

e0800644-2

Vervolgonderzoek monitoringsprogramma en  
validatie/verbetering van huidige beoordeling op  
golfklappen

Projectnummer : e0800644-2  
Offertenummer en datum : 24 juni 2007  
Titel rapport : Vervolgonderzoek monitoringsprogramma  
Status rapport : concept

Naam opdrachtgever : STOWA  
Adres : Postbus 8090  
Plaats : 3503 RB Utrecht  
Naam contactpersoon : dhr. ir. L.R. Wentholt  
Contactpersoon Deltares : mw. dr. B.G.H.M. Wichman  
Datum opdracht : 27 mei 2008  
Kenmerk opdracht : 2008-0432-LRW-451163-BND

Contactpersoon KOAC·NPC : ing. A.K. de Looff  
Auteur(s) rapport : ing. A. Blanken, dr.ir. C.A.P.M. van Gurp, ing. A.K. de Looff

**Rapportage**

Naam: Ing. A. Blanken

Handtekening:

Datum: 9 januari 2009

**Autorisatie**

Naam: Dr. ir. C.A.P.M. van Gurp

Handtekening:

Datum: 9 januari 2009

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

## Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding.....</b>	<b>4</b>
1.1	Algemeen .....	4
1.2	Probleemstelling en doelen.....	4
1.3	Plan van aanpak .....	5
<b>2</b>	<b>Samenvatting eerdere onderzoeken .....</b>	<b>6</b>
2.1	Valgewichtdeflectiemetingen.....	6
2.1.1	Boulevard De Ruyter te Vlissingen .....	6
2.1.2	Ontwikkeling toetsing asfaltbekledingen Texel .....	7
2.1.3	Literatuurstudie toepasbaarheid van valgewichtdeflectiemetingen op taluds.....	12
2.1.4	Aanvullende VGD en GPR-metingen Pettemer Zeewering .....	13
2.1.5	Conclusie.....	16
2.2	Laagdikeradarmetingen .....	17
2.2.1	Boulevard De Ruyter te Vlissingen .....	17
2.2.2	Ontwikkeling toetsing asfaltbekledingen Texel .....	17
2.2.3	Onderzoek bruikbaarheid NDO-technieken Waddenzeedijken Noord-Holland .....	17
2.2.4	Aanvullende VGD en GPR-metingen Pettemer Zeewering .....	18
2.2.5	Conclusie.....	20
2.3	Relatie VGD-metingen met laboratoriumeigenschappen asfalt.....	21
2.3.1	Ontwikkeling toetsing asfaltbekledingen Texel .....	21
2.3.2	Onderzoek bruikbaarheid NDO-technieken Waddenzeedijken Noord-Holland .....	23
2.3.3	Conclusie.....	26
<b>3</b>	<b>Bureaustudie .....</b>	<b>27</b>
3.1	Ontwikkeling voorspellend rekmodel .....	27
3.2	Vergelijking vermoeiingseigenschappen Hellegatsdam .....	32
3.3	Geschiktheid UEC-SLAB voor terugrekenen laagstijfheden en beddingsconstante ..	33
3.3.1	Huidige situatie terugrekenen van laagstijfheden .....	33
3.3.2	Bepaling laagstijfheden met UECSLAB .....	33
3.4	Ontwikkeling model beddingsconstante.....	34
3.5	Nadere analyse VGD-stijfheid - $E_{dyn}$ - breuksterkte .....	38
3.6	Bepalen correlatie asfaltstijfheid en ondergrondstijfheid .....	43
3.7	Invloed van verplaatsingsnelheid op de breuksterkte .....	45
<b>4</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen.....</b>	<b>47</b>
4.1	Conclusies .....	47
4.2	Aanbevelingen .....	48
4.2.1	Voorstel wijzigingen in procedure gedetailleerde beoordeling op golfklappen .....	48
4.3	Voorstel opzet monitoringsprogramma asfalt dijkbekledingen .....	50
<b>5</b>	<b>Referenties .....</b>	<b>53</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Algemeen

Periodiek moeten asfaltdijkbekledingen in Nederland worden onderworpen aan een veiligheidsbeoordeling. Hiervoor wordt de structurele conditie aan de hand van een vaste beoordelingsmethode vastgelegd. Op basis van deze structurele conditie wordt de veiligheid tegen het schadebrengend effect van golfklappen vastgesteld.

In 2007 is een studie [1] uitgevoerd naar verbetering van de veiligheidsbeoordeling van asfaltdijkbekledingen. Voornamelijk voor de oudere asfaltdijkbekledingen kan niet eenduidig worden bepaald worden hoe lang deze nog mee kunnen gaan. Tevens bestaat een behoefte aan een optimale strategie voor beheer en onderhoud van asfaltdijkbekledingen, inclusief een geschikte risicobenadering. De uitkomsten van de studie hebben meer inzicht gecreëerd in het gedrag van asfaltdijkbekledingen en op basis hiervan zijn de volgende aanbevelingen opgesteld:

- Het verdient aanbeveling om op basis van een groot aantal resultaten van doorbuigingsberekeningen van geschematiseerde asfaltbekledingen 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 rek of spanning onder in het asfalt onder een kritieke belasting en de beddingsconstante van de ondergrond;
- De vermoeiingslevensduur van asfalt is afhankelijk van de opgelegde spanning. Voor analyses van de vermoeiingssterkte is het raadzaam om een genormaliseerde indicator te ontwikkelen om relaties met stijfheid, dichtheid, ouderdom, etc. te onderzoeken.

Deze aanbevelingen zijn in een aanvullend onderzoek verder uitgewerkt en de resultaten worden in dit rapport gerapporteerd.

## 1.2 Probleemstelling en doelen

In de afgelopen jaren is voor het toetsen van asfaltdijkbekledingen op veiligheid een methode ontwikkeld 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. De laagdikte wordt ingewonnen met laagdikteradarmetingen (GPR) en voor het terugrekenen van de laagstijfheden worden valgewichtdeflectiemetingen (VGD) uitgevoerd. Aanvullend op deze metingen worden op geselecteerde plaatsen asfaltmonsters uit de dijkbekleding geboord voor de 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 aangetast asfalt onder een oppervlakbehandeling.

De resultaten van het ontwikkelen van een niet-destructieve meetmethode voor het lokaliseren van aangetast asfalt onder een oppervlakbehandeling zijn in een ander rapport gerapporteerd.

### **1.3 Plan van aanpak**

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

1. Samenvatting eerdere onderzoeken  
Door STOWA zal een selectie van relevante documenten worden verzameld van onderzoeken die zijn uitgevoerd op de volgende locaties: Boulevard de Ruyter te Vlissingen, Waddenzeedijken Texel, Waddenzeedijken Noord-Holland en Helderse, Pettemer en Hondsbossche zeekering. Hiervan stelt KOAC·NPC een samenvatting op.
2. Bureaustudie  
De bureaustudie is een vervolgonderzoek voor het opzetten van een monitoringsprogramma en voor verbetering van de huidige gedetailleerde beoordeling op golfklappen. Tevens worden nog onderdelen uit de rapportage van 2007 nader uitgewerkt. De bureaustudie bestaat uit de volgende onderdelen:
  - ontwikkeling van een model voor het bepalen van de maatgevende rek of spanning op basis van gemeten deflecties
  - vergelijking vermoeiingseigenschappen Hellegatsdam 2001 en 2007
  - nagaan geschiktheid UEC-SLAB t.b.v. terugrekenen van asfaltstijfheden
  - nadere analyse relatie asfaltstijfheid teruggerekend uit deflectiemetingen ( $E_{vgd}$ ), asfaltstijfheid bepaald op proefstuk ( $E_{dyn}$ ) en de breuksterkte
  - bepalen correlatie stijfheid asfalt en stijfheid ondergrond voor meerdere werken
  - invloed van verplaatsingsnelheid op breuksterkte van asfalt
  - beschrijving voorstel voor monitoringsprogramma

De bureaustudie wordt uitgevoerd op basis van de volgende informatie:

- gegevens uit in het verleden uitgevoerde veiligheidsbeoordelingen

## 2 Samenvatting eerdere onderzoeken

De huidige aanpak van de gedetailleerde beoordeling is tot stand gekomen op basis van diverse onderzoeksprojecten. Voor het bepalen van de laagdikte en de laagstijfheden zijn laagdikteradar- en valgewichtdeflectiemetingen uitgevoerd. Aanvullend aan deze metingen is tevens sterkte- en vermoeiingsonderzoek uitgevoerd op proefstukken vanuit boorkernen. In het literatuuronderzoek zijn vijf relevante onderzoeksprojecten geselecteerd:

- 1) Meetrapport Radar- en Valgewichtdeflectiemetingen Boulevard De Ruyter in Vlissingen. Rapport NPC-988197, G. Gaarkeuken e.a., 7 augustus 1998.
- 2) Onderzoek beoordeling asfaltbekleding Boulevard De Ruyter in Vlissingen. Rapport NPC-988197INT, G. Gaarkeuken e.a., 3 september 1998.
- 3) Methodiekontwikkeling Toetsing Asfaltbekledingen (Texel). Rapport NPC-998205, A. Versluis e.a. mei 2000.
- 4) Literatuurstudie naar de toepasbaarheid van valgewichtmetingen op taluds. NPC-008463, G. Gaarkeuken e.a., 28 maart 2001.
- 5) Onderzoek naar de bruikbaarheid van Radar en Valgewicht bij het toetsen van asfaltbekledingen. NPC-008463, A.K. de Looff e.a., 29 november 2002.
- 6) Aanvullende VGD en GPR-metingen Pettemer zeewering. KOAC-NPC-e048338-3, M. Moenielaal, 16 december 2005.

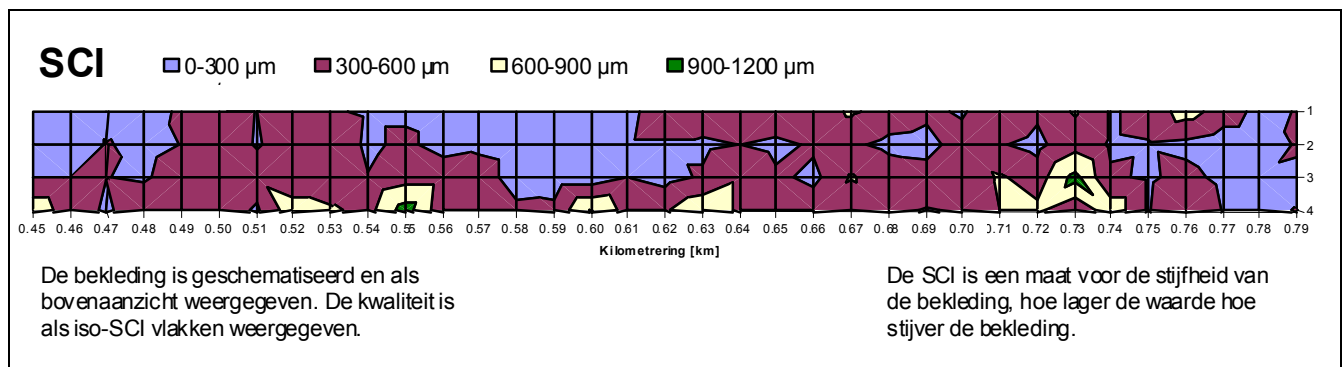
De resultaten van het literatuuronderzoek zijn per deelaspect samengevat.

### 2.1 Valgewichtdeflectiemetingen

#### 2.1.1 Boulevard De Ruyter te Vlissingen

Ter bevestiging van een veiligheidsbeoordeling is in 1998 een aanvullend onderzoek uitgevoerd naar de asfaltdijkbekleding op de Boulevard De Ruyter. Hiervoor zijn valgewichtdeflectiemetingen en laagdikteradarmetingen verricht. De valgewichtdeflectiemetingen zijn over 5 meetraaien met een hart op hart afstand van 10 m uitgevoerd. Tevens zijn ter plaatse van het gemiddelde, 95%-karakteristieke en slechtste deflectieprofiel VGD-metingen verricht met een hart op hart afstand van 1 m. In dit onderzoek is de SCI 600 (verschil tussen de deflectie in het centrum en op 600 mm afstand, ook wel IDK 600 genoemd) gebruikt voor het inzichtelijk maken van de kwaliteitsspreiding van de asfaltbekleding en (ondergrond). De SCI 600 is hoofdzakelijk afhankelijk van de stijfheid en laagdikte van de asfaltbekleding.

Uit het onderzoek bleek een grote variatie waarneembaar in de meetresultaten van de eerste geofoons en de SCI 600 (Zie figuur 1). De variatie in de conditie van de bekleding tussen 2 meetpunten h.o.h. 10 m is behoorlijk groot en deze neemt bij een kleinere h.o.h. afstand van 1 m niet significant af (standaardafwijking van SCI 600 in het 10m-meetnet van ca. 45 % en in het 1m-meetnet van ca. 35 %). Een mogelijke verklaring voor de grote spreidingen is de aanlegmethode (handmatig) en de geometrie van het dijkvak (bochten en uitstulpingen kademuur).



**Figuur 1      Overzicht variatie SCI 600 op dijkvak**

### 2.1.2 Ontwikkeling toetsing asfaltbekledingen Texel

In de veiligheidsbeoordeling voor de Waddenzeedijk op Texel zijn valgewichtdeflectiometingen en laagdikteradarmetingen toegepast voor het selecteren van de zwakke plekken. Aansluitend is sterkte- en vermoeiingsonderzoek uitgevoerd op proefstukken afkomstig uit boorkernen. De meetresultaten zijn tevens toegepast voor het verdere ontwikkelen van de methodiek van toetsing van asfaltbekledingen. In het onderzoek zijn met betrekking tot VGD-metingen de volgende deelonderzoeken te onderscheiden:

- invloed op de meetnauwkeurigheid van VGD-metingen van het onder een helling staan van de opnemers
- invloed van het steenslagsplit van de oppervlakbehandeling op de meetnauwkeurigheid van VGD-metingen
- evaluatie van herhaalde VGD-metingen
- toepasbaarheid van de SCI 600 uit de VGD-metingen
- statistische onderbouwing van het aantal meetpunten en minimale VGD-meetafstand

#### Invloed op de VGD-metingen van het onder een helling staan van de opnemers

In het onderzoek is onderzocht wat de effecten zijn van onder een helling meten op de snelheidsmeters (gefoons) . VGD-metingen op asfaltbekledingen vinden altijd plaats onder een maximale helling van 1:3. In het onderzoek is ter hoogte van de derde gefoon van de VGD-apparatuur met een losse gefoon vertikaal de deflecties gemeten. Schuinplaatsing van een gefoon heeft een systematische afwijking tot gevolg van ongeveer 5-10 µm.

#### Invloed van het steenslagsplit van de oppervlakbehandeling op de VGD-metingen

Asfaltbekledingen worden voorzien van oppervlakbehandelingen met steenslag om verwerking en stripping tegen te gaan. In het onderzoek is nagegaan wat de invloed is van split op de meetresultaten. Op 3 verschillende locaties zijn VGD-metingen verricht met en zonder split. In eerste instantie is gemeten op een dikke splitlaag en vervolgens is de meting op exact dezelfde plaats herhaald zonder splitlaag.

**Tabel 1 Meetresultaatverschillen VGD met en zonder split**

Metingnr.	Geofoonsafstanden						
	0 mm	300 mm	600 mm	900 mm	1200 mm	1500 mm	1800 mm
1 [ $\mu\text{m}$ ]	-13	-2	-3	-	+2	-1	-
1 [%]	<b>-3,6</b>	-0,7	-1,3	-	+1,6	-1,1	-
2 [ $\mu\text{m}$ ]	-2	+3	-1	-	-1	0	-
2 [%]	-0,6	+1,1	-0,5	-	-0,9	-0,0	-
3 [ $\mu\text{m}$ ]	-6	-7	-6	-	-1	-5	-
3 [%]	-1,9	<b>-2,6</b>	<b>-2,8</b>	-	-0,9	<b>-4,3</b>	-

In het onderzoek is geconcludeerd dat de splitlaag een geringe invloed heeft op de nauwkeurigheid van de gemeten deflecties. In normale situaties zal er minder split aanwezig zijn en zijn de effecten verwaarloosbaar.

#### Evaluatie van herhaalde VGD-metingen

Op één locatie op een asfaltbekleding op Texel) is op exact dezelfde plaats, binnen een half uur achtmaal een VGD-meting uitgevoerd. Uit analyse van de meetgegevens blijkt dat de standaardafwijking maximaal 5  $\mu\text{m}$  bedraagt.

Op twee locaties zijn op verschillende dagen VGD-metingen uitgevoerd op een 100m-vak. Per meting zijn de stijfheden teruggerekend en genormaliseerd voor temperatuur (zie tabel 3). Voor temperatuurnormalisatie van de stijfheden is gebruik gemaakt van mastercurves, welke zijn bepaald met driepuntsbuigproeven. Voor het werk NH-1630 is geen mastercurve opgesteld, aangezien de resultaten van de driepuntsbuigproef geen betrouwbare resultaten opleverde. Normalisatie van de stijfheden is bij dit werk met behulp van nomogrammen uitgevoerd, welke minder betrouwbaar zijn, omdat ze globaler zijn en niet de eigenschappen van het lokale asfalt beschrijven.

**Tabel 2 Resultaten herhalingsmetingen 100m-vakken**

	aant. punten	T [°C]	Geofoonsafstanden								IDK-600
			0 mm	300 mm	600 mm	900 mm	1200 mm	1500 mm	1800 mm		
NH-1630 km 24,2-24,3	101	21.0	gem.:	597	470	324	215	140	98	72	272
			st.afw.:	149	94	52	30	19	12	11	106
laagdikte gem. 209mm	11	16.3	gem.:	570	450	304	208	140	99	73	266
			st.afw.:	191	114	60	33	15	11	11	136
NH-3432 km 22,6-22,7	101	16.8	gem.:	301	261	209	166	124	94	70	92
			st.afw.:	18	15	12	9	6	7	7	11
laagdikte gem. 273mm	5	19.5	gem.:	335	283	220	167	122	91	67	115
			st.afw.:	23	14	12	4	6	6	6	21



**Tabel 3 Resultaten herhalingsmetingen 100m-vakken**

		<b>Evgd (zonder correctie)</b>	<b>Evgd (met correctie o.b.v. mastercurve)</b>	<b>Evgd (met correctie o.b.v. nomogram)</b>
<b>Bestek</b>	<b>T [°C]</b>			
NH-1630	21,0	2743	-	3977
NH-1630	16,3	2881	-	5294
NH-3432	16,8	5662	4603,5	-
NH-3432	19,5	4294	4465,6	-

#### Gebruik van de SCI 600 uit de VGD-metingen

De SCI 600 is het verschil tussen de deflectie in het centrum en op 600 mm afstand en geeft een indicatie van de doorbuigweerstand van de asfaltbekleding. De SCI 600 wordt beïnvloed door de laagdikte, asfalttemperatuur en in mindere mate door de stijfheid van de ondergrond. In het onderzoek is geconcludeerd, dat gebruik van SCI-waarden voor het detecteren van de zwakke plekken waarschijnlijk niet nauwkeurig genoeg is (tenzij de laagdikte constant is en de meettemperatuur weinig varieert). Voor het corrigeren van de SCI zijn laagdikte- en temperatuurmetingen noodzakelijk. Indien deze gegevens bekend zijn kan ook de stijfheid worden bepaald van de asfaltbekleding. In het onderzoek is geadviseerd om de stijfheid toe te passen voor het vaststellen van de boorlocaties in plaats van de SCI 600.

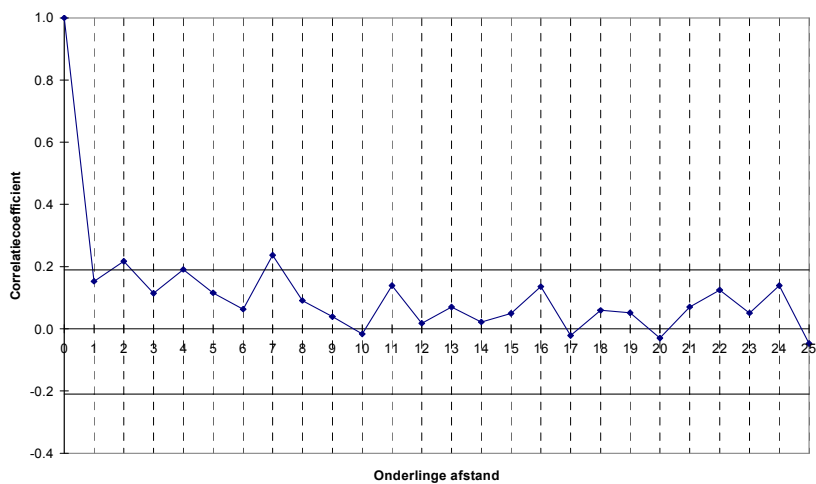
#### Statistische bepaling van de VGD-meetafstanden

Voor het project Texel is door M.E. van den Bol – De Jong (DWW) een statistische analyse uitgevoerd voor bepaling van het benodigd aantal VGD-metingen. Hierbij heeft zij twee aspecten bekeken:

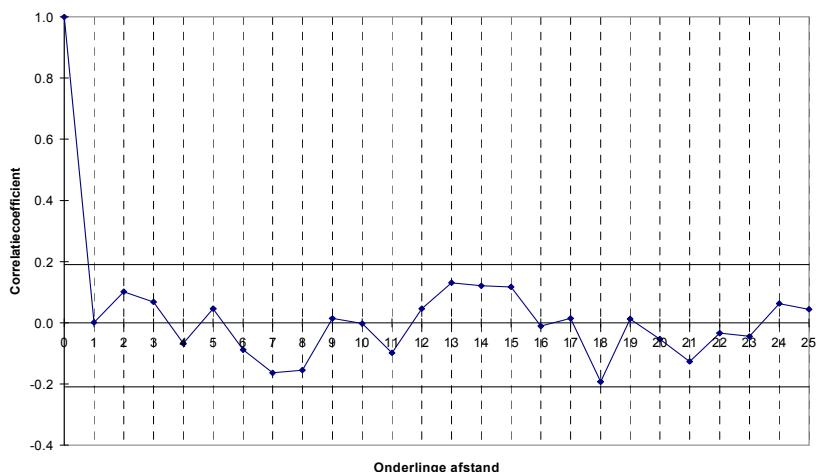
- bepaling onderlinge afstand VGD-metingen
- bepaling van het aantal VGD-meetpunten

VGD-metingen dicht bij elkaar genomen zullen meer op elkaar lijken dan VGD-metingen, die verder van elkaar zijn verwijderd. Deze gelijkens kan worden uitgedrukt in een correlatiecoëfficiënt als functie van de onderlinge afstand. Wanneer we met de VGD-metingen informatie over het oppervlak willen verzamelen, geven VGD-metingen dicht bij elkaar gelegen, vanwege de grote correlatie, niet veel extra informatie. Het is dus zonde om VGD-metingen dicht bij elkaar te nemen. Bovendien is het zo, dat bij veel statistische methoden de analyse het meest eenvoudig is en de resultaten het best te interpreteren zijn, wanneer we met onafhankelijke gegevens te maken hebben. Het is dus zaak de onderlinge afstand groot genoeg te kiezen dat we zo goed als ‘onafhankelijke’ metingen krijgen.

Ten einde de onderlinge afstand in het project Texel zo te kunnen kiezen om zo goed als 'onafhankelijke' VGD-metingen krijgen, is de autocorrelatiefunctie van de VGD-metingen berekend. De autocorrelatiefunctie en de grenzen zijn uitgezet in een grafiek. De onderlinge meetpuntafstand moet nu minstens gelijk gekozen worden aan de afstand behorend bij de eerste correlatiecoëfficiënt die niet significant van nul verschilt. In de figuren 2 en 3, zijn de autocorrelatiefuncties weergegeven van de bestekken NH-1630 en NH-3432. Bij bestek NH-1630 zijn de correlatiecoëfficiënten duidelijk niet significant verschillend van nul bij een minimale afstand van 10 m. Bij bestek NH-3432 duikt de autocorrelatiefunctie gelijk onder de bovengrens van het betrouwbaarheidsinterval, hetgeen inhoudt dat de onderlinge afstand dus minstens 1 m moet zijn.



**Figuur 2 Autocorrelatiefunctie van bestek NH-1630**

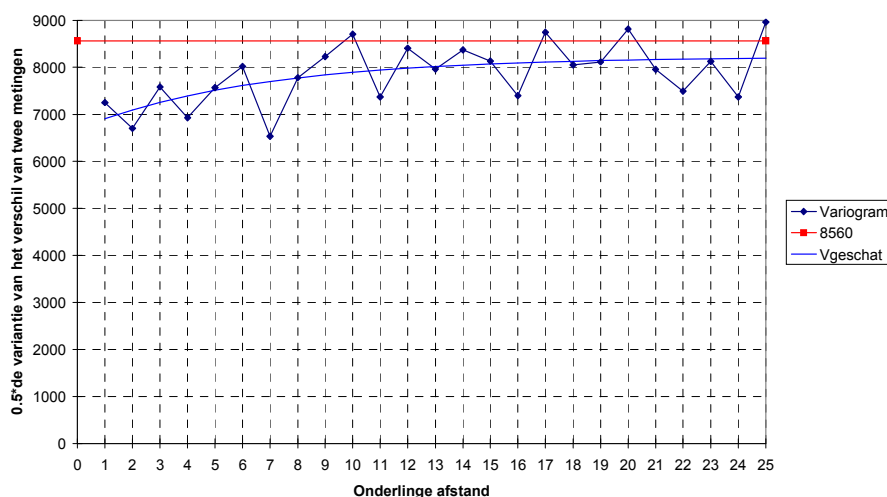


**Figuur 3 Autocorrelatiefunctie van bestek NH-3432**

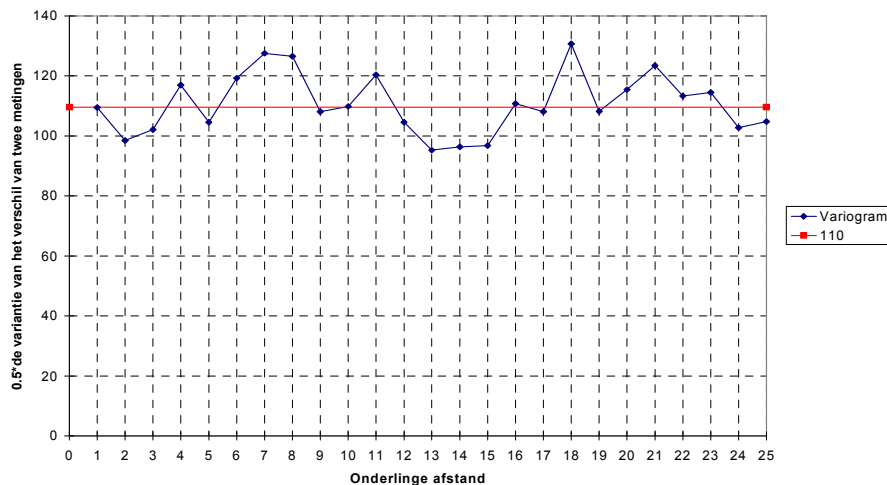
Naast de minimale h.o.h. afstand is ook het minimum aantal meetpunten bepaald. Als criterium heeft de nauwkeurigheid waarmee we de gemiddelde IDK willen schatten gediend. Daarbij is uitgegaan van een nauwkeurigheid van  $\pm 5\%$  met een betrouwbaarheid van 95%. Dan moet de halve breedte van een 95%-betrouwbaarheidsinterval gelijk zijn aan 5%:  $\frac{2\sigma}{\sqrt{n}} = 0.05\bar{x}$ , met

andere woorden:  $n = \frac{4\sigma^2}{(0.05\bar{x})^2}$ . Om deze berekening te kunnen uitvoeren moet informatie over  $\sigma$  en  $\bar{x}$  beschikbaar zijn.

Voor de standaardafwijking  $\sigma$  moet een waarde worden ingevuld die de standaardafwijking weergeeft van onderling onafhankelijke metingen. Deze standaardafwijking is afgeleid uit de variogrammen (zie figuur 4 en 5). Het variogram geeft de halve variantie weer van het verschil van twee metingen als functie van hun onderlinge afstand.



**Figuur 4 Variogram van bestek NH-1630**



**Figuur 5 Variogram van bestek NH-3432**

Uit figuur 4 en 5 zijn de benodigde gegevens overgenomen. Met deze gegevens is het benodigd aantal waarnemingen berekend.

**Tabel 4 Benodigd aantal waarnemingen**

<b>IDK</b>	<b>Bestek NH-1630</b>	<b>Bestek NH-3432</b>
Gemiddelde	244	86
Variantie	8220	110
Standaardafwijking	90.7	10.5
Benodigd aantal	221	24

Er zijn twee bestekken van Texel beschouwd. In het oude bestek met het tweelagensysteem (NH-1630) is precies genoeg meetafstand aangehouden maar tegelijk zijn er (statistisch gezien) onvoldoende meetpunten bemonsterd. Het is wel de vraag of een onderlinge meetafstand van minder dan 10 m nog wel zinvol is. Overigens kan de nauwkeurigheid in deze metingen nog wel goed genoeg zijn.

In het nieuwe bestek (NH-4332), dat als representatief wordt beschouwd voor alle bestekken na 1970 op Texel, is de onderlinge meetafstand ruim voldoende en ook het aantal meetpunten in de bestekken is voldoende.

Bij onderzoek in de wegenbouw of waterbouw wordt in de meeste gevallen minder metingen of proefstukken genomen dan statistisch minimaal benodigd wordt geacht, aangezien dit vooraf niet kan worden berekend. In de wegenbouw wordt uitgegaan van een minimum van 12 VGD-meetpunten per homogeen wegvak.

### *2.1.3 Literatuurstudie toepasbaarheid van valgewichtdeflectiemetingen op taluds*

Voor de toepassing van VGD-apparatuur op taluds is een literatuurstudie uitgevoerd. In deze studie zijn twee onderzoeksvragen beantwoord:

- 1) Is de VGD-apparatuur geschikt voor metingen op het talud en tot welke helling kunnen metingen worden verricht.
- 2) Kunnen de meetresultaten worden teruggerekend alsof er wordt gemeten op een plat vlak.

In de rapportage is geconcludeerd, dat VGD-metingen toepasbaar zijn op het talud (betreft mechanica en materiaalgedrag), indien gemeten wordt op een minimale afstand van 2,0 m van discontinuïteiten zoals de kruin en de teen van de dijk.

Met betrekking tot de meetgevoeligheid zijn de volgende conclusie in de rapportage getrokken:

- 1) Het talud mag niet steiler zijn dan 1:3
- 2) Het deflectiesignaal mag niet teveel laagfrequente signalen bevatten

Opmerking C. van Gulp: Deze conclusie is destijds verkeerd getrokken. De verwerkingssoftware voor valgewichtdeflectiemetingen corrigeert de meetwaarden voor laagfrequente signalen.

- 3) De maximale of piekwaarde van de deflectie moet binnen 60 ms plaatsvinden in het zogenaamde meetvenster.

Opmerking: Alleen op zwakke ondergronden (bv. veen) kan het voorkomen, dat de piekwaarde van de deflectie buiten de 60 ms plaatsvindt. De huidige VGD-metingen kunnen ook een tijdsvenster van 120 ms instellen.

#### 2.1.4 Aanvullende VGD en GPR-metingen Pettemer Zeewering

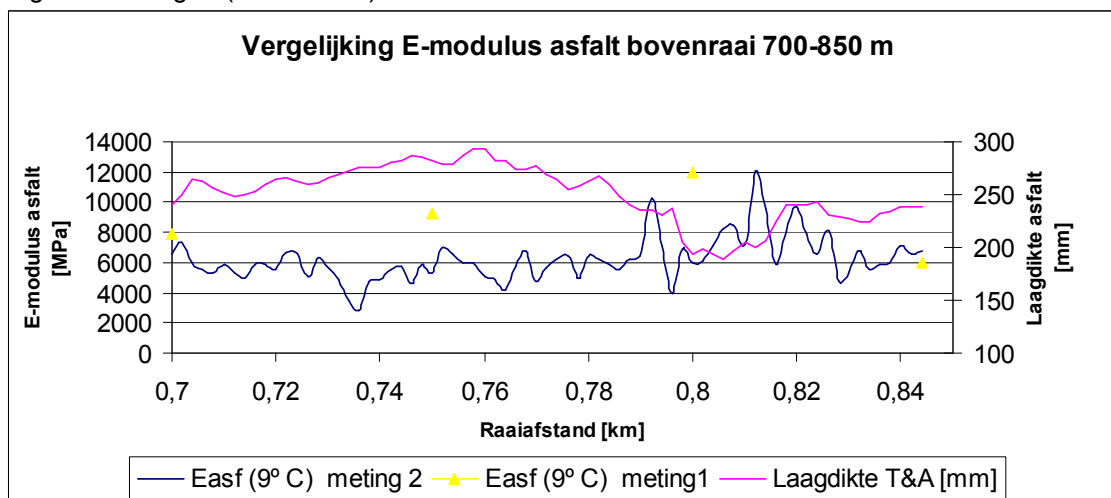
Na afronding van de veiligheidsbeoordeling van de Helderse, Hondsbossche en Pettemer Zeewering is aanvullend onderzoek uitgevoerd op de Pettemer Zeewering. Het aanvullende onderzoek bestond uit extra valgewichtdeflectiemetingen en laagdikteradarmetingen. In het onderzoek zijn ten aanzien van VGD-metingen de volgende onderwerpen beschouwd:

- variatie in stijfheidsmodulus
- betrouwbaarheid van de temperatuurbepaling met behulp van de BELLS-vergelijkingen

Aangezien de aanvullende metingen een half jaar na afronding van de veiligheidsbeoordeling zijn uitgevoerd kan niet met zekerheid worden gesteld, dat de metingen op exact dezelfde locatie zijn uitgevoerd.

#### Variatie in stijfheidsmodulus

Voor de veiligheidsbeoordeling van de Pettemer Zeewering zijn VGD-metingen uitgevoerd met een hart op hart afstand van 50 m. In het onderzoek zijn ter aanvulling voor 2 vakken VGD-metingen uitgevoerd met een h.o.h.-afstand van 2 m. Vervolgens zijn de teruggerekende stijfheidsmoduli van de herhalingsmetingen (h.o.h. 2 m) voor vier meettraaien vergeleken met de originele metingen (h.o.h. 50 m).



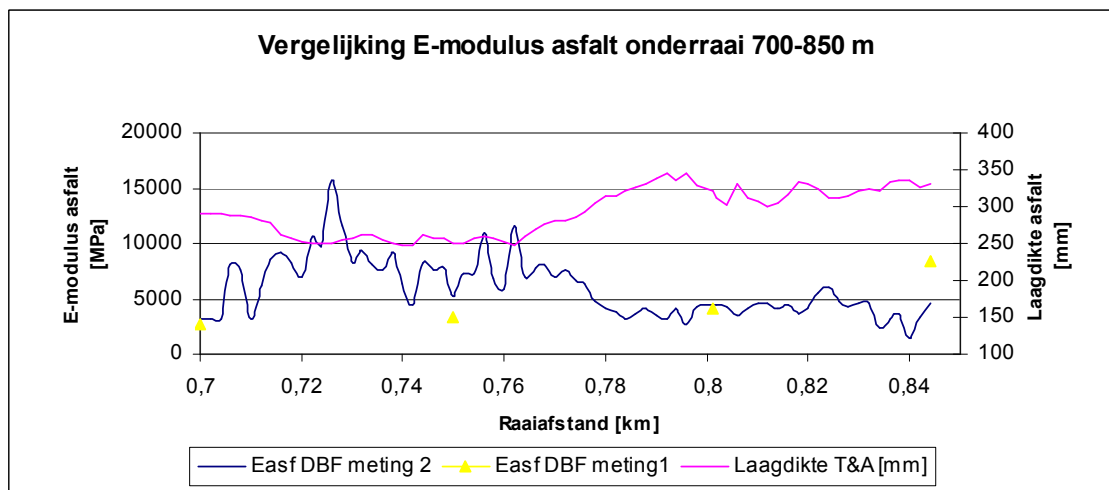
**Figuur 6**      **Vergelijking stijfheidsmodulus**

**Tabel 5 Stijfheidsmoduli meting 1 en 2, 700-850 m bovenraai**

Meting	Gemiddelde (Mpa)	Standaardafwijking (Mpa)	Minimum (Mpa)	Maximum (Mpa)
Meting 1 (n=4) oktober 2004	8802	2517	6031	12016
Meting 2 (n=75) juni 2005	6213	1475	2877	12101

**Tabel 6 Statistische grootheden meting 1 en 2, 800-850 m bovenraai**

Meting	Gemiddelde (Mpa)	Standaardafwijking (Mpa)	Minimum (Mpa)	Maximum (Mpa)
Meting 1 (n=2) (oktober 2004)	9032	-	6031	12016
Meting 2 (n=25) juni 2005	7210	1677	4770	12101


**Figuur 7 Vergelijking stijfheidsmodulus**
**Tabel 7 Statistische grootheden meting 1 en 2, 700-850 m onderraai**

Meting	Gemiddelde (Mpa)	Standaardafwijking (Mpa)	Minimum (Mpa)	Maximum (Mpa)
Meting 1 (n=4) Oktober 2004	4664	2569	2716	8414
Meting 2 (n=75) juni 2005	5935	2648	1471	15745

**Tabel 8 Statistische grootheden meting 1 en 2, 800-850 m onderraai**

Meting	Gemiddelde (Mpa)	Standaardafwijking (Mpa)	Minimum (Mpa)	Maximum (Mpa)
Meting 1 (n=2) oktober 2004	6286	-	4157	8414
Meting 2 (n=25) juni 2005	4111	957	1471	5991

In het onderzoek worden de volgende conclusies getrokken:

#### Bovenraai

1. Er is een verschil van 20-30% in de gemiddelde waarde van stijfheidsmoduli tussen beide metingen.
2. De eerste en tweede meting geven dezelfde trend te zien over de lengte van de meetraai.
3. De tweede meting met kleinere hart-op-hart afstanden heeft een kleinere standaarddeviatie en daarmee minder variatie dan de eerste meting met een hart-op-hart afstand van 50 m.
4. Bij vergelijking van de stijfheidsmoduli van beide metingen valt op dat op het begin –en eindpunt (700 m; 850 m) zeer weinig verschillen zijn. Op het tussenliggende gedeelte zijn er behoorlijke verschillen zichtbaar. Het is echter lastig om een goede koppeling te maken tussen beide metingen, omdat de meetposities van de twee series metingen niet exact op elkaar liggen. De tweede meting geeft aan dat bij toepassing van kleine hart op hart afstanden grote variaties kunnen voorkomen.
5. Opvallend is dat op het gedeelte tussen 800 en 850 m de tweede meting grote verschillen laat zien op kleine afstanden. De variatie in stijfheidsmodulus wordt niet verklaard door de variatie in laagdikte op dit gedeelte. Bij de keuze van een kleinere hart-op-hart afstand van de VGD-meting wordt de variatie in dit wegvak dus nog sterker weergegeven.

#### Onderraai

1. Er is een verschil van 20-35% in de gemiddelde waarde van de stijfheidsmoduli tussen beide metingen.
2. Op het gedeelte van 700 tot 800 m geven beide metingen dezelfde trend weer. In het gedeelte van 800 tot 850 m vertoont de eerste meting een sterke toename in de stijfheidsmodulus, terwijl in de tweede meting de stijfheidsmoduli op hetzelfde gedeelte op een bijna constant niveau liggen.
3. De tweede meting heeft voor de gehele meetraai (700-850 m) vrijwel dezelfde standaarddeviatie als de eerste meting.
4. Bij vergelijking van de stijfheidsmoduli van beide metingen valt op dat er op 700, 750 en 800 m (zeer) weinig verschillen zijn. Op het eindpunt (850 m) is er een behoorlijk verschil tussen beide metingen. Het is echter lastig om een goede koppeling te maken tussen beide metingen, omdat de meetposities van de twee series metingen niet exact op elkaar liggen. De tweede meting geeft aan dat bij toepassing van kleine hart op hart afstanden grote variaties kunnen voorkomen.

5. Opvallend is dat op het gedeelte tussen 700 en 750 m de tweede meting grote verschillen laat zien op kleine afstanden. De variatie in stijfheidsmodulus wordt niet verklaard door de variatie in laagdikte op dit gedeelte. Bij de keuze van een kleinere hart-op-hart afstand van de VGD-meting wordt er een grotere variatie in dit wegvak weergegeven, dan volgt uit de eerste meting tussen twee opeenvolgende punten, te weten 700 en 750 m.

#### Vergelijking temperatuurmetingen

Voor het terugrekenen van de stijfheidsmoduli is de asfalttemperatuur benodigd. De asfalttemperatuur kan worden gemeten in een boorgat of kan met de BELLS3-methode worden berekend aan de hand van de oppervlaktetemperatuur. In het onderzoek zijn de twee verschillende temperatuurmetingen met elkaar vergeleken. De gemiddelde gemeten temperatuur met de methode BELLS3 ligt 1,2 - 2,6 °C lager dan gemeten in het boorgat. Het uiteindelijke advies is om gebruik te maken van de methode BELLS3 en tevens ook de temperatuur te meten in een boorgat. Bij een te grote afwijking van de temperatuur bepaald met de methode BELLS3, dient de temperatuur gecorrigeerd te worden. Bij een groter verschil tussen de BELLS-temperatuur en het boorgattemperatuur dan 1 °C wordt de BELLS-temperatuur gecorrigeerd met de helft van het verschil.

#### *2.1.5 Conclusie*

Met betrekking tot het uitvoeren van valgewichtdeflectiemetingen kunnen op basis van het literatuuronderzoek de volgende conclusies worden getrokken:

- de ongecorrigeerde SCI 600 is niet geschikt voor selectie van zwakke plekken, aangezien deze grootte wordt beïnvloed door laagdikte en temperatuur;
- VGD-metingen zijn niet geschikt voor bekledingen met een helling steiler dan 1:3;
- steenslagsplit gebruikt voor het afstrooien van de asfaltbekleding heeft nauwelijks effect op de nauwkeurigheid van VGD-meetresultaten
- de methode BELLS is geschikt voor het berekenen van de asfalttemperatuur. Ter controle wordt ook de temperatuur in boorgaten gemeten en wordt een correctie op de BELLS-temperatuur uitgevoerd bij te grote afwijkingen.



## **2.2 Laagdikteradarmetingen**

### *2.2.1 Boulevard De Ruyter te Vlissingen*

In het onderzoek naar de asfaltdekkingsdikte zijn laagdikteradarmetingen gebruikt voor het lokaliseren van verdikte lassen. Deze informatie is gebruikt voor het bepalen van de meettraaien van de VGD-metingen. In het onderzoek is geconcludeerd dat het vaststellen van locaties van verdikte lassen in een dekking goed mogelijk is met radarmetingen. In het onderzoek is niet gekeken naar de nauwkeurigheid van laagdiktemetingen.

### *2.2.2 Ontwikkeling toetsing asfaltbekledingen Texel*

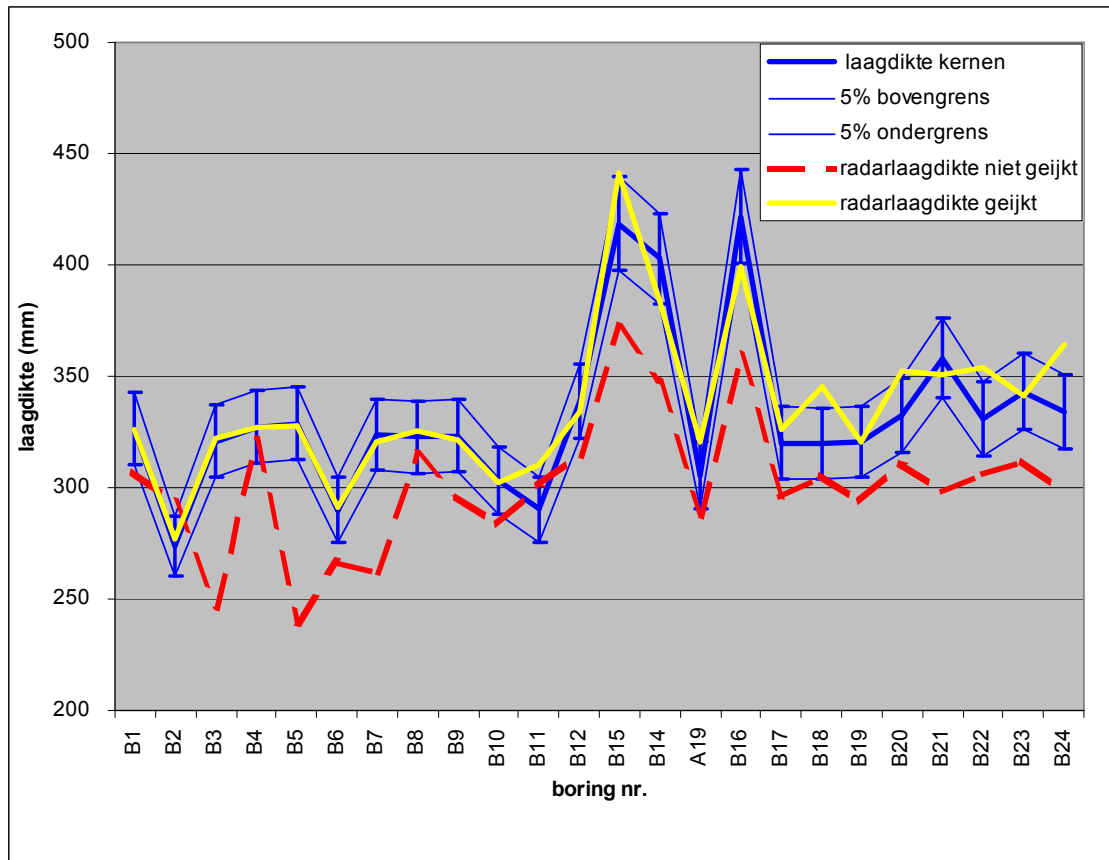
Voor het meten van de laagdikte zijn in de veiligheidsbeoordeling voor de Waddenzeedijk op Texel laagdikteradarmetingen toegepast. Voor het kalibreren van de laagdikteradarmetingen zijn bovendien referentieboringen uitgevoerd. De radarmetingen zijn zigzaggend over de 4 VGD-meettraaien uitgevoerd. In de meetmethode om uit radarmetingen laagdikten te bepalen zitten een aantal foutbronnen:

- meetnauwkeurigheid in de tijdsintervalmeting en meting in metring
- variatie loopsnelheid radarsignaal vanwege variatie in elektromagnetische eigenschappen van de asfaltdekking
- meetnauwkeurigheid laagdikte referentiekernen
- meetlocatie radarsignaal en locatie referentiekernen niet exact hetzelfde
- boorkernmeting is een puntmeting en een radarmeting is meer een vlakmeting

Het laagdikteverloop wordt met de radarmetingen goed in beeld gebracht en de grootste waargenomen afwijking van radarlaagdikte en de boorkernlengte bedraagt 20 mm bij een gemiddelde laagdikte van 230 mm.

### *2.2.3 Onderzoek bruikbaarheid NDO-technieken Waddenzeedijken Noord-Holland*

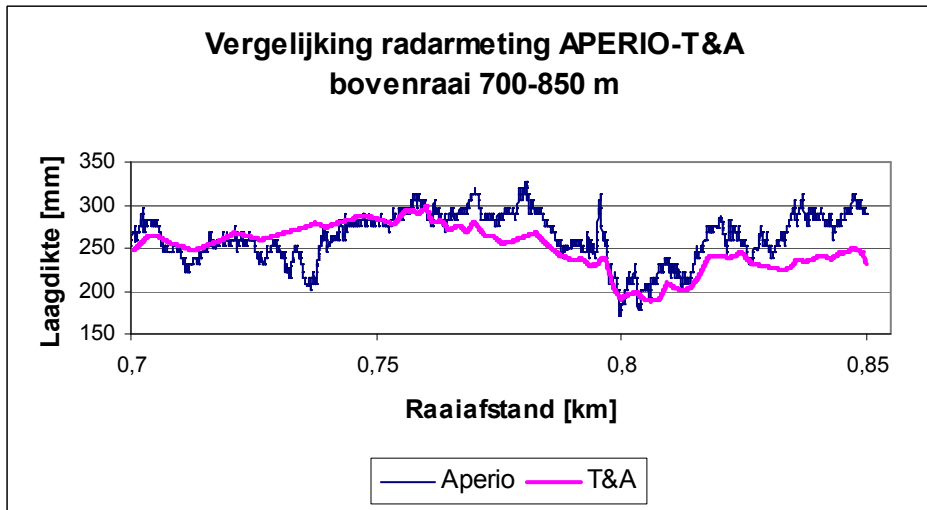
Aanvullend op de veiligheidsbeoordeling van de Waddenzeedijken in Noord-Holland heeft onderzoek plaatsgevonden naar mogelijke verbetering van de methodiek. Hiervoor zijn ook de laagdikteradarmetingen nadere geanalyseerd. In fase 2 van de veiligheidsbeoordeling is zonder gebruik van referentiekernen de laagdikte voor de asfaltdekking vastgesteld. In fase 5 is vervolgens het radarsignaal gekalibreerd aan de lengte van de geboorde kernen. De resultaten van beide fasen zijn vergeleken met de referentiekernen, waarbij de gekalibreerde radarlaagdikte een goede overeenkomst heeft met de boorkernlengtes (zie figuur 8). In het onderzoek is geconcludeerd, dat laagdikteradarmetingen ingezet kunnen worden voor asfaltbekledingen, mits het radarsignaal wordt gekalibreerd met boorkernen.



**Figuur 8 Boorkernlengte versus radarlaagdikte**

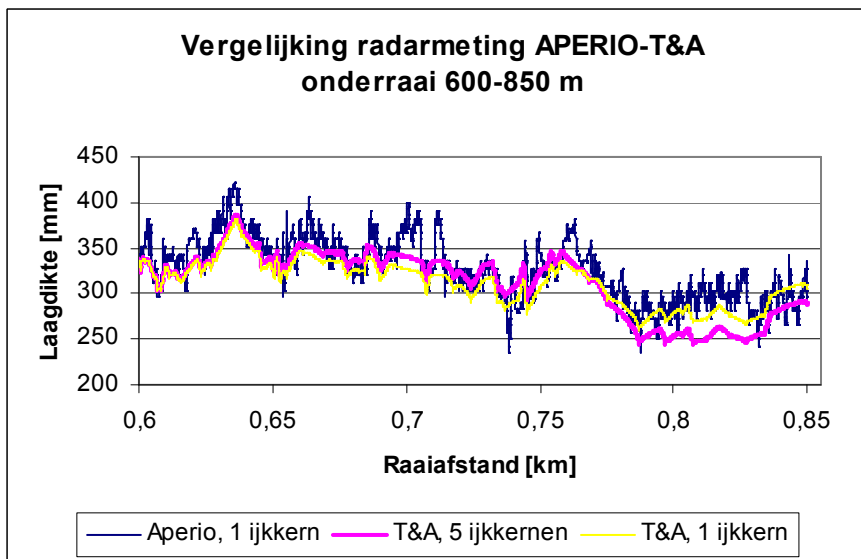
#### 2.2.4 Aanvullende VGD en GPR-metingen Pettemer Zeewering

In het aanvullende onderzoek op de Pettemer Zeewering zijn laagdikteradarmetingen uitgevoerd door Aperio en T&A. Het doel was om de reproduceerbaarheid van verschillende meetapparatuur te bekijken. Aangezien de metingen met de boorlocaties. Aangezien de aanvullende metingen van T&A een half jaar na afronding van de veiligheidsbeoordeling zijn uitgevoerd kan niet met zekerheid worden gesteld, dat de metingen op exact dezelfde locatie zijn uitgevoerd. Aperio heeft in de metingen een meetpuntafstand aangehouden van 0,02 m en T&A een meetpuntafstand van 0,10 m. Daardoor heeft de lijn van Aperio meer uitschieters en vakt de lijn van T&A de verschillen uit. De resultaten van de vergelijkende radarmetingen zijn als volgt:



**Figuur 9**      **Vergelijking radarmeting bovenraai**

Vermeld wordt dat bij de meting van Aperio er gebruik is gemaakt van één boorkern, terwijl bij de ijking van de meting van T&A gebruik is gemaakt van 4 boorkernen.



**Figuur 10**      **Vergelijking radarmeting onderraai**

**Tabel 9 Gegevens kernen en radarmetingen**

Kern nr.	Raai	Locatie (m)	Laagdikte Boorkern (mm)	Laagdikte Aperio (mm)	Laagdikte T&A 1 ijkkern (mm)	Laagdikte T&A 5 ijkkernen (mm)
9	5 meter (onderraai)	700	340	367	327	341
10	11 meter (bovenraai)	701	252	253	-	250
11	5 meter (onderraai)	750	322	342	308	325
12	11 meter (bovenraai)	750	283	283	-	284
13	5 meter (onderraai)	800	251	281	279	254
14	11 meter (bovenraai)	800	194	186	-	191
15	5 meter (onderraai)	850	291	289	306	287
16	11 meter (bovenraai)	850	241	290	-	232

De volgende conclusies worden getrokken betreft figuur 9 en 10:

1. Hoewel er weinig verschil (< 5%) is in de gemiddelde waarde en de standaarddeviatie van de laagdikte tussen beide metingen, worden er lokaal verschillen van 50-60 mm waargenomen.
2. De eerste en tweede meting geven dezelfde trend te zien over de lengte van de meetraai.

De volgende conclusies worden getrokken op basis van tabel 8:

1. De radarlaagdiktes van T&A met gebruik van 5 kalibratiekernen komen zeer goed overeen met de diktes van de boorkernen.
2. De resultaten van T&A laten zien dat toepassing van meer kalibratiekernen tot een nauwkeurigere benadering van de constructieopbouw leidt, zoals bepaald met behulp van boorkernen.
3. De vergelijking van de radarresultaten van Aperio met de constructieopbouw van de boorkernen geeft een wisselend beeld te zien.

### 2.2.5 Conclusie

Met betrekking tot het uitvoeren van laagdikteradarmetingen kunnen op basis van het literatuuronderzoek de volgende conclusies worden getrokken:

- Laagdikteradarmetingen zijn geschikt om discontinuïteiten zoals verdikte lassen in kaart te brengen
- Met laagdikteradarmetingen kan een gemiddelde nauwkeurigheid worden bereikt van minimaal 20 mm (5-10 %) bij gebruik van kalibratiekernen
- Meetresultaten moeten altijd gekalibreerd worden met asfaltboringen
- De reproduceerbaarheid van laagdikteradarmetingen laat nog te wensen over

## 2.3 Relatie VGD-metingen met laboratoriumeigenschappen asfalt

### 2.3.1 Ontwikkeling toetsing asfaltbekledingen Texel

In het onderzoek op de Waddenzeedijken op Texel is onderzocht of er relaties bestaan tussen de SCI, asfaltstijfheidsmoduli met de vermoeiingslevensduur. Hiervoor is op basis van VGD-metingen de SCI bepaald en de asfaltstijfheid is teruggerekend vanuit de gemeten deflectieprofielen met behulp van de laagdikte bepaald met de radarmeting. Tevens is de stijfheidsmodulus bepaald met ultrasoonmetingen en de dynamische driepuntsbuigproef.

Deze parameters zijn vergeleken met de vermoeiingslevensduur van het asfalt. Hiervoor zijn de levensduren uit de vermoeiingsproeven uitgevoerd bij verschillende krachtniveaus, genormeerd naar een standaardbelasting van 2,5 MPa.

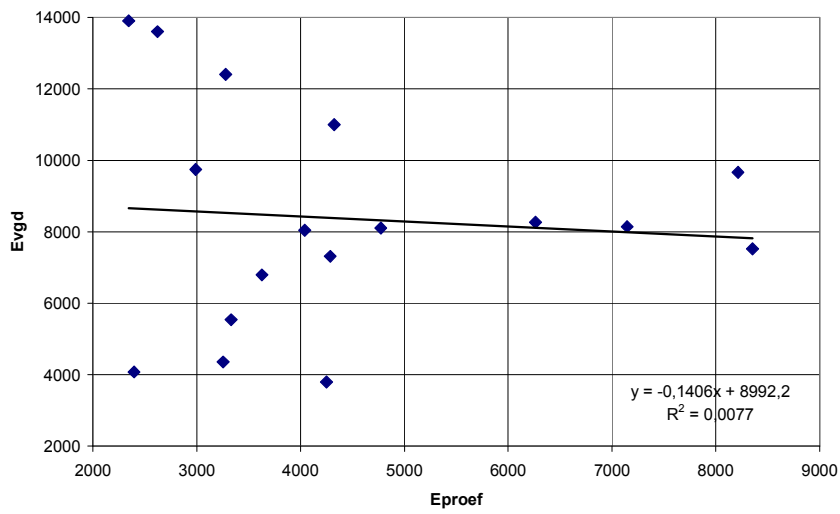
Dit is geoorloofd, indien een goede relatie (in geval van hoge correlatiecoëfficiënt  $r^2$ ) wordt gevonden voor de vermoeiingslijn.

Uit de vergelijking van de SCI 600, de asfaltstijfheidsmoduli met de vermoeiingslevensduur is in het onderzoek geconcludeerd:

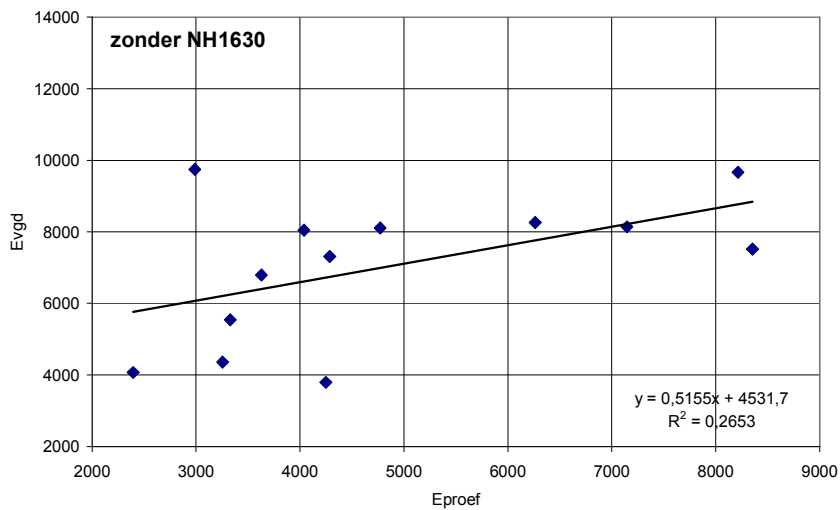
- Er is geen goed verband gevonden tussen de SCI en de vermoeiingslevensduur van asfalt mede door invloed van de laagdikte- en spreiding van de SCI)
- Er is geen goed verband gevonden tussen de  $E_{vgd}$  en de vermoeiingslevensduur (mede door twijfelachtige resultaten van de stijfheidproeven)
- Er is een beter verband tussen de E-ultrasoon en de vermoeiingslevensduur

Het slechte verband tussen de  $E_{vgd}$  en de vermoeiingslevensduur was niet verwacht, daarom is de VGD-stijfheid ook nog uitgezet tegen de stijfheid vanuit de driepuntsbuigproef. De  $E_{dyn}$ -waarden zijn afkomstig van de 5%, 15%, 45%, 85%, 95% karakteristieke SCI-locaties. In eerste instantie werd geen verband gevonden. Hierop zijn meetwaarden uit een afwijkende bekleding en alle resultaten van "verdachte" proeven weggelaten. Weglating van deze punten levert een betere relatie op ( $r^2 = 0,59$ ). De vergelijking benadert de vorm  $y=x$  (zie figuur 11, 12 en 13).

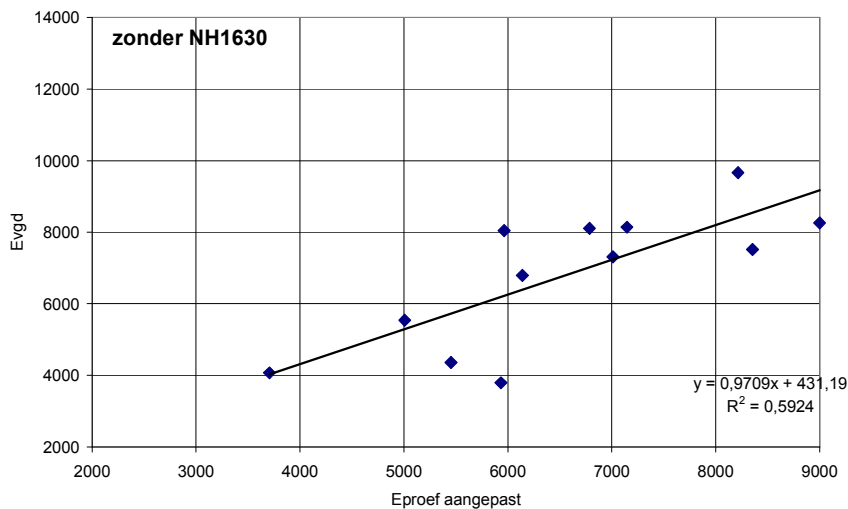
Zoals te zien in figuur 13 zijn de waarden voor  $E_{dyn}$  naar boven bijgesteld. Het is niet duidelijk op basis van welke criteria, dit heeft plaatsgevonden. De definitie van de typering "verdacht" is ook niet te achterhalen.



**Figuur 11** Relatie E<sub>vgd</sub> versus E<sub>dyn</sub>



**Figuur 12** E<sub>vgd</sub> versus E<sub>dyn</sub> zonder NH-1630 (oud werk)



**Figuur 13** E<sub>vgd</sub> versus E<sub>dyn</sub> aangepast en zonder NH-1630

### 2.3.2 Onderzoek bruikbaarheid NDO-technieken Waddenzeedijken Noord-Holland

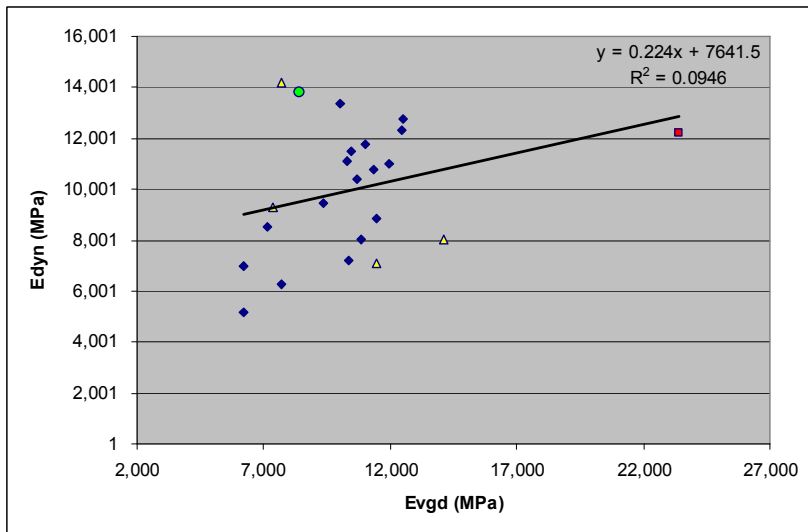
#### Relatie tussen E<sub>vgd</sub> en E<sub>dyn</sub>

Aanvullend op de veiligheidsbeoordeling van de Waddenzeedijken in Noord-Holland heeft onderzoek plaatsgevonden naar mogelijke verbetering van de toetsingsmethodiek van asfaltdekkingslagen. Hiervoor zijn ook de VGD-metingen in relatie tot de driepuntsbuigproeven nader geanalyseerd. Daarvoor is de E<sub>vgd</sub> gebruikt die bepaald is ter plaatse van de boorkern. Van deze boorkern is tevens de E<sub>dyn</sub> vastgesteld met behulp van de driepuntsbuigproef. De locaties van de boorkernen zijn gebaseerd op de percentielpunten van de E<sub>vgd</sub>-waarden (varieert van 4% - 96%).

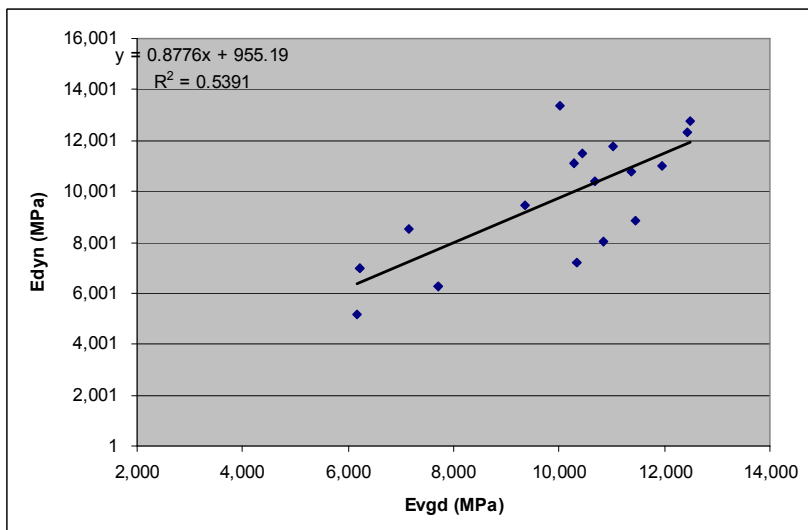
De relatie tussen de E<sub>vgd</sub> en E<sub>dyn</sub> voor alle boorlocaties is slecht. Uit een nadere analyse worden onderstaande redenen genoemd voor de slechte relatie:

- 1 meetpunt met een onnauwkeurige temperatuurmeting
- 4 meetpunten met een onnauwkeurige laagdiktemeting
- 1 meetpunt met een (niet nader verklaarde) grote afwijking tussen de E<sub>vgd</sub> en E<sub>dyn</sub>

Weglaten van deze punten levert een betere relatie op ( $r^2 = 0,54$ ). De vergelijking benadert de vorm  $y=x$  (zie figuur 14 en 15).



**Figuur 14**  $E_{vgd}$  versus  $E_{dyn}$  voor alle boorlocaties



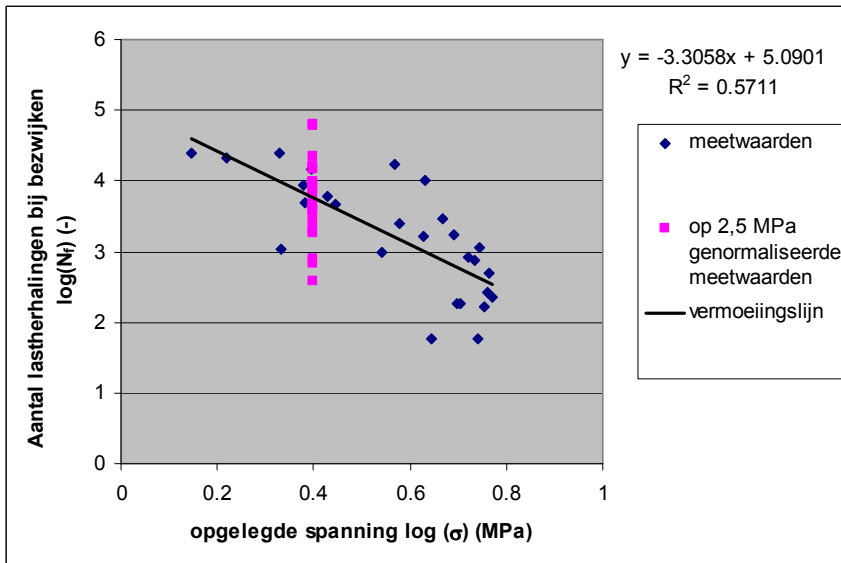
**Figuur 15**  $E_{vgd}$  versus  $E_{dyn}$  voor een selectie van boorlocaties

#### Relatie tussen $E_{dyn}$ en vermoeiingssterkte

De stijfheden bepaald met de driepuntsbuigproef zijn uitgezet tegen de vermoeiingssterkte. Hiervoor zijn de resultaten van de vermoeiingsproeven uitgevoerd bij verschillende krachtniveaus, genormeerd naar een standaardbelasting van 2,5 MPa.

Deze normalisatie is geoorloofd, indien een goede relatie (in geval van hoge correlatiecoëfficiënt  $r^2$ ) wordt gevonden voor de vermoeiingslijn. In figuur 16 is te zien dat voor dit werk dit niet het geval is. De relaties die gevonden zijn in figuur 17 en 18 moeten dan ook in twijfel worden getrokken.

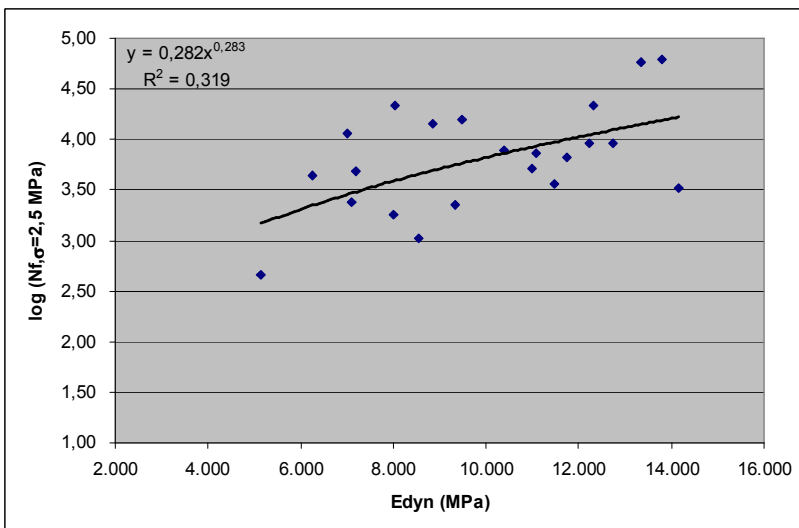




**Figuur 16 Normalisatie Nf**

Vervolgens is het genormaliseerd aantal lastherhalingen uitgezet tegen de dynamische elasticiteitsmodulus.

In de gevonden relatie ( $r^2 = 0,32$ ) resulteert een hogere stijfheid in een hogere vermoeiingssterkte (zie figuur 17).

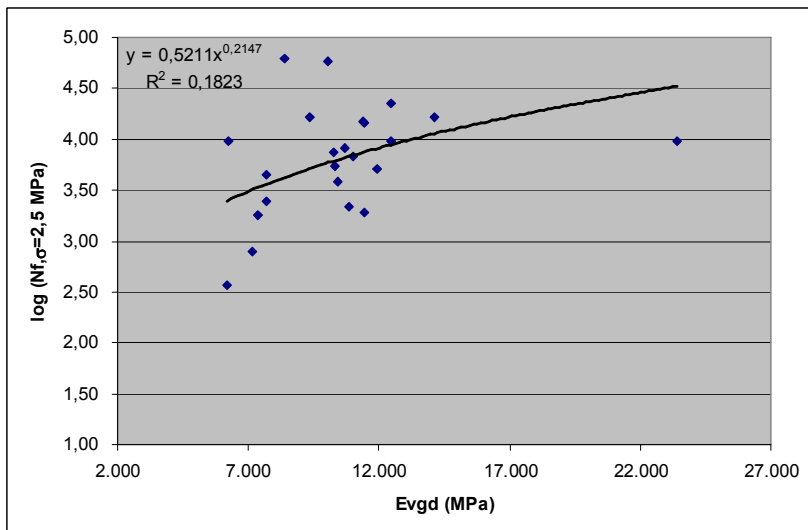


**Figuur 17 Relatie  $N_{f,2,5MPa}$  en  $E_{dyn}$**

### Relatie tussen $E_{vgd}$ en vermoeiingssterkte

De teruggerekende stijfheden uit het deflectieprofiel zijn uitgezet tegen de vermoeiingssterkte. Hiervoor zijn de resultaten van de vermoeiingsproeven genormaliseerd naar een opgelegde spanning van 2,5 MPa. Dit is geoorloofd, indien een goede relatie (in geval van hoge correlatiecoëfficiënt  $r^2$ ) wordt gevonden voor de vermoeiingslijn. In figuur 15 is te zien dat voor dit werk dit niet het geval is.

Vervolgens is het genormaliseerd aantal lastherhalingen uitgezet tegen de teruggerekende stijfheden. Na selectie van het aantal meetpunten (weglaten van meetwaarden van een afwijkende bekleding en alle resultaten van "verdachte" proeven) wordt een vergelijkbare relatie gevonden als tussen de  $E_{dyn}$  en de vermoeiingssterkte ( $r^2 = 0,18$ ) (zie figuur 17).



**Figuur 18** Relatie  $N_{f,2,5MPa}$  en  $E_{vgd}$

### 2.3.3 Conclusie

Met betrekking tot de relatie van VGD-metingen met de laboratoriumeigenschappen van asfalt kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

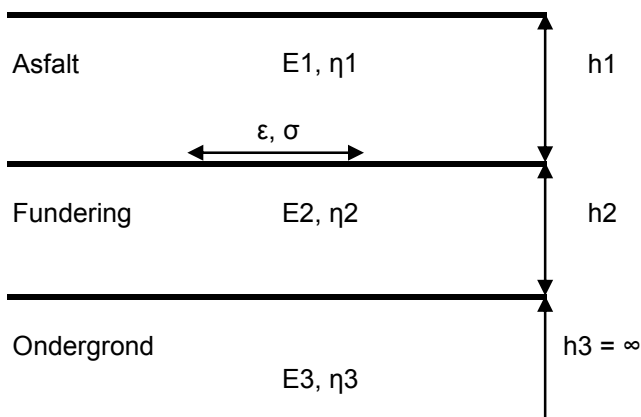
- Er bestaat een zwakke relatie tussen  $E_{vgd}$  en  $E_{dyn}$  en er wordt pas na selectie van datapunten een redelijke relatie gevonden ( $r^2 = 0,54$  en  $0,59$ ). De  $E_{dyn}$  is representatief voor de stijfheid van een enkele boorkern en de  $E_{vgd}$  is representatief voor de stijfheid van een zone. Dit kan een mogelijk oorzaak zijn voor de gevonden zwakke relatie tussen deze twee grootheden.
- De gevonden relatie tussen de vermoeiingslevensduur en de  $E_{dyn}$  en de  $E_{vgd}$  is slecht.

### 3 Bureaustudie

#### 3.1 Ontwikkeling voorspellend rekmodel

In de huidige methode van de veiligheidsbeoordeling van asfaltdijkbekledingen worden zwakke plekken geselecteerd op basis van asfaltstijfheid. Zwakke plekken zijn plekken met een dunne laagdikte van de dijkbekleding en een ongunstige waarde voor de asfaltstijfheid en ondergrondstijfheid. In het onderzoek van 2007 is geconcludeerd, dat de maximale asfaltrek of spanning een betere indicator is om zwakke plekken qua vermoeiingslevensduur te detecteren dan de asfaltstijfheid. De maatgevende asfaltrek voorziet namelijk in alle combinaties van variaties in stijfheid en laagdikte. Aan de hand van een groot aantal meerlagenberekeningen is een relatie ontwikkeld tussen gemakkelijke meetbare grootheden zoals deflectieprofiel en laagdikte en maximale rek of spanning.

Met behulp van het computerprogramma BISAR 1.0 is voor een groot aantal combinaties van laagdikte en laagstijfheden het deflectieprofiel en optredende rekken en spanningen onder een uniform verdeelde belasting van 50 kN bereken, verdeeld over een cirkelvormig oppervlak met een diameter van 300 mm. Er is uitgegaan van een drielaagenmodel, waarbij de derde laag zich half oneindig uitstrekt (zie figuur 19)



**Figuur 19 Schematisering van de beschouwde constructie**

Een overzicht van de beschouwde laagdikten en laagstijfheden is opgenomen in tabel 10. Voor het Poissongetal is een waarde aangehouden van 0,35.

**Tabel 10 Beschouwde laagdikten en laagstijfheden**

Laagstijfheden in (MPa) en laagdikten in mm	Laagdikten en laagstijfheden						
	500	1000	2000	5000	10000	20000	
E1	500	1000	2000	5000	10000	20000	
h1	100	200	300	400	500	600	
E2	50	100	200	300	1000	3000	10000
h2	100	200	300				
E3	20	50	100	200	300		

Op een selectie van de resultaten van de berekeningen is middels regressieanalyse voor zowel de maximale asfaltrek als voor de maximale spanning een voorspellend model afgeleid. Voor de maximale asfaltrek is ook een model afgeleid zonder de asfaltdikte als invoervariabele. Het voordeel van dit laatste model is dat geen informatie van de laagdikten nodig is en kan worden volstaan met deflectiemetingen alleen. De selectie van de dataset is als volgt tot stand gekomen:

- Resultaten met een maximale rek onderin laag 1 kleiner dan 20  $\mu\text{m/m}$  zijn verwijderd;
- Resultaten met een maximale rek onderin laag 1 groter dan 1000  $\mu\text{m/m}$  zijn verwijderd;
- Resultaten met een negatieve spanning onderin laag 1 (drukspanning) zijn verwijderd.

De gedetailleerde resultaten van de regressieanalyse zijn opgenomen in bijlage 1.

Tabel 11 bevat een samenvatting van de regressieanalyse voor een model op basis van de maximale horizontale asfaltrek. De standaardfout in de schatting van de asfaltrek bedraagt 0,0865. De machtsverheffing  $10^{0,0865}$  (de regressie is op log-basis uitgevoerd) levert een waarde van ongeveer 1,22 op. Dit betekent dat de fout in de geschatte asfaltrek ongeveer 22% is. De asfaltrek kan 1,22 maal kleiner of groter zijn.

**Tabel 11      Regressieresultaten model o.b.v. asfaltrek**

correlatiecoëfficiënt $r^2$	0,9583
standaardafwijking in schatting van logaritme van asfaltrek	0,0865
toetsingsgrootte F	6747

De relatie tussen afgeleiden van het deflectieprofiel, de dikte van het asfalt en de asfaltrek luidt:

$$\log(\varepsilon) = 1,5231 + 0,3927 \cdot \log(h_1) - 2,24069 \cdot \log(d_0) - 2,64937 \cdot \log(d_{300}) + 0,66605 \cdot \log(d_{600}) + 4,22079 \cdot \log(SCI_{300}) - 8,30623 \cdot \log(SCI_{600}) + 5,54845 \cdot \log(BDI) - 0,75753 \cdot \log(BCI) \quad (1)$$

- waarbij  $\varepsilon$  = maximum rek onderin 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 ( $\mu\text{m}$ )
- $SCI_{300}$  = Surface Curvature Index  $d_0 - d_{300}$  ( $\mu\text{m}$ )
- $SCI_{600}$  = Surface Curvature Index  $d_0 - d_{600}$  ( $\mu\text{m}$ )
- $BDI$  = Base Damage Index  $d_{300} - d_{600}$  ( $\mu\text{m}$ )
- $BCI$  = Base Curvature Index  $d_{600} - d_{900}$  ( $\mu\text{m}$ )

Tabel 12 bevat een samenvatting van de regressieanalyse voor een model op basis van de maximale horizontale asfaltrek maar zonder de laagdikte van het asfalt als voorspellende variabele. De standaardfout in de schatting van de asfaltrek bedraagt 0,0942. De machtsverheffing  $10^{0,0942}$  (de regressie is op log-basis uitgevoerd) levert een waarde van ongeveer 1,24 op. Dit betekent dat de fout in de geschatte asfaltrek ongeveer 24% is.

**Tabel 12 Regressieresultaten model o.b.v. asfaltrek zonder  $h_1$**

correlatiecoëfficiënt $r^2$	0,9505
standaardafwijking in schatting van asfaltrek	0,0942
toetsingsgrootte F	6443

De relatie tussen afgeleiden van het deflectieprofiel en de asfaltrek luidt:

$$\log(\varepsilon) = 1,5231 + 2,09803 \cdot \log(d_0) - 1,4151 \cdot \log(d_{300}) - 0,42989 \cdot \log(d_{600}) + 4,32481 \cdot \log(SCI_{300}) - 7,60848 \cdot \log(SCI_{600}) + 3,56736 \cdot \log(BDI) + 0,39567 \cdot \log(BCI) \quad (2)$$

De voorspellende kracht van vergelijking (2) is vrijwel gelijk aan die van vergelijking (1). Omdat voor vergelijking (2) minder data hoeven te worden verzameld, heeft deze vergelijking de voorkeur

Tabel 13 bevat een samenvatting van de regressieanalyse voor een model op basis van de maximale horizontale spanning. De standaardfout in de schatting van de spanning bedraagt 0,2161. De machtsverheffing  $10^{0,2161}$  (de regressie is op log-basis uitgevoerd) levert een waarde van ongeveer 1,64 op.

**Tabel 13 Regressieresultaten model o.b.v. spanning**

correlatiecoëfficiënt $r^2$	0,8419
standaardafwijking in schatting van spanning	0,2161
toetsingsgrootte F	1565

De relatie tussen afgeleiden van het deflectieprofiel, de dikte van het asfalt en de maximale horizontale spanning onderin het asfalt luidt:

$$\log(\sigma) = -2,4535 + 0,3327 \cdot \log(h_1) - 9,48779 \cdot \log(d_0) + 22,00578 \cdot \log(d_{200}) - 11,65764 \cdot \log(d_{300}) - 3,86351 \cdot \log(SCI_{300}) + 4,5985 \cdot \log(SCI_{600}) - 0,71007 \cdot \log(BDI) \quad (3)$$

waarbij  $\sigma$  = maximale trekspanning onderin asfalt onder belasting van 50 kN (MPa)  
 $d_i$  = deflectie onder belasting van 50 kN gemeten op afstand  $i$  mm vanaf het lastcentrum ( $\mu\text{m}$ )  
 $SCI_{300}$  = Surface Curvature Index  $d_0 - d_{300}$  ( $\mu\text{m}$ )  
 $SCI_{600}$  = Surface Curvature Index  $d_0 - d_{600}$  ( $\mu\text{m}$ )  
 $BDI$  = Base Damage Index  $d_{300} - d_{600}$  ( $\mu\text{m}$ )

Het model voor de asfaltrek blijkt een grotere voorspellende kracht en precisie te hebben dan dat het model voor de spanning in het asfalt. KOAC·NPC stelt dan ook voor om het model voor asfaltrek toe te passen voor de selectie van zwakke plekken t.b.v. monitoring van asfaltdijkbekledingen.

Bij toepassing van het model voor het berekenen van de asfaltrek wordt gebruik gemaakt van het deflectieprofiel. De verschillende deflectieprofielen worden bij verschillende temperaturen gemeten. De deflecties gemeten tot 900 mm van het lastcentrum worden sterk beïnvloed door temperatuurverschillen. Voordat deze deflectieparameters worden gebruikt voor het model moet temperatuurnormalisatie plaatsgevonden hebben. KOAC-NPC adviseert te normaliseren naar een naar een standaardtemperatuur van 5 °C.

Temperatuurnormalisatie kan plaatsvinden met formules van afgeleid door Van Gurp [2]. Deze formules normaliseren naar een standaardtemperatuur van 20 °C.

$$TNF = 1 + \left( a_1 + \frac{a_2}{h_1} \right) \cdot (T_a - 20) + \left( a_3 + \frac{a_4}{h_1} \right) \cdot (T_a - 20)^2 \quad (4)$$

De genormaliseerde deflectie bij 20 °C wordt als volgt bepaald:

$$d_{ref} = \frac{d_t}{TNF} \quad (5)$$

waarbij TNF	=	temperatuurnormalisatiefactor
$c_i$	=	modelcoëfficiënt (zie tabel 14)
$h_1$	=	dikte van asfaltlaag (mm)
$T_A$	=	asfalttemperatuur (°C)
$d_{ref}$	=	deflectie bij referentietemperatuur (µm)
$d_t$	=	deflectie bij meettemperatuur (µm)

**Tabel 14 Coëfficiënten voor temperatuurnormalisatie**

Variabele	a1 (°C <sup>-1</sup> )	a2 (mm/°C)	a3 (0,001°C <sup>-2</sup> )	a4 (mm/°C <sup>2</sup> )
$d_0$	0,01661	-0,67095	0,28612	-0,01408
SCI300	0,05398	-2,61130	1,28439	-0,07493
SCI600	0,04190	-2,15168	0,97228	-0,05301

De genormaliseerde deflectie bij 5 °C wordt dan ook als volgt berekend:

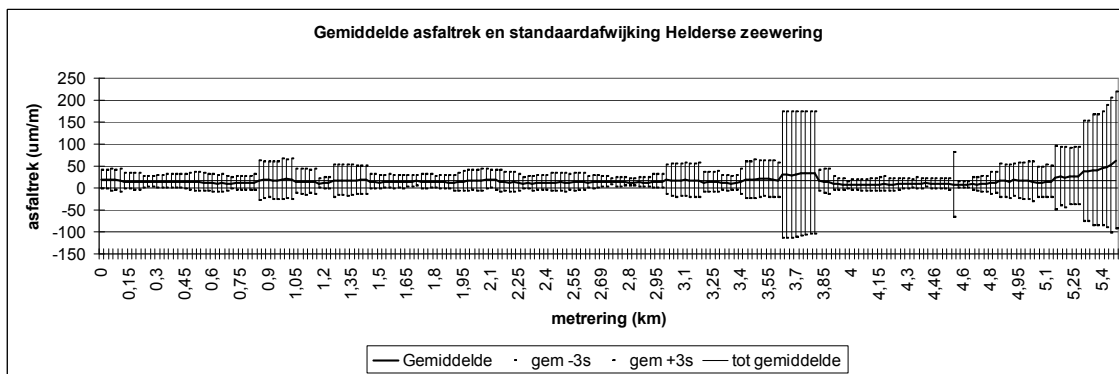
$$d_5 = \frac{TNF_5}{TNF_t} \cdot d_t \quad (6)$$

waarbij $TNF_t$	=	temperatuurnormalisatiefactor van de meettemperatuur
$TNF_5$	=	temperatuurnormalisatiefactor bij een temperatuur van 5 °C
$d_t$	=	deflectie bij meettemperatuur (µm)
$d_5$	=	deflectie bij 5 °C (µm)

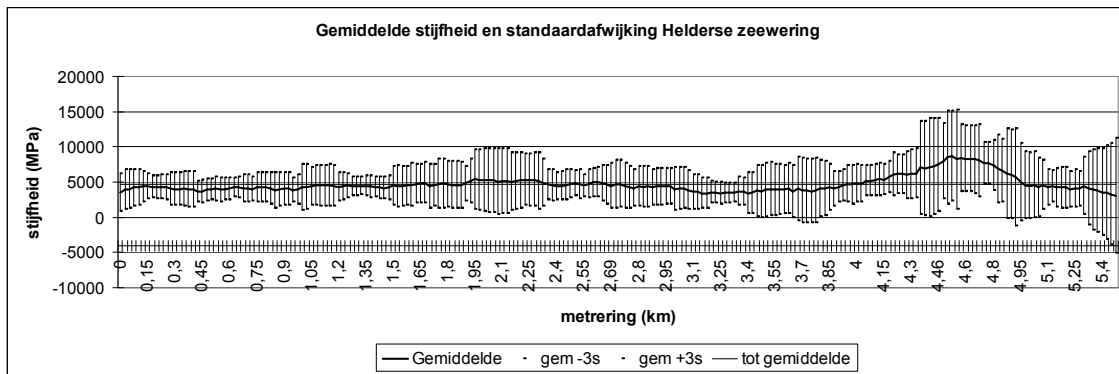
TNF<sub>5</sub> wordt als volgt berekend:

$$TNF_5 = 1 + \left( a_1 + \frac{a_2}{h_1} \right) \cdot (-15) + \left( a_3 + \frac{a_4}{h_1} \right) \cdot 225 \quad (7)$$

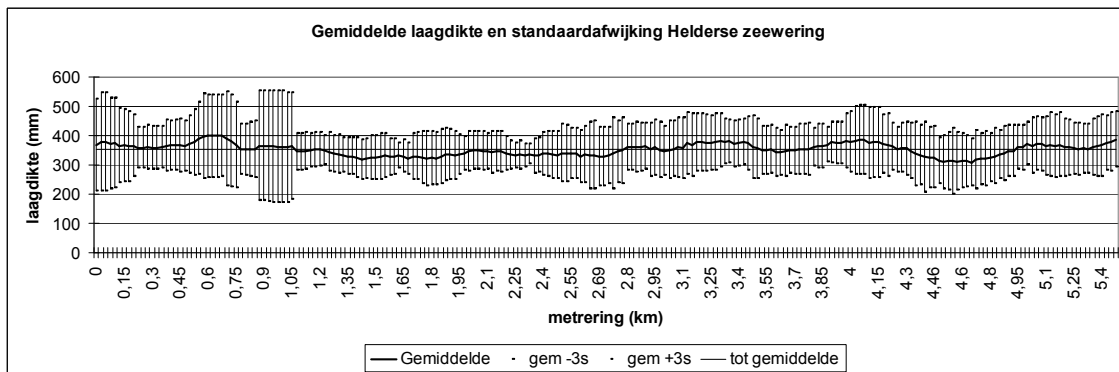
In figuren 20 t/m 22 zijn als voorbeeld het voortschrijdende gemiddelde en drie maal plus of min de standaardafwijking van de maatgevende rek, de stijfheidsmodulus en de laagdikte gegeven. Hierbij is gebruik gemaakt van de gegevens van de Helderse zeewering.



**Figuur 20** Voortschrijdend gemiddelde van de maatgevende rek



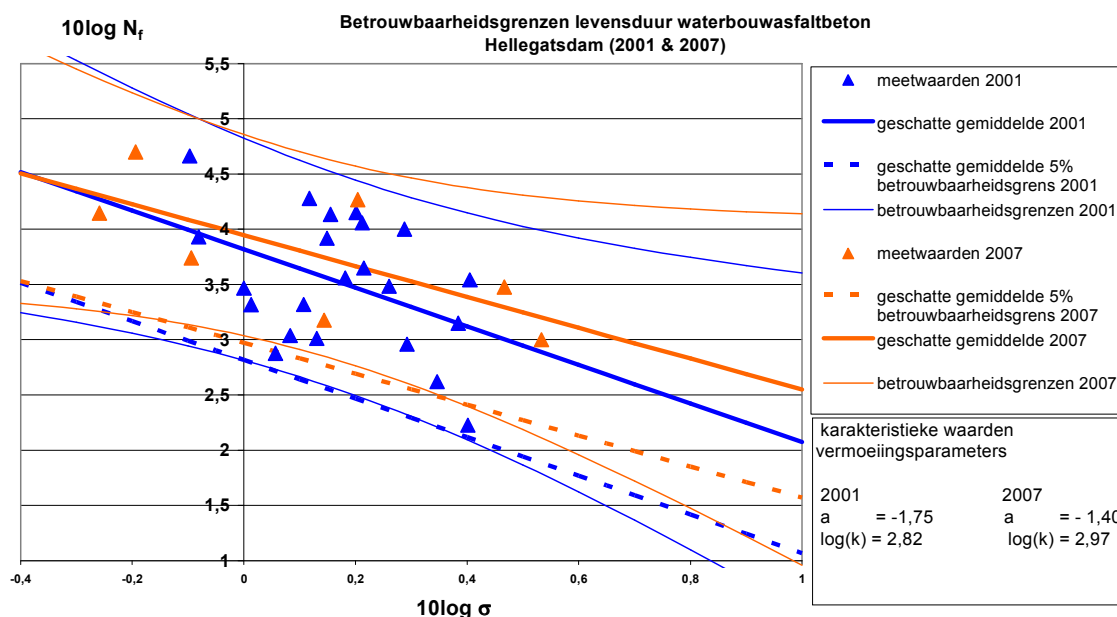
**Figuur 21** Voortschrijdend gemiddelde van de stijfheidsmodulus



**Figuur 22** Voortschrijdend gemiddelde van de laagdikte

### 3.2 Vergelijking vermoeiingseigenschappen Hellegatsdam

In 2001 zijn uit de bekleding van de Hellegatsdam aselekt en representatief 21 kernen geboord waarna eenzelfde aantal vermoeiingsproeven is uitgevoerd. In 2007 zijn op hetzelfde damvak valgewichtdeflectiemetingen uitgevoerd en op basis daarvan is een zwakke plek in de bekleding geselecteerd voor vermoeiingsonderzoek. Op deze locatie zijn 8 kernen geboord waarna 8 vermoeiingsproeven zijn uitgevoerd. Om meer inzicht te verkrijgen in de statistische betrouwbaarheid van beide methoden zijn deze resultaten met elkaar vergeleken. Hiervoor zijn de vermoeiingseigenschappen van beide jaren in figuur 23 uitgezet.



**Figuur 23 Vergelijking vermoeiingseigenschappen Hellegatsdam 2001/2007**

De grafiek laat zien, dat het geschatte gemiddelde in 2001 lager ligt dan in 2007. Echter het verschil in beide vermoeiingsparameters is niet significant. De verschillen in vermoeiingsparameters zijn hoogstwaarschijnlijk het gevolg van de krachtniveaus waarop de vermoeiingsproeven zijn uitgevoerd. In 2001 liggen de krachtniveaus dichter bij elkaar dan in 2007.

Zoals verwacht vertonen de resultaten uit 2001 een grotere spreiding dan de resultaten uit 2007. Dit komt doordat de boorkernen in 2007 uit één zwakke plek zijn genomen en in 2001 over het gehele damvak aselekt en representatief zijn geboord.

#### Conclusie

Op basis van de vergelijking van de vermoeiingseigenschappen tussen 2001 en 2007 kan geconcludeerd worden dat de vermoeiingseigenschappen van de asfaltbekleding nauwelijks zijn veranderd.



### 3.3 Geschiktheid UEC-SLAB voor terugrekenen laagstijfheden en beddingsconstante

#### 3.3.1 Huidige situatie terugrekenen van laagstijfheden

In de huidige methode van de veiligheidsbeoordeling van asfaltdijkbekledingen worden zwakke plekken geselecteerd op basis van asfaltstijfheid. Zwakke plekken zijn plekken met een dunne laagdikte van de dijkbekleding en een ongunstige waarde voor de asfaltstijfheid en ondergrondstijfheid. Het terugrekenen van de laagstijfheden gebeurt op dit moment vrijwel altijd met modellen die zijn gebaseerd op de meerlagentheorie van Burmister. Hierbij worden de stijfheden van de lagen teruggerekend na invoering van de laagdikten en Poissongetallen.

Voor de daadwerkelijke veiligheidsbeoordeling dient ook de beddingsconstante te worden berekend. Deze wordt berekend op basis van de stijfheid van de fundering/ondergrond met onderstaande formule [Verruit, 1983].

$$c = \frac{E}{2a(1-\nu^2)} \quad (8)$$

waarbij c	beddingsconstante [MPa/m]
E	elasticiteitsmodulus van de ondergrond [MPa]
a	straal van de belaste plaat = 0,15 + laagdikte [m]
$\nu$	Poissongetal

#### 3.3.2 Bepaling laagstijfheden met UECSLAB

UECSLAB, dat wordt gebruikt voor de evaluatie van cementbetonnen verhardingen, gaat uit van een Pasternak-model waarbij de toplaag wordt gekarakteriseerd door een elasticiteitsmodulus en een laagdikte en de ondergrond met een beddingsconstante en schuifkrachtparameter. Indien voor het terugrekenen van laagstijfheden gebruik wordt gemaakt van UECSLAB, wordt direct een beddingsconstante verkregen. Er is nagegaan of UECSLAB geschikt is voor asfaltdijkbekledingen en of er grote hoeveelheden deflectieprofielen mee kunnen worden teruggerekend.

In UEC-SLAB dienen handmatig deflecties te worden ingevoerd. Daarna moet voor de toplaag de laagdikte en de elasticiteitsmodulus worden opgegeven. Voor het opgeven van de beddingsconstante zijn twee mogelijkheden gedefinieerd:

- 1) Bepalen k-waarde op basis van Westergaard  
De eerste mogelijkheid is om de k-waarde te laten berekenen op basis van de Westergaard-formule voor doorbuiging.
- 2) Bepalen k-waarde op basis van de elasticiteitsmodulus  
Op basis van de globale correlatie tussen de CBR-waarde en de elasticiteitsmodulus wordt de beddingsconstante ingeschat.

Nadat de beddingsconstante is berekend of ingevoerd wordt de schuifkrachtparameter Pasternak (G) berekend op basis van een indicatieve relatie met de beddingsconstante, dikte van de verharding en de plaatradius van de opgelegde belasting. Op basis van de complete set data wordt een bijbehorend deflectieprofiel berekend. Dit profiel wordt vergeleken met het gemeten deflectieprofiel. De waarden voor k, G en E moeten iteratief worden gevarieerd totdat een goede fit wordt bereikt.

### Conclusie

Aangezien de deflectieprofielen handmatig moeten worden ingevoerd, wordt UEC-SLAB met betrekking tot het terugrekenen van stijfheden in grote aantallen minder geschikt geacht. Bij het fitten van het deflectieprofiel moeten k, G en E worden gevarieerd, wat met onvoldoende kennis tot onjuiste uitkomsten kan leiden.

### 3.4 Ontwikkeling model beddingsconstante

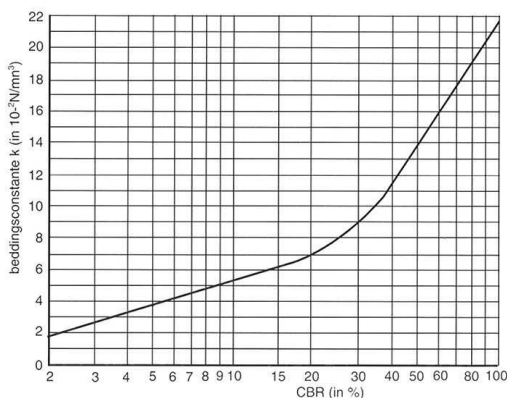
In plaats van berekening van de beddingsconstante met de formule van Verruijt is gekeken of de beddingsconstante direct uit het deflectieprofiel berekend kan worden. Hiervoor is gebruik gemaakt van de dataset, welke is gebruikt voor het ontwikkelen van het model voor asfaltrek.

De beddingsconstante van fundering en ondergrond is berekend met de formules vanuit [6]. Deze worden ook toegepast in de dimensionering van cementbetonverhardingen. Het beddinggetal van de ondergrond (onder de plaatondersteuning) is bepaald op basis van figuur 24 en onderstaande formule, afkomstig uit [8].

$$E_2 = 17,6 \cdot \frac{CBR}{0,64} \quad (9)$$

waarbij  $E_2$  = elasticiteitsmodulus van de fundering of het zandbed (MPa)  
 CBR = California bearing ratio (%)

Geldig voor  $2\% > CBR < 12\%$



**Figuur 24** Verband tussen  $k_0$ -waarde en de CBR-waarde van de ondergrond

$$k_1 = 2,7545 \cdot 10^{-4} \cdot (C_1 + C_2 \cdot e^{c^3} + C_4 \cdot e^{c^5}) \quad (10)$$

waarbij $k_1$	=	samengesteld beddinggetal direct onder de plaat ( $\text{N/mm}^3$ )
$k_0$	=	beddinggetal onder plaatondersteuning ( $\text{N/mm}^3$ )
$h_2$	=	laagdikte van de plaatondersteuning (fundering of zandbed) (mm)
$E_2$	=	elasticiteitsmodulus van de fundering of het zandbed ( $\text{N/mm}^2$ )

Met als coëfficiënten en voorwaarden:

$C_1 = 30 + 3360 \cdot k_0$	$h_2 \geq 150$ mm (gebonden fundering)
$C_2 = 0,3778 \cdot (h_2 - 43,2)$	$h_2 \geq 200$ mm (ongebonden fundering)
$C_3 = 0,5654 \cdot \ln(k_0) + 0,4139 \cdot \ln(E_2)$	$h_2 \leq 400$ mm (ongebonden fundering)
$C_4 = -283$	$h_2 \leq 600$ mm (fundering)
$C_5 = 0,5654 \cdot \ln(k_0)$	

Elke hoger gelegen laag heeft een elasticiteitsmodulus die ten minste zo groot is als die van de direct eronder gelegen laag. De waarde  $k_1$  is begrensd door  $E_2$  door middel van:

$$\log k_1 \leq 0,73688 \cdot \log E_2 - 2,82055$$

Voor de bovengrens van het samengestelde beddinggetal geldt een maximum van  $k_1 \leq 0,160 \text{ N/mm}^3$

Op basis van bovenstaande uitgangspunten is een selectie gemaakt van de bestaande dataset. Van de overgebleven combinaties is het samengestelde beddinggetal berekend. Op deze dataset is een regressieanalyse uitgevoerd. De gedetailleerde resultaten van de regressieanalyse zijn opgenomen in bijlage 2.

Tabel 15 bevat een samenvatting van de regressieanalyse voor een model op basis van de het samengestelde beddinggetal. De standaardfout in de schatting van het samengestelde beddinggetal bedraagt 0,0660. De machtsverheffing  $10^{0,0660}$  (de regressie is op log-basis uitgevoerd) levert een waarde van ongeveer 1,16 op. Dit betekent dat de fout in de geschatte samengestelde beddinggetal ongeveer 16% is. Het beddinggetal kan namelijk 1,16 maal kleiner of groter zijn.

**Tabel 15      Regressieresultaten model met laagdikte**

correlatiecoëfficiënt $r^2$	0,8504
standaardafwijking in schatting van logaritme van beddinggetal	0,0660
toetsingsgrootte F	614

De relatie tussen afgeleiden van het deflectieprofiel, de dikte van het asfalt en het samengestelde beddingsgetal luidt:

$$\log(k_1) = 2,5590 - 0,5264 \cdot \log(h_1) + 2,2612 \cdot \log(d_0) - 11,6043 \cdot \log(d_{300}) + 14,4679 \cdot \log(d_{600}) - 8,5418 \cdot \log(d_{900}) + 2,6250 \cdot \log(d_{1800}) + 1,8283 \cdot \log(SCI_{300}) - 3,6626 \cdot \log(SCI_{600}) + 3,8920 \cdot \log(BDI) - 1,7047 \cdot \log(BCI) \quad (11)$$

waarbij $k_1$	=	samengesteld beddingsgetal direct onder de plaat (beddingsconstante) (N/mm <sup>3</sup> )
$h_1$	=	laagdikte asfalt (mm)
$d_i$	=	deflectie onder belasting van 50 kN gemeten op afstand $i$ mm vanaf het lastcentrum ( $\mu\text{m}$ )
$SCI_{300}$	=	Surface Curvature Index $d_0 - d_{300}$ ( $\mu\text{m}$ )
$SCI_{600}$	=	Surface Curvature Index $d_0 - d_{600}$ ( $\mu\text{m}$ )
$BDI$	=	Base Damage Index $d_{300} - d_{600}$ ( $\mu\text{m}$ )
$BCI$	=	Base Curvature Index $d_{600} - d_{900}$ ( $\mu\text{m}$ )

De belasting is uniform verdeeld over een cirkelvormig oppervlak met een diameter van 300 mm.

Tabel 16 bevat een samenvatting van de regressieanalyse voor een model op basis van de het samengestelde beddinggetal, maar zonder de laagdikte van het asfalt als voorspellende variabele.. De standaardfout in de schatting van het samengestelde beddinggetal bedraagt 0,0868. De machtsverheffing  $10^{0,0868}$  (de regressie is op log-basis uitgevoerd) levert een waarde van ongeveer 1,22 op. Dit betekent dat de fout in de geschatte samengestelde beddinggetal ongeveer 22% is. Het beddinggetal kan namelijk 1,22 maal kleiner of groter zijn.

**Tabel 16      Regressieresultaten model zonder laagdikte**

correlatiecoëfficiënt $r^2$	0,8622
standaardafwijking in schatting van logaritme van beddinggetal	0,0865
toetsingsgrootte $F$	345

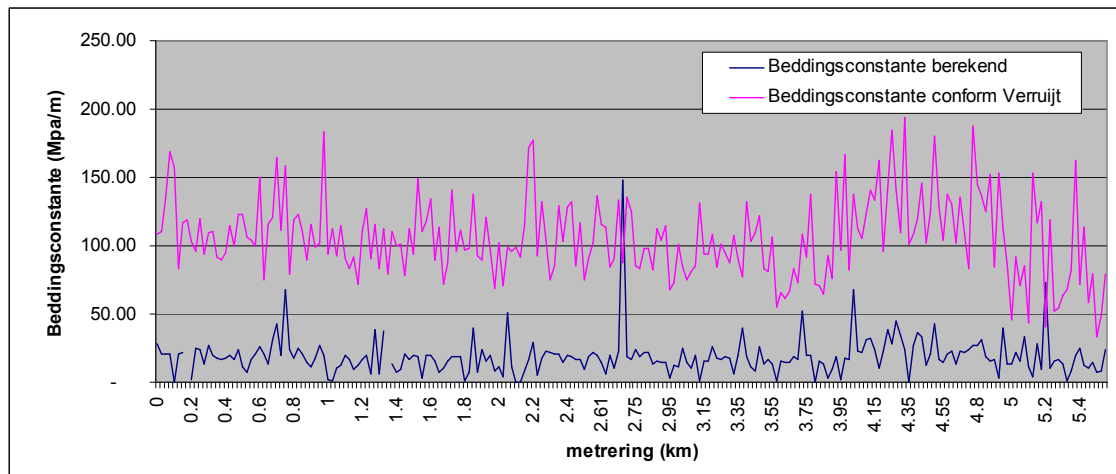
De relatie tussen afgeleiden van het deflectieprofiel, de dikte van het asfalt en het samengestelde beddingsgetal luidt:

$$\log(k_1) = 1,5669 + 2,3063 \cdot \log(d_0) - 11,655 \cdot \log(d_{300}) + 12,6741 \cdot \log(d_{600}) - 5,9900 \cdot \log(d_{900}) + 1,9663 \cdot \log(d_{1800}) + 2,0391 \cdot \log(SCI_{300}) - 5,1064 \cdot \log(SCI_{600}) + 6,5216 \cdot \log(BDI) - 3,1557 \cdot \log(BCI) \quad (12)$$

waarbij $k_1$	=	samengesteld beddingsgetal direct onder de plaat (beddingsconstante) ( $\text{N}/\text{mm}^3$ )
$d_i$	=	deflectie onder belasting van 50 kN gemeten op afstand $i$ mm vanaf het lastcentrum ( $\mu\text{m}$ )
$\text{SCI}_{300}$	=	Surface Curvature Index $d_0 - d_{300}$ ( $\mu\text{m}$ )
$\text{SCI}_{600}$	=	Surface Curvature Index $d_0 - d_{600}$ ( $\mu\text{m}$ )
BDI	=	Base Damage Index $d_{300} - d_{600}$ ( $\mu\text{m}$ )
BCI	=	Base Curvature Index $d_{600} - d_{900}$ ( $\mu\text{m}$ )

De voorspellende kracht van vergelijking (12) is vrijwel gelijk aan die van vergelijking (11). Omdat voor vergelijking (12) minder data hoeven te worden verzameld, heeft deze vergelijking de voorkeur.

Voor de Helderse zeewering is een voorbeeld nader uitgewerkt waarbij de beddingsconstante zoals bepaald met Verruijt en zoals bepaald met de hierboven gegeven relatie met elkaar is vergeleken.



**Figuur 25**      **Vergelijking beddingsconstante met beide berekeningsmethoden**

Het blijkt dat de nieuw opgestelde relatie vrijwel consequent tot lagere beddingsconstanten komt. Vergelijking van globale waarden voor de beddingsconstante van verschillende grondtypen gegeven in [6] en [7] geeft opmerkelijke verschillen voor het grondtype zand. In [6] worden waarden gegeven van 40 - 100 MPa/m en in [7] worden waarden genoemd van 10 - 300 MPa/m.

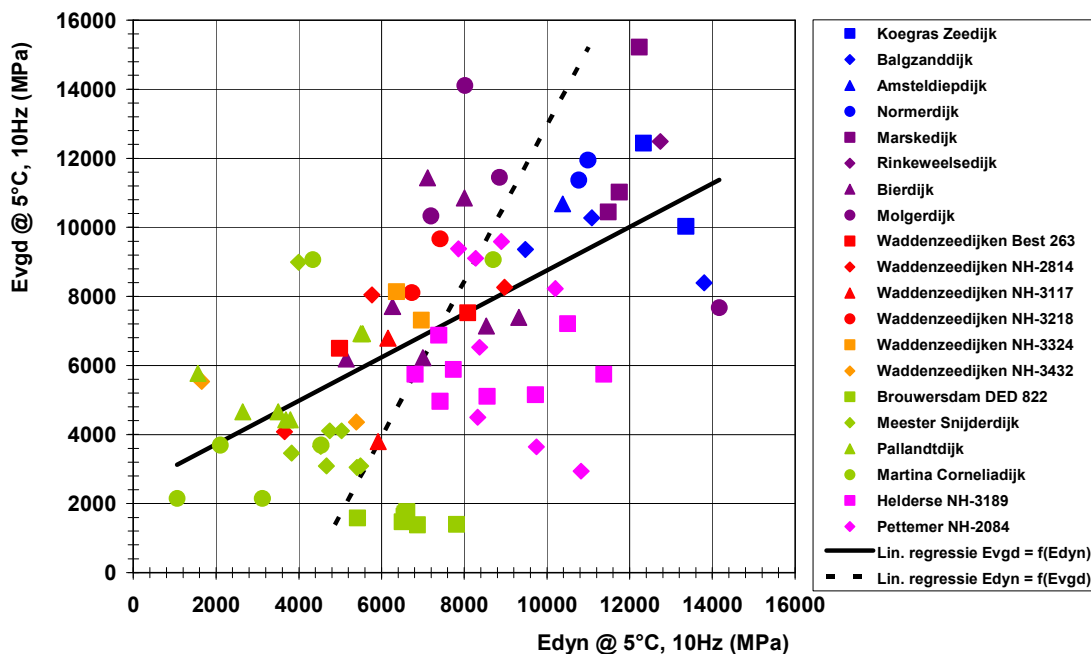
Bij plaatbelastingproeven voor de aanleg van betonnen bedrijfsvloeren op zand worden normaal gesproken maximale waarden gemeten van 60 - 80 MPa/m. De eis voor een goed verdicht zandbed is doorgaans 60 MPa/m.

### Conclusie

Naar aanleiding van de in deze rapportage uitgevoerde analyse wordt geconcludeerd dat de tot nu toe gehanteerde methode met de formule van Verruijt leidt tot te hoge beddingsconstanten en dus een te lage optredende spanning. Geadviseerd wordt daarom de in dit rapport gepresenteerde nieuw ontwikkelde relatie te gebruiken waarbij de beddingsconstante wordt berekend op basis van het deflectieprofiel.

### 3.5 Nadere analyse VGD-stijfheid - $E_{dyn}$ - breuksterkte

Bij de in 2007 uitgevoerde studie werd een goede relatie gevonden tussen de dynamische stijfheid zoals bepaald in het laboratorium en de breuksterkte, maar een slechte relatie tussen de dynamische stijfheid en de stijfheid zoals bepaald met het valgewicht. De basisgegevens van figuur 26 zijn daarvoor nader bestudeerd op onregelmatigheden en verklaringen voor de slechte relatie tussen de  $E_{dyn}$  en  $E_{vgd}$ .



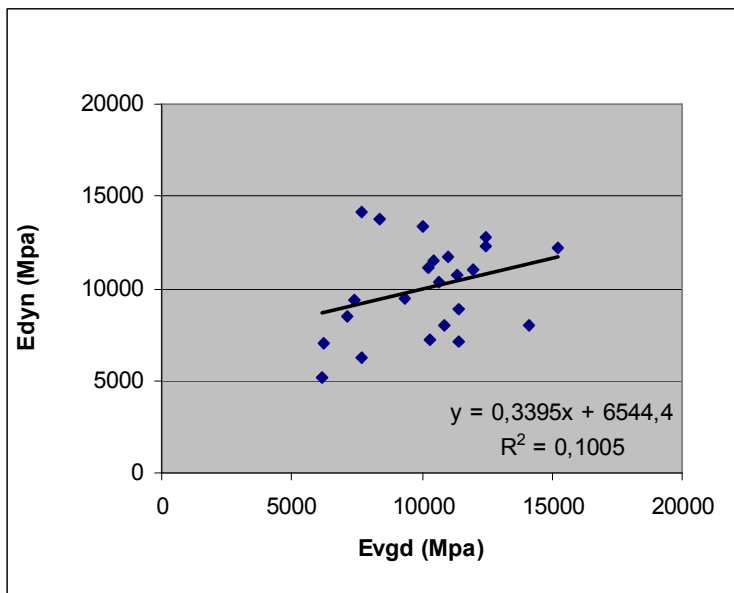
**Figuur 26 Stijfheidsmodulus asfalt laboratorium vs valgewichtdeflectiemeting**

Allereerst zijn de  $E_{vgd}$  gecorrigeerd voor laagdikteverschillen tussen de laagdikte bepaald met de radar en bepaald aan de hand van boorkernen. Dit leidde voor de afzonderlijke dijkvakken en het totale overzicht niet tot verbeteringen.

In het terugrekenen van de asfaltstijfheden zitten veel bronnen van onnauwkeurigheid. Deze onnauwkeurigheden zijn (gedeeltelijk) oorzaak van de slechte relatie  $E_{dyn}$ -  $E_{vgd}$ . De volgende onnauwkeurigheden zijn onder andere te onderscheiden:

- onnauwkeurigheden in plaatsbepaling radarlaagdikte
- gebonden funderingen
- boorkernen niet op meetraai door dikte van bekleding
- $E_{dyn}$  en  $E_{vgd}$  in meeste gevallen bepaald van de zwakke plekken op dijkbekleding en niet aselekt

Hierop is de data van de Waddenzeedijken N-Holland nader bestudeerd en er zijn handmatig enkele punten verwijderd. Dit leidt tot een betere relatie (zie figuur 27, 28 en 29) voor de Waddenzeedijken. De data van de Waddenzeedijken Noord-Holland is aselekt verkregen en vertoont ook een beter verband tussen  $E_{vgd}$  en  $E_{dyn}$ .



**Figuur 27 Relatie  $E_{vgd}$  v.  $E_{dyn}$  Waddenzeedijken N-Holland; alle data**

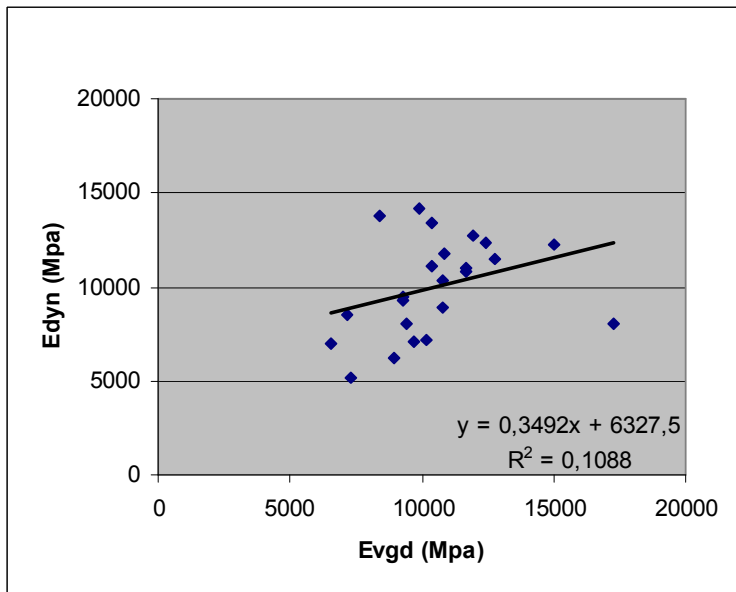
Tussen de radarlaagdikte en de lengte van de boorkernen zit een verschil. Hiervoor is gecorrigeerd met onderstaande formule:

$$E_{vgd1} \cdot h_{radar}^3 = E_{vgd2} \cdot h_{boor}^3$$

$$E_{vgd2} = \frac{E_{vgd1} \cdot h_{radar}^3}{h_{boor}^3} \quad (13)$$

waarbij  $E_{vgd1}$  = teruggerekende stijfheidsmodulus op basis van de radarlaagdikte (MPa)  
 $h_{radar}$  = radarlaagdikte (m)  
 $E_{vgd2}$  = stijfheidsmodulus op basis van de lengte van boorkern (MPa)  
 $h_{boor}$  = lengte van de boorkern (m)

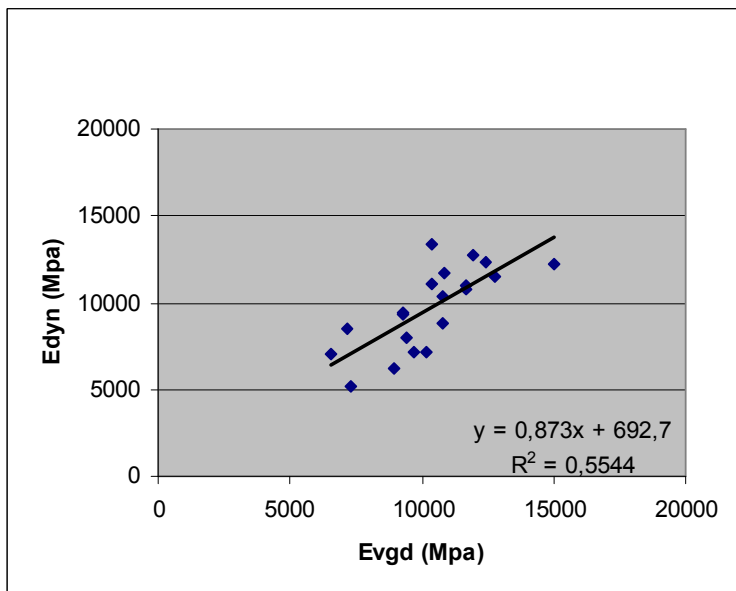
Correctie voor de laagdikte leidt niet tot een betere relatie (zie figuur 24).



**Figuur 28** Relatie  $E_{vgd}$  v.  $E_{dyn}$  Waddenzeedijken N-Holland; correctie laagdikte

Weglating van 6 meetpunten leidt tot een redelijke relatie (zie figuur 29). De volgende punten zijn verwijderd:

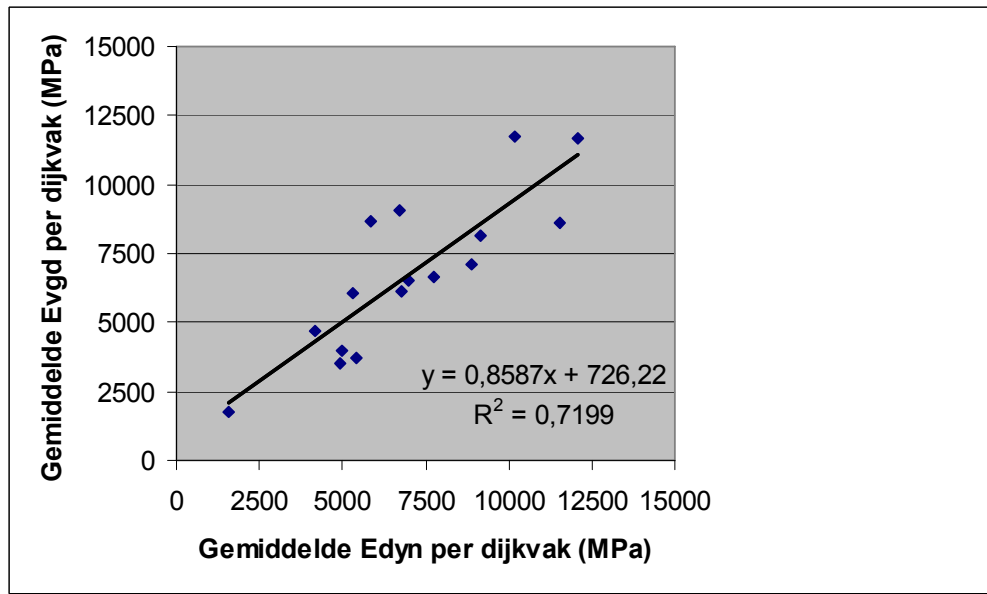
- 1 meetpunt met een onnauwkeurige temperatuurmeting
- 4 meetpunten met een onnauwkeurige laagdiktemeting
- 1 meetpunt met een (niet nader verklaarde) grote afwijking tussen de  $E_{vgd}$  en  $E_{dyn}$



**Figuur 29** Relatie  $E_{vgd}$  v.  $E_{dyn}$  Waddenzeedijken N-Holland; handmatig verwijderen drie punten



Vervolgens zijn de gemiddelden van de afzonderlijke werken in een grafiek uitgezet. Na weglating van twee dijkvakken (Waddenzeedijken Texel - Bestek NH1630 en Hellegatsdam) met een niet nader verklaard groot verschil tussen de gemiddelde  $E_{vgd}$  en  $E_{dyn}$  wordt een goede relatie gevonden.



**Figuur 30** Relatie gemiddelde  $E_{vgd}$  v.  $E_{dyn}$

Deze figuur is gebaseerd op de gegevens zoals opgenomen in tabel 17.

### Conclusie

Bij de in 2007 uitgevoerde studie werd een slechte relatie tussen de dynamische stijfheid en de stijfheid zoals bepaald met het valgewicht gevonden. Een mogelijke oorzaak voor de grote verschillen tussen de  $E_{vgd}$  en de  $E_{dyn}$  is, dat de verkregen data meestal afkomstig van de zwakke plekken in de dijkbekleding. Hierdoor is de spreiding in zowel  $E_{vgd}$  als  $E_{dyn}$  beperkt en wordt de dataset een geconcentreerde puntenwolk. Bij de Waddenzeedijken Texel en Noord-Holland, waar de  $E_{vgd}$  en de  $E_{dyn}$  aselekt zijn bepaald, wordt een redelijke relatie gevonden.

Er wordt een goede relatie gevonden indien de gemiddelde  $E_{dyn}$  en  $E_{vgd}$  tegen elkaar worden uitgezet.

**Tabel 15 Gemiddelde en standaarddeviatie afzonderlijke dijkvakken**

	<b>Leeftijd Bekleding (jaar)</b>	<b>Aantal Datapunten (stuks)</b>	<b>Gemiddelde E<sub>vgd</sub> (MPa)</b>	<b>Standaarddeviatie E<sub>vgd</sub> (MPa)</b>	<b>Gemiddelde E<sub>dyn</sub> (MPa)</b>	<b>Standaarddeviatie E<sub>dyn</sub> (MPa)</b>
Waddenzeedijken N-Holland - groep 1	20 / 21	11	9134	2488	8148	2218
Waddenzeedijken N-Holland - groep 2	14 / 16	6	12081	1546	11661	679
Waddenzeedijken N-Holland - groep 3	11	6	10196	1242	11739	1561
Waddenzeedijken Texel						
Bestek - Best 263		2	7008	513	6539	1549
Bestek - NH 2814	22	3	6793	1923	6133	2187
Bestek - NH 3117	21	2	5294	1496	6037	119
Bestek - NH 3218	20	2	8883	777	7077	341
Bestek - NH 3324	19	2	7727	413	6666	302
Bestek - NH 3432	18	2	4948	589	3524	1400
Bestek - NH 1630*	31	4		1145		1759
Brouwersdam	34	7	1561	139	1735	649
Meester Snijderdijk		8	4191	1857	4713	561
Pallandtdijk	50	7	5397	1052	3748	1328
Martina Corneliadijk		6	4968	2966	3979	2432
Helderse	25	8	5833	772	8687	1554
Pettemer	34	8	6736	2548	9062	998
Hondsbosche	34	8	11546	2118	8605	1950
Hellegatsdam*		8		715		2376

\* Dijkvakken buiten beschouwing gelaten figuur 30.

### **3.6 Bepalen correlatie asfaltstijfheid en ondergrondstijfheid**

Bij het terugrekenen van stijfheidsmoduli uit valgewichtdeflectiemetingen 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. 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.

In het uitgevoerde onderzoek in 2007 is voor 15 gevallen de correlatie bepaald tussen de ondergrondstijfheid en de asfaltstijfheid. Uit de resultaten bleek 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.

Voor zes nieuwe gevallen is wederom de correlatie bepaald. Tabel 18 bevat de correlaties tussen de teruggerekende waarden van de asfaltstijfheid en de stijfheid van de onderliggende laag van de oude en nieuwe gevallen.

#### Conclusie

Uit de analyse van de data blijkt dat in ongeveer 77 % van de gevallen een negatieve correlatiecoëfficiënt wordt gevonden. Met dit resultaat alleen kan geen oordeel over de juistheid van de teruggerekende stijfheidsmoduli worden geveld. Hiervoor is tevens een analyse van de verwachting van de stijfheidsmoduli nodig. Als de teruggerekende ondergrondstijfheid voor een dijkvak naar verhouding van het lokale materiaal hoog is, kan de conclusie worden getrokken dat de teruggerekende asfaltstijfheid te laag is. Andersom geldt ook dat bij een te lage ondergrondstijfheid de bijbehorende asfaltstijfheid wordt overschat.

**Tabel 18 Correlatie tussen asfaltstijfheid en stijfheid van onderliggende laag (VGD)**

Project-nummer	Naam dijkvak	Subvak	Correlatie
	Veerse Dam 'Plaats van Onrust'		+0,709
	Veerse Dam 'Sluitgat'		+0,755
	Waddenzeedijken Noord-Holland	4,75 - 7,20 (b)	-0,053
		4,75 - 7,20 (o)	-0,088
		7,25 - 12,50 (b)	-0,021
		7,30 - 12,50 (o)	-0,434
		12,55 - 14,70 (b)	-0,149
		12,55 - 14,70 (o)	-0,425
		15,70 - 17,40 (b)	-0,081
		15,70 - 17,40 (o)	-0,511
		17,45 - 20,10 (b)	-0,307
		17,45 - 20,10 (o)	-0,247
		20,15 - 21,50 (b)	-0,673
		20,15 - 21,50 (o)	-0,552
		22,45 - 23,10 (b)	-0,108
		22,45 - 23,10 (o)	-0,407
		24,20 - 25,40 (b)	-0,538
		24,20 - 25,40 (o)	-0,207
		4,75 - 25,40 (b)	+0,112
	4,75 - 25,40 (o)	-0,188	
	Eemshaven 2A	37,05 - 41,90 (L)	+0,137
		37,05 - 41,90 (R)	+0,164
	Eemshaven 2C	0,0 - 1,40 (L)	-0,144
		0,0 - 1,40 (R)	-0,220
	Lauwersmeerdijk 2I	82,10 - 89,90 (L)	-0,284
		82,10 - 89,90 (R)	-0,121
0700462	Hellegatsdam	0,000 - 0,925	+0,376
		1,125 - 5,300	+0,380
048163	Houtribdijk*	50,65 - 53,45	-0,276
		53,50 - 55,95	-0,297
		56,00 - 60,75	-0,579
		60,75 - 68,35	-0,136
		68,40 - 73,35	-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

### **3.7 Invloed van verplaatsingsnelheid op de breuksterkte**

Voor het vaststellen van de invloed van stripping op de sterkte van de asfaltdijkbekledingen wordt de breuksterkte beproefd. Proefstukken afkomstig uit boorkernen worden beproefd in de SCB-opstelling of de driepunts-buigopstelling bij een temperatuur van 5 °C. De belastingssnelheid in de SCB-opstelling is 0,085 mm/s en de verplaatsingssnelheid in de driepunts-buigopstelling bedraagt 0,35 mm/s. De reksnelheid van 0,1350 %/s is in beide gevallen nagenoeg gelijk aan elkaar volgens [3] en komt globaal overeen met de reksnelheid in een vermoeiingsproef van 1Hz.

Vanwege het viscoelastische materiaalgedrag van asfalt heeft de reksnelheid invloed op de breuksterkte. Bij een hogere reksnelheid zal het proefstuk zich elastischer gedragen en zal een hogere breuksterkte worden gevonden. Aan het verhogen van de breuksterkte door verhoging van de reksnelheid zit echter een limiet. Door middel van een literatuurstudie is onderzocht in hoeverre verhoging van de toegepaste reksnelheden bij de SCB-opstelling en driepunts-buigopstelling nog leidt tot een hogere breuksterkte.

In het proefschrift van Erkens [4] is een realistisch materiaalmodel voor asfalt ontwikkeld. Voor het verkrijgen van de modelparameters zijn laboratoriumproeven uitgevoerd, waaronder de uniaxiale trekproef. Van het onderzochte asfaltmengsel, een verschaalde DAB 0/5 met een hoog bitumenpercentage van 9,4%, is een grafiek opgesteld waarin de reksnelheid is uitgezet tegen de breuksterkte (zie figuur 26).

De reksnelheid van de SCB-opstelling en de driepuntsbuigopstelling bedraagt ca. 0,135 %/s. Deze reksnelheid is in figuur 26 met een rode stippellijn uitgezet als referentie. Vanuit de proefresultaten kan geconcludeerd worden, dat de reksnelheid invloed heeft op de breuksterkte bij 15 °C en 30 °C. Bij een temperatuur van 0 °C heeft de reksnelheid nauwelijks invloed op de breuksterkte.

De SCB-proef en de driepuntsbuigproef op asfalt uit dijkbekledingen vinden plaats bij 5 °C. De breuksterkte bepaald onder deze proefcondities zal hoogstwaarschijnlijk min of meer dezelfde trend vertonen als resultaten bij 0 °C. Dit wordt ook bevestigd door het eindrapport van het Europese consortium SpecifiQ [5]. In de rapportage van dit consortium zijn resultaten opgenomen van onderzoek naar de invloed van de verplaatsingsnelheid op de breuksterkte [5]. In dit onderzoek is geconcludeerd, dat bij temperaturen lager dan 10 °C de breuksterkte zeer weinig varieert bij verschillende verplaatsingsnelheden.

#### Conclusie

Op basis van bovenstaande onderzoeken kan worden geconcludeerd, dat de invloed van de reksnelheid op de breuksterkte bij 5 °C gering zal zijn. Voor kwantificering van de verschillen zal onderzoek moeten plaatsvinden bij verschillende reksnelheden en een vaste temperatuur van 5 °C.

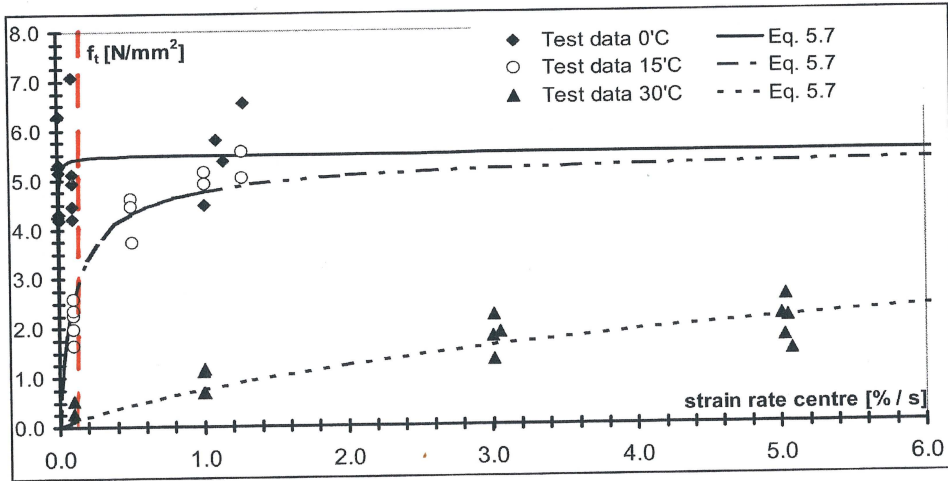
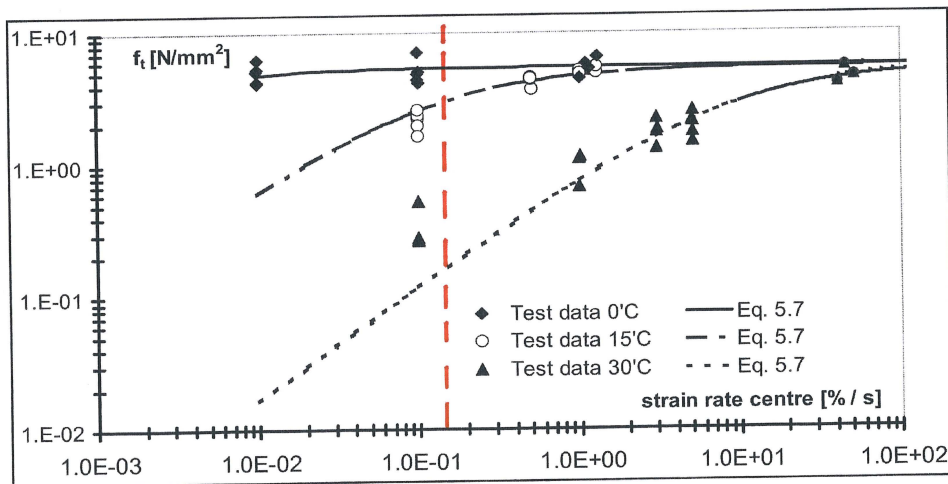


Figure 5.27: Tension test results (markers) and Equation 5.7



Figuur 27 Relatie reknelheid en breuksterkte voor ACRE-mengsel

## 4 Conclusies en aanbevelingen

### 4.1 Conclusies

#### Literatuurstudie

Met betrekking tot het uitvoeren van valgewichtdeflectiemetingen kunnen op basis van het literatuuronderzoek de volgende conclusies worden getrokken:

- de ongecorrigeerde SCI 600 is niet geschikt voor selectie van zwakke plekken, aangezien deze grootte wordt beïnvloed door laagdikte en temperatuur;
- VGD-metingen zijn niet geschikt voor bekledingen met een helling steiler dan 1:3;
- steenslagsplit gebruikt voor het afstrooien van de asfaltbekleding heeft nauwelijks effect op de nauwkeurigheid van VGD-meetresultaten
- de methode BELLS is geschikt voor het berekenen van de asfalttemperatuur. Ter controle wordt ook de temperatuur in boorgaten gemeten en wordt een correctie op de BELLS-temperatuur uitgevoerd bij te grote afwijkingen.

Met betrekking tot het uitvoeren van laagdikteradarmetingen kunnen op basis van het literatuuronderzoek de volgende conclusies worden getrokken:

- Laagdikteradarmetingen zijn geschikt om discontinuïteiten zoals verdikte lassen in kaart te brengen
- Met laagdikteradarmetingen kan een gemiddelde nauwkeurigheid worden bereikt van minimaal 20 mm (5-10 %) bij gebruik van kalibratiekernen
- Meetresultaten moeten altijd gekalibreerd worden met asfaltboringen
- De reproduceerbaarheid van laagdikteradarmetingen laat nog te wensen over

Met betrekking tot de relatie van VGD-metingen met de laboratoriumeigenschappen van asfalt kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Er bestaat een zwakke relatie tussen  $E_{vgd}$  en  $E_{dyn}$  en er wordt pas na selectie van datapunten een redelijke relatie gevonden ( $r^2 = 0,54$  en  $0,59$ ). De  $E_{dyn}$  is representatief voor de stijfheid van een enkele boorkern en de  $E_{vgd}$  is representatief voor de stijfheid van een zone. Dit kan een mogelijk oorzaak zijn voor de gevonden zwakke relatie tussen deze twee grootheden.
- De gevonden relatie tussen de vermoeiingslevensduur en de  $E_{dyn}$  en de  $E_{vgd}$  is slecht.

#### Ontwikkeling voorspellend rekmodel

In deze studie is een relatie opgesteld om direct uit met het valgewicht gemeten parameters of daarvan afgeleide gegevens de maatgevende rek per meetpunt te bepalen. De maatgevende rek kan redelijk nauwkeurig worden geschat zonder dat er informatie over de laagdikte voorhanden is. Daarnaast zullen zowel een lagere stijfheid als een geringere laagdikte leiden tot een hogere maatgevende rek. Het wordt dan ook aanbevolen om een overzicht van zwakke plekken op stellen op basis van de maatgevende rek in plaats van op basis van de stijfheid.

### Ontwikkeling model beddingsconstante

Naar aanleiding van de in deze rapportage uitgevoerde analyse wordt geconcludeerd dat de tot nu toe gehanteerde methode met de formule van Verruijt leidt tot te hoge beddingsconstanten en dus een te lage optredende spanning. Geadviseerd wordt daarom de in dit rapport gepresenteerde nieuw ontwikkelde relatie te gebruiken waarbij de beddingsconstante wordt berekend op basis van het deflectieprofiel.

### Nader analyse VGD-stijfheid - $E_{dyn}$ - breuksterkte

Bij de in 2007 uitgevoerde studie werd een slechte relatie tussen de dynamische stijfheid en de stijfheid zoals bepaald met het valgewicht gevonden. Een mogelijke oorzaak voor de grote verschillen tussen de  $E_{vgd}$  en de  $E_{dyn}$  is, dat de verkregen data meestal afkomstig van de zwakke plekken in de dijkbekleding. Hierdoor is de spreiding in zowel  $E_{vgd}$  als  $E_{dyn}$  beperkt en wordt de dataset een geconcentreerde puntenwolk. Bij de Waddenzeedijken Texel en Noord-Holland, waar de  $E_{vgd}$  en de  $E_{dyn}$  aselekt zijn bepaald, wordt een redelijke relatie gevonden.

Er wordt een goede relatie gevonden indien de gemiddelde  $E_{dyn}$  en  $E_{vgd}$  tegen elkaar worden uitgezet.

## **4.2 Aanbevelingen**

### *4.2.1 Voorstel wijzigingen in procedure gedetailleerde beoordeling op golfklappen*

#### Bepalen overzicht zwakke plekken in de bekleding

Het huidige overzicht van zwakke plekken in een asfaltbekleding is gebaseerd op verschillen in stijfheid. Hierbij wordt verondersteld dat de stijfheid een maat is voor de sterkte van de bekleding. Op basis van valgewichtdeflectiemetingen en radarmetingen wordt de stijfheid per meetpunt teruggerekend. Deze methodiek heeft enkele nadelen:

- Voor het terugrekenen van de stijfheid uit valgewichtdeflectiemetingen is de laagdikte benodigd. Deze wordt bepaald met grondradar. Onnauwkeurigheden in de laagdiktebepaling leiden tot een afwijking in de teruggerekende stijfheid
- De zwakte van een bepaalde locatie wordt niet alleen bepaald door de sterkte van het materiaal, ook de laagdikte speelt hierbij een rol.
- De huidige procedure is tijdrovend. Na uitvoeren van valgewichtdeflectie- en grondradarmetingen worden eerst enkele kalibratiekernen geboord. Op basis hiervan wordt eerst de laagdikte uit het radarsignaal bepaald. Met de laagdikte wordt per meetpunt de stijfheid teruggerekend. Als deze informatie beschikbaar is kan een overzicht van zwakke plekken worden opgesteld. Dit hele proces neemt enkele weken in beslag.



In deze studie is een relatie opgesteld om direct uit met het valgewicht gemeten parameters of daarvan afgeleide gegevens de maatgevende rek per meetpunt te bepalen. Het voordeel is dat voor deze methode de bovenstaande nadelen niet gelden. De maatgevende rek kan redelijk nauwkeurig worden geschat zonder dat er informatie over de laagdikte voorhanden is. Daarnaast zullen zowel een lagere stijfheid als een geringere laagdikte leiden tot een hogere maatgevende rek. Tenslotte kan de maatgevende rek direct worden bepaald uit de resultaten van de valgewichtdeflectiemetingen waardoor de hele procedure aanzienlijk wordt versneld. Het wordt dan ook aanbevolen om een overzicht van zwakke plekken op stellen op basis van de maatgevende rek in plaats van op basis van de stijfheid.

#### Bepalen van de boorlocaties voor het vermoeiingsonderzoek

Tot nu toe worden kernen voor proefstukken waarvan de vermoeiingseigenschappen worden bepaald geboord op de zogenaamde zwakste plek in de bekleding. Dit is een raster van 8 VGD-meetpunten met gemiddeld de laagste stijfheid. De redenering hierachter is dat de sterkte van de gehele bekleding voldoet als de sterkte op de zwakste plek voldoende is. Op basis van de volgende overwegingen wordt voorgesteld om de keuze van de boorlocaties te wijzigen:

- Het boren van kernen op zowel sterke als zwakke locaties leidt tot een grotere spreiding in de opgelegde krachtniveaus bij de vermoeiingsproeven. Hierdoor zal de vermoeiingslijn beter vast te stellen zijn omdat de meetwaarden meer over de x-as worden gespreid en dus minder een geconcentreerde puntenwolk zullen worden.
- Uit een vergelijking van de vermoeiingsproeven op proefstukken uit de Hellegatsdam die in 2001 en 2007 zijn uitgevoerd, blijkt dat de resultaten niet wezenlijk anders zijn hoewel de selectieprocedure voor de boorlocaties en het aantal proeven wel verschilden. In 2001 zijn aselekt en representatief 21 kernen geboord en beproefd, in 2007 zijn select (op de zwakste plek) 8 kernen geboord en beproefd. Hoewel er niet meer vergelijkingsmateriaal voor handen is bestaat het vermoeden dat de invloed van de selectieprocedure op de gemiddelde en karakteristieke vermoeiingslijn gering is.
- Inmiddels is ook het Voorschrift Toetsen op Veiligheid gewijzigd. Na uitvoeren van de visuele inspectie wordt expliciet nagegaan of de conditie van het asfalt aanleiding geeft tot nader onderzoek. Dit betekent dat de gedetailleerde beoordeling op golfklappen geen uitspraak hoeft te doen over de conditie van eventueel lokaal aanwezige slechte plekken.

Op grond van bovenstaande overwegingen wordt voorgesteld op kernen te boren op verschillende percentielpunten van de maatgevende rek te weten:

- 2 kernen op 5% percentielpunten
- 2 kernen op 35% percentielpunten
- 2 kernen op 65% percentielpunten
- 2 kernen op 95% percentielpunten

#### Minimaal aantal uit te voeren valgewichtdeflectiemetingen

Uit in het verleden uitgevoerde statische analyses op de resultaten van valgewichtdeflectiemetingen op Texel is gebleken dat de wens om de gemiddelde (IDK)-waarde met een nauwkeurigheid van  $\pm 5\%$  en met een betrouwbaarheid van 95% te schatten leidt tot een groot aantal metingen dat per vak moet worden uitgevoerd, zeker als de spreiding in eigenschappen in het betreffende vak groot is. Dit beeld wordt bevestigd door vergelijkbare analyses die in het verleden in de wegebouw zijn uitgevoerd.

In de huidige werkbeschrijving is vastgelegd dat per dijkvak minimaal 20 punten met het valgewicht worden gemeten. Voorgesteld wordt om dit aantal te handhaven. Dit kan betekenen dat de betrouwbaarheid en nauwkeurigheid lager zijn dan gewenst. Ter vergelijking; in de wegebouw wordt een minimum aantal van 12 meetpunten per homogeen vak gehanteerd bij toetsing van wegvakken in beheer bij Rijkswaterstaat die conform de innovatieve contracten zijn aangelegd.

#### Bepaling van de beddingsconstante

Op dit moment wordt de beddingsconstante van de ondergrond, benodigd voor het uitvoeren van berekeningen met het computermodel GOLFKLAP, bepaald met een formule zoals opgenomen in Grondmechanica van Verruijt. Deze formule beschrijft een relatie tussen de beddingsconstante en de elasticiteitsmodulus. Een alternatieve methode is gewenst omdat de invloed van de asfaltbekleding niet goed met deze formule kan worden verdisconteerd. In dit rapport is een relatie beschreven die is ontwikkeld op basis van een groot aantal berekeningen met een lineair elastisch meerlagenprogramma. Hiermee kan de beddingsconstante direct worden bepaald uit de gemeten deflecties of direct daarvan afgeleide parameters. Voorgesteld wordt om deze formule te gebruiken voor het bepalen van de beddingsconstante.

### **4.3 Voorstel opzet monitoringsprogramma asfalt dijkbekledingen**

Op basis van de in de afgelopen jaren uitgevoerde studies en recent overleg met onder meer Deltares en TNO is een monitoringsprogramma opgesteld voor asfalt dijkbekledingen. Het doel van dit programma is om de teruggang van de sterkte van een asfaltbekleding te monitoren nadat eenmaal een gedetailleerde beoordeling op golfklappen is uitgevoerd. Met dit monitoringsprogramma wordt op basis van niet-destructieve technieken aan de bekleding gemeten. Op basis van enkele relaties en een regressiemodel worden vervolgens parameters bepaald voor het uitvoeren van een berekening met Golfklap. Op deze wijze wordt bepaald of de bekleding zonder meer kan worden goedgekeurd of dat er aanleiding is tot nader onderzoek waarbij opnieuw de sterkteparameters van de asfaltbekleding moeten worden bepaald. Hieronder is het voorgestelde monitoringsprogramma nader uitgewerkt.

#### Stap 1: Uitvoeren van valgewichtdeflectiemetingen en radarmetingen

- Uitvoeren van valgewichtdeflectiemetingen over 1 meetraai met een hart op hart afstand van 50 m. Per dijkvak dienen minimaal 12 m punten te worden gemeten.
- Uitvoeren van grondradarmetingen over dezelfde meetraai.
- Boren van enkele referentiekernen om het radarsignaal te kalibreren

### Stap 2: Bepalen stijfheid per dijkvak

- Bepalen van de laagdikte op basis van het gemeten radarsignaal en de referentiekernen
- Terugrekenen van de stijfheid per meetpunt op basis van het deflectieprofiel en de radarlaagdikte
- Normeren van de stijfheid naar 1 temperatuur en frequentie met 5 jaar geleden gehanteerde mastercurve.

### Stap 3: Bepalen vermoeiingseigenschappen met voorspellend regressiemodel

Uitgangspunt bij deze stap is dat het mogelijk is om een regressiemodel te ontwikkelen dat de teruggang van de vermoeiingseigenschappen in de tijd voorspelt. Dit model moet op dit moment nog door TNO worden ontwikkeld. De volgende parameters dienen als input voor het regressiemodel

- Elasticiteitsmodulus uit de valgewichtdeflectiemetingen of de breuksterkte uit de in 2007 gevonden relatie tussen de elasticiteitsmodulus en de breuksterkte (het te hanteren percentiepunt moet nog in overleg met TNO worden vastgesteld)
- Vermoeiingseigenschappen  $\log(k)$  en  $a$  uit eerder uitgevoerd laboratoriumonderzoek
- Leeftijd van de bekleding
- Holle ruimte

Het model heeft als output de parameters  $\alpha$  en  $\beta$  uit de volgende relatie.

$$\log(N) = \beta(\log(\sigma_b) - \log(\sigma_o))^\alpha \quad (13)$$

Hierin is:

- N = Aantal lastherhalingen tot bezwijken (-)
- $\alpha, \beta$  = materiaalparameters
- $\sigma_b$  = breuksterkte asfalt (MPa)
- $\sigma_o$  = opgelegde spanning bij vermoeiingsproef (MPa)

De breuksterkte wordt per dijkvak bepaald uit de met de valgewichtdeflectiemetingen bepaalde elasticiteitsmodulus met de volgende relatie [1]:

$$\log(\sigma_{br}) = -4,47963 + 1,33855 \cdot \log(E_{dyn}) \quad (14)$$

waarbij

- $E_{dyn}$  = laboratoriumstijfheidsmodulus asfalt bij 5 °C en 10 Hz (MPa)
- $\sigma_{br}$  = breuksterkte asfalt bij 5 °C (MPa)

#### Stap 4: Uitvoeren berekeningen met GOLFKLAP:

- Uit de resultaten van de uitgevoerde valgewichtdeflectiemetingen en grondradarmetingen worden per dijkvak karakteristieke waarden voor de volgende parameters bepaald:
  - Laagdikte
  - Elasticiteitsmodulus
  - beddingsconstante
- Daarnaast zijn per dijkvak met het voorspellend regressiemodel de parameters  $\alpha$  en  $\beta$  van de vermoeiingsrelatie bepaald. De parameters van het vermoeiingsmodel kunnen per dijkvak verschillen omdat per dijkvak de breuksterkte wordt geschat op basis van de elasticiteitsmodulus
- De overige constructieparameters zijn bekend uit de eerder uitgevoerde beoordeling. De hydraulische randvoorwaarden zijn afkomstig uit het randvoorwaardenboek. Met deze gegevens wordt per dijkvak een berekening met Golfklap uitgevoerd.
- De met Golfklap gevonden minersom wordt getoetst aan een veilige ondergrens. Ervan uitgaande dat het niveau van de minersom op hetzelfde niveau ligt wanneer gebruikt wordt van de nieuwe vermoeiingsrelatie wordt voorgesteld om vooralsnog als grens voor goedkeuren te hanteren: minersom < 0,75. Als de minersom deze waarde overschrijdt moet nader onderzoek worden uitgevoerd waarbij de vermoeiingseigenschappen van de bekleding opnieuw moeten worden bepaald.

#### Mogelijke aanvullingen en alternatieven

Elke kilometer wordt een referentiekern geboord. Van een proefstuk uit deze kern kan met een SCB-proef de breuksterkte worden bepaald ter verificatie.

De hierboven beschreven methode heeft als uitgangspunt dat er een voorspellend regressiemodel beschikbaar komt waarmee de teruggang van de vermoeiingseigenschappen in de tijd kan worden voorspeld. Als dit niet haalbaar blijkt moet een alternatief monitoringsprogramma worden ontwikkeld. Een mogelijkheid hiervoor kan de volgende opzet hebben:

- Uitvoeren van valgewichtdeflectiemetingen zoals hierboven beschreven.
- Bepalen van de maatgevende rek per meetpunt op basis van de resultaten van de valgewichtdeflectiemetingen.
- Normeren van de maatgevende rek naar 1 temperatuur met de in dit rapport genoemde methode.
- Bepalen van de gemiddelde waarde en de standaardafwijking van de maatgevende rek per dijkvak.
- Stellen van een grens voor de maximaal toelaatbare afname van de maatgevende rek. De maximaal toelaatbare afname kan afhankelijk worden gesteld van de bij de 5 jaar eerder uitgevoerde gedetailleerde beoordeling op golfklappen berekende minersom.

Voordeel van deze methode is dat de kosten lager zullen zijn. Nadeel is dat er geen goede inschatting kan worden gemaakt van de te hanteren goedkeurgrens. Dit betekent dat een veiliger grens moet worden gehanteerd die zal leiden tot het eerder uitvoeren van nader onderzoek.

## 5 Referenties

1. Van Gorp, C.A.P.M., Westera, G.E., De Loeff, A.K., Relatie tussen sterkte en stijfheid in de context van de inspectiemethode meerjarig onderzoek asfaltdijkbekledingen. Rapport e0700170-2. KOAC·NPC, Utrecht, februari 2008.
2. Van Gorp, C.A.P.M, Characterization of seasonal influences on asphalt pavements with the use of falling weight deflectometers. TU Delft, Delft, 1995.
3. Tolman, F, De driepuntsbuigproef ter bepaling van de stijfheid en de vermoeiingslevensduur van waterbouwasfalt. Rapport e028126-2. KOAC-NPC, Utrecht, december 2005.
4. Erkens, S.M.J.G., Asphalt concrete response (ACRe) - determination, modelling and prediction. TU Delft, Delft, juni 2002.
5. Eindrapport Project SpecifiQ. Rapport SMT4-CT98-5518, maart 2001.
6. Stet, M.J.A., Betonverhardingen. Reed Business Information bv, Doetinchem, editie 2003.
7. Leidraad voor de toepassing van asfalt in de waterbouw, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Staatsuitgeverij, Den Haag, 1984.
8. Nader in te vullen

Bijlage 1

Gedetailleerde resultaten regressieanalyse model asfaltrek

(1 pagina, exclusief voorblad)

SAMENVATTING UITVOER									
Gegevens voor de regressie									
Meervoudige correlatiecoëfficiënt R	0,975005775								
R-kwadraat	0,950636262								
Aangepaste kleinste kwadraat	0,950488719								
Standaardfout	0,094207794								
Waarneemingen	2350								
Variantie-analyse									
	Vrijheidsgraden	Kwadratensom	Gemiddelde kwadraten	F	Significante F				
Regressie	7	400,282771	57,183253	6443,104727	0				
Storing	2342	20,78550391	0,008875108						
Totaal	2349	421,0682749							
	Coëfficiënten	Standaardfout	T- statistische gegevens	P-waarde	Laagste 95%	Hoogste 95%	Laagste 95,0%	Hoogste 95,0%	Hoogste 95,0%
Snijpunt	2,26326993	0,069329888	32,64493834	5,5502E-193	2,127315588	2,399224272	2,127315588	2,399224272	
Variabele X 1 (log UZ00)	2,098032114	0,095655472	21,93321587	3,91192E-97	1,910453898	2,28561033	1,910453898	2,28561033	
Variabele X 2 (log UZ300)	-1,41509536	0,2025885637	-6,985171211	3,69311E-12	-1,81236121	-1,017829509	-1,81236121	-1,017829509	
Variabele X 3 (log UZ 600)	-0,429888967	0,136355201	-3,152714128	0,001638074	-0,69727843	-0,162499504	-0,69727843	-0,162499504	
Variabele X 4 (log IDK300)	4,324805221	0,122819374	35,21272817	2,298E-218	4,083959208	4,565651234	4,083959208	4,565651234	
Variabele X 5 (log IDK600)	-7,60848215	0,2306452	-32,9878192	2,476E-196	-8,060772168	-7,156192132	-8,060772168	-7,156192132	
Variabele X 6 (log BDJ)	3,567362061	0,153467856	23,24501136	1,0142E-107	3,266415068	3,868309055	3,266415068	3,868309055	
Variabele X 7 (log BC)	0,395671221	0,076292486	5,053757272	4,66695E-07	0,242141427	0,549201014	0,242141427	0,549201014	

## Bijlage 2

Gedetailleerde resultaten regressieanalyse model beddingsgetal

(1 pagina, exclusief voorblad)



SAMENVATTING UITVOER									
Gegevens voor de regressie									
Meervoudige correlatiecoëfficiënt F	0,862196168								
R-kwadraat	0,743382231								
Aangepaste kleinste kwadraat	0,741225779								
Standaardfout	0,086805894								
Waarnemingen	1081								
Variantie-analyse									
	Vrijheidsgraden	Kwadraten	Gemiddelde kwadraten	F	Significante F				
Regressie	9	23,37832298	2,597591442	344,7247085	0				
Storing	1071	8,070266988	0,007535263						
Totaal	1080	31,44858987							
	Coëfficiënten	Standaardfout	T-statistische gegevens	P-waarde	Laagste 95%	Hoogste 95%	Laagste 95,0%	Hoogste 95,0%	Hoogste 95,0%
Snijpunt	1,566864754	0,164961549	9,498363479	1,34225E-20	1,24318027	1,890549239	1,24318027	1,890549239	
Variabele X 1 (log UZ0)	2,306281183	0,18554659	12,42966083	3,1263E-33	1,942205114	2,670357253	1,942205114	2,670357253	
Variabele X 2 (log UZ300)	-11,65484307	0,694585408	-16,77956797	2,78739E-56	-13,01774565	-10,2919405	-13,01774565	-10,2919405	
Variabele X 3 (log UZ600)	12,8741709	1,127276101	11,24318247	8,41735E-28	10,46225069	14,8860911	10,46225069	14,8860911	
Variabele X 4 (log UZ900)	-5,989938797	0,870905302	-6,87763021	1,03129E-11	-7,698812989	-4,28106461	-7,698812989	-4,28106461	
Variabele X 5 (log UZ1800)	1,966290101	0,306376057	6,417897414	2,07122E-10	1,365124699	2,567455503	1,365124699	2,567455503	
Variabele X 6 (log DK300)	2,039087424	0,182247654	11,1885239	1,46274E-27	1,681484466	2,396690382	1,681484466	2,396690382	
Variabele X 7 (log DK600)	-5,106424238	0,360778009	-14,15392321	8,07897E-42	-5,81433614	-4,39851234	-5,81433614	-4,39851234	
Variabele X 8 (log BDI)	6,521637687	0,300790188	21,68168363	1,03133E-86	5,931432773	7,1118426	5,931432773	7,1118426	
Variabele X 9 (log BCI)	-3,155719206	0,192349463	-16,40617633	3,92048E-54	-3,533143746	-2,77829467	-3,533143746	-2,778294666	