

HET ENERGIEBEGINSEL VOOR VERMOEIING VAN ASFALT

Fedde Tolman
Kiwa-KOAC

Natascha Poeran
Boskalis Nederland

Berwich Sluer
Boskalis Nederland

Samenvatting

Steeds vaker blijkt in de praktijk dat de huidige analysemethoden voor vermoeiing van bitumineus gebonden materialen niet toereikend zijn. De oorzaken hiervan zijn divers en niet altijd beheersbaar. Er leeft dus een sterke behoefte aan een eenduidigere wijze van analyse en vooral aan een eenduidigere interpretatie van de uitgevoerde metingen aan vermoeiing. De laatste tijd staan om deze reden modellen op basis van energiebeschouwingen, met name voor vermoeiing, wederom in de belangstelling. De beschrijving van materiaalgedrag met het energiebeginsel is geen nieuwe aangelegenheid. Sinds decennia is het energiebeginsel in vele vormen gepubliceerd. Hoewel deze onderzoeken inzicht verwerven in de fundamentele mechanismen achter vermoeiingsgedrag hebben geen van deze publicaties geleid tot een praktisch toepasbare analysemethodiek. Recente ontwikkelingen in dit kader tonen echter veelbelovende mogelijkheden voor de praktische toepassing van energieconcepten bij de beoordeling van materiaalgedrag. Hiernaar worden momenteel studie en experimenteel onderzoek verricht. In dit artikel wordt het energiebeginsel en een aantal relevante, daaruit voortvloeiende analysemethoden die de afgelopen decennia voor asfalt belangstelling hebben genoten, beschouwd. Bovendien wordt naast de theoretische beschouwing het resultaat van een praktijkcasus overlegd, waarmee tevens wordt ingegaan op de waarde van het energiebeginsel voor de verificatie van functionele asfalteigenschappen.

Steekwoorden

Asfalt, Vermoeiing, Energiedissipatie, Functioneel Verifiëren, RDEC

1. **Achtergrond**

1.1 **Probleemstelling**

In Nederland worden flexibele verhardingen ontworpen op basis van mengspecifieke functionele eigenschappen. De ontwerpmethodologie verlangt voor de dimensionering van de verhardingslagen de stijfheidsmodulus en de weerstand tegen vermoeiing van het toe te passen asfalt. Omdat verkeersbelasting in de regel relatief laag is vergeleken met de sterkte van de verharding is met name het vermoeiingsgedrag van de onderlaag leidend in het verhardingsontwerp. Het meten aan de vermoeiing van asfaltmengsels is in Nederland daarom vastgelegd in Proef 62 van de Standaard RAW 2015. Vermoeiingseigenschappen worden conform Proef 62 bepaald middels het uitvoeren van vierpuntsbuigproeven (4PB) bij voorgeschreven proefcondities op prismatische asfaltbalken. Het resultaat van een 4PB proef is een aantal lastherhalingen tot het bereiken van een uniform faalcriterium; het aantal lastherhalingen bij de halvering van de gemeten initiële stijfheid ($N_{0.5G^*}$). De vermoeiingsrelatie wordt geconstrueerd door $N_{0.5G^*}$ uit te zetten tegen de opgelegde rek. Het verloop van de benodigde kracht om de verplaatsingen op te leggen, wordt in dit resultaat niet beschouwd.

Er zijn directe praktische aanleidingen om de huidige methode ter beoordeling van de vermoeiing, die in feite teruggaat tot Wöhler (1867), onvoldoende te noemen. De mechanische parameters stijfheid en rek bij het bepaalde faalcriterium zijn niet representatief voor de daadwerkelijke ontwikkeling van schade. De schadeontwikkeling wordt zodoende wel uniform, maar niet objectief beoordeeld. Zo blijkt in de praktijk dat:

- De capaciteit van asfalt met PMBs wordt onderschat.
- Het gedrag van asfaltmengsels met onconventionele bouwstoffen en additieven ontwikkeld in het kader van de toenemende circulariteit ontoereikend worden beschreven.
- Functioneel verifiëren van asfaltverhardingen niet mogelijk is, omdat het gemeten materiaalgedrag in sterke mate afhankelijk is van de gekozen proefopstelling.

Met name door de veranderende contractuele voorwaarden tussen opdrachtgever en opdrachtnemer zijn deze punten ter discussie komen te staan. Het merendeel van de actuele tekortkomingen van de methode is terug te leiden naar geaccepteerde beperkingen bij de implementatie ervan. Deze beperkingen zijn gekozen om proefresultaten vergelijkbaar te maken ten behoeve van de uniforme waardering van materialen, zowel voor het ontwerp als voor de verificatie van eisen. De beperkingen betreffen onder andere:

- De representativiteit voor het actuele, praktische materiaalgedrag voor ontwerp en verificatie na realisatie van materialen en constructies.
- De moeilijkheden om dit type proefstukken te verkrijgen, met name uit constructies.
- De vereenvoudigingen in theoretische achtergronden van materialen en mechanica ten opzichte van het werkelijke gedrag.
- De vergelijkbaarheid met andere proefopstellingen, hetgeen de vraag impliceert in welke mate de eigenschappen van materiaal en proefopstelling verweven zijn.

Om hierin verbetering te brengen is nadere bezinning op de grondslagen nodig. Daarnaast is het vanuit het oogpunt van fundamenteel onderzoek wenselijk de veelheid van verschijnselen terug te brengen tot minder, meeromvattende en beter verklarende begrippen. Ook is het vanuit het oogpunt van economie uiteraard onwenselijk de kracht en de verplaatsing tijdens een proef

wel te meten, maar hier vervolgens geen zinvolle informatie uit te halen. Deze invalshoeken lopen parallel.

Op theoretische gronden is er veel voor te zeggen vermoeïng in termen van energie te beschrijven. Hierbij wordt de opgelegde kracht tijdens de proef wel in het resultaat betrokken. Van het energiebeginsel zijn al sinds decennia vele vormen gepubliceerd. De laatste jaren zijn er ontwikkelingen verschenen die kunnen bijdragen tot beter inzicht. Hiernaar worden momenteel studie en experimenteel onderzoek verricht. Naast theoretische argumenten zijn er ook praktische ervaringen dat door de betrekking van de extra informatie (van zowel het kracht- als vervormingssignaal) materiaalgedrag gemeten bij verschillende belastingvormen en in verscheidene proefopstellingen vergelijkbaar zijn [20,23,24]. De mogelijkheid om vermoeïngsgedrag te beoordelen onafhankelijk van de gebruikte proefopstelling faciliteert zo het Functioneel Verifiëren van asfaltverhardingen.

1.2 Mechanica van constructies en proefopstellingen

Het ontwerp van constructies wordt in de regel opgesplitst in drie delen:

- Evenwicht van krachten
- Geometrie, meestal in de vorm van samenhang (compatibiliteit)
- Materiaaleigenschappen (constitutie)

De berekening van krachten en spanningen enerzijds en de geometrie en rekken anderzijds zijn het terrein van de mechanica. De schakel tussen spanningen en rekken, de constitutieve eigenschappen, is een materiaalkundige zaak. Materiaaleigenschappen die voor de wegenbouwpraktijk als het meest relevant worden beschouwd zijn de modulus (vaak aangeduid als elasticiteits- of stijfheidsmodulus) en de bezwijkcriteria; sterkte en weerstand tegen vermoeïng. De genoemde eigenschappen zijn in de huidige methodiek voor het ontwerpen van asfaltverhardingen directe input.

De elasticiteitsmodulus staat in deze voor de effectiviteit waarmee het betreffende materiaal bijdraagt aan de spreiding van verkeersbelasting zonder daarbij degradatie te ondergaan. De elasticiteitsmodulus is daarom een maat voor de draagkracht. De sterkte van een materiaal kan worden omschreven als de uiterste belastinggrens. Belastingen rondom deze grens kunnen en zullen binnen een kort tijdsbestek of zelfs instantaan leiden tot aanzienlijk verlies van functie óf falen. Falen van een constructie als gevolg van een overschrijding van de sterkte kan worden voorkomen door adequaat te dimensioneren. Immers, door de laagdikte af te stemmen op de modulus kan een situatie worden gecreëerd waarin de uiterste belastinggrens nooit wordt bereikt. Echter, ook belastingen ver onder de maximaal toelaatbare belasting leiden tot materiaaldegradatie en (pas) na een relatief hoog aantal lastherhalingen tot bezwijken. Dit type materiaalgedrag wordt ook wel vermoeïng genoemd. De levensduur van een verharding kan daarom worden geoptimaliseerd op basis van de vermoeïngseigenschappen van het toegepaste materiaal.

Een nauwkeurige, maar voornamelijk een eenduidige en betrouwbare bepaling van deze materiaaleigenschappen is daarom noodzakelijk. Gegeven de bovenstaande ontwerpfilosofie, mogen de materiaaleigenschappen niet afhangen van de constructie waarin de materialen worden toegepast of onderzocht. Nu leveren de bepaling van de stijfheidsmodulus en van de absolute sterkte in het laboratorium geen tot weinig moeilijkheden. De stijfheidsmodulus vanwege de relatief lage, niet-destructieve aangebrachte excitatie en de absolute sterkte

vanwege het statische karakter van de proef. De bepaling van de vermoeiingsweerstand van asfalt in het laboratorium daarentegen is ontvankelijker voor variatie.

Er zijn vele manieren in omloop om van eenzelfde materiaal onder gelijke omgevingstoestanden de vermoeiingseigenschappen te meten en de resultaten zijn vaak verschillend. In België en Frankrijk wordt gebruik gemaakt van verplaatsinggestuurde 2PB proeven en in Duitsland ook van Cyclische ITT voor de bepaling van de vermoeiingsweerstand.

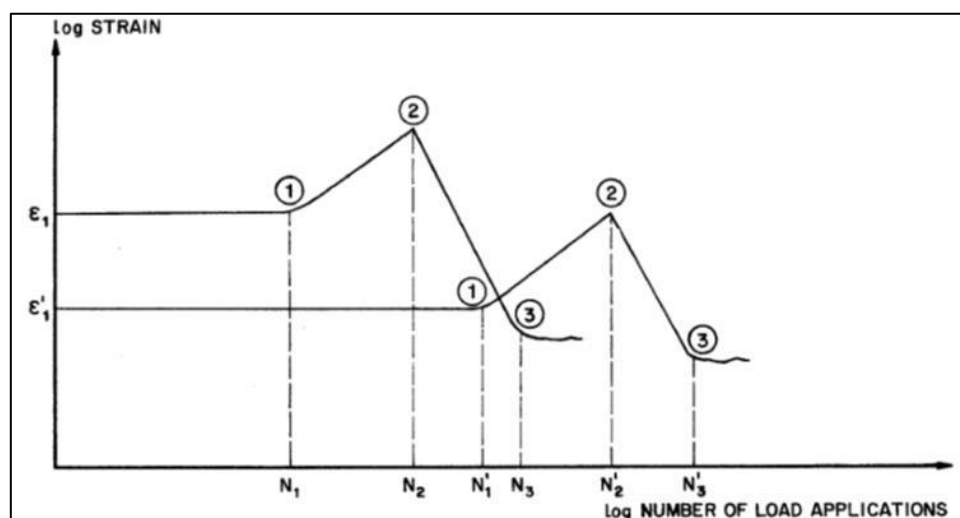
1.3 Vermoeiing van materialen

De beschrijving van vermoeiingsgedrag door enkel het aantal herhalingen en de grootte van een excitatie zonder het verloop ervan te beschouwen, heeft zijn oorsprong in de tijd van de eerste stoommachines vooral voor railtransport, waarbij asbreuk een belangrijke oorzaak van ongevallen was. De naam van Wöhler is nog steeds verbonden aan de weergave van vermoeiingslijnen bij asfaltonderzoek; zij het dat hij ze presenteerde in de vorm van een exponentiële relatie $\lg(N) - \sigma$ vergeleken met de machtsrelatie $\lg(\epsilon) - \lg(N)$, die nu bij het asfaltonderzoek gebruikelijk is.

Deze manier van vermoeiingsanalyse bevat impliciet de aanname dat het gedrag van een materiaal gedurende een (gestandaardiseerde) vermoeiingsproef niet onderscheidend is voor het gedrag ervan. En dat de degradatiestaat ter hoogte van $N_{0.5G^*}$ maatgevend is voor de prestatie van het materiaal. Echter, het mechanisme achter vermoeiing wordt vaak beschreven als een drie-fasen systeem:

1. Dislocatie | Initiatie van microscheuren
2. De vorming van een scheurtip | Ontwikkeling en agglomeratie van diffuse microscheuren
3. Discrete macroscheur | Ontstaan en ontwikkeling van (een) macroscheur(en)

Afhankelijk van materiaal, proefstukafmetingen en proefcondities treden enkel de eerste, de eerste en de tweede of alle drie fasen op. Scheurgroei vereist uiteraard de derde fase en is dus niet in alle omstandigheden relevant. De overgang van de ene naar de andere fase en de doorlooptijd van de fasen is niet voor alle materialen eenduidig gebonden aan de degradatie van de stijfheidsmodulus. De huidige wijze van meting van vermoeiing lijkt min of meer arbitrair (halvering van de beginstijfheid) ergens in fase twee te eindigen.



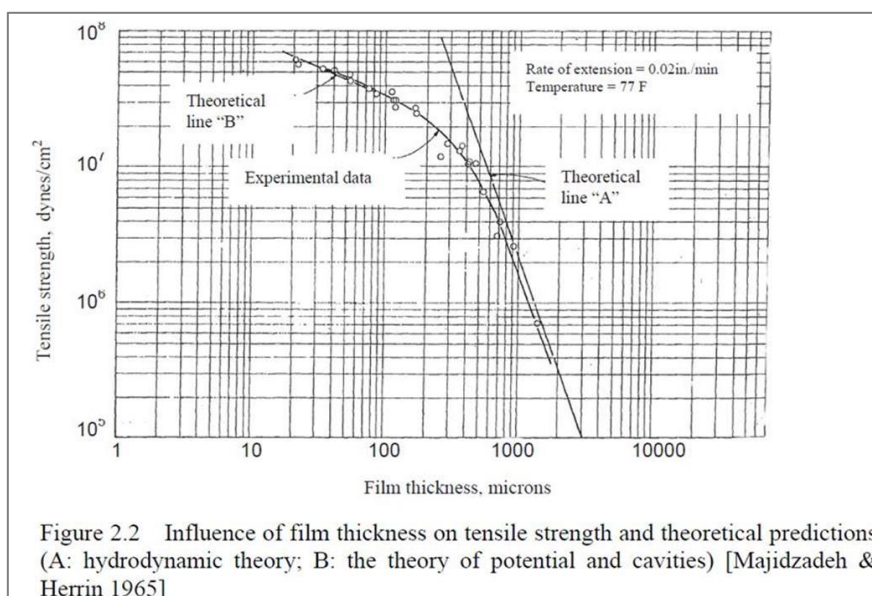
Figuur 1.1: Drie fasen van vermoeiing zoals gevisualiseerd door Van Dijk, 1975

1.4 Visco-elasticiteit en haar fenomenen

Het drie fasen vermoeiingssysteem dat in bovenstaande paragraaf is omschreven is van toepassing op alle materialen. Ten opzichte van andere bouwmaterialen, zoals staal en beton, verschilt het gedrag van asfalt, vanwege de visco-elastische aard van het bitumineuze bindmiddel. Visco-elastisch materiaalgedrag kan worden beschreven als gedrag dat zich bevindt tussen de 'limietstaten' Newtons gedrag (viskeus) en Hooks gedrag (elastisch). Kenmerkend voor het gedrag van visco-elastische materialen is de sterke afhankelijkheid van de tijd (excitatie) en de omstandigheden (temperatuur). Anders gezegd, de relatie tussen spanning en rek is afhankelijk van tijd en temperatuur. Tijdens (langdurige) cyclische belasting vertonen deze materialen hysteresis, spanningsrelaxatie en kruip.

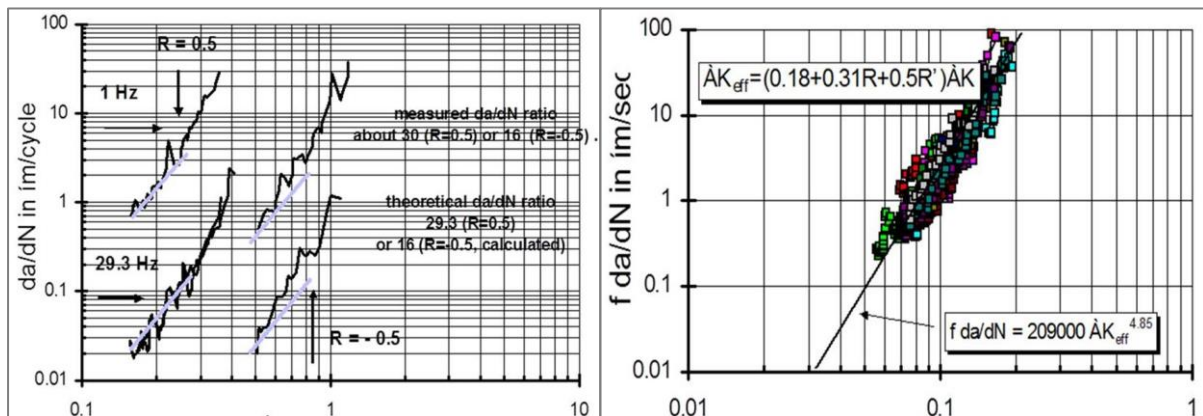
Bitumen en daarmee asfalt, zijn geclassificeerd als reologisch simpele materialen. Daarom mag het bij belasting voldoende kleine rek, binnen het Lineair Visco-Elastisch gebied (LVE), mag worden geanalyseerd volgens het Tijd-Temperatuur Superpositie Principe. Dit principe stelt dat de invloed van een temperatuursverandering op de kruipcurve van het materiaal een verschuiving is langs de logaritmische tijdas bij gelijkblijvende vorm van de curve. Ofwel, het deformatiemechanisme is niet temperatuursafhankelijk, maar de snelheid waarmee het mechanisme voortbeweegt wel. Tijd en temperatuur zijn om deze reden uitwisselbaar. De gangbare techniek is proeven zo uit te voeren dat er een gedeeltelijke overlap in respons tussen verschillende excitaties of omstandigheden is. Vervolgens kunnen deze delen op de overlappen aan elkaar worden gepast tot een volledig beeld. Deze techniek wordt vaak aangeduid als het vormen van een mastercurve. Proeven bij één enkele proefconditie dekken immers slechts een deel van het materiaalgedrag.

Het ontstaan van schademechanismen en lokale schade komt veelal voor buiten het LVE. Het Tijd-Temperatuur Superpositie Principe is niet meer van toepassing. De deformatiemechanismen zijn niet meer gelijk voor alle temperaturen en frequentie en temperatuur zijn niet meer uitwisselbaar. Een eerste belangrijk onderscheid in mechanisch materiaalgedrag is dat tussen vloeit met insnoering en breuk. In figuur 1.2 is te zien dat bij dikke bitumenfilms het eerste en bij dunne films, waarbij insnoering verhinderd wordt, het tweede mechanisme optreedt. Het mechanisme is tijd- en temperatuurafhankelijk. Figuur 1.3 laat de afhankelijkheid van belastingtypen en de reductie tot één vergelijking bij scheurgroei zien.



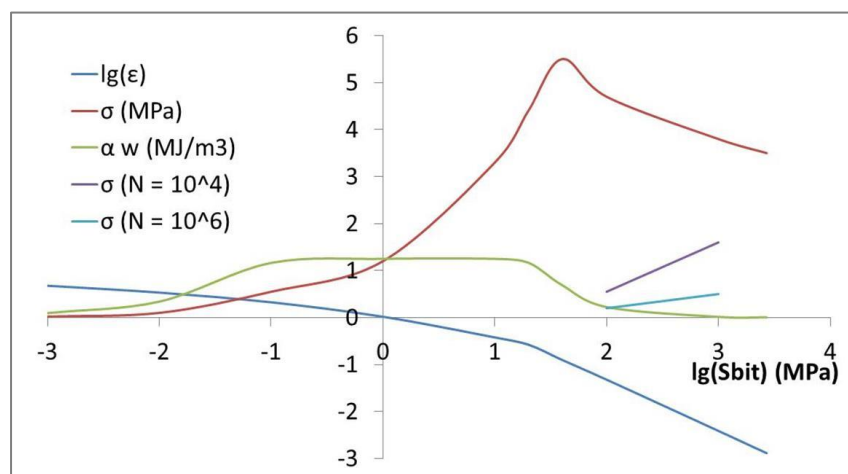
Figuur 1.2: Effect van visco-elasticiteit op mechanisch materiaalgedrag

Hieruit volgt dat het mogelijk is het gedrag buiten het LVE te modelleren. De koppeling met het werkelijke gedrag in weg of de formulering van een eenduidige schadeformule blijkt echter moeilijk. Overigens vertoont blijkaar de snelheid van de scheurgroei nog wel enige lineariteit.



Figuur 1.3: Scheurgroei (horizontale as ΔK [MPa/m²]) [Zuidema, Schulte, Krans, Tolman 1998, niet gepubliceerde figuren]

Zoals eerder genoemd vertonen visco-elastische materialen hysteresis, zichtbaar in de spanning-rek curve tijdens belasting. Dat is, de respons van het materiaal volgt niet direct na aanbrengen van de belasting. Dit is het gevolg van viscositeit. Aangezien viscositeit kan worden omschreven als de weerstand tegen plastische vervorming, verliest een visco-elastisch materiaal energie gedurende belasting. *Visco-elastische materialen dissiperen energie*. Klassiek is het werk van het voormalige KSLA (Koninklijke Shell Laboratorium Amsterdam). Figuur 1.4 is samengesteld uit [Heukelom 1966]. Een bijzonder kenmerk van de KSLA-aanpak is de materiaalparameter S_{bit} , een functie van bitumensoort, belastingtijd en temperatuur. De onderliggende data is verkregen uit een breed scala aan proefopstellingen en -condities en voor vele bitumensoorten. Uit de resulterende spanningen en rekken en de suggestie dat zij uit de metingen zijn afgeleid onder de aanname van lineair gedrag, is suggestief een lijn van gedissipeerde energie toegevoegd.

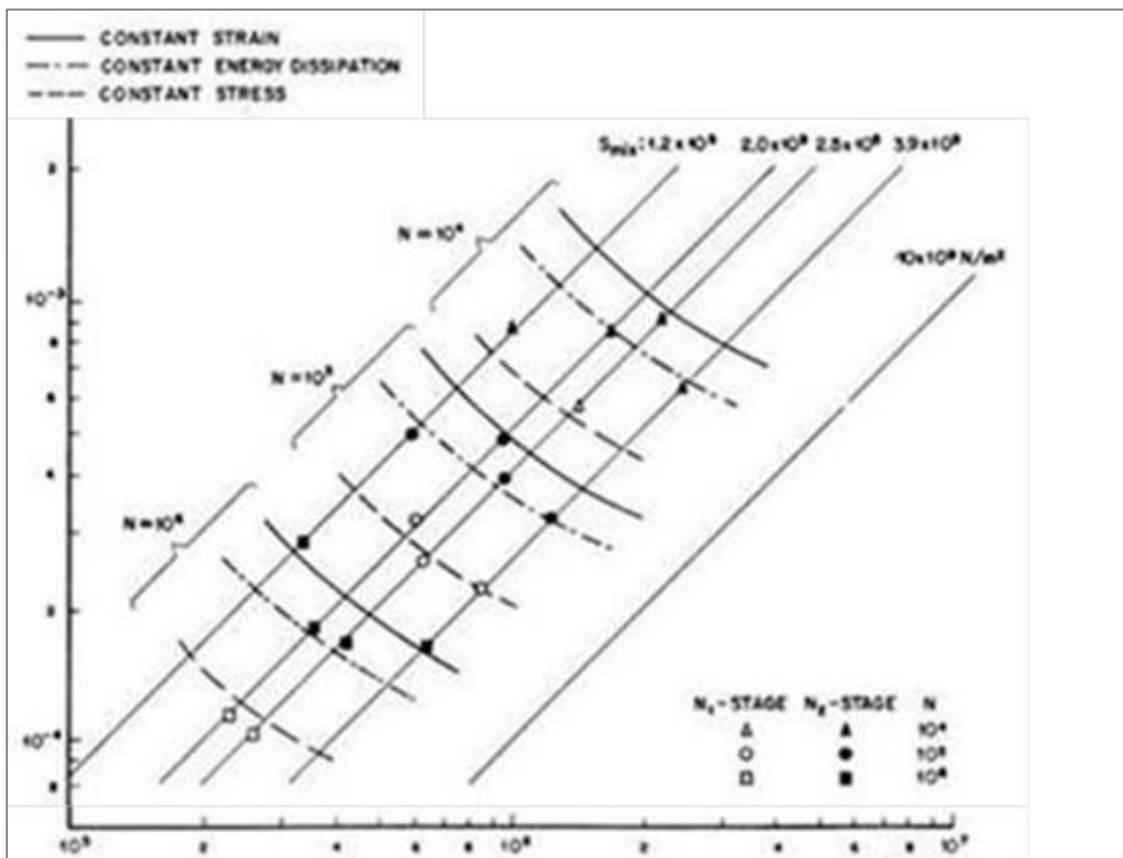


Figuur 1.4: Mogelijke beschrijving van gedissipeerde energie in bitumen [Heukelom 1966, bewerking Tolman]

Opmerkelijk is het punt bij $S_{bit} = 40$ MPa/ $\log(S_{bit}) = 1.6$, dat als een (geleidelijke) overgang tussen vloeï en breuk gezien kan worden. Kennelijk is er aanzienlijk meer energie benodigd voor de taaiere vloeï en vervorming dan voor de brossere breuk.

Vermoeïng doorloopt dus voor alle materialen hetzelfde drie fasen systeem op macroniveau. Dit fasensysteem wordt in de huidige analysemethodiek beschreven door de koppeling aan mechanische variabelen gemeten aan deze macroschaal. Echter, wanneer de totstandkoming van macroschade wordt beschouwd, is het duidelijk dat deze lokaal ontstaat op mesoschaal. De mechanismen die op deze schaal plaatsvinden zijn sterk afhankelijk van het type materiaal, maar het gedrag van de materialen op deze schaal is vergelijkbaar. In de zin dat alle materialen, in welke mate ook, een vorm van elastisch gedrag, vloeï, plastische deformatie vertonen. De mesoscopische parameters zouden daarom beschreven moeten kunnen worden met energiemechanismen die elkaar sterk gelijken zonder de microscopische complexiteiten daarbij te beschouwen.

In figuur 1.5 zijn vermoeïngsduren uit proeven op asfalt uitgezet in het algemeen bekende σ - ϵ -vlak, zij het hier met de assen verwisseld en op log-schaal, weergegeven. Er blijkt een verschil tussen duren afhankelijk van het type excitatie – kracht- of verplaatsingsturing. Door de gedissipeerde energie als excitatie te kiezen vallen beide samen.



Figuur 1.5: ϵ - σ diagram (resp. horizontale en verticale assen) [Van Dijk 1975]

2. **Energieconcepten & materiaalvermoeiing**

2.1 **Energie(dissipatie) en schadevorming**

Energie is de capaciteit van een systeem om warmte, licht of beweging te produceren. Energie wordt ook aangeduid als de mogelijkheid om arbeid te verrichten, of ruimer: de mogelijkheid om een verandering te bewerkstelligen. Energie kan ook gezien worden als essentiële natuurlijke hulpbron, aangezien ze geconsumeerd, geproduceerd en gebruikt wordt door levende wezens.

Energie is een grootheid die in vele vormen kan optreden. De energie die aan een proefstuk wordt toegevoegd of daaruit vrijkomt, bestaat dus uit onderdelen die onderscheiden moeten worden. Enkel het bestanddeel dat schade veroorzaakt, moet voor vermoeiing worden beschouwd. In eenvoudige termen zijn de belangrijkste voor dit onderwerp:

- arbeid, de integraal van een kracht over een afgelegde weg
- schade, de vorming van nieuw oppervlak (bijv. vorming van een scheur, strekken van een oppervlak)
- herrangschikking van de interne structuur (dislocaties), wat m.n. bij viskeuze componenten van belang kan zijn
- warmte, de moleculaire beweging van het materiaal

De extern toegevoerde arbeid minus eventueel door het proefstuk geleverde arbeid (terugvering) wordt door de vijzel geleverd (de uitwendige arbeid is kracht maal verplaatsing van de vijzel). De interne arbeid is voor de punten van een proefstuk waar krachten aangrijpen en verplaatsingen gemeten worden, is redelijk goed te bepalen onder de aanname van een mechanicamodel van het proefstuk (de interne arbeid). In de regel worden beide gelijk gesteld. Schade is in de regel niet afzonderlijk direct te meten. Een uitzondering is de groei van een scheur, maar zoals gezegd is dat voor vermoeiing meestal geen relevant aspect. De interne structuur is eveneens niet op praktische wijze rechtstreeks en afzonderlijk te bepalen. Het is bekend dat in een vermoeiingsproef in de regel vrij aanzienlijke warmteproductie is, maar ook zij is lastig te bepalen. Het tweede orde effect is dat de stijfheid van visco-elastische materialen temperatuurafhankelijk is. Aangezien ook de vermoeiingsduur via stijfheid bepaald wordt, is dit een bedenkelijk aspect.

Omdat figuur 1.5 gebaseerd is op een aantal verschillende proefopstellingen en energie vrij constant lijkt voor de twee onderscheiden fundamentele mechanismen, lijkt een energieaanpak een vruchtbaar uitgangspunt. In eerdere onderzoeken zijn drie vormen aan te treffen waarmee de toegevoerde energie beschreven wordt:

- de totale energie per cyclus (het oppervlak van de Lissajous figuur): alle energie wordt omgezet in schade
- de verandering van de totale energie ten opzichte van een referentie,: enkel de mindere energie is omgezet in schade
- totale energie: er wordt geen energie geleverd door het proefstuk (dit is bijvoorbeeld het geval als kruip dominant is)

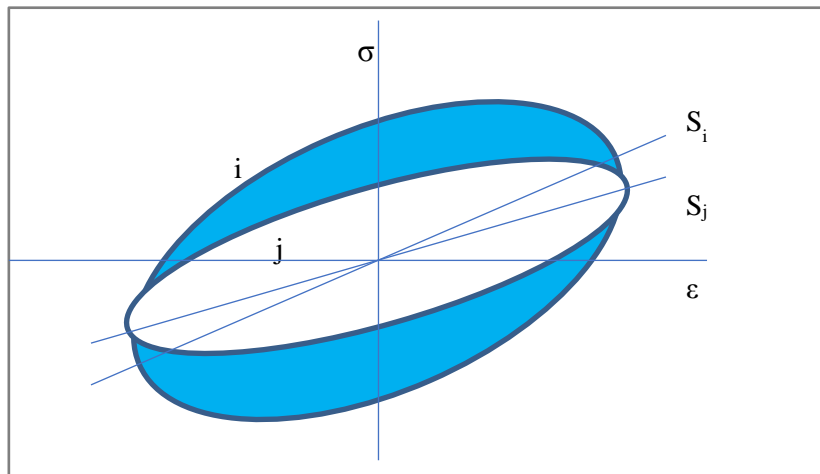
De energie per cyclus wordt in alle vormen eenvoudig berekend als:

$$w_i = \pi \sigma_i \varepsilon_i \sin\phi_i$$

σ_i spanningsamplitude

ε_i rekamplitude

ϕ_i faseverschuiving spanning - rek



Figuur 2.2: Definitieschets; de DEC(verandering van de energie) is blauw aangegeven

De stijfheid wordt berekend als de grootte van de complexe modulus

$$S = |S_*| = \left| \frac{\sigma}{\varepsilon} \right|$$

2.2 Energieconcepten voor de analyse van asfaltvermoeiing

Er zijn in de loop van de tijd twee richtingen voorstellen gedaan tot een fundamenteelere aanpak. De ene is gebaseerd op het scheurgroei-principe, het andere op het energieprincipe. Getracht is verder de schadebeginselen verder te onderbouwen met o.a. de CDM *Continuum Damage Mechanics* (kracht, beschrijving in o.a. [Kotte, Tolman 1993]) en KRT *Kinetic Rate Theory* (energie, beschrijving in o.a. [Jacobs 1995]).

Daaruit zijn op basis van verschillende uitgangspunten en aannames veel analysemethoden af te leiden. In dit artikel worden twee veronderstellingen beschouwd:

- alle arbeid over het traject van stabiele schadevorming is evenredig met de energie die aan schade toekomt (Van Dijk en Visser, Tolman en Kotte)
- enkel de verandering van arbeid over het traject van stabiele schadevorming komt toe aan schade (Shen en Carpenter)

Het criterium voor de beoordeling van deze veronderstellingen is het verband tussen de ingangsvariabele (arbeid) en de uitgangsvariabele (vermoeiingsduur).

Tabel 2.1: overzicht van vermoeiingstheorieën

| | DIFFUSE, (LOKAAL) CONTINUE VERDEELDE SCHADE | DISCRETE SCHEUR, (INCL. SCHEURTIPZONE MET VERDEELDE SCHEUREN OF PLASTISCHE VERVORMING) |
|---------|---|--|
| KRACHT | Wöhler | K (SIF - <i>Stress Intensity Factor</i>), o.a. Paris en Schapery |
| ENERGIE | o.a. Van Dijk, Carpenter | G (Griffith), J-integraal |

2.2.1 Kinetic Rate Theory

De ene is de Kinetic Rate Theory, welke is opgezet vanuit een klassiek atoommodel a la Dalton en Avogadro (1811 / 1865) en als eerste is de naam van Arrhenius (1889) daaraan verbonden voor het verloop van chemische processen. Eyringh (1935) en velen na hem hebben deze toepassing uitgebreid naar dislocaties in vaste stoffen en andere verschijnselen. In sterk vereenvoudigde vorm is de vergelijking [o.a. Jacobs 1995]

$$\frac{dD}{dt} = - \left(\frac{kT}{h} \right) D \exp \left(\frac{1}{kT} \left(\frac{W}{D} - Q \right) \right)$$

k = R/A constante van Boltzmann (1,38 10⁻²³ J/K) 1877 / 1900

R moleculaire gasconstante 8,31 J mol⁻¹ K⁻¹

A constante van Avogadro 6,02 10²³ mol⁻¹

h constante van Plack (6,6 10⁻³³ Js)

T absolute tempratuur (K)

Q activeringsenergie (het modale energieniveau van de moleculaire bindingen is Q_m = kT)

W toegevoerde energie, arbeid (J)

D schade

Bij verdere aannamen, waaronder constante kracht, kan worden afgeleid:

- De vergelijking van Wöhler in termen van energie:

$$\lg(t) = A + BW$$

- Het model van Shen en Carpenter volgt hieruit als:

$$W = D \ \& \ RDEC = \frac{1}{D} \frac{dD}{dt} = - \left(\frac{kT}{h} \right)$$

Dit is een constante die Shen en Carpenter PV (plateauvalue) noemen. Merk op dat door het gebruik van dw/dt / w het volume dat beschouwd wordt geëlimineerd wordt. Dat zal de spreiding in de resultaten verminderen. Hiernaar is nog geen onderzoek gevonden.

De RDEC is gedefinieerd als $r = \frac{dw_i}{dt} \frac{1}{w_i}$

En wordt in publicaties meestal in discrete vorm, en niet altijd juist, gepresenteerd. Een mogelijk schema voor punt i met als naastliggende meetpunten $i-j$ en $i+k$ en n het aantal cycli met periode Δt :

$$r = \frac{w_{i-j} - w_{i+k}}{n_{i-j} - n_{i+k}} \frac{1}{\Delta t} \frac{1}{w_i}$$

2.2.2 Continuum Damage Theorie

De andere is de Continuum Damage Theory (in energie termen), een machtswet waaraan de naam Kachanov verbonden is.

$$\frac{dD}{dt} = C \left(\frac{\sigma}{\sigma_c} \right)^n$$

Voor een constante kracht kan afgeleid worden

$$W = W_f \left(1 - \left(1 - \frac{t}{t_f} \right)^{\frac{1}{n+1}} \right)$$

De afgeleiden houden dezelfde vorm. Voor bovenstaande toepassing zijn de eerste twee afgeleiden van belang.

$$\frac{dW}{dt} = \frac{1}{n+1} \frac{W_f}{t_f} \left(1 - \frac{t}{t_f} \right)^{\frac{-n}{n+1}}$$

$$\frac{d^2W}{dt^2} = \frac{-n}{(n+1)^2} \frac{W_f}{t_f^2} \left(1 - \frac{t}{t_f} \right)^{\frac{-2n-1}{n+1}}$$

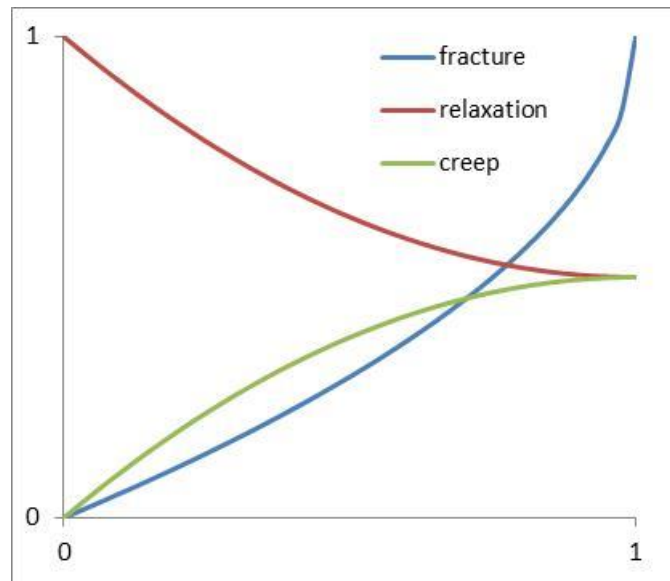
$$\left. \frac{dW}{dt} \right|_0 = \frac{1}{n+1} \frac{W_f}{t_f}$$

Hierbij is $n > 1$ en is voor asfalt $n = 3 - 5$ een gebruikelijke exponent in vermoeiingsrelaties. De laatste vergelijking is van belang omdat hiermee het verband tussen de exponenten in de vergelijkingen van [Van Dijk 1977] ($w_f \sim t_f^{0,66}$) en [Tolman, Kotte 19xx] ($dw/dt \sim t_f^{-1,36}$) kan worden gelegd. Hierbij is

$$w_i = \left. \frac{dW}{dt} \right|_i$$

In het algemeen is een machtsrelatie zeer prettig te gebruiken. Zij is flexibel en schaalinvariant. Het eerste is vooral een praktisch punt. Het tweede staat toe dat uiteenlopende verschijnselen gelijkvormig beschreven kunnen worden. De drie basisvormen van een machtswet met een mogelijke interpretatie zijn in figuur 2.3 weergegeven. Enige conclusies van [Van Dijk en Visser 1977] l.c. [Jacobs 1995] zijn dat de energierelatie onafhankelijk is van:

- type test (2PB en 3PB)
- belastingsignaal, m.n. kracht- of verplaatsingcontrole, frequentie (10–50Hz) en rustperioden
- temperatuur (10 – 40 C)
- bitumensoort (40/50 en 80/100)



Figuur 2.3: Basisvormen machtswet en mogelijke interpretaties

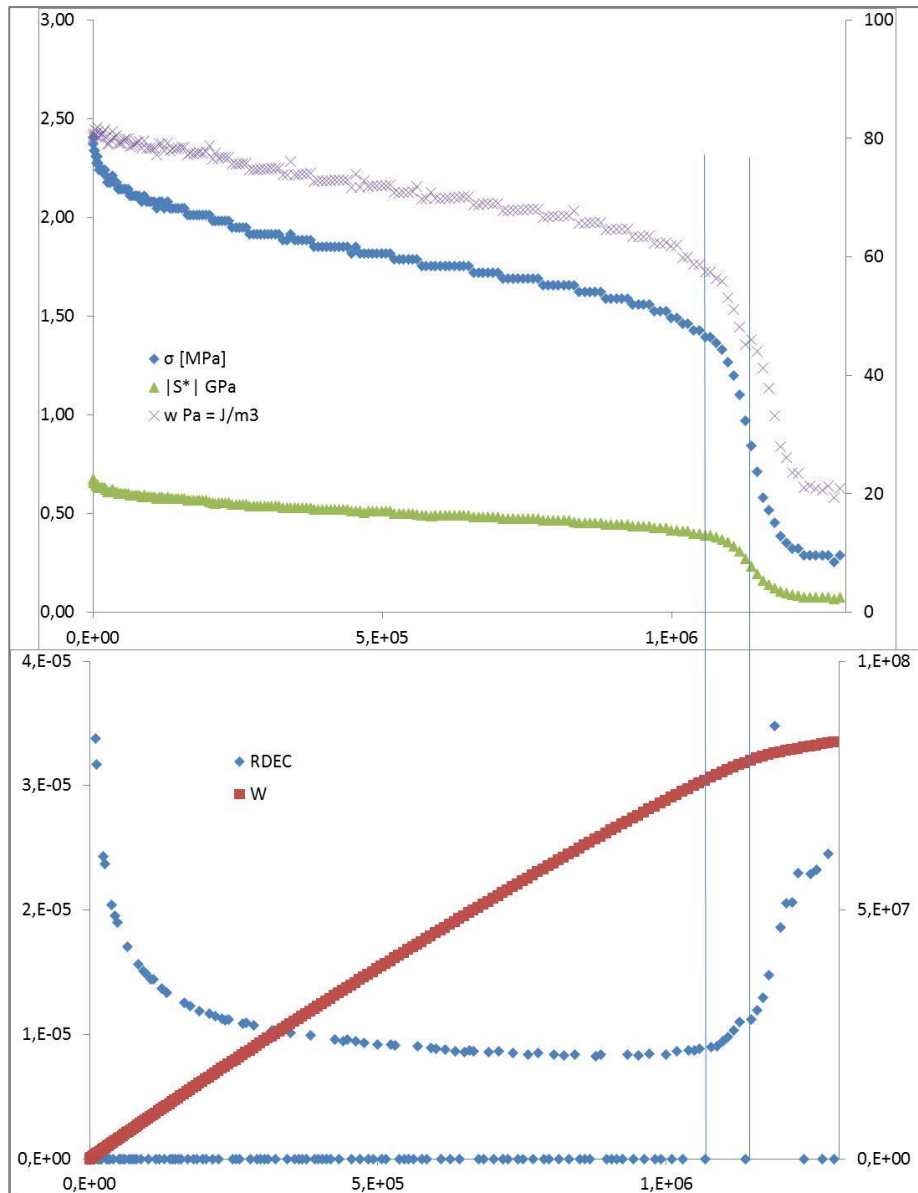
2.3 Criterium einde levensduur

De vermoeiingsduur lijkt vrij duidelijk bij proeven waarbij de kracht wordt voorgeschreven (zgn. krachtgestuurde proeven) i.p.v. via terugkoppeling van een voorgeschreven verplaatsing (zgn. verplaatsingsgestuurde proeven). Na het bereiken van dit punt valt de kracht terug tot 0, zie ook figuur 2.4. Bij verplaatsingsgestuurde proeven is het criterium arbitrair. Voorbeelden zijn:

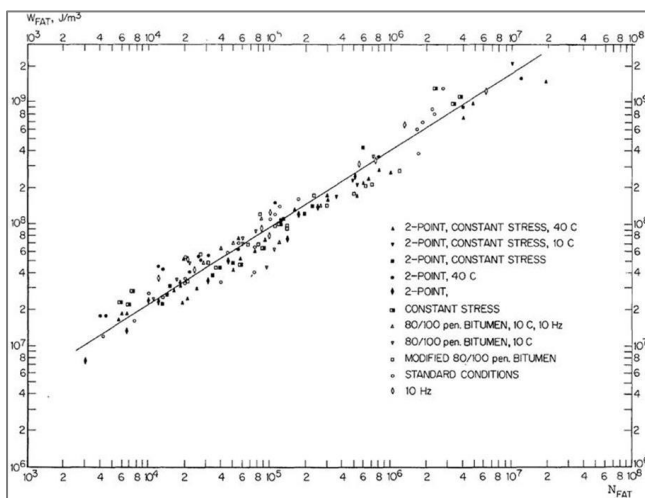
- vaak wordt een halvering van de beginstijfheid of de initiële arbeid gekozen ($N_{f, \text{macro}}$)
- bij de methode van de RDEC is er een punt waarop de constante waarde (RDEC – PV, de zgn. plateauwaarde bereikt wordt); dit punt wordt wel aangeduid met $N_{f, \text{micro}}$

Het verloop van de spanning in het kritieke punt van een 4PB proef, de stijfheid, de toegevoerde energie per cyclus en energieën onder punt 1 en 2 zijn weergegeven in figuur 2.4. De beide genoemde criteria zijn aangegeven met verticale lijnen. factor verschillen, m.a.w. de vermoeiinglijnen lopen parallel (op log-log schaal, zie ook de opmerking over schaal-invariantie in *paragraaf 2.4*). [Van Dijk 1975] stelde drie verschillende duren voor, zie figuur 1.1 en suggereerde dat ze een [Van Dijk 1975] vond een relatie voor de totale toegevoegde energie op asfaltbalken, figuur 2.5 en 2.6. [Mo 2009] vond soortgelijke verbanden voor mortels, figuur 2.7. Karakteristiek zijn:

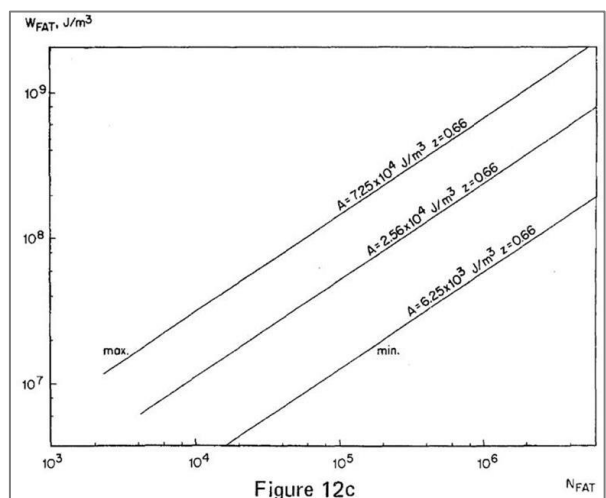
- De gelijke hellingen (ca. 0,63-0,66) voor de totale energie (een verklaring voor deze waarde is niet gegeven)
- Het samenvallen van de verschillende proeven en omstandigheden op een lijn
- Verschillen tussen materiaalgroepen, figuur 9 (de constanten in deze machtsrelaties zijn voor de modellering van minder belang en worden daarom niet beschouwd)
- Belangrijk voor het vervolg zijn de exponenten 0,66 , -0,34 en -1,34



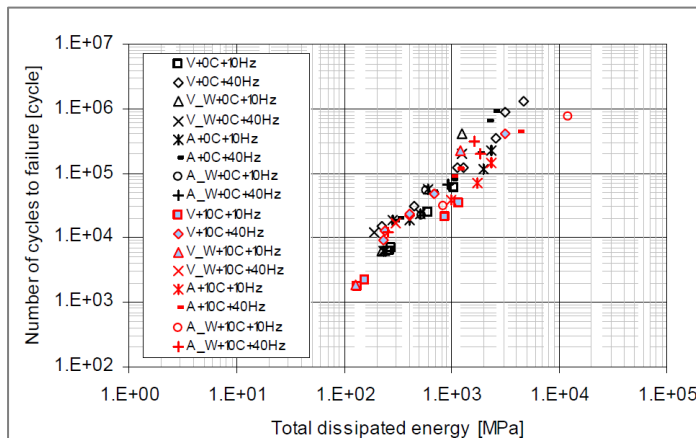
Figuur 2.4: Verloop van kenmerkende grootheden gedurende een 4PB proef



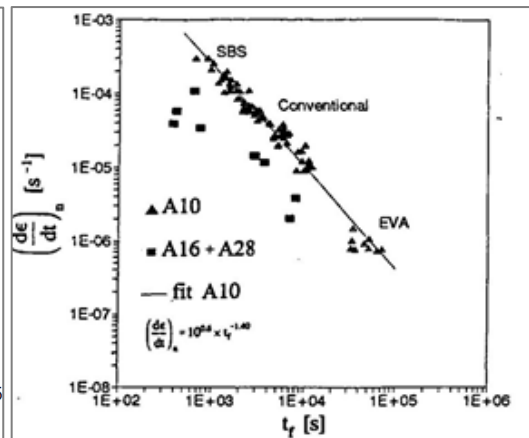
Figuur 2.5: Vermoeingscurve voor een verscheidenheid aan proeven [Van Dijk 1975], exponent = 0,66



Figuur 2.6: Classificering van mengsels m.b.t. vermoeing [Van Dijk, Visser 1977]



Figuur 2.7: Vermoeingsproeven op mortel, totale gedissipeerde energie [Mo 2009] exponent 0,63



Figuur 2.8: rafelingstrekkproef op ZOAB [Tolman, Kotte 1993], exponent -1,40 (≈ -1,34)

Het lijkt erop dat de exponenten in alle drie beschouwingen met elkaar in overeenstemming zijn:

- 0,67 en is een empirische constante
- de gemiddelde energie per cyclus heeft een helling 1 kleiner dan 0,67; dat is ook het geval met de tijdsafgeleide van de totale energie, zie [Tolman, Kotte 1993]
- ingeval van statische belasting ($\sim \epsilon$) i.p.v. cyclische ($\sim \epsilon^2$) wordt de helling 2 kleiner; in [Tolman, Kotte 1993] is vooral deze statische component beschouwd (een interpretatie van statische belasting is dat alle energie opgeslagen wordt, terwijl bij cyclische belasting een deel van de toegevoerde energie weer vrij komt)
- de waarde van -1 bij de RDEC is een wiskundige constante (in figuur 12 -1,11, maar in de recentere literatuur wordt steeds een waarde dicht bij -1 gepresenteerd)

2.4 Dataregistratie en -bewerking

Waarschijnlijk heeft voor Wöhler's benadering meegespeeld dat voor het meten van de vervormingen niet enkel nauwkeurige, maar vooral snelle meetapparatuur en voor die tijd enorme dataopslag nodig waren. Met de huidige apparatuur speelt de nauwkeurigheid de hoofdrol. Een karakteristieke maat voor het meten van verplaatsingen is 1 μm . Bij buigopstellingen kunnen eenvoudig verplaatsingen van zo'n 50 μm worden opgelegd, waarmee dus redelijk onderscheidend gemeten kan worden. Bij andere opstellingen kan dat veel moeilijker liggen (bijvoorbeeld CY-ITT).

Een ander probleem is het punt waar op het proefstuk gemeten wordt. Lokale defecten spelen daarbij niet zo'n rol, mits steeds op hetzelfde punt gemeten wordt. De omrekening naar rekken via een mechanicamodel is kritischer. Hierbij moeten aannamen worden gedaan voor de constitutieve vergelijkingen. Meestal worden deze aannamen niet gecontroleerd.

Een derde punt is de verwerking van de data. In het algemeen gaat de voorkeur uit naar een statistische aanpak in de vorm van regressievergelijkingen waarvan niet enkel de parameters, maar ook de vorm wordt bepaald door een beste fit aan de data. Het uitgangspunt is dan dat enkel de feiten spreken en er geen subjectieve interpretatie wordt ingepast.

Hier kan veel tegenin worden gebracht. De proefopzet is al gebaseerd op gekozen uitgangspunten en de data is vrijwel altijd al bewerkt via het genoemde mechanicamodel. Juist

door deze vooronderstellingen consequent door te voeren tot een consequent model, wordt de willekeur vaak verminderd.

Het blijkt erg lastig een goede fitprocedure te vinden voor sterk niet-lineaire verbanden, vooral als zij asymptotisch verlopen, o.a. [Tolman, Kotte 1993]. Om een probleem op te lossen is het in de regel niet verstandig proberenderwijs verbanden te leggen. Een mogelijk efficiëntere weg is een hypothetisch model en daarbij proefopstellingen en excitaties te kiezen.

Vrijwel unaniem wordt tegenwoordig (door de beschikbaarheid van apparatuur) data geanalyseerd die niet vooraf gezuiverd is tot significante waarden. Zo'n zuivering vergt inzicht in het model en de nauwkeurigheid van de metingen. Het bedrijven van rekenwerk op de ruis van de signalen vindt zonder kritische beschouwing plaats, o.a. gezien de overmaat aan cijfers in gepresenteerde getallen bij proefuitslagen.

3. Functioneel Verifiëren met QRS-RDEC

3.1 De Ratio of Dissipated Energy Change (RDEC) benadering

In een enkele jaren geleden uitgevoerd onderzoek bij BKN zijn mastieken vervaardigd met hoog gemodificeerde bindmiddelen verouderd en beproefd op vermoeiing middels de DSR. De proeven zijn uitgevoerd in rekgestuurde modus en hadden een maximum toegestane duur van 24 uur. Als bezwijken voor die tijd niet was opgetreden, werd het mastiekkolommetje verwijderd en niet meer gebruikt voor onderzoek. De vermoeiingsrelaties van deze mastieken op basis van opgelegde rek en aantal lastherhalingen tot breuk én het aantal lastherhalingen bij een stijfheidsreductie van 50% leidden tot de volgende waarnemingen:

- 1 | Het was bij sommige temperaturen niet mogelijk hoge rekken op te leggen op sommige mastieken. De geconstrueerde vermoeiingsrelaties op basis van lagere opgelegde rekniveaus kunnen wel worden geëxtrapoleerd naar hogere rekken. Een vergelijking tussen mastieken op grond van dergelijke relaties is echter onzuiver.
- 2 | Door de rekken uit te zetten tegen het aantal lastherhalingen bij breuk werden vermoeiingsrelaties gevonden met een hogere betrouwbaarheid dan wanneer uitgezet tegen het aantal lastherhalingen bij een 50% stijfheidsreductie, het huidige criterium einde levensduur. Uit deze observatie is geconcludeerd dat voor PMBs de reductie van de stijfheid niet representatief is voor de daadwerkelijke degradatie van het proefstuk [24].
- 3 | Vanwege waarneming 1, is besloten enkel de proeven bij gelijke belasting te vergelijken. De resultaten waren niet onderscheidend genoeg. Onderzoek (relatief kostbaar) dat niet leidt tot onderscheidende factoren als input voor beslissingen betreffende bijvoorbeeld optimale mengselsamenstelling, is onwenselijk.

Om deze redenen is BKN gestart met een zoektocht naar alternatieve analysemethoden voor de vermoeiing van bitumineus gebonden materialen. De RDEC methode, in 2007 geïntroduceerd door Shen & Carpenter [8], gebaseerd op gedissipeerde energie bleek veelbelovend. Shen en Carpenter claimden namelijk het volgende:

- De vermoeiing van asfalt is direct afhankelijk van de verandering van de gedissipeerde energie en niet van de gedissipeerde energie zelf.

- Deze verandering is te vatten in de parameter RDEC door de gedissipeerde energie rekenkundig te bewerken. Achter de rekenkundige bewerking ligt de aanname dat de gedissipeerde energie in een cyclus afhankelijk is van de gedissipeerde energie in de vorige cyclus.
- De plateauwaarde, PV, is de typische waarde van RDEC bij een stijfheidsreductie van 50%, waarmee de fundamentele vermoeiingsweerstand van een materiaal kan worden beschreven onafhankelijk van mengseltype, belastingmodi en proefcondities.

Als de claims van Shen en Carpenter zouden blijken te kloppen dan maakt de vermoeiingsanalyse op basis van RDEC het mogelijk:

- Vermoeiing te beschrijven met een ‘objectieve’, fundamentele parameter en zo wellicht leiden tot een meer onderscheidende weergave van proefresultaten.
- Het bezwijkmoment van proefstukken op een eenduidige manier te karakteriseren, zodat de staat van degradatie van alle proefstukken bij het criterium einde levensduur vergelijkbaar is.
- Vermoeiingsrelaties van krachtgestuurde en verplaatsinggestuurde proeven direct met elkaar te vergelijken zijn en zo Functioneel Verifiëren van asfalt haalbaar te maken.

Echter, de theorie bevatte ook enkele stellingen die in twijfel getrokken werden. Shen en Carpenter houden namelijk ook vast aan $N_{F,50}$ als criterium einde levensduur, terwijl de onafhankelijkheid van het bezwijkmoment ten opzichte van de stijfheid reeds is aangetoond. En zij stellen dat de vermoeiingsrelatie uitgedrukt in PV een algemene uitdrukking levert voor alle asfaltmengsels.

3.2 Toepassing van RDEC voor Functioneel Verifiëren / QRS-RDEC¹

Vanwege de grote potentie van de S&C methode is onderzoek gedaan naar de validiteit van de claims van Shen en Carpenter. De resultaten van dit onderzoek hebben geleid tot aanpassing van enkele uitgangspunten, zoals opgesteld in [8], en een bijbehorende analysemethode [20,23, 24]. Na het doorvoeren van de aanpassingen is middels verificatieonderzoek aangetoond dat vermoeiingsanalyse met de QRS-RDEC methode de vermoeiingsrelatie betrouwbaarder beschrijft dan o.a. de conventionele methode gebaseerd op rek en stijfheid. Deze conclusie geldt voor zowel, 4PB als CY-ITT vermoeiingsproeven. Bovendien zijn de vermoeiingsrelaties van 4PB en CY-ITT van *hetzelfde* mengsel uit te drukken in één relatie met een relatief hoge betrouwbaarheid [23]. De QRS-RDEC analysemethode is zodoende reeds ingezet voor de ontwikkeling van functionele verificatie van asfalt. Voor een uitgebreider verslag van deze praktische toepassing wordt verwezen naar [24].

3.2.1 Verschuiving van het criterium einde levensduur | $N_{F,MICRO}$

Het criterium einde levensduur is een belangrijk punt van aandacht bij de analyse van destructieve proeven. Zoals eerder gesteld wordt degradatie veelal gekoppeld aan relevante veranderingen in ‘macroscopische’ eigenschappen, veelal de stijfheid. Naast het feit dat deze parameters geen goede weergave zijn van de werkelijke schade, vertonen parameters als stijfheid in de omgeving van het werkelijke bezwijkmoment, breuk, niet altijd een onderscheidend verloop. Op basis van deze grootheden is de bepaling van het werkelijke bezwijkmoment voor $N_{F,MICRO}$ dus niet op een eenduidige en objectieve manier uit te voeren.

¹ Quality, Research & Support (QRS) – Specialistische afdeling verhardingen binnen Boskalis Nederland

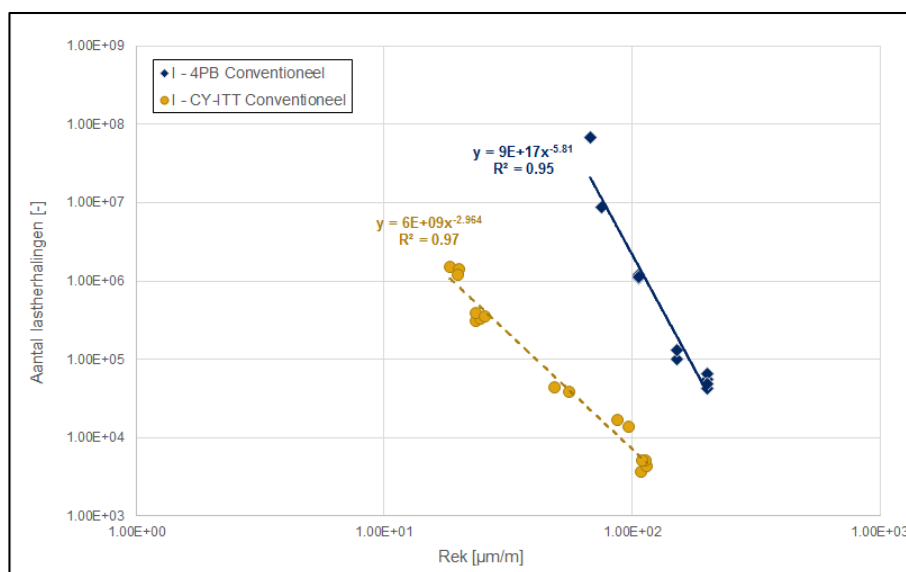
Het criterium $N_{F,50}$ wordt om deze reden nog vaak toegepast. Immers, het is relatief makkelijk te bepalen en vormt een ‘brug’ tussen de verschillende analysemethoden.

Omdat RDEC is gebaseerd op gedissipeerde energie is de parameter te omschrijven als een indicator voor schadegroei. Het badkuipvormige verloop van de RDEC bestaat uit drie delen die de drie fasen van vermoeiing, figuur 1.1, beschrijven in termen van schadegroei. Veranderingen in het verloop van de RDEC duiden op ofwel stabilisatie ofwel toename van de schade. De overgang van de tweede naar de derde fase, $N_{F,MICRO}$, wordt geassocieerd met het moment waarop de belasting ook op macroschaal de prestatie van het materiaal gaat beïnvloeden. De matrix van microscheuren is op één of meer locaties geagglomereerd tot een macroscheur. Elke volgende lastherhaling zal dus direct bijdragen aan de groei van de macroscheur en het totale bezwijken van het materiaal is op handen. Het vergelijken van vermoeiingsweerstand kan met $N_{F,MICRO}$ vanwege vergelijkbare degradatiestaten objectief worden uitgevoerd. $N_{F,MICRO}$ is dus een uniform faalcriterium onafhankelijk van mechanische parameters en daarom beter geschikt als criterium einde levensduur. Ook in literatuur [18] is aangegeven dat $N_{F,MICRO}$ wordt beschouwd als een zuiverder criterium einde levensduur, maar de bepaling ervan op basis van meetdata lastig is. Deze overgang wordt met RDEC, in tegenstelling tot andere energieconcepten, wel duidelijk zichtbaar gemaakt. Anders gesteld, ter hoogte van $N_{F,MICRO}$ ondergaat RDEC een duidelijk waarneembare verandering.

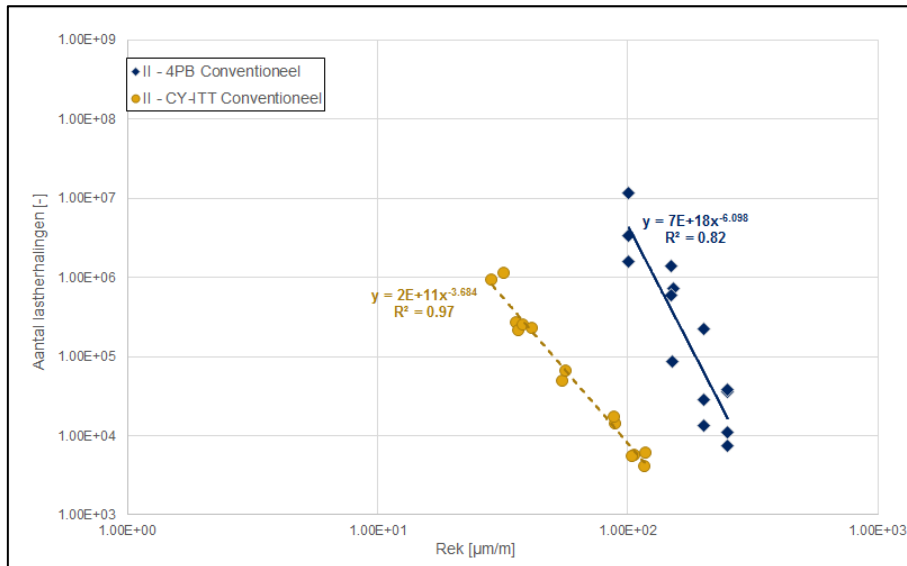
In samenwerking met Q-Consult Progress Partners (QCPP) is een analysemethodiek ontwikkeld, waarmee de PV- $N_{F,MICRO}$ relatie kan worden bepaald op grond van de gewijzigde uitgangspunten [23,24].

3.2.2 Resultaten verificatieonderzoek van de QRS-RDEC analysemethodiek

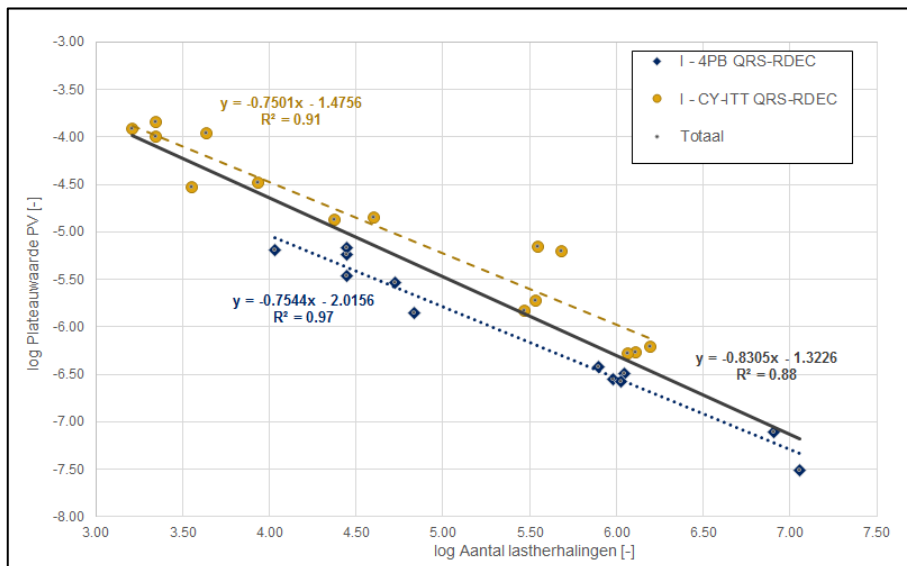
Met de aangepaste analysemethodiek is van twee AC 22 Base mengsels de vermoeiingsweerstand bepaald in de 4PB en de CY-ITT opstelling. Wat betreft samenstelling zijn de mengsels nagenoeg gelijk. Enkel in bindmiddel verschillen deze; Mengsel I bevat penetratiebitumen en Mengsel II een gemodificeerde bitumen. De resultaten van de huidige, conventionele methode (ϵ , $N_{F,50}$ -relatie) zijn weergegeven in figuren 3.1 en 3.2. De PV- $N_{F,MICRO}$ relaties, resulterend uit de QRS-RDEC analyse, zijn gerapporteerd in figuren 3.3 en 3.4.



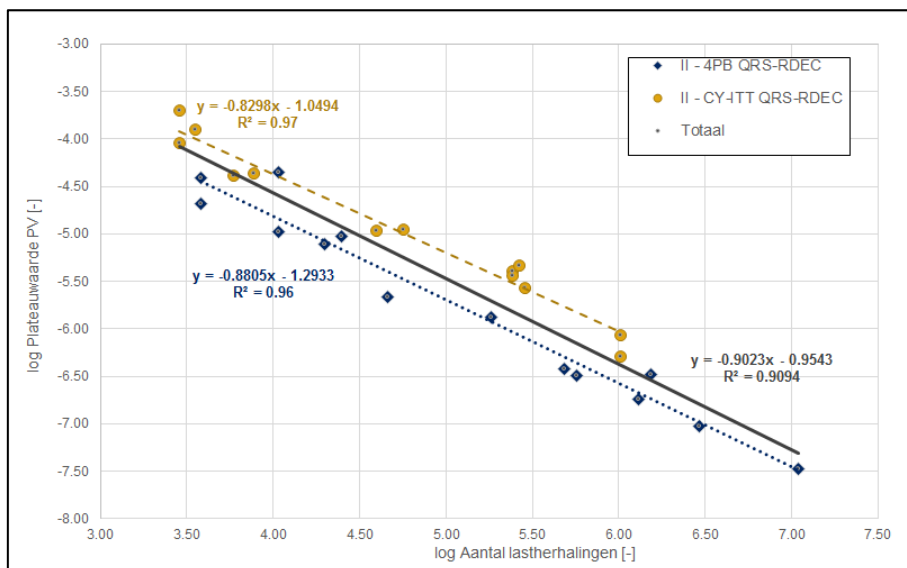
Figuur 3.1: ϵ , N_F -relaties Mengsel I conform conventionele analyse



Figuur 3.2: ε , N_F -relaties Mengsel II conform conventionele analyse



Figuur 3.3: PV , $N_{F:MICRO}$ -relaties Mengsel I conform QRS-RDEC analyse



Figuur 3.4: PV , $N_{F:MICRO}$ -relaties Mengsel II conform QRS-RDEC analyse

Een analyse van de proefresultaten heeft geleid tot de volgende conclusies:

- Analyse van vermoeiing met de QRS-RDEC methodiek is mogelijk
- De resulterende PV, $N_{F;MICRO}$ -relaties beschrijven de 4PB én de CY-ITT vermoeiingsweerstand van asfalt betrouwbaarder dan relaties gebaseerd op huidige analysemethoden.
- De proefresultaten van 4PB en CY-ITT vermoeiingsproeven zijn uit te drukken in éénzelfde relatie met een betrouwbaarheid die de betrouwbaarheid van de individuele relaties per proef sterk benadert.
- Figuren 3.3 en 3.4 tonen dat er een kleine, maar desondanks aanwezige verticale offset bestaat tussen de PV- $N_{F;MICRO}$ relatie uit CY-ITT proeven ten opzichte van de 4PB relatie. De helling van de vermoeiingsrelaties blijft redelijk gelijk. Hoogst waarschijnlijk is deze offset het resultaat van het verschil in optredende kruip in beide opstellingen. In deze context wordt overigens ook opgemerkt dat de overdenkingen betreffende meetnauwkeurigheden genoemd in paragraaf 2.4 van belang zijn in de noodzakelijke evaluatie van deze offset.

4. Vergelijking methode Visser & van Dijk (V&vD) en QRS-RDEC

4.1 Discussie van de verschillen in uitgangspunten

In hoofdstukken 1 en 2 is een aantal analysemethoden op basis van gedissipeerde energie (DE) besproken. Uit die bespreking volgt dat ondanks de gedeelde basis, gedissipeerde energie, de methoden gestoeld zijn op een variatie aan uitgangspunten die een onmiskenbaar gevolg hebben op het resultaat van de analyses. Om inzicht te verkrijgen in de effecten van de uiteenlopende uitgangspunten is een vergelijking gemaakt tussen de methode van Visser & Van Dijk (V&vD) en de QRS-RDEC methode. De dataset gebruikt voor de verificatie van de QRS-RDEC methode, Hoofdstuk 3, is zodoende ook uitgewerkt met methode V&vD.

Er is specifiek gekozen voor een vergelijking tussen V&vD en QRS-RDEC, omdat de fundamentele opvatting van de relatie tussen gedissipeerde energie en optredende schade in de methoden van elkaar verschilt. Waar Shen & Carpenter zich beroepen op de aanname dat slechts een deel van de gedissipeerde energie daadwerkelijk wordt omgezet schade, beschouwen Visser en Van Dijk de DE in haar totaliteit als schadeoorzaak. De rekenkundige bewerkingen van de DE zijn als gevolg hiervan verschillend en beschrijven daarom ook verschillende paden. Middels de RDEC bewerking wordt de verhouding tussen het verschil in DE tussen opeenvolgende cycli ten opzichte van de totale DE in *de vorige* cyclus berekend. Visser en Van Dijk berekenen effectief het verschil in werkelijke DE per cyclus ten opzichte van de DE in de *initiële* cyclus over het aantal lastherhalingen tot bezwijken. In de RDEC methode wordt in essentie gesteld dat de DE in een cyclus afhankelijk is van de DE uit de vorige cyclus. Visser & Van Dijk stellen juist dat de cumulatieve verandering ten opzichte van de initiële situatie representatief is voor bezwijken onder vermoeiing.

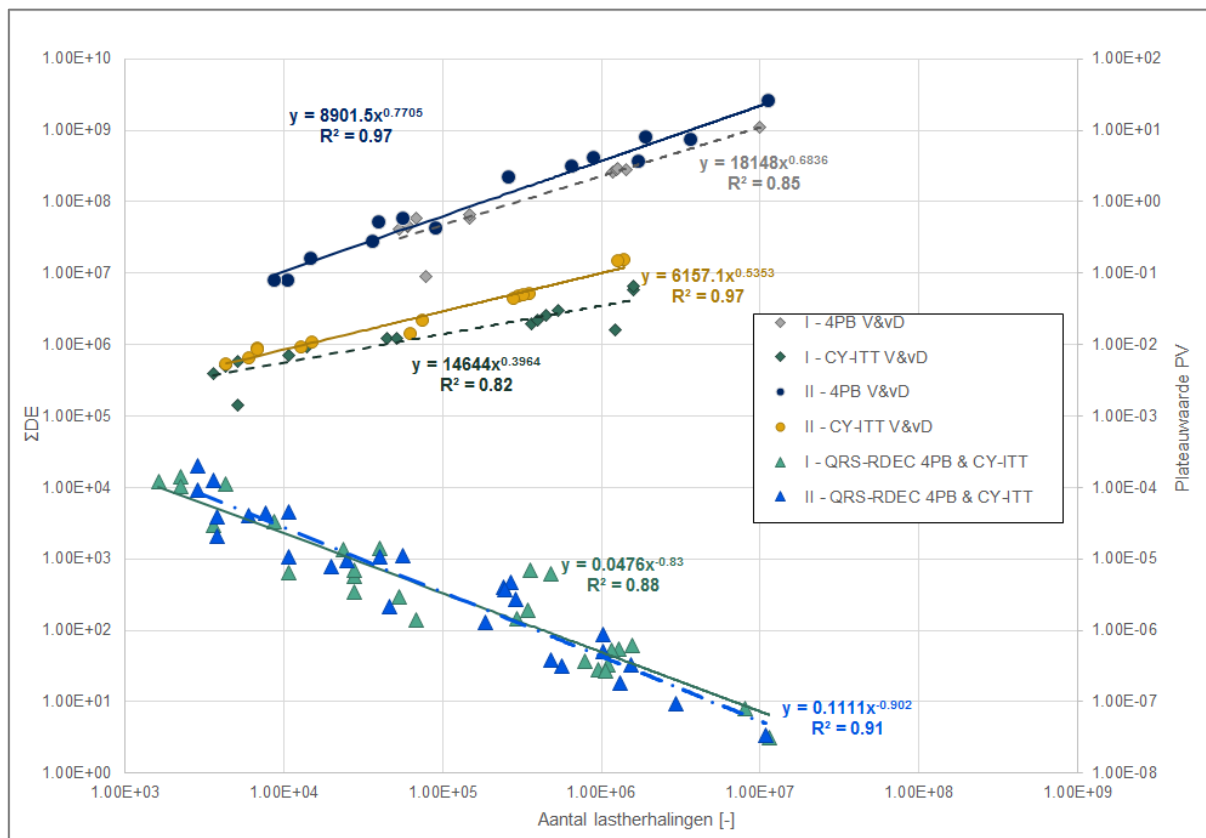
4.2 Resultaten V&vD versus QRS-RDEC

De dataset, zoals gepresenteerd in hoofdstuk 3, is geanalyseerd conform de methode Visser & Van Dijk. Omdat in deze methode geen duidelijke bepaling of criterium einde levensduur is

omschreven is de cumulatieve verandering van de DE bij $N_{F;MACRO}$ uitgezet tegen $N_{F;MACRO}$. Het criterium einde levensduur uit de QRS-RDEC is hiervoor dus toegepast. De V&vD relaties met $N_{F;MICRO}$ waren in alle gevallen minder betrouwbaar dan die met $N_{F;MACRO}$. In figuur 4.1 zijn de vermoeiingslijnen verkregen uit beide methoden uitgezet. Overigens, is de PV- $N_{F;MICRO}$ relatie in deze figuur niet uitgezet in log-waarden, maar op log-schaal.

Uit figuur 4.1 is op te maken dat de methode Visser & Van Dijk zeer betrouwbare vermoeiingsrelaties oplevert voor de mengsels per proeftype. De betrouwbaarheden zijn echter niet groter dan die verkregen middels de QRS-RDEC methode voor afzonderlijke proeftypen. Opvallend is dat enkel de 4PB relaties een exponent hebben die de door Visser & Van Dijk beschreven exponent van 0.67 benadert. De V&vD relaties voor de CY-ITT proeven vertonen een aanzienlijk lagere exponent. Ook dit verschil kan, net als de offset tussen CY-ITT en 4PB in de QRS-RDEC methode, hoogst waarschijnlijk worden toegeschreven aan verschillen in optredende kruip.

Bovendien toont figuur 4.1 dat een analyse op basis van de methode V&vD geen mogelijkheid biedt tot het uitdrukken van 4PB en CY-ITT resultaten in éénzelfde vermoeiingsrelatie.



Figuur 4.1: Vermoeiingsrelaties conform methode Visser & van Dijk en QRS-RDEC

4.3 Discussie van de resultaten in het licht van thermodynamica

De resultaten van de vergelijking tussen de methodes Visser & van Dijk en QRS-RDEC zijn wellicht te verklaren, als de 4 wetten van de mechanothermodynamica voor gesloten irreversibele systemen worden beschouwd en toegepast. Een uiteenzetting van deze wetten is

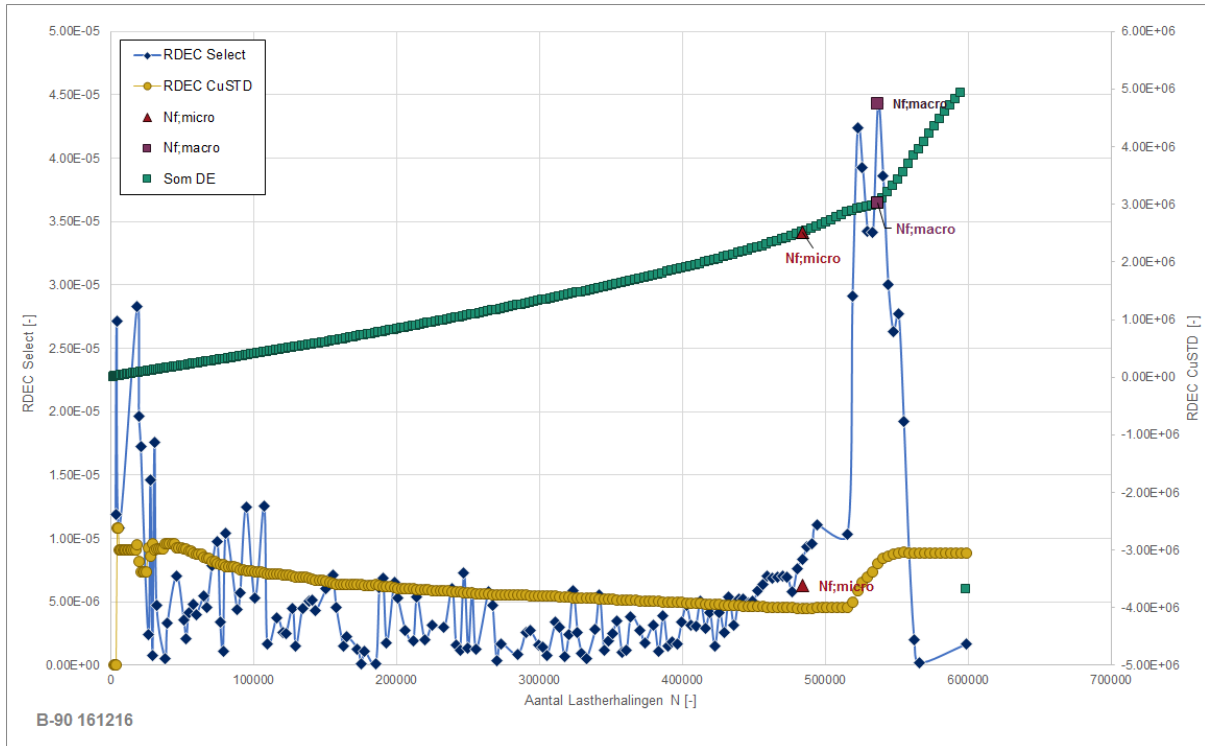
in deze context te uitvoerig, de geïnteresseerde lezer wordt verwezen naar [10, 11, 12, 19]. Belangrijke uitgangspunten van deze leer in een cyclisch proces zijn de volgende:

- De richting van het proces is vastgelegd en kan niet veranderen. Veranderingen vinden daarom altijd plaats ten opzichte van een referentieniveau.
- Elke volgende cyclus is minder efficiënt dan de vorige, omdat het proces in tegengestelde richting na excitatie nooit dezelfde hoeveelheid energie kan ‘produceren’ (het perpetuum mobile)
- Degradatie van een materiaal uit zich in schade op macroniveau
- Schade is het gevolg van de som van lokale energie dissipatie op microniveau
- Energie dissipatie is het gevolg van een complexe matrix van fysische, chemische en thermische reacties die teweeg worden gebracht door een externe excitatie
- De verandering van de gedissipeerde energie (DE) kan via vele paden worden bereikt (krachtgestuurd, rekgestuurd), maar is altijd gebaseerd op de eindwaarden van de opeenvolgende cycli. Deze verandering van de DE, ook wel *entropie* genoemd, is dus padonafhankelijk en wordt daarom beschouwd als een fundamentele parameter.
- De gedissipeerde energie per cyclus kan worden opgedeeld in een reversibel en een irreversibel deel, die in ons kader kunnen worden opgevat als het elastische en viskeuze deel. Beide energieën zijn individueel tevens cyclisch en moeten als zodanig bestaan uit een ‘irreversibel’ en ‘reversibel’ deel.
 - Om deze laatste uit te drukken als ‘irreversibel’ en ‘reversibel’ is intuïtief ‘fout’. Immers beide zijn onderdeel van reeds gedissipeerde energie. De opdeling van de viskeuze energie kan beter worden opgevat als *de energie die in die cyclus direct schade veroorzaakt*, ‘irreversibel’, en *energie die gepaard gaat met lange termijn schade in de vorm van volumeveranderingen*, ‘reversibel’.
- De energie dissipatie per cyclus in een systeem onder cyclische belasting is dus direct beïnvloed door de hoeveelheid ‘extra’ energie naar lange termijn schade die wordt overgedragen uit de vorige.
- Entropie en/of de entropie flux zijn daarom intiem verbonden met de schadeproductie in een systeem
- In verscheidene onderzoeken [13, 15, 17, 22] is aangetoond dat de *rate of entropy production*, ofwel de snelheid waarmee de verandering van de DE verandert, onderscheidend is voor vermoeiingsschade.

Op basis van de zeer summiere beschrijving van de theorie kan worden gefilosofeerd over de herkomst van de verschillen tussen de resultaten van Visser & van Dijk en QRS-RDEC. In termen van entropie kan worden gesteld dat Visser & van Dijk de cumulatieve DE beschouwen, deze is niet padonafhankelijk en vrij van kruipeffecten. Met de QRS-RDEC methode wordt meer de rate of entropy production bepaald. Een ander belangrijk verschil is dat Visser & van Dijk de DE beschouwen ten opzichte van de initiële cyclus. Dit is, zo blijkt uit [13, 15, 17, 22], een algemeen geaccepteerd uitgangspunt, ook in de mechanothermodynamica. De rate of entropy production wordt in veel onderzoeken ook cumulatief ten opzichte van de eerste cyclus

beschouwd, voornamelijk omdat deze onderzoeken beogen een voorspellingsmodel te bouwen. In essentie zou dat betekenen dat de cumulatieve benadering ten opzichte van de intiele cyclus geen onderscheid maakt tussen de reversibele en irreversibele delen van de verandering in DE. Omdat ze beide bijdragen aan de degradatie van het materiaal en de entropie intiem gerelateerd is aan schadeontwikkeling worden zeer betrouwbare relaties gevonden met Visser & van Dijk. Echter, juist omdat geen onderscheid wordt gemaakt tussen de twee genoemde delen wordt het effect van proefopstelling (kruip) niet ‘gefilterd’ uit de energie die enkel als gevolg van de externe belasting leidt tot schade. Met RDEC wordt voor het berekenen van de toename van de entropie steeds de voorgaande cyclus beschouwd. Met RDEC wordt deze splitsing dus wel gemaakt, omdat steeds de voorgaande cyclus wordt gebruikt als referentie. RDEC beschrijft daarom in theorie de daadwerkelijke, momentane staat van degradatie. Veranderingen in RDEC zijn daarom direct gerelateerd aan schade die ontstaat op macroniveau als gevolg van het werkelijk verantwoordelijke deel van de DE. Met RDEC is het daarom wel mogelijk, in tegenstelling tot met cumulatieve methoden, bezwijken juist voor ‘catastrofaal’ falen te detecteren. Dit is van belang, omdat alle processen die plaatsvinden na $N_{F;MICRO}$ niet meer als ‘lineair’ vermoeiingsgedrag worden beschouwd en ook de RDEC is dan niet meer geheel representatief voor de ontwikkeling van de schade.

In figuur 4.2 zijn voor een individuele CY-ITT proef de QRS-RDEC en bijbehorende $N_{F;MICRO}$ en $N_{F;MACRO}$ uitgezet, evenals de som van de DE volgens Visser & van Dijk. Te zien is dat de V&vD lijn rondom bezwijken een sterke knik vertoont. Deze knik is niet altijd evenzo uitgesproken als in figuur 4.2 afgebeeld en kan zodoende niet dienen als uniform faalcriterium. Na een analyse van de locaties van de knik ten opzichte van de $N_{F;MICRO}$ en $N_{F;MACRO}$ uit de QRS-RDEC methode blijkt dat de knik zich vaak tussen beide bevindt. Maar altijd meer in de buurt van $N_{F;MACRO}$. Dit is een verklaring voor de hogere betrouwbaarheid van de gevonden V&vD relaties met $N_{F;MACRO}$. Overigens toont het ook waarom de verschillen tussen 4PB en CY-ITT groter zijn voor V&vD dan voor QRS-RDEC. QRS-RDEC filtert, waarschijnlijk niet geheel, effecten van verschillen in proefopstelling uit en beschouwt enkel het gedrag tot aan $N_{F;MICRO}$. De methode V&vD filtert de effecten van proefopstelling niet en beschouwt daarom ook DE als gevolg van interne effecten die niet direct in die cyclus hoeven bij te dragen aan schade. Door de cumulatieve benadering wordt meer de bezwijkgrens van het materiaal als grens beschouwd, dus ook het niet-lineaire gebied voorbij $N_{F;MICRO}$. Dat is voor , elastische materialen wellicht ‘veilig’, maar voor materialen als asfalt zijn in die fase afwijkingen in proefstuk en additionele visco-elastische effecten als gevolg van proefopstelling van grotere invloed op de gemeten respons dan de fundamentele materiaaleigenschappen.



Figuur 4.2: QRS-RDEC analyse en Visser & van Dijk analyse op een data van een CY-ITT proef

5. **Conclusies & aanbevelingen**

- Uit een verkenning van de analyse van vermoeiing op basis van gedissipeerde energie volgt dat het mogelijk is het vermoeiingsgedrag van asfalt gemeten in verschillende opstellingen direct met elkaar te vergelijken
- De aanname die ten grondslag ligt aan de daadwerkelijk actieve gedissipeerde energie die omgezet wordt in schade lijkt bepalend voor de effectiviteit van de methode
- De thermodynamica van irreversibele processen lijkt een onderbouwing te leveren voor de verschillen als gevolg van wijzigingen in de bovengenoemde aanname
- De perspectieven voor het herleiden van verschillende proefopstellingen en condities tot elkaar zijn veelbelovend en verdienen verdere aandacht.
- Er is nog onvoldoende kennis over de mechanismen die veranderingen in materialen veroorzaken om ze zowel beknopt als fundamenteel te beschrijven. Eenvoudige macroscopische modellen zijn daarom nu nog aan te bevelen voor het maken van ontwerpen.
- Er is behoefte aan proeven in drie stadia van onderzoek en de uitvoering van werken: materiaalontwikkeling en functionele verificatie van eisen aan materialen en aan de gerealiseerde constructie. Het energiebeginsel biedt de mogelijkheid geschiktere proefmethoden dan de huidige standaardmethoden daarmee te vergelijken
- Energiemodellen zijn beter dan de traditionele beginrekmodellen om vermoeiing te beschrijven. Het verloop van de schade tijdens beproeving wordt verdisconteerd en verschillende proefopstellingen en condities kunnen ermee tot elkaar worden herleid.
- De verschillende vormen van het energiebeginsel zijn via een beschrijving van de schadeontwikkeling door een machtsrelatie in praktische zin op elkaar terug te voeren. Dit is een wiskundig en geen fysisch argument.
- Meetnauwkeurigheid en databewerking van onderhavige onderzoeken zijn zaken die beter uitgezocht moeten worden.

6. Referenties

1. Heukelom; W.; Observations on the Rheology and fracture of Bitumens and Asphalt mixes; AAPT 1966
2. Van Dijk, W.; Practical Fatigue Characterization of Bituminous Mixes; AAPT 1975
3. Van Dijk, W., Visser, W; The Energy Approach to Fatigue for Pavement Design AAPT 1977
4. Hopman, P.C.; Kunst, P.A.J.C.; Pronk, A.C.; A renewed interpretation for fatigue measurements: Verification of Miner's rule; Eurobitume 1989
5. Tolman, F.; Kotte, J.F.A.K. ; Totstandkoming van de publikatie "Raveling of drain asphalt"; Dutch Ministry of Transport and Public Works, Road and Hydraulic Engineering Division and Netherlands Pavement Consultants BV; P-DWW-94.509; Strategic Highway Research Program (SHRP) and Traffic Safety on Two Continents; 1993
6. Jacobs, M. M. J.; Crack Growth in Asphaltic Mixes; Delft University of Technology; 1995
7. Zuidema, J.; Schulte, J.; Krans, J.L.; Tolman, F.; Creep-fatigue interactions during crack-growth in fine sand-asphalt concrete mixtures; Sheffield 1998
8. Shen, S., Carpenter, S.H.; Dissipated energy concepts for hma performance: fatigue and healing; University of Illinois at Urbana-Champaign; 2007
9. Mo, L.; Damage development in the adhesive zone and mortar of porous asphalt concrete; Delft University of Technology; 2009
10. Lemaitre, J., A course on Damage Mechanics, Springer-Verlag, 1996 Berlijn
11. Basaran, C & Nie, S., An irreversible thermodynamics theory for damage mechanics of solids, International Journal of Damage Mechanics, 2004
12. Brant, M. & Khonsari, M., On thermodynamics of degradation, VS, 2008
13. Naderi M. et al, On the thermodynamic entropy of fatigue failure, Proceedings of the Royal Society A, VS, 2009
14. Delas, N. & Kayanov, V., Entropy-energy model of fatigue defects, National Aviation University Kyiv, 2014
15. Bryant, M., Modeling degradation using thermodynamic entropy, University of Texas at Austin, 2014
16. Sluer, B. & Stigter, J., Functioneel Verifiëren van Asfaltverhardingen, CROW Infradagen, Papendal, Juni 2014
17. Imaniam, A. & Modarres, M., A Thermodynamic entropy approach to reliability assessment with applications to corrosion fatigue, www.mpd.com, ISSN 1099-4300, 2015
18. Shen, S. & Lu, X., Energy based laboratory fatigue failure criteria for asphalt materials, Journal of Testing and Evaluation, Vol.39, No.3, September 2015
19. Eu, B., Kinetic theory of Nonequilibrium Ensembles, Irreversible Thermodynamics and Generalized Hydrodynamics, Springer International Publishing, Zwitserland, 2016
20. Poeran, N. & Sluer, B., Analyse van vermoeiingsgedrag met methode Shen & Carpenter, CROW Infradagen, Papendal, Juni 2016
21. Sluer, B. et al., Functioneel Verifiëren stijfheid en vermoeiing van asfalt, CROW Infradagen, Papendal, Juni 2016
22. Sosnovskiy, L. & Sherbakov, S., Mechano-thermodynamic entropy and analysis of damage state of complex systems, www.mpd.com, 2016
23. Telman, J., Verificatie RDEC methodiek voor karakterisering asfaltvermoeiing, Q-Consult Progress Partners, Waardenburg, April 2017
24. Poeran, N. et al, Van Functioneel Verifiëren naar Functioneel Opleveren, CROW Infradagen 2018, Papendal juni 2018