

VERGELIJKING STERKTE IN HET LABORATORIUM GEPRODUCEERD HEET EN WARM WAB



RAPPORT

2025
14

VERGELIJKING STERKTE IN HET LABORATORIUM
GEPRODUCEERD HEET EN WARM WAB

RAPPORT

2025

14

ISBN 978.94.6479.092.4



COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEURS Ir. M. Slokker,
Ing. A.K. de Looff
dr. B.G.H.M. Wichman (Deltares)

BEGELEIDINGSKOMMISSIE
Hendrik Meuwese, Waterschap Scheldestromen
Bob Kuiper, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
Oscar van Dam, STOWA

VORMGEVING Buro Vormvast
STOWA STOWA 2025-14
ISBN 978.94.6479.092.4

De inhoud van deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden in de publicatie, of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud ervan.

STOWA spant zich in de rechthebbenden van in de uitgave gebruikte afbeeldingen te respecteren conform het auteursrecht. Indien u desondanks van mening bent dat uw rechten in het geding zijn, dan verzoeken wij u contact met ons op te nemen.

TEN GELEIDE

Nederland wil in 2050 klimaatneutraal zijn. Daarbij is als circulaire doelstelling afgesproken de hoeveelheid gebruikte primaire abiotische grondstoffen zoals mineralen, metalen en fossiel, in 2050 met de helft te verminderen ten opzichte van 1990.

Ook bij de Nederlandse dijken wordt gekeken of de gangbare werkwijze bij aanleg en verbetering kan bijdragen aan deze landelijke doelstellingen. Het gebruik van waterbouwasfaltbeton (WAB), dat veel wordt gebruikt als dijkbekleding tegen golfslag aan de Nederlands kust, is daarvan een voorbeeld.

De sector wegebouw maakt al langer gebruik van asfalt dat wordt geproduceerd op een lagere productietemperatuur ('warm WAB'). Ook hergebruikt de sector meer bestaand asfalt. Beide methoden dragen bij aan de landelijke doelstellingen en worden op beperkte schaal toegepast bij dijken. De levensduur van warm WAB is echter onbekend, terwijl die bepalend kan zijn voor de milieu-impact.

In opdracht van STOWA is laboratoriumonderzoek gedaan naar de kwaliteit van nieuwgeproduceerd warm WAB, in vergelijking met heet WAB. Ook is gekeken naar een hogere recycle fractie. De belangrijkste conclusies en aanbevelingen van dit rapport geven aan dat er verschillen zijn tussen warm en heet WAB, die effect hebben op materiaalgedrag. De verschillen zijn klein en op basis van het onderzoek is een levensduur van ten minste 40 jaar voor zowel het onderzochte warme als heet WAB haalbaar.

Aangezien er sprake is van toenemend gebruik van warm WAB en asfaltgranulaat en de kwaliteit van modern bitumen minder goed is dan vroeger, pleiten de auteurs voor aanvullende eisen, ter aanvulling van de huidige standaard RAW-bepalingen.

Mark van der Werf
Directeur STOWA

STOWA IN HET KORT

HOE WE WERKEN

STOWA is het kennis- en innovatiecentrum voor regionale waterbeheerders in Nederland; de waterschappen en provincies. We helpen ze met het verkrijgen van nieuwe kennis en inzichten die nodig zijn om de opgaven van de regionale waterbeheerders beter te kunnen uitvoeren. Dat doen we door kennisvragen te formuleren en te selecteren in programmacommissies. We zetten ons onderzoek uit bij een keur aan experts, adviesbureaus, instituten en universiteiten, die we begeleiden tijdens hun werk. We zorgen voor de beschikbaarstelling en verspreiding van de kennis, inzichten en antwoorden aan de gezamenlijke waterbeheerders. We stimuleren de uitwisseling van kennis en ervaringen, via bijeenkomsten, werkgroepen, excursies, conferenties en communities of practice. We werken samen met onder andere ministeries, Rijkswaterstaat, gemeenten, drinkwaterbedrijven.

WAT WE ONDERZOEKEN

Inhoudelijk richt STOWA zich op alle onderdelen van waterbeheer, van waterkering en stedelijk waterbeheer tot waterzuivering en watersystemen. Belangrijke thema's daarbij zijn klimaatadaptatie, waterveiligheid, waterkwaliteit en ecologie, energietransitie en circulaire economie.

De kennisvragen die STOWA beantwoordt liggen meestal op technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk gebied. Onze kennis is altijd gericht op de praktijk van regionale waterbeheerders. Dat is waar we voor staan, als Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer.

WIE WE ZIJN

STOWA is als kennisorganisatie onafhankelijk, onpartijdig en transparant. De afnemers van onze kennis moeten erop kunnen vertrouwen dat de inhoud van onze rapporten objectief en representatief is. Alleen zo kan onze kennis worden ingezet voor beter waterbeheer en innovaties die antwoord geven op de uitdagingen van vandaag en morgen. Het is aan regionale waterbeheerders zelf te bepalen hoe ze de kennis van STOWA in de praktijk gebruiken. STOWA kan daarbij een rol spelen als adviseur, maar is geen uitvoerder of regisseur.

STOWA is een stichting die de richtlijnen volgt voor organisaties zonder winstoogmerk (RJ-640). In ons jaarverslag is daarom naast de cijfermatige jaarrekening onder meer ook een directieverslag over de stichting, haar activiteiten en kentallen opgenomen.

VERGELIJKING STERKTE IN HET LABORATORIUM GEPRODUCEERD HEET EN WARM WAB

INHOUD

	COLOFON	
	TEN GELEIDE	
	STOWA IN HET KORT	
1	INLEIDING	1
1.1	Aanleiding en context project	1
1.2	Doel van het project	2
1.3	Aanpak	3
2	VERVAARDIGEN VAN PLATEN EN LABORATORIUMONDERZOEK	4
2.1	Inleiding	4
2.2	Samenstelling	4
2.3	Productie van de platen	5
2.4	Laboratoriumonderzoek	5
3	RESULTATEN	6
3.1	Driepunts-buigproef	6
3.2	Vermoeiingseigenschappen	6
3.3	Buigtreksterkte	7
4	ANALYSE VAN DE RESULTATEN	8
4.1	Dataset voor vergelijking	8
4.2	Vermoeiingseigenschappen	8
4.3	Buigtreksterkte	8
4.4	Breukenergie	9
4.4.1	Heet versus warm geproduceerd WAB	10
4.4.2	WAB uit het laboratorium versus WAB van de dijk	11
4.4.3	Nieuw versus oud WAB	12
4.5	Analyse water- en vorstgevoeligheid	13

5	VERGELIJKING DATA MET LEVENSDUURMODEL	17
5.1	Duiding van de verschillen in buigtreksterkte heet en warm WAB	17
5.2	Andere verklarende parameters	20
5.3	Beschouwing levensduur van warm WAB	23
6	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	24
6.1	Conclusies	24
6.2	Aanbevelingen	25
7	REFERENTIES	26
BIJLAGE A	ASFALTMENGSELKAART [15]	27
BIJLAGE B	RAPPORTAGE VOORONDERZOEK [16]	30
BIJLAGE C	RAPPORTAGE LABORATORIUMONDERZOEK KIWA KOAC [17]	34

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), inzake K&C WAB, met als target K&C WAB vanaf 2025 in het kader van een dijkversterking aan te leggen.

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 procesmatige 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 leef-tijden.

Tabel 1.1 geeft een overzicht van asfalt dat gemaakt wordt bij verschillende productie-temperatuur. 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].

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.

TABEL 1.1

INDELING OP BASIS VAN PRODUCTIETEMPERAATUUR (CROW).

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

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. Analoog 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 belangrijke doelstelling 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 is het verkrijgen van inzicht in de invloed van de verlaging van de productietemperatuur op sterkte en de levensduur van waterbouwasfaltbeton (WAB). Daarnaast wordt nagegaan of het mogelijk is om het levensduurmodel aan te passen, zodat deze ook geschikt is voor een bij een lagere temperatuur geproduceerd asfalt.

1.3 AANPAK

Voor dit project wordt WAB met eenzelfde samenstelling en holle ruimte geproduceerd bij verschillende temperaturen. Hiervan wordt uit de driepunts-buigproef de buigtreksterkte bepaald, alsmede andere mogelijk verklarende parameters. Tevens worden de resultaten uit de in een ander deelproject uitgevoerde water- en vorstgevoeligsproeven gebruikt.. Ook worden de driepunts-buigopstelling de vermoeiingseigenschappen van het WAB bepaald. Deze resultaten worden geanalyseerd. Daarnaast worden de mogelijkheden verkend om het levensduurmodel geschikt te maken voor bij lagere temperatuur geproduceerd WAB.

2

VERVAARDIGEN VAN PLATEN EN LABORATORIUMONDERZOEK

2.1 INLEIDING

In de week van 20 november 2023 zijn in het laboratorium van AsfaltNu in Culemborg 4 platen waterbouwasfaltbeton (WAB) gemaakt voor dit onderzoek. Het betreft twee platen heet WAB en twee platen warm WAB, elk met een afmeting van circa 350x500 mm. In dit hoofdstuk is de informatie over samenstelling en productie van de platen vastgelegd.

Door Kiwa KOAC zijn proefstukken uit de platen in het laboratorium getest. De werkwijze is in dit hoofdstuk beknopt samengevat.

2.2 SAMENSTELLING

De samenstelling van het asfaltmengsel en de toegepaste bouwstoffen zijn samengevat in de asfaltmengselkaart, zie bijlage A. De samenstelling is samengevat in tabel 2.1.

TABEL 2.1 SAMENSTELLING VAN HET WATERBOUWASFALTBETON

Fractie	aandeel in het mengsel	
	% (m/m op*)	% (m/m in**)
steenslag	50,0	46,9
zand	42,0	39,4
vulstof	8,0	7,5
bitumen	6,5	6,1
Totaal:	106,5	100,0

* "op" betekent de fractie ten opzichte van de massa van de minerale fractie (som van steenslag, zand en vulstof);

** "in" betekent fractie ten opzichte van de totale massa van het mengsel.

Om tot deze samenstelling te komen is een vooronderzoek uitgevoerd. De rapportage van het vooronderzoek is opgenomen in bijlage B.

Het mengsel bestaat voor 50% uit asfaltgranulaat 0/16 Cat C, een uit de wegenbouw afkomstig asfaltgranulaat met als herkomst onderlagen in de wegconstructie. Er is gekozen voor dit type asfaltgranulaat in verband met de beschikbaarheid. In de toekomst zullen ook onderzoeken plaatsvinden met asfaltgranulaat afkomstig van WAB. In het hier gebruikte asfaltgranulaat kunnen ook ronde (ongebroken) stenen in het freesasfalt zitten. De samenstelling van het asfaltgranulaat is vastgelegd in de rapportage van het vooronderzoek. Het bitumen dat aanwezig is in het asfaltgranulaat, is verouderd en heeft daardoor een lage penetratiewaarde (gemiddeld 18). Voor waterbouwasfaltbeton is de eis dat er een bitumen 70/100 moet worden toegepast zodat de penetratie na productie en verwerking hoger is dan 45. Om dit te realiseren is het toegevoegd bitumen zeer zacht namelijk 160/220. Het is gebruikelijk om op deze manier op de gewenste penetratiewaarde van het gemengde bitumen te komen.

2.3 PRODUCTIE VAN DE PLATEN

Door AsphaltNu zijn vier platen geproduceerd: twee platen heet WAB en twee platen warm WAB. De productietemperatuur voor het heet WAB lag op circa 175 graden Celsius. Het warm WAB is geproduceerd met behulp van bitumenverschuiming bij een productietemperatuur van circa 120 graden Celsius.

Bij productie van de platen is gestuurd op een verdichtingsgraad van 99%, met als doel een holle ruimte van circa 3%. Uiteindelijk is een lager holle ruimte percentage rond de 2% gerealiseerd.

2.4 LABORATORIUMONDERZOEK

Vanaf de tweede week van december 2023 (ten minste 14 dagen na productie van de asfaltplaten) zijn de proefstukken uit de platen beproefd in het laboratorium van Kiwa KOAC. Uit de platen zijn 32 proefstukken gezaagd waarvan de buigtreksterkte en vermoeiingseigenschappen met de driepunts-buigproef zijn bepaald volgens de geldende voorschriften voor waterbouwasfaltbeton. In bijlage C is de rapportage van Kiwa KOAC met daarin de resultaten van het onderzoek opgenomen. Deze rapportage bevat tevens het onderzoeksplan dat voortgaand aan de proefuitvoering is opgesteld.

In hoofdstuk 3 zijn de resultaten van het onderzoek opgenomen.

3

RESULTATEN

3.1 DRIEPUNTS-BUIGPROEF

De driepunts-buigproef is een test om de buig eigenschappen van een materiaal te bepalen. Bij deze proef wordt een materiaalmonster, meestal een balk of staaf, 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 langzaam en 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. Tevens zijn met een andere proef in de driepunts-buigopstelling de vermoeiingseigenschappen van het WAB bepaald.

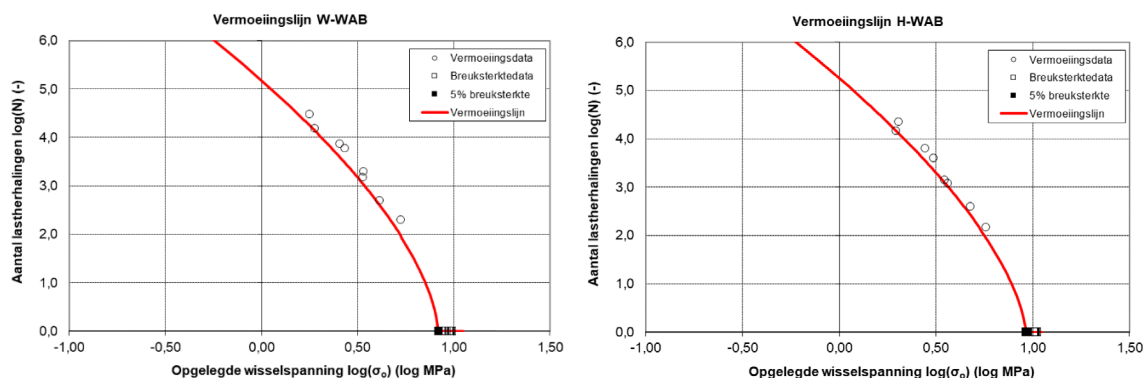
3.2 VERMOEIINGSEIGENSCHAPPEN

De vermoeiingsparameters van de asfaltbekleding zijn opgenomen in Tabel 3.1.

TABEL 3.1 VERMOEIINGSPARAMETERS

Plaat	α	β
W-WAB	0,62	5,46
H-WAB	0,64	5,38

FIGUUR 3.1 VERMOEIINGSLIJN W-WAB EN H-WAB, MET BUIGTREKSTERKTE=BREUKSTERKTE



De vermoeiingslijn van de betreffende warm geproduceerd WAB (W-WAB) en heet geproduceerd WAB (H-WAB) zijn weergegeven in de grafiek in Figuur 3.1. De invoer voor de grafiekenmaker W-WAB is opgenomen in Tabel 3.2 en de invoer voor de grafiekenmaker H-WAB is opgenomen in Tabel 3.3.

TABEL 3.2 INVOER VOOR GRAFIEKENMAKER W-WAB

Proefstuk	Buigtreksterkte [MPa]	Opgelegde spanning [MPa]	Lastherhalingen tot bezwijken
W1-4 en W2-1	9,01	1,88	15500
W2-6 en W1-3	9,47	3,35	1500
W2-7 en W1-1	8,30	4,10	500
W2-4 en W1-5	9,12	2,72	6000
W1-2 en W2-5	9,78	5,31	200
W2-2 en W2-3	9,66	1,77	30500
W1-7 en W2-8	9,10	3,38	2000
W1-8 en W1-6	9,39	2,55	7500

TABEL 3.3 INVOER VOOR GRAFIEKENMAKER H-WAB

Proefstuk	Buigtreksterkte [MPa]	Opgelegde spanning [MPa]	Lastherhalingen tot bezwijken
H4-2 en H3-1	9,44	4,73	400
H3-6 en H4-8	10,31	1,95	15000
H4-6 en H4-1	10,45	5,72	150
H4-7 en H3-2	9,55	3,64	1200
H3-3 en H4-5	9,58	3,50	1400
H3-7 en H4-4	10,21	2,02	22500
H4-3 en H3-5	10,14	2,77	6500
H3-8 en H3-4	10,07	3,07	4000

In de bovenstaande tabellen zijn steeds de resultaten van twee tweelingproefstukken in één rij gegeven waarbij van één proefstuk een buigtreksterkte is gegeven en van het andere proefstuk de opgelegde spanning en het aantal lastherhalingen bij bezwijken. De resultaten zijn afkomstig uit de rapportage van het materiaalonderzoek dat door Kiwa KOAC is uitgevoerd. Deze is integraal opgenomen in bijlage C. Hierin zijn ook de resultaten van de afzonderlijke proefstukken te vinden.

3.3 BUIGTREKSTERKTE

Voor het bepalen van de buigtreksterkte is de kracht opgevoerd die de vijzel op het proefstuk uitoefent. De kracht en verplaatsing van het proefstuk zijn gemeten. De maximale kracht die het proefstuk kan weerstaan, wordt omgerekend naar spanning de buigtreksterkte genoemd.

De buigtreksterkte is bepaald in de driepunts-buigopstelling bij 5 °C en met een belastingsnelheid van 0,35 mm/s. In Tabel 3.4 zijn de resultaten samengevat.

TABEL 3.4 BUIGTREKSTERKTE RESULTATEN

Plaat	Aantal balkjes	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
W	8	9,23	0,47	9,78	8,30
H	8	9,97	0,39	10,45	9,44

* gemiddeld gemeten buigtreksterkte

** maximale gemeten buigtreksterkte

*** minimale gemeten buigtreksterkte

4

ANALYSE VAN DE RESULTATEN

4.1 DATASET VOOR VERGELIJKING

De resultaten van dit onderzoek en met name de resultaten van de buigtreksterkteproeven zijn vergeleken met de resultaten van twee andere onderzoeken:

- POV-Wadden. In dit project zijn 7 proefvakken aangelegd waarvan direct na aanleg de eigenschappen zijn bepaald. Een deel hiervan betreft heet WAB met leeftijd 0 jaar en verschillende percentages asfaltgranulaat [11].
- Analyses in het kader van de ontwikkeling van een levensduurmodel voor WAB. Hier zijn van 3 dijkvakken, te weten dijkvak Kaaphoofd van de Helderse Zeewering, 't Schoor – Wierum (Fr.) en een deel van de Eemshavendijk (Gr.) de buigtreksterkteproeven die op verschillende momenten in de tijd zijn uitgevoerd nader geanalyseerd [9].

Voor de analyse is een database opgezet waarin de resultaten van de drie onderzoeken zijn opgenomen. Voor de analyse is voor elke proef de breukenergie tot bezwijken of taaiheid bepaald.

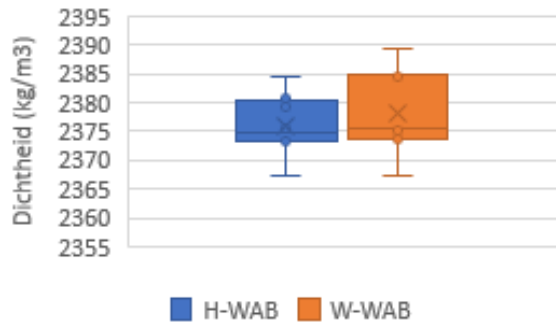
4.2 VERMOEIINGSEIGENSCHAPPEN

Het is opvallend aan de resultaten in Tabel 3.1 en Figuur 3.1, dat er nauwelijks een verschil is tussen de parameters en vermoeiingslijnen van W-WAB ten opzichte van H-WAB. Hieruit kan worden geconcludeerd dat het verlagen van de productietemperatuur van asfalt geen negatieve invloed heeft op de vermoeiingseigenschappen van het materiaal, bij leeftijd nul, en een holle ruimte percentage rond de 2.

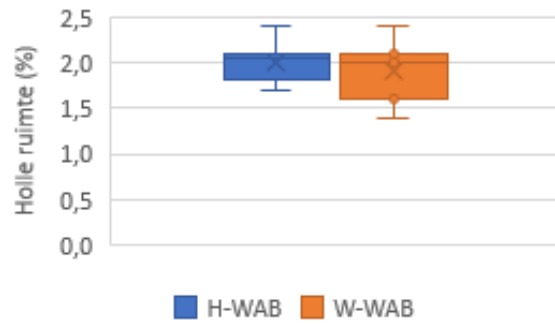
4.3 BUIGTREKSTERKTE

Voordat de buigtreksterkte van heet en warm WAB met elkaar wordt vergeleken, is eerst nagegaan of de dichtheid proefstuk (incl. ingesloten lucht) van de platen vergelijkbaar is. Doordat de platen bij een andere temperatuur zijn verdicht, moet ook een andere hoeveelheid verdichtingsenergie worden gebruikt om tot eenzelfde dichtheid te komen. Door verschillen in dichtheid kunnen ongewenste verschillen in de buigtreksterkte en andere eigenschappen worden geïntroduceerd.

FIGUUR 4.1 BOXPLOTS DICHTHEID H-WAB VS. W-WAB



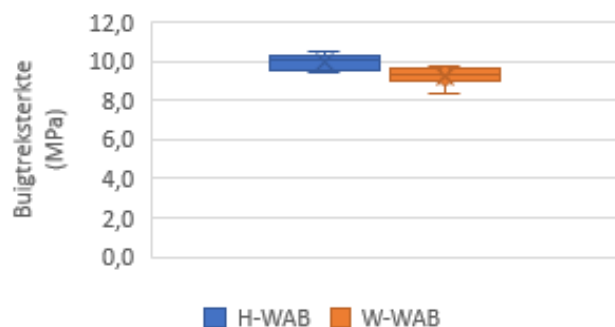
FIGUUR 4.2 BOXPLOTS HOLLE RUIMTE H-WAB VS. W-WAB



In figuur 4.1 is een boxplot van de dichtheid van zowel H-WAB als W-WAB weergegeven. De gemiddelde dichtheid van W-WAB is 0,091% hoger ten opzichte van de gemiddelde dichtheid van H-WAB, een minimaal verschil dus. De spreiding van de dichtheid van W-WAB is groter dan bij H-WAB. De gemiddelde waarde van het percentage holle ruimte neemt juist iets af bij W-WAB ten opzichte van H-WAB (zie figuur 4.2) en ook hier is de spreiding bij W-WAB groter. Geconcludeerd kan worden dat de verschillen in dichtheid en holle ruimte tussen het heet en warm WAB verwaarloosbaar klein zijn en naar verwachting de eigenschappen zoals buigtreksterkte niet beïnvloeden. Dit wordt nader onderzocht in Hoofdstuk 5.

In Tabel 3.4 en Figuur 4.3 valt het op dat de buigtreksterkte afneemt bij W-WAB ten opzichte van H-WAB. De gemiddelde buigtreksterkte van W-WAB neemt af met een percentage van 7,41% ten opzichte van H-WAB. De samenstelling van de mengsels (H-WAB en W-WAB) lijkt niet heel erg te verschillen op basis van de dichtheid en de holle ruimte. Het is aannemelijk dat de verschillen worden veroorzaakt door de verschillende productietechnieken en productietemperaturen die zijn toegepast, wat blijkbaar een negatieve invloed heeft op de buigtreksterkte van warm WAB.

FIGUUR 4.3 BUIGTREKSTERKTE VAN HEET EN WARM WAB



4.4 BREUKENERGIE

Uit het resultaat van de buigtreksterkte proef wordt de breukenergie tot bezwijken in onderhavig onderzoek bepaald door het oppervlak onder de grafiek van een kracht-verplaatsingsdiagram (de arbeid), zie Figuur 4.4, te delen door de hoogte maal de breedte (= doorsnede) van het proefstuk:

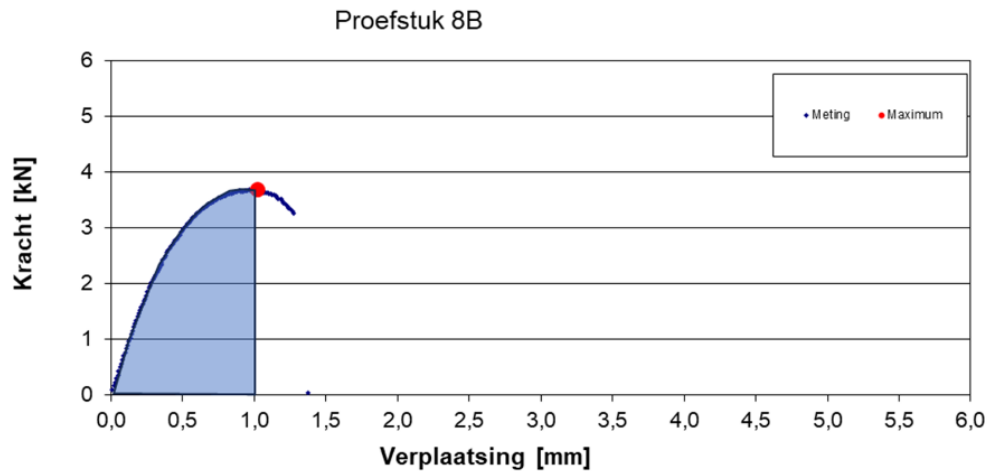
$$G_f = \frac{W_f}{A}$$

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 de arbeid geldt:

$$W_f = \int F dv$$

Hierin is F = Kracht (N), v = verplaatsing (m)

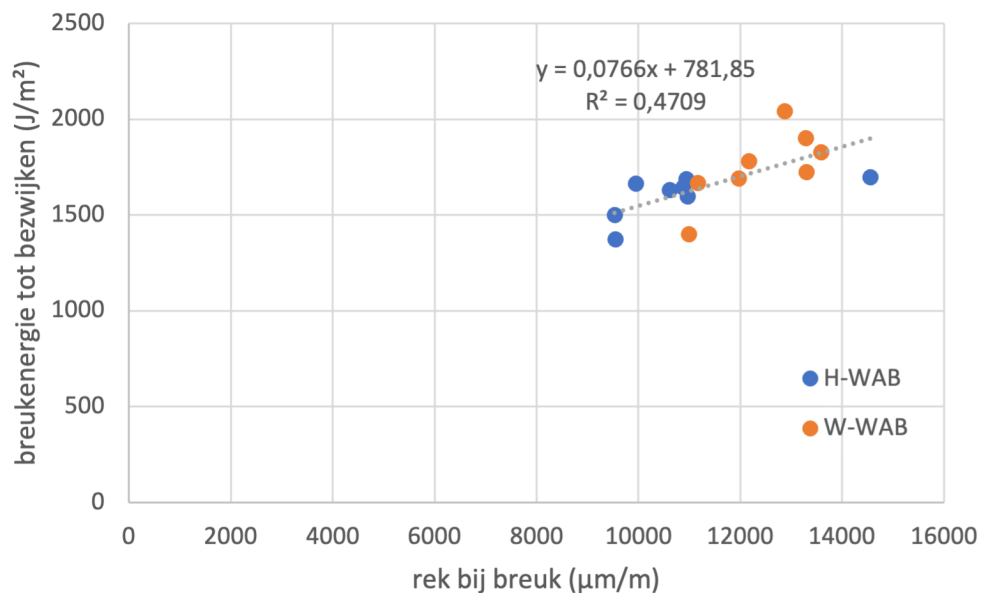
FIGUUR 4.4 DE BREUKENERGIE TOT BEZWIJKEN OF TAAIHEID GEEFT AAN HOEVEEL ENERGIE EEN MATERIAAL KAN ABSORBEREN VOOR HET BREEKT



4.4.1 HEET VERSUS WARM GEPRODUCEERD WAB

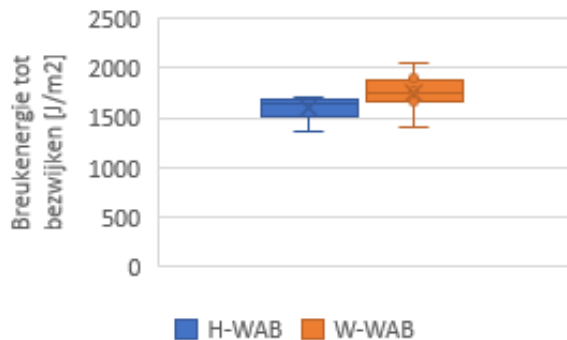
In onderstaande grafiek (figuur 4.5) is de breukenergie tot bezwijken uitgezet tegen de rek bij breuk. De datapunten van H-WAB zijn redelijk geclusterd, op een uitschieter met een hoge rek bij breuk na. Er is op basis van het kracht-verplaatsingsdiagram geen reden om deze uitschieter uit de dataset te verwijderen. De datapunten van W-WAB hebben iets meer spreiding.

FIGUUR 4.5 BREUKENERGIE TOT BEZWIJKEN VS. REK BIJ BREUK

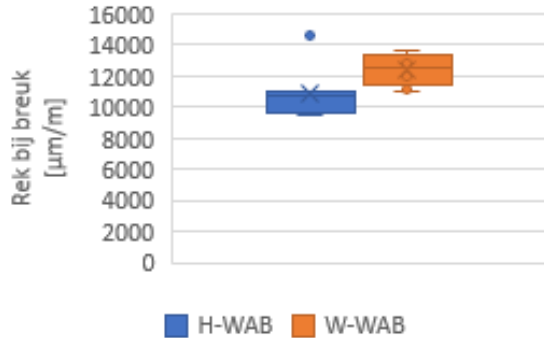


Ondanks de uitschieter bij de rek bij breuk in de data van H-WAB, is de gemiddelde waarde van W-WAB van de rek bij breuk hoger ten opzichte van H-WAB. Ook voor de breukenergie ligt de gemiddelde waarde van W-WAB hoger dan H-WAB. Dit wordt duidelijk uit de grafieken in figuur 4.6 en 4.7. De gemiddelde breukenergie van W-WAB is 9,7% hoger t.o.v. H-WAB. Voor de rek bij breuk is het verschil in het gemiddelde 14,2%. In beide mengsels zijn exact dezelfde bouwstoffen gebruikt. Op basis van deze resultaten kan worden geconcludeerd dat het verlagen van de productietemperatuur (W-WAB) een positief effect heeft op de breukenergie en de rek bij breuk van het asfalt. Dit is positief omdat het warm WAB daarmee ductieler is en minder veroudering vertoont. Immers, veroudering gaat gepaard met verharding van het bitumen, wat de ductiliteit vermindert, d.w.z. het materiaal wordt brosser.

FIGUUR 4.6 BREUKENERGIE



FIGUUR 4.7 REK BIJ BREUK

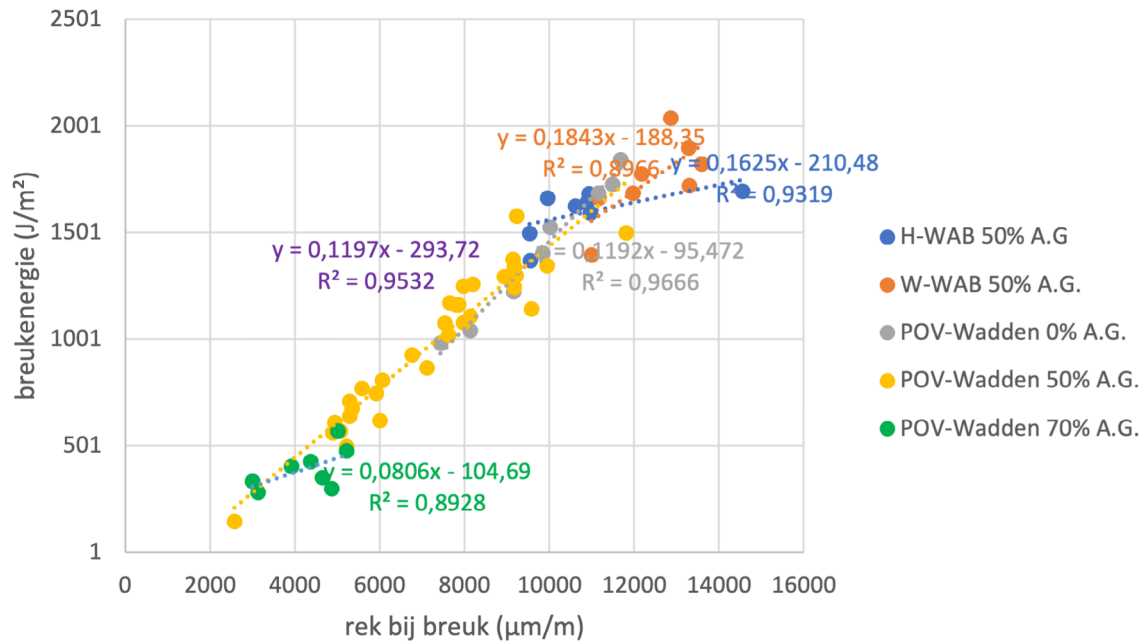


4.4.2 WAB UIT HET LABORATORIUM VERSUS WAB VAN DE DIJK

In figuur 4.8 is de breukenergie uitgezet tegen de rek bij breuk. Hierin zijn zowel de resultaten van het WAB uit het laboratorium als het WAB van de dijk (POV Wadden [11]) te zien. H-WAB en W-WAB zijn de laboratorium proefstukken en het WAB van de POV-Wadden komt van de dijk. Zoals blijkt uit de figuur is er bij het WAB van de dijk onderscheid gemaakt tussen het percentage hergebruikte asfaltgranulaat. Op basis van deze resultaten kan worden geconstateerd dat een hoger percentage (hergebruikt) asfaltgranulaat in WAB ten koste gaat van de kwaliteit van het asfalt en dat de breuktaaiheid afneemt. Dit betreft asfaltgranulaat dat afkomstig is van een asfaltcentrale, en niet het gefreesde dijksmateriaal.

De resultaten van de H-WAB en W-WAB mengsels uit het laboratorium liggen enigszins in het verlengde van de resultaten van de POV-Wadden met 50% asfaltgranulaat (A.G.) en het valt op dat de in het lab geproduceerde asfaltmengsels betere prestaties leveren ten opzichte van het in het werk geproduceerde asfalt. Immers, de rek bij breuk en breukenergie liggen gemiddeld hoger bij in het laboratorium geproduceerde asfalt. Dit is te verklaren vanwege het feit dat het WAB in het laboratorium onder ideale omstandigheden wordt geproduceerd. Het mengsel wordt gecontroleerd verwarmd, niet langer verwarmd dan noodzakelijk, en direct bij de gewenste temperatuur verdicht. Buiten zijn de marges waarbinnen deze werkzaamheden worden uitgevoerd veel groter. Figuur 4.8 geeft inzicht in deze verschillen. Het is dus goed om te bedenken dat in het laboratorium geproduceerd asfalt een rooskleuriger beeld geeft van deze eigenschappen dan asfalt dat in een asfaltcentrale wordt geproduceerd, naar het werk wordt getransporteerd en daar wordt verwerkt en verdicht.

FIGUUR 4.8 WAB UIT HET LABORATORIUM VS. WAB VAN DE DIJK

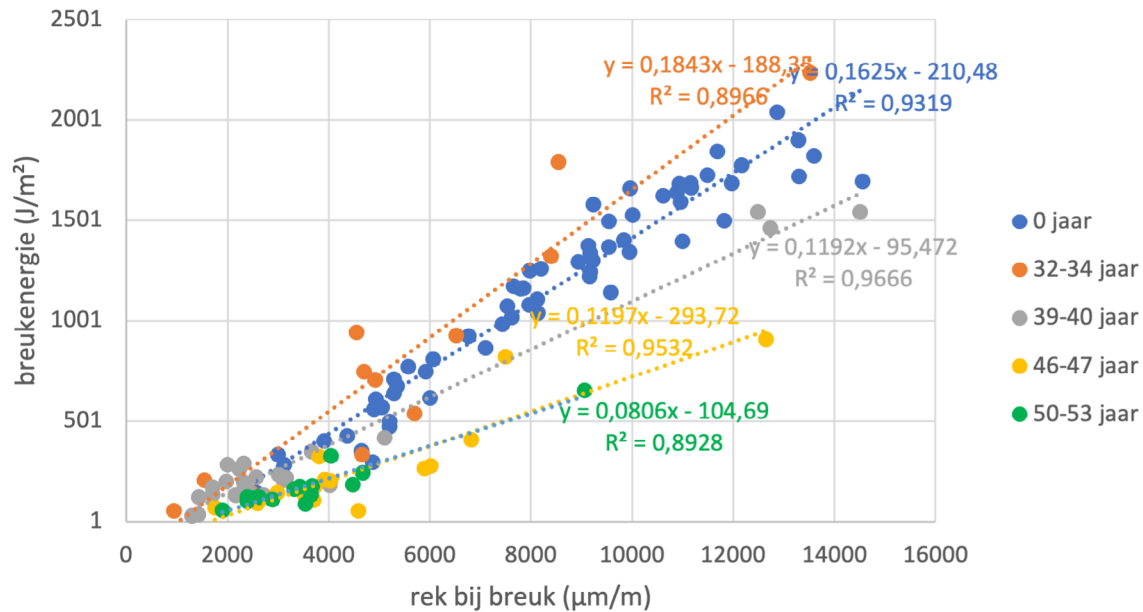


4.4.3 NIEUW VERSUS OUD WAB

Bij analyses in het kader van de ontwikkeling van een verbeterd levensduurmodel voor WAB [9] werd gevonden dat de richtingscoëfficiënt van de regressielijn in de grafiek met breukenergie versus rek bij breuk voor de drie geanalyseerde dijkvakken afneemt in de tijd. Aan deze data zijn de data van dit onderzoek en het POV-Waddenproject toegevoegd waarna de data is gegroepeerd naar leeftijd. Al het onderzochte asfalt betreft WAB dat binnen de specificaties van de Standaard RAW-bepalingen is geproduceerd en dus weinig variatie in samenstelling vertoont. Mengsels ouder dan 25 jaar bevatten nog geen asfaltgranulaat.

In figuur 4.9 is de breukenergie uitgezet tegen de rek bij breuk. Dit is gedaan voor proefstukken asfalt met verschillende leeftijd. Wat opvalt aan deze grafiek is dat asfalt met een leeftijd van 32-34 jaar beter presteert dan nieuw asfalt met een leeftijd van 0 jaar. Dit is te verklaren doordat asfalt in de eerste 30 jaar vaak juist eerst in sterkte toeneemt door physical hardening van het bitumen, voordat de kwaliteit daarna afneemt. Tevens kan de bitumenkwaliteit direct na aanleg verschillen. Na ongeveer 30 jaar nemen de sterkte-eigenschappen van het asfalt weer af. Deze afname wordt vooral veroorzaakt door stripping. Ook dit is terug te zien in de grafiek. Op basis van de gemeten data is er weinig verschil tussen de leeftijdsgroepen 46-47 jaar en 50-53 jaar. Hier liggen de lijnen namelijk vrij strak over elkaar heen.

FIGUUR 4.9 NIEUW VERSUS OUD WAB



4.5 ANALYSE WATER- EN VORSTGEVOELIGHEID

Er zijn in het kader van eerder onderzoek indirecte trekproeven uitgevoerd in het laboratorium op monsters met heet en warm WAB [12]. De verdichtingsgraad is hierbij gevarieerd. Hierbij is van drie series waterbouwasfaltbeton proefstukken de water- en vorstgevoeligheid bepaald. Deze mengsels zijn bij verschillende temperaturen gemaakt en verdicht, naar analogie met wat voor onderhavig onderzoek naar warm versus heet WAB is gedaan, zie onderstaande tabel. In Tabel 5.1 is:

- Serie 1: heet WAB, 100% verdichtingsgraad (geproduceerd 160 graden, verdicht 140 graden)
- Serie 2: warm WAB, 100% verdichtingsgraad (geproduceerd 130 graden, verdicht 120 graden)
- Serie 3: warm WAB, 95% verdichtingsgraad (geproduceerd 130 graden, verdicht 120 graden)

TABEL 5.1

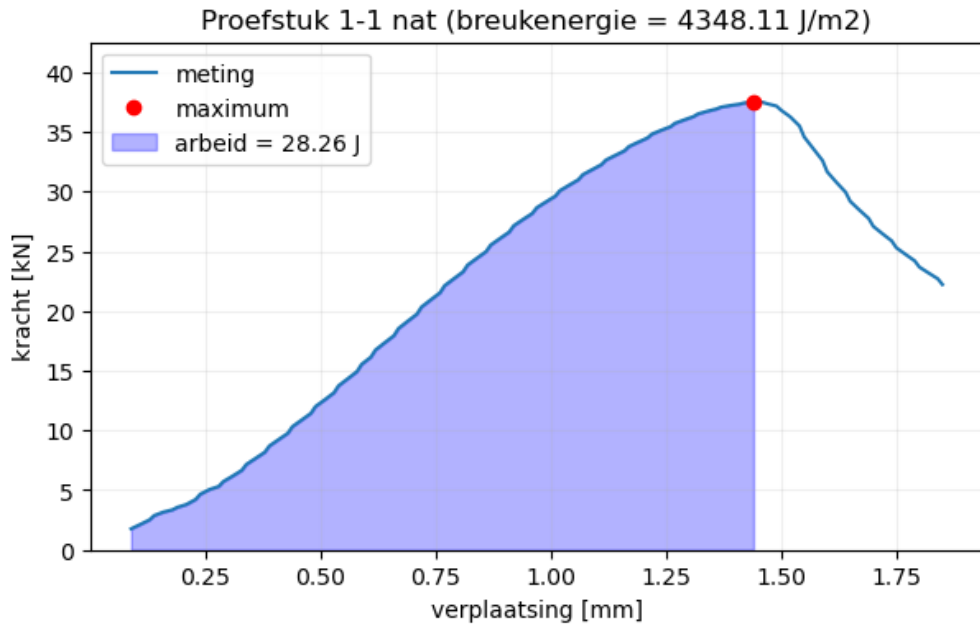
EIGENSCHAPPEN ONDERZOCHE PROEFSTUKKEN WATER- EN VORSTGEVOELIGHEID MET N.R. IS ONGECONDITIEERD EN R. IS GECONDITIEERD

Eigenschap	Serie 1		Serie 2		Serie 3	
	N.R	R.	N.R	R.	N.R	R.
Dichtheid (kg/m³)	2394	2393	2398	2386	2314	2300
Splijsterkte (MPa)	4,17	3,84	4,23	3,88	3,49	2,56
ITSR (%)	92		92		74	

De drie series WAB-mengsels (proefstukken) zijn getest op water- en vorstgevoeligheid om hun weerstand tegen deze factoren te bepalen. De proefprocedure is beschreven in de Handreiking specificatie levensduur [13]. De sterkte is gemeten op cilindrische proefstukken in de indirecte trekopstelling. De helft van de proefstukken is geconditioneerd (nat), terwijl de andere helft bij 5 °C is opgeslagen tot het testmoment (droog).

Bij de indirecte trekproef zijn de kracht en verplaatsing gemeten per tijdstap. In figuur 4.10 zijn de resultaten van proefstuk 1-1 weergegeven. Hier is de kracht tegen de verplaatsing uitgezet. De oppervlakte onder de grafiek is de arbeid tot bezwijken.

FIGUUR 4.10 RESULTATEN PROEFSTUK 1-1 (GECONDITIONEERD, NAT)



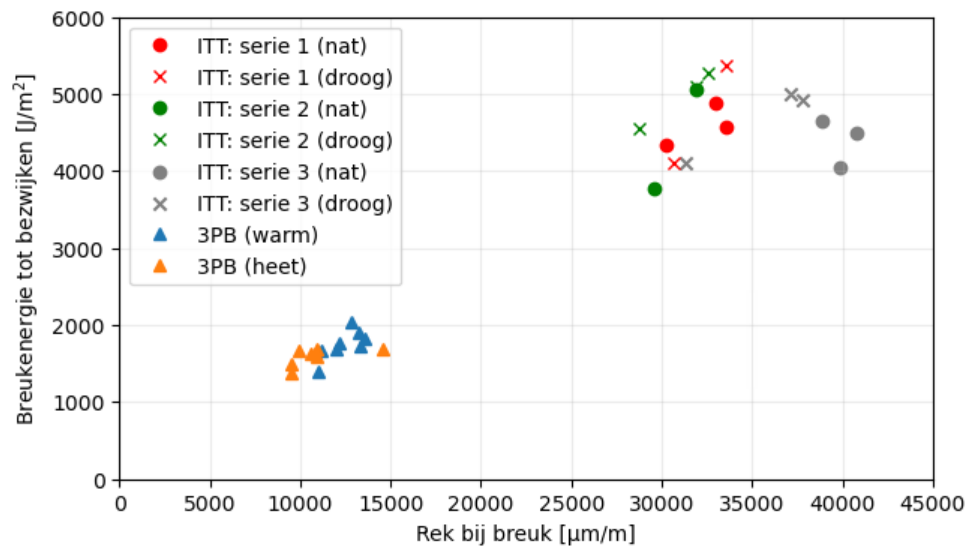
De breukenergie is bepaald door de arbeid te delen door de oppervlakte (doorsnede) van het proefstuk. Op deze manier is voor alle proefstukken de breukenergie tot bezwijken bepaald. In figuur 4.11 is de breukenergie tot bezwijken uitgezet tegen de rek bij breuk, waarbij serie 1 heet WAB betreft en serie 2 en 3 warm WAB met verschillende verdichtingsgraad. In deze grafiek zijn ook de resultaten van de driepunts-buigproeven toegevoegd.

Opvallend aan de grafiek in figuur 4.11 is dat zowel de breukenergie als de rek bij breuk van de resultaten van de indirecte trekproeven (ITT) veel hoger zijn dan de resultaten van de driepunts-buigproeven (3PB). Verder wijkt serie 3 met een lagere verdichtingsgraad duidelijk af van de serie 1 en 2. Met name de breukrek is groter.

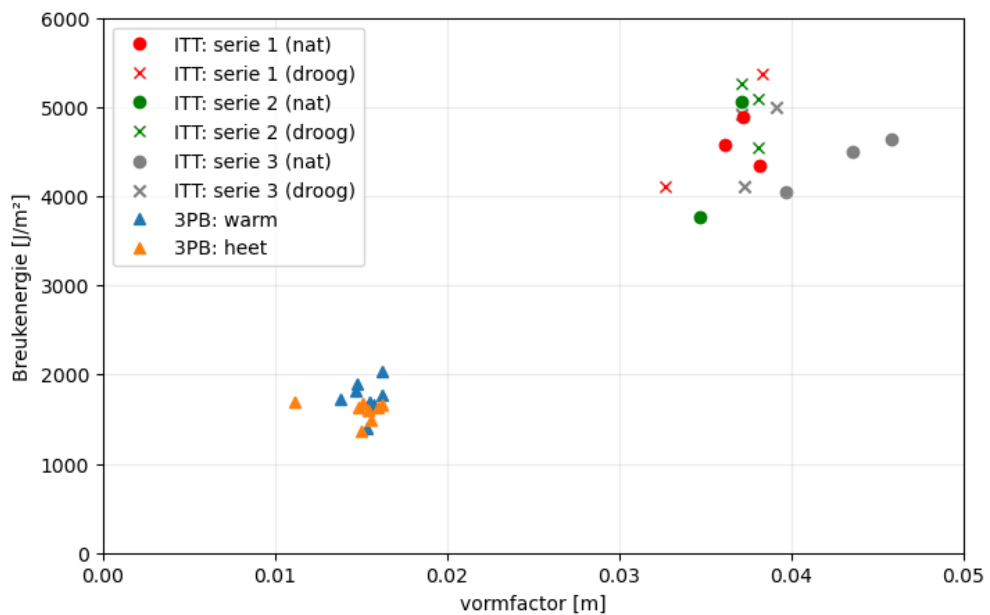
De vormfactor (breukenergie/(buigtreksterkte*rek bij breuk)) kan worden gezien als een indicator voor de mate waarin het materiaal bros (lage waarde) of ductiel bezwijkt (hoge waarde). Als de vormfactoren in de driepunts-buigproef en indirecte trekproef globaal overeenkomen, kunnen beide proeven op vergelijkbare wijze worden gebruikt om bijvoorbeeld op scheur-gevoeligheid te beoordelen. In figuur 4.12 is de vormfactor uitgezet tegen de breukenergie voor beide proeven.

In Figuur 4.12 is te zien dat voor serie 3 de breukenergie duidelijk lager is dan die voor serie 1 en 2.

FIGUUR 4.11 RESULTATEN WATER- EN VORSTGEVOELIGHEIDSPROEVEN (ITT) & DRIEPUNTS-BUIGPROEVEN (3PB) (BREUKENERGIE VS. REK BIJ BREUK)



FIGUUR 4.12 RESULTATEN BREUKENERGIE VS. VORMFACTOR

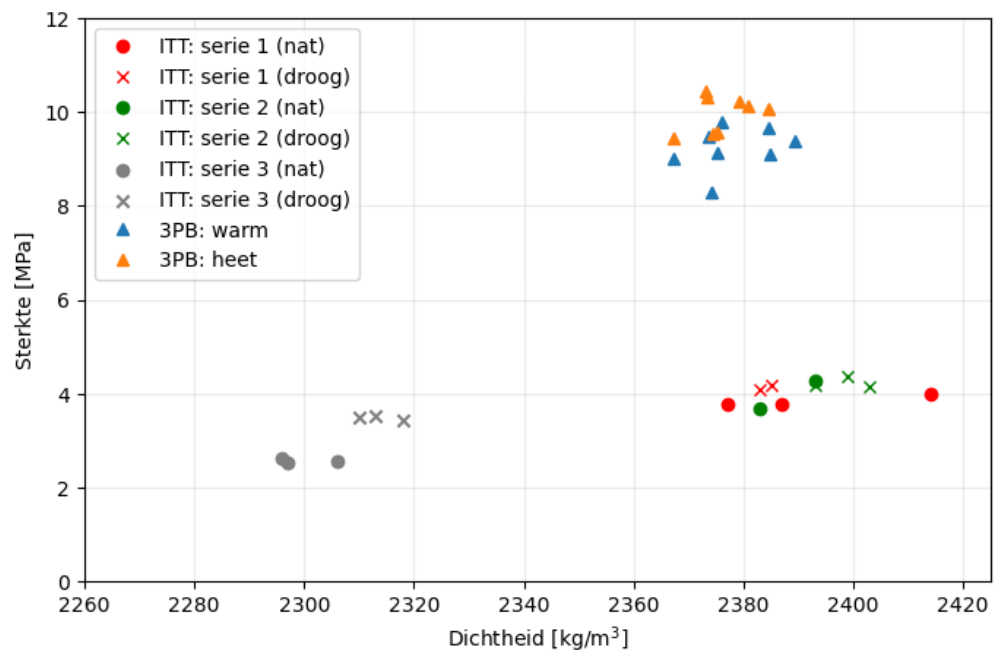


Een mogelijke verklaring voor het verschil tussen de resultaten van de ITT-proeven en de 3PB-proeven is dat de breukenergie bij de ITT-proeven is gebaseerd op de verticale verplaatsing, terwijl de horizontale verplaatsing hier beter voor geschikt zou zijn omdat de proefstukken bezwijken op basis horizontale verplaatsingen. Daarom is de berekende breukenergie uit de ITT-proeven vergeleken met berekeningsmethode die P.C. Hopman [14] hanteert bij het uitwerken van ITT-proeven en daarbij komen de orde groottes van de breukenergie overeen. Op basis hiervan kan gesteld worden dat dezelfde methode is toegepast voor bepaling van de breukenergie. De vraag is echter of op deze wijze de breukenergie correct wordt bepaald voor de indirecte trekproef.

Gebaseerd op bovenstaande resultaten wordt geconcludeerd dat de breukenergie van de ITT-proeven niet goed vergeleken kunnen worden met de breukenergie van de 3PB-proeven, omdat de orde grootte van de breukenergie en de vormfactor erg verschilt. Wellicht is dit deels te verklaren door een verkeerde aanname van de verplaatsing bij bepaling van de breukenergie.

In figuur 4.13 is de relatie tussen de sterkte en dichtheid proefstuk weergegeven voor zowel de ITT-proeven als de 3PB-proeven. Voor zowel de resultaten van de ITT-proeven als de resultaten van de 3PB-proeven is er geen duidelijk aantoonbare relatie tussen de sterkte en dichtheid van de proefstukken. Het is echter wel opvallend dat de sterkte van de ITT-proeven veel lager ligt dan de sterkte van de 3PB-proeven. Dit is een bekend verschijnsel.

FIGUUR 4.13 RELATIE TUSSEN STERKTE EN DICHTHEID (ITT EN 3PB)



5

VERGELIJKING DATA MET LEVENSDUURMODEL

5.1 DUIDING VAN DE VERSCHILLEN IN BUIGTREKSTERKTE HEET EN WARM WAB

Deze paragraaf gaat in op de significantie van de geconstateerde verschillen in gemeten buigtreksterkte van het in het lab gemaakte heet en warm WAB. De samenstelling van dit hete en warme WAB was identiek. De holle ruimte percentages zijn gegeven in Tabel 5.1. Er is gebruik gemaakt van het aangepaste levensduurmodel [8] om de verschillen te duiden.

TABEL 5.1 DE GEMETEN HOLLE RUIMTE PERCENTAGES VAN HET BEPROEFDE HEET EN WARM WAB

mengsel	Holle ruimte percentage			
	gemiddelde	Standaarddeviatie	minimum	maximum
heet WAB	2,0	0,22	1,7	2,4
warm WAB	1,9	0,33	1,4	2,4

Het aangepaste levensduurmodel [8] heeft als verklarende parameters de leeftijd bij beproeving en het holle ruimte percentage, zie formule 5.1.

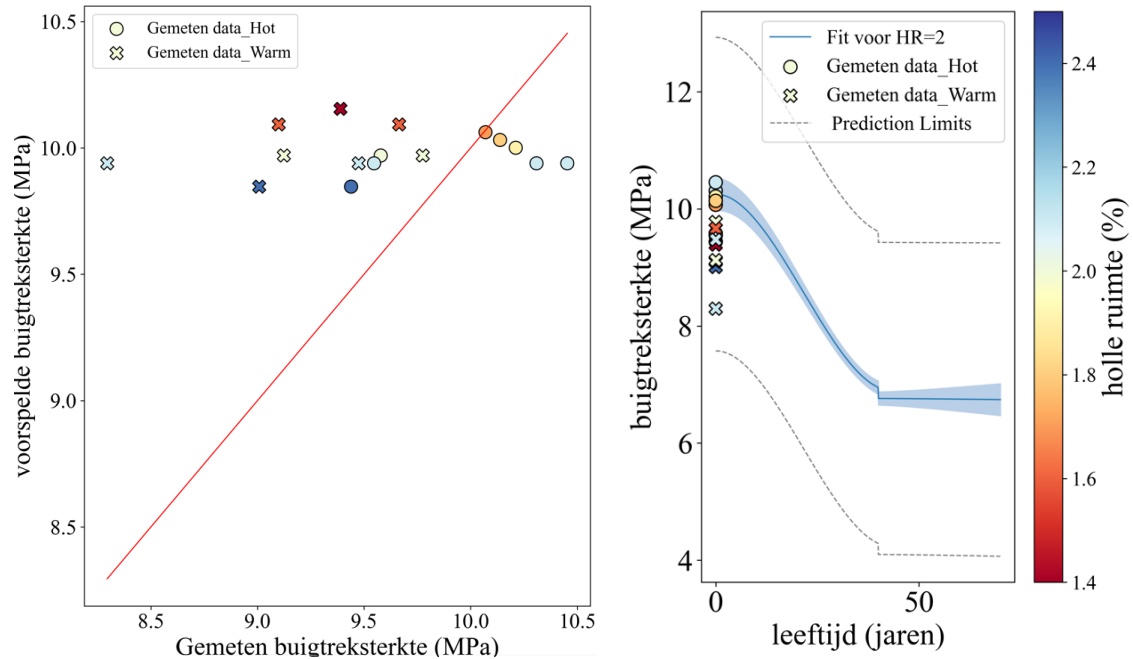
$$\begin{cases} \sigma_b = 10,5852 - 0,0054 * Lft^2 + 8,341 * 10^{-5} * Lft^3 - 0,3077 * HR & Lft \leq 40 \\ \sigma_b = 6,8238 - 0,0466 * HR^2 + 0,0026 * HR^3 - 5,17 * 10^{-6} * HR^2 * Lft^2 & 40 < Lft < 70 \end{cases} \quad (5.1)$$

Met σ_b = buigtreksterkte (MPa); Lft = leeftijd (jaren); HR = holle ruimte percentage.

Dit levensduurmodel is gebaseerd op de eigenschappen van boorkernen die zijn genomen uit 73 dijkvakken. Er kan gekeken worden of nieuwe meetwaarden (met een vergelijkbaar holle ruimte percentage als de predictielijn) binnen het zogenaamde predictie interval liggen, het interval behorende bij die predictielijn. Deze predictielijn betreft het gemiddelde van te verwachten meetwaarden, gegeven het gekozen holle ruimte percentage. De leeftijd van het in het lab gemaakte hete en warme WAB is nul.

Figuur 5.1 toont een vergelijking van de meetwaarden en de predictie.

FIGUUR 5.1 VERGELIJKING VAN DE GEMETEN BUIGTREKSTERKTE MET DE PREDICTIE OP BASIS VAN HET AANGEPASTE LEVENSDUURMODEL [8]. DE RECHTER FIGUUR TOONT OOK DE PREDICTIELIJN VOOR EEN HOLLE RUIMTE PERCENTAGE VAN 2% INCL. HET 90% BETROUWBAARHEIDINTERVAL (GEARCEERD) EN 90% PREDICTIE INTERVAL (STIPPELLIJNEN). DE BALK MET KLEURENSCHAAL BETREFT HET HOLLE RUIMTE PERCENTAGE EN DEZE KLEUREN ZIJN GEBRUIKT IN DE MARKERS



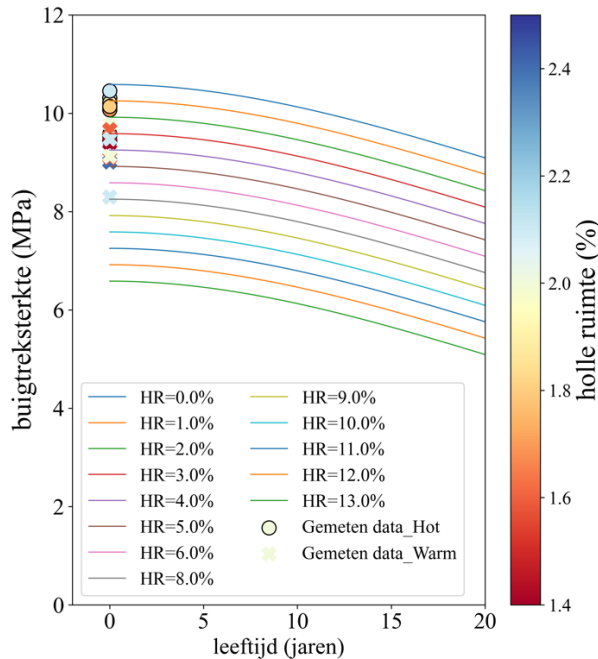
De linker helft in Figuur 5.1 toont dat de meetwaarden voor heet WAB grotendeels gunstiger zijn dan de predictie op basis van het aangepaste levensduurmodel, dat wil zeggen dat de markers rechts liggen van de diagonale lijn (meting=predictie). De meetwaarden voor warm WAB liggen alle links van de diagonale zijn, d.w.z. de meting is ongunstiger (lagere buigtreksterkte) dan de predictie en tevens zijn de meetwaarden grotendeels lager dan die voor heet WAB. De rechter helft in Figuur 5.1 toont dat de meetwaarden met een holle ruimte percentage van rond de twee binnen het predictie interval liggen. Voor de andere holle ruimte percentages is dit ook het geval met de predictie intervallen bij de regressielijnen behorende bij die holle ruimte percentages.

De conclusie is dat de gemeten buigtreksterktes voor warm en heet WAB binnen de predictie intervallen behorende bij het aangepaste levensduurmodel liggen. Er zijn echter wel duidelijke verschillen tussen warm en heet WAB: de meetwaarden van heet WAB zijn grotendeels gunstiger dan de predictie, terwijl de meetwaarden voor warm WAB ongunstiger zijn (tot 1,5 circa MPa lager dan de predictie).

Figuur 5.2 toont een vergelijking van de meetwaarden voor heet en warm WAB en de predictielijnen voor diverse holle ruimte percentages. De holle ruimte percentages van de metingen (zie Tabel 5.1) liggen tussen de 1,4 en 2,4. Deze meetwaarden kunnen vergeleken worden met de predictielijnen voor holle ruimte percentages van resp. 1, 2 en 3, wat grofweg de range is van de holle ruimte percentages behorende bij de meetwaarden (zie de tweede tot en vierde lijn van boven in Figuur 5.2). Vooral de meetwaarden van de buigtreksterkte voor warm WAB liggen een stuk lager dan de genoemde predictielijnen, en liggen in de range van de predictielijnen bij een holle ruimte percentage van 4 tot 8. Nogmaals, deze predictie lijnen tonen het te verwachten gemiddelde van de data, gegeven een holle ruimte percentage. Hoewel alle meetwaarden van de buigtreksterkte binnen het 90% predictie interval van het levensduurmodel vallen, is er wel een duidelijk verschil in buigtreksterkte zichtbaar tussen

heet en warm WAB. Omdat warm WAB bij een lagere temperatuur is geproduceerd dan het WAB uit de 2023 dataset (die is gebruikt voor het levensduurmodel) bestaande uit heet WAB, is het van belang nog andere indicatoren van de materiaalkwaliteit te beschouwen, zoals de breukenergie.

FIGUUR 5.2 EEN VERGELIJKING VAN DE MEETWAARDEN EN DE PREDICTIELIJNEN BIJ DIVERSE HOLE RUIMTE PERCENTAGES



Tevens kan gekeken worden hoe dit zich verhoudt tot de kwaliteit van verouderd WAB. In [9] zijn drie zogenaamde referentie dijkvakken met oud WAB onderzocht, waarvan tijdreeksen van gemeten buigtreksterktes beschikbaar zijn (bij leeftijden tussen de 32 en 53 jaren). In deze studie is geconstateerd dat de meetwaarden voor deze drie tijdreeksen steeds grotendeels onder de predictielijnen liggen, maar wel binnen de bij deze lijnen behorende predictie intervallen. Het blijkt hiermee dat de asfaltkwaliteit slechter is dan gemiddeld, maar ook dat er naast het effect van het holle ruimte percentage meer aspecten een rol spelen als het gaat om verschillen in buigtreksterkte. Dit is in [9] nader onderzocht en het blijkt dat de breukenergie als functie van de breukrek sterk verandert als functie van de leeftijd. Deze aspecten geven mogelijk een betere verklaring voor (de afname van) de asfaltkwaliteit, zie ook Hoofdstuk 4.

In [9] is ook een methode voor restlevensduurprognose uitgewerkt, waarbij wordt uitgegaan van de eerste set aan meetwaarden van de buigtreksterkte. Dit is van belang, omdat de vermoeiingsberekeningen sterk afhangen van de waarde van de hierbij gehanteerde buigtreksterkte, zodat het uitgaan van de predictie alleen, zonder de dijkvak specifieke meetwaarden van de buigtreksterkte te gebruiken, veel te onnauwkeurig is. Dit houdt in dat ook voor warm WAB een restlevensduurpredictie nodig is, uitgaande van de meetset van de buigtreksterkte bij leeftijd nul jaar. Tot nu toe laten de in het laboratorium gemaakt monsters zien dat het warm WAB duidelijk verschilt van het heet WAB, en te zijner tijd na aanleg kan dit nader worden onderzocht. Er kan na aanleg een nulmeting worden uitgevoerd, op basis waarvan dan een eerste voorlopige inschatting van het verloop in buigtreksterkte kan worden gemaakt. Figuur 5.3 toont indicatieve restlevensduurpredicties voor warm en heet WAB. Hierbij is formule 5.2 gebruikt [9] met leeftijd nul op de datum van de meting.

Formules 5.2 geven aan hoe de predictie per boorkern op tijdstip p (met leeftijd Lft_p) gemaakt kan worden op basis van de meetset op tijdstip m (met leeftijd Lft_m).

For $Lft \leq 40$:

$$\sigma_{b,p} = \sigma_{b,m} + 0.0054(Lft_m^2 - Lft_p^2) - 8.341 \cdot 10^{-5}(Lft_m^3 - Lft_p^3)$$

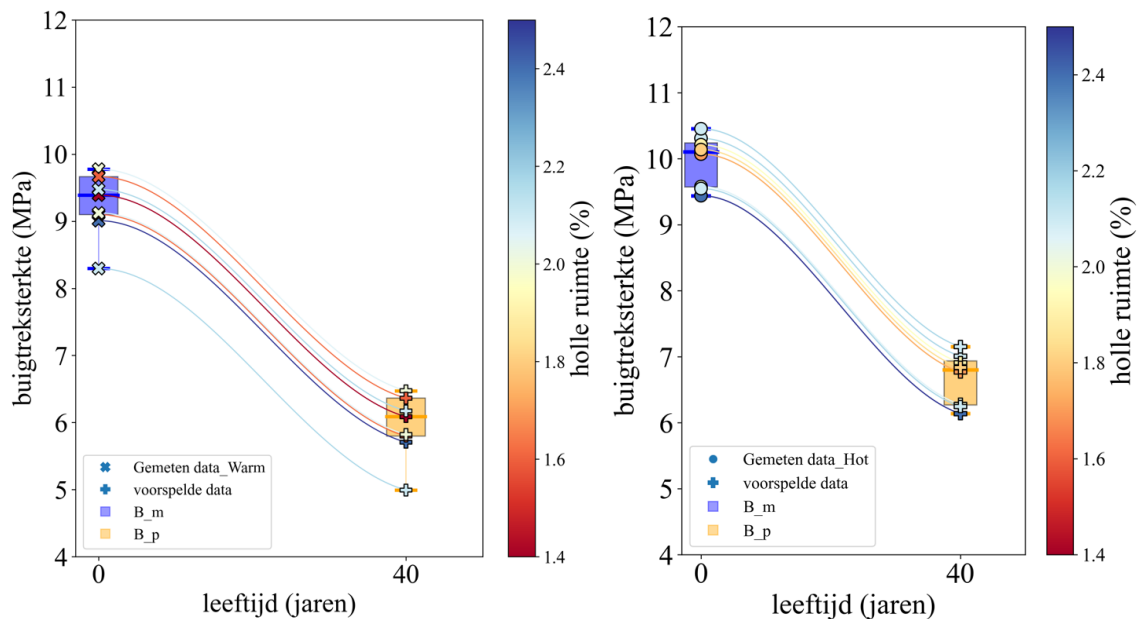
For $40 < Lft < 70$:

$$\sigma_{b,p} = \sigma_{b,m} + 5.17 \cdot 10^{-6}HR_m^2(Lft_m^2 - Lft_p^2) \quad (5.2)$$

Met $\sigma_{b,p}$ = buigtreksterkte predictie (MPa); $\sigma_{b,m}$ = meetwaarde voor buigtreksterkte (per boorkern); HR_m = holle ruimte percentage van de boorkern uit de meetset; Lft_p = leeftijd op predictiedatum; Lft_m = leeftijd op datum van meting.

De neerwaartse trend uit Figuur 5.3 geldt voor alle WAB tot en met een leeftijd van 40 jaar, d.w.z. vanaf aanlegjaar 1970 voor de dataset waarvoor deze regressie is gemaakt, en dan voor zowel WAB met als zonder recycling fractie en zowel voor WAB uit het veld als gemaakt in het lab. Het is de vraag of deze trend geldt voor warm WAB. Verder blijkt uit [10] dat de water- en vorstgevoeligheid voor warm WAB bij een hoger holle ruimte percentage vrij groot is, dat wil zeggen dat verwacht wordt dat dit warm WAB sneller verouderd dat heet WAB. Mogelijk zijn de predictielijnen (zie Figuur 5.3), die immers gelden voor heet WAB, te gunstig voor warm WAB.

FIGUUR 5.3 INDICATIEVE RESTLEVENSDUURPREDICTIES VOOR WARM EN HEET WAB OP BASIS VAN HET AANGEPASTE LEVENSDUURMODEL VOOR HEET WAB

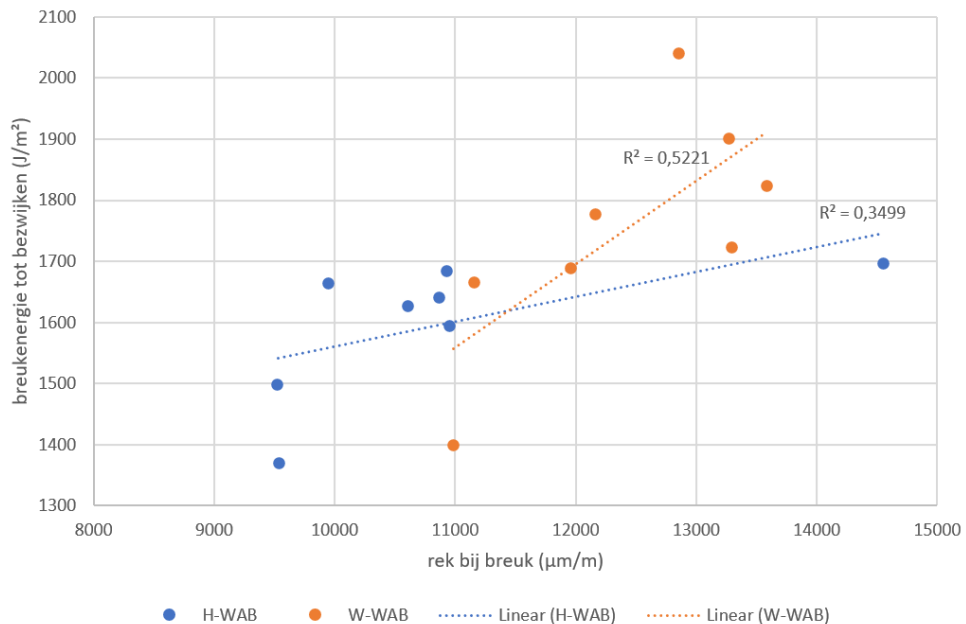


5.2 ANDERE VERKLARENDE PARAMETERS

In hoofdstuk 4 hebben we gezien dat als de uit de buigtreksterkte proeven verkregen breukenergie wordt uitgezet als functie van de breukrek, er duidelijk verschil is te constateren tussen WAB uit het veld of gemaakt in het laboratorium en ook de grootte van de recycling fractie heeft effect. Tevens wijkt het voor onderhavig project gemaakte warm WAB af van het heet WAB (referentie) qua breukenergie als functie van de breukrek, zie Figuur 5.4. Als voor het hete WAB het punt bij de hoge breukrek niet in de regressie wordt meegenomen,

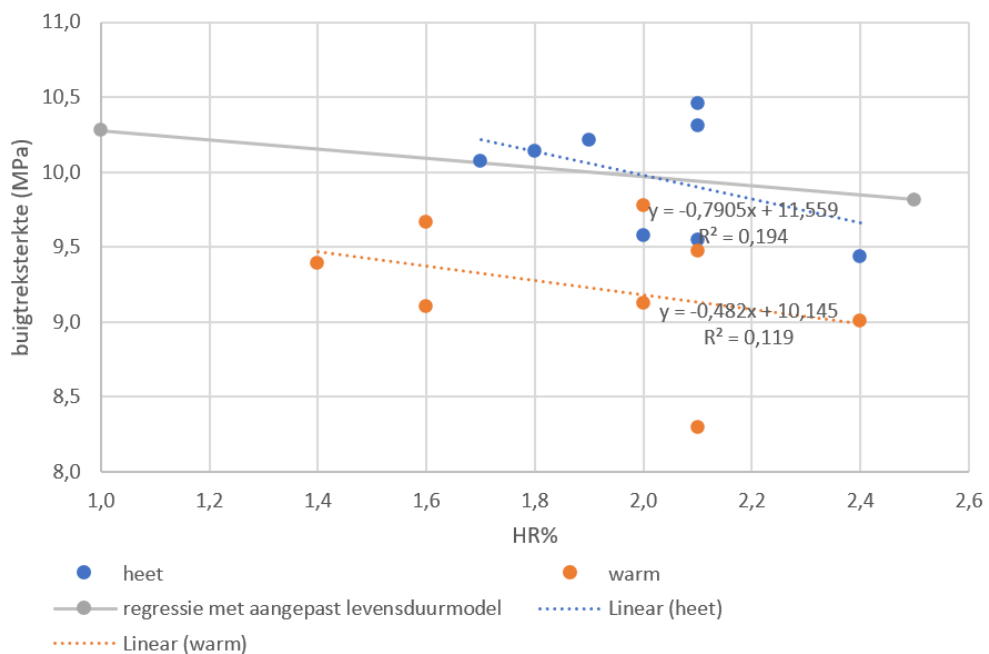
dan lijken beide regressies meer op elkaar. Wel lijkt warm WAB minder verouderd, omdat de breukenergie en de breukrek relatief hoog zijn. Dit is te verklaren met het feit dat de productietemperatuur lager was.

FIGUUR 5.4 BREUKENERGIE ALS FUNCTIE VAN DE BREUKREK VOOR HET WARME EN HETE WAB



Uit Figuur 5.5 is de gemeten buigtreksterkte als functie van het holle ruimte percentage uitgezet. Tevens is de lijn uit het levensduurmodel uitgezet bij leeftijd nul (zie formule 5.1).

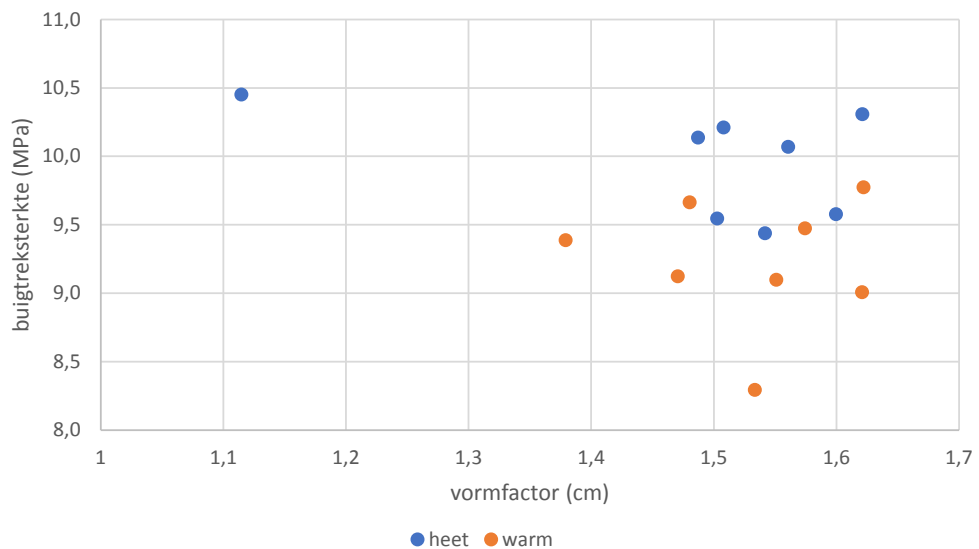
FIGUUR 5.5 GEMETEN BUIGTRKSTERKTE EN PREDICTIE BIJ LEEFTIJD NUL VOOR HEET EN WARM WAB



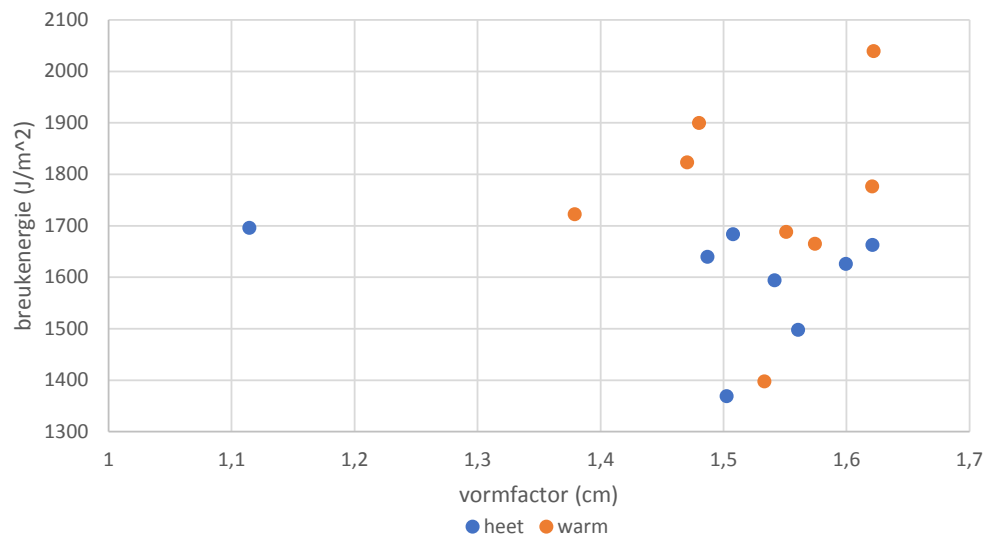
In Figuur 5.5 is het verband tussen de gemeten buigtreksterkte en het holle ruimte percentage zwak. De predictie laat een beperkte afname zien als functie van het holle ruimte percentage, en de meetwaarden voor warm WAB liggen duidelijk lager dan deze predictielijn.

Figuren 5.6 en 5.7 tonen respectievelijk de gemeten buigtreksterkte als functie van de zogenaamde vormfactor = breukenergie gedeeld door (breukrek*buigtreksterkte), en de breukenergie als functie van deze vormfactor. Met behulp van de vormfactor kan onderscheid gemaakt worden tussen brosse en taaie breuk. Hoe groter de vormfactor hoe taaier de breuk. Een brosse breuk toont een rechte in het last-verplaatsingsdiagram, terwijl een taaie breuk meestal een gekromde lijn laat zien met een geleidelijk afnemende stijging.

FIGUUR 5.6 GEMETEN BUITREKSTERKTE ALS FUNCTIE VAN DE VORMFACTOR (= BREUKENERGIE GEDEELD DOOR (BREUKREK*BUIGTREKSTERKTE) VOOR HEET EN WARM WAB



FIGUUR 5.7 GEMETEN BREUKENERGIE ALS FUNCTIE VAN DE VORMFACTOR (= BREUKENERGIE GEDEELD DOOR (BREUKREK*BUIGTREKSTERKTE) VOOR HEET EN WARM WAB



Te zien is dat het bereik in vormfactor grotendeels vergelijkbaar is voor heet en warm WAB. Er lijkt geen verband te zijn tussen vormfactor en buigtreksterkte. Tevens is er geen verband tussen breukenergie en vormfactor. Uit de last-verplaatsingsdiagrammen volgt dat alle proefstukken een taai gedrag laten zien, voor zowel warm als heet WAB.

5.3 BESCHOUWING LEVENSDUUR VAN WARM WAB

Tot nu toe is er alleen een levensduurmodel beschikbaar voor heet WAB. Dit model bleek bruikbaar om te laten zien dat de meetwaarden van de buigtreksterkte voor warm WAB anders gepositioneerd zijn ten opzichte van de predictie in vergelijking met heet WAB.

Het type breuk in de driepunts-buigopstelling verschilt niet veel voor warm WAB versus heet WAB, echter wel is de rek bij breuk en de breukenergie groter, wat aangeeft dat het warm WAB materiaal een ductieler gedrag vertoont bij belasting. Dit is een gunstig aspect omdat hierdoor grotere vervormingen kunnen worden gevolgd. De breukenergie en rek bij breuk maken echter geen deel uit van het huidige levensduurmodel.

Dit alles geldt voor proefstukken met een holle ruimte percentage tussen de 1,4 en 2,4. Bij dergelijke holle ruimte percentages is de water- en vorstgevoeligheid goed [10]. Uit water- en vorstgevoeligheidsproeven [10] blijkt dat warm WAB met een hoger holle ruimte percentage (rond de 6,5) behoorlijk gevoelig is, meer dan je verwacht voor heet WAB.

De holle ruimte als verklarende parameter is van belang, zie het levensduurmodel, maar verklaart maar ten dele de verschillen in gemeten buigtreksterkte. De meetwaarden liggen wel binnen het predictie interval bij de regressielijnen uit het levensduurmodel.

Er is behoefte aan aanvullende verklarende parameters. De breukenergie als functie van de breukrek lijkt kansrijk voor het duiden van de materiaalkwaliteit. Er is hier een duidelijk verschil te zien tussen warm en heet WAB. Daarnaast is de vormfactor = breukenergie gedeeld door (breukrek*buigtreksterkte) een mogelijk aanvullende verklarende parameter.

Een prognose van de levensduur voor warm WAB kan nu nog niet gemaakt worden omdat de veranderingen in materiaalgedrag ten opzichte van heet WAB niet met het model worden beschreven. In dit rapport is wel een indicatieve prognose gegeven, op basis van meetwaarden van in het laboratorium gemaakt warm WAB. Op basis van deze prognose is een levensduur van ten minste 40 jaar voor zowel het onderzochte warme als heet WAB haalbaar. Hierbij moet worden bedacht dat niet alle invloeden die de levensduur van WAB bepalen met het model worden beschreven. Zo kan de constatering dat het bitumen van warm WAB minder verouderd is, waardoor het materiaal een hogere rek bij breuk en breukenergie heeft, leiden tot een langere levensduur dan heet WAB. Anderzijds is nog geen inzicht in andere mogelijke invloeden zoals de invloed op adhesie tussen steen en bitumen bij een lagere productietemperatuur. Het feit dat warm het heet WAB bij de water- en vorstgevoeligheidsproef gelijkwaardig presteren bij lage holle ruimte geeft hier een indicatie dat er geen grote verschillen worden verwacht in adhesief gedrag bij warm en heet WAB, mits de holle ruimte laag is. Er loopt nog onderzoek (in 2025) naar wat de verschillen zijn in water- en vorstgevoeligheid bij hogere holle ruimte percentages..

Vanwege de overgang naar warm WAB, de kwaliteitsvermindering van het moderne bitumen en de toepassing van asfaltgranulaat in WAB ligt het voor de hand om met aanvullende eisen te komen ten opzichte van de huidige traditionele opleveringseisen. Dit kunnen (deels) functionele eisen zijn. Een nulmeting of functionele oplevering direct na aanleg is in dat geval noodzakelijk en regelmatige beproevingen van het WAB na aanleg, waarbij gebruik kan worden gemaakt van de aanpak uit de Handreiking Continu Inzicht [18].

6

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

6.1 CONCLUSIES

Om een eerste inzicht te krijgen in de sterkte van warm geproduceerd waterbouwasfaltbeton (WAB) ten opzichte van heet WAB, zijn in het laboratorium enkele platen met warm en heet WAB geproduceerd. Het warm WAB is geproduceerd met behulp van bitumenverschuiming. Van balkjes die uit de platen zijn gezaagd, zijn de vermoeiingseigenschappen en de buigtreksterkte bepaald. Vergelijking van deze resultaten leidt tot de volgende conclusies:

- In de vermoeiingsproef zijn geen verschillen in prestaties waargenomen. De bepaalde vermoeiingsparameters α en β , die zijn bepaald op basis van de resultaten van vermoeiingsproeven, zijn vrijwel identiek.
- Er is een klein verschil gevonden tussen de buigtreksterkte van het warm WAB en het heet WAB. De buigtreksterkte van het warm WAB is gemiddeld 7,4% lager dan die van heet WAB.

Om meer inzicht te krijgen in het materiaalgedrag zijn ook de breukenergie tot bezwijken (of de taatheid) en de rek bij breuk bepaald uit de resultaten van de driepunts-buigproeven. Een hogere taatheid leidt tot een ductieler materiaalgedrag onder belasting. Naarmate WAB ouder wordt gaat het steeds brosser materiaalgedrag vertonen waardoor het scheurgevoeliger wordt. Een ductiel materiaalgedrag is te verkiezen boven bros materiaalgedrag omdat het dan beter is staat is om belastingen te weerstaan zonder te scheuren. Op basis van de analyse van deze parameters wordt het volgende geconcludeerd:

- De breukenergie tot bezwijken of taatheid van warm WAB is wat hoger dan die van het heet WAB. De breukenergie van warm WAB ligt gemiddeld 9,7% hoger t.o.v. het heet WAB.
- Het verschil bij de rek bij breuk is nog wat groter. De rek bij breuk van warm WAB ligt gemiddeld 14,2% hoger ten opzichte van heet WAB.

De meest voor de hand liggende verklaring voor deze verschillen is dat het bitumen van warm WAB minder veroudert tijdens productie waardoor er meer van het ductiele karakter van het oorspronkelijke bitumen behouden blijft.

De resultaten van de in het laboratorium vervaardigde platen zijn vergeleken met de proefvakken van de POV-Wadden [11]. Als de breukenergie en rek bij breuk van de laboratoriumplaten worden vergeleken met de resultaten van in het veld vervaardigd heet WAB, dan valt op dat het in het laboratorium vervaardigde WAB hogere waarden laat zien dan het WAB dat in het veld is vervaardigd. Dit is een factor om rekening mee te houden bij het formuleren van toekomstige eisen.

Als de breukenergie wordt uitgezet tegen de rek bij breuk voor de tot nu toe geanalyseerde data, dan ontstaat een beeld waarbij de richtingscoëfficiënt van de regressielijn verandert in de tijd. De resultaten van het voor dit onderzoek vervaardigde WAB passen in dit beeld.

Mogelijk kan dit inzicht worden gebruikt bij de ontwikkeling van een toekomstig levensduurmodel dat ook geschikt is voor warm WAB.

Op basis van de ITT-proeven die worden uitgevoerd voor bepaling van de water- en vorstgevoeligheid zijn eveneens de breukenergie tot bezwijken en de rek bij breuk bepaald. Er worden grote verschillen gevonden tussen de resultaten van de ITT-proef en de driepunts-buigproef die vooralsnog niet kunnen worden verklaard.

Met het levensduurmodel voor WAB is nagegaan hoe de in het laboratorium bepaalde buigtreksterktes zich verhouden tot de predicties van het model. De resultaten van het heet WAB blijken goed in lijn te liggen met het levensduurmodel, de resultaten van het warm WAB liggen wat lager ten opzichte van het model. Op basis van de ze prognose is een levensduur van ten minste 40 jaar voor zowel het onderzochte warme als heet WAB haalbaar. Hierbij moet worden bedacht dat niet alle invloeden die de levensduur van WAB bepalen met het model worden beschreven. Zo kan de constatering dat het bitumen van warm WAB minder verouderd is waardoor het materiaal een hogere rek bij breuk en breukenergie heeft, leiden tot een langere levensduur dan heet WAB. Anderzijds is nog geen inzicht in andere mogelijke invloeden zoals de invloed op adhesie tussen steen en bitumen bij een lagere productietemperatuur. Het feit dat het warm WAB en het heet WAB met laag holle ruimte percentage bij de water- en vorstgevoeligheidsproef gelijkwaardig presteren geeft hier een indicatie dat er geen grote verschillen worden verwacht in adhesief gedrag bij warm en heet WAB, mits de holle ruimte laag is. Er loopt nog onderzoek (in 2025) naar wat de verschillen zijn in water- en vorstgevoeligheid bij hogere holle ruimte percentages.

Er is behoefte aan aanvullende verklarende parameters voor het levensduurmodel. De breukenergie als functie van de breukrek lijkt kansrijk voor het duiden van de materiaalkwaliteit. Er is hier een duidelijk verschil te zien tussen warm en heet WAB.

6.2 AANBEVELINGEN

Op basis van het uitgevoerde onderzoek worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- Vanwege de overgang van heet naar warm WAB, de toepassing van asfaltgranulaat in WAB en vanwege de verminderde kwaliteit van modern bitumen, is het noodzakelijk om aanvullende eisen te stellen ten opzichte van de huidige Standaard RAW-bepalingen. Deze zullen binnen het KCW-project verder worden vormgegeven.
- Er moet rekening worden gehouden bij het stellen van toekomstige eisen met een verschil in prestaties van asfalt dat in het laboratorium is vervaardigd ten opzichte van asfalt dat in het veld wordt verwerkt.
- Voor toekomstige aanpassingen aan het levensduurmodel voor WAB wordt aanbevolen om de breukenergie tot bezwijken en de rek bij breuk in beschouwing te nemen. Mogelijk kunnen veranderingen van materiaalgedrag in de tijd hiermee beter inzichtelijk worden gemaakt en kan ook veranderend materiaalgedrag door verlaging van de productietemperatuur en verandering van het percentage asfaltgranulaat hiermee worden beschreven.
- Een voordeel van de ITT-proef ten opzichte van de driepunts-buigproef is dat iedere grotere aannemer deze proef zelf kan uitvoeren. Een analyse van rek bij breuk en breukenergie op basis van deze proef zou dus een groot voordeel zijn. Op dit moment zijn de resultaten van beide proeven nog niet goed met elkaar te vergelijken. Hiervoor is nadere analyse noodzakelijk. Tevens ontbreekt een dataset met verschillende leeftijden voor de ITT-proef.

7

REFERENTIES

- [1] Projectplan Klimaatneutraal en circulair Waterbouwasfalt versie 1.0; 14-06-2023; opstellers: Marten Hoeksema (RWS WVL) 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 Looff van Infram-Hydren.
- [7] Plan van aanpak levensduur warm waterbouwasfaltbeton; Infram-Hydren; datum 26 juni 2023; concept, versie 2; kenmerk: 230620-22i826-PVA levensduur warm WAB.
- [8] Levensduurmodel waterbouwasfaltbeton; Doorontwikkeling op basis van gegevens uit veiligheidsbeoordeling; Deltares 2023; 11209268-012-GEO-0001; versie 1.0.
- [9] Studie levensduuraspecten van waterbouwasfaltbeton; Met meetdata van drie dijkvakken met oud WAB; Deltares 2024; 11209268-024-GEO-0001; versie 1.0.
- [10] Resultaten werkpakket 5 inzake Klimaatneutraal en Circulair Waterbouwasfaltbeton; Deltares 2023; 11209271-005-GEO-0007, status definitief.
- [11] Eindrapport project POV-Wadden asfaltbekledingen; POV-Waddenzeedijken 2021, Kiwa KOAC e190038401-5.
- [12] Water- en vorstgevoeligheid 3 mengsels WAB, e230137301, Kiwa KOAC, augustus 2023
- [13] Handreiking voor de specificatie van levensduur van dijkbekledingen van waterbouwasfaltbeton, e140416901-2, Kiwa KOAC, mei 2020
- [14] Excel Sheet: Analyse indirecte trekproef.xls (standaard sheet voor de uitwerking van de data van de indirecte trekproef), KOAC-NPC, P.C. Hopman, versie 2.0b, januari 2010
- [15] Asfaltmengselkaart WAB 16, an955500v1, Asfaltnu, 19 juni 2024
- [16] Vooronderzoek Waterbouwasfaltbeton, Asfaltnu, 18 november 2023
- [17] Onderzoek op hete en warme asfaltplaten, e230341901, Kiwa KOAC, februari 2024
- [18] Handreiking Continu Inzicht Dijkbekledingen van Waterbouwasfaltbeton, Stowa 2017, rapport 2017-09.

BIJLAGE A

ASFALTMENGSELKAART [15]

AsfaltNu			
Plantijnweg 32	Telefoon:		
4104 BB Culemborg Nederland	E-mail:	info@asfaltnu.nl	
ASFALTMENGSELKAART 01		an955500v1	Printdatum: 19-06-2024



MENGSELGEGEVENS

Mengselontwerp code	ASN01320	Europese norm	
Mengselcode	an955500v1	Europese benaming	
Typeonderzoek code	TA073	Ingangsdatum	30-11-2022
Opmerkingen	TA073	Geldig tot	30-11-2027

Bouwstoffen

Bouwstofcode	Naam	Bouwstofverhouding % (m/m)
6026 (v1.2)	Bestone 8/11 GIB	10,41
6034 (v1.2)	Bestone 11/16 GIB	11,84
3024 (v1.0)	Kwartzsand 0/2 Kaliwaal 41	20,32
2003 (v1.0)	Wigro 0/0 Sibelco	2,63
2201 (v1.0)	Productiestof 0/0 AMI	1,00
1010 (v1.0)	Bitumen 160/220 -	3,80
7810 (v1.3)	Asfaltgranulaat 0/16 Cat C Feedstock	50,00

Samenstelling

Zeef	FPC Zeef	Doel % (m/m)	Berekend recept % (m/m)
22,4 mm	1,4D	100,0	100,0
16 mm	DZF	97,5	97,5
11,2 mm		82,5	82,5
8 mm	CCS	67,0	67,0
5,6 mm		58,8	58,8
2 mm	2 mm	50,0	50,0
0,5 mm		35,4	35,4
0,18 mm		12,9	12,9
0,125 mm	CFS	9,7	9,7
0,063 mm	0,063 mm	8,0	8,0

Bindmiddelgehalte

Bindmiddelgehalte wens	6,1 % (m/m)
Berekende bindmiddelcorrectie	0,0 % (m/m)
Bindmiddelgehalte doel	6,1 % (m/m)
Oplosbaar bindmiddelgehalte	6,1 % (m/m)

ASFALTMENGSELKAART 01

an955500v1

Printdatum:

19-06-2024

Uitgangspunten typeonderzoek

Dichtheid mengsel berekend	2421 kg/m ³	Bitumengrade	PEN 70/100
Streefdichtheid	2386 kg/m ³	Maximale productietemperatuur	180 °C
Vmin % (V/V)	Vmax 5,0 % (V/V)	Minimale aflevert temperatuur	140 °C
Holle ruimte berekend	1,3 % (V/V)	Adviesmengtemperatuur	150 °C
Dichtheid mineraal aggregraat berekend	2657 kg/m ³	Verwerkingstemperatuur minimaal	140 °C
TR&K-mengsel berekend	48,9 °C	Verwerkingstemperatuur maximaal	180 °C
Pen-mengsel berekend	76 0,01 mm	Praktijk-shiftfactor healing berekend	4,00

Onderzoeksresultaten

Proefspecificatie	Waarde	Datum onderzoek	CE-min	CE-max
Streefdichtheid	2386 kg/m ³			
Dichtheid mengsel (bepaald)	2449 kg/m ³			
Bindmiddelgehalte	6,1 % (m/m)	B _{min3,0}		
Holle ruimte	2,6 % (V/V)	V _{min} NPD	V _{max} 5,0	
Reactie bij brand	NPD Euroklasse	NPD		
Vullingsgraad	91,6 % (V/V)	VFB _{min} NPD	VFB _{max} NPD	
Holle ruimte in aggregraat	15,5 % (V/V)	VMA _{min} NPD		
Penetratie mengsel (berekend)	76 0,1 mm			
TR&K mengsel (berekend)	48,9 °C			

Referentie

Zeef	FPC Zeef	Ontwerp % (m/m)	Ontwerpsamenstelling geschiktheidsonderzoek % (m/m)	Advies referentie samenstelling % (m/m)
22,4 mm	1,4D	100,0	100,0	100,0
16 mm	DZF	97,5	97,0	97,0
11,2 mm		82,5	83,5	
8 mm	CCS	67,0	68,0	68,0
5,6 mm		58,8	60,0	
2 mm	2 mm	50,0	50,0	50,0
0,5 mm		35,4	36,5	
0,18 mm		12,9	14,0	
0,125 mm	CFS	9,7	10,5	10,5
0,063 mm	0,063 mm	8,0	8,5	8,5

BIJLAGE B

RAPPORTAGE VOORONDERZOEK [16]

Vooronderzoek Waterbouwasfaltbeton

Soort asfalt LEAB Waterbouwasfaltbeton 16 70/100 50% PR BSt
 Nummer vooronderzoek TA073
 Datum vooronderzoek 18-11-2023
 Plaats vooronderzoek Centraal Laboratorium AsphaltNu Culemborg
 Regelgeving Standaard RAW Bepalingen 2020
 Rapport opgesteld door Ruud Kurvers

1.0 Bouwstoffen

Door zeef [% m/m]	Bestone 11/16	Bestone 8/11	Kwrtsznd 0/2		Wigro	Productie stof	Bitumen 160/220
	6034	6026	3024		2003	2201	1010
31,5 mm	100,0						
22,4 mm	100,0						
16 mm	86,5	100,0					
11,2 mm	17,5	86,5					
8 mm	3,5	17,5					
5,6 mm	1,5	3,5					
4 mm		2,0	100,0				
2 mm	1,0	1,5	98,0		100,0	100,0	
1 mm			93,0				
0,5 mm			65,0				
0,18 mm			4,5				
0,125 mm	0,5	0,5	0,5		95,5	92,0	
0,063 mm	0,5	0,5	0,5		84,5	78,5	
Dichtheid [kg/m³]	2715	2715	2640		2780	2675	1018
Korrelvorm Cat. FI	FI_20	FI_20					
Korrelvorm Cat. C	C_NPD	C_NPD					
Bitumengetal [-]					45	40	
Penetratie [dmm]							183

2.0 Asfaltgranulaat

Door zeef [% m/m]	1 van 5	2 van 5	3 van 5	4 van 5	5 van 5	Gem [*]	Spreiding
						7810	7810
22,4 mm	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
16 mm	97,3	98,1	99,2	98,9	98,2	98,5	0,5
11,2 mm	86,1	88,2	90,3	91,0	89,8	89,0	1,1
8 mm	76,3	74,6	80,4	77,9	76,8	77,0	2,1
5,6 mm	63,5	64,1	66,9	65,8	63,1	64,5	1,5
2 mm	46,8	47,4	49,5	47,9	49,8	48,5	1,0
0,5 mm	34,5	33,1	35,8	33,8	34,2	34,5	
0,18 mm	16,6	15,9	17,8	14,7	16,0	16,0	
0,125 mm	12,2	11,4	12,3	10,7	11,1	11,5	
0,063 mm	8,5	9,6	9,4	8,7	9,5	9,0	0,4
Dichtheid [kg/m³]						2455	
Korrelvorm Cat. C						C_50/30	
Nevenbestanddelen Cat. F						F1	
Bitumengehalte [%m/m]	4,6	4,8	4,4	4,6	4,8	4,6	0,2
Penetratie [dmm]	17	20	16	18	19	18	1

*Gemiddelde korrelverdeling [Gem] afgerond op 0,5 [% m/m].

3.0 Resultaten vooronderzoek

3.1 Holle ruimte bepaling met slagverdichting conform RAW 2020 (2 x 20 slagen)

Serie		A	B	C
Bitumenpercentage		5,8% "in"	6,1% "in"	6,4% "in"
Dh. proefstuk	1	2374	2388	2381
[kg/m³]	2	2389	2390	2389
	3	2390	2385	2387
	4	2404	2382	2383
Gem		2389	2386	2385
Dh. mengsel	[kg/m³]	2561	2449	2450
Holle ruimte	1	7,3	2,5	2,8
[% v/v]	2	6,7	2,4	2,5
	3	6,7	2,6	2,6
	4	6,1	2,7	2,7
Gem		6,7	2,6	2,7

3.3 Gekozen bindmiddelgehalte

Het laagste bindmiddelgehalte in het traject 5,8 - 6,4 met een holle ruimte van ten hoogste 3,0 [% v/v] is 6,1 [% m/m]. De berekende penmengbitumen is bij 6,1 [% m/m] bindmiddel: 76 dmm.

4.0 Samenstelling vooronderzoek

4.1 Doelsamenstelling en doelsamenstelling na extractie [korrelverdeling en zandpunt]

Door zeef [% m/m]	Doel	[*] Doel na extr. Verwrkng	Extr. Clab gekozen serie
31,5 mm	100,0	100,0	100,0
22,4 mm	100,0	100,0	100,0
16 mm	97,5	97,0	97,0
11,2 mm	82,5	83,5	82,1
8 mm	67,0	68,0	66,6
5,6 mm	58,8	60,0	57,6
2 mm	50,0	50,0	49,4
0,5 mm	35,4	36,5	36,8
0,18 mm	12,9	14,0	14,9
0,125 mm	9,7	10,5	11,1
0,063 mm	8,0	8,5	9,5
Zandpunt 2 mm - 500 µm	35	33	32
Zandpunt 500µm - 180 µm	54	54	55
Zandpunt 180 µm - 63 µm	12	13	14

**Doel na extractie is afgerond op 0,5 [% m/m].*

4.2 Referentiesamenstelling en streefdichtheid

De referentiesamenstelling en de streefdichtheid volgen uit het geschiktheidsonderzoek.

4.3 Bijlagen

Als bijlage toegevoegd aan dit vooronderzoek zijn de CE - DoP - BvO documenten van de bouwstoffen en een afdruk van het definitief mengselontwerp met daarin o.a. de bouwstofsamenstelling.

BIJLAGE C

RAPPORTAGE LABORATORIUMONDERZOEK KIWA KOAC [17]



Kiwa KOAC B.V.

Wilmersdorf 50

Postbus 137

7300 AC Apeldoorn

T 088 562 26 72

E info@kiwa-koac.com

www.kiwa-koac.com

e230341901

Onderzoek op hete en warme asfaltplaten





Projectnummer : e230341901
Offertenummer en datum : o230850/staf/mac/dvh 3-10-2023
Titel rapport : Onderzoek op hete en warme asfaltplaten
Status rapport : Definitief

Naam opdrachtgever : Infram-Hydren B.V.
Adres : Postbus 150
Plaats : 3950 AD Maarn
Naam contactpersoon : De heer A. de Looff
Datum opdracht : 07-11-2023
Kenmerk opdracht : 23i731

Contactpersoon Kiwa KOAC : ing. A. Achahchah
Auteur(s) rapport : ir. M. Sadeghian

Rapportage

Naam: ir. M. Sadeghian

Functie: Consultant

Handtekening:

Datum: 21 februari 2024

Autorisatie

Naam: ing. A. Achahchah

Functie: Senior Consultant

Handtekening:

Datum: 21 februari 2024

Zonder schriftelijke toestemming van Kiwa KOAC mag het rapport niet anders dan in zijn geheel worden gereproduceerd. Daar waar in deze rapportage specifieke opdrachtgever eigen informatie wordt vermeld (zoals bijvoorbeeld werkvaknummers, specifieke productnamen of mengselcodes) betreft het informatie die door de klant bij Kiwa KOAC is aangeleverd en waarvoor Kiwa KOAC niet verantwoordelijk is. Daar waar deze informatie van invloed kan zijn op de geldigheid van de resultaten is dit apart in deze rapportage vermeld. De in deze rapportage weergegeven meet- en testresultaten hebben enkel betrekking op de bij de betreffende resultaten aangegeven weggedeelten.



Inhoudsopgave

1	Inleiding	4
2	Bepalen dichtheid proefstuk en selectie proefstukken	5
3	Buigtreksterkte	8
3.1	Proefopstelling	8
3.2	Buigtreksterkte resultaten	8
4	Vermoeiingseigenschappen.....	9

Bijlage 1	Onderzoeksplan WAB
Bijlage 2	Resultaten buigtreksterkte
Bijlage 3	Resultaten vermoeiingsonderzoek



1 Inleiding

In deze rapportage worden de resultaten van de buigtreksterkte en vermoeiingseigenschappen van de vier asfaltplaten gerapporteerd. De vier asfaltplaten zijn vervaardigd bij AsfaltNu en in week 48 naar Kiwa KOAC gestuurd. Het onderzoek omvat verschillende aspecten namelijk het bepalen van de dichtheid van het proefstuk, de dichtheid van het mengsel, de holle ruimte, het bepalen van de buigtreksterkte en het vaststellen van de vermoeiingseigenschappen.

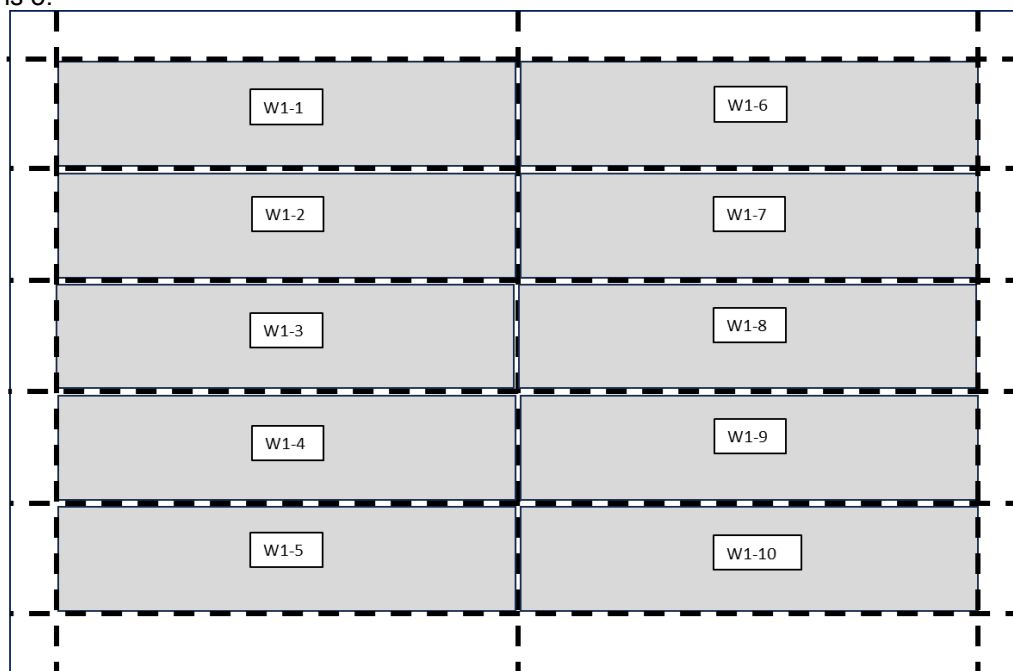
De platen 1 en 2 zijn Warm WAB, terwijl de platen 3 en 4 Heet WAB zijn. Het onderzoeksplan met kenmerk: 23i731-231205-01 is door Infram-Hydren opgesteld en op 5 december 2023 aan Kiwa KOAC verstrekt. Het onderzoek is te vinden in bijlage 1. Van elke plaat zijn 10 balkjes gezaagd met afmetingen van 220x50x50 mm. De asfaltplaten zijn geproduceerd op woensdag 22 november 2023. Het asfalt moest minstens 2 weken na productie uitharden voordat de mechanische eigenschappen werden bepaald. Het testen is daarom gestart na 7 december 2023.



2 Bepalen dichtheid proefstuk en selectie proefstukken

Na het zagen van de proefstukken wordt elk proefstuk gedroogd tot een constante massa. Van elk proefstuk wordt de dichtheid bepaald door nauwkeurige metingen van de afmetingen en massa van het proefstuk. Door AsphaltNu is de dichtheid van het mengsel van de specie bepaald, deze is voor alle platen gelijk aan 2.424 kg/m^3 . Uit de dichtheid van het mengsel en dichtheid van het proefstuk wordt voor elk proefstuk de holle ruimte berekend.

Op basis van de resultaten van de dichtheid is de selectie van de monsters uitgevoerd. De methode voor de selectie is beschreven in het onderzoeksplan. De resultaten van de dichtheid en de selectie van proefstukken worden weergegeven in onderstaande tabellen op de volgende bladzijde. De codering van de proefstukken is gedaan op basis van de suggestie in het onderzoeksplan. Bijvoorbeeld, het proefstuk W2-3 is een warme plaat 2 en het monsternummer is 3.



Figuur 1 Zaagplan voor de platen (bron: onderzoeksplan opdrachtgever)

De proefstukken worden per plaat zodanig geselecteerd dat de gemiddelde dichtheid van de proefstukken waarvan de buigreksterkte wordt bepaald, ongeveer gelijk is aan de dichtheid van de proefstukken waarvan de vermoeiingseigenschappen worden bepaald. Deze gemaakte selectie is ter accordering aan Infram Hydren gestuurd en de selectiegroep is bevestigd door Infram-Hydren voordat het onderzoek op 12 december 2023 begon.

Proefstuk	Gemiddelde [mm]			Dichtheid [kg/m³]		dichtheid mengsel	holle ruimte [%]		Afwijkende dichtheid	Controle		Groep
	Breedte	Hoogte	Lengte	gemeten	gewogen	kg/m³	gemeten	gewogen	kg/m³	± 30 kg/m³		
W1-1	50.4	50.4	222.9	2375	2386	2424	2	1.6	3	Goedkeuren		vermoeiingseigenschappen
W1-2	50.4	49.8	223.2	2376	2377	2424	2	1.9	2	Goedkeuren		buigtreksterkte
W1-3	50.3	49.9	224.1	2373	2388	2424	2.1	1.5	5	Goedkeuren		vermoeiingseigenschappen
W1-4	50.4	49.8	224.3	2367	2381	2424	2.4	1.8	11	Goedkeuren		buigtreksterkte
W1-5	50.3	50.2	225.1	2380	2389	2424	1.8	1.4	-2	Goedkeuren		vermoeiingseigenschappen
W1-6	49.8	50.2	227.7	2385	2387	2424	1.6	1.5	-7	Goedkeuren		vermoeiingseigenschappen
W1-7	50.1	50.3	227.9	2385	2396	2424	1.6	1.2	-7	Goedkeuren		buigtreksterkte
W1-8	50.2	50.2	228.1	2389	2394	2424	1.4	1.2	-11	Goedkeuren		buigtreksterkte
W1-9	50.2	50.1	228.7	2373	2384	2424	2.1	1.7	5	Goedkeuren		reserve
W1-10	50	50.3	229	2376	2384	2424	2	1.7	2	Goedkeuren		reserve
Gemiddelde	50.2	50.1	226.1	2378	2387		1.9	1.6				
W2-1	50	50.1	227.3	2368	2387	2424	2.3	1.5	10	Goedkeuren		vermoeiingseigenschappen
W2-2	50	49.6	227.7	2385	2388	2424	1.6	1.5	-8	Goedkeuren		buigtreksterkte
W2-3	50	50.3	227.1	2382	2388	2424	1.7	1.5	-5	Goedkeuren		vermoeiingseigenschappen
W2-4	50.2	50.1	227.1	2375	2385	2424	2	1.6	3	Goedkeuren		buigtreksterkte
W2-5	50.3	50.1	224.6	2381	2388	2424	1.8	1.5	-4	Goedkeuren		vermoeiingseigenschappen
W2-6	50.2	49.6	226.9	2374	2376	2424	2.1	2	4	Goedkeuren		buigtreksterkte
W2-7	50.4	50.1	224.6	2374	2390	2424	2.1	1.4	4	Goedkeuren		buigtreksterkte
W2-8	50.1	50.1	224.3	2382	2388	2424	1.7	1.5	-5	Goedkeuren		vermoeiingseigenschappen
W2-9	50.2	49.6	224.1	2380	2385	2424	1.8	1.6	-3	Goedkeuren		reserve
W2-10	50.4	50	223.7	2374	2386	2424	2.1	1.6	4	Goedkeuren		reserve
Gemiddelde	50.2	50.0	225.74	2378	2386		1.9	1.6				
				Gemiddelde W-WAB voor buigtreksterkte					2378.13			
				Gemiddelde W-WAB voor vermoeiingseigenschappen					2378.25			

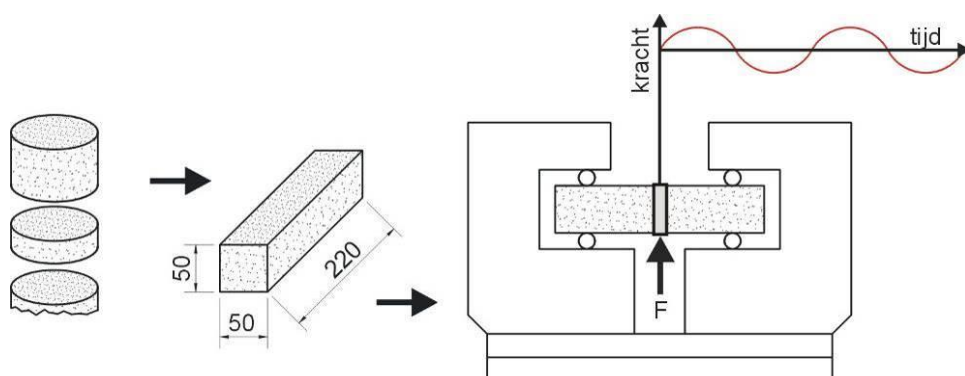
Proefstuk	Gemiddelde [mm]			Dichtheid [kg/m³]		dichtheid mengsel	holle ruimte [%]		Afwijkende dichtheid	Controle	Groep
	Breedte	Hoogte	Lengte	gemeten	gewogen	kg/m³	gemeten	gewogen	kg/m³	± 30 kg/m³	
H3-1	50.3	50.3	226.8	2362	2381	2424	2.6	1.8	15	Goedkeuren	vermoeiingseigenschappen
H3-2	50.1	50.3	227.1	2370	2382	2424	2.2	1.7	7	Goedkeuren	vermoeiingseigenschappen
H3-3	50.3	50	227	2375	2385	2424	2	1.6	2	Goedkeuren	buigtreksterkte
H3-4	49.8	50	227.5	2392	2397	2424	1.3	1.1	-15	Goedkeuren	vermoeiingseigenschappen
H3-5	50.3	50	227.9	2388	2390	2424	1.5	1.4	-11	Goedkeuren	vermoeiingseigenschappen
H3-6	50	50.3	223.6	2373	2386	2424	2.1	1.6	4	Goedkeuren	buigtreksterkte
H3-7	50.3	50	223.9	2379	2394	2424	1.9	1.2	-2	Goedkeuren	buigtreksterkte
H3-8	50.3	50.2	224.2	2384	2387	2424	1.7	1.5	-7	Goedkeuren	buigtreksterkte
H3-9	50.3	50.2	224.4	2374	2386	2424	2.1	1.6	3	Goedkeuren	reserve
H3-10	50.2	50.3	225.1	2373	2385	2424	2.1	1.6	4	Goedkeuren	reserve
Gemiddelde	50.2	50.2	225.8	2377	2387		2.0	1.5			
H4-1	50.4	50.3	229.2	2369	2385	2424	2.3	1.6	2	Goedkeuren	vermoeiingseigenschappen
H4-2	50.6	50.3	228.7	2367	2382	2424	2.4	1.7	4	Goedkeuren	buigtreksterkte
H4-3	50.2	50.4	228.6	2381	2389	2424	1.8	1.4	-10	Goedkeuren	buigtreksterkte
H4-4	50.3	50	228.7	2385	2395	2424	1.6	1.2	-14	Goedkeuren	vermoeiingseigenschappen
H4-5	50.3	50.3	228.6	2373	2388	2424	2.1	1.5	-2	Goedkeuren	vermoeiingseigenschappen
H4-6	50.5	50.2	223.9	2373	2390	2424	2.1	1.4	-2	Goedkeuren	buigtreksterkte
H4-7	50.5	50.2	223.7	2374	2387	2424	2.1	1.5	-3	Goedkeuren	buigtreksterkte
H4-8	50.5	50.2	223.6	2363	2381	2424	2.5	1.8	8	Goedkeuren	vermoeiingseigenschappen
H4-9	50.5	50.1	223.3	2358	2375	2424	2.7	2	13	Goedkeuren	reserve
H4-10	50.5	50.2	223.1	2369	2382	2424	2.3	1.7	2	Goedkeuren	reserve
Gemiddelde	50.4	50.2	226.1	2371	2385		2.2	1.6			
				Gemiddelde H-WAB voor buigtreksterkte					2375.75		
				Gemiddelde H-WAB voor vermoeiingseigenschappen					2375.25		



3 Buigtreksterkte

3.1 Proefopstelling

De balkjes zijn in de driepuntsbuigopstelling geplaatst. In Figuur 2 is een schematische weergave van de proefopstelling gegeven. Op de proefstukken zijn aan de uiteinden stalen beugels bevestigd die bij de opleggingen zijn geplaatst.



Figuur 2 Schematische weergave van de driepuntsbuigopstelling

3.2 Buigtreksterkte resultaten

Voor het bepalen van de buigtreksterkte wordt de kracht opgevoerd die de vijzel op het proefstuk uitoefent. De verplaatsing van het proefstuk wordt gemeten. De maximale kracht die het proefstuk kan weerstaan, wordt de buigtreksterkte genoemd.

De buigtreksterkte is bepaald in de driepuntsbuigopstelling bij 5 °C en met een belastingsnelheid van 0,35 mm/s. In Tabel 1 zijn de resultaten samengevat. In bijlage 2 zijn de kracht-verplaatsingsdiagrammen opgenomen.

Tabel 1 Buigtreksterkte resultaten

Plaat	Aantal balkjes	σ_{gem}^* [MPa]	$\sigma_{\text{st.dev}}$ [MPa]	σ_{max}^{**} [MPa]	$\sigma_{\text{min}}^{***}$ [MPa]
W	8	9.23	0.47	9.78	8.30
H	8	9.97	0.39	10.45	9.44

* gemiddeld gemeten buigtreksterkte

** maximale gemeten buigtreksterkte

*** minimale gemeten buigtreksterkte



4 Vermoeiingseigenschappen

De vermoeiingseigenschappen worden in totaal 16 keer bepaald: 8 keer voor W-WAB en 8 keer voor H-WAB. Elk proefstuk wordt gekoppeld aan een proefstuk waarvan de buigtreksterkte is bepaald op basis van de dichtheid van het proefstuk. Zo ontstaan paren met een vergelijkbare dichtheid van het proefstuk, waarvan eenmaal de buigtreksterkte en eenmaal de vermoeiingseigenschappen zijn bepaald.

Voor asfalt dijkbekledingen is een model ontwikkeld met een gekromde vermoeiingslijn om het vermoeiingsgedrag van waterbouwasfaltbeton te beschrijven. De relatie tussen het aantal lastherhalingen bij bezwijken (N) en de buigtreksterktes (σ_b) en opgelegde spanning (σ_o) luidt:

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

Hierin zijn α en β materiaalparameters (Tabel 2).

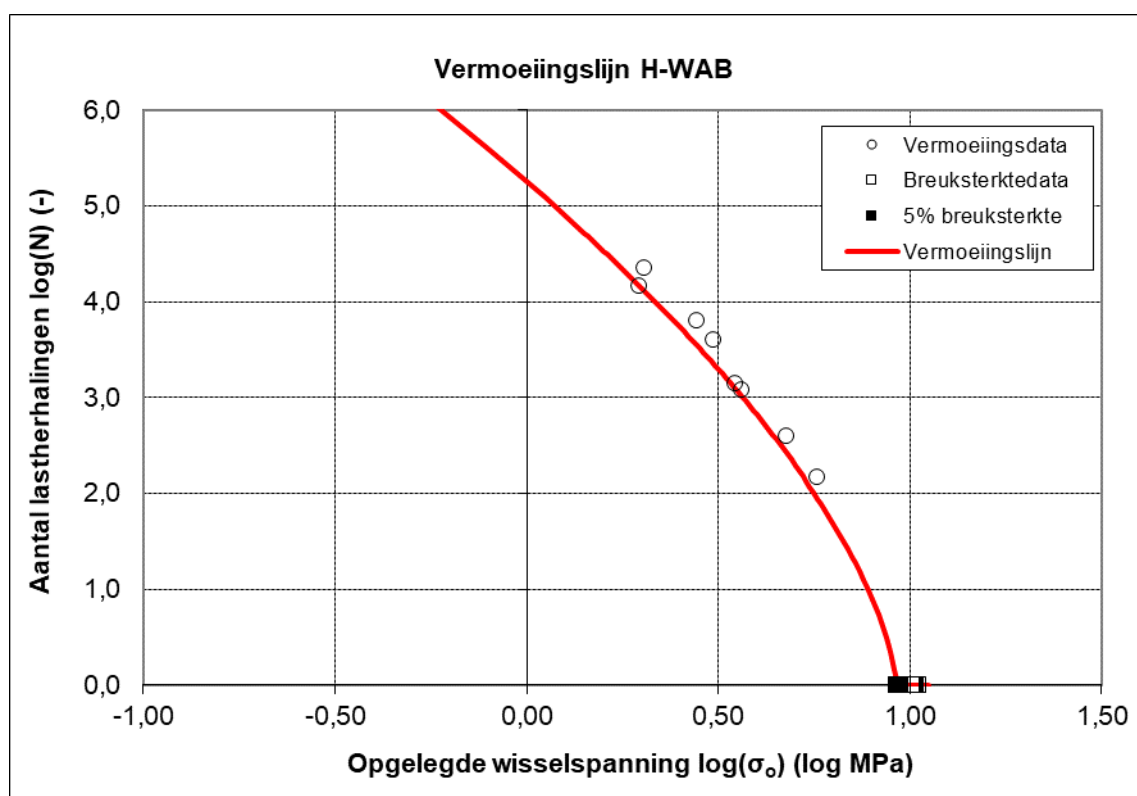
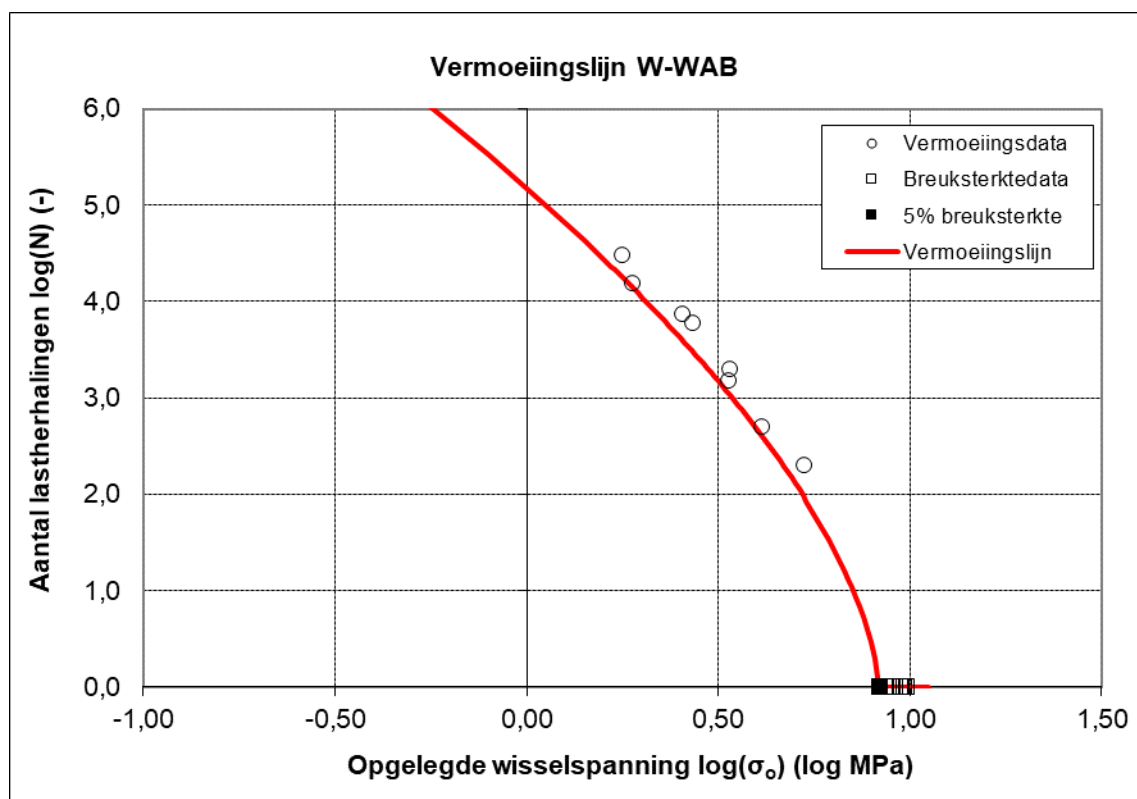
Voor het opstellen van de vermoeiingslijn wordt gebruik gemaakt van het MS-Excel-sjabloon: grafiekenmaker karakteristieke vermoeiingslijn (versie 5).

4.1.1 Resultaten

De vermoeiingslijn van de betreffende W- en H- WAB zijn opgenomen in de grafiek in Figuur 3 en Tabel 3 en Tabel 4. In Tabel 2 zijn de vermoeiingsparameters van de asfaltbekleding opgenomen. De vermoeiingsresultaten zijn opgenomen in bijlage 3.

Tabel 2 Vermoeiingsparameters

Plaat	α	β
W-WAB	0.62	5.46
H-WAB	0.64	5.38



Figuur 3 Vermoeiingslijn W- en H- WAB



In Tabel 3 en Tabel 4 zijn de invoer voor de grafiekenmaker opgenomen.

Tabel 3 Invoer voor grafiekenmaker W-WAB

Proefstuk	Buigtreksterkte [MPa]	Opgelegde spanning [MPa]	Lastherhalingen tot bezwijken
W1-4 en W2-1	9,01	1,88	15500
W2-6 en W1-3	9,47	3,35	1500
W2-7 en W1-1	8,30	4,10	500
W2-4 en W1-5	9,12	2,72	6000
W1-2 en W2-5	9,78	5,31	200
W2-2 en W2-3	9,66	1,77	30500
W1-7 en W2-8	9,10	3,38	2000
W1-8 en W1-6	9,39	2,55	7500

Tabel 4 Invoer voor grafiekenmaker H-WAB

Proefstuk	Buigtreksterkte [MPa]	Opgelegde spanning [MPa]	Lastherhalingen tot bezwijken
H4-2 en H3-1	9,44	4,73	400
H3-6 en H4-8	10,31	1,95	15000
H4-6 en H4-1	10,45	5,72	150
H4-7 en H3-2	9,55	3,64	1200
H3-3 en H4-5	9,58	3,50	1400
H3-7 en H4-4	10,21	2,02	22500
H4-3 en H3-5	10,14	2,77	6500
H3-8 en H3-4	10,07	3,07	4000



Bijlage 1

Onderzoeksplan WAB

(3 pagina's, exclusief voorblad)

MEMO

Aan: Mohammad Sadeghian, Mounim Achahchah (Kiwa KOAC)

Van: Arjan de Looff

Onderwerp: Zaagplan en onderzoeksplan platen H-WAB en W-WAB **Bijlage(n):** -

Kenmerk: 23i731-231205-01 **Status:** versie 1

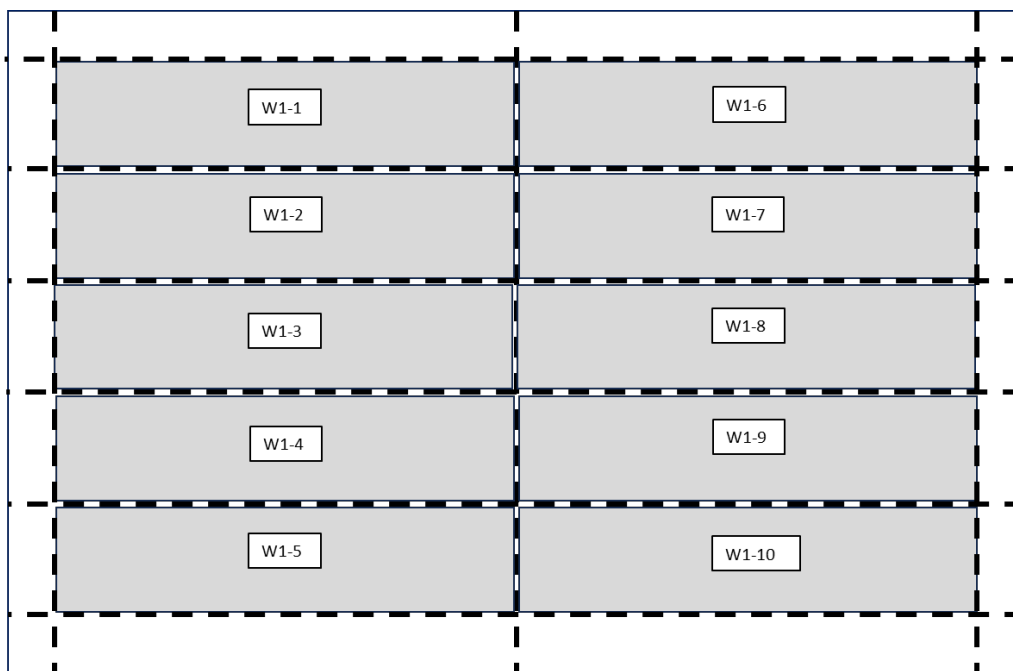
Datum: 05 december 2023

Inleiding

In week 48 zijn er 4 asfaltplaten door AsfaltNu vervaardigd die inmiddels naar het laboratorium van Kiwa KOAC zijn getransporteerd. In deze memo zijn het zaagplan en het onderzoeksplan beschreven.

Zaagplan

Door AsfaltNu zijn 4 platen vervaardigd, genummerd van 1 t/m 4. De platen 1 en 2 zijn warm WAB, de platen 3 en 4 zijn heet WAB. Uit elke plaat worden 10 balkjes gezaagd van 220x50x50 mm. De werkzaamheden worden uitgevoerd volgens de geldende proefvoorschriften, zie deel 2 van de bijlage. Hierin zijn tevens de zaagtoleranties opgenomen. In figuur 1 is weergegeven op welke wijze de 10 proefstukken uit een plaat moeten worden gezaagd.



Figuur 1 Zaagplan voor de platen

Voor codering van de proefstukken, zie tabel 1 en figuur 1.

Tabel 1 Codering van de proefstukken

plaat 1	plaat 2	plaat 3	plaat 4
W1-1	W2-1	H3-1	H4-1
W1-2	W2-2	H3-2	H4-2
W1-3	W2-3	H3-3	H4-3
W1-4	W2-4	H3-4	H4-4
W1-5	W2-5	H3-5	H4-5
W1-6	W2-6	H3-6	H4-6
W1-7	W2-7	H3-7	H4-7
W1-8	W2-8	H3-8	H4-8
W1-9	W2-9	H3-9	H4-9
W1-10	W2-10	H3-10	H4-10

Bepalen dichtheid proefstuk, dichtheid mengsel en holle ruimte

Na het zagen van de proefstukken, wordt elk proefstuk gedroogd tot een constante massa. Van elk proefstuk wordt de dichtheid bepaald door het nauwkeurig bepalen van de afmetingen en de massa van het proefstuk. Door AsphaltNu is de dichtheid mengsel van de specie bepaald. Deze is voor alle platen gelijk: 2.424 kg/m³. Uit de dichtheid mengsel en dichtheid proefstuk wordt voor elk proefstuk de holle ruimte berekend.

Selectie proefstukken

Nagegaan wordt of er beschadigde proefstukken zijn of proefstukken met een duidelijk afwijkende dichtheid proefstuk. Een proefstuk heeft een afwijkende dichtheid als deze meer dan 30 kg/m³ afwijkt van de gemiddelde dichtheid van de plaat. Deze worden niet in het onderzoek meegenomen. Indien er meer dan twee proefstukken uit één plaat beschadigd zijn of een afwijkende dichtheid hebben, graag contact opnemen met Infram Hydren voor overleg. Als er geen afwijkende of beschadigde proefstukken zijn, gelden de proefstukken 9 en 10 van elke plaat als reserve.

Per plaat worden 4 proefstukken gebruikt voor bepaling van de buigtreksterkte en 4 proefstukken voor bepaling van de vermoeiingseigenschappen. De proefstukken worden per plaat zodanig geselecteerd dat de gemiddelde dichtheid van de proefstukken waarvan de buigtreksterkte wordt bepaald ongeveer gelijk is aan de dichtheid van de proefstukken waarvan de vermoeiingseigenschappen worden bepaald. Op deze wijze worden 4x 8 series proefstukken verkregen waarvan de gemiddelde dichtheid ongeveer gelijk is:

- 8x W-WAB voor buigtreksterkte
- 8x W-WAB voor vermoeiingseigenschappen
- 8x H-WAB voor buigtreksterkte
- 8x H-WAB voor vermoeiingseigenschappen

Startdatum proefuitvoering

De asfaltplaten zijn geproduceerd op woensdag 22 november. Het asfalt moet ten minste 2 weken na productie besterven voordat mechanische eigenschappen worden bepaald. De startdatum voor vervolg van het onderzoek is ten vroegste donderdag 7 december.

Bepalen buigtreksterkte

De buigtreksterkte wordt in totaal 16x bepaald: 8x voor W-WAB en 8x voor H-WAB.

De buigtreksterkte wordt bij 5 °C en een verplaatsingssnelheid van 0,35 mm/s in de driepunts-buigopstelling bepaald. De werkzaamheden worden uitgevoerd volgens de geldende proefvoorschriften. Zie deel 2 van de bijlage voor meer informatie over de proefuitvoering.

Bepalen vermoeiingseigenschappen

De vermoeiingseigenschappen worden in totaal 16x bepaald: 8x voor W-WAB en 8x voor H-WAB. Elk proefstuk wordt gekoppeld aan een proefstuk waarvan de buigtreksterkte is bepaald op basis van de dichtheid proefstuk. Z ontstaan dus paren met een vergelijkbare dichtheid proefstuk waarvan eenmaal de buigtreksterkte en eenmaal de vermoeiingseigenschappen zijn bepaald.

Het belastingniveau is afhankelijk van de resultaten van het buigtreksterkte onderzoek. Het onderzoek wordt per dijkvak uitgevoerd. In tabel 2 zijn deze belastingniveaus opgenomen voor acht proefstukken.

Tabel 2 Vermenigvuldigingsfactoren voor instellen belastingniveau

Volgorde buigtreksterkte (gesorteerd op sterkte)	Bepaalde buigtreksterkte	Factor	Buigtreksterkte * factor
1	Te bepalen	0,47 - 0,60	Te berekenen
2	Te bepalen	0,25 - 0,35	Te berekenen
3	Te bepalen	0,35 - 0,47	Te berekenen
4	Te bepalen	0,60 - 0,70	Te berekenen
5	Te bepalen	0,60 - 0,70	Te berekenen
6	Te bepalen	0,35 - 0,47	Te berekenen
7	Te bepalen	0,25 - 0,35	Te berekenen
8	Te bepalen	0,47 - 0,60	Te berekenen

De vermoeiing van acht balkjes wordt bij 5°C en 1 Hz bepaald waarbij het belastingniveau varieert. Zie deel 1 van de bijlage voor meer informatie over de proefuitvoering.

Op te leveren gegevens

Er wordt een beknopte rapportage van de resultaten opgeleverd inclusief de Excel-bestanden met de resultaten van de buigtreksterkte- en vermoeiingsproeven.

Planning

Zodra bekend is wanneer de proeven worden uitgevoerd, graag de planning per mail doorgeven.



Bijlage 2

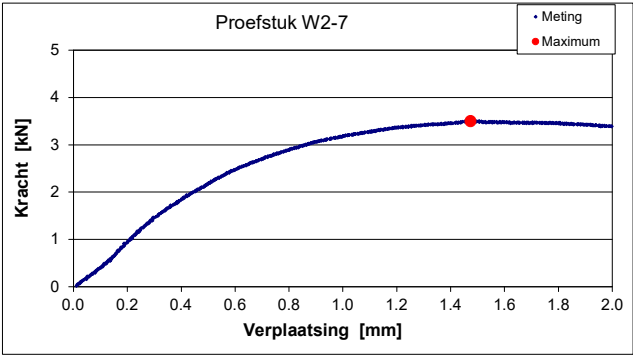
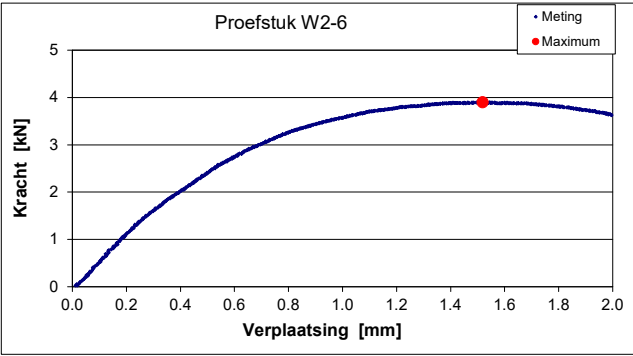
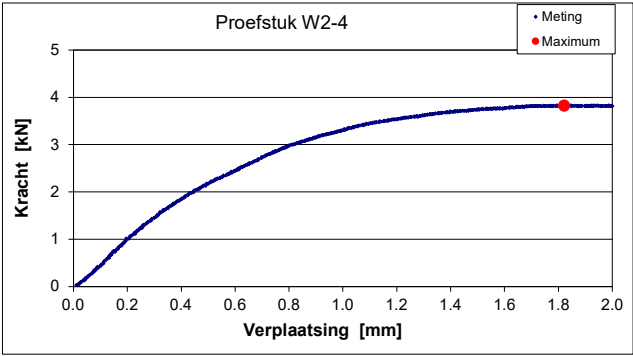
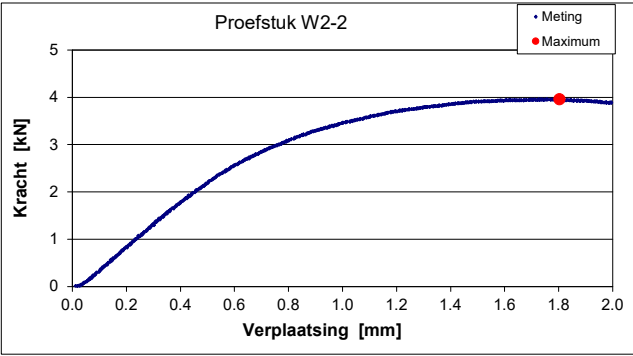
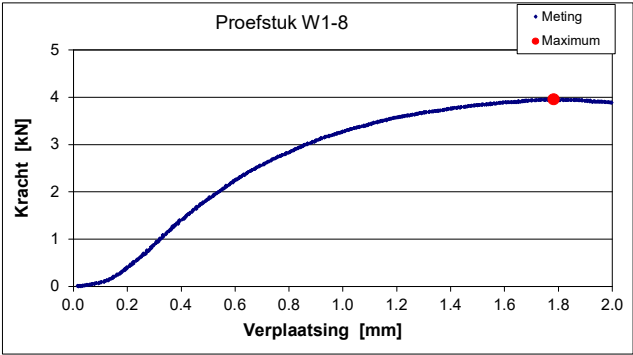
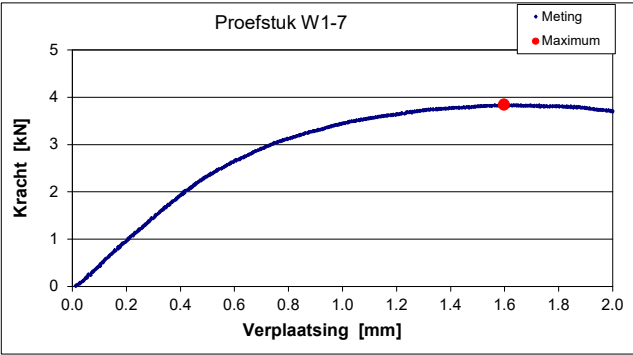
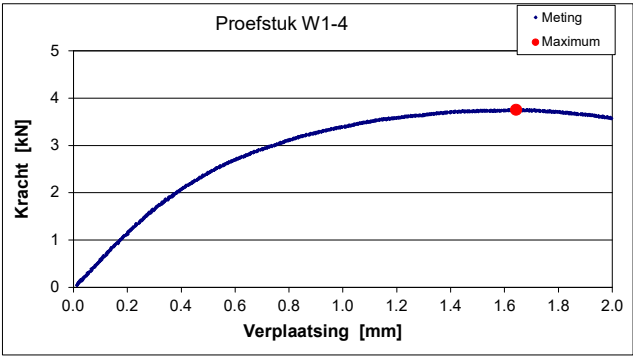
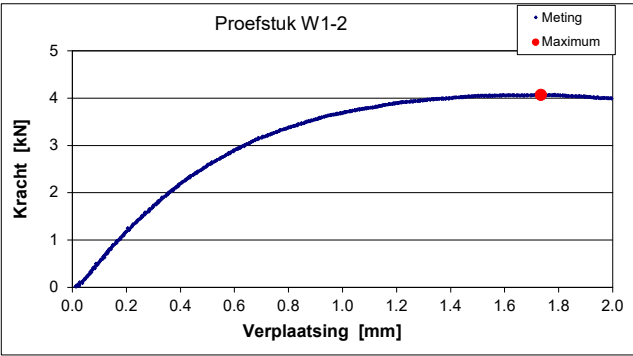
Resultaten buigtreksterkte

(2 pagina's, exclusief voorblad)

Proefstuk	Temp.	Hoogte	Breedte	Lengte	Massa	Dichtheid (gemeten)	Dichtheid (gewogen)	Breuk- sterkte	Buigtrek- sterkte	Rek bij breuk
	[°C]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kN]	[MPa]	[µm/m]
W1-2	5	49.8	50.4	223.2	1331	2376	2377	4.073	9.78	12862
W1-4	5	49.8	50.4	224.3	1333	2367	2381	3.753	9.01	12166
W1-7	5	50.3	50.1	227.9	1370	2385	2396	3.845	9.10	11960
W1-8	5	50.2	50.2	228.1	1374	2389	2394	3.959	9.39	13300
W2-2	5	49.6	50	227.7	1347	2385	2388	3.963	9.66	13278
W2-4	5	50.1	50.2	227.1	1357	2375	2385	3.832	9.12	13588
W2-6	5	49.6	50.2	226.9	1341	2374	2376	3.901	9.47	11161
W2-7	5	50.1	50.4	224.6	1346	2374	2390	3.498	8.30	10987

	Buigtreksterkte [MPa]
Gemiddelde	9.23
Standaard deviatie	0.47
Maximum	9.78
Minimum	8.30

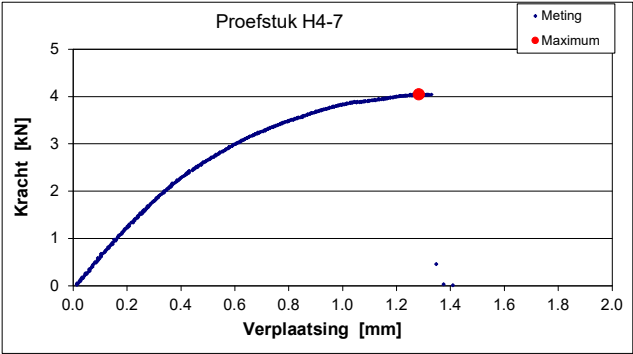
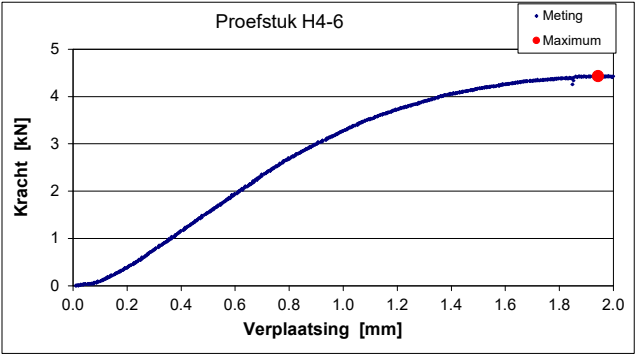
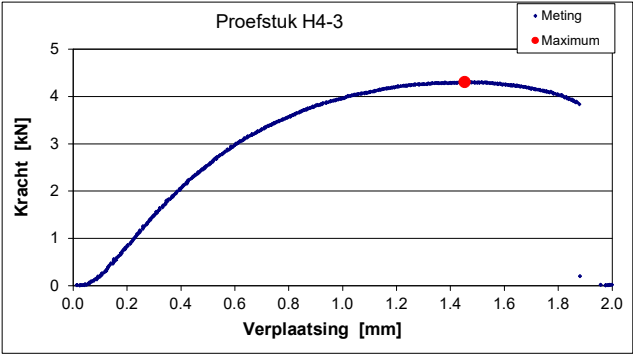
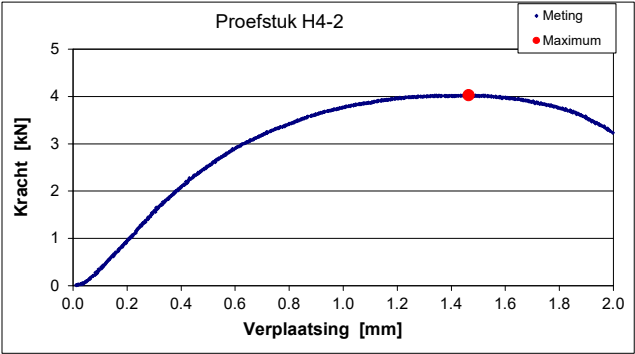
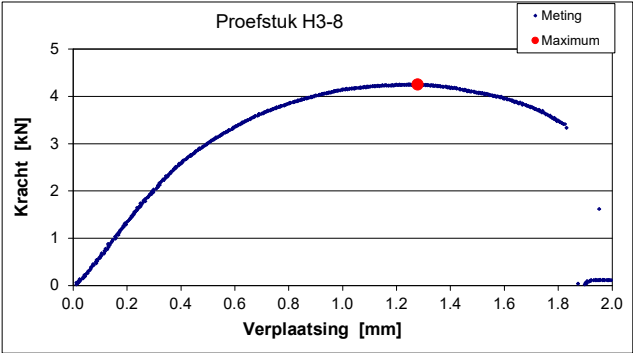
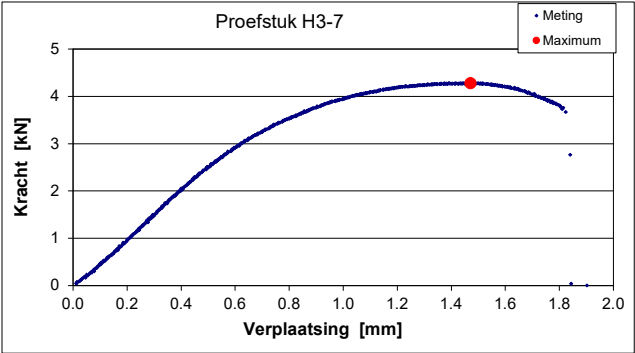
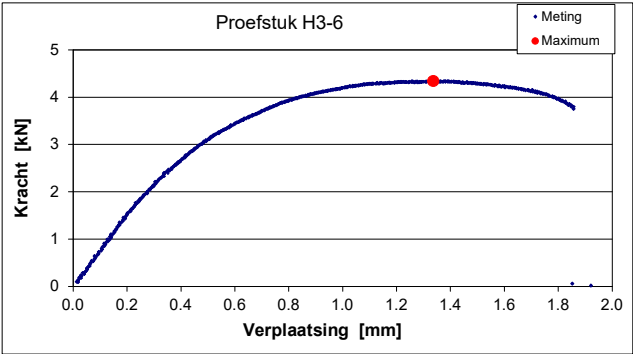
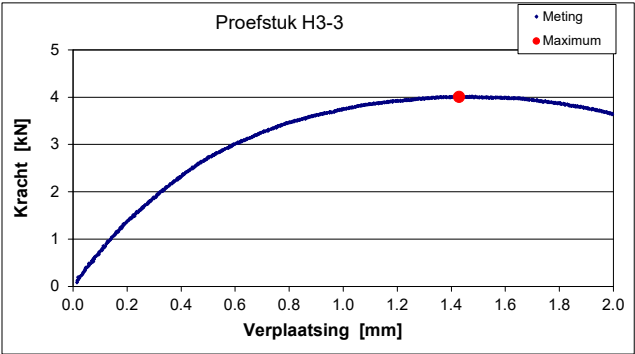
	Gemeten dichtheid [kg/m³]
Gemiddelde	2378
Standaard deviatie	7
Maximum	2389
Minimum	2367



Proefstuk	Temp.	Hoogte	Breedte	Lengte	Massa	Dichtheid (gemeten)	Dichtheid (gewogen)	Breuk- sterkte	Buigtrek- sterkte	Rek bij breuk
	[°C]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kN]	[MPa]	[µm/m]
H3-3	5	50.0	50.3	227	1356	2375	2385	4.015	9.58	10613
H3-6	5	50.3	50	223.6	1335	2373	2386	4.347	10.31	9949
H3-7	5	50.0	50.3	223.9	1340	2379	2394	4.280	10.21	10932
H3-8	5	50.2	50.3	224.2	1350	2384	2387	4.255	10.07	9531
H4-2	5	50.3	50.6	228.7	1378	2367	2382	4.028	9.44	10955
H4-3	5	50.4	50.2	228.6	1377	2381	2389	4.309	10.14	10874
H4-6	5	50.2	50.5	223.9	1347	2373	2390	4.434	10.45	14554
H4-7	5	50.2	50.5	223.7	1347	2374	2387	4.050	9.55	9541

	Buigtreksterkte [MPa]
Gemiddelde	9.97
Standaard deviatie	0.39
Maximum	10.45
Minimum	9.44

	Gemeten dichtheid [kg/m³]
Gemiddelde	2376
Standaard deviatie	5
Maximum	2384
Minimum	2367



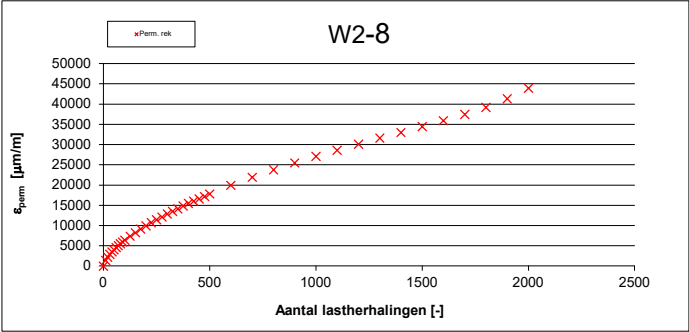
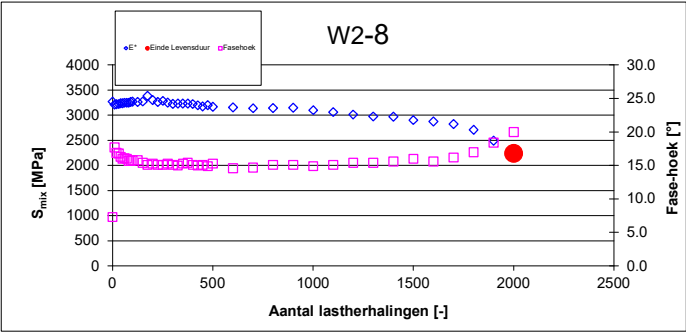
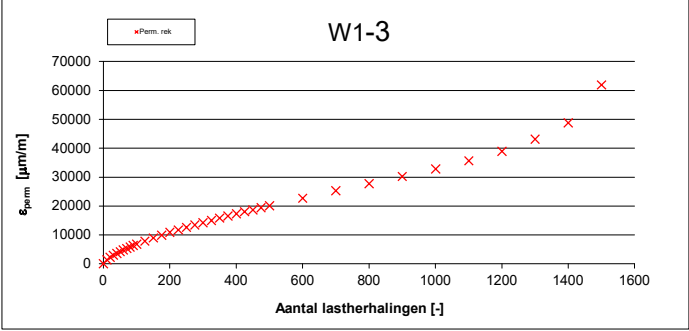
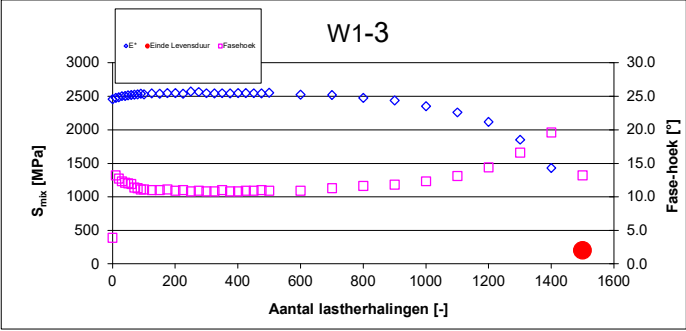
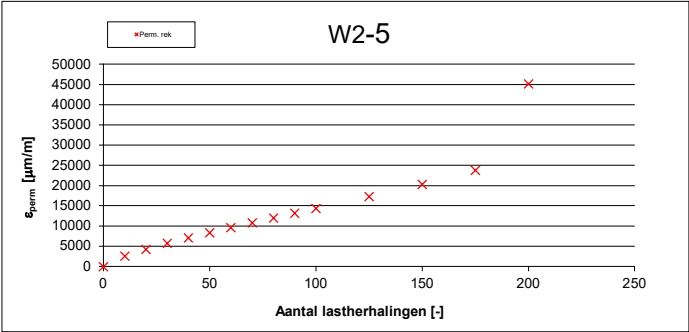
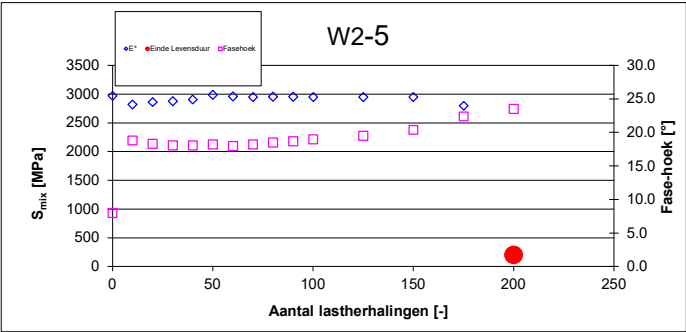
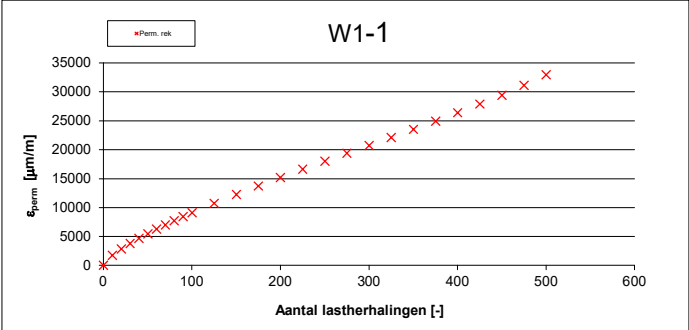
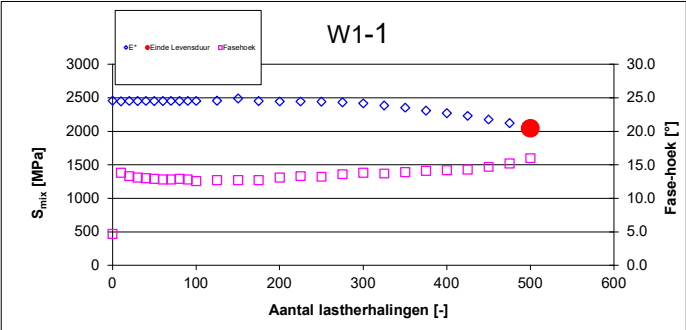


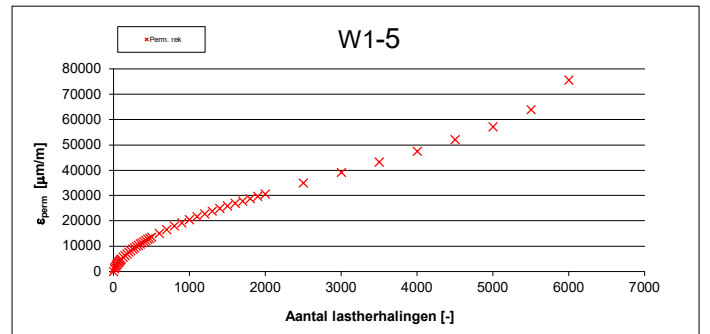
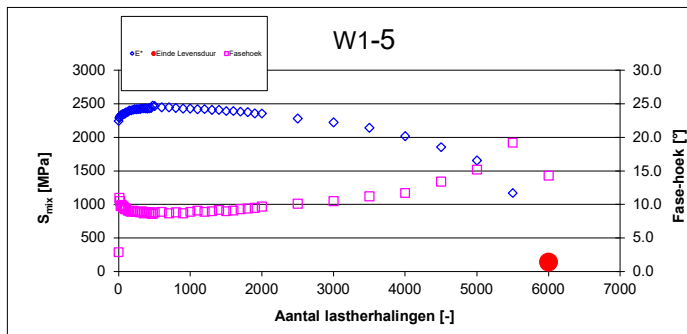
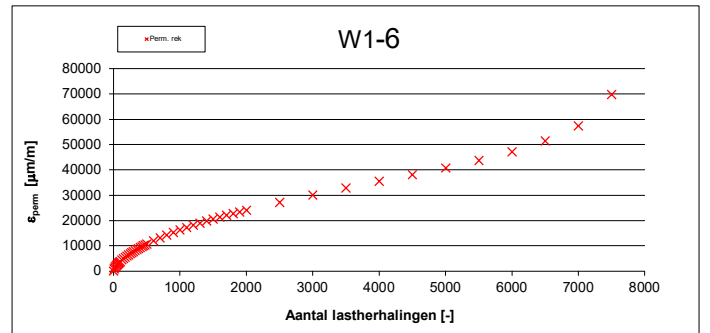
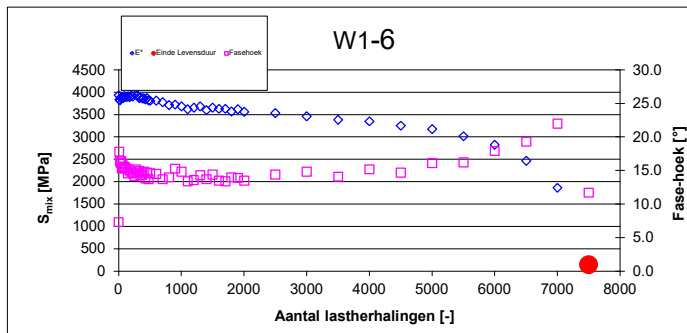
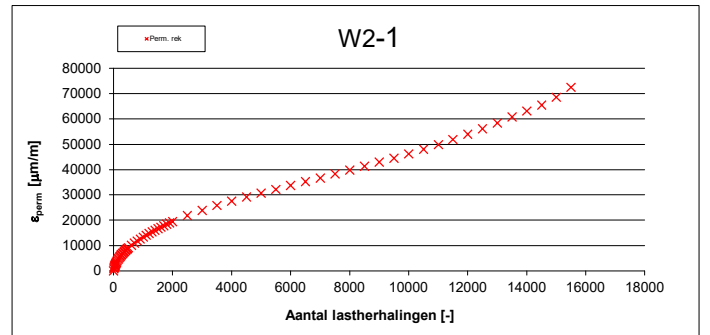
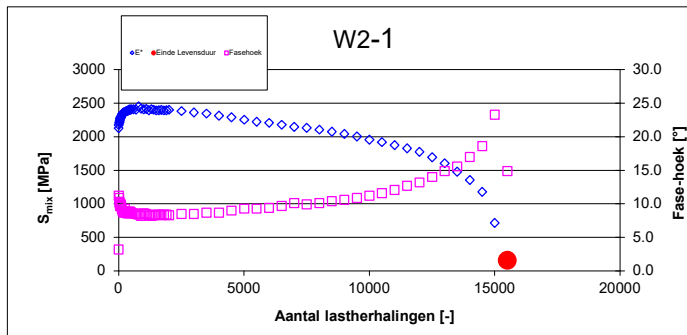
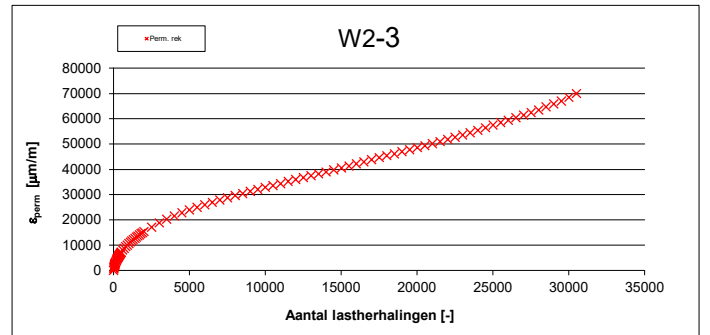
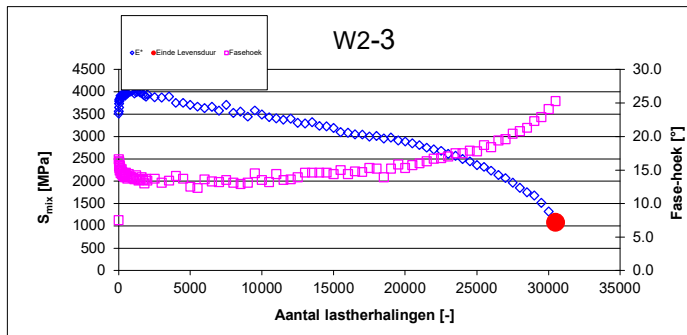
Bijlage 3

Resultaten vermoeiingsonderzoek

(4 pagina's, exclusief voorblad)

Code	$\sigma_{cycl. (p-p)}$ [MPa]	σ_{perm} [MPa]	E_{ini} [MPa]	Fasehoek [°]	N_{fat} [-]
W1-1	4.10	2.11	2451	14.0	500
W2-5	5.31	2.72	2844	19.0	200
W1-3	3.35	1.74	2481	13.0	1500
W2-8	3.38	1.75	3216	17.0	2000
W2-3	1.77	0.95	3605	16.0	30500
W2-1	1.88	1.00	2192	11.0	15500
W1-6	2.55	1.34	3826	17.0	7500
W1-5	2.72	1.42	2302	11.0	6000





Code	$\sigma_{cycl. (p-p)}$ [MPa]	σ_{perm} [MPa]	E_{ini} [MPa]	Fasehoek [°]	N_{fat} [-]
H4-1	5.72	2.94	1906	14.0	150
H3-1	4.73	2.43	2688	14.0	400
H3-2	3.64	1.88	2587	13.0	1200
H4-5	3.50	1.82	3098	16.0	1400
H4-8	1.95	1.04	2314	8.0	15000
H4-4	2.02	1.07	3864	13.0	22500
H3-5	2.77	1.45	2443	11.0	6500
H3-4	3.07	1.60	3771	17.0	4000

