

Verkenning en toetsing van het Amerikaanse convolutie healing model voor asfalt

Greet Leegwater
TU Delft, TNO

Tom Scarpas
TU Delft

Sandra Erkens
RWS, TU Delft

Samenvatting

In de meeste landen wordt bij het wegontwerp healing op een bepaalde manier in rekening gebracht. Doorgaans gebeurt dit 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. Ondanks deze toepassing in de praktijk is het mechanisme dat healing drijft, tot op heden nog steeds onduidelijk. Recent is in Amerika een model gepresenteerd dat het mechanisme achter healinggedrag van asfalt beschrijft, het convolutiemodel. In dit artikel wordt het model besproken en getoetst aan bestaande inzichten op het gebied van healing. Hieruit worden de volgende conclusies getrokken. Het model als zodanig is nog onvoldoende is gevalideerd om zonder meer over te nemen. Het model verdient verdere studie, aangezien het aansluit bij healinggedrag zoals dit is geobserveerd in het verleden en de mogelijkheid biedt om een aantal fysische en chemische processen te scheiden.

1. Inleiding

Het feit dat asfalt zelfherstellend vermogen bezit is reeds in de jaren 60 van de vorige eeuw experimenteel vastgelegd (Bazin and Saunier 1967). Dit onderzoek demonstreerde dat volledig bezweken asfalt proefstukken 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.

In de meeste landen wordt bij het wegontwerp healing op een bepaalde manier in rekening gebracht. Doorgaans gebeurt dit 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. Het achterliggende idee is dat een asfaltproefstuk in het laboratorium continue wordt belast en daardoor weinig gelegenheid heeft om te herstellen, terwijl in de praktijk er altijd een rustperiode zal zitten tussen het passeren van twee vrachtwagenassen. 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. De healingfactor die wordt toegepast in ontwerpregels is doorgaans een vaste factor gebaseerd op uitgebreid empirisch onderzoek dat is uitgevoerd in het verleden. Er is tot op heden geen internationale consensus over een proef die de healingcapaciteit van asfalt of bitumen kan vastleggen. Dit alles resulteert erin dat de healingfactor goed kan worden gebruikt voor asfaltmengsels waar in het verleden ervaring mee is opgedaan.

Voor bepaalde innovatieve asfaltmengsels, zoals asfalt met een hoog recycling percentage of een hoge stijfheid wordt een verminderd healinggedrag verwacht met als gevolg dat de bestaande healingfactor niet representatief wordt geacht. Er kan worden besloten dat deze materialen alleen kunnen worden toegepast met een aangepaste healingfactor van bijvoorbeeld 1, in plaats van 4. Deze lage healingfactor heeft tot gevolg dat er grotere laagdiktes nodig zijn wat het toepassen van deze materialen minder interessant maakt.

Vanwege het beperkte inzicht in het healingmechanisme is het op dit moment niet duidelijk of een dermate lage healingfactor voor deze innovatieve asfaltmengsels in overeenstemming is met het werkelijke materiaalgedrag. Meer inzicht in het healingmechanisme maakt het mogelijk om een betere schatting te maken van het healingspotentieel van een asfaltmengsel, bijvoorbeeld door proef te ontwerpen die healingscapaciteit voorspeld. Recent is in Amerika een model gepresenteerd dat het mechanisme achter healinggedrag van asfalt beschrijft, dit zogenaamde “convolutiemodel” wordt in dit artikel besproken. Allereerst zal het model worden beschreven, vervolgens wordt aangegeven in hoeverre dit model op dit moment is gevalideerd. Daarna zal het model getoetst worden op een aantal resultaten van healingonderzoeken uit het verleden. Er zal worden afgesloten met een beschouwing in hoeverre het convolutiemodel een bijdrage kan leveren om het healingmechanisme te beschrijven.

2. Healing en schade in asfalt en bitumen

Er zal pas healing in een materiaal optreden als er sprake is van schade. Het is echter tot op heden niet duidelijk hoe microschatte in asfalt precies optreedt. Er zou sprake kunnen zijn van microscheuren, maar dit is niet zeker. Schade in asfalt laat zich moeilijk in detail bestuderen om een aantal redenen. In de eerste plaats is bitumen zwart, waardoor er moeilijk contrasten te vinden met behulp van lichtmicroscopie. Daarnaast healt het materiaal zoals al eerder gezegd, waardoor het moeilijk is om zeker te zijn aangebrachte schade nog op dezelfde manier zichtbaar is tegen de tijd dat een proefstuk onder een microscoop ligt. Er komt steeds meer geavanceerde apparatuur beschikbaar waarmee microstructuur en microschatte kan worden bestudeerd (Masson, Leblond et al. 2006, Gaskin 2012, Nahar, Schmets et al. 2013, Fischer and Dillingh 2014). Echter dit heeft vooralsnog niet tot eenduidige conclusies geleid hoe microschatte zich manifesteert in bitumen of asfalt.

Naast het feit dat het op dit moment niet zeker is hoe schade zich manifesteert, is een gedeelte van het gemeten stijfheidsverlies in een vermoeiingsproef niet te wijten aan schade. Stijfheidsverlies wordt ook veroorzaakt door tijdelijke fysische processen (Westera 2002, Di Benedetto, Nguyen et al. 2011). Een deel van het stijfheidsverlies is gerelateerd aan opwarming van het proefstuk door energiedissipatie. Daarnaast is waarschijnlijk ook een deel te wijten aan thixotropie, het fenomeen dat de viscositeit van een vloeistof afneemt onder invloed van schuifspanning.

3. Convolutiemodel voor mechanisme van healing van asfalt

(Little and Bhasin 2007) introduceerden het convolutiemodel om het mechanisme van healing van asfalt te beschrijven. Zij hebben dit model overgenomen uit de polymeertechnologie (Wool and O' Connor 1981). In dit model wordt gesteld dat gedurende healing van twee oppervlakten de volgende stadia worden doorlopen, de moleculen aan het oppervlak herschikken, de oppervlakten naderen elkaar, oppervlakten komen in contact (Engels: wetting), moleculen diffunderen over het contactoppervlak en er vindt randomisatie plaats. Dit proces wordt vervolgens beschreven door te stellen dat alleen oppervlakten die met elkaar in contact staan kracht kunnen overdragen en dat oppervlakten die met elkaar in contact zijn in de tijd steeds meer kracht kunnen overdragen. De gemeten healing (R) is dus een convolutie van het contactoppervlak (ϕ) en de krachtsoverdracht die mogelijk is tussen deze oppervlakten (R_h). R_h wordt ook de intrinsieke healing genoemd. De convolutie integraal is in formulevorm weergegeven in vergelijking (1). R staat voor de ratio tussen het gehealde en het niet gehealde materiaal en heeft een waarde tussen 0 en 1, waarbij 0 geen healing betekent en 1, 100% healing.

$$R = \int_{\tau=-\infty}^{\tau=t} R_h(t-\tau) \frac{d\phi(\tau, X)}{d\tau} d\tau \quad (1)$$

Dezelfde auteurs presenteren in volgend paper een relatie voor de ontwikkeling van het contactoppervlak in de tijd (wetting function) voor een eendimensionale situatie (Bhasin,

Little et al. 2008). Deze formule is gebaseerd op eerder afgeleide formules voor visco-elastische materialen (Schapery 1989) en beschrijft een situatie waarbij healing plaatsvindt met een constante snelheid.

$$\frac{d\phi(t, X)}{dt} = \dot{a}_b = \beta \left[\frac{1}{D_1 k_m} \left\{ \frac{\pi W_c}{4(1-\nu^2) \sigma_b^2 \beta} \right\} - D_0 \right]^{-1/m} \quad (2)$$

\dot{a}_b is de snelheid waarmee de scheur healt, β is de healingzone, naar analogie met de scheurzone (het deel van de scheur waar nog kracht wordt overgedragen), D_0 , D_1 en m zijn relaxatie parameters verkregen dmv het fitten van $D(t) = D_0 + D_1 t^m$, k_m kan vervolgens afgeleid worden uit m , W_c is de cohesieve arbeid gebaseerd op oppervlakte-energie, ν is de dwarscontractiecoëfficiënt, σ_b is de trekspanning in de healingzone.

Volgens vergelijking (2) wordt de snelheid van de toename van contactoppervlak bepaald door oppervlakte-energie, viscoelasticiteit en schadegeometrie. De auteurs stellen dat verschillen in mechanische belasting zoals proeven waarin zowel sprake is van trek en druk ook tot uiting komen in deze functie.

In weer een volgend artikel (Bhasin, Palvadi et al. 2011) wordt een verbeterde formule voorgesteld om de intrinsieke healing te beschrijven, vergelijking (3). Er is gekozen voor functie met een sigmoïdaal verloop. Een sigmoïd functie is in staat om chemische processen zoals nucleatie en faseformatie te beschrijven. Het model gaat ervanuit dat intrinsieke healing het effect is van een faseformatie die diffusie gestuurd is, een sigmodale functie sluit aan bij deze aanname. Daarnaast is er sprake van een instantané healing op het moment van contact, waarvan wordt verondersteld dat dit proces wordt gedreven door oppervlakte-energie. Voor dit proces is een extra term opgenomen in de formule (R_0).

$$R_h(t) = R_0 + (1 - R_0)(1 - e^{-qt^r}) \quad (3)$$

R_h is wederom een ratio tussen wel en niet geheald materiaal. R_0 staat voor de instantané healing. In het tweede deel van de formule zitten twee constanten q en r welke karakteristiek worden geacht voor het chemische proces. Deze constanten kunnen worden gefit op mechanische testresultaten en verschillen per bitumentype, temperatuur en druk. Bij het fitten wordt aangenomen dat q een temperatuurafhankelijke materiaalconstante is en r een materiaalconstante. De intrinsieke healing wordt gezien als materiaaleigenschap die niet wordt beïnvloed door de methode van testen.

4. Invoerparameters convolutiemodel

Oppervlakte-energie en cohesie arbeid

Indien er geen sprake is van verliezen zijn de oppervlakte-energie en de cohesieve arbeid van een bitumen direct aan elkaar gerelateerd. Een molecule heeft de gunstigste energie toestand op het moment dat het omgeven is door andere moleculen, indien moleculen niet geheel omgeven worden door andere moleculen ontstaat er een minder gunstige energietoestand, het creëren van oppervlak kost daarom energie. Op basis van dit fysische inzicht is de cohesie arbeid, vereist om een materiaal in tweeën te splijten en twee nieuw oppervlakken te creëren, gelijk aan tweemaal de oppervlakte-energie van het materiaal. Hierbij moet worden opgemerkt dat dit een theoretische relatie is en dat in de praktijk er grote verschillen gemeten kunnen worden tussen de oppervlakte-energie en de arbeid die nodig is om twee oppervlakten te creëren (Kendall 2001). Deze verschillen ontstaan doordat oppervlakte-energieën op een dermate kleine schaal optreden dat kleine veranderingen van het oppervlak of de manier van splijten grote gevolgen kunnen hebben voor de gemeten arbeid.

Er wordt gesteld dat de oppervlakte-energie van een bitumen op twee manieren de healing beïnvloed. In de eerste plaats leidt een grotere cohesie tot een snellere toename van het contactoppervlak, omdat een grotere cohesie ervoor zal zorgen dat een scherpe scheuropening sneller zal dichtgroeien. Daarnaast zorgt een grotere oppervlakte-energie voor meer cohesie tussen twee scheuoppervlakken die met elkaar in contact komen, waardoor er instantaan een grotere kracht kan worden overgedragen. De theorie gaat uit van cohesieve scheuren waarbij beide scheuoppervlakken bestaan uit bitumen. De oppervlakte-energie van een bitumen wordt daarom gezien als een erg belangrijke parameter voor het bepalen van de healing potentie van een bitumen en het asfalt dat hiermee is gemaakt. De oppervlakte-energie van bitumen kan relatief eenvoudig worden bepaald met de Wilhelmy Plate Methode. De inzet van deze methode is uitgebreid beschreven in (Hefer, Bhasin et al. 2006).

Beperkingen beschikbaarheid invoerparameters

Zoals in paragraaf 2 van dit artikel is toegelicht is er nog weinig bekend over de verschijningsvorm van (micro)schade in asfalt. Dit heeft tot gevolg dat twee parameters in de formule die de toename in contactoppervlak beschrijft (2) niet bepaald kunnen worden, dit geldt voor de lengte van de healingzone β en de trekspanning in de healingzone σ_b . Hiervoor kunnen slechts aannames worden gedaan die niet eenvoudig te verifiëren zijn. Dit heeft tot gevolg dat deze formule op dit moment nog niet ingezet kan worden om op betrouwbare wijze de toename van het contactoppervlak te bepalen.

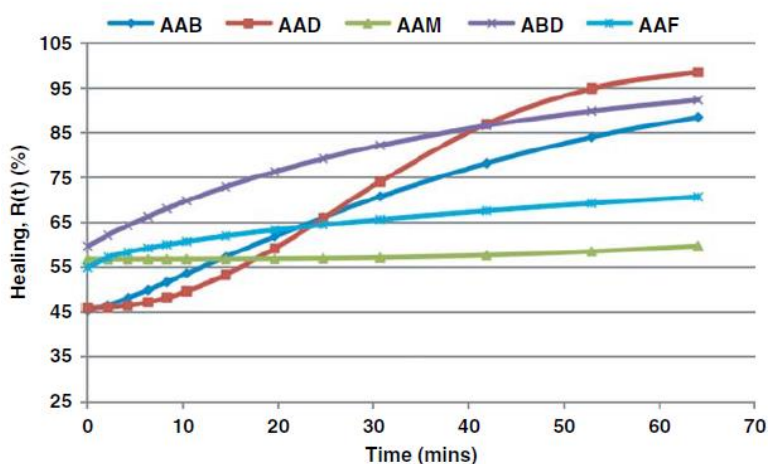
De verandering van intrinsieke healing in de tijd is gekarakteriseerd als een diffusie gestuurd proces. Meer precies wordt intrinsieke healing gestuurd door de zelfdiffusie van bitumenmoleculen in bitumen nabij een scheuoppervlak. Dit diffusieproces is onmogelijk exact te beschrijven, aangezien bitumen uit een erg groot aantal moleculen bestaat en de individuele bewegingen van al deze moleculen niet te bepalen of te modelleren zijn. Toch is

het aannemelijk dat onder de invloed van de chemische samenstelling, zelfdiffusie in het ene bitumen sneller zal verlopen dan in het andere. (Bhasin, Bommavaram et al. 2010) gebruiken moleculaire dynamica om een voorspelling te doen van de diffusiesnelheid op basis van 1 of 3 moleculen die representatief worden geacht voor een bepaalde bitumen. Op basis van dit onderzoek lijkt het mogelijk om met behulp van relatief eenvoudig te bepalen chemische indicatoren, namelijk de CH_2/CH_3 ratio (een indicator van de ketenlengte van de moleculen) en de MMHC ratio (een indicator voor de mate van vertakking van de moleculen) een relatieve waarde te schatten voor de snelheid van diffusie in bitumen. Moleculaire dynamica berekeningen geven aan dat zelfdiffusie sneller verloopt in bitumen met langere ketens met minder vertakkingen. Er zijn waarschijnlijk nog meer chemische indicatoren voor zelfdiffusie snelheid.

5. Proefresultaten ter validatie convolutiemodel

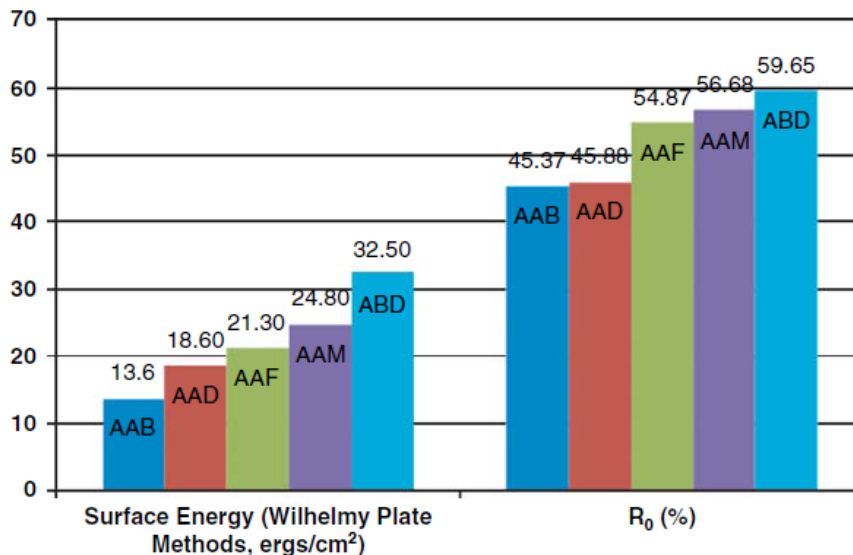
Intrinsieke healing

Er is een methode ontwikkeld om de intrinsieke healing te bepalen, dit is de zogenaamde Two-piece healing method (Bommavaram, Bhasin et al. 2009). Met behulp van een DSR apparaat worden twee schijven bitumen zachtjes op elkaar gedrukt (0,4N) bij kamertemperatuur. Er wordt aangenomen dat deze aanpak resulteert in instantaan contact over het gehele bitumenoppervlak, waardoor het contactoppervlak onmiddellijk gelijk is aan 1 en de totale healing functie enkel nog wordt bepaald door de intrinsieke healing. De stijfheidsontwikkeling (G^*) van de het contactoppervlak wordt, zonder schade te initiëren, gemeten door gedurende de proef op verschillende momenten een hele kleine schuifrek op te leggen van 0,01%. De gemeten waarde wordt genormaliseerd door de stijfheid van de twee losse schijven te delen op een stijfheid van een tweemaal zo dikke referentieschijf die is blootgesteld aan dezelfde belasting. De resultaten voor 5 verschillende bitumina zijn weergegeven in Figuur 1.



Figuur 1. Ontwikkeling van gemeten healing in de tijd voor 5 SHARP bitumen, two-piece healing method (Bommavaram, Bhasin et al. 2009)

De gemeten healing na 1 minuut wordt gelijk gesteld aan de instantané healing (R_0). Om de relatie van de instantane healing met de oppervlakte-energie aan te tonen zijn de gemeten waarden voor R_0 vergeleken met oppervlakte-energieën bepaald met de Wilhelmy Plate methode. Zoals is weergegeven in Figuur 2 komt de ranking van beide waardes goed overeen. Het lijkt dus waarschijnlijk dat er een relatie is tussen de oppervlakte-energie en de instantane healing. Het verdere verloop van de healing in de tijd varieert sterk per binmiddel, zoals zichtbaar in Figuur 1.



Figuur 2. Oppervlakte-energie versus instantane healing (R_0) (Bommavaram, Bhasin et al. 2009)

(Qiu 2012) heeft ook onderzoek uitgevoerd met de two-piece healing methode. Zijn onderzoek laat zien dat het verkleinen van de afstand tussen de platen een grotere invloed heeft op de bepaalde healingfactor dan de tijd. Indien deze observaties correct zijn, geeft dit aan dat de gemeten healing afhankelijk is van de meetmethode. Dus dat de two-piece healing methode geen materiaalparameter vast legt.

Er is tot op heden nog geen werk gepubliceerd dat laat zien hoe de ontwikkeling van het contactoppervlak kan worden bepaald in het laboratorium. De betrokken onderzoekers stellen dat het contactoppervlak het best kan worden bepaald door zowel de totale healing, als de intrinsieke healing te bepalen en het contactoppervlak hieruit terug te rekenen (FHWA 2009). Deze benadering via het bepalen van de totale healing vereist echter een geaccepteerde methode en testcondities om healing te bepalen. De onderzoekers hebben recent een methode gepubliceerd voor het bepalen van de totale healing (Palvadi, Bhasin et al. 2012), echter verdere validatie van het convolutiemodel is nog niet gerapporteerd.

6. Inpassing convolutiemodel in historische observaties healinggedrag asfalt

Er zijn sinds de jaren 60 van de vorige eeuw een aantal uitgebreide studies gedaan naar healing van bitumineuze materialen. In deze alinea zal worden besproken in hoeverre het voorgestelde convolutiemodel aansluit bij de verschillende resultaten uit deze studies.

(Bazin and Saunier 1967) bepaalden dat tijd, temperatuur en druk invloed hadden op de mate van healing. Deze drie verbanden zijn ook terug te vinden in het convolutiemodel. In het model neemt zowel het contactoppervlak als de intrinsieke healing (krachtoverdracht per oppervlakenheid) toe met de tijd. Een verhoging van de temperatuur heeft een positieve invloed op de groei van contactoppervlak, omdat de zachtere bitumen sneller zal vervormen waardoor oppervlakten gemakkelijker bij elkaar komen. Een verhoging van de temperatuur heeft een positieve invloed op de diffusiesnelheid, voor chemische processen geldt de vuistregel dat een temperatuurverhoging van 10 °C de reactietijd halveert. De positieve invloed van druk kan worden opgenomen in de formule voor de groei van het contactoppervlak, dit is op dit moment echter nog niet het geval.

Verschillende onderzoeken hebben laten zien dat het type testopstelling van grote invloed is op de gemeten healing (Bonnaure, Huibers et al. 1982, Westera 2002). In het model wordt de aangroei van het contactoppervlak los gezien van het intrinsieke healingproces, waardoor er in de formule voor de aangroei van het contactoppervlak ruimte is om de invloed van spanningscondities, en dus testcondities op te nemen. Wellicht kan via deze weg worden verklaard waarom krachtgestuurde vermoeiingsproeven een hogere healingfactor opleveren dan verplaatsinggestuurde proeven.

In de Nederlandse ontwerpregels (Rijkswaterstaat 2011) wordt aangenomen dat zachtere bitumen zullen resulteren in een hogere mate van healing in de praktijk. Dit is ook bevestigd door onderzoek (Westera 1994). Zachtere bitumen zullen ervoor zorgen dat het contactoppervlak onder vergelijkbare omstandigheden sneller zal groeien, dus dat de mate van healing groter is.

Verschillende onderzoeken hebben gedemonstreerd dat het waarschijnlijk is dat de chemische samenstelling en configuratie van de moleculen in het bindmiddel van invloed is op de healing (Kim, Little et al. 1990, Bhasin, Bommavaram et al. 2010). De formule voor intrinsieke healing geeft ruimte om verschillen in moleculaire mobiliteit op mate van healing mee te nemen.

(Little, Lytton et al. 2001) presenteerde voor het eerste de relatie tussen oppervlakte-energie en healing. Ook het model laat het belang van oppervlakte-energie voor healing zien. Hierbij dient te worden opgemerkt dat de auteurs van het model voor een deel overeenkomen met de geestelijk vaders van het convolutiemodel.

Er is veel onderzoek gedaan naar de relatie tussen energiedissipatie en healing. Het model gaat niet direct in op energiedissipatie, er is dus geen conflict met bestaande onderzoeksresultaten.

Over de jaren heen is door een aantal onderzoekers geconstateerd dat stijfheidsherstel sneller optreedt dan sterkteherstel of herstel van de weerstand tegen vermoeiing (Lee and Kim 1998, Westera 2002, Palvadi, Bhasin et al. 2012). Dit fenomeen is tot op heden niet verklaard. Uitgaande van het model waarin contactoppervlak langzaam groeit kan de volgende mogelijke verklaring worden geformuleerd. Over het gehele scheuoppervlak ontstaan in korte tijd een groot aantal kleine contactoppervlakken. Deze contactpunten zorgen ervoor dat

de doorsnede als een geheel vervormd bij een kleine belasting, waardoor er een hoge stijfheid wordt gemeten. Deze kleine contactoppervlakken hebben samen echter nog steeds maar een heel beperkt oppervlak, waardoor er weinig kracht kan worden overdragen en de sterkte beperkt is.

7. Conclusies potentie van convolutiemodel voor het verklaren van het healingmechanisme

Het convolutiemodel sluit aan bij de staande inzichten en testresultaten op het gebied van healing van asfalt. Een goed aspect van het model is dat het een tweetal processen die spelen bij healing poogt te scheiden en onafhankelijk van elkaar te beoordelen, de schadegeometrie wordt los gemaakt van chemisch transport. Dit scheiden van verschillende fenomenen vergroot het inzicht te verkrijgen in het healingsproces. Het is daarom jammer dat de oppervlakte-energie zowel terugkomt in de aangroei van contactoppervlak als de intrinsieke healing, deze parameter blijkt dus moeilijk te isoleren in het model.

Het model is tot op heden nauwelijks gevalideerd. Dit kan worden veroorzaakt omdat er nog weinig effort in validatie is gestoken. Het is echter ook mogelijk dat er is gepoogd het model te valideren, maar dat (nog) is gelukt.

Het convolutiemodel lijkt een goed startpunt om meer inzicht te verwerven in het healingmechanisme, echter op dit moment is er nog onvoldoende bewijslast om het model zonder meer over te nemen. Om deze reden werken de auteurs van dit artikel aan een testprogramma om de aangroei van contactoppervlak en intrinsieke healing verder te onderzoeken.

Dankbetuiging

De onderzoekers bedanken InfraQuest voor de financiering van dit onderzoek.

Referenties

Bazin, P. and J. Saunier (1967). Deformability, fatigue and healing properties of asphalt mixes. Intl Conf Struct Design Asphalt Pvmnts.

Bhasin, A., et al. (2010). "Use of molecular dynamics to investigate self-healing mechanisms in asphalt binders." Journal of Materials in Civil Engineering **23**(4): 485-492.

Bhasin, A., et al. (2008). "A framework to quantify the effect of healing in bituminous materials using material properties." Road Materials and Pavement Design **9**(sup1): 219-242.

Bhasin, A., et al. (2011). "Influence of aging and temperature on intrinsic healing of asphalt binders." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **2207**(1): 70-78.

Bommavaram, R. R., et al. (2009). "Determining Intrinsic Healing Properties of Asphalt Binders." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **2126**(1): 47-54.

Bonnaure, F., et al. (1982). "A laboratory investigation of the influence of rest periods on the fatigue characteristics of bituminous mixes." Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists **51**: 104-128.

Di Benedetto, H., et al. (2011). "Nonlinearity, heating, fatigue and thixotropy during cyclic loading of asphalt mixtures." Road Materials and Pavement Design **12**(1): 129-158.

FHWA (2009). ARC Consortium Quaterly Technical Pogress Report. April-June, FHWA.

Fischer, H. and E. Dillingh (2014). "On the investigation of the bulk microstructure of bitumen—Introducing two new techniques." Fuel **118**: 365-368.

Gaskin (2012). On Bitumen Microstructure And The Effects Of Healing, University of Nottingham. **PhD**.

Hefer, A. W., et al. (2006). "Bitumen surface energy characterization using a contact angle approach." Journal of Materials in Civil Engineering **18**(6): 759-767.

Kendall, K. (2001). Molecular adhesion and its applications: the sticky universe, Springer.

Kim, Y. R., et al. (1990). "Chemical and mechanical evaluation on healing mechanism of asphalt concrete." Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists **59**.

Lee, H.-J. and Y. R. Kim (1998). "Viscoelastic continuum damage model of asphalt concrete with healing." Journal of Engineering Mechanics **124**(11): 1224-1232.

Little, D., et al. (2001). Microdamage healing in asphalt and asphalt concrete, Volume I: Microdamage and microdamage healing, Project summary report.

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.

Masson, J. F., et al. (2006). "Bitumen morphologies by phase-detection atomic force microscopy." Journal of microscopy **221**(1): 17-29.

Nahar, S., et al. (2013). "Temperature induced healing in strained bituminous materials observed by atomic force microscopy."

Palvadi, S., et al. (2012). "Method to Quantify Healing in Asphalt Composites by Continuum Damage Approach." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **2296**(1): 86-96.

Qiu, J. (2012). Self-Healing of Asphalt Mixtures Delft, Technical University Delft. **PhD**.

Rijkswaterstaat (2011). Specificaties Ontwerp Asfaltverhardingen.

Schapery, R. (1989). "On the mechanics of crack closing and bonding in linear viscoelastic media." International Journal of Fracture **39**(1-3): 163-189.

Westera (1994). Deelrapport 2 nadere beschouwing van het fenomeen healing bij asfalt.

Westera, P. (2002). Review healing. CROW Wegenbouwkundige Werkdagen.

Wool, R. P. and K. M. O' Connor (1981). "A theory crack healing in polymers." Journal of Applied Physics **52**(10): 5953-5963.