

Labveroudering van ZOAB correleert niet met praktijkveroudering

Maarten Jacobs
BAM Infra Asfalt

Jeroen Besamusca
Kuwait Petroleum R&T

Natascha Poeran
Boskalis Nederland

René Gelpke
BAM Infra Asfalt

Samenvatting

De verouderingsgevoeligheid van asfaltmengsels is een belangrijke parameter voor de inschatting van de levensduur van asfaltdekkingen. Zowel leveranciers, aannemers als wegbeheerders zijn geïnteresseerd in dit fenomeen. Vandaar dat er over de hele wereld onderzoek op dit gebied wordt uitgevoerd.

Voor deze bijdrage zijn proeven uitgevoerd die een vervolg zijn op eerder onderzoek naar de simulatie van praktijkveroudering van bitumen in het lab. Alle verouderingsprocedures zijn uitgevoerd op ZOAB-platen. De asfaltplaten zijn in een stoof geconditioneerd bij verschillende temperaturen gedurende een variabele tijdsduur. Van het geëxtraheerde bitumen zijn minimaal 5 verschillende mechanische eigenschappen bepaald en zijn de chemische veranderingen door middel van FTIR vastgesteld. Alle veranderingen van eigenschappen geven vergelijkbare trends voor de rangschikking van de variatie in de onderzochte testmethode.

De resultaten laten zien dat veroudering van het bitumen in ZOAB door middel van alleen oxidatie geen goede indicatie geeft van wat er in de weg gebeurt. De verandering van de mechanische eigenschappen van asfalt uit de weg is altijd groter dan de verandering van mechanische eigenschappen van lab verouderd asfalt. De verandering van de chemische eigenschappen zijn daarentegen in sommige simulaties groter dan de verandering op de weg.

Trefwoorden

ZOAB, laboratoriumveroudering, praktijkveroudering, chemische bitumen eigenschappen, fysische bitumen eigenschappen, FTIR

1. Inleiding

Bitumen is een organisch materiaal en bevat voornamelijk koolstof (C) en waterstof (H). De moleculaire structuur van bitumen is zeer complex is, waardoor het nog steeds niet mogelijk is alle moleculen in bitumen te identificeren. Er wordt verondersteld dat bitumen meer dan 1 miljoen verschillende moleculen bevat, maar in het algemeen worden er een paar groepen actieve moleculen onderscheiden [1, 2, 3, 4]. In deze bijdrage wordt onder actief verstaan de bereidheid om een reactie met zuurstof aan te gaan. Veroudering treedt dus op als een reactie met zuurstof plaatsvindt in de tijd. De hoeveelheid oxidatie is afhankelijk van de oorsprong van het bitumen, de productie en verwerking van het asfalt, de verhardingsconstructie en de omgeving en het milieu van de verharding [5].

Vooraf tijdens productie en verwerking veranderen de eigenschappen van het bitumen enorm. Het begrijpen van het verouderingsmechanisme en de introductie van duurzaamheidsmodellen van het verouderingsproces van bitumen aan het wegoppervlak en in de asfaltlagen draagt er toe bij asfalt- en bitumeneigenschappen individueel te evalueren. Zo zal bitumen in een ZOAB of een DGD anders verouderen dan bitumen in een AC-mengsel en zal het bitumen in een kern uit een weg aan de bovenzijde meer verouderd zijn dan aan de onderzijde van de kern. Bij het extraheren van een totale kern zullen de bitumeneigenschappen dan ook afwijken van resultaten van extracties in plakken van de boorkern. Dit betekent dus ook dat schadebeelden niet altijd overeenkomen met eigenschappen van geëxtraheerd bitumen als de aanpak van bitumenonderzoek niet juist is geweest.

Er zijn standaard conditioneringstechnieken ontwikkeld die de veroudering van bitumen in het laboratorium simuleren. Veroudering van bitumen tijdens de productie van asfalt (korte termijn veroudering) wordt gesimuleerd met de RTFOT [6, 7, 8]; de combinatie van RTFOT en PAV wordt gezien als representatieve manier om het lange termijn verouderingsgedrag van bitumen te simuleren. In 2012 is in [9] aangegeven dat er beperkingen aan deze verouderingsprocedures zijn met betrekking tot verschillende asfaltconstructies.

Er is nieuw onderzoek uitgevoerd om een realistische verouderingsprocedure voor asfalt in het lab te ontwikkelen. Hier is gebruik gemaakt van eerdere ervaringen [9, 10]. Hierin is geconstateerd dat simulatie van de veroudering van bitumen in een ZOAB-mengsel niet mogelijk is door alleen aandacht te besteden aan de veroudering van het bitumen alleen: ook het mineraal aggregaat (zand, steenslag en vooral vulstof) heeft substantiële invloed op de veroudering van bitumen in een ZOAB-mengsel. Daarom is in [10] een ZOAB-specie verouderd door het materiaal gedurende 2 uur bij 165°C en daarna 7 dagen bij 90°C in een stoof te bewaren. Van deze methode werd ingeschat dat hiermee de veroudering van ZOAB gedurende 10 jaar in de praktijk gesimuleerd zou kunnen worden.

In deze bijdrage wordt ingegaan op de resultaten van verouderingsonderzoek op het bitumen, dat wordt geëxtraheerd uit laboratorium verouderde ZOAB-platen. Veroudering in het lab van alleen bitumen is, zeker voor ZOAB-mengsels, niet representatief voor praktijkveroudering.

2. Bouwstoffen en onderzoeksprogramma

Het uitgevoerde onderzoek sluit aan op het onderzoek dat in [9] is uitgevoerd. Op deze manier is het mogelijk een nieuw verouderingsprotocol te ranken ten opzichte van eerder uitgevoerd onderzoek. Bovendien is in [9] de praktijkveroudering van een bitumen uit een 10 jaar oude

ZOAB-laag gerapporteerd. Deze eigenschappen van het verouderde bitumen worden als referentie in deze bijdrage gehanteerd.

Het belangrijkste doel van het onderzoek is het simuleren van het verouderingsproces van asfalt in het laboratorium. Er is geen aanvullende conditionering van het bitumen toegepast en daarom is bitumenconditionering [12] niet meegenomen in het onderzoek.

In het onderzoek is besloten een protocol te ontwikkelen waarin de veroudering van het bitumen in een ZOAB-mengsel thermisch wordt opgewekt. Er is voor een ZOAB 0/8 als basismengsel gekozen. In dit ZOAB mengsel zijn bitumen 70/100, Bestone steenslag, Wigro 60K vulstof en Bestone brekerzand als bouwstoffen gebruikt. Het toegepaste bitumen is afkomstig van dezelfde bitumenleverancier als van de 10 jaar oude referentie ZOAB. Omdat het basisbitumen en het raffinageproces van deze bitumenleverancier de afgelopen 10 jaar niet is veranderd, wordt verondersteld dat de resultaten van lab verouderd bitumen rechtstreeks vergeleken kunnen worden met het geëxtraheerde bitumen uit 10 jaar oude ZOAB.

Het ZOAB is laboratorium gemengd en laboratorium verdicht, waarbij getracht is dezelfde werkwijze te volgen als in de praktijk. Na menging is het ZOAB in een houten bak verdicht tot een verdichtingsgraad van 100% met een lichte 2-rol wals. Na verdichting is de plaat thermisch verouderd in een stoof met geforceerde ventilatie, waarbij de plaat op een geperforeerde onderplaat is gelegd. In het onderzoek zijn 5 verouderingsprotocollen toegepast (zie Tabel 1). In deze tabel zijn ook de kleuren aangegeven waarmee de beproevingsresultaten in grafiekvorm worden weergegeven. In Tabel 2 zijn alle uitgevoerde bitumenproeven samengevat.

Tabel 1: Overzicht van de toegepaste verouderingsprocedures

Label	Kleur	Verouderingsprotocol	
		Temperatuur [°C]	Duur [hrs]
BAM_AA135	Rode lijn	135	44
BAM_AA0_0	Wit	-	-
BAM_AA90_336	Rood	90	336
BAM_AA90_504	Rood	90	504
BAM_AA100_504	Blauwe lijn	100	504
BAM_AA100_504_2	Blauw	100	504
BAM_AA100_840	Blauw	100	840

Tabel 2: Overzicht toegepaste bitumenproeven

Eigenschap	Norm	Korte beschrijving
Penetratie	EN 1426	Hardheid door naaldpenetratie bij 25°C
Verwekingspunt $T_{R\&K}$	EN 1427	Verwekingspunt door kogelval, bepaald in een geroerd waterbad
Dynamisch viscositeit	EN 12596	Vacuum capillaire viscometer bij 60°C
Kinematische viscositeit	EN 12595	Kinematische viscometer bij 135°C
Breekpunt van Fraass	EN 12593	Brosheid bij lage temperatuur
BBR	EN 14771	Flexibiliteit en kruipstijfheid bij lage temperatuur
DSR	EN 14770	Complexe stijfheid and fasehoek
FTIR	Variatie methode	Infrarood adsorptie

Eigenschap	Norm	Korte beschrijving
Detectie oplosmiddel	'Head space' analyse	'Head space' is het gas boven het bitumenmonster in een chromatografie – opstelling waarin vluchtige componenten gedetecteerd kunnen worden die uit het bitumen verdampen
Componenten	Gaschromatografie	Methode om gasvormige componenten te scheiden en te detecteren

Nadat de platen verouderd zijn is het bitumen uit de platen teruggewonnen, waarbij gebruik gemaakt is van de rotatieverdamplingsmethode conform NEN-EN 12697-3. Bovendien is ook een monster bitumen uit een niet verouderde ZOAB-plaat geëxtraheerd en onderzocht. In het onderzoek zijn een serie bitumenproeven uitgevoerd die zich focussen op het herkennen van chemische en mechanische bitumenwijzigingen als gevolg van veroudering van bitumen. De FTIR-waarden zijn berekend met de variatiemethode. De piek rond 1700 cm^{-1} voor C=O resp. de piek rond 1030 cm^{-1} voor S=O zijn gedeeld door de piek bij 2600 cm^{-1} voor CH.

In de volgende paragraaf worden de resultaten van de proeven gepresenteerd en besproken. In de diverse grafieken zullen oude en nieuwe onderzoeksresultaten gepresenteerd worden. In Tabel 3 zijn de labels en protocollen van het onderzoek uit [9] aangegeven.

Tabel 3: Conditioneringsopties uit onderzoek [9]

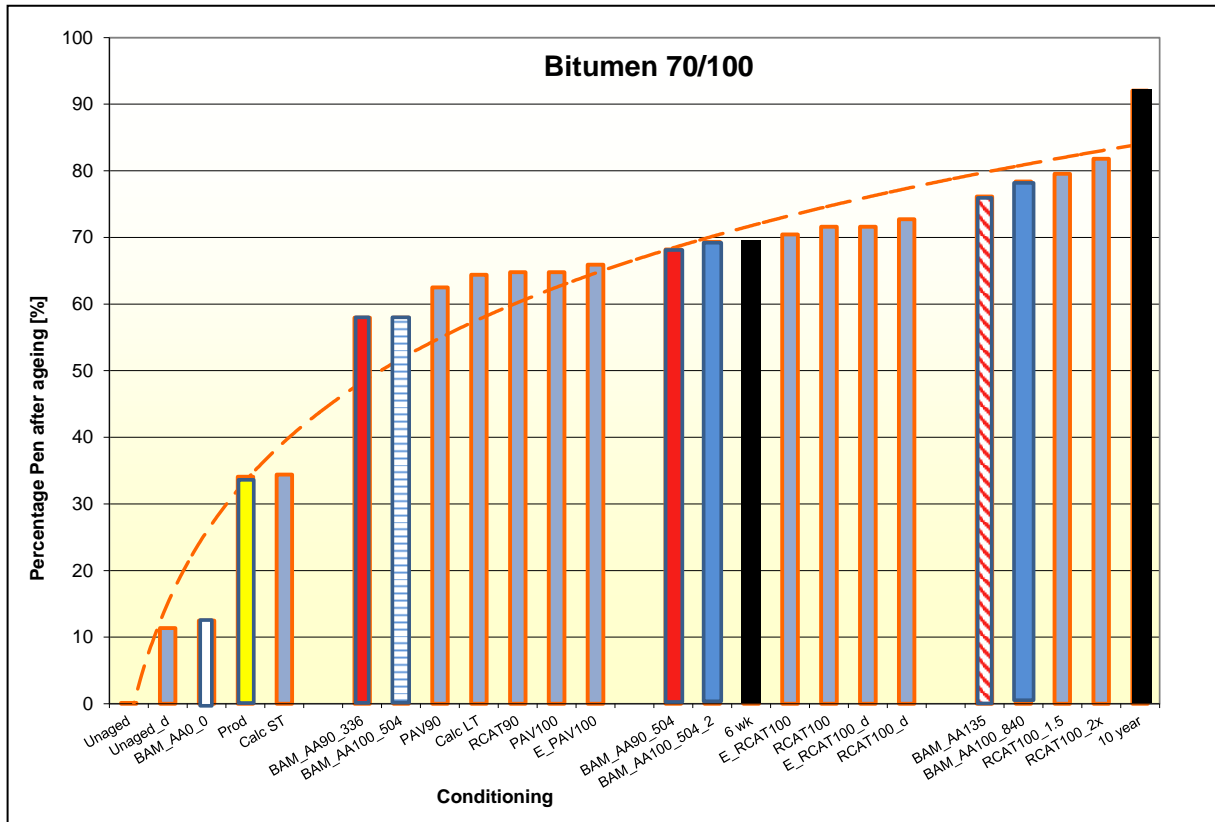
Label	Beschrijving	In grafieken
Unaged	Niet verouderd bitumen, pen 88	
Unaged_d	Duplicate onverouderd bitumen, pen 78	
Prod	Geëxtraheerd bitumen direct na productie in de asfaltcentrale	Kleur: geel
Calc ST	Korte termijn veroudering, data uit Q8 database	
PAV90	RTFOT(163) + PAV(90)	
Calc LT	Lange termijn veroudering, data uit Q8 database	
RCAT90	RCAT(163) + RCAT(90)	
PAV100	RTFOT(163) + PAV(100)	
E_PAV100	RTFOT(151) + PAV(100)	
6 wk	Geëxtraheerd bitumen 6 weken oud asfalt uit de weg	Kleur: zwart
E_RCAT100	RCAT(151) + RCAT(100)	
E_RCAT100_d	RCAT(151) + RCAT(100), gedupliceerd met pen 78	
RCAT100	RCAT(163) + RCAT(100)	
RCAT100_d	RCAT(163) + RCAT(100), gedupliceerd met pen 78	
RCAT100_1.5	RCAT(163) + RCAT(100) @ 210h	
RCAT100_2x	RCAT(163) + RCAT(100) @ 280h	
10 year	Geëxtraheerd bitumen 10 jaar oud asfalt uit de weg	Kleur: zwart

3. Resultaten en discussie

Alle onderzoeksresultaten zijn grafisch weergegeven in de vorm van staafdiagrammen, waarbij de resultaten in oplopende volgorde zijn weergegeven.

3.1 Penetratie

De penetratiewaarden zijn weergegeven als percentage van de penetratie van het originele bitumen. Het doel van deze presentatievorm is het evalueren van de ranking naar verouderingsprocedure. In de grafieken zijn verschillende kleuren gebruikt voor de verschillende verouderingsprocedures.



Figuur 1: Ranking op basis van de penetratie van het bitumen

In Figuur 1 is de penetratie van de teruggewonnen bitumina weergegeven. De witte kolom is het resultaat van het niet verouderde ZOAB en is duidelijk lager dan die van het bitumen direct uit de asfaltcentrale (Label Prod; gele kolom). Het Unaged_d monster is een controlemonster van het bitumen met een kleine afwijking ten opzichte van het originele bitumen monster. Unaged_d kan gebruikt worden om verschillen in de veroudering van het bitumen aan te geven. Het originele bitumen heeft een penetratie van 88 dmm terwijl het reservemonster een penetratie heeft van 78 dmm. Dit wordt in Figuur 1 weergegeven door 11% verschil ten opzichte van het origineel.

Het BAM_AA135 monster (rood-wit gestreepte kolom) is het monster dat 44 uur laboratorium verouderd is bij 135°C. BAM_AA90_336 (rode kolom) en BAM_AA90_504 zijn bitumina uit ZOAB dat 2 resp. 3 weken (336 resp. 504 uur) laboratorium verouderd zijn bij 90°C.

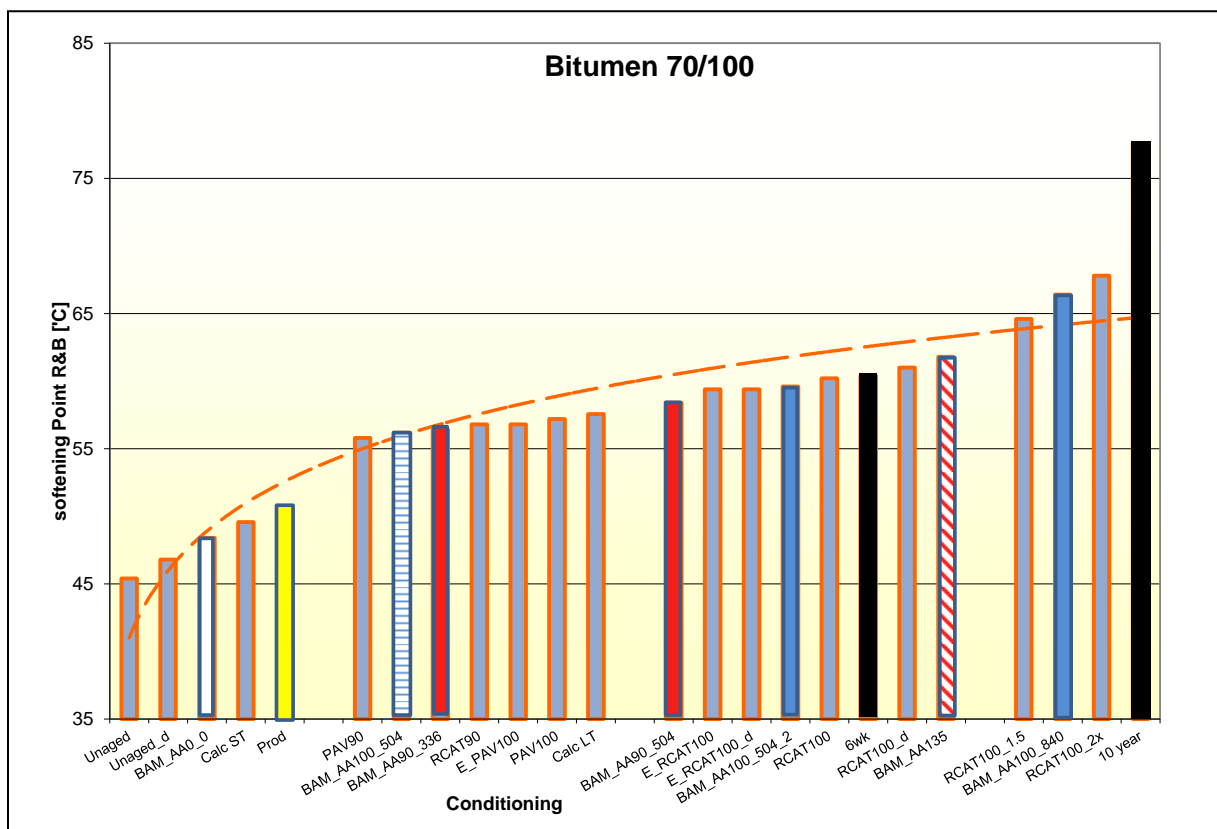
Het BAM_AA100_504 (blauw-wit gestreepte kolom) is een monster waarop een extra analyse is uitgevoerd omdat de resultaten van dit monster duidelijk afweek van de andere resultaten. Uit de headspace gaschromatografie bleek dat het monster verontreinigd was, met

het oplosmiddel waarmee bitumen uit een asfaltmengsel wordt geëxtraheerd. Voor deze analyse is een nieuw monster gebruikt en geanalyseerd: BAM_AA100_504_2. Dit monster is geëxtraheerd van een proefplaat waar aanvullende rafelingsproeven op zijn uitgevoerd. BAM_AA100_504_2 (blauwe kolom) en BAM_AA100_840 (blauwe kolom) zijn bitumen-monsters afkomstig van ZOAB dat 3 resp. 5 weken (504 resp. 840 uur) laboratorium verouderd is bij 100°C.

Uit de resultaten van het penetratieonderzoek blijkt dat 1 week extra veroudering een groter effect heeft op de pen waarde dan een temperatuuroename van 10°C. De vuistregel dat 10°C toename in temperatuur een verdubbeling van de veroudering tot gevolg heeft wordt uit de penetratieresultaten niet bevestigd. Bovendien moet geconcludeerd worden dat geen enkele verouderingsprocedure in het lab eenzelfde verandering in penetratie heeft opgeleverd als veroudering gedurende 10 jaar in de praktijk.

3.2 Verwekingspunt ring en kogel ($T_{R\&K}$)

De ranking van de resultaten op basis van het verwekingspunt $T_{R\&K}$ (zie Figuur 2) zijn nagenoeg identiek als voor de penetratie. Het monster BAM_AA135 lijkt voor $T_{R\&K}$ iets afwijkend te presteren, maar de ranking op basis van veroudering blijft onveranderd. Opnieuw is de significante invloed van de resten van het oplosmiddel op het verwekingspunt (blauw-wit gestreepte kolom) duidelijk waarneembaar.

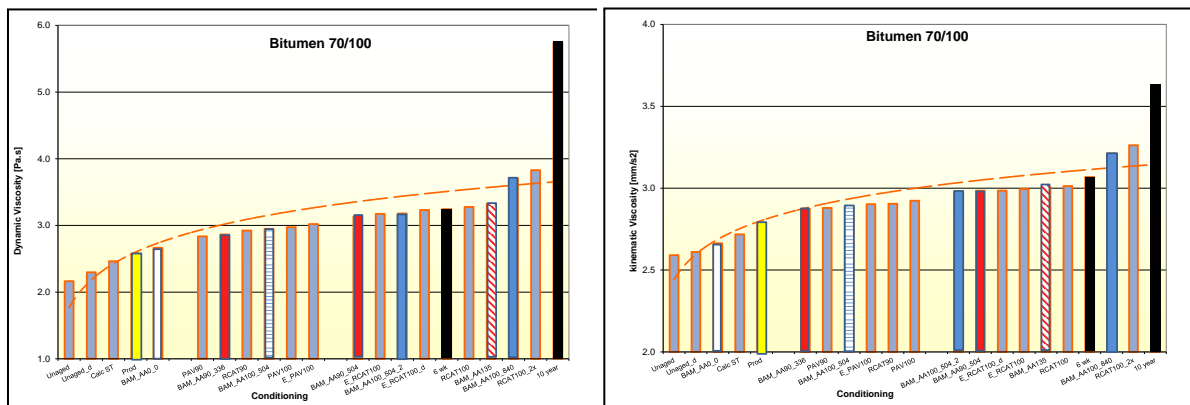


Figuur 2: Ranking op basis van het verwekingspunt van het bitumen

3.3 Viscositeit

De ranking op basis van de dynamische en kinematische viscositeit (Figuur 3) is nagenoeg identiek als voor de penetratie en het verwekingspunt. Als gevolg van kleine verschillen wisselt de volgorde soms om, maar blijven altijd in de buurt van de oorspronkelijke plek. Opnieuw moet geconstateerd worden dat de hierboven genoemde vuistregel ook hier niet

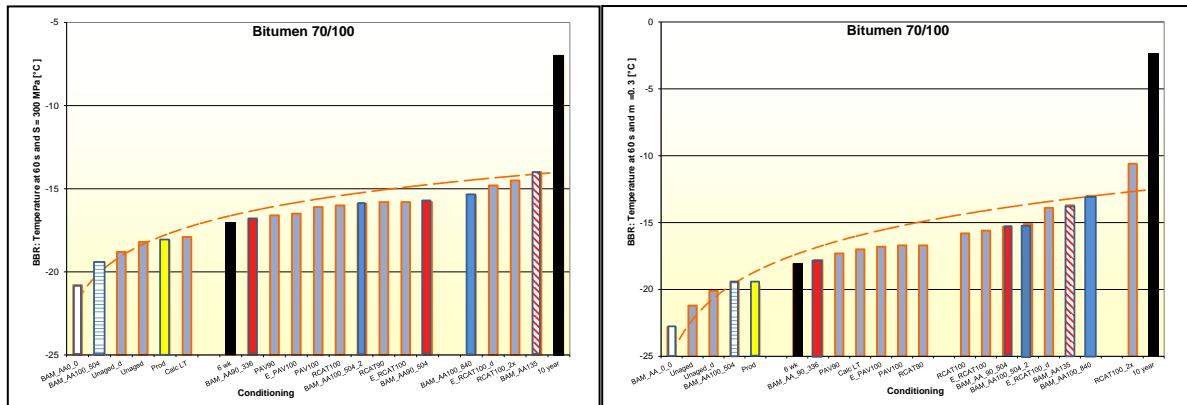
opgaat. Verder kan opgemerkt worden dat in sommige onderzoeken de viscositeitsverhouding als verouderingsindex wordt gebruikt.



Figuur 3: Ranking op basis van de dynamische en kinematische viscositeit van het bitumen

3.4 BBR-onderzoek

De resultaten van het BBR-onderzoek (Figuur 4) laten dezelfde tendens zien als de vorige resultaten. In de linker figuur zijn de resultaten weergegeven van de temperatuur waarbij de kruipstijfheid 300 MPa is en in de rechter figuur de resultaten van de temperatuur waarbij de m-waarde 0,3 is. De enige afwijkende waarde wordt gevonden voor het monster BAM_AA100_504 (blauw-witte kolom). Dit resultaat is nagenoeg identiek aan de meetresultaten op het niet-verouderde bitumen. Opnieuw is de invloed van oplosmiddel in het monster duidelijk zichtbaar. Deze substantiële invloed van oplosmiddelen op de BBR-resultaten is ook al gerapporteerd in eerder onderzoek [15].

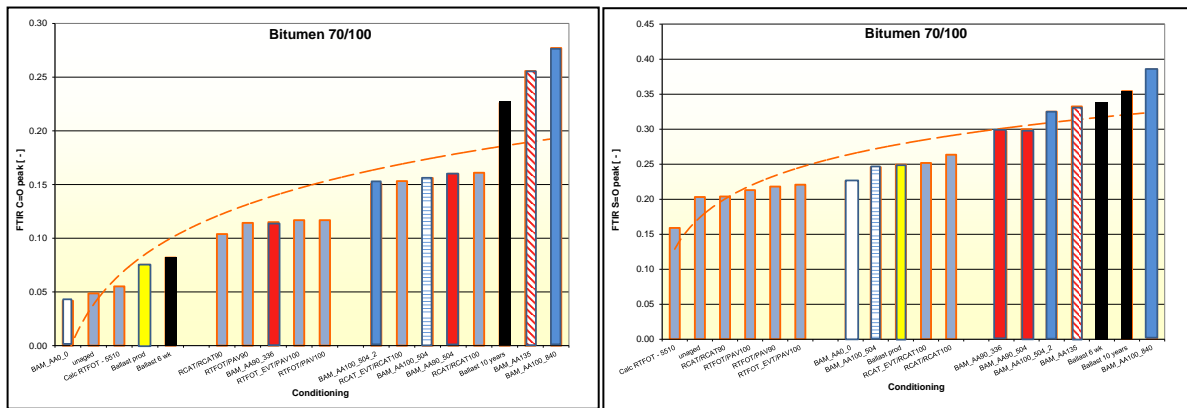


Figuur 4: Ranking op basis van BBR-resultaten (kruipstijfheid en m-waarde)

3.5 FTIR-onderzoek

De resultaten van de ranking van de oxidatiepieken (zie Figuur 5) zijn afwijkend ten opzichte van de andere eigenschappen. De C=O-resultaten van het bindmiddel na 6 weken in de weg zijn nagenoeg identiek aan de resultaten van bindmiddel direct na productie van het asfaltmengsel in de asfaltcentrale. Dit is in tegenspraak met de resultaten van de mechanische proeven waarbij de eigenschappen van bitumen dat 6 weken in een verharding heeft gezeten altijd gelijkwaardig waren met de eigenschappen van bitumen na RTFOT+PAV-veroudering in het lab.

De resultaten van BAM_AA135 en BAM_A100_840 vertonen een hogere oxidatiewaarde dan bitumen uit 10 jaar oude ZOAB.



Figuur 5: Ranking op basis van de FTIR-resultaten van het bitumen (C=O en S=O)

In de ranking op basis van de S=O-pieken in het FTIR-onderzoek blijkt dat bijna alle verouderde bitumina uit asfaltplaten een hoge ranking hebben (liggen aan de rechterzijde van de grafiek) ten opzichte van alle laboratorium verouderde bitumina (liggen aan de linkerzijde van de grafiek), behalve voor de RCAT-verouderde bitumina bij 100°C. Dit kan een gevolg zijn van de verschillen in oxidatie kinetiek bij 100°C ten opzichte van de oxidatie kinetiek bij 90°C. Maar het meest waarschijnlijke verklaring is het feit dat RCAT-veroudering veel zwaarder is dan PAV-conditionering van het bitumen.

De resultaten van de S=O-analyses wijken duidelijk af van de andere onderzoeksresultaten, zelfs van de C=O-resultaten. Dit kan een indicatie zijn voor het feit dat de kinetiek van zwaveloxidatie in de aanwezigheid van een vulstof en/of mineraal aggregaat anders is dan die bij de koolstofoxidatie.

De verschillen tussen het BAM_A100_504 monster (blauw-wit gestreepte kolom) en de hoge ranking van het BAM_A100_504_2 monster (blauwe kolom) in de S=O-analyse kan een indicatie zijn voor het ontstaan van zwaveloxidatie tijdens aanvullende proeven (rafelingsproeven met de ARTe).

3.6 Resumé

De resultaten van de chemische analyses tonen duidelijk aan dat alleen chemische proeven niet voldoende zijn om een indicatie van de verouderingsgevoeligheid van bitumen te krijgen. Dit wordt vaak beweerd in de literatuur (bijvoorbeeld [16]).

Het algemene beeld dat de proefresultaten geeft impliceert dat oxidatieve veroudering van bitumen in het laboratorium, zowel op onbehandeld bitumen als bitumen dat geëxtraheerd is uit asfalt, niet overeenkomt met praktijkveroudering. Dit is eerder in andere onderzoek geconstateerd [16-20]. De reden voor de mismatch is het feit dat in de praktijk ook UV, regen, straling, verkeersbelasting, olie- en vetresten, zout en 'physical hardening' substantiële invloed hebben op de veroudering van het bitumen.

4. Conclusies en aanbevelingen

Op basis van de resultaten van het onderzoek kunnen de volgende conclusies worden geformuleerd:

1. Veroudering van bitumen 70/100 op basis van oxidatieve behandelingen in een laboratorium is niet representatief voor de veroudering van bitumen in een ZOAB-laag in de praktijk;

2. De invloed van een geringe hoeveelheid achterblijvend oplosmiddel in geëxtraheerd bitumen heeft substantiële invloed op de eigenschappen van dit bitumen;
3. De pieken van carbonyl- en zwaveloxide vertonen een andere ranking als het bitumen al dan niet gemengd is geweest met mineraal aggregaat. De kinetiek van zwavel oxidatie wordt meer door het mineraal aggregaat en/of vulstof beïnvloed dan die van carbonyl-oxidatie;
4. Hoewel het onderzoek géén representatieve verouderingsprocedure heeft opgeleverd lijkt de oplossing gezocht te moeten worden in de richting van een protocol waarbij het bitumenmonster niet onder druk en bij voorkeur bij lagere temperaturen (beneden 90°C) wordt verouderd.

Voor vervolgonderzoek worden de volgende aanbevelingen gegeven:

1. Bij onderzoek op bitumen uit asfaltkernen moet rekening gehouden worden met verschillen in eigenschappen tussen bitumen aan de bovenzijde van de kern (het wegoppervlak) en enige afstand van het wegoppervlak. Dit geldt zelfs voor bitumen in ZOAB-lagen;
2. Bij de terugwinning van bitumen uit asfalt moet er voor gezorgd worden dat er geen oplosmiddel in het bitumen achterblijft. Dit kan eenvoudig worden gecontroleerd door een gaschromatografie uit te voeren op het gas boven het geëxtraheerde bitumen (headspace-analyse);
3. De conclusies van dit onderzoek gelden waarschijnlijk niet alleen voor bitumina in ZOAB-mengsel. Dit geldt voor bitumen in alle asfaltmengsels;
4. Bitumen van verschillende oorsprong en verschillende hardheid zullen verschillend reageren op oxidatieve verouderingsprocessen. Daarom zou voorzichtig met generalisatie van bindmiddelonderzoek omgegaan moeten worden. Eigenlijk zou ieder individueel bitumen opnieuw onderzocht moeten worden.

5. Geraadpleegde literatuur

- [1] Bell, C.A., *Ageing of Asphalt-Aggregate systems*, SHRP-A 305, 1989;
- [2] Glover, C.J., *Oxidation and kinetics of Ageing in Asphalt Binders*, Int. Workshop on Binders and Mastics, Madison, Wisconsin, 2010;
- [3] Verhasselt, A.F., *A Kinetic approach to the ageing of Bitumens*, Asphaltenes and Asphalts, Developments in Petroleum Science, Elsevier Science B.V., 2000;
- [4] Herrington, P.R., *Effect of Oxygen Concentration on Product Ratios During Bitumen Oxidation*, Petr. Sci. Techn. 23, 2005;
- [5] Brown, A B., Sparks, J.W. and Larsen, O., *Rate of change of Softening Point, Penetration and Ductility of Asphalt in Bituminous Pavement*, AAPT, vol 26, p.66;
- [6] Pauls, J.T. and Welborn, J.Y., *Studies of the Hardening Properties of Asphaltic Materials*, AAPT, vol 21, 1952;
- [7] R. L. Griffin, T. K. Miles and C. J. Penther, *Microfilm Durability Test for Asphalt*, AAPT, vol 24, 1955;
- [8] Peterson, J. C., *A Review of the Fundamentals of Asphalt Oxidation*, Transportation Research Circulair, E-C140, 2009;
- [9] Besamusca, J., Volkers, A., Water, van de J. and Gaarkeuken, B., *Simulating ageing of EN 12591 70/100 bitumen at laboratory conditioning compared to porous asphalt*, E&E2012, paper 224;
- [10] Ven, van de M.F.C., Voskuilen, J., and Jacobs, M.M.J., *Practical Laboratory Ageing Method for Porous Asphalt*, E&E2012, paper 219;
- [11] prEN 12697-52, *Bituminous mixtures – Test methods – Part 52: Conditioning to address oxidative ageing*, concept juli 2015;

- [12] Erskine, A. J., et. all., *Another look at accelerated ageing of asphalt cements in the pressure ageing vessel*, E&E2012, paper 202;
- [13] EN 12697-03, *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 3: Bitumen recovery: Rotary evaporator*, mei 2013;
- [14] Glover., C. J., et. all., *Evaluation of Binder Ageing and its influence in Ageing of Hot Mix Asphalt Concrete*: Technical Report, FHWA/TX-14/0-6009-2, januari 2014;
- [15] Herrington, P. R. and Wu, Y., *Effect of inter-molecular association on bitumen oxidation*, Petroleum Science and Technology, 17 (3&4), 291-318, 1999;
- [16] Memon, G. M. and Chollar, B. H., *Laboratory simulation of oxidative ageing of asphalt, Oxidative Behaviour of Materials by Thermal analytical Techniques*, STP 1326, ASTM PCN 04-013260-50, 1997;
- [17] NCRHP 84, *Development of a Fracture Mechanics-Based Asphalt Binder Test Method for Low Temperature Performance Prediction*, Final Report for Highway IDEA Project 84, februari 2004;
- [18] TRB E-C140, *A review of the Fundamentals of Asphalt Oxidation*, Chemical, Physicochemical, Physical Property, and Durability Relationships, oktober 2009.
- [19] Yut, I., Bernier, A. and Zofka, A., *Development of a Compact Laboratory Aging Procedure for Asphalt Binders*, Proceedings AAPT vol. 81, 2012;
- [20] AP-T 296-15, *Development of a Durability Test Method for Sprayed Sealing Binders: A Field Validation Study*, Austroads, 2015.