

Hergebruik asfalt met PmB's of vezels: kans of bedreiging?

Amin Hassani
Maarten Jacobs
Rémy van den Beemt
BAM Infra Asfalt

Samenvatting

In het kader van duurzaamheid wordt steeds meer vrijkomend asfalt hergebruikt bij het produceren van nieuwe asfalmengsels. Er wordt enerzijds in steeds meer mengselsoorten asfaltgranulaat toegepast (nu ook in ZOAB en SMA), terwijl anderzijds in asfaltbetonmengsels (AC surf/bin/base) het percentages hergebruik steeds hoger wordt. Bij al deze ontwikkelingen wordt de kwaliteit van het asfaltgranulaat steeds belangrijker. Niet alleen de homogeniteit van het freesmateriaal is belangrijk, maar ook de bouwstoffen in het freesmateriaal spelen een rol in de herbruikbaarheid van asfaltgranulaat.

In een laboratoriumstudie is de invloed van gemodificeerde bitumina (EVA en SBS) en van vezels in het asfaltgranulaat op de eigenschappen van het nieuwe asfalmengsel vastgesteld. Hiertoe zijn verschillende soorten asfaltgranulaat in het lab geproduceerd en gedoseerd in een laboratorium-verouderd asfaltbetonmengsel. Ook zijn, in praktijk-verouderde, asfaltgranulaten (met SBS-, EVA- en vezelmodificatie) uit de weg verzameld en gedoseerd in hetzelfde asfaltbetonmengsel. Van alle mengsels zijn mengbaarheid, verdichtbaarheid, watergevoeligheid, stijfheid, vermoeiing en spoorvormingsweerstand bepaald. Bovendien is uitgebreid gekeken naar de mogelijke emissie van allerlei schadelijke gassen bij verwarming van de verschillende soorten asfaltgranulaten, waarmee ook een milieukundig vergelijk van de freessoorten is opgesteld.

Steekwoorden

Hergebruik asfalt, polymeer gemodificeerd bitumen, vezels, emissies, functionele eigenschappen

1. Inleiding

Aangezien de wegenbouwsector een grootverbruiker van de bouwstoffen is, is circulariteit daar niet weg te denken. Het verlengen van de levensduur van een weg brengt niet alleen financiële en sociale voordelen met zich mee, het heeft ook een positief effect op de klimaatimpact. Een van de toegepaste materiaalverbeteringen die de levensduur van asfaltverhardingen verlengen is het gebruik van polymeer gemodificeerde bitumina (PmB). Daarvan zijn SBS en EVA het meest gebruikt. Polymeren versterken het bitumen en hierdoor wordt een besparing op laagdikte mogelijk.

Daarnaast zijn er in de afgelopen decennia ook Panaceavezels gebruikt die als een soort wapening van de mastiek functioneren. Uit praktijkervaringen blijkt dat een 2L-ZOAB met bitumen 70/100 en Panaceavezels beter presteert dan een 2L-ZOAB met een gemodificeerd bindmiddel. Het gebruik van Panaceavezels in een 2L-ZOAB komt neer op een 3 á 4 jaar langere levensduur [5]. De hypothese is: door het gebruik van Panaceavezels wordt de erosie van verouderde mastiek in een ZOAB-mengsel beperkt, waardoor de verouderde mastiek als het ware de veroudering van onderliggende mastiek beperkt. De ‘paraplu’-functie van Panaceavezels zorgt dus voor minder erosie en vertraagde veroudering van de mastiek in ZOAB-mengsels.

Een kanttekening van de toepassing van deze innovatieve producten is het feit of deze materialen ook goed gerecycled moeten kunnen worden. Daar is op dit moment weinig inzicht in. Zo worden er vraagtekens gezet bij de herbruikbaarheid van polymeer gemodificeerde asfaltmengsels.

In onderhavig onderzoek is de herbruikbaarheid van asfaltgranulaat met SBS, EVA en Panaceavezels in nieuwe asfaltmengsels onderzocht. Tevens zijn er emissiemetingen uitgevoerd om deze materialen met elkaar te kunnen vergelijken qua uitstoot in asfaltcentrales. Aangezien in Nederland een transitie gaande is van de aanleg naar het vervangen en reconstructie van het wegennet en met het oog op circulariteit, wordt de kwaliteit van het vrijkomend asfalt steeds belangrijker.

2. Onderzoek

2.1 *Civiel technisch onderzoek*

Als uitgangspunt van het onderzoek is gekozen voor een AC 16 bin/base 30/45 met 60% PR Bestone mengsel waarin asfaltgranulaat is toegepast dat afkomstig is van verouderde DZOAB 16 varianten. Er is in dit onderzoek specifiek voor DZOAB-granulaten gekozen omdat alleen in deze mengsels in het verleden Panaceavezels zijn toegepast. Uitzondering hierop is mengsel M5 met asfaltgranulaat AG5, waarin geen ZOAB-granulaat toegepast maar een PmB-houdend AC 16 bin/base granulaat.

Om het effect van de diverse asfaltgranulaten beter zichtbaar te maken is er voor gekozen om een hoog percentage asfaltgranulaat in de mengsels te gebruiken. Aangezien niet alle verouderde DZOAB-mengsels uit praktijk beschikbaar zijn, zijn in het laboratorium kunstmatig verouderde DZOAB-mengsels gemaakt. Hierbij is gebruik gemaakt van de zogenaamde Mandela verouderingsprocedure [3], waarin een asfaltmengsel gedurende 44 uur bij 135°C in een goed ventilerende stoof wordt verouderd. Praktijk verouderd ZOAB-granulaat dat wél beschikbaar is, wordt ook meegenomen in het onderzoek. Een volledig overzicht van onderzochte asfaltmengsels is weergegeven in Tabel 1.

Tabel 1: De onderzochte asfaltmengsels

NR	Nieuw mengsel	NR	Partiele recycling materiaal	Bron
M1	AC 16 bin/base 30/45 60% PR Bestone (referentiemengsel)	AG1	PA 16 met standaard penetratiebitumen 70/100 (referentiemengsel)	LAB
M2	AC 16 bin/base 30/45 60% PR SBS Bestone	AG2	PA 16 met SBS-modificatie (Sealoflex SFB 5-50 (HS))	LAB
M3	AC 16 bin/base 30/45 60% PR EVA Bestone	AG3	PA 16 70/100 met EVA (Polybilt 106)-modificatie	LAB
M4	AC 16 bin/base 30/45 60% PR Panacea Bestone	AG4	PA 16 70/100 met Panacea vezels 3,2 mm	LAB
M5	AC 16 bin/base 30/45 60% PR SBS Bestone	AG5	AC 16 met SBS-modificatie uit de weg	Schiphol
M6	AC 16 bin/base 30/45 60% PR EVA Bestone	AG6	2L ZOAB 8 met EVA modificatie uit de weg ¹⁾	A15
M7	AC 16 bin/base 30/45 60% PR Panacea Bestone	AG7	2L ZOAB 8 met Panacea uit de weg ¹⁾	A15

1) Voor dit mengsel is de bovenlaag van een 2L-ZOAB uit de praktijk gebruikt. Aangezien er ook ZOAB-granulaat > 8 mm nodig is, is deze ontbrekende fractie in het lab gemaakt en verouderd.

De te onderzoeken eigenschappen en de bijbehorende proefmethodes zijn samengevat in Tabel 2.

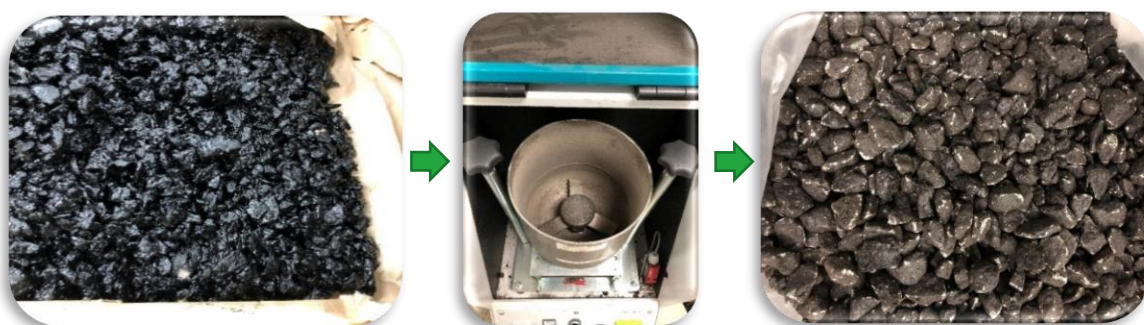
Tabel 2: Overzicht van de bepaalde eigenschappen van de mengsels

Eigenschap	Testmethode	Aantal proefstukken	Proefnorm
Mengbaarheid	Visueel	-	-
Verdichtbaarheid	Aantal gyraties	30 st	NEN-EN 12697-31
Watergevoeligheid	ITSR	6 st Ø100 mm, h 50mm	NEN-EN 12697-12 en -23 en proef 62 van Standaard RAW Bepalingen 2020
Stijfheid	CIT-CY	6 st Ø100 mm, h 50mm	NEN-EN 12697-26 Annex F
Vermoeiingsweerstand	CIT-CY	6 st Ø100 mm, h 50mm	NEN-EN 12697-24 Annex F
Spoorvormingsweerstand	Triaxiaalproef	4 Ø100 mm, h 60mm	NEN-EN 12697-25, methode B en proef 62 van Standaard RAW Bepalingen 2020
Emissiemetingen	FID & MRU		-

In het algemeen zijn de volgende handelingen uitgevoerd om asfaltgranulaat AG1 t/m AG7 te maken en te karakteriseren:

1. Voor asfaltgranulaat AG1 t/m AG4 is per mengsel circa 50 kg ZOAB in het lab gemengd en daarna kunstmatig verouderd door middel van de Mandela procedure. In deze procedure is ZOAB-specie in een laagdikte van 4 cm 44 uur bij 135°C opgeslagen in een geventileerde oven.

Na veroudering is de ZOAB-specie gegraneerd in een daarvoor bestemde breker in charges van circa 1,5 kg. Om verbrijzeling van het mineraal aggregaat in het ZOAB-granulaat te voorkomen is de ZOAB-specie eerst verwarmd tot circa 80 °C gedurende 45 min en daarna gegraneerd;

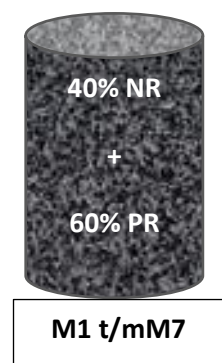


Figuur 1: ZOAB-specie vóór (links) en ná (rechts) het granuleren met de granulator in het midden.

2. De gegranuleerde ZOAB-mengsels zijn vervolgens uitgezeefd in de fracties ≤ 8 mm en > 8 mm. Deze fracties (van elk asfaltgranulaat AG1 t/m AG4 dus 2 fracties) zijn gedoseerd in de uiteindelijke AC 16 bin/base mengsels;
3. Om streefdichtheden van de AC 16 bin/base mengsels M1, M5, M6 en M7 te bepalen is er voor elk mengsel een Marshallvooronderzoek uitgevoerd. De streefdichtheid van mengsel M2 t/m M4 is identiek aan die van mengsel M1;
4. Alle AC 16 bin/base mengsels zijn bij mengen verwarmd tot 165°C. Het verse bitumen is eerst gemengd met nieuwe zand en steenslag en daarna is het PR-materiaal (AG1 t/m AG7) toegevoegd aan het mengsel;
5. Van asfaltgranulaten AG5 t/m AG7 is de samenstelling vastgesteld d.m.v. extractie, zijn bitumeneigenschappen bepaald (penetratie, verwekingspunt en PI) en is de soort modificatie vastgesteld o.b.v. een FT-IR (Fourier Transform InfraRood spectroscopie) analyse.

Voorafgaand aan het maken van uiteindelijk (beproefde) asfaltmengsels AC 16 bin/base is eerst asfaltgranulaat voor deze mengsels vervaardigd. Er is gekozen voor een hoog percentage hergebruik in het AC 16 bin/base mengsel om het effect van PR op de mengseleigenschappen beter waar te nemen. De ZOAB-granulaten AG1 tot en met AG4 zijn in het laboratorium bereid en zijn verouderd volgens de Mandela procedure. In [6] zijn de meeste mengselsamenstellingen opgenomen:

- AG1 bevat 5,1% standaard penetratiebitumen 70/100;
- AG2 bevat 5,1% Sealoflex SFB 5-50 (HS) bitumen;
- AG3 bevat 0,26% Polybilt 106 (EVA-modificatie) en 4,8% 70/100 bitumen . Hierbij is de modificatie eerst gemengd met penetratiebitumen volgens de aanbevelingen van de leverancier waarna het mengbitumen gedoseerd is in het asfaltmengsel;
- AG4 bevat 5,1% penetratiebitumen en 0,15% Panaceavezels met een lengte van 3,2 mm;
- AG5 is afkomstig van een AC 16 bin/base mengsel, dat toegepast is op Schiphol. FT-IR-analyses op het teruggewonnen bitumen uit dit freesmateriaal tonen aan dat in dit frees-materiaal een SBS gemodificeerde bitumen zit. Dit strookt met het feit dat in het verleden op Schiphol met name Sealoflex bitumina zijn toegepast. Het is echter niet bekend welke type Sealoflex precies toegepast is. AG5 is afkomstig van een AC-mengsel, terwijl de overige asfaltgranulaten allemaal ZOAB-granulaten zijn.
- AG6 en AG7 zijn afkomstig van proefvakken die in 2005 zijn aangelegd op de A15 nabij Leerdam [5]. Het gaat om vakken met 2L-ZOAB 8. AG6 is afkomstig van proefvak 1 met een EVA-gemodificeerd bitumen. AG7 is afkomstig uit vak 6 van het proefvak 2L-ZOAB op de A15 met bitumen 70/100 en 3,2 mm lange Panaceavezels.



2.1 Milieutechnisch onderzoek

Asfalt bevat tegenwoordig vaak producten die toegepast worden om de eigenschappen van het asfaltmengsel te verbeteren. Er is echter nauwelijks inzicht (jaar 2020) in de stoffen die vrijkomen tijdens het produceren, verwerken en hergebruiken van de asfaltmengsels in relatie tot de desbetreffende toevoegingen. Hierbij speelt de temperatuur een belangrijke rol.

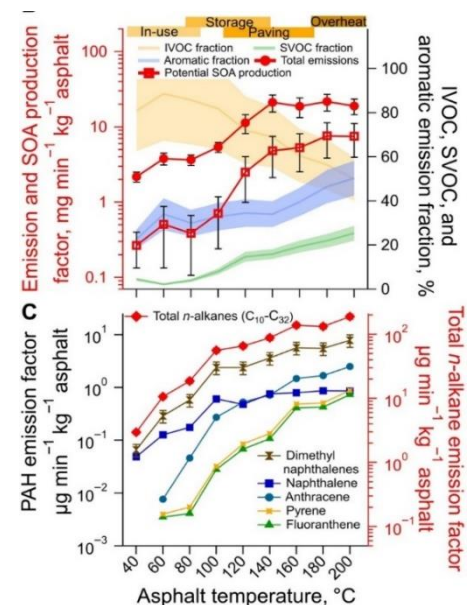
Op dit moment wordt in Nederland een groot onderzoek bij de asfaltcentrales uitgevoerd om vast te stellen welke stoffen in welke concentraties uitgestoten worden bij de productie van nieuwe asfaltmengsels. Onderdelen van dit meetprogramma zijn het bepalen van welke

schadelijke stoffen vrijkomen bij de productie van asfalt en hoe deze stoffen het best gemeten kunnen worden. Bitumen (als restproduct van de aardolie-industrie) en andere additieven in oude asfaltmengsels zijn de grote bronnen van de emissies. Uit ervaringen bij asfaltcentrales is wel vast te stellen dat er een breed scala aan stoffen vrijkomt, met name tijdens de productie van het asfalt. Exacte data omtrent de hoeveelheden/concentratie en de mate van schadelijkheid voor mens en het milieu zijn echter niet bekend. In deze studie is een poging gedaan om op laboratoriumschaal vast te stellen welke stoffen vrij kunnen komen tijdens de productie van asfalt.

Het is algemeen bekend dat bij het verwarmen van asfalt vluchtige organische stoffen (VOC's) en half vluchtige stoffen (I/SVOC's) vrijkomen die tot het ontstaan van secundaire organische aerosolen (SOA's) kunnen leiden. SOA's zijn naast primaire stoffen ook een belangrijk component van fijnstof PM 2,5 (fijnstof kleiner dan 2,5 μm in diameter). De belangrijkste bestanddelen van de secundaire aerosolen zijn ammoniumsulfaat en ammoniumnitraat. Deze ontstaan uit de gasen zwaveldioxide (SO_2), stikstofoxiden (NO_x) en ammoniak (NH_3). Deze kunnen ook tijdens de productie van asfalt vrijkomen. VOC's op hun beurt bestaan uit duizenden verbindingen. Het zijn koolwaterstoffen met diverse eigenschappen. Onder andere polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK's) behoren tot de VOC's. Overige stoffen die mogelijk vrijkomen tijdens de productie van asfalt zijn:

- Broeikasgassen (Methaan en CO_2);
- Volatile Chemical Products (VCP's). Hierover zijn geen data beschikbaar maar VCP's dragen bij het productie van VOC's en Ozon;
- Geur.

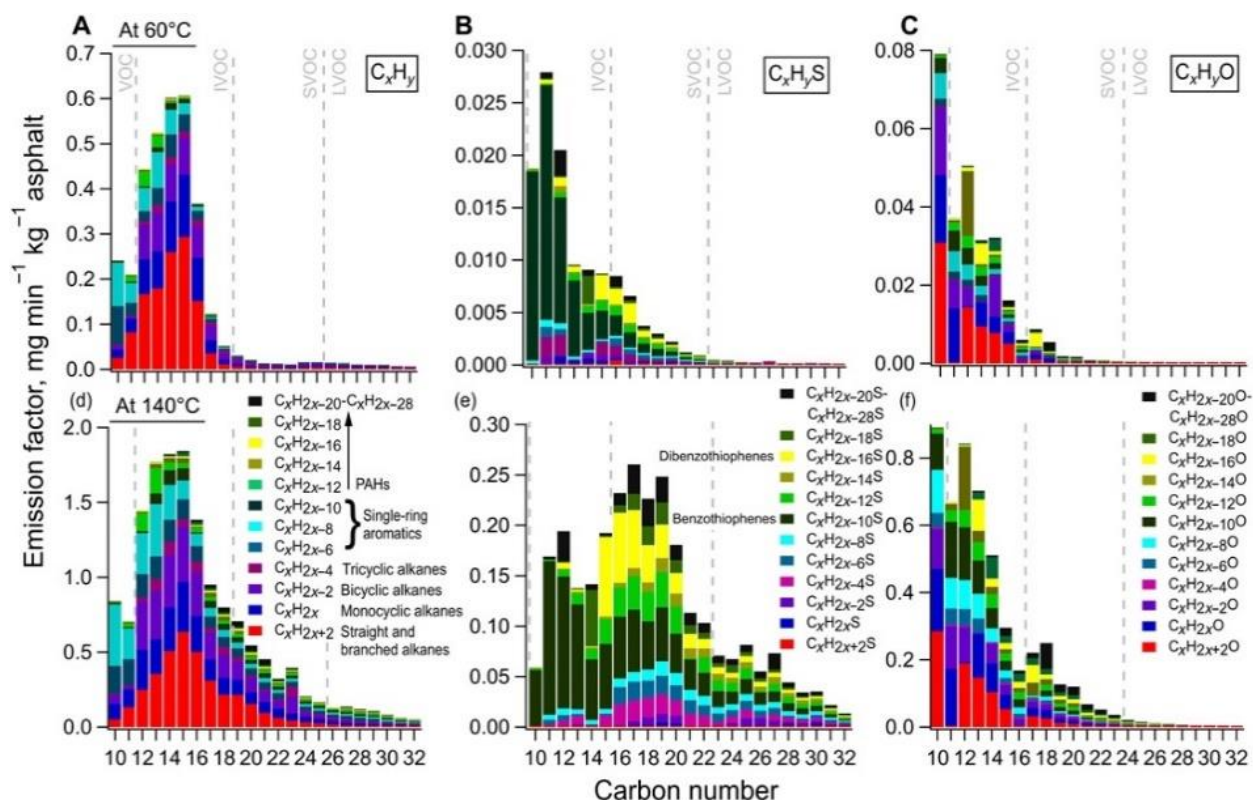
Uit recente onderzoeken [4] blijkt dat asfalt bij lagere temperatuur al aanzienlijke hoeveelheden VOC's uitstoot. Zoals in Figuur 2 te zien is neemt aantal uitgestoten VOC's met een factor twee toe bij een temperatuurstijging van 40 $^{\circ}\text{C}$ naar 60 $^{\circ}\text{C}$; daarna is er een toename van ca. 40% per 10 $^{\circ}\text{C}$. Vergelijkbare studies met Nederlandse asfaltmengsels en omstandigheden is aan te raden. Met de opstelling bij laboratoriumonderzoek kunnen o.a. de koolwaterstoffen gemeten worden maar kan geen onderscheid gemaakt worden in diverse koolwaterstofverbindingen zoals te zien in Figuur 3(A).



Figuur 2: Invloed van temperatuur op emissies

In 2016 is een laboratoriumonderzoek uitgevoerd door TNO naar componenten die vrijkomen vrij tijdens het verhitten van Panaceavezels en naar de milieu- en gezondheidseffecten [2]. In deze laatste studie wordt aanbevolen om experimenten uit te voeren met Panaceavezels in het asfaltgranulaat. In onderhavig onderzoek wordt hieraan invulling gegeven. De emissie-experimenten met Panaceavezels zijn uitgevoerd onder diverse condities, zowel in asfaltgranulaat als in bitumen maar ook in de vorm van pure vezels.

Om de emissies tijdens het hergebruik van asfaltmengsel met Panacea of PmB-houdend asfaltgranulaat asfalt in kaart te kunnen brengen, is een bepaalde meetmethode gehanteerd. Deze methode is geoptimaliseerd door het uitvoeren van een vooronderzoek waarin diverse mengsels, temperaturen en hoeveelheden zijn beproefd.



Figuur 3: Onderzoek van Yale University naar VOC's bij het verwarmen van asfalt.

Het vooronderzoek heeft geresulteerd in de volgende randvoorwaarden voor het definitieve meetplan:

- Het materiaal wordt opgewarmd tot 300°C. Bij deze temperatuur zijn reële emissies meetbaar;
- Er wordt gewerkt met kleine hoeveelheden bouwstoffen omdat dit resulteert in heldere en duidelijke toe- en afnames in het meetwaarden.

Verder zijn de volgende meetdoelen geformuleerd;

1. Onderzoek bitumina om de emissies te vergelijken tijdens het opwarmen van bitumina met diverse modificaties en verouderingswijzen. De doelen worden gerealiseerd in de metingen 1 tot en 7 uit Tabel 3;
2. Vergelijk de emissies van diverse asfaltgranulaten met elkaar (metingen 8 t/m 14 in Tabel 3);
3. Bepaal de invloed van opwarmingstijd op de emissies. Hier wordt antwoord gegeven op de vraag hoe de uitstoot reageert op een verandering in opwarmtijd (metingen 15 en 18 in Tabel 3);
4. Bepaling van de invloed van de temperatuur op de emissies door asfaltgranulaat (en één bitumen) stapsgewijs tot hoge temperaturen op te warmen (metingen 15 t/m 17 en meting 24 in Tabel 3);
5. Probeer inzicht te vergaren over de uitstoot van verschillende PmB's (metingen 2, 3 en 19 in Tabel 3);
6. Analyseer of het gebruik van aluminium bakjes tijdens de metingen invloed hebben op de meetresultaten (meting 23).

Tabel 3: Overzicht van de uitgevoerde emissiemetingen

Me- ting	Tijds- duur	Tempe- ratuur	Materiaal	Gewicht	Toelichting/ Beschrijving
1	30 min	300 °C	Bitumen 1	25 gram	Bitumen 70/100 dat gebruikt is bij het maken van de mengsel 1
2	30 min	300 °C	Bitumen 2	25 gram	Bitumen Sealoflex dat gebruikt is bij het maken van de mengsel 2
3	30 min	300 °C	Bitumen 3	25 gram	Bitumen 70/100 + polybilt dat gebruik is bij het maken van de mengsel 3
4	30 min	300 °C	Bitumen 4	25 gram	70/100 bitumen + 0,3 % Panacea 3,2 mm
5	30 min	300 °C	Bitumen 5	25 gram	Teruggewonnen bitumen uit AG 5 met SBS modificatie
6	30 min	300 °C	Bitumen 6	25 gram	Teruggewonnen bitumen uit AG 6 + 1,5 gram Panacea
7	30 min	300 °C	Bitumen 7	25 gram	Teruggewonnen bitumen uit AG7 + 1,5 gram Panacea
8	30 min	300 °C	AG1	50 gram	Asfaltgranulaat van M1 met standaard penetratiebitumen
9	30 min	300 °C	AG2	50 gram	Asfaltgranulaat van M2 met SBS-modificatie
10	30 min	300 °C	AG3	50 gram	Asfaltgranulaat van M3 met EVA modificatie
11	30 min	300 °C	AG4	50 gram	Asfaltgranulaat van M4 met Panacea
12	30 min	300 °C	AG5	50 gram	Schipholrees
13	30 min	300 °C	AG6	50 gram	A15 2L ZOAB 8 frees (EVA modificatie)
14	30 min	300 °C	AG7	50 gram	A15 2L ZOAB 8 frees (Panacea-vezels)
15	ca 45 min	start 50°C + 10 °C /min	AG1	50 gram	Tot circa 500 °C
16	ca 35 min	start 50°C + 10 °C /min	AG2	50 gram	Tot 400 °C
17	ca 35 min	start 50°C + 10 °C /min	AG4	50 gram	Tot 400 °C
18	ca 75 min	start 50°C + 5 °C /min	AG1	50 gram	Tot 400 °C
19	30 min	300 °C	Styrelf	25 gram	
20	30 min	300 °C	Wigras 40K	25 gram	
21	30 min	300 °C	Panaceavezels	5 gram	
22	30 min	300 °C	Arbocell	5 gram	
23	30 min	300 °C	AL-bak	-	
24	35 min	start 50°C + 10 °C /min	Bitumen 1	25 gram	

De emissies zijn met een bij BAM beschikbare set samengestelde apparaten gemeten. Met deze apparaten kunnen koolwaterstoffen C_xH_y en een (beperkt) aantal andere elementen gemeten worden. Deze opstelling wordt ook bij de asfaltcentrales gebruikt om een kwantitatieve indicatie te krijgen van de emissies bij de productie van asfalt.

Bij de emissiemetingen in het laboratorium werden materialen in een bakje in een verassingsoven geplaatst en opgewarmd. Deze verassingsoven (Nabertherm controller B170) kan materialen onder vooraf geprogrammeerde condities opwarmen tot temperaturen boven 2000°C . De emissies worden gemeten met behulp van sensoren van de hierboven vermelde meetapparatuur. De sensoren worden in de ontluuchtingspijp van de oven geplaatst. Vervolgens wordt de rest van de ontluuchtingspijp afgesloten, zodat vermenging van de emissies met lucht wordt voorkomen. De volgende emissiemeters zijn gebruikt:



Figuur 4: Proefopstelling emissiemetingen

- **FID** emissiemeter: De koolwaterstoffen (C_xH_y) worden gemeten met een RS 53 T Total Hydrocarbon Analyzer;
- **MRU** emissiemeter: SO_2 , SO , CO en NO_x worden gemeten met een Vario Plus 061 755.

3. Resultaten onderzoek

3.1 Mengbaarheid

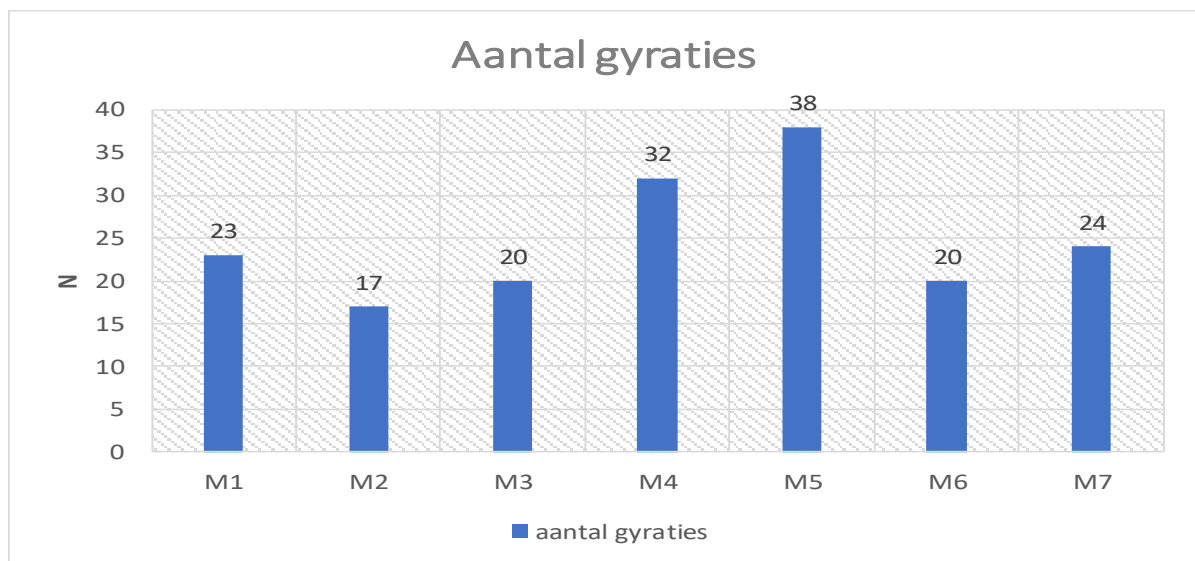
In het algemeen is er geen afwijkend gedrag geobserveerd bij het mengen van alle mengsels. Op zich zijn alle mengsels goed te mengen. Bij alle mengsels zijn asfaltgranulaat en het nieuwe toe te voegen materiaal opgewarmd bij een constante temperatuur van 165°C gedurende 4 uur in een gekalibreerde stoof. Vervolgens zijn de mengsels (40% nieuwe bouwstoffen inclusief nieuwe 70/100 bitumen en 60% PR) in een grote laboratoriummenger gemengd gedurende $1\frac{1}{2}$ minuut:

- **M1:** Dit mengsel is goed mengbaar binnen de gewenste $1\frac{1}{2}$ minuut en ziet er glanzend en bitumenrijk uit;
- **M2:** Dit mengsel kan goed gemengd worden en ziet er bitumenrijk eruit terwijl bitumenpercentage bij alle mengsels gelijk zijn. Verder heeft verwarmd PR materiaal een aparte geur;
- **M3:** Het lijkt dat dit mengsel iets meer mengtijd nodig heeft om alle stenen omhuld te krijgen met bitumen ($\frac{1}{2}$ minuut langer). Na vervaardigen van de gyratortabletten hebben sommige tabletten vette plekken. Maar in het algemeen is dit mengsel ook vrij goed mengbaar en zijn er geen bijzonderheden geconstateerd;
- **M4:** Dit mengsel lijkt iets stugger in vergelijking met de PmB-houdende mengsels M2 en M3. Bij het maken van gyratortabletten zijn geen vette plekken te zien zoals bij M3 en M5;
- **M5:** Dit mengsel zet iets meer uit na afkoelen dan de overige mengsels als gevolg van het gebruik van veel SBS-modificatie in het asfaltgranulaat. Dit kan het hogere aantal gyraties verklaren (zie volgende paragraaf). In de praktijk zal dit mengsel langer gewalst moeten worden;

- **M6:** Bij dit mengsel zijn geen bijzonderheden geconstateerd. Het menggedrag is vergelijkbaar met M1;
- **M7:** Dit mengsel ziet er iets droger uit en maar is wel goed mengbaar. Ook dit mengsel heeft iets meer mengtijd nodig.

3.2 Verdichtbaarheid

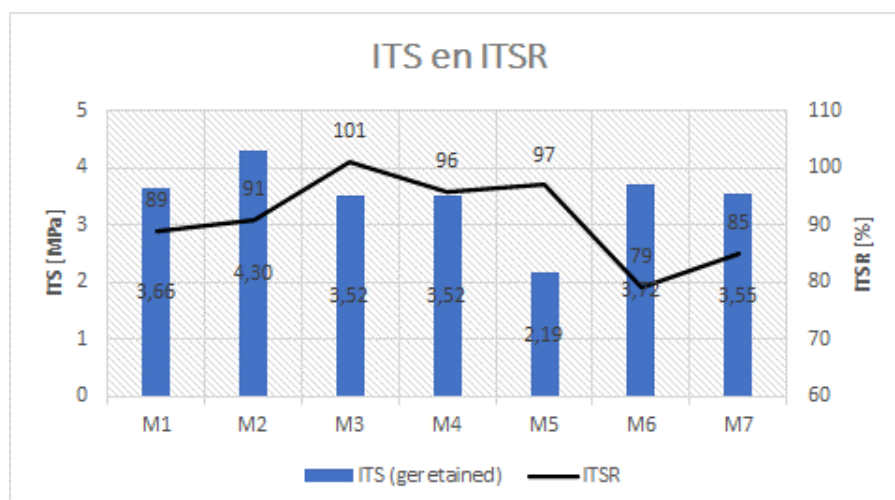
Als indicator van de verdichtbaarheid van een asfaltmengsel kan het aantal gyraties gebruikt worden, dat nodig is om proefstukken te maken met de streefdichtheid. Per mengsel zijn in totaal 30 gyratortabletten Ø100-78 mm gemaakt. Het gemiddeld aantal gyraties per mengsel is weergegeven in Figuur 5.



Figuur 5: Aantal gyraties als indicatie van de verdichtbaarheid

3.3 Indirect treksterkte ITS en watergevoeligheid ITSR

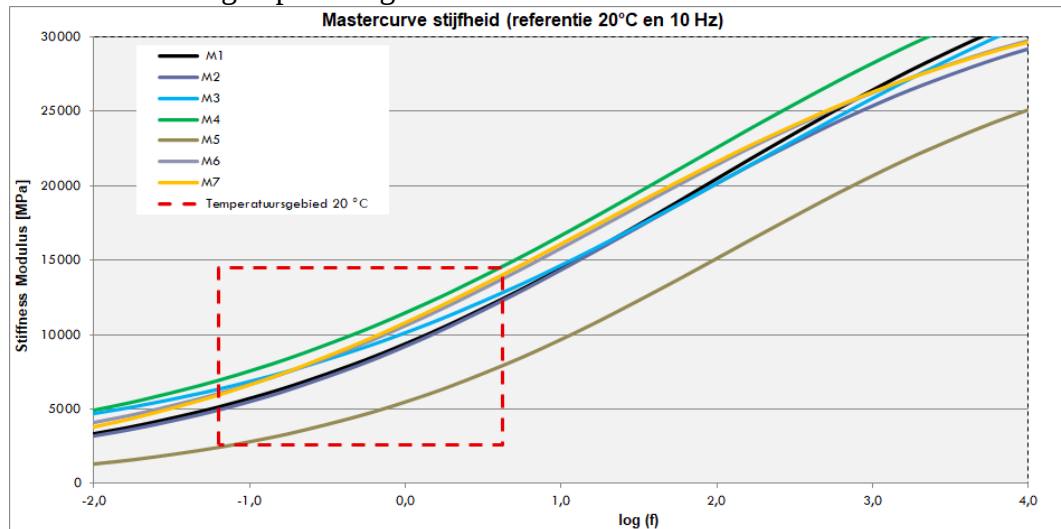
De resultaten van het ITSR-onderzoek zijn in figuur 6 weergegeven.



Figuur 6: Resultaten van de watergevoeligheidsproeven bij 15°C

3.4 Stijfheid S_{mix}

De stijfheden van de proefstukken zijn in de CIT-CY-proefopstelling bij 20°C en verschillende frequenties (van 0,1 t/m 30 Hz) bepaald. Per mengsel zijn 6 proefstukken beproefd. Elk proefstuk is 2 maal beproefd: na de eerste ‘frequency sweep’ is het proefstuk een kwartslag gedraaid en opnieuw beproefd. De gepresenteerde data in Figuur 7 zijn dus de gemiddelde waarden van 12 metingen per mengsel.



Figuur 7: Mastercurve van de stijfheid van de 7 asfaltmengsels

3.5 Vermoeiing

De vermoeiingsweerstand van de proefstukken zijn in de CIT-CY-proefopstelling bij 20°C en 10 Hz bepaald. Voor het bepalen van de vermoeiingslijn van een mengsel zijn 6 proefstukken beproefd, 3 bij een laag initieel rekniveau en 3 bij een hoog initieel rekniveau. In onderstaande Tabel 4 en Figuur 8 zijn de resultaten van vermoeiingsproeven samengevat. In tabel 4 zijn regressieparameters C1 en C2 weergegeven, waarbij C1 en C2 regressiecoëfficiënten zijn van de vermoeiingsrelatie:

$$N_{macro} = C1 \cdot \epsilon_{el,ini}^{C2}$$

waarin:

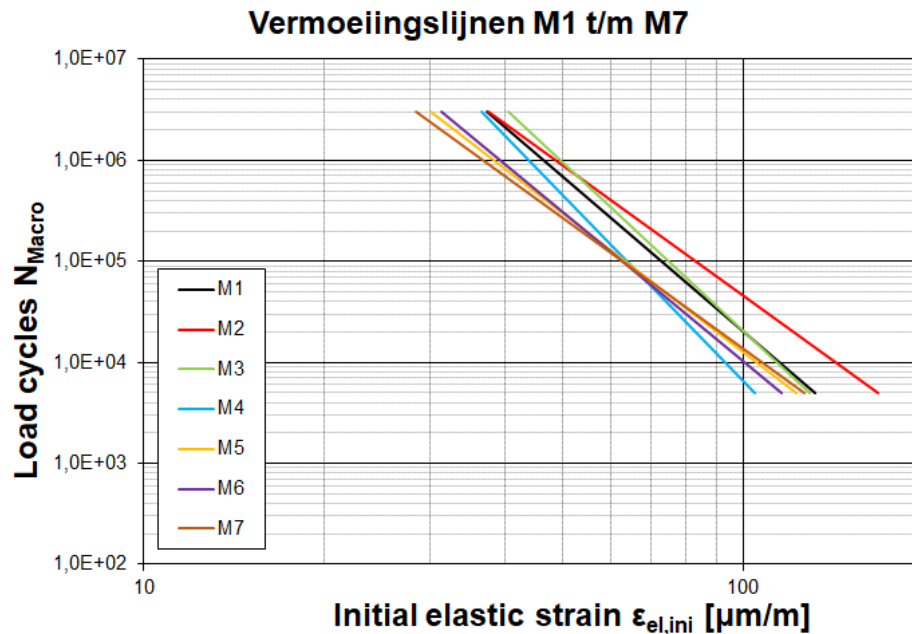
N_{macro} = levensduur waarbij een theoretische macroscheur ontstaat conform Annex F van NEN-EN 12697-24;

$\epsilon_{el, ini}$ = de initiële rek die opgelegd is aan het proefstuk in de vermoeiingsproef [in $\mu\text{m}/\text{m}$];

R^2 = variatiecoëfficiënt van de regressie.

Tabel 4: Resultaten vermoeiingseigenschappen op basis van initiële rek

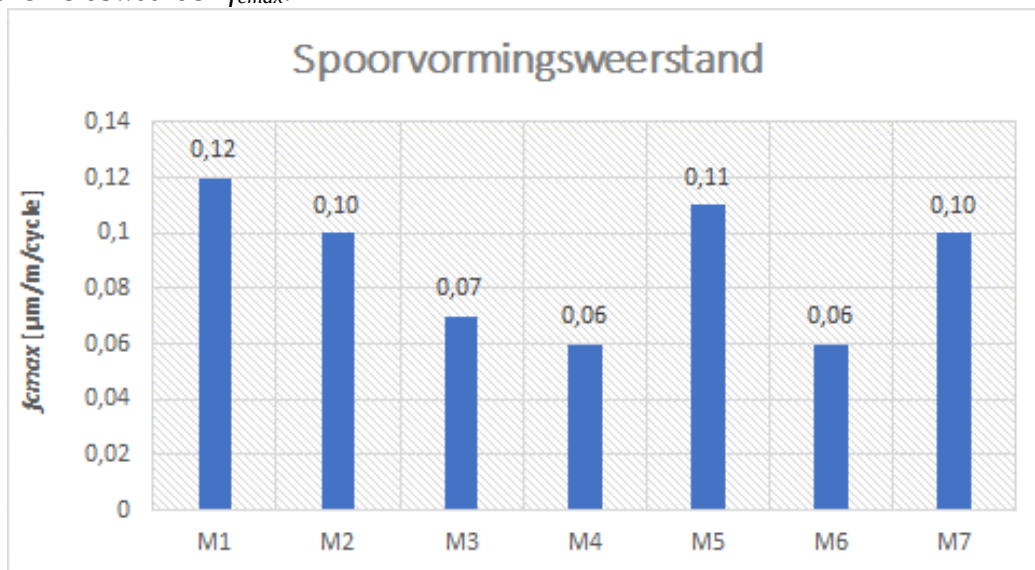
Mengsel	C1 [-]	C2 [-]	ϵ_6 [$\mu\text{m}/\text{m}$]	R^2 [-]
M1	0,160	-5,096	46,4	0,94
M2	2,385	-4,280	48,6	0,91
M3	0,063	-5,511	49,4	0,95
M4	0,005	-6,109	44,3	0,96
M5	0,347	-4,560	38,3	0,96
M6	0,127	-4,904	39,2	0,98
M7	0,711	-4,284	36,7	0,95



Figuur 8: Vermoeiingsrelatie van de 7 mengsels op basis van de initiële rek

3.6 Spoorvorming

In Figuur 9 zijn de resultaten uit het triaxiaalonderzoek weergegeven in de vorm van de kruipsnelheidswaarden f_{cmax} .

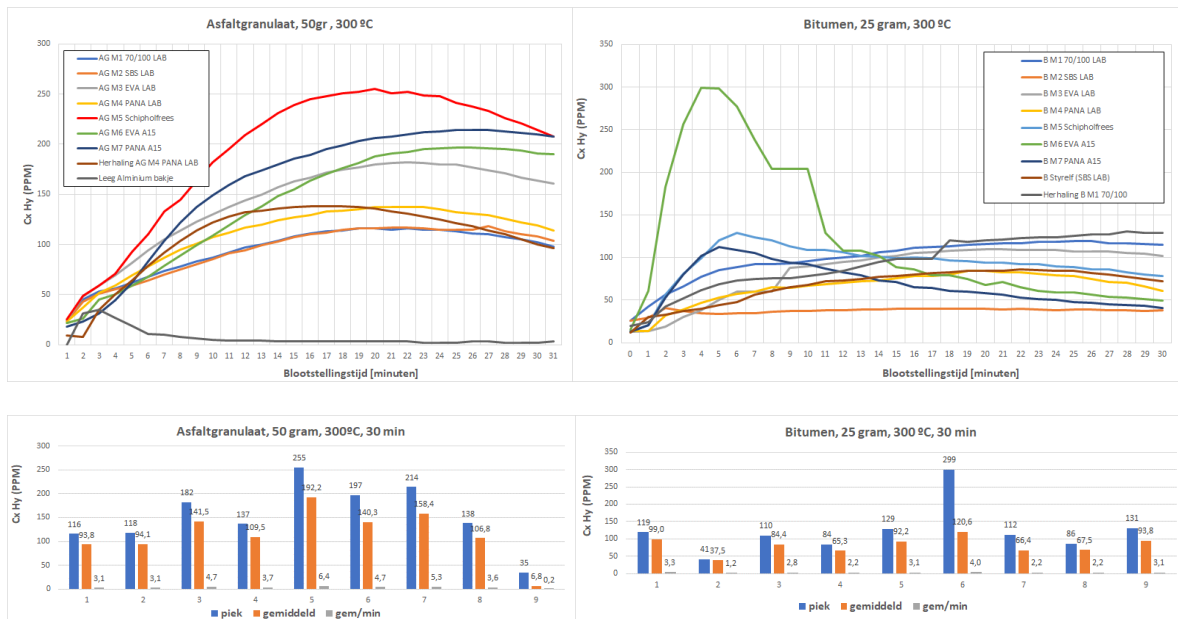


Figuur 9: Resultaten van het triaxiaalonderzoek op de 7 asfaltmengsels

3.7 Emissies

3.7.1 CxHy uitstoot

In onderstaande figuren zijn de vrijgekomen koolwaterstoffen van diverse bitumina en asfaltgranulaten weergegeven.



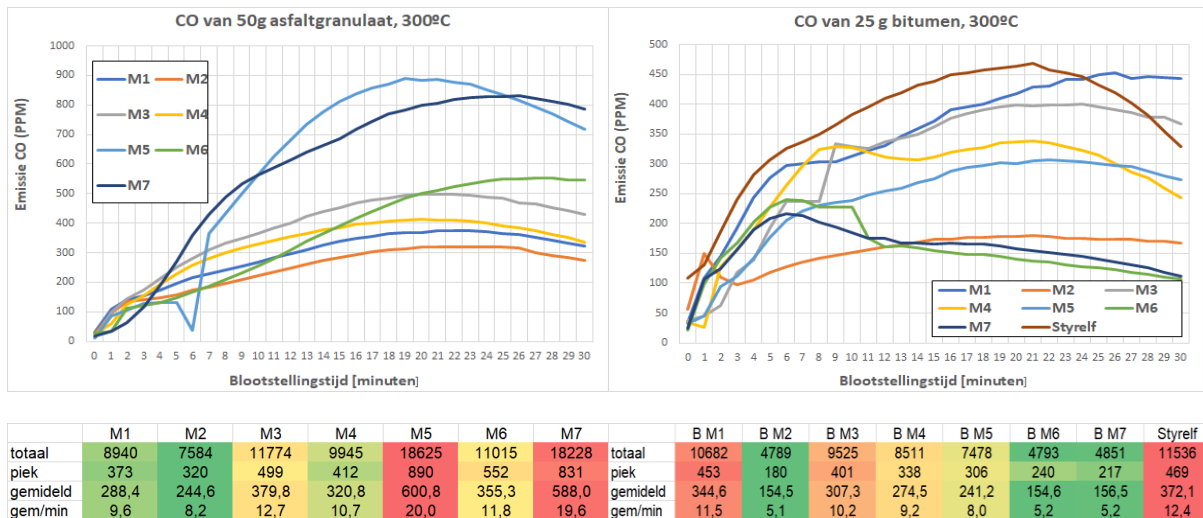
Figuur 10: Resultaten van CxHy-emissiemetingen van verschillende bitumina en de asfaltgranulaten



Figuur 11: CxHy emissies bij oplopende temperatuur voor asfaltgranulaat M1, M2 en M4 en het referentiebitumen 70/100 (links) en asfaltgranulaat met penetratiebitumen bij snel en langzaam opwarmen (rechts)

3.7.2 CO-uitstoot

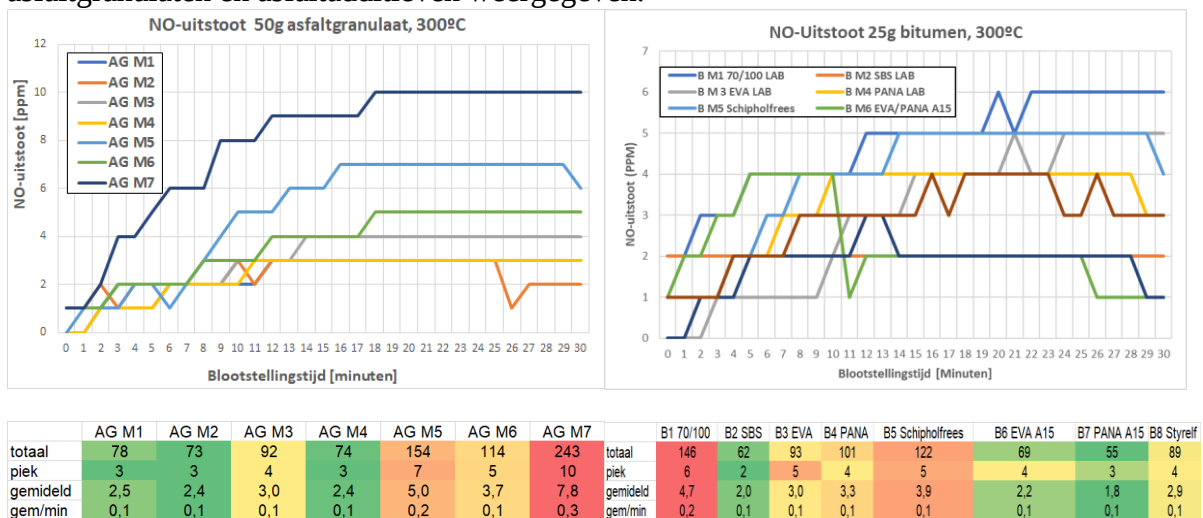
In onderstaande figuren is de CO-uitstoot (koolstofmonoxide) van verschillende bitumina, asfaltgranulaten en asfaltadditieven weergegeven.



Figuur 122: CO-uitstoot asfaltgranulaten mengsels M1 t/m M7 (links) en bitumina 1 t/m 7 en Styrelf 65/105-80 A AP (rechts)

3.7.3 NO-uitstoot

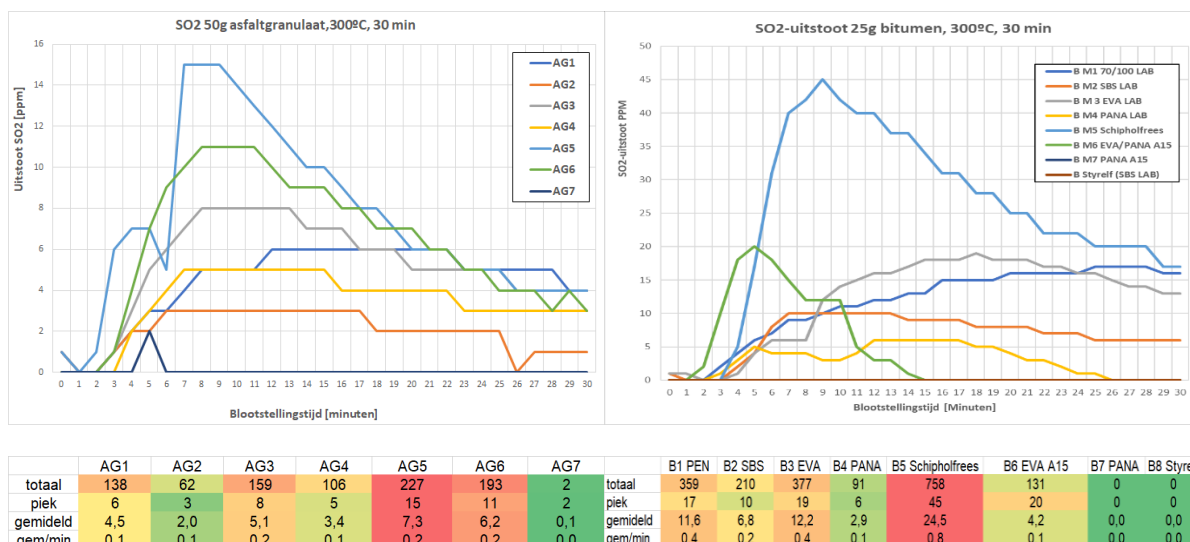
In onderstaande figuren is de NO-uitstoot (stikstofmonoxide) van verschillende bitumina, asfaltgranulaten en asfaltadditieven weergegeven.



Figuur 13: NO-uitstoot van asfaltgranulaten en bitumina

3.7.4 SO₂-uitstoot

In onderstaande figuren is de SO₂-uitstoot (zwaveloxide) van verschillende bitumina, asfaltgranulaten en asfaltadditieven weergegeven.



Figuur 144: SO₂-uitstoot van asfaltgranulaten en bitumina van mengsels M1 t/m M7

4. Conclusies

Op basis van het onderzoek kunnen de volgende conclusies getrokken worden over de mengsels met laboratorium verouderd asfaltgranulaat (M1 t/m M4):

1. Mengsels met lab verouderd asfaltgranulaat vertonen toch ander gedrag dan mengsels met praktijk verouderd asfaltgranulaat. Praktijkveroudering zit nou eenmaal complexer in elkaar (met UV-licht, temperatuurwisselingen, oxidatie, regen en sneeuw, afscheidingen van voertuigen (rubber, vet, oliën,) dan lab veroudering (met alleen temperatuur en oxidatie);
2. Bij vergelijking van het gedrag van de mengsels M1 t/m M4 met lab verouderd ZOAB-granulaat kan geconcludeerd worden dat het gebruik van een SBS- of EVA-modificatie of het gebruik van Panacea-vezels in het ZOAB-granulaat een positief effect heeft op het gedrag van het uiteindelijke AC 16 bin/base mengsel:
 - Bij gebruik van een SBS-modificatie in het ZOAB-granulaat worden de verdichtbaarheid, splijtsterkte en vermoeiingsweerstand (op basis van ϵ_{ini}) van het AC 16 bin/base mengsel positief beïnvloed;
 - Bij gebruik van een EVA-modificatie in het ZOAB-granulaat worden de verdichtbaarheid, de watergevoeligheid, de vermoeiingsweerstand (op basis van ϵ_{ini}) en de spoorvormingsweerstand van het AC 16 bin/base mengsel positief beïnvloed. De mengbaarheid wordt negatief beïnvloed;
 - Bij gebruik van Panacea-vezels in het ZOAB-granulaat worden de watergevoeligheid en de spoorvormingsweerstand positief en de stijfheid sterk positief beïnvloed van het AC 16 bin/base mengsel. De mengbaarheid wordt sterk negatief en de verdichtbaarheid wordt negatief beïnvloed;
3. Vergelijking van de functionele eigenschappen van de mengsels M2, M3 en M4 met lab verouderd ZOAB-granulaat) levert géén mengsel op dat duidelijk beter acteert bij alle eigenschappen dan de andere mengsels:
 - Mengsel M2 (met SBS in de ZOAB-frees) scoort duidelijk beter op verdichtbaarheid dan mengsel M3 (met EVA in de ZOAB-frees), terwijl mengsel M4 (met Panacea-vezels in de ZOAB-frees) hier duidelijk het slechts presteert;

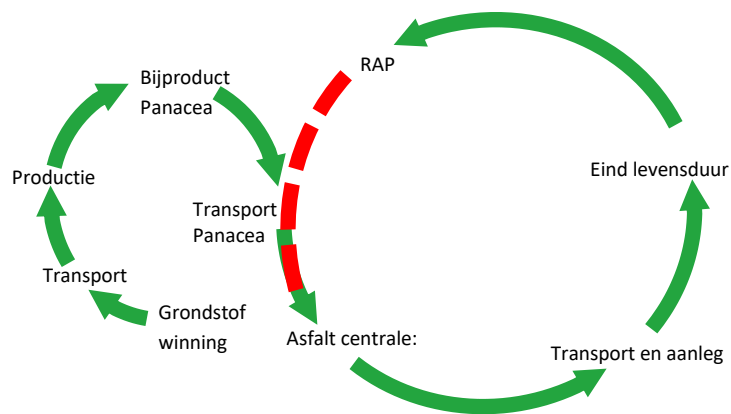
- Mengsel M2 heeft een hogere splijtsterkte dan de mengsel M3 en M4, terwijl mengsel M4 minder watergevoelig is dan mengsel M4 en duidelijk minder watergevoelig is dan mengsel M2;
- Mengsel M4 scoort duidelijk beter in stijfheid dan mengsel M2 en M3, terwijl mengsel M2 en M3 weer beter presteren dan mengsel M4 in de vermoeiingsproeven. Waarschijnlijk zal mengsel M4 geringere laagdikten opleveren in dimensioneringsberekeningen dan mengsel M2 en M3;
- Mengsel M3 en M4 zijn minder gevoelig voor spoorvorming dan mengsel M2.

De conclusies met betrekking tot de mengsels met praktijk verouderd asfaltgranulaat (mengsels M5 tot en met M7) worden hierna gegeven. Soms wordt er een vergelijking gemaakt met lab verouderd asfaltgranulaat:

4. Mengsel M5 (met praktijk verouderd AC-asfaltgranulaat) scoort op bijna alle functionele eigenschappen slechter dan referentiemengsel M1 (met lab verouderd ZOAB-granulaat met bitumen 70/100). Alleen de watergevoeligheid is beter en de spoorvormingsweerstand is gelijkwaardig met M1. Een mogelijke oorzaak van deze verschillen kan het compleet andere asfaltgranulaat zijn dat in beide mengsels is toegepast;
5. Vergelijking van de mengsel M5 (met praktijk verouderd, SBS-houdend AC-asfaltgranulaat; Schipholfrees) met de mengsels M6 (met praktijk verouderd, EVA-houdend 2L-ZOAB 8 asfaltgranulaat) en M7 (met praktijk verouderd, Panacea-houdend 2L-ZOAB 8 asfaltgranulaat) laat zien dat mengsel M6 bijna op alle eigenschappen iets beter presteert dan mengsel M7 en duidelijk beter presteert dan mengsel M5;
6. Uit bijna alle functionele eigenschappen blijkt dat Panacea-houdend asfaltgranulaat geen belemmering oplevert bij hergebruik. Alleen bij het mengen en verdichten moet er meer aandacht besteed worden aan het mengsel.

Wat emissiemetingen betreft kunnen de volgende conclusies geformuleerd worden:

7. Uit de emissiemetingen op lab schaal blijkt dat lab verouderd asfaltgranulaat duidelijk lagere emissies CxHy, CO, NO en SO₂ veroorzaakt dan praktijkverouderd asfaltgranulaat;
8. Emissiemetingen op laboratorium verouderd ZOAB-granulaat laten zien dat SBS-houdend granulaat (in mengsel M2) de laagste CxHy-, CO-, NO- en SO₂-emissies veroorzaakt, gevolgd door Panacea-houdend granulaat (in mengsel M4, rekening houdend dat er iets meer Panacea vezels zijn toegevoegd dan de originele mengsels zouden bevatten), 70/100 houdend granulaat (het referentiemengsel; mengsel M1) en EVA-houdend granulaat (in mengsel M3);
9. Bij praktijk verouderd asfaltgranulaat veroorzaakt het mengsel met SBS-houdend asfaltgranulaat (mengsel M5) de hoogste CxHy-, CO-, NO- en SO₂-emissies, gevolgd door Panacea-houdend asfaltgranulaat (in mengsel M7). Als beste presteert het mengsel met EVA-houdend asfaltgranulaat (in mengsel M6).
10. Ten aanzien van LCA-analyses (cradle to grave) en MKI-berekeningen is recyclebaarheid een belangrijk aspect. In Figuur 15 is een schema voor de cradle-to-grave analyse van Panaceavezel-houdend asfalt weergegeven. De invloed van de up-stream keten wordt meegenomen in de initiële MKI-berekeningen van de vezels. In de asfaltketen is de herbruikbaarheid van de Panacea-houdend asfaltgranulaat de enige missing-link om de analyse robuust te maken. Uit gepresenteerd onderzoek blijkt dat asfaltmengsels met Panacea vezels prima hergebruikt kunnen worden.



Figuur 15: LCA Panaceavezels

Geraadpleegde literatuur

- 1 BAM Infra Asphalt. (2016). *De invloed van PMB gedrag op functionele eigenschappen: van bitumeneigenschappen naar verhardingsontwerp*. Utrecht.NL: BAM Infra Asphalt.
- 2 J.A. van der Meer, T. v. (2016). *Rapportage Decompositie Panacea vezel (fase 1 en 2)*. NL: TNO innovation for life.
- 3 M. van de Ven, J. Voskuilen en M. Jacobs, (2012), PRACTICAL LABORATORY AGEING METHOD FOR POROUS ASPHAT. Istanbul: E&E congress;
- 4 Peeyush Khare, J. M. (2020). Asphalt-related emissions are a major missing. *SCIENCE ADVANCES | RESEARCH ARTICLE*.
- 5 J. Voskuilen,. (2019). *EVALUATIE LEVENSDUUR ZOAB PROEFVAKKEN MET PANACEA® VEZELS*. NL: Groen Asphalt.
- 6 A. Hassani, M. Jacobs, (2021). *Invloed Panacea vezels en PmB bij hergebruik*. Culemborg: BAM Infra Asphalt.