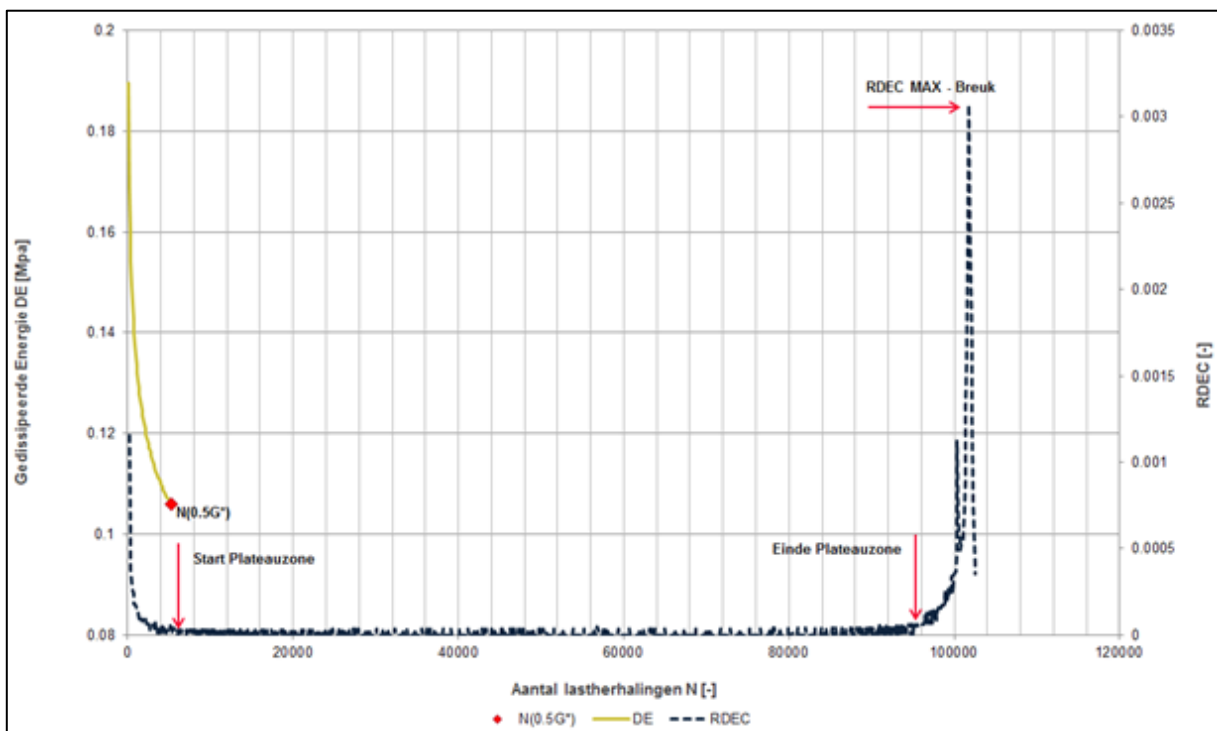
De methode van Shen & Carpenter levert in de vorm van de plateauwaarde een waardevolle, objectieve parameter ter beoordeling van de schadevorming in een proefstuk. Echter, ook in deze methode wordt 50% stijfheidsreductie als faalcriterium aangemerkt. Bij toepassing van het N_{F50} criterium op DSR vermoeiingsproeven van mastieken met polymeer gemodificeerde bindmiddelen worden echter resultaten gevonden die nadrukkelijk de vraag oproepen of een einde levensduur criterium gebaseerd op 50% stijfheidsreductie wel een realistisch en uniform uitgangspunt is voor vermoeiingsproeven op asfaltmengsels en -mastieken met alle in de praktijk voorkomende bindmiddelen, figuren 2.3 t/m 2.5.

De figuren tonen elk het resultaat van een individuele mastiekvermoeiingsproef uitgewerkt conform de RDEC methode zoals beschreven door Shen & Carpenter [2]. Overigens varieert het bindmiddel per figuur, maar de componentverhoudingen van de mastieken zijn gelijk. Uit de figuren is af te leiden dat het aantal lastherhalingen bij 50% stijfheidsreductie, $N_{0,5G^*}$, zich niet voor alle mastieken binnen de plateauzone bevindt, maar soms in fase III (figuur 2.3). Bovendien bereikt de mastiek uit figuur 2.4 relatief snel de halve stijfheid reeds aan het begin van de plateauzone, maar bezit nog een aanzienlijke (rest)levensduur (figuur 2.4). Uit deze waarnemingen kan worden geconcludeerd dat de berekende plateauwaarde niet voor elke mastiek dezelfde fysische toestand beschrijft, namelijk einde vermoeiingslevensduur. De bovenstaande PV – $N_{0,5G^*}$ relatie geeft om deze reden een vertekend beeld van het vermoeiingsgedrag van de beproefde mastieken. De vraag die dit oproept is of het criterium 50% stijfheidsreductie wel een realistisch criterium is voor het beschrijven van einde

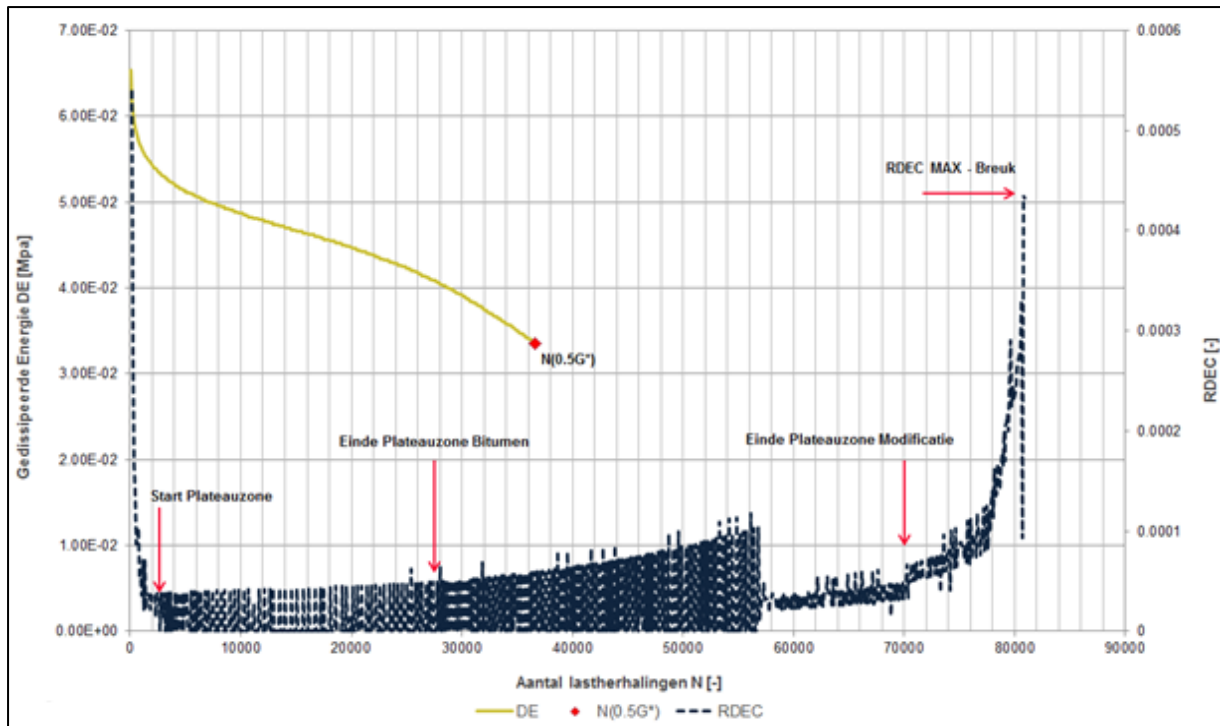
vermoeingslevensduur, als uit het verloop van de RDEC blijkt dat nog geen significante stijging van de dissipatiegroei optreedt.



Figuur 2.3: Gedissipeerde energie, RDEC PMB1 – N0.5G* in fase III



Figuur 2.4: Gedissipeerde energie, RDEC PMB2 – N0.5G* in fase I/II



Figuur 2.5: Gedissipeerde energie, RDEC PMB3 – N0.5G* in fase II

Het feit dat mengsels met PMB als bindmiddel nog (rest)levensduur bezitten na halvering van de stijfheid betekent dat de zwaarst belaste doorsnede op dat moment 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 kan zich na een halvering van de stijfheid nog ‘veilig’ in de plateauzone bevinden. 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.’

Op basis van resultaten van onderzoek heeft Boskalis ervoor gekozen om $N_{F,MICRO}$ te hanteren als uniform einde levensduur criterium voor alle vermoeiingsproeven. Onderzoek heeft uitgewezen dat voor elk asfaltmengsel een unieke lineaire relatie bestaat tussen $\log PV$ en $\log N_{F,MICRO}$ [1]. Uit een externe verificatie van de onderzoeksresultaten verricht door Q-Consult Progress Partners (QCPP) is gevolgd dat de $PV-N_{F,MICRO}$ relatie het vermoeiingsgedrag van asfalt nauwkeuriger beschrijft dan de huidige $N_{F,50-\epsilon}$ relatie. Bovendien kon op basis van data van twee asfaltmengsels, penetratiebitumen en PMB, worden aangetoond dat op log-log schaal de relatie tussen PV en $N_{F,MICRO}$ optimaal kan worden beschreven door één gezamenlijke regressielijn voor de 4PB en de CY-ITT proef. Hiermee is aangetoond dat 4PB en CY-ITT proeven, ondanks hun verschillende aard, dezelfde informatie leveren wat betreft het vermoeiingsgedrag van asfalt. Deze doorbraak schept de mogelijkheid resultaten uit de type test (4PB) op zuivere wijze te vergelijken met de resultaten uit het gerealiseerde werk (CY-ITT). Na afronding van dit onderzoek is in samenwerking met QCPP een analyseprocedure

ontwikkeld, waarmee de QRS-RDEC analyse op een eenduidige en objectieve wijze kan worden uitgevoerd in EXCEL.

2.2.3 Bepaling van $N_{F,MICRO}$ middels cumulatieve standaardafwijking (CuSTD)

Om de PV- $N_{F,MICRO}$ relatie op te stellen uit individuele RDEC curves moeten per vermoeiingsproef twee parameters worden bepaald:

- $N_{F,MICRO}$ - Het aantal lastherhalingen waarbij de overgang van fase II naar fase III plaatsvindt.
- PV - Plateauwaarde, de gemiddelde waarde voor de RDEC in fase II

Het is van belang om deze parameters zo zuiver en betrouwbaar mogelijk vast te stellen, omdat immers in een vervolgstap een relatie wordt gefit door alle combinaties $\log(N_{F,MICRO})$, $\log(PV)$ voor de monsters van een bepaald mengsel.

Bepaling Plateauwaarde PV

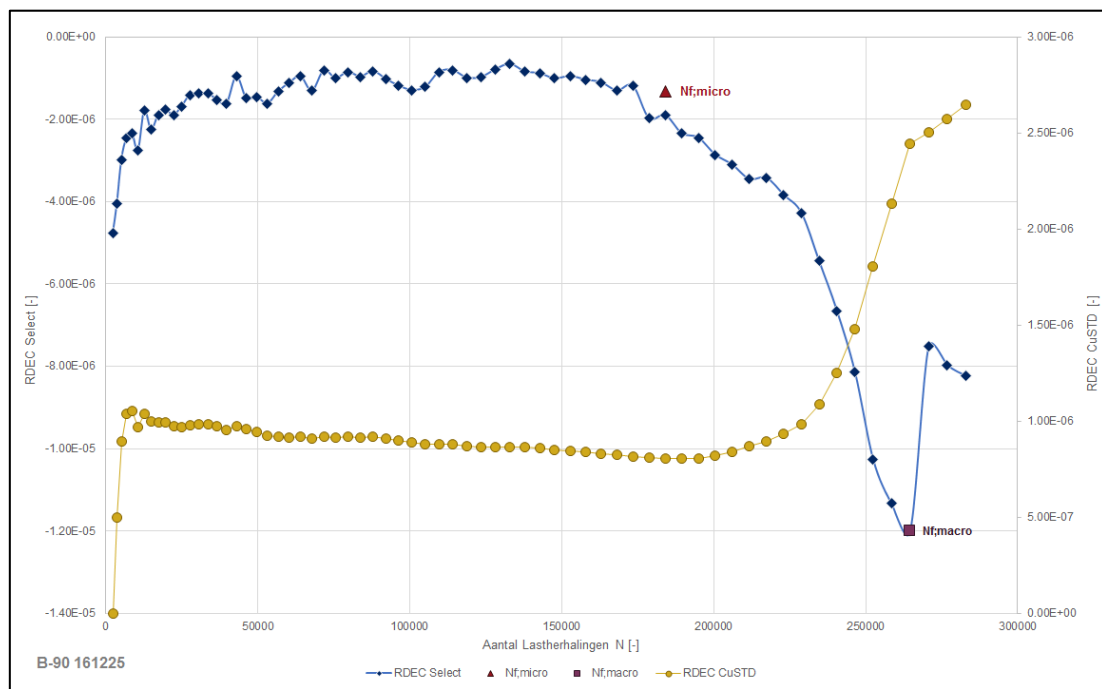
De RDEC is een rekenkundige bewerking van de gedissipeerde energie (DE) en omschrijft de snelheid waarmee het verschil in DE tussen opvolgende lastcycli beweegt. In een 4PB proef verloopt de DE in de vorm van een dalende S-vormige curve. De resulterende RDEC is daarom altijd negatief. De CY-ITT is krachtgestuurd en daarom verloopt de DE volgens een stijgende S-vormige curve. De RDEC berekend uit CY-ITT is daarom altijd positief. In de eerste analyses is om die reden gerekend met absolute waarden van RDEC voor 4PB en CY-ITT. Uit het verificatieonderzoek bleek echter dat dit kan leiden tot een aanzienlijke overschatting van de PV waarde. De mate waarin dit gebeurt is afhankelijk van het gemiddelde in combinatie met de spreiding in de niet-absolute waarden van RDEC in het vlakke deel in fase II van de badkuipcurve. De overschatting van de PV was in een aantal gevallen groot (>0.50) en ook nog eens wisselend tussen proefstukken. Dit heeft een nadelig effect op de betrouwbaarheid van de resulterende PV- $N_{F,MICRO}$ relatie.

Voor dit probleem waren twee oplossingen: een analysemethode hanteren die PV berekent uit DE i.p.v. uit RDEC, of de RDEC ongevoeliger maken voor overschatting. In een vergelijkend onderzoek is vervolgens met geselecteerde rekenmethoden op dezelfde dataset een aantal analyses uitgevoerd. Uit deze analyse volgde dat de zogenaamde exponentiële methode, waarbij de PV wordt berekend uit het exponentiele deel van de DE-curve, tot uitzonderlijk goede resultaten leidt. Echter, deze methode vereist (iteratieve) statistische toetsingen en is daarmee moeilijker te programmeren in EXCEL. Omdat de toegankelijkheid van de analyse van groot belang is, is besloten een methode te ontwikkelen die programmeerbaar is in EXCEL en deze vervolgens te toetsen aan de resultaten van de exponentiële methode.

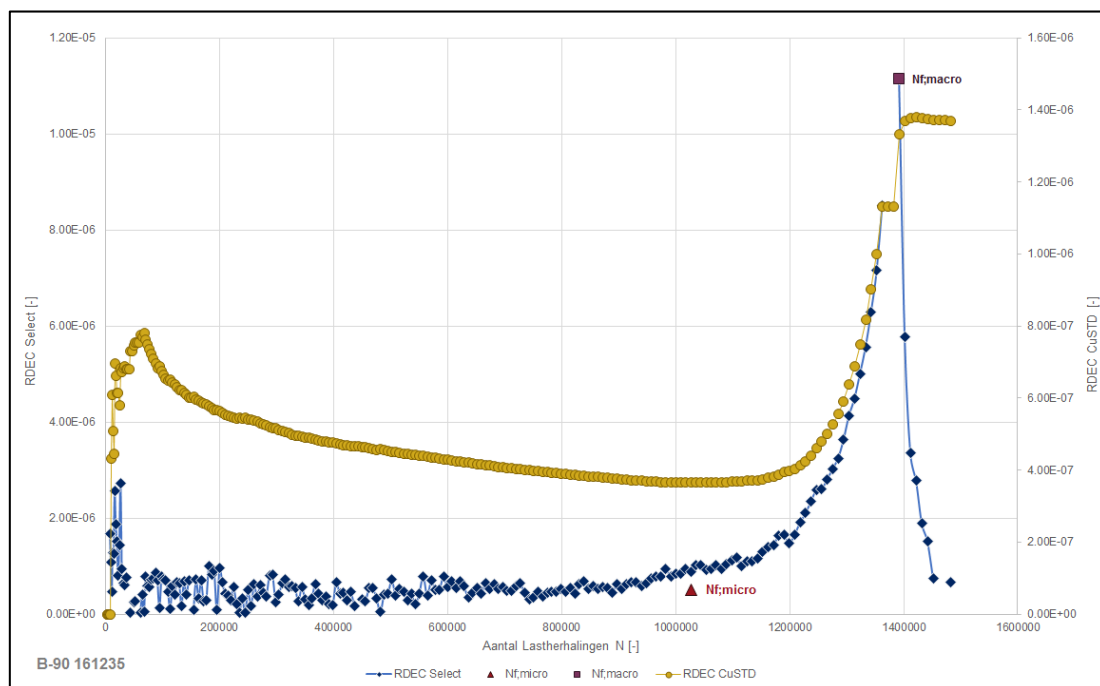
De overschatting van de RDEC treedt met name op als de waarden wisselend boven en onder nul komen. In deze gevallen kennen de DE-metingen zoveel spreiding dat deze niet monotoon dalend/stijgend zijn bij opeenvolgende lastcycli. Om de RDEC ongevoeliger te maken voor overschatting is daarom besloten eerst de DE waarden te filteren door middel van een Moving Average. Dit bleek succesvol, want na het smoothen bleek de overschatting van de PV waarde opgelost [7].

Bepaling $N_{F;MICRO}$

Uit de analyse van de $N_{F;MICRO}$ waarden berekend met alle geselecteerde methodes bleek dat het resultaat alle gevallen redelijk gelijk was. Het bezwijkpunt of de overgang van RDEC fase II naar RDEC fase III werd op geen enkele wijze beïnvloed door de bepalingmethode van de RDEC. De bepaling was alleen nog niet geautomatiseerd en daarom gevoeliger voor fouten. In de huidige analysemethode is de bepaling van $N_{F;MICRO}$ wel geautomatiseerd door het aantal lastherhalingen te bepalen bij het minimum van de cumulatieve standaardafwijking van de RDEC, figuren 2.6 en 2.7.



Figuur 2.6: RDEC en CuSTD RDEC incl. $N_{f;micro}$ en $N_{f;macro}$ voor 4PB proef



Figuur 2.7: RDEC en CuSTD RDEC incl. $N_{f;micro}$ en $N_{f;macro}$ voor CY-ITT proef

3. Resultaten Functioneel Verifiëren

Sinds de inrichting van de database voor Functioneel Verifiëren is voor een aantal projecten reeds een functionele verificatie uitgevoerd volgens de voorkeursstrategie. In dit hoofdstuk worden de resultaten van deze verificatie gepresenteerd.

3.1 Case I: De onderlaag – mengsel 252 A4 Steenbergen

3.1.1 NL-LAB – FEC 2.0

In 2012/2013 is in het kader van NL-LAB het FEC 2.0 onderzoek uitgevoerd. Doel van dit onderzoek was het vaststellen in welke mate de werkelijk in een werk gerealiseerde functionele eigenschappen van asfalt overeenstemmen met de gespecificeerde eigenschappen op basis van een type test. Tabel 3.1 bevat de resultaten van het onderzoek voor het molengemengde mengsel 251-1 zowel verdicht in het werk, als in het laboratorium bij Boskalis en Strukton. Opgemerkt wordt dat voor de bepaling van de stijfheid en vermoeiingsweerstand van het gerealiseerde werk balkjes uit de weg zijn gezaagd die zijn beproefd in de 4PB opstelling conform proef 62 Standaard RAW.

Uit de resultaten volgt dat bij gelijke mengselsamenstelling en bouwstoffen de gerealiseerde functionele eigenschappen voor de asfaltonderlaag in het project A4 Steenbergen beter zijn dan bepaald in de type test. Deze conclusie is gebaseerd op de onderzoeksresultaten in tabel 3.1, waaruit blijkt dat de resulterende benodigde asfaltdikte op basis van de in het werk gerealiseerde eigenschappen in alle gevallen minder is dan de benodigde ontwerpdikte op basis van de eigenschappen van de type test. Dit betekent dat het mogelijk is asfalt te realiseren met functionele eigenschappen gelijkwaardig aan die bepaald in de type test van het betreffende mengsel, mits wordt voldaan aan de volgende voorwaarden:

- Mengselsamenstelling TT \approx mengselsamenstelling werk, *én*
- Eigenschappen bouwstoffen TT \approx eigenschappen bouwstoffen werk, *én*
- Dichtheid TT \approx dichtheid werk

Tabel 3.1: Resultaten NL-LAB FEC 2.0

		TYPE TEST	BOSKALIS		STRUKTON	
		MENGSEL 251-1	MOLENGEMENGD	WERK	MOLENGEMENGD	WERK
PRODUCTIE		TT	Molen	Molen	Molen	Molen
VERDICHTING		TT	Wals	Werk	Plaatverdichter	Werk
DICHTHEID	[kg/m ³]	2355	2398	2417	2383	2418
STIJFHEID	[MPa]	8402	9592	9850	8611	9781
ε₆	[µm/m]	102.6	108.3	106.9	96.9	110.8
K₂		-5.968	-6.997	-5.315	-5.798	-4.968
ITS	[MPa]	-	2.61	3.02	2.62	2.60
ITSR	[%]	86	87	106	93	93
f_c	[µm/m/N]	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2
H_{ASFALT}	[mm]	312	223	260	278	276

3.1.2 Functioneel Verifiëren mengsel 251-1 – A4 Steenberg

Het mengsel toegepast in het FEC 2.0 onderzoek wordt veelvuldig toegepast als onder- of tussenlaag. Zo is het mengsel ook toegepast in het werk A4 Steenberg. Uit de verharding zijn kernen geboord waarmee functionele verificatie is verricht van mengsel 251-1. De resultaten van deze verificatie zijn in tabellen 3.2 t/m 3.4 opgenomen.

Tabel 3.2: Functionele verificatie van mengselsamenstelling

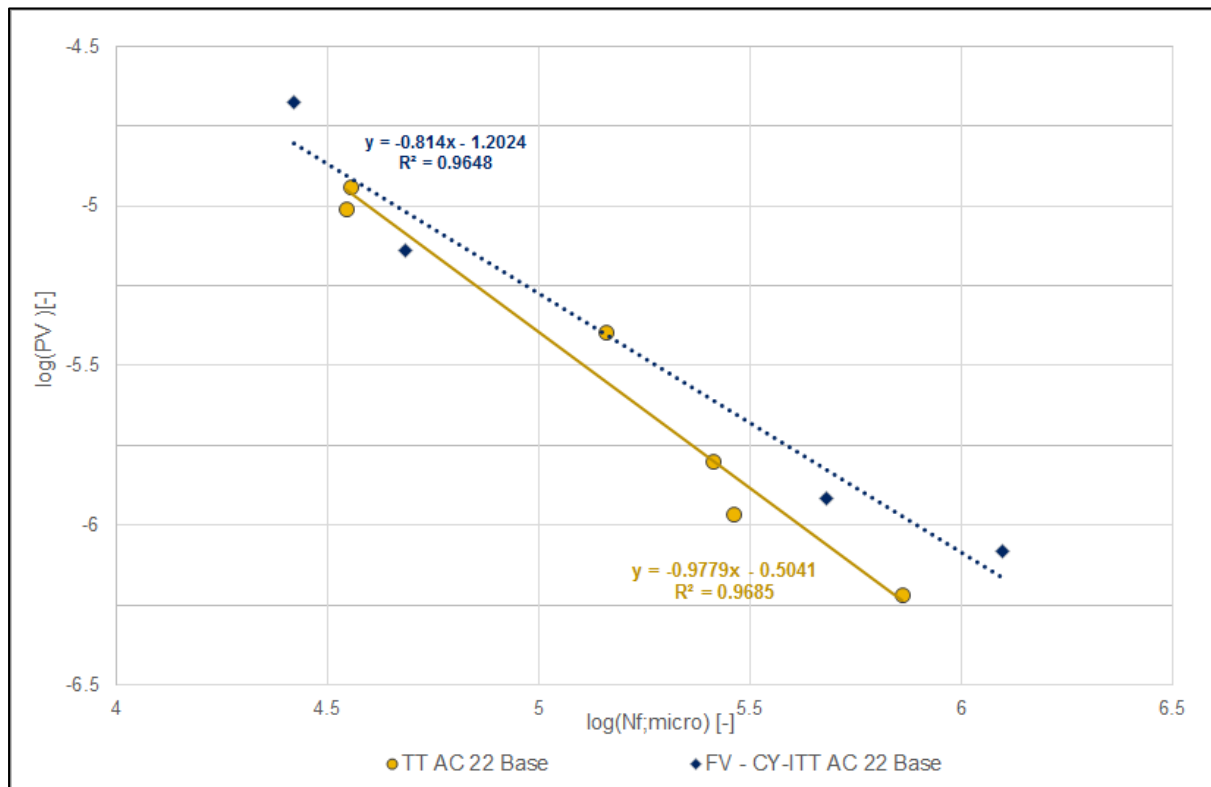
TYPE TEST				FUNCTIONEEL VERIFIËREN	
DOELSAMENSTELLING		SAMENSTELLING NA EXTRACTIE		SAMENSTELLING WERK	
Zeef	Door zeef	Zeef	Door zeef	Zeef	Door zeef
C31.5		C31.5	100.0	C31.5	100.0
C22.4	99.2	C22.4	99.2	C22.4	99.4
C16		C16		C16	91.0
C11.2	78.0	C11.2	78.0	C11.2	76.2
C8		C8		C8	61.8
C5.6		C5.6		C5.6	54.1
2mm	43.0	2mm	44.0	2mm	44.3
0.5mm		0.5mm		0.5mm	28.2
0.180mm		0.180mm		0.180mm	10.8
0.063mm	6.0	0.063mm	6.3	0.063mm	5.9
Bitumen 'in'	4.3	Bitumen 'in'	4.3	Bitumen 'in'	4.2

Tabel 3.3: Functionele verificatie van dichtheid

EIGENSCHAP		TYPE TEST	FUNCTIONEEL VERIFIËREN
			WERK
Streefdichtheid	[kg/m ³]	2355	--
Dichtheid proefstuk	[kg/m ³]	--	2373
Dichtheid mengsel	[kg/m ³]	2504	--
Holle ruimte	[% v/v]	6.0	--

Tabel 3.4: Functionele verificatie van functionele eigenschappen

EIGENSCHAP		TYPE TEST	FUNCTIONEEL VERIFIËREN
			WERK
ITS retained	[MPa]	--	2.71
Triaxiaal f_c	[$\mu\text{m}/\text{m}/\text{N}$]	0.12	0.14
4PB S $E_{\text{mix}}@8\text{Hz}\&20^\circ\text{C}$	[MPa]	8402	
CY-ITT S $E_{\text{mix}}@8\text{Hz}\&20^\circ\text{C}$	[MPa]		12618
VERMOEIINGSANALYSE RDEC			
4PB F logPV-log $N_{F,\text{MICRO}}$ relatie		$-0.97 \cdot x - 0.50$	
R^2		0.97	
CY-ITT F logPV-log $N_{F,\text{MICRO}}$ relatie		$-0.82 \cdot x - 1.20$	
R^2			0.96
VERMOEIINGSANALYSE CONVENTIONEEL			
4PB F $N = k_1 \cdot \epsilon^{k_2}$		$N_f = 10^{18.00} \cdot \epsilon^{-5.97}$	
R^2		0.62	
CY-ITT F $N_f = C_1 \cdot \epsilon_{\text{EL,INI}}^{C_2}$			$N_f = 0.220 \cdot \epsilon_{\text{EL,INI}}^{-4.57}$
R^2			0.92



Figuur 3.1: PV- $N_{F,\text{MICRO}}$ vermoeïngrelaties TT (4PB) en werk (CY-ITT) – Case I

3.2 Case II: Twee verwerkingsmethoden versus het typeonderzoek

In tabellen 3.5 t/m 3.7 zijn de resultaten van functionele verificatie weergegeven voor één mengsel op twee werken. Op deze twee werken is een verschillende verwerkingsmethode toegepast van een AC22 Base mengsel.

Tabel 3.5: Functionele verificatie van mengselsamenstelling

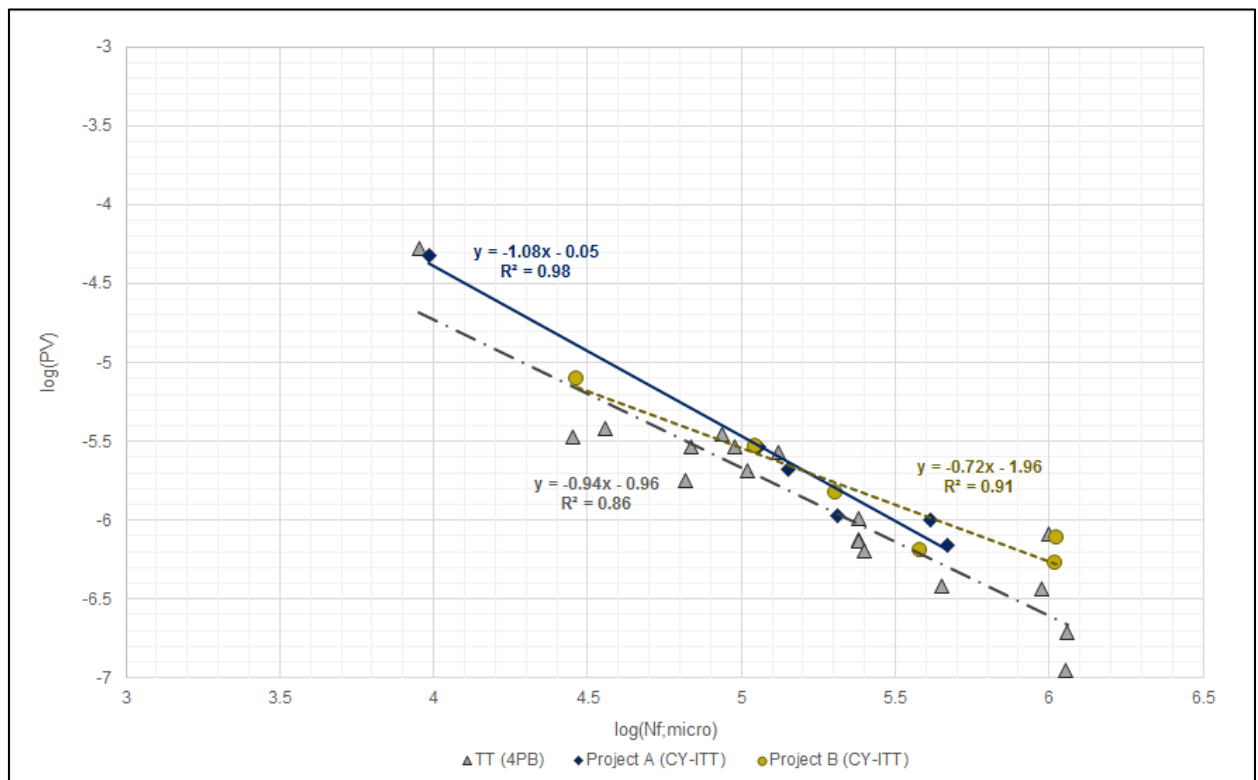
TYPE TEST				FUNCTIONEEL VERIFIËREN			
Doelsamenstelling		Samenstelling na extractie		Samenstelling project A		Samenstelling project B	
Zeef	Door zeef	Zeef	Door zeef	Zeef	Door zeef	Zeef	Door zeef
C31.5	100.0	C31.5	100.0	C31.5	100.0	C31.5	100.0
C22.4	98.0	C22.4	100.0	C22.4	100.0	C22.4	99.4
C16		C16	93.3	C16	92.1	C16	95.1
C11.2	80.0	C11.2	83.7	C11.2	81.0	C11.2	81.8
C8		C8	68.1	C8	68.5	C8	54.4
C5.6		C5.6	57.4	C5.6	58.8	C5.6	59.7
2mm	43.0	2mm	41.5	2mm	44.9	2mm	45.6
0.5mm		0.5mm	29.0	0.5mm	30.4	0.5mm	31.9
0.180mm		0.180mm	13.8	0.180mm	13.9	0.180mm	15.2
0.063mm	6.4	0.063mm	6.7	0.063mm	6.5	0.063mm	7.1
Bitumen 'in'	4.3	Bitumen 'in'	4.3	Bitumen 'in'	5.3	Bitumen 'in'	4.4

Tabel 3.6: Functionele verificatie van dichtheid

EIGENSCHAP		TYPE TEST	FUNCTIONEEL VERIFIËREN	
			PROJECT A	PROJECT B
Streefdichtheid	[kg/m ³]	2368	2368	2368
Dichtheid proefstuk	[kg/m ³]	2377	2353	2355
Dichtheid mengsel	[kg/m ³]	2470	2475	2475
Holle ruimte	[% v/v]	3.8	5.0	4.1

Tabel 3.7: Functionele verificatie van functionele eigenschappen

EIGENSCHAP		TYPE TEST	FUNCTIONEEL VERIFIËREN	
			PROJECT A	PROJECT B
ITS retained	[MPa]	2.00	1.93	2.01
Triaxiaal f_c	[$\mu\text{m}/\text{m}/\text{N}$]	0.23	0.25	0.18
4PB S				
$E_{\text{mix}}@8\text{Hz}\&20^\circ\text{C}$	[MPa]	7525		
CY-ITT S				
$E_{\text{mix}}@8\text{Hz}\&20^\circ\text{C}$	[MPa]		10993	11277
VERMOEIINGSANALYSE RDEC				
4PB F				
logPV-log $N_{F,\text{MICRO}}$ relatie		$-0.96 - 0.94x$		
R^2		0.86		
CY-ITT F				
logPV-log $N_{F,\text{MICRO}}$ relatie			$-0.05 - 1.08x$	$-1.96 - 0.72x$
R^2			0.98	0.91
VERMOEIINGSANALYSE CONVENTIONEEL				
4PB F				
$N = k_1 \cdot \epsilon^{k_2}$		$N = 10^{17.02} \cdot \epsilon^{-5.29}$		
R^2		0.74		
CY-ITT F				
$N_f = C_1 \cdot \epsilon_{\text{el,ini}}^{C_2}$			$N_f = 10^{11.78} \cdot \epsilon_{\text{el,ini}}^{-4.75}$	$N_f = 10^{13.30} \cdot \epsilon_{\text{el,ini}}^{-3.73}$
R^2			0.87	0.92



Figuur 3.2: PV- $N_{F,\text{MICRO}}$ Vermoeingsrelaties TT, Project A en Project B – Case II

3.3 *Discussie*

Uit de gerapporteerde resultaten kan worden afgeleid dat het Functioneel Verifiëren van verwerkt asfalt ten opzichte van de functionele eigenschappen van ditzelfde mengsel bepaald in het typeonderzoek mogelijk is. Het is daarom aantoonbaar mogelijk asfalt te realiseren met functionele eigenschappen gelijkwaardig aan die bepaald in de type test van het betreffende mengsel, mits wordt voldaan aan de voorwaardes geformuleerd op basis van het NL-LAB onderzoek.

Bovendien is aangetoond dat de empirische eigenschappen alleen, niet toereikend zijn om de feitelijke kwaliteit van een gerealiseerde asfaltverharding te beoordelen. Een overschrijding van de gestelde, mengsel specifieke tolerantiebanden om deze empirische eigenschappen leidt niet vanzelfsprekend tot minder wenselijke functionele eigenschappen en vice versa. In deze specifieke gevallen is aangetoond dat een tekort (Case I) en een overschrijding (Case II) van het gewenste bitumengehalte, buiten de geldende tolerantiebanden, wel degelijk meetbare invloed heeft op de functionele eigenschappen, maar dat deze invloed niet altijd significant hoeft te zijn in relatie tot de daadwerkelijk gerealiseerde kwaliteit van een verharding.

In tegenstelling tot de overige bepaalde eigenschappen, is de weerstand tegen vermoeiing uit 4PB en CY-ITT normaliter niet direct te vergelijken. De analyse op basis van de RDEC, een rekenkundige bewerking van de gedissipeerde energie, maakt een directe vergelijking wel mogelijk. Uit de grafieken in figuren 3.1 en 3.2 is af te leiden dat de weerstand tegen vermoeiing van het verwerkte asfalt beter is dan die gemeten in de type test. Dit betekent dat de werkelijke vermoeiingslevensduur van de verharding in beide voorbeeldprojecten altijd minstens gelijk óf langer zal zijn dan de ontwerplevensduur. Case 1 toont tevens aan dat de conclusies getrokken voor vermoeiing op basis van 4PB-onderzoek op balkjes uit proefplaten uit het werk en de conclusies getrokken op basis van de methodiek voor Functioneel Verifiëren eensluidend zijn.

4. ***Van Functioneel Verifiëren naar Functioneel Opleveren***

In het voorgaande is aangetoond dat het Functioneel Verifiëren van gerealiseerde asfaltverhardingsconstructies inmiddels mogelijk is. Het uiteindelijke doel is om het Functioneel Verifiëren in te zetten voor Functioneel Opleveren. Met Functioneel Opleveren wordt bedoeld het inzetten van Functioneel Verifiëren voor de contractuele beoordeling en acceptatie van gerealiseerd asfaltwerk. Voor de succesvolle praktische toepassing van Functioneel Verifiëren voor Functioneel Opleveren vereisen vier belangrijke aspecten nog nadere aandacht:

1. Evalueren en standaardiseren van proefvoorschriften en proefcondities
2. Herijken en vaststellen van ontwerpveiligheden in relatie tot uitvoeringscondities
3. Ontwikkelen theoretisch prognosemodel ter ondersteuning bedrijfscontrole
4. Opzetten database lange termijn monitoring en validatie Functioneel Opleveren

Evaluëren en standaardiseren proefvoorschriften en proefcondities

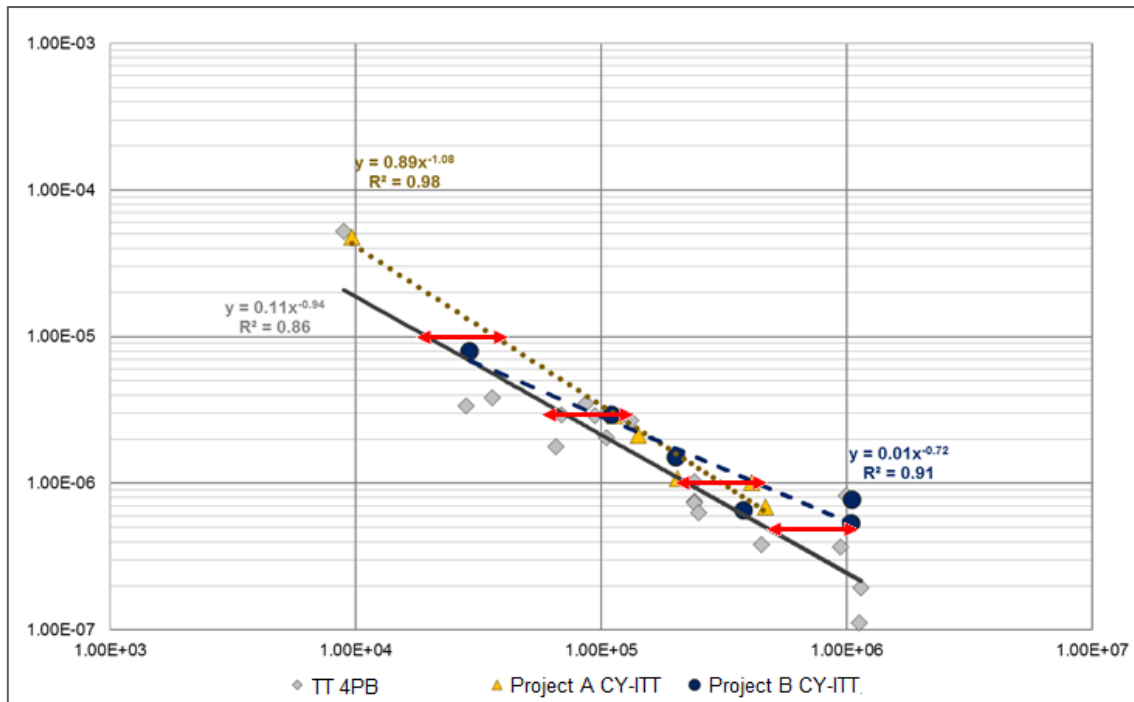
Naast de ontwikkeling c.q. het geschikt maken van de CY-ITT proef voor het meten van stijfheid en vermoeiing van asfalt voor Functioneel Verifiëren moeten met name de CY-ITT en de Triaxiaalproef grondig worden geëvalueerd en geverifieerd, teneinde de proefcondities, proefuitvoering, analyse- en rapportagemethode en apparatuur te uniformeren. Hiervoor kan het noodzakelijk zijn om zowel analyses met een theoretisch eindige elementenmodel van de proeven als verificatieonderzoek in het laboratorium uit te voeren.

Herijken en vaststellen ontwerpveiligheden in relatie tot uitvoeringstoleranties

Voor de succesvolle invoering van Functioneel Verifiëren voor het beheersen van de kwaliteit van asfalt in contracten is het een absolute noodzaak dat onderzoek plaats vindt naar de te hanteren toleranties voor goedkeur/afkeur in relatie tot de in het verhardingsontwerp gehanteerde veiligheden.

De vaststelling van de toe te passen toleranties op de gemeten asfalteigenschappen bij Functioneel Verifiëren staat in directe relatie tot de herijking van de veiligheden in het ontwerp. De veiligheden op de materiaaleigenschappen in het verhardingsontwerp vormen namelijk de basis voor de toe te passen toleranties in de uitvoeringspraktijk. Het kwantitatief vaststellen van de daadwerkelijk geleverde functionele eigenschappen bij Functioneel Verifiëren opent ook nieuwe wegen voor eerlijke(re) afrekening van tekortkomingen in geleverde asfaltkwaliteit, en zelfs bonussystemen bij aantoonbaar geleverde hoge(re) kwaliteit behoren tot de mogelijkheden. Immers, door de op het materiaal uit het werk vastgestelde eigenschappen in te voeren in de ontwerpberekeningen kan een eventueel surplus aan levensduur aantoonbaar worden vastgesteld. Functioneel Verifiëren biedt vanwege de objectieve kwantitatieve beoordeling van gerealiseerde eigenschappen van een asfaltmengsel ook nieuwe mogelijkheden om een aannemer te belonen als de gemiddelde verwachtingswaarden voor de eigenschappen worden overtroffen.

Voor een aantal nader vast te stellen representatieve belastingniveaus zou getoetst moeten kunnen worden of het aantal toelaatbare aslasterhalingen voor het gerealiseerde asfalt binnen een vereiste tolerantie valt. Dit is in figuur 4.1 aangeduid middels de rode pijlen. Uit tabel 4.1 blijkt dat slechts voor één van de getoetste belastingniveaus de gerealiseerde levensduur kleiner is dan de ontwerplevensduur op basis van het typeonderzoek (geel gearceerd). Als de ontwerpveiligheden zodanig zouden zijn ingesteld dat bijvoorbeeld de gerealiseerde $N_{\text{toel,werk}} \geq 0,7 * N_{\text{toel,ontw}}$ moet zijn voor alle belastingniveaus, dan zou dit werk worden geaccepteerd. Als de eis $0,8 * N_{\text{toel,ontw}}$ zou zijn, dan kan contractueel worden vastgelegd of het werk wordt afgewezen of dat er een korting wordt opgelegd op basis van de werkelijke kortere gerealiseerde levensduur. Daar tegenover staat dat als het geel gearceerde getal 1,25 zou zijn geweest er ook te rechtvaardigen is dat de aannemer recht heeft op een bonus op basis van 25% langere geleverde levensduur.



Figuur 4.1: Vergelijking levensduur werk – TT o.b.v. PV- $N_{F,MICRO}$ relatie

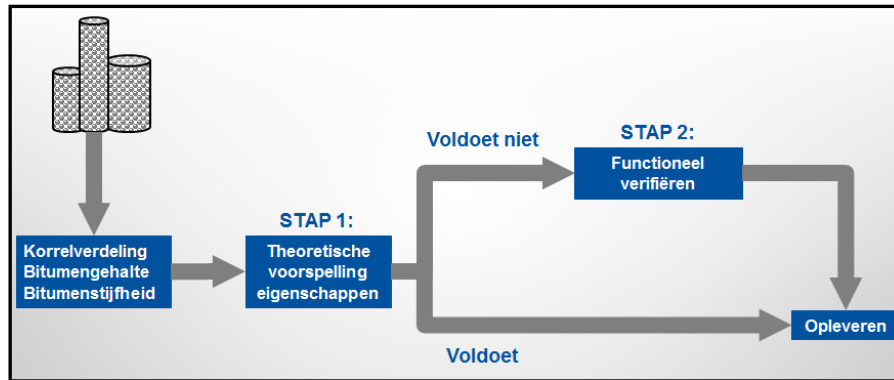
Tabel 4.1: Vergelijking relatieve levensduur werk vs TT

$N = Ax^B$	TT	Project A	Project B
A	0.11	0.89	0.01
B	-0.94	-1.08	-0.72

PV	N_{TT}	$N_{PROJ.A}$	$N_{PROJ.B}$	N_{TT}/N_{TT}	$N_{PROJ.A}/N_{TT}$	$N_{PROJ.B}/N_{TT}$
1.00E-05	1.99E+04	3.83E+04	1.47E+04	1.00	1.92	0.74
2.00E-06	1.10E+05	1.70E+05	1.37E+05	1.00	1.54	1.24
1.00E-06	2.31E+05	3.23E+05	3.59E+05	1.00	1.40	1.56
5.00E-07	4.82E+05	6.13E+05	9.41E+05	1.00	1.27	1.95

Ontwikkelen theoretisch voorspellingsmodel voor ondersteuning bedrijfscontrole

Op basis van de jarenlange ervaring met typeonderzoek van asfalt is bekend dat de eigenschappen van vers geproduceerd en verwerkt asfalt zich in de eerste weken nog sterk ontwikkelen (verbeteren). Voor Functioneel Verifiëren is het daarom van groot belang om aandacht te besteden aan het moment van uitvoeren van de proeven in vergelijking met het moment van beproeven van de proefstukken bij het typeonderzoek van het betreffende mengsel. Momenteel is het uitgangspunt dat de proeven voor Functioneel Verifiëren bij voorkeur in de periode tussen zes tot acht weken na verwerken van het asfalt worden uitgevoerd. Indien het voor de beoordeling van een werk wenselijk is dat er eerder inzicht is in de gerealiseerde kwaliteit, dan kan het gebruik van prognosemodellen voor een eerste beoordeling worden ingezet (zie Stap 1 in figuur 4.2). Feit is dat deze prognosemodellen door middel van aanvullend onderzoek nog verder ontwikkeld en gevalideerd moeten worden. In het kader van de ontwikkeling van Functioneel Verifiëren wordt daarom ook de stijfheid van de bitumen of mastiek met de DSR gemeten (zie tabel 2.1) om de functionele eigenschappen te kunnen voorspellen en data te genereren om de prognosemodellen verder te ontwikkelen.



Figuur 4.2: Mogelijk voorstel systematiek Functioneel Verifiëren

Opzetten database lange termijn monitoring en validatie Functioneel opleveren

Voor de validatie van de rigoureuze veranderingen in de asfaltwegbouwpraktijk sinds 2004 is een lange termijn monitoringprogramma noodzakelijk. In dit programma wordt onderzoek verricht naar de mate waarin ontwerpmethodieken en gerealiseerde verhardingseigenschappen binnen een acceptabele betrouwbaarheidsmarge daadwerkelijk leiden tot realisatie van de prestaties conform het verhardingsontwerp. De resultaten van dit monitoringprogramma vormen dan de basis voor verdere ontwikkeling en aanscherping van het theoretisch technisch kader voor asfaltverhardingen. In tegenstelling tot het grootschalige en vooral kostbare SHRP-monitoringprogramma in het verleden kunnen de kosten voor een dergelijk monitoringprogramma drastisch worden beperkt middels de inzet van nieuwe registratie- en meetsystemen met GPS-plaatsbepaling. Een belangrijk systeem voor het beheren van aanleg- en monitoringdata is bijvoorbeeld Pavement Information Modelling (PIM), dat aan het eind van 2018 bij de aannemers in gebruik wordt genomen.

Voor de verificatie en validatie van de methodiek voor Functioneel Verifiëren is het een primaire vereiste dat er praktijkervaring wordt opgedaan en er een gestructureerde database wordt opgebouwd om de verdere ontwikkelingen te kunnen faciliteren en versnellen. Teneinde dit mogelijk te maken (en te kunnen financieren) worden stakeholders (opdrachtgevers, onderzoeksinstellingen, opdrachtnemers, ingenieursbureaus etc.) gezocht die willen participeren in dataverzameling volgens een vast format gedurende langere tijd om het systeem voor Functioneel Verifiëren in te kunnen regelen.

5. Conclusies & aanbevelingen

5.1 Conclusies

Uit de gerapporteerde resultaten kan worden afgeleid dat het Functioneel Verifiëren van verwerkt asfalt ten opzichte van de functionele eigenschappen van ditzelfde mengsel bepaald in het typeonderzoek aantoonbaar mogelijk is. De methodiek is inmiddels inzetbaar in geval van disputen over de geleverde asfaltkwaliteit, omdat met de QRS-RDEC methode voor alle functionele eigenschappen directe en betrouwbare vergelijkingen kunnen worden gemaakt tussen het werk en de type test. De resultaten onderschrijven tevens de conclusies getrokken op basis van het NL-LAB onderzoek. In aanvulling hierop volgt na beschouwing van twee praktijkvoorbeelden van Functioneel Verifiëren dat een overschrijding van de gestelde, mengselspecifieke tolerantiebanden om empirische eigenschappen niet vanzelfsprekend leidt tot minder wenselijke functionele eigenschappen en vice versa. De toegevoegde waarde van dit functionele verificatiekader op het huidige, empirische kader is daarmee evident. Enkele belangrijke aspecten omtrent de detaillering van de inrichting van het verificatiekader moeten hiervoor nader worden uitgewerkt. Aanbevelingen die worden gedaan omtrent de vervolmaking en validatie van het functionele verificatiekader zijn:

- Evaluatie en standaardisatie van proefmethoden, proefvoorschriften en analysemethoden.
- Doorvoering van een wijziging in het einde levensduur criterium tijdens de specificatie van de vermoeiingsweerstand, van $N_{0,5G^*}$ naar $N_{F,MICRO}$. Het praktische gevolg hiervan is dat vermoeiingsproeven uitgevoerd ten behoeve van een typeonderzoek vanaf heden altijd móeten worden doorgezet tot breuk.
- Ontwikkeling van een theoretisch model voor de prognose van functionele asfalteigenschappen (ten behoeve van de bedrijfscontrole).
- Aanvulling van de in het pilotproject reeds opgezette database Functioneel Verifiëren.
- Uitbreiding van de database door toevoeging van lange termijn monitoring.
- Toepassing van Functioneel Verifiëren voor de beoordeling en acceptatie van de gerealiseerde kwaliteit van gebonden funderingen.

In de nabije toekomst wordt beoogd Functioneel Verifiëren in te zetten voor Functioneel Opleveren. Getoond is dat de resultaten van Functioneel Verifiëren zeer geschikt zijn om te dienen als basis voor de inrichting van een afrekensysteem dat recht doet aan het functionele, technische kader. Om Functioneel Opleveren te faciliteren, is het van belang dat:

- De dialoog wordt gestart omtrent de vorm en de formulering van voorwaarden ten behoeve van Functioneel Verifiëren die nu reeds moeten worden opgenomen in contracten.
- De huidige ontwerpveiligheden worden herzien en herijkt in relatie tot de uitvoeringstoleranties.

De belangrijkste aanbeveling aan het Nederlandse wegenbouwcollectief is om de krachten te bundelen en via het project 'Functioneel Opleveren' onder de vlag van het programma Asfalt-Impuls het kader voor Functioneel Verifiëren en Functioneel Opleveren verder uit te bouwen voor reguliere toepassing in de praktijk.

6. Referenties

- [1] Poeran, N. & Sluer, B., *Analyse van vermoeiingsgedrag met methode Shen & Carpenter*, CROW Infradagen, Papendal, Juni 2016
- [2] Shen, S. & Carpenter, S., *Dissipated energy concepts for HMA performance: fatigue and healing*, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois, Urbana (IL), Maart 2007
- [3] Shen, S. & Lu, X., *Energy based laboratory fatigue failure criteria for asphalt materials*, *Journal of Testing and Evaluation*, Vol.39, No.3, September 2015
- [4] Sluer, B. & Stigter, J., *Functioneel Verifiëren van Asfaltverhardingen*, CROW Infradagen, Papendal, Juni 2014
- [5] Sluer, B. et al., *Functioneel Verifiëren stijfheid en vermoeiing van asfalt*, CROW Infradagen, Papendal, Juni 2016
- [6] Sluer, B., *Systematiek voor Functioneel Opleveren*, Asfalt-Impuls, Nieuw-Vennep, Maart 2018
- [7] Telman, J., *Verificatie RDEC methodiek voor karakterisering asfaltvermoeiing*, Q-Consult Progress Partners, Waardenburg, April 2017
- [8] Tolman, F. et al, *Het energiebeginsel voor vermoeiing van asfalt*, CROW Infradagen, Papendal, Juni 2018