

Het healingmechanisme van bitumen nader verklaard

Greet Leegwater
Technische Universiteit Delft & TNO

Sandra Erkens
Rijkswaterstaat & Technische Universiteit Delft

Tom Scarpas
Technische Universiteit Delft

Samenvatting

Asfalt heeft de aantrekkelijke eigenschap dat het zichzelf kan herstellen na schade. Er is echter tot op heden geen betrouwbare methode om de healingcapaciteit van een asfaltmengsel te bepalen. Bij het healingproces van een discrete scheur spelen twee processen een rol, namelijk het in contact komen van de oppervlakken van de scheur; het zogenaamde bevochtigen, en het vermogen van deze oppervlakken in contact om kracht over te dragen; de intrinsieke healing. In dit artikel wordt een testmethode gepresenteerd welke in staat is om de verschillende parameters die een rol spelen gedurende de healing te variëren om zo het belang van de processen in healing bloot te leggen. Met behulp van deze testmethode is de mate van healing van bitumen in de tijd onderzocht en de invloed van normaalkracht gedurende healing. Op basis van de gepresenteerde resultaten kan worden geconcludeerd dat bevochtiging van het scheuoppervlak tenminste 50% van de macroscopisch geobserveerde healing bepaalt voor pure bitumen. Dit inzicht kan worden gebruikt om een materiaalmodel voor healing van asfalt te formuleren, op basis waarvan een relatief eenvoudige healingtest kan worden ontworpen waarmee de healingcapaciteit van asfaltmaterialen onderling kan worden vergeleken.

Steekwoorden: healing, healingmodel, directe trekproef, bitumen

1 Inleiding

Reeds in de jaren 60 van de vorige eeuw is experimenteel vastgesteld dat asfalt een zelfherstellend vermogen bezit (Bazin and Saunier 1967). Dit onderzoek demonstreerde dat volledig bezweken asfaltproefstukken en proefstukken waarvan de stijfheid was afgenomen als gevolg van vermoeiing, gedurende rustperiodes hun sterkte of aantal lasten tot bezwijken konden herstellen. Het geobserveerde herstel werd “healing” genoemd en is sindsdien veelvuldig bestudeerd. Deze onderzoeken hebben redelijk inzicht opgeleverd over de parameters die invloed hebben op mate de healing van asfalt. Echter, het mechanisme dat healing drijft is tot op dit moment nog steeds onduidelijk.

Omdat wordt verwacht dat healing bijdraagt aan de levensduur van een wegconstructie wordt in de meeste landen healing in rekening gebracht in het constructieve wegontwerp (Van den Bergh 2012). Het constructieve wegontwerp bestaat doorgaans uit een berekening met een in het laboratorium bepaalde weerstand tegen vermoeiing, zo ook in Nederland. Bij het bepalen van de weerstand tegen vermoeiing van een asfaltproefstuk in het laboratorium wordt een continue belasting opgelegd. Hierdoor heeft het asfalt in het laboratorium weinig gelegenheid om te healen, terwijl er in de praktijk altijd rustperiodes aanwezig zijn. De assen van een vrachtwagen hebben nu eenmaal een bepaalde onderlinge afstand, daarnaast is er ook een rusttijd tussen de assen van twee verschillende vrachtwagens vanwege volgafstanden. Voor het wegontwerp wordt dit gebrek aan rust in het laboratorium verdisconteerd door een factor te introduceren waarmee het aantal lastherhalingen tot bezwijken bepaald in het laboratorium, mag worden vermenigvuldigd om het aantal lastherhalingen dat kan worden weerstaan in de praktijk te berekenen. Deze factor, de zogenaamde healingfactor is in Nederland een vaste factor van 4. Deze factor is gebaseerd op uitgebreid empirisch onderzoek uitgevoerd in het verleden (Westera 1993, Westera 1994). In de huidige ontwerprichtlijnen is aan deze factor een omreken tabel toegevoegd met factoren voor asfaltmengsel gemaakt met bitumen met hoge stijfheid en/of lage bitumengehaltes, waarvan wordt aangenomen dat deze een beperkter healend vermogen hebben. Er komen echter steeds nieuwe asfalttypen op de markt waarbij er discussie is over het healend vermogen en de vraag hoe dit kan worden verdisconteerd in het wegontwerp.

Ondanks dat er in het verleden al een aantal uitgebreide studies zijn uitgevoerd op het gebied van healing, is er geen (internationale) consensus over een proef die de healingcapaciteit van asfalt of bitumen kan vastleggen. Het gebrek aan consensus wordt voornamelijk veroorzaakt door de proefafhankelijkheid van de gevonden healing; hetzelfde asfaltmengsel kan in één onderzoek veel meer healingcapaciteit laten zien dan in een volgend onderzoek waarbij een andere testmethode is gebruikt. Een mogelijke verklaring voor de grote verschillen is het feit dat de healingproeven doorgaans een aangepaste versie zijn van de bestaande vermoeiingsproeven. Bij interpretatie van vermoeiingsproeven is nog steeds veel onduidelijkheid over de werkelijke schadeontwikkeling (Di Benedetto, De La Roche et al. 2004, Mangiafico, Sauzéat et al. 2015). Aangezien schade het startpunt is van healing wordt al deze onduidelijk in schade ook doorgegeven aan de geobserveerde healing.

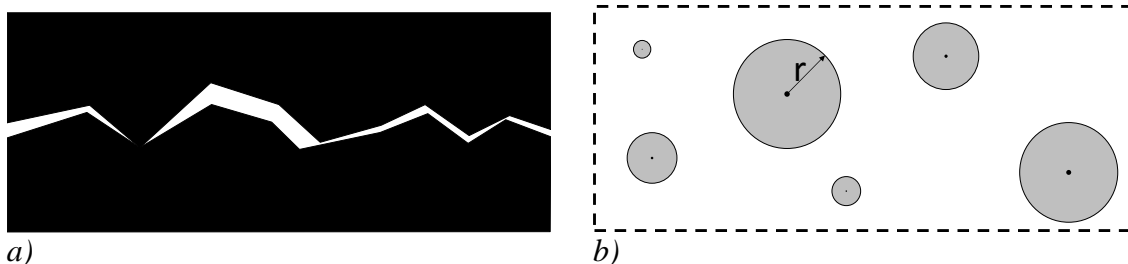
In deze paper wordt een nieuwe testmethode gepresenteerd die als doel heeft de verschillende mechanismen die healing sturen te onderscheiden. Op het moment dat de mechanismen duidelijk zijn, wordt het mogelijk een proef te ontwikkelen die het materiaalgedrag op het gebied van de belangrijkste healingmechanismen kan toetsen. Zo kan een betrouwbare voorspelling worden gedaan van de healingcapaciteit ten opzichte van een referentie. Deze proef zou bijvoorbeeld uitspraken kunnen doen over het effect van recycling op de healingcapaciteit.

Dit paper begint met het beschrijven van een materiaalmodel voor healing van asfalt en bitumen. Vervolgens wordt een nieuw ontwikkelde testmethode voor het bepalen van healing gepresenteerd. Er wordt een aantal voorlopige testresultaten gepresenteerd. Op basis van de testresultaten worden ontwikkelde inzichten in healing beschreven. Tot slot worden conclusies getrokken en wordt een korte beschrijving gegeven van het toekomstige werk in het healingonderzoek.

2 Modelbeschrijving van healing

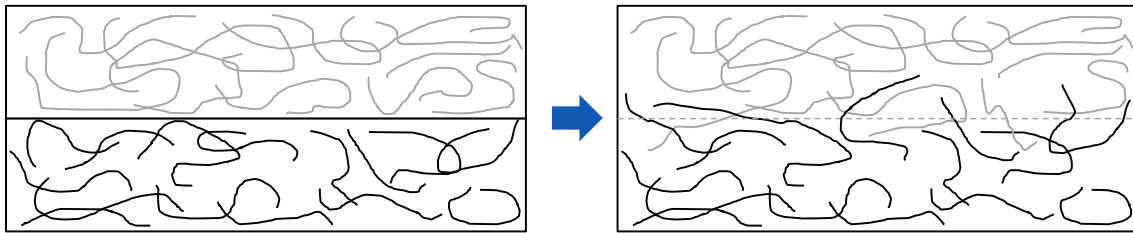
In de polymeertechnologie is een model ontwikkeld om het healing van scheuren te beschrijven (Wool and O' Connor 1981). Dit model is inmiddels ook een aantal keer gebruikt om healing van asfalt te beschrijven (Kim, Little et al. 1990, Little and Bhasin 2007, Bhasin, Little et al. 2008). Dit model onderscheidt twee belangrijke processen in healing, namelijk in de eerste plaats het 'in contact komen' van oppervlakken en in de tweede plaats het vermogen van oppervlakten in contact om kracht over te dragen.

Op het moment dat twee oppervlakten bij elkaar worden gebracht is er doorgaans geen volledig contact tussen beide oppervlakten. Een oppervlak heeft een mate van ruwheid en alleen de uitstekende delen zijn in contact. Voor een plastisch materiaal zoals bitumen ontwikkelt het contactoppervlak zich in de tijd. Initieel zijn er een aantal contactpunten welke elk groeien in de tijd, dit wordt bevochtigen genoemd en is schematisch weergegeven in Figuur 1. Parameters die dit proces beïnvloeden zijn de normaalkracht op het contactoppervlak, de oppervlakruwheid, de visco-elastische eigenschappen van het materiaal en de adhesie van het materiaal (Johnson, Kendall et al. 1971).



Figuur 1 a) Zijaanzicht van twee scheuroppervlakken naderen b) Bovenaanzicht van een gedurende bevochtiging, oppervlak in contact is weergegeven in grijs, contact ontstaat in een enkel punt en groeit vervolgens radiaal.

Het oppervlak, dat in contact is, heeft vervolgens een bepaalde capaciteit om belasting over te dragen, welke zich ontwikkelt in de tijd. Dit proces wordt de intrinsieke healing genoemd. Op het moment dat de oppervlakken werkelijk met elkaar in contact komen ontstaat adhesie tussen de moleculen (Kendall 2001). Deze adhesie zorgt dat er instantaan kracht kan worden overgedragen tussen de oppervlakken. Daarnaast verplaatsen bitumen moleculen zich als gevolg van Browniaanse beweging over de interface tussen de twee oppervlakken, waardoor moleculaire bruggen ontstaan over de interface (i.e. reptatie). Door dit proces zal de hoeveelheid belasting die kan worden gedragen door de contactzone verder toenemen. Dit proces eindigt als er sprake is van volledige homogenisatie van het materiaal en er geen sprake meer is van een interface. Dit proces is schematisch weergegeven in Figuur 2. Dit proces van moleculaire homogenisatie wordt bepaald door de chemische eigenschappen van de bitumen (polariteit, molecuulstructuur en molecuulgewicht). Aangezien de chemische eigenschappen van een bitumen in principe constant zijn, wordt aangenomen dat de intrinsieke healing van een materiaal bij dezelfde temperatuur een constante waarde heeft.

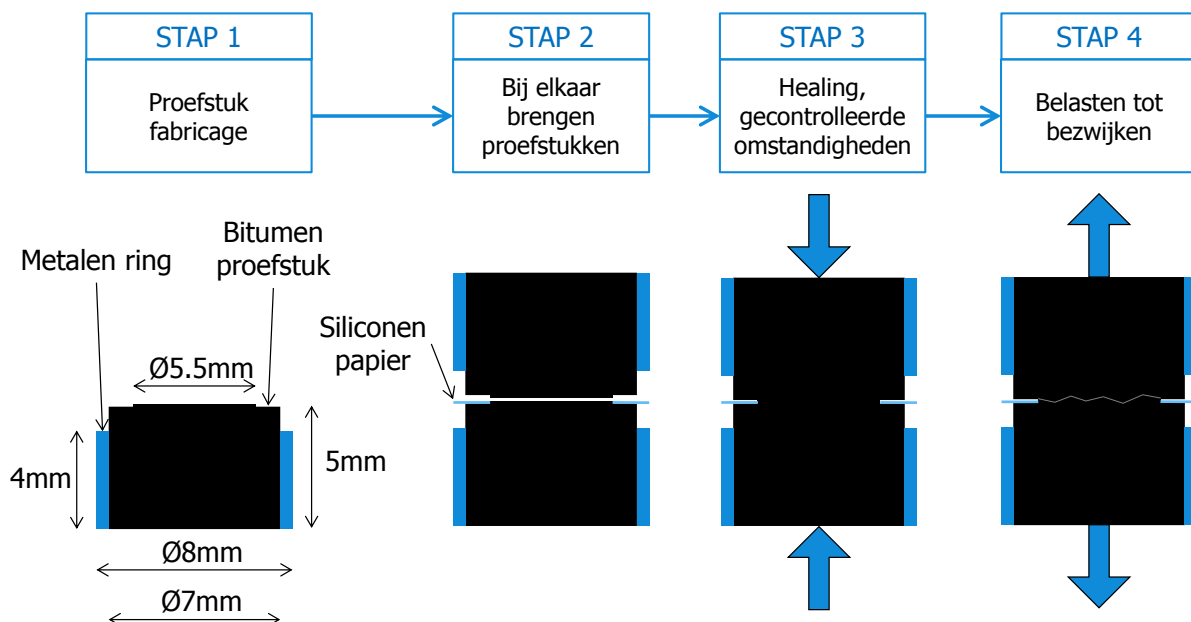


Figuur 2 Links zijn twee bitumenoppervlakken net in contact gebracht, deze zijn in eerste instantie verbonden middels adhesie. Onder invloed van Browniaanse beweging steken (delen van) de bitumenmoleculen de interface over, als gevolg zal de interface uiteindelijk verdwijnen.

3 Testmethode voor het bepalen van healing van een discrete scheur

3.1 Ontwerp testmethode

Een nieuwe testmethode is ontwikkeld om de sterkteontwikkeling van twee bitumenoppervlakken in contact te kunnen bepalen onder verschillende condities. Deze testmethode gaat ervanuit dat de schade die healt een fysieke discontinuïteit is in het materiaal. In de proef wordt de meest extreme versie van een discontinuïteit beproefd, namelijk twee losse bitumen proefstukken. In de proef worden twee bitumenoppervlakken bij elkaar gebracht onder gecontroleerde condities en wordt bekeken hoe de sterkte van het contact zich ontwikkelt terwijl de condities worden gevarieerd. De samengestelde proefstukjes worden vervolgens uit elkaar getrokken met behulp van een DSR, die is uitgerust met een belastingsensor voor normaalkracht en een temperatuurkamer (Anton Paar, EC Twist 502). Een schematische opzet van de proef is gepresenteerd in Figuur 3.



Figuur 3 Schematische opzet van proefstuk ontwerp en testmethode

De bitumenproefstukjes hebben een speciaal ontworpen vorm, zie links in Figuur 3. Om de bitumen zit een roestvrijstalen ring, opdat de proefstukken kunnen worden vastgepakt en bevestigd in de opstelling. Daarnaast is gekozen voor een speciale proefstukvorm waardoor er

een vast contactoppervlak is op het moment dat twee proefstukjes bij elkaar worden gebracht. Er zijn rubberen mallen gefabriceerd om de proefstukken op deze manier te kunnen maken (Figuur 4).



Figuur 4 Rubberen mal voor het vervaardigen van de proefstukjes

4 Materialen en testprogramma

4.1 Materialen

Alle proeven zijn uitgevoerd met straight run 70/100 pen bitumen afkomstig van Kuwait Petroleum en het materiaal is gebruikt zoals ontvangen. Dit is een relatief zachte bitumen waarbij een healingfactor van 4 gebruikt mag worden voor constructieve berekeningen.

4.2 Proefstuk vervaardiging

Bitumen en de mallen worden beiden verwarmd tot 165°C gedurende 1 uur, waarna de bitumen in de mallen wordt gegoten. De bovenkant van de proefstukjes, zit onderin de mal. Het geheel wordt vervolgens afgekoeld tot kamertemperatuur gedurende 30 minuten. Aansluitend worden de mallen gedurende 1 uur in de vriezer geplaatst bij -24°C. De proefstukken worden uit de vriezer gehaald om overschot aan bitumen dat boven de mal uitkomt te verwijderen. Dit gebeurt met een scherp, heet mesje. Tot het moment van 'ontkisten' wordt het sample weer in de vriezer geplaatst. Ontkisten wordt gedaan in een temperatuur gecontroleerde ruimte van 14°C +/-1°C. Nadat de proefstukjes uit de mal worden gehaald, worden de ringen aan de buitenzijde voorzichtig schoongemaakt met methyleenchloride om de hanteerbaarheid en grip van de proefstukken te verbeteren. Initiële resultaten hebben laten zien dat de betrouwbaarheid van de resultaten verbetert als de bitumen 48 uur de tijd krijgt om te besterven.

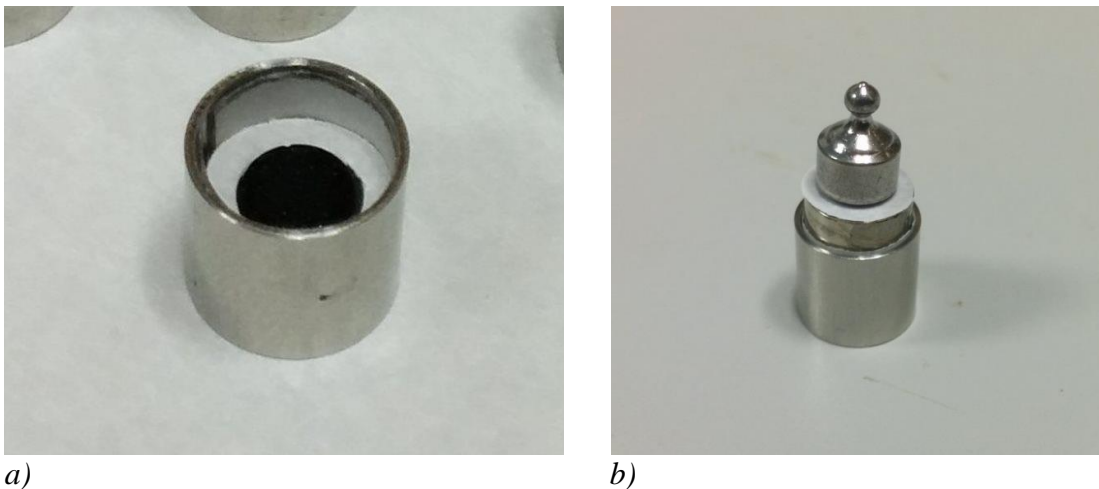
4.3 Conditie tijdens het bijeenbrengen en healen

De proefstukjes kunnen op verschillende manieren bij elkaar worden gebracht. De eerste manier is om de proefstukken bij elkaar te brengen in een geconditioneerde ruimte. In deze ruimte kunnen de proefstukken voor een lange tijd verblijven om te healen, van dagen tot weken. Een volgende manier is dat de proefstukken in de DSR bij elkaar te brengen, echter de healingperioden zijn dan beperkt vanwege grote doorlooptijden van testseries.

Indien de proefstukken bij elkaar worden gebracht in de klimaatruimte wordt de volgende procedure gevolgd:

Proefstukjes worden uit de vriezer gehaald en krijgen 1 uur in de klimaatruimte van 14°C +/-1°C voor acclimatisatie. Om ervoor te zorgen dat de proefstukken gedurende de healingperiode netjes op elkaar blijven zitten, zijn opslagcontainertjes gemaakt, van ronde RVS buisjes met een binnendiameter van 8,5mm. Deze opslagcontainertjes zijn aan de

binnenkant bekleed met siliconenpapier. Eerst wordt één proefstuk geplaatst in het opslagcontainertje, hier bovenop wordt een tweede proefstukje op z'n kop geplaatst. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 3. Tussen beide proefstukjes wordt een rond stukje siliconenpapier geplaatst met een gat, waardoor het contactoppervlak tussen beide proefstukjes wordt gecontroleerd, dit papier is zichtbaar in Figuur 5a. Als de twee proefstukjes bij elkaar zijn gebracht wordt er een gewicht bovenop geplaatst, zoals weergegeven in Figuur 5b. In dit geval is een gewicht gebruikt van 1 gram, wat samen met het eigengewicht van het bovenste proefstukje leidt tot een kracht op het contactoppervlak van ongeveer 0,016 N. De tijd dat de proefstukken hebben om te healen wordt gevarieerd door de proefstukken langer of korter in de opslag te plaatsen. Nadat de healingtijd is verstreken worden de proefstukken overgebracht naar een koelkast $-2\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ tot het moment van testen (maximaal 24 h later).



Figuur 5 a) Opslagcontainer met daarin zichtbaar het siliconenpapier dat wordt gebruikt om contactoppervlak te controleren b) Samengestelde proefstuk met gewicht

Indien de proefstukjes bijeen worden gebracht in de DSR vindt ook de healing plaats in de klimaatkamer van de DSR. Allereerst worden de proefstukjes uit de vriezer gehaald en in een koeling geplaatst van $-2\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vervolgens wordt er één sample in de benedenklem van de DSR geplaatst en één in de bovenklem. De klimaatkamer wordt daarna naar een temperatuur van $14\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ gebracht. Om temperatuurstabilisatie in het proefstuk te bereiken wordt deze temperatuur 10 minuten vastgehouden. Hierna worden de proefstukjes bij elkaar gebracht met een snelheid van $0,01\text{ mm/s}$, tot het gewenste krachtniveau bij assemblage. Vanaf het moment dat dit krachtniveau is bereikt, wordt de verplaatsing constant gehouden. Op dit moment begint de healingtijd van het sample, deze loopt tot het moment dat het proefstuk uit elkaar wordt getrokken. Vanwege de aard van bitumen relaxeert de opgelegde assemblagekracht binnen enkele minuten volledig weg.

4.4 Testcondities directe trektest

Na een periode van healing worden de samples belast tot bezwijken. Dit gebeurt bij $10\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. De samples uit de klimaatkamer worden ingebouwd in de DSR klemmen, waarna de temperatuur naar $10\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ wordt gebracht, vervolgens is er 10 minuten voor het verkrijgen van temperatuurstabilisatie. Alle samples van beide assemblage methodes worden getest op een vast rekniveau van $0,5\%/s$. Bij deze temperatuur bezwijken de samples plastisch als bezwijkkracht wordt de pieklast van het kracht-verplaatsingsdiagram genomen.

4.5 Testprogramma

Het testprogramma bestaat uit twee delen aansluitend bij de twee assemblagemethoden. Het testprogramma voor healing in de klimaatkamer heeft als doel het healinggedrag in de tijd ander te bestuderen, hierbij zijn de healingtijden als volgt gevarieerd van 0,1 uur; 1 uur; 24 uur en 168 uur (1 week).

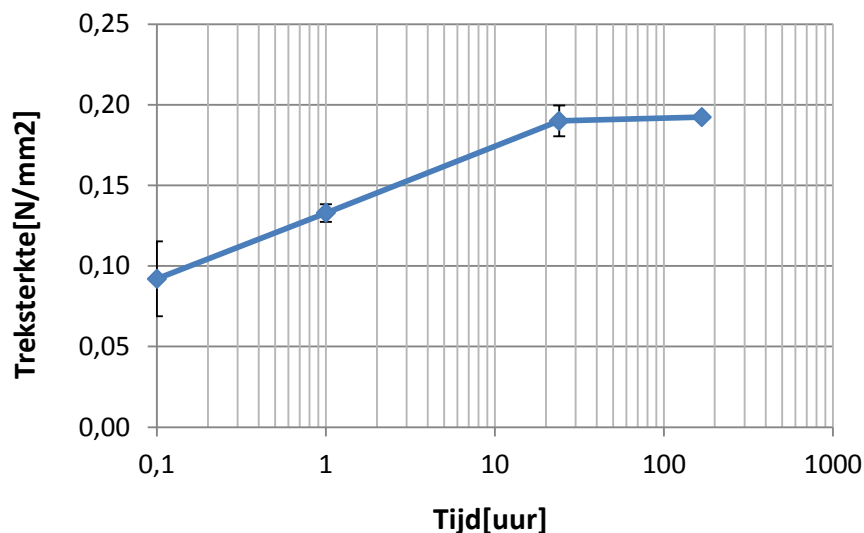
De testserie welke bij elkaar is gebracht in de DSR bestudeert de invloed van kracht tijdens het bijeenbrengen van de proefstukken, drie krachtniveau's zijn opgelegd; 0,05 N; 0,5 N en 1 N. De proefstukken hebben de minimaal mogelijke tijd gekregen om te healen, indien bovenstaande assemblagemethode wordt gevolgd. Onmiddellijk na het bijeenbrengen van de samples is gestart met het koelen van de klimaatkamer naar de testtemperatuur van $10\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$. De healingperiode is in dit geval dus de tijd die nodig is om de samples te koelen tot $10\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ (6 minuten), plus 10 minuten temperatuurstabilisatietijd, in totaal 16 minuten. Gedurende deze healingsperiode was de temperatuur tussen de 14 en 9°C , terwijl de normaalkracht nagenoeg 0N was.

5 Resultaten

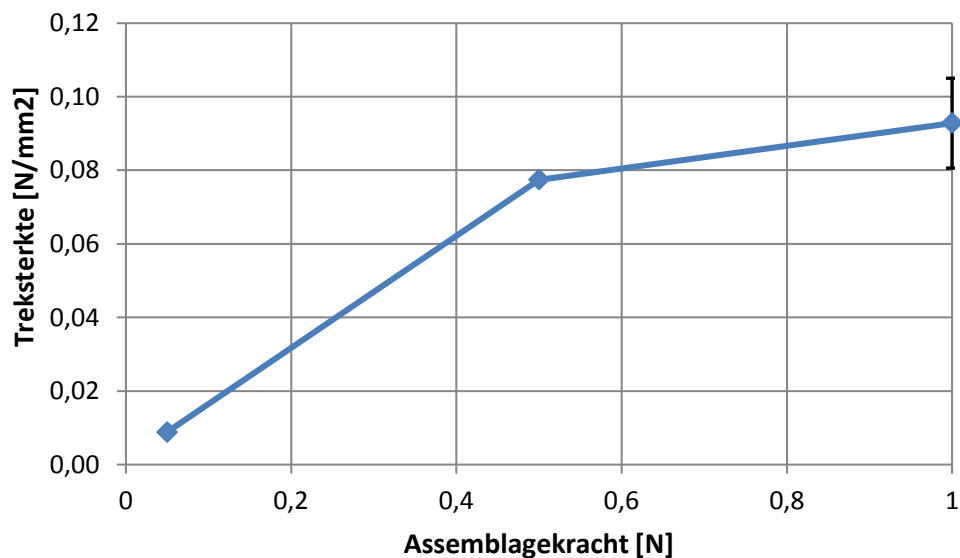
In deze paragraaf worden de resultaten van het onderzoek gepresenteerd. In de volgende paragraaf zullen de resultaten worden geanalyseerd en geïnterpreteerd.

In Figuur 6 wordt de gemeten sterkte van de proefstukken versus de healingtijd gegeven. De grafiek laat zien dat de treksterkte na 6 minuten al een aanzienlijke waarde heeft, welke zich ontwikkelt in de tijd. De treksterkte lijkt na 24 uur niet significant meer toe te nemen.

Figuur 7 laat het verband zien tussen de kracht die is opgelegd tijdens het samenbrengen van de proefstukken en de gemeten sterkte bij bezwijken. Hier is duidelijk te zien dat de die kracht nodig is om het samengestelde proefstuk te laten bezwijken evenredig toeneemt met de kracht die is opgelegd bij het samenbrengen van de proefstukken.



Figuur 6 Treksterkte versus healingtijd



Figuur 7 Treksterkte versus de opgelegde kracht gedurende assemblage

6 Discussie

Zoals verwacht neemt de hoeveelheid healing toe als functie van de healingtijd. Twee belangrijke observaties kunnen worden vermeld bij de analyse van de ontwikkeling van healing in de tijd zoals weergegeven in Figuur 6.

In de eerste plaats wordt na 24 uur een soort plateauwaarde bereikt. Dit wijst erop dat na 24 uur een volledige healing is bereikt. Dit lijkt snel, maar men moet in overweging nemen dat dit geldt voor een pure, onverouderde, redelijk zachte bitumen. Healing in asfalt zal vermoedelijk aanmerkelijk trager zijn doordat dit materiaal stijver is en een hogere viscositeit heeft.

Een tweede interessante observatie is dat na 6 minuten healing reeds ongeveer 50% van de plateauwaarde is gerealiseerd. Zoals eerder is geïntroduceerd in hoofdstuk 2 wordt aangenomen dat de macroscopisch geobserveerde healing bestaat uit een combinatie van het bevochtigen van oppervlak en de sterkte van dit contact. De sterkte van het contact bestaat op haar beurt weer uit een tijdsafhankelijk deel (adhesie) en tijdsafhankelijk deel (diffusie/reptatie). Gedurende de eerste 6 minuten is het niet waarschijnlijk dat het tijdsafhankelijke deel een grote bijdrage levert aan de geobserveerde healing, daarom wordt deze na 6 minuten verwaarloosbaar klein verondersteld. Dit betekent dat de 50% van de totaal geobserveerde healing toegeschreven kan worden aan het bevochtigen in combinatie met de instantaan aanwezige adhesie op het moment van contact.

Het bevochtigen van oppervlak is dus een belangrijk onderdeel van healing. De invloed van de kracht waarmee twee oppervlakken bijeen worden gebracht kan worden gebruikt om deze bevochtiging in meer detail te onderzoeken. Er is reeds toegelicht dat het krachtniveau tijdens assemblage geen invloed kan hebben op de intrinsieke healing, deze wordt enkel bepaald door de chemische samenstelling en de temperatuur (welke constant is gehouden tijdens het samenbrengen). Het variëren van het krachtniveau kan dus enkel invloed hebben op de mate van bevochtiging. De resultaten in Figuur 7 geven aan dat de hoeveelheid oppervlak in contact duidelijk afhankelijk is van de kracht waarmee de oppervlakten zijn samengebracht. Binnen de range van de opgelegde assemblagekracht is geen bovengrens zichtbaar, dit maakt het aannemelijk dat een grotere assemblagekracht leidt tot een nog grotere healing.

Indien de data uit Figuur 6 worden vergeleken met Figuur 7, dan wordt duidelijk dat de gerealiseerde hoeveelheid healing ook sterk afhankelijk is van de duur van de belasting. De bereikte treksterkte voor 6 minuten belast met 0,016N is in dezelfde orde grootte als enkele seconden belast met 0,5 N. De plastische vloeit van bitumen die plaatsvindt onder invloed van een kleine belasting die een geruime tijd aanwezig is, is dus erg belangrijk voor het proces van bevochtiging.

Deze resultaten laten zien dat de macroscopisch geobserveerde healing in een belangrijke mate wordt beïnvloed door bevochtiging van het oppervlak. Deze bevochtiging van oppervlak is sterk afhankelijk van de grote en de duur van de normaalspanning loodrecht op het contactoppervlak. Dit betekent dat naast materiaaleigenschappen ook de randvoorwaarden bij schade erg belangrijk zijn voor de geobserveerde healing. Randvoorwaarden nabij schade worden in hoge mate bepaald door de geometrie van de gekozen proefopstelling en de opgelegde belasting. De grote invloed van de rol van bevochtiging welke zichtbaar gemaakt is in de experimenten is een mogelijke verklaring waarom met verschillende proefopstellingen zulke grote verschillen in healingcapaciteit kunnen worden gevonden.

7 Conclusies

De bevochtiging van het scheuroppervlak bepaalt tenminste 50% van de macroscopisch geobserveerde healing voor pure bitumen. Bevochtiging wordt in belangrijke mate beïnvloed door de normaalkracht loodrecht op de schade, dus door de randvoorwaarden gedurende een healingproef. De grote variatie die tot op heden is gevonden in healingonderzoek kan mogelijk worden verklaard door het niet expliciet meenemen van deze randvoorwaarden bij het analyseren van de resultaten.

8 Vooruitblik

Het uiteindelijke doel van dit onderzoek is een toegankelijke (combinatie) test te ontwerpen waarmee de specifieke healingcapaciteit van een asfaltmestiek (bitumen, zand, vulstof) kan worden bepaald als een materiaalparameter. Deze healingcapaciteit zou met behulp van een omrekenalgoritme (gebaseerd op de huidige conversietabel) kunnen worden vertaald in een materiaal specifieke healingfactor die kan worden gebruikt in het wegontwerp.

Het formuleren van de juiste testmethode om de healingcapaciteit te meten is hierin de grote uitdaging. De testmethode die is gebruikt in dit onderzoek is behoorlijk academisch en geeft nog steeds geen compleet beeld; bevochtiging en intrinsieke healing zijn in de praktijk niet onafhankelijk van elkaar te meten. Echter, met deze opstelling is het wel mogelijk om met behulp van parameterstudies de relatieve invloed van de verschillende processen achter bevochtiging en intrinsieke healing te onderzoeken. Het hier gepresenteerde onderzoek is daar een voorbeeld van. Het laat namelijk zien dat bevochtiging van de oppervlakken tenminste 50% van de healing bepaalt. In de toekomst is daarom onderzoek gepland om de relatieve invloed van viscositeit, adhesie en oppervlakruwheid, etc. te bepalen. Zo worden de dominante processen voor de healing van bitumen in kaart gebracht en kan stap voor stap worden gezocht naar elementen van healing van mestiek die onderdeel moeten zijn van een vereenvoudigde testmethode.

Dankbetuiging

Dit onderzoek maakt deel uit van het onderzoeksprogramma binnen het samenwerkingsverband InfraQuest (Rijkswaterstaat, TNO en TU Delft), project IQ-2012-21.

Referenties

- Bazin, P. and J. Saunier (1967). Deformability, fatigue and healing properties of asphalt mixes. Intl Conf Struct Design Asphalt Pvmnts.
- Bhasin, A., D. N. Little, R. Bommavaram and K. Vasconcelos (2008). "A framework to quantify the effect of healing in bituminous materials using material properties." Road Materials and Pavement Design **9**(sup1): 219-242.
- Di Benedetto, H., C. De La Roche, H. Baaj, A. Pronk and R. Lundström (2004). "Fatigue of bituminous mixtures." Materials and structures **37**(3): 202-216.
- Johnson, K., K. Kendall and A. Roberts (1971). Surface energy and the contact of elastic solids. Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, The Royal Society.
- Kendall, K. (2001). Molecular adhesion and its applications: the sticky universe, Springer.
- Kim, Y. R., D. N. Little and F. C. Benson (1990). "Chemical and mechanical evaluation on healing mechanism of asphalt concrete." Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists **59**.
- Little, D. N. and A. Bhasin (2007). "Exploring Mechanism of Healing in Asphalt Mixtures and Quantifying its Impact." Springer Series in Materials Science **100**: 205.
- Mangiafico, S., C. Sauzéat, H. Di Benedetto, S. Pouget, F. Olard and L. Planque (2015). "Quantification of biasing effects during fatigue tests on asphalt mixes: non-linearity, self-heating and thixotropy." Road Materials and Pavement Design **16**(sup2): 73-99.
- Van den Bergh, W. V. d. V., MFC (2012). "The Influence of Ageing on the Fatigue and Healing Properties of Bituminous Mortars." Procedia-Social and Behavioral Sciences **53**: 256-265.
- Westera (1993). Healingonderzoek deelrapport I evaluatie van zeven healingonderzoeken [in Dutch]. Twello, The Netherlands.
- Westera (1994). Deelrapport 2 nadere beschouwing van het fenomeen healing bij asfalt.
- Wool, R. P. and K. M. O' Connor (1981). "A theory crack healing in polymers." Journal of Applied Physics **52**(10): 5953-5963.