Materiaalmodel voor healing van asfalt

Greet Leegwater, Technische Universiteit Delft & TNO

Sandra Erkens, Rijkswaterstaat & Technische Universiteit Delft

Samenvatting

Het is al lang bekend dat schade in asfalt kan herstellen. Dit herstel wordt healing genoemd en heeft een gunstige invloed op de levensduur. Op basis van literatuuronderzoek en een testprogramma dat is uitgevoerd met een nieuw ontwikkelde testmethode is meer inzicht ontstaan in de processen die een rol spelen bij healing. Deze inzichten worden in dit paper samengebracht tot een kwalitatief materiaalmodel voor healing van een discrete scheur. Daarnaast wordt een methode voorgesteld om het healingpotentieel van een materiaal te bepalen.

De stappen de worden beschreven in het gepresenteerde healingmodel zijn als volgt. Allereest dienen beide zijden van de scheur elkaar voldoende te naderen opdat de moleculaire aantrekkingskracht tussen moleculen van beide zijden van de scheur weer significant wordt. In dit geval kunnen de oppervlakten beschouwd worden als weer volledig in contact. Als de oppervlakten in contact staan zal, als gevolg van adhesie, er sprake zijn van een aanzienlijk herstel van de originele materiaaleigenschappen. Indien het contact tussen de oppervlakken in stand blijft, zorgt diffusie voor verder herstel van de materiaaleigenschappen. Op het moment dat het materiaal ter plaatste van het scheuroppervlak niet meer te onderscheiden is van de bulksamenstelling, dan is het materiaal volledig hersteld. De snelheid waarmee dit gebeurt hangt in belangrijke mate af van de visco-elastische eigenschappen van het materiaal. De materiaaleigenschap die het traagst hersteld is de taaiheid, aangezien hiervoor een aanzienlijke hoeveelheid diffusie nodig is.

Uit het testprogramma kwam naar voren dat, voor de onderzochte bitumina, de healing-ranking direct na het creëren van contact gelijk is aan de ranking na enkele dagen healing. Deze observatie biedt perspectief voor de ontwikkeling van een snelle healing test voor bindmiddelen. In het paper wordt een overzicht gegeven van het materiaalmodel voor healing, de achterliggende processen en testresultaten. Dit paper is gebaseerd op de inzichten die zijn opgedaan in een promotieonderzoek naar healing van bitumen. Een uitgebreidere beschrijving van de voorgestelde testmethode voor healing, de testresultaten en de materiaalmodellen kan teruggevonden worden in het proefschrift hoogstwaarschijnlijk later dit jaar zal verschijnen.

Steekwoorden: healing, healingmodel, bindmiddelen

1. Inleiding

Reeds in de jaren 60 van de vorige eeuw is experimenteel vastgesteld dat asfalt een zelfherstellend vermogen bezit (Bazin and Saunier 1967). 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, er is nog veel onduidelijk over welke mechanismes er spelen bij de healing van asfalt en als gevolg hiervan de relatieve impact van de gevonden beïnvloedende parameters (Qiu 2012).

In veel landen wordt de positieve invloed van healing op een bepaalde manier meegenomen in het constructieve wegontwerp (Van den Bergh 2012), zo ook in Nederland. In de dimensioneringsberekening van een wegconstructie is één van de invoerparameters de vermoeiingsweerstand van het gebruikte asfalt. Bij het bepalen van deze vermoeiingsweerstand van het materiaal wordt een asfaltproefstuk in het laboratorium onderworpen aan een continue wisselende belasting. Door het continue karakter van de belasting, zal er in het laboratorium minder healing plaatsvinden in vergelijking met de werkelijke situatie. In de praktijk zal er immers altijd een bepaalde periode zitten tussen de verschillende belastingen.

In de dimensioneringsberekening is een empirische factor geïntroduceerd die gebruikt wordt om de verschillen tussen het laboratorium en de praktijk in rekening te brengen. Het verschil in healing tussen laboratorium en praktijk wordt ook meegenomen door het gebruik van deze factor. Deze factor wordt wel eens de healing factor genoemd, maar vanwege het empirische karakter van deze factor is het onduidelijk welk deel van deze factor is toe te schrijven aan healing. Deze factor is een vermenigvuldigingsfactor, waardoor het werkelijke aantal lastherhalingen tot bezwijken een veelvoud wordt van het aantal lastherhalingen tot bezwijken in het laboratorium. Initieel was de waarde van deze factor in Nederlandse ontwerprichtlijnen 4. Vanwege voortschrijdend inzicht en veranderingen in mengselontwerp is later een nuance op deze factor aangebracht waardoor voor erg schrale mengsels met erg stijve bindmiddelen een lagere factor geldt. Van deze mengsels wordt verwacht dat ze minder healing vertonen.

Op dit moment komen er vanwege nieuwe duurzaamheidsrichtlijnen een grote variëteit aan nieuwe asfaltmengsels op de markt. Deze mengsels bevinden zich steeds verder uit het ervaringsgebied waar de empirische ontwerpfactor op gebaseerd is. Daardoor is er behoefte om meer inzicht te krijgen in de fundamentele achtergrond van het healend gedrag van asfalt. Immers indien de processen die bijdragen aan het healend gedrag zijn beschreven, kan ook een betere inschatting worden gedaan of deze processen ook plaats zullen kunnen vinden bij nieuwe materialen. Daarnaast is er ook een behoefte om met behulp van een proef het healend vermogen van een nieuwe materiaal ten opzichte van een referentie af te schatten. Hierdoor zou het healend vermogen van een materiaal meegenomen kunnen worden in de huidige wegontwerpmethode.

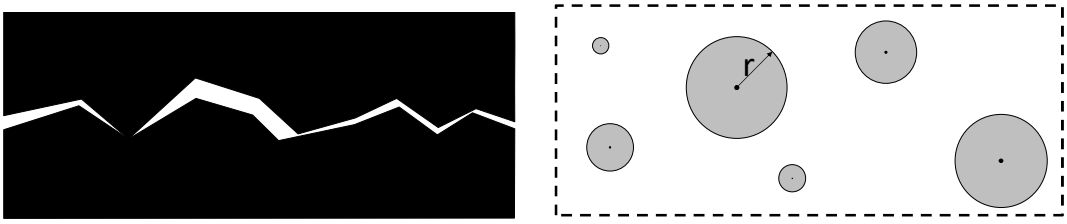
Ondanks dat er in het verleden al een aantal uitgebreide studies zijn uitgevoerd op het gebied van healing, is er geen (internationale) consensus over een proef die de healingcapaciteit van asfalt of bitumen kan vastleggen. Het gebrek aan consensus wordt voornamelijk veroorzaakt door de proefafhankelijkheid van de gevonden healing; de healing potentie van asfaltmengsel hangt in belangrijke mate af van de gebruikte proef. Deze proefafhankelijkheid vindt waarschijnlijk zijn oorsprong in het feit dat healingproeven doorgaans aangepaste versies zijn van de bestaande vermoeiingsproeven. Deze vermoeiingproeven nemen een verlies van stijfheid als maat voor schadeontwikkeling, echter er is nog steeds veel onduidelijkheid over de relatie tussen het verlies aan stijfheid en het ontstaan van (micro)scheuren in het materiaal (Di Benedetto, De La Roche et al. 2004, Mangiafico, Sauzéat et al. 2015). Indien een bepaalde mate van stijfheidsverlies wordt

genomen als startpunt voor een healingtest is er als gevolg hiervan veel onzekerheid in de mate van aanwezige (micro)scheuren. Deze onzekerheid werkt door in het healingresultaat, waardoor de healing bepaald met dergelijke proeven een grote variatie kent (Westera 1993, Westera 1994).

Deze paper poogt het een overzicht te geven van een aantal nieuwe inzichten in het healinggedrag van bitumen. Deze inzichten bieden nieuwe handvatten om healinggedrag van materialen op een passende manier mee te nemen in het ontwerp van wegconstructies. Hiertoe wordt in hoofdstuk 2 een overzicht tegen van het materiaalkundige inzicht in healing van asfalt. Daarnaast wordt in hoofdstuk 3 een nieuwe testmethode geïntroduceerd voor het bepalen van healing van bindmiddelen. In hoofdstuk 0 worden vervolgens een aantal testresultaten beschreven. Op basis van de beschreven inzichten en observaties wordt in hoofdstuk 5 een kwalitatief healingmodel beschreven en wordt in hoofdstuk 6 een voorzet gegeven voor een testmethode voor healinggedrag van bindmiddelen. Het paper sluit af met conclusies en aanbevelingen. De inzichten die zijn beschreven in dit paper zijn opgedaan gedurende een promotieonderzoek. Een uitgebreidere rapportage van alle beschreven concepten met bijbehorende achtergronden zal waarschijnlijk later dit jaar beschikbaar komen in de vorm van een proefschrift (Leegwater 2022).

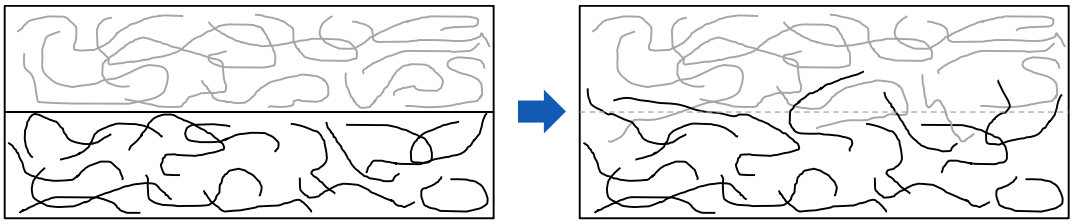
2. Materiaalkundige aspecten van healing van bitumen

De mate van herstel van materiaaleigenschappen of healing hangt af van het regenereren van contact en het homogeniseren van dit contact (Little, Bhasin et al. 2015). Zie ook de visualisaties van het naderen van twee scheuroppervlakken in Figuur 1 en het homogeniseren van dit contactoppervlak in Figuur 2. De fysische processen hierachter zijn hieronder verder uitgediept om beïnvloedende parameters te beschrijven en het belang van deze processen op het herstel van materiaaleigenschappen te kunnen inschatten.



a) *b)*

Figuur 1 a) Zijaanzicht van een scheur waaruit blijkt dat contact op een puntlocatie start. b) Bovenaanzicht van een ontwikkelend contactoppervlak, contactpunten groeien in radiale richting; de grijze zones zijn reeds in contact, terwijl er in de witte zones geen sprake is van contact.



Figuur 2 Links zijn twee bitumenoppervlakken net in contact gebracht, deze zijn in eerste instantie verbonden middels adhesie. Rechts is te zien dat als gevolg van diffusie de moleculen zich zullen verplaatsen van het ene oppervlak naar het andere waardoor uiteindelijk de interface zal verdwijnen.

Moleculen trekken elkaar aan, zo ook de moleculen in bitumen. Als gevolg hiervan kost het energie om (micro)scheuren en dus nieuwe oppervlakken te maken in bitumineuze materialen. Indien oppervlakken weer bij elkaar gebracht worden kan er juist energie worden gewonnen. Om deze energie te kunnen winnen zullen oppervlakken wel heel dicht bij elkaar moeten komen. Voor stijve,

elastische materialen zoals metaal of steen, is helen van scheuren doorgaans niet mogelijk, omdat de oppervlakteruwheid ervoor zorgt dat slechts een heel klein aantal moleculen elkaar voldoende kan naderen (Kendall 2001). Echter in het geval van hele zachte materialen en/of plastische materialen zoals bitumen is het wel mogelijk dat grote delen van een scheuroppervlak elkaar weer voldoende kunnen naderen opdat er moleculair contact gemaakt kan worden en oppervlakte-energie wordt teruggewonnen. Vanuit energetisch perspectief is er dus altijd winst als oppervlakken weer bij elkaar komen. De snelheid waarmee het contactoppervlak opnieuw gegenereerd kan worden hangt echter af van een aantal factoren, namelijk de ruwheid van het oppervlak en het gemak waarmee dit vervormd kan worden (de visco-elastische eigenschappen van het materiaal) en de additionele energie die hierin geïnvesteerd wordt. Dit zijn dan ook de parameters die bepalen hoe snel bitumineuze oppervlakken weer in contact kunnen komen.

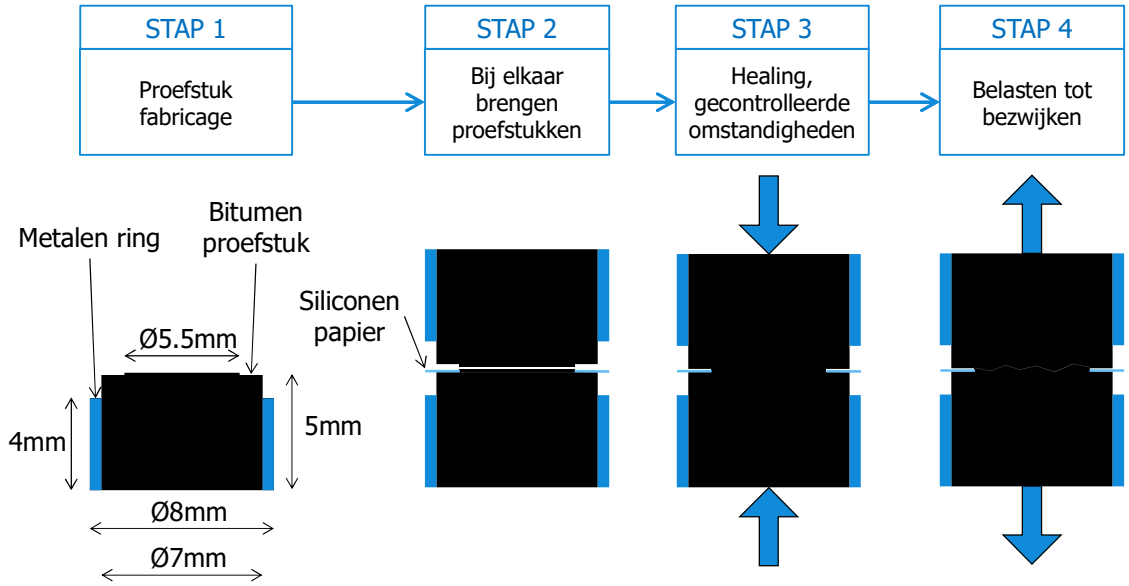
Indien er weer sprake is van moleculair contact tussen bitumenoppervlakken, kan er ook direct kracht overgebracht worden door dit contactoppervlak, immers om het weer los te maken is energie nodig. De kracht die kan worden overgebracht wordt doorgaans adhesie genoemd (al is het natuurlijk cohesie op het moment dat de materialen van beide oppervlakken hetzelfde zijn). Deze adhesie is van veel meer eigenschappen afhankelijk dan enkel de oppervlakte-energie. Andere eigenschappen, zoals de stijfheid en de breuktaaiheid kunnen ervoor zorgen dat de macroscopisch geobserveerde strekte vele malen hoger is dan de oppervlakte-energie. Het gaat te ver om hier uit leggen hoe dit precies zit, maar de materiaalkundige achtergrond is goed beschreven in o.a. (Kendall 2001). De grote van de adhesie die wordt geobserveerd nadat twee oppervlakken met elkaar in contact zijn gebracht is dus afhankelijk van de oppervlakte-energie, maar zeker ook van de visco-elastische eigenschappen van het materiaal.

Bitumen is een extreem traagviskeuze vloeistof, als gevolg hiervan zitten moleculen niet opgesloten in een structuur maar hebben ze een bepaalde mate van bewegingsvrijheid ten opzichte van elkaar. Met andere woorden het is mogelijk voor moleculen in bitumen om zich te verplaatsen ten opzichte van elkaar. Bitumen bestaat uit een eindeloze hoeveelheid verschillende moleculen (Read and Whiteoak 2003). Nabij een bitumenoppervlak zullen zich de moleculen verzamelen met een zo laag mogelijke oppervlakte-energie. Als gevolg hiervan zal er bij een bitumenoppervlak sprake zijn van een andere moleculaire samenstelling ten opzichte van de bulk. Deze verschillen zijn niet heel groot, maar wel meetbaar (Van Lent 2014). Kleine moleculen worden minder gehinderd in hun beweging ten opzichte van grote moleculen en zullen daarom sneller kunnen bewegen, of een hogere diffusiesnelheid hebben. Grote moleculen, zoals asfaltenen, zullen zich juist traag bewegen, terwijl hiervan gedacht wordt dat deze wel veel bijdragen aan de stijfheid en sterkte van bitumen. Indien er sprake is van een scheuroppervlak in een bitumineus materiaal, dan is het waarschijnlijk dat de moleculen aan het oppervlak iets afwijken van het bulkmateriaal. Op het moment dat twee bitumenoppervlakken met elkaar in contact komen verdwijnt het oppervlak zal de samenstelling van het bitumen zich weer bewegen in de richting van de bulk. Daarnaast zullen er moleculen zijn die vanuit het ene oppervlak zich gedeeltelijk verplaatsen in het andere oppervlak. Als gevolg hiervan zal de sterkte en taaiheid van het contact verder toenemen, totdat er weer sprake is van de originele materiaaleigenschappen. Het transport van moleculen door een materiaal heet formeel diffusie en is temperatuurafhankelijk. Hoe snel moleculen zich verplaatsen in bitumen is nog erg onbekend, schattingen van diffusiesnelheden variëren vele orde grootte ($1*10^{-12}$ m^2/s tot $1*10^{-20}$ m^2/s (Leegwater 2022)). Er is dus weinig te zeggen over de tijd die nodig is voor deze homogenisatie, maar wel dat deze per definitie tijd kost en dat deze tijd korter zal zijn naarmate de temperatuur toeneemt.

3. Directe trekproef van samengebracht bitumen met behulp van de DSR

In dit hoofdstuk wordt een nieuwe testmethode gepresenteerd. Deze testmethode richt zich op het bindmiddel. In deze testmethode wordt de healingtest gestart met twee volledig losse oppervlakken, in lijn met de aanname dat schade een fysieke discontinuïteit is in het materiaal is. In de proef worden twee bitumenoppervlakken bij elkaar gebracht onder gecontroleerde condities en wordt bestudeerd in hoeverre de sterkte van het contact zich ontwikkelt over de tijd, onder verschillende condities. In het ontwerp van de proef is ervoor gezorgd dat een aantal van de verschillende invloedsparameters op healing afzonderlijk van elkaar kunnen worden bestudeerd. Hierdoor wordt het mogelijk om het mechanisme achter healing verder te ontrafelen.

De opzet van de proeft is schematisch weergeven in Figuur 3. Als eerste stap worden kleine bitumenmonsters gemaakt met vaste afmetingen en een ring waardoor deze monsters in een DSR kunnen worden ingeklemd (stap 1). Vervolgens wordt een proefstuk gemaakt door twee van deze monsters op elkaar te plaatsen onder gecontroleerde omstandigheden (stap 2). In stap 3 krijgt het proefstuk de gelegenheid om te healen onder verschillende condities. Tot slot wordt in stap 4 de mate van healing bepaald door het proefstuk uit elkaar te trekken met behulp van een DSR (Dynamic Shear Rheometer), die is uitgerust met een belastingsensor voor normaalkracht en een temperatuurkamer (Anton Paar, EC Twist 502).



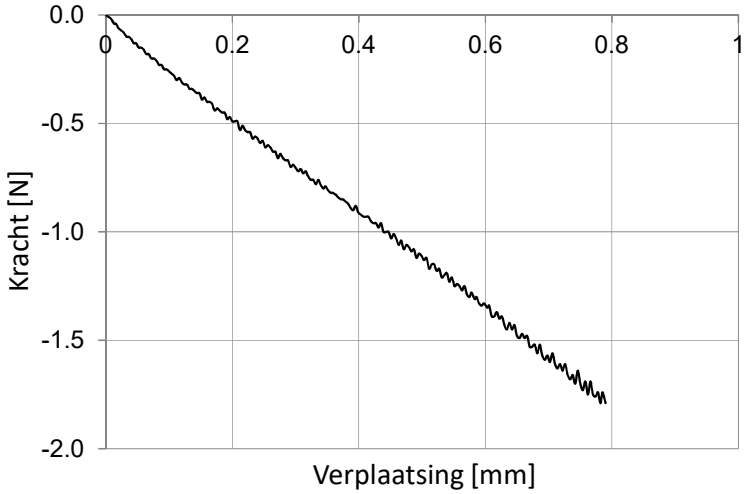
Figuur 3 Schematische opzet van proefstuk ontwerp en testmethode

Er zijn twee methoden onderzocht om de bitumenmonsters bij elkaar te brengen, namelijk met de hand en in de DSR. Beide methoden hebben hun voor en nadelen welke hierna zullen worden toegelicht. Als gevolg hiervan zijn resultaten van beide methoden relevant voor de inzichten die zijn opgedaan in dit onderzoek.

Indien de monsters met de hand bij elkaar worden gebracht, gebeurt dit in een temperatuurgecontroleerde kamer. Waarbij gebruik wordt gemaakt van een mal om te garanderen dat de monsters netjes recht op elkaar staan. Dit kan enkel onder druk van het eigengewicht, maar hier kan ook een klein gewicht (1 of 10gr) aan worden toegevoegd. Voordeel van deze handmatige methode is dat er veel proefstukken kunnen worden gemaakt, die vervolgens in een klimaatruimte voor een lange periode kunnen healen. Een eerste nadeel van deze methode is dat de sterkte net na het samenbrengen van de proefstukken niet direct gemeten kan worden. Een tweede nadeel is dat

er sprake is van een permanente normaalkracht gedurende de healingperiode, waardoor het proefstuk aanzienlijk kan vervormen. Beide effecten dragen eraan bij dat deze methode leidt tot minder nauwkeurige testresultaten.

De monsters kunnen ook met behulp van de DSR bij elkaar worden gebracht. In dit geval wordt een assemblagesnelheid opgegeven aan het apparaat en wordt opgedragen de machine stil te zetten op het moment dat een bepaalde normaalkracht wordt bereikt. Een kracht verplaatsingsdiagram van deze handeling is weergegeven als Figuur 4. Het belangrijkste voordeel van deze benadering is dat direct na het samenbrengen van de proefstukken de opgebouwde sterkte van het contact kan worden gemeten. Daarnaast is er minder verstoring van de meting doordat gehealde en enigszins vervormde proefstukken niet hoeven te worden getransporteerd en ingebouwd in de machine.



Figuur 4 Kracht- verplaatsingsdiagram van het assembleren van de monsters in de DSR

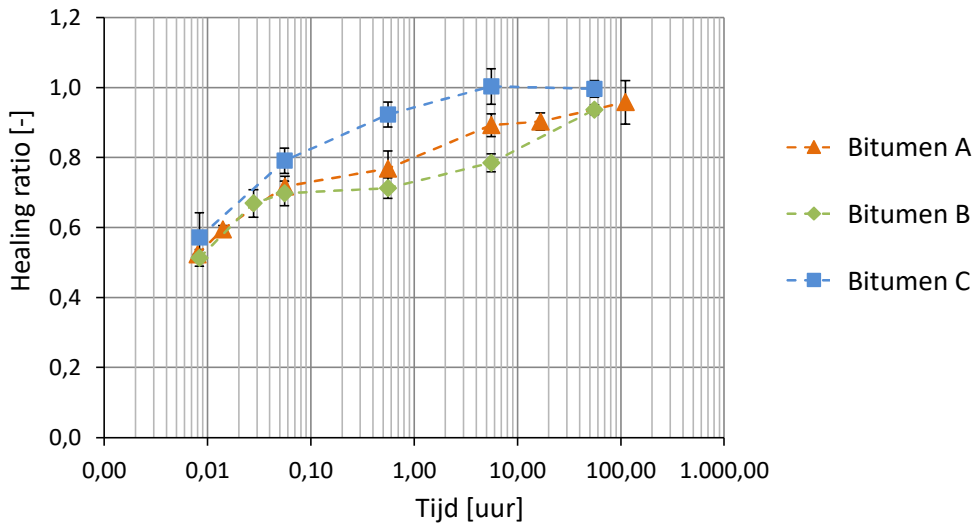
In het onderzoek is de treksterkte van het materiaal bepaald op referentieproefstukken bestaande uit kleine bitumenkolommen. Door de treksterkte van de gehealde bitumen te vergelijken met de referentie is een healingratio bepaald. Dit betekent dat een healingratio van 1 staat voor volledig herstel van het materiaal en een healingratio van 0 staat voor geen enkel herstel.

4. Testresultaten en discussie

Met behulp van de testmethode gepresenteerd in hoofdstuk 3 zijn verschillende materialen beproefd. Hierbij is gevarieerd tussen bitumina met dezelfde penetratiegraad en een verschillende oorsprong. Daarnaast is ook gekeken naar bitumina met verschillende penetratiegraden. In het onderzoek zijn healingtijden gevarieerd op een logaritmische tijdschaal, op deze manier kon de invloed van tijd bekeken worden van 30 seconden tot meerdere dagen.

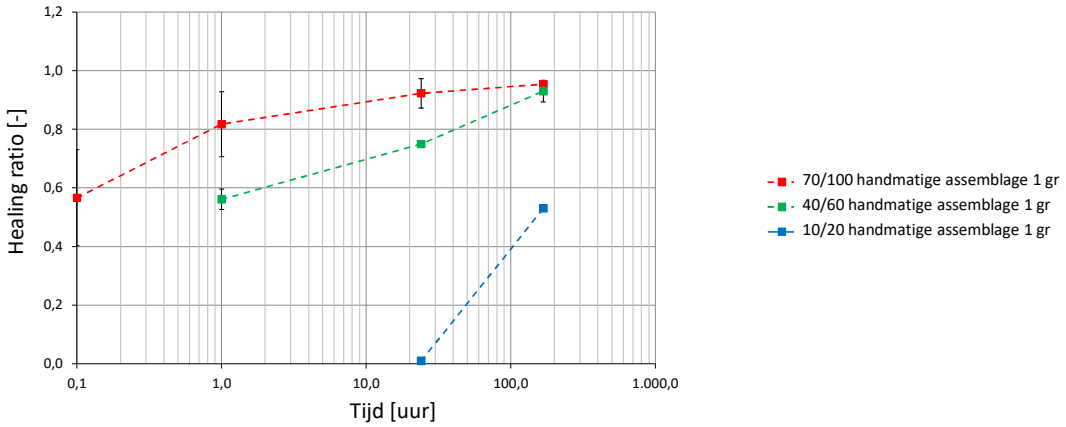
De testresultaten van verschillende 70/100 bitumen is weergegeven in Figuur 5. Om zowel het herstel na korte tijd als na lange tijd te tonen is een logaritmische schaal gebruikt voor de tijd-as. In de figuur is in de eerste plaats te zien dat de trend in healingratio van de verschillende materialen redelijk met elkaar overeenkomt. Daarnaast is te zien dat de healing van deze pure bitumen al in grote mate plaatsvind als het gevolg van het samenbrengen van de bitumenmonsters. De fase van het samenbrengen kost ongeveer 30 seconden, een eerste serie trekproeven is direct na dit moment gestart. Op dat moment is de gemeten healingratio al 0,5 à 0,6. Dit laat zien dat ruim de helft van het sterkteherstel direct na assemblage kan worden waargenomen. Gedurende de opvolgende periode is er initieel nog een relatief snelle toename te zien in sterkte, die steeds minder wordt naarmate de

tijd verstrijkt; in het eerste half uur (healingtijd 36 minuten) is er nog een toename van 20 à 30% in sterkte, terwijl in de volgende 6 uur er nog maar een toename van ongeveer 10% is te zien. De invloed van tijd op het healingproces is dus verre van lineair.



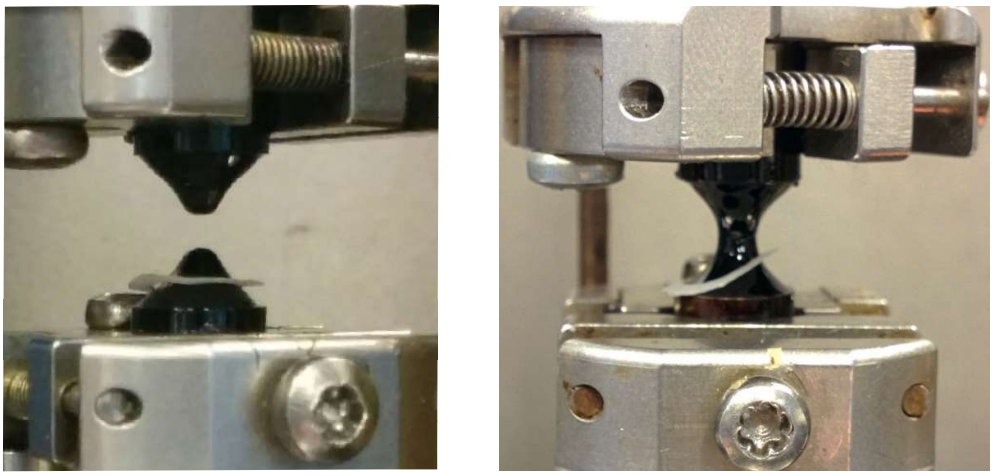
Figuur 5 Healingratio over tijd van verschillende 70/100 bitumina

In Figuur 6 zijn testresultaten getoond van bitumina met verschillende hardheden, namelijk 10/20, 40/60 en 70/100. De figuur laat zien dat de healingratio die wordt gedetecteerd afhankelijk is van bitumen hardheid. Vanwege de handmatige assemblage is de kortste healingtijd die kon worden beproeft 6 minuten. Wat ook opvalt in de figuur is dat zelfs voor een hard bindmiddel van 10/20 het mogelijk is om te healen. In dit geval is de vereiste healingtijd echter veel langer. Het lijkt waarschijnlijk dat voor dit harde bindmiddel vooral het creëren van contactoppervlak langer kost, aangezien het oppervlak veel minder makkelijk kan vervormen.



Figuur 6 Healingratio over tijd van bitumina met verschillende hardheid, beproefd na handmatige assemblage

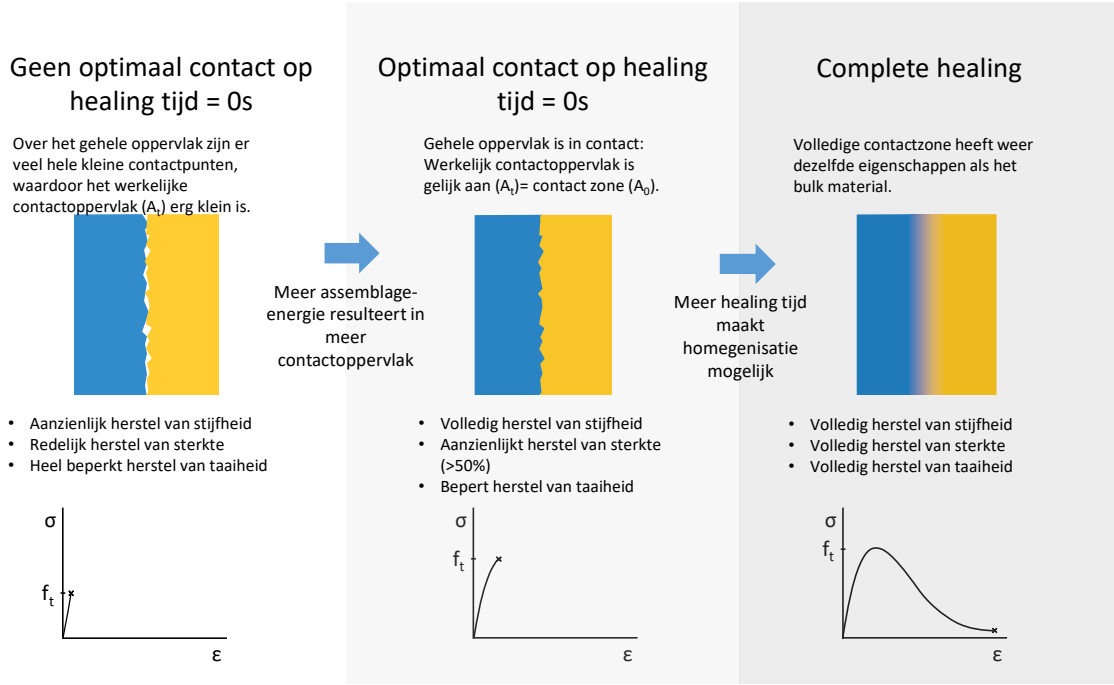
Figuur 5 en Figuur 6 zeggen beiden iets over het herstel van sterkte over de tijd. Een eigenschap die voor asfalt ook relevant is, is het herstel van de taaiheid. Diverse observaties gedaan tijdens het uitvoeren van de proeven hebben getoond dat materiaaltaaiheid wel kan worden teruggewonnen, echter dit herstel kost beduidend meer tijd dan de sterkte. Dit verschil in taaiheid is geïllustreerd in Figuur 7.



Figuur 7 Bitumenmonsters komen na korte healingtijden gedurende de trekproef volledig los van elkaar zoals in het linker figuur terwijl na langere healingtijden de oppervlakten verbonden blijven zoals in het rechter figuur.

5. Kwalitatief healing model

De testresultaten zijn samen met de fundamentele inzichten uit hoofdstuk 2 gebruikt om een kwalitatief healingmodel te formuleren. Dit model beschrijft de huidige kennis over de relevante processen en de mate van herstel die van ieder proces wordt verwacht, zie Figuur 8.

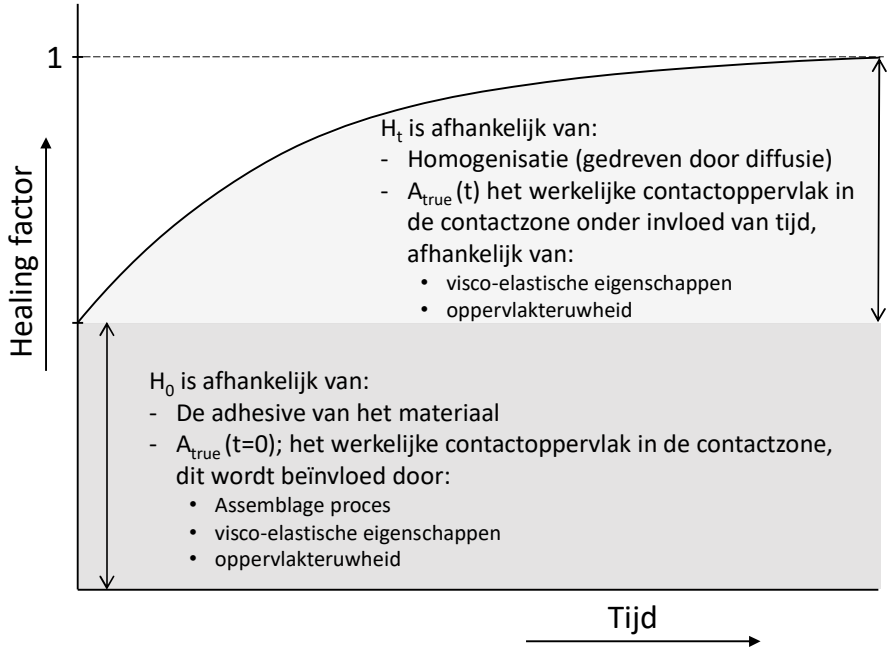


Figuur 8 Kwalitatief healingmodel met beschrijving processen en effect op materiaaleigenschappen.

In Figuur 8 is te zien dat het creëren van contactoppervlak al een grote impact heeft op het herstel van de materiaaleigenschappen. Het herstel van de breuktaaiheid kost vervolgens tijd, omdat dit proces diffusie vereist waarvoor tijd nodig is. Hoeveel tijd er nodig is voor diffusie is niet duidelijk door het gebrek aan betrouwbare waarde voor de diffusiecoëfficiënt.

Deze inzichten kunnen ook vertaald worden naar een ontwikkeling van de sterkte in de tijd, zoals weergeven in Figuur 9. Deze figuur laat zien dat er in healing van sterkte een component is welke

onafhankelijk is van tijd (H_0) en een tijdsafhankelijke component (H_t). De tijdonafhankelijke component wordt bepaald door de materiaaleigenschappen in combinatie met de condities waaronder de beide oppervlakken bij elkaar worden gebracht.



Figuur 9 Kwalitatief model voor herstel van sterkte in de tijd met een tijdsafhankelijke en een materiaal en assemblage afhankelijke component.

6. Snelle proef voor het bepalen van healing potentie van een materiaal

De testmethode beschreven in hoofdstuk 3 is in dit onderzoek vooral gebruikt om te kijken naar de ontwikkeling van healing in de tijd. Het uitgevoerde onderzoek laat zien dat dat de instantaan geobserveerde healing een voorspellende waarde heeft voor de healing die zich daarna nog over tijd zal ontwikkelen. Dit betekent dat deze instantaan bepaalde healing zou kunnen worden ingezet om de relatieve healingpotentie van bindmiddelen ten opzichte van een referentie te bepalen. Indien dit pad wordt ingeslagen moet wel voor een bredere set bindmiddelen worden aangetoond dat de instantane healing een voorspeller is van de healing potentie over langere tijd.

7. Conclusies en Aanbevelingen

Het geobserveerde sterkteherstel van materialen is in belangrijke mate afhankelijk van de mate waarin op moleculair niveau contact tussen healende oppervlakken kan worden gecreëerd. Dit betekent dat als er veel energie wordt geïnvesteerd in bij bijeenbrengen van oppervlakken, er instantaan al veel healing gedetecteerd kan worden. Dit verklaard in ieder geval ten dele waarom stijvere materialen in de meeste testen beschreven in de literatuur, minder healing vertonen, deze oppervlakken zullen minder makkelijk vervorming om contact te faciliteren.

De invloed van tijd op healing is verre van lineair, initieel heeft tijd een grote impact, maar deze wordt veel kleiner met de tijd. Dit geeft de indruk dat lange healingtijden niet perse nodig zijn voor healingonderzoek. Sterker nog, het lijkt erop dat healing na korte tijd indicatief is voor de healingpotentie die na een lange healingstijd kan worden bereikt.

De healingpotentie van een bindmiddel kan worden bepaald met behulp van een proef waar in een DSR bitumenmonsters bij elkaar worden gebracht. Deze proefopzet zou ingezet kunnen worden om te relatieve healingspotentie ten opzichte van een referentie te bepalen.

Het verdient aanbeveling om meer onderzoek te doen naar diffusiesnelheden van de verschillende bitumencomponenten in bitumen opdat meer inzicht verkregen kan worden in de homogenisatiefase.

Dankbetuiging

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

Bibliografie

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

Di Benedetto, H., et al. (2004). "Fatigue of bituminous mixtures." Materials and Structures **37**(3): 202-216.

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

Leegwater, G. A. (2022). Healing of bitumen, TU Delft. **PhD**.

Little, D. N., et al. (2015). Damage healing in asphalt pavements: Theory, mechanisms, measurement, and modeling. theory, mechanisms, measurement, and modeling. Advances in Asphalt Materials: Road and Pavement Construction**:** 205-242.

Mangiafico, S., et al. (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.

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

Read, J. and D. Whiteoak (2003). The Shell bitumen handbook, Thomas Telford.

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.

Van Lent, D. (2014). Interfacial interactions and mass transfer at the interfacial region of bituminous hydrocarbon mixtures, TU Delft, Delft University of Technology.

Westera, G. (1993). Healingonderzoek deelrapport I evaluatie van zeven healingonderzoeken [in Dutch]. Twello, The Netherlands, DWW Rijkswaterstaat.

Westera, G. (1994). Deelrapport 2 nadere beschouwing van het fenomeen healing bij asfalt [in Dutch]. Twello, The Netherlands, DWW Rijkswaterstaat.