

Doorontwikkeling levensduurmodel Waterbouwasfaltbeton

Haalbaarheid implementatie breukenergie en breukrek



Doorontwikkeling levensduurmodel Waterbouwasfaltbeton

Haalbaarheid implementatie breukenergie en breukrek

Auteur(s)

Mevrouw dr. B.G.H.M. Wichman
ing. Arjan de Looff (Infram-Hydrén)

Doorontwikkeling levensduurmodel Waterbouwasfaltbeton

Haalbaarheid implementatie breukenergie en breukrek

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Myron van Damme
Referenties	
Trefwoorden	Waterbouwasfaltbeton, driepunts-buigproef, levensduurpredictie, scheurgevoeligheid

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	19-12-2024
Projectnummer	11210371-018
Document ID	11210371-018-GEO-0001
Pagina's	51
Classificatie	
Status	Definitief

Auteur(s)

	Bernadette Wichman Arjan de Looff (Infram-Hyden)	

Samenvatting

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). Het doel van K&C WAB is om vanaf 2025 warm WAB aan te leggen in het kader van een dijkversterking.

De centrale vraag daarbij is welke eisen er aan warm WAB met een hogere recyclingfractie moeten worden gesteld om het voldoende sterkte en levensduur te geven, vergelijkbaar met heet WAB.

Verandering van mechanische eigenschappen in de tijd

Het levensduurmodel voor WAB wat op dit moment wordt gebruikt binnen ontwerp en WBI, sluit onvoldoende aan bij de data die in de laatste jaren beschikbaar is gekomen bij veiligheidsbeoordelingen. Daarom is in 2023 een aangepast model opgesteld [8]. Voor de toekomst is het gewenst dat er een model beschikbaar komt waarmee de veranderingen in mengselsamenstelling (toevoegen van verschillende percentages asfaltgranulaat) en productietechniek (verlaging van de productietemperatuur) kunnen worden meegenomen in levensduurprognoses. Het huidige model is een relatie tussen buigtreksterkte, leeftijd en holle ruimte. Het bleek, bij de ontwikkeling van dit model, nodig om onderscheid te maken in aanlegjaar van voor en na de oliecrisis van 1973.

Om te komen tot een meer generiek model kan worden nagegaan of extra verklarende parameters helpen om de prognose te verbeteren. Voor een beperkte dataset kan worden onderzocht of verschillen in breukenergie, breukrek en afgeleide parameters een verklaring kunnen geven voor de afwijkingen tussen de gemeten en geprognosticeerde buigtreksterkte.

Tevens kan worden onderzocht wat de verandering in scheurgevoeligheid in de tijd is, door breukenergie, breukrek en combinaties hiervan qua trend in de tijd te onderzoeken. Immers, naast een prognose van de buigtreksterkte, moet ook de scheurgevoeligheid in de tijd bepaald worden. Scheurgevoeligheid betreft met name scheuren dit ten gevolge van temperatuurswisselingen kunnen ontstaan, waardoor het asfalt verzwakt. Uiteindelijk kan mogelijk een tweede regressiemodel worden ontwikkeld voor scheurgevoeligheid, naast de regressie voor de buigtreksterkte.

Met de tot nu toe uitgevoerde analyses van een deel van de dataset met gegevens krijgen we wat meer grip op de veranderingen van de mechanische eigenschappen (buigtreksterkte, rek bij breuk, secant stijfheidsmoduli en breukenergie) in de tijd. Het gaat hierbij om de mechanische eigenschappen die volgen uit driepunts-buigproeven. De analyses laten steeds zien dat de richtingscoëfficiënt in een grafiek van breukenergie tegen breukrek en de vormfactor geschikte parameters zijn om de verandering in materiaalgedrag, ten gevolge van veroudering en omgevingsinvloeden, te beschrijven. De trends zijn het best zichtbaar in de tijdreeksen van de individuele vakken en deze zijn minder goed te zien als meerdere dijkvakken per leeftijd worden gegroepeerd. Ook de mechanische eigenschappen zelf laten minder goede trends in de tijd zien. Tevens is te zien dat de breukenergie (gedeeld door de breukrek) lager wordt als het materiaal veroudert, waarbij gelet moet worden op de laagste waarden, aangezien een lage breukenergie duidt op een zwakke plek.

Implementatie in een levensduurmodel

Het streven is een generiek levensduurmodel te ontwikkelen, waarin naast het holle ruimte percentage en leeftijd ook de materiaalkwaliteit wordt meegenomen.

Er is nagegaan of het levensduurmodel voor de buigtreksterkte kan worden uitgebreid met extra verklarende parameters. Deze parameters zijn breukenergie, breukrek en daarvan afgeleide grootheden zoals de vormfactor (per boorkern) en geven inzicht in de materiaalkwaliteit. Voor een selectie van dijkvakken te weten de Amsteldiepdijk, Balgzanddijk, Normerdijk, Gemeenschappelijke Polders, Emmapolder en Langgrousterwei is onderzocht of de verschillen in de gemeten buigtreksterkte minus de predictie te relateren zijn- aan deze extra verklarende parameters. De selectie van genoemde dijkvakken leent zich voor een eerste beschouwing van de verschillen tussen meting en predictie, omdat er zowel afwijkingen naar beneden als naar boven zijn, iets wat ook aan de orde is voor de 73 dijkvakken van het levensduurmodel.

Er is voor de afwijkingen tussen de gemeten buigtreksterkte en de predictie met het levensduurmodel geen verklaring gevonden in termen van leeftijd, aanlegjaar, holle ruimte percentage en bitumengehalte. Ook blijken geen duidelijke trends aanwezig tussen deze afwijkingen en de breukenergie, breukrek en daarvan afgeleide grootheden, zoals de vormfactor. Er zijn vele andere invloedsfactoren, waar we niet altijd weet van hebben, die de materiaalkwaliteit beïnvloeden. Dit is onder meer terug te zien in het predictie interval behorende bij het levensduurmodel voor de buigtreksterkte.

Voor de beperkte dataset die hier is beschouwd, lijkt het uitbreiden van het huidige model met aan de breukenergie gerelateerde parameters geen voor de hand liggende route. Daar de dataset beperkt is gehouden, is nog niet gezegd dat, als meer data van andere bronnen wordt onderzocht, er ook geen trends zijn te zien. Immers, we weten dat er verschillen in materiaalkwaliteit zijn tussen dijkvakken met verschillende aanlegjaren en ook de meer recente metingen laten belangrijke verschillen zien.

De buigtreksterkte alleen is geen goede indicator van de materiaalkwaliteit. De breukenergie en breukrek die, evenals de buigtreksterkte, ook uit de driepunts-buigproeven kunnen worden verkregen blijken, aanvullend, goede indicatoren van de materiaalkwaliteit te zijn. In dit rapport zijn, los van het levensduurmodel, trends gevonden in breukenergie tegen breukrek die duiden op een afname van de kwaliteit in de tijd, voor de tijdreeksen van de individuele dijkvakken. Maar ook als de dijkvakken onderling worden vergeleken zien we duidelijke verschillen in de opgetreden veroudering.

Aanbevelingen

Het is verstandig om de in de analyse gebruikte dataset uit te breiden, en dan onderscheid te maken in vakken met aanlegjaar voor de oliecrisis (in 1973), na de oliecrisis tot 2000, en na 2000 (met asfaltgranulaat volgens de RAW). Naar verwachting worden trends qua broos en ductiel gedrag beter zichtbaar. De verschillen in materiaalkwaliteit tussen de tot nu toe beschouwde dijkvakken zijn aanzienlijk. Een belangrijke aanbeveling is om het levensduurmodel voor de buigtreksterkte steeds te toetsen aan nieuwe meetgegevens, van met name warm WAB en met oplopende recycling fractie. Dit omdat de verwachte mechanische eigenschappen verschillen van dat van heet WAB. Dan kan ook duidelijk worden of een generiek model voor al deze mengsels haalbaar is. De analyses tot nu toe laten zien dat het betrekken van de breukenergie beter inzicht geeft in de veranderingen van mechanische eigenschappen. Er zijn daarnaast ook proeven op componentniveau voorzien om het effect van veroudering in kaart te brengen (ander deelproject binnen KCW) en die in de toekomst in verband gaan worden gebracht met het gedrag op proefstukniveau in de driepunts-buigproef. Er kan ook een regressieanalyse worden gedaan voor een selectie van dijkvakken, maar nu met breukenergie en breukrek, in plaats van alleen de buigtreksterkte. Dit is een parallel spoor aan de doorontwikkeling van het bestaande regressiemodel voor de buigtreksterkte. Het doel is het maken van een prognose van de scheurgevoeligheid. Op basis van een nulmeting kan een startwaarde worden bepaald en met de gevonden regressie een extrapolatie naar latere datum.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Aanleiding en context project	7
1.2	Probleemstelling	8
1.3	Doel	8
1.4	Aanpak	9
2	Beschouwde dijkvakken	10
3	Resultaten uit driepunts-buigproeven	12
3.1	Proefopzet en parameterbepaling	12
3.2	Relatie tussen rek bij breuk en breukenergie	14
3.3	Boxplots voor tijdreeksen van parameters	17
3.4	Conclusie	19
4	Metingen buigtreksterkte versus predictie met levensduurmodel	20
4.1	Achtergronden levensduurmodel	20
4.1.1	Relatie met onderhavige studie	21
4.2	Meetwaarden buigtreksterkte versus predictie: eerste duiding	21
4.3	Conclusies	25
5	Breukenergie en breukrek als indicatoren	26
5.1	Onderscheidend vermogen qua leeftijd	26
5.2	Breukenergie en breukrek als verklarende parameters.	33
5.3	Andere invloeden	35
5.4	Conclusies	36
6	Conclusies en aanbevelingen	37
7	Referenties	39
A	Boxplots	40
B	Dijkvakken levensduurmodel	50

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). Het doel van K&C WAB is om vanaf 2025 warm geproduceerd WAB met een percentage hergebruik aan te kunnen leggen als dijkbekleding.

Het 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 productietemperaturen. 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, en de parameters die het hardst bijdragen aan veroudering, 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 Probleemstelling

Het levensduurmodel voor WAB wat op dit moment wordt gebruikt binnen BOI, sluit onvoldoende aan bij de data die in de laatste jaren beschikbaar is gekomen bij veiligheidsbeoordelingen. Daarom is in 2023 een aangepast model opgesteld [8]. Voor de toekomst is het gewenst dat er een model beschikbaar komt waarmee de veranderingen in mengselsamenstelling (toevoegen van verschillende percentages asfaltgranulaat) en productietechniek (verlaging van de productietemperatuur) kunnen worden meegenomen in levensduurprognoses. Het huidige model is een relatie tussen buigtreksterkte, leeftijd en holle ruimte. Het bleek, bij de ontwikkeling van dit model, nodig om onderscheid te maken in aanlegjaar van voor en na de oliecrisis van 1973.

Om te komen tot een meer generiek model kan worden nagegaan of extra verklarende parameters helpen om de prognose te verbeteren. De vraag is of voor een beperkte dataset kan worden aangetoond of verschillen in breukenergie, breukrek en afgeleide parameters een verklaring kunnen geven voor de afwijkingen tussen de gemeten en geprognosticeerde buigtreksterkte.

1.3 Doel

Het doel van dit deelproject, onderdeel van wp4b uit plan KCW is de doorontwikkeling van het levensduurmodel voor waterbouwasfaltbeton (WAB), waarbij wordt onderzocht of een zinvolle implementatie van de breukenergie en de breukrek mogelijk is.

Dit is een deelstap om te komen tot een generiek levensduurmodel, dat beter geschikt is voor heet WAB dan het huidige model en dat tevens bruikbaar is voor warm WAB en (warm) WAB met een recycle fractie.

Voorzien is dat de driepunts-buigproef hier inzicht in kan geven.

1.4 Aanpak

In een eerder overleg met RWS WVL zijn drie mogelijke scenario's besproken om tot een verbeterde versie van het levensduurmodel voor WAB te komen. Deze scenario's zijn in deze studie onderzocht.

1. Toevoegen van de rek bij breuk, breukenergie en daarvan afgeleide parameters als variabelen in een regressiemodel.
2. Regressiemodel dat de breukenergie voorspelt in plaats van de buigtreksterkte. Vervolgens wordt de buigtreksterkte bepaald uit de relatie met de breukenergie.
3. Handhaven van de huidige opzet van het model.

Voor een selectie van dijkvakken is onderzocht of een zinvolle implementatie van breukenergie en breukrek in het regressiemodel van de buigtreksterkte mogelijk is. Voor dit project zijn zeven dijkvakken geselecteerd waarvan tijdreeksen met buigtreksterkteproeven beschikbaar zijn. De selectie van dijkvakken sluit aan op eerder onderzoek van drie vakken met WAB ouder dan 40 jaar ('t Schoor-Wierum, Eemshaven en Kaaphoofd), zonder recyclingfractie. Nu zijn vakken geselecteerd met meerdere meetmomenten in de tijd, zonder recyclingfractie, maar nu jonger dan ongeveer 40 jaar bij beproeving. Deze knip bij 40 jaar is relevant gebleken voor de regressies die deel uitmaken van het levensduurmodel, en dit valt voor de 2023 dataset samen met de oliecrisis uit 1973, waarna de bitumenkwaliteit achteruit ging. Dit onderscheid in aanlegjaar geldt ook voor toekomstige meetdata, wat kan betekenen dat de twee regressiemodellen apart worden doorontwikkeld.

De jaren van aanleg van deze vakken liggen tussen 1976 en 1990.

De breukenergie is bij bros gedrag lager, gegeven een bepaalde breukrek. Het bros of taai bezwijken kan worden aangetoond met de driepunts-buigproef. Het met verloop van tijd brosser bezwijken van WAB is manifest voor de tijdreeksen van de onderzochte dijkvakken. Voor de vakken met oud WAB bleek er een duidelijke relatie met de leeftijd te zijn in de grafieken met breukenergie uitgezet tegen breukrek [9]. De vraag is nu of we dit nu weer zien bij jonger WAB. De beschouwde dijkvakken staan in Tabel 2.1. Dit is een eerste stap om tot implementatie van de breukenergie en breukrek in het levensduurmodel te komen.

Ook is nagegaan of er, naast leeftijd, nog andere invloedsfactoren zijn, zoals de veroudering van het bitumen tijdens mogelijk lange transportafstanden, in geval men destijds geen asfaltcentrale naast de dijk meer had, iets wat voor de jaren '70 meestal wel het geval was.

Voor dit project is de volgende aanpak gehanteerd:

- Van de geselecteerde dijkvakken zijn de buigtreksterkteproeven nader geanalyseerd. Rek bij breuk, breukenergie tot bezwijken en afgeleide parameters zijn bepaald. In Hoofdstuk 3 zijn de resultaten samengevat.
- Met het levensduurmodel voor WAB zijn predicties gemaakt voor de dijkvakken en deze zijn vergeleken met de meetwaarden. Deze analyse is uitgevoerd in Hoofdstuk 4.
- In Hoofdstuk 5 is nagegaan of afwijkingen tussen predictie en metingen kunnen worden verklaard uit de aanvullende parameters die bepaald zijn in Hoofdstuk 3.

2 Beschouwde dijkvakken

Tabel 2.1 geeft een overzicht van de beschouwde dijkvakken.

Tabel 2.1 Dijkvakken die zijn geanalyseerd.

Dijknaam	Waterschap	Aanlegjaar	Onderzoeksjaren	HR%		buigtreksterkte (MPa)		bitumen% gemiddelde	bron
				gemiddeld	Stdev	gemiddelde	Stdev		
Amsteldiepdijk	HHNK	1990	2009, 2021	3,64	1,27	6,31	1,01	6,45 - 6,55	bestek en labonderzoek
Balgzanddijk	HHNK	1990	2009, 2021	3,67	1,13	6,52	1,01	6,25 - 6,45	bestek en labonderzoek
Rinkelweerse-Normerdijk	HHNK	1985	2021	5,4	0,99	7,0	1,3	6,65	labonderzoek
Normerdijk	HHNK	1987	2009	4,68	1,36	7,1	1,57	6,19	bestek
Gemeenschappelijke Polders	HHNK	1978	2009	5,2	1,85	7,21	1,05	6,54	opleveringsgegevens
Emmapolder	Noorderzijvest	1980	2009, 2017	2,93	2,42	7,73	2,48	(--)	
Langgrouterwei	Wetterskip Fryslân	1976	2009, 2011, 2014, 2017	4,63	1,83	5,89	1,89	6,58	labonderzoek

In de Figuren 2.1 en 2.2 is de ligging van de dijkvakken weergegeven.



Figuur 2.1 Onderzochte dijkvakken in Noord-Holland.

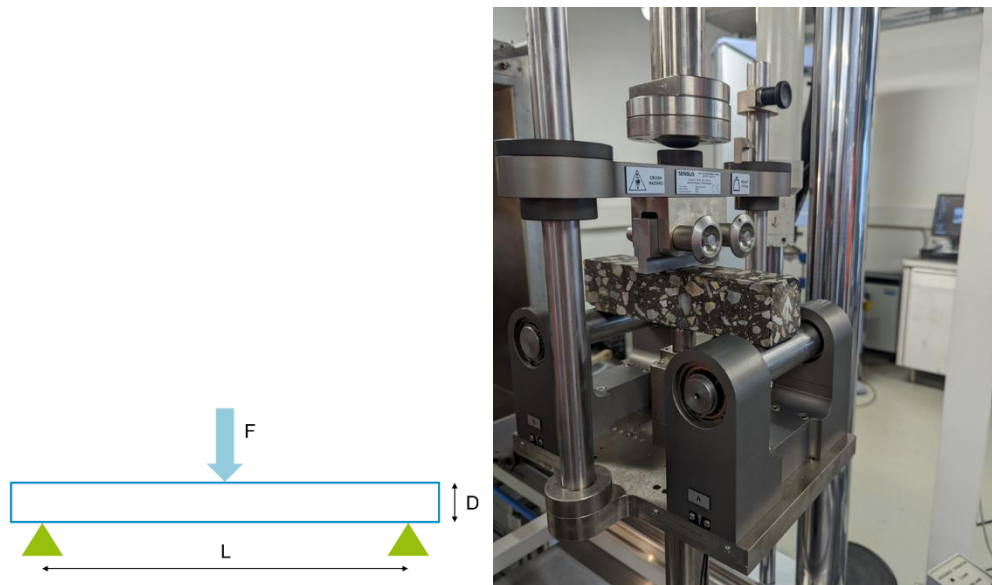


Figuur 2.2 Onderzochte dijkvakken in Groningen en Friesland.

3 Resultaten uit driepunts-buigproeven

3.1 Proefopzet en parameterbepaling

De driepunts-buigproef (zie Figuur 3.1) 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.

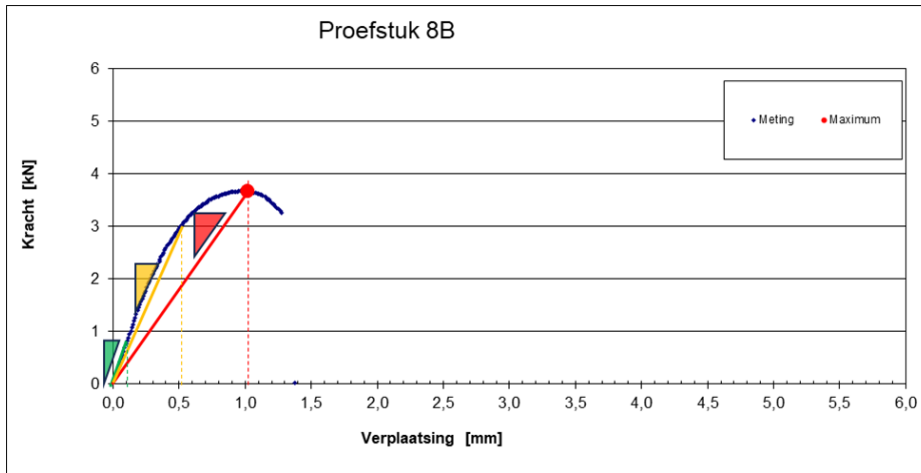


Figuur 3.1 Driepunts-buigproef. Schematische weergave (links) en de proefopstelling (rechts).

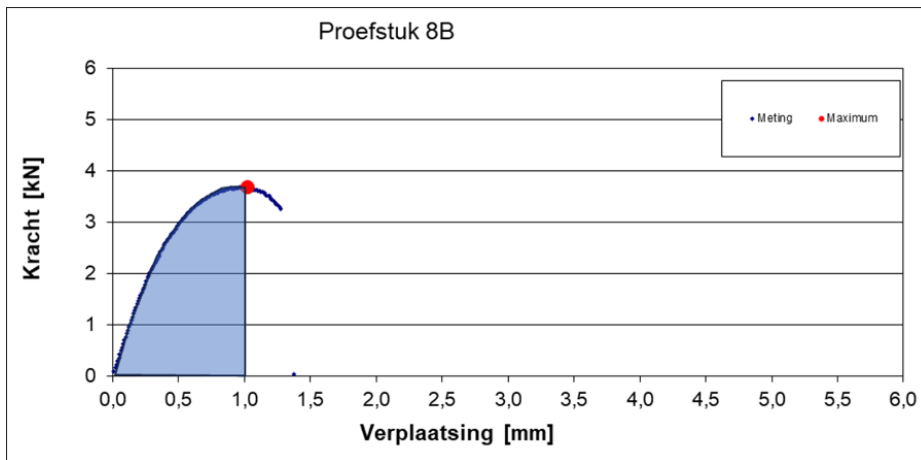
Met de driepunts-buigproef worden verschillende eigenschappen van het materiaal bepaald. Het is bij asfaltdekkingsbekledingen gebruikelijk om uit één boorkern een schijf te zagen uit de onderzijde van de bekleding. Uit deze schijf worden twee balken gezaagd waarvan er één wordt gebruikt voor bepaling van de buigtreksterkte en één voor bepaling van de vermoeiingseigenschappen. Voorafgaand aan deze proeven kan van een van de balkjes een stijfheidsmodulus worden bepaald. Er kan uit de zaagresten bitumen worden geëxtraheerd dat met behulp van een FTIR [11] kan worden onderzocht op veroudering. 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 3.2).
- Rek bij breuk.
- Breukenergie (zie Figuur 3.3).
- Secant modulus (zie Figuur 3.2).



Figuur 3.2 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 3.3 De breukenergie tot bezwijken of taaiheid 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 (J/m^2).

W_f = arbeid tot bezwijken (J).

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

$$W_f = \int_0^{v_{max}} F dv$$

Hierin is:

F = Kracht (N).

v = verplaatsing (m)

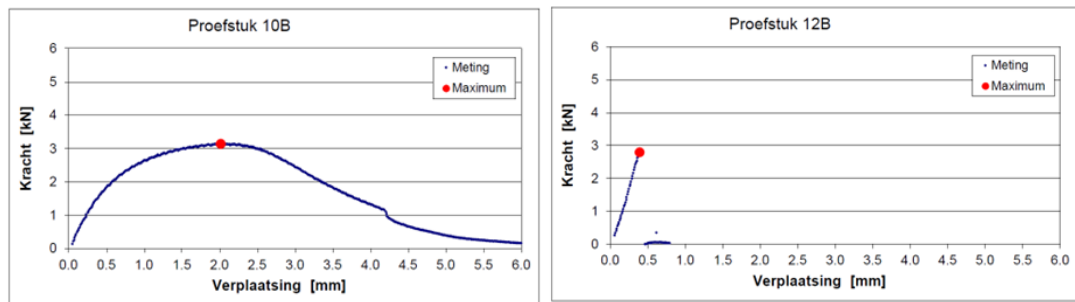
v_{max} = verplaatsing bij maximale kracht (m)

De breukrek wordt afgeleid uit de verplaatsing waarbij de kracht maximaal is, zie Figuur 3.3.

De breukenergie gedeeld door de breukrek is een soort gemiddelde sterktemaat 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.

In de loop van de tijd verandert gedrag van WAB van ductiel naar bros: Het materiaal verliest het vermogen om te vervormen en zal bij grotere vervormingen eerder gaan scheuren. Een voorbeeld van ductiel en bros materiaalgedrag is gegeven in de kracht-verplaatsingsdiagrammen in Figuur 3.4.



Figuur 3.4 Voorbeelden van ductiel (links) en bros (rechts) materiaalgedrag in de driepunts-buigproef.

Deze verandering in materiaalgedrag van ductiel naar bros is duidelijk zichtbaar bij de onderzochte dijkvakken. Hier wordt in de volgende paragraaf nader op ingegaan.

3.2 Relatie tussen rek bij breuk en breukenergie

Het is gebleken dat er bij elk uitgevoerd onderzoek op materiaal van gelijke leeftijd een min of meer lineaire relatie aanwezig is tussen de rek bij breuk en de breukenergie voor de verschillende boorkernen, binnen het meetbereik.

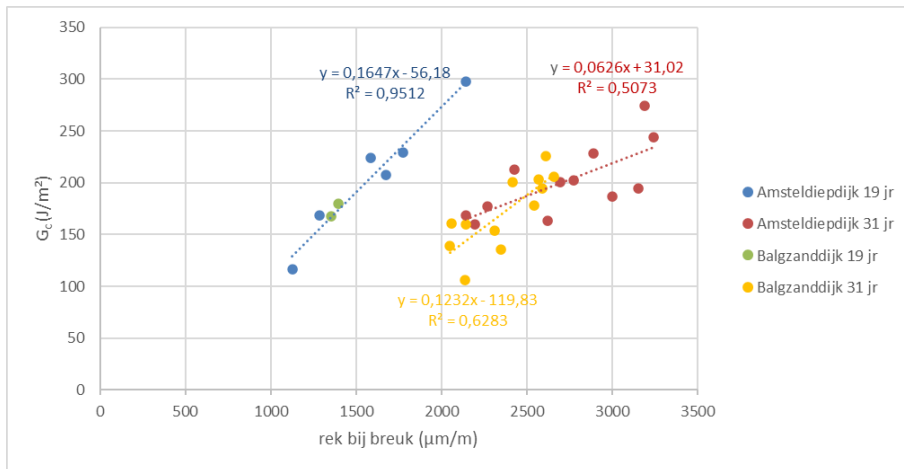
De richtingscoëfficiënt van de regressielijnen door de datapunten van breukenergie en breukrek is een maat voor de taaiheid/ brosheid. Een hogere richtingscoëfficiënt betekent taaiër gedrag.

Extrapolaties van de lineaire trendlijnen door de metingen gaan niet door de oorsprong, terwijl op basis van de fysica een lijn door de oorsprong moet worden verwacht. Dit wordt mogelijk (deels) veroorzaakt door imperfecties in de vorm van het balkje ten gevolge van het zagen. Mogelijk kan hier in de toekomst correctie voor worden toegepast en een aangepaste regressie voor worden uitgevoerd.

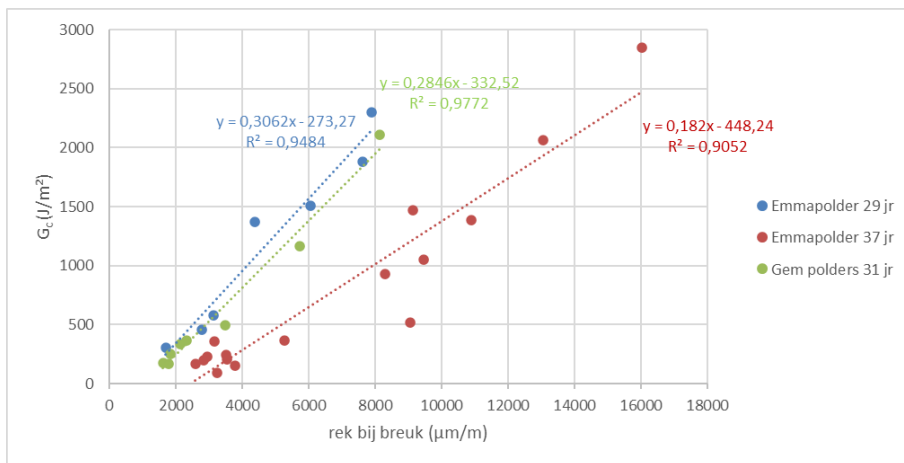
Vergelijkbare grafieken zijn in de literatuur ook gevonden voor aluminium [12] waarbij is aangegeven dat beide parameters kwaliteitsindicatoren zijn die goed correleren. Hierbij loopt de extrapolatie van de regressielijn overigens wel door de oorsprong.

De spreiding rond de regressielijnen, zoals in Figuur 3.5, wordt in belangrijke mate bepaald door de variatie in de materiaalkwaliteit, maar ook door de interactie tussen de in de proef optredende krachten en het proefstuk. Dit proefstuk is verre van homogeen en is iedere keer verschillend. Daarnaast leek bij de eerder onderzochte dijkvakken een trend zichtbaar waarbij de richtingscoëfficiënt van de regressielijn afneemt in de tijd. Dit kan worden verklaard uit de verandering in materiaalgedrag van ductiel naar bros.

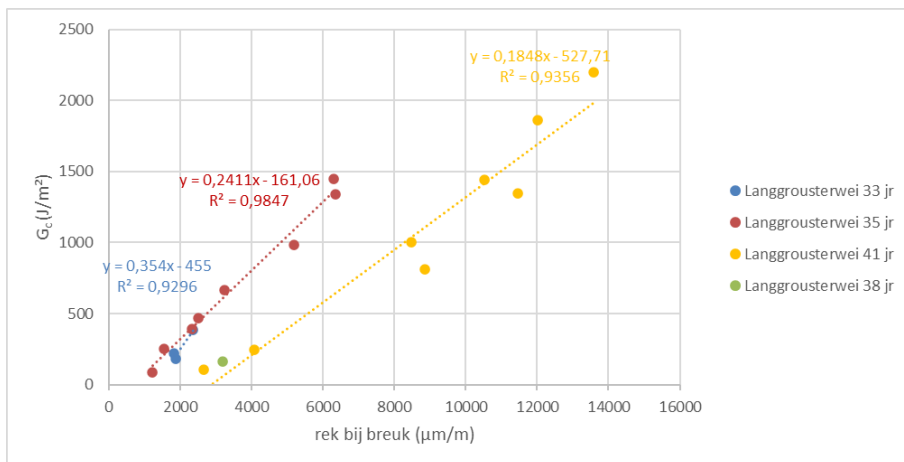
Dat deze relatie wordt gevonden bij vers geproduceerd WAB is aannemelijk, maar dat er ook goede relaties worden gevonden bij 30 en 40 jaar oud WAB waarvan mag worden aangenomen dat de verschillende verouderingsprocessen in verschillende mate op de proefstukken hebben ingewerkt, is opmerkelijk. In de Figuren 3.5 t/m 3.8 is deze relatie voor de onderzochte dijkvakken uitgezet. Om praktische redenen zijn enkele dijkvakken samengevoegd die qua locatie, leeftijd en materiaalgedrag goed vergelijkbaar zijn.



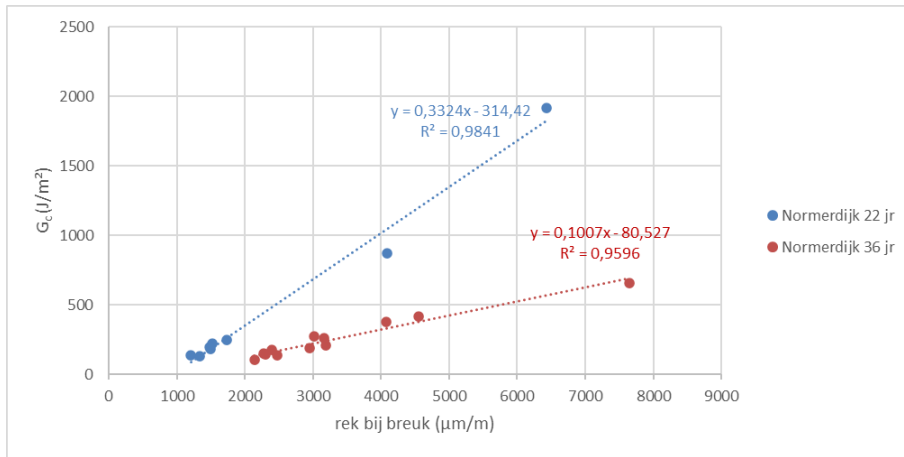
Figuur 3.5 Relatie tussen rek bij breuk en breukenergie van de Amsteldiepdijk en de Balgzanddijk.



Figuur 3.6 Relatie tussen rek bij breuk en breukenergie van de Emmapolderzeedijk.



Figuur 3.7 Relatie tussen rek bij breuk en breukenergie van het dijkvak Langgrousterwei.



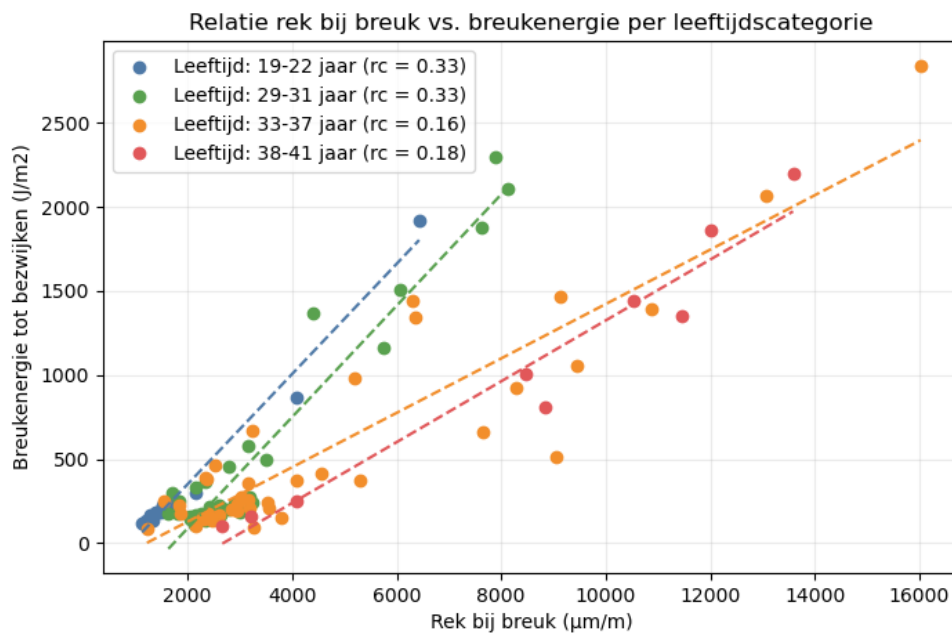
Figuur 3.8 Relatie tussen rek bij breuk en breukenergie van de Normerdijk en Rinkelweerse Normerdijk.

Het volgende valt op:

- De eerder waargenomen trend van een afnemende richtingscoëfficiënt in de tijd is bij elk van de onderzochte dijkvakken waarneembaar.
- De Amsteldiepdijk en Balgzanddijk laten aanzienlijk lagere waarden zien voor de rek bij breuk en breukenergie.
- Tevens is te zien dat de breukenergie (gedeeld door de breukrek) lager wordt als het materiaal veroudert, waarbij gelet moet worden op de laagste waarden, aangezien een lage breukenergie duidt op een zwakke plek.
- Het bereik in breukrek schuift door veroudering naar hogere rekniveaus en de regressielijnen lopen niet door de oorsprong.

Bij een analyse van de tijdreeksen van drie andere dijkvakken (Helderse zeevering-Kaaphoofd, 't Schoor Wierum en de Eemshavendijk) werd eenzelfde trend waargenomen dat de richtingscoëfficiënt van de regressielijn afneemt in de tijd [9]. Dit blijkt voor elk geanalyseerd dijkvak het geval te zijn. In de tijd neemt de breukenergie sneller af dan de rek bij breuk. Dit betekent dat de 100% secant modulus, zoals in Figuur 3.2, afneemt. Soms zien we zelfs een lichte toename van de rek bij breuk in de tijd. Deze verandering van richtingscoëfficiënt in de tijd kan worden gezien als een maat voor de verandering van materiaalgedrag van ductiel naar bros.

In de in 2024 gerapporteerde studie naar de verschillen in mechanische eigenschappen van warm en heet WAB [10] is de data gegroepeerd naar leeftijd, waarna per groep regressielijnen zijn herhaald. Dit is opnieuw gedaan voor de dataset die binnen deze studie is geanalyseerd, zie Figuur 3.9.



Figuur 3.9 Rek bij breuk versus breukenergie per leeftijdscategorie.

De vraag is echter of het groeperen per leeftijdscategorie een correcte manier is om data te sorteren. Als we naar richtingscoëfficiënten (r.c.'s) per dijkvak kijken, zien we grote verschillen. In [10] werden r.c.'s gevonden tussen 0,18 en 0,08 met een r.c. van 0,16 voor nieuw WAB. Bij de in het huidige project geanalyseerde vakken zijn hogere r.c.'s gevonden; tot 0,33 en er worden soms bij vergelijkbare leeftijden voor verschillende dijkvakken afwijkende r.c.'s gevonden. In de huidige studie zijn de resultaten van de Balgzanddijk en Amsteldiepdijk afwijkend van de overige vakken maar de resultaten van deze twee dijkvakken lijken wel beter te passen in de trends van de voorgaande studie [10]. Conclusie voor dit moment is dat de r.c. een duidelijke trend in verandering van mechanische eigenschappen in de tijd beschrijft, maar dat deze geen generieke trend volgt maar per dijkvak verschilt.

3.3 Boxplots voor tijdreeksen van parameters

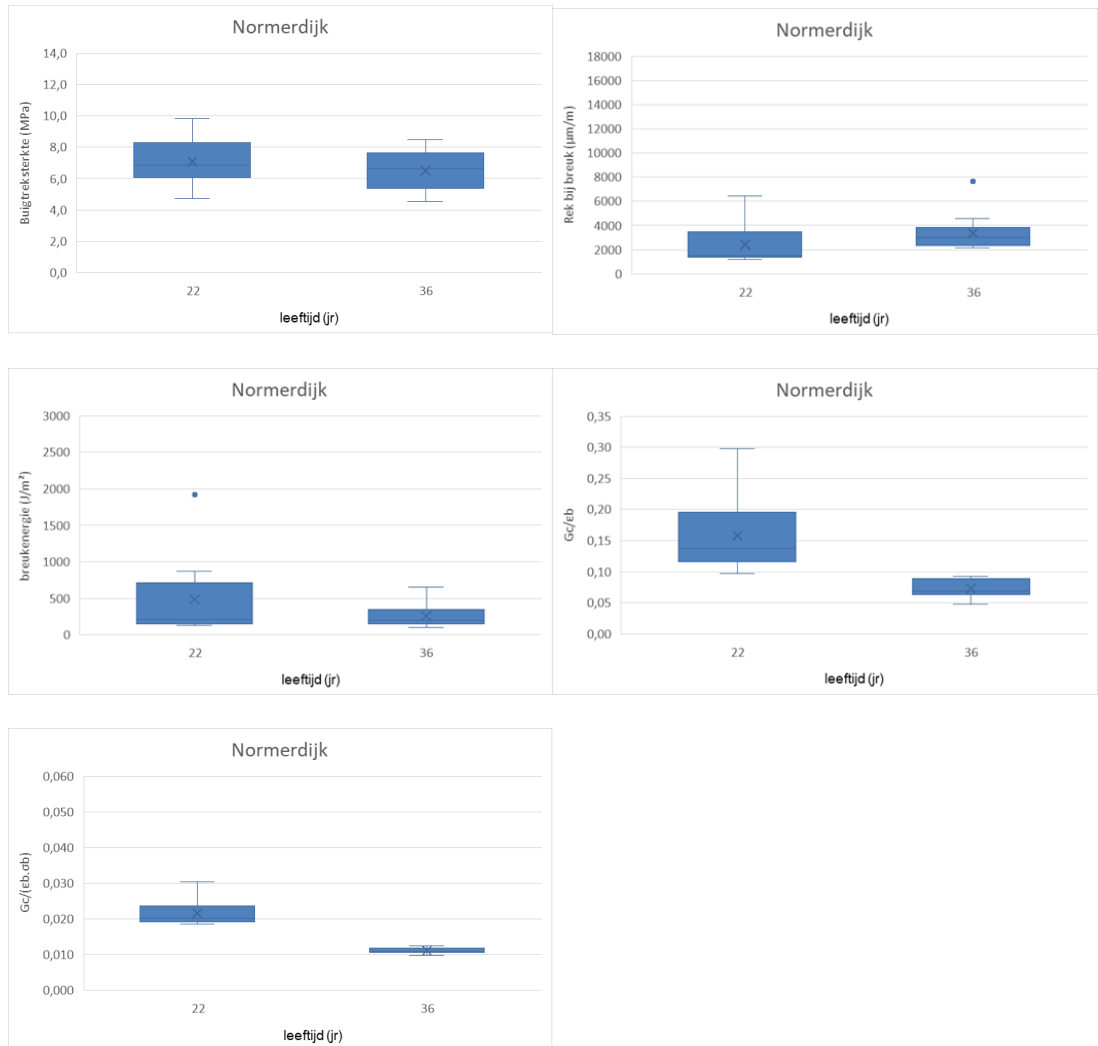
Voor alle dijkvakken zijn boxplots (Box and Whisker diagrammen) gemaakt van de volgende variabelen:

- Buigtreksterkte.
- Rek bij breuk.
- Breukenergie tot bezwijken.
- Breukenergie tot bezwijken gedeeld door rek bij breuk. Dit is te relateren aan de richtingscoëfficiënt van de regressielijnen uit de figuren 3.5 t/m 3.8.
- Breukenergie tot bezwijken gedeeld het product van de rek bij breuk en de buigtreksterkte. Deze parameter wordt ook wel de vormfactor genoemd omdat deze de verandering in vorm in de kracht-verplaatsingsdiagram ten gevolge van verandering van ductiel naar bros gedrag beschrijft.

Met de boxplots wordt een inzicht verkregen van de ligging en spreiding van de beschouwde variabelen. Alle boxplots zijn opgenomen in Bijlage A. In deze paragraaf is een voorbeeld voor één dijkvak gegeven en zijn de trends beschreven.

Een boxplot is een vijfgetallen samenvatting van een dataset.

Een eerste kwartiel is de range van de eerste 25% van de datapunten, de mediaan is getekend bij 50% van de datapunten, en het derde kwartiel bij 75%. Verder geven de voetjes het minimum en maximum aan van de range zonder de uitschieters (uitbijters). De uitschieters wijken meer dan 1,5 x de interkwartielafstand (= afmeting box) af van de grenzen van de box.



Figuur 3.10 Boxplots van de onderzochte variabelen voor de Normerdijk en Rinkelweerse Normerdijk.

De Normerdijk laat een zeer lichte afname van de buigtreksterkte over een periode van 14 jaar zien, een lichte toename van de rek bij breuk, een lichte afname van de rek bij breuk en een duidelijke afname van de richtingscoëfficiënt en de vormfactor. Dit komt overeen met de algehele trends:

- Weinig verandering in de buigtreksterkte, soms een lichte toename, soms een lichte afname.
- Weinig verandering in de rek bij breuk, meestal een lichte toename. Dit is opmerkelijk. Nagegaan moet worden of dit een toevallige uitkomst is die wordt veroorzaakt door het beperkt aantal waarnemingen, of dat dit een fysisch verklaarbare trend is.
- Weinig verandering in de breukenergie, meestal een lichte afname, een enkele keer een toename.
- Een duidelijke afname in de tijd van het quotiënt van de breukenergie en rek bij breuk en een duidelijke trend in de vormfactor.

Daarnaast is duidelijk dat het materiaalgedrag van het WAB op de Amsteldiepdiijk en Balgzanddiijk afwijken van de overige dijkvakken. Dit is niet zozeer zichtbaar in de buigtreksterkte maar wel in de rek bij breuk en de breukenergie.

3.4 Conclusie

De breukenergie is bij bros gedrag lager, gegeven een bepaalde breukrek. Dit gedrag is manifest voor de tijdreeksen van de onderzochte dijkvakken, d.w.z. dat het materiaal brosser wordt. De breukenergie is gerelateerd aan de buigtreksterkte, breukrek, maar ook het brosse of ductiele gedrag.

Het is gebleken dat er bij elk uitgevoerd onderzoek op materiaal van gelijke leeftijd een min of meer lineaire relatie aanwezig is tussen de rek bij breuk en de breukenergie voor de verschillende boorkernen.

Het blijkt verassend dat ook voor ouder materiaal er een min of meer lineair verband is tussen breukenergie en breukrek, waarbij wel een aanzienlijke spreiding is te zien, die wordt veroorzaakt door verschillen in materiaalkwaliteit, maar ook door de interactie tussen de in de proef optredende krachten en het heterogene proefstuk.

Met de tot nu toe uitgevoerde analyses krijgen we grip op de veranderingen van de mechanische eigenschappen in de tijd. De analyses laten steeds zien dat de richtingscoëfficiënt in een grafiek van breukenergie tegen breukrek en de hieraan gecorreleerde vormfactor geschikte parameters zijn om de verandering in materiaalgedrag te beschrijven. De trends zijn het best zichtbaar in de tijdreeksen van de individuele vakken, en deze zijn minder goed te zien als meerdere dijkvakken per leeftijd worden gegroepeerd. Inzicht in dit materiaalgedrag komt in Hoofdstuk 4 van pas bij het verbeteren van het levensduurmodel voor de buigtreksterkte, waarbij kan worden onderzocht of de verschillen tussen de gemeten buigtreksterkte en de predictie samenhangen met de breukenergie, breukrek of andere daaruit afgeleide parameters.

4 Metingen buigtreksterkte versus predictie met levensduurmodel

4.1 Achtergronden levensduurmodel

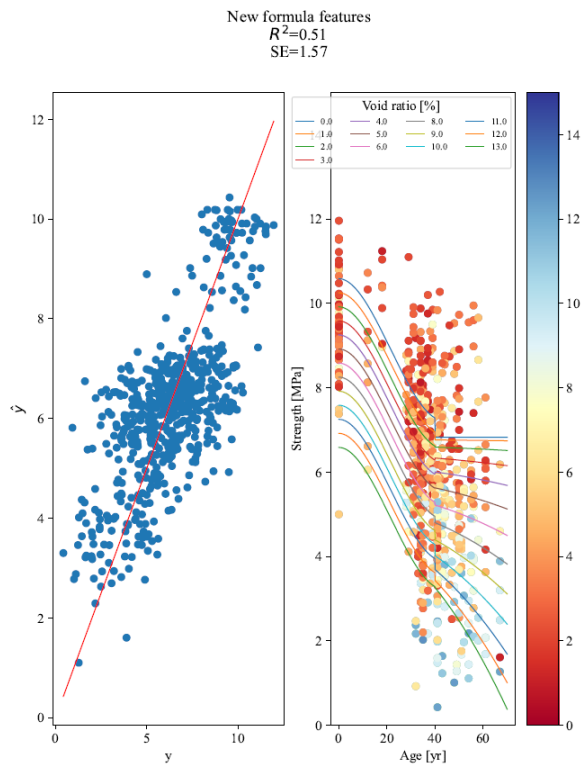
Het in 2023 ontwikkelde levensduurmodel voor de buigtreksterkte van waterbouwasfaltbeton (WAB) is ontwikkeld op basis van data van 73 dijkvakken met heet WAB met 775 datapunten [8]. Bijlage B geeft een indruk van de meetwaarden per dijkvak. Hier zitten ook tijdreeksen tussen, d.w.z. dat er bij verschillende leeftijden boorkernonderzoek is gedaan.

Het betreft heet WAB. De regressie voor de gemiddelde buigtreksterkte als functie van de leeftijd en het holle ruimte percentage [8] 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 restspreading (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 4.1 toont het verkregen beeld, waarbij de diagonale zijn 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. Dit onderscheid in aanlegjaar geldt ook voor toekomstige meetdata, wat kan betekenen dat de twee regressiemodellen apart worden doorontwikkeld.

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).



Figuur 4.1 De regressie voor de gehele dataset met een knip in leeftijd bij 40 jaar, zie formule (4.1) uit [8]. 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.

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.

4.1.1 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 [9].

Voor de dijkvakken uit onderhavige studie is wederom een vergelijking gemaakt van de meetwaarden en de predictie (per boorkern). Dit voor de verschillende tijdstippen van beproeving.

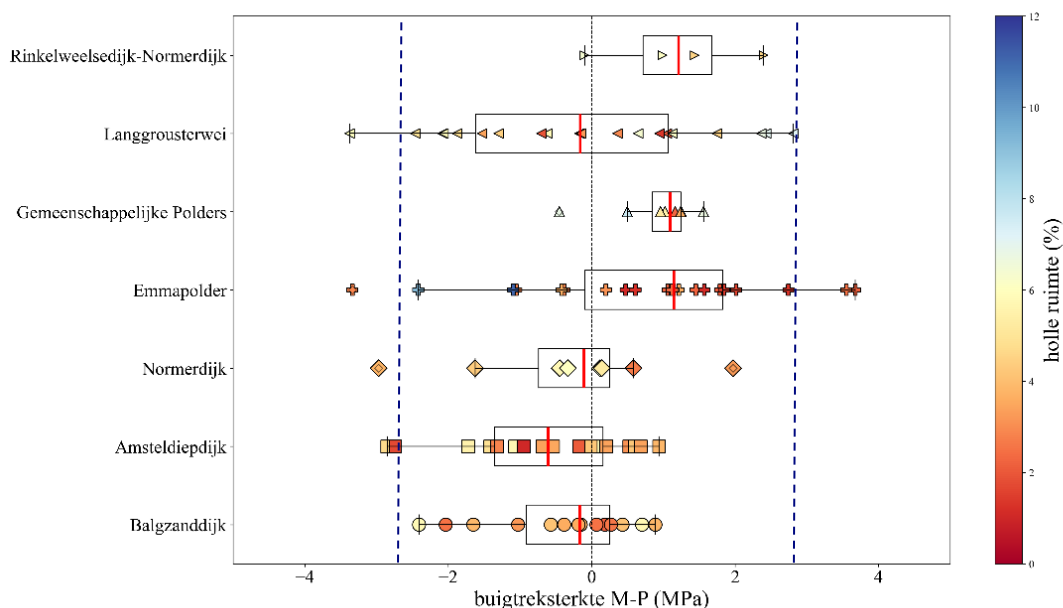
Boxplots geven een snel beeld van de afwijkingen (meetwaarde minus predictie). Ter vergelijking zijn ook boxplots gemaakt voor alle 73 dijkvakken.

In Hoofdstuk 5 wordt ingegaan op de mogelijke relatie tussen de afwijkingen tussen meting en predictie (in termen van buigtreksterkte) en de breukenergie en breukrek.

4.2 Meetwaarden buigtreksterkte versus predictie: eerste duiding

Voor alle boorkernen uit de selectie van dijkvakken uit Tabel 2.1 is per boorkern een predictie gemaakt met het nieuwe levensduurmodel [8], waarbij gebruik is gemaakt van de leeftijd van beproeving en het holle ruimte percentage van de boorkern. In Figuur 4.2 zijn boxplots te zien van de gemeten buigtreksterkte minus deze predictie voor de gehele tijdreeks per dijkvak. De waarden op de verschillende tijdstippen zijn per dijkvak samengevoegd.

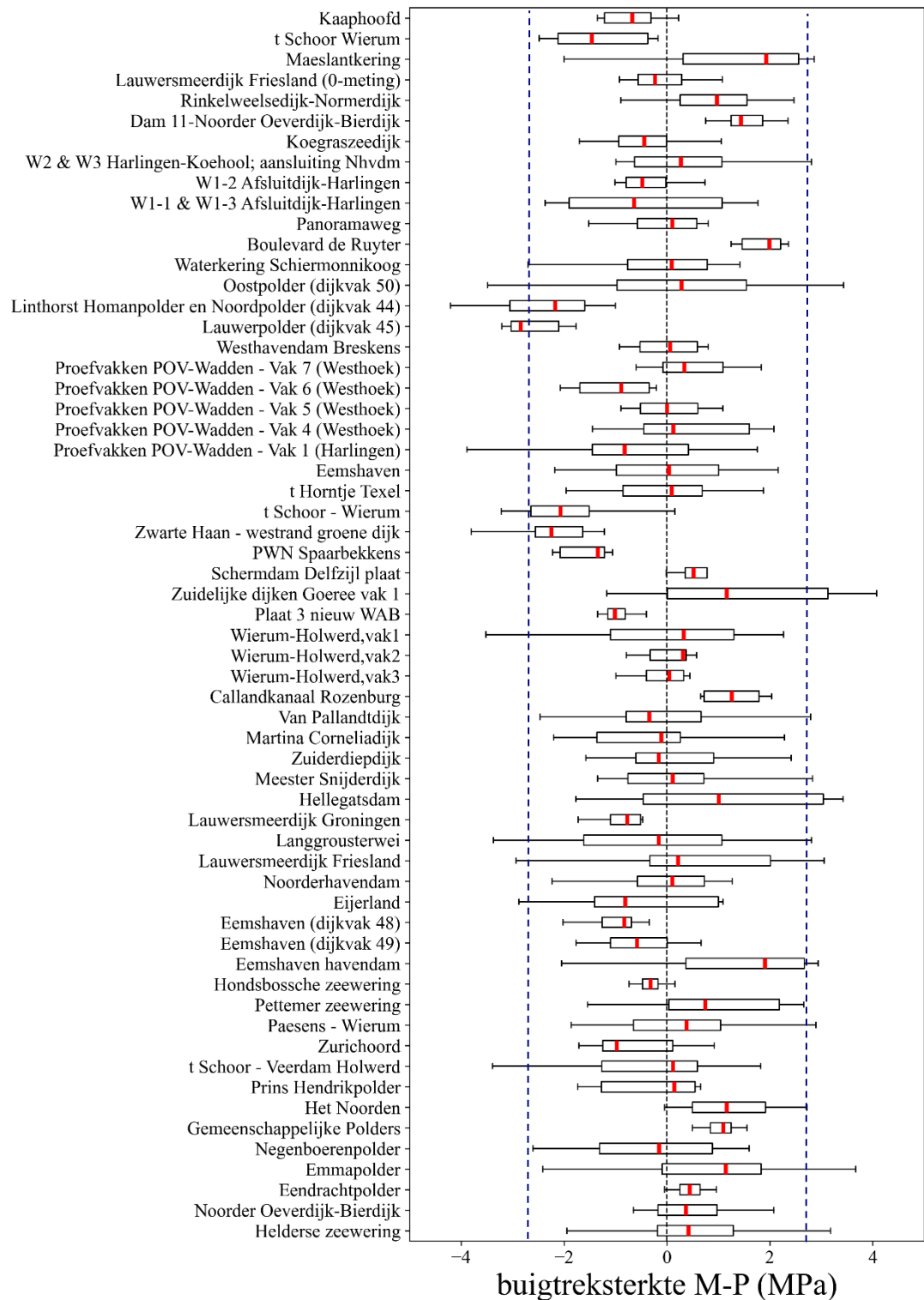
Combined Plot for All Locations (Horizontal Boxplots)



Figuur 4.2 Gemeten buigtreksterkte (M) minus predictie (P) voor de gekozen selectie van dijkvakken uit Tabel 2.1 Het tweezijdig 90% predictie interval is $\pm 2,7$ MPa behorende bij het levensduurmodel [8], zie de stippellijnen.

Het beeld van afwijkingen in buigtreksterkte in Figuur 4.2 lijkt op het beeld van de afwijkingen voor de 73 dijkvakken, zie Figuur 4.3. Dat wil zeggen dat er dijkvakken zijn die metingen die hebben die veelal hoger liggen dan de predictie (rechts in Figuur 4.2), dijkvakken die metingen hebben die veelal lager liggen dan de predictie (links in Figuur 4.2) en dat er dijkvakken zijn met waarden die rond de lijn meting = predictie liggen. Deze afwijkingen worden veroorzaakt door verschillen in materiaalkwaliteit, en de subset aan data uit Figuur 4.2 geeft dan al een aardig beeld van de variaties daar in.

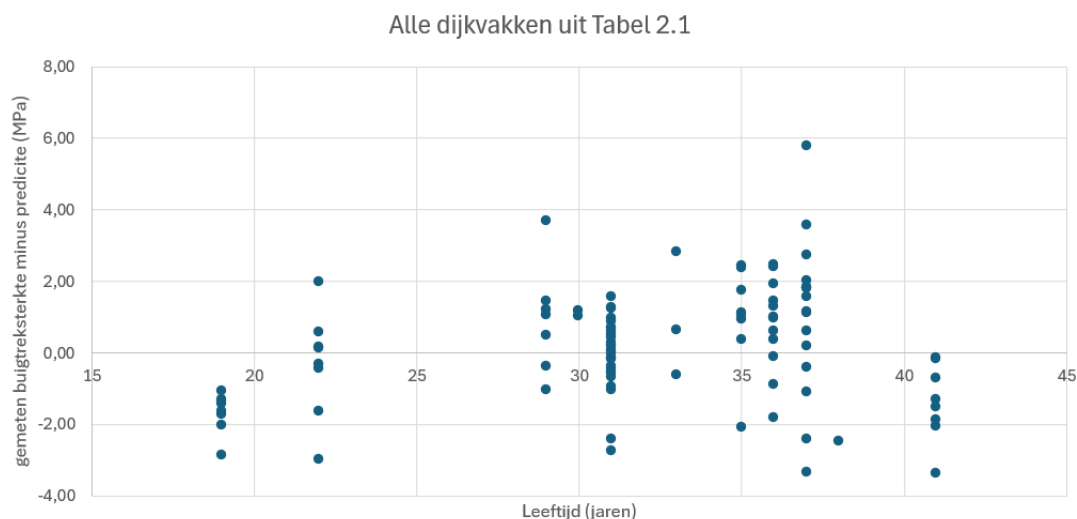
Dit betekent dat de analyse voor de selectie uit Figuur 4.2 bruikbaar is als vertrekpunt om verschillen in buigtreksterkte te vergelijken en te duiden in termen van materiaalkwaliteit.



Figuur 4.3 Meting minus predictie van de buigtreksterkte voor alle 73 dijkvakken. Het tweezijdig 90% predictie interval is $\pm 2,7$ MPa, zie de stippellijnen.

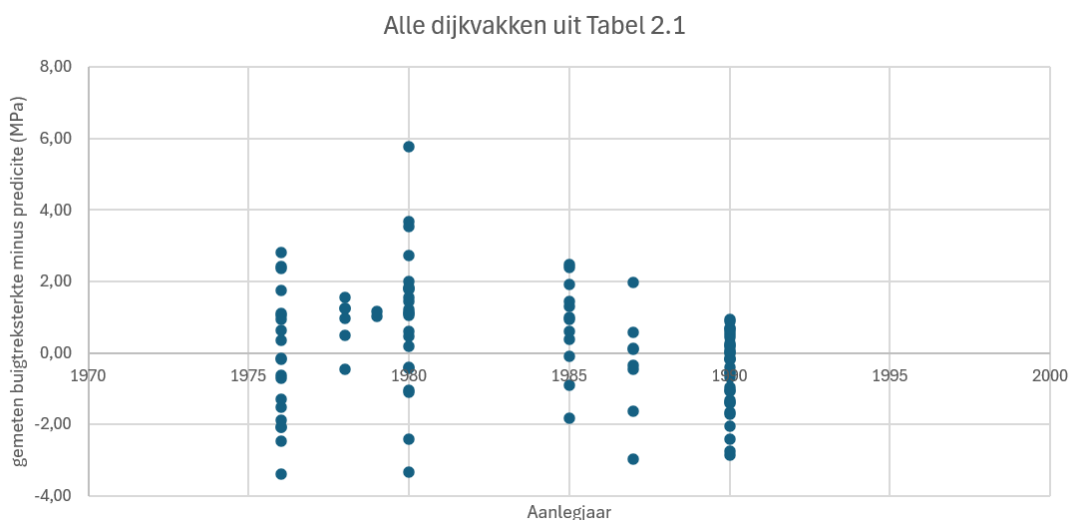
Bedacht moet worden dat de Figuren 4.2 en 4.3 het gemiddeld voorspellend vermogen per dijkvak weergeeft. Van elk dijkvak zijn meetreeksen beschikbaar en het voorspellend vermogen kan per leeftijd voor een dijkvak verschillend zijn. In Hoofdstuk 5 wordt dit nader geduid.

Figuur 4.4 toont de afwijkingen meting minus predictie per boorkern als functie van de leeftijd.



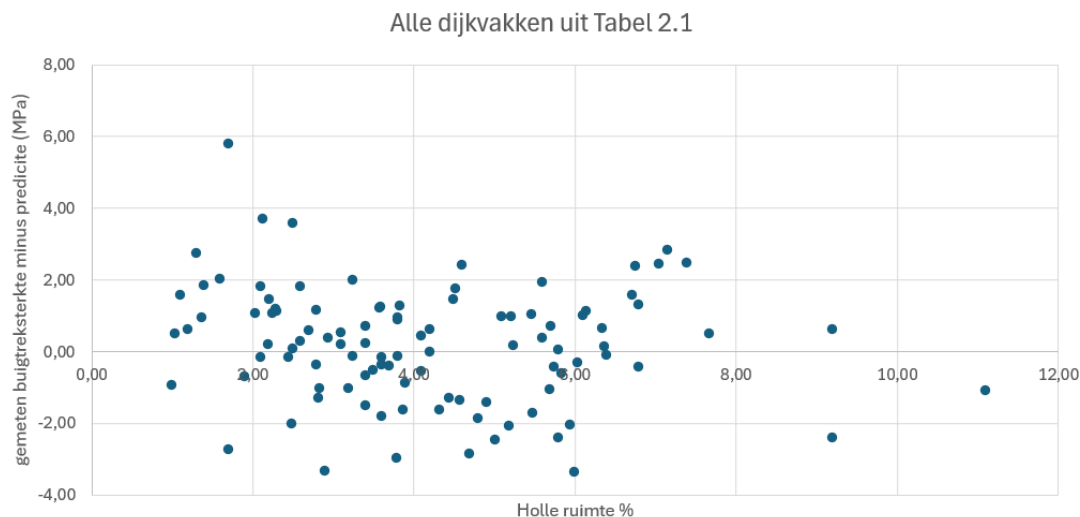
Figuur 4.4 *Meting minus predictie als functie van de leeftijd voor de selectie van dijkvakken.*

In Figuur 4.4 is te zien dat de afwijkingen naar boven en naar beneden gelijkmatig zijn verdeeld over de verschillende leeftijden. Dit geldt ook voor de verschillen als functie van het aanlegjaar, zie Figuur 4.5.



Figuur 4.5 *Meting minus predictie als functie van het aanlegjaar voor de selectie van dijkvakken.*

Figuur 4.6 toont de verschillen tussen meting en de predictie als functie van het holle ruimte percentage per boorkern. Te zien is dat er over het gehele bereik aan holle ruimte percentages vergelijkbare afwijkingen zijn.



Figuur 4.6 Meting minus predictie als functie van het holle ruimte percentage voor de selectie van dijkvakken.

De bitumengehaltes in Tabel 2.1 zijn niet voldoende onderscheidend, omdat de waarden rond de 6,3 liggen en binnen een bandbreedte van 0,5 (tussen minimale waarde en maximale waarde).

4.3 Conclusies

De selectie van de zeven dijkvakken uit Tabel 2.1 leent zich voor een eerste beschouwing van de verschillen tussen meting en predictie van de buigtreksterkte, omdat er zowel afwijkingen naar beneden als naar boven zijn. Er is voor deze afwijkingen geen verklaring gevonden in termen van leeftijd, aanlegjaar, holle ruimte percentage en bitumengehalte. In het volgende hoofdstuk wordt nagegaan of de breukenergie, breukrek of afgeleide parameters, zoals de vormfactor, een verklaring voor de afwijkingen kunnen geven. Deze parameters geven inzicht in de materiaalkwaliteit. Het streven is een generiek levensduurmodel te ontwikkelen, waarin naast holle ruimte percentage en leeftijd ook de materiaalkwaliteit wordt meegenomen.

5 Breukenergie en breukrek als indicatoren

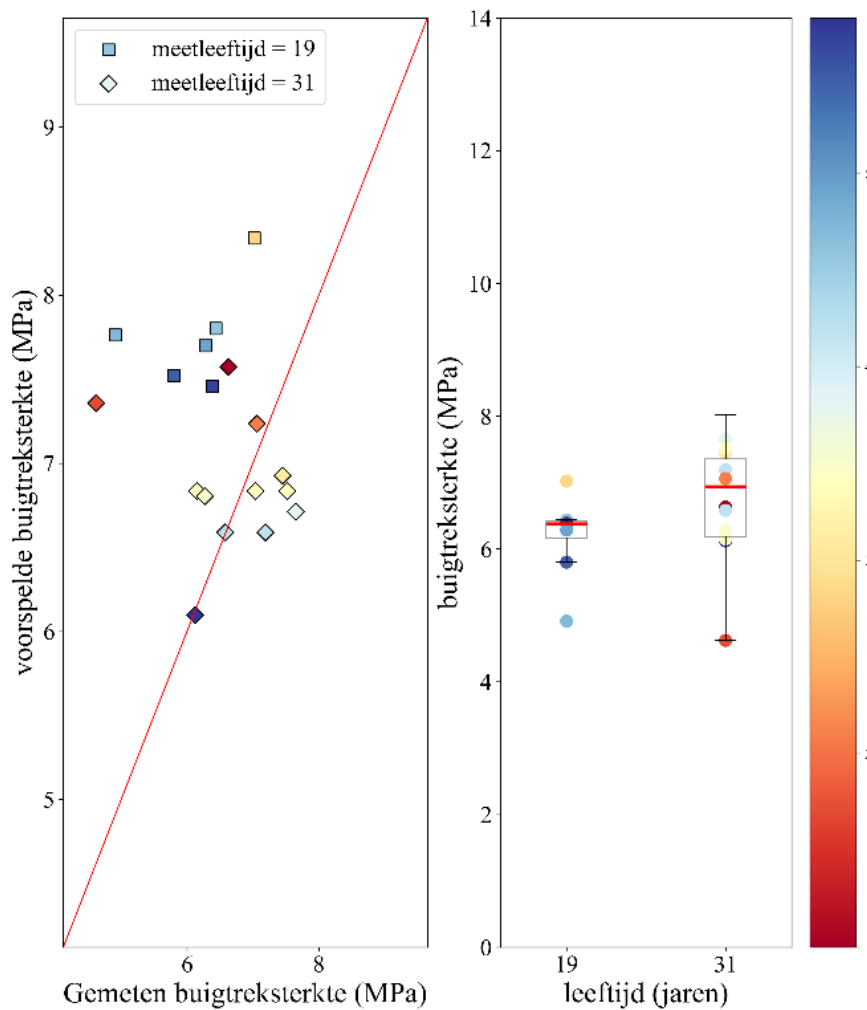
5.1 Onderscheidend vermogen qua leeftijd

Om de verschillen tussen gemeten buigtreksterkte en de predictie nader te duiden, zijn de tijdreeksen van de zeven gekozen dijkvakken onderzocht. Het levensduurmodel geeft de gemiddeld te verwachten buigtreksterkte, waarbij individuele meetwaarden met 90% zekerheid binnen het predictie interval verwacht worden. Als de meetwaarden van een onderzoek grotendeels buiten het predictie interval liggen, dan concluderen we dat het levensduurmodel voor dat dijkvak ongeschikt is.

In Hoofdstuk 3 zijn trends in buigtreksterkte, breukenergie en breukrek voor de tijdreeksen van de individuele dijkvakken in kaart gebracht. Alvorens na te gaan of het levensduurmodel voor de buigtreksterkte kan worden uitgebreid is in deze paragraaf nagegaan hoe voor deze tijdreeksen de metingen afwijken van de predictie, en dat voor de individuele boorkernen. Verschillen tussen de dijkvakken worden hierbij geduid.

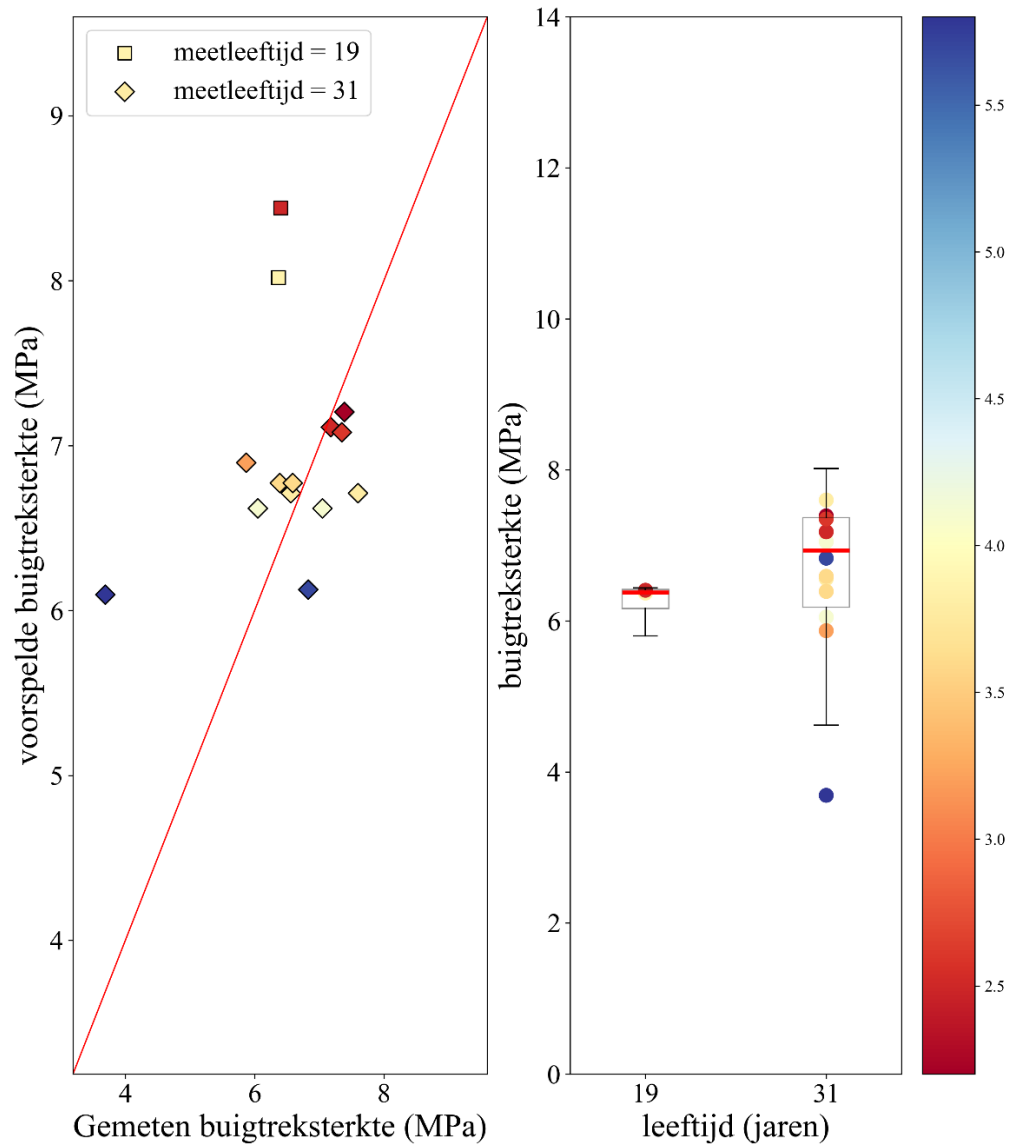
Het verschil tussen de meting en de predictie kan per leeftijd verschillen, wat gerelateerd kan zijn aan de materiaalkwaliteit. Eerst worden de buigtreksterktes beschouwd, en verderop ook de materiaalkwaliteit in termen van breukenergie en breukrek. Tevens is voor de individuele meetpunten het holle ruimte percentage met een kleur aangegeven. De predictieformule voorspelt een hogere buigtreksterkte bij een lager holle ruimte percentage, iets wat je vaak niet terug ziet in de meetwaarden.

Figuren 5.1 tot en met Figuur 5.6 tonen in het linkerdeel voor de buigtreksterkte de predictie versus de metingen per leeftijd, voor de 7 dijkvakken uit Tabel 2.1. In het rechterdeel staan boxplots van de meetwaarden.



Figuur 5.1 Amsteldiepdijk. Linkerdeel: predictie versus meting van de buigtreksterkte met de diagonaal is meting = predictie, rechterdeel: boxplots met meetwaarden. De kleurenbalk betreft het holle ruimte percentage voor de individuele meetpunten.

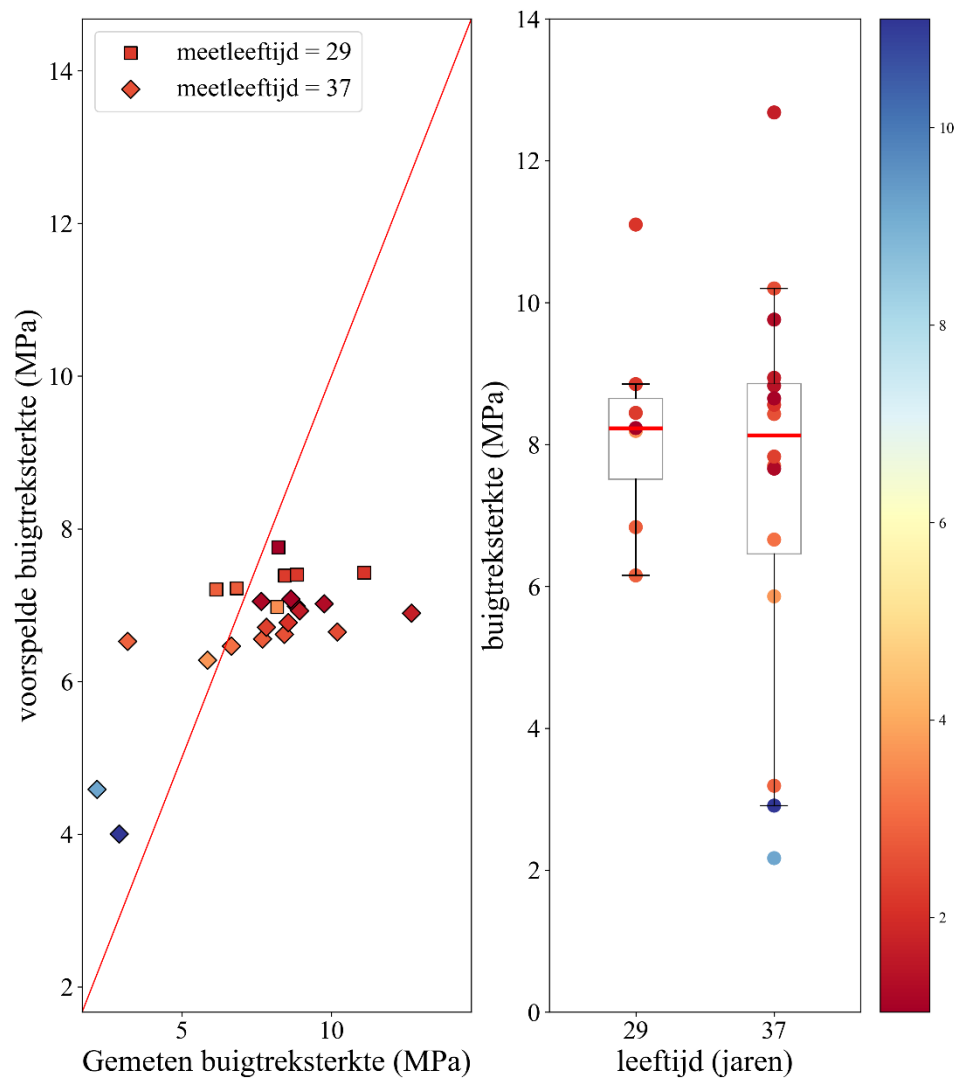
In Figuur 5.1 is te zien dat bij een leeftijd van 19 jaar de metingen van de buigtreksterkte duidelijk lager liggen dan de predicties (dat wil zeggen linksboven in de figuur), en dat bij een leeftijd van 31 jaar de punten rondom de diagonaal met meting = predictie liggen. In de boxplots is te zien dat de meetwaarden bij 19 jaar lager liggen dan bij 31 jaar. De vraag is of deze verhouding tussen meting en predictie voor de Balgzanddijk, welke aanpalend aan de Amsteldiepdijk ligt en in hetzelfde jaar is aangelegd, ook zo is. Dit lijkt het geval, zie Figuur 5.2, ook al zijn er maar twee metingen bij een leeftijd van 19 jaar. Voor beide vakken liggen de meetwaarden op de op een volgende leeftijden in hetzelfde bereik, zie de boxplots in het rechterdeel van de figuren.



Figuur 5.2 Balgzanddijk. Linkerdeel: predictie versus meting van de buigtreksterkte met de diagonaal is meting = predictie, rechterdeel: boxplots met meetwaarden. De kleurenbalk betreft het holle ruimte percentage voor de individuele meetpunten.

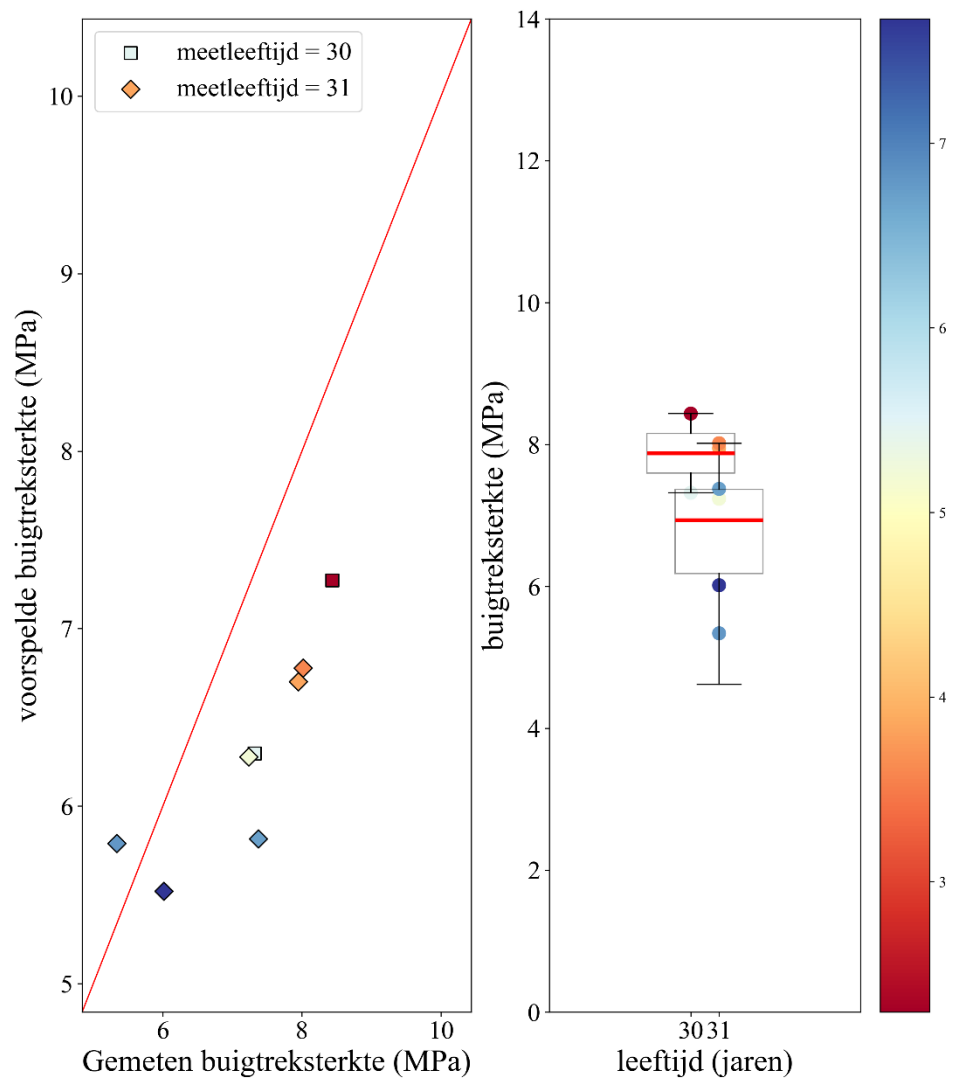
Figuur 5.3 toont de resultaten voor de Emmapolder. Hier liggen voor beide leeftijden de meeste punten rechts van de diagonaal, wat inhoudt dat de meetwaarden veelal hoger liggen dan de predicties. Dit is duidelijk anders dan voor de Amsteldiepdijk en de Balgzanddijk, zie ook de boxplots in Figuur 4.2. De metingen bij 37 jaar tonen twee keer een zeer hoog holle ruimte percentage.

Locatie: Emmapolder



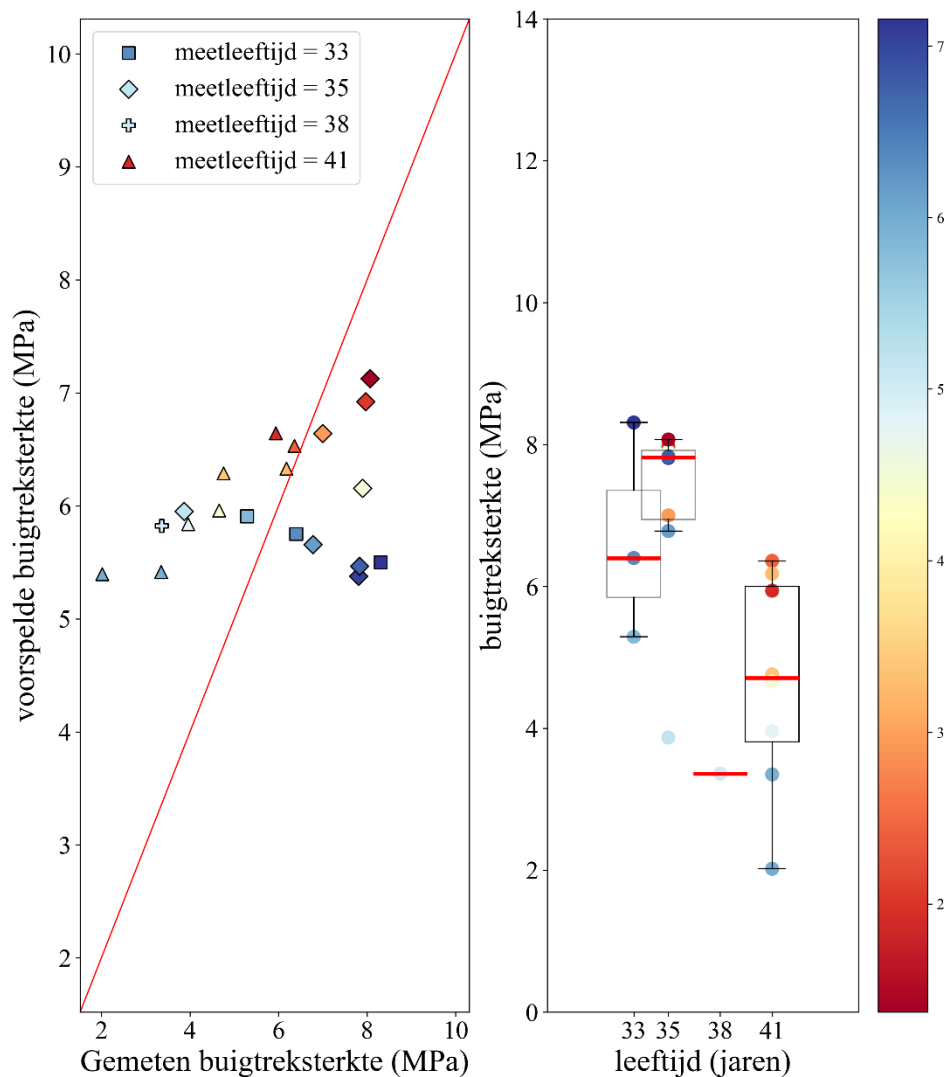
Figuur 5.3 Emmapolder. Linkerdeel: predictie versus meting van de buigtreksterkte met de diagonaal is meting = predictie, rechterdeel: boxplots met meetwaarden. De kleurenbalk betreft het holle ruimte percentage voor de individuele meetpunten.

Figuur 5.4 toont de resultaten voor de Gemeenschappelijke Polders. Voor beide leeftijden zijn de meetwaarden (bijna allemaal) hoger dan de predictie. De leeftijden liggen nu dicht bij elkaar en vullen elkaar goed aan t.a.v. het bereik in holle ruimte percentage.



Figuur 5.4 Gemeenschappelijke Polders.. Linkerdeel: predictie versus meting van de buigtreksterkte met de diagonaal is meting = predictie, rechterdeel: boxplots met meetwaarden. De kleurenbalk betreft het holle ruimte percentage voor de individuele meetpunten.

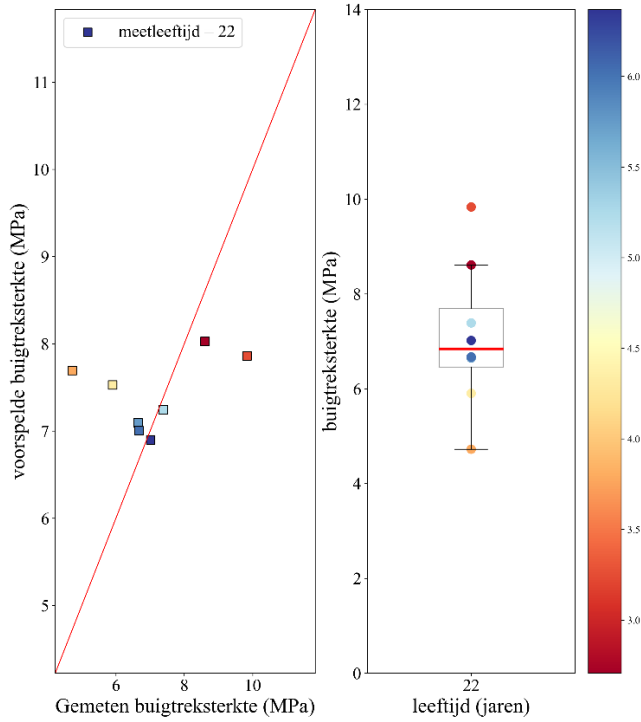
Figuur 5.5 toont de resultaten van Langgrousterwei. De meetwaarden bij 35 jaar zijn op één na hoger dan de predictie, bij 33 jaar bevinden de punten zich rond de diagonaal en na 38 en 41 jaar zijn de meetwaarden allemaal kleiner dan de predictie. Te zien is ook dat de meetwaarden bij 41 jaar duidelijk lager liggen, zie de boxplots in het rechterdeel van de figuur. Dit verschil is niet te verklaren met het levensduurmodel. Overall is er een evenwichtig beeld rondom de diagonaal. De meetwaarden hebben geen enkele relatie met het holle ruimte percentage. Dit is veel extremer dan bij de andere dijkvakken.



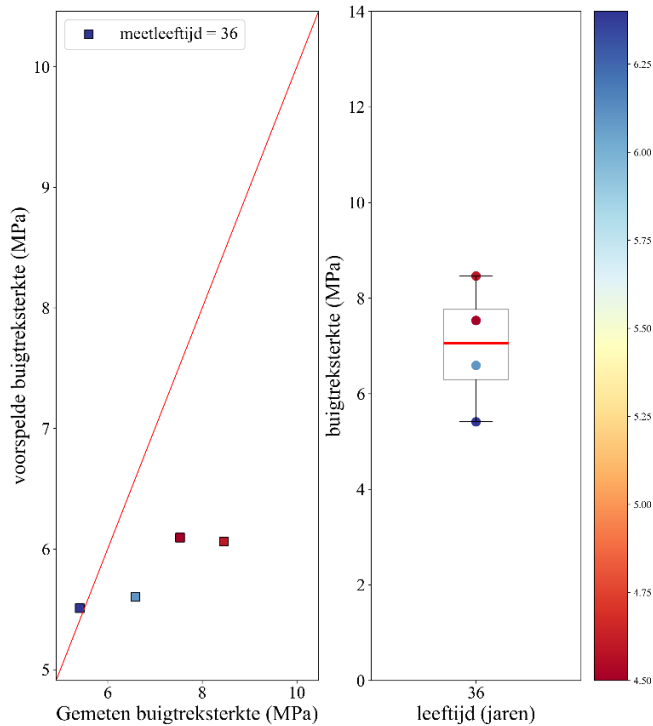
Figuur 5.5 Langgrousterwei.. Linkerdeel: predictie versus meting van de buigtreksterkte met de diagonaal is meting = predictie, rechterdeel: boxplots met meetwaarden. De kleurenbalk betreft het holle ruimte percentage voor de individuele meetpunten.

Figuur 5.6 toont de resultaten van de Normerdijk en het Normerdijkdeel van de Rinkelweerse Normerdijk. Bij een leeftijd 22 jaar liggen de punten rondom de diagonaal, terwijl bij het Normerdijkdeel van de Rinkelweerse Normerdijk, bij een leeftijd van 36 jaar, de meetwaarden bijna allemaal groter zijn dan de predictie. De boxplots laten zien dat de metingen voor beide onderzoeksjaren in hetzelfde bereik liggen.

Locatie: Normerdijk



Locatie: Rinkelweersedijk-Normerdijk



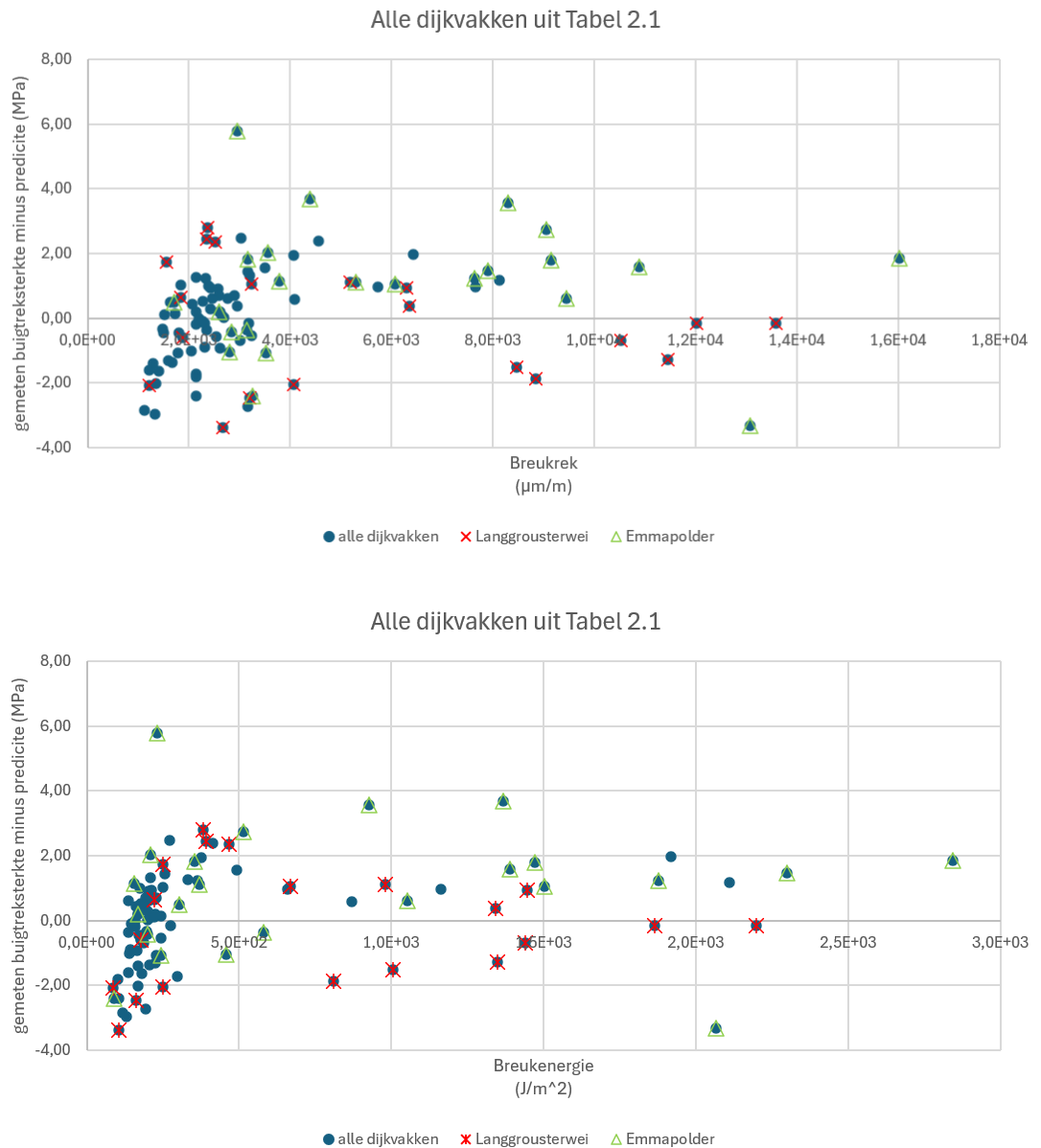
Figuur 5.6 Normerdijk (boven) en Rinkelweerse Normerdijk (onder).. Linkerdeel: predictie versus meting van de buigtreksterkte met de diagonaal is meting = predictie, rechterdeel: boxplots met meetwaarden. De kleurenbalk betreft het holle ruimte percentage voor de individuele meetpunten.

Al met al, is te zien dat de verschillen tussen de meting en de predictie bij de Amsteldiep- en Balgzanddijk bij hogere leeftijd (van 19 naar 31 jaar) gunstiger worden, dat wil zeggen de meetwaarden liggen hoger ten opzichte van de predictie. Bij Langgrousterwei is dat juist andersom (van 33-35 tot 38-41). De range in leeftijd voor deze twee vakken is duidelijk verschillend. Voor de andere vakken zijn de veranderingen in meting minus predictie uitgezet tegen de leeftijd minder groot.

5.2 Breukenergie en breukrek als verklarende parameters.

Voor alle dijkvakken te samen uit Tabel 2.1 is onderzocht of de verschillen in de gemeten buigtreksterkte minus de predictie te relateren is aan breukenergie en breukrek (per boorkern). Dit zijn indicatoren van de materiaalkwaliteit.

Figuur 5.7 toont de afhankelijkheid van de breukrek en van de breukenergie.



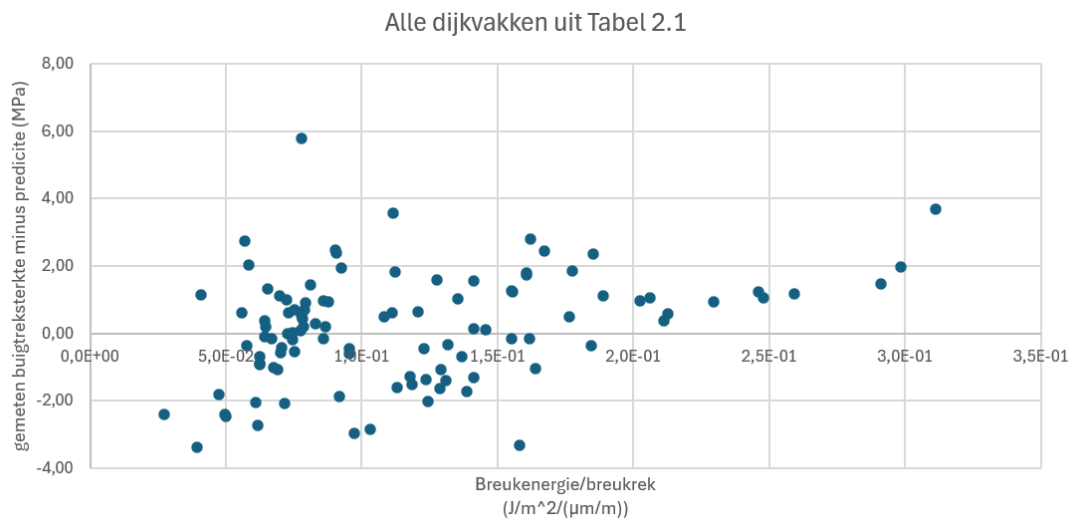
Figuur 5.7 Alle dijkvakken uit Tabel 2.1. Meting buigtreksterkte minus predictie als functie van breukrek (boven) en breukenergie (onder). De gegevens van Langgrousterwei en Emmapolder zijn gemarkeerd.

De gegevens in zijn geheel zijn evenwichtig verdeeld over de range aan breukrek en breukenergie. Er is geen trend te zien, dat wil zeggen dat de verschillen tussen de meting en de predictie niet van de breukrek en breukenergie afhangen.

Interessant is het volgende: Te zien is dat de meeste hoge waarden van breukrek en breukenergie horen bij de dijkvakken Emmapolder en Langgrousterwei, waarbij bij de hoge waarden Langgrousterwei afwijkingen heeft naar boven en naar beneden, en de Emmapolder bijna altijd naar boven.

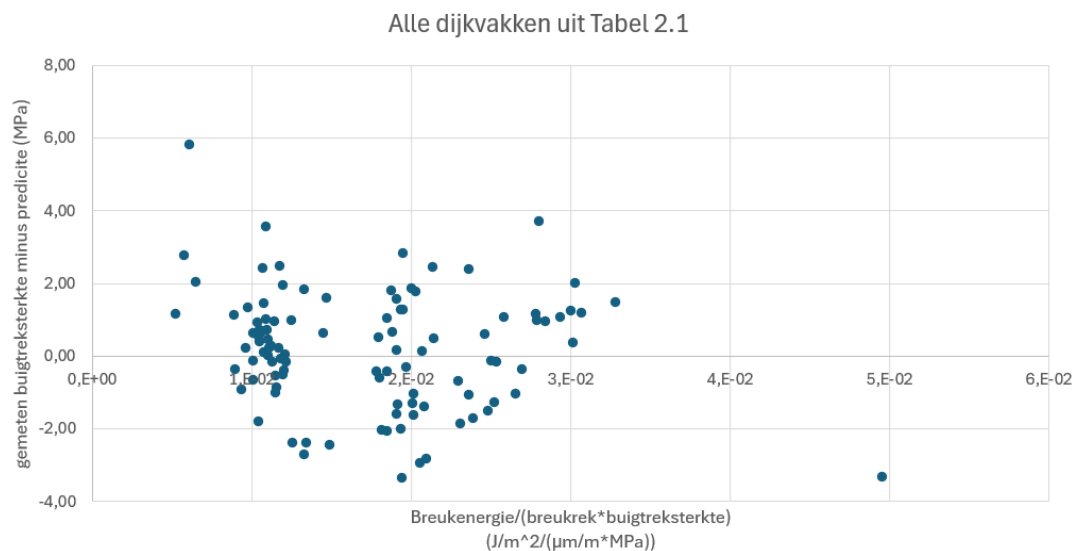
De Emmapolder gegevens hebben een leeftijd van 29 tot 37 jaar, die van Langgrousterwei van 33 tot 41 jaar. Het grootste deel van de lage waarden bij Langgrousterwei is bij een leeftijd van 41 jaar.

Mogelijk is er wel een trend te zien als functie van de breukenergie gedeeld door de breukrek, zie Figuur 5.8. De punten bij een hoge waarde voor de breukenergie gedeeld door de breukrek betreft meerdere dijkvakken. Verder is er geen duidelijke trend te zien.



Figuur 5.8 Alle dijkvakken uit Tabel 2.1. Meting buigtreksterkte minus predictie als functie van breukenergie gedeeld door de breukrek.

Tevens kan gekeken worden of er een trend ontstaat als de vormfactor met breukenergie gedeeld door het product van breukrek en buigtreksterkte wordt geplot, zie Figuur 5.9.



Figuur 5.9 Alle dijkvakken uit Tabel 2.1. Meting buigtreksterkte minus predictie als functie van breukenergie gedeeld door het product van de breukrek en de buigtreksterkte.

Ook in Figuur 5.9 is er geen trend te zien.

5.3 Andere invloeden

Het was voor de beschouwde dijkvakken niet mogelijk om een trend te vinden tussen enerzijds de afwijkingen tussen de gemeten buigtreksterkte en de predictie en anderzijds de bekende eigenschappen en kenmerken, de breukrek, breukenergie en de daar van afgeleide parameters, zoals de vormfactor. Wel is duidelijk dat de verschillen in materiaalkwaliteit tussen de dijkvakken aanzienlijk zijn. De volgorde in secant moduli uit Figuur 3.2 is niet nader beschouwd, omdat deze gevoelig is voor de proefuitvoering.

Hieronder wordt ingegaan op andere invloedsfactoren die de materiaalkwaliteit bepalen. De mechanische eigenschappen en de verandering van deze eigenschappen in de tijd worden beïnvloed door veel factoren. Bij in het verleden uitgevoerde analyses bleken leeftijd en holle ruimte steeds het meest bepalend voor verandering van de buigtreksterkte. Verwachte andere factoren die de verandering van de buigtreksterkte in de tijd beïnvloeden, zoals het bitumengehalte bleken niet dominant bij het opstellen van regressiemodellen. Bedacht moet worden dat er veel factoren zijn, waarvan (nog) geen data beschikbaar is, maar die waarschijnlijk wel de mechanische eigenschappen en de verandering in de tijd beïnvloeden. Gedacht wordt hierbij aan, onder andere, de volgende factoren die de materiaalkwaliteit bepalen:

- Factoren gerelateerd aan de mengselsamenstelling:
 - Toegepaste steensoort en bitumen en affiniteit tussen beide componenten.
 - (Maximale) steendiameter.
 - Toegepaste type vulstof.
- Factoren gerelateerd aan productie een aanleg:
 - Productietemperatuur.
 - Wijze waarop de individuele bouwstoffen tijdens productie zijn verwarmd.
 - Tijd gedurende welke de asfaltspecie tijdens transport is verwarmd.
 - Temperatuur tijdens het walsen.
- Factoren gerelateerd aan de gebruiksfase:
 - Oriëntatie ten opzichte van de zon.
 - Weersinvloeden: Optreden van vorst-dooicycli, water- en vochtbelasting.
 - Wijze van onderhoud, zoals reparaties en oppervakbehandeling

Deze lijst is ongetwijfeld onvolledig. Genoemde invloedsfactoren kunnen wel een verklaring zijn voor de spreiding in eigenschappen, en hier met name de buigtreksterkte, die aanwezig is in de dataset. Deze spreiding in eigenschappen wordt maar beperkt in beeld gebracht bij boorkernonderzoek. In de Handreiking Continu inzicht [13] is aangegeven hoe een combinatie van visuele inspectie, valgewicht-deflectie-metingen en boorkern onderzoek kan worden gebruikt om de achteruitgang in materiaalkwaliteit te monitoren. Ook kan als ondersteuning van de visuele inspectie radar worden ingezet.

5.4 Conclusies

Een nadere beschouwing van de tijdsreeksen van de individuele dijkvakken, waarbij de gemeten buigtreksterkte is vergeleken met de predictie met het levensduurmodel, geeft inzicht in de verschillen in materiaalkwaliteit. Hierbij geeft de predictie de gemiddeld te verwachten buigtreksterkte, welke een goede benadering is voor de meeste boorkernen, maar waar voor individuele boorkernen flinke afwijkingen van kunnen optreden (90% predictie interval met 2,7 MPa naar boven en 2,7 MPa naar beneden).

Voor alle boorkernen van de dijkvakken te samen uit Tabel 2.1 is onderzocht of de verschillen in de gemeten buigtreksterkte minus de predictie te relateren zijn aan de breukenergie, breukrek en daarvan afgeleide grootheden zoals de vormfactor. Er blijken geen duidelijke trends aanwezig.

Er zijn vele andere invloedsfactoren, waar we niet altijd weet van hebben, die de materiaalkwaliteit beïnvloeden. Dit is, onder meer, terug te zien in het predictie interval behorende bij het levensduurmodel voor de buigtreksterkte.

Voor de beperkte dataset die hier is beschouwd, lijkt het uitbreiden van het huidige model met aan de breukenergie gerelateerde parameters geen voor de hand liggende route. Daar de dataset beperkt is gehouden, is nog niet gezegd dat, als meer data van andere bronnen wordt onderzocht, er ook geen trends zijn te zien. Immers, we weten dat er verschillen in materiaalkwaliteit zijn tussen dijkvakken met verschillende aanlegjaren en ook de meer recente metingen laten belangrijke verschillen zien.

6 Conclusies en aanbevelingen

Verandering van mechanische eigenschappen in de tijd

Met de tot nu toe uitgevoerde analyses van een deel van de dataset met gegevens krijgen we wat meer grip op de veranderingen van de mechanische eigenschappen (buigtreksterkte, rek bij breuk, secant stijfheidsmoduli en breukenergie) in de tijd. Het gaat hierbij om de mechanische eigenschappen die volgen uit driepunts-buigproeven. De analyses laten steeds zien dat de richtingscoëfficiënt in een grafiek van breukenergie tegen breukrek en de vormfactor geschikte parameters zijn om de verandering in materiaalgedrag, ten gevolge van veroudering en omgevingsinvloeden, te beschrijven. De trends zijn het best zichtbaar in de tijdreeksen van de individuele vakken en deze zijn minder goed te zien als meerdere dijkvakken per leeftijd worden gegroepeerd. Ook de mechanische eigenschappen zelf laten minder goede trends in de tijd zien. Tevens is te zien dat de breukenergie lager wordt als het materiaal veroudert, waarbij gelet moet worden op de laagste waarden, aangezien een lage breukenergie duidt op een zwakke plek.

Implementatie in een levensduurmodel

Het streven is een generiek levensduurmodel te ontwikkelen, waarin, naast het holle ruimte percentage en leeftijd, ook de materiaalkwaliteit wordt meegenomen.

Er is nagegaan of het levensduurmodel voor de buigtreksterkte kan worden uitgebreid met extra verklarende parameters: breukenergie, breukrek en daarvan afgeleide grootheden zoals de vormfactor (per boorkern). Voor een selectie van dijkvakken te weten de Amsteldiepdiijk, Balgzanddiijk, Normerdiijk, Gemeenschappelijke Polders, Emmapolder en Langgrousterwei is onderzocht of de verschillen in de gemeten buigtreksterkte minus de predictie te relateren zijn aan deze extra verklarende parameters.

De selectie van genoemde dijkvakken leent zich voor een eerste beschouwing van de verschillen tussen meting en predictie, omdat er zowel afwijkingen naar beneden als naar boven zijn, iets wat ook aan de orde is voor de 73 dijkvakken van het levensduurmodel.

Er is voor de afwijkingen tussen de gemeten buigtreksterkte en de predictie met het levensduurmodel geen verklaring gevonden in termen van leeftijd, aanlegjaar, holle ruimte percentage en bitumengehalte. Ook blijken geen duidelijke trends aanwezig tussen deze afwijkingen en de breukenergie, breukrek en daarvan afgeleide grootheden, zoals de vormfactor.

Er zijn vele andere invloedsfactoren, waar we niet altijd weet van hebben, die de materiaalkwaliteit beïnvloeden. Dit is onder meer terug te zien in het predictie interval behorende bij het levensduurmodel voor de buigtreksterkte.

Voor de beperkte dataset die hier is beschouwd, lijkt het uitbreiden van het huidige model met aan de breukenergie gerelateerde parameters geen voor de hand liggende route. Daar de dataset beperkt is gehouden, is nog niet gezegd dat, als meer data van andere bronnen wordt onderzocht, er ook geen trends zijn te zien. Immers, we weten dat er verschillen in materiaalkwaliteit zijn tussen dijkvakken met verschillende aanlegjaren en ook de meer recente metingen laten belangrijke verschillen zien.

De buigtreksterkte op zichzelf is slechts in beperkte mate een indicator van de materiaalkwaliteit. De breukenergie en breukrek die, evenals de buigtreksterkte, ook uit de driepunts-buigproeven kunnen worden verkregen blijken, aanvullend, goede indicatoren van de materiaalkwaliteit te zijn.

In dit rapport zijn, los van het levensduurmodel, trends gevonden in breukenergie gedeeld door breukrek en leeftijd die duiden op een afname van de kwaliteit in de tijd, voor de tijdreeksen van de individuele dijkvakken. Maar ook als de dijkvakken onderling worden vergeleken zien we duidelijke verschillen in de opgetreden veroudering.

Wat betreft de vermoeiingsberekeningen, zoals met Basis Module Asphalt Golfklap, is veroudering en broser gedrag vooral van invloed op de asfaltstijfheid en de buigtreksterkte. In een dijkvak wordt de spreiding in de tijd van deze eigenschappen steeds groter, wat ook kan volgen uit voldoende boorkernonderzoek. We rekenen met de 95% onderschrijdingswaarde van de asfaltstijfheid en met de 5% onderschrijdingswaarde van de buigtreksterkte. Een hogere stijfheid geeft een hogere Minersom, dus meer vermoeiing, en een lagere buigtreksterkte geeft ook een hogere Minersom (meer vermoeiing).

Aanbevelingen

Het is verstandig om de in de analyse gebruikte dataset uit te breiden, en dan onderscheid te maken in vakken met aanlegjaar voor de oliecrisis (in 1973), na de oliecrisis tot 2000, en na 2000 (met asfaltgranulaat volgens de RAW). Naar verwachting worden trends qua broser en ductiel gedrag beter zichtbaar. De verschillen in materiaalkwaliteit tussen de tot nu toe beschouwde dijkvakken zijn aanzienlijk.

Op basis van deze uitgebreide dataset kan opnieuw worden onderzocht of de verschillen tussen de gemeten en de met het levensduurmodel voorspelde buigtreksterkte te duiden zijn in termen van breukenergie, breukrek en daarvan afgeleide parameters, zoals de vormfactor. Een belangrijke aanbeveling is om het levensduurmodel voor de buigtreksterkte steeds te toetsen aan nieuwe meetgegevens, van met name warm WAB en met oplopende recycling fractie. Dit omdat de verwachte mechanische eigenschappen verschillen van dat van heet WAB. Dan kan ook duidelijk worden of een generiek model voor al deze mengsels haalbaar is.

De analyses tot nu toe laten zien dat het betrekken van de breukenergie beter inzicht geeft in de veranderingen van mechanische eigenschappen.

Er zijn daarnaast ook proeven op componentniveau voorzien om het effect van veroudering in kaart te brengen (ander deelproject binnen KCW) en die in de toekomst in verband gaan worden gebracht met het gedrag op proefstukniveau in de driepunts-buigproef.

Er kan in de toekomst ook een regressieanalyse worden gedaan voor een selectie van dijkvakken, maar nu met breukenergie. Dit is een parallel spoor aan de doorontwikkeling van het bestaande regressiemodel voor de buigtreksterkte.

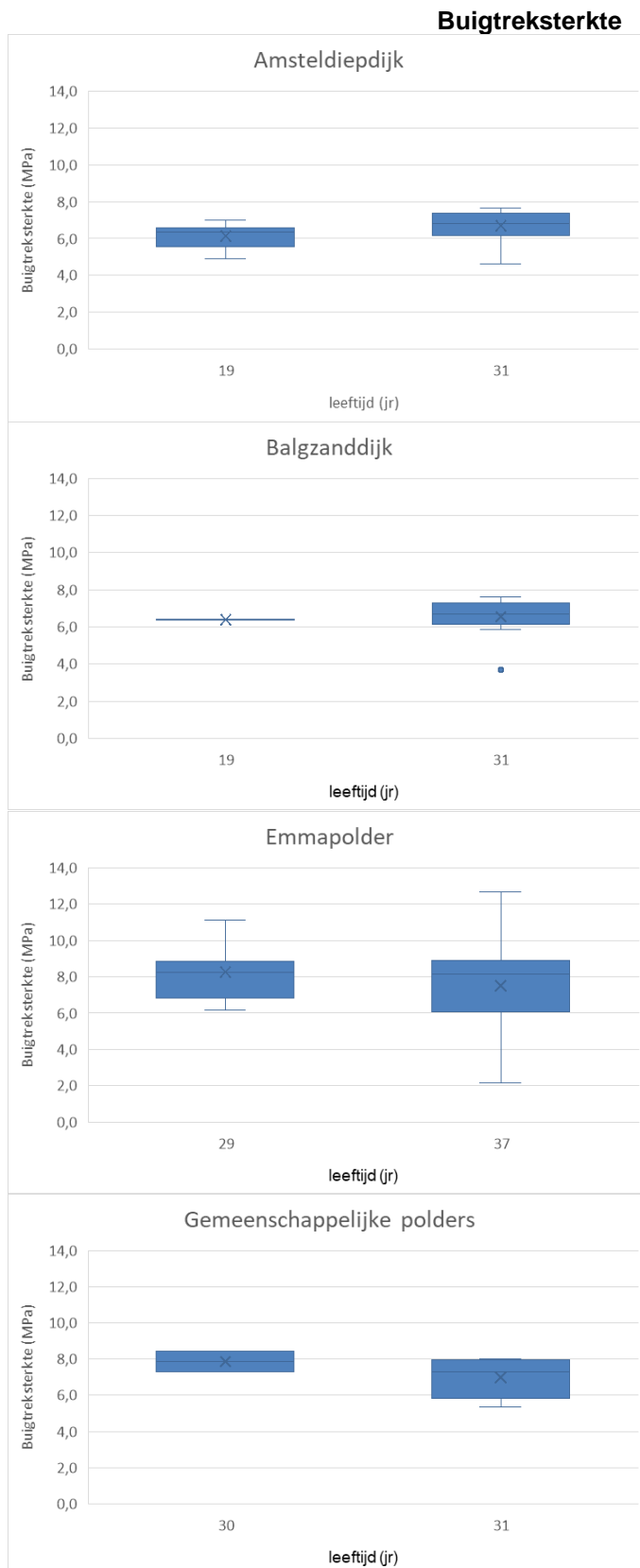
Het doel is het maken van een prognose van de scheurgevoeligheid, d.w.z. de afname van de breukenergie. Op basis van een nulmeting kan een startwaarde worden bepaald en met de nog te ontwikkelen regressie een extrapolatie naar latere datum.

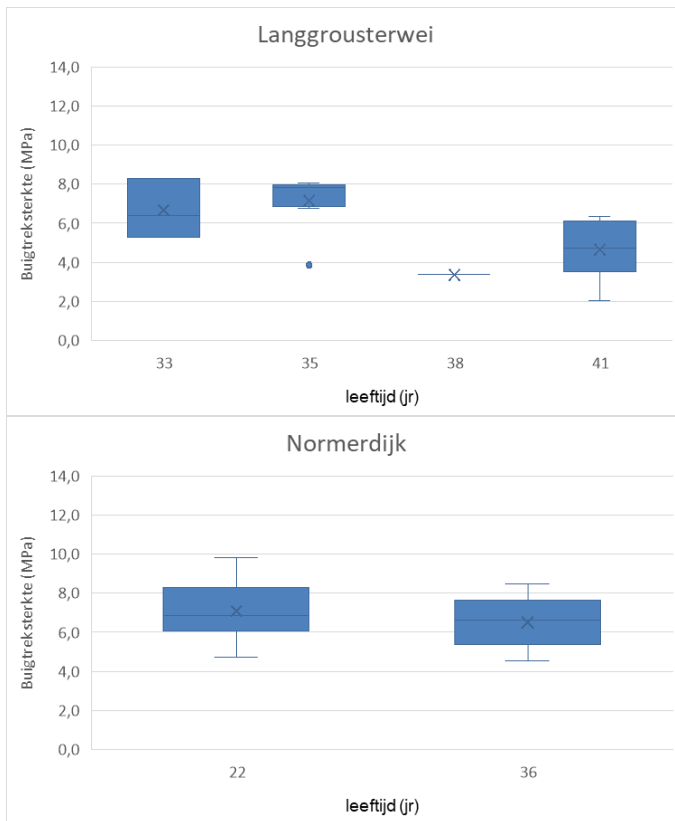
Om de scheurgevoeligheid in kaart te brengen kan het gedrag, zoals te zien in Figuur 3.2, nog verder worden uitgewerkt. Een idee is om het oppervlak tussen gemeten kracht-verplaatsingslijn (blauwe lijn) en de 100% secant modulus lijn (rode lijn) te beschouwen. Als het materiaal broser is, dan is dit oppervlak vrijwel gelijk aan nul, en geleidelijke veranderingen in de kromming van de kracht-verplaatsingslijn zijn zo ook waar te nemen. Een vervolgstap is om dit oppervlak te delen door de helft van het product van maximale kracht en bijbehorende verplaatsing. Dit geeft dan een zuiver beeld van de kromming.

7 Referenties

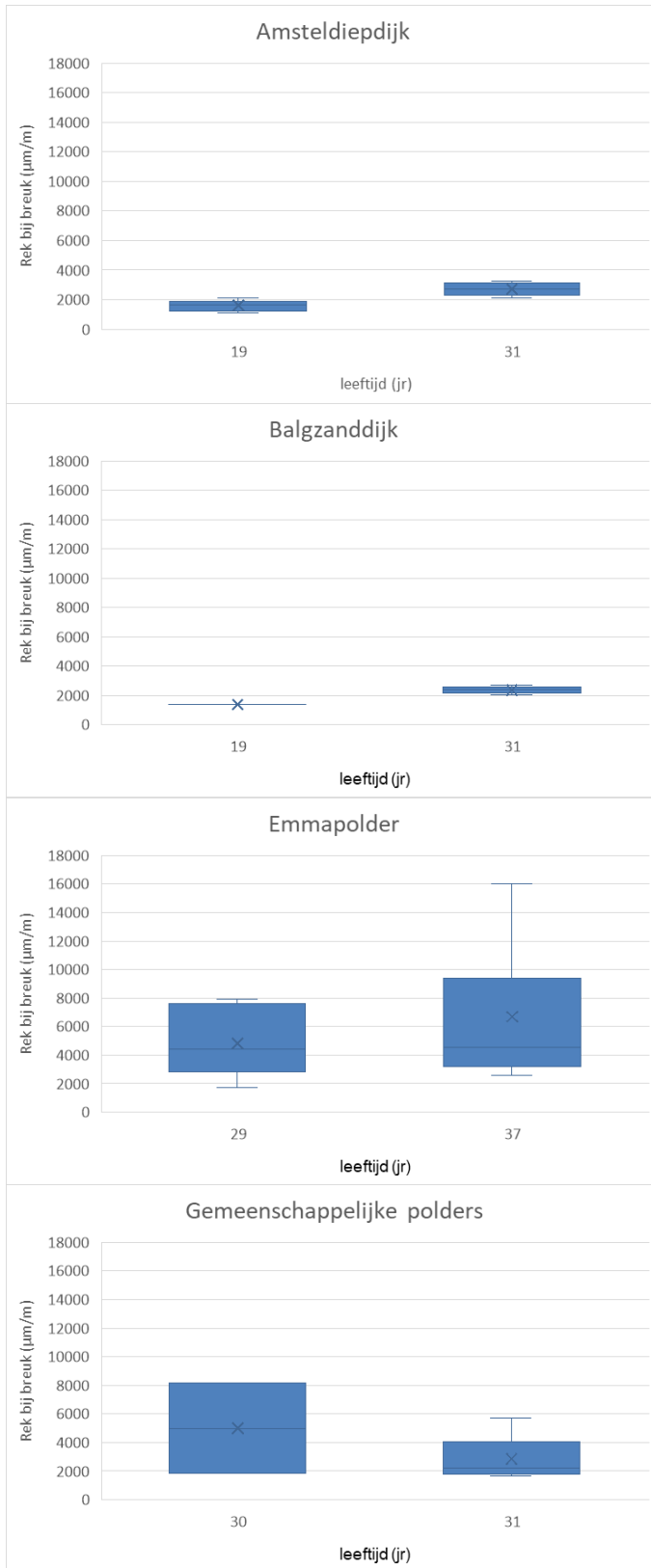
- [1] Projectplan Klimaatneutraal en circulair Waterbouwasfalt versie 1.0; 14-06-2023; opstellers: Marten Hoeksema (RWS WVL) en Barry Ros (Wetterskip Fryslân).
- [2] PCR Asfalt, versie 2.0; Product Category Rules voor bitumineuze materialen in verkeersdragers en waterwerken in Nederland ("PCR Asfalt").
- [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 Loeff van Infram-Hyden.
- [7] Plan van aanpak levensduur warm waterbouwasfaltbeton; Infram-Hyden; 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.
- [9] Studie levensduuraspecten van waterbouwasfaltbeton; met meetdata van drie dijkvakken met oud WAB; Deltares April 2024; auteur: dr. Bernadette Wichman; 11209268-024-GEO-0001.
- [10] Vergelijking sterkte in het laboratorium geproduceerd heet en warm WAB (concept) augustus 2024, Infram Hyden, Auteurs; ir. Marloes Slokker, ing. A.K. de Loeff, dr. Bernadette Wichman; rapport R23i731.
- [11] Laboratoriumonderzoek veroudering Waterbouwasfalt (WAB); TU Delft December 2024; Reference number:31190720; Auteurs: Dr. Avishreshth Singh, Dr. Aikaterini Varveri en Dr. Lili Ma.
- [12] The Effect of Structural Integrity on the Tensile Deformation Characteristics of A206-T71 Alloy Castings; Auteurs: M. Tiryakioğlu et. al., Materials Science and Engineering A, July 2008.
- [13] Handreiking Continu Inzicht Dijkbekledingen van Waterbouwasfaltbeton, Stowa 2017, rapport 2017-09.

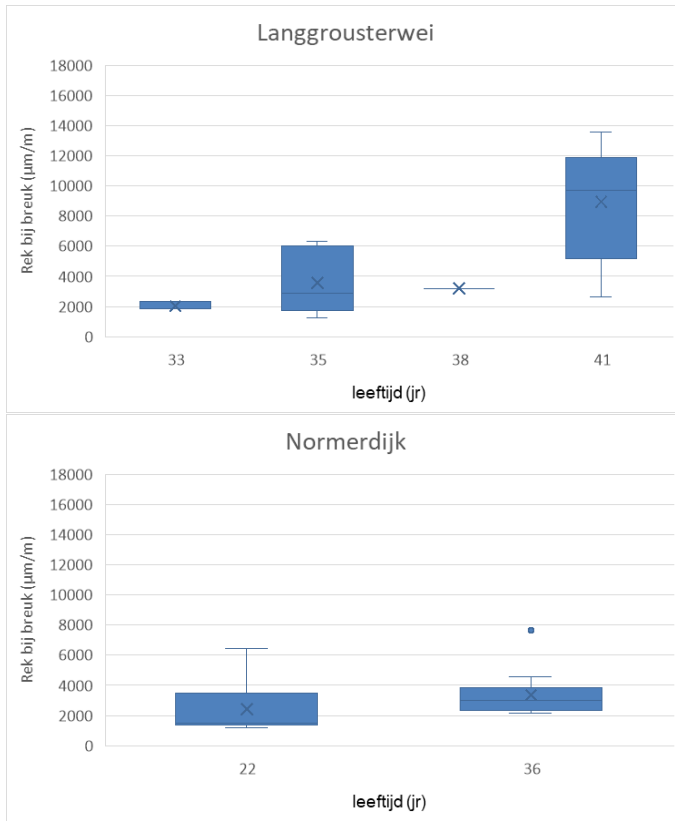
A Boxplots



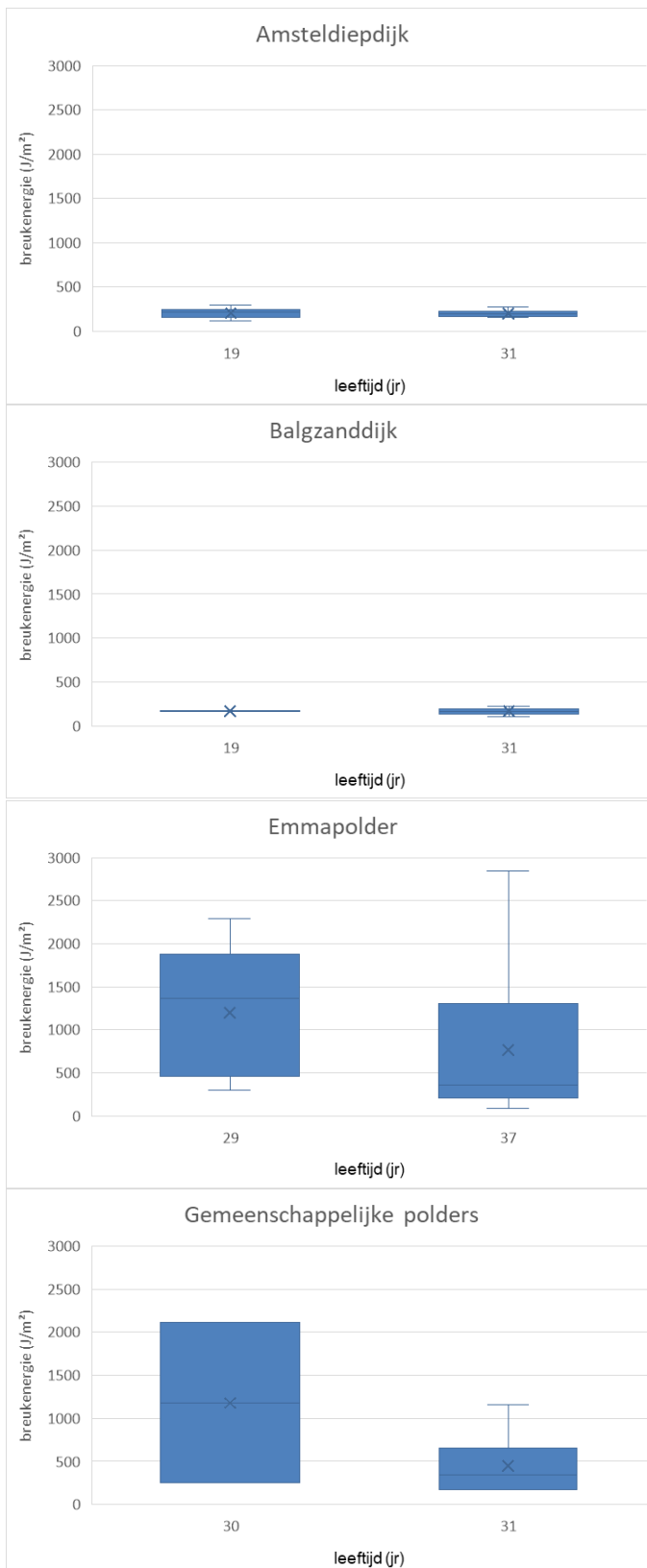


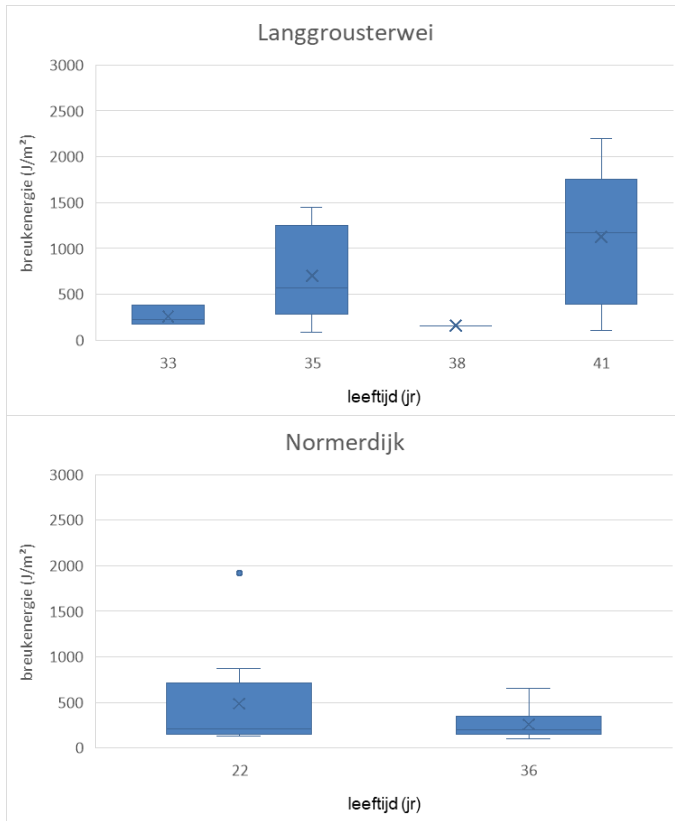
Rek bij breuk

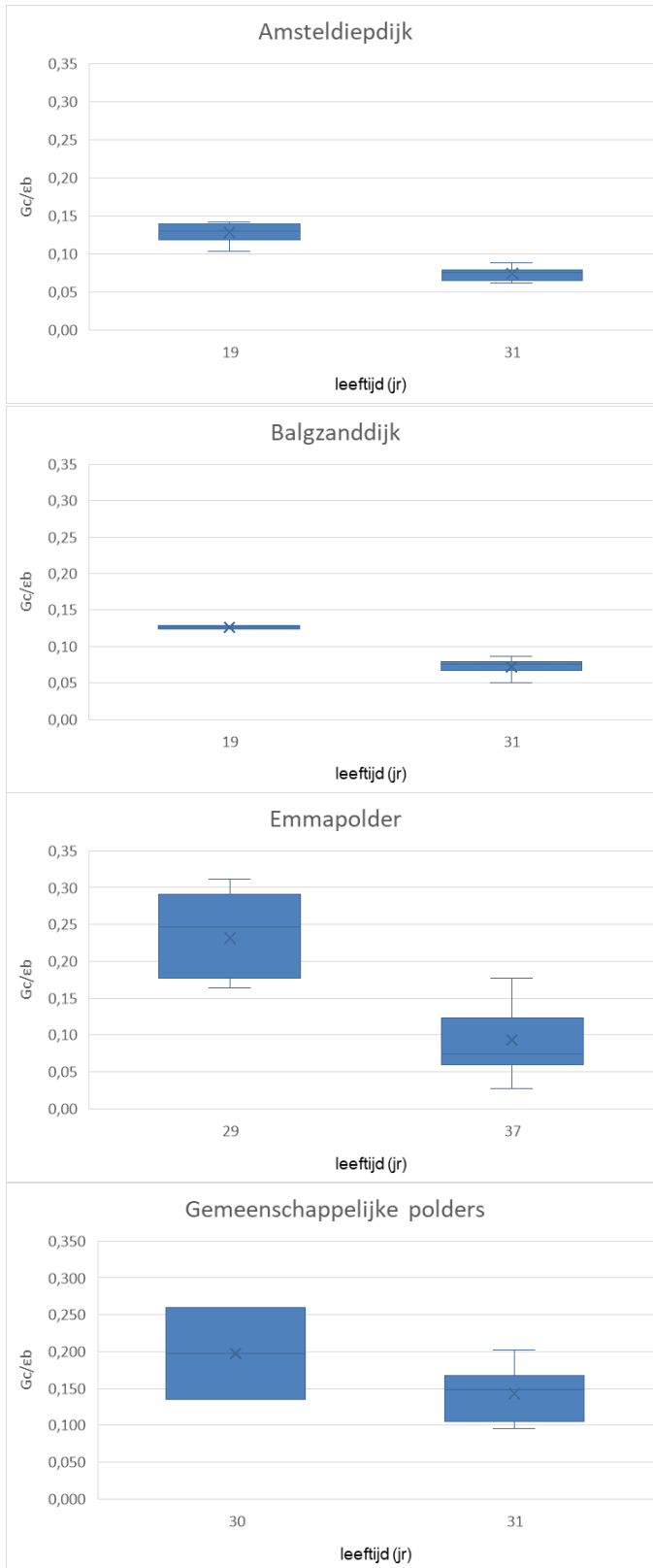


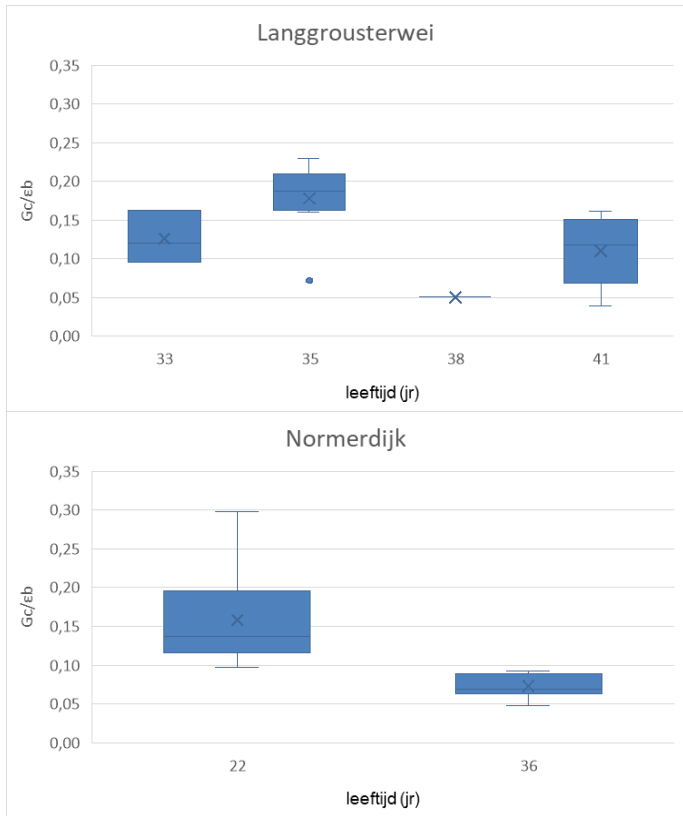


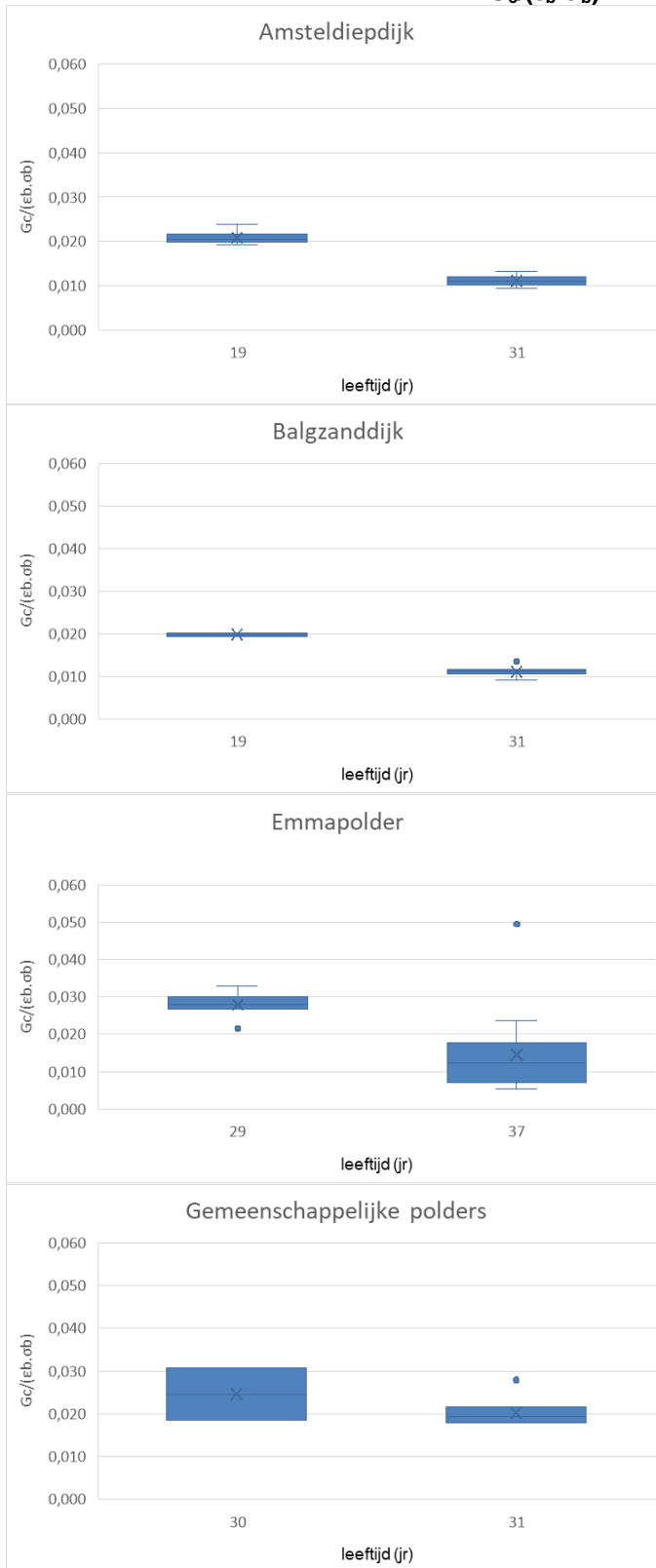
Breukenergie

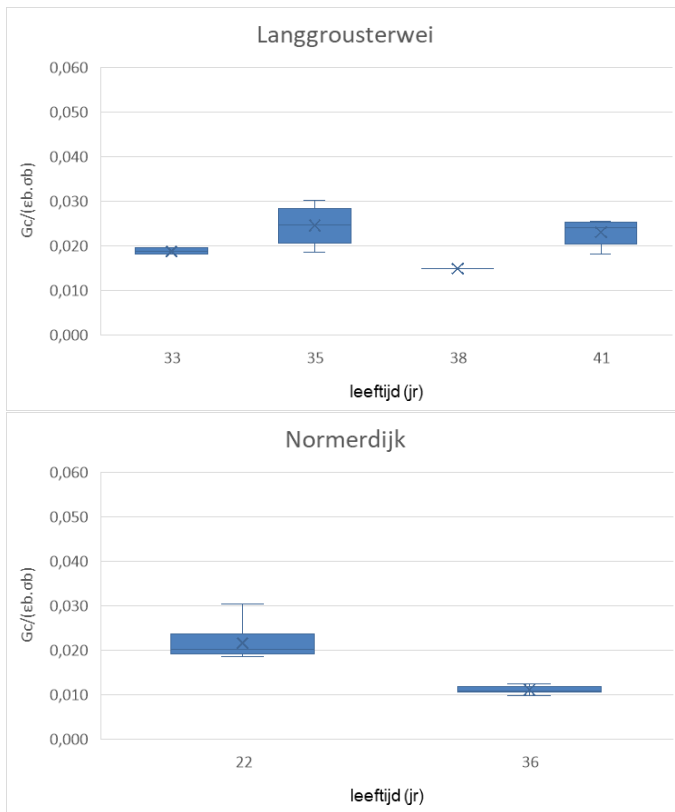






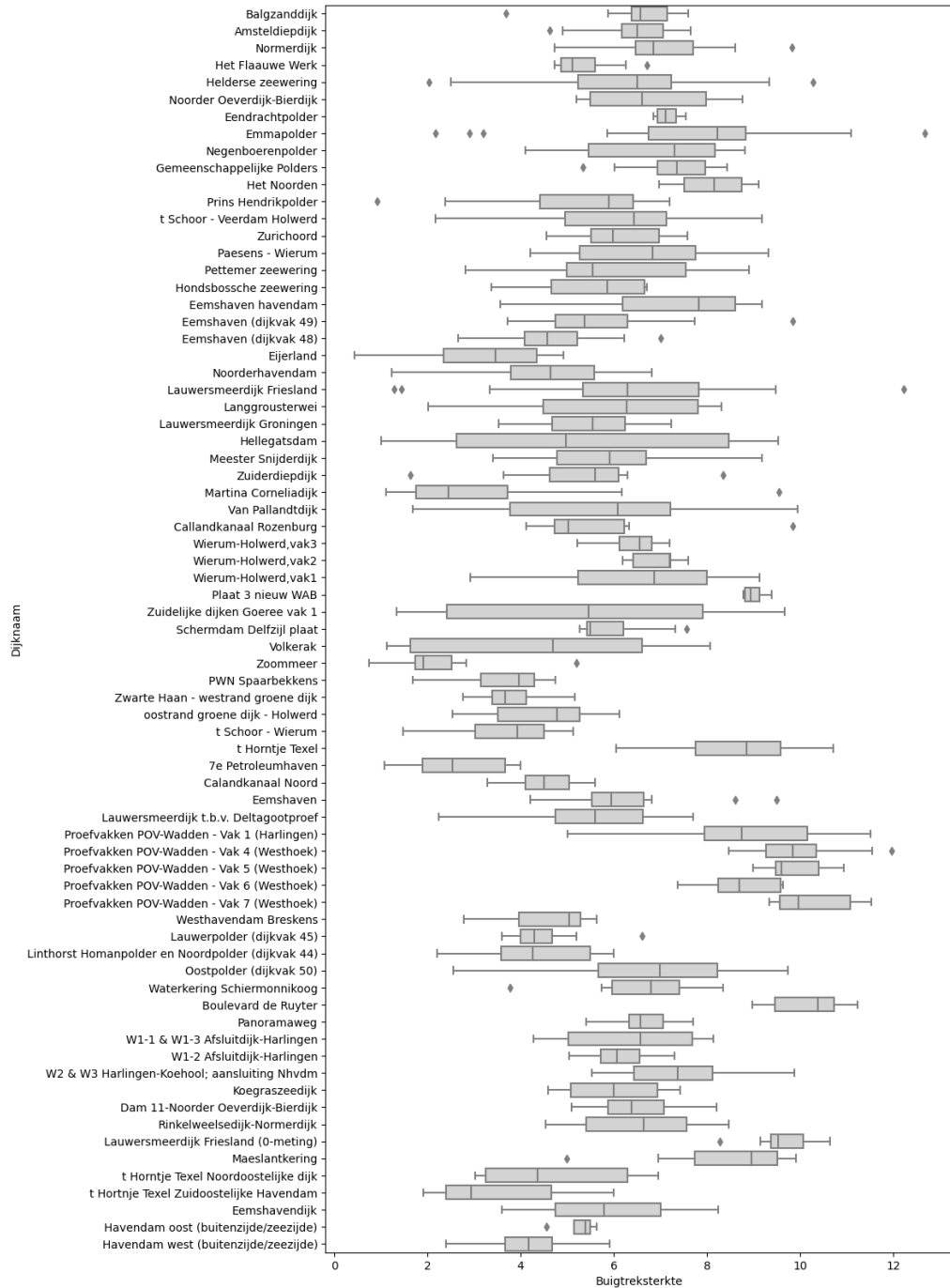


$G_c/(\epsilon_b \cdot \sigma_b)$ 



B Dijkvakken levensduurmodel

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