

Gebruik van de DSR voor de bepaling van de vermoeiing en healing van bitumen en mastiek met AG-bindmiddel

ING. WIM VAN DEN BERGH¹

IR. M.F.C. VAN DE VEN²

ING. KIM DELOOSE¹

¹ARTESIS Hogeschool Antwerpen, onderzoeksgroep Wegenbouwkunde

² TU DELFT

Samenvatting

Deze bijdrage geeft een overzicht van de tussentijdse resultaten van het doctoraatsonderzoek 'Invloed van het gebruik van bindmiddel van asfaltpuingranulaat op de duurzaamheid van asfaltmengsels en op healing in het bijzonder'. De recente resultaten leiden tot een voorstel voor een healing- en vermoeiingsproef op bitumineuze mastiek en mortel.

Résumé

Cette contribution présente les résultats partiels de la recherche de doctorat « L'influence du liant des agrégats d'enrobés bitumineux sur la durabilité d'un enrobé et en particulier sur l'auto-réparation ». Les derniers résultats amènent à une proposition d'un test de fatigue et d'auto-réparation pour mastic et mortier bitumineux.

1. Inleiding en belang

Bij het structureel wegontwerp met asfaltmengsels als verharding, wordt naast de vermoeiingslevensduur, bepaald met continue beproeving ("fatigue"), ook rekening gehouden met het zelfherstellend vermogen tijdens rustperiodes ("healing") van het asfalt. Deze healingfactor geeft samen met de versporing van het verkeer, een verlenging van de structurele levensduur van het asfalt in situ ten opzichte van de vermoeiingslevensduur, bepaald in het laboratorium bijvoorbeeld door middel van een continue tweekantsbuigproefmeting. Het belang van deze factor is groot: een hogere healingfactor resulteert in een dunnere asfaltlaag voor een zelfde structurele levensduur of een langere levensduur bij eenzelfde laagdikte asfalt. Voor Belgische mengsels wordt een healingfactor van 7,1 gebruikt. De grootte van deze factor werd bepaald op asfaltmengsels in de jaren '80, zonder hergebruik. In Nederland is intussen discussie ontstaan over de healingfactor bij hergebruik; mogelijk wordt de healingfactor 4 teruggebracht naar 1 indien asfaltgranulaat wordt toegevoegd. Vanuit economisch perspectief wordt hergebruik dan veel duurder

aangezien het asfalt in een dikkere laag dient aangelegd te worden in vergelijking met nieuw asfalt. Onderzoek heeft uitgewezen dat healing meetbaar is, maar een eenduidige standaardproef is nog niet vastgelegd. Daarenboven is er op dit moment nog maar één Nederlands onderzoek bekend waarin de healingfactor bepaald werd op materiaal met asfaltgranulaat [ref.1].

Healingfactoren worden in de meeste gevallen vastgelegd met een dynamische buigproef op asfalt. Deze proef is duur en langlopend zodat een toepassing op asfaltmengsels eerder uitzonderlijk is. Er zijn echter ook andere mogelijkheden -niet limitatieve lijst- om healing te bekijken, zowel op gebied van proefopstelling (Dynamic Mechanical Analyzer - DMA, Dynamic Shear Rheometer-DSR, dynamische buigproef), uitvoering (verlenging van de vermoeiingslevensduur door introductie van rustperiodes, Partial Healing Model) als materiaal (asfalt, mastiek, bitumen). Een samenvattend overzicht van de meest voorkomende healingproefopstellingen is gegeven in [ref.2]. Hieruit blijkt dat er weinig coherentie te vinden is in de proefmethoden en het gebruik van de resultaten. Eén traject is meer op elkaar afgestemd: de methode van oppervlakte-energie gecombineerd met reologie. Voor fundamenteel onderzoek kan deze methode, vnl. oppervlakte-energiebepaling, een toevlucht zijn. Voor de asfaltproducent die graag de healing factor van 'zijn' asfaltmengsel wil bepalen, is de procedure omslachtig. Er is behoefte aan een eenvoudige procedure om op een adequate doch snelle manier een idee te vormen over de healingpotentie van een bindmiddel of mastiek. Gezien de weinige publicaties met betrekking tot een praktische proefopstelling om healing te meten en de 'random' testparameters wanneer dan al een onderzoek werd gepubliceerd, werd er gestart vanuit enkele basishypotheses:

- Healing in asfalt gebeurt voornamelijk in het bindmiddel (in een cohesieve scheur) of op de grens van bindmiddel en aggregaat (adhesieve scheur). Vanuit fysico-chemische kant gezien zou in het eerste geval healing zich gemakkelijker voordoen dan het tweede. Hieruit komt de wens naar voren om healing op bitumen te meten.
- Een bindmiddelfilm van 1 tot 2 mm (DSR-gap) komt niet voor in het asfalt; mastiek of mortel als proefmateriaal is veel realistischer.
- Er moet een duidelijke healing component zijn die op één of andere manier zichtbaar is tegenover de vermoeiingslijn.
- Gezien er meer ervaring is met rekgestuurde proeven dan met krachtgestuurde proeven en bovendien vermoeiingslijnen in functie van de rek opgesteld zijn, is een rekgestuurde proef een eerste keuze.

Deze bijdrage geeft een overzicht van de tussentijdse resultaten bekomen uit een healing- en vermoeiingsonderzoek dat uitgevoerd wordt aan de Hogeschool Antwerpen in samenwerking met de TU Delft [ref.3-5]. De globale doelstelling in deze samenwerking is het onderzoek naar de invloed van het bindmiddel van asfaltgranulaat op het healing- en vermoeiingsgedrag van asfalt. In een eerste fase werd een literatuuronderzoek uitgevoerd naar healing en vermoeiing. Een tweede fase is ondertussen gestart waarbij de mogelijkheden van de Dynamic Shear Rheometer om healing en vermoeiing van bitumen en mastiek kwantitatief vast te leggen, worden geëvalueerd. Het bestaan van het fenomeen healing is reeds lang aangetoond, maar een goede, snelle en eenvoudige healingtest is nog niet voorhanden.

2. Healingonderzoek met DSR: plaat-plaat configuratie

2.1. Proefopstelling

Sinds de jaren '90 wordt de Dynamic Shear Rheometer- DSR gebruikt voor de reologische karakterisering van o.a. polymeren en bitumina. Met bepaling van G^* (dynamic shear modulus) en delta (fasehoek) in de SHRP en Superpave-karakterisering van bindmiddelen, werd de DSR onderdeel van het bitumenlab. Ondertussen heeft de DSR aan belang gewonnen en maakt in de meeste gevallen deel uit van het bindmiddelonderzoek. Dit betekent dat het inschakelen van de DSR voor healingmetingen een logische stap is.

Er werd gewerkt met een Smartpave MCR300 van Anton Paar Physica met dubbele peltierverwarming.

2.2. Oriënterende healingtesten op bitumen

In 2006 werden de eerste healing testen uitgevoerd op bitumen [ref.5,6] waarbij uitgegaan werd van de stelling dat healing kan gemeten worden aan de hand van een stijfheidsherstelling na een vermoeiing en/of een netto levensduurverlenging door het tussenvoegen van rustperioden in een vermoeiingsproef.

Vier bitumina (B35/50, RTFOT- en RCAT-verouderd, 50% nieuw + 50% RCAT-verouderd) ondergingen een vermoeiing met de klassieke DSR-proefopstelling (8 mm plaat-plaat geometrie, rekgestuurd). De aangestuurde rek werd vastgelegd als het punt in de LVER-curve waarbij de G^* met 60% verminderde in grootte.

Op deze manier werd elk bindmiddel –ongeacht de initiële stijfheid- met elkaar vergeleken. Testen werden uitgevoerd bij 25°C en 1,6Hz. Vooreerst werd een vermoeiingsproef uitgevoerd en vervolgens een discontinue proef waarbij gedurende 1 minuut een belasting wordt aangebracht en daarna 1 minuut het monster onbelast wordt. De healingfactor wordt berekend aan de hand van vergelijking $H=(\text{aantal belastingscycli met rust}/ \text{aantal cycli zonder rust})$. Tijdens de discontinue vermoeiingsproef kon een stijfheidsherstelling opgemerkt worden van 10%, in alle gevallen. Deze stijging was niet volledig te wijten aan de mogelijke afkoeling van het monster bij rust. Een levensduurverlenging bij de discontinue proef was echter niet het geval. Healingfactoren varieerden van 0,95 tot 1,15 waarbij de hoogste healingcoëfficiënt gevonden werd voor het RCAT-verouderd bindmiddel. Uit dit onderzoek werd geconcludeerd dat healingonderzoek in deze configuratie en levensduurdefinitie niet geschikt is.

Door Deloose [ref.5] werd een proefconfiguratie gebruikt van Kim et al [ref.7] voor de bepaling van de healingfactor en levensduurverlenging van bitumen, bij lagere temperatuur en hogere frequentie (15°C en 10 Hz). Hierbij wordt eerst een vermoeiingsproef uitgevoerd. Daarna wordt de levensduur bepaald als de piek in de curve van het product van G^* en het aantal cycli in functie van het aantal cycli.

De vermoeiingslevensduur wordt in 10 gelijke perioden verdeeld. De discontinue vermoeiingsproef wordt uitgevoerd als een sequentie van telkens één periode (1/10) van belasting gevolgd door 2 minuten rust. Deze cyclus wordt daarna nog 9 keer herhaald zodat het monster eenzelfde vermoeiingsduur heeft ondergaan. Hieruit wordt de discontinue

levensduur bepaald. Om de healing te evalueren worden de fatigue life index (FLI;(1)) en de healing potential index (HPI(2)) berekend.

$$FLI = \frac{N_{t,B} - N_{t,A}}{N_{t,A}} \quad (1)$$

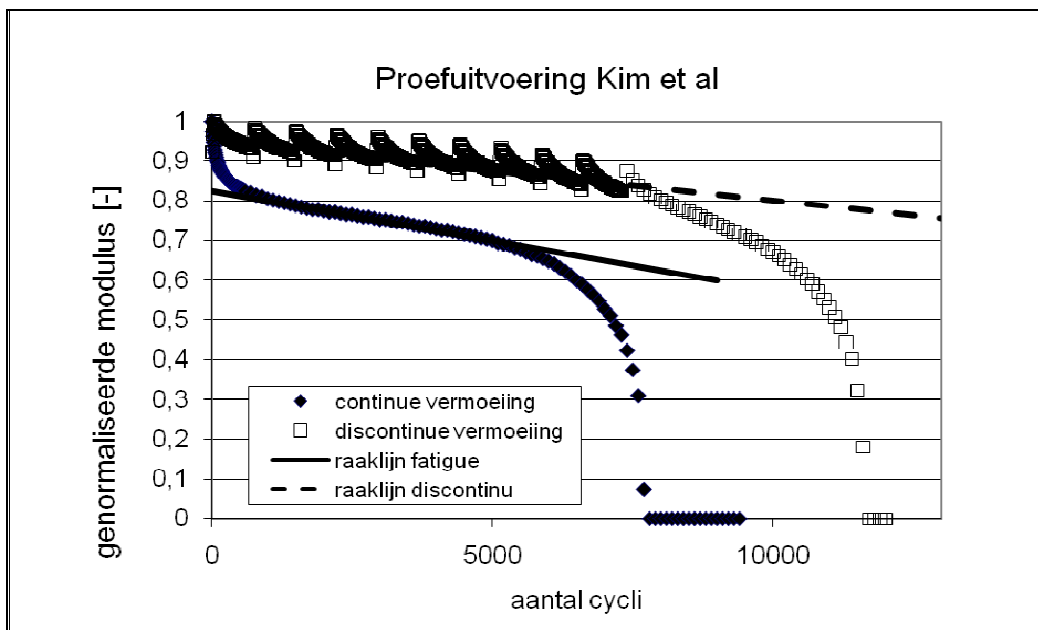
$$HPI = \frac{A - B}{A} \quad (2)$$

In de vergelijking voor FLI (1) staat $N_{t,B}$ voor de levensduur, bij de discontinue vermoeiingsproef; idem voor $N_{t,A}$ maar dan bij de continue vermoeiingsproef. A en B zijn de richtingscoëfficiënten in absolute waarden van de continue en discontinue vermoeiingslijn.

Als proefmonster werd een bitumen B35/50 gebruikt. De proeven werden uitgevoerd bij 15°C en 10Hz. Wanneer de vergelijkingen (1) en (2) worden gebruikt, dan verkrijgt men een waarde van ongeveer nul: geen healing. Er is dus geen levensduurverlenging vast te leggen. Er zijn kleine stijfheidherstellingen van ongeveer 5%. Een verschil met de metingen de eerdere metingen [ref. 6] is de stijfheidherstelling: bij hogere testtemperatuur en lagere frequentie kan een hogere stijfheidherstelling opgemerkt worden. Opgemerkt dient te worden dat in het oorspronkelijk onderzoek van Kim et al [ref.8] zandasfaltmengsels werden beproefd en niet alleen het bitumen.

Uit voorgaande kan besloten worden dat bij een discontinue rekgestuurde vermoeiingsproef op bitumen de levensduurverlenging teleurstellend is. Er werd buiten de stijfheidherstelling een healingfactor van ca. 1 bekomen, m.a.w. geen healing, zowel met het klassieke criterium van stijfheidsreductie met 50% als met de procedure van Kim et al.

Een krachtgestuurde continue en discontinue vermoeiingsproef bij 15°C en 10 Hz op bitumen leidden tot een FLI van 0,42 en een HPI van 0,6 (zie figuur 1). Dit zijn resultaten die aanleunen bij Kim et al.. Het verschil met een rekgestuurde vermoeiingsproef (FLI en HPI=0) is dus opmerkelijk.



Figuur 1: krachtgestuurde vermoeiings- en healingproef

In het onderzoek van Van den bergh [ref.4] is bovendien gebleken dat de reometer niet alle proefmanipulaties toelaat, bijvoorbeeld het aanleggen van één belastingscyclus gevolgd door 3 rustcycli is niet mogelijk. Dit is eigen ook aan andere reometers van andere producenten. Elke krachtgestuurde reometer heeft een minimumtijd nodig om een vooraf gedefinieerde verplaatsing (bijv. rek van 0,1%) te sturen tot de gewenste rek in het monster. In uitzonderlijke gevallen van grote rekken of zeer stijve monsters kan dit tot 1,5s duren. Dit betekent een ongecontroleerde dus ongewenste proefuitvoering. Voorgaande betekent dat een afgeleide van de asfalthealingproef (1 cyclus belasting en 3 cycli rust) met de reometer niet mogelijk is. Wat wel mogelijk is, is de tijdspanne waarop de rek wordt aangelegd tot de gewenste rek, kleiner maken t.a.v. de aangehouden constante rekperiode, bijvoorbeeld een vermoeiing van 30s. Indien het aantal van deze perioden beperkt is, zal de invloed klein zijn, in de meeste gevallen zelfs verwaarloosbaar.

2.3. Conclusie: healingmetingen op bitumen

Uit bovenstaande resultaten kan op dit moment geconcludeerd worden dat de DSR niet toelaat om een discontinue proef uit te voeren zoals dat gebeurt bij asfalt, nl. 1 periode met een rek- of krachtsturing gevolgd door een rustperiode. De DSR heeft een minimumtijd nodig van ca. 0,5 tot 1,5 seconde (afhankelijk van de frequentie en de stijfheid van het monster) om de krachtsturing aan te passen opdat een ingestelde rek in het monster bekomen wordt. Er dient overgegaan te worden naar een cyclus waarbij de belastingsduur groot is ten opzichte van de duur van vijf belastingsperioden: bijvoorbeeld 50 belastingscycli bij 10 Hz. De methode volgens Kim et al [ref.8] geeft voor een standaardbitumen geen healingcomponent voor de verlenging van de vermoeiingslevensduur. Er worden betere resultaten verkregen wanneer een krachtgestuurde vermoeiingsproef uitgevoerd wordt.

3. Healing van mastiek

Gezien in Kim et al [ref.8] zandasfaltmengsels wel leiden tot een HPI en FLI en door de tegenvallende healingresultaten van bitumen, werd overgegaan naar mastiek en mortel als proefmateriaal. Bovendien is de doelstelling om de healingfactoren van asfaltmengsels te bepalen en te vergelijken; vanuit reologisch, mechanisch en fysico-chemisch standpunt is het dan beter om mastiek en mortel te beproeven. Als laatste kan gesteld worden dat een bitumenlaag van 2 mm niet voorkomt in asfalt. Een materiaal dat beter overeenstemt met een asfaltcomponent is mastiek en mortel, die als dusdanig tussen de aggregaten aanwezig is en het mechanisch-reologisch gedrag mee bepaalt. Onderzoek heeft uitgewezen dat de bitumeneigenschappen wijzigen door de toevoeging van vulstof. De bitumen-fijne deeltjes verhouding, het bitumen- en vulstofftype beïnvloeden de mastiek en morteleigenschappen. Uit onderzoek [ref.4] blijkt dat het type vulstof (zwak, sterk, teruggewonnen uit AG) een invloed heeft op de reologie. Dit is logisch te verklaren: vulstof heeft een verstijvend vermogen - vertaald naar een hogere G^* - waarbij de samenstelling van de vulstof een rol speelt in de mate van verstijving. Dit fenomeen werd al vastgelegd in de delta R&B-test zoals gebruikt in Prado-Win. De vraag is dus wat de invloed van het type vulstof op de vermoeiing

en de healing en in het bijzonder is, wanneer AG-vulstof deel uitmaakt van de samengestelde mastiek. Indien uit healingtesten op mastiek een healingfactor bepaald zou kunnen worden, kan dit verder leiden tot onderzoek naar de invloed van bijv. AG-bitumen en vulstoftype, compatibiliteit van bindmiddelen enz. .

Een onderzoek naar het healinggedrag van mastiek door gebruik te maken van de plaat-plaat configuratie van de DSR werd uitgevoerd. Gezien de vele mogelijkheden –en ook beperkingen- om healingproeven uit te voeren en om de vermoeiingslevensduur te definiëren, werden de eerste proeven uitgevoerd met het vertrouwde criterium voor de vermoeiingslevensduur: een reductie van 50% stijfheid of G^* in dit geval. Er werden proeven gedaan met mastieken samengesteld met verschillende bindmiddelen: B35/50, RTFOT verouderd en RCAT-verouderd bindmiddel. Deze oriënterende proeven gaven een toename van de vermoeiingslevensduur in de orde van 35% bij 25°C en 1,6 Hz voor de mastiek met B35/50. Er is eveneens een stijfheidtoename te zien bij rustperioden: tot 90% herstelling van de stijfheid na 1 minuut rust. Wanneer mastiek met RCAT-verouderd bindmiddel wordt beproefd, dan verlengt de vermoeiingslevensduur met 79%. Wanneer we deze healingfactoren van resp. 1,35 en 1,79 vergelijken met klassieke healingfactor in de grootteorde van 4 of meer, dan zijn de healingfactoren van mastiek bij deze testcondities aan de lage kant. Uiteraard is het niet onbekend wat het effect van het totale mengsel is: mastiek is verschillend aan asfalt. Maar wanneer we dit vergelijken met de bevindingen van Kim et al op zandasfalt dan lijken dit toch zinvolle resultaten. Dat de mastiek met RCAT-verouderd bindmiddel een hogere healingfactor aangeeft, is opmerkelijk.

Conclusie

De plaat-plaat configuratie met de DSR levert in oscillatie en zelfs rekgestuurd zinvolle resultaten die te vergelijken zijn met de FLI en HPI van zandasfaltmengsels. Dit biedt het perspectief dat het healinggedrag kan gemeten worden aan de hand van de mastiek. Meer onderzoek, o.a. ook in correlatie met het vermoeiings- en healingsgedrag van asfaltmengsels is noodzakelijk om deze proefmethode te valideren.

4. Healingonderzoek met DSR: mortelcilinderopstelling

4.1. Opzet en proefopstelling

Aan de Universiteit van Delft werd binnen het LOT-project een nieuwe proefopstelling met de DSR ontwikkeld [ref.8] om o.a. vermoeiingsproeven uit te voeren op mortel. Op cilindervormige proefstukken van mortel wordt een krachtgestuurde vermoeiingsproef uitgevoerd. De proefstukken zijn aan de boven- en onderzijde voorzien van metalen ringen waarlangs de DSR-klemmen hun verplaatsing en kracht kunnen overbrengen op het mortelmonster. De proefstukken hebben een totale lengte van 20 mm waarvan de middelste zone van 10 mm een diameter heeft van 6mm. Voor een gedetailleerde beschrijving van het apparaat, de proefuitvoering en de resultaten wordt verwezen naar [ref.8].

Met de operationele proefopstelling, waarmee vermoeiingsproeven werden uitgevoerd voor het LOT-project, werden eveneens healing-metingen uitgevoerd in het kader van een doctoraal onderzoek [ref.4] aan de TUD en de Artesis Hogeschool Antwerpen.

De mortelproefstukken worden onderworpen aan een vermoeiingsproef met constante oscillatie torsie ("shear fatigue test"). Hierbij wordt aan de bovenste klem een sinusoidale hoekrotatie gegeven resulterend in een shear-rek in het monster. De torsie wordt constant gehouden (applied torque [μNm]) en de hoekverdraaiing gemeten (displacement [rad]). Door rekening te houden met de inertia van het toestel, het meetlichaam en het proefstuk wordt de fasehoek [rad] en de gemiddelde piekwaarde voor torsie op het proefstuk berekend. De vermoeiingsproef werd uitgevoerd in continue oscillatie waarbij om de 10s een meetpunt geregistreerd werd als gemiddelde van de piekwaarden van de 3 laatste seconden. De vermoeiingslevensduur werd bepaald bij 15°C en 10Hz, als het punt waarbij het proefstuk volledig bezweken was (fasehoek van 180°). Voor de healing test, dat geen standaardinstelling is in de reometersoftware, werd een speciale procedure uitgeschreven met twee wederkerende fases in een luscyclus tot er breuk optreedt. De eerste fase is een belasting met constante torsie gedurende 30 cycli bij 10Hz (3s) met onmiddellijk daaropvolgend een tweede fase met een rustperiode van 9s. Daarna wordt de eerste fase hernomen. Om de 12s werd een meetpunt geregistreerd, telkens het gemiddelde van de belastingsfase van 3s.

4.2. Aanmaak van de proefstukken en materiaalgebruik

De mortel is het mengsel samengesteld uit een fractie aggregaat kleiner dan 0,5 mm en bitumen. Voor de aggregaatfractie werd de doorval van het droge aggregaat van een referentieasfaltmengsel (AB-3B, onderlaag) door de zeef van 0,5mm beschouwd.

De proefstukken werden telkens gemaakt in reeksen van 5 stuks. Voor de mortels werd in deze eerste fase gekozen voor een variatie in samenstelling (verhouding aggregaat/bindmiddel) en aard (verouderd en niet-verouderd).

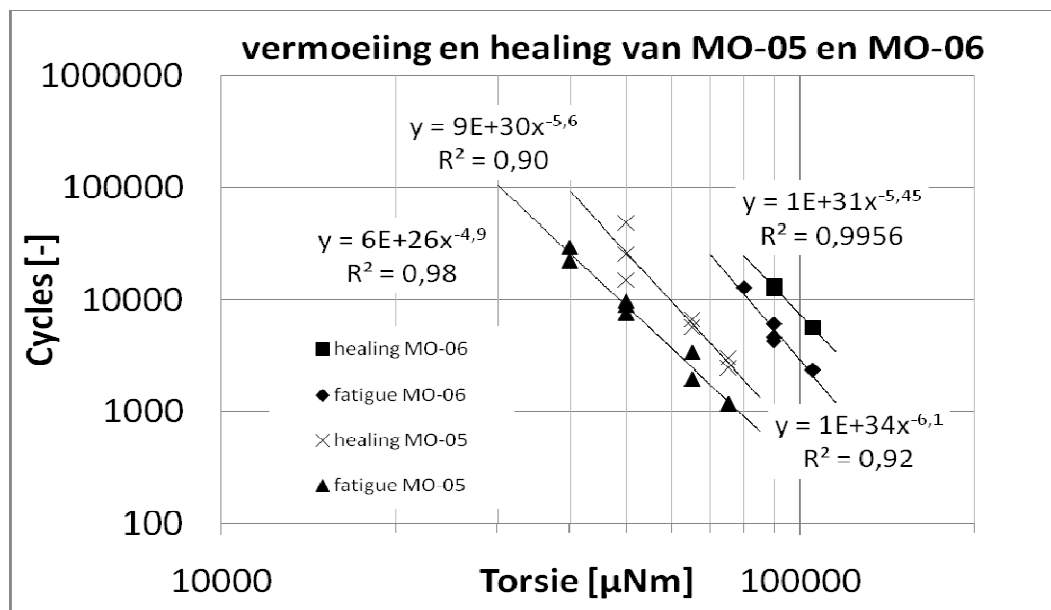
Mortel I.D.	Mortelsamenstelling (m/m%)				(f+a)/b m/m%
	filler	Agg < 0,5mm	Binder		
MO-02	16,4	51,6	32	Virgin	2,1
MO-03	16,4	51,6	32	Virgin	2,1
MO-04	16,4	51,6	32	RCAT-aged	2,1
MO-05	20,4	64,0	15,6	Virgin	5,4
MO-06	20,4	64,0	15,6	RCAT-aged	5,4

Tabel 1: samenstelling van de mortels

4.3. Testprogramma

De proeven werden uitgevoerd bij 15°C en 10 Hz. Voor de krachtgestuurde vermoeiingsproef werd een constante torsie aangehouden totdat het proefstuk bezweek. Hieruit werd de vermoeiingslevensduur berekend.

In onderstaande figuur 2 worden de resultaten uit de vermoeiingsproef en de healingproef weergegeven samen met de gemiddelde vermoeiingslijn en de "healing lijn".



Figuur 2: healing en vermoeiingslijn van mortelproefstukken

Per torsielevel kan een aparte healingfactor bepaald worden. Een healingfactor kan berekend aan de hand van het einde-levensduurcriterium zoals hierboven gesteld.

De discontinue vermoeiingslijn is boven de continue vermoeiingslijn gelegen, hetgeen duidt op een levensduurverlenging. Bij een gelijk torsielevel is de netto-levensduur (aantal belastingscycli) van de proefstukken bij discontinue belasting hoger dan bij de continue belasting. Deze healing factor is voor MO-05 gemiddeld 2,8 en voor MO-06 2,2. De spreiding van de resultaten bij de healingproef is groter dan bij de vermoeiingsproef.

Om de invloed van AG-binder op de healingfactor te bepalen, werden mortels verouderd door middel van het RCAT-apparaat. Een algemene waarneming is dat de verouderde mortel, in vergelijking met zijn niet-verouderde variant, een hogere vermoeiingslevensduur hebben en bovendien een healing factor heeft die gelijkwaardig is.

Verder onderzoek zal moeten uitmaken of het discriminerend vermogen van deze testopstelling voldoende is om slecht healende mengsels te onderscheiden van goed healende mengsels. Verder zal dieper ingegaan worden op de bepaling van het einde-levensduurcriterium en verschillende healing-settings (duur belasting en rust).

5. Conclusie

In deze bijdrage werd een overzicht gegeven van oriënterende proefmethoden om het healingsgedrag van bitumen, mastiek en mortel te meten. Hierbij werd gebruik gemaakt van

de Dynamic Shear Rheometer (MCR300) van de Hogeschool Antwerpen en de AR2000 van de TU Delft.

Een belangrijke conclusie uit deze tweede fase van het onderzoek is dat het meten van healing op bitumen –volgens een verplaatsingsgestuurde oscillatie- zich alleen vertaalt als een stijfheidherstelling bij een rustperiode zonder reflectie op de vermoeiingslevensduur. Wanneer krachtgestuurde proeven worden uitgevoerd, is er wel een (kleine) levensduurverlenging vast te leggen.

Een tweede belangrijke conclusie betreft het meten van healing op mastiek met de plaat-plaatconfiguratie. Er kan een healingfactor bepaald worden aan de hand van levensduurverlenging. Verouderd bindmiddel leidt tot een hogere healingwaarde. Het onderzoek wordt verdergezet.

De proefopstelling met cilindrische mortelproefstukken, zoals gebruikt in het LOT-project [ref.8] is geschikt om een typische vermoeiingslijn op te stellen en healingfactoren te bepalen van bitumineuze mortels voor een vergelijkend onderzoek. De healingfactoren zijn van dezelfde grootte-orde als voor asfalt. Deze proefopstelling is beloftevol en verdient diepgaander onderzoek.

Dankwoord

De auteurs willen graag de onderzoekers en technici van het Laboratorium Weg- en Railbouwkunde van de TU Delft en van de onderzoeksgroep Wegenbouwkunde van de Hogeschool Antwerpen danken voor hun bijdrage aan dit onderzoek.

6. Referenties

[ref.1] Van den bergh, W. (2006) "Een aanzet tot healingonderzoek in Vlaanderen", bijdrage Wegenbouwkundige Werkdagen 2006, CROW.

[ref.2] Huurman, M., Hopman, P. (2003). "De effecten van hergebruik op healing en vermoeiing in StAB", rapport, NPC, Utrecht.

[ref.3] Van den bergh, W. (2008). "Research on the applicability of DSR for fatigue and healing measurement of bituminous binders and mastics", Intern onderzoeksrapport, Hogeschool Antwerpen, Onderzoeksgroep Wegenbouwkunde, Antwerpen.

[ref.4] Van den bergh, W., "Onderzoek naar de invloed van AG-binder op de duurzaamheid van asfaltmengsels, i.h.b. de healingfactor", lopend doctoraal onderzoek.

[ref.5] Deloose, K. (2008). "Healingonderzoek op bitumen", thesis, Hogeschool Antwerpen, Onderzoeksgroep Wegenbouwkunde, Antwerpen

[ref.6] Kuypers, F., Van den bergh, W. (2007) "Healingonderzoek van bitumen en mastiek met (kunstmatig) verouderd bitumen", tussentijds rapport, Hogeschool Antwerpen, Onderzoeksgroep Wegenbouwkunde, Antwerpen

[ref.7] Kim, Y.R., Little, D.N., Lytton, R.L. (2001) "Use of dynamic mechanical analysis (DMA) to evaluate the fatigue and healing potential of asphalt binders in sand asphalt mixtures", Annual Meeting of the Association of Asphalt Paving Technologists 2002.

[ref.8] Huurman, M. (2007)"Lifetime Optimisation Tool – Main Report", Delft University of Technology, Laboratory of Road and Railway Engineering, Report 7-07-170-1, Delft