

VERGELIJKING VAN DE VERMOEIINGSEIGENSCHAPPEN VAN STEENSLAGASFALTBETON EN GRINDASFALTBETON

F. van Gogh, A.E. van Dommelen, J.L.M. Voskuilen, R.L. Krans
Dienst Weg- en Waterbouwkunde
DELFT

Samenvatting

In de DWW-Handleiding Wegenbouw-Ontwerp Verhardingen wordt voor de dimensionering van verhardingen, uitgegaan van de eigenschappen van grindasfaltbeton (GAB). In de praktijk wordt echter steeds vaker steenslagasfaltbeton (STAB) toegepast, waaraan tenminste dezelfde eigenschappen worden toegekend als aan GAB. Teneinde deze eigenschappen te toetsen is een onderzoek uitgevoerd naar de vermoeiingseigenschappen van STAB. Van zeven STAB-mengsels, zowel bereid met "verse" bouwstoffen als met diverse percentages regeneratie-asfalt zijn de F-curven bepaald.

Uit het samenstellingsonderzoek is gebleken, dat in de praktijk veel afwijkingen in de samenstelling voorkomen ten opzichte van wat in het vooronderzoek is vastgesteld. Twee mengsels moesten op grond van hun samenstelling worden afgekeurd. Deze mengsels zijn wel in het onderzoek meegenomen.

Uit het onderzoek is gebleken, dat de vermoeiingseigenschappen van STAB niet zodanig van die van GAB verschillen, dat ten behoeve van het ontwerpen van verhardingen een onderscheid voor vermoeiingseigenschappen van deze mengseltypen noodzakelijk is.

Summary

The dimensioning of pavements in the RHED Pavement Design Manual is based on the properties of gravel asphalt concrete (GAB). In practice, crushed gravel asphalt concrete (STAB) increasingly is used. Till now the properties of this material have been assumed to be at least equivalent to those of normal asphalt concrete. In order to test these properties an investigation has been carried out to determine the fatigue properties of STAB. The F-curves of seven STAB-mixtures have been determined. The mixtures contained STAB with regenerated asphalt in various percentages.

An analysis of the compositions of the mixtures revealed many discrepancies between mixtures in practice and laboratory mixtures for preliminary investigations. Two mixtures were rejected based on their compositions. Nevertheless these mixtures were also included in this investigation. The results of the investigation showed that the fatigue properties of STAB don't differ much from GAB, so that it's not necessary on behalf of the design of pavements to make a difference between the fatigue properties of these mixtures.

Inhoud

1. Inleiding
2. Bepalen van F-curves
3. Herkomst STAB
4. Het vermoeiingsonderzoek
5. Stijfheidskarakteristiek en F-curves STAB en GAB
6. Conclusies
7. Literatuur

1. Inleiding

Voor het ontwerpen van wegen volgens de DWW-Handleiding Wegenbouw-Ontwerp Verhardingen [1] wordt als criterium scheurvorming van onderuit gehanteerd. Omdat GAB traditioneel in onderlagen wordt toegepast, wordt in de dimensionering uitgegaan van in 1978 bepaalde eigenschappen van GAB [2,3].

Sinds enkele jaren wordt in onderlagen steeds vaker STAB met steenslag 6/22, verkeersklasse 4 toegepast in plaats van het traditionele GAB met grind 4/32 soort 57, verkeersklasse 4. In de huidige praktijk wordt STAB bijna altijd bereid met hergebruik van asfaltgranulaat tot een maximum van 50 %. STAB bereid met uitsluitend "vers" bouwstoffen komt niet of nauwelijks meer voor.

De reden dat STAB wordt toegepast in plaats van GAB is de verwachting dat de weerstand tegen permanente vervorming beter is. Het mineraalaggregaat van STAB is gebroken materiaal en heeft een kleinere gradering dan GAB. Hierdoor heeft STAB een hogere haakweerstand, een groter hechtingsoppervlak en daardoor een dunnere bitumenfilm. Dit zorgt voor een betere vervormingsweerstand. Wat betreft de vermoeiingseigenschappen wordt verwacht dat STAB tenminste gelijkwaardig is aan GAB.

Deze verwachting berust echter slechts op een beperkt onderzoek, uitgevoerd door CROW werkgroep B15 "Asfalttechnologie" [4]. Tot op heden is hier ondanks het toenemende gebruik van STAB weinig nader onderzoek naar verricht.

Het is van groot belang om het vermoeiingsgedrag van STAB te kennen, teneinde onder- of overdimensionering te voorkomen. Voor bestaande wegen met STAB, die gedimensioneerd zijn met de eigenschappen van GAB, is te bepalen of deze een verhoogde kans hebben op doorscheuren van onderuit, of dat ze in feite overgedimensioneerd zijn. Dit kan consequenties hebben voor de laagdikte van STAB voor nieuwe werken.

Om te onderzoeken hoe de mechanische eigenschappen van STAB zich verhouden tot die van GAB zijn vermoeiingsonderzoeken uitgevoerd op zeven STAB-mengsels uit verschillende wegvakken [5]. Hiervan zijn vijf mengsels (A t/m E) bereid met regeneratie-asfalt en twee met uitsluitend verse bouwstoffen (F en G). Het onderzoek zal nog worden aangevuld met een beperkt healing-onderzoek.

In dit artikel worden de resultaten van het vermoeiingsonderzoek gepresenteerd.

2. Bepalen van F-curves

Onder een F-curve wordt verstaan een grafiek van de toelaatbare rekamplitude als functie van de complexe initiële dynamische stijfheidsmodulus en de gewenste vermoeiingslevensduren van 10^5 , 10^6 , 10^7 en 10^8 latherhalingen, zie figuur 2.

Het bepalen van F-curves vindt plaats op basis van resultaten van cyclische vierpuntsbuigproeven [6], die worden uitgevoerd bij verschillende temperaturen en verschillende rekniveaus.

Volgens het energieconcept van Van Dijk en Visser [7] worden uit deze resultaten de regressieconstanten A en z van de volgende relatie bepaald:

$$W_f = A \cdot N_f^z \quad (1)$$

waarin:

- W_f gecumuleerde gedissipeerde energie na N_f lastherhalingen
 N_f aantal lastherhalingen waarbij de dynamische stijfheidsmodulus is gedaald tot de helft van de initiële waarde.

De F-curve wordt bepaald met formule (2):

$$\varepsilon' = \sqrt{\frac{A\psi}{\pi S_0 \sin \phi_0} \cdot \frac{1}{N_f^{1-z}}} \quad (2)$$

waarin:

- ε' de toegestane rek [$\mu\text{m}/\text{m}$]
 ψ verhouding tussen energiedissipatie op het initiële punt en de gemiddelde energiedissipatie per cyclus [-]
 S_0 initiële dynamische stijfheidsmodulus [MPa]
 ϕ_0 initiële faseverschil [°]
 N_f aantal lastherhalingen waarbij de dynamische stijfheidsmodulus is gedaald tot de helft van de initiële dynamische stijfheidsmodulus [-]

ϕ_0 en ψ worden door regressie bepaald als functie van de dynamische stijfheidsmodulus volgens formules (3) en (4), zodat de F-curven over een groot stijfheidsgebied bepaald kunnen worden:

$$\phi_0 = C_1 + C_2 \log S_0 \quad (3)$$

$$\psi = C_3 + C_4 \log S_0 \quad (4)$$

De initiële dynamische stijfheidsmodulus kan op twee manieren worden bepaald: volgens de raaklijnmethode [8] en met de initieel punt methode [6].

Bij de raaklijnmethode wordt S_0 verkregen door de doorsnijding van de raaklijn aan het lineaire gedeelte van de stijfheid-levensduur-curve met de verticale as ($N = 0$ lastherhalingen). Destijds [2,3] is voor het bepalen van de F-curve van GAB gebruik gemaakt van deze raaklijnmethode. Voor het vergelijken van STAB- met GAB-resultaten is daarom in dit onderzoek de raaklijnmethode gehanteerd voor het bepalen van S_0 .

Bij de initieel punt methode wordt S_0 verkregen door de dynamische stijfheidsmodulus te bepalen op het initieel punt, dat ligt tussen de 45° en 75° lastherhaling. In dit onderzoek is tevens een vergelijking gemaakt tussen de beide methoden.

3 Herkomst STAB

Het onderzoek is uitgevoerd op zeven STAB-mengsels. De mengsels A t/m E zijn samengesteld onder partieel hergebruik van asfaltgranulaat. De mengsels F en G zijn

samengesteld uit geheel "verse" bouwstoffen.

De monsters zijn verkregen uit wegvakken, met een minimale lengte van 300 m, die in een normaal bestek zijn aangelegd om zoveel mogelijk aan te sluiten bij de in de praktijk geleverde kwaliteit. Er zijn dus geen speciale proefvakken aangelegd.

Voor het onderzoek naar de samenstelling zijn uit de gekozen wegvakken kernen ϕ 0,10 m geboord. Op de kernen is samenstellingsonderzoek uitgevoerd om vast te stellen of de mengsels voldoen aan de eisen. Per vak zijn in viervoud de mengselsamenstelling, holle ruimte, verdichtings- en vullingsgraad bepaald en in tweevoud de eigenschappen van het teruggewonnen bitumen. De proeven zijn uitgevoerd conform de "Standaard RAW-Bepalingen 1990" [9]. In tabel 1 is een samenvatting van de gemiddelde resultaten van het onderzoek naar de mengselsamenstelling opgenomen. In tabel 2 zijn de eigenschappen van de teruggewonnen bitumina opgenomen.

Tabel 1 Gemiddelde mengselsamenstelling per vak.

| Vak | Rege- neratie | Ver- dich- tings- graad | Holle ruimte | Vullings- graad | steen >2mm | vulstof <63 μ m | zand- driehoek | bitumen- gehalte |
|-----|------------------|----------------------------------|--------------|--------------------|------------|------------------------|-------------------|-------------------------|
| | % | % | % (vol.) | % (vol.) | %(m/m) | %(m/m) | %(m/m) | % (m/m) op 100% m.a. |
| A | 50 | 100,7 | 5,5 | 64 | 55,0 | 6,3 | 44/40/16 | 4,4 |
| B* | 50 | 101,0 | 1,8 | 87 | 58,8 | 8,3 | 29/43/28 | 5,3 |
| C | 20 | 99,5 | 4,9 | 68 | 58,9 | 6,7 | 46/39/15 | 4,6 |
| D | 20 | 101,0 | 3,8 | 72 | 59,8 | 6,1 | 30/50/20 | 4,3 |
| E | 50 | 99,1 | 6,5 | 60 | 58,9 | 6,0 | 32/39/19 | 4,4 |
| F* | 0 | 99,4 | 6,8 | 60 | 58,8 | 4,6 | 13/73/14 | 4,6 |
| G | 0 | 101,5 | 3,1 | 76 | 59,3 | 5,8 | 17/55/28 | 4,3 |

* = voldoet niet aan de eisen

Tabel 2 Eigenschappen van de teruggewonnen bitumina.

| vak | A | B* | C | D | E | F* | G |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| pen (10^{-1} mm) | 39 | 32 | 33 | 35 | 27 | 40 | 41 |
| T _{RAK} (°C) | 56,5 | 59,0 | 57,0 | 55,0 | 59,0 | 54,5 | 54,5 |
| PI | -0,3 | -0,3 | -0,5 | -0,9 | -0,6 | -0,7 | -0,6 |

* = voldoet niet aan de eisen

Hoewel mengsel B is afgekeurd, is dit mengsel in het onderzoek meegenomen om inzicht te krijgen in het effect van de afwijkingen op de vermoeiingseigenschappen. Deze afwijkingen van het vooronderzoek zijn ontstaan bij wegvakken, waarbij tijdens de uitvoering wijzigingen in het bestek zijn voorgekomen.

Mengsel F was in eerste instantie afgekeurd omdat de samenstelling niet overeenkwam met wat in het vooronderzoek was vastgesteld. Achteraf is een verkort vooronderzoek uitgevoerd aan de hand van de gemiddelde extractieresultaten, waaruit blijkt dat het mengsel met deze samenstelling toch aan de Marshall-eigenschappen voldoet. Het vulstofgehalte voldoet niet aan de eisen.

Mengsel B, D en F hebben een hoge vullingsgraad. Deze zijn bepaald van boorkernen en er zijn alleen eisen aan de vullingsgraad gesteld voor Marshallkernen. Voor Marshallkernen geldt voor STAB met steenslag 6/22, verkeersklasse 4 een vullingsgraad tussen 50 % en 68 % (V/V).

Voor het verkrijgen van balkjes voor het vermoeiingsonderzoek zijn platen van lengte*breedte = $0,50*0,50 \text{ m}^2$ uit de constructie gezaagd. In eerste instantie werden asfaltplaten verkregen door, voor het aanbrengen van de te bemonsteren STAB, de onderliggende laag af te strooien met brekerzand of fijne split om de hechting aan de onderliggende laag tegen te gaan waardoor het niet nodig zou zijn om door de gehele constructie heen te zagen. Tijdens aanleg van de eerste wegvakken is op de afgestrooide plaatsen afschuiving van het asfalt geconstateerd. De resultaten van vergelijkend vermoeiingsonderzoek [10] tussen balkjes verkregen uit afgestrooide platen en balkjes uit niet afgestrooide platen, die volledig door de constructie heen waren gezaagd, gaven significante verschillen te zien, zodat besloten werd voor het verdere onderzoek alle platen toch door de gehele constructie heen te zagen en het afstrooien te laten vervallen.

4 Het vermoeiingsonderzoek

De vermoeiingsproeven zijn uitgevoerd op STAB-balkjes met nominale afmetingen van lengte*breedte*hoogte = $0,450*0,050*0,050 \text{ m}^3$. De balkjes zijn uit platen gezaagd, die afkomstig zijn uit de geselecteerde wegvakken.

De proeven zijn uitgevoerd op een hydraulische, dynamische Schenck-bank. De vierpuntsbuigopstelling is geplaatst in een klimaatkast. De aansturing van de vijzels is computergestuurd en de data zijn met een PC opgeslagen en zijn later verwerkt.

De proeven zijn verplaatsingsgestuurd uitgevoerd met een sinusvormig signaal met constante amplitude en een frequentie van 29,3 Hz. De amplitude van het verplaatsingssignaal wordt met behulp van een vormfactor omgerekend naar een rekamplitude. Per mengsel zijn proeven uitgevoerd bij drie temperaturen van 0, 10 en 20°C en bij drie zodanig gekozen rekamplituden, dat levensduren werden verwacht van $1*10^5$, $5*10^5$ en $1*10^6$ lastherhalingen. De proeven zijn in viervoud uitgevoerd, zodat per mengsel 36 proeven ($3*3*4$) zijn uitgevoerd.

Uit metingen van kracht en verplaatsing zijn onder andere het faseverschil tussen kracht en verplaatsing, de initiële dynamische stijfheidsmodulus en de gedissipeerde energie te bepalen.

Doordat er tijdens de proef vermoeiing optreedt, zal de dynamische stijfheidsmodulus afnemen. Daardoor zal de kracht, die nodig is om het proefstuk te buigen, tijdens de proef afnemen. Einde levensduur is gedefinieerd als het moment waarop de dynamische stijfheidsmodulus van het proefstuk is afgenomen tot de helft van de initiële waarde.

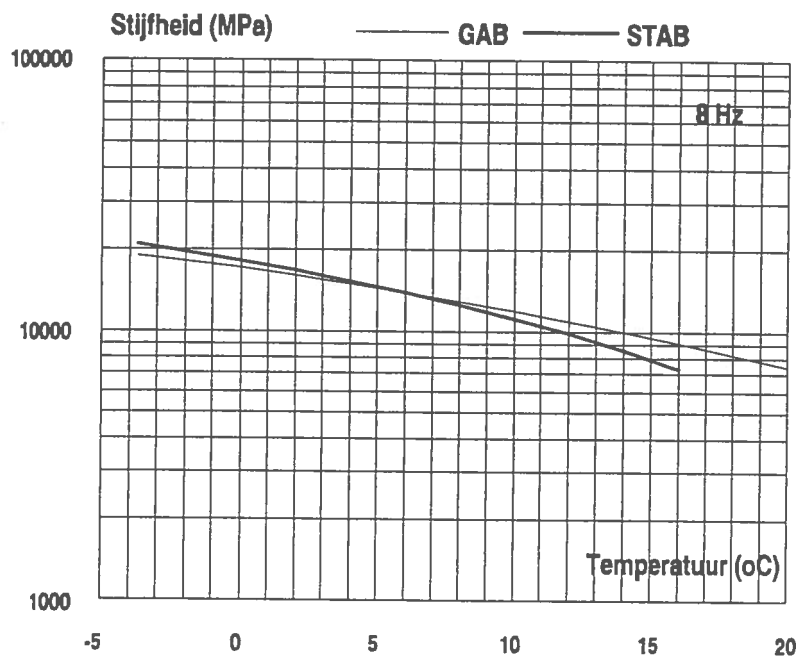
5. Stijfheidskarakteristiek en F-curves STAB en GAB

In figuur 1 wordt de gemiddelde stijfheidskarakteristiek van de vier goedgekeurde regeneratie STAB-mengsels weergegeven. In deze figuur is de dynamische stijfheidsmodulus (raaklijn methode) uitgezet als functie van de temperatuur. Deze figuur

geldt voor een frequentie van 8 Hz.

Omdat de stijfheidsmoduli zijn bepaald bij een frequentie van 29,3 Hz, zijn deze in figuur 1 horizontaal verschoven met behulp van het equivalentieprincipe tussen frequentie en temperatuur [11]. Volgens dit principe kan een verschil in frequentie met een temperatuurscorrectie worden verdisconteerd. In figuur 1 is ook de stijfheidskarakteristiek voor GAB (S78) [1] weergegeven.

Uit de figuur is af te lezen, dat de stijfheidskarakteristiek van STAB (raaklijnmethode) weinig afwijkt van die van GAB. De verschillen zijn niet significant gezien het beperkt aantal beschikbare mengsels en de aanzienlijke spreidingen in stijfheidswaarden.



Figuur 1 De dynamische stijfheidsmodulus (raaklijnmethode) tegen de temperatuur bij een frequentie van 8 Hz.

Het afgekeurde regeneratiemengsel B (teveel mortel: bitumen en vulstof) wijkt, wat dynamische stijfheidsmodulus betreft, slechts zeer weinig af van de hierboven aangegeven gemiddelde karakteristiek. Waarschijnlijk speelt hierbij een rol dat de bitumen/vulstof-verhouding ongeveer hetzelfde is als bij de goedgekeurde mengsels en daarmee de mortelstijfheid. Binnen bepaalde grenzen voor de hoeveelheid bitumen kan de verhouding bitumen/vulstof een belangrijke factor zijn voor de dynamische stijfheidsmodulus van STAB.

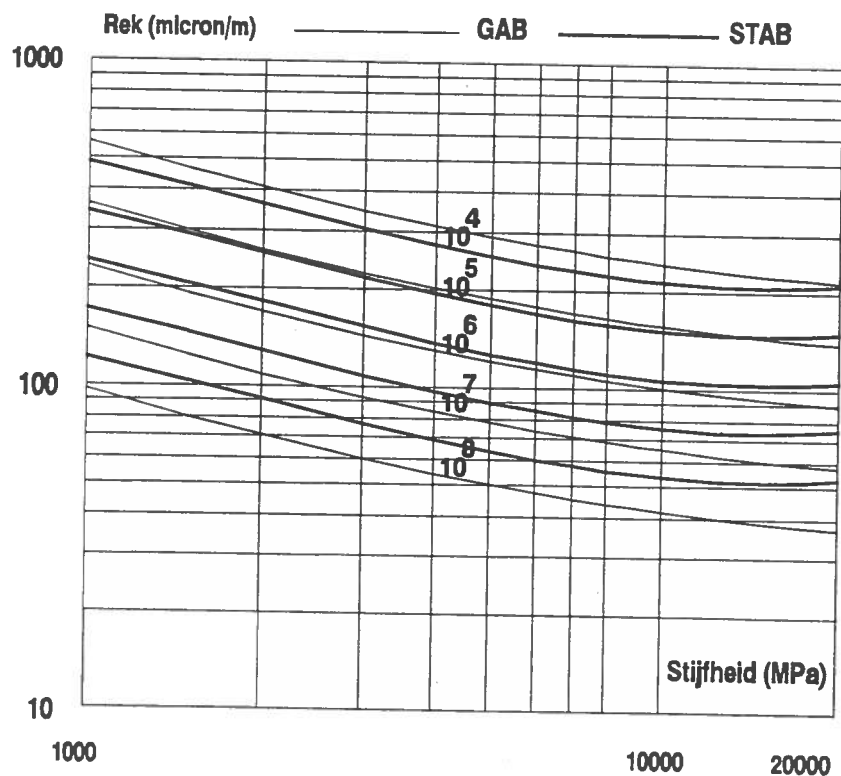
Mengsel G wijkt ook weinig af van de gemiddelde stijfheidskarakteristiek. Mengsel F heeft echter bij alle onderzochte temperaturen een aanzienlijk lagere stijfheid. Hier speelt de hoge verhouding bitumen/vulstof wellicht een rol.

Uit de vergelijking van de stijfheidsmodulus bepaald met de raaklijnmethode en de stijfheidsmodulus op het initiële punt ($S_{0, \text{raaklijn}}$ en $S_{0, \text{initieel punt}}$) is gebleken, dat bij 0 °C geldt dat $S_{0, \text{raaklijn}}$ en $S_{0, \text{initieel punt}}$ nagenoeg gelijk zijn en bij 20 °C is $S_{0, \text{initieel punt}}$ ongeveer 1,3 maal $S_{0, \text{raaklijn}}$. Dit wordt veroorzaakt doordat bij de initieel punt methode de dynamische stijfheidsmodulus in het begin van de proef wordt bepaald waarna een sterke

afname van de dynamische stijfheidsmodulus plaatsvindt. Bij de raaklijnmethode wordt de dynamische stijfheidsmodulus uit het traject na de sterke stijfheidsdaling in het begin van de proef bepaald.

In figuur 2 worden de gemiddelde vermoeiingskarakteristieken van de 4 goedgekeurde STAB-regeneratiemengsels weergegeven. Tevens is de vermoeiingskarakteristiek voor GAB (F78) weergegeven. De vermoeiingskarakteristieken van STAB liggen iets dichter bij elkaar dan die van GAB.

De F-curven van het afgekeurde regeneratiemengsel B liggen iets hoger. De F-curven van mengsel F liggen lager. Van mengsel G liggen de F-curven bij lage rekken lager dan die van GAB en bij hoge rekken vallen ze nagenoeg over elkaar heen.



Figuur 2 ϵ' tegen S_0 voor verschillende standaard levensduren.

Er vallen in de F-curven van STAB en GAB twee verschillen op:

1. de gevonden STAB-karakteristieken blijken bij stijfheidsmoduli boven ca. 10.000 MPa weer enigszins op te lopen, en
2. de F-curven van STAB liggen dichterbij elkaar dan de F-curven van GAB.

Het eerste wordt vaker gevonden bij analyse van vermoeiingsresultaten op basis van het energieconcept en kan als volgt worden verklaard.

Bij een dynamische stijfheidsmodulus van 1000 MPa reageert het materiaal sterk visco-elastisch. Bij een toenemende dynamische stijfheidsmodulus neemt het faseverschil af. Tot ongeveer 10.000 MPa zal de gedissipeerde energie per cyclus toenemen, doordat het effect van de toenemende stijfheid groter is dan het effect van het afnemende faseverschil.

In het stijfheidsgebied van 10.000 tot 20.000 MPa gaat het materiaal zich zodanig elastisch gedragen, dat het faseverschil sterker afneemt dan dat de stijfheid toeneemt en

er weer minder energie per cyclus wordt gedissipeerd.

Er wordt echter benadrukt dat het verloop van de F-curves moeilijk aan de meetdata te toetsen is, door de grote spreiding in de resultaten en door het beperkte gebied van stijfheidswaarden waarbinnen is gemeten (van 6.000 tot 25.000 MPa). Met name in het stijfheidsgebied van 1000 tot 6000 MPa moet het verloop van de F-curves beschouwd worden als een verre gaande extrapolatie op zuiver theoretische basis.

Het tweede - dat de F-curven voor STAB voor de diverse levensduren (10^4 t/m 10^8 lastherhalingen) dichter bij elkaar liggen dan de F-curven van GAB - kan betekenen dat de vermoeiingslevensduur van STAB meer gevoelig voor het rekniveau is in vergelijking met GAB. Opgemerkt kan worden dat het verschil tussen de krommen voor gangbare ontwerpwaarden van $N = 10^5$ en $N = 10^6$ klein is. De krommen vallen ongeveer over elkaar heen. Ten gevolge van de berekeningsmethode wordt dit verschil bij lagere, respectievelijk hogere levensduren "uitvergroot". Bij deze levensduren wordt echter niet gemeten. Aan de verschillen tussen de curven van STAB en GAB, voor $N = 10^4$ en $N = 10^7$ of hoger, dienen daarom geen praktische consequenties voor het ontwerpen van verhardingen te worden verbonden.

Bij de interpretatie van de geconstateerde verschillen (zoals het ten opzichte van GAB duidelijk slechtere gedrag van STAB, bereid met "verse" bouwstoffen, bij lage rekwaarden) dient rekening te worden gehouden met het feit dat de hier gepresenteerde resultaten slechts op een beperkt aantal mengsels berust en voor STAB met verse bouwstoffen slechts één goedgekeurd mengsel.

6 Conclusies

1. Het stijfheidsgedrag van STAB (zie figuur 1) verschilt niet significant van dat van GAB.
2. De vermoeiingskarakteristieken van STAB en GAB (zie figuur 2) - met name de vermoeiingskrommen voor $N = 10^5$ en $N = 10^6$ - verschillen niet zodanig, dat bij het ontwerpen van verhardingen een onderscheid voor de vermoeiingseigenschappen van deze mengseltypen noodzakelijk is. De Handleiding Wegenbouw-Ontwerp Verhardingen behoeft daarom voor STAB niet speciaal te worden aangepast.
3. STAB met "verse" bouwstoffen lijkt een iets lagere vermoeiingslevensduur te hebben dan GAB of STAB met regeneratie-asfalt.
4. Uit het samenstellingsonderzoek is gebleken, dat de asfaltmengsels relatief veel afwijken van het vooronderzoek.
5. Verder is uit een aantal verkennende proeven gebleken, dat voor het zagen van platen uit het wegdek ten behoeve van vermoeiingsonderzoek de onderliggende laag niet mag worden afgestrooid. Door het afstrooien kunnen significante verschillen in vermoeiingsresultaten optreden. Bij voorkeur moeten de platen door de gehele constructie worden gezaagd.

7 Literatuur

- [1] "Handleiding Wegenbouw-Ontwerp Verhardingen", 3^e editie, Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft, 1994.
- [2] F. Geysendorpher, P.C. Hopman, "Vermoeiingseigenschappen en dynamische stijfheidsmoduli van grindasfaltbeton 'Eisen 1978'", Wegen, oktober 1987.
- [3] P.C. Hopman, "Vermoeiingsonderzoek aan asfalt", Wegen, juli/augustus 1987
- [4] P.C. Hopman, R.C.J. van den Ban, "Asfalttechnologie en mengselontwerp", Stichting Centrum voor Regelgeving en Onderzoek in de Grond-, Water- en Wegenbouw en de Verkeerstechniek (CROW), Ede, 1990.
- [5] "Bepalen van F-curves van 7 STAB-mengsels en aanleveren invoerdata t.b.v. het CARE programma", IR-R-95248, Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft, 1995.
- [6] "Standaard uitvoering van de dynamische vierpuntsbuigproef ter bepaling van de vermoeiingseigenschappen van asfaltbeton", W-DWW-94530, Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft, 1995.
- [7] W. van Dijk, W. Visser, "The energy approach to fatigue for pavement design", AAPT, San Antonio, Texas, February 1977.
- [8] J.M.M. Molenaar, "Standaard uitvoering van de dynamische vierpuntsbuigproef", MAO-R-87060, Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft, 1987.
- [9] "Standaard RAW-Bepalingen", Stichting Centrum voor Regelgeving en Onderzoek in de Grond-, Water- en Wegenbouw en de Verkeerstechniek (CROW), Ede, 1990.
- [10] "Vergelijking vermoeiingseigenschappen van STAB-monsters van A76 bij Venlo", IR-R-95.222, Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft, 1995.
- [11] L. Francken, C. Clauwaert, "Characterization and Structural Assessment of Bound Material for Flexible Road Structures", Proc. 6th Int. Conf. Struct. Design of Asphalt Pavements, pp 130-144.