

e0700170-2

Relatie tussen sterkte en stijfheid in de context
van de inspectiemethode meerjarig onderzoek
asfaldijkbekledingen

Projectnummer : e0700170-2
Offertenummer en datum : o070471/au/adl van 03-05-2007
Titel rapport : Relatie tussen sterkte en stijfheid in de context van de inspectiemethode meerjarig onderzoek asfaltdijkbekledingen
Status rapport : Definitief

Naam opdrachtgever : Stowa
Adres : Postbus 8090
Plaats : 3503 RB Utrecht
Naam contactpersoon : ir. L.R. Wentholt
Datum opdracht : 6 juni 2007
Kenmerk opdracht :

Contactpersoon KOAC·NPC : ing. A.K. de Looff
Auteur(s) rapport : dr.ir. C.A.P.M. van Gorp, G.E. Westera, ing. A.K. de Looff

Rapportage

Naam: dr.ir. C.A.P.M. van Gorp

Handtekening:

Datum: 4 februari 2008

Autorisatie

Naam: ing. A.K. de Looff

Handtekening:

Datum: 4 februari 2008

Zonder schriftelijke toestemming van KOAC·NPC mag het rapport (of certificaat) niet anders dan in zijn geheel worden gereproduceerd.

Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	5
1.1	Algemeen	5
1.2	Probleemstelling en doelen.....	5
1.3	Plan van aanpak	6
2	Mogelijke oplossingsrichtingen	8
2.1	Onderzoek naar relatie tussen stijfheid en sterkte.....	8
2.2	Opstellen van een systematiek voor selectie van locaties voor sterkteonderzoek.....	9
2.3	Systematiek voor de monitoring van de teruggang van sterkte.....	9
3	Relatie stijfheid en sterkte.....	10
3.1	Inleidende beschouwing.....	10
3.2	Levensduur	12
3.3	Sterkte	12
3.4	Mechanisch onderzoek ter bepaling van sterkte en stijfheid	13
3.5	Vermoeiingssterkte	13
3.6	Correlatie teruggerekende stijfheidsmoduli.....	14
3.7	Invloed van laagdikte op nauwkeurigheid van structurele parameters	16
3.8	Spreiding in structurele parameters	20
3.9	Correlatie tussen laboratoriumstijfheid en breuksterkte.....	20
3.10	Effect van dichtheid van asfalt	24
3.11	Schatting vermoeiing.....	27
3.12	Relatie asfaltstijfheid uit laboratorium en valgewichtdeflectiemeting	30
3.13	Relatie asfaltstijfheid en vermoeiingslevensduur	33
4	Monstergrootte voor vermoeiingsonderzoek van oud asfalt	35
4.1	Algemeen	35
4.2	Betrouwbaarheid en nauwkeurigheid.....	35
4.3	Ouderdom en structurele parameters	36
4.4	Monstergrootte	41
5	Selectie van locaties voor sterkteonderzoek	43
5.1	Voorgestelde systematiek	43
5.2	Selectiemethode zwakke plekken.....	43
6	Monitoring van teruggang van sterkte.....	45
6.1	Inleiding	45
6.2	Archiefonderzoek	45
6.3	Monitoring.....	53
7	Conclusies en aanbevelingen.....	56
7.1	Conclusies.....	56

7.2	Aanbevelingen	56
8	Referenties	58
Bijlage 1	Literatuur archiefonderzoek	
Bijlage 2	Overzicht proefresultaten op dijkbekledingen	

1 Inleiding

1.1 Algemeen

Medio 2007 waren op bijna alle asfaltdijkbekledingen in Nederland onderzoeken uitgevoerd naar de structurele conditie. Deze conditie is van uiterst belang voor het vaststellen van de veiligheid tegen het schadebrengend effect van golfklappen. Uit de analyse van onderzoeksresultaten kwam aan het licht dat de beoordeling van de asfaltdijkbekledingen voor verbetering vatbaar is, vooral voor de oudere asfaltdijkbekledingen. Voor deze categorie kon niet eenduidig worden bepaald hoe lang ze nog mee konden gaan. Omdat ongeveer de helft van de 600 km aan asfaltdijkbekledingen in Nederland ouder is dan 30 jaar, is de relevantie voor het opzetten van een bruikbare veiligheidsbeoordeling evident. Een aanzienlijk deel van de genoemde asfaltdijkbekledingen is in beheer bij Rijkswaterstaat.

Daarmee samenhangend is er behoefte aan een strategie voor optimaal beheer en onderhoud, inclusief een geschikte risicobenadering. Als de gemiddelde levensduur van de asfaltdijkbekleding door doelmatig onderhoud en beheer kan worden verlengd van bijvoorbeeld 40 naar 60 jaar, levert dit alleen voor Rijkswaterstaat al een besparing op van 1,25 M€ per jaar. Voor heel Nederland zou de jaarlijkse besparing dan uitkomen op 12,5 M€.

1.2 Probleemstelling en doelen

In de afgelopen jaren is een methode ontwikkeld voor het toetsen van asfaltdijkbekledingen op veiligheid die op een aantal punten verbetering en aanvulling nodig heeft. Een belangrijk onderdeel van de veiligheidsbeoordeling is de gedetailleerde beoordeling op golfklappen die voor alle bekledingen ouder dan 30 jaar moet worden uitgevoerd. Deze beoordeling wordt uitgevoerd met het softwarepakket GOLFKLAP. Belangrijke inputparameters voor dit programma zijn de laagopbouw en de laagstijfheden van de dijkbekleding. Voor dit doel zijn laagdikteradarmetingen (GPR) en valgewichtdeflectiemetingen (VGD) uitgevoerd. Uit de combinatie van laagdikte en deflectie zijn de laagstijfheden teruggerekend. Aanvullend zijn op geselecteerde plaatsen asfaltmonsters uit de dijkbekleding geboord voor bepaling van de asfaltstijfheid, vermoeiingssterkte en breuksterkte.

Verbetering van de methode is noodzakelijk op de volgende punten:

1. Verbeteren en onderbouwen van de huidige gedetailleerde beoordeling op golfklappen. Het betreft met name het ontwikkelen van een onderbouwde methode voor selectie van locaties voor sterkteonderzoek en specificatie en onderbouwing van de te hanteren meetmethoden.
2. Ontwikkelen van een methode voor het monitoren van de teruggang van de sterkte van een bekleding om na te gaan op welk moment opnieuw de breuksterkte en vermoeiingseigenschappen van het asfalt moeten worden bepaald.
3. Het ontwikkelen van een niet-destructieve meetmethode voor het lokaliseren van aangeast asfalt onder een oppervlakbehandeling.

ad 1. Zwakke plekken in de bekleding worden geselecteerd op basis van een veronderstelde relatie tussen stijfheid en sterkte. De gekozen strategie hierbij is dat vermoeiingsonder-

zoek wordt uitgevoerd op asfalt afkomstig uit zwakke plekken zodat bij goedkeuren van de bekleding zekerheid en voldoende veiligheid bestaat voor het hele beschouwde dijkvak. De relatie tussen stijfheid en sterkte is echter nog niet aangetoond. Er moet een methode worden opgesteld waarbij de keuze van de locaties voor monsternamen voor het sterkteonderzoek kan worden verantwoord. Dit betekent dat ofwel de relatie tussen stijfheid en sterkte moet worden aangetoond ofwel er een statistisch verantwoorde strategie moet worden opgesteld voor het selecteren van locaties voor het sterkteonderzoek.

De gedetailleerde beoordeling op golfklappen is vaak pragmatisch opgezet. Er moet een onderbouwing plaatsvinden van welke metingen moeten worden uitgevoerd, hoeveel metingen voor de beoordeling noodzakelijk zijn, en op welke locaties onderzoek moet worden uitgevoerd.

- ad 2. Een veiligheidsbeoordeling moet periodiek (eenmaal per vijf jaar) worden uitgevoerd. Nadat eenmaal een gedetailleerde beoordeling heeft plaatsgevonden is het meestal niet noodzakelijk om bij volgende toetsingen een veiligheidsbeoordeling met dezelfde omvang te verrichten. Er moet een monitoringsprogramma worden opgesteld zodat met beperkte middelen de teruggang in sterkte van de bekleding kan worden gemonitord. Op deze manier kan het moment worden vastgesteld dat opnieuw een volledige beoordeling moet worden uitgevoerd om na te gaan of de bekleding moet worden afgekeurd.
- ad 3. Uit recente ervaringen met enkele dijkvakken in Friesland is gebleken dat delen van een dijkbekleding onvoldoende van kwaliteit kunnen zijn hoewel kort daarvoor een gedetailleerde beoordeling is uitgevoerd waarbij de bekleding is goedgekeurd. Op de Friese dijkvakken bleek het asfalt onder de oppervlakbehandeling ernstig te zijn aangetast op plaatsen waar het asfalt in contact kon komen met vocht. Het is waarschijnlijk dat de aantasting een proces van jaren is geweest. Een diagnosesysteem voor het lokaliseren van aantastingen onder een oppervlakbehandeling is gewenst.

1.3 Plan van aanpak

Om de genoemde doelstellingen te realiseren is een plan van aanpak met de volgende werkstappen opgesteld:

- 1. Uitvoeren van archiefonderzoek.
Met het archiefonderzoek wordt de informatie over de in het verleden uitgevoerde onderzoeken naar bruikbare diagnosesystemen op asfaltdijkbekledingen verzameld en samengevat. De beschikbare informatie wordt door Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde aangeleverd en door KOAC·NPC samengevat.
- 2. Bepaling oplossingsrichting
In een opstartoverleg met: Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, de Technische Universiteit Delft en KOAC·NPC worden mogelijke wegen uitgezet naar een oplossing voor de relatie tussen stijfheid en sterkte en de binnen dit project te ontwikkelen methoden voor de selectie van boorlocaties en het monitoringsprogramma. Dit onderwerp heeft tevens raakvlakken met andere onderwerpen die op korte termijn gaan spelen, te

weten: het ontwikkelen van een levensduurmodel en implementatie van de breuksterkte in de veiligheidsbeoordeling.

3. Bureaustudie

De bureaustudie heeft als doel om de veronderstelde relatie tussen stijfheid en sterkte aan te tonen. Bij de studie wordt specifiek aandacht besteed aan het feit dat het vermoeiingsgedrag van asfaltdijkbekledingen high strain fatigue betreft. Blijkt het niet mogelijk een goede relatie te leggen dan moet er een andere systematiek worden opgesteld om locaties voor het sterkteonderzoek te selecteren. De bureaustudie bestaat uit de volgende onderdelen:

- studie naar de relatie tussen sterkte en stijfheid
- opstellen van een systematiek voor selectie van locaties voor sterkteonderzoek
- opstellen van een systematiek voor de monitoring van de teruggang van de sterkte (de invulling van dit onderdeel is afhankelijk van het resultaat van de studie naar de relatie tussen sterkte en stijfheid.
- onderbouwen en waar nodig verbeteren van de strategie voor het uitvoeren van metingen op een dijkbekleding

De bureaustudie wordt uitgevoerd op basis van de volgende informatie:

- gegevens uit in het verleden uitgevoerde veiligheidsbeoordelingen
- gegevens over de opzet van het monitoringsprogramma open steenasfalt (project in opdracht van Rijkswaterstaat Zeeland)
- resultaten archiefonderzoek
- publicaties met informatie over de relatie tussen stijfheid en sterkte; in de studie wordt specifiek aandacht gegeven aan het feit dat het vermoeiingsgedrag van asfalt dijkbekledingen 'high strain fatigue' betreft.

2 Mogelijke oplossingsrichtingen

In een overleg met Rijkswaterstaat, Technische Universiteit Delft en KOAC·NPC is op 15 mei 2007 een brainstormsessie gehouden voor het bepalen van mogelijke oplossingsrichtingen. De volgende onderwerpen zijn aan de orde geweest:

- 1 relatie tussen stijfheid en sterkte in relatie tot bepaling van de 'zwakke plek'
- 2 opstellen van een systematiek voor de selectie van locaties voor het sterkteonderzoek
- 3 opstellen van systematiek voor het monitoren van de teruggang van de sterkte
- 4 onderbouwen en waar nodig verbeteren van de strategie voor het uitvoeren van metingen op de bekleding

2.1 Onderzoek naar relatie tussen stijfheid en sterkte

Bij analyse van de structurele conditie van wegverhardingen wordt de rek onder in het asfalt als maatgevend vermoeiingscriterium genomen; bij asfaltdijkbekledingen wordt de spanning onder in het asfalt gehanteerd. De vermoeiingsrelatie die in de huidige toetsing wordt gebruikt is een ondergrens en is gerelateerd aan dat deel van de dijkstrekking met de laagste stijfheid. Met andere woorden, de vermoeiingssterkte wordt niet overschat voor deze dijkstrekking. Verder wordt er bij het berekenen van de spanning in het asfalt onder golfbelasting gewerkt met ongunstige combinatie van stijfheden.

Om de huidige werkwijze bij toetsing voldoende te onderbouwen, wordt aanbevolen de correlatie tussen de stijfheid (zowel uit de driepuntsbuigopstelling, als uit VGD-metingen) en de sterkte (zowel vermoeiingssterkte als breuksterkte) te verbeteren. Hier is ook een link naar bovenstaand punt 2, omdat de selectie van de locaties voor sterkte onderzoek gebeurt op basis van VGD-stijfheden. Er is ook een link met punt 4 ten aanzien van het benodigde aantal boorkernen. Het is in de eerste plaats van belang om allerlei foutenbronnen te elimineren, en als dat niet kan, deze te kwantificeren. Een regressiegrafiek kan pas goed beoordeeld worden als ook de onzekerheden in de afzonderlijke punten bekend zijn.

Mogelijke verbeteringen zijn:

- de gemeten deflecties moeten consistent zijn
- eisen stellen aan de stijfheidsmoduli van de onderliggende lagen en een begrenzing op de asfaltstijfheden aangeven op basis van ervaring en literatuur over veroudering. Zo-doende de spreiding in VGD-metingen terugdringen
- Nagaan wat de exacte werkwijze van het bedrijf is dat de radarmetingen uitvoert en kijken of hier nog onzekerheidsmarges ten aanzien van de laagdikte uit volgen
- zoeken naar correlaties tussen stijfheid en vermoeiingssterkte, bijvoorbeeld door het delen van de optredende spanning door de bijbehorende stijfheid
- meenemen van de breuksterkte in het onderzoek naar de relatie tussen stijfheid en sterkte, waarbij gebruik kan worden gemaakt van de regressielijnen die TNO heeft gemaakt
- nagaan of voor de bepaling van de vermoeiingssterkte voor vooral ouder asfalt genoeg boorkernen worden geboord. Bij te weinig boorkernen is het zoeken naar correlaties met de stijfheid niet zo zinnig.
- maken van een vergelijking van laboratorium stijfheden en VGD-stijfheden

- analyseren van datasets van meerdere locaties samen, daar naar verwachting de spreidingsbreedte van één locatie te klein is. Er moet aandacht worden besteed aan de condities die worden en zijn gehanteerd bij het bepalen van de stijfheden en de sterkten. Deze condities moeten consistent zijn. De aanpak van terugrekenen moet worden verbeterd voor zover dit binnen de mogelijkheden ligt. Minstens tien datasets meenemen indien mogelijk.

2.2 Opstellen van een systematiek voor selectie van locaties voor sterkteonderzoek

Uit paragraaf 2.1 moet volgen of de stijfheid, zoals bepaald met de valgewichtdeflectiemeter, een goede maat is voor de sterkte van het asfalt. Als dit niet zo is, moet naar een alternatief worden gezocht. Een alternatieve mogelijkheid is om met een levensduurmodel een prognose te maken van het aantal lastherhalingen dat het asfalt moet kunnen weerstaan. Hiervoor is echter wel een boorkernonderzoek nodig.

Ten aanzien van het aantal te boren kernen, moet worden nagegaan of een aantal van acht genoeg is, met name voor ouder asfalt. De Hellegatsdam is misschien een goed voorbeeld om nader te bekijken, omdat daar in het verleden veel meer boorkernen dan acht zijn onderzocht.

2.3 Systematiek voor de monitoring van de teruggang van sterkte

Voor de vaststelling van het aantal en de posities van de meetpunten in een valgewichtdeflectiemeting moet het verschil tussen een kleine (2 meter) en een grote hart-op-hart afstand van meetpunten worden onderzocht. Drie geschikte locaties zijn Petten, Texel en Vlissingen. Naar verwachting zijn Petten en Texel locaties met een gemiddelde kwaliteit asfalt, en Vlissingen zou een slechte kwaliteit asfalt hebben (is al gereconstrueerd).

Bij de analyse kunnen bijvoorbeeld “om en om” de gemeten deflecties worden geanalyseerd om te kijken of dit wat uitmaakt voor het verloop van de stijfheid over het dijkvak in termen van gemiddelde en spreiding.

Op basis van bovenstaande analyses van de tot nu toe uitgevoerde VGD-metingen kan het zinvol zijn om aan de hand van het gemeten deflectiepatroon een uitspraak te doen over of het asfalt is achteruit gegaan. Het deflectieverloop zou dan grilliger moeten worden. Deflecties zijn te corrigeren naar temperatuur; voor wegen is dit al uitgewerkt.

3 Relatie stijfheid en sterkte

3.1 Inleidende beschouwing

3.1.1 Stijfheid en sterkte

Stijfheid en sterkte zijn bij asfalt mechanische eigenschappen die geen vaste waarden hebben. Het bindmiddel bitumen brengt met zich mee dat het materiaalgedrag van de temperatuur en de belastingstijd afhangt (visco-elastisch gedrag). Onder kortdurende belasting (ca. 0,1 s bij een golfklap) en lage temperatuur ($< 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) gedraagt het asfalt zich (relatief) elastisch en stijf. Bij lange belastingstijden (b.v. bij zettingen) en hoge temperatuur gedraagt het zich viskeus en slap. De temperatuur van een asfaltbekleding kan behoorlijk variëren: van meerdere $^{\circ}\text{C}$ onder nul tot $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ of meer bij opwarming door de zon, wat sterk op de stijfheid van invloed is.

Stijfheid is een begrip dat is gerelateerd aan de verhouding tussen spanning en rek in een materiaal. Naast temperatuur en belastingstijd hangt de stijfheid van een asfaltmengsel (S_{mix}) ook af van de bitumenstijfheid (S_{bit}), mengselsamenstelling en holle ruimte (verdichting) in het mengsel.

Sterkte is een begrip dat is gerelateerd aan een maximale belasting (grenswaarde) van het materiaal die tot een bezwijkreactie leidt. Een materiaal kent, afhankelijk van de aard van de belasting, verschillende sterkten: druksterkte, treksterkte, buig(trek)sterkte, scheursterkte, schuifsterkte, etc. Voor asfaltbekledingen zijn vooral de buigsterkte (belasting op buiging door een golfklap) en de scheur- en schuifsterkte (i.v.m. scheurdoorgroei) relevant. De scheursterkte kan worden bepaald via een SCB-proef (Semi Circular Bending) met kerf. Beide grootheden zijn tot nu toe niet bepaald.

3.1.2 Spanningsafhankelijkheid

Een complicerende factor bij asfalt is dat het materiaalgedrag spanningsafhankelijk reageert; onder trek reageert het anders dan onder druk. Asfalt kan doorgaans beter drukspanningen dan trekspanningen opnemen. Bezijken (breuk) treedt normaliter op bij overschrijding van een grenswaarde voor de trekspanning. Er wordt van uitgegaan dat asfalt vermoeiingsgedrag vertoont: herhaalde belasting op een niveau onder de bezwijkbelasting resulteert in scheurinitiatie (microscheuren), gevolgd door scheurdoorgroei en uiteindelijk evident bezijken. Ook hier speelt echter weer een bijzonderheid van het materiaal: asfalt bezit zelfherstellend vermogen, ook wel met healing aangeduid. Bij intermitterende belasting (wat in de praktijk het geval zal zijn) treedt in de rustperiodes (gedeeltelijk) herstel van schade op. Er wordt zelfs aangenomen dat healing ook al optreedt wanneer het belastingsniveau wordt verlaagd.

De sterkte van asfalt is niet alleen afhankelijk van de opgelegde spanning maar ook van de belastingsnelheid, lastpulsduur en reksnelheid. Ook de temperatuur van het materiaal speelt een grote rol in het gedrag van het asfalt. Hoe hoger de belasting- of reksnelheid is, des te hoger is de sterkte van asfalt doorgaans.

Bij lage temperaturen overheerst de elastische component in het gedrag van asfalt. Naarmate de belastingduur groter wordt en/of de temperatuur hoger wordt, gaan de viskeuze en plastische componenten een steeds grotere rol spelen.

Bestaande modellen voor asfaltonderzoek en (weg)ontwerp beschouwen het materiaal vrijwel altijd als (visco-)elastisch. Het probleem daarbij is dat er geen limietwaarde voor de belasting is; het materiaal is oneindig sterk. Dit is natuurlijk niet de werkelijkheid; het materiaal raakt beschadigd en daardoor verandert het gedrag. Als het materiaal in een punt met hoge spanningen beschadigd raakt, neemt de sterkte op dat punt af waardoor de spanningen zich herverdelen. Hierdoor verandert de spanningsverdeling in de constructie en gaat deze steeds verder afwijken van de lineair-elastische spanningsverdeling. Een lineair-elastisch materiaalmodel is goed geschikt om het gedrag van asfalt ten gevolge van één enkele belasting te beschrijven, maar er kan geen levensduurvoorspelling mee worden gedaan. Hiervoor is immers de achteruitgang van het materiaal ten gevolge van de belasting van invloed en het kenmerk van een lineair-elastisch model is dat het een dergelijke responsdegradatie niet kent.

Als het bij onderzoek om materiaalgegevens zoals stijfheid en sterkte gaat, moeten we kijken naar wat het materiaal 'voelt'. Dat zijn spanningen en rekken, de zogenaamde geometrie-onafhankelijke grootheden. Immers, het materiaal op een willekeurig punt 'weet' niet welke kracht (of vervorming) wordt opgelegd, want dat hangt af van de doorsnede (of hoogte) van het proefstuk. Zowel de belastingsfrequentie als de vervormingssnelheid kunnen worden uitgedrukt in de reksnelheid.

Als de vervorming $u(t)$ sinusvormig met amplitude U verloopt in de tijd:

$$u(t) = U \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad (1)$$

is de vervormingssnelheid $v(t)$ cosinusvormig met dezelfde frequentie f :

$$v(t) = \frac{du(t)}{dt} = U \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad (2)$$

De reksnelheid wordt verkregen door de vervormingssnelheid op de hoogte te delen. De reksnelheid is daarmee de logische basisgrootte voor het weergeven van de invloed van de 'snelheid' op het gedrag.

Omdat de invloed van temperatuur, reksnelheid en spanningscondities in het model is opgenomen, kan voor elk punt in een constructie het bij de in dat punt geldende omstandigheden behorende gedrag worden bepaald. Hierdoor worden voor elke combinatie van constructie (geometrie) materiaal en belasting automatisch de 'zwakke plekken' gevonden, want daar treedt als eerste schade op. Als bijvoorbeeld de laagdikte verandert, verandert de spanningsverdeling ook. Dunne constructies zijn gevoelig voor buiging, terwijl dikkere meer leiden door afschuiving. In het eerste geval wordt er schade aan de onderzijde verwacht; in het tweede geval hoger in de constructie. Bij simulaties [4] zijn twee constructies beschouwd met verschillende laagdikte en stijfheid. De belasting is gesimuleerd als een herhaalde valgewichtbelasting, dus een cirkel-

vormige belasting op één punt. De schadepatronen sluiten aan bij praktijkobservaties: bij de dunnere, minder stijve constructie begint de schade inderdaad onderin; bij de dikkere constructie juist bovenin [4].

3.2 Levensduur

Bij de levensduur van een asfaltdijkbekleding gaat het vooral om de structurele levensduur en minder om de functionele levensduur. Bij de structurele levensduur is van belang of de constructie op een zeker moment nog sterk en stijf genoeg is om de (golfklap)belasting te dragen. Onvoldoende structurele sterkte wordt aan het oppervlak zichtbaar door scheurvorming, die gewoonlijk aan de onderkant van de asfaltdijkbekleding begint, en ontoelaatbare vervormingen. De aanwezige structurele sterkte kan berekend worden uit deflectiemetingen (meting van de doorbuiging van de constructie onder gestandaardiseerde condities). Het structurele ontwerp van asfaltconstructies is gebaseerd op de stijfheid (elastisch gedrag, de verhouding tussen belasting en vervorming), de weerstand tegen permanente vervorming (viskeus gedrag) en de weerstand tegen vermoeiing. Overschrijding van de structurele levensduur kenmerkt zich vooral door een grillig scheurpatroon aan het oppervlak (craquelé), door overschrijding van de vermoeiingslevensduur.

Een hogere stijfheid van het asfaltbeton leidt doorgaans tot lagere vermoeiingseigenschappen. Bij een zeer stijve deklaag (het meest extreme voorbeeld is de combinatiedeklaag) gelden tal van aanvullende ontwerpvoorwaarden die om economische reden per project moeten worden afgewogen. De kans op scheurvorming van bovenaf is een belangrijke parameter.

M.E. Nunn van TRL Ltd. heeft in 1997 zijn onderzoek naar de limietwaarde van het rekniveau van asfalt gerapporteerd waarin hij concludeerde dat onder een bepaalde grenswaarde van de rek geen vermoeiing meer optrad. Daarmee kon hij een wetenschappelijke onderbouwing geven aan de in de praktijk waargenomen 'oneindige' levensduur van de full depth constructies. Essentie is dat niet de levensduur wordt verlengd, maar de levensduur oneindig wordt als de rek onder een grenswaarde blijft; uiteraard beperkt tot het aspect van constructieve levensduur van vermoeiingsscheuren vanuit de onderzijde van de constructie.

3.3 Sterkte

Voor asfaltbekledingen worden vier faalmechanismen onderscheiden:

1. bezwijken van de bovenlaag door golfklappen ten gevolge van vermoeiing
2. opdrukken van de bovenlaag door wateroverdruk al dan niet samen met de onderlaag
3. uitspoeling van het dijklichaam van onder de bekledingsconstructie
4. bezwijken van de onderlaag bij bezwijkende bovenlaag

ad 1. Bezwijken van de bovenlaag: het overschrijden van de vermoeiingssterkte van het asfalt door herhaalde golfklappen. Als dit optreedt zal de bekleding van onderaf gaan scheuren en volgt een scheurgroeifase waarin de scheuren onder invloed van herhaalde belasting door de bekleding heen groeien. De duur van deze fase kan een belangrij-

ke bijdrage leveren aan de veiligheid van de kering, omdat de (gedeeltelijk) gescheurde bekleding nog een zekere reststerkte heeft.

- ad 2. Opdrukken van de bovenlaag: het oplichten van de laag doordat de wateroverdruk tegen de bekleding groter is dan het eigen gewicht. Als dit optreedt zal de laag omhoog buigen; indien deze belasting lang genoeg aanhoudt zal de toelaatbare rek worden overschreden en de laag gaan scheuren. Bij het ontstaan van een doorgaande scheur zal de overdruk snel afnemen maar is enige erosie van het dijklichaam mogelijk. Ook in dit mechanisme zit een aanzienlijke reststerkte.
- ad 3. Uitspoelen van het dijklichaam: het verlies van materiaal uit het dijklichaam onder invloed van waterstroming door gaten, scheuren en naden in de bekleding.
- ad 4. Bezwijken van de onderlaag: het overschrijden van de sterkte van de onderlaag nadat de bovenlaag is bezweken.

Sterkte kan worden gedefinieerd als de weerstand die de bekleding biedt tegen belastingen bij extreme mechanismen. De sterkte wordt in beginsel geleverd door de sterkte van het materiaal (bijv. buigtreksterkte) en de laagdikte van de bekleding. Bij het mechanisme golfklap is de sterkte direct bepalend voor de weerstand tegen herhaalde golfklappen. Met name de dynamische buigtreksterkte als functie van het aantal golfklappen bepaalt of de bekleding voldoende weerstand biedt. Naast deze vermoeiingssterkte is ook de stijfheidsmodulus van de bekleding en van de directe ondergrond van belang.

3.4 Mechanisch onderzoek ter bepaling van sterkte en stijfheid

In aanvulling op de resultaten van het standaardonderzoek is voor de gedetailleerde toetsing op Golfklap informatie over de sterkte en stijfheid van het asfalt nodig; dit wordt bepaald met mechanisch onderzoek. Uit de boorkernen worden proefstukken gezaagd. Deze worden in het laboratorium beproefd, zodat de materiaaleigenschappen kunnen worden bepaald. Bij waterbouwasfaltbeton wordt de driepunts-buigproef uitgevoerd, bij open steenasfalt de indirecte trekproef en de SCB-proef. Hiermee worden de stijfheid (elasticiteitsmodulus E_{dyn}) en de relatie tussen het aantal lastherhalingen en de bezwijksterkte (N - σ -relatie) van het asfalt bepaald. Het is verstandig om ook een standaardonderzoek uit te voeren op de monsters waarvan de mechanische eigenschappen worden bepaald. Voor Golfklap zijn met name de mechanische eigenschappen onderin de asfaltlaag van belang, omdat het bij dit mechanisme gaat om buiging van het asfalt onder de golfklapbelasting.

3.5 Vermoeiingssterkte

Voor de vermoeiingssterkte wordt een karakteristieke ondergrens gehanteerd van 5 % van de regressielijn, die het verband aangeeft tussen de opgelegde spanning en het aantal lastherhalingen. Voor de stijfheidsmodulus wordt de 95 % bovengrens gehanteerd. Beide grenswaarden resulteren in hogere Minersommen. De combinatie van beide grenswaarden geven wel een conservatief resultaat. Dit is des te meer conservatief omdat een lage sterkte in werkelijkheid is

gerelateerd aan een lage stijfheid; de combinatie van lage sterkte en hoge stijfheid is dus minder reëel.

De Minersom is een getal dat de verhouding aangeeft tussen de optredende belasting en de maximaal toelaatbare belasting. Een Minersom van één betekent dat de vermoeiingslevensduur van het asfalt net voldoende is om een maatgevende storm te doorstaan. Als de Minersom daarentegen vijf bedraagt betekent dit dat de vermoeiingslevensduur al na 1/5 van de maatgevende storm wordt bereikt.

Onder “bezwijken van de topklaag” wordt verstaan het bereiken van het vermoeiingscriterium bij Golfklap of een ontoereikende massa/m² bij Wateroverdruk. In beide gevallen biedt de topklaag een zekere reststerkte die echter nog niet valt te kwantificeren.

Het overschrijden van de vermoeiingssterkte van het asfalt door herhaalde golfklappen. Als dit optreedt zal de bekleding van onderaf gaan scheuren en volgt een scheurgroefase waarin de scheuren onder invloed van herhaalde belasting door de bekleding heen groeien. De duur van deze fase kan een belangrijke bijdrage leveren aan de veiligheid van de kering, omdat de (gedeeltelijk) gescheurde bekleding nog een zekere reststerkte heeft.

Het oplichten van de asfaltbekleding doordat de wateroverdruk tegen de bekleding groter is dan het eigen gewicht. Als dit optreedt zal de laag omhoog buigen. Indien deze belasting lang genoeg aanhoudt zal de toelaatbare rek worden overschreden en de laag gaan scheuren. Bij het ontstaan van een doorgaande scheur zal de overdruk snel afnemen maar is enige erosie van het dijklichaam mogelijk. Ook in dit mechanisme zit een aanzienlijke reststerkte.

3.6 Correlatie teruggerekende stijfheidsmoduli

Bij het terugrekenen van stijfheidsmoduli uit valgewichtmetingen heeft de huidige generatie terugrekensoftware de neiging om bij deflectieprofielen waarbij de fit tussen teruggerekend en gemeten deflectieprofiel slecht of matig is, de stijfheid van het asfalt te overschatten ten koste van de stijfheid van de ondergrond. Om te onderzoeken of dit voor de deflecties op dijkbekledingen ook het geval is zijn 15 gevallen nader onderzocht. Tabel 1 bevat de correlaties tussen de teruggerekende waarden van de asfaltstijfheid en de stijfheid van de onderliggende laag. In alle gevallen op één na is dit de ondergrond; in het afwijkende geval is de onderliggende laag de fundering.

Een correlatie van +1 wil zeggen dat een toenemende stijfheid van de ondergrond gepaard gaat met een toenemende stijfheid van het asfalt; een correlatie van -1 wil zeggen dat een toenemende stijfheid van de ondergrond gepaard gaat met een afnemende stijfheid van het asfalt; bij een correlatie van 0 zijn de waarden voor de tweede stijfheidsmoduli ongecorrleerd.

De stijfheidsmoduli van ondergrond en asfalt zouden onafhankelijk of licht positief gecorreleerd moeten zijn. Een positieve correlatie kan het resultaat zijn van veel inspanning in het verdichten van asfalt waardoor een hoge stijfheid voor alle lagen wordt verkregen. In de terugrekenanalyses van wegverhardingen is het heel gebruikelijk dat een negatieve correlatie wordt gevonden. Deze correlatie kan alleen worden verklaard door onvolkomenheden in de modellering in het terugrekenproces.

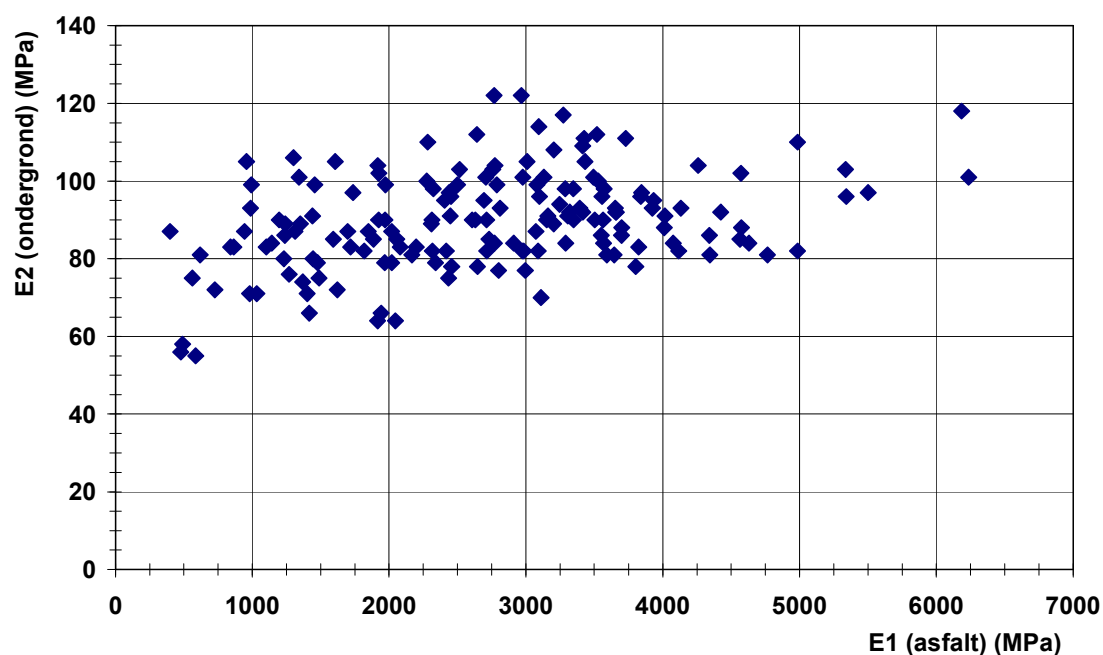
Tabel 1 Correlatie tussen asfaltstijfheid en stijfheid van onderliggende laag (VGD)

Project-nummer	Naam dijkvak	Subvak	Correlatie
0700462	Hellegatsdam	0,000 - 0,925	+0,376
		1,125 - 5,300	+0,380
048163	Houtribdijk*	50,650 - 53,450	-0,276
		53,500 - 55,950	-0,297
		56,000 - 60,750	-0,579
		60,750 - 68,350	-0,136
		68,400 - 73,350	-0,060
0603066	Koehool-Westhoek	bovenlijn	-0,372
		onderlijn	-0,468
048304	Helderse	bovenlijn	+0,073
		onderlijn	+0,059
048304	Hondsbossche	bovenlijn	-0,331
		onderlijn	-0,197**
048304	Pettemer	bovenlijn	-0,446
		onderlijn	+0,144

* ondergrond bestaat uit keileem; deze afwijkende grondsoort heeft geen effect op de nauwkeurigheid van het terugrekenproces

** ten opzichte van fundering en niet ondergrond

Figuur 1 toont de moduli van asfalt en ondergrond voor elk meetpunt van meetvak 2 (1,125-5,300) van de Hellegatsdam.


Figuur 1 Asfaltstijfheid en ondergrondstijfheid voor Hellegatsdam meetvak 2

Bij deflectiemetingen op wegen zijn de stijfheidsmoduli van asfalt en fundering meestal in redelijke mate negatief gecorreleerd; bij wegen op een gebonden fundering meestal erg negatief. Omdat dijkbekledingen doorgaans als een tweelagensysteem worden gemodelleerd, wordt ook hier verwacht dat de modellering van het terugrekenen zijn onvolkomenheden heeft waardoor de correlatie negatief zou moeten zijn.

Uit Tabel 1 blijkt dat in veel gevallen sprake is van een negatieve correlatie tussen de asfaltstijfheid en de stijfheid van de daaronder gelegen laag. Dit betekent dat de gehanteerde modellering in het terugrekenproces de nauwkeurigheid van de stijfheidsmoduli beïnvloedt.

Verbetering van de terugrekenresultaten is mogelijk door toepassing van complexere modellen; deze zijn voor alledaagse terugrekenroutines nog niet op de markt. Een andere mogelijkheid is om de teruggerekende stijfheidsmoduli door een deskundige te laten controleren en handmatig te laten aanpassen. Een betere optie is om de aanpak van terugrekenen te omzeilen door maatgevende structurele parameters direct af te leiden uit de andere meeteenheden zoals deflecties en laagdikten [12]. In paragraaf 3.7.2 wordt hierop dieper ingegaan.

In de huidige veiligheidstoetsing van dijkbekledingen zijn de stijfheidsmoduli van asfalt en ondergrond, maar ook de beddingsconstante van de ondergrond de parameters waarop toetsing plaatsvindt.

3.7 Invloed van laagdikte op nauwkeurigheid van structurele parameters

3.7.1 Effect van asfaltdikte op asfaltstijfheid

Voor het terugrekenen van stijfheidsmoduli uit deflectiemetingen zijn laagdikten een onontbeerlijke parameter. Een verkeerde bepaling of schatting van de laagdikte, leidt tot een verkeerde waarde voor de stijfheidsmoduli. Vooral de bovenste constructielaag is hier gevoelig voor [8]. Omdat de verhouding van de asfaltstijfheid en de ondergrondstijfheid meestal een factor 10 of groter is, kan de volgende vuistregel worden gehanteerd voor de invloed van de asfaltdikte op de asfaltstijfheid:

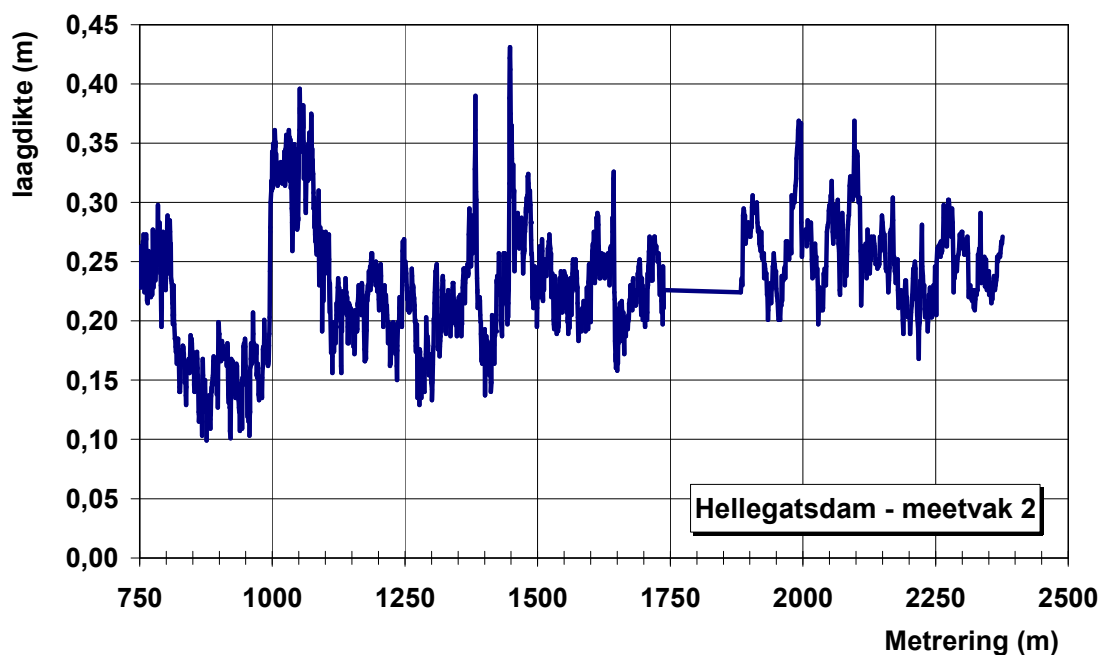
$$E_{a,w} = E_{a,t} \cdot \left(\frac{h_{a,t}}{h_{a,w}} \right)^3 \quad (3)$$

waarbij $E_{a,w}$	=	stijfheidsmodulus asfalt bij werkelijke asfaltlaagdikte
$E_{a,t}$	=	stijfheidsmodulus asfalt bij asfaltlaagdikte in terugrekenproces
$h_{a,w}$	=	werkelijke asfaltlaagdikte
$h_{a,t}$	=	asfaltlaagdikte in terugrekenproces

Hanteren van een teveel aan 10 mm in laagdikte op een gemiddelde laagdikte van 200 mm (fout +5%) leidt tot een onderschatting van de asfaltstijfheid van ongeveer 14%. Bij een teveel aan 20 mm afwijking loopt de fout al op tot ongeveer 25%. Uiteraard leidt het gebruik van de foute laagdikte ook tot een fout in de bepaling van de ondergrondstijfheid, zij het dat de ondergrond stijver wordt geschat dan werkelijk het geval is. Deze compensatie leidt tot afwijkingen in

de rek onder in het asfalt die beperkt zijn. In het rekenvoorbeeld waren de afwijkingen niet meer dan 3% en 6%.

Zelfs als de stijfheidsmoduli van het asfalt juist en accuraat zijn bepaald, dan nog is de stijfheid alleen niet de enige indicator voor de sterkte. Figuur 2 toont het verloop van de laagdikte van de bekleding over de lengte van een dijkvak. De dikten variëren sterk over de lengte van het vak; de dikste locatie is meer dan viermaal (!) zo dik als de dunste locatie. De dikte heeft naast de stijfheid invloed op de weerstand van de dijkbekleding tegen golfklappen. Daarom hoort de laagdikte in de monitoringsparameter verdisconteerd te zijn.



Figuur 2 Laagdikte asfalt Hellegatsdam - meetvak 2

Figuur 2 geeft aan dat het verstandig is voor een snelle monitoring van de structurele conditie van de dijkbekleding de asfaltrek onder in het asfalt als structurele parameter te gebruiken. De structurele conditie is namelijk afhankelijk van de combinatie van laagdikte en stijfheden en de asfaltrek is een parameter waarin al die parameters handig zijn gecombineerd. De asfaltrek is sterk afhankelijk van het deflectieprofiel, meer specifiek van het verschil tussen de centrumdeflectie en de deflectie op 300 mm [8] en in mindere mate van de laagdikte van het asfalt. De invloed van de laagdikte neemt af met toename van de asfaltdikte. Voor het voorbeeld van de Hellegatsdam - meetvak 2 leidt een onder/overschatting van de asfaltdikte met 10% tot een vermindering/vermeerdering van de asfaltrek van 5,5%.

3.7.2 Schatting van structurele parameter asfaltrek

In de wegenbouwbranche wordt in de meeste landen de maatgevende horizontale rek onder in de asfaltlaag gebruikt om de vermoeiingssterkte te bepalen. In sommige landen wordt de maatgevende horizontale spanning gebruikt. De maatgevende rek is de rek onder in het asfalt onder

de ontwerpverkeersbelasting. Deze ontwerpbelasting is vrijwel altijd één zijde van een 100 kN aslast. Bij de ontwerp-, c.q. dimensioneringsberekeningen wordt het rijdend karakter van de verkeersbelasting verdisconteerd in de keuze van de stijfheidsmoduli. Met andere woorden de pulsduur van een vrachtwagenwielpassage wordt omgezet naar een lastfrequentie. Samen met de ontwerptemperatuur kan dan voor het gekozen asfaltmengsel de stijfheid worden bepaald die in de berekeningen moet worden gehanteerd. Het rekenmodel is dus statisch; de laagstijfheden zijn pseudodynamisch.

Normaal worden deflectieresultaten via een terugrekenprocedure omgezet in een set laagstijfheden en wordt voor de set laagstijfheden en laagdikten de maatgevende rek berekend onder een maatgevende belasting aan het wegoppervlak. Deze rekencyclus kan tijdrovend zijn vooral als de fit tussen gemeten en gemodelleerd deflectieprofiel slecht is, d.w.z. afwijkingen van meer dan 2% en als de laagstijfheden van opeenvolgende lagen dicht of juist ver van elkaar liggen. In die gevallen laat de nauwkeurigheid van de gangbare terugrekenroutines te wensen over en moet een deskundige in het terugrekenproces ingrijpen.

In het kader van het opzetten van CROW ontwerpmethodes voor dunne asfaltverhardingen is een voorspellend model ontwikkeld dat uit de gemeten deflectie en de asfaltdikte direct de maatgevende asfaltrek kan berekenen [9]. Omdat op lagere ordewegen naast dunne asfaltlagen ook dikke asfaltlagen voorkomen, is bij de ontwikkeling van het model rekening gehouden met asfaltlagen tot een dikte van 250 mm. In het ontwikkelde model wordt standaard een uniform verdeelde belasting van 50 kN maatgevende met een cirkelvormig lastoppervlak met een diameter van 300 mm gehanteerd. Deze belasting is kenmerkend voor een VGD-belasting en een standaard vrachtwagenwielbelasting [10].

$$\log(\varepsilon_1) = 1,06755 + 0,56178 \cdot \log(h_1) + 0,03233 \cdot \log(d_{1800}) + 0,47462 \cdot \log(SCI_{300}) + 1,15612 \cdot \log(BDI) - 0,68266 \cdot \log(BCI) \quad (4)$$

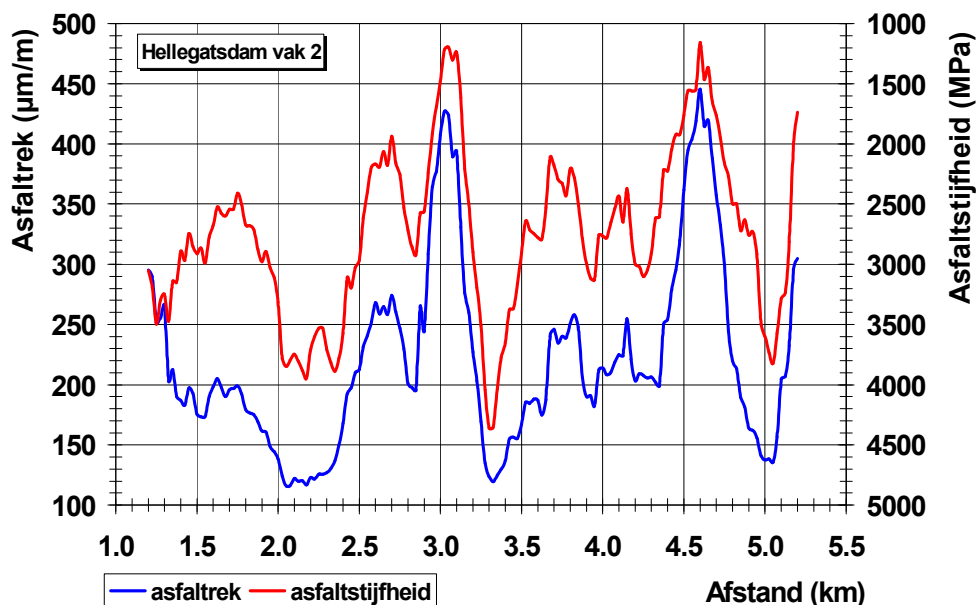
waarbij	ε_1	=	maximum rek onder in asfalt onder belasting van 50 kN ($\mu\text{m/m}$)
	h_1	=	laagdikte asfalt (mm)
	d_i	=	deflectie onder belasting van 50 kN gemeten op afstand i mm vanaf het lastcentrum (μm)
	SCI_{300}	=	Surface Curvature Index $d_0 - d_{300}$ (μm)
	BDI	=	Base Damage Index $d_{300} - d_{600}$ (μm)
	BCI	=	Base Curvature Index $d_{600} - d_{900}$ (μm)

In [10] staan geen gegevens vermeld over de nauwkeurigheid van het voorspellende model (*Opmerking C. van Gurp als ontwikkelaar van het model: "De correlatiecoëfficiënt r^2 van het model bedraagt meer dan 0,9; de brongegevens zijn verloren gegaan"*).

De rek hoort bij de temperatuurcondities waaronder de deflecties zijn bepaald. Er zijn normalisatieformules beschikbaar om de deflectie te normaliseren naar een standaardtemperatuur. Als de rek moet worden bepaald voor een bepaalde referentie lastfrequentie, dan moet de benodigde conversie worden vertaald in een extra temperatuurcorrectie via een standaard mastercurve.

Figuur 3 toont het verloop van de asfaltrek en de stijfheidsmodulus van het asfalt met de afstand voor meetvak 2 van de Hellegatsdam. De data zijn afgeleid uit de laagdikten en de gemeten deflecties. De gepresenteerde waarden zijn voortschrijdende gemiddelden over een reeks van acht opeenvolgende meetpunten. Deze middeling is nodig om het springerige beeld van de structurele parameters uit te dempen. In het voorbeeldgeval van de Hellegatsdam zijn de deflecties over een enkele lijn gemiddeld.

De stijfheidsmodulus staat afgebeeld op de rechter verticale as. Met opzet is de as van hoog naar laag uitgezet om de vergelijking met de asfaltrek te vergemakkelijken.



Figuur 3 Verloop van asfaltrek en asfaltstijfheid met afstand

De grafiek laat duidelijk zien het verloop van de asfaltstijfheid en de asfaltrek een gelijkvormig patroon hebben. Het verband is natuurlijk niet perfect omdat in de asfaltrek ook wijzigingen in ondergrondstijfheid en laagdikte zijn verdisconteerd. De hoge pieken in de grafiek duiden op (relatief) zwakke plekken.

3.7.3 Aanpassing voorspellend rekmodel

Het in vergelijking (4) gepresenteerde model is afgeleid uit een zeer grote set vierlagenconstructies. Het is niet zo moeilijk om voor de dijkbekledingen een soort gelijk model te ontwikkelen met de rek onder in het asfalt of de spanning onder in het asfalt als te berekenen grootheden op basis van de deflectiedata en de laagdikten. De ontwikkeling vergt het samenstellen van een grote set combinaties van laagstijfheden en laagdikten en verschillende soorten belastingen, zoals de VGD-belasting en de golfklapbelasting. Onder de VGD-belasting kan het deflectieprofiel worden berekend. De maatgevende indicatoren zoals rek en spanning worden onder de typische golfklapbelasting berekend. Via statistische analyses kunnen de best fittende modellen worden ontwikkeld.

3.8 Spreiding in structurele parameters

Voor het voorbeeld van Hellegatsdam meetvak 2 is onderzocht wat de spreiding of nauwkeuriger gezegd de variatiecoëfficiënt in de structurele parameters is over de volle lengte van meetvak 2 (zie Tabel 2). De asfaltdikte is bepaald met radarmetingen. De asfaltrek is berekend uit de laagdikte en het deflectieprofiel. Voor de linker datakolom hebben de individuele meetpunten als basis gefungeerd; voor de rechterkolom zijn dit de voortschrijdende gemiddelden over een grid van acht bij elkaar liggende meetpunten. De systematiek van het voortschrijdende gemiddelde wordt standaard in de gedetailleerde toetsing van dijkbekledingen gebruikt.

Tabel 2 Variatiecoëfficiënten van structurele parameters Hellegatsdam meetvak 2

Parameter	Variatiecoëfficiënt (%) over individuele waarden	Variatiecoëfficiënt (%) over grid van 8 waarden
Asfaltstijfheid	44,3	25,1
Ondergrondstijfheid	13,7	9,1
Asfaltdikte	16,6	9,9
Asfaltrek	54,2	35,5
Deflectie op 0 mm	34,7	24,4
Deflectie op 300 mm	28,6	18,1
Deflectie op 600 mm	19,4	12,4
Deflectie op 900 mm	18,7	9,1
Deflectie op 1200 mm	14,2	6,8
Deflectie op 1500 mm	11,5	5,8
Deflectie op 1800 mm	14,2	7,2
SCI ₃₀₀	59,8	40,6
BDI	45,9	31,9
BCI	33,3	24,0

Het is gebruikelijk dat de variatie in ondergrondstijfheid, en dus in deflecties ver van het lastcentrum kleiner is dan in die van de asfaltstijfheid en de deflectiegrootheden dichtbij het lastcentrum. Tabel 2 toont duidelijk de gebruikelijke trend in afname van variatiecoëfficiënt met afstand tot het lastmidden zien. Zoals verwacht neemt de variatiecoëfficiënt af wanneer de berekening wordt gebaseerd op voortschrijdende gemiddelden. Uit de tabel valt ook waar te nemen dat de spreiding in asfaltrek nagenoeg gelijk is aan die van de parameter SCI₃₀₀. Dit is conform verwachting omdat in wegebouwkringen heel vaak de SCI-parameter als voorspeller van de asfaltrek wordt gebruikt.

In paragraaf 4.3 wordt meer informatie verschaft over het verloop van spreiding met de tijd.

3.9 Correlatie tussen laboratoriumstijfheid en breuksterkte

3.9.1 Laboratoriumstijfheid versus breuksterkte

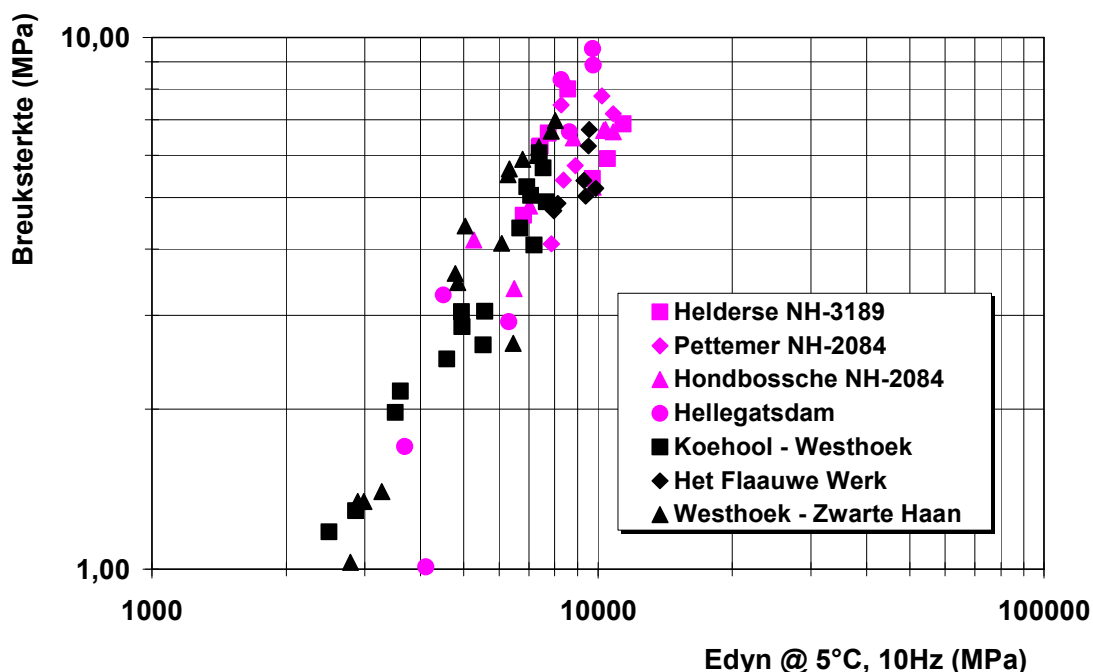
Bij de analyse van de data van uitgevoerd materiaalonderzoek blijken van slechts zeven onderzochte waterkeringen voldoende data beschikbaar te zijn om een relatie tussen de laboratorij-

umstijfheidsmodulus en de breuksterkte te onderzoeken. De stijfheidsmodulus van het asfalt is bepaald bij drie temperaturen (5, 15 en 25 °C) en verschillende frequenties tussen 0,1 en 30 Hz. De geanalyseerde stijfheidsmodulus is de modulus die naar een temperatuur van 5 °C en een belastingsfrequentie van 10 Hz is genormaliseerd. Deze lastfrequentie is kenmerkend voor de drukstoot van een enkele golf.

De breuksterkte is voor de Houtribdijk bepaald op half-cirkelvormige proefstukken in de SCB-opstelling. De proef is uitgevoerd bij een constante belastingsnelheid van 0,085 mm/s of 0,35 mm/s bij een temperatuur van 5 °C. Het proefstuk is belast tot bezwijken. Voor alle andere dijkvakken is de breuksterkte bepaald op balkjes van 250x50x50 mm in de driepuntsbuigopstelling.

Figuur 4 toont de resultaten van de analyse. De grafiek laat zien dat de resultaten van verschillende waterkeringen en leeftijden, mate van veroudering, etc van asfalt in een enkel verband kunnen worden verrat. Dit betekent dat de relatie met grote mate van betrouwbaarheid kan worden gebruikt voor het voorspellen van de breuksterkte op basis van de stijfheidsmodulus van asfaltproefstukken uit andere asfaltwaterkeringen.

De twee parameters stijfheidsmodulus en breuksterkte zijn beide op logaritmische schaal uitgezet omdat door deze conversie een betere fit wordt verkregen dan bij regressie op lineaire schaal. De grafiek toont overduidelijk aan dat er een nauwkeurige relatie bestaat tussen de laboratoriumstijfheid en de breuksterkte.



Figuur 4 Relatie laboratoriumstijfheidsmodulus en breuksterkte

Tabel 3 bevat een samenvatting van de regressieanalyse. De standaardfout in de schatting van de breuksterkte bedraagt 0,09988. De machtsverheffing $10^{0,09988}$ (de regressie is op log-basis

uitgevoerd) levert een waarde van ongeveer 1,25 op. Dit betekent dat de fout in de geschatte breuksterkte ongeveer 25% is. De breuksterkte kan namelijk 1,25 maal kleiner of groter zijn. In plaats van de term standaardfout kan men in de literatuur voor dezelfde grootte ook de term standaardafwijking tegenkomen. In de routines van Microsoft Excel 2007 wordt de term standaardfout (in Engelstalige versie standard error) gebruikt.

Tabel 3 Regressieresultaten Edyn - breuksterkte (log-log)

helling	1,33855
constante	-4,47963
standaardfout in helling	0,07192
standaardfout in constante	0,2755
correlatiecoëfficiënt r^2	0,8339
standaardfout in schatting van breuksterkte	0,09988
toetsingsgrootte F	346,419
vrijheidsgraden	69
regressiesom kwadraten	3,45575
residuele som kwadraten	0,68832

De relatie tussen laboratoriumstijfheid asfalt en breuksterkte luidt:

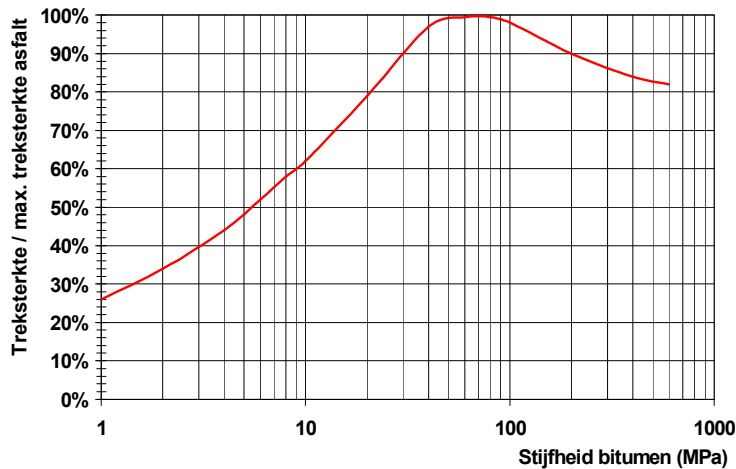
$$\log(\sigma_{br}) = -4,47963 + 1,33855 \cdot \log(E_{dyn}) \quad (5)$$

waarbij E_{dyn} = laboratoriumstijfheidsmodulus asfalt bij 5 °C en 10 Hz (MPa)
 σ_{br} = breuksterkte asfalt bij 5 °C (MPa)

LET OP: Vergelijking (5) is alleen geldig op het stijfheidsinterval tussen 2000 MPa en 12.000 MPa.

3.9.2 Verklaring relatie laboratoriumstijfheid en breuksterkte

De relatie tussen de treksterkte c.q. breuksterkte van asfalt en de stijfheid van bitumen is al lang geleden beschreven door Heukelom [3]. Hij constateerde dat de treksterkte, zowel via een directe trekproef of via buiging, meestal niet veel hoger was dan 8 MPa voor de toenmalig gebruikte mengsels. In het waterkeringenonderzoek is een waarde van bijna 10 MPa als maximum gevonden. Heukelom nam ook waar dat de verhouding van de treksterkte c.q. breuksterkte en de grootste waarde die in zijn experimenten voor de treksterkte werd gevonden onafhankelijk was van het type asfaltmengsel en een functie was van de stijfheid van de bitumen.

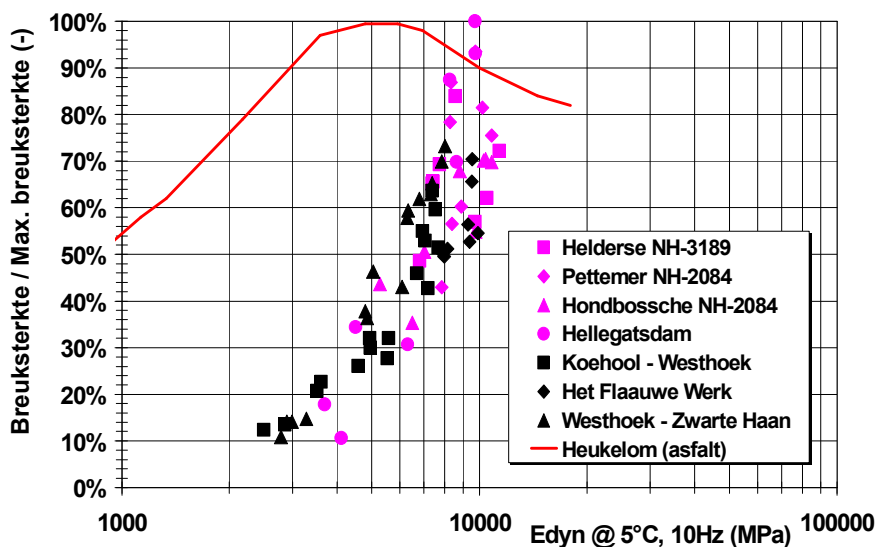


Figuur 5 Relatie tussen genormaliseerde asfaltbreuksterkte en bitumenstijfheid

Figuur 5 toont de door Heukelom opgestelde grafiek. De penetraties van de door Heukelom onderzochte bitumina varieerden van pen 25 tot pen 190, terwijl het gehalte aan steen varieerde van 45% tot 65%.

Door de bitumenstijfheid te vertalen in een asfaltstijfheid kan indicatief worden bepaald of de Heukelomgrafiek overeenkomt met de relatie tussen stijfheid en breuksterkte afkomstig van de dijkbekledingen en zoals afgebeeld in Figuur 4. Voor de vertaling is uitgegaan van een asfaltmengsel met een holle ruimte van 5% en een bitumengehalte "op" van 7% m/m. Uiteraard zullen andere combinaties van holle ruimte en bitumengehalte leiden tot een andere vertaling van bitumenstijfheid naar asfaltmengselstijfheid.

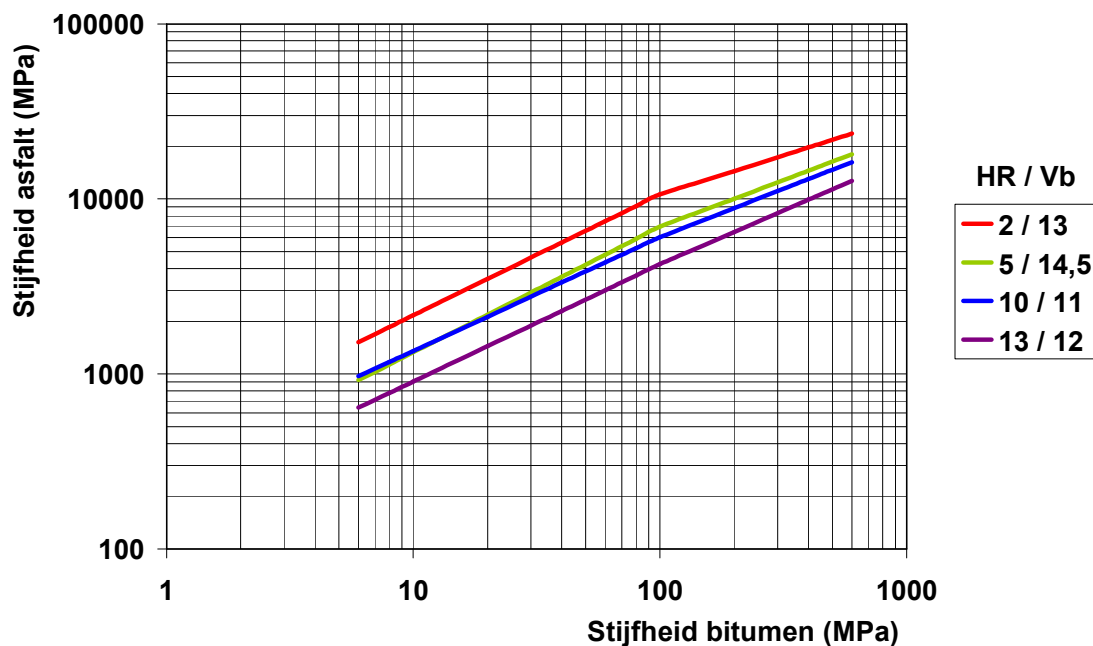
De asfaltstijfheidsmoduli zijn bepaald met het Shell-softwarepakket BANDS 2.0. Figuur 6 toont de relatie tussen de asfaltstijfheid en de genormaliseerde breuksterkte (quotient van breuksterkte en grootste waarde gevonden voor de breuksterkte). Om een vergelijking met de Heukelomgrafiek te vereenvoudigen, is de genormaliseerde breuksterkte op een lineaire schaal afgebeeld.



Figuur 6 Relatie tussen asfaltstijfheid en verhouding breuksterkte

De helling van de datapunten van de dijkvakken is vrijwel gelijk aan de helling van de relatie die Heukelom heeft gevonden. De datapunten liggen alleen te ver naar rechts, met andere woorden de stijfheidsmoduli zijn aan de te hoge kant in relatie tot de breuksterkte.

Met behulp van het computerprogramma BANDS 2.0 is voor drie andere combinaties van holle ruimte (HR) en bitumengehalte (Vb) onderzocht hoe de relatie tussen bitumenstijfheid en asfaltstijfheid verandert. Het in Figuur 7 genoemde bitumengehalte is uitgedrukt in volumeprocenten. De groene lijn voor de combinatie HR/Vb van 5/14,5 is in Figuur 6 gebruikt. Met behulp van de lijnen kan worden afgeleid dat de conversie van bitumenstijfheid naar asfaltstijfheid een zekere bandbreedte kent. Voor gangbare asfaltmengsels blijft echter een groot verschil bestaan tussen de asfaltstijfheidsmoduli uit het waterkeringenonderzoek en asfaltstijfheidsmoduli die met BANDS 2.0 uit mengselsamenstelling worden voorspeld. Heukelom vermeldt in [3] niet wat de precieze samenstelling van de door hem onderzochte mengsels was. Waarschijnlijk wordt het verschil in asfaltstijfheid veroorzaakt door het gehalte aan steen.



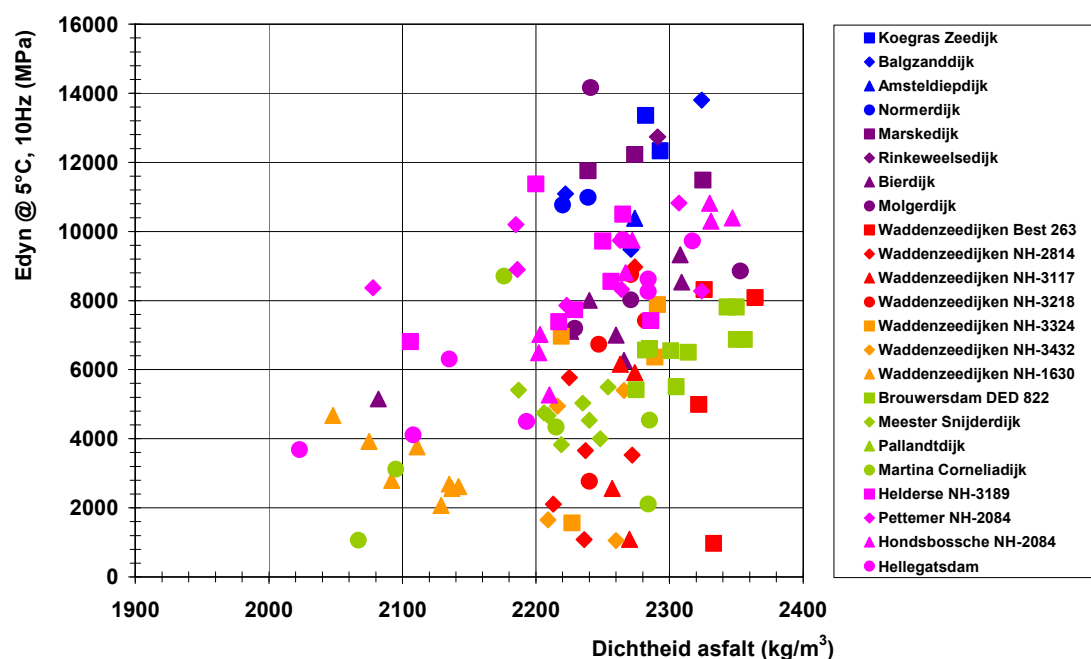
Figuur 7 Relatie tussen bitumenstijfheid en asfaltstijfheid

3.10 Effect van dichtheid van asfalt

3.10.1 Invloed van dichtheid asfalt op laboratoriumstijfheid

Van diverse, maar niet alle, dijkvakken is informatie voorhanden om een analyse uit te voeren op de relatie tussen dichtheid en stijfheidsmodulus uit de driepuntsbuigproef. Uit de grafiek van Figuur 8 valt op te maken dat lage dichtheden leiden tot lage stijfheidsmoduli. Bij toenemende dichtheid is echter geen tendens waar te nemen in welke mate de stijfheid toeneemt. Waarschijnlijk wordt dit gedeeltelijk veroorzaakt door de verschillen in asfaltmengsels tussen de di-

verse dijkvakken. Voor sommige vakken is een bruikbare relatie af te leiden tussen dichtheid en stijfheid; voor tal van andere is dit niet mogelijk.



Figuur 8 Relatie dichtheid en laboratoriumasfaltstijfheid

3.10.2 Invloed dichtheid asfalt op breuksterkte

In analogie met Figuur 8 toont Figuur 9 de relatie tussen de dichtheid en de breuksterkte van de onderzochte asfaltproefstukken. Uit de laatste grafiek valt duidelijk op te maken dat voor vrijwel elk dijkvak de breuksterkte toeneemt bij toenemende dichtheid. Dit is conform verwachting. De waarden voor de dichtheid zijn bepaald op hetzelfde deel van de boorkern.

Voor sommige dijkvakken kan een bruikbare relatie tussen dichtheid en breuksterkte worden afgeleid, maar een algemeen bruikbare versie zal een grote mate van onnauwkeurigheid bezitten vanwege de grote spreiding in en tussen de dijkvakken. Weglaten van een of meer dijkvakken uit de analyse levert geen noemenswaardige verbetering op van de relatie.

Tabel 4 Regressieresultaten breuksterkte - dichtheid (lin-lin)

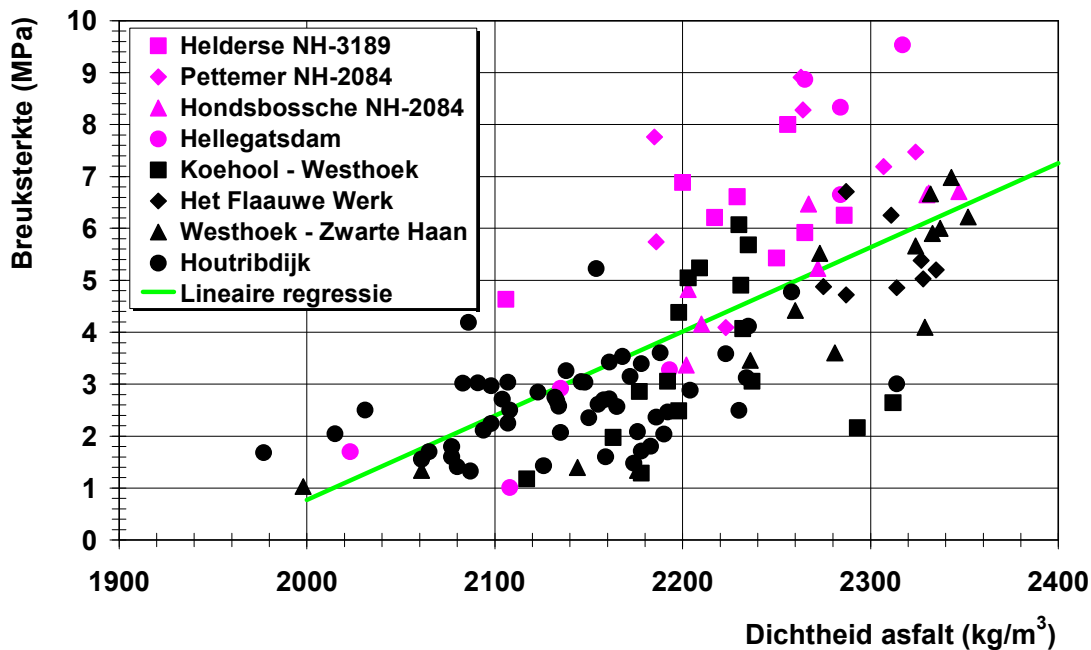
helling	0,0162
constante	-31,6433
standaardfout in helling	0,00151
standaardfout in constante	3,3290
correlatiecoëfficiënt r^2	0,4824
standaardfout in schatting van breuksterkte	1,4775
toetsingsgrootte F	114,614
vrijheidsgraden	123
regressiesom kwadraten	250,215
residuele som kwadraten	268,523

De relatie tussen de dichtheid en de breuksterkte van asfalt luidt:

$$\sigma_{br} = -31,6433 + 0,0162 \cdot \rho_p \quad (6)$$

waarbij σ_{br} = breuksterkte asfalt bij 5 °C (MPa)
 ρ_p = dichtheid asfaltproefstuk (kg/m^3)

Ter illustratie is de regressielijn ingetekend in de set datapunten van Figuur 9. De exacte ligging is niet zozeer van belang; de helling is van groter belang. De lijn geeft aan dat per dijkvak de conclusie kan worden getrokken dat bij een toename van de dichtheid van het asfaltproefstuk met 10 kg/m^3 de breuksterkte met ongeveer 0,16 MPa toeneemt. Let op dat de relatie alleen geldig is voor het onderzochte interval van dichtheden.



Figuur 9 Relatie dichtheid en breuksterkte

3.10.3 Interactie laboratoriumstijfheid, dichtheid en breuksterkte asfalt

Voor zeven van de onderzochte dijkvakken zijn in het materiaalonderzoek volledige sets van data voor de laboratoriumstijfheidsmodulus bij 5 °C en 10 Hz, de dichtheid van het asfaltproefstuk en de breuksterkte bij 5 °C gerapporteerd. Tabel 5 presenteert de voornaamste resultaten van de regressieanalyse.

Tabel 5 Regressieresultaten Edyn - dichtheid - breuksterkte (log-log-log)

coëfficiënt stijfheidsmodulus	1,1784
coëfficiënt dichtheid	2,7707
constante	-13,1489
standaardfout in coëfficiënt stijfheid	0,0855
standaardfout coëfficiënt dichtheid	0,9003
standaardfout constante	2,8288
correlatiecoëfficiënt r^2	0,8542
standaardfout in schatting van breuksterkte	0,09426
toetsingsgrootte F	199,214
vrijheidsgraden	68
regressiesom kwadraten	3,53991
residuele som kwadraten	0,60416

De relatie tussen stijfheid asfalt, dichtheid en breuksterkte luidt:

$$\log(\sigma_{br}) = -13,1489 + 1,1784 \cdot \log(E_{dyn}) + 2,7707 \cdot \log(\rho_p) \quad (7)$$

De regressiecoëfficiënten voor de stijfheid en dichtheid zijn beide positief, wat conform de verwachting is. Hoe stijver en dichter het asfaltproefstuk is, des te hoger zal de breuksterkte zijn.

De standaardfout in de onafhankelijke variabele breuksterkte is slechts zeer licht beter geworden vergeleken met vergelijking (5). De dichtheid van het proefstuk levert dus een verwaarloosbare bijdrage aan de nauwkeurigheid van de relatie.

Uit de analyse kan de conclusie worden getrokken dat er een relatie bestaat tussen de stijfheidsmodulus van het asfalt bepaald aan de hand van een proefstuk en de breuksterkte van het asfalt. De dichtheid van het proefstuk heeft een verwaarloosbare invloed op de relatie.

3.11 Schatting vermoeiing

In de Nederlandse ontwerpgrafieken van asfaltwegen wordt altijd gebruik gemaakt van de volgende asfaltvermoeiingslijnen ongeacht of een valgewichtbelasting of een vrachtwagenwielbelasting als lastvorm wordt gekozen.

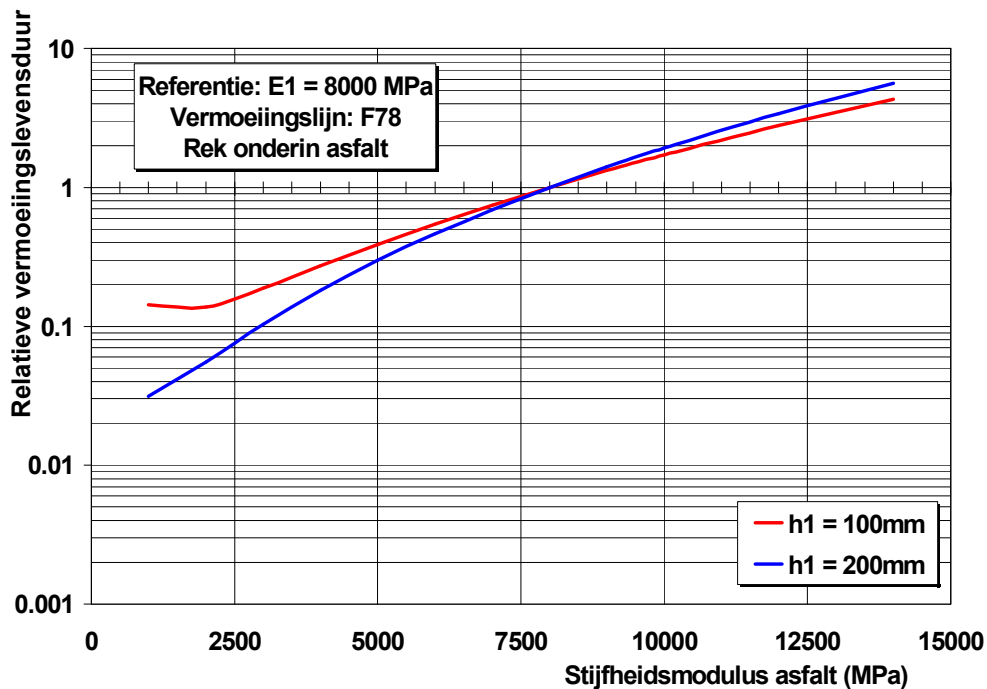
$$\ln(N_{fat}) = c_1 \cdot \ln(E_1)^3 + c_2 \cdot \ln(E_1)^2 + c_3 \cdot \ln(E_1) + c_4 + c_5 \cdot \ln(\varepsilon_1) \quad (8)$$

waarbij

N_{fat}	=	vermoeiingssterkte (aantal toelaatbare lastherhalingen)
E_1	=	stijfheidsmodulus asfalt onder ontwerpcondities (MPa)
ε_1	=	maatgevende asfaltrek onder ontwerpplast ($\mu\text{m/m}$)
c_i	=	materiaalcoëfficiënt

De relatie laat duidelijk zien dat de stijfheid invloed heeft op de vermoeiingssterkte. De mate van deze invloed hangt af van de maatgevende asfaltrek en de materiaalcoëfficiënten. Om dit

effect te bepalen is een voorbeeldconstructie met een tweelagenmodel doorgerekend met een ondergrondstijfheid van 100 MPa en twee arbitrair gekozen asfaltlaagdikten van 100 mm en 200 mm. De asfaltstijfheid is gevarieerd van 1.000 MPa tot 14.000 MPa. Voor elke constructie is de maatgevende rek onder een uniforme cirkelvormige belasting van 50 kN uitgerekend. Deze rek is samen met de asfaltstijfheden in vergelijking (8) ingevuld om de vermoeiingssterkte te bepalen. Figuur 10 presenteert de verhouding van elke berekende vermoeiingssterkte met de sterkte bij een arbitrair gekozen asfaltstijfheid van 8.000 MPa als referentie.



Figuur 10 Relatieve vermoeiingssterkte voor voorbeeld (op basis van rek)

De grafiek laat duidelijk zien dat een lage stijfheid leidt tot een geringere vermoeiingssterkte. De lage asfaltstijfheid gaat altijd gepaard met een hoge waarde voor de maatgevende asfaltrek. De verschillen tussen de twee onderzochte gemodelleerde laagdikten zijn klein.

In [11] wordt de vermoeiingssterkte uitgedrukt als een functie van opgelegde spanning en breuksterkte. De formule luidt:

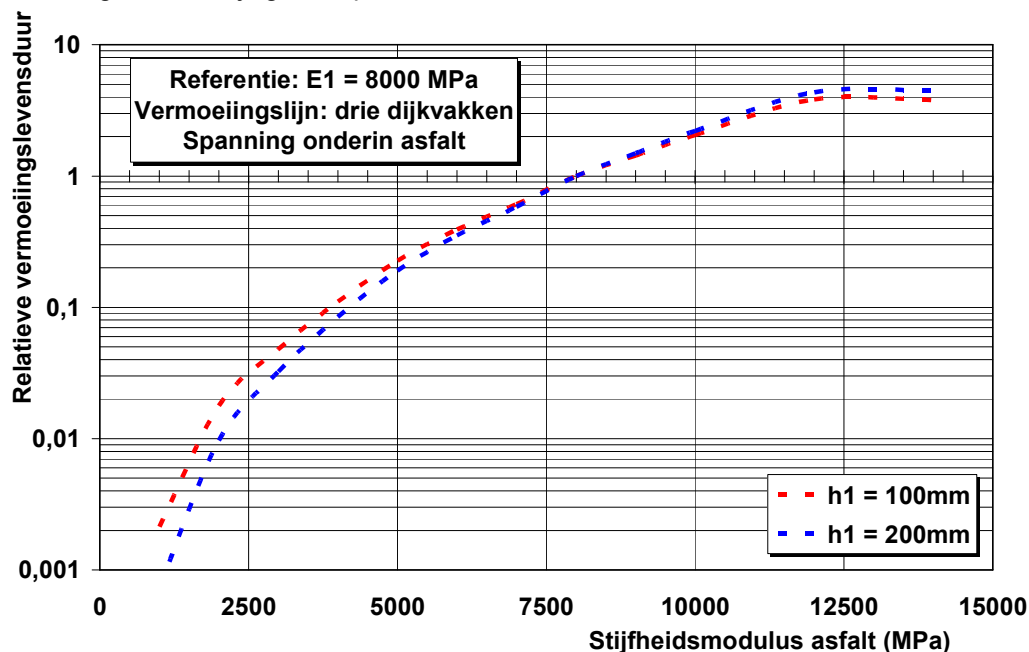
$$\log(N_{\text{fat}}) = \log(k) - a \cdot \log\left(\frac{\sigma}{\sigma_{\text{br}}}\right) \quad (9)$$

waarbij

- N_{fat} = vermoeiingssterkte (= aantal toelaatbare lastherhalingen)
- σ = opgelegde spanning c.q. maatgevende spanning onderin asfalt (MPa)
- σ_{br} = breuksterkte asfalt (MPa)
- $\log(k)$ = materiaalcoëfficiënt
- a = materiaalcoëfficiënt

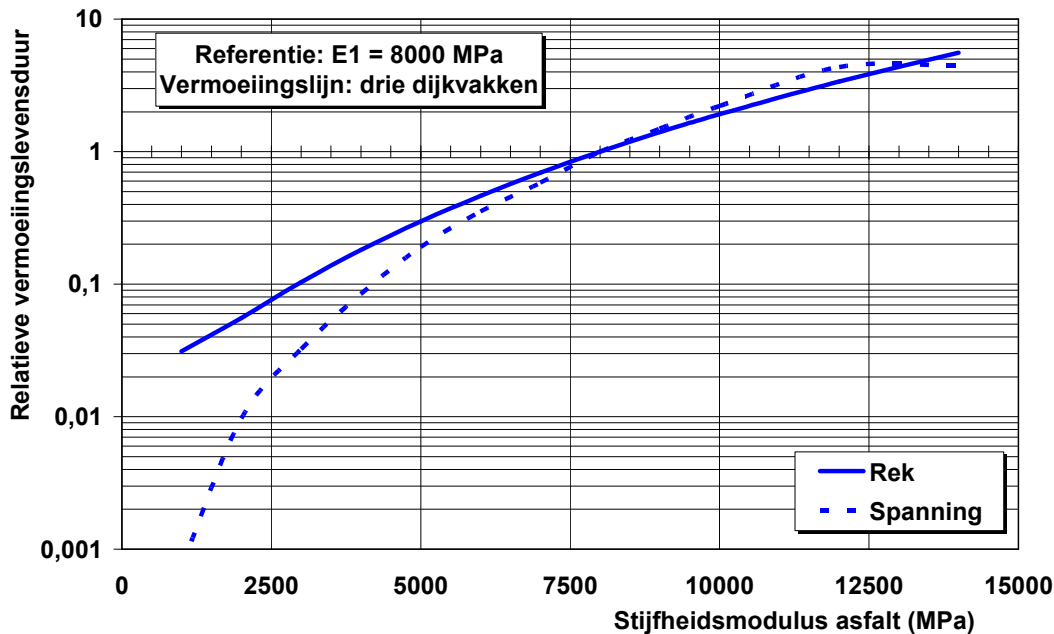
De coëfficiënten $\log(k)$ en a zijn bepaald voor de dijkvakken Helderse, Pettemer en Hondsbosche zeewering. Voor de drie dijkvakken geldt $\log(k) = 4,57$ en $a = 3,92$. De resultaten zijn verkregen bij een testtemperatuur van 5 °C en een lastpuls van 10 Hz.

Om voor vergelijking (9) dezelfde oefening te herhalen als voor vergelijking (8), zijn de maatgevende spanningen berekend onder in het asfalt onder dezelfde belasting als hiervoor beschreven. Met behulp van vergelijking (5) is op basis van de asfaltstijfheid de bijbehorende breuksterkte berekend. Vervolgens zijn voor alle situaties als in het vorige voorbeeld de diverse waarden voor de vermoeiingssterkte berekend. Figuur 11 geeft in analogie aan in welke mate de vermoeiingssterkte wijzigt ten opzichte van de referentiesituatie van $E = 8.000 \text{ MPa}$.



Figuur 11 Relatieve vermoeiingssterkte voor voorbeeld (op basis van spanning)

De vorm van de lijnen uit Figuur 11 wijkt wat af van die van Figuur 10 omdat bij toenemende asfaltstijfheid de breuksterkte is afgetopt op een maximumwaarde van 10 MPa. Dit houdt in dat de relatieve vermoeiingslijn niet verder stijgt bij toenemende asfaltstijfheid. Bij lage asfaltstijfheden is de relatieve levensduur veel lager dan die gebaseerd op de rek.



Figuur 12 Relatieve vermoeiingssterkte als functie van asfaltstijfheid

In Figuur 12 zijn de lijnen uit Figuur 10 en Figuur 11 voor de asfaltdikte 200 mm in een grafiek uitgezet. De lijnen tonen glashelder aan dat op het stijfheidsinterval van 5.000 MPa tot boven 12.000 MPa het effect van veranderende asfaltstijfheid op de relatieve vermoeiingslevensduur gelijk is, ongeacht of de relatie is gebaseerd op rek of op spanning. Dit houdt in dat monitoring van de stijfheid een bruikbare indicatie zou moeten verschaffen van de vermoeiingslevensduur.

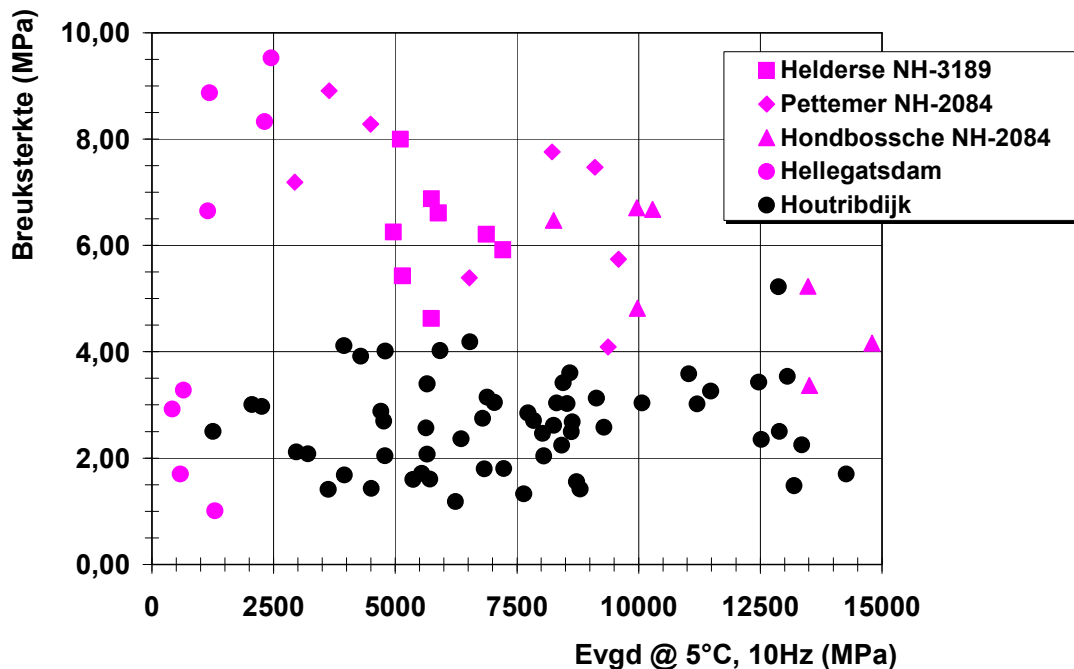
Voor asfaltstijfheden lager dan 5000 MPa wijken de lijnen uiteen. De relatie gebaseerd op spanning is gevoeliger dan die op basis van rek. Beide lijnen geven nogal altijd aan dat bij lage stijfheden de (relatieve) vermoeiingslevensduur in het geding is.

Samengevat kan worden gesteld dat monitoring van de asfaltstijfheid een bruikbaar middel is om zwakke plekken qua vermoeiingslevensduur te detecteren. Omdat er een goede relatie bestaat tussen asfaltstijfheid en asfaltrek (zie Figuur 3) is ook de asfaltrek een bruikbare indicator. Deze indicator is zelfs beter omdat ook veranderingen in laagdikte automatisch worden meegenomen.

3.12 Relatie asfaltstijfheid uit laboratorium en valgewichtdeflectiemeting

Voor de voorspelling van de breuksterkte van het asfalt op basis van de stijfheidsmodulus van het asfalt, moet nog altijd eerst een kern worden geboord waaruit vervolgens een proefstuk moet worden gezaagd alvorens de breuksterkte kan worden bepaald. Het zou veel gemakkelijker zijn als de breuksterkte zou kunnen worden voorspeld op basis van de stijfheidsmoduli of andere parameters uit de valgewichtdeflectiemetingen. Voor deze bepaling is namelijk geen destructieve handeling nodig. Wel zijn metingen van de laagdikten onontbeerlijk.

In de database bleken vijf onderzoeken voor te komen waarbij zowel valgewichtdeflectiometingen waren uitgevoerd als waarin asfaltmonsters op breuksterkte waren onderzocht. Figuur 13 toont de relatie tussen de naar 5 °C en 10 Hz genormaliseerde stijfheidsmodulus van het asfalt (bepaald uit de deflectiedata, asfalttemperatuur en mastercurve uit laboratoriumonderzoek) en de breuksterkte. De grafiek laat zien dat er geen causaal verband is tussen de twee parameters. De stijfheidsmoduli van de Houtribdijk variëren over een breed bereik terwijl de hoogste en laagste waarde voor breuksterkte zich in een nauwe, redelijk lage, band bewegen. De laboratoriumdata zijn voor dit dijkvak niet op precies dezelfde locatie bepaald als de stijfheden uit de deflectiometingen. Bovendien zijn de breuksterktes bepaald op SCB-proefstukken en niet op driepuntsbuigproeven. Gezien de wolk van spreiding wordt niet verwacht dat deze afwijkende vorm van beproeven de oorzaak is van het gebrek aan correlatie.

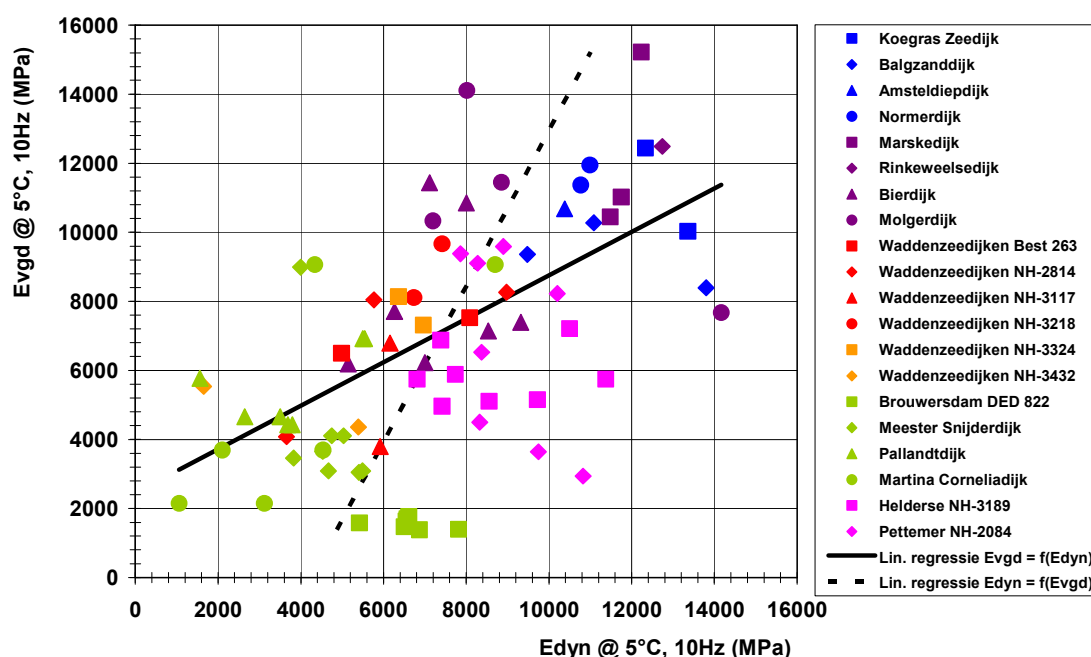


Figuur 13 Relatie stijfheidsmodulus valgewichtdeflectiometing en breuksterkte

Figuur 14 toont de relatie tussen de stijfheidsmodulus van het asfalt verkregen in het laboratorium en die uit de valgewichtdeflectiometingen. De data van de Hondbossche zeewering NH-2084 zijn niet afgebeeld omdat op dit dijkvak de onderlaag uit zandasfalt bestaat.

De laboratorium- en veldwaarde zijn per boorkernlocatie uitgezet. Beide grootheden zijn genormaliseerd naar een temperatuur van 5 °C en een lastfrequentie van 10 Hz. De grafiek laat overduidelijk zien dat er alleen een onnauwkeurige relatie is te vinden tussen de twee stijfheidsparameters. Tabel 6 bevat de voornaamste resultaten van de lineaire regressieanalyse.

Uit bestudering van het archief bleek dat deze conclusie ook in de beginjaren negentig al was getrokken.



Figuur 14 Stijfheidsmodulus asfalt laboratorium vs valgewichtdeflectiemeting

Tabel 6 Regressieresultaten Evgd als functie van Edyn en v.v.

Parameter	Evgd = b+m•Edyn	Edyn = b+m•Evgd
helling (= m)	0,6303	0,4433
constante (= b)	2449,6	4262,19
standaardfout in helling	0,1092	0,07676
standaardfout in constante	870,603	608,978
correlatiecoëfficiënt r^2	0,2794	
standaardfout in schatting van y	2991,46	2508,62
toetsingsgrootte F	33,34178	
vrijheidsgraden	86	
regressiesom kwadraten	2,9837E08	2,0983E08
residuele som kwadraten	7,6960E08	5,4121E08

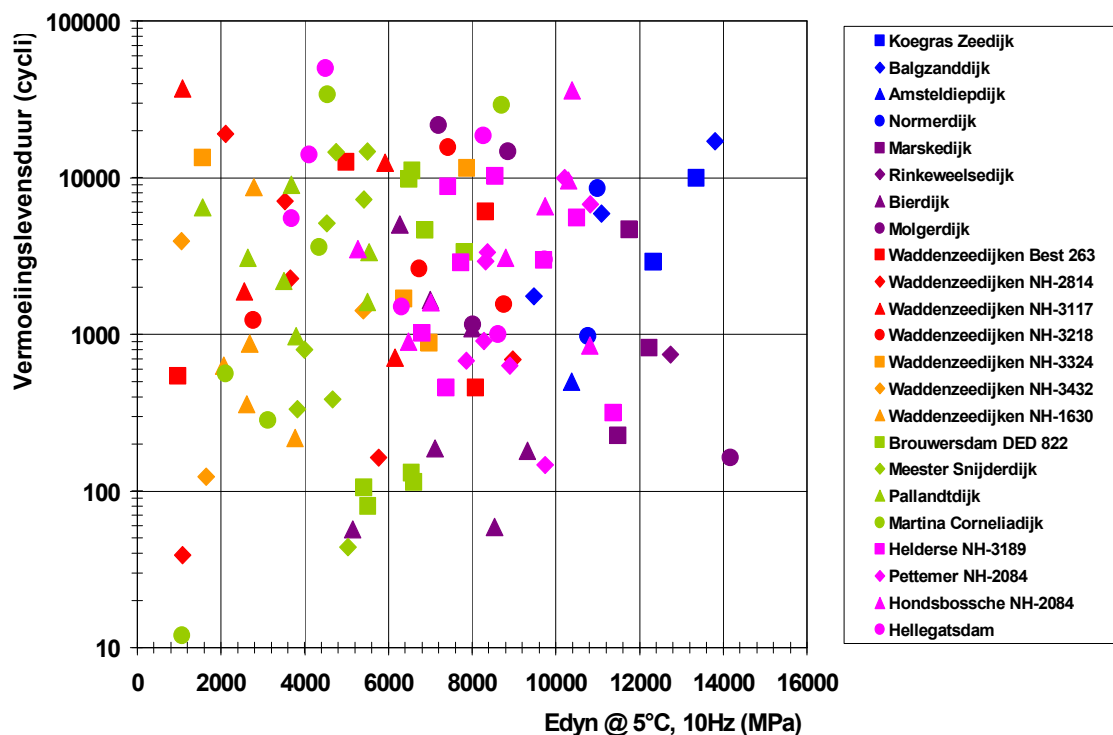
Diverse redenen zijn aan te voeren om de verschillen tussen de twee proeven te verklaren.

- De stijfheidsmoduli uit de valgewichtdeflectiemeting zouden naar verwachting lager, gelijk of hooguit een klein beetje hoger mogen zijn dan die van de laboratoriumproef. Bij een laboratoriumproef wordt een proefstuk uit een kern gezaagd. Dit proefstuk zal altijd zonder scheuren zijn, omdat anders geen valide buigproef kan worden uitgevoerd. De stijfheidsmodulus van de asfaltdijkbekleding is altijd een karakteristiek die representatief is voor een bepaald volume onder de voetplaat van de valgewichtdeflectiemeter. In de stijfheid zitten dus eventueel aanwezige ongerechtigheden, scheuren, holtes, verschillen in dichtheid en verdichtingsgraad, etc. in verdisconteerd.

- De waarde van de stijfheidsmodulus zoals bepaald in een laboratoriumproef bevat vrijwel altijd geometrische kenmerken van de proefopstelling. Dat wil zeggen dat de stijfheidsmodulus voor hetzelfde materiaal anders wordt als een andere wijze van beproeven of opstelling wordt gekozen. Bij de driepuntsbuigopstelling wordt altijd een sinusoidale zwelspanning opgelegd, dat wil zeggen dat de minimum en maximum waarde van de opgelegde sinusspanningsignaal altijd hetzelfde teken hebben. De minimum waarde ligt dicht bij de nullijn. Bij stijfheidsbepalingen bij asfaltproefstukken voor wegenbouwmengsels wordt altijd een zuivere sinusoidale wisselspanning opgelegd waarbij minimum en maximum waarde gelijk in grootte zijn, maar verschillend van teken. De stijfheidsmoduli van proefstukken van wegenbouwasfalt komen meestal goed overeen met de teruggerekende stijfheden van asfalt uit valgewichtdeflectiemetingen. Het is onduidelijk welke effecten de uitvoering van de driepuntsbuigproef invloed heeft op het testresultaat.
- In een aantal gevallen is vermoeiingsonderzoek uitgevoerd maar ontbreekt jammer genoeg de laboratoriumstijfheid.

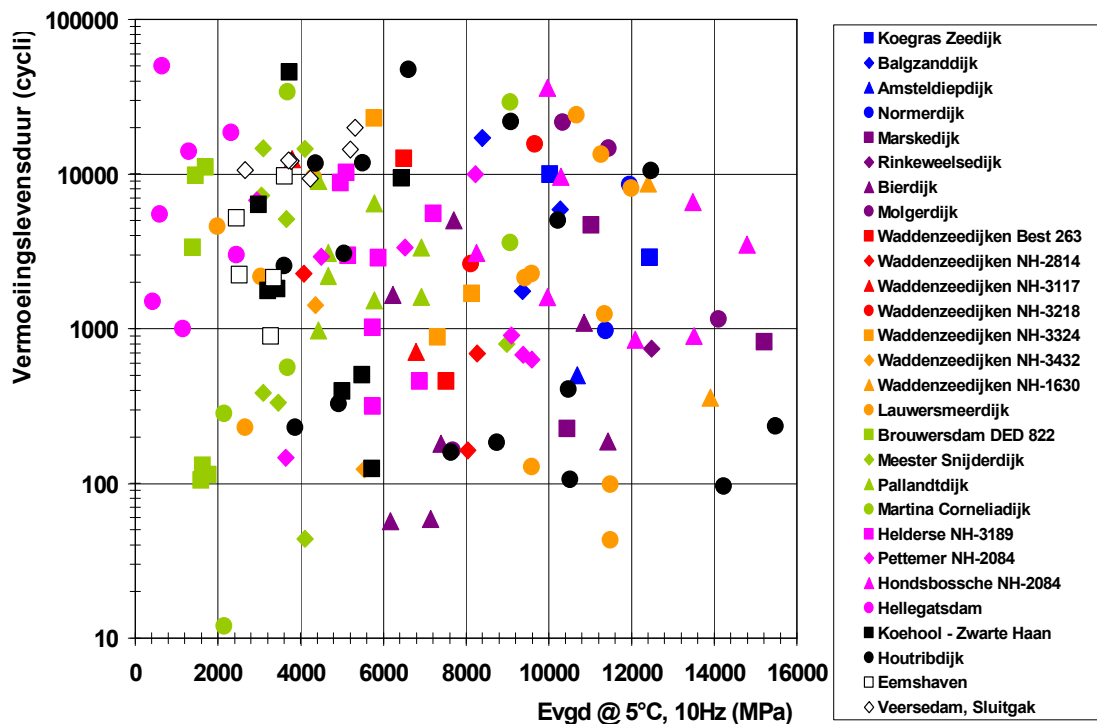
3.13 Relatie asfaltstijfheid en vermoeiingslevensduur

Omdat de relatie tussen de asfaltstijfheid bepaald in een laboratoriumproef en de uit de deflectiemetingen teruggerekende stijfheidsmodulus erg slecht is, is de relatie tussen de asfaltstijfheid en de vermoeiingslevensduur nader onderzocht. Van veel dijkvakken zijn data beschikbaar. De datapunten zijn afgebeeld in Figuur 15 en Figuur 16.



Figuur 15 Stijfheidsmodulus laboratoriumasfaltstijfheid vs vermoeiingslevensduur

Voor geen van beide grafieken kan op basis van de stijfheid van het asfalt een voorspelling van de vermoeiingslevensduur worden gedaan. Dit resultaat is conform verwachting omdat de vermoeiingslevensduur van meer aspecten afhankelijk is dan de stijfheid van de asfalt dijkbekleding alleen. De belangrijkste parameter naast de asfaltstijfheid is de asfaltlaagdikte. Bovendien is de via laboratoriumproeven gevonden vermoeiingslevensduur afhankelijk van de opgelegde spanning. Voor een vergelijking van asfaltstijfheidsmodulus en vermoeiingssterkte, zou de laatste parameter eigenlijk genormaliseerd moeten worden. Dit was op basis van de beschikbare informatie niet eenvoudig en is daarom niet uitgevoerd. In paragraaf 4.3 is een eerste aanzet gegeven om tot zo'n genormaliseerde indicator te komen.



Figuur 16 Stijfheidsmodulus asfaltstijfheid uit deflectiemetingen vs vermoeiingslevensduur

4 Monstergrootte voor vermoeiingsonderzoek van oud asfalt

4.1 Algemeen

Wil men aan de hand van een aantal valgewichtdeflectiemetingen of aan de hand van de breuksterkten van een aantal kernen uit een dijkbekleding, een uitspraak doen over bijvoorbeeld de (rest)levensduur van de constructie, dan zal het duidelijk zijn dat zo'n uitspraak niet met 100% zekerheid kan worden gedaan. Immers niet elk punt van het dijkvak is onderzocht. Wanneer de vorm van de kansverdeling bekend is, kan de steekproef worden gebruikt om de parameters van de kansverdeling te schatten, en kan met een zekere betrouwbaarheid een uitspraak over de stijfheid of sterkte worden gedaan.

Bij onderzoek in het algemeen, maar zeker bij opleveringscontroles en bij evaluaties van bestaande constructies moet veelal aan de hand van een beperkt aantal metingen een uitspraak worden gedaan over de stijfheid, sterkte of de levensduur van een constructie. Deze uitspraak kan worden gegoten in de vorm van een betrouwbaarheidsinterval. Voor de berekening van een betrouwbaarheidsinterval is het nodig dat de grootte waarover men een uitspraak wil doen, een bekende kansverdeling volgt. Het uitgangspunt "stel de variabele is normaal verdeeld" zal velen bekend voorkomen. Gemiddelden van steekproeven van voldoende omvang zijn meestal normaal verdeeld, zelfs als de verdeling zelf dat niet is. Daarom kan men bij uitspraken over gemiddelden vaak wel uitgaan van de veronderstelling van normaliteit. Bij sterkten en restlevensduren van constructies is men echter niet geïnteresseerd in de gemiddelde sterkte van de constructie of in de gemiddelde restlevensduur. Men wil dan vaak een uitspraak kunnen doen zoals: met 95% zekerheid kan worden gesteld dat minstens 80% van de constructie een restlevensduur heeft van minimaal 6 jaar.

4.2 Betrouwbaarheid en nauwkeurigheid

In deze paragraaf wordt beschreven hoe een betrouwbaarheidsinterval wordt berekend in het geval de vorm van de kansverdeling bekend is, en hoe een betrouwbaarheidsinterval moet worden geïnterpreteerd. Het is gebruikelijk om met behulp van statistische methoden aan de hand van een steekproef een bepaalde grootte te schatten en bij die schatting aan te geven hoe nauwkeurig de schatting is. De nauwkeurigheid van de schatting hangt af van de omvang van de steekproef en van de spreiding in de meetresultaten. Verder wordt gebruik gemaakt van de kansverdeling van de steekproefuitkomsten om vervolgens een kansuitspraak te doen. De nauwkeurigheid wordt dan ook vaak uitgedrukt in de vorm van een betrouwbaarheidsinterval.

De parameter μ geeft de gemiddelde waarde van een bepaalde grootte weer, de parameter σ de bijbehorende standaardafwijking. Aan de hand van een steekproef van tien waarnemingen kan een uitspraak worden gedaan over het gemiddelde van de steekproef. De werkelijke gemiddelde waarde μ is onbekend. Op basis van het gemiddelde van de steekproef en de bekende standaardafwijking σ kan een betrouwbaarheidsuitspraak worden gedaan over het werkelijke gemiddelde μ . Het betrouwbaarheidsinterval luidt:

$$\bar{x} - Z_{0,5\alpha} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + Z_{0,5\alpha} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (10)$$

waarbij n = aantal waarnemingen in steekproef
 $Z_{0,5\alpha}$ = factor afhankelijk van gewenste onbetrouwbaarheidsdrempel α

De factor Z neemt toe met toenemende betrouwbaarheid.

De breedte van het betrouwbaarheidsinterval kan op twee manieren worden verkleind:

- door het aantal metingen in de steekproef te vergroten. Algemeen geldt dat de standaardafwijking van een gemiddelde gelijk is aan de standaardafwijking van de waarnemingen gedeeld door de wortel uit het aantal waarnemingen in de steekproef
- door de betrouwbaarheid te verlagen. Een 90%-betrouwbaarheidsinterval is namelijk smaller dan een 95%-betrouwbaarheidsinterval ($Z_{0,95} = 1,645$ en $Z_{0,975} = 1,96$). Let op, het voorbeeld is van toepassing op een tweezijdig betrouwbaarheidsinterval. Voor een eenzijdig interval moeten $Z_{0,90}$ en $Z_{0,95}$ worden gebruikt.

Bij de vaststelling van het benodigde aantal waarnemingen om een bepaalde nauwkeurigheid te halen, moet men dus een keuze maken tussen de gewenste betrouwbaarheid en de hoeveelheid inspanning die men zich moet getroosten om deze betrouwbaarheid te halen.

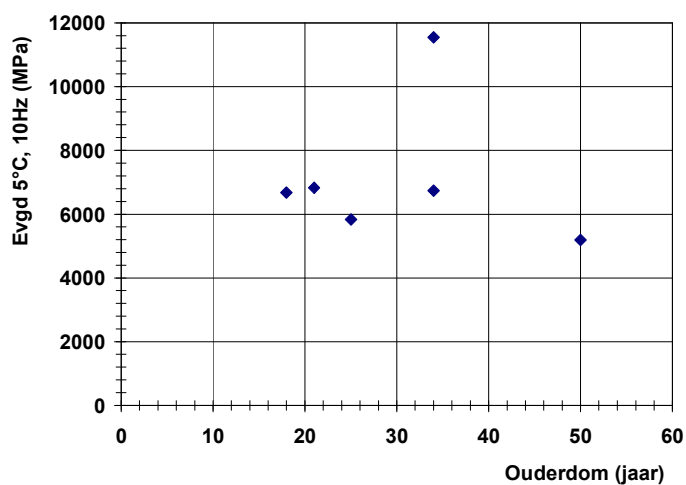
Bij bovenstaande redeneringen is ervan uitgegaan dat de standaardafwijking σ bekend is. In de praktijk is dat nooit het geval. Veelal schat men deze standaardafwijking dan ook op basis van de steekproefgegevens. Het enige dat men dan moet aanpassen in vergelijking (10) is σ vervangen door de schatting s , en het procentpunt van de standaardnormale verdeling Z vervangen door het overeenkomstige procentpunt van de Student t-verdeling met $(n-1)$ graden van vrijheid.

4.3 Ouderdom en structurele parameters

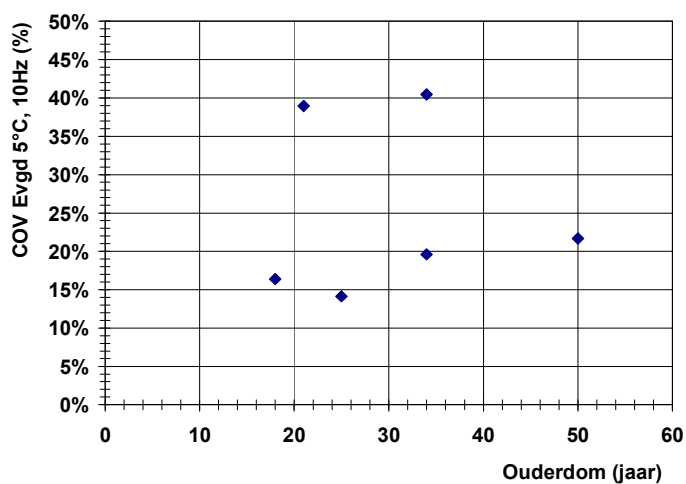
Bij de analyse van de stijfheids- en sterkteparameters blijken de volgende grootheden van belang te zijn:

- stijfheidsmodulus asfalt bepaald in laboratorium
- stijfheidsmodulus asfalt bepaald met valgewichtdeflectiemetingen
- dichtheid asfalt
- breuksterkte asfalt
- vermoeiingslevensduur asfalt

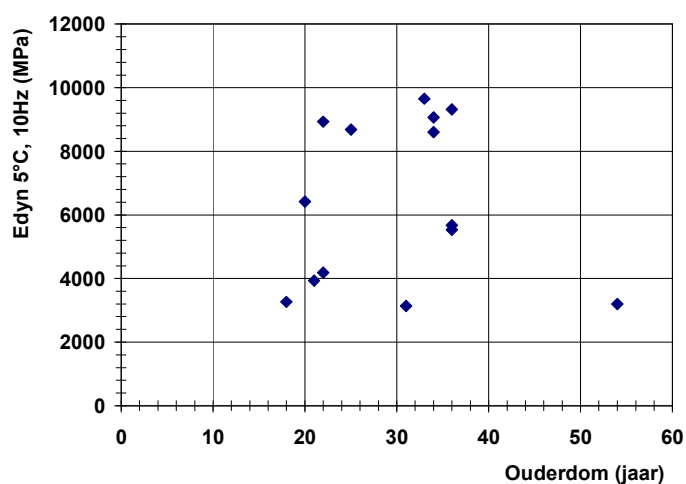
Van deze vijf grootheden is met behulp van de dataset van beschikbare data bepaald in welke mate het gemiddelde en de variatiecoëfficiënt van de genoemde grootheden afhankelijk zijn van de ouderdom van de dijkvakken. Helaas was niet van alle dijkvakken de ouderdom bekend. Voor het dijkvak Hellegatsdam was opgegeven dat de ouderdom tussen de 31 en 42 jaar lag; in de analyse is hiervoor 36 jaar als rekenwaarde genomen.



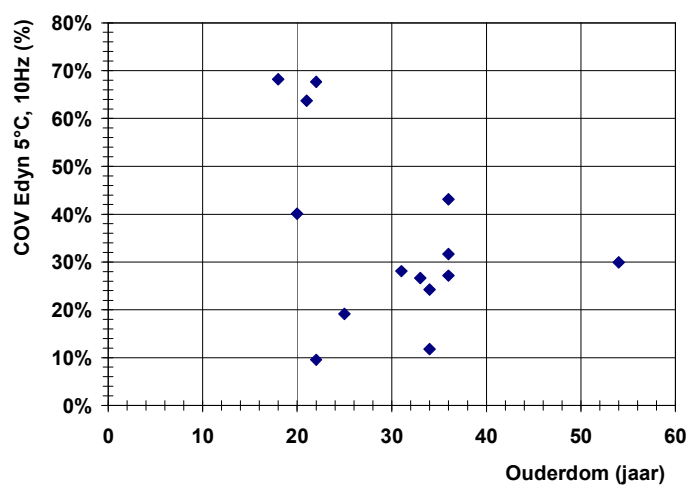
Figuur 17 Relatie tussen ouderdom en gemiddelde van VGD-stijfheid asfalt



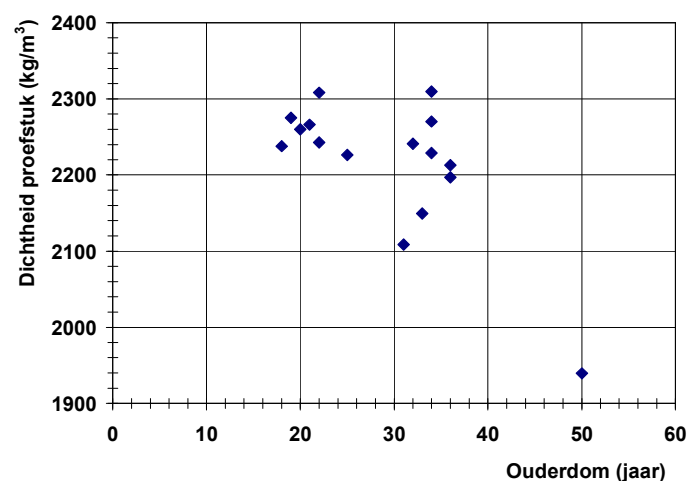
Figuur 18 Relatie tussen ouderdom en variatiecoëfficiënt van VGD-stijfheid asfalt



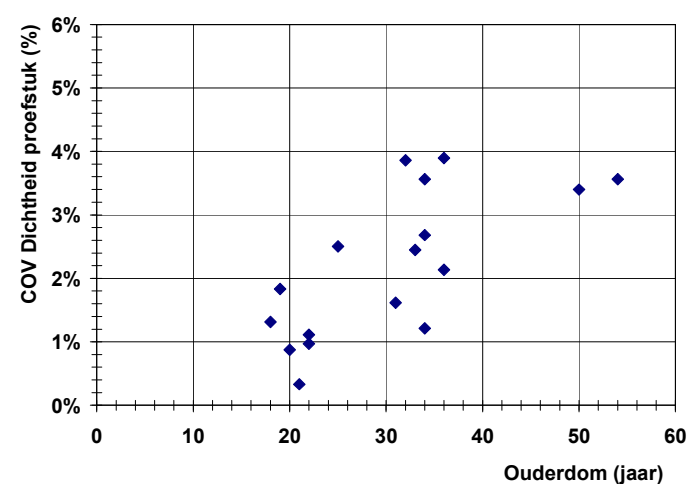
Figuur 19 Relatie tussen ouderdom en gemiddelde van lab.stijfheid asfalt



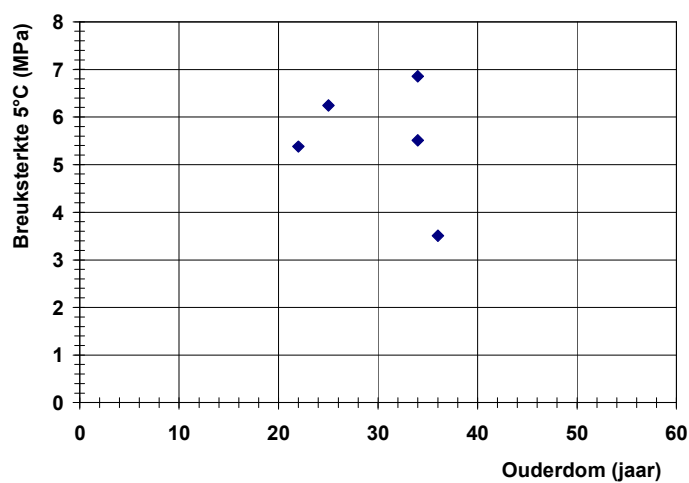
Figuur 20 Relatie tussen ouderdom en variatiecoëfficiënt van lab.stijfheid asfalt



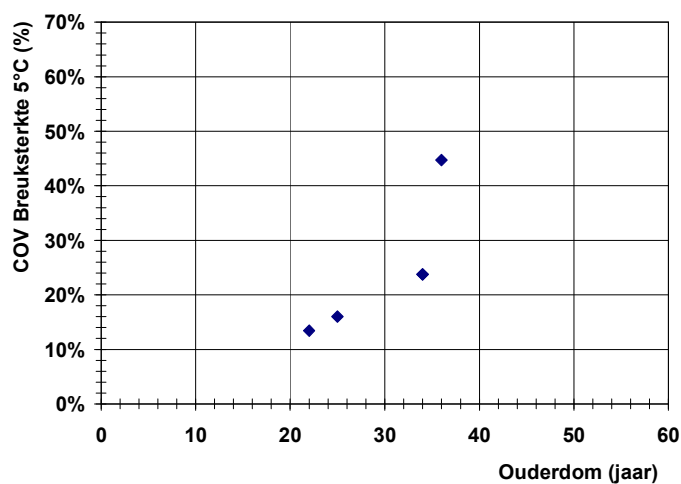
Figuur 21 Relatie tussen ouderdom en gemiddelde van dichtheid asfalt



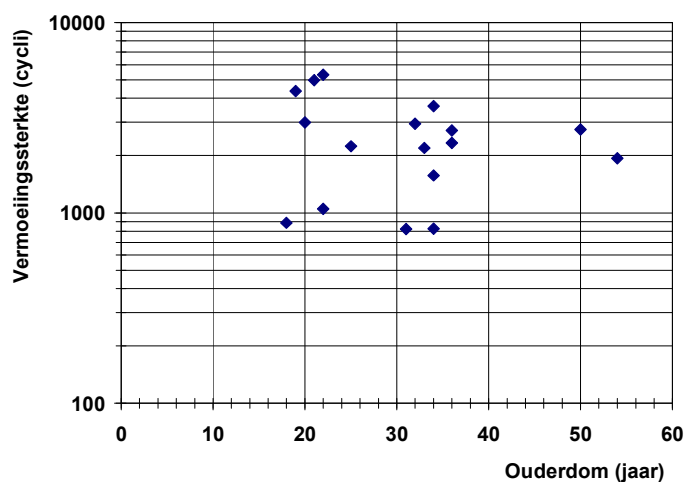
Figuur 22 Relatie tussen ouderdom en variatiecoëfficiënt van dichtheid asfalt



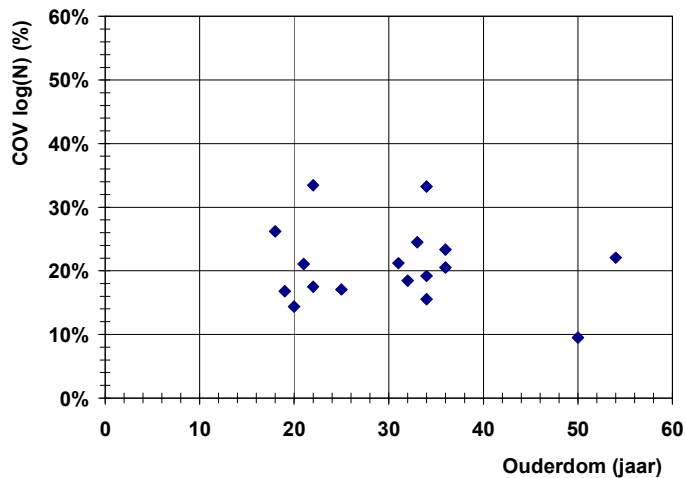
Figuur 23 Relatie tussen ouderdom en gemiddelde van breuksterkte asfalt



Figuur 24 Relatie tussen ouderdom en variatiecoëfficiënt van breuksterkte asfalt



Figuur 25 Relatie tussen ouderdom en gemiddelde van vermoeiing asfalt

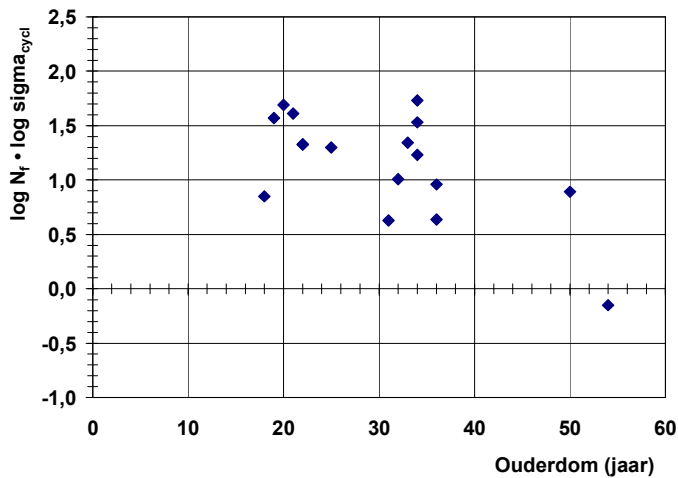


Figuur 26 Relatie tussen ouderdom en variatiecoëfficiënt van vermoeiing asfalt

Voor de vermoeiingslevensduur zijn per dijkvak eerst de logaritmes van de vermoeiingslevensduur genomen. Van deze geconverteerde waarden is vervolgens het gemiddelde berekend. Dit rekenresultaat is vervolgens weer teruggeconverteerd en in de grafiek van Figuur 25 uitgezet. De variatiecoëfficiënt uit Figuur 26 is bepaald op basis van logaritmische waarden.

Uit de grafieken kan worden geconcludeerd dat de gemeten vermoeiingslevensduur nagenoeg constant blijft met de ouderdom, terwijl de spreiding in de levensduur nagenoeg gelijk blijft. Dat is conform verwachting omdat bij de vermoeiingsproeven wordt gestreefd naar levensduren van 100 tot 10.000 lastherhalingen.

Het product van de gemiddelde vermoeiingslevensduur in een proef en de gemiddelde opgelegde cyclische spanning (beide op logaritmische basis) lijkt een bruikbare genormaliseerde indicator van de vermoeiingssterkte. In vermoeiingsproeven leiden lage cyclische spanningen altijd tot hoge waarden voor de vermoeiingslevensduur. Als de spanning wordt opgevoerd en de levensduur blijft gehandhaafd, dan geeft dit blijk van een goede prestatie van het dijkvak. Met andere woorden een hoge waarde van het product van vermoeiingslevensduur en opgelegde spanning is een indicatie van een goede vermoeiingssterkte. Figuur 27 maakt duidelijk dat de vermoeiingssterkte-indicator daalt met toenemende ouderdom van het onderzochte asfalt. Het verdient aanbeveling tot een meer onderbouwde indicator te ontwikkelen.



Figuur 27 Relatie tussen ouderdom en vermoeiingsterkte-indicator

Er zijn te weinig datacombinaties ouderdom en breuksterkte beschikbaar om een uitspraak over de relatie tussen de twee parameters te doen. In Figuur 24 staan twee datapunten afgebeeld onder de marker bij de ouderdom van 34 jaar.

Figuur 22 toont helder aan dat de spreiding in de dichtheid met de jaren toeneemt. Dit patroon is geheel conform verwachting. In Figuur 21 is een tendens zichtbaar dat de dichtheid afneemt met de ouderdom van de bekleding. Grote voorzichtigheid moet worden betracht met gebruik van deze neerwaartse lijn omdat de ligging van de lijn sterk wordt beïnvloed door het meest rechtse datapunt. Er zit dus een grote mate van toevalligheid in de relatie.

In analogie kan hetzelfde worden gezegd voor de laboratoriumstijfheid van het asfalt (zie Figuur 19). Opvallend genoeg neemt de variatiecoëfficiënt voor deze parameter met de tijd af, hetgeen niet conform verwachting is. Er is geen verklaring voor dit patroon gevonden.

Omdat slechts een beperkt aantal combinaties van ouderdom en veldstijfheid van het asfalt beschikbaar is, kan geen conclusie over het verloop van deze stijfheid met de ouderdom worden getrokken.

4.4 Monstergrootte

Voor het bepalen van het statistisch gezien minimum aantal waarnemingen in de steekproef kan worden uitgegaan van eenzijdig toetsen. Het is van belang de zwakke plekken te detecteren en niet de zeer goede. Als uitgegaan wordt van een 95% betrouwbaarheid, dan geldt $Z = 1,645$.

Het minimum aantal monsters c.q. waarnemingen n bedraagt dan:

$$n \geq \left(\frac{Z_{\alpha} \cdot \sigma}{\Delta x} \right)^2 \quad (11)$$

waarbij Δx = gewenste absolute nauwkeurigheid

Als we niet uitgaan van een absolute nauwkeurigheid maar een relatieve nauwkeurigheid, dan kan vergelijking (11) worden herschreven in:

$$n \geq \left(\frac{t_{\alpha, n-1} \cdot \text{COV}}{\Delta x / \bar{x}} \right)^2 \quad (12)$$

waarbij COV = variatiecoëfficiënt (%)
 $t_{\alpha, n-1}$ = factor Studentverdeling behorend bij onbetrouwbaarheidsdrempel α
 en $n-1$ vrijheidsgraden

 $\Delta x / \bar{x}$ = gewenste relatieve nauwkeurigheid (%)

De COV-waarden (variatiecoëfficiënten) kunnen worden afgelezen uit de grafieken in paragraaf 4.3. Deze coëfficiënten zijn kenmerkend voor onderzoek op materiaal dat al jaren tot decennia oud is.

5 Selectie van locaties voor sterkteonderzoek

5.1 Voorgestelde systematiek

Voor het sterkteonderzoek worden de zwakke plekken in een dijkbekleding geselecteerd. Dit zijn plekken met een dunne laagdikte van de dijkbekleding en een ongunstige waarde voor de asfaltstijfheid en ondergrondstijfheid. Deze combinaties van variaties in stijfheid en laagdikte worden alle drie gevangen in de maximale rek of spanning onder in de asfaltlaag onder de maatgevende belasting. Voorlopig is alleen een model beschikbaar om de maximale rek onder een uniform verdeelde belasting van 50 kN met een diameter van 300 mm rechtstreeks uit deflecties en laagdikte te bepalen. Bij de ontwikkeling van dit model (zie paragraaf 3.7.2) is uitgegaan van een maximale asfaltdikte van 250 mm. Ervaring leert dat het model nog betrouwbaar is tot laagdikten van 300 mm.

Het is geen ingewikkeld proces om een soortgelijke aanpak te ontwikkelen om met andere structurele parameters als indicator en andere maatgevende belastingcondities. In plaats van de maximale rek onderin het asfalt onder een VGD-belasting kan worden gekozen voor de ontwikkeling van een relatie tussen de maximale spanning onderin het asfalt onder een typische golfklappuls en de combinatie van laagdikten en deflecties onder een valgewichtbelasting.

Voor de selectie van de zwakke plekken zal het weinig uitmaken welke vorm het model precies heeft. Met het te ontwikkelen model op basis van spanning zullen naar alle waarschijnlijk dezelfde zwakke plekken worden gevonden als via de aanpak met vergelijking (4).

5.2 Selectiemethode zwakke plekken

Voor de detectie van zwakke plekken in een dijkvak en/of plekken die nader onderzoek naar sterkte en/of berekeningen met GOLFKLAP behoeven, moeten de volgende stappen worden genomen. De methodiek van selectie van zwakke plekken heeft veel overeenkomst met de monitoringsystematiek beschreven in paragraaf 6.3)

1. Voer valgewichtdeflectiometingen uit met een onderlinge meetpuntafstand van niet meer dan 25 m; bij grotere meetpuntafstanden moeten twee parallelraaien worden gehanteerd; gebruik nooit meetafstanden die groter dan 50 m zijn.; deze methode van meten is gelijk aan de huidige werkbeschrijving
2. Meet per meetpunt de deflecties, de oppervlaktemperatuur en het tijdstip van meten; eigenlijk zou per meetpunt de verhardingstemperatuur moeten worden bepaald. Omdat dit onmogelijk is, wordt gebruik gemaakt van de oppervlaktemperatuur en het tijdstip van meten omdat deze data samen met de gemiddelde luchttemperatuur van de vorige dag via de BELLS-methode kunnen worden omgerekend naar een verhardingstemperatuur op een door de gebruiker op te geven diepte.
3. Meet per meetpunt de laagdikten met een laagdikteradar, bij voorkeur gelijktijdig met de deflectiometingen. Voor de omrekening van de echogrammen naar laagdikten is informa-

tie over de diëlektrische constante van de materialen nodig. In deze stap wordt eerst uitgegaan van "best guess" schattingen. Deel het dijkvak op in homogene subvakken.

4. Neem per subvak zoals bepaald in de vorige stap boorkernen ter bepaling van de laagdikte en voor kalibratie van de conversie van echogram naar laagdikte. Presenteer de definitieve laagdikten.
5. Normaliseer de gemeten deflecties naar een asfalttemperatuur van 5°C en een lastpulsconditie van 10 Hz. Voor deze conversie is info over de mastercurve van het asfalt nodig. Gebruik de voor het onderzochte dijkvak de mastercurve zoals die in laboratoriumonderzoek op asfalt uit het onderzochte dijkvak is bepaald.
6. Bepaal met behulp van de laagdikten en de genormaliseerde deflecties de maatgevende structurele conditieparameter. Voorlopig wordt hiervoor bij gebrek aan een ander model de maatgevende rek onder in de asfaltlaag genomen.
7. Bereken het voortschrijdend gemiddelde van de structurele conditieparameter over acht opeenvolgende meetpunten op een en dezelfde raai als de onderlinge meetpuntafstand 25 m of minder bedraagt; middel over vier punten en twee parallelraaien bij onderlinge meetpuntafstanden tot 50 m.
8. Bepaal het gemiddelde en de standaardafwijking van de voortschrijdende gemiddelden van de structurele conditieparameter over het geheel van dijkvak en meetraaien. Bepaal de grenswaarde van de structurele conditieparameter waarvoor in 5% van de gevallen een "slechtere" waarde (voor asfaltrek zal dit een hogere waarde zijn) wordt gevonden. Locaties waarvoor het voortschrijdende gemiddelde van de structurele conditieparameter slechter is dan de grenswaarde worden aangeduid met zwakke plek; deze plekken komen in aanmerking voor sterkteonderzoek.
9. Bepaal de verandering in de waarde van de structurele conditieparameter van de zwakke plek ten opzichte van eerder uitgevoerd deflectieonderzoek op dezelfde plek. Deel de verandering door het aantal jaren verlopen tussen de twee onderzoeken. Toets de verandering per jaar aan de grenswaarde voor monitoring (zie paragraaf 6.3)
10. Bepaal van elke zwakke plek de maatgevende spanning en bepaal via data uit eerder uitgevoerd materiaalonderzoek, zoals breuksterkte en vermoeiingslijncoefficienten de Minersom. Als deze Minersom kleiner is dan 1 en voor de komende jaren kleiner zal blijven dan 1, is geen verder onderzoek noodzakelijk op deze zwakke plek. Als de Minersom binnen een periode van vijf jaar de waarde van 1 zal overschrijden is sterkteonderzoek noodzakelijk om te bepalen of en welke versterking toegepast moet worden.

6 Monitoring van teruggang van sterkte

6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt allereerst verslag gedaan van beschrijvingen en ervaringen met mogelijke monitoringstechnieken. Aan het einde wordt een systematiek gepresenteerd die kan worden ingezet voor periodieke controle van de structurele conditie van dijkbekledingen.

6.2 Archiefonderzoek

6.2.1 Inleiding

Bijlage I bevat een overzicht van de documenten die in het archiefonderzoek zijn bestudeerd. Bij het archiefonderzoek is op basis van in het verleden uitgevoerde onderzoeken vooral gezocht naar bruikbare diagnosesystemen voor asfaltdijkbekledingen en relaties tussen stijfheid en sterkte van asfalt. De stukken zijn gecodeerd met 101 t/m 132. Paragraaf 6.2.2 geeft een beknopte samenvatting van de inhoud van de stukken. Paragraaf 6.2.3 bevat een evaluatie van de bruikbare informatie.

6.2.2 Samenvatting inhoud archiefstukken

De relevantie van elk document wordt aangeduid met de volgende codering:

- * geringe relevantie
- ** enige relevantie
- *** behoorlijke relevantie
- **** belangrijk document

Document: 101

Relevantie: *

Bijzonderheden: Metingen met Goodman Vibrator op het onverharde zandlichaam van de Ommelander Zeedijk. De metingen geven zicht op homogeniteit en de dynamische stijfheidsmodulus op verschillende diepten.

Document: 102

Relevantie: **

Bijzonderheden: Valgewichtdeflectiometingen en trillingsmetingen met RVM (Road Vibration Machine) en Goodman Vibrator op de asfalt-verharde platberm van de Ommelander Zeedijk. Uit beide metingen worden stijfheidsmoduli berekend en wordt een conclusie getrokken over de homogeniteit.

Document: 103

Relevantie: *

Bijzonderheden: Foto's van deflectiesignalen behorend bij onderzoek genoemd onder 102.

- Document:** 104, 105
Relevantie: ***
Bijzonderheden: Dit rapport evalueert een groot aantal onderzoeken op het proefvak Ommelander Zeedijk, met het doel om na te gaan in hoeverre verschillende meetmethoden inpasbaar zijn voor een onderzoeksprocedure bij de controle van de uitvoering van dijkconstructies, of als beheersinstrument bij bestaande zeedijken met asfaltbekleding. Het betreft: Valgewichtdeflectiometingen, trillingsmetingen RVM, Goodman Vibrator, seismograaf, conusweerstand, sonderingen, dichtheids- en vochtgehaltemetingen, boringen, maar ook laboratoriumonderzoek: proctordichtheidsbepalingen, analyse boringen, korrelverdelingen, bepaling minimum en maximum droge dichtheden en triaxiaalproeven.
- Document:** 106
Relevantie: *
Bijzonderheden: Sondeer- en korrelverdelingsgegevens van onderzoek proefvak Ommelander Zeedijk.
- Document:** 107, 108
Relevantie: *
Bijzonderheden: Theoretische verhandeling over het spannings-vervormingsgedrag in relatie tot de interpretatie [104, 105] van uitgevoerde triaxiaalproeven.
- Document:** 109
Relevantie: **
Bijzonderheden: Rapport gaat in op de vraag of een variatie in gemeten deflecties en/of variatie in gemeten asfaltdikte veel invloed heeft op de bepaling van ondergrond- en asfaltmoduli ofwel het onderscheidend vermogen van de terugrekening met BISAR.
- Document:** 110
Relevantie: *
Bijzonderheden: Resultaten van onderzoek dichtheid op proefvak 'Flauwe Werk' (steekringen, nucleaire metingen, handsonderingen, slagsonderingen, etc.).
- Document:** 111
Relevantie: **
Bijzonderheden: Resultaten van onderzoek op proefvak 'Flauwe Werk' (triaxiaalproeven, valgewichtdeflectiometingen, asfaltboringen).
- Document:** 112
Relevantie: **
Bijzonderheden: Uitwerking van metingen gerapporteerd in [110, 111] (grafieken, tabellen, correlaties, etc.) Ook radarmetingen.

- Document:** 113, 114
Relevantie: ***
Bijzonderheden: Concept voor een diagnosesysteem. Beschrijving en toelichting op diverse meetmethoden, zoals Rayleigh-golfmethode, seismische methoden, grond-radar, verdichtingscontrole, valgewichtdeflectiemeting. Ook met theoretische beschouwingen. Rapport bedoeld als discussiestuk. Document 114 is de aangepaste versie van document 113.
- Document:** 115
Relevantie: *
Bijzonderheden: Notitie gaat in op de relatie tussen seismische gegevens en grondparameters. Nogal theoretisch verhaal.
- Document:** 116
Relevantie: *
Bijzonderheden: Notitie met beschouwing van de mogelijke invloed van 'materiaalfouten' (stripping, scheurtjes) op de (akoesto-)elastische moduli (c.q. golfvoortplantingssnelheden). Nogal theoretisch verhaal.
- Document:** 117
Relevantie: *
Bijzonderheden: Zeer theoretisch verhaal, gericht op de vraag in hoeverre een lopende golf in een visco-elastisch medium (asfalt) als voldoende 'informatiedrager' van de mechanische kwaliteit kan fungeren, opdat gerichter monsterkeuze en in-situ materiaal-kwaliteitswaardering d.m.v. akoestische metingen mogelijk is.
- Document:** 118
Relevantie: ***
Bijzonderheden: Notitie met overwegingen om te komen tot een samenhangend systeem van beoordelingstechnieken (interpretatie procedures en aangepaste meetmethoden), kortweg 'diagnosesysteem'. Het gaat om een indicatie hoe het diagnosesysteem (met diverse keuzeopties) eruit kan zien.
- Document:** 119
Relevantie: ***
Bijzonderheden: Proefvakrapportage; evaluatie van groot aantal verschillende metingen op zandlichaam en asfaltbekleding. Slotopmerking (in paragraaf 8.3): 'De moeilijke opgave in geval van bestaande dijklichamen is om zwakke subsectoren op te sporen, daar die zich blijkbaar onvoldoende in de valgewichtdeflecties manifesteren (d.w.z. de krommingen geven die informatie niet, de grootte van de deflecties mogelijk wel). Mogelijk relevante paragraaf 1.1 van de inleiding: "Inleiding m.b.t. de problematiek van een diagnosesysteem voor de kwaliteitsbeoordeling van een WAB-dijkbekleding".

- Document:** 120
Relevantie: *
Bijzonderheden: Bijlagen bij rapport van document 119.
- Document:** 121
Relevantie: ****
Bijzonderheden: Bouwt voort op document 118. Geeft richtsnoer voor 'kleine variant' diagnosesysteem. Plaatst de ontwikkeling van de diagnosemethodiek in een 'historisch perspectief'. In het rapport ontbreekt een aantal figuren. Uitgebreide literatuurlijst.
- Document:** 122
Relevantie: ****
Bijzonderheden: Samenvattend rapport over het in-situ onderzoek aan zeedijken met asfaltbekleding, dat ruwweg vanaf 1984 tot 1988 heeft plaatsgevonden. Na 1988 is het accent komen te liggen op het beheer, waarvoor naast visuele inspecties ook een diagnosesysteem gewenst is dat zowel globaal grote tracés kan verkennen als lokaal zwakke plekken kan aanwijzen. Lijkt goed leesbaar rapport.
- Document:** 123
Relevantie: *
Bijzonderheden: Verslag werkbezoek aan de Universiteit van Texas in Austin. Hoofdthema is de oppervlaktegolf (Rayleighgolf) verkenningmethode (SASW).
- Document:** 124
Relevantie: ***
Bijzonderheden: Concept werkplan om te komen tot diagnosesysteem.
- Document:** 125
Relevantie: ***
Bijzonderheden: Notitie is een uitbreiding van notitie TAW A4 90/10/23
- Document:** 126
Relevantie: *
Bijzonderheden: Is conceptversie van document 127.
- Document:** 127
Relevantie: ****
Bijzonderheden: Zeer relevant document m.b.t. ontwikkeling van de diagnosemethode: structuur, strategische opzet, meetmethoden (ook nieuwe ontwikkelingen) en haalbaarheid. Lijst met 37 referenties.

- Document:** 128
Relevantie: ****
Bijzonderheden: Lijkt een samenvatting van de essenties uit 27.
- Document:** 129
Relevantie: ***
Bijzonderheden: Samenvattende paper m.b.t. de ontwikkeling van een diagnosesysteem, met meetmethoden: radar, FWD en SASW
- Document:** 130
Relevantie: ***
Bijzonderheden: Rapport behandelt toetsing van een asfaltbekleding en ontwikkeling/ervaring van/met een toetsingsmethodiek op basis van niet-destructief onderzoek (NDO).
- Document:** 131
Relevantie: ****
Bijzonderheden: Rapport gaat in op de bruikbaarheid van ingezette NDO technieken (radar en VGD) in relatie tot de veiligheidsbeoordeling. In bijlage 7 is een uitgebreid overzicht gegeven van vragen en mogelijke oplossingsrichtingen.
- Document:** 132
Relevantie: ****
Bijzonderheden: Rapport beschrijft in detail het proces van de beoordeling van een asfaltdijk-bekleding via uiteindelijk de toetsing met GOLFKLAP.

6.2.3 Evaluatie archiefstukken

In deze paragraaf worden per onderwerp de voornaamste resultaten van het archiefonderzoek geëvalueerd. Tabel 7 bevat een overzicht van de in het archiefonderzoek gepresenteerde mogelijke monitoringsystemen. De coderingen over toepasbaarheid, status en inzet zijn aangepast. De oorspronkelijke coderingen dateren uit de beginjaren negentig. Voor een aantal aspecten is de codering aangepast aan de huidige stand van techniek. Tabel 8 bevat de bijbehorende legenda.

Tabel 7 Evaluatie monitoringsystemen

Doel	Techniek	Object	Toepas- baarheid	Status	Inzet
Lokale verkenning	Grondradar	B, O	I	P	E, R
	NMR-monitoring	B	O	O	R, M
	Detectie vochtgehalte	B	W, O	V	(R, M)
	Microgolf scheurdetectie	B	O	O	(R, M)
	Radar asfaltdikte	B	I	P	E, R
	Valgewichtdeflectiemeting	B, O	I	P	R, M
	Golfmethode asfaltstijfheid	B	W	V	R, M
	Asfaltdichtheid nucleair	B	I	P	E
Selectieve bepalingen	Oppervlaktegolfmeting	B, O	T	O, V	R, M
	Proefbelasting	B, O	T	O	R, M
	Kernboringen	B	I	P	R, M
	Asfaltproefstukken	B	I	P	R, M
	Downhole seismometer	O	T	V	E
	NEA-sonde dichtheid/vochtgehalte	O	T	V	E
	Sondeergradiëntmethode	O	T	V	R, M
	Continuboring	O	T	P	E
Lab. onderzoek aan monsters	Standaard bitumenonderzoek	B	I	P	R, M
	Standaard asfaltonderzoek	B	I	P	R, M
	Kalibratie akoestische monitoring	B	T	V	E
	Breuksterkte asfaltproefstuk	B	I	P	R, M
	Stijfheid asfaltproefstuk	B	I	P	R, M
	Vrije torsietrillingsproeven	O	T	P	E
	Triaxiaalproeven grond	O	T	P	E
Interpretatie in-situ verkenning in ter- men van mechani- sche kwaliteit	Correlatie van in-situ en lab.bepalingen		T	O	R, M

Tabel 8 Legenda behorend bij Tabel 7

Categorie	Code	Verklaring
Object	B	bekleding
	O	ondergrond
Toepasbaarheid	I	inzetbaar
	O	nader onderzoek
	T	toepasbaar
	W	twijfelachtig
Status	O	ontwikkeling nodig
	P	aanwezig
	V	verkrijgbaar
Inzet	E	eenmalig of incidenteel (eenmaal per 10 jaar)
	M	monitoring (eenmaal per 1-2 jaar)
	R	regulier (eenmaal per 5 jaar)

Voor de non-destructieve in-situ bepaling zijn in het verleden de volgende technieken gebruikt:

- trillingsmetingen met de Road Vibration Machine (RVM)
- trillingsmetingen met de Goodman Vibrator
- spectrale analyse van de oppervlaktegolven (SASW)
- valgewichtdeflectiometingen (VGD)

De RVM, Goodman Vibrator en SASW zijn alle drie gebaseerd op de analyse van schuif- en Rayleighgolven. De apparaten verschillen van elkaar in de grootte van de belasting, lastfrequenties en meetmethoden. De RVM en Goodman Vibrator zijn destijds door het Koninklijke/Shell Laboratorium Amsterdam gebruikt voor de bepaling van de structurele conditie van asfaltwegverhardingen. vervolgens zijn ze via Rijkswaterstaat en de Technische Universiteit Delft eind jaren tachtig van de vorige eeuw op de schroothoop beland.

De techniek van SASW kent een paar fervente aanhangers in de Verenigde Staten van Amerika, in de persoon van Prof. Soheil Nazarian, University of Teas in El Paso, Dr. Kenneth H. Stokoe II. In het kader van het Strategic Highway Research Program in de VS is een gepatenteerde aanhanger gebouwd om de SASW-metingen eenvoudiger en sneller te kunnen uitvoeren. De metingen en meetresultaten hebben nooit geleid tot een breed verbreide omarming van de meetmethode.

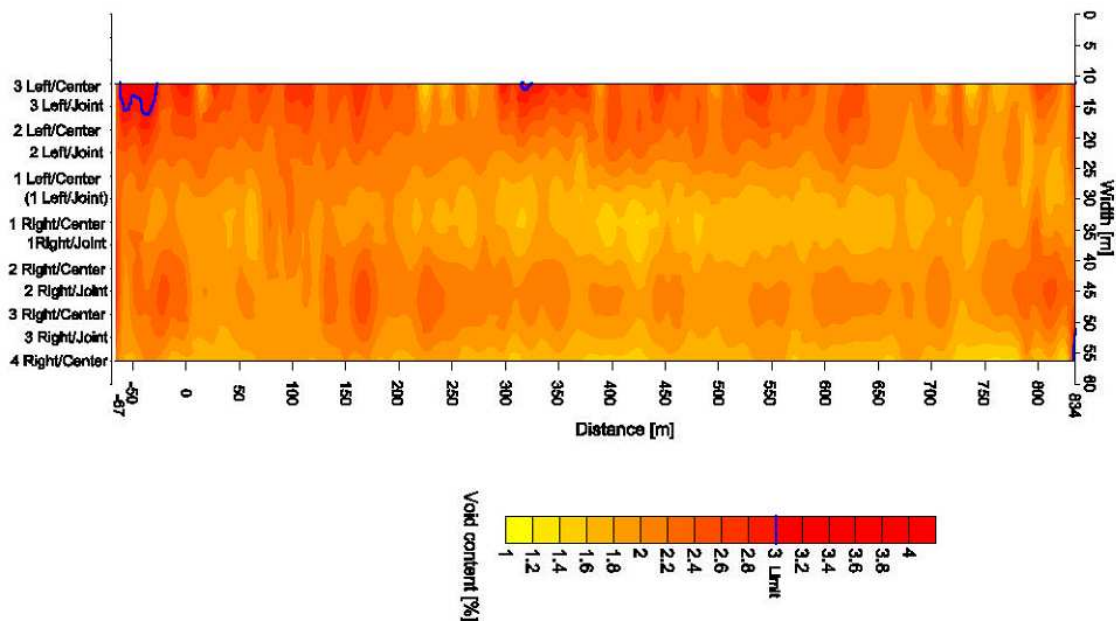
Verreweg de meest gebruikte methode wereldwijd voor het non-destructief meten van draagkracht en stijfheid van verhardingsconstructies is de deflectiometing. Daarvan is de valgewichtdeflectiometing met ongeveer 400 apparaten de methode die het meest wereldwijd wordt ingezet. Voordeel van de valgewichtdeflectiometing is dat deze redelijk snel kan worden uitgevoerd, en dat zeer veel expertise op het gebied van de meting, kalibratie, techniek en analyse beschikbaar is.

Voor het monitoringsprogramma wordt daarom voorgesteld om valgewichtdeflectiometingen te gebruiken om de draagkracht van de onderlaag en de stijfheid van de asfaltdijkbekleding te meten. De methodiek is, mits de onderlinge meetpuntafstand niet te ruim wordt gekozen, goed bruikbaar om zwakke plekken in de dijkbekleding op te sporen. Effecten van wijzigingen in laagdikte van de bekleding en stijfheid van de dijkbekleding en de ondergrond worden automatisch gereflecteerd in de gemeten deflecties.

In 1991 was er geen eenduidige relatie tussen de parameters van de vermoeiingssterkte zoals bepaald met laboratoriumproeven en de stijfheden bepaald uit veldonderzoek. Anno 2007 zijn nog steeds geen bruikbare relaties vastgelegd tussen de veldstijfheden en de laboratoriumstijfheden voor asfaltdijkbekledingen.

6.2.4 Nieuwe monitoringstechnieken niet beschreven in archief

De huidige stand van de techniek maakt het mogelijk om uit de radarmetingen ook de holle ruimte, vochtgehalte en/of het bitumengehalte te bepalen. Deze uitwerking is nog niet overal operationeel en op de lokale situatie gekalibreerd. Figuur 28 geeft een voorbeeld van de variatie van holle ruimte gemeten met radarmetingen over een oppervlak van een startbaan.



Figuur 28 Voorbeeld presentatie bepaling holle ruimte via GPR

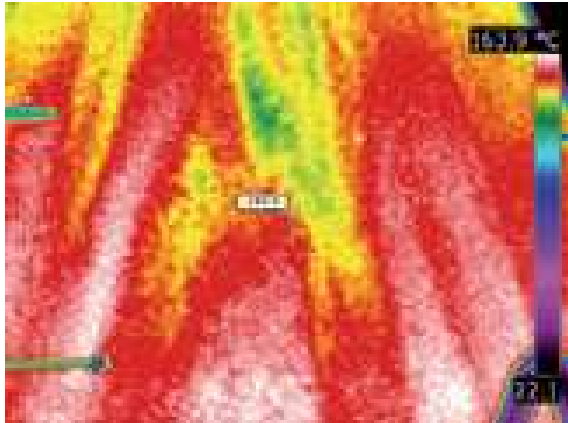
Soortgelijke presentaties kunnen worden gemaakt voor de dichtheid en voor vochtgehalte c.q. bitumengehalte. Voor deze gegevens geldt dat een oppervlakpresentatie alleen kan worden verkregen door radarmetingen in diverse meettraaien uit te voeren.

De dichtheid van het asfalt kan al sinds decennia via nucleaire technieken worden gemeten. Deze technieken zijn ook in staat om het vochtgehalte te meten. In Nederland wordt deze bepaling van het vochtgehalte te onnauwkeurig beschouwd om te worden toegestaan in de Standaard RAW Bepalingen.

Anno 2007 is onderzoek opgestart om te kijken of de dichtheid van asfalt via meten van achtergrondstraling kan worden vastgesteld. Deze techniek is veiliger dan de nucleaire methode. De methode is al in staat gebleken om de steensoort in het wegdek op basis van achtergrondstraling te herkennen.

Infraroodtechnieken worden al sinds jaren toegepast om contactloos temperaturen te meten. Zo zijn alle valgewichtdeflectiometers van KOAC·NPC met een sensor uitgerust om continu de oppervlaktemperatuur tijdens deflectiometingen te kunnen meten.

Recent zijn proefnemingen gedaan om infraroodtechnieken te gebruiken om de kwaliteit van asfalt te controleren en te verbeteren. Bij de aanleg van het proefvak op de A35 is o.a. een infraroodcamera op de spreidmachine gemonteerd waarmee de temperatuur van het asfalt direct achter de afwerkbalk is geregistreerd. In het onderzoek zijn twee aanlegtechnieken vergeleken. Uit de infraroodfoto's (voorbeeld zie Figuur 29) bleek dat de nieuwe techniek een positief effect had op de homogeniteit van de asfalttemperatuur achter de afwerkbalk. Homogene asfalttemperaturen leiden tot minder spreiding in gedragskenmerken van het asfalt. De techniek kan ook worden gebruikt op bestaande verhardingen. Evaluatie van de data op bestaande verhardingen verkeert nog in een experimenteel stadium.



Figuur 29 Thermografische weergave pas aangelegd asfalt

In 2005 zijn infraroodtechnieken gebruikt op aangetast oppervlak onder een oppervlakbehandeling op te sporen. De proef is uitgevoerd op de asfaltglooiing van Wethoek - Zwarte Haan. De methode bleek in de toen gebruikte opzet niet toepasbaar voor het beoogde doel.

6.3 Monitoring

6.3.1 Algemeen

De voorgaande hoofdstukken hebben duidelijk gemaakt dat eigenlijk alleen de metingen op het asfalt van belang zijn.

Voor een snelle monitoring komen in aanmerking:

- laagdiktemetingen met radar
- deflectiemetingen met valgewichtdeflectiemetingen
- temperatuurmetingen met infraroodsensor

Via de deflectiemetingen wordt automatisch ook informatie over de diepere lagen ingewonnen. De ondergrondstijfheid kan eenvoudig in een beddingsconstante worden omgezet.

De deflectiedata moeten worden omgezet naar de maatgevende asfaltrek, genormaliseerd voor temperatuur en lastfrequentie. Van wegverhardingen is bekend in welke mate deflecties (genormaliseerd voor seizoen en temperatuur) voor goed functionerende verhardingen groeien met de tijd [5, 6]. Bij het onderzoek naar de verandering van deflecties met de tijd zijn zowel lagere ordewegen als hogere ordewegen bestudeerd. Dat betekent dat allerlei schademechanismen hebben bijgedragen aan de groei in deflecties. Voor de lagere ordewegen zal dit overwegend de vermoeiing onder in het asfalt zijn geweest, en voor de hogere ordewegen eerder het verlies aan structurele kwaliteit bovenin het asfalt.

In het kader van innovatieve contracten hanteert Rijkswaterstaat voor wegen deelsluitmakend van het hoofdwegennet momenteel de grenswaarden van Tabel 9 gebruikt voor de toelaatbare toename in deflecties met de tijd (de exacte procedure wijkt op details af). De hoofdwegen worden gedimensioneerd op vermoeiing onderin het asfalt, maar maatgevende schade speelt zich vaak aan het oppervlak af, zoals rafeling, veroudering, scheurgroei van bovenaf.

Tabel 9 Grenswaarden jaarlijkse toename deflectieparameters wegen

Parameter	Maximale jaarlijkse toename
Centrumdeflectie tussen de rijsporen	1%
Centrumdeflectie in rechter rijspoor	1,5%
Vershil in centrumdeflectie in rechter rijspoor en tussen de rijsporen	1%
Variatiecoëfficiënt centrumdeflectie tussen de rijsporen	1%
verschil in variatiecoëfficiënt centrumdeflectie in het rechter rijspoor en variatiecoëfficiënt centrumdeflectie tussen de rijsporen	1%

6.3.2 Methodiek van monitoring met deflectiemetingen

Om de deflecties op dijkbekledingen te kunnen toetsen aan de grenswaarden, moet de volgende methodiek van meten worden toegepast.

1. Voer valgewichtdeflectiemetingen uit met een onderlinge meetpuntafstand van niet meer dan 25 m; bij grotere meetpuntafstanden moeten twee parallelraaien worden gehanteerd; gebruik nooit meetafstanden die groter dan 50 m zijn; deze methode van meten is gelijk aan de huidige werkbeschrijving
2. Meet per meetpunt de deflecties, de oppervlaktemperatuur en het tijdstip van meten; eigenlijk zou per meetpunt de verhardingstemperatuur moeten worden bepaald. Omdat dit onmogelijk is wordt gebruik gemaakt van de oppervlaktemperatuur en het tijdstip van meten omdat deze data samen met de gemiddelde luchttemperatuur van de vorige dag via de BELLS-methode kunnen worden omgerekend naar een verhardingstemperatuur op een door de gebruiker op te geven diepte.
3. Normaliseer de gemeten deflecties naar een asfalttemperatuur van 5°C en een lastpulsconditie van 10 Hz. Voor deze conversie is info over de mastercurve van het asfalt nodig. Gebruik de voor het onderzochte dijkvak de mastercurve zoals die in vroeger uitgevoerd laboratoriumonderzoek op asfalt uit het onderzochte dijkvak is bepaald.
4. Bereken het voortschrijdend gemiddelde van de structurele conditieparameter over acht opeenvolgende meetpunten op een en dezelfde raai als de onderlinge meetpuntafstand 25 m of minder bedraagt; middel over vier punten en twee parallelraaien bij onderlinge meetpuntafstanden tot 50 m.
5. Bepaal het gemiddelde en de standaardafwijking van de voortschrijdende gemiddelden van de structurele conditieparameter over het geheel van dijkvak en meetraaien. Deel het onderzochte dijkvak op in homogene subvakken op basis van de voortschrijdende gemiddelden van de centrumdeflectie. Gebruik voor de opdeling bijvoorbeeld de "cusum"-techniek, voluit de techniek van de cumulatieve afwijkingen van het gemiddelde.

6. Bereken per homogeen subvak de gemiddelde waarde, standaardafwijking en variatiecoëfficiënt van de centrumdeflectie.
7. Bepaal bij een hermeting het verschil tussen de resultaten uit stap 6. van twee opeenvolgende monitoringsmetingen. Deel het rekenresultaat door het aantal jaren verlopen tussen de twee metingen.
10. Toets of het verloop in de gemiddelde deflectie groter dan 1,5% per jaar is. Toets of het verloop in de variatiecoëfficiënt groter is dan 1%. Bij niet voldoen aan de grenswaarden is nader onderzoek nodig.

6.3.3 *Opmerkingen*

De periodieke deflectiemetingen moeten bij voorkeur altijd in hetzelfde seizoen of in dezelfde maand worden gehouden als waarin de eerste deflectiemeting heeft plaatsgevonden. Op deze manier worden storende invloeden van seizoenseffecten gereduceerd.

Voor dijkbekledingen bestaat geen database met jarenlang verzamelde deflectiegegevens. Uit de deflectiemetingen op dijkbekledingen is gebleken dat de spreiding in meetresultaten veel groter is dan bij wegen. De analyseresultaten gepresenteerd in paragraaf 4.3 laten zien dat gemiddelde waarden en variatiecoëfficiënten niet snel veranderen met toenemende ouderdom. Om die reden zijn de grenswaarden voor wegen (voorlopig) ook van toepassing verklaard voor dijkbekledingen van asfalt.

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies

- De maximale asfaltrek onder in het asfalt lijkt een bruikbare grootheid om op snelle wijze uit het gemeten deflectieprofiel en laagdikte een indicator van laagdikte en stijfheid van het asfalt. De indicator is bruikbaar voor het opdelen van een dijkvak in homogene subvakken of het opsporen van zwakke plekken.
- de valgewichtdeflectiemeting is een bruikbaar apparaat om de structurele teruggang van de sterkte van een asfalt dijkbekleding te monitoren.
- de breuksterkte van een asfalt dijkbekleding kan nauwkeurig worden vastgesteld uit de stijfheidsmodulus zoals die op een asfaltkern wordt gemeten. De invloed van de dichtheid op breuksterkte is verwaarloosbaar
- relaties tussen de uit deflectiemetingen teruggerekende stijfheidsmodulus van het asfalt en asfaltkenmerken als breuksterkte en vermoeiingssterkte blijken onderhevig te zijn aan erg veel spreiding. Er is geen eenduidige verklaring voor de grootte van de spreiding gevonden.
- het blijkt zeer lastig om bruikbare technieken te vinden voor het detecteren van zwakke plekken onder een oppervlakbehandeling. Vooralsnog lijken radarmetingen en visuele inspecties de best toepasbare middelen voor dit doel.
- de uit deflectiemetingen teruggerekende stijfheidsmoduli blijken in de meeste gevallen licht gecorreleerd te zijn; dat wil zeggen dat een relatief hoge asfaltstijfheid wordt gecompenseerd door een te lage schatting van de stijfheid van de ondergrond. Verbetering van het terugrekenproces zal de hiervoor geschetste correlatieproblemen tussen structurele parameters onvoldoende verbeteren.
- naarmate een dijkvak ouder wordt lijken dichtheid en genormaliseerde vermoeiingssterkte af te nemen. De spreiding in de dichtheid neemt toe met de ouderdom.

7.2 Aanbevelingen

- Het verdient aanbeveling om op basis van een groot aantal meerlagenberekeningen relaties te ontwikkelen tussen gemakkelijk meetbare grootheden als deflectieprofiel en laagdikte en indicatoren die veelvuldig in de toetsing en analyse van dijkvakken worden gebruikt. Zulke parameters zijn de maatgevende spanning onder in het asfalt onder valgewichtbelasting en onder een typische golfklapbelasting en de beddingsconstante van de ondergrond.

- De vermoeiingslevensduur van asfalt is afhankelijk van de opgelegde spanning. Voor analyses van de vermoeiingsterkte is het raadzaam om een genormaliseerde indicator te ontwikkelen om relaties met stijfheid, dichtheid, ouderdom, etc. te onderzoeken.

8 Referenties

1. De Looft, A.K., Moenielal, M. en Weijers, M., Opzet monitoringsprogramma open steen-asfalt havendammen Oosterschelde – Resultaten laboratoriumonderzoek. Rapport e0500131. KOAC·NPC, Utrecht, juli 2007.
2. Moenielal, M. en De Loof, A.K., Valgewichtdeflectiemeting open steenasfalt havendam Oosterschelde. Rapport e0500131-2. KOAC·NPC, Utrecht, juli 2007.
3. Heukelom, W., Observations on the rheology and fracture of bitumens and asphalt mixes. Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists. Minneapolis, MN, February 1966.
4. Erkens, S.M.J.G. en Poot, M.R., Asfalt: meten en modelleren. Wegbouwkundige Werkdagen 2000, Deel 1, pp. 89-102. CROW, Ede, 2000.
5. Toetsingsprocedure deflecties flexibele verhardingen voor innovatieve contractvormen met meerjarige garantie- of onderhoudsperiode. IR-N-04-007. Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft, maart 2004.
6. Van Dommelen, A.E., Een meetbare performance-eis voor het draagvermogen van asfaltverhardingen in DB(F)M-contracten. Wegbouwkundige Werkdagen 2002, Deel 1, pp. 493-506. CROW, Ede, 2002.
7. Veiligheidsbeoordeling van asfaltdijkbekledingen - achtergrondrapport bij het toetsen van asfaltdijkbekledingen volgens het Voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV). Publicatie DWW-2005-006. Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde. Delft, november 2005.
8. Van Gurp, C.A.P.M., Characterization of Seasonal Influences on Asphalt Pavements with the use of Falling Weight Deflectometers. Proefschrift. Technische Universiteit Delft, Delft, 1995.
9. Dunne asfaltverhardingen - ontwerp en herontwerp. Publicatie 157. CROW, Ede, januari 2002.
10. Van Gurp, C.A.P.M. en Wennink, P.M., Ontwerp van verhardingen van plattelandswegen. Rapport E96007. KOAC·WMD, Apeldoorn. 1997.
11. De Loof, A.K., Moenielal, M. en Tolman, F., Model karakterisering vermoeiing asfaltdijkbekledingen. Rapport e048338-2. KOAC·NPC, Utrecht, december 2005.
12. Ullidtz, P. and Stubstad, R.N., Why bother about layer moduli?. Proceedings 3rd International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields, Vol. 1, pp. 659-667. Norwegian Institute of Technology, Trondheim, 1990.

Bijlage 1

Literatuur archiefonderzoek

(2 pagina's, exclusief voorblad)

101. Trillingsmetingen op de platberm van de Ommelander Zeedijk, voor het aanbrengen van de asfaltbekleding; PCS bv, december 1983.
102. Onderzoek proefvak Ommelander Zeedijk; valgewicht- en trillingsmetingen na het aanbrengen van de asfaltlaag; rapport PCS bv, februari 1984.
103. Tweede meting Ommelander Dijk, project 83.1.62; notitie PCS bv, maart 1984.
104. Onderzoek op een proeflokatie aan de Ommelander Zeedijk, rapport LGM, juli 1984.
105. Onderzoek op een proeflokatie aan de Ommelander Zeedijk, bijlage bij rapport LGM, juli 1984.
106. Proefvak Ommerlander Zeedijk, documentatiemap betreffende sonderingen en korrelverdelingen; rapport LGM, juli 1984 (?).
107. Onderzoek op zandmonsters uit het proefvak Ommerlander Zeedijk; rapport LGM, september 1984.
108. Onderzoek op zandmonsters uit het proefvak Ommerlander Zeedijk; bijlagen bij rapport LGM, september 1984.
109. Beschrijving van de nauwkeurigheid van de bepaling van ondergrond en asfaltmoduli met valdeflectiemetingen op de Ommerlander Zeedijk; Centrum voor Onderzoek Waterkeringen, januari 1985.
110. Proefvak "Flaauwe Werk" te Ouddorp; Bundeling van de resultaten van het uitgevoerde terrein- en laboratoriumwerk; Concept Meetrapport Deel I; LGM mei 1985.
111. Proefvak "Flaauwe Werk" te Ouddorp; Bundeling van de resultaten van het uitgevoerde terrein- en laboratoriumwerk; Concept Meetrapport Deel II; LGM mei 1985.
112. Resultaten van het onderzoek betreffende TAV / proefvak op het "Flaauwe Werk", bijlagen, LGM, september 1985.
113. Omtrent een mogelijke opzet van een Diagnose-systeem voor de beoordeling van zeedijken met asfaltbekleding; rapport LGM 1e versie, discussiestuk, juni 1986.
114. Omtrent een mogelijke opzet van een Diagnose-systeem voor de beoordeling van zeedijken met asfaltbekleding; rapport LGM 2e versie, juni 1986.
115. Project: Opzet van een diagnosesysteem voor zeedijken met asfaltbekleding; Subonderwerp: Gevoeligheidsanalyse van de seismische grondparameters bij isotroop materiaalgedrag; rapport LGM, oktober 1986.
116. Notitie omtrent de mogelijke invloed van scheurtjes in een vast materiaal op de elastische mechanische eigenschappen, mede gelet op mogelijkheden voor akoestische verkenningsindicaties bij dijkbekledingen; LGM, februari 1987.
117. Een visco-elastisch dynamicamodel en aanverwante aspecten in het kader van een akoestische verkenningmethode voor asfaltbekledingen; GD, maart 1987.
118. Conclusies uit het onderzoek 1986-1987 met betrekking tot de produktfilosofie ten aanzien van het onderwerp Diagnosesysteem voor Zeedijken (bestaande constructies); notitie GD, december 1987.
119. Resultaten van het onderzoek betreffende een TAW-proefvak op de zeewering nabij Westkapelle; rapport GD, september 1988.
120. Resultaten van het onderzoek betreffende een TAW-proefvak op de zeewering nabij Westkapelle; Bijlagen bij rapport GD, september 1988.
121. Achtergronden en overwegingen bij de haalbaarheidsstudie voor de opzet van een zeedijk-diagnosesysteem (intern discussiestuk TAW-A5-DS 19.4); LGM, oktober 1988.

122. Samenvatting onderzoek naar een diagnose-systeem voor asfaltbekleding, onderzoek 1984-1988; Rapport CO-301170/7. Grondmechnica Delft, februari 1989.
123. De toepassingsmogelijkheden van de SASW-techniek binnen het diagnosesysteem voor zeedijken met asfaltbekleding (verslag van het desbetreffende werkbezoek aan de Universiteit van Texas in Austin van 25 tot 28 juni 1989); rapport GD augustus 1989.
124. Diagnose-Systeem Asfalt Dijkbekledingen Zeedijken (concept-werkplan 1990); GD, januari 1990.
125. Notitie m.b.t. overleg subgroepen duurzaamheid en diagnose TAW A4; december 1990.
126. Samenvatting haalbaarheidsstudie diagnosesysteem voor zeedijken, concept, GD (?), november 1991.
127. Technische haalbaarheid van een diagnosesysteem voor de asfaltbekleding van zeedijken; GD, november 1991.
128. Resultaten technische haalbaarheid diagnosesysteem voor de asfaltbekleding van zeedijken; GD, december 1991.
129. Towards a diagnostic system for asphalt revetments on seadikes; paper Eurobitume 1993.
130. Methodieontwikkeling toetsing asfaltdijkbekledingen (Texel); rapport NPC, december 1999.
131. Onderzoek naar de bruikbaarheid van radar en valgewicht bij het toetsen van asfaltbekledingen; rapport NPC, november 2002.
132. Werkbeschrijving voor het uitvoeren van een gedetailleerde beoordeling op golfklappen op een bekleding van waterbouwasfaltbeton; rapport KOAC·NPC, augustus 2006.

Bijlage 2

Samenvatting onderzoeken op dijkbekledingen

(2 pagina's, exclusief voorblad)

Overzicht proefresultaten op dijkbekledingen

Project-nummer	Jaar onderzoek	Naam dijkvak	E_{VG}D 5°C, 10 Hz	E_{dyn} 3pb	Fase- hoek	Vermoeiing	Breuk- sterkte	Dicht- heid
08463	2001	Koegras Zeedijk NH 4264	X	-	-	X	-	X
		Balgzanddijk NH 4264	X	-	-	X	-	X
		Amsteldiepdijk NH 4385	X	-	-	X	-	X
		Normerdijk NH 3967	X	-	-	X	-	X
		Marskedijk NH 3599	X	-	-	X	-	X
		Rinkeweelsedijk NH 3599	X	-	-	X	-	X
		Bierdijk NH 3430	X	-	-	X	-	X
		Molgerdijk NH 3254	X	-	-	X	-	X
0603066	2006	Koehool - Westhoek	-	X	X	X	-	X
0603066	2006	Koehool - Westhoek	-	X	-	-	X	-
0601831	2006	Het Flauwe Werk	-	X	X	X	X	-
048291/..	2005	Houtribdijk	X	-	-	X	-	-
038364/..	2003	Houtribdijk	X	-	-	-	X	X
998205	1999	Waddenzeedijken Best 263	X	X	X	X	-	X
		Waddenzeedijken NH-2814	X	X	X	X	-	X
		Waddenzeedijken NH-3117	X	X	X	X	-	X
		Waddenzeedijken NH-3218	X	X	X	X	-	X
		Waddenzeedijken NH-3324	X	X	X	X	-	X
		Waddenzeedijken NH-3432	X	X	X	X	-	X
		Waddenzeedijken NH-1630	X	X	X	X	-	X
008447	2000	Rak van Scheelhoek DED 1092	-	X	-	X	-	X
		Damaanzet DED 1092	-	X	-	X	-	X
018395	2001	Hellegatsdam	-	X	X	X	-	X
008497	2001	Brouwersdam DED 822	X	X	X	X	-	X
018247	2001	Havendam Harlingen	-	X	-	X	-	X

Project-nummer	Jaar onderzoek	Naam dijkvak	E_{VGD} 5°C, 10 Hz	E_{dyn} 3pb	Fase- hoek	Vermoeiing	Breuk- sterkte	Dicht- heid
038182	2003	Meester Snijderdijk	X	X	-	X	-	X
		Pallandtdijk	X	X	-	X	-	X
		Martina Corneliadijk	X	X	-	X	-	X
028292	2002	Eemshaven	X	-	-	X	-	X
		Lauwersmeerdijk	X	-	-	X	-	X
038202	2003	Lauwersmeerdijk	X	-	-	X	-	X
028387	2002	Ketelmeerbrug	-	X	-	X	-	X
028471	2002	Lauwersmeer	X	-	-	-	-	-
		Zwarte Haan-Koehool	X	-	-	-	-	-
038299	2003	Lauwersmeerdijk	X	-	-	X	-	-
		Koehool - Zwarte Haan	X	-	-	X	-	-
		Makkum	-	-	-	X	-	-
		Havendammen Stavoren	-	-	-	X	-	-
		W. havendam Lemmer	-	-	-	X	-	-
		O. havendam Lemmer	-	-	-	X	-	-
038335	2003	Nijs Hooglandpolder	-	X	X	X	-	X
048304	2004	Helderse NH-3189	X	X	X	X	X	-
048304		Petteimer NH-2084	X	X	X	X	X	-
		Hondbossche NH-2084	X	X	X	X	X	-
048456	2004	Veersedam, Sluitgk	X	-	-	X	-	-
		Veersedam, Plaat van Onrust	X	-	-	X	-	-
0500453	2005	Westhoek - Zwarte Haan	-	X	X	X	X	X
0500967	2005	Texel, Mokbaai	-	X	X	X	-	X
0700462/.	2007	Hellegatsdam		X	X	X	X	X