

Verklarende parameters levensduur WAB op componentniveau

Benutten van onderzoek bitumenkwaliteit voor vier referentie-dijkvakken



Verklarende parameters levensduur WAB op componentniveau
Benutten van onderzoek bitumenkwaliteit voor vier referentie-dijkvakken

Auteur(s)

mevrouw dr. B.G.H.M. Wichman

mevr. ir. M. Slokker (Infram Hydren)

Dhr. ing. A.K. de Looff (Infram Hydren)

Verklarende parameters levensduur WAB op componentniveau

Benutten van onderzoek bitumenkwaliteit voor vier referentie-dijkvakken

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Myron van Damme
Referenties	
Trefwoorden	Waterbouwasfaltbeton, veroudering, laboratoriumonderzoek, bitumenkwaliteit

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	16-12-2024
Projectnummer	11210365-004
Document ID	11210365-004-ZWS-0002
Pagina's	57
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	dr. Bernadette Wichman ir. Marloes Slokker (Infram Hydren) ing. Arjan de Looff (Infram Hydren)	

Samenvatting

Aanleiding en doel

In 2023 is het project Klimaatneutraal & Circulair Waterbouwasfaltbeton (K&C WAB) gestart, ook deels binnen de Kennis en Innovatie Agenda (KIA) van het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP/KIA). De target van K&C WAB is om vanaf 2025 warm WAB aan te leggen in het kader van een dijkversterking.

Dit rapport geeft de bevindingen weer van het onderzoek naar welke proeven inzicht geven in de levensduur van heet waterbouwasfaltbeton (WAB), wat een eerste stap is om te komen tot een levensduurmodel voor warm WAB. Er is getracht een verband te leggen tussen onderzoek op componentniveau inzake de bitumenkwaliteit en resultaten uit de driepunts-buigproeven (mengselniveau). Tevens is het levensduurmodel voor de buigtreksterkte (uit driepunts-buigproeven) vergeleken met meetwaarden. Dit is gedaan voor vier dijkvakken, te weten 't Schoor-Wierum, Eemshaven, Kaaphoofd en het POVW-proefvak 4 toplaag. Al dit WAB bevat geen recycling fractie. Een van de doelen is ook om uit de proeven referentiewaarden voor te stellen eisen voor de toepassing af te leiden.

Effect veroudering op bitumenkwaliteit

Een doelstelling van dit onderzoek was na te gaan wat het effect van de bitumenkwaliteit is op de op mengselniveau geconstateerde veroudering door middel van verschillende proeven. Deze proeven worden in het rapport duidelijk beschreven. Opgemerkt wordt dat de adhesieproeven (steen-bitumen) niet bruikbaar zijn gebleken, wat jammer is, omdat de langzame achteruitgang door veroudering in de samenhang op proefstukniveau aan adhesie gerelateerd is.

Er is een viertal dijkvakken onderzocht, met leeftijden 0, 46, 50 en 53 jaar (voor respectievelijk POVW-proefvak 4 toplaag, 't Schoor-Wierum, Eemshaven en Kaaphoofd). De jaren van aanleg zijn respectievelijk 2019, 1977, 1970 en 1970. Bekend is dat de bitumenkwaliteit na de oliecrisis van 1973 is veranderd. Ook het recente bitumen is weer anders dan wat in de jaren '70 is toegepast.

Het effect van natuurlijke veroudering is in kaart gebracht door bitumen uit slices over de laagdikte te onderzoeken. Uit FTIR-onderzoek blijkt dat onderin de grootste veroudering optreedt, maar ook in het midden van de asfaltlaag is veroudering duidelijk zichtbaar. Het bitumen van dijkvak 't Schoor-Wierum blijkt het minst verouderd te zijn, maar is wel gevoeliger voor kunstmatige veroudering met de PAV (Pressure Aging Vessel). Het Kaaphoofd bitumen is het sterkst verouderd.

De DSR-proeven op de met het bitumen gemaakte mastiek tonen ook een effect van veroudering, maar er zijn nog vragen over de proefuitvoering.

De cohesieproeven op de mastiek laten zien dat het bitumen uit het POVW-proefvak 4 toplaag een lagere rek en breukenergie heeft, d.w.z. lager dan die voor het bitumen uit het midden van de asfaltlaag van de drie oudere dijkvakken. Een hogere breukenergie en rek betekent dat de mastiek minder scheurgevoelig is. De resultaten uit het adhesieonderzoek zijn niet verder geïnterpreteerd, omdat men twijfels had over de proefuitvoering.

Samenvattend kan gesteld worden dat het FTIR-onderzoek, DSR-onderzoek en cohesieonderzoek verschillen in bitumenkwaliteit zichtbaar heeft gemaakt. Tevens is voor de drie vakken met oud WAB duidelijk verschil in veroudering geconstateerd en met behulp van een multi-variate analyse was een vergelijking van deze drie vakken mogelijk. Er is hierbij een duidelijke opeenvolging te zien van veroudering na 46, 50, en 53 jaren.

Effect veroudering op mengselniveau

Op mengselniveau is de veroudering zichtbaar gemaakt door een vergelijking te maken van de volgende grootheden die uit de driepunts-buigproeven zijn afgeleid: buigtreksterkte,

breukrek en breukenergie. Er zijn voor de drie oudere vakken meetwaarden uit meerdere meetsessies in de tijd beschikbaar en geanalyseerd. Op basis van de buigtreksterkte alleen was het lastig om veroudering zichtbaar te maken. De breukenergie en breukrek bleken meer inzicht hierin te geven. De op basis van deze twee grootheden geconstateerde veroudering correspondeert met wat op componentniveau is waargenomen. Er is een opeenvolging qua leeftijd te zien, ook als we alle vier de vakken te samen beschouwen. Er is echter geen duidelijke relatie van de richtingscoëfficiënten in de grafiek met breukenergie versus breukrek uit de driepunts-buigproeven en de waarden van de verouderingsindicator PC2 uit de FTIR-metingen voor de drie vakken met oud WAB.

Vergelijking met het levensduurmodel

Verder is een vergelijking gemaakt tussen de gemeten buigtreksterkte en de predictie met het levensduurmodel (zoals ontwikkeld voor het geheel van 73 dijkvakken). Voor alle vier de dijkvakken was de predictie te gunstig. De verwachting is dat er ook dijkvakken van de 73 dijkvakken zijn waarbij de predictie (deels) ongunstiger is. Het levensduurmodel geeft voor 73 dijkvakken als geheel een evenwichtig beeld, d.w.z. dat er ook dijkvakken zijn waarbij de predictie (deels) ongunstiger is. Het is gewenst dat er nader onderzoek plaatsvindt naar de betrouwbaarheid van de voorspelling van de buigtreksterkte per individueel dijkvak. Idealiter beschikken we over een levensduurmodel waarbij er bij elk dijkvak zowel een onderschatting als een overschatting van de meetwaarden is te zien, kortom een meer evenwichtig beeld. Dit vergt wel dat we de nodige kennis hebben van deze individuele dijkvakken en dat we naast het standaard holle ruimte percentage en de leeftijd, nog meer verklarende parameters vinden. In het verleden is een groot deel van de 73 dijkvakken maar beperkt gedocumenteerd.

In de metingen per dijkvak is geen duidelijke trend als functie van holle ruimte te zien, d.w.z. als het holle ruimte percentage hoger is, is de buigtreksterkte niet altijd lager en soms heb je twee heel verschillende waarden van de buigtreksterkte bij eenzelfde holle ruimte percentage. Er is uiteraard wel een trend in de predictie, d.w.z. bij eenzelfde leeftijd voorspelt het predictiemodel bij een hoger holle ruimte percentage een lagere waarde van de buigtreksterkte.

Eisen aan bitumenkwaliteit

Gezocht is naar een referentie voor de eisen die aan de bitumenkwaliteit moeten worden gesteld. De resultaten uit de cohesieproeven voor het bitumen uit het midden van de asfaltlaag van de drie oudere vakken, laten zien dat dit bitumen van betere kwaliteit was bij aanleg dan het in 2019 voor het POVW-proefvak toegepaste bitumen. We zouden hier enkele eisen op kunnen baseren. Daarnaast geven de resultaten voor het natuurlijk verouderde bitumen uit de onderzijde van de asfaltlaag inzicht in welke procedure nodig is bij kunstmatige veroudering, zoals in de PAV. Dit is bediscussieerd in het rapport van de TU Delft [8]. Verder wordt aanbevolen om ook voor warm WAB proeven op componentniveau uit te voeren. De onderzoeksresultaten met een grotere cohesieve breukenergie voor het bitumen uit het midden van de laag bij de oudere vakken ten opzichte van de waarde voor recent bitumen (POV proefvak 4 toplaag), tonen aan dat het noodzakelijk is om aanvullende eisen te stellen aan nieuwe mengsels qua cohesieve scheurgevoeligheid van bitumen en mastiek, om zo meer garanties te hebben voor een levensduur van 50 jaar.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	Aanleiding en context project	8
1.2	Doel van het project	9
1.3	Aanpak	9
2	Beproeving dijkvakken	10
2.1	Dijkvakken	10
2.2	Overzicht proeven	10
2.2.1	Op mengselniveau: driepunts-buigproef [12]	10
2.2.2	Componentniveau: Dynamic Shear Rheometer (DSR) [9]	13
2.2.3	Componentniveau: Direct Tension Test (DTT) [9]	13
2.2.4	Componentniveau: Adhesive strength test (AST) [9]	13
2.2.5	Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) [8]	14
3	Opzetten database met verklarende parameters	15
3.1	Gebruikte informatie	15
3.2	Driepunts-buigproeven	15
3.3	DSR-proeven	15
3.4	Adhesie en cohesie proeven	16
3.5	FTIR	18
4	Overzicht bevindingen uit metingen	19
4.1	Driepunts-buigproeven	19
4.2	Adhesieproeven	22
4.3	Cohesie proeven	24
4.4	DSR	26
4.5	FTIR	27
5	Levensduurmodel op dijkvakniveau	29
5.1	Achtergronden levensduurmodel	29
5.1.1	Relatie met onderhavige studie	30
5.2	Levensduurmodel regressie	30
5.3	Predictie buigtreksterkte versus metingen	30
5.4	Predictie buigtreksterkte vanuit meetwaarden	33
5.4.1	Vergelijking van de 3 dijkvakken met oud WAB	33
5.5	Conclusies	35

6	Extra verklarende parameters levensduur	37
6.1	Nadere analyse driepunts-buigproeven	37
6.2	FTIR-resultaten (componentniveau)	42
6.3	DSR-resultaten (componentniveau)	47
6.4	Cohesieproeven in DTT (componentniveau)	48
6.4.1	Relatie met driepunts-buigproeven	49
6.5	Conclusies	52
7	Conclusies en aanbevelingen	53
8	Referenties	55
A	Bijlage met dijkvakken	56

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en context project

In 2023 is het project Klimaatneutraal & Circulair Waterbouwasfaltbeton (K&C WAB) gestart [1], ook deels binnen de Kennis en Innovatie Agenda (KIA) van het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP/KIA). De target van K&C WAB is om vanaf 2025 warm WAB aan te leggen in het kader van een dijkversterking.

Dit project heeft de volgende doelstellingen [1]:

1. Versterken inzicht in de levensduur van asfaltbekledingen voor ontwerp-, beoordelings- en beheeroptimalisatie door de ontwikkeling van een levensduurmodel voor waterbouwasfaltbeton.
2. Beschikbaar krijgen van (nieuwe) mengsels van lagere temperatuur waterbouwasfalt zodat er in concurrentie kan worden aanbesteed.
3. Maximaal benutten hergebruikpotentie van bestaande asfaltbekledingen door optimalisatie van secundair grondstofgebruik en procesmatig voorwaarden te scheppen.
4. Opdoen van vertrouwen in nieuwe asfaltmengsels en productiemethoden door beheerders.
5. Verspreiden en actualiseren van kennis over funderingslagen voor asfaltbekledingen.
6. Het ontwikkelen van een praktisch uitvoerbaar, gedragen en betrouwbaar testprotocol en een set van functionele eisen voor nieuwe asfaltmengsels.

Het klimaatneutrale aspect betreft vooral een verlaging van de productietemperatuur; het circulaire aspect betreft het werken met een hogere recycle fractie. Het te recyclen asfalt kan hierbij afkomstig zijn van de te vervangen oude WAB-bekleding. De levensduur van dit nieuwe WAB is zeer bepalend voor de milieu impact (MKI¹), zie [2].

Een levensduurprognose met behulp van het levensduurmodel van dit soort dijkbekleding is nodig voor ontwerp op basis van functionele eisen en de veiligheidsbeoordeling gedurende de gehele levensduur (in het kader van assetmanagement)². Voor het gangbare heet WAB is er een vigerend levensduurmodel daterend uit 2013 [3].

Er is inmiddels veel meer meetdata verzameld, ook van nieuw areaal met verschillende leeftijden.

Tabel 1.1 geeft een overzicht van asfalt dat gemaakt wordt bij verschillende productietemperatuur. Op basis van de European Asphalt Pavement Association (EAPA) - indeling en ervaringen binnen Nederland is de CROW Lage Temperatuur (LT)-werkgroep tot deze indeling voor Nederland gekomen [4].

Tabel 1.1 Indeling op basis van productietemperatuur (CROW).

Mengselbenaming	Productie- en verwerkingstemperatuur [°C]
Koud asfalt (KA)	Omgevingstemperatuur
Half warm asfalt (HWA)	<110
Warm asfalt (WA)	110 – 140
Heet asfalt (HA)	>140

¹ Milieu kosten indicator

² Met het begrip levensduurmodel wordt bedoeld dat hiermee de grootte van de buigtreksterkte in de tijd kan worden bepaald. Veilig gekozen waarden van deze buigtreksterkte zijn input voor berekeningen met Basis Module Asfalt Golfklap waarmee de mate van vermoeiing van het asfalt in termen van de Minersom kan worden berekend. De Minersom wordt getoetst aan een veilige bovengrens. Als deze wordt overschreden heeft het asfalt einde levensduur bereikt.

De kortere termijn doelstelling betreft de toepassing van (half)warm WAB, omdat vergelijkbare mengsels (Lage Energie Asfaltbeton LEAB) zich voor een belangrijk deel hebben bewezen in de wegenbouw. Meer specifiek: de techniek van bitumenverschuiming is in wegenbouwprojecten het best gevalideerd [5]. (Half)warme WAB-mengsels gemaakt met bitumenverschuiming zijn qua samenstelling vrijwel identiek aan de al decennia gangbare heet WAB-mengsels. Er wordt een kleine hoeveelheid schuimverbeteraar toegevoegd. Analoot aan de wegenbouw, wordt ook bij warm WAB een recyclefractie van 50% haalbaar geacht [6].

Tot nu toe is er geen ervaring met de aanleg van (half)warm WAB als dijkbekleding en er is geen bruikbaar levensduurmodel beschikbaar voor dit materiaal. Om beter zicht te hebben op de levensduur van (half)warm WAB moet meer kennis van dit te produceren materiaal worden verworven. De lagere productietemperatuur heeft meerdere positieve of negatieve effecten op de eigenschappen van het mengsel.

Er spelen verschillende processen een rol die de levensduur van het (half) warm WAB mogelijk beïnvloeden (+ = positief effect, - = negatief effect) [7]. De belangrijkste zijn:

- Minder veroudering bitumen tijdens productiefase (+).
- Minder goede menging in geval van toepassing asfaltgranulaat in het mengsel (-).
- Minder goede adhesie tussen steen en bitumen (-).
- Minder goede verwerkbaarheid door hogere viscositeit (minder vloeibaar) bitumen (-).
- In geval van schuimbitumen: Risico op achterblijven water in het mengsel (-).

Het gehele project K&C waterbouwasfaltbeton heeft als een van de doelstellingen het ontwikkelen van een levensduurmodel voor lagere temperatuur waterbouwasfaltbeton met hogere recycling fractie (gelijk of hoger dan 50%). Een subdoelstelling is het verder ontwikkelen van een levensduurmodel voor het gangbare heet WAB, mede op basis van de nieuwe meetdata die is verkregen in het kader van de veiligheidsbeoordelingen.

1.2 Doel van het project

Het doel van dit deelproject (wp4a uit plan KCW, d.w.z. WVH 02 2024 - Versterking Onderzoek Waterveiligheid, Cluster 1: Aanleg, beheer en onderhoud, onderdeel prestatie-eisen waterbouwasfaltbeton) is het verkrijgen van inzicht in de invloed van de bitumenkwaliteit, zoals onderzocht door de TU Delft op functioneel niveau (wp3 uit plan KCW en POV Waddenzeedijken onderzoek), op de sterkte en de levensduur van waterbouwasfaltbeton (WAB). Hierbij worden vier dijkvakken beschouwd, te weten 't Schoor-Wierum (46 jaar oud), Eemshavendijk (50 jaar oud), Kaaphoofd (53 jaar oud) en POV Waddenzeedijken proefvak 4 toplaag (0 jaar oud, zonder recycling), die op termijn als referentie kunnen dienen voor het onderzoek naar warm WAB. Daarnaast wordt nagegaan of het mogelijk is om een relatie te leggen met het levensduurmodel, alsmede met de waarden van breukenergie en breukrek uit de driepunts-buigproeven.

1.3 Aanpak

De resultaten uit het TU Delft onderzoek op componentniveau voor de drie dijkvakken met oud WAB [8] en de resultaten uit het POV Waddenzeedijken onderzoek [9], zijn gebruikt om de bitumenkwaliteit op componentniveau vast te stellen, ten aanzien van het effect van natuurlijke veroudering en welke conditionering geschikt is [8]. Hierbij is van belang dat er inzicht komt in verschillen tussen de vier dijkvakken, qua effect van de leeftijd, maar ook t.a.v. verschillen in gebruikt bitumen. Van de drie vakken met oud WAB hebben we tijdsreeksen met driepunts-buigproefresultaten, zodat inzicht kan worden verkregen in de veroudering op proefstukniveau, zie [10]. Deze resultaten worden geanalyseerd en met elkaar vergeleken. Daarnaast wordt onderzocht hoe de vier dijkvakken als referentie kunnen dienen bij het onderzoek naar warm WAB, en op termijn ook om eisen te stellen.

2 Beproeving dijkvakken

2.1 Dijkvakken

De volgende drie dijkvakken zijn onderzocht [10] en [11], zie Tabel 2.1 en Figuur 2.1:

Tabel 2.1 Selectie van de drie referentievakken, met enkele kenmerken.

Naam dijksectie	Waterschap	Jaar van aanleg	Eerste beoordeling		
			jaar	buigtreksterkte (MPa)	
				gemiddelde	variatiecoëfficiënt
Eemshaven dijkvak 48; km 0,65-2,10	Noorderzijvest	1970	2009	4,73	0,19
't Schoor - Wierum; km 46,1-49,7	Wetterskip Fryslân	1977	2009	4,38	0,55
Helderse Zeewering, Kaaphoofd; km 2,7-4	HHNK	1970	2004	6,24 (*)	0,16

(*) lagere belastingsnelheid 0,085 mm/s in plaats van de standaard 0,35 mm/sec.

Naam dijksectie	Waterschap	Jaar van aanleg	tweede beoordeling			gemiddelden van alle metingen	
			jaar	buigtreksterkte (MPa)		bitumen gehalte "in" (%m/m)	holle ruimte
				gemiddelde	variatiecoëfficiënt		
Eemshaven dijkvak 48; km 0,65-2,10	Noorderzijvest	1970	2020	4,61	0,27	6,7	5,3
't Schoor - Wierum; km 46,1-49,7	Wetterskip Fryslân	1977	2017	3,67	0,31	6,45	5,2
Helderse Zeewering, Kaaphoofd; km 2,7-4	HHNK	1970	2017	5,07	0,35	6,4	5,5



Figuur 2.1 De locatie van drie onderzochte zogenaamde referentievakken met oud WAB.

De meetwaarden van de Helderse zeewering uit 2004 zijn niet meegenomen in de analyse, vanwege de afwijkende belastingsnelheid in de driepuntsbuigproeven.

Verder is POV Wadden proefvak 4 toplaag onderzocht [8]:

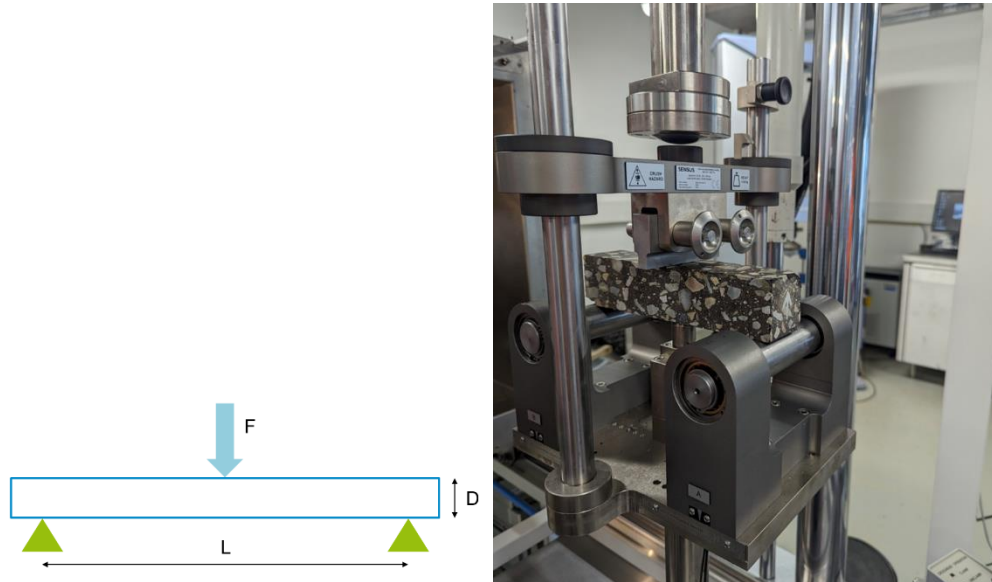
4	Westhoek	Strukton	(vezel) WAB toplaag 0/16	Wigro	Pen 70/100	2.3	Bestone
---	----------	----------	--------------------------------	-------	------------	-----	---------

2.2 Overzicht proeven

2.2.1 Op mengselniveau: driepunts-buigproef [12]

De driepunts-buigproef is een test om de buigeigenschappen van een materiaal te bepalen. Bij deze proef wordt een prismatisch materiaalmonster blootgesteld aan een buigbelasting via drie contactpunten: Twee onderste steunpunten en een bovenste belastingpunt. Het

monster ligt horizontaal op de twee steunpunten. Een verticale belasting wordt gecontroleerd aangebracht op het middelste punt van het monster, totdat het breekt of een vooraf bepaalde vervorming bereikt. Tijdens de test worden gegevens zoals de uitgeoefende kracht en de vervorming van het monster verzameld. Deze gegevens worden vaak geregistreerd met behulp van sensoren en meetapparatuur. Op basis van deze informatie worden belangrijke parameters zoals de buigtreksterkte, elasticiteitsmodulus en taaiheid van het materiaal bepaald.

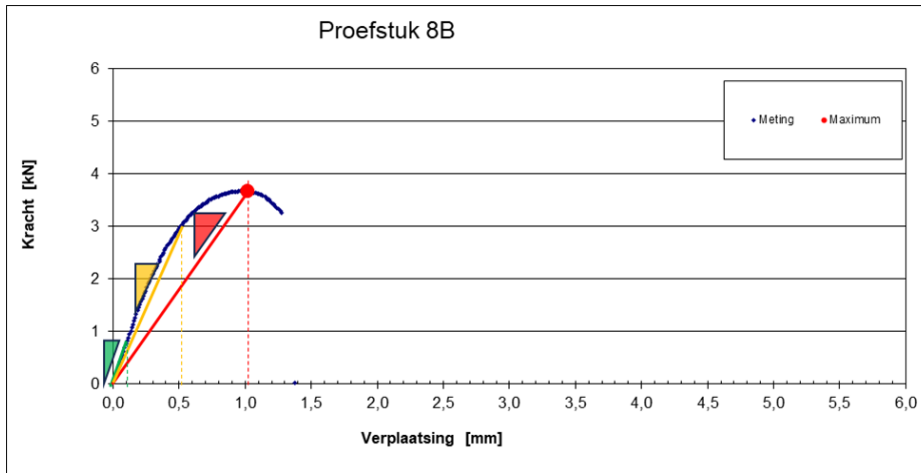


Figuur 2.2 Driepunts-buigproef. Schematische weergave (links) en de proefopstelling (rechts).

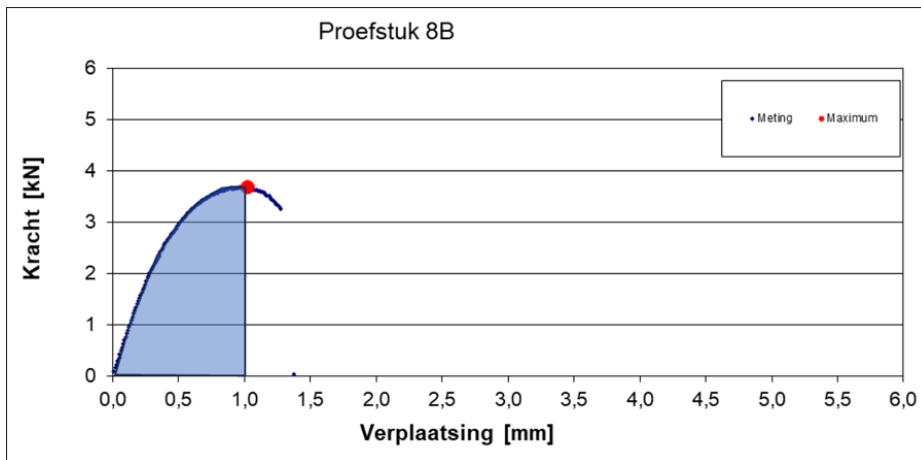
Met de driepunts-buigproef worden verschillende eigenschappen van het materiaal bepaald. Het is bij asfaltdijkbekledingen gebruikelijk om uit één boorkern een schijf te zagen uit de onderzijde van de bekleding. Uit deze schijf worden twee balken gezaagd waarvan er één wordt gebruikt voor bepaling van de buigtreksterkte en één voor bepaling van de vermoeiingseigenschappen. Voorafgaand aan deze proeven kan van een van de balkjes een stijfheidsmodulus worden bepaald. De proeven worden uitgevoerd bij een temperatuur van 5 graden Celsius. De buigtreksterkte wordt bepaald met een constante belastingsnelheid van 0,35 mm/s.

Uit de resultaten van een buigtreksterkteproef worden de volgende eigenschappen bepaald:

- Buigtreksterkte (volgt uit rode stip in Figuur 2.4).
- Rek bij breuk.
- Breukenergie (zie Figuur 2.4).
- Secant modulus (zie Figuur 2.4).



Figuur 2.3 De secant modulus bij 10 (groen), 50 (oranje) en 100 (rood) % verplaatsing. De secant modulus is de richtingscoëfficiënt van de lijn van het nulpunt tot het beschouwde punt in een spanning-rekdiagram.



Figuur 2.4 De breukenergie tot bezwijken of taatheid geeft aan hoeveel energie een materiaal kan absorberen voor het breekt.

De breukenergie tot bezwijken wordt bepaald door het oppervlak onder de grafiek van een kracht-verplaatsingsdiagram (de arbeid) te delen door de hoogte en breedte (=doorsnede) van het proefstuk:

$$G_f = \frac{W_f}{A}$$

Hierin is

G_f = breukenergie tot bezwijken of taatheid (J/m^2).

W_f = arbeid tot bezwijken (J).

A = oppervlakte van de doorsnede van het proefstuk (m^2). Voor W_f geldt:

$$W_f = \int F dv$$

Hierin is

F = Kracht (N).

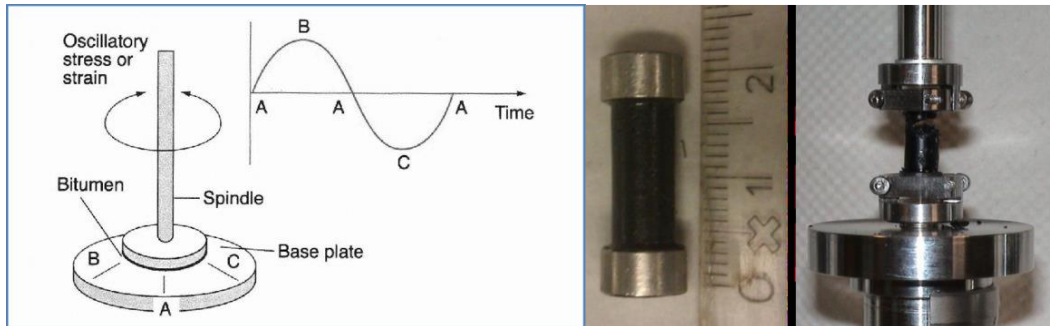
v = verplaatsing (m).

De breukrek wordt afgeleid uit de verplaatsing waarbij de kracht maximaal is, zie Figuur 2.4. De breukenergie gedeeld door de breukrek is een soort gemiddelde sterkte maat voor het verloop van kracht tegen verplaatsing.

Door de opeenvolgende secantmoduli van één proef met elkaar te vergelijken wordt een indruk verkregen van de brosheid of ductiliteit van het materiaal. De ductiliteit is de vervormbaarheid; de mate waarin een materiaal plastische vervormingen als gevolg van een opgelegde trekspanning toelaat. De brosheid van een materiaal is de eigenschap om zonder veel plastisch te vervormen te breken.

2.2.2 Componentniveau: Dynamic Shear Rheometer (DSR) [9]

Bij Dynamic Shear Rheometer metingen, ofwel DSR, wordt de mastiek (vulstof en bitumen) getest. Om dit te kunnen doen is in het laboratorium het bitumen gescheiden van het mineraal aggregaat en vervolgens wordt er een vulstof toegevoegd. Met de DSR worden de complexe afschuifmodulus (G^*) (stijfheid) en de fasehoek van een mastiek proefstukje bepaald. In Figuur 2.5 zijn het principe van de proef (links) de proefstukken (midden) en de proefopstelling (rechts) weergegeven.

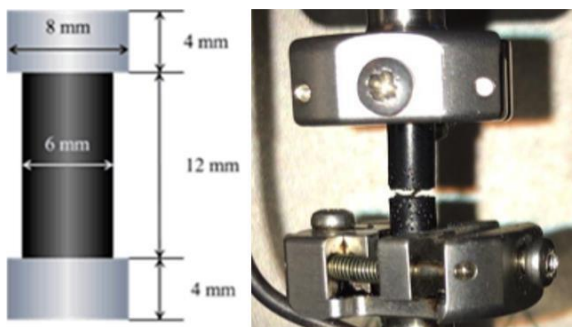


Figuur 2.5 DSR test. Schematische weergave (links) en de proefopstelling (rechts).

De proef wordt veel gebruikt omdat hiermee de rheologische eigenschappen van bitumen en mastiek worden vastgelegd. En deze componenten bepalen in belangrijke mate het mechanisch gedrag van het asfaltmengsel. Er zijn frequency sweeps uitgevoerd met een frequentie van 0,1 – 10Hz. Bij temperaturen van 0 – 40 graden Celsius. De proeven zijn verplaatsings gestuurd uitgevoerd bij een rek van 0,05%.

2.2.3 Componentniveau: Direct Tension Test (DTT) [9]

De treksterkte van het mastiek is bepaald met een uniaxiale trekproef op kleine kolommen mastiek. In Figuur 2.6 zijn de proefstukafmetingen en de testopstelling weergegeven.



Figuur 2.6 Proefstukafmetingen en testopstelling DTT.

De proef wordt uitgevoerd bij een constante reksnelheid van 3% of 0,3%/sec en een temperatuur van 5 graden Celsius.

2.2.4 Componentniveau: Adhesive strength test (AST) [9]

Met de adhesive strength test wordt de hechtsterkte tussen bitumen en stenen getest. Hiervoor worden proefstukken vervaardigd waarbij bitumen tussen twee stenen wordt geplaatst en verwarmd zodat er een goede hechting ontstaat tussen de stenen en het

bitumen. De proef wordt steeds met twee verschillende steensoorten uitgevoerd; bestone, waarvan bekend is dat de hechting met bitumen over het algemeen goed is en schots graniet, waarvan bekend is dat de hechting met bitumen minder goed is. De proefstukken worden, net als bij de DTT, belast tot bezwijken. In Figuur 2.7 is een voorbeeld gegeven van een proefstuk voor belasten.



Figuur 2.7 Proefstuk voor de adhesive strength test (AST).

De proef wordt uitgevoerd bij een constante reksnelheid van 0,3%/sec en een temperatuur van 5 graden Celsius.

2.2.5 **Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) [8]**

Door middel van infraroodspectroscopie kan de molecuulsamenstelling van materialen worden onderzocht. De meettechniek, gebaseerd op absorptie en reflectie van infraroodlicht, geeft informatie over de trillingen van chemische bindingen en daarmee over de structuur van moleculen. Een FTIR analyse op bitumen geeft inzicht in de veroudering van bitumen. Hiervoor worden de specifieke veranderingen in de chemische samenstelling van het bitumen geïdentificeerd. Met name de verandering in de spectrale gebieden waarin zich de sulfoxiden, carbonylen en aromaten bevinden, zijn hier van belang. Er zijn hierbij steeds twee onafhankelijke metingen op hetzelfde materiaal uitgevoerd, een voor en een na geforceerde veroudering van het monster. De metingen zijn uitgevoerd bij een frequentiespectrum dat overeenkomt met een moleculaire vibratiebereik van 4000 tot 650 cm^{-1} , met een resolutie van 4 cm^{-1} en 24 scans per monster.

Het resultaat van de meting is een absorptiespectrum.

3 Opzetten database met verklarende parameters

3.1 Gebruikte informatie

De opgestelde database bevat informatie van verschillende soorten proeven en parameters voor meerdere dijkvakken. De beschouwde dijkvakken zijn 't Schoor-Wierum, Eemshavendijk, de Helderse Zeewering (Kaaphoofd) en POV Wadden vak 4 toplaag. Op proefstukken van deze dijkvakken zijn verschillende proeven uitgevoerd, waaronder driepunts-buigproeven, DSR-proeven, adhesie proeven, cohesie proeven en FTIR proeven. De TU Delft heeft op WAB-materiaal uit deze dijkvakken DSR-, adhesie-, cohesie en FTIR-proeven uitgevoerd [8]. Het materiaal in de DSR- en cohesieproeven bestaat uit een standaard mastiek dat gemaakt is met het uit het dijksmateriaal geëxtraheerde bitumen. De FTIR- en adhesieproeven zijn uitgevoerd met alleen het bitumen.

3.2 Driepunts-buigproeven

Aan de hand van driepunts-buigproeven kunnen onder andere parameters als buigtreksterkte, rek bij breuk en breukenergie tot bezwijken worden vastgesteld. Bij deze proeven is er gebruik gemaakt van proefstukken uit de onderkant van de asfaltlaag. Kiwa KOAC heeft de proeven uitgevoerd en deze data aangeleverd. De waarden van deze parameters zijn samengevat in Tabel 3.1 voor de verschillende dijkvakken.

Tabel 3.1 Samenvatting resultaten 3-puntsbuigproeven van 4 dijkvakken met E_s = secant modulus, G_c = breukenergie, ε_b = rek bij breuk, σ_b = buigtreksterkte en LFT = leeftijd.

Parameter	Eenheid	t Schoor - Wierum	HZW, Kaaphoofd	Eemshavendijk	POV-Wadden vak 4 toplaag
projectnummer	-	230140801	230140801	1903877	
jaar meting	-	2023	2023	2020	2019
jaar aanleg	-	1977	1970	1970	2019
leeftijd	jaar	46	53	50	1
boorkern	-	W1	H1		17
Gemiddelde Buigtreksterkte	MPa	4,53625	4,3175	4,61125	9,45
Standaard deviatie Gem. buig-	MPa	1,07949641	0,596890753	1,254710411	0,48
rek bij breuk (gemiddelde)	$\mu\text{m}/\text{m}$	5541,75	3326,375	3790,75	9858
rek bij breuk (st dev)	$\mu\text{m}/\text{m}$	3260,795773	674,0341105	2320,264933	1560
$E_{s,10\%}$	MPa	1865,625	1894	2130,5	1775
$E_{s,50\%}$	MPa	1063,875	1358	1556,625	1562
$E_{s,100\%}$	MPa	979,125	1335,75	1413,25	977
breukenergie tot bezwijken (G)	J/m^2	298,875	138,125	226,1125	1430
breukenergie (st dev)	J/m^2	268,7502492	37,44495961	193,7007002	323
G_c/ε_b		0,05393152	0,041524182	0,059648486	0,145069394
$G_c \cdot \text{LFT}/\varepsilon_b$		2,480849912	2,200781632	2,982424322	0,145069394
G_c/σ_b		65,88591899	31,99189346	49,03496883	151,3182227
$G_c/(\varepsilon_b \cdot \sigma_b)$		0,01188901	0,009617645	0,012935427	0,015350014
holle ruimte (gem)	%	4,575	6,125	2,1875	1,89
holle ruimte (st dev)	%	0,917683419	2,662839516	1,000624805	0,80

3.3 DSR-proeven

Bij de DSR proeven wordt gekeken naar parameters zoals de cross-over frequency en cross-over modulus. Bij deze cross-over modulus behoort een fasehoek van 45° . De cross-over frequentie geeft aan hoe elastisch of viskeus het materiaal is. Als deze frequentie laag moet worden gekozen, dan is het asfalt erg stijf, en dat houdt in dat er sprake kan zijn van

veroudering, verharding van het bitumen. Dit betekent dat het materiaal scheurgevoelig is en minder in staat is om energie te dissiperen. Tevens is de verwachting dat de cross-over modulus groter wordt ten gevolge van veroudering. Door veroudering neemt dus de scheurgevoeligheid toe.

Er is onderscheid gemaakt tussen verschillende soorten proefstukken: ongeconditioneerd voor bitumen uit het midden van de laag; kunstmatig verouderd (40h PAV) voor bitumen uit het midden van de laag en ongeconditioneerd voor bitumen uit de onderkant van de laag. De resultaten van de (parameters van de) DSR proeven zijn weergegeven in onderstaande Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Resultaten DSR proeven met G^* = complex modulus, retained stiffness ratio = (G^* _geconditioneerd/ G^* _ongeconditioneerd) en fresh = ongeconditioneerd. PAV= pressure aging vessel met 40h = 40 uren.

conditionering	Parameter	Eenheid	t Schoor - Wierum	HZW, Kaaphoofd	Eemshavendijk	POV-Wadden vak 4 toplaag
fresh	crossover modulus	Pa	21629388,12	9158627,868	4868747,35	355000000
fresh	crossover frequency	Hz	0,724249036	0,066664298	0,042408157	8,1355
fresh	G^* bij 10 Hz	Pa	69195788,88	73025497	47102530,55	
40h PAV	crossover modulus	Pa	157148,4157	2741596,752	4112342,934	381000000
40h PAV	crossover frequency	Hz	0,148335693	0,009794378	0,014094593	8,7889
40h PAV	G^* bij 10 Hz	Pa	1265147,358	48501974,39	59523587,95	
fresh	crossover modulus	Pa	14139880,1	8707859,434	26741,33579	
fresh	crossover frequency	Hz	0,035491355	0,006643655	0,00194199	
	retained stiffness ratio (interpolatie waai		0,0183	0,6642	1,2637	
	retained stiffness ratio met crossover mo		0,007265504	0,299345796	0,844640857	1,073239437

3.4 Adhesie en cohesie proeven

Voor zowel de adhesie proeven als de cohesie proeven is een vergelijking gemaakt tussen ongeconditioneerde proefstukken (fresh) en kunstmatig verouderde proefstukken (40h PAV). Bij deze proeven zijn veel van dezelfde parameters vastgesteld als bij de driepunts-buigproeven, waaronder de breukenergie tot bezwijken, treksterkte (peak stress) en rek bij breuk (peak strain). De waarden voor de parameters van de adhesie proeven zijn in een overzicht weergegeven in Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Parameters adhesie proeven met peak stress = treksterkte en peak strain = rek bij breuk.

conditionering	Parameter	Eenheid	t Schoor - Wierum	HZW, Kaaphoofd	Eemshavendijk	POV-Wadden vak 4 toplaag
fresh	Area under the curve (J/m ²) (gem)	J/m ²	104,45	1270,46	110,14	6,53
fresh	Area under the curve (J/m ²) (st dev)	J/m ²	43,20	2169,31	128,35	
fresh	Area of cylinder (mm ²)	mm ²	0,00004778	0,00004778	0,00004778	4,61E-05
fresh	Secant Modulus at 10% Strain	MPa	26,67	16,85	8,43	201,95
fresh	Secant Modulus at 10% Strain (st dev)	MPa	21,56	14,40	7,38	
fresh	Secant Modulus at 50% Strain	MPa	8,67	9,67	9,16	80,09
fresh	Secant Modulus at 50% Strain (st dev)	MPa	6,93	8,56	2,80	
fresh	Secant Modulus at 100% Strain	MPa	6,53	8,22	7,63	58,84
fresh	Secant Modulus at 100% Strain (st dev)	MPa	6,88	7,07	4,82	
fresh	Peak Stress (MPa) (gem)	MPa	5,95	5,15	5,87	1,84
fresh	Peak Stress (MPa) (st dev)	MPa	2,65	1,77	1,22	
fresh	Peak Strain (gem)		1,36	10,15	1,10	0,0317
fresh	Peak Strain (st dev)		0,64	16,99	0,93	
fresh	cohesive, mixed of adhesive		Mixed	Mixed	Mixed	
40h PAV	Area under the curve (J/m ²) (gem)	J/m ²	19	36,33	29,39	10,6
40h PAV	Area under the curve (J/m ²) (st dev)	J/m ²	12,31	18,72	15,28	
40h PAV	Area of cylinder (mm ²)	mm ²	0,00004778	0,00004778	0,00004778	4,61E-05
40h PAV	Secant Modulus at 10% Strain	MPa	13,18	39,40	10,09	128,47
40h PAV	Secant Modulus at 10% Strain (st dev)	MPa	9,08	6,86	3,52	
40h PAV	Secant Modulus at 50% Strain	MPa	15,11	19,10	7,41	93,69
40h PAV	Secant Modulus at 50% Strain (st dev)	MPa	8,94	5,46	1,81	
40h PAV	Secant Modulus at 100% Strain	MPa	9,62	11,78	6,58	80,03
40h PAV	Secant Modulus at 100% Strain (st dev)	MPa	6,70	4,28	2,34	
40h PAV	Peak Stress (MPa) (gem)	MPa	3,21	5,42	4,05	2,58
40h PAV	Peak Stress (MPa) (st dev)	MPa	0,814	2,26	1,66	
40h PAV	Peak Strain (gem)		0,41	0,46	0,63	0,0320
40h PAV	Peak Strain (st dev)		0,20	0,13	0,22	
40h PAV	cohesive, mixed of adhesive		Mixed	Mixed (1x adhesive)	Mixed	

De resultaten voor de cohesie proeven zijn gepresenteerd in onderstaande Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Parameters cohesie proeven met peak stress = treksterkte en peak strain = rek bij breuk.

conditionering	Parameter	Eenheid	t Schoor - Wierum	HZW, Kaaphoofd	Eemshavendijk	POV-Wadden vak 4 toplaag
fresh	Area under the curve (J/m ²) (gem)	J/m ²	2387,84	2499,08	2053,32	1011,2925
fresh	Area under the curve (J/m ²) (st dev)	J/m ²	503,03	641,54	232,97	
fresh	Area of cylinder (mm ²)	mm ²	0,00002827	0,00002827	0,00002827	2,83E-05
fresh	Secant Modulus at 10% Strain	MPa	146,25	115,90	126,80	180,64
fresh	Secant Modulus at 10% Strain (st dev)	MPa	24,04	9,66	10,70	
fresh	Secant Modulus at 50% Strain	MPa	42,37	34,89	39,00	70,90
fresh	Secant Modulus at 50% Strain (st dev)	MPa	9,78	3,69	3,55	
fresh	Secant Modulus at 100% Strain	MPa	22,09	18,40	20,75	38,71
fresh	Secant Modulus at 100% Strain (st dev)	MPa	4,97	2,07	1,94	
fresh	Peak Stress (MPa) (gem)	MPa	2,20	2,08	2,03	1,81
fresh	Peak Stress (MPa) (st dev)	MPa	0,02	0,184	0,15	
fresh	Peak Strain (gem)		0,103	0,11	0,10	0,0525
fresh	Peak Strain (st dev)		0,021	0,02	0,01	
40h PAV	Area under the curve (J/m ²) (gem)	J/m ²	897,59	2922,11	1486,80	269,73
40h PAV	Area under the curve (J/m ²) (st dev)	J/m ²	950,91	467,35	360,75	
40h PAV	Area of cylinder (mm ²)	mm ²	0,00002827	0,00002827	0,00002827	2,83E-05
40h PAV	Secant Modulus at 10% Strain (MPa)	MPa	287,45	195,35	172,12	735,34
40h PAV	Secant Modulus at 10% Strain (MPa) (st dev)	MPa	79,96	42,70	10,11	
40h PAV	Secant Modulus at 50% Strain (MPa)	MPa	154,94	62,74	62,80	486,11
40h PAV	Secant Modulus at 50% Strain (MPa) (st dev)	MPa	89,79	16,82	5,28	
40h PAV	Secant Modulus at 100% Strain (MPa)	MPa	99,83	33,27	33,92	332,79
40h PAV	Secant Modulus at 100% Strain (MPa) (st dev)	MPa	68,89	9,18	3,09	
40h PAV	Peak Stress (MPa) (gem)	MPa	2,35	3,23	2,23	2,68
40h PAV	Peak Stress (MPa) (st dev)	MPa	0,19	0,311	0,25	
40h PAV	Peak Strain (gem)		0,037	0,094	0,066	0,0099
40h PAV	Peak Strain (st dev)		0,033	0,017	0,010	

3.5 FTIR

De TU Delft heeft ook FTIR proeven uitgevoerd. Uit het resultaat van deze proeven is de combined aging index bepaald. Deze combine daging index is een samenstelling van de sulfoxide index en carbonyl index, zie [8].

De combined aging index is bepaald voor het bitumen uit het midden van de laag met zowel geconditioneerde proefstukken (40h PAV) als ongeconditioneerde proefstukken (fresh). De combined aging index is ook bepaald voor het ongeconditioneerde bitumen uit de onderkant van de laag. De waarden hiervan zijn in Tabel 3.5 weergegeven.

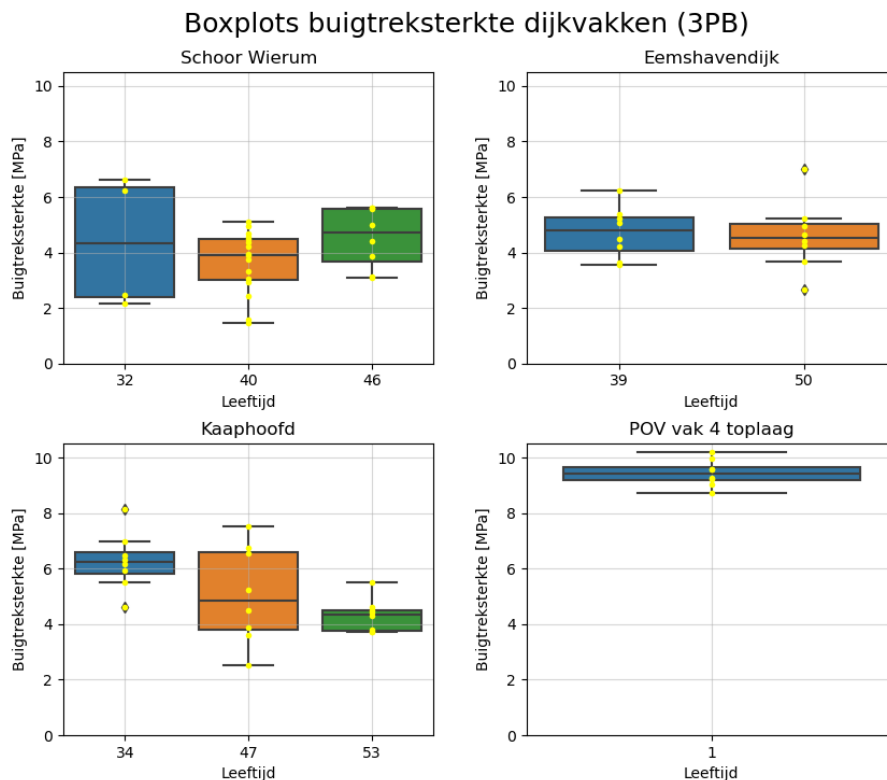
Tabel 3.5 Parameters FTIR proeven met fresh = ongeconditioneerd en 40h PAV = 40 uren in de Pressure Aging Vessel.

Positie in de kern	Conditionering	Parameter	Eenheid	't Schoor Wierum	HWZ, Kaaphoofd	Eemshavendijk
Midden	Fresh	Combined aging index	-	0,05158981	0,091712393	0,067779207
Onder	Fresh	Combined aging index	-	0,121623256	0,156226645	0,143697059
Midden	40h PAV	Combined aging index	-	0,119896163	0,176181183	0,160714493

4 Overzicht bevindingen uit metingen

4.1 Driepunts-buigproeven

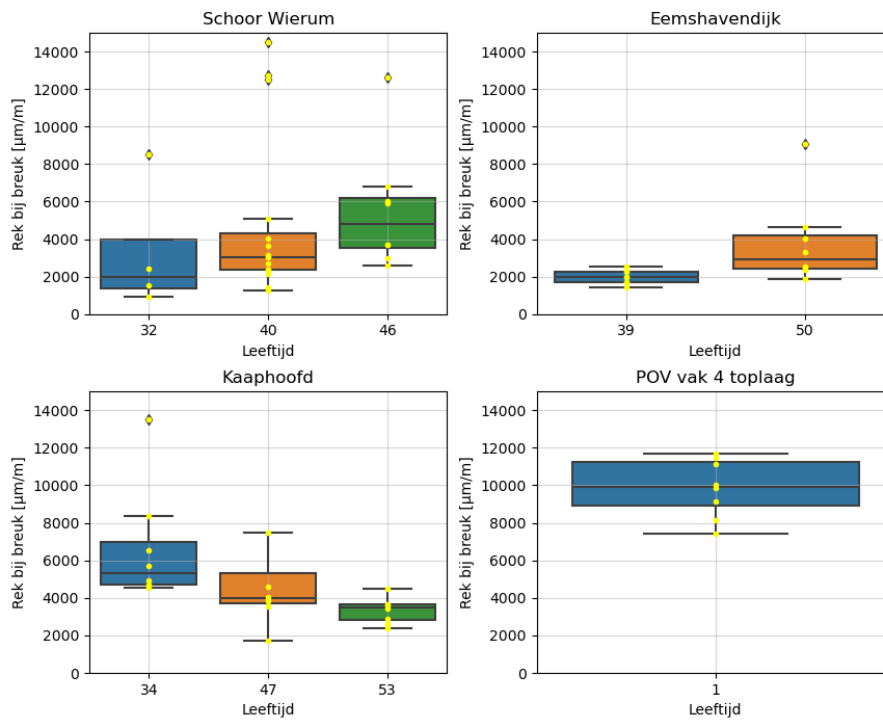
De trend van het verloop van de buigtreksterkte na verloop van jaren verschilt per dijkvak, zie Figuur 4.1. Er is een duidelijk dalende trend waar te nemen bij dijkvak Helderse Zeewering (Kaaphoofd). Voor dijkvakken 't Schoor Wierum en Eemshavendijk lijkt de buigtreksterkte ongeveer gelijk te blijven bij verdere veroudering van het asfalt.



Figuur 4.1 Boxplots buigtreksterkte dijkvakken (3PB).

Figuur 4.2 toont de rek bij breuk. Opvallend is dat voor de dijkvakken 't Schoor Wierum en Eemshaven de rek bij breuk toeneemt bij veroudering van het asfalt. Voor dijkvak Helderse Zeewering (Kaaphoofd) neemt deze juist af.

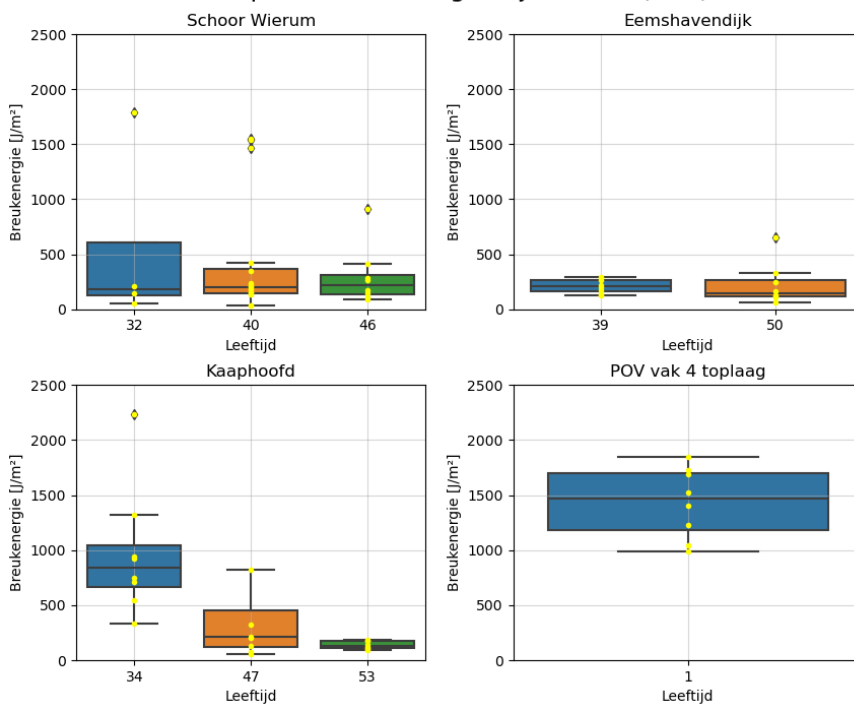
Boxplots rek bij breuk dijkvakken (3PB)



Figuur 4.2 Boxplots rek bij breuk dijkvakken (3PB).

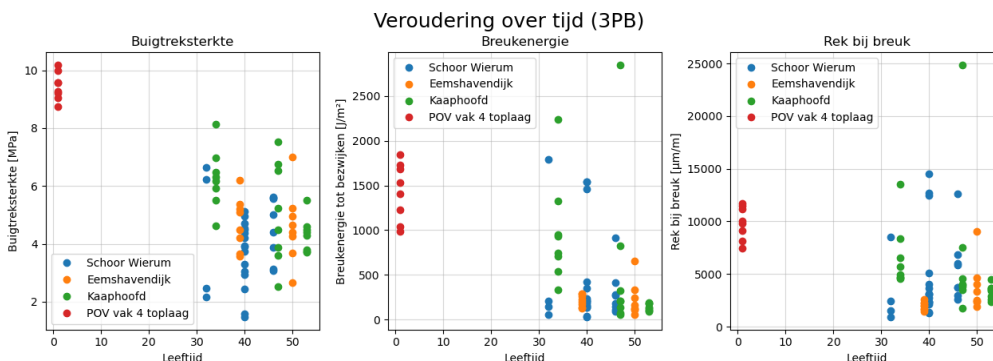
Figuur 4.3 toont de breukenergie. Het algemene beeld van de boxplots is dat voor 't Schoor Wierum en Eemshaven de breukenergie enigszins afneemt met de tijd. Voor Kaaphoofd is dit veel duidelijker het geval. Voor 't Schoor Wierum en Kaaphoofd wordt bandbreedte kleiner, terwijl deze voor de Eemshavendijk groter wordt. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat het asfalt over de jaren heen brosser wordt en er daardoor minder energie nodig is om het materiaal te scheuren en te breken.

Boxplots breukenergie dijkvakken (3PB)



Figuur 4.3 Boxplots breukenergie dijkvakken (3PB).

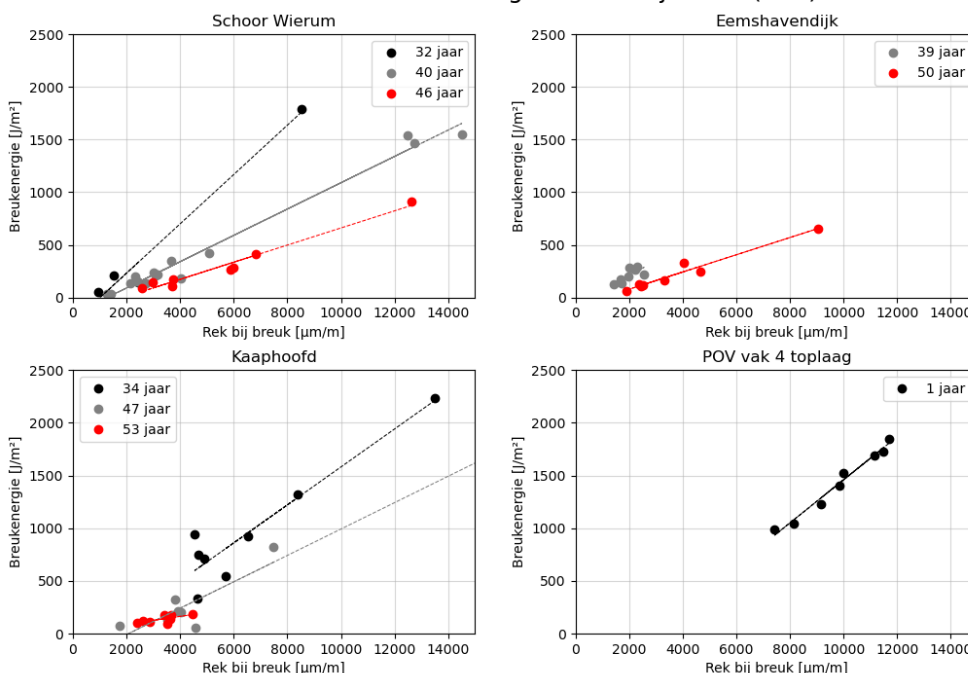
Figuur 4.4 geeft voor de vier dijkvakken een beeld van de veroudering van het asfalt over tijd, aan de hand van de buigtreksterkte, breukenergie en rek bij breuk. Te zien zijn de afzonderlijke proefresultaten. Er is een aanzienlijke spreiding te zien, die in de tijd verandert. Voor POV proefvak 4 is vooral de buigtreksterkte aanzienlijk hoger dan die voor de andere drie vakken.



Figuur 4.4 Veroudering over tijd dijkvakken (3PB).

In Figuur 4.5 is voor de vier dijkvakken de relatie tussen de breukenergie tot bezwijken en de rek bij breuk (op basis van de driepunts-buigproeven) weergegeven. Wat opvalt is dat voor alle dijkvakken de algemene trend is dat de hellingen van de regressielijnen flauwer worden naarmate het asfalt verouderd. Dat wil zeggen dat bij een gegeven rek bij breuk de bijbehorende breukenergie tot bezwijken afneemt.

Relatie tussen breukenergie en rek bij breuk (3PB)



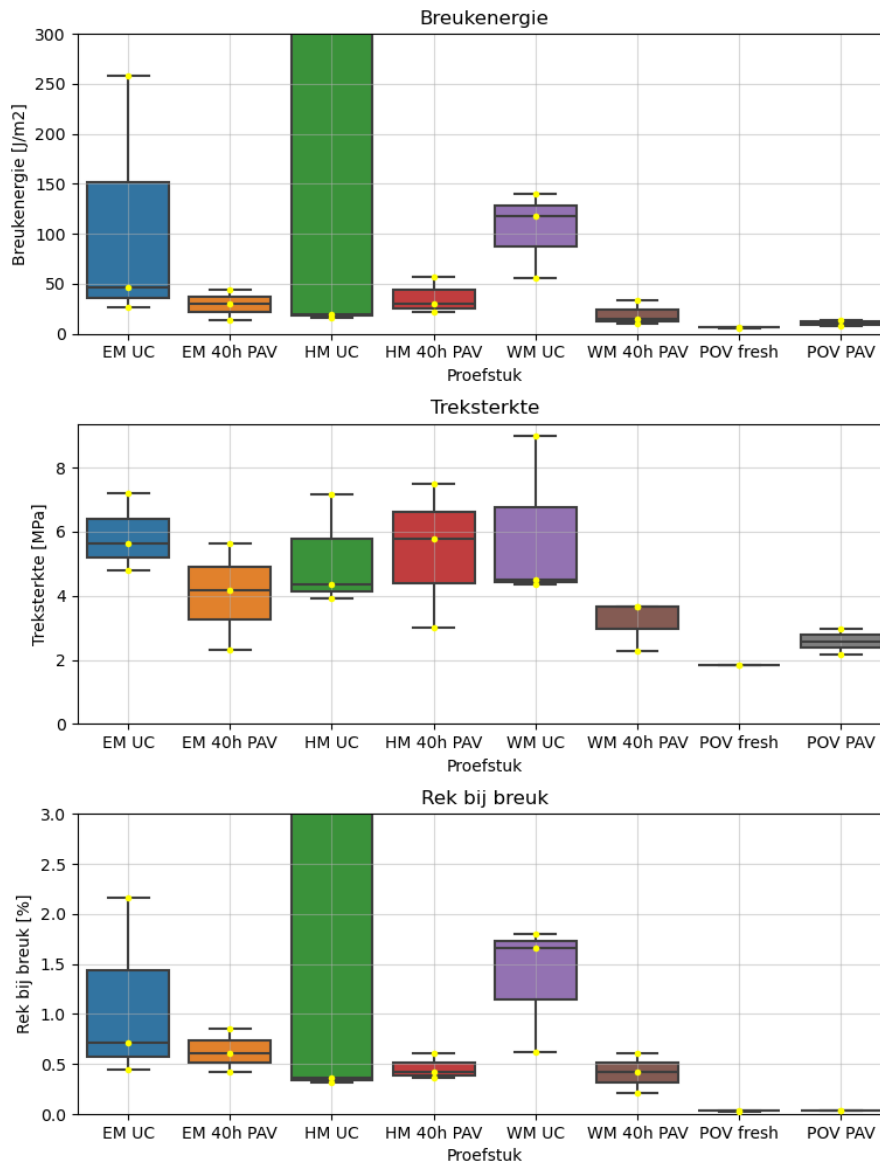
Figuur 4.5 Relatie tussen breukenergie en rek bij breuk (uit de driepunts-buigproeven).

4.2 Adhesieproeven

Figuur 4.6 geeft de boxplots weer met breukenergie, treksterkte en rek bij breuk uit de adhesie proeven. De adhesie proeven zijn uitgevoerd op ongeconditioneerde proefstukken met bitumen uit het midden van de asfaltlaag (fresh = UC) en kunstmatig verouderde proefstukken met dit bitumen (40h PAV = 40 uur in de PAV). Dezelfde proef is drie keer uitgevoerd per proefstuk. Hiervan zijn de resultaten weergegeven in onderstaande grafieken (zie Figuur 4.7). Een boxplot is in dit geval in principe geen representatieve weergave van deze resultaten, aangezien op basis van een steekproef van $n = 3$ er geen uitschieters waargenomen worden. Deze boxplots geven alleen een globale indruk.

In Figuur 4.6 is te zien dat de conditionering duidelijk effect heeft op de waarde van de breukenergie en rek bij breuk. De treksterkte varieert minder. In Figuur 4.7 is e.e.a. beter te zien: In Figuur 4.7 is te zien dat voor de Eemshavendijk en 't Schoor Wierum de breukenergie van de kunstmatig verouderde proefstukken lager is dan de breukenergie van de ongeconditioneerde proefstukken. Voor 't Schoor Wierum is ook de rek bij breuk kleiner. Voor Kaaphoofd heeft de PAV-veroudering minder effect. Voor het POV-proefvak nemen, ten gevolge van de conditionering, de breukenergie en treksterkte iets toe en de rek bij breuk blijft ongeveer gelijk.

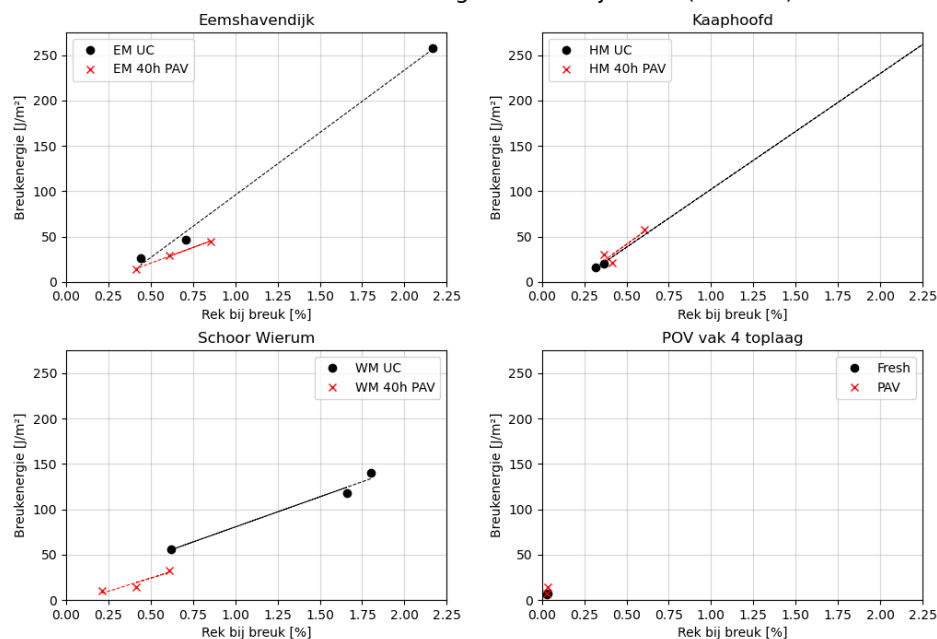
Boxplots parameters componentniveau (adhesie)



Figuur 4.6 Boxplots parameters adhesie proeven – componentniveau met fresh = UC = ongeconditioneerd en 40h PAV = 40 uren in de Pressure Aging Vessel. POV PAV = 40 uren in de PAV. EM = Eemshaven midden asfaltlaag, HM = Kaaphoofd midden asfaltlaag, WM = 't Schoor Wierum midden asfaltlaag en POV = POVW proefvak 4 toplaag.

Op basis van de resultaten kan de relatie tussen de breukenergie tot bezwijken en de rek bij breuk onderzocht worden. In Figuur 4.7 is deze relatie weergegeven voor de verschillende adhesieproeven. In de grafieken zijn lijnen toegevoegd die normaal gesproken zouden fungeren als regressielijnen, maar in dit geval geven ze alleen een indruk van de clustering van de gegevens. Dit komt doordat elke proef drie keer is uitgevoerd, waarbij de resultaten telkens verschilden. Hierbij is een regressielijn dus geen passende fit.

Relatie tussen breukenergie en rek bij breuk (adhesie)



Figuur 4.7 Relatie tussen breukenergie en rek bij breuk (adhesie) met fresh = UC = ongeconditioneerd en 40h PAV = 40 uren in de Pressure Aging Vessel. POV PAV = 40 uren in de PAV.

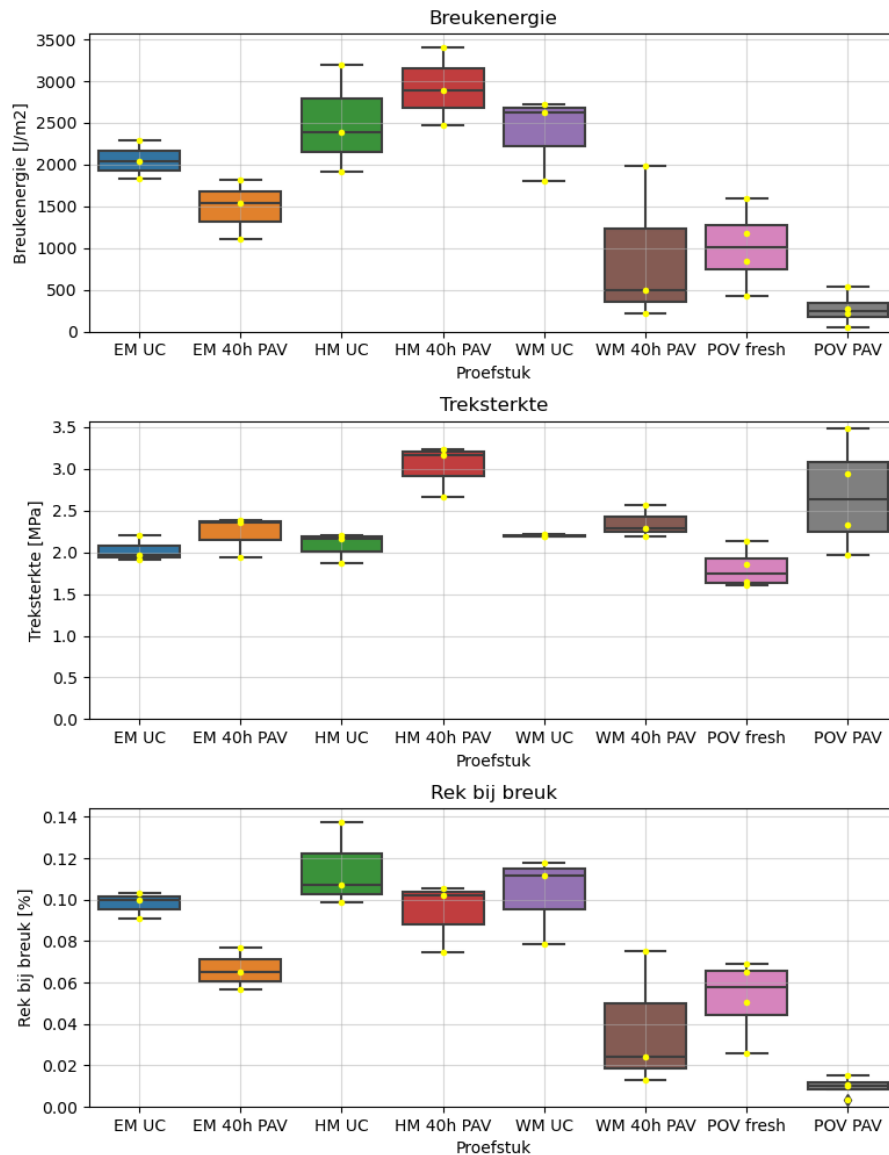
4.3 Cohesie proeven

Figuur 4.8 geeft de boxplots weer met breukenergie, treksterkte en rek bij breuk uit de cohesie proeven. De cohesie proeven zijn uitgevoerd op ongeconditioneerde proefstukken met mastiek dat gemaakt is met bitumen uit het midden van de asfaltlaag (fresh = UC) en kunstmatig verouderde proefstukken met deze mastiek (40h PAV = 40 uur in de PAV). Dezelfde proef is drie keer uitgevoerd per proefstuk. Hiervan zijn de resultaten weergegeven in onderstaande grafieken (zie Figuur 4.9). Een boxplot is in dit geval in principe geen representatieve weergave van deze resultaten, aangezien op basis van een steekproef van $n = 3$ er geen uitschieters waargenomen worden. Deze boxplots geven alleen een globale indruk.

In Figuur 4.8 is te zien dat de breukenergie door conditionering afneemt, behalve voor Kaaphoofd (HM). De rek bij breuk neemt in alle gevallen af, bij Kaaphoofd iets minder duidelijk. De treksterkte neemt iets toe, behalve bij Kaaphoofd waar deze sterk toeneemt. Dit laatste is een verklaring voor dat bij Kaaphoofd de breukenergie toeneemt.

In Figuur 4.9 is te zien dat de breukrekken na conditionering steeds duidelijk lager worden, behalve bij Kaaphoofd. De breukenergieën zijn na conditionering grotendeels lager, behalve bij Kaaphoofd, waar deze iets groter zijn.

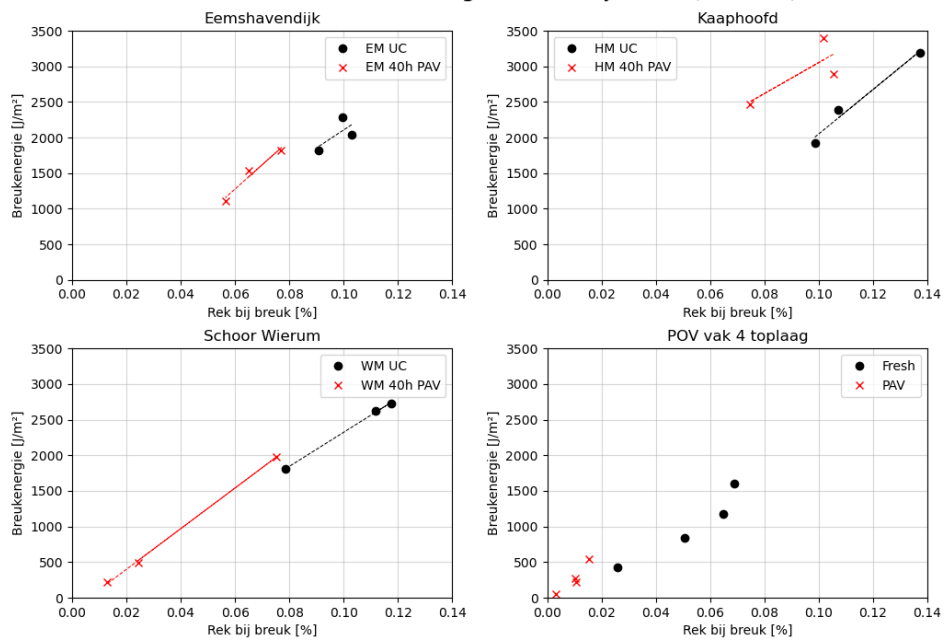
Boxplots parameters componentniveau (cohesie)



Figuur 4.8 Boxplots parameters cohesie proeven – componentniveau met fresh = UC = ongeconditioneerd en 40h PAV = 40 uren in de Pressure Aging Vessel. POV PAV = 40 uren in de PAV. EM = Eemshaven midden asfaltlaag, HM = Kaaphoofd midden asfaltlaag, WM = 't Schoor Wierum midden asfaltlaag en POV = POVW proefvak 4 toplaag.

Evenals bij de adhesie proeven kan ook voor de cohesie proeven op basis van de resultaten de relatie tussen de breukenergie tot bezwijken en de rek bij breuk onderzocht worden. In de Figuur 4.9 is deze relatie weergegeven voor de verschillende cohesieproeven. Wederom zijn in de grafieken lijnen toegevoegd die normaal gesproken zouden fungeren als regressielijnen, maar in dit geval geven ze alleen een indruk van de clustering van de data.

Relatie tussen breukenergie en rek bij breuk (cohesie)



Figuur 4.9 Relatie tussen breukenergie en rek bij breuk (cohesie) met fresh = UC = ongeconditioneerd en 40h PAV = 40 uren in de Pressure Aging Vessel. POV PAV = 40 uren in de PAV.

4.4 DSR

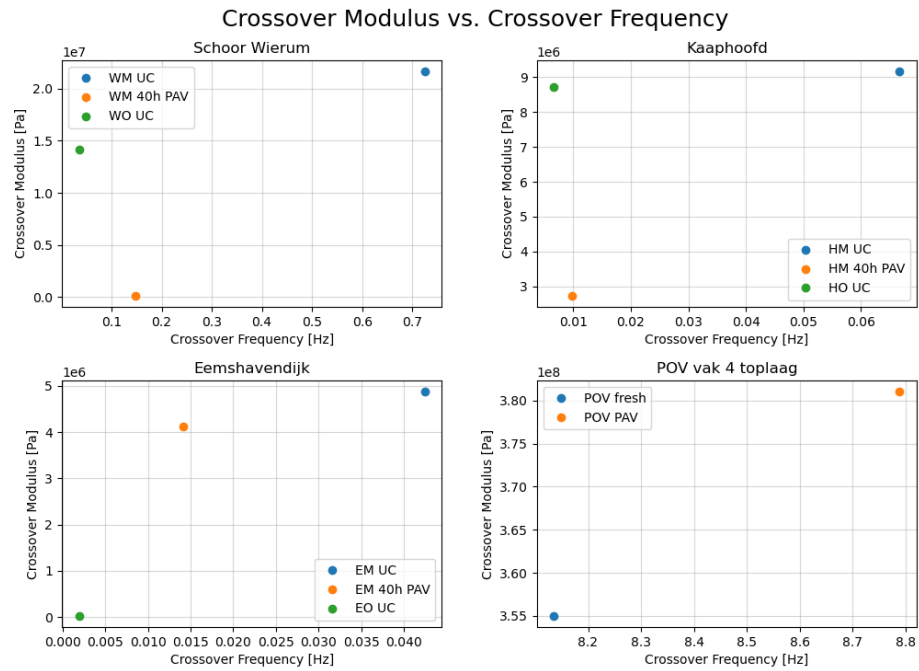
De resultaten van de DSR proeven in termen van cross-over modulus en cross-over frequency zijn weergegeven in Figuur 4.10. Per dijkvak zijn proefstukken onderzocht bestaande uit mastiek dat is gemaakt met bitumen uit het midden van de asfaltlaag. Een deel van deze proefstukken is ongeconditioneerd, en het andere deel is 40 uren in de PAV geweest (40h PAV en POV PAV). Verder zijn er proefstukken onderzocht, bestaande uit mastiek dat is gemaakt met bitumen uit de onderzijde van de asfaltlaag. Deze proefstukken zijn niet geconditioneerd.

De ongeconditioneerde proefstukken uit de onderzijde van de laag tonen de voor de driepunts-buigproeven relevante natuurlijke veroudering. Dit omdat de proefstukken die in de driepunts-buigproeven worden getest ook uit de onderzijde komen.

De veroudering in het midden van de asfaltlagen verloopt anders dan aan de onderzijde van de asfaltlagen. Onderin treedt er meer veroudering op dat zich theoretisch uit in een afname van de cross-over frequency, en een toename van de cross-over modulus. Als we in Figuur 4.10 de resultaten van 't Schoor Wierum, Eemshaven en Kaaphoofd voor het midden en de onderzijde vergelijken, dan zie we dat de cross-over frequency onderin steeds lager is, maar de cross-over modulus is steeds in meer of mindere mate lager. Dit laatste is tegen de verwachting. Mogelijk is de opgelegde strain in de proeven niet altijd juist gekozen, omdat verschil in bitumenkwaliteit een andere instelling kan vergen.

De kunstmatige veroudering geeft voor genoemde drie dijkvakken een afname van de cross-over frequency, maar ook weer steeds een afname van de cross-over modulus. Dit kan ook weer veroorzaakt zijn door de opgelegde strain. Voor het POV-proefvak 4 toplaag zien we een lichte toename van de cross-over frequency na 40 uur in de PAV, wat tegen de verwachting is. De cross-over modulus neemt toe, wat je wel zou verwachten. De cross-over frequency voor dit vak ligt een stuk hoger dan voor de andere drie dijkvakken, omdat het bitumen jonger is. De natuurlijke veroudering voor de drie oude dijkvakken heeft de laagste

cross-over frequency, wat verklaard kan worden door het feit dat deze veroudering het sterkst is.

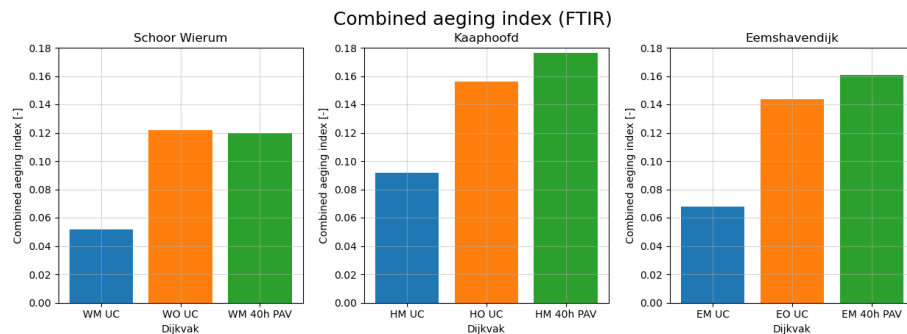


Figuur 4.10 DSR resultaten voor de vier dijkvakken met fresh = UC = ongeconditioneerd en 40h PAV = 40 uren in de Pressure Aging Vessel. POV PAV = 40 uren in de PAV. M = midden laag, O = onderzijde laag.

4.5 FTIR

In Figuur 4.11 is voor de drie oude dijkvakken de combined aging index te zien, welke is afgeleid uit het FTIR-absorptiespectrum.

Per dijkvak is bitumen onderzocht uit het midden van de asfaltlaag. Een deel van deze bitumen is ongeconditioneerd, en het andere deel is 40 uren in de PAV geweest (40h PAV). Verder is er bitumen onderzocht uit de onderzijde van de asfaltlaag. Dit bitumen is niet geconditioneerd.



Figuur 4.11 Resultaten uit het FTIR-onderzoek met UC = ongeconditioneerd, 40h PAV = 40 uur in de PAV. M = midden asfaltlaag en O = onderzijde asfaltlaag.

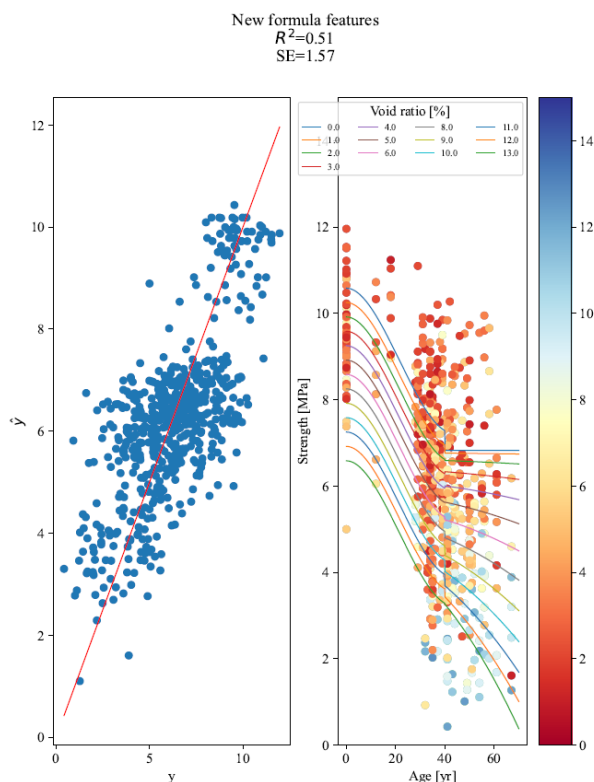
Te zien is dat voor alle dijkvakken de combined aging index het laagst is voor het ongeconditioneerde bitumen uit het midden van de asfaltlaag. De combined aging indices liggen dicht bij elkaar voor de PAV-veroudering van het bitumen uit het midden van de asfaltlaag en voor de natuurlijke veroudering van het bitumen uit de onderzijde van de

asfaltlaag. Verder is een volgorde in leeftijd te zien bij de natuurlijk verouderde bitumen, met de laagste waarde voor 't Schoor Wierum (46 jaar oud), dan Eemshaven (50 jaar oud) en de hoogste waarde voor Kaaphoofd (53 jaar oud). Dit is volgens verwachting.

5 Levensduurmodel op dijkvakniveau

5.1 Achtergronden levensduurmodel

Het in 2023 ontwikkelde levensduurmodel voor de buigtreksterkte van waterbouwasfaltbeton (WAB) is ontwikkeld voor 73 dijkvakken met heet WAB met 775 datapunten [14]. Bijlage A geeft een indruk van de meetwaarden per dijkvak. Hier zitten ook tijdreeksen tussen, d.w.z. dat er op meerdere tijdstippen boorkernonderzoek is gedaan. Het betreft heet WAB. De regressie voor de gemiddelde buigtreksterkte als functie van de leeftijd en het holle ruimte percentage [14] werd geselecteerd uit een set van mogelijkheden die de beste fit opleveren in termen van percentage verklaarde variantie ($R^2 \times 100\%$) en de standaard afwijking van de restspreiding (SE). Tevens moet er sprake zijn van statistische significantie (p-waarden³ < 0,05). Verder was een criterium voor de keuze van het best passende regressiemodel dat voor het gehele bereik in meetwaarden de predictie evenwichtig is, d.w.z. met ongeveer evenveel afwijkingen naar beneden als naar boven. Figuur 5.1 toont het verkregen beeld, waarbij de diagonale lijn aangeeft dat de meting gelijk is aan de predictie. Er is een knip bij een leeftijd van 40 jaar gemaakt, wat voor de gebruikte dataset overeenkomt met aanleg voor of na de oliecrisis uit 1973. Er zijn hierbij twee regressies samen gevoegd.



Figuur 5.1 De regressie voor de gehele dataset met een knip in leeftijd bij 40 jaar, zie formule (4.1) uit [14]. Met strength = buigtreksterkte, void ratio = holle ruimte% en age = leeftijd, y = meetwaarde van de buigtreksterkte, \hat{y} = predictie van de buigtreksterkte. De kleuren, zie legenda, tonen het holle ruimtepercentage.

³ Als de kans, dat een verschil door toeval ontstaan is, kleiner is dan 5% ($p = 0.05$), dan noemt men het verschil significant (betekenisvol). Als de kans, dat het verschil door toeval ontstaan is, kleiner is dan 1% ($p = 0.01$) dan noemt men het verschil zeer significant (zeer betekenisvol).

Het levensduurmodel voorspelt, gegeven een leeftijd en holle ruimte percentage, wat de gemiddelde waarde van de buigtreksterkte wordt. Tevens zijn er grenzen rondom het verloop van het gemiddelde in de tijd aan te geven, waarbinnen toekomstige individuele metingen worden verwacht, het zogenaamde predictie-interval.

5.1.1 Relatie met onderhavige studie

Eerder is al geconstateerd dat meetwaarden voor de drie vakken met oud WAB ('t Schoor-Wierum, Eemshaven en Kaaphoofd) veelal lager liggen dan de predictie [10].

In onderhavige studie is een vergelijking gemaakt met jong WAB (leeftijd 0 jaar) van proefvak 4 top laag uit het project POV Waddenzeedijken (met 0% asfaltgranulaat).

Genoemde vier dijkvakken zijn geselecteerd omdat:

- Er geen gerecycled asfalt (asfaltgranulaat) in het mengsel zit.
- Er onderzoek beschikbaar is op componentniveau.

In eerste instantie zijn voor dit proefvak de metingen vergeleken met de predictie met het levensduurmodel. Er is gekeken of bij proefvak 4 de metingen en predicties beter overeenkomen.

In principe kan voor alle 73 dijkvakken zo een vergelijking gemaakt worden.

In eerste instantie beperken we ons tot genoemde vier vakken omdat voor deze aan de hand van de proeven op componentniveau gekeken kan worden wat de invloed is van de bitumenkwaliteit. Voor de andere vakken hebben we daar momenteel minder inzicht in.

In hoofdstuk 6 wordt ingegaan op welke verklarende parameters er aanvullend uit de driepunts-buigproef kunnen worden verkregen, en ook hoe dit gerelateerd kan worden aan de onderzochte bitumenkwaliteit op componentniveau.

5.2 Levensduurmodel regressie

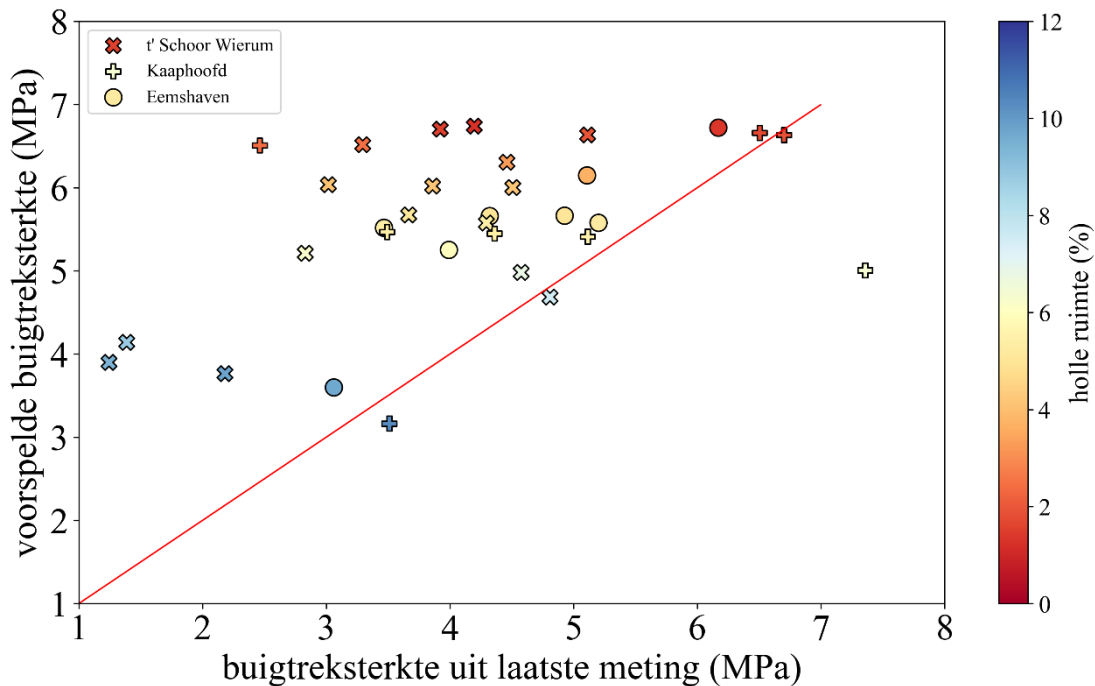
De dataset die de basis is van het nieuwe levensduurmodel [14] is uitgebreid met twee in 2023 uitgevoerde meetsessies [10], te weten bij 't Schoor Wierum en Kaaphoofd. Het blijkt dat als de oorspronkelijke dataset wordt uitgebreid met deze nieuwe meetwaarden (= nieuwe dataset), de regressie nog prima voldoet, zie Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Vergelijking regressiemodel met nieuwe dataset.

	R ²	SE
Regressiemodel 2023	0,51	1,57
Vergelijking van model met nieuwe dataset	0,52	1,56

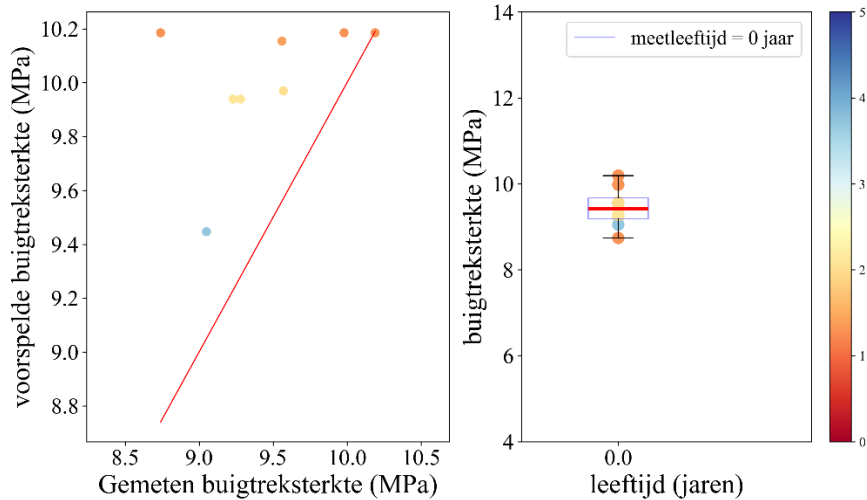
5.3 Predictie buigtreksterkte versus metingen

Voor de gekozen vier dijkvakken is gekeken hoe de predictie zich verhoudt tot de metingen en of de verdeling rond de diagonale lijn met predictie = meting evenwichtig is. Voor de drie dijkvakken met oud WAB is de predictie vergeleken met de metingen uit de laatste meetsessies, zie Figuur 5.2.



Figuur 5.2 Vergelijking van de predictie met het 2023 regressiemodel en de meetwaarden voor de laatste meetsessies. Met leeftijden 46, 50 en 53 jaren voor respectievelijk t' Schoor-Wierum, Eemshaven en Kaaphoofd.

Te zien is dat de predictie voor de drie vakken met oud WAB veelal gunstiger is dan de meting, d.w.z. de waarden liggen linksboven de diagonale lijn met meting = predictie. In [10] is geconstateerd dat de gemeten buigtreksterktes wel binnen het 90% predictie-interval liggen. In Figuur 5.2 is te zien dat een laag holle ruimte percentage geen duidelijk verband houdt met een hoge gemeten buigtreksterkte. Andersom geldt dit voor een hoog holle ruimte percentage. De predicties laten wel een duidelijke afhankelijkheid zien. Op dijkvakniveau is er dus geen duidelijk verband te zien van buigtreksterkte als functie van het holle ruimte percentage. Dit was wel af te leiden uit de grote dataset met 73 dijkvakken. Er is voor proefvak 4 toplaag ook een vergelijking gemaakt, zie Figuur 5.3, linkerzijde. De rechterzijde van Figuur 5.3 toont een boxplot met de metingen.

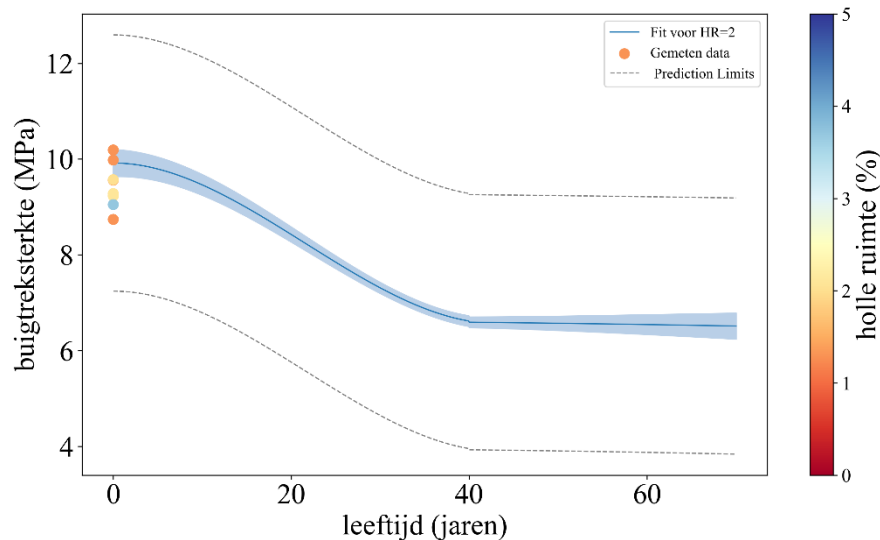


Figuur 5.3 Vergelijking van de predictie met de metingen voor POVW-proefvak 4 top laag (links) en met een boxplot van de metingen (rechts). De kleurenschaal geeft het holle ruimte percentage.

Ook in Figuur 5.3 liggen de waarden uit de predictie linksboven en zijn duidelijk gunstiger dan de metingen. De metingen hebben wat meer spreiding dan de predictie, iets wat je wel verwacht.

Voor alle tot nu toe nader onderzochte vakken geldt dat de predicties gunstiger zijn dan de meetwaarden. Het levensduurmodel geeft voor 73 dijkvakken als geheel een evenwichtig beeld, d.w.z. dat er ook dijkvakken zijn waarbij de predictie (deels) ongunstiger is. Het is gewenst dat er nader onderzoek plaatsvindt naar de betrouwbaarheid van de voorspelling van de buigtreksterkte per individueel dijkvak. Idealiter beschikken we over een levensduurmodel waarbij er bij elk dijkvak zowel een onderschatting als een overschatting van de meetwaarden is te zien, kortom een meer evenwichtig beeld. Dit vergt wel dat we de nodige kennis hebben van deze individuele dijkvakken, en dat we naast het standaard holle ruimte percentage en de leeftijd, nog meer verklarende parameters vinden. In het verleden is een groot deel van de 73 dijkvakken maar beperkt gedocumenteerd.

Figuur 5.4 toont de metingen van POVW-proefvak 4 top laag met het verloop van de predictie bij een gemiddeld holle ruimte percentage van 2 en het 90% predictie-interval. De meetwaarden liggen binnen dit interval.



Figuur 5.4 De predictie voor POVW-proefvak 4 toplaag bij gemiddeld holle ruimte percentage van 2 met het 90% predictie-interval en de meetwaarden. De kleurenschaal geeft het holle ruimte percentage.

De conclusie is dat voor alle vier de vakken de predictie te gunstig is, maar dat de metingen wel binnen het 90% predictie-interval liggen.

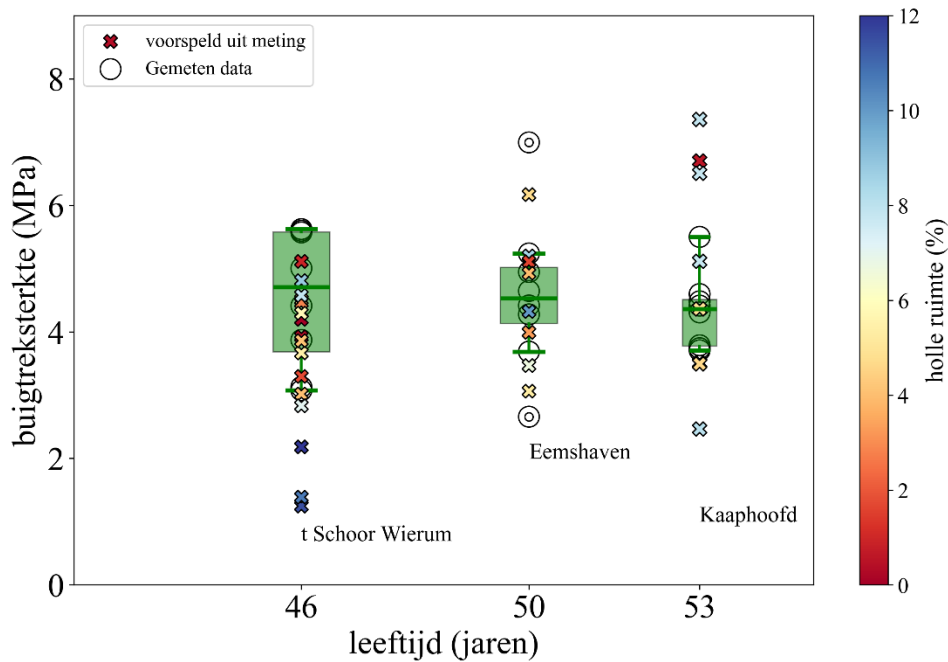
De volgende stap is om voor de drie vakken met oud WAB ook meetwaarden uit de voorlaatste meetsessie te benutten, zie paragraaf 5.4. Dit geeft een completer beeld van de conditie van het WAB op het laatste meetmoment.

5.4 Predictie buigtreksterkte vanuit meetwaarden

De metingen op het voorlaatste tijdstip kunnen met behulp van het levensduurmodel geëxtrapoleerd worden naar het tijdstip van de laatste meetsessie [10]. Hiermee ontstaat een vollediger beeld van de opgetreden veroudering, waarbij ook een groter bereik aan holle ruimte percentages wordt beschouwd.

5.4.1 Vergelijking van de 3 dijkvakken met oud WAB

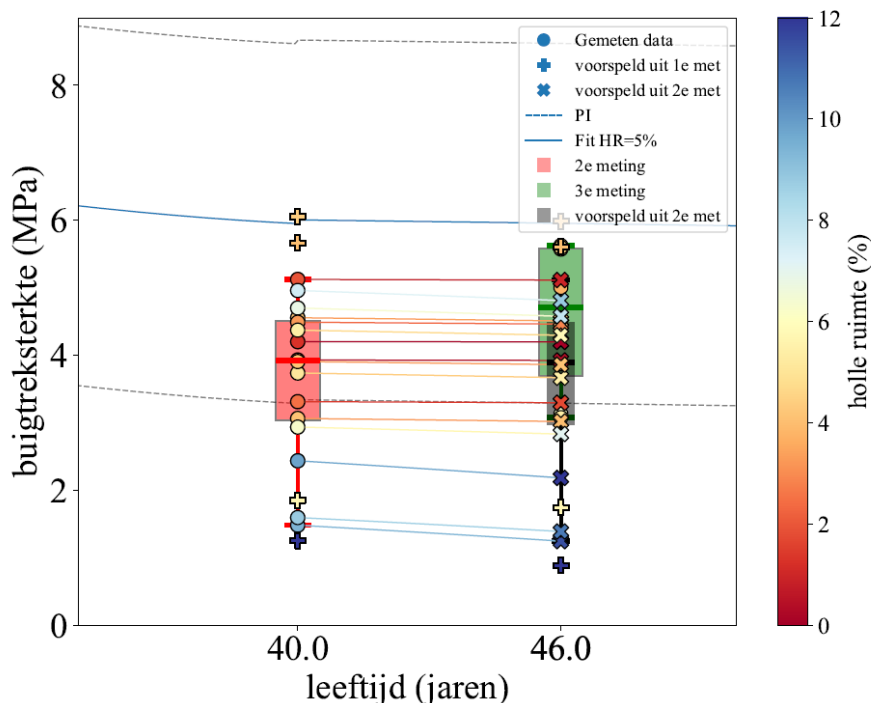
Figuur 5.5 toont voor de drie dijkvakken met oud WAB, op het tijdstip van het laatste meetmoment, de meetwaarden plus predicties vanuit de meetwaarden op het voorgaande tijdstip. De boxplots en de grote cirkels zijn de metingen van laatste meetsessie. De gekleurde kruisjes zijn de predicties, waarbij de kleur het holle ruimte percentage aangeeft. De kleine cirkeltjes zijn uitbijters behorende bij de boxplots.



Figuur 5.5 Meetwaarden op laatste meetmoment en predicties vanuit vorige meetmoment voor de 3 dijkvakken met oud WAB. De kleine cirkeltjes zijn uitbijters behorende bij de boxplots.

Door de boxplots met de metingen te vergelijken met de predicties vanuit de meetdata uit de vorige meet sessie, zie je dat het bereik in buigtreksterkte veel groter wordt. Figuur 5.6 geeft voor dijkvak 't Schoor-Wierum' weer hoe de predicties vanuit de vorige meet sessie er uit zien in de tijd. De kleuren geven het holle ruimte percentage weer. Bij de predicties zijn dat de waarden op het tijdstip van waaruit geëxtrapoleerd wordt.

t Schoor Wierum_4Pred



Figuur 5.6 Dijkvak 't Schoor-Wierum. Meetwaarden, predicties en verloop van levensduurmodel voor holle ruimte percentage van 5% incl. 90% predictie-interval.

Te zien is dat de meeste predictielijnen tussen 40 en 46 jaar horizontaal lopen, maar bij holle ruimte percentages boven de 5% is er wel een neerwaartse trend in buigtreksterkte, die toeneemt naarmate het holle ruimte percentage groter is. Dit houdt in dat het predictiemodel bij eenzelfde leeftijd een lagere waarde van de buigtreksterkte voorspelt, als het holle ruimte percentage groter is. Voor de andere twee dijkvakken met oud WAB zijn dergelijke grafieken te vinden in [10].

5.5 Conclusies

Op de volgende vragen kan antwoord worden gegeven voor de vier onderzochte dijkvakken:

Hoe verhouden de predicties zich tot de meetwaarden?

Voor alle vier de dijkvakken is de predictie vrijwel altijd te gunstig. In de metingen per dijkvak is geen duidelijke trend als functie van holle ruimte te zien, d.w.z. als het holle ruimte percentage hoger is, is de buigtreksterkte niet altijd lager en soms heb je twee heel verschillende waarden van de buigtreksterkte bij eenzelfde holle ruimte percentage. Er is uiteraard wel een trend in de predictie, d.w.z. bij eenzelfde leeftijd voorspelt het predictiemodel bij een hoger holle ruimte percentage een lagere waarde van de buigtreksterkte.

Zijn er duidelijke verschillen tussen de dijkvakken?

Voor de drie dijkvakken met oud WAB is er een significant verschil in leeftijd op het laatste tijdstip van meten, zie Figuur 5.5. 't Schoor-Wierum heeft lagere waarden voor de buigtreksterkte, ook al was deze met 46 jaar de jongste van de drie. Dit komt deels door de hogere holle ruimte percentages. Kaaphoofd heeft bij holle ruimte percentages rond de 8 een grote spreiding in buigtreksterkte, met ook relatief hoge waarden er tussen. Een globale neerwaartse trend in de tijd van 46, naar 50 naar 53 jaren van de buigtreksterkte is niet te zien in Figuur 5.5.

Het is nodig om de driepunts-buigproeven nader te bekijken als het gaat om tekenen van veroudering. Uit [10] volgde dat Eemshaven en Kaaphoofd een toename hebben in percentage brosse breuk in de driepunts-buigproef [10]. 't Schoor-Wierum niet. Dit was niet duidelijk afhankelijk van het holle ruimte percentage. Brosse breuk duidt op veroudering. Bij een leeftijd van 0 jaar is het bereik in buigtreksterkte van het POVW-proefvak 4 toplaag 8,8 tot 10,2 MPa, en dat bij een holle ruimte percentage rond de 2. Dit bereik ligt duidelijk boven de waarden in Figuur 5.5, waarbij wordt opgemerkt dat in Figuur 5.5 een aantal veel lagere waarden in buigtreksterkte te zien zijn bij een holle ruimte percentage van rond de 2. De drie vakken met oud WAB zijn dus meer verouderd dan POVW-proefvak 4 toplaag.

Geeft het levensduurmodel voldoende inzicht in het gedrag op dijkvakniveau?

Er zijn lastig trends in de metingen van de buigtreksterkte te ontwaren in de tijd, en als functie van het holle ruimte percentage voor de vier dijkvakken. Wat voor de 73 dijkvakken in zijn geheel geldt, blijkt voor individuele dijkvakken anders te liggen. De vraag rijst of de buigtreksterkte van de asfaltbekleding alleen een goed beeld geeft van de sterkte onder golfbelasting en de scheurgevoeligheid, iets wat regelmatig per dijkvak blijkt te verschillen, zie [10] en [12]. Het aantal boorkernen per meetmoment is beperkt, wat mede oorzaak is van dat trends lastig zijn te ontwaren. Om die reden zijn de laatste twee meetsessies voor ieder van de 3 dijkvakken met oud WAB gecombineerd, door de buigtreksterkte vanaf de één na laatste meetsessie te extrapoleren naar het tijdstip van het laatste meetmoment. Ook dan zijn trends lastig te zien.

Er kan gekeken worden of de bitumenkwaliteit, zoals getest op componentniveau, een trend in de tijd kan laten zien en ook of er duidelijke verschillen zijn tussen de dijkvakken. Tevens kunnen de buigtreksterkteproeven nader worden beschouwd, door daar waarden voor de breukenergie en de breukrek uit af te leiden. Deze zaken kunnen met elkaar worden

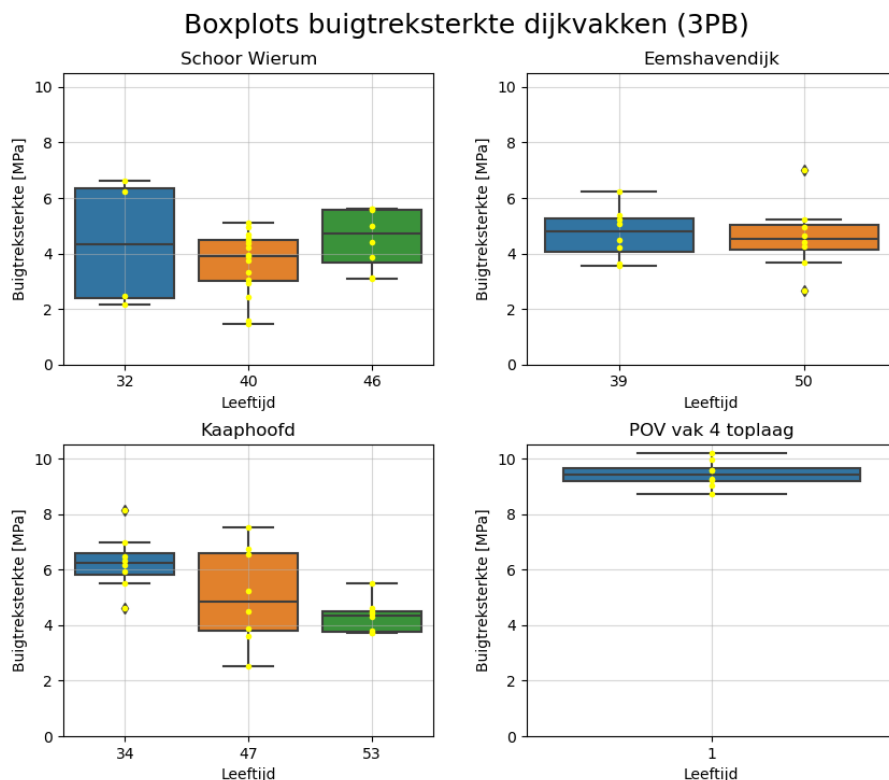
vergeleken, met als vraag of de trends op componentniveau terug komen in de driepunts-
buigproef resultaten op mengselniveau. Hierbij moet worden bedacht dat informatie over de
bitumenkwaliteit beperkt beschikbaar is en dat een nadere analyse van de
buigtreksterkteproeven voor elke in het verleden uitgevoerde proef mogelijk is.

6 Extra verklarende parameters levensduur

6.1 Nadere analyse driepunts-buigproeven

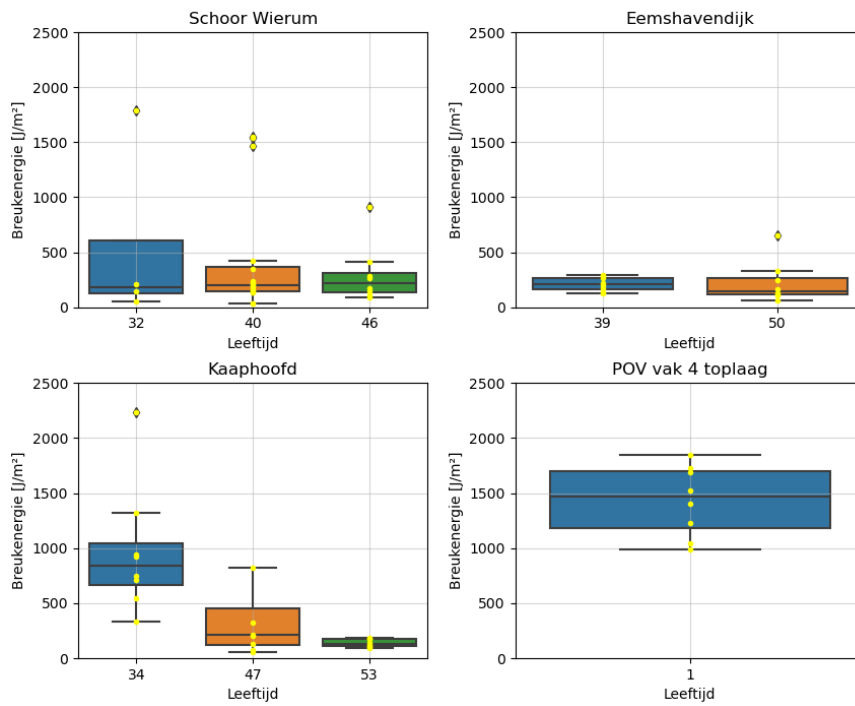
Op mengselniveau kunnen uit de driepunts-buigproeven extra verklarende parameters worden verkregen, waarbij de wens is om veroudering beter zichtbaar te maken en het effect dat dit heeft op de scheurgevoeligheid.

Uit de driepunts-buigproeven kunnen de breukenergie en breukrek worden afgeleid, zie paragraaf 2.2.1, die beide een maat zijn voor de scheurgevoeligheid. De resultaten zijn weergegeven in Figuren 6.1, 6.2 en 6.3.



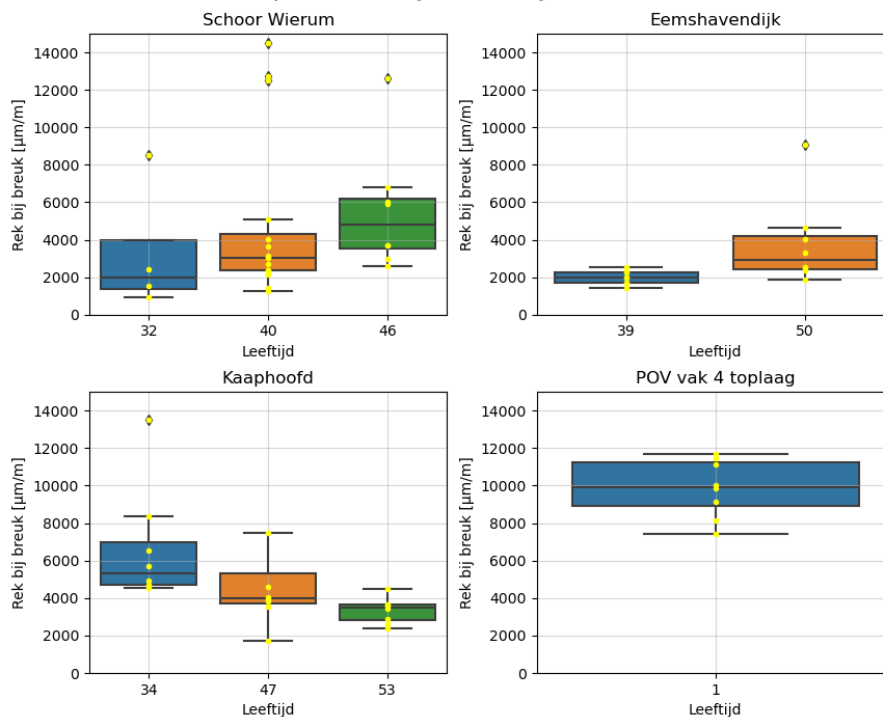
Figuur 6.1 Boxplots van de buigtreksterkte op de opeenvolgende meetmomenten voor de vier dijkvakken.
Note: de leeftijd van het POVW proefvak 4 toplaag is 0 jaren.

Boxplots breukenergie dijkvakken (3PB)



Figuur 6.2 Boxplots van de breukenergie op de opeenvolgende meetmomenten voor de vier dijkvakken. Note: de leeftijd van het POVW proefvak 4 toplaag is 0 jaren.

Boxplots rek bij breuk dijkvakken (3PB)

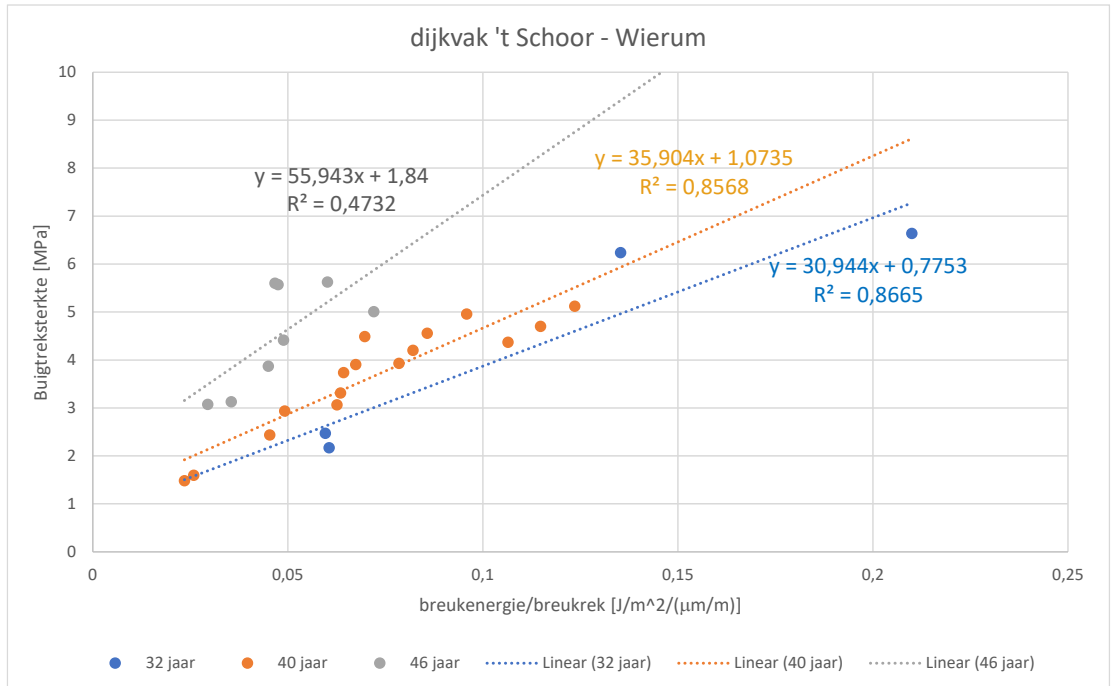


Figuur 6.3 Boxplots van de breukrek op de opeenvolgende meetmomenten voor de vier dijkvakken. Note: de leeftijd van het POVW proefvak 4 toplaag is 0 jaren.

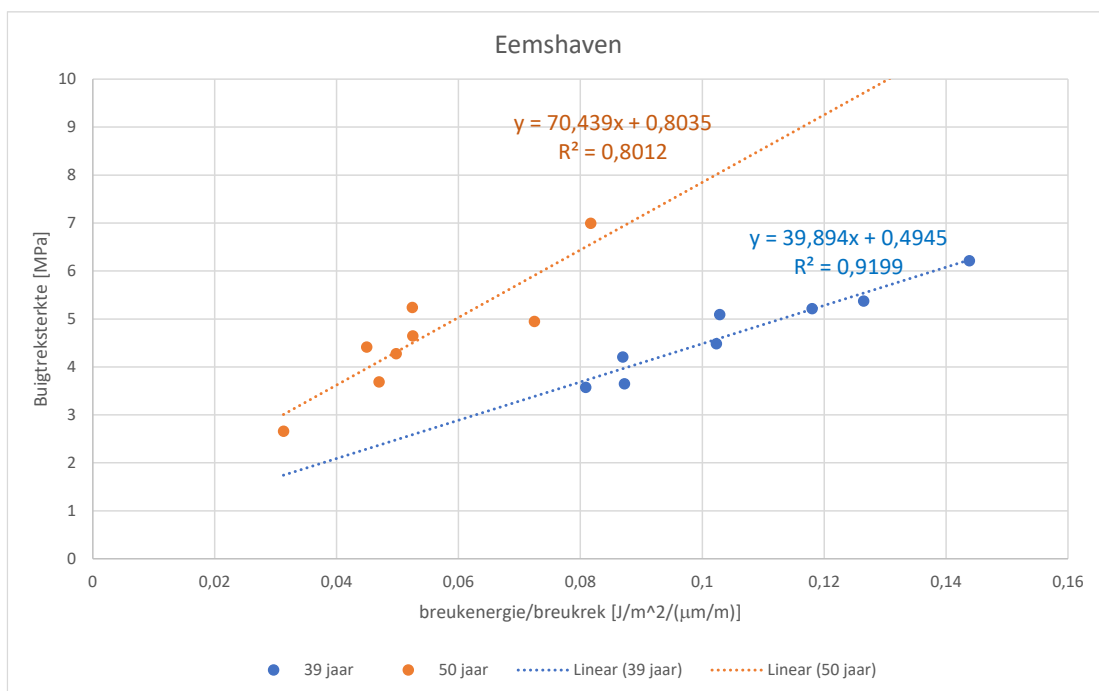
De verwachting is dat ten gevolge van veroudering de breuk brosser wordt, waarbij de breukenergie en de breukrek afnemen. In de boxplots is dit niet zo duidelijk te zien. De trend

van een afnemende breukenergie is vooral bij Kaaphoofd goed waarneembaar, een afnemende breukrek alleen bij Kaaphoofd. Bij 't Schoor – Wierum en de Eemshavendijk lijkt de rek bij breuk zelfs toe te nemen in de tijd. Hiervoor is geen fysische verklaring gevonden. Mogelijk speelt het beperkt aantal waarnemingen per onderzoek wel een rol. Vaak zijn er één of twee uitschieters in de rek bij breuk per onderzoek, die grote invloed kunnen hebben op het gemiddelde.

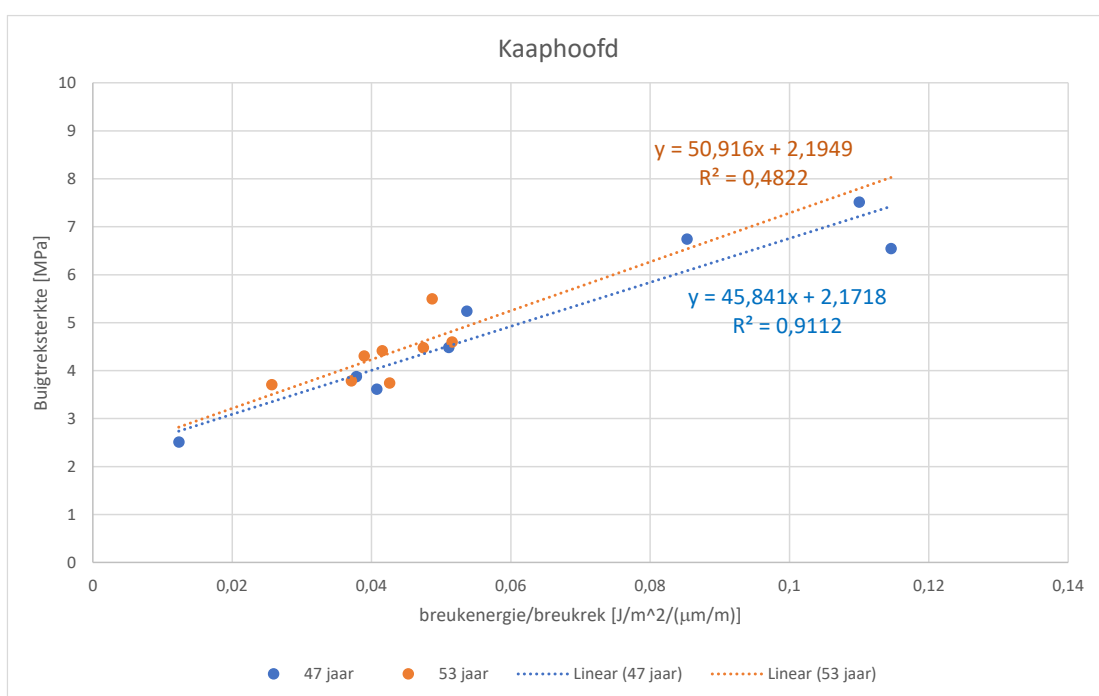
Er kunnen ook combinaties van parameters worden gemaakt. De breukenergie gedeeld door de breukrek is een sterktemaat, zie paragraaf 2.2.1. Deze kan uitgezet worden tegen de buigtreksterkte, zoals te zien is in Figuren 6.4, 6.5 en 6.6.



Figuur 6.4 Dijkvak 't Schoor-Wierum. Buigtreksterkte versus breukenergie gedeeld door de breukrek voor de individuele driepunts-buigproeven.



Figuur 6.5 Dijkvak Eemshaven. Buigtreksterkte versus breukeneggie gedeeld door de breukrek voor de individuele driepunts-buigproeven.



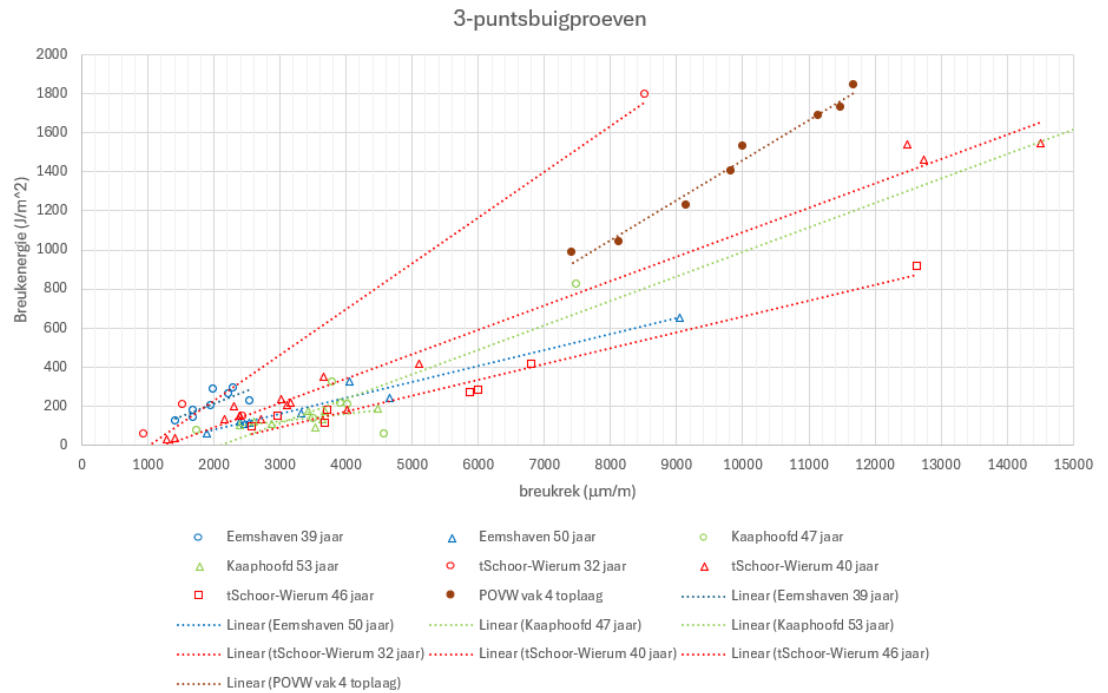
Figuur 6.6 Dijkvak Kaaphoofd. Buigtreksterkte versus breukeneggie gedeeld door de breukrek voor de individuele driepunts-buigproeven.

In Figuren 6.4 tot en met 6.6 is te zien dat er een min of meer rechtlijnig verband is tussen de buigtreksterkte en de breukeneggie gedeeld door de breukrek. Ook is te zien dat er nu een beter onderscheid gemaakt kan worden bij de opeenvolgende leeftijden, aan de hand van het verloop van de regressielijnen, dat willen zeggen beter dan als alleen naar de buigtreksterkte wordt gekeken. De regressielijnen voor Kaaphoofd liggen wat dichterbij elkaar. Te zien is dat

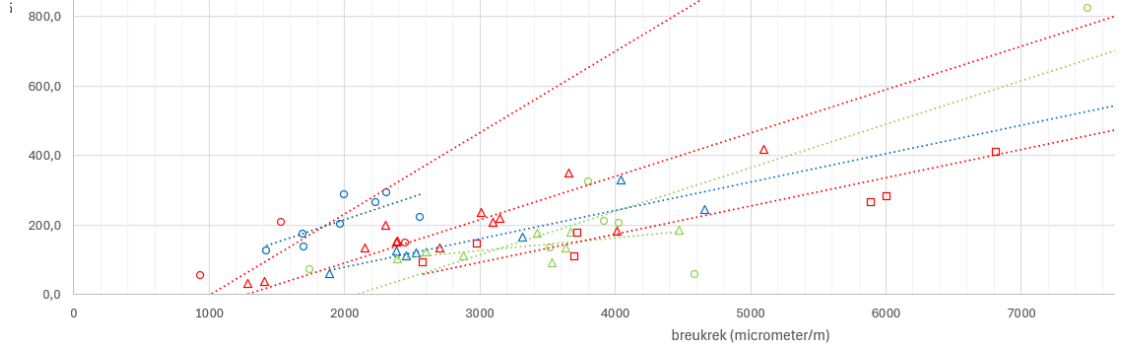
de waarden voor breukenergie gedeeld door breukrek lager komen te liggen bij hogere leeftijd. Dergelijke verbanden tussen de breukenergie gedeeld door de breukrek en de buigtreksterkte kunnen gebruikt gaan worden bij een te ontwikkelen levensduurmodel. De spreiding rond de regressielijnen wordt bepaald door allerlei invloeden, uitgeoefend door het klimaat, die per locatie van de boringen vaak anders kunnen uitpakken. Veroudering manifesteert zich in verharding van het bitumen, maar ook kan de adhesie tussen mastiek en mineraalaggregaat minder worden. Soms is het ene mechanisme relevant bij het testen van het proefstuk, soms het andere. Qua sterkte eigenschappen betekent dit dat de ruimtelijke spreiding groter wordt, naarmate het asfalt ouder is.

Dit inzicht noopte tot het maken van grafieken van de breukenergie als functie van de breukrek, om te kijken wat het effect is van de leeftijd van de bekleding. Figuur 6.7 toont dit voor alle vier de dijkvakken, waarbij ook regressielijnen zijn weergegeven.

(a)



(b)



Figuur 6.7 Alle vier de dijkvakken. Breukenergie versus breukrek uit de driepunts-buigproeven met regressieverbanden voor de verschillende leeftijden. (a) totale verloop; (b) detail uit (a) met eenzelfde legenda.

In Figuur 6.7 is te zien dat het POVW proefvak 4 toplaag de meeste hoge waarden heeft voor breukenergie en breukrek, alsmede dat er een min of meer rechtlijnig verband is te zien.

De vakken met oud WAB laten ook een min of meer rechtlijnig verband zien tussen breukenergie en breukrek, en per dijkvak is er goed onderscheid te maken tussen de opeenvolgende leeftijden. De regressielijnen roteren, waarbij de richtingscoëfficiënt afneemt bij hogere leeftijd. In Figuur 6.7 is te zien dat de spreiding rond het lineaire verband bij POVW vak 4 toplaag van 0 jaar oud duidelijk minder groot is dan voor het oude WAB. Toch is het resultaat niet voor alle proefstukken gelijk, d.w.z. op de schaal van de afmeting van de proefstukken is er een ruimtelijke spreiding. Dat de trendlijnen in Figuur 6.7 bij hoger wordende leeftijd minder steil lopen, dat wil zeggen dat er lagere waarden van de breukenergie zijn gemeten bij een gegeven breukrek, duidt mogelijk op een verlies aan adhesie tussen de mastiek en mineraalaggregaat door veroudering. Dit geeft grotere rekken, waarbij tegelijkertijd het balkje minder weerstand biedt tegen vervorming (in de driepuntsbuigproef). Dit geeft dan een lagere waarde van de breukenergie.

POVW proefvak 4 toplaag heeft het op één na steilste verloop, wat te verklaren valt met dat de leeftijd van dit materiaal 0 jaren is. De regressielijn bij 32 jaar van 't Schoor-Wierum loopt het steilst, zelfs steiler dan POVW vak 4 toplaag. Deze regressielijn fit echter maar 4 meetpunten en is hiermee wat minder nauwkeurig. Een fysische verklaring is ook mogelijk. Door physical hardening van het bindmiddel kunnen stijfheid en sterkte in de eerste decennia na aanleg toenemen. Afname van de sterkte en stijfheid, vooral door indringing van vocht en schade ten gevolge van thermische spanningen, treden pas later in de tijd op.

Als we de drie vakken met oud WAB te samen beschouwen is, ook nu, de volgorde in leeftijd te zien aan de helling van de regressielijnen, d.w.z. bij iedere toename in leeftijd wordt de richtingscoëfficiënt kleiner, waarbij 's Schoor-Wierum bij 46 jaar wat afwijkt.

Er kan geconcludeerd worden dat de afname van de richtingscoëfficiënt een maat is voor veroudering. Daarnaast zijn er bij hogere leeftijden meer lagere meetwaarden van de breukenergie en de breukrek te zien.

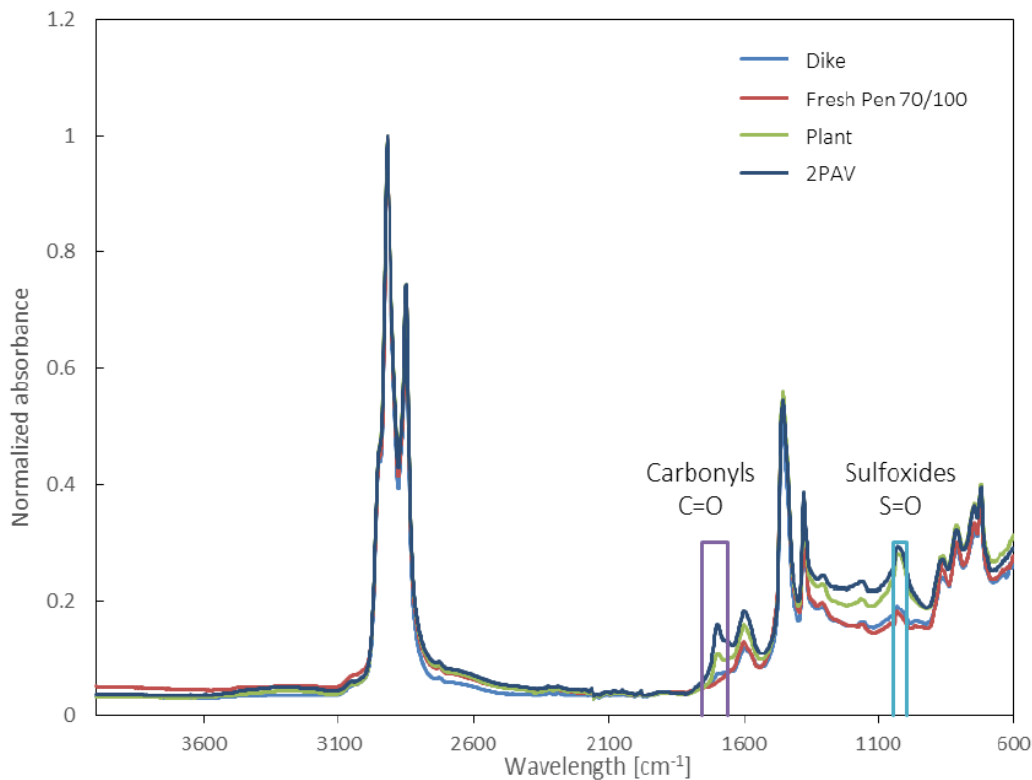
Een idee is om naast de buigtreksterkte een nieuwe sterktemaat (als quotiënt van breukenergie en breukrek) te introduceren en het levensduurmodel te zijner tijd hierop aan te passen. Dit is nog onderwerp van nader onderzoek.

Er kan ook gezocht worden naar verbanden met de al opgetreden natuurlijke veroudering van het bitumen, zoals is onderzocht op componentniveau. Dit wordt onderzocht in de volgende paragraaf.

6.2 FTIR-resultaten (componentniveau)

Er zijn FTIR-resultaten beschikbaar voor het geëxtraheerde bitumen van 't Schoor-Wierum, Eemshaven en Kaaphoofd (zie par. 2.2.5 voor een proefbeschrijving). Voor de POVW proefvakken is dit er nog niet, maar binnenkort wordt er wel een FTIR-onderzoek gedaan op deze vakken met een leeftijd van 5 jaar.

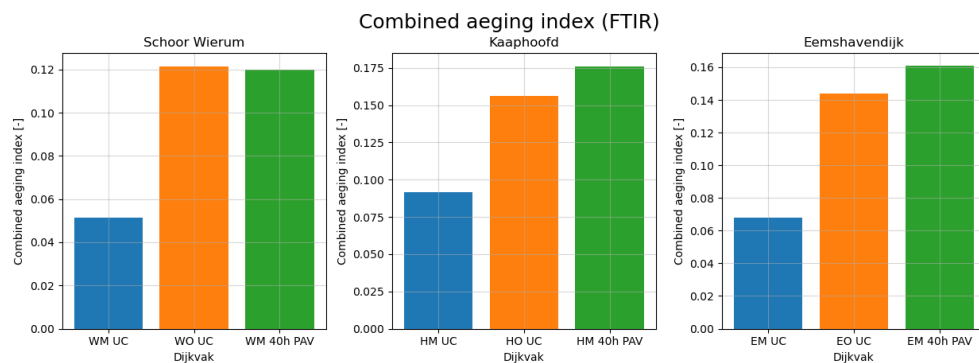
Een voorbeeld van een FTIR-absorptiespectrum is te zien in Figuur 6.8, ontleend aan [15].



Figuur 6.8 FTIR spectra for all bitumen types [15].

De in Figuur 6.8 getoonde absorptiepieken met Carbonyls en Sulfoxides maken deel uit van de combined aging index [8]. Deze geeft vooral inzicht in veroudering door de inwerking van zuurstof, waarbij een toename van deze index betekent dat er meer veroudering is opgetreden. Dit is een belangrijk verouderingsmechanisme in de conditionering met de zogenaamde pressure aging vessel (PAV). In Figuur 6.8 is te zien dat een conditionering met 2x PAV (= 40 uur in de PAV) leidt tot een sterke toename in de absorptie bij de Carbonyls en de Sulfoxides molecuulgroepen ten opzichte van vers bitumen, ofwel de veroudering is goed zichtbaar.

De resultaten voor de drie dijkvakken met oud WAB, zoals verkregen uit [8] zijn gegeven in Figuur 6.9. Er zijn resultaten te zien voor het bitumen uit het midden van de asfaltlaag en uit de onderzijde van de asfaltlaag. De conditionering met 40h PAV is gedaan voor het bitumen uit het midden van de asfaltlaag.



Figuur 6.9 Combined aging index voor 't Schoor-Wierum (W), Eemshaven (E) en Kaaphoofd (H). De notatie M betekent midden asfaltlaag, O is onderzijde asfaltlaag. UC = ongeconditioneerd, 40h PAV betekent conditionering met 40 uur in de PAV.

In Figuur 6.9 is te zien dat de combined aging index onderin de asfaltlaag veel groter is dan in het midden. Dit is onder meer het gevolg van het feit dat onderin de asfaltlaag meer zuurstof indringt, wat veroudering bevordert. Verder leidt de conditionering met 40 uur PAV van het bitumen uit het midden van de asfaltlaag tot een sterke toename van de Combined aging index. Dit alles geeft inzicht in de veroudering ten gevolge van de indringing van zuurstof. De PAV-conditionering van de bitumen uit het midden van de asfaltlagen toont een combined aging index die bijna net zo groot is als die voor het bitumen uit de onderzijde van de asfalt laag. Verder is het verschil in leeftijd terug te zien in de waarden voor de combined aging index, met voor alle 3 de bitumen (.M UC, ..O UC en ..M 40h PAV) een rangorde in leeftijd, waarbij Kaaphoofd (53 jaar oud) de hoogste waarden heeft, dan Eemshaven (50 jaar oud) en met de laagste waarden bij 't Schoor-Wierum (46 jaar oud).

Multivariate analyse (Principal Component Analysis PCA)

Figuur 6.10 toont de score plot die is verkregen uit de PCA resultaten. Dit toont hoe de data punten (samples) zijn verdeeld in het nieuwe coördinaten systeem dat is gedefinieerd met de principal components PC1 en PC2. De spreiding van de samples in de score plot is indicatief voor de onderlinge verbanden. Zoals aangegeven door de cirkels in Figuur 6.10, zijn de samples van de drie bronnen van elkaar gescheiden in de vorm van drie clusters. De verschillen tussen de clusters hangen samen met significante verschillen in chemische samenstelling.

Naast de oxidatieve veroudering uit de combined aging index, zijn er ook nog andere verouderingsmechanismen, die zich vooral uiten in de 3000 – 2800 cm⁻¹ en de nabij 3300 en 3530 cm⁻¹ delen van het absorptiespectrum. Deze spectrale zones zijn gerelateerd aan de moleculaire aliphatische structuur en de polaire functionele groepen van het bitumen. Dit komt tot uiting in een multi-variate analyse [8], principal component PC2. Principal component PC1 geeft aan in hoeverre de bron van het geteste bitumen verschilt, wat betekent dat verschillende dijkvakken andere waarden hebben. Tevens wordt de waarde van PC1 beïnvloed door veroudering, zoals oxidatieve aging (carbonyl, sulfoxide).

PC1 en PC2 zijn onafhankelijk, dus je kan verschillende bitumenbronnen met elkaar vergelijken qua veroudering. Figuur 6.10 geeft een indruk van het resultaat uit genoemde multi-variate analyse.

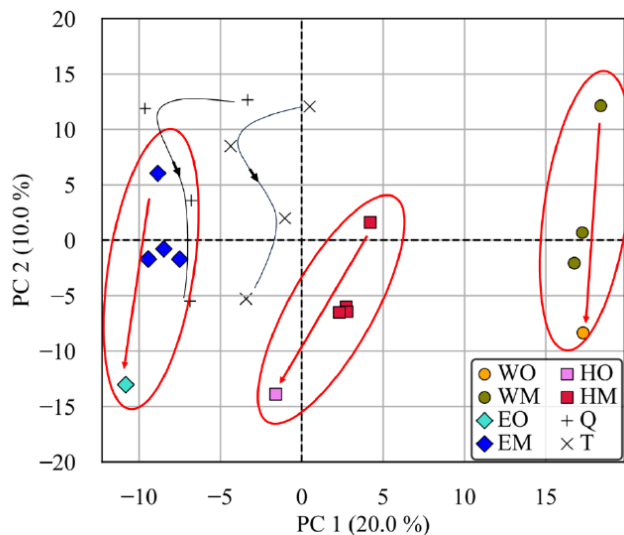


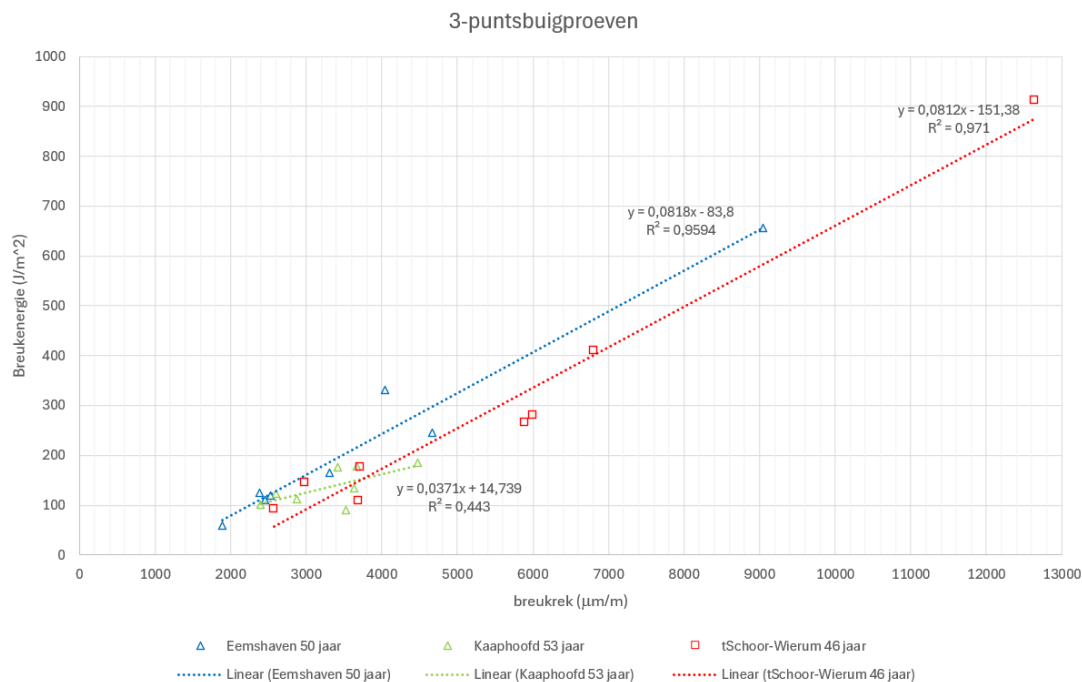
Figure 9. Score plot obtained from PCA analysis of all samples. Sample “WM C 20h” was not included in this figure due to its large deviation from the rest samples. The values at the brackets of x- and y- axes represent the variances encompassed by principal component 1 (PC 1) and principal component 2 (PC 2). Q and T are obtained from two bitumen sources, with each aged for 20, 40, and 80 hours using PAV.

Figuur 6.10 uit [8] Overzicht van resultaten van een multi-variate analyse van de FTIR-absorptiespectra voor 't Schoor-Wierum (W), Eemshaven (E) en Kaaphoofd (H). O = onderzijde asfaltlaag, M = midden asfaltlaag. De bovenste punten betreffen het ongeconditioneerde bitumen uit het midden van de asfaltlaag, de clusters met 2 of 3 punten eronder zijn de PAV-conditioneringen van dit bitumen (20 h PAV, 40h PAV en 40h PAV met vocht)

Ook voor dit verouderingsmechanisme is er een volgorde in leeftijd te zien. De PC2-waarden voor de niet geconditioneerde bitumen uit het midden van de asfaltlaag (rechts bovenin de clusters) tonen dat voor 't Schoor-Wierum (46 jaar) de veroudering het minst is (hogere waarde), dan komt Eemshaven (50 jaar oud) en het oudst is het bitumen van Kaaphoofd (53 jaar, laagste waarde).

Voor het bitumen onder uit de asfaltlaag is ook zo'n volgorde te zien (links onderin de clusters), waarbij wordt opgemerkt dat de PC2-waarden van Eemshaven en Kaaphoofd dichter bij elkaar liggen.

We kunnen dit vergelijken met de richtingscoëfficiënten in Figuur 6.11, zie Tabel 6.1.



Figuur 6.11. Dijkvakken 't Schoor Wierum, Eemshaven en Kaaphoofd .Breukenergie versus breukrek uit de driepunts-buigproeven met regressieverbanden bij de leeftijden waarbij de bitumenkwaliteit is onderzocht.

Tabel 6.1 De drie dijkvakken met oud WAB. Overzicht met de PC2 indicator van de veroudering van bitumen onder uit de asfalt laag en de richtingscoëfficiënt uit de grafiek met breukenergie tegen breukrek uit de driepunts-buigproeven.

Naam dijkvak	FTIR PC2	richtingscoëfficiënt
Eemshaven	-13	0,0818
Kaaphoofd	-14	0,0371
't Schoor Wierum	-8	0,0812

Uit Tabel 6.1 volgt dat er geen duidelijke relatie is tussen PC2 uit de FTIR en de richtingscoëfficiënt uit de grafiek met breukenergie versus breukrek (Figuur 6.11).

Er is in Figuur 6.10 ook een volgordelijkheid in PC2 voor het in de PAV geconditioneerde bitumen.

Verder lijkt het alsof het bitumen in het midden van de asfalt laag nog steeds flink aan het verouderen is op hoge leeftijd, n.l. vergelijk PC2 rechtsboven in de clusters W, E en H met de PAV-aging stappen voor referentie bitumen Q en T in Figuur 6.10. Het voordeel van deze multivariate analyse is dat bitumen van diverse chemische samenstelling kan worden vergeleken qua veroudering.

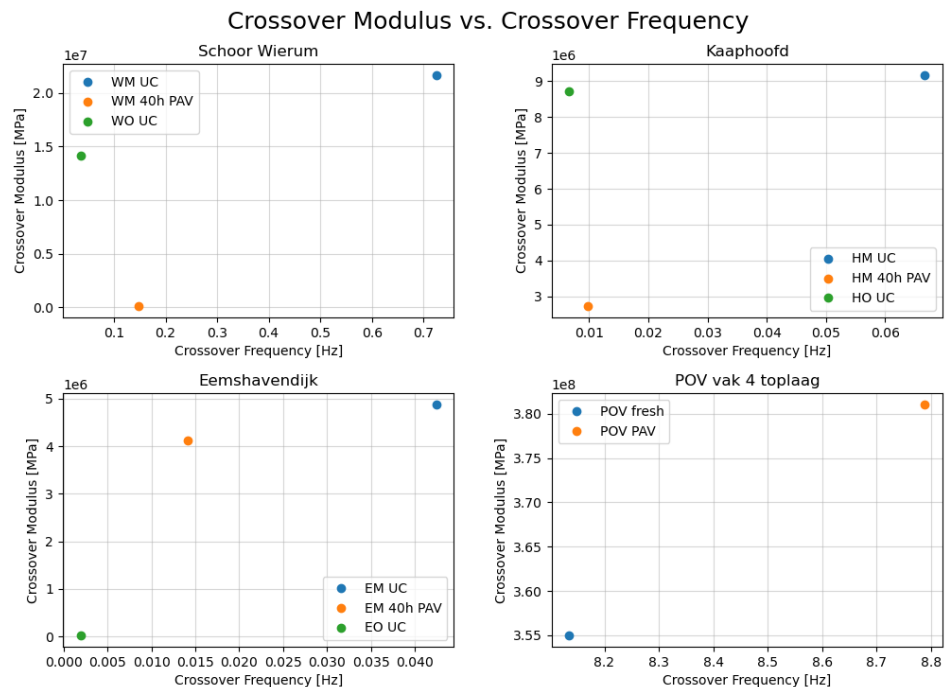
De veroudering in het midden van de asfaltlaag verloopt geheel anders dan onderin de laag. Langere moleculaire ketens reageren anders met zuurstof bijvoorbeeld, wat maakt dat de timing van alle min of meer gelijktijdig optredende verouderingsmechanismen (zie [8]) verschilt over de asfaltlaagdikte. Onderin de laag (onderste 13 mm) is de reactie met vocht en zuurstof dominant, in het midden is de verlenging van de moleculaire ketens dominant. De PAV stimuleert vooral de reactie met zuurstof. Ook bovenin de asfaltlaag verloopt de veroudering sneller, mede door de reactie met zuurstof.

Ter vergelijking met de resultaten uit de driepuntsbuigproeven waarin veroudering zichtbaar gemaakt is, kan gekeken worden naar het verschil in veroudering van het bitumen uit de

onderzijde van de asfalt laag voor de 3 dijkvakken. Allebei de verouderingsmechanismen tonen dat 't Schoor Wierum het minst is verouderd, dan komt Eemshaven en dan Kaaphoofd, waarbij Eemshaven en Kaaphoofd wat dichterbij elkaar liggen.

6.3 DSR-resultaten (componentniveau)

De DSR-proeven worden uitgevoerd op mastiek dat is gemaakt met het geëxtraheerde bitumen [8]. Uit de DSR-proeven volgen mastercurves met de stijfheidsmodulus en fasehoek als functie van de frequentie bij de verschillende temperaturen van beproeving. Uit deze resultaten kan de zogenaamde cross-over modulus worden afgeleid. Bij deze modulus behoort een fasehoek van 45° . De cross-over frequentie geeft aan hoe elastisch of viskeus het materiaal is. Als deze frequentie laag moet worden gekozen, dan is het asfalt erg stijf, en dat houdt in dat er sprake kan zijn van veroudering, verharding van het bitumen. Dit betekent dat het materiaal scheurgevoelig is en minder in staat is om energie te dissiperen. Tevens is de verwachting dat de cross-over modulus groter wordt ten gevolge van veroudering. Door veroudering neemt dus de scheurgevoeligheid toe. Figuur 6.12 toont de cross-over modulus en cross-over frequentie voor monsters uit alle vier de dijkvakken.



Figuur 6.12 Alle vier de dijkvakken. Cross-over modulus versus cross-over frequentie. M = midden asfaltlaag, O = onderzijde asfaltlaag. UC = ongeconditioneerd, 40h PAV = 40 uur in de PAV.

Als we naar de cross-over frequentie van het bitumen uit de onderzijde (WO UC, HO UC en EO UC) kijken, dan is deze voor de drie vakken met oud WAB lager dan de waarden van de monsters met het bitumen uit het midden van de asfalt laag. De ongeconditioneerde monsters uit het midden van de asfalt laag hebben de grootste cross-over frequentie, en de PAV-geconditioneerde monsters liggen ergens in het bereik tussen de monsters uit de onderzijde en monsters uit het midden van de asfalt laag. De cross-over frequentie van het POVW proefvak 4 toplaag is ordes hoger dan die voor de 3 vakken met oud WAB. Dit duidt op minder veroudering, wat wel klopt met de leeftijd van 0 jaar. De cross-over frequenties

voor POV fresh en POV PAV liggen relatief dicht bij elkaar, waarbij de veroudering juist een toename in frequentie laat zien.

Verder is het interessant of de vakken met oud WAB nog een aan de leeftijd gerelateerde volgorde in cross-over frequentie laten zien. Kaaphoofd en Eemshaven hebben cross-over frequenties in dezelfde orde van grootte. 't Schoor-Wierum heeft duidelijk hogere cross-over frequenties, maar wel weer ordes lager dan die voor POVW proefvak 4 toplaag. Wat verassend lijkt is het feit dat de cross-over modulus voor de drie vakken met oud WAB afneemt ten gevolge van veroudering, hetzij natuurlijke veroudering of met de PAV. Voor POVW proefvak 4 toplaag neemt deze modulus wel toe. Voor een afname van de cross-over modulus bij veroudering is nog geen afdoende verklaring gevonden [8]. In een recente paper [16] zie je ook niet altijd een toename van de cross-over modulus bij de diverse verouderingsmethoden.

Mogelijk kan het rekniveau in DSR-proef een rol spelen, want de verschillende (al dan niet verouderde) bitumen kan een ander rekniveau vergen. Immers, je kan bij te hoge rek vermoeiing veroorzaken en dat geeft een lagere stijfheid en daarmee een lagere cross-over modulus. Ieder bitumen reageert anders.

Tot nu toe lijkt de cross-over frequency het meest bruikbaar om een rangorde in veroudering aan te brengen. Kanttekening hierbij is dat, als er tijdens de DSR-proef inderdaad vermoeiingsschade in de proefstukken is geïntroduceerd, dit ook de cross-over frequency zal beïnvloeden. Voorzichtigheid met de interpretatie van deze resultaten is dus geboden totdat duidelijk is of de opgelegde rekken daadwerkelijk te groot zijn geweest of niet. Ook nu, net als bij de FTIR-verouderingsmechanismen, is 't Schoor-Wierum het minst verouderd. Kaaphoofd en Eemshaven hebben een vergelijkbare cross-over frequentie, met iets hogere waarden voor Kaaphoofd.

Deze inzichten voor de bitumen uit de onderzijde van de asfalt laag kunnen weer vergeleken worden met de resultaten uit de driepunts-buigproeven, zodat het effect van veroudering beter zichtbaar wordt.

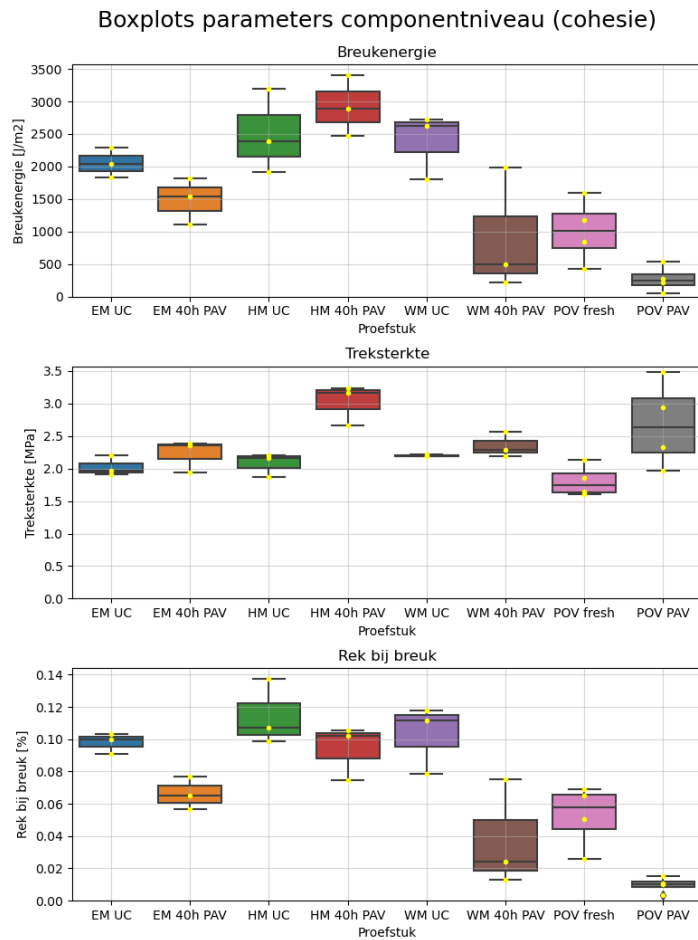
6.4 Cohesieproeven in DTT (componentniveau)

Met het geëxtraheerde bitumen wordt een standaard mastiek gemaakt om te testen in de DTT (zie paragraaf 2.2.3 en [8]). De treksterke, breukenergie en breukrek van de mastiek monsters geven inzicht in de cohesieve eigenschappen welke ook op mengselniveau van belang zijn. Daarnaast zijn de adhesieve eigenschappen van belang, maar deze konden nog niet goed getest worden.

Figuur 6.13 toont boxplots van de resultaten voor de vier dijkvakken, waarbij naast de treksterkte ook de breukenergie en de breukrek is gegeven.

Het valt op dat de treksterkte veelal in dezelfde range ligt, behalve voor HM 40h PAV. De breukenergie en breukrek voor de vier dijkvakken zijn wel duidelijk verschillend. Voor POVW proefvak 4 toplaag neemt de breukenergie duidelijk af na conditionering in de PAV. Dit wordt vooral veroorzaakt door de afname van de breukrek, want de treksterkte is iets toegenomen. Voor 't Schoor-Wierum en Eemshaven is er na conditionering in de PAV een afname van de breukenergie te zien, wat vooral veroorzaakt wordt door de afname in breukrek. Bij Kaaphoofd neemt de breukenergie juist toe, ten gevolge van de toename in treksterkte. De PAV-conditionering heeft het grootste effect voor 't Schoor-Wierum mastiek. Als de breukenergie en breukrek kleiner zijn, dan is de mastiek scheurgevoeliger. Dit zou kunnen betekenen dat de POVW vak 4 toplaag ongeconditioneerde mastiek scheurgevoeliger is dan de ongeconditioneerde mastiek (met bitumen uit het midden van de asfalt laag) van de drie vakken met oud WAB. Het WAB in het proefvak van de POV-Wadden lijkt dus in ieder geval scheurgevoeliger te zijn dan het WAB dat in de drie onderzochte dijkvakken is toegepast.

Het bitumen uit de onderzijde van de asfaltlagen is hier niet onderzocht, wat een vergelijking met de driepunts-buigproefresultaten lastiger maakt. In de volgende paragraaf is wel een poging gedaan zaken te vergelijken.



Figuur 6.13 Resultaten voor cohesieproeven op standaard mastiek voor de 4 dijkvakken. M = midden asfaltlaag, UC = ongeconditioneerd, 40h PAV = 40 uur in de PAV.

6.4.1 Relatie met driepunts-buigproeven

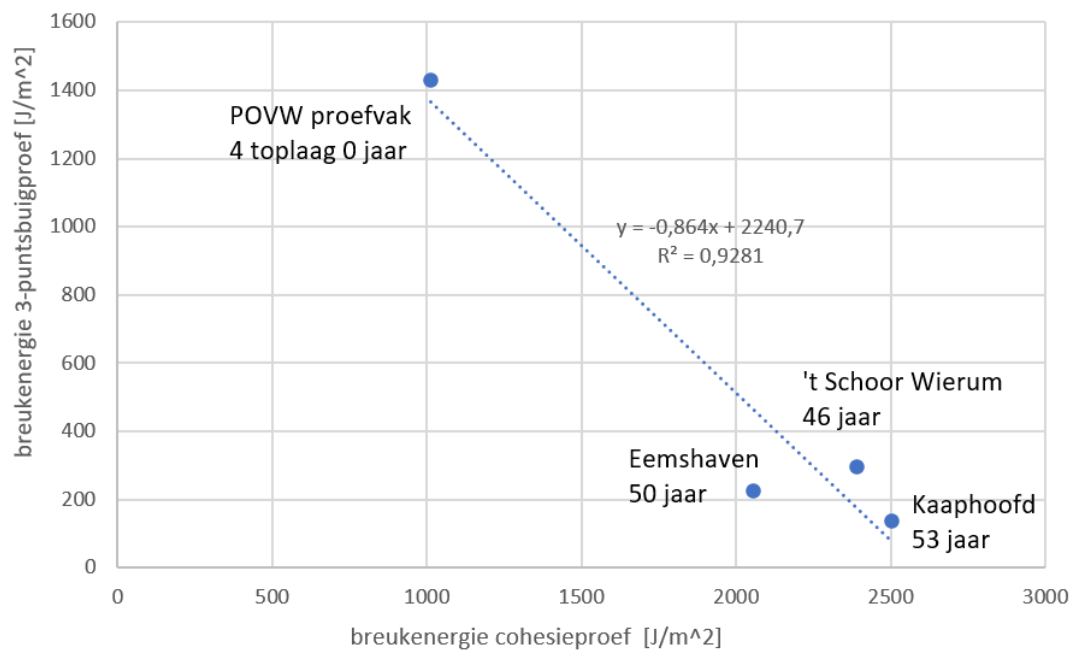
De resultaten uit de cohesieproeven voor het ongeconditioneerde bitumen uit het midden van de asfaltlaag kunnen met de driepunts-buigproeven op dijkvakniveau worden vergeleken. Let op dat de driepunts-buigproeven zijn uitgevoerd op proefstukken uit de onderzijde van de asfalt laag, terwijl de cohesieproeven zijn gedaan met bitumen uit het midden van deze laag. In eerste instantie is gekeken naar de scheurgevoeligheid die sterk gerelateerd is aan de breukenergie. Figuur 6.14 toont de gemiddelde breukenergie uit de driepunts-buigproeven uitgezet tegen de gemiddelde breukenergie uit de cohesieproeven.

De reksnelheid in de cohesieproeven op het POVW proefvak 4 toplaag asfalt was een factor 10 lager (0,3%/sec) dan de reksnelheid bij de proeven op de drie vakken met oud WAB (3%/sec). Een lagere reksnelheid levert minder weerstand in de mastiek op, dus een grotere rek en een lagere treksterkte. Dit heeft invloed op de grootte van de breukenergie, die naar verwachting lager wordt bij lagere reksnelheid.

Er is in Figuur 6.14, voor de 3 vakken met oud WAB, geen duidelijke opeenvolging te zien in de breukenergie uit de cohesieproeven met stijgende leeftijd, wat ook blijkt uit Figuur 6.12. De foutenmarges zijn echter zodanig groot dat onderscheid maken lastig is. Eemshaven heeft de laagste breukenergie en de kleinste foutenmarge, zie Figuur 6.13. Als in Figuur 6.14 de opeenvolging van de waarden uit de driepunts-buigproeven langs de y-as wordt beschouwd, dan is er wel een opeenvolging in leeftijd. De grote foutenmarges maken het lastig dit langs de x-as te zien.

Verder verwacht je een positief verband tussen de breukenergie uit de cohesietesten en die uit de driepunts-buigproeven, d.w.z. een stijgende trend. Dit is in Figuur 6.14 juist andersom. POVW proefvak 4 heeft een lagere waarde langs de x-as, wat kan samenhangen met het verschil in reksnelheid in de cohesieproeven.

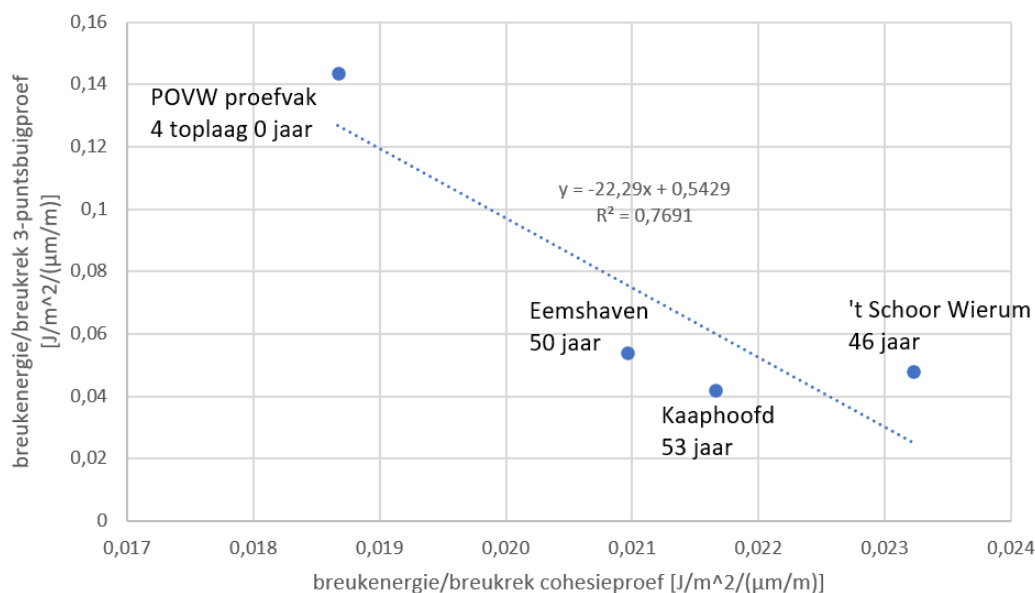
Verder is te zien dat de breukenergie uit de cohesietesten op het bitumen uit het midden van de laag hoger is voor de oudere vakken vergeleken met die van POVW vak 4, wat betekent dat de cohesieve scheurgevoeligheid van het asfalt uit het midden van de laag bij deze oudere vakken waarschijnlijk gunstiger is. Dit aspect is van belang voor de levensduur. Het bitumen uit het midden van de laag van de oudere vakken lijkt in dit opzicht van betere kwaliteit.



Figuur 6.14 Alle vier de dijkvakken. Gemiddelde breukenergie uit de driepunts-buigproeven uitgezet tegen de gemiddelde breukenergie uit de cohesieproeven.

Figuur 6.15 toont het gemiddelde van het quotiënt breukenergie gedeeld door de breukrek, met langs de x-as de waarden uit de cohesieproeven en langs de y-as de waarden uit de driepunts-buigproeven. Langs beide assen is er geen volgorde in leeftijd meer te zien. POVW proefvak 4 heeft een lagere waarde langs de x-as, wat kan samenhangen met het verschil in reksnelheid in de cohesieproeven. Ook in Figuur 6.15 is een neerwaartse trend te zien.

De onzekerheden voor de drie vakken met oud WAB zijn zo groot dat onderscheid nauwelijks mogelijk is.



Figuur 6.15 Alle vier de dijkvakken. Gemiddelde breukenenergie gedeeld door de gemiddelde breukrek uit de driepunts-buigproeven uitgezet tegen de gemiddelde breukenenergie gedeeld door de gemiddelde breukrek uit de cohesieproeven.

Naast het verschil in reksnelheid in de cohesie proeven zijn er nog andere oorzaken voor de afwijkende trend in Figuur 6.14:

In de driepuntsbuigproeven is ook de adhesieve sterkte van belang, iets wat tot nu toe niet goed getest kon worden. Er kunnen defecten zijn in de balkjes. Tevens speelt het holle ruimte percentage een rol. Bij het toenemen van de holle ruimte zal de invloed van adhesie in het resultaat van de driepunts-buigproef toenemen, omdat omgevingsinvloeden en vocht dan meer indringen en geleidelijk stripping kunnen bewerkstelligen.

In deze paragraaf vergelijken we zeer verschillende bitumen: POVW-vak 4 betreft bitumen dat direct na aanleg is geëxtraheerd (in 2019). Voor Eemshaven, Kaaphoofd en 't Schoor Wierum geldt dat de cohesieproeven zijn uitgevoerd op verouderd bitumen uit het midden van de asfalt laag, terwijl de 3-puntsbuigproeven zijn uitgevoerd op balkjes uit de onderzijde van de asfalt laag. Aan de onderzijde is er een ander soort veroudering opgetreden dan in het midden, dus de resultaten zijn lastig met elkaar te vergelijken. Verder is het oorspronkelijke bitumen dat is gebruikt in de asfaltnolen ook verschillend, dus je verwacht daarom ook verschillen na veroudering. De aanlegjaren zijn: voor Kaaphoofd 1970, voor Eemshaven 1970 en voor 't Schoor-Wierum 1977. Vanaf de jaren '70 is het raffinageproces sterk veranderd, dus ook het bitumen. Ook al hanteren we (nog steeds) dezelfde penetratie (PEN), maar het bitumen in 2019 acteert verschillend, d.w.z. waarschijnlijk is deze minder ductiel.

Zeker als er ook nog asfaltgranulaat wordt toegevoegd, zoals voor de andere POV-Wadden proefvakken, is nog niet duidelijk of een levensduur van 50 jaar kan worden behaald, omdat er nog geen langere termijn ervaring is met dit type dijkvakken. De onderzoeksresultaten met een grotere cohesieve breukenenergie voor het bitumen uit het midden van de laag bij de oudere vakken, tonen aan dat het noodzakelijk is om aanvullende eisen te stellen aan nieuwe mengsels qua cohesieve scheurgevoeligheid van bitumen en mastiek, om zo meer garanties te hebben voor een levensduur van 50 jaar.

6.5 Conclusies

Door de dijkvakken 't Schoor-Wierum, Eemshaven, Kaaphoofd, en het POVW proefvak 4 toplaag te vergelijken, is veroudering zichtbaar gemaakt, zowel in de driepuntsbuigproefresultaten als op componentniveau met het FTIR-onderzoek en het DSR-onderzoek. Dit geeft vertrouwen in de relevantie van dit onderzoek om op componentniveau om eisen te stellen aan de bitumenkwaliteit.

De breukenergie en de breukrek uit de driepunts-buigproeven voor de vier dijkvakken zijn goede indicatoren van de scheurgevoeligheid en laten een effect zien van veroudering. De buigtreksterkte alleen geeft onvoldoende onderscheid. Er is geen duidelijke relatie van de richtingscoëfficiënten in de grafiek met breukenergie versus breukrek uit de driepunts-buigproeven en de waarden van de verouderingsindicator PC2 uit de FTIR-metingen voor de drie vakken met oud WAB.

Uit het DSR-onderzoek blijkt dat de cross-over frequentie een goede indicator is van de opgetreden veroudering. Kanttekening is dat nog moet worden onderzocht of de DSR-proeven zijn uitgevoerd bij de juiste rekniveaus.

Een multivariate analyse van de FTIR-resultaten laat zien dat de natuurlijke veroudering onder in de asfalt laag (slices van 13 mm) heel substantieel is, veel groter dan na 40 uur conditionering in de PAV.

Uit het FTIR-onderzoek en DSR-onderzoek volgt dat ook op hoge leeftijd het WAB nog substantieel veroudert.

Het DTT-onderzoek naar de cohesieve eigenschappen van de mastiek was minder bruikbaar, omdat de foutenmarges fors waren en omdat er alleen bitumen uit het midden van de asfaltlaag is onderzocht. Voor een duiding van de driepunts-buigproefresultaten is vooral de bitumen onder uit de asfaltlaag van belang.

De onderzoeksresultaten met een grotere cohesieve breukenergie voor het bitumen uit het midden van de laag bij de oudere vakken ten opzichte van de waarde voor recent bitumen (POV proefvak 4 toplaag), tonen aan dat het noodzakelijk is om aanvullende eisen te stellen aan nieuwe mengsels qua cohesieve scheurgevoeligheid van bitumen en mastiek, om zo meer garanties te hebben voor een levensduur van 50 jaar.

Effect veroudering op bitumenkwaliteit

Een doelstelling van dit onderzoek was na te gaan wat het effect van de bitumenkwaliteit is op de op mengselniveau geconstateerde veroudering door middel van verschillende proeven. Deze proeven worden in het rapport duidelijk beschreven. Opgemerkt wordt dat de adhesieproeven (steen-bitumen) niet bruikbaar zijn gebleken, wat jammer is, omdat de langzame achteruitgang door veroudering in de samenhang op proefstukniveau aan adhesie gerelateerd is.

Er is een viertal dijkvakken onderzocht, met leeftijden 0, 46, 50 en 53 jaar (voor respectievelijk POVW-proefvak 4 toplaag, 't Schoor-Wierum, Eemshaven en Kaaphoofd). De jaren van aanleg zijn respectievelijk 2019, 1977, 1970 en 1970. Bekend is dat de bitumenkwaliteit na de oliecrisis van 1973 is veranderd. Ook het recente bitumen is weer anders dan wat in de jaren '70 is toegepast.

Het effect van natuurlijke veroudering is in kaart gebracht door bitumen uit slices over de laagdikte te onderzoeken. Uit FTIR-onderzoek blijkt dat onderin de grootste veroudering optreedt, maar ook in het midden van de asfaltlaag is veroudering duidelijk zichtbaar. Het bitumen van dijkvak 't Schoor-Wierum blijkt het minst verouderd te zijn, maar is wel gevoeliger voor kunstmatige veroudering met de PAV (Pressure Aging Vessel). Het Kaaphoofd bitumen is het sterkst verouderd.

De DSR-proeven op de met het bitumen gemaakte mastiek tonen ook een effect van veroudering, maar er zijn nog vragen over de proefuitvoering.

De cohesieproeven op de mastiek laten zien dat het bitumen uit het POVW-proefvak 4 toplaag een lagere rek en breukenergie heeft, d.w.z. lager dan die voor het bitumen uit het midden van de asfaltlaag van de drie oudere dijkvakken. Een hogere breukenergie en rek betekent dat de mastiek minder scheurgevoelig is.

De resultaten uit het adhesieonderzoek zijn niet verder geïnterpreteerd, omdat men twijfels had over de proefuitvoering.

Samenvattend kan gesteld worden dat het FTIR-onderzoek, DSR-onderzoek en cohesieonderzoek verschillen in bitumenkwaliteit zichtbaar heeft gemaakt. Tevens is voor de drie vakken met oud WAB duidelijk verschil in veroudering geconstateerd, en met behulp van een multi-variate analyse was een vergelijking van deze drie vakken mogelijk. Er is hierbij een duidelijke opeenvolging te zien van veroudering na 46, 50, en 53 jaren.

Effect veroudering op mengselniveau

Op mengselniveau is de veroudering zichtbaar gemaakt door een vergelijking te maken van de volgende grootheden die uit de driepunts-buigproeven zijn afgeleid: buigtreksterkte, breukrek en breukenergie. Er zijn voor de drie oudere vakken meetwaarden uit meerdere meetsessies in de tijd beschikbaar en geanalyseerd. Op basis van de buigtreksterkte alleen was het lastig om veroudering zichtbaar te maken. De breukenergie en breukrek bleken meer inzicht hierin te geven. De op basis van deze twee grootheden geconstateerde veroudering correspondeert met wat op componentniveau is waargenomen. Er is een opeenvolging qua leeftijd te zien, ook als we alle vier vakken te samen beschouwen.

Er is echter geen duidelijke relatie van de richtingscoëfficiënten in de grafiek met breukenergie versus breukrek uit de driepunts-buigproeven en de waarden van de verouderingsindicator PC2 uit de FTIR-metingen voor de drie vakken met oud WAB.

Vergelijking met het levensduurmodel

Verder is een vergelijking gemaakt tussen de gemeten buigtreksterkte en de predictie met het levensduurmodel (zoals ontwikkeld voor het geheel van 73 dijkvakken). Voor alle vier de dijkvakken was de predictie te gunstig. De verwachting is dat er ook dijkvakken van de 73 dijkvakken zijn waarbij de predictie (deels) ongunstiger is. Het levensduurmodel geeft voor 73 dijkvakken als geheel een evenwichtig beeld, d.w.z. dat er ook dijkvakken zijn waarbij de predictie (deels) ongunstiger is. Het is gewenst dat er nader onderzoek plaatsvindt naar de betrouwbaarheid van de voorspelling van de buigtreksterkte per individueel dijkvak. Idealiter beschikken we over een levensduurmodel waarbij er bij elk dijkvak zowel een onderschatting als een overschatting van de meetwaarden is te zien, kortom een meer evenwichtig beeld. Dit vergt wel dat we de nodige kennis hebben van deze individuele dijkvakken, en dat we naast het standaard holle ruimte percentage en de leeftijd, nog meer verklarende parameters vinden. In het verleden is een groot deel van de 73 dijkvakken maar beperkt gedocumenteerd.

In de metingen per dijkvak is geen duidelijke trend als functie van holle ruimte te zien, d.w.z. als het holle ruimte percentage hoger is, is de buigtreksterkte niet altijd lager en soms heb je twee heel verschillende waarden van de buigtreksterkte bij eenzelfde holle ruimte percentage. Er is uiteraard wel een trend in de predictie, d.w.z. bij eenzelfde leeftijd voorspelt het predictiemodel bij een hoger holle ruimte percentage een lagere waarde van de buigtreksterkte.

Eisen aan bitumenkwaliteit

Gezocht is naar een referentie voor de eisen die aan de bitumenkwaliteit moeten worden gesteld. De resultaten uit de cohesieproeven voor het bitumen uit het midden van de asfaltlaag van de drie oudere vakken, laten zien dat dit bitumen van betere kwaliteit was bij aanleg dan het in 2019 voor het POVW-proefvak toegepaste bitumen.

De onderzoeksresultaten met een grotere cohesieve breukenergie voor het bitumen uit het midden van de laag bij de oudere vakken ten opzichte van de waarde voor recent bitumen (POV proefvak 4 toplaag), tonen aan dat het noodzakelijk is om aanvullende eisen te stellen aan nieuwe mengsels qua cohesieve scheurgevoeligheid van bitumen en mastiek, om zo meer garanties te hebben voor een levensduur van 50 jaar.

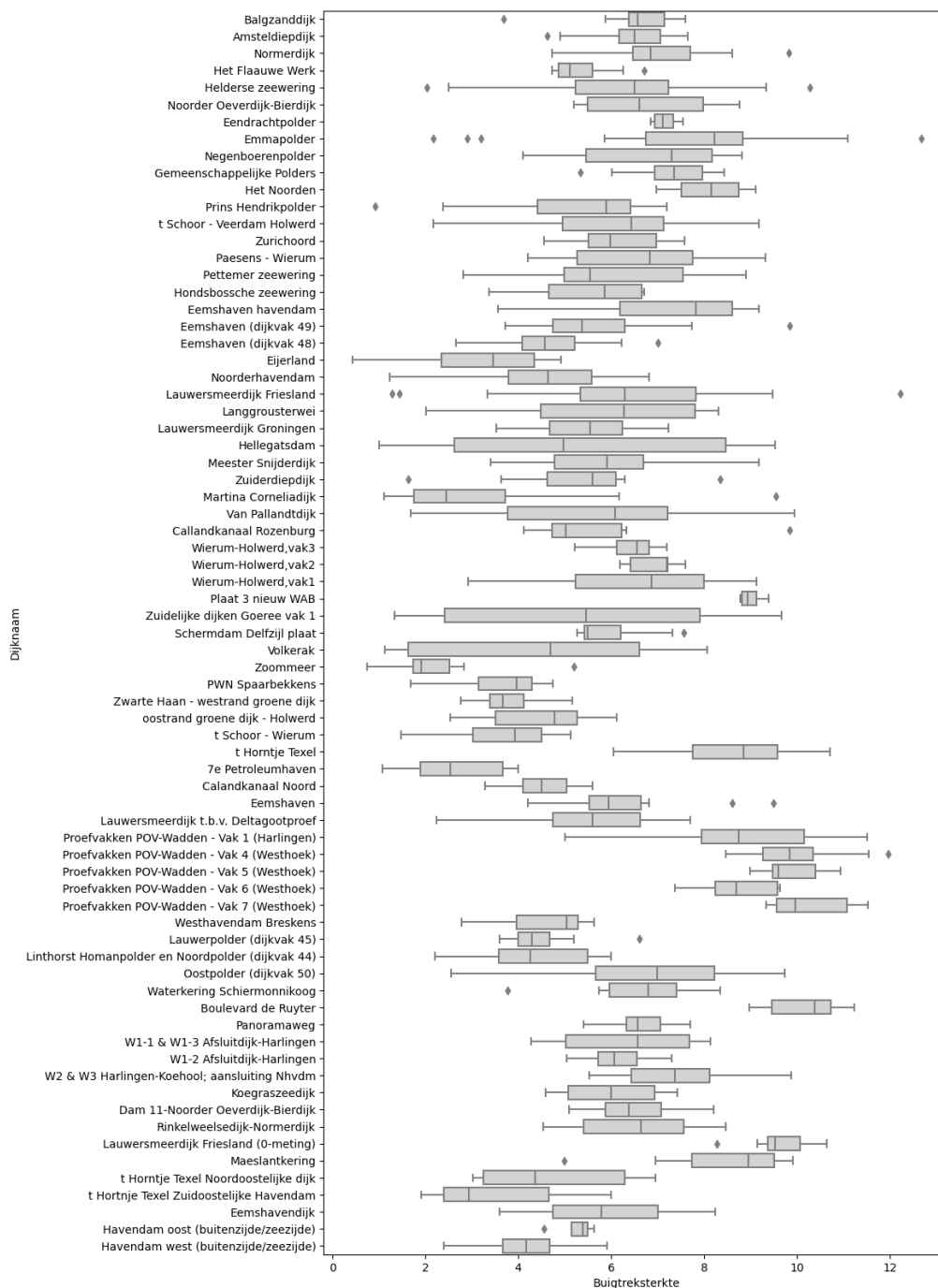
Daarnaast geven de resultaten voor het natuurlijk verouderde bitumen uit de onderzijde van de asfaltlaag inzicht in welke procedure nodig is bij kunstmatige veroudering, zoals in de PAV. Dit is bediscussieerd in het rapport van de TU Delft [8]. Verder wordt aanbevolen om ook voor warm WAB proeven op componentniveau uit te voeren.

8 Referenties

- [1] Projectplan Klimaatneutraal en circulair Waterbouwasfalt versie 1.0; 14-06-2023; opstellers: Marten Hoeksema (RWS WV) en Barry Ros (Wetterskip Fryslân).
- [2] PCR Asphalt, versie 2.0; Product Category Rules voor bitumineuze materialen in verkeersdragers en waterwerken in Nederland ("PCR Asphalt").
- [3] Schematiseringshandleiding asfaltbekleding WBI 2017; Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat; Rijkswaterstaat; datum 28 november 2019; status definitief v 2.1.
- [4] Klimaatneutraal en circulair waterbouwasfaltbeton; onderdeel: (Half)warm waterbouwasfaltbeton; Deltares 10-08-2023; auteurs: Frans van den Berg en Bernadette Wichman; 11209262-004-ZWS-0001.
- [5] <https://www.crow.nl/asfalt-impuls/projecten/asfaltkwaliteitsloket>.
- [6] Personal communication van Arjan de Looft van Infram-Hydrén.
- [7] Plan van aanpak levensduur warm waterbouwasfaltbeton; Infram-Hydrén; datum 26 juni 2023; concept, versie 2; kenmerk: 230620-22i826-PVA levensduur warm WAB.
- [8] Laboratoriumonderzoek veroudering Waterbouwasfalt (WAB); TU Delft December 2024; Reference number:31190720; Auteurs: Dr. Avishreshth Singh, Dr. Aikaterini Varveri en Dr. Lili Ma.
- [9] POV-Waddenzeedijken Asfaltbekleding fase D (monitoringsfase): Testing programme for assessing the durability of asphalt innovations for dike revetments; TU Delft Januari 2020; Referentie nummer 00165558; Auteur: Dr. Aikaterini Varveri.
- [10] Studie levensduuraspecten van waterbouwasfaltbeton; met meetdata van drie dijkvakken met oud WAB; Deltares April 2024; auteur: dr. Bernadette Wichman; 11209268-024-GEO-0001.
- [11] Rapport met specificatie boringen bij de drie vakken met oude WAB ten behoeve van bitumenextractie toevoegen: taak Infram-Hydrén
- [12] Rapportage evaluatie testmethoden POV Wadden; Infram-Hydrén, augustus 2024, concept, projectnr. 22i822.
- [13] Verklarende parameters levensduur WAB op componentniveau; Infram-Hydrén Augustus 2024; projectnr. 23i731.
- [14] Levensduurmodel waterbouwasfaltbeton; Doorontwikkeling op basis van gegevens uit veiligheidsbeoordeling; Deltares 2023; 11209268-012-GEO-0001.
- [15] POV-Waddenzeedijken Asfaltbekleding fase B2: Development of test methods for assessing the durability of asphalt dike revetments; Test methods and results for assessing durability of asphalt mixture components; TU Delft 2019; Reference number: 00112651.
- [16] Sadaf Khalighi, Sandra Erkens & Aikaterini Varveri; Exploring the impact of humidity and water on bituminous binder aging: a multivariate analysis approach (TI CAB); Road Materials and Pavement Design 2024; <https://doi.org/10.1080/14680629.2024.2364189>.

A Bijlage met dijkvakken

Onderstaande Figuur geeft alle data uit de 2023 dataset per dijkvaknaam weer in de vorm van boxplots met de buigtreksterkte (MPa).



Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl