

De ontwikkeling van een kunstmatig verouderd asfalt: AAAM – Artificially Aged Asphalt Mixture

ING. WIM VAN DEN BERGH¹

¹Artesis Hogeschool Antwerpen, Opleiding Bouwkunde, onderzoeksgroep
Wegenbouwkunde

Samenvatting

In deze bijdrage wordt de ontwikkeling van een artificieel verouderd asfaltmengsel besproken. Dit mengsel (AAAM) kan nadien aangewend worden als asfaltgranulaat voor verdere beproeving in het onderzoekslab.

Résumé

Cette contribution concerne le développement d'un enrobé âgé artificiel. Ce mélange peut être utilisé comme des agrégats d'enrobés bitumineux en cas des études expérimentaux.

1. Ter inleiding

Bij experimenteel onderzoek is het aanwenden van een referentiemateriaal noodzakelijk ten einde resultaten te kunnen vergelijken i) in de tijd, ii) tussen verschillende proefmonsters en iii) tussen verschillende laboratoria. De zogenaamde round robins voor bitumen en asfaltbeproeving maken bijvoorbeeld gebruik van een zelfde (nieuw) materiaal.

Aan de Artesis Hogeschool van Antwerpen is het gebruik en de evaluatie van asfaltgranulaat een belangrijk onderzoeksvoorwerp sinds 1997. Dit materiaal is echter nooit van constante kwaliteit hetgeen een probleem is bij vergelijkende proeven. Er dient steeds een grote hoeveelheid asfaltgranulaat bewaard te worden. Dit materiaal is onderhevig aan veroudering.

Asfaltgranulaat is afkomstig van het affrezen of opbreken van een verouderde asfaltverharding. In de meeste gevallen is het bindmiddeltype en haar oorsprong niet gekend zodat bij bindmiddelonderzoek het terugwinnen van het bindmiddel uit het asfaltgranulaat noodzakelijk is. Het terugwinnen van een bindmiddel is genormeerd (EN12697-3) maar blijft ter discussie voornamelijk wanneer er gemodificeerd bindmiddel aanwezig is [ref.1].

In het doctoraal onderzoek [ref.2] wordt het effect van het gebruik van asfaltgranulaat op de duurzaamheid van asfaltmengsels voor onderlagen uitvoerig onderzocht. Naast asfaltmengsels dienen ook mortel-, mastiek- en bindmiddelmengsels aangemaakt en beproefd te worden. Deze mengsels (bitumen, mastiek, mortel en asfalt) zijn samengesteld uit verouderd en nieuwe materialen. Om het telkens terugwinnen van bindmiddel en mastiek te vermijden is het verouderen van deze materialen noodzakelijk. Er zijn diverse verouderingstechnieken ter beschikking die productie, verwerking en in-situ veroudering simuleren. In dit onderzoek werd gekozen voor de RCAT-veroudering (EN-15323). Bij deze

verouderingstechniek wordt in één cyclus ca. 550 ml bindmiddel of mastiek verouderd. Dit is een grote hoeveelheid in vergelijking met de terugwinefficiëntie uit asfalt (ca. 125g teruggewonnen bindmiddel uit 3kg asfaltgranulaat). Met dit verouderd materiaal kunnen dan mengsels aangemaakt worden voor verdere beproeving bijv. met de dynamic shear rheometer. In dit onderzoek worden echter ook vermoeiings- en healingproeven voorzien op asfalt waarin een gedeelte asfaltgranulaat is verwerkt. Het zou een zeer interessant gegeven zijn indien het asfaltgranulaat over hetzelfde bindmiddel beschikt als bij de bindmiddel- en mastiekmengsels van hierboven. Hetzelfde bindmiddel betekent: producent, type en verouderingsgraad.

In deze paper wordt de ontwikkeling besproken van een kunstmatig verouderd asfalt (Eng.: Artificially Aged Asphalt Mixture) aan de Artesis Hogeschool Antwerpen. Met deze ontwikkeling werd gestart in 2006 en is ondertussen mee opgenomen binnen de Round Robin van de RILEM-werkgroep TG5 – Recycling of Bituminous Mixtures. Deze Round Robin kan aanleiding geven tot een standaardisatie van de productie van een asfaltgranulaat in het labo als een referentiemateriaal.

2. Doelstellingen van het onderzoek

Dit onderzoek heeft de volgende doelstellingen:

- Het ontwikkelen van een procedure voor het kunstmatig verouderen van asfalt tot asfaltgranulaat;
- Het afstemmen van de RCAT-verouderingscyclus voor bindmiddel en mastiek tot gelijkwaardige reologische en chemische eigenschappen van het bindmiddel in het AAAM;
- Het gebruik van AAAM moet leiden tot het ter beschikking hebben van een verouderd asfaltmengsel waarvan de grondstoffen gekend zijn: aggregaat en bindmiddel;
- Het bindmiddel en de mastiek van AAAM kunnen verouderd worden in een RCAT-oven voor bindmiddel- en mastiektesten opdat de terugwinprocedure overbodig wordt.

3. Onderzoeksprogramma

Het onderzoeksprogramma kan samengevat worden als volgt.

Deel 1: Vooronderzoek en keuze procedure AAAM

In dit deel werd een literatuuronderzoek uitgevoerd naar reeds bestaande verouderingsprocessen, hun voor- en nadelen en validering.

Deel 2: Uitvoeren van de procedure AAAM

In dit deel werd asfalt aangemaakt en verouderd. Op regelmatige tijdstippen werden monsters genomen uit het asfaltmengsel. Het bindmiddel werd teruggewonnen en geanalyseerd door middel van reologische metingen en FTIR.

Deel 3: RCAT-veroudering van bindmiddel en analyse

In dit deel werd het bindmiddel dat gebruikt werd in het asfalt van deel 2 verouderd in de RCAT-oven. Op regelmatige tijdstippen werden monsters genomen en geanalyseerd door middel van reologische metingen en FTIR.

Deel 4: Aanbevelingen voor verder onderzoek.

3.1. Verouderingsparameters

Het bindmiddel in asfalt is onderhevig aan veroudering. De veroudering van dit bindmiddel leidt tot een stijver gedrag van het asfalt. Deze stijfheidverhoging heeft positieve en negatieve gevolgen. Enerzijds is het asfalt minder onderhevig aan plastische vervorming en heeft een hoger draagvermogen maar anderzijds kan deze verstijving leiden tot schadebeelden waaronder scheurvorming en rafeling.

De verstijving van het asfalt en bindmiddel is rechtstreeks gerelateerd aan de productie, verwerking en in-situ omstandigheden van het asfalt. Bitumen is een mengsel van asfalteneën en malteneën. Deze malteneën zijn voornamelijk harsen, aromaten en verzadigden. De samenstelling van het bitumen (onderlinge verhoudingen van deze groepen) bepaalt grotendeels het reologisch gedrag bij welbepaalde externe omstandigheden (belasting, temperatuur). Onderzoekers [ref.3] rapporteren belangrijke wijzigingen in viscositeit bij de productie en verwerking van asfalt. Het asfalteengehalte verhoogt beduidend. Het verouderen of verharden van het bindmiddel is een proces van voornamelijk oxidatie, verlies van vluchtige bestanddelen sterische en fysieke verharding.

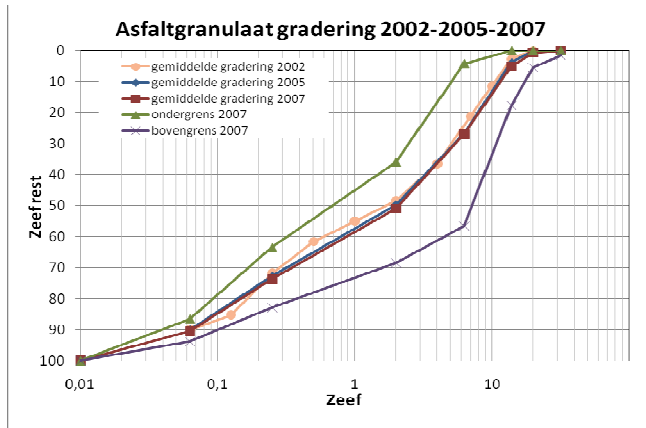
De korte termijn veroudering van het bindmiddel wordt in het labo gesimuleerd door de RTFOT of RCAT korte termijn veroudering. Na de aanleg van het asfalt verouderd het bindmiddel ook doch minder intens dan bij de productie en verwerking.

Om de veroudering van een bindmiddel te kwantificeren zijn er diverse verouderingsparameters. Er kunnen verhoudingen opgesteld worden van de viscositeiten, stijfheden, verwekingspunten e.d. van de bindmiddelen voor en na de veroudering. Dit zijn meestal fysische parameters. Men kan de veroudering ook chemisch bekijken door middel van FTIR. Er wordt hierbij gekeken naar de piekwaarden bij onder andere 1700 cm⁻¹ (C=O binding) en 1030 cm⁻¹ (Sulfoxides). Een andere methode wordt gegeven door Lamontagne et al [ref. 4] . Bij deze methode worden verhoudingen berekend van de oppervlaktes onder de absorptiecurve. In deze bijdrage wordt er niet verder ingegaan op de achtergrond van deze technieken.

Het bindmiddel uit asfaltgranulaat wordt bij het mengselontwerp gekarakteriseerd door het penetratiegetal en het verwekingspunt. Dit betekent dat een verouderd bindmiddel uit asfaltgranulaat gelijkwaardig gesteld wordt met een nieuw bindmiddel uit dezelfde klasse.

3.2. Het verouderen van asfalt in het labo

In 2002 werd door de onderzoeksgroep Wegenbouwkunde van de Hogeschool Antwerpen [ref. 5] een overzicht gemaakt van 21 verschillende AG-monsters op basis van verantwoordingsnota's aan het MOW. Deze gegevens werden recentelijk geüpdatet. Hieruit kan opgemerkt worden dat de gemiddelde gradering van AG-mengsels nagenoeg constant blijft van 2000 tot 2007 zoals kan worden gezien in figuur 1, samen met de onder- en bovengrens van gevonden korrelverdelingen. De eigenschappen van de bijhorende bitumina zijn samengevat in tabel 1.



figuur 1:AG-gradering 2002, 2005 en 2007

AG-bitumen	bitumen		% B (op)
	Pen 1/10 mm	R&B °C	
Gem. 2002	27,1	62,3	6,1
St.afw. 2002	5,3	4,4	0,9
Gem.2005	24,4		5,9
St.afw. 2005	6,5		0,8
Gem. 2006	18,6		
St.afw.. 2006	5,6		
Gem. 2007	18,8		5,6
St.afw. 2007	3,9		0,9

Tabel 1: AG-bindmiddelen

Uit de resultaten blijkt dat de gemiddelde gradering nagenoeg constant blijft. Dit is ook te verwachten aangezien de asfaltsamenstellingen in de loop van de jaren nauwelijks zijn veranderd. Voor het penetratiegetal van de AG-bitumina is er een duidelijke trend waarneembaar: de gemiddelde penetratie daalt van 27,1 naar 18,8. Oorzaken hiervan zijn waarschijnlijk het hoger gebruik van harder bindmiddel (tegen spoorvorming) en uitgesteld onderhoud. De standaardafwijkingen zijn in de loop van de jaren eveneens kleiner geworden.

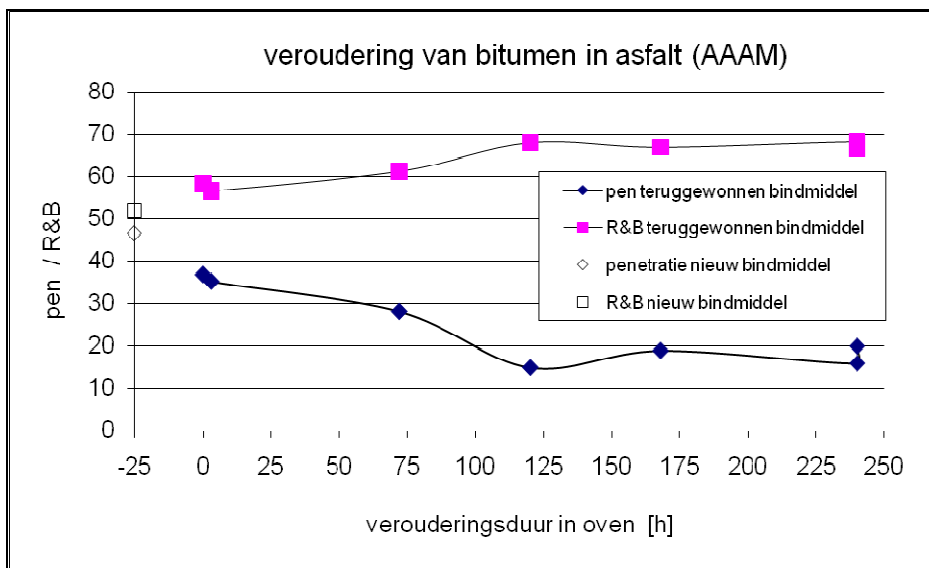
Op basis van bovenstaande gegevens werd beslist om een AB-3B mengsel te verouderen met een bindmiddel 35/50.

Er zijn in de literatuur vele verouderingstechnieken voor asfalt beschreven en dit voor verdichte als niet-verdichte mengsels en voor open en dichte asfaltmengsels. Een Europese standaardprocedure is er niet. Het Amerikaanse SHRP programma A383 [ref.6] ontwikkelde een procedure om asfaltmengsels in het lab te verouderen, later overgenomen in de AASHTO R30-2 methode. De methode bestaat erin om het asfalt een korte termijnveroudering en een lange termijnveroudering te laten ondergaan. Tijdens de korte termijnveroudering wordt een niet-verdicht asfaltmengsel in een geventileerde oven gedurende vier uur bij 135°C verouderd. Tijdens de lange termijnveroudering worden verdichte proefstukken verouderd gedurende vijf dagen bij 85°C. In het Verenigd Koninkrijk

werd door Collop et al [ref.7] een verouderingsprocedure ontwikkeld waarbij verdichte proefstukken in contact met water, onder hoge druk (2,1 MPa) en temperatuur (85°C) verouderd worden. Deze procedure maakt deel uit van een watergevoeligheidsproef op verdichte proefstukken: Saturation Ageing Tensile Stiffness (SATS).

Op basis van de literatuur en met het in acht nemen van het werkelijke warmtetraject van asfalt bij de productie en verwerking, werd gekozen voor de veroudering van niet verdicht asfalt op korte termijn gedurende 3u bij 130°C (simulatie opslag, verwerking en aanleg) en op lange termijn bij 90°C in een geventileerde oven (simulatie van veroudering op de weg). Op regelmatige tijdstippen werden monsters genomen en het bindmiddel teruggewonnen.

In de onderstaande grafiek (figuur 2) wordt een overzicht weergegeven van het penetratiegetal en het verwekingspunt van het bindmiddel in het verouderde asfalt. De gegevens bij -25 uur zijn de gegevens voor het bitumen voorafgaandelijk de verouderingsprocedure. De punten 0 uur en 3 uur zijn de bindmiddelen respectievelijk na productie van het asfalt en na 3 uur korte termijn veroudering.



Figuur 2: Verouderen van asfalt

Op basis van deze gegevens werd beslist om het asfalt te verouderen in de oven tot 168h (7 dagen). Het verouderde asfalt wordt verder Artificial Aged Asphalt Mixture (AAAM) genoemd.

3.3. Het verouderen van het bindmiddel met RCAT

Het bindmiddel waarmee het AAAM geproduceerd werd, een bindmiddel B35/50 werd eveneens verouderd door middel van RTFOT en RCAT korte term en RCAT lange term veroudering.

In de tabel hieronder worden de resultaten gegeven. De penetratie werd berekend uit G*-metingen bij 25°C en 0,4Hz volgens Saal and Labout [ref. 8].

	Pen 1/10mm	R&B [°C]
B35/50	46,6	52
B35/50 RTFOT	33,5	56,4
B35/50 RCAT korte termijn	39	54,5
B35/50 RCAT lange termijn 144 uur	16	65,6
Bindmiddel teruggewonnen na productie	36,9	58,3
Bindmiddel teruggewonnen na 3 uur	35,3	56,6
Bindmiddel teruggewonnen na 168 uur	19	66,9
Bindmiddel teruggewonnen na 240 uur	16	68,2
	20	66,6

Tabel 2: bindmideleigenschappen na RTFOT, RCAT en uit AAAM (2006)

De penetratie na 144h van het RCAT verouderde bindmiddel bedroeg 16 1/10 pen en het verwekingspunt bedroeg 65,6 °C. Een nieuw mengsel werd in 2007 opnieuw verouderd en de bindmideleigenschappen werden bepaald na 168 uur. Met een penetratie van 17 1/10mm en een verwekingspunt van 68°C werd, samen met de resultaten uit 2006, een goede correlatie gevonden met de RCAT lange termijn veroudering.

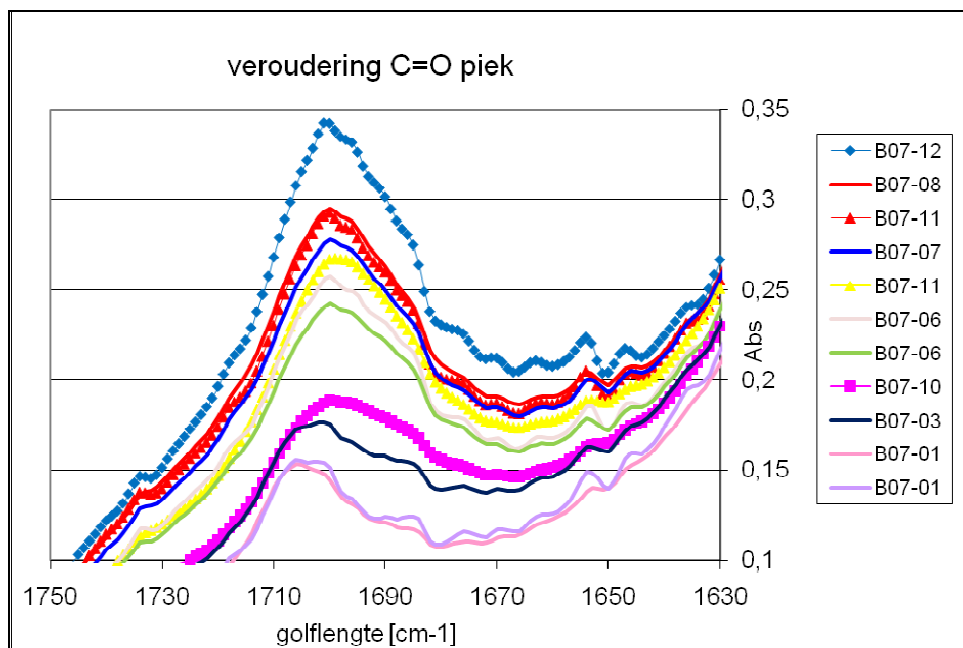
3.4. FTIR-metingen

Op de bindmiddelen teruggewonnen uit het verouderd asfalt en verouderd met RCAT werden eveneens FTIR-metingen uitgevoerd. De FTIR metingen werden uitgevoerd bij NYNAS AB en MOW – Afd. Wegenbouwkunde.

In de tabel wordt een overzicht gegeven van de gekozen bindmiddelen en de grafiek geeft de piekwaarden van de absorptie bij 1700 cm⁻¹ (C=O bindingen) weer.

B35/50	B07-01
B35/50 RCAT korte termijn	B07-03
B35/50 RCAT 144h	B07-06
B35/50 RCAT 192h	B07-07
B35/50 RCAT 240h	B07-08
teruggewonnen na 3 uur	B07-10
teruggewonnen na 7 dagen	B07-11
teruggewonnen na 10 dagen	B07-12

Tabel 3: Bindmiddelnummering



Figuur 3: verouderingsparameter C=O

De bovenstaande grafiek toont voor de C=O piek een steeds hogere waarde zowel voor de RCAT veroudering van het bindmiddel als voor het teruggewonnen AAAM-bindmiddel. Aan de hand van de reologische waarden (tabel 2) en de figuur 3 kan de veroudering van AAAM geëvalueerd worden. De resultaten worden in 2009 diepgaander geanalyseerd (en gecorrigeerd) met andere methoden (bijv. volgens ref. 4). Aan de hand van de grafiek kunnen nu reeds enkele specifieke details opgemerkt worden:

- 1) Bindmiddel B07-10 is het bindmiddel teruggewonnen uit korte termijn verouderd asfalt en kan vergeleken worden met RTFOT en RCAT korte termijn veroudering. Echter, het bindmiddel teruggewonnen uit het asfalt heeft een hogere C=O piek dan het RCAT-verouderd bindmiddel. Dit is in overeenstemming met de reologische waarden (tabel 2) Dit zou kunnen wijzen op een hogere oxidatie door het contact met het (hete) aggregaat, de invloed van vulstof of dat de verouderingsduur van het AAAM in de short-term fase te lang is. In het geval van korte-termijn veroudering werd door Verhasselt A. [ref.9] aangetoond dat de RCAT korte termijn en RTFOT procedure nagenoeg gelijkwaardig verouderen. In dit onderzoek verouderd RTFOT meer dan RCAT short term, op basis van reologische waarden: zie tabel 2.
- 2) De piek van het verouderde bindmiddel RCAT 144h (standaardtest) is lager dan het bindmiddel teruggewonnen uit AAAM 7d. Reologisch gezien (mastercruves) komen deze overeen.
- 3) De C=O-pieken van de teruggewonnen bindmiddelen uit AAAM-7d en 10 dagen liggen ver uit elkaar. Tussen deze twee pieken wordt de piek teruggevonden van RCAT-192h.

Een voorlopige conclusie in dit onderzoek is dat de veroudering van asfalt tot AAAM gedurende 7 dagen voldoende veroudering geeft wanneer vergeleken wordt met RCAT-veroudering.

De RCAT lange termijn veroudering werd gevalideerd in vergelijking met een in situ verouderd dicht asfaltbeton door Choquet [ref.10] wat betreft het asfalteengehalte. RCAT veroudering gedurende 144 u bij 85°C komt overeen met 20 jaar veroudering als toplaag. Door Francken et al [ref.11] werd voor een open asfalt van 12 jaar een overeenstemming gevonden met RCAT veroudering gedurende 240 u bij 83°C op basis van het asfalteengehalte. Voor de reologische waarden bleek het bindmiddel uit het verouderde asfaltmengsel meer verouderd (*harder*).

De RCAT-korte termijn veroudering is op chemisch vlak (C=O piek) zwakker dan verwacht. Uit een vergelijking met RTFOT en de korte termijn veroudering van AAAM asfalt blijkt dat de korte termijn veroudering van bindmiddel met RCAT een te lage verouderingsindex wordt bekomen.

Om een chemische en reologische overeenstemming te vinden tussen RCAT en AAAM-bindmiddel zou men kunnen opteren om de RCAT lange termijnveroudering van het bindmiddel naar 192 u te verlengen om de vergelijking te maken met het AAAM-bindmiddel (7 dagen).

3.5. Verder onderzoek AAAM

De eerste resultaten voor het aanmaken van AAAM zijn beloftevol en het bindmiddel kan gereproduceerd worden in een RCAT-oven, maar met een verlengde verouderingsduur van 192 i.p.v. 144 uur.

In 2009 worden nieuwe tests uitgevoerd op andere types AAAM (verschillende bindmiddelen). Tevens worden de FTIR analyses verder geëvalueerd.

In de RILEM TG5 werkgroep “recycling of asphalt mixtures” wordt in 2009 een round Robin georganiseerd. De resultaten worden eind 2009 verwacht.

4. Invloed van AAAM op de ITS-R resultaten van asfalt

De AAAM-ontwikkeling kadert in de evaluatie van het gebruik van hoge percentages asfaltgranulaat in asfalt op de ITS-R waarde. Uit een vooronderzoek aan de Hogeschool Antwerpen [ref.12] blijkt dat bij een AB-3B mengsel de toevoeging tot 80 m/m% AAAM (met een zelfde samenstelling als het referentiemengsel) leidt tot verbeterde ITS-R resultaten bij een constante hoeveelheid bitumen in het mengsel en door gebruik te maken van eenzelfde bitumentype (B35/50) als nieuw toegevoegd bitumen.

Mengsel	% HR	ITS dry (Mpa)	ITS wet (Mpa)	ITS Ratio op 15 °C (%)
AM0702-01 referentiemengsel	4,1	2,21	1,70	77
AM0702-02 20% AAAM	3,9	2,27	2,26	100
AM0702-04 50% AAAM	3,5	2,75	2,63	96
AM0702-05 60% AAAM	4,1	3,11	2,50	81
AM0702-06 80% AAAM	5,0	3,03	2,40	79
AM0702-07 100% AAAM	4,8	3,07	2,05	67

Tabel 4: ITS-R resultaten bij toevoeging van AAAM en met zelfde bindmiddel B35/50

Doordat gebruik gemaakt wordt van een kunstmatig verouderd mengsel tot AG met een zelfde samenstelling als het uiteindelijke mengsel, hebben de mengsels een zelfde bindmiddelgehalte, korrelverdeling en grondstoffen. Het effect op de ITS-R wordt aldus bepaald door het aandeel verouderde AG-bitumen.

De asfaltmengsels werden in een tweede fase aangemaakt met zachtere bindmiddelen opdat een zelfde theoretische 'eindpen' bekomen werd voor alle asfaltmengsels.

Mengsel	% HR	ITS dry (Mpa)	ITS wet (Mpa)	ITS Ratio op 15 °C (%)
AM0702-01 referentiemengsel	4,1	2,21	1,70	77
AM0702-20 20% AAAM	3,7	2,45	2,26	92
AM0702-21 40% AAAM	4,0	2,33	1,88	80
AM0702-22 50% AAAM	3,9	2,36	2,03	86

Tabel 5: ITS-R resultaten bij toevoeging van AAAM en zachter bindmiddel

Uit de tabel blijkt dat tot 50% een verbetering van ITS-R te noteren is in vergelijking met het referentiemengsel; de trend is vergelijkbaar met de resultaten uit tabel 4.

Testen met een afgfreesd asfaltgranulaat leiden eveneens tot een verhoging van de ITSR. Tot 50% is er geen beduidend verschil tussen AAAM en het afgfreesde AG. Bij hogere percentages is het echter moeilijker om eenzelfde korrelverdeling te ontwerpen. 100% Asfaltgranulaat heeft een zeer lage ITS-R waarde omwille van het hoog percentage holle ruimte van 10%. Dit heeft vooral te maken met de niet aangepaste korrelverdeling.

Mengsel (nieuw/verouderd)	% HR	ITS dry (Mpa)	ITS wet (Mpa)	ITS Ratio op 15 °C (%)
AM0702-01 referentiemengsel	4,1	2,21	1,70	77
AM0702-40 20% AG	3,7	2,50	2,15	86
AM0702-41 40% AG	3,5	2,39	2,21	92
AM0702-42 50% AG	3,1	2,29	1,93	84
AM0702-43 100% AG	10,0	1,46	0,41	28

Tabel 6: ITS-R resultaten bij toevoeging van afgfreesd asfaltgranulaat en zachter bindmiddel

Uit dit onderzoek wordt onthouden dat AAAM kan gebruikt worden als alternatief voor AG maar men dient bij hogere percentages te onthouden dat AAAM een betere kwaliteit – dus betere resultaten- heeft dan AG. In 2009 worden testen uitgevoerd met een AAAM waarvan de korrelverdeling en bindmiddelgehalte gelijk is aan de korrelverdeling van een AG.

5. Referenties

- [ref.1] De Jonghe, A.C.A. et al (2005). "Onderzoek naar de compatibiliteit van bindmiddelen bij gebruik van APG", eindrapport, Hogeschool Antwerpen, Antwerpen.
- [ref.2] Van den bergh, W. "Onderzoek naar de invloed van AG-bindmiddel op de duurzaamheid van onderlagen", lopend doctoraal onderzoek, Artesis Hogeschool Antwerpen en TU Delft.
- [ref.3] Chipperfield E.H., Duthie, J.L. en Girdler R.B. (1970). "Asphalt characteristics in relation in road performance", Proc. AAPT 1970, Seattle.
- [ref.4] Lamontange, J., Dumas, P., Mouillet, V., Kister, J. (2001) "Comparison by Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy of different ageing techniques : application to road bitumens", Fuel 80, pp 483-488, 2001, Elsevier.
- [ref.5] De Jonghe, A.C.A., Van den bergh, W., Verheyen, J. (2003). "Studie naar een wegopbouw bestaande uit uitsluitend bitumineus gebonden materialen", Eindrapport, Hogeschool Antwerpen, Antwerpen.
- [ref.6] Bell, C.A., AbWahab, Y., Cristi, M.E. and Sosnovske D. (1994) "Selection of laboratory aging procedures for asphalt-aggregate mixtures", Strategic Highway research Programme Report No. SHRP-A-383. National Research Council, Washington D.C.
- [ref.7] Collop, A.C., Choi, Y., Airey, G.D. and Elliott, R. C. (2004) "Development of a combined ageing / moisture sensitivity laboratory test", Eurasphalt and Eurobitume Congress, Vienna, 12-14 May 2004, paper 252.
- [ref.8] Saal, R.N.J., Labout, J.W.A. (1958). "Rheological properties of Asphalts", Rheology (Ed. Eidrich), Volume II, ch.9, pp.363-400, Academic Press Inc., New York
- [ref.9] Verhasselt, A.F. (2002), "Long Term ageing – Simulation by RCAT ageing tests, ISAP 2002.
- [ref.10] Choquet, F.S. (1991) "The search for an ageing test method based on changes in the generic composition of bitumens" International Symposium "Chemistry of Bitumens", Vol. II, pp. 787-812, Rome 1991.
- [ref.11] Francken, L., Vanelstraete A., Verhasselt A. (1997) "Long-term ageing of pure and modified bitumen: influence on the rheological properties and relation with the mechanical performance of asphalt mixtures" ISAP 1997.
- [ref.12] De Meester, S. (2008) "Invloed van asfaltgranulaat op de ITS-R", thesis, Hogeschool Antwerpen, Antwerpen