

Aanzet tot functioneel specificeren van vulstof

Jan Voskuilen
Rijkswaterstaat, GPO

Salil Mohan
KWS Infra bv.

Samenvatting

Er zijn in Nederland vele soorten vulstoffen op de markt, die geschikt zijn voor diverse asfaltmengsels. Vulstof is vanwege het hoge specifieke oppervlak een belangrijk onderdeel van asfalt en kan verschillende functies vervullen afhankelijk van het mengseltype.

In asfaltbetonmengsels is de mortel (bitumen+vulstof) als het bindmiddel te beschouwen. Het continu gegradeerde mineraal aggregaat wordt gebonden door de mortel. Door de kwaliteit van de vulstof en het bitumen en de verhouding ervan kan het gedrag van de mortel worden beïnvloed.

In steenskeletmengsels, zoals ZOAB en SMA is de mastiek (zand + vulstof + bitumen) als bindmiddel te beschouwen en bepalend voor de duurzaamheid. Mastiek lijmt het korrelskelet aan elkaar. Afhankelijk van de eigenschappen van de drie bestanddelen en de verhouding kan de kwaliteit en het gedrag van de mastiek variëren.

Als de functie van vulstof beter wordt begrepen, kunnen asfaltmengsels worden geoptimaliseerd door vulstoffen toe te passen met de juiste functionele eigenschappen.

In het verleden is er al kennis vergaard door veel empirische proeven uit te voeren op vulstoffen. Dit onderzoek heeft geresulteerd in verbeterde vulstoffen. Nu zijn er meer geavanceerde proeven uit te voeren met behulp van het DSR apparaat waarmee de invloed van vulstoffen op het gedrag van mortel en mastiek kan worden onderzocht.

In deze paper wordt ingegaan op een verkennend onderzoek naar de invloed van verschillende soorten vulstof op het verstijvend effect van mortels.

1. Inleiding

Asfalt bevat in vergelijking met de andere minerale aggregaten een gering percentage vulstof, maar door het hoge specifieke oppervlak blijft vulstof toch een belangrijke bouwstof waarmee de functionele eigenschappen van asfalt zijn te beïnvloeden.

De functie van vulstof is afhankelijk van het asfalttype, waarin het wordt toegepast. Is het een continue of discontinue gegradeerd mengsel?

Bij continue gegradeerde asfaltmengsels (AC surf/bind/base) heeft vulstof een verstijvend effect op de mortel zowel tijdens de productie en verwerking van het asfaltmengsel als in de gebruiksfase. Het vergroot de samenhang van het mengsel via de vulling van de opbouw van het mineraal aggregaat als volgt: eerst worden de holle ruimtes van de grovere steenfracties opgevuld door steeds fijnere steenfracties, dan wordt de overgebleven holle ruimtes in het steenskelet opgevuld met zand en tenslotte worden de overgebleven holle ruimtes in het steen/zand skelet opgevuld met vulstof, zodat het uiteindelijke minerale skelet een gering percentage holle ruimte heeft. Ondanks het lage percentage heeft vulstof toch een hoog specifiek oppervlak in het gehele mengsel waardoor het asfalt een hoge stabiliteit heeft en tevens voldoende bitumen kan bevatten voor een goede duurzaamheid en vermoeiingsweerstand.

Bij discontinue gegradeerde asfaltmengsels (ZOAB en SMA) is vulstof onderdeel van de mastiek, die als de lijm voor het steenskelet fungeert. Tijdens de productie en verwerking moet de mastiek voldoende viskeus zijn om afdruipt te voorkomen. Tijdens de gebruikperiode moet mastiek duurzaam blijven hechten aan de steen en voldoende weerstand bieden tegen vermoeiing en erosie. Voor de duurzaamheid moet mastiek voldoende bitumen kunnen bevatten. Bij al deze mastiek eigenschappen speelt de kwaliteit en hoeveelheid vulstof een belangrijke rol.

In deze paper wordt alleen ingegaan op de functionele eigenschappen van vulstof in asfaltbetonmengsels, met name op het verstijvend vermogen. Het verstijvend vermogen van vulstof heeft invloed op o.a. de asfaltstijfheid, vermoeiings- en vervormingsweerstand en verdichtbaarheid .

1.1 Historie

Nederland heeft wat vulstoffen betreft een aparte historie. In de meeste landen bestaat steenslag en zand uit gebroken groevemateriaal en wordt tijdens het breken zoveel eigen stof verkregen, dat dit meestal voldoende is en hoeft er geen fabrieksvulstof te worden toegepast. In het verleden werd in Nederland alleen (gebroken) riviergrind uit de Maas en Rijn toegepast als kiezelslag in asfalt. Daar dit werd gewassen, bevatte het bijna geen eigen stof. Vanaf het begin was duidelijk dat toevoegen van fabrieksvulstof noodzakelijk was om een kwalitatief goed asfalt te kunnen produceren.

Het toepassen van verschillende soorten vulstoffen resulteerde in verschillen in asfalteigenschappen. Al snel werd een onderscheid gemaakt in zeer zwakke, zwakke, middelsoort en vroeger ook sterke vulstoffen.

Het onderscheid in sterkte was gebaseerd op het bitumengetal van Van der Baan en de holle ruimte Rigden. Voor de diverse asfaltsoorten werd in de "Eisen voor bouwstoffen in de wegenbouw van RWS" het bijbehorende type vulstof voorgeschreven. Zeer zwakke vulstof werd alleen in waterbouwasfalt en gietasfalt toegepast en in zandasfalt en asfaltbeton mocht alleen zwakke vulstof worden opgenomen. In ZOAB werd vanaf het begin middelsoort vulstof toegepast met hydroxide, omdat deze vulstof veel bitumen kan absorberen en de hechting tussen steen en bitumen verbetert. In de loop der tijd zijn in Nederland steeds meer

secundaire materialen toegepast (o.a. assen) in zgn. composiet vulstoffen. Het is de vraag of deze nieuwe vulstoffen met de empirische vulstofproeven voldoende zijn te karakteriseren.

2. Doel van het onderzoek

Doel van het onderzoek is om een verkennend onderzoek uit te voeren naar functionele proeven voor vulstoffen. Hierbij zijn de vulstoffen eerst gekarakteriseerd met de standaard vulstofproeven en niet-standaard vulstofproeven en zijn de morteleigenschappen onderzocht. Om een breed scala van vulstoffen te onderzoeken zijn verschillende Nederlandse en uit Suriname afkomstige vulstoffen en eigen stof onderzocht, zodat grote verschillen in eigenschappen waren te verwachten. Als functionele proef om de invloed van de vulstof op de stijfheid te onderzoeken zijn stijfheidsmetingen uitgevoerd met het DSR apparaat. Hiervoor zijn mortels vervaardigd met de verschillende vulstoffen.

Dit onderzoek richt zich op:

- het karakteriseren van vulstoffen
- het bepalen van het effect van de hoeveelheid vulstof op de mortelstijfheid
- het bepalen van het effect van het type vulstof op de mortelstijfheid
- het vinden van correlaties tussen de resultaten van de vulstofproeven en het fundamentele gedrag (mortelstijfheid).

3. Materialen en testmethoden

3.1 Materialen

In dit onderzoek zijn 8 zeer verschillende vulstoffen geselecteerd, hierbij ook cement en eigen stof en één soort bitumen, die ook onderdeel uitmaken van een afstudeeronderzoek [1].

De volgende materialen werden onderzocht:

1. MNO - eigen stof van MNO Vervat uit Suriname
2. Dalian - eigen stof van de Chinese aannemer, die in Suriname werkzaam is
3. Cement - een normale Portland cement die in Suriname wordt toegepast als er een tekort is aan eigen stof
4. Wigro 60 K - middelsoort kalksteenvulstof dat minstens 25% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bevat
5. Keerkring 1- zwakke kalksteenvulstof
6. Eigen stof - random verzameld eigen stof bij een Nederlandse asfaltmolen
7. Duras 18K - een zwakke vulstof, die 50 tot 85% vliegias bevat en 5 tot 15% $\text{Ca}(\text{OH})_2$
8. Wigro 60K + eigen stof (massaverhouding 1/1,5)

Het bitumen dat is gebruikt om de mortels te vervaardigen is een pengrade bitumen 70/100 (Penetratie = 89 dmm, $T_{r\&k} = 47^\circ\text{C}$).

3.2 Mortel

Voor het mengselontwerp en de asfaltproductie wordt de mengselsamenstelling opgegeven in massaprocenten, maar de asfalteigenschappen worden eigenlijk voornamelijk bepaald door de volumetrische mengselsamenstelling. Indien bij gelijke mengselsamenstelling op massabasis de dichtheden van materialen variëren, kan dit resulteren in variërend mengselgedrag.

Om een extra parameter, veroorzaakt door het verschil in dichtheid van vulstoffen, uit te sluiten is er in dit onderzoek voor gekozen om alle vulstof/bitumen ratio's (f/b) volumetrisch te kiezen. De volgende f/b ratio's zijn onderzocht: 0,4, 0,5, 0,6 en 0,8.

Het verstijvend effect van de verschillende vulstoffen is gekarakteriseerd met behulp van de stijfheidsratio (SR) welke gelijk is aan de ratio tussen de mortelstijfheid en bitumenstijfheid.

3.3. Testmethoden

Alle vulstoffen zijn gekarakteriseerd met de volgende proeven:

- Korrelverdeling conform EN 933-1:1997
- Dichtheid conform EN 1097-6:2000
- Holle ruimte Rigden conform EN 1097-4
- Bitumengetal van Van der Baan conform EN 13179-2
- Specifiek oppervlak met behulp van laser diffractie methoden
- Delta $T_{r\&k}$ conform EN 13179-1. De delta $T_{r\&k}$ is het verschil tussen het verwerkingspunt $T_{r\&k}$ van de mortel en en het verwekingspunt $T_{r\&k}$ van het bitumen.

Het bitumen werd gekarakteriseerd met:

- Penetratie conform EN 1426
- Verwerkingspunt R&K conform EN 1427

De mortels werden onderzocht met DSR proeven conform EN 14770 met de volgende testcondities:

- temperaturen van -10 tot 50 ° C (stappen van 10 ° C)
- frequentie 0,1 - 400 rad/s.

De mortels werden bereid door handmatig mengen met een spatel. Hierbij werd stapsgewijs voorverwarmde vulstof aan het hete bitumen toegevoegd. De mortels werden gemengd bij dezelfde mengseltemperatuur die geldt voor asfalt (EVT). De mengtijd is constant gehouden.

4. Resultaten en discussie

4.1 Resultaten van vulstof en bitumen proeven.

De resultaten van de verschillende vulstof proeven zijn samengevat in tabel 1.

	MNO	Cement	Dalian	Eigen stof	Keerkrin g 1	Duras 18K	Wigro 60K	Wigro 60K + eigen stof
vulstof	1	2	3	4	5	6	7	8
korrelverdeling (cum. %)								
Op zeef								
2 mm	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
125 µm	3.2	0.6	4.3	10.5	4.9	3.3	4.0	6.6
63 µm	14.2	0.4	15.7	27.0	11.7	15.7	13.6	19.0
< 63 µm	85.8	95.6	84.3	73.0	88.3	84.3	86.4	81.0
HR Rigden AV (%)	33	37	35	33	34	42	47	44
Bitumengetal Van der Baan	39	36	37	48	44	46	58	57
Vulstof klasse (NEN 6240)	Zeer zwak	Zeer zwak	Zeer zwak	Zwak	Zwak	Zwak	Middel-soort	Middel-soort

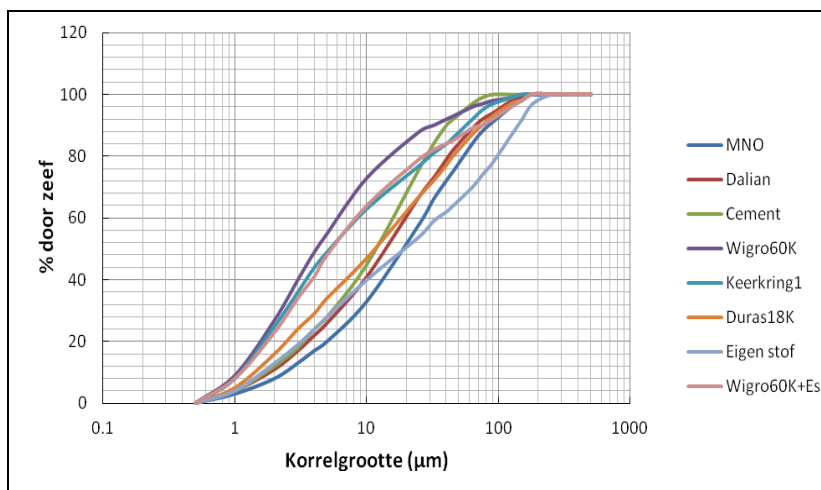
Dichtheid (kg/m ³)	2640	3040	2660	2632	2697	2580	2593	2610
Specifiek oppervlak (cm ² /g)	3374	3969	4146	4253	7126	5298	8243	7073

Tabel 1. Resultaten vulstofproeven.

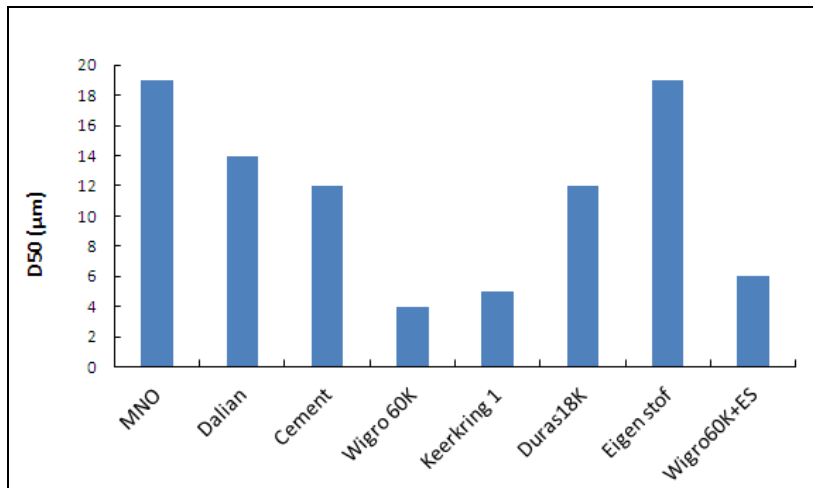
Uit tabel 1 blijkt dat de 8 onderzochte vulstoffen inderdaad totaal verschillende eigenschappen hebben. Vulstoffen 1 t/m 4 worden normaal niet toegepast in asfaltbeton en hebben, behalve vulstof 4, het laagste bitumengetal. Volgens NEN 6240 kunnen de verschillende vulstoffen worden ingedeeld in de klassen zeer zwak, zwak en middelsoort [2]. Hoe zwakker de vulstof, hoe minder bitumen kan worden gebonden. Dit betekent dat bij zwakke vulstoffen meer kans is op zgn. “vrije” bitumen, dat gevaar kan opleveren voor spoorvorming en/of vetslaan.

Tabel 1 laat ook zien dat cement, vulstof 2, het hoogste percentage door zeef 0.063 mm heeft. Op basis hiervan wordt een hoog specifiek oppervlak verwacht, maar uit laserdiffractie metingen blijkt dat dit niet het geval is. Mogelijk hebben cementkorrels een minder ruw oppervlak?

Opgemerkt wordt dat als cement wordt toegepast in asfalt, er op massabasis relatief veel moet worden gecorrigeerd om eenzelfde f/b te krijgen vanwege de hogere dichtheid van cement. In figuur 1 wordt de korrelverdeling verkregen door laserdiffractie van de verschillende vulstoffen vergeleken. Duidelijk is te merken dat de verdeling van de fractie kleiner dan 0.063mm verschillend is. Als indicator om de verschillen te kwantificeren, is gebruik gemaakt van de D50 maat, de zeefopening waardoor 50% van het materiaal door heen gaat. Zie figuur 2.



Figuur 1. Korrelverdeling verschillende vulstoffen



Figuur 2. *Vergelijking D50 verschillende vulstoffen*

Wanneer figuur 2 vergeleken wordt met tabel 1, kan geconcludeerd worden dat de “standaard” korrelverdeling onvoldoende inzicht geeft over de fijnheid en specifiek oppervlak van het materiaal.

T.b.v. het vervaardigen van een mastercurve zijn stijfheidsmetingen op bitumen uitgevoerd in een temperatuurbereik van -10 tot 50°C in stappen van 10 °C in een frequentiebereik van 0,1 tot 400 rad/s. De verschillende isothermen zijn verschoven met een shiftfactor berekend met de Williams Landel Ferry (WLF) vergelijking:

$$\log a_T = \frac{-C_1(T - T_r)}{C_2 + (T - T_r)}$$

Waarin:

a_T = Shift factor bij temperatuur T

T = Temperatuur [K]

T_r = Referentie temperatuur [K]

C_1, C_2 = Constanten

Om de morteleigenschappen bij specifieke temperaturen en frequenties te kunnen bepalen, is gebruik gemaakt van in literatuur beschikbare modellen. In dit onderzoek is het Christensen – Anderson model gebruikt.

$$G^*(\omega) = G_g \left[1 + \left\{ \frac{\omega}{\omega_c} \right\}^{\frac{(\log 2)}{R}} \right]^{-\frac{R}{\log 2}}$$

$$\delta_{(\omega)} = 90 / \left[1 + \left\{ \frac{\omega}{\omega_c} \right\}^{(\log 2)/R} \right]$$

Waarin:

$G^*(\omega)$ = Complex modulus (stijfheid) [Pa]

$\delta_{(\omega)}$ = Fasehoek [°]

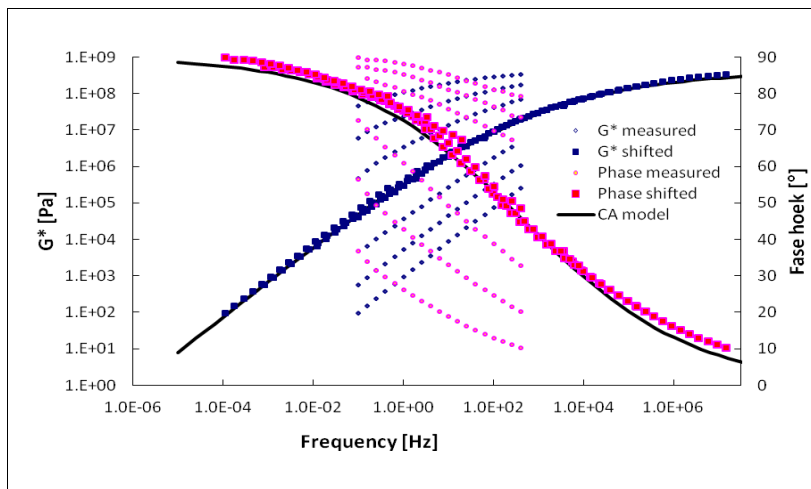
G_g = Glas modulus [Pa]

R = Rheological Index

ω = Frequentie [Hz]

ω_c = Crossover frequentie [Hz]

Met behulp van de kleinste kwadraten methode zijn de modelparameters zodanig gekozen dat het model de gemeten data het beste benadert. Hierna kan met behulp van het model voor elke willekeurige temperatuur en/of frequentie, de stijfheid (complexe modulus) en fasehoek worden bepaald. Figuur 3 geeft een illustratie hiervan weer.

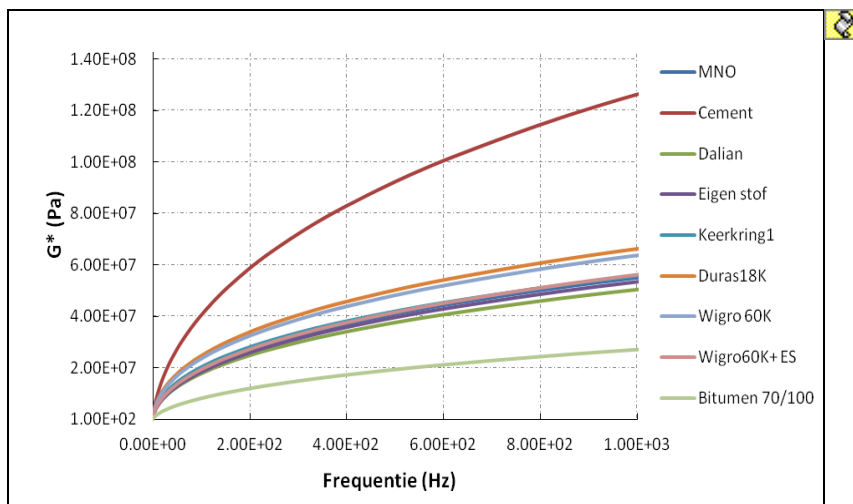


Figuur 3. DSR proefresultaten bitumen 70/100

4.2 Resultaten mortel proeven

In het laboratorium werden met de acht vulstoffen mortels bereid met vier verschillende f/b verhoudingen, waarbij het basisbitumen constant is gehouden. In figuur 4 worden als voorbeeld de resultaten weergegeven van de mastercurves voor de stijfheid van mortels met verschillende vulstoffen met dezelfde f/b van 0,4.

De berekende modelparameters zijn terug te vinden in tabel 2.



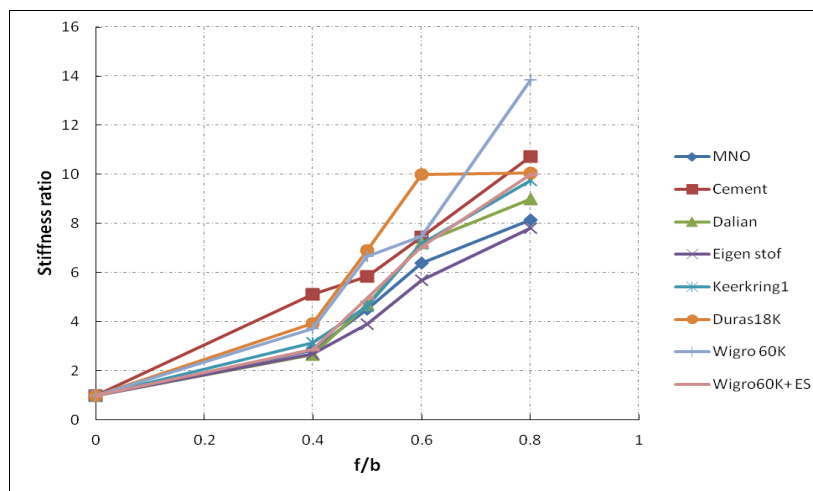
Figuur 4. Vergelijking stijfheid master curves, $T_{ref}=20^{\circ}C$ $f/b=0.4$

Material	C₁	C₂	G_g [Pa]	ω_c [Hz]	R	R²
Pen 70/100	16.7	140.2	4E+08	477	1.30	0.99
MNO	21.7	146.8	1E+09	114	1.71	0.98
Cement	20.4	167.1	1E+09	283	1.46	0.97

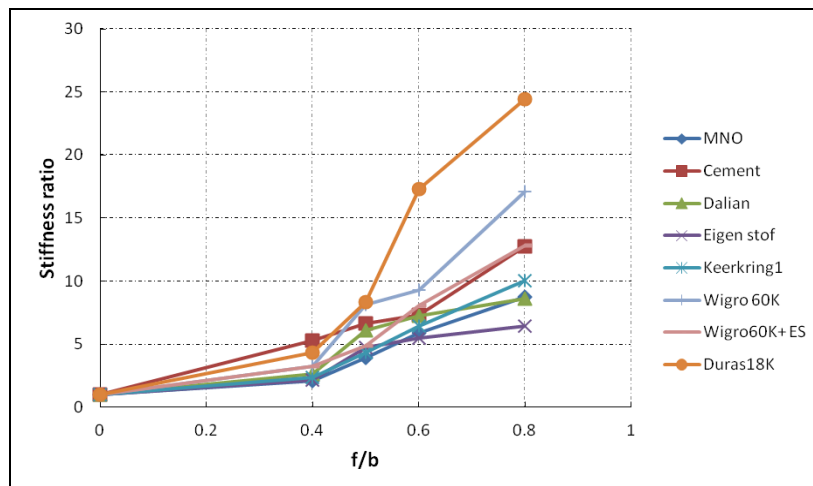
Dalian	21.3	174.0	1E+09	86	2.08	0.98
Eigenstof	20.6	163.6	1E+09	436	1.22	0.99
Keerkring 1	19.5	154.7	1E+09	344	1.28	0.99
Duras 18K	13.3	113.7	1E+09	357	1.21	0.98
Wigro 60K	15.7	129.2	1E+09	336	1.22	0.99
Wigro 60K + ES	15.7	129.2	1E+09	671	1.22	0.99

Tabel 2. Overzicht modelparameters $T_{ref}=20^{\circ}C$ $f/b=0.4$

Om het gedrag van verschillende vulstoffen onder wisselende omstandigheden te onderzoeken, is de stijfheidsratio bepaald bij 20 en 50°C en twee arbitrair gekozen frequenties. Alle resultaten zijn weergegeven in figuren 5 t/m 8.



Figuur 5. Stijfheidsratio's als functie van f/b , $T_{ref} = 20^{\circ}C$ $10Hz$



Figuur 6. Stijfheidsratio's als functie van f/b , $T_{ref} = 50^{\circ}C$ $10Hz$

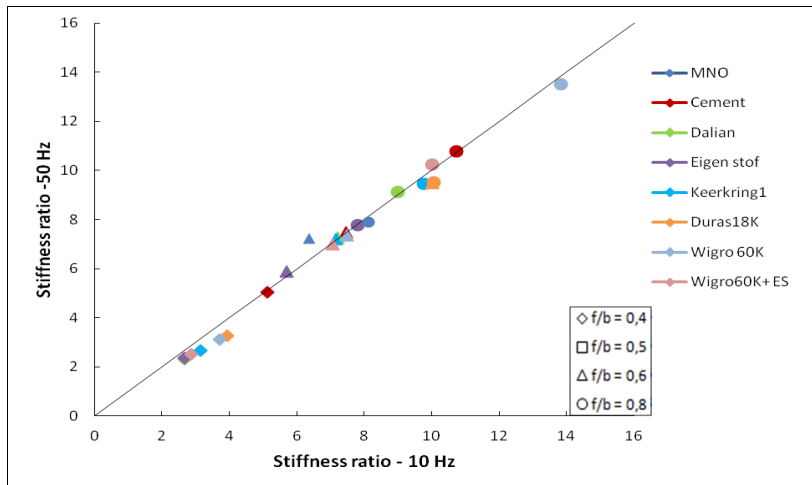
Uit de figuren 5 en 6 kan worden waargenomen dat vulstof 2, cement, zich tot een f/b van 0,4 stijver gedraagt. Vanaf f/b 0,4 vertoont vulstof 6, Duras 18K, een stijver gedrag.

Dit komt overeen met de waarnemingen uit [3] en [4], dat vulstoffen, die vliegassen bevatten, meer bitumen absorberen dan kalksteenvulstoffen, ook al hebben ze eenzelfde holle ruimte. Rigden en bitumengetal Van de Baan. In Suriname wordt wel eens tijdens de productie cement toegepast als er een tekort is aan eigen stof om aan de graderingseisen op massabasis

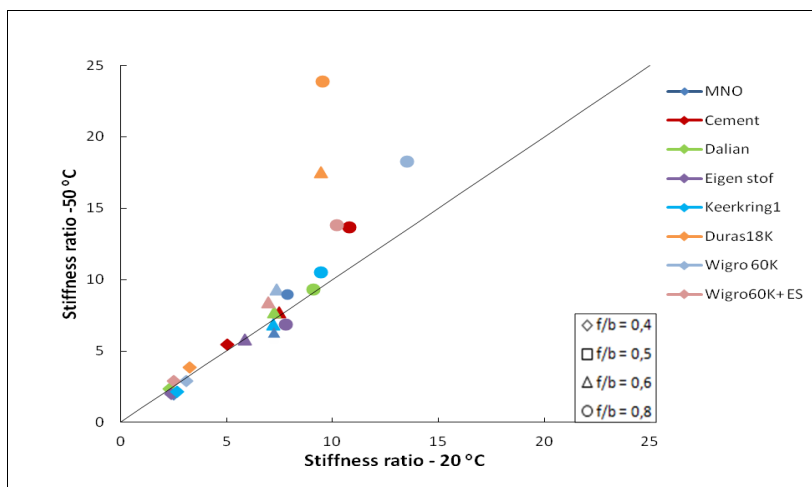
te voldoen [5]. Dit kan resulteren in een te stijf mengsel waardoor verdichtingsproblemen kunnen ontstaan of vroegtijdige schade door scheurvorming.

Bovenstaande kon niet worden afgeleid uit de in tabel 1 gepresenteerde resultaten van de empirische standaard vulstofproeven.

Aanvullende analyses (zie figuren 7 en 8) zijn uitgevoerd om te achterhalen of de stijfheidsratio's van de verschillende mortels mogelijk temperatuur en belasting afhankelijk zijn.



Figuur 7. Stijfheidsratio's van 8 onderzochte mortels als functie van frequentie (De verschillende kleuren en symbolen verwijzen naar vulstoffen resp. f/b ratio's)

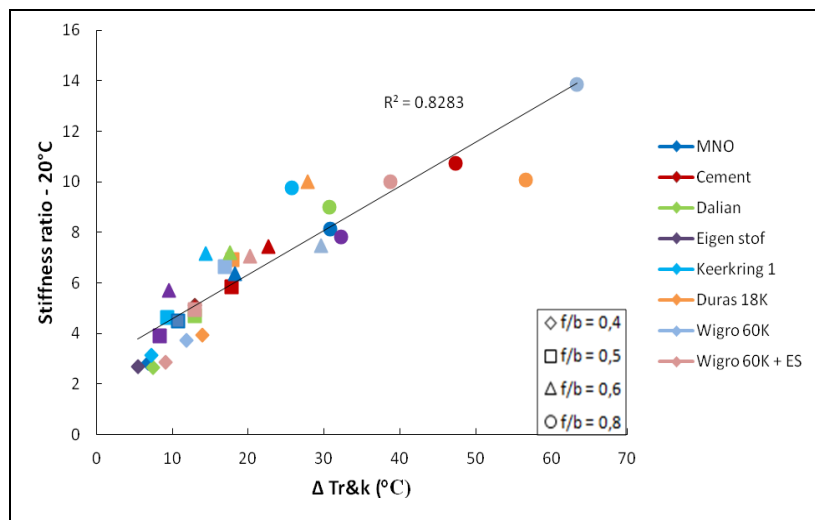


Figuur 8. Stijfheidsratio's van 8 onderzochte vulstoffen als functie van temperatuur, $f=10\text{Hz}$ (De verschillende kleuren en symbolen verwijzen naar vulstoffen resp. f/b ratio's)

Uit de verschillende verkregen resultaten kon geen effect van de belastingstijden worden waargenomen. Ook wat betreft het effect van de temperatuur werden geen significante verschillen waargenomen bij lage f/b ratio's. Echter, vanaf een f/b van 0,6 werd bij mortel met vulstof 6, Duras 18K, wel een toename in stijfheidsratio waargenomen. Bij een f/b van 0,8 is het effect nog sterker en wordt het effect ook bij mortels met andere vulstoffen waargenomen.

Bij hoge f/b ratio's neemt de hoeveelheid "vrije bitumen" af en wordt het mortelgedrag meer gedomineerd door de vulstoffeigenschappen zelf. Het is nog niet duidelijk welke vulstoffeigenschappen dit proces precies beïnvloeden. Het effect van de temperatuur en de gekozen f/b van 0,8 is echter minder relevant, want dit komt in de praktijk niet voor.

Als extra is de delta $T_{r\&k}$ van de verschillende mortels bepaald. Figuur 9 toont de relatie tussen het verstijvend effect in termen van toename van het verwekingspunt van de mortel en de toename van de complexe modulus in vergelijking met die van bitumen 70/100.



Figuur 9. Relatie tussen verstijvend effect en $\Delta Tr\&k$

Figuur 7 laat het verband zien tussen stijfheidsratio en de delta $T_{r\&k}$. Met de bepaling van de delta $T_{r\&k}$ is het dus mogelijk om inzicht te krijgen in het verstijvend effect van verschillende vulstoffen.

4.3 Empirisch versus functioneel

De verschillend verkregen proefresultaten laten zien dat het verstijvend effect van de vulstof op de mortel niet direct en eenduidig uit de conventionele vulstofproeven is te halen.

Een hogere holle ruimte Rigden leidt niet altijd tot een hoger verstijvend effect.

Verder was gebleken dat cement het hoogste percentage door zeef 0,063 mm had, maar dat leidde niet tot een hoog specifiek oppervlak. Het hoogste specifiek oppervlak had Wigro 60K en dit correleerde goed met de hoge stijfheidsratio.

Om het bovenstaande nader te onderzoeken is een correlatie analyse uitgevoerd om te achterhalen of de empirische proefresultaten statistisch goed correleren met de functionele proefresultaten. Gebruik is gemaakt van SPSS 17, waarbij de stijfheidsratio, SR, was ingesteld als afhankelijke variabele. De volgende onafhankelijke variabelen zijn getoetst in de analyse:

- BG – bitumengetal Van der Baan
- HR – holle ruimte Rigden
- SO – specifiek oppervlak
- D50 – zeefmaat “50% door”
- DRK – delta $T_{r\&k}$
- DH – dichtheid vulstof

Omdat uit de verkregen resultaten bleek, dat bij hogere f/b ratio's de verschillen tussen de verschillende vulstoffen duidelijker worden, zijn de correlatie analyses uitgevoerd met de resultaten verkregen uit proeven op mortels met f/b ratio's van 0,5 en 0,8.

In de figuren 10 en 11 zijn de resultaten van de correlatie analyses weergegeven.

	SR	SO	D50	BG	HR	DRK	DH
SR Pearson Correlation	1	.707	-.772*	.514	.817*	.674	.108
Sig. (2-tailed)		.050	.025	.192	.013	.067	.798
N	8	8	8	8	8	8	8
SO Pearson Correlation	.707	1	-.921**	.808*	.713*	.148	-.359
Sig. (2-tailed)	.050		.001	.015	.047	.727	.383
N	8	8	8	8	8	8	8
D50 Pearson Correlation	-.772*	-.921**	1	-.575	-.683	-.326	.056
Sig. (2-tailed)	.025	.001		.136	.062	.431	.895
N	8	8	8	8	8	8	8
BG Pearson Correlation	.514	.808*	-.575	1	.755*	.058	-.573
Sig. (2-tailed)	.192	.015	.136		.030	.891	.138
N	8	8	8	8	8	8	8
HR Pearson Correlation	.817*	.713*	-.683	.755*	1	.676	-.268
Sig. (2-tailed)	.013	.047	.062	.030		.066	.521
N	8	8	8	8	8	8	8
DRK Pearson Correlation	.674	.148	-.326	.058	.676	1	.287
Sig. (2-tailed)	.067	.727	.431	.891	.066		.491
N	8	8	8	8	8	8	8
DH Pearson Correlation	.108	-.359	.056	-.573	-.268	.287	1
Sig. (2-tailed)	.798	.383	.895	.138	.521	.491	
N	8	8	8	8	8	8	8

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).
**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Figuur 10. Resulten van correlatie analyses van mortel data $f/b=0.8$

	SR	SO	D50	BG	HR	DRK	DH
SR Pearson Correlation	1	.377	-.457	.253	.749*	.914**	.030
Sig. (2-tailed)		.357	.255	.546	.033	.001	.944
N	8	8	8	8	8	8	8
SO Pearson Correlation	.377	1	-.921**	.808*	.713*	.148	-.359
Sig. (2-tailed)	.357		.001	.015	.047	.727	.383
N	8	8	8	8	8	8	8
D50 Pearson Correlation	-.457	-.921**	1	-.575	-.683	-.326	.056
Sig. (2-tailed)	.255	.001		.136	.062	.431	.895
N	8	8	8	8	8	8	8
BG Pearson Correlation	.253	.808*	-.575	1	.755*	.058	-.573
Sig. (2-tailed)	.546	.015	.136		.030	.891	.138
N	8	8	8	8	8	8	8
HR Pearson Correlation	.749*	.713*	-.683	.755*	1	.676	-.268
Sig. (2-tailed)	.033	.047	.062	.030		.066	.521
N	8	8	8	8	8	8	8
DRK Pearson Correlation	.914**	.148	-.326	.058	.676	1	.287
Sig. (2-tailed)	.001	.727	.431	.891	.066		.491
N	8	8	8	8	8	8	8
DH Pearson Correlation	.030	-.359	.056	-.573	-.268	.287	1
Sig. (2-tailed)	.944	.383	.895	.138	.521	.491	
N	8	8	8	8	8	8	8

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).
**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Figuur 11. Resulten van correlatie analyses van mortel data $f/b=0.5$

De correlatie analyse laat zien dat zowel bij de lagere als hogere vulstofgehaltenes, alleen de holle ruimte Rigden significant correleert met de stijfheidsratio. Verder correleert de D50 significant met de stijfheidsratio bij de hogere vulstofgehaltenes. Bij de lagere vulstofgehaltenes is de correlatie niet significant. Het tegenovergestelde geldt voor de delta $T_{r\&k}$. Conform de norm moet deze proef uitgevoerd worden met een mortel waarbij het f/b verhouding gelijk is aan 0.6. Aanvullende proeven zullen moeten bevestigen of bij hogere vulstof gehaltenes het beeld ongewijzigd blijft. Verder laten de resultaten zien dat het specifiek oppervlak goed correleert met de holle ruimte Van der Baan.

Uit de verkregen resultaten kan worden geconcludeerd dat de empirische proeven voldoende inzicht geven in de algemene eigenschappen van vulstoffen. Echter, om een beter inzicht te krijgen in het effect van vulstoffen op mortel- en asfalteigenschappen is het noodzakelijk om aanvullende functionele proeven uit te voeren.

4.4 Discussie

De verschillend verkregen proefresultaten laten zien dat er tijdens de productie van asfalt niet zo maar van type vulstof (bv. toepassen van cement) kan worden gewisseld tijdens de productie. Indien deze vulstof bv. een meer verstijvend effect heeft op de mortel, zou dit kunnen leiden tot een slechter verwerkbaar mengsel of zelfs tot vroegtijdig falen door scheurvorming of craquelé.

Aangezien cement een relatief hoog gehalte heeft door zeef 0,063 mm, werd een hoog specifiek oppervlak verwacht. Dit was niet het geval, wat mogelijk wordt veroorzaakt door een glad oppervlak van de cementkorrels. Er is geen verklaring gevonden voor het hoge stijfheidsgedrag van de mortel.

De vulstof met het hoogste specifieke oppervlak, Wigro 60K, liet ook een toename in mortelstijfheid zien bij relatief hoge f/b ratio's en bij 50°C. Mogelijk wordt dit mede veroorzaakt door het hoge gehalte aan $\text{Ca}(\text{OH})_2$, dat een verstijvend effect heeft op bitumen. Door de TU Aken is vastgesteld dat er tussen bitumen en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ een chemische reactie plaats vindt, die tot verstijving van het bitumen leidt [6].

Bij hoge temperaturen neem de mobiliteit van vulstoffen in mortel toe, terwijl bij hoge vulstofgehalten het "vrije" bitumengehalte afneemt wat resulteert in stijver mortelgedrag dat wordt gedomineerd door de vulstofeigenschappen.

Echter de resultaten bij lage f/b ratio's, laten de resultaten zien dat het specifiek oppervlak niet significant is en dat andere vulstofeigenschappen het stijfheidsgedrag van de mortel beïnvloeden.

De resultaten van de delta $T_{r\&k}$ proeven, laten toch een relatie zien tussen delta $T_{r\&k}$ en de stijfheidsratio van mortel. Om meer inzicht te krijgen in deze relatie zouden meer proeven moeten worden uitgevoerd en zouden ook mortels met andere f/b verhoudingen en andere bitumina moeten worden onderzocht.

Samenvattend kan gesteld worden dat door onderzoek aan mortels ook inzicht wordt verkregen in het verstijvend effect veroorzaakt door de interactie bitumen/vulstof.

5. Conclusies

Om inzicht te krijgen in het gedrag van de verschillende vulstoffen zijn de vulstoffen met de standaard en speciale vulstofproeven gekarakteriseerd en is het verstijvend effect van vulstoffen op mortels functioneel onderzocht met de DSR. Uit de resultaten kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- de huidige empirische vulstofproeven zijn voldoende geschikt om onderscheid te kunnen maken tussen de verschillende vulstoffen. Om te begrijpen hoe de vulstoffen het gedrag van mortels kunnen beïnvloeden, is meer fundamenteel onderzoek noodzakelijk.
- het uitvoeren van functionele proeven op mortels met behulp van het DSR apparaat, maakt het mogelijk om composiet vulstoffen te ontwikkelen, die goed in asfalt onder praktijkomstandigheden kunnen presteren

6. Aanbevelingen

Op basis van het uitgevoerde onderzoek kunnen de volgende aanbevelingen worden gedaan:

- nu is het onderzoek met slechts een bitumensoort uitgevoerd. Mogelijk worden met bitumina van andere herkomst of andere pengrades andere resultaten verkregen. Om dit te onderzoeken zouden ook proeven moeten worden uitgevoerd met andere bitumina

- er zou aanvullend onderzoek moeten worden uitgevoerd om de relatie tussen korrelgrootteverdeling, specifiek oppervlak en het verstijvend effect van vulstoffen op mortels te onderzoeken. Mogelijk kunnen laserdiffractieproeven meer inzicht geven in tegenstelling tot de huidige zeefproef voor vulstoffen.
- de resultaten van dit eerste onderzoek, om te onderzoeken of functionele proeven op mortels een meerwaarde hebben ten opzicht van de standaard en speciale vulstofproeven, zijn zodanig positief dat aanbevolen wordt om meer onderzoek te doen in deze richting, zodat in de toekomst vulstoffen functioneel gespecificeerd kunnen worden
- dit onderzoek was gericht op het gedrag van mortels in asfaltbeton. Aanbevolen wordt om ook een dergelijk onderzoek uit te voeren op mastieken voor SMA en ZOAB. Voor het functionele gedrag zullen dan andere proeven moeten worden ingezet dan in dit onderzoek.

7. Referenties

- [1] M. Hirosemito, afstudeerrapport “Vulstoffen in de Surinaamse asfaltindustrie”, Anton de Kom Universiteit, Suriname, 2013
- [2] <http://admin.campaigner.nl/users/nevul/files/32843962-nevul-boekje%202011-2012.pdf>
- [3] Stichting Vulstof Controle, “Vulstof en de mechanische eigenschappen van dicht asfaltbeton”, SVC kasteel Maurik, 1982
- [4] Voskuilen, J. en Molenaar J., Vulstof-bitumen interacties, CROW Wegbouwkundige Werkdagen 1994.
- [5] Thematic paper Quality Control: http://www.neasurinameists.org/?wpfb_dl=42, 2010, NEA
- [6] Gharabaghy, C. en Csink C., Eindrapport Leren van de weg, RWTH 2006.