TER INZAGE

Scheurgroei-mechanismen

in dichtasfaltbeton

J.G. Schulte

Begeleiders: Dr. ir. J. Zuidema (TUD) Dr. R.L. Krans (DWW) Ir. F. Tolman (NPC)

Delft, juni 1996 Technische Universiteit Delft Faculteit der Scheikundige Technologie en der Materiaalkunde Vakgroep Toepassingen van materialen in constructies Sectie TMC-II Mechanisch gedrag van materialen Technische Universiteit Delft

Laboratorium voor Materiaalkun

TMC 2

VOORWOORD

Dit rapport is een afstudeerverslag geschreven in het kader van de opleiding tot materiaalkundig ingenieur aan de TU Delft. Het is geschreven in opdracht van de Dienst Wegen Waterbouwkunde, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat en maakt deel uit van inspanningsverplichting 2100.1681, project asfalt/TWAO.

Het rapport is bedoeld voor diegenen die geinteresseerd zijn in het mechanisch gedrag van asfalt, en dan in het bijzonder de optredende scheurgroeimechanismen. Bij dit rapport is er vanuit gegaan dat de lezers bekend zijn met de basisbegrippen uit de lineair-elastische breukmechanica.

Allereerst dank ik mijn begeleiders Jan Zuidema, Rutger Krans en Fedde Tolman en de sectie TMC-II voor alle hulp bij mijn onderzoek en de gezelligheid.

Mijn bijzondere dank gaat uit naar Jan Zuidema, Peter Ament en Carel ten Horn voor hun hulp bij de dataverwerking, naar Theo van Soest en Ton Riemslag voor hun hulp bij het uitvoeren van de experimenten en naar Alfons Krom voor het uitvoeren van de eindige elementenberekeningen.

Tenslotte wil ik mijn ouders en mijn vriendin Loretta bedanken voor alle morele steun en geduld tijdens mijn studie.

Den Haag, 30 mei 1996

Johan Schulte

INHOUDSOPGAVE

VOORWOORD	<i>i</i>
SAMENVATTING	v
SUMMARY	vii

7	INTEDING	1
1.	INLEIDINO	

2. PROEFSTUKFABRICAGE	3
2.1 Samenstelling micro-DAB	3
2.2 Samenstelling DAB-0/8	5
2.3 Fabricage asfaltplaten	6
2.4 Vervaardiging proefstukken en eindcontrole	6
2.5 Conclusie	12

3. MEETOPSTELLING EN MEETMETHODE	15
3.1 Meetopstelling	15
3.2 Visuele scheurlengtebepaling	15
3.3 Scheurlengtebepaling met camera	17
3.4 Bepaling scheurlengte uit compliantie	20
3.5 Conclusie	25

4. METHODES VOOR DATAVERWERKING	27
4.1 Vorm van de a-N curve	27
4.2 Mogelijke algoritmes voor dataverwerking	30
4.2.1 De incremental-da methode	30
4.2.2 De incremental-da improved methode ontwikkeld door Michael Janssen	32
4.2.3 De incremental-da methode ontwikkeld door Jan Zuidema	34
4.2.4 Evaluatie	37
4.3 Conclusie	37

5. INTERPRETATIE MEETRESULTATEN KLEEMANS ______39

6. MEETRESULTATEN	43
6.1 Scheurgroeimechanismen in micro-DAB	43
6.2 Verouderingsinvloed op scheurgroeigedrag micro-DAB	48
6.3 Meetresultaten DAB 0/8	49
6.4 Conclusies	53

7. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	55
7.1 Conclusies	55
7.2 Aanbevelingen	

LITERATUUR ______ 57

BIJLAGE 1: Afmetingen CCT-proefstuk micro-DAB en DAB-0/8	59
BIJLAGE 1ª: Zaagschema asfaltplaten micro-DAB en DAB-0/8	59 ^a
BIJLAGE 2: Gebruikte mesh voor eindige elementen berekeningen	61
BIJLAGE 3: Holle ruimte percentages in proefstukplaten	63
BIJLAGE 4: Overzicht gebruikte apparatuur en software	65
BIJLAGE 5: Proefstukfoto's	67
BIJLAGE 6: Schematisch overzicht uitgevoerde proeven en alle originele meetdata	71
BIJLAGE 7: Vergelijking compliantieverloop bij identieke proeven	107
BIJLAGE 8: Exacte werking algoritmes dataverwerking	109
BIJLAGE 9: Afzonderlijke Parisresultaten uitgevoerde proeven	111

¢

SAMENVATTING

Oppervlaktescheuren in het asfaltwegdek worden veroorzaakt door vermoeiingsbelasting ten gevolge van het rijdende verkeer. De kosten van reparatie van deze scheuren bedraagt op jaarbasis ongeveer 400 miljoen gulden. Er is daarom grote behoefte aan een test waarmee het scheurgroeigedrag van asfalt gekarakteriseerd kan worden. Doel van het onderzoek dat in dit verslag beschreven staat is het bepalen van de in asfalt optredende scheurgroeimechanismen afhankelijk van de belastingsomstandigheden en de samenstelling. Met behulp van deze gegevens kan er meer inzicht verkregen worden in de werkelijk optredende scheurgroeimechanismen in een wegdek onder praktijkomstandigheden. Tevens kan er bepaald worden in hoeverre extrapolaties van resultaten naar andere omstandigheden en samenstellingen toelaatbaar zijn. Bij dit onderzoek zijn vermoeiingscheurgroeiproeven en kruipscheurgroeiproeven uitgevoerd, welke ontwikkeld zijn vanuit de lineair-elastische breukmechanica. De onderzochte asfaltsoorten zijn micro-DAB en DAB-0/8, een toplaagasfalt dat wordt toegepast bij lichtbelaste stadswegen. Micro-DAB, ook wel zandasfalt genoemd, wordt niet gebruikt in de wegenbouw, maar is gekozen vanwege zijn zeer fijne structuur, waardoor de scheurlengte veel exacter bepaald kan worden dan in DAB-0/8

Uit de meetresultaten bepaald aan micro-DAB blijken de testomstandigheden een grote invloed te hebben op de optredende scheurgroeisnelheid en het scheurgroeimechanisme. Bij vermoeiingsproeven met positieve R-waardes (volledig in het trekgebied) is er alleen sprake van een kruipscheurgroeimechanisme. Bij negatieve R-waardes (deel van de belastingscurve in het druk gebied), blijkt er een combinatie op te treden van twee mechanismen, namelijk: kruipscheurgroei en vermoeiingsscheurgroei. Naarmate de R-waarde negatiever wordt, wordt het aandeel van de vermoeiingsscheurgroei steeds groter. Bij R = -0.5 is er sprake van een gelijk aandeel van beide scheurgroeimechanismen, terwijl bij R = -1 het aandeel van de vermoeiingsscheurgroei steed groter.

De meetresultaten bepaald aan DAB-0/8 laten zien dat ook in dit materiaal sprake is van een puur kruipscheurgroeimechanisme bij positieve R-waardes. Dit is een sterke aanwijzing dat het optredende scheurgroeimechanisme onafhankelijk is van de samenstelling. De optredende scheurgroeisnelheid blijkt wel sterk afhankelijk van de samenstelling. Onder gelijke testomstandigheden is de scheurgroeisnelheid in DAB-0/8 ongeveer vijf maal zo groot.

De belastingsomstandigheden in een wegdek zijn te beschouwen als een vermoeiingsbelasting met een R-waarde die ergens ligt tussen de 0 en de -1. Bij deze R-waardes blijkt er in micro-DAB sprake te zijn van een combinatie kruip- en vermoeiings-scheurgroei. De meetresultaten aan DAB-0/8 geven sterke aanwijzingen dat het optredende scheurgroeimechanisme onafhankelijk is van de samenstelling. Als dit inderdaad waar blijkt te zijn kan er aangenomen worden dat scheuren in een wegdek groeien door een combinatie van kruip- en vermoeiings-scheurgroei, onafhankelijk van de samenstelling.

SUMMARY

Surface cracking of an asphaltic overlay is caused by fatigue loading as a result of traffic. An amount of four hundred million guilders is needed every year to repare these cracks. Therefore, a test is required, capable of characterizing crack growth behaviour of asphalt. The main purpose of this research is to determine the crack growth mechanisms in asphalt, depending on loading conditions and mixture composition. The results of this research may help to get a clear insight into the crack growth mechanisms occuring in an asphaltic overlay under traffic loading. Furthermore, it is investigated whether extrapolations of test results to other circumstances and mixture compositions is acceptable.

In this research, a series of fatigue and creep tests based on lineair-elastic fracture mechanics have been carried out. The mixtures tested in this research are micro-DAC and DAC-0/8. Micro-DAC, also known as sand asphalt, is not used for road constructions. It is chosen for this research for its very fine structure, which makes crack growth monitoring easier. DAC-0/8 is an asphalt concrete which is used as a top layer for city roads (not heavily loaded).

The micro-DAC specimens reveal a great influence of testing circumstances on the crack growth rate and the crack growth mechanism. In fully tensile fatigue tests, i.e. positive R-values, the crack growth mechanism is pure creep crack growth. However, tensile-pressure fatigue tests, i.e. negative R-values, show a combination of creep and fatigue crack growth. The amount of fatigue crack growth increases with decreasing R-value. An R-value of -0.5 results in an equal combination of creep and fatigue crack growth. When the R-value decreases to -1, the fatigue crack growth mechanism becomes twice as important as the creep crack growth mechanism.

Tests performed on DAC-0/8 specimens show a pure creep crack growth mechanism at positive R-values. This result is an indication that the crack growth mechanism is independent of mixture composition. However, the crack growth rate is not independent of mixture composition: under equal circumstances, the crack growth rate in DAC-0/8 turned out to be five times the crack growth rate in micro-DAC.

The loading conditions in an asphaltic overlay caused by traffic can be considered fatigue loading with an R-value somewhere between 0 and -1. For micro-DAC, fatigue loading with these R-values gives a combination of creep and fatigue crack growth. Test results of DAC-0/8 specimens give an indication that crack growth mechanisms are independent of mixture composition. If indeed this the case, it can be concluded that surface cracks in an asphaltic overlay are caused by a combination of creep and fatigue crack growth.

. .

1. INLEIDING

Rijdend verkeer oefent een vermoeiingsbelasting uit op het wegdek. Bij asfaltwegen leidt deze vermoeiingsbelasting tot langsscheuren aan het oppervlak. Inspectie en reparatie van het wegdek is tijdrovend en duur. Er is daarom grote behoefte aan een test waarmee het scheurgroeigedrag van een bepaalde asfalt-samenstelling van tevoren te bepalen is. Met behulp van zo'n test is het mogelijk asfaltsoorten te rangschikken naar scheurgroei-gevoeligheid. Daarnaast biedt een beter inzicht in de scheurgroeigevoeligheid de mogelijkheid om de lengte van inspectie-intervallen te verhogen.

Het doel van dit verslag is het bepalen van de scheurgroeimechanismen die in een wegdek kunnen optreden, afhankelijk van de asfaltsamenstelling en de optredende belastingsomstandigheden. Ter beantwoording van deze vraag is een experimenteel breukmechanisch onderzoek uitgevoerd aan twee soorten asfalt. Er werden vermoeiingsscheurgroei- en kruipscheurgroeiproeven uitgevoerd aan standaard CCT-proefstukken, waarbij de frequentie en de (gemiddelde) belastinghoogte werden gevarieerd. Alle proeven werden uitgevoerd bij een temperatuur van 0°C.

De onderzochte asfaltsoorten zijn micro-DAB, ook wel zandasfalt genoemd, en DAB 0/8. Micro-DAB is geen asfalt dat in de wegenbouw wordt toegepast. Het is gekozen vanwege zijn, in vergelijking met andere asfaltsoorten, homogene structuur waardoor scheurgroei beter te beschrijven is met een breukmechanische parameter zoals de K-factor. DAB 0/8 is een asfalt dat bij lichtbelaste stadswegen vaak wordt gebruikt als deklaag. Het is gekozen om twee redenen. Ten eerste kan onderzocht worden of scheurgroeimechanismen die voorkomen in een 'theoretisch' mengsel als micro-DAB vergelijkbaar zijn met scheurgroeimechanismen in een praktijkmengsel. Ten tweede is DAB 0/8 een mengsel dat bij de gekozen proefstukafmetingen een aanvaardbare verhouding geeft tussen maximale korrelgrootte en proefstukdikte (korrelgrootte maximaal 20% van de proefstukdikte).

Om de hoofdvraag van dit rapport te beantwoorden wordt in hoofstuk 2 eerst dieper ingegaan op de proefstukfabricage. Deze fabricage dient uiterst zorgvuldig plaats te vinden om te zorgen dat er, voor zover mogelijk, identieke proefstukken verkregen worden. In hoofdstuk 3 worden de meetopstelling en de toegepaste methodes voor scheurlengte-bepaling besproken, welke grote invloed kunnen hebben op de nauwkeurigheid van de testresultaten. Hoofdstuk 4 behandelt de keuze van de voor asfalt meest geschikte rekenkundige methode voor het verwerken van de ruwe meetdata tot testresultaten. Hoofdstuk 5 bevat een bespreking van de proefresultaten van Carel Kleemans. Dit onderzoek is te beschouwen als een vervolg hierop. De resultaten van de uitgevoerde proeven worden beschreven in hoofdstuk 6. Conclusies over het scheurgroeigedrag en aanbevelingen voor verder onderzoek zijn opgenomen in hoofdstuk 7.

.

2. PROEFSTUKFABRICAGE

Dit hoofdstuk behandelt de vervaardiging van 30 micro-DAB en 30 DAB-0/8 CCTproefstukken. De proefstukfabricage vond plaats bij NPC te Hoevelaken (tegenwoordig gevestigd te Utrecht) in de periode juli-augustus 1995. Een uitgebreide beschrijving van de proefstukfabricage met alle details kunt u vinden in NPC-projectrapport 95200 (1996). Paragraaf 2.1 en 2.2 beschrijven de bepaling van de mengverhouding van de gebruikte grondstoffen om te komen tot de juiste samenstelling van respectievelijk micro-DAB en DAB-0/8. In paragraaf 2.3 wordt de fabricage van de asfaltplaten beschreven waaruit de CCTproefstukken gezaagd zijn. Het zagen van de proefstukken en de eindcontrole om te kijken of aan de van tevoren gestelde eisen voldaan is worden beschreven in paragraaf 2.4. Enkele conclusies ten aanzien van de proefstukfabricage worden gegeven in paragraaf 2.5.

2.1 Samenstelling micro-DAB

Voor de vervaardiging van het micro-DAB is uitgegaan van de volgende grondstoffen:

- Fries brekerzand
- rivierzand
- vulstof V40K (deze vulstof is uiteindelijk niet toegepast)
- vulstof Wigro
- bitumen 45/60

Zowel het Friese brekerzand als het rivierzand zijn van tevoren afgezeefd op een maximale korreldiameter van 2 mm, aangezien micro-DAB geen zand mag bevatten met een diameter groter dan 2 mm.

Er is getracht het micro-DAB dat was vervaardigd voor het afstudeeronderzoek van Carel Kleemans (afstudeerder op het asfalt/TWAO project in de periode 1993-1994, zie literatuurlijst) wat betreft de samenstelling zoveel mogelijk te benaderen (zie tabel 2.1). Deze samenstelling was door Kleemans gekozen omdat het de beste combinatie gaf van laag percentage holle ruimte (<5%) en een hoge splijt-treksterkte (zie ASTM C-496-90).

mineraal	percentage (%)
Fries brekerzand	75
rivierzand	5
vulstof Wigro	20
bitumen 45/60	8.5*

Tabel 2.1: Samenstelling micro-DAB van Carel Kleemans

(*gewichtspercentage t.o.v. 100% mineraal)

Aangezien de mineralen die gebruikt worden afkomstig zijn uit de natuur (steengroeves en rivierbeddingen) kunnen zij van partij tot partij licht verschillen in korrelopbouw en hoekigheid. Het maken van een identiek mengsel is dus nagenoeg onmogelijk. Er wordt in ieder geval geeist dat de proefstukken, analoog aan de proefstukken van Kleemans, een percentage holle ruimte bevatten dat lager is dan 5%, omdat het percentage holle ruimte een zeer grote invloed heeft op de scheurgroeigevoeligheid.

In eerste instantie werd uitgegaan van een mengsel met dezelfde samenstelling als het mengsel voor Kleemans, alleen werd wel gebruik gemaakt van een ander type vulstof (V40K in plaats van Wigro). Van dit mengsel werden vier Marshallproefstukken gemaakt. Dit zijn tabletvormige proefstukken die op een vast voorgeschreven wijze worden verdicht met behulp van stootbelastingen (zie ASTM D 1559-89 en D 3203-91). Het gemiddelde percentage holle ruimte in deze proefstukken bedroeg 10.8 ± 0.7 % in plaats van de maximaal toegestane 5%.

Op grond van dit resultaat werd besloten de mineraalverhouding te bepalen, die met de hier beschikbare partijen mineraal het laagst mogelijke percentage holle ruimte oplevert. Hiertoe werd gebruik gemaakt van de stampvolume-proef van Engelsman (zie standaard RAWbepalingen, 1990). Bij deze proef wordt van een aantal mineraalmengsels bepaald welk mengsel het kleinste volume heeft. Deze volumebepaling vindt plaats nadat het mengsel een vast aantal keren met een gewicht is aangestampt. In dit geval werd eerst de optimale verhouding Fries brekerzand/rivierzand bepaald, waarna met het beste mengsel de optimale verhouding zandmengsel/vulstof werd bepaald. Hieruit volgde de volgende optimale mengverhouding:

Fries brekerzand	:	76.5%
rivierzand	:	8.5%
vulstof V40K	:	15%

Met deze mineraalsamenstelling is een aantal asfaltmengsels gemaakt met een verschillend bitumenpercentage, maar geen van de mengsels had een holle ruimte percentage onder de 5%. Met deze grondstoffen bleek het onmogelijk om aan de eis van maximaal 5% holle ruimte te voldoen. Hierom werd besloten de vulstof V40K te vervangen door Wigro, welke ook was gebruikt in het mengsel van Kleemans. Na bepaling van het percentage holle ruimte van een aantal mengselsamenstellingen werd gekozen voor dezelfde mineraalsamenstelling als het mengsel van Kleemans, maar wel met een iets hoger percentage bitumen om aan het vereiste percentage holle ruimte te voldoen (zie tabel 2.2).

Tabel 2.2: Samenstelling micro-DAB

mineraal	percentage (%)
Fries brekerzand	75
rivierzand	5
vulstof Wigro	20
bitumen 45/60	9.5*

(*gewichtspercentage t.o.v. 100% mineraal)

Het percentage holle ruimte van dit mengsel bedroeg $4.6 \pm 0.1\%$. In paragraaf 2.4. worden de resultaten van de eindcontrole gegeven, waarbij bepaald is of het vereiste percentage holle ruimte daadwerkelijk gehaald is in de vervaardigde asfaltplaten.

2.2 Samenstelling DAB-0/8

Voor de vervaardiging van het DAB-0/8 is uitgegaan van de volgende grondstoffen:

- Ned. steenslag 4/8
- Ned. steenslag 2/6
- Schots brekerzand
- rivierzand
- vulstof V40K
- bitumen 80/100

Met behulp van zeefanalyses is van elk mineraal de korrelgrootte-verdeling bepaald. Hierna is de optimale verhouding tussen de verschillende mineraalaggregaten berekend zodat wordt voldaan aan de voorgeschreven samenstellingseisen zoals die zijn vastgelegd in de standaard RAW bepalingen (1990). In tabel 2.3 is de samenstelling gegeven die gebruikt is bij de produktie van de DAB-0/8 asfaltplaten Er is gekozen voor een asfalt met zandtype B, wat inhoudt dat het brekerzand en het rivierzand gemengd worden in een massaverhouding van 3 op 1. Dit zandtype geeft het asfaltmengsel een hoge stabiliteit, maar maakt het iets moeilijker verdichtbaar in vergelijking met een asfaltmengsel dat alleen rivierzand bevat.

mineraal	percentage (%)
Ned, steenslag 4/8	31.3
Ned, steenslag 2/6	22,4
Schots brekerzand	29.6
rivierzand	9.9
vulstof V40K	6.8
bitumen 80/100	7*

Tabel 2.3: Samenstelling DAB-0/8

(*gewichtspercentage t.o.v. 100% mineraal)

Van dit mengsel zijn Marshalltabletten geslagen om het percentage holle ruimte in dit mengsel te bepalen. Het gemiddelde percentage holle ruimte (van 4 Marshall-tabletten) bedroeg $3.7 \pm 0.1\%$. Door D.W.W. (opdrachtgever proefstukfabricage) is geëist dat het percentage holle ruimte niet hoger is dan 4%. Aan deze eis is dus voldaan. In paragraaf 2.4. worden de resultaten van de eindcontrole gegeven, waarbij bepaald is of het vereiste percentage holle ruimte daadwerkelijk gehaald is in de vervaardigde asfaltplaten.

2.3 Fabricage asfaltplaten

micro-DAB

Per keer werden twee platen micro-DAB gemaakt met een afmeting van $70 \times 61 \times 6$ cm. De benodigde grondstoffen voor het vervaardigen van deze platen werden verhit in ovens tot een temperatuur van 150-160°C. Hierna werden de grondstoffen goed gemengd waarbij het mengsel op oventemperatuur gehouden werd. Na menging werd het mengsel gestort in een mal van staalprofielen welke zich op een betonnen vloer bevond.

De eerste verdichting van het mengsel vond plaats bij een temperatuur tussen de 140°C en 150° C met een trilplaat, totdat een zodanige verdichting was bereikt dat bijna al het asfalt zich onder de bovenrand van de mal bevond (≈ 90% verdichting). Hierna werd met behulp van een handwals het mengsel verder verdicht. De trilplaat is in de lengte- en de breedte richting over het asfalt bewogen. De handwals is voornamelijk in de lengterichting over het asfalt gerold.

Na een rustperiode van een half uur , waarbij het asfalt afkoelde en een zekere mate van stabiliteit verkreeg, werd het mengsel nogmaals verdicht met behulp van een trilplaat. Tenslotte werd de asfaltplaat afgewalst met de handwals

DAB-0/8

De gevolgde procedure voor het maken van de platen is identiek aan die voor het micro-DAB, behalve het verdichten. Omdat het DAB-0/8 door de grovere structuur al redelijk stabiel was bij de eerste verdichting, was het niet nodig om na afkoeling de trilplaat opnieuw te gebruiken. Alleen afwalsen met de handwals was voldoende.

2.4 Vervaardiging proefstukken en eindcontrole

Uit elke asfaltplaat werden 2 CCT-proefstukken en 2 FPB-proefstukken gezaagd en 3 boorkernen geboord. De CCT-proefstukken zijn de proefstukken die zijn gebruikt voor dit onderzoek. Door een fout in het zaagschema zijn de DAB-0/8 CCT-proefstukken op een lengte van 340 mm gezaagd in plaats van de gewenste lengte van 390 mm (zie bijlage 1). De micro-DAB proefstukken zijn wel op de juiste lengte gezaagd (afmetingen CCT-proefstukken, zie bijlage 1^{a}).

Allereerst is gecontroleerd of de te kort uitgevallen DAB-0/8 proefstukken nog voldoen aan de lengte-breedte verhouding die door de ASTM gesteld wordt aan CCT-proefstukken die gebruikt worden voor het meten van vermoeiings-scheurgroei snelheden (zie ASTM E647-93) Deze lengte-breedte verhouding is materiaalonafhankelijk. De ASTM schrijft verschillende verhoudingen voor, afhankelijk van de soort inklemming. Bij dit onderzoek worden de asfaltproefstukken over de gehele breedte ingelijnd in metalen bekken (zie Kleemans, 1994). Deze methode van 'inklemming' staat niet vermeld in de ASTM-norm. Wel vermelt de ASTMnorm afmetingseisen voor een inklemming van het proefstuk over de gehele breedte, zonder het gebruikt van bouten door het proefstuk heen. Deze inklemming is vergelijkbaar met de inlijming zoals deze in dit onderzoek wordt toegepast. Voor deze manier van inklemmen schrijft de ASTM voor dat het CCT-proefstuk een lengte tussen de inklemmingen moet hebben, die minimaal gelijk is aan 1.2 maal de breedte van het proefstuk. De breedte van het CCT-proefstuk bedraagt 230 mm, dus de lengte tussen de inklemmingen moet minimaal 276 mm bedragen. De DAB-0/8 proefstukken hebben een lengte van 300 mm tussen de inlijmbekken en voldoen dus aan de ASTM-norm (de inlijmdiepte in de bek bedraagt aan beide kanten 20 mm, waardoor van de totale lengte van 340 mm tussen de bekken 300 mm overblijft).

Alhoewel het proefstuk voldoet aan de ASTM-afmetingsnorm, wil dit nog niet zeggen dat het lengteverschil van 50 mm geen invloed zal hebben op de uiteindelijke vermoeiingsresultaten. Voor de heersende K_I aan de scheurtip van een centraal gescheurd proefstuk geldt:

$$K_{1} = C\sigma\sqrt{\pi a}$$
(2.1)

waarin σ = de spanning;

a = de scheurlengte (enkelzijdig);

C = de geometriefactor die corrigeert voor de eindige afmetingen van het proefstuk.

Voor een centraal gescheurd proefstuk geeft Ewalds and Wanhill (1989) drie mogelijke formules voor het berekenen van de geometriefactor:

$$C = 1 + 0.256 \cdot \left(\frac{a}{W}\right) - 1.152 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 12.200 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^3$$
(2.2)

$$C = \sqrt{\sec\left(\frac{\pi a}{W}\right)}$$
 (Feddersen) (2.3)

$$C = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{2a}{W}\right)^2}} \quad (Dixon) \tag{2.4}$$

waarin W = de proefstukbreedte;a = de scheurlengte (enkelzijdig).

Deze geometrische formules worden ook algemeen toegepast ter berekening van de geometriefactor van een plaat waarbij er twee scheuren zijn gegroeid vanuit een centraal gat, zoals het geval is bij de in dit onderzoek gebruikte CCT-proefstukken. Theoretisch is dit onjuist, omdat het centrale gat zeer zeker invloed zal hebben op de K-waarde die aan de scheurtip heerst In Murakami (1987, blz.291 e.v.) is een geometrieformule gegeven die wel rekening houdt met de invloed van het centrale gat in het CCT-proefstuk. Deze formule is erg gecompliceerd en is bepaald met behulp van een eindige-elementen methode. Ook deze formule houdt, evenals formules 2.2 t/m 2.4 geen rekening met de proefstuklengte.

Omdat er in de literatuur geen gegevens beschikbaar waren over de invloed van de proefstuklengte op de geometriefactor van een CCT-proefstuk met een centraal gat, werd besloten tot het uitvoeren van eindige-elementen berekeningen aan deze geometrie met het eindige-elementen programma MARC. Met behulp van dit programma werd de geometriefactor berekend voor een scheur van 26 mm bij twee proefstuklengtes, te weten: 340 en 390 mm. De gebruikte mesh is weergegeven in bijlage 2. Wegens de symmetrie van het proefstuk konden de berekeningen worden uitgevoerd aan 1/4 deel van het proefstuk (gekozen is voor de rechterbovenhoek). De uitgespaarde kwart cirkel linksonder in de mesh is het centrale gat van waaruit de scheur groeit. De scheurtip bevindt zich in het midden van het halve 'spinneweb' linksonder. Deze spinnewebvorm wordt in de eindige elementen berekeningen gebruikt voor de modellering van discontinuiteiten zoals een scheurtip. Omdat de waarde van de geometriefactor berekend voor drie verschillende situaties (zie tabel 2.4). In tabel 2.4 zijn alle berekende waardes voor de geometriefactor van het CCT-proefstuk gegeven bij een scheurlengte van 26 mm.

bepalingswijze	C	fout (%)	bijzonderheden	
polynoom (form. 2.2)	1.032	(≈ 0.5%)*	houdt geen rekening met proefstuklengte	
Feddersen (form. 2.3)	1.033	(0.3-1.0%)*	houdt geen rekening met proefstuklengte	
Dixon (form. 2.4)	1.027	(?)*	houdt geen rekening met proefstuklengte	
Murakami	1.07	≈ 5%	houdt geen rekening met proefstuklengte	
MARC (340 mm.)	1.067	< 0.5%	opgelegde verplaatsing	
MARC (340 mm.)	1.086	< 0.5%	opg. verpl.+ dwarsverhindering bij inlijming	
MARC (340 mm.)	1.084	< 0.5%	opgelegde spanning	
MARC (390 mm.)	1.067	< 0.5%	opgelegde verplaatsing	
MARC (390 mm.)	1.083	< 0.5%	opg. verpl.+ dwarsverhindering bij inlijming	
MARC (390 mm.)	1.074	< 0.5%	opgelegde spanning	

Tabel 2.4 Waarden van de geometriefactor C bij a = 26 mm.

*(de gegeven fout geldt alleen bij toepassing van de geometrieformule op een centraal gescheurd proefstuk in het geval van opgelegde spanning. Wanneer deze formules worden gebruikt op CCT-proefstukken met twee scheuren vanuit een centraal gat zal de fout minimaal 4% bedragen. Dit is af te leiden uit de waarde van de geometriefactor berekend met MARC in het geval van opgelegde spanning)

Als we de berekende geometriefactoren door MARC bij de twee proefstuklengtes vergelijken, dan blijkt het verschil bij deze scheurlengte ongeveer 1% te bedragen bij een aan het proefstuk opgelegde spanning ((1.084-1.074)/ $1.084\times100\%$). Aangezien we bij dit onderzoek krachtgestuurde proeven uitvoeren kan dit dus resulteren in een fout van 1% in de berekende K-factor (formule 2.1).

Bij het berekenen van de K_I-waardes uit de meetresultaten van de uitgevoerde proeven is de geometriefactor echter berekend met behulp van het polynoom (formule 2.2). Het beschikbare data-verwerkingsprogramma maakte hiervan gebruik. Zoals al werd opgemerkt is het algemeen aanvaard dat formules 2.2 t/m 2.4 ook worden toegepast voor CCT-proefstukken met een centraal gat. Gezien de precisie van de berekeningen met behulp van MARC kan geconcludeerd worden dat de fout die bij een scheurlengte van 26 mm door deze formules gemaakt wordt minimaal 4% bedraagt. Ook de berekende K-factor heeft dus een fout van minimaal 4%. De fout die gemaakt wordt door het berekenen van de geometriefactor met behulp van formule 2.2 is dus minimaal 4× zo groot als het verschil in de berekende K-factor voor de twee proefstuklengtes. Tevens zal bij grotere scheurlengtes deze fout steeds groter worden, maar dit geldt ook voor de fout ten gevolge van het lengteverschil.

Op basis van de resultaten van MARC kan gesteld worden dat de fout in de geometriefactor door het verschil in proefstuklengte klein is ten opzichte van de fout die gemaakt wordt bij de berekening van de geometriefactor met behulp van formule 2.2.

Ter bevestiging van dit theoretische resultaat zijn er twee identieke constante- ΔK proeven uitgevoerd aan zandasfalt (zie figuur 2.1), waarbij 1 proefstuk was ingekort tot 340 mm en de ander de oorspronkelijke lengte had van 390 mm. Voor deze soort proef is gekozen om twee redenen:

- Bij een constante ΔK -proef heerst tijdens de gehele test een constante scheurgroeisnelheid per wisseling. Hierdoor is het mogelijk om zeer exact de scheurgroeisnelheid te bepalen voor een bepaalde ΔK . Als de proefstuklengte invloed heeft op de ΔK zal dit te merken zijn aan een verschil in scheurgroeisnelheid.
- Door Kleemans (1994) is een identieke test uitgevoerd. Bij vergelijking van de proefresultaten is de scheurgroeiweerstand van het geproduceerde micro-DAB te vergelijken met het micro-DAB dat was gemaakt voor Kleemans.



Figuur 2.1 Scheurgroeisnelheid in micro-DAB bij verschillende proefstuklengtes

Uit de testresultaten weergegeven in figuur 2.1 blijkt dat de scheurgroeisnelheid in het korte proefstuk 25% hoger was dan de scheurgroeisnelheid in het lange proefstuk. Dit is een aanzienlijk verschil te noemen. De vraag is of dit verschil in scheurgroeisnelheid veroorzaakt kan zijn door het verschil in proefstuklengte.

Uit tabel 2.4 volgt uit de resultaten van MARC dat de geometriefactor bij een scheur van 26 mm ongeveer 1% hoger is voor het korte proefstuk, wanneer uitgegaan wordt van een situatie van opgelegde spanning, zoals bij deze proeven het geval is. Hierdoor zal de werkelijke K_{I} -waarde die aan de scheurtip heerst in het korte proefstuk ongeveer 1% hoger zijn dan die in het lange proefstuk, wanneer op beide proefstukken een even grote spanning wordt aangebracht (zie formule 2.1).

Dit is bij de proeven in figuur 2.1 het geval omdat voor de berekening van de geometriefactor gebruik is gemaakt van formule 2.2, die geen rekening houdt met het lengte-effect, en voor beide proeven dezelfde waarde heeft over het hele scheurgroeitraject. Afgezien hiervan schat formule 2.2 de geometriefactor in beide gevallen minimaal 4% te laag in (zie uitleg pagina 7).

Het is twijfelachtig of het lengte-effect, wat een verschil in K_I geeft van 1% het relatief grote verschil in scheurgroeisnelheid heeft veroorzaakt. Uit proefresultaten van vermoeiingsproeven aan micro-DAB zijn de coëfficiënten van de Parisvergelijking bepaald. Deze heeft de volgende algemene vorm:

$$da / dN = A \cdot (\Delta K)^{n}$$
(2.5)

waarin A = Parisconstanten = Parisexponent

Voor micro-DAB bedraagt de waarde van de Parisexponent ongeveer 4 (zie figuur 6.1). Gebruiken we de resultaten van MARC uit tabel 2.4 om de werkelijke ΔK te berekenen die bij de proeven geheerst heeft bij een scheurlengte van 26 mm, dan komen we tot een ΔK van 0.346 MPa \sqrt{m} voor het korte proefstuk en een ΔK van 0.343 MPa \sqrt{m} voor het lange proefstuk. Invullen van deze waardes in formule 2.5 laat zien dat het verschil van 1% bij deze waardes van ΔK leidt tot een verschil van 3.5% in da/dN. Het lijkt dus onwaarschijnlijk dat het verschil van 25% in de scheurgroeisnelheid veroorzaakt is door het verschil in lengte.

Een mogelijk verklaring van het grote verschil in scheurgroeisnelheid is het flinke verschil in percentage holle ruimte in de twee proefstukken. Bij de eindcontrole (zie volgende pagina) bleek dat het percentage holle ruimte in het korte proefstuk (code C-339-II) bijna3 % bedroeg, terwijl het lange proefstuk (code C-346-II) nog geen 2% holle ruimte bevatte (zie tabel 2.5). Dat zo'n verschil in percentage holle ruimte kan leiden tot een verschil in scheurgroeisnelheid van enkele tientallen procenten bleek ook uit de uitgevoerde kruipproeven bij constante K. Net zoals bij de constante Δ K-vermoeiingsproeven leidt een constante K-kruipproef tot een constante scheurgroeisnelheid, in dit geval per tijdseenheid, over het gehele scheurgroeitraject. In figuur 2.2 zijn twee koppels kruipscheurgroeiproeven bij konstante K weergegeven.



Figuur 2.2 Scheurgroeisnelheid in micro-DAB bij verschillende K en % holle ruimte

Aangezien er bij beide koppels sprake was van identiek uitgevoerde proeven, zou je een gelijke scheurgroeisnelheid verwachten bij dezelfde K-waarde. Dit blijkt echter niet het geval te zijn. Het enige verschil was het percentage holle ruimte in de proefstukken (zie tabel 2.5).

proefstuk	proef	% holle ruimte	da/dt (µm/sec)	da/dN (µm/cycle)
C-339-II	const ∆K=0.33 MPa√m	2.90	n.v.t.	0.1
C-346-II	const ∆K=0.33 MPa√m	1.97	n.v.t.	0.08
C-338-II	const K=0.4 MPa√m	3.30	10.3	n.v.t.
C-339-I	const K=0.4 MPa√m	2.90	6.1	n.v.t.
C-340-II	const K=0.5 MPa√m	3.37	34.0	n.v.t.
C-343-I	const K=0.5 MPa√m	2.63	29.8	n.v.t.

Tabel 2.5 Vergelijking scheurgroeisnelheden bij verschillend percentage holle ruimte

Uit bovenstaande tabel is duidelijk te zien dat voor beide koppels constante-K kruipproeven een verlaging van het percentage holle ruimte met enkele tienden van procenten een verlaging van de scheurgroeisnelheid geeft van tientallen procenten. Hieruit blijkt dat dit 'holle ruimte' effect inderdaad een verklaring kan zijn voor het verschil in scheurgroeisnelheid tussen de twee constante ΔK -vermoeiingsproeven aan proefstukken met verschillende lengtes.

Het percentage holle ruimte heeft duidelijk een enorme invloed op de sterkte van het micro-DAB.

Eindcontrole

Om de scheurgroeiweerstand van het 'nieuw' vervaardigde micro-DAB te vergelijken met het 'oude' micro-DAB dat was gemaakt voor Kleemans kunnen we gebruik maken van de resultaten van de constante Δ K-proef (aan het lange proefstuk) weergegeven in figuur 2.1. Door Kleemans is namelijk een identieke proef uitgevoerd (Kleemans et. al., 1995). Op het tijdstip van beproeveing was de leeftijd van beide proefstukken nagenoeg gelijk (3 tot 5 maanden).

De optredende scheurgroeisnelheden bij $\Delta K = 0.33$ MPa \sqrt{m} blijken redelijk dicht bij elkaar te liggen. De scheurgroeisnelheid in het 'oude' micro-DAB bedroeg 0.07 µm/cycle, terwijl het 'nieuwe' micro-DAB scheurde met 0.08 µm/cycle. Dit verschil in sterkte lijkt ook bevestigd te worden door de waarde van de K_{Ic}-factor. De gemiddelde K_{Ic}-waarde van het 'oude' micro-DAB bedroeg 1.0 ± 0.1 MPa \sqrt{m} , terwijl de gemiddelde K_{Ic}-waarde van het 'nieuwe' micro-DAB 0.8 ± 0.1 MPa \sqrt{m} bedroeg. Dit is frappant, gezien het feit dat er meestal vanuit wordt gegaan dat de scheurgroeisnelheid onder vermoeiingsomstandigheden niet voorspelbaar is uit de K_{Ic}-waarde.

Het verschil in scheurgroeisnelheid is, gezien de verschillen in de samenstelling, vreemd te noemen. Ten eerste bevatte het 'oude' micro-DAB minder bitumen (8.5% in plaats van de 9.5% in het nieuwe micro-DAB), en ten tweede was het percentage holle ruimte veel hoger $(3.9 \pm 0.2\%)$ in plaats van de $1.97 \pm 0.06\%$ in het nieuwe micro-DAB).

Beide verschillen zouden moeten leiden tot een hogere scheurgroeisnelheid in het 'oude' micro-DAB. Het is onduidelijk waarom dit niet het geval is. Er zijn wel kleine verschillen in de zandsamenstellling, maar het is niet bekend of deze verschillen zo'n grote invloed kunnen hebben op de sterkte dat de invloed van het bitumengehalte en het percentage holle ruimte teniet gedaan worden.

Wel was er sprake van een verschil in bitumeneigenschappen. In beide gevallen is een 45/60 bitumen toegepast. De waarde van de penetratie moet zich dus bevinden tussen de 45 en de 60 mm (voor uitleg, zie van Gurp, 1987). Naarmate het penetratiegetal lager is, is het bitumen harder. Het bitumen toegepast in het 'nieuwe' micro-DAB had een penetratie van 45, terwijl het bitumen dat was gebruikt voor het oude micro-DAB een penetratie had van 53, en dus een stuk zachter was. Mogelijk heeft dit een grote invloed op de gevoeligheid voor vermoeiingsscheurgroei.

In bijlage 3 zijn voor alle proefstukken de holle ruimte percentages gegeven. Deze waarden zijn bepaald aan de drie boorkernen die uit elke plaat geboord zijn (zie begin van deze paragraaf). Van elk van deze boorkernen is het percentage holle ruimte bepaald door weging van de boorkern boven en onder water. Deze weegprocedure ter bepaling van het percentage holle ruimte staat beschreven in ASTM D 1559 (1989). Op basis van deze bepaling is een gemiddeld percentage holle ruimte berekend voor elke asfaltplaat, door middeling van de drie berekende waardes. Van deze waarde wordt aangenomen dat hij een goede maat is voor het percentage holle ruimte dat aanwezig is in de twee CCT-proefstukken die uit dezelfde plaat gezaagd zijn. Uit bijlage 3 blijkt dat alle asfaltplaten, zowel het micro-DAB als het DAB-0/8 voldoen aan de eisen die gesteld waren ten aanzien van het percentage holle ruimte.

Voor het micro-DAB was een maximaal percentage holle ruimte geeist van 5%. Uit het Marshall-vooronderzoek bleek het gekozen mengsel $4.6 \pm 0.1\%$ holle ruimte te bevatten (zie bladzijde 4). De van dit mengsel gemaakte asfaltplaten hadden een gemiddeld percentage holle ruimte van $3.22 \pm 0.38\%$ (gemiddelde bepaald uit alle boorkernen). Het DAB-0/8 mocht niet meer dan 4% holle ruimte bevatten. Het Marshall-vooronderzoek aan het gebruikt mengsel leverde een percentage holle ruimte op van $3.7 \pm 0.1\%$. De gemaakte asfaltplaten hadden een gemiddeld percentage holle ruimte van $2.97 \pm 0.58\%$. Bij de plaatfabricage wordt duidelijk een aanzienlijk hogere verdichting verkregen dan bij de fabricage van de Marshall-proefstukken.

2.5 Conclusie

Alle gefabriceerde DAB-0/8 platen voldeden aan de vooraf gestelde eis van maximaal 4% holle ruimte. Helaas zijn de CCT-proefstukken door een verkeerd zaagschema 50 mm te kort uitgevallen. Na bestudering van de ASTM-normen bleek dat ze nog wel aan de afmetingseisen voldeden. Uit de uitgevoerde eindige-elementen berekeningen bleek dat het verschil in hoogte een kleine invloed had op de waarde van de geometriefactor ($\approx 1\%$). De gebruikte formule (2.2) ter bepaling van de geometriefactor gaf een fout die een stuk groter was (minimaal 4%). In vergelijking met de fout die gemaakt wordt door deze formule is de invloed van het verschil in proefstuklengte verwaarloosbaar klein. De uitgevoerde constante Δ K-proeven ter bepaling van de proefstuklengte gaven een verschil te zien van 25% in scheurgroeisnelheid. Dit verschil was te groot om veroorzaakt te zijn door het lengteverschil. Na vergelijking van de resultaten met resultaten van constante-K kruipproeven werd duidelijk dat het grote verschil in scheurgroeisnelheid waarschijnlijk veroorzaakt was door een verschil in percentage holle ruimte.

Op basis van bovenstaande resultaten is aangenomen dat de invloed van de proefstuklengte verwaarloosbaar klein is ten opzichte van fouten die geintroduceerd worden bij de berekening van de geometriefactor en de grote verschillen in proefstuklevensduur die veroorzaakt worden door relatief kleine verschillen in percentage holle ruimte.

De fabricage van de micro-DAB platen verliep iets moeizamer. Geprobeerd werd om het micro-DAB dat gefabriceerd was voor Kleemans exact na te maken, met als minimum eis dat het in ieder geval minder dan 5% holle ruimte zou bevatten.

In eerste instantie werd echter uitgegaan van een andere vulstof waarmee het uiteindelijk niet mogelijk bleek om onder de 5% holle ruimte te komen. Tevens was het Friese brekerzand iets anders van samenstelling. Dit was niet te voorkomen aangezien we hier te maken hebben met een natuurlijk materiaal dat geen constante samenstelling heeft. Na weer over te zijn gegaan op de vulstof die ook bij de platen voor Kleemans was gebruikt, bleek het wel mogelijk een mengsel te maken dat minder dan 5% holle ruimte bevatte. Na het testen van een aantal mengsels werd gekozen voor een mengsel met dezelfde mineraalsamenstelling als het mengsel voor Kleemans, maar met een iets hoger bitumenpercentage. Bij de eindcontrole bleken alle platen minder dan 5% holle ruimte te bevatten

Bij vergelijking van de vermoeiingssterkte van het 'oude' micro-DAB voor Kleemans en het 'nieuwe' micro-DAB bleek dat er een klein verschil in sterkte aanwezig was. Het 'oude' micro-DAB was iets sterker (een lagere Parisconstante A) terwijl op basis van de verschillen in samenstelling verwacht was dat het nieuwe bitumen sterker was. Verassend was het feit dat dit 'verschil in vermoeiingssterkte ook tot uiting kwam in een verschil in K_{Ic}-waarde. Het verschil in sterkte is niet verklaarbaar. Mogelijke oorzaak is het verschil in de korrelopbouw van het Friese brekerzand, of het verschil in hardheid tussen de twee bitumina. Deze mogelijkheden zijn echter niet sterk te onderbouwen.

3. MEETOPSTELLING EN MEETMETHODE

Dit hoofdstuk behandelt de meetopstelling en de methodes voor bepaling van de scheurlengte die bij dit onderzoek zijn toegepast. De meetopstelling wordt beschreven in paragraaf 3.1. Er zijn twee methodes toegepast ter bepaling van de scheurlengte, namelijk: visueel, welke methode wordt behandeld in paragraaf 3.2, en met behulp van een beeld-digitaliseringscamera, beschreven in paragraaf 3.3. Paragraaf 3.4 behandelt een indirekte methode van scheurlengtebepaling waarvan de bruikbaarheid onderzocht is, maar die niet daadwerkelijk is toegepast voor bepaling van de scheurlengte. Bij deze methode wordt aangenomen dat er een eenduidige relatie bestaat tussen de scheurlengte en de compliantie, en dat uit de waarde van de compliantie de scheurlengte te bepalen is. Conclusies zijn opgenomen in paragraaf 3.5.

3.1 Meetopstelling

Voor het uitvoeren van de proeven is gebruik gemaakt van een Instron vermoeiingsmachine, type 1251/8502/s (zie bijlage 4). Het proefstuk bevond zich tijdens de proef in een klimaatkast waarvan de temperatuur constant gehouden werd op 0°C. De koeling vond plaats met stikstofgas (Kleemans, 1994). Bij een aantal proeven is de vermoeiingsmachine aangestuurd met behulp van een computer. Hierbij werd gebruik gemaakt van het softwareprogramma Advanced Fatigue Crack Propagation afkomstig van Instron.

Scheurlengtemeting

Voor het visueel meten van de scheur was geen speciale apparatuur benodigd. Voor het meten van de scheur werd een lijnenraster aangebracht op het gedeeltelijk wit gespoten proefstuk. In de klimaatkast was een spiegelconstructie aanwezig waarmee de scheur ook aan de achterkant van het proefstuk te volgen was (Kleemans, 1994).

Bij de automatische scheurlengtemetingen werd gebruik gemaakt van een HCS type MX-5 beelddigitalisatie-camera (zie bijlage 4). De camera was voorzien van een vast objectief, en was op een afstand van twee meter recht voor het proefstuk opgesteld. Bij deze afstand was het mogelijk om de gehele proefstukbreedte in één keer in beeld te krijgen. Aangezien de camera de scheur meet uit het contrastverschil van scheur (zwart) en oppervlak (wit) moet het contrastverschil zo groot mogelijk zijn. Om dit te bereiken werd het proefstuk wit gespoten en van twee zijden belicht met TL-lampen. De beelden van de camera werden gedigitaliseerd met een speciaal stuk hardware, de zogenaamde 'frame grabber'. De beelden en de meetdata werden met behulp van een computer opgeslagen.

3.2 Visuele scheurlengtebepaling

In het begin van het onderzoek is de scheurlengte alleen visueel bepaald. De werkwijze was als volgt:

- Het proefstuk werd aan beide zijden wit gespoten in het gebied waar de scheur zal gaan lopen.
- In deze witte vlakken werd met behulp van een liniaal een raster opgetekend met lijnen om de vijf millimeter, op basis waarvan de lengte van de scheur kan worden afgelezen.

 Door middel van een spiegelconstructie is het mogelijk de scheur aan beide zijden van het proefstuk te meten. Per meting worden dus vier scheurlengtes bepaald (zie Kleemans, 1994).

De afleesnauwkeurigheid die met deze methode behaald wordt is afhankelijk van de afstand tussen twee rasterlijnen (≈ 5 mm; deze afstand beinvloedt het maximale onderscheidingsvermogen van het oog) en de precisie waarmee dit raster is aangebracht. Voor beiden geldt een fout van ongeveer 0.5 mm, wat resulteert in een afleesnauwkeurigheid van ongeveer 0.7 mm. (wortel van de kwadratische som van de afzonderlijke fouten).

Visuele scheurlengtebepaling heeft een aantal nadelen:

- Het maakt de meting zeer arbeidsintensief, omdat veel aanwezigheid vereist is.
- Zelfs bij constante aanwezigheid levert deze methode relatief weinig scheurlengtemetingen op. Per uur is het mogelijk om maximaal 15 metingen te doen, terwijl dit bij automatische meetsystemen een veelvoud kan zijn. Veel meetpunten is in dit geval een voordeel, omdat het exacte scheurgroeigedrag beter te bepalen is. Tevens zal de toevallige fout (ruis) in het meetresultaat kleiner worden naarmate je meer meetpunten hebt.
- De duur van een proef wordt beperkt, aangezien het zowel fysiek als mentaal nagenoeg onmogelijk is om langer dan ongeveer 12 uur metingen te verrichten. Dit beperkt het aantal meetpunten van een proef tot maximaal 180. Door kortere proefstuklevensduur en het niet constant aanwezig zijn varieert het werkelijke aantal meetdata meestal tussen 50 en de 80 (zie figuur 3.1).



Figuur 3.1 Vermoeiingsmeting aan micro-DAB, visuele scheurlengtebepaling

Afgezien van de 'mogelijk' hogere afleesnauwkeurigheid heeft visuele scheurlengtemeting heeft geen grote voordelen ten opzichte van automatische scheurlengtemeting met behulp van een meetapparaat.

In de meeste gevallen (bij metalen en kunststoffen) wordt het alleen nog toegepast als controle van de automatische meting. Het is bij het begin van dit onderzoek toegepast omdat er nog geen apparaat beschikbaar was om de scheurlengte in asfalt automatisch te kunnen meten.

3.3 Scheurlengtebepaling met camera

Halverwege het onderzoek is overgestapt van visuele scheurlengtemeting op automatische meting van de scheurlengte met behulp van een beeld-digitaliseringscamera (zie bijlage 4, gebruikte apparatuur). Voor een duidelijke zichtbaarheid van de scheur wordt het proefstuk wit gespoten. De werkwijze van scheurlengtebepaling met behulp van de camera is als volgt:

- De camera maakt een zwart-wit foto van het proefstuk. Omdat het proefstuk wit is gespoten is er een scherp contrast tussen de scheur en het proefstukoppervlak.
- Deze foto wordt doorgegeven aan de zogenaamde 'frame grabber', een speciaal stuk hardware dat is aangesloten op een computersysteem.
- Via de computer is de frame grabber geprogrammeerd om op een deel van de foto een aantal beeldbewerkingen uit te voeren. Eerst wordt aan elk beeldpunt een waarde toegekend tussen de 0 en de 255, afhankelijk van de grijswaarde. Een beeldpunt dat perfect wit is krijgt waarde 0, een zwart beeldpunt waarde 255. Hierna wordt de inverse van het beeld bepaald. Dit is te vergelijken met een negatief. Het proefstukoppervlak is nu nagenoeg zwart, terwijl de scheur wit is. Om de ruis veroorzaakt door oneffenheden op het oppervlak te onderdrukken wordt een ruisonderdrukkende beeldbewerking uitgevoerd; in een klein opgegeven gebied rond een beeldpunt A (bij dit onderzoek werd gekeken naar twee beeldpunten links en rechts van het proefstuk) bepaalt de frame grabber het donkerste beeldpunt en kent de grijswaarde van dit beeldpunt toe aan beeldpunt A. Hierdoor zullen kleine witte punten op het oppervlak, die mogelijk als scheur zouden worden aangezien, weggemiddeld worden.
- Van te voren is aan de frame grabber een zogenaamde grensgrijswaarde opgegeven. Alle beeldpunten met een lagere grijswaarde krijgen de grijswaarde 0 toegekend, terwijl de beeldpunten met een hogere grijswaarde de grijswaarde 255 wordt toegekend. Uiteindelijk houden we dus een beeld over wat is opgebouwd uit alleen witte (de scheur) en zwarte (het proefstukoppervlak) beeldpunten.
- De eigenlijke scheurlengte-bepaling vind hierna pas plaats. Ten opzichte van een referentiepunt, wat is aangebracht op het proefstukoppervlak (zie figuur 3.3), bepaalt de frame grabber links en rechts de in horizontale richting verst weg liggende witte punten. Het gemiddelde van deze twee horizontale afstanden is de gemiddelde scheurlengte a.

De afleesnauwkeurigheid met deze methode is lager dan met visuele scheurlengte bepaling (zie paragraaf 3.1). Deze wordt in dit geval bepaald door de ruisonderdrukkende beeldbewerking. Door deze bewerking zal een deel van de niet openstaande scheurtip een te klein contrast geven en worden weggefilterd. Afhankelijk van de soort proef (meer of mindere mate openstaande scheur) zal de afleesnauwkeurigheid liggen tussen de 1 à 2 mm. Bij proeven waarbij de scheur in het geheel niet openstaat, zoals proeven bij wisselbelasting, is deze meetmethode dan ook niet bruikbaar omdat de scheur in het geheel geen contrast geeft. Ook wanneer het proefstuk onder de maximale kracht staat tijdens de cyclus (P_{max}) is het contrast te klein. Een ander nadeel van de camera ten opzichte van de visuele scheurlengtebepaling is dat de scheurlengte wordt bepaald uit het gemiddelde van de twee scheurlippen die zich aan de voorzijde van het proefstuk bevinden, terwijl bij visuele scheurlengtemeting ook de twee scheurtippen aan de achterkant van het proefstuk gemeten konden worden.

Alhoewel de scheurlengtebepaling met de camera een iets minder goede afleesnauwkeurigheid geeft, wordt hij toch toegepast omdat hij een aantal belangrijke voordelen heeft in vergelijking met visuele scheurlengtemeting.

- Het automatisch meten van de scheurlengte betekent dat de proeven veel minder arbeidsintensief worden. Omdat de mogelijkheid bestaat om de gemeten scheurlengte als signaal terug te koppelen naar de testbank, kan hij gebruikt worden om het verloop van de proef te sturen. Zo kunnen ingewikkelde proeven, waarbij het op te leggen signaal constant moet worden aangepast aan de scheurlengte, ook volautomatisch worden uitgevoerd.
- Omdat het niet meer nodig is om veel aanwezig te zijn bij de proef kunnen er ook proeven uitgevoerd worden die veel langer duren dan de maximale 12 uur die mogelijk was bij visuele scheurlengtebepaling (zie paragraaf 3.1). Dit geeft ook mogelijkheden om in een bepaald tijdsbestek aanzienlijk meer proeven uit te voeren.
- Door gebruik van de camera is er ook een veel groter aantal metingen per tijdseenheid mogelijk. De op dit moment toegepaste computer (type 80286) beperkt het aantal metingen tot ongeveer honderd per uur, wat ruim 6 keer zoveel is als mogelijk was met visuele scheurlengtemeting (zie figuur 3.2). Een snellere computer zou dit nog verder kunnen opvoeren.
- De computer biedt de mogelijkheid om een aantal van de foto's op te slaan die de framegrabber gebruikt om de scheurlengte te bepalen. Dit biedt de mogelijkheid om na afloop van de proef een controle uit te voeren en visueel een schatting te maken van de meetfout van de computer (zie figuur 3.2). Een aantal van 15 foto's per proef is, gezien het beperkte geheugen van de gebruikte computer, op dit moment het maximum. Ook dit is echter aanzienlijk op te voeren door gebruik van een modernere computer met meer geheugen.



Figuur 3.2 Vermoeiingsmeting aan DAB 0/8, scheurlengtebepaling met camera

Eerder werd al opgemerkt dat bij proeven waarbij de scheur niet openstaat, zoals proeven met een wisselbelasting, de scheur te weinig contrast geeft en automatische meting met behulp van de camera niet mogelijk is.

Bij DAB-0/8 trad echter nog een ander verschijnsel op dat meting met behulp van de camera in bepaalde gevallen onmogelijk maakte, namelijk: crack branching en het ontstaan van scheuren voor de scheurtip (zie figuur 3.3).



Figuur 3.3 Foto van DAB 0/8 proefstuk tijdens kruipproef

In figuur 3.3 is duidelijk het ronde centrale gat te zien en de twee zaagsnedes die dienst deden als beginkerf. De grote zwarte stip boven het centrale gat was het referentiepunt dat de camera nodig had voor de bepaling van de scheurlengte. Een vergrote versie van figuur 3.3 is opgenomen in bijlage 5.

Het verschijnsel van crack-branching en het ontstaan van scheuren voor de scheurtip trad veel sterker op bij kruipproeven dan bij vermoeiingsproeven (zie bijlage 5). Bij vermoeiings- en kruipproeven aan micro-DAB trad crack-branching in zeer lichte mate op, en beinvloedde de scheurlengtemeting niet of nauwelijks. Bij vermoeiingsproeven aan DAB-0/8 was er sprake van crack-branching, maar uitgebreide scheurvorming voor de scheurtip trad niet op. Hierdoor was het mogelijk om de scheurlengte te meten met de camera, alleen bleek uit controle van de foto's achteraf, dat de meetfout ruim twee maal zo groot was als bij het micro-DAB (4-5 mm. in plaats van 1-2 mm.). Deze grotere fout werd veroorzaakt doordat de camera kleine scheurtjes voor de scheurtip, die niet op het pad van de hoofdscheur lagen, registreerde en deze als uiterste scheurtip beschouwde. Visueel werden dit soort scheurtjes alleen beschouwd als scheurtip als zij in het verlengde van de hoofdscheur lagen en hier duidelijk deel van uit zouden gaan maken, en als er sprake was van een scheur over de volledige proefstukdikte. Bij kruipproeven aan DAB-0/8 was automatische scheurlengtemeting met behulp van de camera niet meer mogelijk vanwege de zeer uitgebreide scheurvorming tot enkele centimeters voor de scheurtip (zie figuur 3.3). Figuur 3.3 laat echter duidelijk zien dat ook visuele bepaling van de werkelijke scheurtip zeer moeilijk is in DAB-0/8, vooral bij kruipproeven, afgezien van de vraag of aan op deze schaal vertakte scheuren nog gerekend kan worden met formules die uitgaan van een eenduidige scheur, zoals de K-formule.

3.4 Bepaling scheurlengte uit compliantie

In combinatie met het visueel bepalen van de scheurlengte is bij dit onderzoek ook de relatie tussen de compliantie en de scheurlengte onderzocht, en gekeken naar de bruikbaarheid van de compliantie als maat voor de scheurlengte.

De compliantie C is gedefinieerd als de inverse van de stijfheid. Hieruit volgt (Ewalds and Wanhill, 1989):

$$C = v / P \tag{3.1}$$

waarin: v = verplaatsing ten gevolge van de kracht P

Gezien de definitie wordt de compliantie ook wel beschouwd als een maat voor de 'slapheid' van het materiaal.

De waarde van de compliantie kan dus bepaald worden uit de helling van het krachtverplaatsingsdiagram. Een voorbeeld van een kracht verplaatsingsdiagram voor een viscoelastisch materiaal als asfalt is weergegeven in figuur 3.4.



Figuur 3.4 Typisch kracht-verplaatsingsdiagram voor visco-elastisch materiaal

Voor een visco-elastisch materiaal zal er sprake zijn van een hysterese-effect zoals weergegeven is in figuur 3.4. Bij een ideaal lineair-elastisch materiaal zal dit niet optreden, en vallen het belastings- en ontlastingsdeel van de curve samen tot een rechte lijn. Dit hysterese-effect geeft een complicatie bij het bepalen van de compliantie. De helling van het diagram is namelijk niet constant meer, en hierdoor wordt de waarde van de compliantie afhankelijk van het punt waar hij uit het diagram bepaald wordt. Om toch een bruikbare waarde voor de compliantie te verkrijgen wordt een vast deel van het diagram gebruikt voor de bepaling van de helling van de curve. Er wordt een stuk gekozen uit het ontlastingsdeel dat nagenoeg geen kromming vertoont. Bij dit onderzoek is gekozen voor het stuk tussen 90 % en 50 % van de maximale belasting (zie figuur 3.4).

De gemiddelde helling in dit deel wordt gebruikt ter bepaling van de compliantie. Dit is nauwkeuriger dan het bepalen van de compliantie uit 1 punt op de kromme, zeker voor viscoelastische materialen.

Naarmate de scheur in het proefstuk groter wordt, zal het proefstuk slapper worden. Ten gevolge hiervan zal een bepaalde opgelegde kracht P resulteren in een steeds grotere verplaatsing. Hierdoor wordt de helling van het kracht-verplaatsingsdiagram steeds kleiner en de waarde van de compliantie steeds groter (zie formule 3.1). De waarde van de compliantie is dus gerelateerd aan de scheurlengte.

Het opnemen van een kracht-verplaatsingsdiagram gebeurt in de regel met een COD-meter die over de scheuropening wordt geplaatst. Deze meet de verplaatsing van de scheurflanken als gevolg van de opgelegde kracht. De gemeten verplaatsingen kunnen dan worden omgerekend naar een scheurlengte met behulp van formules waarvan de coefficiënten afhankelijk zijn van het elastische materiaalgedrag, de positie van de COD-meter en van de proefstukgeometrie (zie ASTM-E 647, 1993).

Deze methode was 'nog' niet beschikbaar tijdens dit onderzoek, maar het was wel mogelijk om een compliantiewaarde te berekenen uit de verplaatsing van het krachtoverbrengende deel van de vermoeiingsbank, de zuiger. De gemeten verplaatsing is dan de verplaatsing ten gevolge van de rek die optreedt in het gehele proefstuk plus inklemmingen.

Met behulp van het van Instron afkomstige softwareprogramma AFCP (Advanced Fatigue Crack Propagation) was het mogelijk de vermoeiingsbank volledig computergestuurd te bedienen en relevante meetgegevens op te slaan en te bewerken (voor een uitgebreid overzicht van de mogelijkheden van dit programma, zie handleiding, Instron 2490 series, Application programs).

Een van de mogelijkheden waarvan gebruik is gemaakt is het berekenen van de compliantie uit de zuigerverplaatsing. In het AFCP-programma kon van tevoren worden opgegeven over welk deel van de ontlastingscurve de helling berekend moest worden. Gekozen werd voor het deel tussen 90% en 50% van de maximaal opgelegde kracht (zie figuur 3.4). De formule die de computer gebruikte om de compliantie te berekenen was:

$$C = B_{eff} E \cdot \frac{V}{P}$$
(3.2)

waarin: B_{eff} = proefstukdikte (minus eventueel aangebrachte 'notches' in het oppervlak) E = elasticiteitsmodulus

Zowel de B_{eff} als de E zijn constanten, en in feite wordt dus de compliantie vermenigvuldigd met een constante. De 'compliantie' wordt door vemenigvuldiging met deze constanten dimensieloos. Ook in de ASTM-norm E -647 (1993) wordt de compliantie vermenigvuldigd met deze constanten. Men spreekt dan van de compliantie genormaliseerd voor elasticiteitsmodulus en proefstukdikte. Aangezien de elasticiteitsmodulus van een viscoelastich materiaal als asfalt niet constant is, maar afhankelijk van de reksnelheid (en dus ook van de frequentie en de belastingshoogte), is het niet mogelijk om de werkelijk genormaliseerde compliantie te berekenen. Bij de berekening van formule 3.2 is voor de elasticiteitsmodulus een vaste waarde aangenomen, zodat de verandering in de genormaliseerde compliantie alleen wordt bepaald door de verandering in het belastings-verplaatsingsdiagram

De vraag is of de uit de zuigerverplaatsing berekende waarde voor de compliantie een eenduidige relatie met de scheurlengte en een acceptabele onnauwkeurigheid heeft. Onder acceptabel verstaan we hier een onnauwkeurigheid die ongeveer even groot is als die van andere automatische meetmethodes, zoals de eerder bescheven camera (paragraaf 3.2).

Het is duidelijk dat de waarde van deze compliantie niet alleen meer bepaald wordt door de slapheid van het ligament voor de scheurtip (zoals bij de COD-meter), maar door alle veranderingen in stijfheid in het hele proefstuk en zijn lijmverbindingen met de inspanbekken. Een voorbeeld van een meting waarbij naast de visueel bepaalde scheurlengte ook de 'genormaliseerde' compliantie is berekend, is weergegeven in figuur 3.5.



Figuur 3.5 Vergelijking 'genormaliseerde compliantie en scheurlengte als functie van N

In deze figuur is goed te zien dat de compliantie de visueel gemeten scheurlengte niet op de voet volgt. De compliantie vertoont duidelijk een ander globaal verloop over de totale proefstuklevensduur. Dit was het geval bij de meeste compliantieberekeningen (zie bijlage 6). Onderzocht is of er voor asfalt een constante en reproduceerbare relatie bestaat tussen de compliantie uit de zuigerverplaatsing en de scheurlengte. Voor lineair-elastische materialen is er sprake van een constante relatie tussen de compliantie en de scheurlengte voor een bepaalde proefstukgeometrie, welke tevens onafhankelijk is van de testomstandigheden. Omdat het mechanisch gedrag, in het bijzonder de stijfheid, van een visco-elastisch materiaal als asfalt sterk afhankelijk is van de testomstandigheden, werd eerst gekeken of er sprake was van een constante relatie onder identieke proefomstandigheden. (zie figuur 3,6).



Figuur 3.6 Relatie tussen a-visueel en de compliantie uit de zuigerverplaatsing

Uit figuur 3.6 blijkt dat de relatie zeker niet constant te noemen is. Zowel de ligging als de kromming van de curves is verschillend, terwijl je zou verwachten dat voor identieke proeven de curves zouden samenvallen. Ook onder andere testomstandigheden blijkt zowel de ligging als de kromming van twee identieke metingen verschillend. Soms is er ook sprake van een lineair- in plaats van een kwadratisch verband (zie bijlage 7).

Het verschil in ligging wordt zeer waarschijnlijk veroorzaakt door het verschil in ouderdom van de lijmverbinding tussen het proefstuk en de inspanbekken. Uit alle proeven waarbij de compliantie was berekend bleek dat aanvangscompliantie lager was naarmate de lijmverbinding ouder was. De lijmverbinding werd in de loop van de tijd steeds sterker en stijver. De gebruikte lijm was een twee-componenten lijm. In dit soort lijmen voltrekt zich een chemische reaktie, waarbij zich de lijm vormt. Deze reaktie is aflopend en zal dus doorgaan tot alle reaktiecomponenten zijn opgebruikt. Naarmate de reaktie afloopt zal de lijmverbinding steeds sterker worden.

Het verschil in kromming is minder goed te verklaren. Aangezien de compliantie bepaald werd uit de zuigerverplaatisng, werd de afname in stijfheid gemeten van het volledige proefstuk en de lijmverbindingen. Zowel het proefstuk als de lijmverbinding verschilt in sterkte van proef tot proef. Hierdoor zal er, naast het groeien van de hoofdscheur, in het ene geval sneller schade ontstaan, die leidt tot een lagere stijfheid van het geheel tussen de inspanbekken, dan in het andere geval.

Alleen een verschil in ligging is niet ernstig. Wanneer bij een eerste proef het verband bepaald is tussen scheurlengte en compliantie, kan bij het nogmaals uitvoeren van dezelfde proef volstaan worden met 1 meting van bijvoorbeeld de beginscheurlengte en de bijbehorende compliantie, waarmee de ligging van het verband ten opzichte van het verband bepaald uit de eerste proef bekend is. Met behulp van het eerste verband is dan voor elke compliantie de bijbehorende scheurlengte te berekenen. Het verschil in kromming is wel een probleem. Indien de werkwijze uit de vorige alinea (enkele pijl in figuur 3.7) was toegepast op de metingen in figuur 3.6, dan had het verschil in kromming geleid tot een fout in de berekende scheurlengte van meer dan 8 mm. voor een groot deel van de proef (dubbele pijl in figuur 3.7).



Figuur 3.7 Mogelijke fout in scheurlengte bij berekening scheurlengte uit compliantie

Dit is een veel grotere fout dan de fout die gemaakt wordt wanneer er automatisch gemeten wordt met de camera (zie paragraaf 3.2). Voor micro-DAB bedraagt de meetfout van de camera slechts 1 à 2 mm.

Tevens is bepaling van de scheurlengte uit de compliantie ook arbeidsintensiever. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat bij elke verandering van de proefomstandigheden de stijfheid van het asfalt dusdanig verandert dat er een nieuwe ijkcurve bepaald moet worden. De eerste van een serie identieke metingen dient als ijkcurve voor de andere, en wanneer elke proef twee keer wordt uitgevoerd betekent dit dus dat bij de helft van de proeven de scheurlengte nog steeds visueel gemeten moet worden.

De waarde van de compliantie bepaald uit de verplaatsing van de zuiger lijkt geen voordelen te hebben ten opzichte van het gebruik van de beeld-digitaliserings camera beschreven in paragraaf 3.2. Dit betekent echter niet dat het gebruik van de compliantie als maat voor de scheurlengte in zijn algemeen af te raden is voor asfalt. Als de compliantie wordt bepaald op de door de ASTM (E-647, 1993) voorgeschreven wijze uit de verplaatsingen van een CODmeter die aangebracht is over de scheuropening zal de compliantiewaarde alleen bepaald worden door het ligament voor de scheurip en het materiaal direkt boven en onder de scheur. Mogelijk is fout in de berekende scheurlengte dan een stuk kleiner. Ook dan blijft het echter nodig om ijkcurves op te stellen, terwijl dit niet hoeft wanneer gebruik wordt gemaakt van een camera. Bij dit onderzoek was de camera de best beschikbare methode door de combinatie van grote tijdswinst en goede precisie.

3.5 Conclusie

Bij dit onderzoek zijn drie methoden van scheurlengtebepaling met elkaar vergeleken, te weten:

- visuele bepaling;
- automatische bepaling met behulp van een beeld-digitalisatie camera;
- bepaling scheurlengte uit de compliantie verkregen uit de zuigerverplaatsing.

De beeld-digitalisatie camera bleek de beste methode voor het bepalen van de scheurlengte op basis van de volgende argumenten:

- De fout in de gemeten scheurlengte was iets minder goed dan met de visuele bepaling behaald kon worden (1 à 2 mm in plaats van 0.7 mm), maar zeer acceptabel voor een materiaal als asfalt.
- De tijdswinst in vergelijking met de visuele bepaling was groot. Op een volledige meting inclusief inlijmen van het proefstuk en eindcontrole, werd door gebruik van de camera een tijdswinst geboekt van gemiddeld 65 %. De totaal benodigde tijd voor uitvoering van een proef was gemiddeld 11 uur waarvan 4 uur voorbereiding. De meettijd (proefstuklevensduur) bedroeg gemiddeld 7 uur. Deze metingen werden door gebruik van de camera overbodig. Dit leverde dus een totale tijdsbesparing op van 7 uur, 65% van de totaal benodigde tijd.
- Door het automatisch meten van de scheur was het ook mogelijk om proeven uit te voeren die door hun looptijd bijna niet handmatig mogelijk waren. Ook het 's nachts uitvoeren van proeven behoorde tot de mogelijkheden.
- De scheurlengte bepaald uit de compliantie had een veel grotere meetfout dan de scheurlengte bepaald met de camera (tot 8 mm. in plaats van 1 à 2 mm.). Hij is ook niet toegepast ter bepaling van de scheurlengte. In vergelijking met de camera zou deze methode ook veel minder tijdswinst opleveren, omdat bij verandering van de testomstandigheden opnieuw een ijkcurve bepaald moet worden. Wanneer de compliantie zou worden bepaald met een COD-meter over de scheurflanken (voorgeschreven methode ASTM E-647,1993), is het goed mogelijk dat de meetfout een stuk kleiner wordt.

Nadeel van de camera is de relatief grote begin-investering in vergelijking met handmatig meten. Het complete systeem (camera met frame grabber, computer en software) wat bij dit onderzoek gebruikt is heeft bij aanschaf ruim dertigduizend gulden gekost. Op dit moment zal een vergelijkbaar systeem een stuk minder kosten. Bij veelvuldig gebruik kan dit bedrag echter snel worden terugverdiend door besparing op de arbeidskosten.
4. METHODES VOOR DATAVERWERKING

In dit hoofdstuk worden een aantal wiskundige methodes (algoritmes) vergeleken die gebruikt kunnen worden voor het verwerken van de vermoeiingsdata (a tegen N) tot zogenaamde Pariscurves (da/dN tegen ΔK , zie ook formule 2.5 of Ewalds and Wanhill, 1989). Door de ASTM worden twee dataverwerkings-methodes aanbevolen (zie ASTM E-647,1993), namelijk: De ASTM-secant methode en de ASTM-incremental polynoom methode. Deze methodes leveren, zeker voor een materiaal als asfalt, matige resultaten, omdat er geen sprake is van een gladde, geleidend oplopende a-N curve. Bij de Sectie Mechanisch gedrag van materialen zijn een aantal andere algoritmes ontwikkeld, die gebruik maken van een middeling over een bepaald scheurlengte-interval da. Bij dit onderzoek zijn drie van deze algoritmes vergeleken, en is bepaald welke het meest geschikt is voor de verwerking van vermoeiingsdata van asfalt. Paragraaf 4.1 gaat dieper in op de vorm van de a-N curve (scheurlengte tegen het aantal wisselingen), en welke eisen deze vorm stelt aan het te gebruiken algoritme. In paragraaf 4.2 worden de prestaties van de drie algoritmes vergeleken. Conclusies zijn opgenomen in paragraaf 4.3.

4.1 Vorm van de a-N curve

Een a-N curve bepaald aan asfalt uit een vermoeiingsproef met een constante krachtsamplitude is geen mooie gladde curve zoals het geval is voor bijvoorbeeld metalen. Als we kijken naar de globale vorm dan zien we dat de curve, die met behulp van de beelddigitaliserings camera bepaald is, is opgebouwd uit een aantal plateau's of terassen die steeds korter worden naarmate de scheurlengte groter wordt (zie figuur4.1).



Figuur 4.1 Gemeten a-N curve aan vermoeiingsproef met constante krachtsamplitude

De resolutie van de camera bedraagt ongeveer 0.25 mm. De afstanden tussen de plateau's zijn vele malen groter, en kunnen dus niet veroorzaakt zijn door de 'beperkte' resolutie van de camera. Dit blijkt tevens uit het feit dat ook bij visuele (handmatige) scheurlengtebepaling plateau's gemeten worden (zie figuur 3.1). Het aantal meetpunten per plateau is wel veel kleiner dan met de camera omdat er veel minder metingen per tijdseenheid mogelijk zijn. De plateau's worden waarschijnlijk veroorzaakt door het materiaalgedrag. Vanuit materiaalkundig oogpunt zijn er twee mogelijke verklaringen voor deze plateau's:

De plateau's worden veroorzaakt door de wijze van scheurgroei. Bij vermoeiingsproeven aan kunststoffen worden deze plateau's ook vaak waargenomen. Er wordt dan gesproken van zogenaamde 'retarded crack crowth', of stapsgewijze scheurgroei. Bij deze scheurgroeiwijze is eerst een aantal wisselingen nodig waarbij het materiaal voor de scheurtip steeds meer 'beschadigd' wordt. In veel kunststoffen is deze schade zichtbaar in de vorm van een craze, een zone waar de molecuulketens gestrekt zijn (zie figuur 4.2). Deze craze is het begin van een scheur, en de flanken van de craze worden bij elkaar gehouden door de gestrekte molecuulketens. Op een bepaald moment breken een aantal van deze molecuulketens tegelijk af, waardoor de scheur in een keer een stukje groter wordt. De sprongen die in de scheurlengte optreden als gevolg van dit proces varieren, afhankelijk van de kunststof en de belasting, tussen de 0.01 en de 0.5 mm (Hertzberg, 1980). Aangezien het bitumen te beschouwen is als een mengsel van kunststoffen met verschillende molecuullengte's is het mogelijk dat ook in het bitumen crazevorming optreedt. De molecuulketens zijn gemiddeld wel veel korter dan in een kunststof, wat ongunstig is voor crazevorming. Als crazevorming optreedt, zal het wel in veel mindere mate zijn dan het geval is bij kunststoffen.



Figuur 4.2 Craze-vorming in kunststoffen. Bron: Riemslag, 1995.

De plateau's worden veroorzaakt door de opbouw van het materiaal. Asfalt is te beschouwen als een steenskelet, dat zorgt voor de sterkte, en een 'lijmlaag' van bitumenmortel (bitumen en vulstof), die zorgt voor de samenhang. De scheurgroei in dit materiaal vindt voornamelijk plaats langs de grens bitumen-steen (zie figuur 4.3). Op micro-schaal zijn in dit scheurgroeiproces drie fasen te onderscheiden (Jacobs, 1995). Eerst bereikt een scheurtip een steen, na een klein stukje te zijn gegroeid door de bitumenfilm heen (fase II of cohesieve scheurgroei). Hierna zal de scheur van richting veranderen, (fase III of crack retardant) en verder groeien langs de grens bitumen-steen (fase I of adhesieve scheurgroei) totdat de scheurrichting zo ongunstig wordt dat de scheur weer door de bitumenfilm gaat groeien totdat de volgende korrel bereikt wordt, en het proces zich herhaalt. De scheur zal bij het bereiken van een korrel waarschijnlijk een tijdje stilstaan ten gevolge van het veranderen van de richting. Verder zullen de scheurgroeisnelheden van de cohesieve en de adhesieve scheurgroei waarschijnlijk verschillend zijn .



Figuur 4.3 Scheurgroeifasen in dichtasfaltbeton, bron: Jacobs,1995.

Uit figuur 4.1 blijkt dat er sprongen in de scheurlengte optreden van enkele millimeters. Het is zeer onwaarschijnlijk dat zulke grote sprongen veroorzaakt zijn door een craze-vormings mechanisme. De maximale korrelgrootte in het DAB-0/8 uit figuur 4.1 is 8 mm. Mogelijk is het verschil in scheurgroeisnelheid in fasen I en II zo groot dat er in een van de twee fasen meer sprake is van een sprongsgewijze groei. Vanuit theoretisch oogpunt zijn er aanwijzingen dat de scheurgroeisnelheid in fase I mogelijk een stuk lager zal zijn dan in fase II.

Ten eerste groeit de scheur in fase I voor een aanzienijk gedeelte niet in de ideale richting (loodrecht op de richting van de grootste hoofdspanning) en verandert ook nog constant van richting. Ten tweede zal de 'effectieve' scheurgroeisnelheid in fase I lager zal zijn dan de netto scheurgroeisnelheid in horizontale richting, omdat de scheur moet groeien om de korrel heen. Ook fase III zou kunnen zorgen voor een scheurgroeivertraging, maar het is onduidelijk of deze fase gezien moet worden als een apart optredende fase naast fase I, aangezien in beide gevallen sprake is van een onthechtingsmechanisme in combinatie met het veranderen van de scheurgroeirichting.

Of de scheurgroeisnelheid in fase I daadwerkelijk een stuk lager zal zijn dan in fase II is hiermee nog niet aangetoond. Het is mogelijk dat de scheurgroeiweerstand door puur bitumen een stuk groter is dan langs het grensvlak bitumen-korrel, bijvoorbeeld door een grote mate van blunting in het bitumen.

Als het voorgaande model klopt zou er sprake zijn van een sprongsgewijze groei ter grootte van de afstand tussen de verschillende korrels (= de bitumenfilmdikte), welke soms wel enkele millimeters kan bedragen. Dit mechanisme is een stuk waarschijnlijker dan het craze-mechanisme.

We gaan er bij dit onderzoek in ieder geval van uit dat de aanwezige plateau's veroorzaakt worden door het materiaalgedrag en niet door een meetfout van de camera. Als deze plateau's dus wezenlijke informatie geven over het scheurgroeigedrag, is het de vraag of er gebruik gemaakt moet worden van een data-verwerkingsmethode die deze plateau's wegfiltert. Als het bepalen van algemene trends in de scheurgroeisnelheid het doel zou zijn van dit onderzoek, zijn de plateau's niet van wezenlijk belang. Het doel van dit onderzoek is meer tweeledig te noemen. Naast het bepalen van de algemene trends (helling en ligging van de Pariscurve) wordt gekeken naar de optredende scheurgroeimechanismes. Aangezien de plateau's informatie geven over het mechanisme van scheurgroei in het asfalt is het af te raden om een methode te gebruiken die deze plateau's volledig wegfiltert. Hierom is het beter een data-verwerkingsmethode of algoritme te gebruiken die de plateau's slechts gedeeltelijk wegfiltert. Op deze manier blijven zowel de algemene trends als de plateau's zichtbaar in de meetresultaten (de Pariscurves).

4.2 Mogelijke algoritmes voor dataverwerking

Er zijn drie mogelijke algoritmes voor dataverwerking vergeleken:

- de incremental-da methode;
- de incremental-da improved methode ontwikkeld door Michael Janssen;
- de incremental-da methode ontwikkeld door Jan Zuidema.

Zoals al werd opgemerkt in paragraaf 4.1 zijn alle methodes of algoritmes variaties op één thema, namelijk het uitvoeren van een middeling van de resultaten over een vast scheurgroeiinterval met lengte da. De grootte van dit interval wordt bepaald door de toevallige meetfout (of ruis) in de meetdata. Deze meetfout bleek afhankelijk te zijn van de geteste asfaltsoort en van de meetmethode (zie hoofdstuk 3). Er werd besloten om voor de grootte van het scheurgroei-interval da twee keer de maximaal optredende meetfout te nemen.

Bij micro-DAB is gebruik gemaakt van visuele scheurlengte-bepaling en scheurlengtebepaling met behulp van de beeld-digitaliseringscamera. De maximale meetfouten voor deze twee methodes bedroegen respectievelijk 0.7 en 2 mm. Dit zou, op basis van de vorige alinea, een da opleveren van respectievelijk 1.4 en 4 mm. Ter wille van de uniformiteit in de verwerking van de meetdata werd besloten om voor alle micro-DAB proeven een scheurgroeiinterval da aan te houden van 4 mm. Bij het DAB-0/8 is alleen gebruik gemaakt van de camera, die bij dit materiaal een meetfout gaf van maximaal 5 mm. Dit resulteerde in een da van 10 mm.

Op de volgende pagina's is voor elk van de drie methodes gevisualiseerd hoe het algoritme werkt, waarna met elk algoritme de Parisrelatie is berekend voor proefstuk C-323-I (zie figuur 4.1).

De berekeningen met de incremental-da methode en de incremental-da improved methode zijn uitgevoerd met het softwareprogramma Fatigue for Windows[©]. De berekeningen met de incremental-da methode ontwikkeld door Zuidema zijn uitgevoerd met het softwareprogramma Curvefit[©]. De exacte werking van de drie algoritmes is weergegeven in bijlage 8.

4.2.1 De incremental-da methode

De werking van deze methode is weergegeven in figuur 4.4. De methode zoekt bij een meetpunt het eerstvolgende meetpunt dat op zijn minst een lengte da groter is. Uit de lijn tussen deze twee meetpunten bepaalt hij een da/dN. De waarde van ΔK bij deze da/dN wordt berekend met formule 2.1 waarin voor σ de σ_{max} - σ_{min} = $\Delta \sigma$ wordt ingevuld. Voor de scheurlengte a wordt de gemiddelde scheurlengte van de twee meetpunten ingevuld.

Dat deze methode een probleem geeft bij meetdata die liggen in plateau's is direkt uit figuur 4.4 te zien. Elk punt in één plateau zal gemiddeld worden met hetzelfde beginpunt P van een van de volgende plateau's, afhankelijk van de stapgrootte da. In figuur 4.4 is de situatie getekend dat da kleiner is dan een plateau-afstand. Hierdoor zullen een aantal steeds verder oplopende da/dN waardes berekend worden met dezelfde a_{gem} , en dus dezelfde ΔK . Dat dit inderdaad optreedt is te zien in figuur 4.5 waarin de pariscurve is getekend die met deze methode berekend is (da=10 mm.). Een serie van oplopende da/dN waardes bij dezelfde ΔK geeft verticale lijnen in deze figuur. Uit figuur 4.4 zou je verwachten dat er alleen maar een aantal discrete vertikale lijnen in figuur 4.5 te zien zouden zijn die bij hogere ΔK steeds korter zouden worden ten gevolge van het steeds korter worden van de plateau's bij grotere scheurlengte, maar uit figuur 4.1 is te zien dat de werkelijke datapunten zich niet bevinden in perfect horizontale plateau's, en dat de lengte van de plateau's soms weer kan toenemen bij grotere scheurlengtes.



N (wisselingen)

Figuur 4.4 Werking incremental-da methode



Figuur 4.5 Pariscurve berekend met de incremental-da methode

4.2.2 De incremental-da improved methode ontwikkeld door Michael Janssen

De incremental-da improved methode is te beschouwen als een variant op de incremental-da methode. Hij werkt als volgt (zie figuur 4.6).

- Eerst wordt door de a-N meetdata een polynoom gefit met behulp van de kleinste kwadraten methode die de algemene trend van de meetdata goed volgt. Een polynoom van de vierde orde bleek daartoe het best in staat, en werd daarom toegepast.
- Hierna wordt bij een meetpunt (in figuur 4.6 het eerste meetpunt) een stap da (=10 mm voor DAB-0/8) opgeteld. Dit is weergegeven door lijn 1.
- Vanuit dit punt wordt een horizontale lijn (2) getrokken welke een snijpunt geeft met het gefitte polynoom.
- Door het snijpunt wordt nu een vertikale lijn getrokken. Het meetpunt dat zich nu het dichtst bij deze vertikale lijn bevindt wordt het punt waarmee het uitgangsmeetpunt (in figuur 4.6 het eerste meetpunt) gemiddeld wordt.
- Nu wordt een rechte lijn getrokken door de twee meetpunten. De helling geeft een da/dN, en net zoals bij de incremental-da methode (paragraaf 4.2.1) wordt de bijbehorende ΔK berekend met het gemiddelde van de twee a-waardes.

Uit figuur 4.6 is duidelijk te zien dat ook hier alle punten van één plateau gemiddeld worden met hetzelfde punt P uit een volgend plateau, zoals dit ook het geval was bij de incremental-da methode. Alleen betreft het nu niet het beginpunt van een plateau, maar een punt dat bepaald wordt door het verloop van de globale fitcurve.

Ook in dit geval zullen er een aantal steeds hogere da/dN waardes berekend worden met dezelfde ΔK . Door de verschuiving van het punt P naar rechts worden de da/dN waarden echter niet zo hoog als bij de incremental-da methode. Dit blijkt inderdaad het geval te zijn zoals te zien is in figuur 4.7.

Deze methode is eventueel nog verder te verfijnen door de laatste stap anders uit te voeren. In plaats van het trekken van een rechte lijn tussen twee meetpunten voor bepaling van de da/dN en de a voor berekening van ΔK kan ook een kleinste kwadraten lijn berekend worden voor de twee meetpunten inclusief alle meetpunten die zich hiertussen bevinden. Hierna wordt halverwege deze kleinste kwadraten lijn (tussen de twee grensmeetpunten) de da/dN bepaald door het bepalen van de afgeleide. De ΔK wordt berekend uit de a-waarde van dit punt.



Figuur 4.6 Werking incremental-da improved methode





4.2.3 De incremental-da methode ontwikkeld door Jan Zuidema

Ook deze methode is te beschouwen als een variant op de incremental-da methode uit paragraaf 4.2.1. De werking van deze methode is als volgt (zie figuur 4.8):

- Bij een bepaald meetpunt wordt het eerstvolgende meetpunt gezocht dat minimaal een lengte da groter is.
- Tussen deze twee punten wordt een rechte lijn getrokken. De helling van de lijn geeft de da/dN, en het gemiddelde van de twee meetpunten de a_{gem} , waarmee de ΔK berekend wordt.
- Om nu te voorkomen dat het tweede punt en volgende punten van een plateau gemiddeld worden met hetzelfde punt van een volgend plateau (waardoor de scheurgroeisnelheid oploopt bij dezelfde ΔK , zoals het geval is bij de incremental-da methode in paragraaf 4.2.1) is de voorwaarde ingebouwd dat een meetpunt slechts 1 keer gebruikt mag worden als eindpunt van een middeling. Als een punt voor de tweede keer bereikt wordt, wordt automatisch 1 meetpunt doorgeschoven. Praktisch betekent dit dat het eerste punt van een plateau gemiddeld wordt met het eerste punt van een volgend plateau, het tweede punt met het tweede, etc etc. Dit vindt plaats in het gebied tussen de twee doorgetrokken lijnen tussen het eerste en het tweede plateau. Wanneer alle punten van het tweede plateau doorlopen zijn herhaalt dit proces zich tussen het eerste en het derde plateau (weergegeven door de geblokte lijnen).

Uit figuur 4.8 is te zien wat dit betekent voor de bepaalde da/dN- ΔK punten. Afhankelijk van de lengte van de plateau's zullen steeds groepjes identieke da/dN- ΔK waardes berekend worden. Er is dus sprake van data reduktie.

Tevens treedt nog een ander, ongewenst verschijnsel op. Omdat een meetpunt slechts 1 keer gebruikt mag worden, zal na een aantal middelingen een meetpunt komen dat gemiddeld wordt met het laatste meetpunt van de test. Deze middeling is aangegeven in figuur 4.8 met de gestippelde lijn. Aangezien alle meetpunten dan zijn opgebruikt houdt de berekening op, en wordt dus een deel van de meetdata niet gebruikt als beginpunt van een middeling. Het is eenvoudig in te zien dat het aantal meetpunten dat hierdoor niet in de berekening wordt meegenomen, gelijk is aan het aantal meetpunten in het grootste plateau min één.

Inderdaad blijkt dat de grafiek van da/dN tegen ΔK , of Pariscurve (zie figuur 4.9) minder ver naar boven doorloopt dan de Pariscurves die zijn bepaald met de andere twee methodes. De Pariscurve bepaald met de hierboven beschreven methode blijkt een maximale da/dN te halen van 0.4 µm/cycle, terwijl met de incremental-da improved methode een da/dN gehaald wordt van 1 µm/cycle (zie figuur 4.7). De gewone incremental-da methode komt zelfs tot 2.5 µm/cycle (zie figuur 4.5).

In figuur 4.10 is op twee plekken de globale da/dN weergegeven van de originele meetdata. Hieruit is goed te zien wat er gebeurt bij de hierboven beschreven berekeningsmethode. Het laatste deel van de curve wordt niet meer meegenomen. De maximale da/dN van 1 μ m/cycle berekend met de incremental-da improved methode is een realistische waarde. De waarde van 2.5 μ m/cycle berekend met de incremental-da methode is erg hoog, en is waarschijnlijk veroorzaakt door de plateau's. Het globale verloop van de curve haalt deze hoge waarde niet. De globale da/dN van 0.4 μ m/cycle bij een scheurlengte van ongeveer 50 mm (wat bij deze proef overeenkomt met een Δ K van ongeveer 0.34 MPa \sqrt{m}) wordt wel redelijk goed voorspeld door de Pariscurves bepaald met de incremental-da improved methode en de incremental-da methode ontwikkeld door Zuidema (zie figuur 4.7 en 4.9). De 'gewone' incremental-da methode zit duidelijk te hoog; deze voorspelt een da/dN van ongeveer 0.5 μ m/cycle.



N (wisselingen)

Figuur 4.8 Werking incremental-da methode ontwikkeld door Zuidema







Figuur 4.10 Globaal optredende scheurgroeisnelheden in proefstuk C-323-I

4.2.4 Evaluatie

De incremental-da methode kan beschouwd worden als de basismethode waaruit de incremental-da improved en de incremental-da methode ontwikkeld door Zuidema afgeleid zijn. Wanneer met de incremental-da methode een Pariscurve aan asfalt berekend wordt levert dit series vertikale lijnen op in het Parisverband, veroorzaakt door sprongsgewijze groei van de scheur waardoor de meetdata zich in plateau's bevinden (zie figuur 4.10). Deze vertikale lijnen zijn geen werkelijke weergave van het scheurgroeiverloop, maar worden veroorzaakt door een combinatie van de ligging van de meetdata en de dataverwerkingsmethode. Hierdoor wordt het bepalen van de globale ligging van de Pariscurve bemoeilijkt, waardoor niet voor deze methode gekozen is voor de verwerking van alle meetresultaten.

In de data-verwerkingsmethode ontwikkeld door Zuidema was het originele incremental-da algoritme zo aangepast dat de vertikale lijnen niet meer optraden. Met deze methode is beter het globale verloop van de Pariscurve te bepalen. De aanpassing van het algoritme creërde wel een ander probleem. Door de eis dat een meetpunt slechts één keer gebruikt mag worden als eindpunt van een middeling, loopt de Pariscurve veel minder ver door dan verwacht wordt. Het maximum in figuur 4.9 wordt bereikt bij 0.4 μ m/cycle, terwijl uit figuur 4.10 blijkt dat de globale scheurgroeisnelheid oploopt tot zeker 1 μ m/cycle. Gezien dit probleem is besloten ook deze methode niet te gebruiken voor de verwerking van de meetresultaten.

De incremental-da improved methode werkt ook volgens het standaard incremental-da algoritme, maar er wordt een globale fitcurve gebruikt ter bepaling van het meetinterval. Hierdoor worden de plateau's in de meetdata voor een flink deel weggemiddeld, alhoewel ze in het Parisverband wel zichtbaar blijven. De globale ligging van de Pariscurve is goed te bepalen uit de meetresultaten. Tevens blijkt de maximaal optredende scheurgroeisnelheid uit figuur 4.10 inderdaad terug te vinden in de Pariscurve in figuur 4.7. Op basis van deze resultaten is besloten om deze methode te gebruiken bij de verwerking van de meetresultaten.

4.3 Conclusie

De a-N curve of scheurgroeikromme van asfalt vertoont een aantal plateau's (zie figuur 4.10), wat duidt op een discontinu scheurgroeigedrag. Het is waarschijnlijk dat dit discontinue scheurgroeigedrag veroorzaakt wordt door de heterogene materiaalsamenstelling.

Voor de berekening van het verband tussen da/dN en ΔK , ook wel Pariscurve genoemd, uit de scheurgroeikromme zijn drie mogelijke dataverwerkingsmethodes onderzocht. De algoritmes van deze methodes maken allemaal gebruik van een middeling over een bepaald scheurlengte-interval da.

De incremental-da improved methode ontwikkeld door Michael Janssen is van de drie onderzochte methodes het best in staat om uit de scheurgroeikromme de Pariscurve te berekenen. De Pariscurve die met deze methode bepaald is (zie figuur 4.9) loopt door tot een maximale scheurgroeisnelheid van 1 μ m/cycle, een waarde die goed overeenkomt met de verwachte maximale scheurgroeisnelheid uit figuur 4.10. Tevens is de spreiding in de berekende Pariscurve klein genoeg om een goede schatting te kunnen maken van de constante en de exponent van de Parisvergelijking.

.

5. INTERPRETATIE MEETRESULTATEN KLEEMANS

Uit de resultaten van de door Kleemans (1994) uitgevoerde vermoeiingsproeven aan micro-DAB bleek de scheurgroeisnelheid per wisseling sterk afhankelijk te zijn van de frequentie (zie figuur 5.1).



Figuur 5.1 Invloed testfrequentie op scheurgroeisnelheid (CCT proefstuk) Bron: Kleemans, 1994

Bij kunststoffen wordt dit frequentie-effect ook vaak waargenomen, en gekwantificeerd met de zogenaamde 'Frequency Sensitivity Factor', ook wel FSF-factor genoemd (Hertzberg, 1980). De FSF-factor is gedefinieerd als de toenamefactor van da/dN bij een decade verlaging van de frequentie. Als de FSF-factor gelijk is aan 1 hebben we te maken met een puur vermoeiingsscheurgroei-mechanisme. Een FSF-factor van 10 duidt op een puur kruipscheurgroeimechanisme. Wanneer er sprake is van scheurgroei ten gevolge van een combinatie van deze twee mechanismen zal de waarde van de FSF-factor liggen tussen de 1 en de 10, afhankelijk van welk mechanisme de overhand heeft.

De definitie van de FSF-factor is goed aan te voelen. FSF = 1 betekent niets anders dan dat er bij elke wisseling een even grote toename van de scheurlengte plaats vindt, onafhankelijk van de frequentie. We spreken dan van een vermoeiingsmechanisme. Als de FSF-factor gelijk is aan 10 betekent dit dat de toename van de scheurlengte alleen afhankelijk is van de verstreken tijdsduur tijdens de vermoeiingsbelasting. Het aantal wisselingen dat in deze tijd optreedt heeft geen invloed op de scheurlengte-toename. Dit pure tijdseffect duidt op een kruipscheurgroeimechanisme.

Als we de FSF-factor bepalen uit de resultaten van Kleemans (1994), dan blijkt dat bij vermoeiingsproeven met een R-waarde van 0.1 een FSF-factor optreedt van 10 (zie figuur 5.1), wat duidt op pure kruipscheurgroei.

Andere testresultaten van Kleemans (1994, zie figuur 5.2) laten zien dat bij R-waardes van 0.5 en -0.5 ook sprake is van een in ieder geval overheersend kruipscheurgroei-mechanisme, al lijkt de FSF-factor bij R = -0.5 iets lager dan 10.



Figuur 5.2 Frequentie- en R-effect micro-DAB. Bron: Kleemans, 1994.

De bovenstaande theorie van een heersend kruipscheurgroeimechanisme lijkt aannemelijk, maar door de R-waardes waarbij deze proeven zijn uitgevoerd is het optredende frequentieeffect uit figuur 5.1 en 5.2 ook te verklaren vanuit een ander gezichtspunt. Als we kijken naar het belastings-signaal bij verschillende R-waardes (zie figuur 5.3), dan zien we dat dit signaal bij een R-waarde van 0.5, 0.1 en -0.5 te ontbinden is als een statische belasting en een wisselbelasting. Het is best mogelijk dat het materiaal scheurt als gevolg van de 'gemiddelde' statische belasting en dat het effect van de wisselbelasting ten opzichte hiervan verwaarloosbaar is. Als dit het geval is, is er gewoon sprake van een kruipproef en verwacht je dus ook dat er een kruipscheurgroeimechanisme optreedt. Vanuit deze gedachtengang kan figuur 5.2 dus ook verklaard worden.





Wanneer er namelijk sprake is van kruipscheurgroei in het 'statische' deel en het effect van de sprongbelasting verwaarloosbaar is, zal de frequentie geen invloed hebben op de scheurgroeisnelheid per tijdseenheid. Wanneer de scheurgroeisnelheid per wisseling wordt uitgezet zien we wel een groot effect, omdat bij verandering van de frequentie het aantal wisselingen per tijdseenheid verandert (bij pure kruipscheurgroei FSF=10). Tevens zal een hogere R-waarde leiden tot een hogere 'gemiddelde' statische belasting en dus een hogere kruipscheurgroeisnelheid.

Door de keuze van de R-waardes zijn de proefresultaten dus op meer dan één manier te verklaren, en aangezien de gemiddelde spanning in een wegdek bij benadering gelijk zal zijn aan 0 geven de proefresultaten in figuur 5.1 en 5.2 nog geen uitsluitsel over de optredende scheurgroeimechanismen in een wegdek onder vermoeiingsbelasting.

Om toch aan te kunnen tonen dat er sprake was van een puur kruipscheurgroeimechanisme tijdens vermoeiingsbelasting, en geen kruipscheurgroei ten gevolge van de gemiddelde statische belasting, redeneerde Kleemans als volgt.

Als er bij de uitgevoerde vermoeiingsproeven inderdaad sprake is van een puur kruipscheurgroeimechanisme, dan is de scheurgroeisnelheid da/dt op een bepaald punt in de belastingscyclus alleen afhankelijk van de op dat moment heersende K-factor, onafhankelijk van de frequentie. Wanneer nu tijdens een kruipproef dezelfde K-factor heerst, moet hier dezelfde scheurgroeisnelheid da/dt optreden als bij de vermoeiingsproef.

Meer algemeen: het machtsverband dat bij een kruipscheurgroeiproef de scheurgroeisnelheid relateert aan de heersende K-factor geldt ook bij een vermoeiingsproef als daar sprake is van een puur kruipscheurgroeimechanisme.

Om deze redenatie te toetsen voerde Kleemans een aantal kruipscheurgroeiproeven uit en bepaalde het machtsverband tussen de K-factor en de scheurgroeisnelheid da/dt. Dit machtsverband heeft de volgende algemene vorm:

$$\frac{da}{dt} = C(K)^n \tag{5.1}$$

Het opgelegde krachtsignaal werd omgerekend tot een K-signaal (zie figuur 5.4, waar een proef is weergegeven bij 1 Hz.).





Elke wisseling werd opgedeeld in 100 quasi-statische stappen (dus bij 1 Hz 100 stappen per seconde, bij 10 Hz. duizend enz.), en van elke stap werd de K-factor berekend. Met het machtsverband is nu de toename van de scheurlengte te berekenen tijdens zo'n quasi-statische stap. Elke seconde wordt (onafhankelijk van de frequentie) een nieuwe scheurlengte berekend door de scheurlengte-toenames tijdens deze stappen op te tellen, waarna het stapsgewijze sommatieproces zich herhaalt. Elke seconde levert een 'gemiddelde' scheurgroeisnelheid da/dt op en een bijbehorende ΔK . Bij vermoeiingsproeven bij R = -0.5 werd er vanuit gegaan dat er geen scheurgroei optrad in het negatieve deel van de belastingscurve.

De berekende punten vormen een curve die kan worden uitgezet tegen de resultaten van de vermoeiingsproef (waarbij de scheurgroeisnelheid ook tegen de tijd uitgezet moet worden door vermenigvuldiging van de scheurgroeisnelheid da/dN met de frequentie). Deze berekeningen werden uitgevoerd bij drie R-waardes en leverden figuur 5.5 op.



Figuur 5.5 Vergelijking berekende curve met vermoeiingsresultaten

Uit figuur 5.5 is blijkt dat voor R-waardes van 0.5 en 0.1 de voorspelling van de vermoeiingscurve die was berekend uit het kruipscheurgroei-machtsverband beter samenvalt met de vermoeiingsresultaten dan bij R = -0.5. Dit houdt in dat bij R=0.5 en 0.1 er sprake is van een puur kruipscheurgroei-mechanisme. Bij R=-0.5 voorspelt het machtsverband een lagere scheurgroeisnelheid. Hier is waarschijnlijk sprake van een combinatie van een kruip- en een vermoeiings-scheurgroeimechanisme. Aangezien er in een wegdek sprake zal zijn van een negatieve R-waarde, is dit een sterke aanwijzing dat er onder praktijkomstandigheden sprake zal zijn van een gecombineerd kruip- en vermoeiingsscheurgroei-mechanisme, mits we ervan uitgaan dat een constructie asfalt zich hetzelfde gedraagt als micro-DAB

De mogelijke verklaring dat de hoogte van de scheurgroeisnelheid in het materiaal bepaald wordt door de 'gemiddelde' statische belasting blijkt niet op te gaan. Wanneer we bij de stapsgewijze berekening uitgaan van een gemiddelde K-waarde blijkt de berekende scheurgroeisnelheid een onderschatting te zijn van de werkelijk optredende scheurgroeisnelheid tijdens de vermoeiingsproef (zie Kleemans, 1994). Omdat de macht in vergelijking 5.1 groter is dan 1 (bij Kleemans was n gelijk aan 3.4) zorgen de hogere K_I -waardes voor een onevenredig grotere bijdrage in de toename van de scheurlengte.

6. MEETRESULTATEN

Dit hoofdstuk behandelt de resultaten van de uitgevoerde vermoeiings- en kruipproeven aan micro-DAB en DAB-0/8. en geeft enkele conclusies ten aanzien van de optredende scheurgroeimechanismen. Paragraaf 6.1 behandelt de meetresultaten van de uitgevoerde proeven aan micro-DAB, waaruit conclusies te trekken zijn ten aanzien van optredende scheurgroei-mechanismen. In paragraaf 6.2 wordt dieper ingegaan op de invloed van veroudering op het scheurgroeigedrag van micro-DAB. In paragraaf 6.3 worden de resultaten van de uitgevoerde proeven aan DAB-0/8 behandeld, waarbij het R-effect en het frequentie-effect aan bod komen. Conclusies zijn opgenomen in paragraaf 6.4. De a-N curves van alle proeven zijn opgenomen in bijlage 6.

6.1 Scheurgroeimechanismen in micro-DAB

De meetresultaten van Kleemans leverden aanwijzingen op dat een wegdek onder praktijkomstandigheden scheurt door een combinatie van twee mechanismen, namelijk: kruipscheurgroei en vermoeiingsscheurgroei. Dit vermoeden moet echter wel met enige voorzichtigheid geuit worden.

- Ten eerste zal de gemiddeld heersende spanning in een wegdek onder vermoeiingsbelasting bij benadering gelijk zijn aan nul. Als we dit willen simuleren in een laboratorium met een eenvoudige vermoeiingsproef moeten we uitgaan van een zuivere wisselbelasting (R = -1), en niet van een belastingspatroon waarbij er sprake is van een gemiddelde trekbelasting. Een werkelijke simulatie van de praktijkomstandigheden vereist een veel ingewikkelder proef, waarbij de frequentie, de R-waarde en de hoogte van de maximale belasting constant gevarieerd dienen te worden om zo het effect van verschillende snelheden en gewichten van voertuigen mee te nemen. Dit soort proeven is echter niet geschikt om scheurgroeimechanismen aan te tonen.
- Ten tweede is deze stelling gebaseerd op resultaten verkregen met behulp van micro-DAB. Het is goed mogelijk dat een constructie asfalt zich anders gedraagt. Om een antwoord te krijgen op de vraag of het scheurgroeigedrag van een constructie-asfalt vergelijkbaar is met micro-DAB is een aantal vermoeiingsproeven bij verschillende frequenties en Rwaarden uitgevoerd aan DAB-0/8. Dit is een toplaagasfalt dat wordt toegepast bij lichtbelaste stadswegen. De resultaten worden beschreven in paragraaf 6.2.

Om meer inzicht te krijgen in het R-effect werden een aantal vermoeiingsproeven uitgevoerd bij een R-waarde van -1. Er werd gekozen voor een frequentie van 29.3 Hz. Bij deze proef is de gemiddelde spanning 0. Deze proeven benaderen de omstandigheden die heersen in een wegdek. De resultaten van deze proeven werden vergeleken met de resultaten van enkele uitgevoerde proeven bij een R-waarde van 0.5 (zie figuur 6.1)



Figuur 6.1 R-effect micro-DAB bij f = 29.3 Hz.

De meetdata bij R = 0.5 zijn afkomstig van vier proeven, twee identieke proeven bij $\Delta P=7$ kN en twee identieke proeven bij $\Delta P=5$ kN. Bij R = -1 zijn de meetdata afkomstig van drie proeven, waarvan twee identieke bij $\Delta P=10$ kN en 1 proef bij $\Delta P=14$ kN. In eerste instantie was besloten om bij elke R-waarde twee proeven uit te voeren. De eerste serie proeven leverde echter weinig meetdata op omdat de optredende scheurgroeisnelheid een stuk hoger lag dan verwacht. De belastingen waren even hoog gekozen als bij de proeven van Kleemans, maar het nieuwe micro-DAB scheurde onder identieke omstandigheden een stuk sneller dan het micro-DAB van Kleemans. Dit was al eerder gebleken (zie conclusie Hoofstuk 2). Om toch een voldoend aantal meetdata te verkrijgen zijn drie extra proeven uitgevoerd (twee bij R = 0.5 en één bij R = -1).

Vergelijken we de ligging van de vermoeiingsdata bij R = 0.5 en 29.3 Hz uit figuur 5.2 met bovenstaande figuur, dan blijkt het Parisverband van figuur 6.1 inderdaad een stukje hoger te liggen, wat betekent dat het nieuwe micro-DAB iets minder sterk is.

Volgens de ASTM (norm E-647, 1993), vindt er in het negatieve deel van de belastingscurve geen scheurgroei plaats, en moeten vermoeiingsdata van proeven met een negatieve R-waarde niet worden uitgezet tegen ΔK maar tegen K_{max} , omdat de scheurgroei plaatsvindt ten gevolge van het deel van de K dat positief is. Als we de ASTM-norm toepassen op figuur 6.1 schuiven de datapunten van R = -1 sterk naar links op (zie figuur 6.2)



Figuur 6.2 Verschuiving R = -1 curve door toepassing ASTM-norm

Indien mogelijk zou het interessant zijn om een proef uit te voeren met het belastingssignaal van R = -1 (zie figuur 5.3) waarbij het negatieve deel van dit signaal wordt vervangen door een constant houden van de kracht op nul. Uit de ligging van de vermoeiingsdata uit deze proef in vergelijking met de data van R = -1 weergegeven volgens de ASTM norm kan dan meer inzicht verkregen worden over wat er in asfalt gebeurt in het negatieve belastingsdeel.

Om enig inzicht te krijgen in het scheurgroeigedrag in het negatieve deel van de belastingscurve werd besloten om vermoeiingsproeven uit te voeren bij een R-waarde van 20. Bij deze proeven is er dus constant sprake van een (wisselende) drukbelasting. Voor de uitvoering van deze proeven was het nog niet duidelijk of het zin had om te vermoeien in het drukgebied. In asfalt is het namelijk mogelijk dat ontstane scheuren weer dichtgroeien. Dit zogenaamde proces van healing treedt al op wanneer het materiaal onbelast is, dus bij drukbelasting zijn de condities helemaal gunstig.

Wanneer een reeds volledig doorgebroken proefstuk weer 'tegen elkaar aan werd vermoeid' bij R=20, bleek er inderdaad sprake te zijn van healing. De twee losse proefstukhelften kwamen steeds steviger aan elkaar te zitten naarmate zij langer waren blootgesteld aan de drukvermoeiing bij R=20. Periodes van twee tot vijf uur bij een frequentie van 29.3 Hz waren echter lang niet genoeg om de twee proefstukhelften weer volledig aan elkaar te healen, en de originele sterkte te bereiken. De treksterkte na vijf uur vermoeien bedroeg tussen de 30% en 40% van de normale treksterkte Het is niet duidelijk of volledige healing binnen een redelijke tijdsduur mogelijk is.

Om meer inzicht te krijgen in de optredende scheurgroeimechanismen werden een aantal kruipproeven uitgevoerd om het machtsverband te bepalen tussen de scheurgroeisnelheid da/dt en de K-factor (zie figuur 6.3)



Figuur 6.3 Resultaten uitgevoerde kruipproeven bij Pconst en Kconst

In de figuur staan zowel de resultaten van de uitgevoerde kruipproeven bij constante belasting, welke een verband geven tussen da/dt en K over een bepaald K-traject (hier van 0.18 tot 0.4 MPa \sqrt{m}), als de resultaten van de uitgevoerde kruipproeven waarbij de K-factor constant gehouden is, wat resulteert in een constante scheurgroeisnelheid tijdens de proef. In een grafiek van da/dt tegen K levert zo'n proef dus een punt op (de uitgevoerde kruipproeven bij K_{const} zijn weergegeven in bijlage 6).

Aangezien de uitgevoerde kruipproef bij P = 4 kN het grootste K-gebied beschrijft is besloten het machtsverband van deze proef te gebruiken voor het berekenen van de ligging van de Pariscurve indien er sprake zou zijn van een puur kruipscheurgroeimechanisme. Deze procedure staat uitgebreid beschreven in Hoofdstuk 5. Het machtsverband is weergegeven in figuur 6.3.

Wanneer de voorspelde ligging van de vermoeiingscurve berekend uit het machtsverband in figuur 6.3 wordt vergeleken met de werkelijke ligging van de vermoeiingscurves blijkt de berekende Pariscurve voor de vermoeiingsproef bij R = 0.5 exact samen te vallen met de gemeten Pariscurve (zie figuur 6.4). Dit houdt in dat er bij R = 0.5 sprake is van een puur kruipscheurgroeimechanisme.



Figuur 6.4 Vergelijking voorspelde en werkelijke ligging vermoeiingscurves (f=29.3 Hz.)

Bij R = -1 is er echter een aanzienlijk verschil tussen de berekende en de gemeten ligging. Dit betekent dat er zeker geen sprake is van een puur kruipscheurgroeiproces, maar van een combinatie van kruipscheurgroei en een ander scheurgroeimechanisme, waarschijnlijk vermoeiingsscheurgroei. Uit de afstand tussen beide curves zou je kunnen afleiden dat er sprake is van ongeveer $1/3^{\circ}$ deel kruipscheurgroei. De berekende curve voorspelt namelijk een scheurgroeisnelheid die een factor drie lager ligt dan de werkelijk optredende scheurgroeisnelheid. Vermoeiingsscheurgroei draagt mogelijk voor de overige $2/3^{\circ}$ deel bij aan de totale scheurgroeisnelheid. Of deze verhouding uit de onderlinge afstand kan worden afgeleid is onbekend. Zowel de voorspelde ligging als de werkelijke meetdata bij R = -1 zijn uitgezet tegen de ΔK . Uitzetting tegen K_{max}, zoals is voorgeschreven door de ASTM had geen invloed op hun onderlinge ligging.

De verhouding tussen kruipscheurgroei en vermoeiingsscheurgroei bij R=-1 is in ieder geval goed te bepalen door het effect van de frequentie te bepalen op de ligging van de Pariscurve. Hiertoe werden twee identieke proeven uitgevoerd bij R = -1 bij een frequentie van 2.93 Hz, een factor 10 lager dan de proeven bij R = -1 uit figuur 6.4. Uit het verschil in ligging van de Pariscurves bij 29.3 Hz. en 2.93 Hz, is de FSF-factor te bepalen (zie Hoofdstuk 5). In figuur 6.5 is het verschil in ligging weergegeven. De afzonderlijke proefresultaten zijn opgenomen in bijlage 9.



Figuur 6.5 Frequentie-effect micro-DAB bij R = -1

Uit figuur 6.5 blijkt dat er ook bij R = -1 sprake is van een frequentie-effect, al is het effect niet zo groot als bij R = 0.1 en 0.5 (zie figuur 5.1 en 5.2). Uit de power-law vergelijkingen die zijn gefit aan de meetdata blijkt de FSF-factor ongeveer gelijk aan vier te zijn (vergelijk Parisconstanten bij aanname dat Parisexponenten gelijk zijn). Hieruit volgt dat er sprake is van een combinatie van vermoeiingsscheurgroei en kruipscheurgroei. Als we aannemen dat de FSF-factor een direkte weergave is van de verhouding van de twee scheurgroeimechanismes, dan is er bij R = -1 sprake van 60% vermoeiingsscheurgroei en 40% kruipscheurgroei. Dit komt zeer goed overeen met de verhouding die geschat werd uit de afstand tussen de voorspelde en de werkelijke ligging van de vermoeiingscurve uit figuur 6.4.

De resultaten weergegeven in figuur 6.4 en 6.5 maken het aannemelijk dat er in micro-DAB onder praktijkomstandigheden zoals die in een wegdek voorkomen sprake is van een combinatie van kruipscheurgroei en vermoeiingsscheurgroei. Dit omdat in een wegdek tijdens vermoeiingbelasting veroorzaakt door rijdend verkeer ook een gemiddelde spanning heerst die bij benadering gelijk is aan nul. De vraag is echter nog steeds of de optredende scheurgroeimechanismes in wegenasfalt vergelijkbaar zijn met die in micro-DAB.

6.2 Verouderingsinvloed op scheurgroeigedrag micro-DAB

Een aantal micro-DAB proefstukken van de partij vervaardigd voor Kleemans in 1993 is voor een periode van twee jaar opgeslagen, waarbij het niet is blootgesteld aan direkt zonlicht of weersinvloeden. Aangezien deze twee factoren vaak worden aangemerkt als oorzaak voor de veroudering van asfalt, werd verwacht dat er nagenoeg geen veroudering zou hebben plaatsgevonden. Om de invloed van deze opslag op de scheurgroeisnelheid te bepalen, werden er twee proeven uitgevoerd die identiek waren aan een vermoeiingsproef uitgevoerd door Kleemans. De scheurlengtemetingen werden, analoog aan de metingen door Kleemans, visueel uitgevoerd. De proefresultaten van Kleemans werden opnieuw berekend met de incremental-da improved methode zodat alle testresultaten met dezelfde dataverwerkingsmethode verkregen waren. De resultaten zijn weergegeven in figuur 6.6.



Figuur 6.6 Invloed veroudering op scheurgroeisnelheid

Uit figuur 6.6 lijkt het materiaal na twee jaar toch wel iets gevoeliger voor scheurgroei te zijn. Het verschil tussen verouderd en niet verouderd materiaal is echter van ongeveer dezelfde grootte als de spreiding in de meetresultaten bij de twee proefstukken die twee jaar bewaard zijn. Echte conclusies ten aanzien van veroudering ten gevolge van opslag zijn dus niet te trekken op basis van de meetresultaten weergegeven in figuur 6.6. Hiervoor is het nodig dat er meer proeven uitgevoerd worden, waarbij ook gekeken wordt naar langere opslagperiodes dan twee jaar.

6.3 Meetresultaten DAB 0/8

De proeven uitgevoerd aan micro-DAB hebben veel informatie opgeleverd over mogelijke scheurgroeimechanismen die onder verschillende omstandigheden in een wegdek zouden kunnen optreden. Probleem is echter wel dat micro-DAB geen asfaltsoort is die in de wegenbouw wordt toegepast. Het materiaal is veel homogener en bevat relatief meer bitumen dan een asfaltsoort dat wordt toegepast in de wegenbouw. Of de resultaten uit deze proeven ook geldig zijn voor een wegenasfalt is dus maar de vraag.

Om tegemoet te komen aan dit probleem zijn er een aantal vermoeiingsmetingen uitgevoerd aan DAB-0/8, een toplaagasfalt dat wordt toegepast bij lichtbelaste asfaltwegen. Er is gekozen voor deze asfaltsoort omdat het qua structuur een van de fijnste wegenbouw-asfaltsoorten is (maximale korrelgrootte van 8 mm). Bij de gekozen proefstukdikte van 40 mm kan een korrel maximaal 20% van de proefstukdikte bedragen. Van een homogene samenstelling is dus absoluut geen sprake, maar de heterogeniteit is nog aanvaardbaar vergeleken met de meeste soorten wegenasfalt.

Er zijn vermoeiingsmetingen uitgevoerd bij drie frequenties (1, 10 en 29.3 Hz.) en twee R-waardes (R=0.1 en 0.5). Omdat verwacht wordt dat de speiding in de meetresultaten groter zal zijn dan bij micro-DAB is besloten om alle proeven in drievoud uit te voeren. De Pariscurves zijn berekend over het totale resultaat van drie identieke proeven en geven dus het gemiddelde verband aan.

Frequentie-effect

Uit figuur 6.7 is duidelijk te zien dat er ook bij DAB-0/8 sprake is van een groot frequentieeffect bij een R-waarde van 0.1.



Figuur 6.7 Frequentie-effect DAB-0/8 bij R = 0.1

Het verschil in scheurgroeisnelheid tussen de uitgevoerde proeven bij 1 en 10 Hz is ook hier ongeveer een factor 10, net zoals bij het micro-DAB in figuur 5.1. In DAB-0/8 is er bij een R-waarde van 0.1 dus ook sprake van een puur kruipscheurgroeimechanisme (FSF = 10).

Bij vergelijking van figuur 5.1 met figuur 6.7 zien we dat het DAB-0/8 gevoeliger is voor scheurgroei onder vermoeiingsbelasting dan het micro-DAB. De curves bepaald aan DAB-0/8 liggen duidelijk een stuk hoger, maar hebben wel ongeveer dezelfde helling als de curves bepaald aan micro-DAB. Als we de curves bepaald bij 1 Hz vergelijken blijkt de scheurgroeisnelheid in DAB-0/8 ongeveer 5 maal zo hoog te zijn over het hele Δ K-traject. Uit hoofstuk vier, en in het bijzonder figuur 4.7 en 4.9 is te zien dat de methode van dataverwerking geen invloed heeft op de ligging van de curves. Figuur 5.1 is gemaakt met de incremental-da methode gebruikt door Kleemans, terwijl figuur 6.7 tot stand is gekomen met behulp van de incremental-da improved methode.

Is dit verschil in sterkte verklaarbaar? DAB-0/8 is een veel grover mengsel dan micro-DAB, waardoor er sprake is van een soort 'steenskelet', en het beter in staat is om drukkrachten op te nemen. Bij R = -1 wordt het materiaal echter getest op zijn sterkte onder trekbelasting, en in de rekrichting draagt dit skelet alleen bij aan de sterkte door de samenhang tussen mortel en mineraal.

Bij asfalt wordt de sterkte onder trekbelasting onder andere bepaald door de hechting van de mortel (bitumen+vulstof) aan het mineraal. De mortel is te beschouwen als het bindmiddel. De hechting is op zijn beurt afhankelijk van het type vulstof, de verhouding vulstof/bitumen en de omhullingsgraad; de mate waarin alle korrels omhuld zijn met een laagje mortel. Onder ideale omstandigheden (optimale verdichting) bedraagt de omhullingsgraad 100%.

De toegepaste vulstoffen in micro-DAB en DAB-0/8 zijn verschillend (zie hoofdstuk 2). De Wigro-vulstof welke is gebruikt in micro-DAB is 'sterker' dan de vulstof V40K welke is toegepast in DAB-0/8. Sterker betekent in deze context een hoger opneemvermogen voor bitumen. Dit hogere opneemvermogen betekent dat de viscositeit van de mortel hoger wordt, waardoor er een 'verstijving' van de mortel plaatsvindt. Een sterkere vulstof leidt tot een asfaltmengsel met een hogere stabiliteit.

Zowel het percentage als de soort bitumen verschilt in beide mengsels. Micro-DAB bevat een 45/60 bitumen welke een stuk visceuzer is dan het 80/100 bitumen in DAB-0/8. Dit leidt tot een hogere stabiliteit (weerstand tegen vervorming ten gevolge van een belasting). Tevens bevat micro-DAB een hoger percentage bitumen. Dit hogere percentage is nodig om een goede omhullingsgraad te verkrijgen in dit mengsel dat door zijn fijne structuur een veel grotere hoeveelheid vrij mineraaloppervlak bevat dat met bitumen omhuld moet worden. Door deze fijne structuur bestaat er in het micro-DAB dus ook een veel sterkere samenhang tussen mortel en mineraal, aangezien er per gewichtseenheid mineraal een veel groter oppervlak aanwezig is. Dit zal zeer zeker bijdragen tot een hogere sterkte. Ook de verhouding vulstof/bitumen heeft een grote invloed op de hechting van de mortel aan het mineraalaggregraat. Het is echter onbekend of deze verhouding bij beide asfaltmengsels optimaal is

Gezien de veel grotere samenhang tussen mortel en bitumen ten gevolge van de fijnere structuur zal het micro-DAB een stuk sterker zijn dan het DAB-0/8. Door de verschillen in bitumen-samenstelling zal het micro-DAB in vergelijking met het DAB-0/8 ook een stuk stabieler zijn. Deze hogere stabiliteit draagt waarschijnlijk ook bij tot een hogere sterkte.

Naast de verschillen in vulstof en bitumen is er nog een verschil tussen de twee mengsels. Het percentage holle ruimte in DAB-0/8 is iets lager dan in het micro-DAB. Het verschil bedraagt 0.25%, een getal dat is berekend over het gemiddelde van alle platen (zie hoofdstuk 2). Uit een aantal uitgevoerde kruipproeven bij constante K bleek echter dat een iets lager percentage holle ruimte kan leiden tot een grote verlaging van de scheurgroeisnelheid. Op basis van het percentage holle ruimte zou je dus verwachten dat het DAB-0/8 sterker zou zijn. Mogelijk wordt het effect van het verschil in percentage holle ruimte sterk overschaduwd door het effect van de verschillen in samenhang en samenstelling

R-waarde effect

Ter bestudering van het R-waarde effect zijn er bij 29.3 Hz. ook een aantal proeven uitgevoerd met een R-waarde van 0.5. In figuur 6.8 worden de vermoeiingsproeven bij verschillende R-waardes vergeleken.



Figuur 6.8 R-waarde effect DAB-0/8 bij f=29.3Hz.

Ook de grootte van het R-effect op de scheurgroeisnelheid is vergelijkbaar voor DAB-0/8 en micro-DAB, zoals blijkt uit vergelijking van figuur 5.4 en 6.8. In figuur 5.4 staat langs de yas niet da/dN uit maar da/dt, maar dit heeft geen effect op de afstand tussen de curves.

De resultaten van de vermoeiingsmetingen aan DAB-0/8 tonen aan dat onder de geteste omstandigheden (positieve R-waardes) het scheurgroeigedrag van micro-DAB en DAB-0/8 identiek is. De verschillen in samenstelling leiden wel tot grote verschillen in scheurgroeigevoeligheid, maar de optredende scheurgroeimechanismen zijn gelijk.

Alhoewel er, zeker bij een materiaal als asfalt, altijd voorzichtig moet worden omgegaan met extrapolaties, zijn de overeenkomstige resultaten bij micro-DAB en DAB-0/8 een aanwijzing dat het scheurgroeigedrag van beide asfaltsoorten onder praktijkomstandigheden gelijk is. Er zal nog een aantal proeven nodig zijn om dit vermoeden te bevestigen (zie aanbevelingen, hoofdstuk 7).

Als de optredende scheurgroeimechanismen in asfalt inderdaad onafhankelijk blijken te zijn van de samenstelling, dan zijn de metingen aan micro-DAB bruikbaar voor het voorspellen van het scheurgroeigedrag van asfalt in de praktijk, wat inhoudt dat we in de praktijk in wegenasfalt te maken hebben met een combinatie van twee ongeveer gelijkwaardige scheurgroeimechanismen, namelijk: kruipscheurgroei en vermoeiingsscheurgroei.

6.4 Conclusies

Uit de meetresultaten van de uitgevoerde vermoeiings- en kruipproeven aan micro-DAB blijkt dat de scheurgroei in dit materiaal veroorzaakt wordt door een combinatie van twee scheurgroeimechanismen, namelijk: kruipscheurgroei en vermoeiingsscheurgroei. De verhouding waarin deze twee mechanismen bijdragen aan de scheurgroei is afhankelijk van de R-waarde.

Uit de proefresultaten van Kleemans was al gebleken dat er bij R-waarden van 0.5 en 0.1 sprake was van een puur kruipscheurgroeimechanisme (zie figuur 5.4). Bij de vermoeiingsproeven uitgevoerd bij een R-waarde van -0.5 was de scheurgroeisnelheid echter niet meer volledig toe te schrijven aan kruipscheurgroei. Hier was duidelijk sprake van een gemengd mechanisme van kruip- en vermoeiings-scheurgroei.

Om te kijken of deze verhouding sterk beinvloed werd door de R-waarde zijn proeven uitgevoerd bij R = 0.5 (ter vergelijking met de resultaten van Kleemans) en R= -1 (zie figuur 6.4). Deze verhouding bleek inderdaad sterk R-waarde afhankelijk. Bij R = 0.5 was, analoog aan de resultaten van Kleemans, spake van pure kruipscheurgroei terwijl bij R = -1 het aandeel kruipscheurgroei was gedaald tot minder dan de helft. Dit bleek ook uit de metingen waarbij de FSF-factor was bepaald bij een R-waarde van -1 (zie figuur 6.5). Deze factor is ongeveer 4, wat inhoudt dat er waarschijnlijk sprake is van een verhouding van 40%/60% kruip/vermoeiings-scheurgroei.

Uit de meetresultaten van de vermoeiingsproeven aan DAB-0/8 blijkt dat het scheurgroeigedrag van deze asfaltsoort onder de geteste omstandigheden (positieve R-waarden) zeer goed vergelijkbaar is met micro-DAB. De frequentie- en R-effecten zijn van dezelfde orde van grootte. Wel treden er grote verschillen in scheurgroeisnelheid op, die waarschijnlijk worden veroorzaakt door verschillen in samenstelling.

Ook de spreiding in de meetresultaten is bij DAB-0/8 groter dan bij micro-DAB. Dit hangt samen met de veel grovere structuur. Deze spreiding is ook mogelijk de oorzaak van de variatie in de Paris-exponent. Bij micro-DAB is deze voor zowel de kruipproeven als voor alle vermoeiingsproeven gelijk aan ongeveer 4, identiek aan de vermoeiingsresultaten van Kleemans (1994). Bij DAB-0/8 komen waarden voor tussen de 3.1 en de 4.7. Deze grote variaties in de waarde van de Paris-exponent bij metingen aan wegenasfalt werden ook door Jacobs (1995) gevonden.

Als de verhouding van optredende scheurgroeimechanismen in micro-DAB en DAB-0/8 over het hele belastingsspectrum vergelijkbaar is, dan zijn de resultaten die volgen uit de metingen aan micro-DAB te gebruiken om de scheurgroeimechanismen in wegenasfalt te voorspellen. De vermoeiingsbelasting die in de praktijk op een wegdek wordt uitgeoefend door het erover rijdende verkeer is in werkelijkheid een gecompliceerd signaal waarin zowel de amplitude als de frequentie constant verandert. Wat betreft R-waarde lijkt dit signaal echter het meest op iets wat het midden houdt tussen een sprongbelasting (R=0) en een wisselbelasting (R=-1). Gezien de resultaten van de vermoeiingsmetingen aan micro-DAB bij R= -0.5 en R= -1 is er in de praktijk mogelijk een combinatie van kruipscheurgroei en vermoeiingsscheurgroei te verwachten. Meer proeven aan DAB-0/8 zullen moeten aantonen of het scheurgroeigedrag inderdaad onafhankelijk is van de asfaltsamenstelling.

Uit de metingen aan 'twee jaar oud' micro-DAB van de partij die was vervaardigd voor Kleemans leek er sprake van een klein verschil in scheurgroeisnelheid, dat mogelijk veroorzaakt wordt door veroudering (zie figuur 6.6). Voor het werkelijk aantonen van een verouderingsinvloed zijn echter meer metingen nodig, ook bij langere verouderingstijden.

.

7. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

7.1 Conclusies

Bij belastingsomstandigheden zoals die in een wegdek optreden ten gevolge van het rijdende verkeer, wordt scheurgroei in micro-DAB veroorzaakt door een combinatie van twee scheurgroeimechanismen, te weten: kruipscheurgroei en vermoeiingsscheurgroei.

De verhouding van het kruip- en vermoeiingsaandeel in het optredende 'combinatie' mechanisme is sterk afhankelijk van de R-waarde van het belastings-signaal. Als er sprake is van een zuivere wisselbelasting (R = -1), dan zal de vermoeiingscomponent in het mechanisme ongeveer anderhalf keer zo groot zijn dan de kruipcomponent. Wanneer de gemiddelde belasting iets groter wordt dan nul wordt de vermoeiingscomponent al snel kleiner. Bij R= -0.5 is er nog sprake van een gelijkwaardige combinatie van kruip en vermoeiing, maar wanneer het belastingssignaal tijdens de hele cyclus positief blijft (R > 0) is de vermoeiingscomponent verwaarloosbaar klein, en is er dus sprake van een puur kruipscheurgroeimechanisme.

Uit de resultaten van uitgevoerde proeven aan DAB-0/8 bij verschillende positieve R-waarden en frequenties bleek dat ook in deze asfaltsoort sprake is van een puur kruipscheurgroeimechanisme bij positieve R-waardes. Gezien de grote verschillen in samenstelling is het waarschijnlijk dat de optredende scheurgroeimechanismen onafhankelijk zijn van de materiaalsamenstelling. Dit zou inhouden dat de resultaten van metingen aan micro-DAB te gebruiken zijn om de optredende scheurgroeimechanismen in een wegdek te voorspellen, onafhankelijk van de asfaltsoort waarvan het wegdek gemaakt is. Voor bevestiging van deze hypothese moeten nog wel vermoeiingsproeven worden uitgevoerd bij negatieve R-waardes.

De automatische scheurlengtebepaling met behulp van de beelddigitalisatie-camera bleek enkele grote voordelen te hebben ten opzichte van de handmatige visuele meting. Ten eerste werd het hele meetproces veel minder arbeidsintensief, en kon het aantal meetpunten per vermoeiingsproef sterk opgevoerd worden. Ten tweede kon ook 's nachts gemeten worden, waardoor proeven konden worden uitgevoerd die door hun lange looptijd handmatig nagenoeg onmogelijk waren. Aangezien de camera de scheur door verschillen in contrast moet bepalen, is meting aan een dichtstaande scheur niet mogelijk. De scheurlengte bij negatieve R-waardes is bij dit onderzoek dan ook handmatig gemeten. Verder bleek het onmogelijk om de scheurlengte te bepalen bij kruipproeven aan DAB-0/8, omdat er geen sprake meer was van een éénduidige scheur. Bij toepassing van deze methode moet rekening gehouden worden met een investering van enkele tienduizenden guldens.

7.2 Aanbevelingen

Ter bevestiging van de hypothese dat het optredende scheurgroeimechanisme onafhankelijk is van de samenstelling van het asfaltmengsel zullen er nog vermoeiingsproeven aan DAB-0/8 moeten worden uitgevoerd bij negatieve R-waardes, en dan het liefst ook nog bij verschillende frequenties, zodat de waarde van de FSF-factor kan worden vastgesteld.

Om inzicht te krijgen hoe de scheurgroei wordt beinvloed door het negatieve deel van de belastingscurve kunnen vermoeiingsproeven uitgevoerd worden met het belastingssignaal van R = -1, waarbij het negatieve deel van dit signaal wordt vervangen door een constant houden van de kracht op nul.

Vergelijking van de meetresultaten van zo'n proef met de meetresultaten van een gewone R=-1 proef kan informatie geven over de bijdrage van het negatieve deel aan de scheurgroei (aanscherping van de scheurtip, wat een hogere scheurgroeisnelheid tot gevolg heeft, of healing een proces wat de scheurgroeisnelheid vertraagt).

Alhoewel een K_{Ic} -waarde geen inzicht geeft in de optredende scheurgroeimechanismen, lijkt deze wel in staat om materialen te rangschikken naar sterkte. De berekende K_{Ic} -waarden bij dit onderzoek zijn bepaald uit de restbreuk na vermoeiing. Uit onderzoek van Krans (1993) was al gebleken dat de hoogte van de K_{Ic} sterk afhankelijk was van de bepalingswijze. Daarom is het zinvol om een aantal K_{Ic} -bepalingen uit te voeren op de wijze zoals is bijvoorbeeld is voorgeschreven door ASTM-norm E 399. Het is vooral van belang om deze K_{Ic} -bepaling op een exact voorgeschreven wijze uit te voeren, zodat bepaalde K_{Ic} -waardes vergelijkbaar zijn.

Automatische scheurlengtebepaling met behulp van de waarde van de compliantie was bij dit onderzoek tot nu toe geen succes. De bij deze methode gemaakte meetfouten waren veel te groot. Dit werd waarschijnlijk niet veroorzaakt door de berekeningsprocedure, maar door de meetfout in het verplaatsingssignaal waaruit de compliantie berekend werd. Het betrof hier het verplaatsingssignaal van de zuiger van de vermoeiingsbank. De waarde van dit signaal werd dus niet alleen bepaald door de scheurlengte, maar ook door alle veranderingen van stijfheid in het hele proefstuk en de lijmverbindingen. De ASTM-norm E-647 schrijft voor om het verplaatsingssignaal te bepalen met behulp van een COD-meter die geplaatst is over de scheurflanken. Het is zeker de moeite waard om te onderzoeken of dit betere resultaten oplevert. Automatische scheurlengtebepaling uit de compliantiewaarde zou namelijk ook kunnen worden toegepast bij vermoeiingsproeven waarbij de scheur dichtstaat, en er dus geen gebruik kan worden gemaakt van de beeld-digitalisatie camera.

LITERATUUR

- ASTM Standard Practice C 496-90, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Philadelphia 1990 Annual Book, pag 269-272.
- ASTM Standard Practice D 1559-89, Standard Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus. Philadelphia 1989 Annual Book, pag 209-214.
- ASTM Standard Practice D 3203-91, Standard Test Method for Percent Air Voids in Compacted Dense and Open Bituminous Paving Mixtures. Philadelphia 1991 Annual Book Vol. 04-03, pag 362-363.
- ASTM Standard Practice E 399-90^{ε1}, Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials. Philadelphia 1990 Annual Book, pag 509-539.
- ASTM Standard Practice E 647-93, Standard Test Method Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. Philadelphia 1993 Annual Book Vol. 03-01, pag 679-706.

Ewalds, H.L. and Wanhill, R.J.H., Fracture Mechanics. Fourth print. Delft: DUM, 1989.

- Gurp, C.A.P.M. van, *Proeven voor wegenbouwmaterialen*. Herdruk 1988. Delft: Faculteit der Civiele Techniek, 1987. Rapport 7-87-113-10
- Hertzberg, R.W. and Manson, J.A., Fatigue of Engineering Plastics. New York: Academic Press, 1980.
- Handleiding Instron 2490 Series Application Programs. Advanced Fatigue Crack Propagation. Instron, 1991.
- Jacobs, M.M.J., Crack growth in asphaltic mixes. Delft: Universiteitsdrukkerij TU Delft, 1995.(proefschrift)
- Kleemans, C.P. et. al., Vermoeiingsscheurgroei in zandasfalt. Delft: Dienst Weg- en Waterbouw, 1994. (afstudeerverslag)
- Kleemans, C.P., 'Fatigue and creep crack growth in asphalt pavement materials'. Delft: 1995.(artikel naar aanleiding van afstudeerverslag)
- Krans, R.L. et al., 'Crack growth experiments on asphalt concrete beams'. SHRP and traffic safety on two continents, Den Haag (1993).
- Murakami, Y. Stress Intensity Factors Handbook. Pergamon Press, New York (1987).
- R.A.W.-Standaarbepalingen voor grond-, wegen- en waterbouw. R.A.W., Ede (1990).
- Riemslag, A.C., Vermoeiing en kruipscheurgroei in polyetheen. Delft: 1995. (eindrapport voor Gastec)
- Tolman, F. en Schulte, J.G., *Proefstukfabricage bij NPC*. NPC projectrapport 95200. Hoevelaken (1995).

Bijlage 1: Afmetingen CCT-proefstukken micro-DAB en DAB-0/8



Proefstukdikte: Micro-DAB 30 mm, DAB-0/8 40 mm




Bijlage 2: Gebruikte Mesh voor eindige elementen berekeningen



Bijlage 3: Holle ruimte percentages in proefstukplaten

DA	B-0/8	micro-DAB				
plaatcode	holle ruimte (%)	plaatcode	holle ruimte (%)			
321	2.97 ± 0.15	336	3.67 ± 0.15			
322	3.13 ± 0.23	337	3.60 ± 0.10			
323	3.66 ± 0.15	338	3.30 ± 0.26			
324	3.63 ± 0.15	339	2.90 ± 0.52			
325	3.70 ± 0.10	340	3.37 ± 0.49			
326	3.60 ± 0.17	341	2.53 ± 0.67			
327	3.20 ± 0.10	342	3.13 ± 0.06			
328	3.50 ± 0.00	343	2.63 ± 0.15			
329	2.97 ± 0.15	344	3.17 ± 0.06			
330	3.20 ± 0.17	345 .	3.00 ± 0.00			
331	2.97 ± 0.15	346	1.97 ± 0.06			
332	2.87 ± 0.74	347	2.27 ± 0.06			
333	2.90 ± 0.10	348	3.60 ± 0.20			
334	2.83 ± 0.06	349	3.23 ± 0.21			
335	3.53 ± 0.21	350	2.23 ± 0.21			
gemiddeld perce	ntage: 2.97 ±0.58	gemiddeld percentage: 3.22 ± 0.38				

Bijlage 4: Overzicht gebruikte apparatuur en software

Gebruikte Apparatuur:

- Vermoeiingsmachine merk: Instron, type 1251/8502/s serienummer H0038
- Krachtopnemer merk: Lebow, type Loadcell Model 3116-199 serienummer 811 CAP. 5000 LBS
- Temperatuurkast merk:Cryoson, type TRA-I0 serinummer 228
- Temperatuurregelaar merk:Cryoson, type 6/8 serienummer 032
- Beeld-digitaliserings camera merk: HCS, type MX-5 serienummer MX5.5010949129234

Gebruikte Software:

- Voor aansturing vermoeiingsmachine: Advanced Fatigue Crack Propagation leverancier: Instron
- Voor aansturing beelddigitaliseringscamera: TIM for windows leverancier: ?
- Voor berekening meetresultaten: Fatigue For Windows programmeurs; ir. P.C.H. Ament en C.H.L.J. ten Horn
- Voor berekening meetresultaten: Curvefit programmeur: dr. ir. J. Zuidema
- Voor eindige elementen berekeningen: MARC

Overig:

- Gebruikte lijm voor inlijming proefstukken: Pattex Stabilit Express
- Gebruikte verf voor wit maken proefstuk: PeVeHa leverancier: I.T.C. b.v. Gouda

Bijlage 5: Proefstukfoto's

Op de volgende vier pagina's worden proefstukfoto's getoond van het scheurpatroon onder verschillende omstandigheden, allen bij een scheurlengte van 65 mm.

Pagina 67: vermoeiingsproef aan micro-DAB Pagina 68: kruipproef aan micro-DAB Pagina 69: vermoeiingsproef aan DAB 0/8 Pagina 70: kruipproef aan DAB-0/8 (figuur 3.3)







TU DELFT



type proef	materiaal	proefstuk code	frequentie (Hz)	R- waarde	ΔP (kN)	ΔK (MPa√m)	K _(max) (MPa√m)	uiterlijk proefstuk
constante ΔP	oud micro- DAB	C 3265	29.3	-1	14	n.v.t.	n.v.t.	gaaf (test bij 20 °C) geen testresultaten
constante ΔP	oud micro- DAB	C 2???	29.3	-1	7	n.v.t.	n.v.t.	lengtescheur aan zijkant over driekwart van de proefstuklengte
constante ΔP	oud micro- DAB	C 3264	29.3	-1	10	n.v.t.	n.v.t.	gaaf, één kleine holte aan zijkant, geen testresultaten
constante ΔP	oud micro- DAB	C 1264	29.3	-1	10	n.v.t.	n.v.t.	gaaf, geen testresultaten
constante ΔP	oud micro- DAB	C 4264	29.3	0.1	7	n.v.t.	n.v.t.	gaaf, twijfelachtige lijmverbinding
constante ΔP	oud micro- DAB	C 1283	29.3	0.1	7	n.v.t.	n.v.t.	redelijk, enkele kleine holtes aan oppervlakte
constante ΔP	micro-DAB	C 336 I	29.3	0.5	3.5	n.v.t.	n.v.t.	gaaf,afgezien van enkele kleine holtes aan oppervlak
constante ΔP	micro-DAB	C 338 I	29.3	0.5	3.5	n.v.t.	n.v.t.	veel kleine holtes aan oppervlak
constante ΔP	micro-DAB	C 340 I	29.3	0.5	2.5	n.v.t.	n.v.t.	gaaf

* -

Bijlage 6: Schematisch overzicht uitgevoerde proeven en alle originele meetdata

type proef	materiaal	proefstuk code	frequentie (Hz)	R- waarde	ΔP (kN)	ΔK (MPa√m)	K _(max) (MPa√m)	uiterlijk proefstuk
constante ΔP	micro-DAB	C 342 I	29.3	-1	14	n.v.t.	n.v.t.	gaaf
constante ΔP	micro-DAB	C 344 I	29.3	0.5	2.5	n.v.t.	n.v.t.	kleine oppervlakteholtes
constante ΔP	micro-DAB	C 346 I	29.3	-1	10	n.v.t.	n.v.t.	gaaf
constante ΔP	micro-DAB	C 348 I	29.3	-1	10	n.v.t.	n.v.t.	gaaf
constante ΔP	micro-DAB	C 350 I	29.3	-1	10	n.v.t.	n.v.t.	kleine oppervlakteholtes
constante ΔP	micro-DAB	C-337-I	29.3	-1	10	n.v.t.	n.v.t.	kleine oppervlakteholtes
constante ΔP	micro-DAB	C-337-I	29.3	20	5	n.v.t.	n.v.t.	test na breuk (zie boven)
kruip-const K	micro-DAB	C-339-I	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	0.4	gaaf
constante ΔP	micro-DAB	C-339-I	29.3	20	5	n.v.t.	n.v.t.	test na breuk (zie boven)
kruip-const K	micro-DAB	C-341-I	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	0.5	gaaf (proef mislukt)
constante ΔP	micro-DAB	C-341-I	29.3	_20	5	n.v.t.	n.v.t.	test na breuk (zie boven)
kruip-const K	micro-DAB	C-343-I	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	0.5	herhaling proef 6-2-1996
constante ΔP	micro-DAB	C-343-I	29.3	_20	5	n.v.t.	n.v.t.	test na breuk (zie boven)
kruip-const K	micro-DAB	C-345-I	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	0.3	gaaf

• •

type proef	materiaal	proefstuk code	frequentie (Hz)	R- waarde	(Δ) P (kN)	∆K (MPa√m)	K _(max) (MPa√m)	uiterlijk proefstuk
kruip-const P	micro-DAB	C-347-I	n.v.t.	n.v.t.	4.8	n.v.t.	n.v.t.	gaaf (meting m.b.v. camera)
kruip-const P	micro-DAB	C-349-I	n.v.t.	n.v.t.	4.8	n.v.t.	n.v.t.	gaaf (meting m.b.v. camera)
kruip-const K	micro-DAB	C-336-II	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	0.5	gaaf, proef mislukt (K _{Ic} < 0.5)
kruip-const K	micro-DAB	C-338-II	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	0.4	veel kleine oppervlakteholtes
kruip-const K	micro-DAB	C-340-II	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	0.5	gaaf
constante ΔP	DAB 0/8	C-325-II	29.3	0.18	7.9	n.v.t.	n.v.t.	gaaf
constante ΔP	DAB 0/8	C-323-I	10	0.1	7	n.v.t.	n.v.t.	gaaf
constante ΔP	DAB 0/8	C-321-I	1	0.1	7	n.v.t.	n.v.t.	gaaf
kruip-const P	micro-DAB	C-342-II	n.v.t.	n.v.t.	4	n.v.t.	n.v.t.	gaaf
constante ΔP	DAB 0/8	C-327-I	29.3	0.1	7	n.v.t.	n.v.t.	gaaf
constante ΔP	DAB 0/8	C-329-I	10	0.1	7	n.v.t.	n.v.t.	gaaf
constante ΔP	DAB 0/8	C-331-I	1	0.1	7	n.v.t.	n.v.t.	gaaf
constante ΔP	DAB 0/8	C-333-I	29.3	0.1	7	n.v.t.	n.v.t.	gaaf
constante ΔP	DAB 0/8	C-335-I	10	0.1	7	n.v.t.	n.v.t.	gaaf

*.

type proef	materiaal	proefstuk code	frequentie (Hz)	R- waarde	(Δ) P (kN)	ΔK (MPa√m)	K _(max) (MPa√m)	uiterlijk proefstuk
constante ΔP	DAB 0/8	C-322-I	1	0.1	7	n.v.t.	n.v.t.	gaaf
constante ΔP	DAB 0/8	C-324-I	29.3	0.5	3.5	n.v.t.	n.v.t.	gaaf
constante ΔP	DAB 0/8	C-326-I	29.3	0.5	2.5	n.v.t.	n.v.t.	gaaf
constante ΔP	DAB 0/8	C-328-I	29.3	0.5	2.5	n.v.t.	n.v.t.	gaaf
constante ∆K	micro-DAB	C-339-II	10	n.v.t.	n.v.t.	0.33	n.v.t.	gaaf (proefstuk ingekort tot 340 mm.)
kruip-const P	DAB 0/8	C-330-I	n.v.t.	n.v.t	4	n.v.t.	n.v.t.	gaaf (camera meting mislukt)
constante ΔK	micro-DAB	C-346-II	10	n.v.t.	n.v.t.	0.33	n.v.t.	gaaf (standaard lengte 390 mm)
constante ΔP	micro-DAB	C-347-II	2.93	-1	10	n.v.t.	n.v.t.	gaaf
constante ΔP	micro-DAB	C-343-II	2.93	-1	10	n.v.t.	n.v.t.	gaaf



C4264, vermoeiingsproef aan oud micro DAB (proef onderbroken bij N=265000)

e.

C1283, vermoeiingsproef aan oud micro DAB



C-336-I, vermoeiingsproef aan micro-DAB

e



C-338-I, vermoeiingsproef aan micro-DAB





C-340-I, vermoeiingsproef aan micro-DAB (proefstuk tot a = 62 mm gescheurd door overshoot i.v.m.software)



C-342-I, vermoeiingsproef aan micro DAB



C-344-I, vermoeiingsproef aan micro-DAB (proef onderbroken bij N = 630000 cycles)

*





C-337-I, vermoeiingsproef aan micro-DAB (scheur tot 60 mm door overshoot software)

*





C-347-I, kruipproef aan micro-DAB bij constante belasting P=4.8 kN

*



C-349-I, kruipproef aan micro-DAB bij constante belasting P=4.8 kN







e

C-340-II, kruipproef aan micro-DAB bij konstante K, K=0.5 MPa√m (lineair verloop verwacht) C-325-II, vermoeiingsproef aan DAB 0/8

.



C-323-I, vermoeiingsproef aan DAB 0/8



C-321-I, vermoeiingsproef aan DAB 0/8

.





C-342-II, kruipproef aan micro-DAB bij constante belasting P=4.0 kN

C-327-I, vermoeiingsproef aan DAB 0/8



C-329-I, vermoeiingsproef aan DAB 0/8



C-331-I, vermoeiingsproef aan DAB 0/8

.



C-333-I, vermoeiingsproef aan DAB 0/8


C-335-I, vermoeiingsproef aan DAB 0/8

....



C-322-I, vermoeiingsproef aan DAB 0/8



C-324-I, vermoeiingsproef aan DAB 0/8



C-326-I, vermoeiingsproef aan DAB 0/8

.



C-328-I, vermoeiingsproef aan DAB 0/8

.







C-346-II, vermoeiingsproef aan micro-DAB bij const ∆K=0.33 MPa√m aan normaal proefstuk (390 mm) C-347-II, vermoeiingsproef aan micro-dab



C-343-II, vermoeiingsproef aan micro-DAB





* #







* .*

Bijlage 8: Exacte werking algoritmes dataverwerking

Incremental-da methode

$$\begin{array}{ll} a_i & 0 \leq i \leq k \\ \\ \text{for (} i = 0 \text{ to } k\text{-}1) \\ & \text{for (} j = i\text{+}1 \text{ to } k) \\ & \Delta a = a_j \text{-} a_i \\ & \text{if (} \Delta a \geq \text{opgegeven a-interval) then} \\ & \Delta N = N_j \text{-} N_i \\ & a_{i,nieuw} = (a_j + a_i)/2 \\ & (\text{da}/\text{dN})_i = (\text{da}/\text{dN}) \end{array}$$

Incremental-da improved methode
a_i
$$0 \le i \le k \ (\le 2000)$$

 $C_1 = (a_0 + a_k)/2$
 $C_1 = (a_k - a_0)/2$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & \frac{a_0 - C_1}{C_2} & \left(\frac{a_0 - C_1}{C_2}\right)^2 & \dots & \ddots \\ 1 & \frac{a_1 - C_1}{C_2} & \left(\frac{a_1 - C_1}{C_2}\right)^2 & \dots & \ddots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots \\ 1 & \frac{a_k - C_1}{C_2} & \left(\frac{a_k - C_1}{C_2}\right)^2 & \dots & \ddots \end{bmatrix}$$

$$N = \begin{bmatrix} N_0 \\ N_1 \\ \vdots \\ N_k \end{bmatrix}$$

(bij dit onderzoek van de 4^e orde)

LU decompositie en terugsubstitutie van ($M^{T}M b = M^{T}N$) (b bevat de coëfficiënten van het gefitte polynoom)

Met bovenstaande berekening is de globale polynoom bepaald. Hierna vindt de eigenlijke berekening plaats van de da/dN en de ΔK (z.o.z.)

```
for ( i = 0 to k-1)

if ( a<sub>i</sub> + opgegeven a-interval < a<sub>k</sub> )

N_{nieuw} = b_1 + b_2((a_i + opgegeven a-interval - c_1)/c_2) + b_3((a_i + opgegeven a-interval - c_1)/c_2)^2 + \dots

for ( j = i+1 to k )

if ( N<sub>j</sub> ≥ N<sub>nieuw</sub> )

a_{i,nieuw} = (a_i + a_j)/2 + \dots

(da/dN)<sub>i</sub> = ( a<sub>i</sub> - a<sub>i</sub> )/( N<sub>i</sub> - N<sub>i</sub> )
```

Incremental-da methode toegepast door Kleemans

```
k = 1
i = 1
FOR i = j TO ikoleind%
deltaA = yk(i) - yk(k)
       IF deltaA >= atraject THEN
       deltaN = xk(i) - xk(k)
       agem = (yk(i) + yk(k)) / 2
       Ngem = (xk(i) + xk(k)) / 2
       dadN = deltaA / deltaN
       dadN = 1000 * dadN
       dadt = dadN * f
      deltaK =(deltaF/(dikte*W))*(((PI*agem)/1000)^0.5)*((1/COS((PI*agem/W)))^0.5)
       Kmax = deltaK / (1 - R)
      WRITE #2, agem, Ngem, deltaK, Kmax, dadN, dadt, xk(i), xk(k), yk(i), yk(k)
      k = k + 1:
             IF (yk(i) = yk(i + 1)) AND (yk(k - 1) = yk(k)) THEN
             j = i + 1
             ELSE
                                                                                   a ...
                                                                          a,
                                                                                          0
             j = i
             END IF
                                               g
                                                    d
      EXIT FOR
      END IF
                                                                о
                                                         a<sub>i+1</sub>
NEXT i
                                                    a_i
CLOSE #2
                                                                         N
END
```

ŧ,



**

Bijlage 9: Afzonderlijke Paris-resultaten uitgevoerde proeven





. .







TU DELFT



DAB-0/8 bij R = 0.5, f = 29.3 Hz.



117

TU DELFT

∆K (MPa√m)



118

TU DELFT

TU DELFT

100 Ŧ * * x C-321-I 888 ♦ C-331-I 🛚 C-322-I 10 + \times da/dN (μm/cycle) * *** 1 \times . ì 0.1 + 0.1 1

DAB-0/8 bij R = 0.1, f = 1 Hz.

.

....

and the second sec