

# Karakteriseren en beheersen gedrag van gebonden funderingen

Berwich Sluer  
Boskalis Nederland Infra

## Samenvatting

Sinds jaar en dag worden in Nederland gebonden funderingen in de wegenbouw toegepast. De laatste jaren staat dit type fundering echter onder druk vanwege regelmatig terugkerende kostbare schadegevallen met uiteenlopende oorzaken. De vraag kan worden gesteld of er wel voldoende over de eigenschappen, het gedrag en de toepassingscondities van gebonden funderingen bekend is om daar in functioneel gespecificeerde contracten met grote zekerheid betrouwbare toepassing mogelijk te maken. Dit is in 2010 voor Jacobs en Sluer [1] aanleiding geweest om een voorstel te presenteren voor het functioneel karakteriseren van gebonden funderingen.

Naast kennis van de mechanische eigenschappen van deze funderingsmaterialen is de beheersing van de scheurvorming door krimp en temperatuur, inherent aan het binden met cement, van groot belang. Momenteel is het ontspannen van cementgebonden funderingen de meest toegepaste methode voor de beheersing van scheurvorming. Het is echter de vraag of er in de praktijk met voldoende resultaat wordt ontspannen.

In deze bijdrage worden proeven voor de mechanische karakterisering van een cementgebonden funderingsmateriaal (immobilisaat) beschreven en resultaten van onderzoek gepresenteerd. Tevens wordt uitgelegd op welke wijze een cementgebonden fundering aantoonbaar enerzijds kan worden ontspannen en anderzijds de gewenste sterkte bereikt. Met deze kennis van de eigenschappen en gedrag van cementgebonden funderingen kunnen op verantwoorde wijze verhardingsconstructies met OIA worden gedimensioneerd en met minimaal risico goed presterende verhardingen met cementgebonden funderingen worden aangelegd. Enige resterende voorwaarden zijn dat een cementgebonden fundering niet op een onderbouw waarin ontoelaatbare vervormingen kunnen optreden moet worden aangelegd en dat er zorg voor moet worden gedragen dat de constructie niet in de bouwfase al door werkverkeer wordt stuk gereden.

## Steekwoorden

Ontspannen, kerven, specificeren, verifiëren, dimensioneren, gebonden, fundering

## 1. Inleiding

Sinds jaar en dag worden in Nederland gebonden funderingen in de wegebouw toegepast. De laatste jaren staat dit type fundering echter onder druk vanwege regelmatig terugkerende kostbare schadegevallen met uiteenlopende oorzaken. De vraag kan worden gesteld of er wel voldoende over de eigenschappen, het gedrag en de toepassingscondities van gebonden funderingen bekend is om daar in functioneel gespecificeerde contracten met grote zekerheid betrouwbare toepassing mogelijk te maken. Dit is in 2010 voor Jacobs en Sluer [1] aanleiding geweest om een voorstel te presenteren voor het functioneel karakteriseren van gebonden funderingen.

In het verleden is de gebonden zandcement-fundering het meest populair geweest. Regelmatig falen van dit type fundering, met name door onvoorspelbare eigenschappen en gedrag, heeft er echter toe geleid dat de populariteit snel afnam en daarvoor in de plaats de asfaltgranulaatcementfundering op kwam. In de beginperiode van de asfaltgranulaatcementfundering, toen nog breekasfaltcement (brac) genoemd, waren de Standaard RAW-bepalingen van dien aard dat er relatief hoge cementpercentages werden toegepast. De eisen aan het gerealiseerde resultaat waren op de toenmalige productkwaliteit afgestemd. Toch waren de prestaties van brac-funderingen in de praktijk geen onverdeeld succes. Naast enkele aspecten die van alle tijden zijn, was er toen vooral ook sprake van schade als gevolg van inhomogene mengkwaliteit. Dit laatste hoeft heden ten dage absoluut geen probleem meer te zijn, mits van de mengbedrijven geen onrealistische dagproducties worden geëist.

In de periode van het IPO interim beleid voor secundaire materialen was het toegestaan om teerhoudend asfaltgranulaat in gebonden funderingen toe te passen. In die periode is voor het immobiliseren op grote schaal gebruik gemaakt van het toevoegen van bitumen als bindmiddel aan brac of cement als bindmiddel volledig te vervangen door bitumen. De benamingen asfaltgranulaatcement (agrac), asfaltgranulaatemulsiecement (agrec) en asfaltgranulaatemulsie (agrem) werden geïntroduceerd. Opvallend aan de prestaties van de gebonden funderingen in deze periode was dat asfaltgranulaatemulsiecement en asfaltgranulaatemulsie nagenoeg geen problemen met scheurvorming vertoonden. Vanwege problemen met spoorvorming in enkele werken is asfaltgranulaatemulsie vrij snel naar de achtergrond verdwenen. De bitumencomponent in de cementgebonden funderingen was vanwege de opbrengsten door nuttig hergebruik van teerhoudend asfaltgranulaat ten tijde van het IPO interim beleid financieel nog op te brengen. Met het verbod op het hergebruik van teerhoudend asfaltgranulaat in wegfunderingen is echter ook asfaltgranulaatemulsiecement van het firmament verdwenen. Door steeds vaker falen van funderingen van asfaltgranulaatcement is er nu weer hernieuwde aandacht voor asfaltgranulaatemulsiecement, of in de variant van misschien wel granulaatschuimbitumencement (grasbicem?) waarin asfaltgranulaat wordt vervangen door allerhande granulaat.

Een laatste stroming in de wereld van gebonden funderingen betreft de ontwikkelingen geïnitieerd voor Schiphol en tegenwoordig ook veelvuldig toegepast in de havens, namelijk cement treated base (CTB). CTB, omdat er diverse granulaten mogen worden toegepast in

plaats van alleen asfaltgranulaat. De eisen aan de sterkte van dit type fundering zijn vergeleken met agrac uitermate hoog. Een druksterkte-eis van 10 MPa na 28 dagen is min of meer de standaard. Of deze druksterkte wel noodzakelijk is in relatie tot de andere eigenschappen van de fundering is natuurlijk maar de vraag.

En dan, last but not least, de immobilisaten, oneerbiedig ‘cement gebonden rommel’ genoemd, omdat granulaat vervangen kan zijn door grond, zand, gemalen restproducten etc. ‘Oneerbiedig’, omdat dit type fundering mede vanwege het milieu hygiënische doel van alle typen gebonden funderingen nog wel de meest stringente eisen aan de productie van het materiaal kent. In de regel is er sprake van een relatief fijne gradering van het ‘granulaat’ en wordt voor de immobiliserende werking een relatief hoog cementgehalte van 6-11% toegepast.

Het zal duidelijk zijn dat er sprake is van een grote verscheidenheid aan gebonden funderingen. Ieder type heeft vanwege de specifieke samenstelling ook specifieke materiaaleigenschappen, kent materiaalspecifieke eisen aan productie en verwerking en vertoont daarmee ook materiaalspecifiek praktijkgedrag. Toch worden bij het ontwerp van verhardingen met deze materialen identieke ontwerpcriteria gesteld.

In het Ontwerp Instrumentarium Asfalverhardingen (OIA) is over de toetsing van een gebonden fundering het volgende gesteld:

*Voor cementgebonden funderingsmaterialen waarin het principe van binding op hydrauliteit berust, geldt net als voor de bitumineus gebonden materialen de maximale rek onder in de fundering als indicator voor het ontstaan van scheurvorming. Een gebonden fundering is zelfs kort na aanleg niet homogeen maar al gescheurd. Kort na aanleg ontstaan krimpscheuren in de dwarsrichting. Door verkeersinvloeden ontstaan met de tijd langsscheuren. Om er voor te zorgen dat de verharding door het ontstaan van krimpscheuren niet te snel doorscheurt, gaat OIA er van uit dat bij een gebonden fundering de rek onder in de fundering onder de (waarschijnlijk slechts eenmalig voorkomende) zwaarste aslast niet groter mag zijn dan de toelaatbare rek. Deze toelaatbare rek is gedefinieerd als de breukrek die slechts in vijf procent van de gevallen wordt onderschreden.*

*De langsscheuren die door verkeersinvloeden ontstaan worden ‘gecontroleerd’ door de vermoeiingsrek onder in de gebonden fundering.*

*In het achtergrondrapport met formularia van OIA is aangegeven welke typen vermoeiingslijnen in OIA worden gebruikt. Met behulp van het ontwerp criterium van de vermoeiing onderin de gebonden fundering wordt beoogd dat de constructie voldoende weerstand heeft tegen het doorscheuren van de gebonden fundering onder verkeersinvloeden. OIA berekent de maximale rek onder in de fundering via de traditionele toepassing van een meerlagenmodel. Deze situatie geeft de ongescheurde toestand weer. In de praktijk zullen door passages van (zware) aslasten langsscheurvorming optreden waardoor de rekken onder de verkeersbelasting groter zullen zijn dan in de aanvangssituatie, toen de funderingslaag nog homogeen en ongescheurd was. Voor OIA zijn geen modellen ontwikkeld die het effect van het ontstaan van de scheuren verdisconteren. In de software is de klassieke aanpak van*

*de rek in beginsituatie gehanteerd. Via het gebruik van partiële factoren wordt veiligheid in het ontwerp gebracht en wordt een correctiefactor over de ontwerpvermoeiingssterkte gezet.*

In het kort komt het erop neer dat bij het ontwerp van een verharding een gebonden fundering getoetst kan worden op:

- vermoeiing onder invloed van herhaalde belasting
- breuk onder invloed van een incidentele zeer zware belasting

Het is echter de vraag of deze toetsingscriteria voldoende zijn voor het ontwerp van verhardingen met de grote diversiteit aan typen gebonden funderingsmateriaal.

In deze paper worden de resultaten van de karakterisering conform het voorstel in [1] van een immobilisaat gepresenteerd en wordt ingegaan op de wijze waarop dit type fundering zou moeten worden getoetst op basis van de gemeten eigenschappen.

Naast eisen aan het ontwerp van een verharding met een gebonden fundering worden er ook eigen gesteld aan de wijze waarop ongewenste scheurvorming in de fundering moet worden beheerst.

De Specificaties Ontwerp Asfaltverhardingen' (SOA) van Rijkswaterstaat, bijvoorbeeld, stelt hierover:

*Met name voor asfaltgranulaatcement geldt dat het materiaal gevoelig is voor plaatwerking en scheurvorming. Om deze redenen mogen deze materialen niet worden toegepast op een slappe ondergrond (berekende restzettingsverschillen na 10.000 dagen van meer dan 5 cm over 25 m. Daarnaast moeten deze funderingen altijd worden ontspannen of worden voorzien van een scheurremmende tussenlaag (SAMI) bestaande uit polymeergemodificeerde bitumen in een hoeveelheid van ten minste 3,0 kg/m<sup>2</sup>.*

Er is vanuit het verleden nog sprake van het kerven van gebonden funderingen om reflectiescheuren vanuit de fundering te voorkomen. Er is echter een principieel verschil tussen kerven en ontspannen, namelijk:

- bij kerven is zeker dat er scheurvorming in de fundering en het asfalt op zal treden, echter het moment waarop de scheuren het oppervlak van de verharding hebben bereikt is onbekend en afhankelijk van de scheurremmende eigenschappen van het asfalt
- bij ontspannen wordt beoogd om de eerste spanningen in de fundering als gevolg van krimp door de cementbinding weg te nemen (ontspannen) middels het creëren van haarscheuren. Het moment van ontspannen moet echter zodanig zijn dat de fundering na ontspannen nog wel de beoogde sterkteontwikkeling heeft. Het moment en de wijze van ontspannen zijn hiermee vrij kritisch.

Over de wijze waarop moet worden ontspannen zijn echter geen algemene richtlijnen beschikbaar. In deze paper wordt ook ingegaan op een procedure voor het ontspannen van gebonden funderingen die door Boskalis is ontwikkeld.

De ervaringen van de laatste decennia hebben geleerd dat het toepassen van gebonden funderingen van ontwerp tot oplevering oordeelkundig moet plaatsvinden. De meest voorkomende schadeoorzaken zijn:

- Verkeerde dimensionering, resulterend in onderdimensionering van de verharding

- Overbelasting van de fundering in de niet afgebouwde fase van de verharding
- Vervorming in de ondergrond, leidend tot opgelegde vervorming van een gebonden fundering
- Te hoge en/of ongelijkmatige stijfheidsmodulus van de fundering als gevolg van onjuiste mengselkeuze of onzorgvuldige realisatie.

Aan het eind van deze paper worden enkele aanbevelingen gedaan om de kwaliteit en prestaties van gebonden funderingen beter te beheersen.



*Schade door vervormingen ondergrond*



*Schade door overbelasting van de fundering in de uitvoeringsfase*

## **2. Functionele eigenschappen gebonden fundering**

In deze paragraaf worden de resultaten van de karakterisering van een immobilisaatfundering gepresenteerd. Het doel van deze paper is niet het bediscussiëren van de resultaten van de metingen van een gebonden fundering, maar het illustreren van beschikbare operationele proeven voor het karakteriseren van gebonden funderingen. Deze proeven zijn gebaseerd op de voorstellen die hiertoe in 2010 door Sluer en Jacobs zijn gedaan.

### **2.1 Druksterkte (RAW 2010)**

Proefstukken	<b>diameter: Ø 150mm hoogte: 150mm</b>
Beproevingstemperatuur	<b>20°C</b>
Snelheid	<b>0,1± 0,02MPa per seconde</b>

Proefstuknummer	Beproevingdatum	Productie datum	Ouderdom [dagen]	Dichtheid [kg/m <sup>3</sup> ]	Druksterkte [N/mm <sup>2</sup> ]
1	4/7/2015	3/24/2015	14	1912	0,9
2	4/7/2015	3/24/2015	14	1893	1,0
2	4/7/2015	3/24/2015	14	1887	0,6

4	4/7/2015	3/24/2015	14	1886	0,5
<b>Gemiddeld</b>				<b>1895</b>	<b>0,74</b>
5	4/14/2015	3/24/2015	21	1894	1,0
6	4/14/2015	3/24/2015	21	1894	0,7
7	4/14/2015	3/24/2015	21	1899	0,9
8	4/14/2015	3/24/2015	21	1878	1,0
<b>Gemiddeld</b>				<b>1891</b>	<b>0,89</b>
9	4/21/2015	3/24/2015	28	1894	0,9
10	4/21/2015	3/24/2015	28	1906	1,3
11	4/21/2015	3/24/2015	28	1908	1,5
12	4/21/2015	3/24/2015	28	1914	1,4
<b>Gemiddeld</b>				<b>1905</b>	<b>1,27</b>

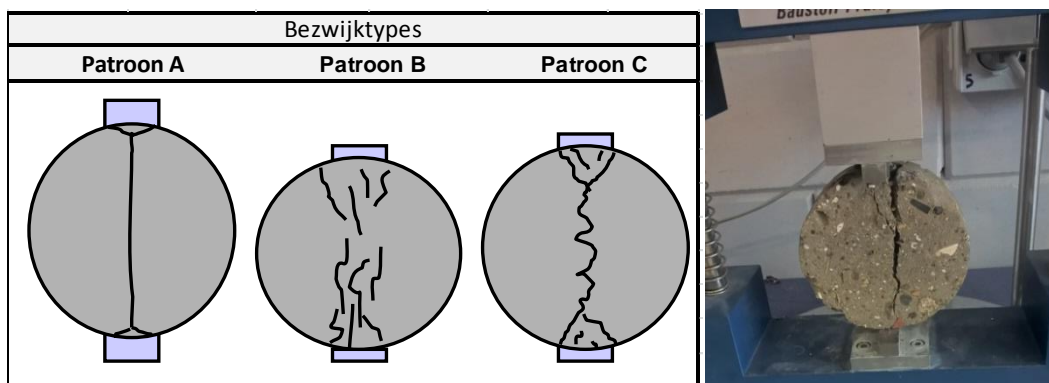


Voorbeeld proefstuk na uitvoeren drukproef

## 2.2 Spleetsterkte (NEN-EN 12697-23)

Proefstukken	<b>diameter: Ø 100mm hoogte: 50mm</b>
Beproevingstemperatuur	<b>15°C</b>
Snelheid	<b>50mm/min</b>

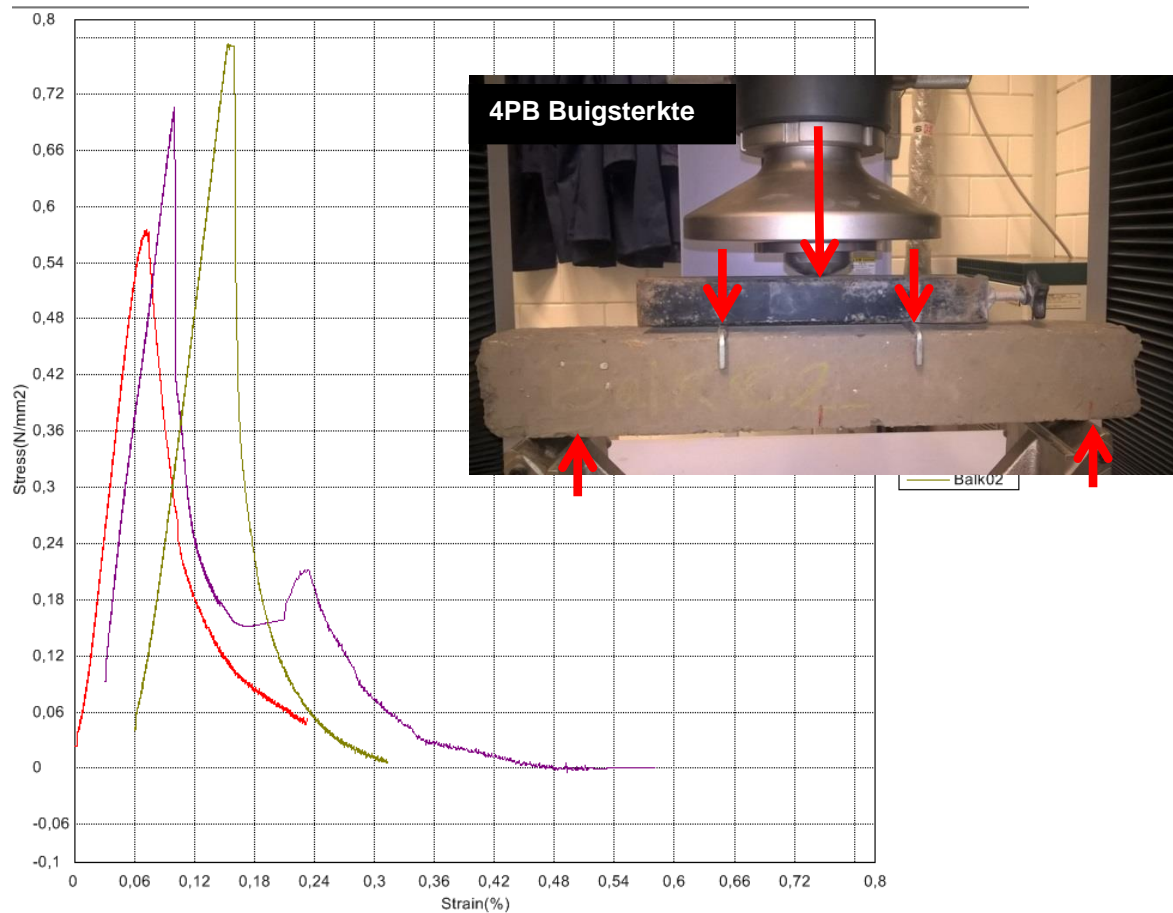
Proefstuk Code	Beproeving datum	Maximale kracht [N]	Spleetsterkte 15°C [MPa]	Bezwijktype A/B/C
W01	6/12/2015	7357	0,98	A
W02	6/12/2015	4471	0,59	A
W03	6/12/2015	6859	0,88	A
<b>Gemiddeld</b>		<b>6229</b>	<b>0,81</b>	



Bezwijktypen en voorbeeld proefstuk na uitvoeren spleetproef

### 2.3 Buigtreksterkte, 4 punts buigproef (proefvoorschrift Boskalis)

Proefstukken	<b>L = 450 mm &amp; B = H = 50 mm</b>
Beproevingstemperatuur	Kamer temperatuur (ca. 20°C)
Vorm axiale belasting	<b>Haversine</b>
Amplitude axiale kracht	<b>50 N</b>
Max. totale axiale kracht	<b>400 N</b>
Frequentie	<b>10 Hz (Strain control)</b>

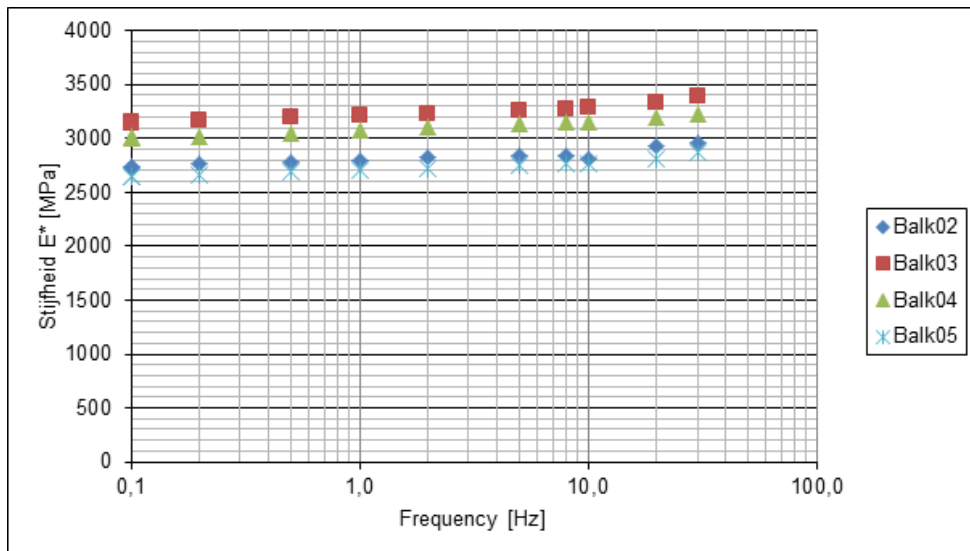


Name	Unit	Balk02	Balk04	Balk05	Gemiddelde
Max_Force	N	640,9	479,9	584,8	569
Buigtreksterkte	N/mm <sup>2</sup>	0,774	0,575	0,706	<b>0,69</b>
Max_Strain	µm/m	941	724	703	<b>789</b>

### 2.4 Stijfheid, 4 punts buigproef (NEN-EN 12697-26 Annex B)

Proefstukken	<b>L = 450 mm &amp; B = H = 50 mm</b>
Beproevingstemperatuur	<b>15°C</b>
Rekniveau	<b>50 µm/m</b>
Frequenties	<b>0.1; 0.2; 0.5; 1; 2; 5; 8; 10; 20; 30; en 0.1</b>

Code.	Uint.	0.1 Hz	0.2 Hz	0.5 Hz	1 Hz	2 Hz	5 Hz	8 Hz	10 Hz	20 Hz	30 Hz	0.1 Hz
Balk02	S [Mpa]	2764	2790	2816	2833	2852	2876	<b>2872</b>	2835	2961	2994	2764
	$\varphi$ [°]	2,0	1,7	1,5	1,5	1,4	1,4	1,6	2,0	1,4	1,4	1,6
Balk03_2	S [Mpa]	3256	3275	3301	3317	3337	3366	<b>3384</b>	3391	3438	3498	3240
	$\varphi$ [°]	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	2,0	1,9
Balk04	S [Mpa]	3047	3063	3096	3125	3152	3178	<b>3196</b>	3206	3245	3273	3065
	$\varphi$ [°]	2,0	1,9	1,9	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	2,0	2,1	1,8
Balk05	S [Mpa]	2668	2686	2712	2730	2748	2774	<b>2788</b>	2795	2829	2889	2674
	$\varphi$ [°]	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,8	2,0	1,8
Average	S [Mpa]	2934	2954	2981	3001	3022	3049	<b>3060</b>	3057	3118	3163	2936
	$\varphi$ [°]	1,9	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,8	1,7	1,9	1,8



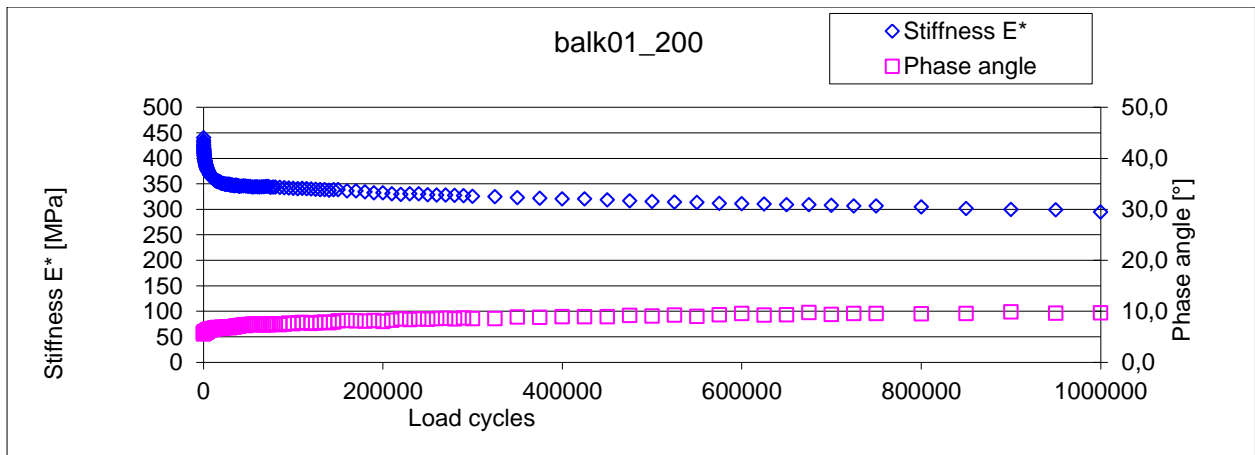
Resultaten 4PB stijfheidproef (frequency sweep)

## 2.5 Vermoeiing, 4 punts buigproef (NEN-EN 12697-24 Annex D)

proefstukken	<b>L = 450 mm &amp; B = H = 50 mm</b>
Beproevingstemperatuur	<b>15°C</b>
Frequentie	<b>30 Hz (Strain control)</b>

Code	Temp	Strain	E <sub>ini</sub>	E <sub>fat</sub>	N <sub>fat</sub>
	[°C]	[□m/m]	[MPa]	[MPa]	(@50%E <sub>ini</sub> ) [-]
balk01_200	20	203.7	440	220	>10 <sup>6</sup>
balk04_200	20	202.0	2861	1430	>10 <sup>6</sup>
balk05_200	20	202.6	2239	1119	>10 <sup>6</sup>





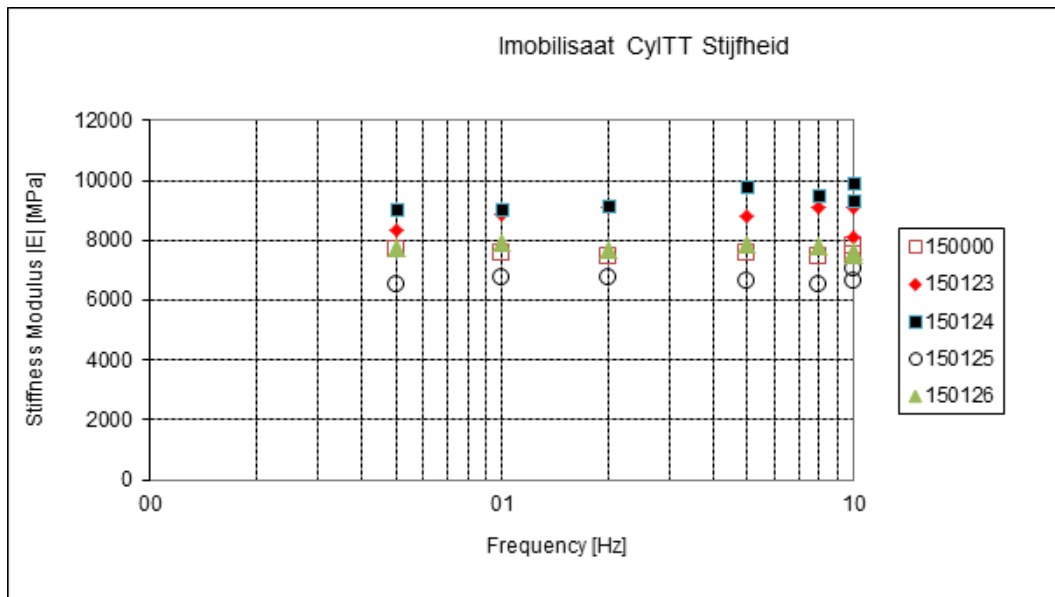
Voorbeeld resultaat vermoeiingsproef

## 2.6 Stijfheid; cyclische indirecte trekproef (NEN-EN 12697-26 Annex E)

proefstukken	<b>diameter: Ø 100mm hoogte: 40mm</b>
Beproevingstemperatuur	<b>15°C</b>
Min. axiale kracht	<b>50 N</b>
Max. totale axiale kracht	<b>400 N</b>
Frequenties	<b>10; 8; 5; 2; 1; 0.5 en 10 Hz</b>

Bij de resultaten van deze proef moet worden opgemerkt dat de stijfheid op een later tijdstip is bepaald dan de stijfheid in de vier punts buigproef.

Code	f [Hz]	$\sigma_u$ [MPa]	$\sigma_o$ [MPa]	$\sigma_{ampl}$ [MPa]	$\epsilon_{cl}$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	E  [MPa]
150000	8,0	0,011	0,059	0,024	9,99	8536
150123	8,0	0,010	0,067	0,029	9,93	10403
150124	8,0	0,008	0,064	0,028	9,26	10831
150125	8,0	0,010	0,065	0,028	13,60	7448
150126	8,0	0,009	0,065	0,028	11,31	8931
<b>Gem.</b>						<b>9230</b>

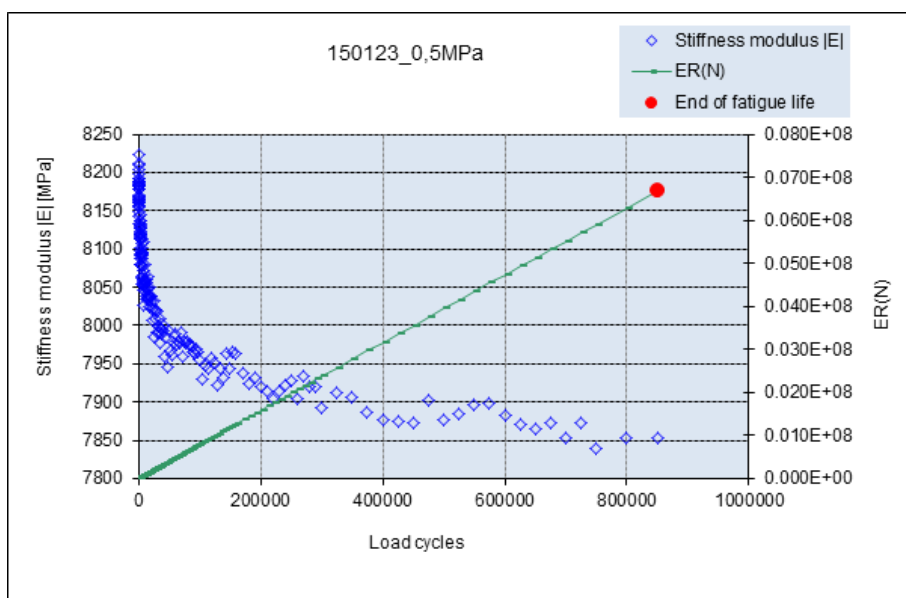


Resultaten cyclische ITT stijfheidsproef

## 2.7 Vermoeiing, cyclische indirecte trekproef (NEN-EN 12697-26 Annex C)

Proefstukken	<b>diameter: Ø 100mm hoogte: 40mm</b>
Beproevingstemperatuur	<b>15°C</b>
Min trekspanning	<b>0.01 MPa</b>
Max trekspanning	<b>0.1 MPa;</b>
Frequenties	<b>10 Hz</b>

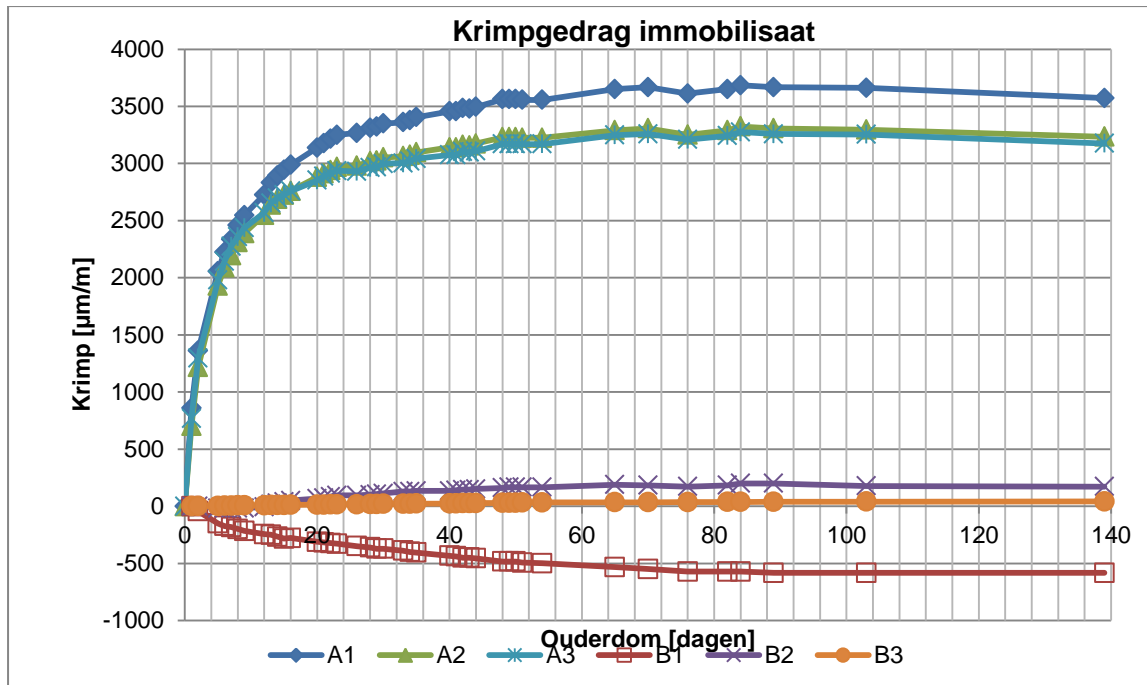
Specimen ID	$\sigma_u$ [MPa]	$\sigma_o$ [MPa]	$\epsilon_{el,ini}$ [‰]	$N_{macro}$ [-]
150123_0,5MPa	0,036	0,515	0,1107	850000



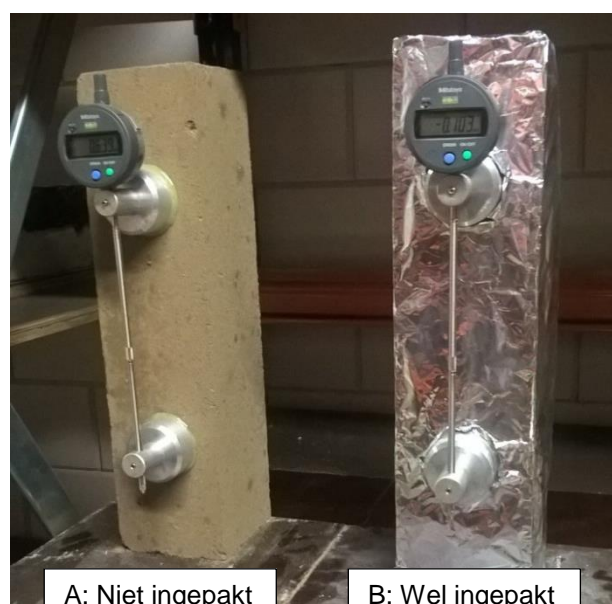
Voorbeeld resultaat cyclische ITT vermoeiingsproef

## 2.8 Krimpproef (proefvoorschrift TUDelft/Boskalis)

Beproevingstemperatuur	15°C
Proefstukken	L= 450 mm & B = H = 100 mm



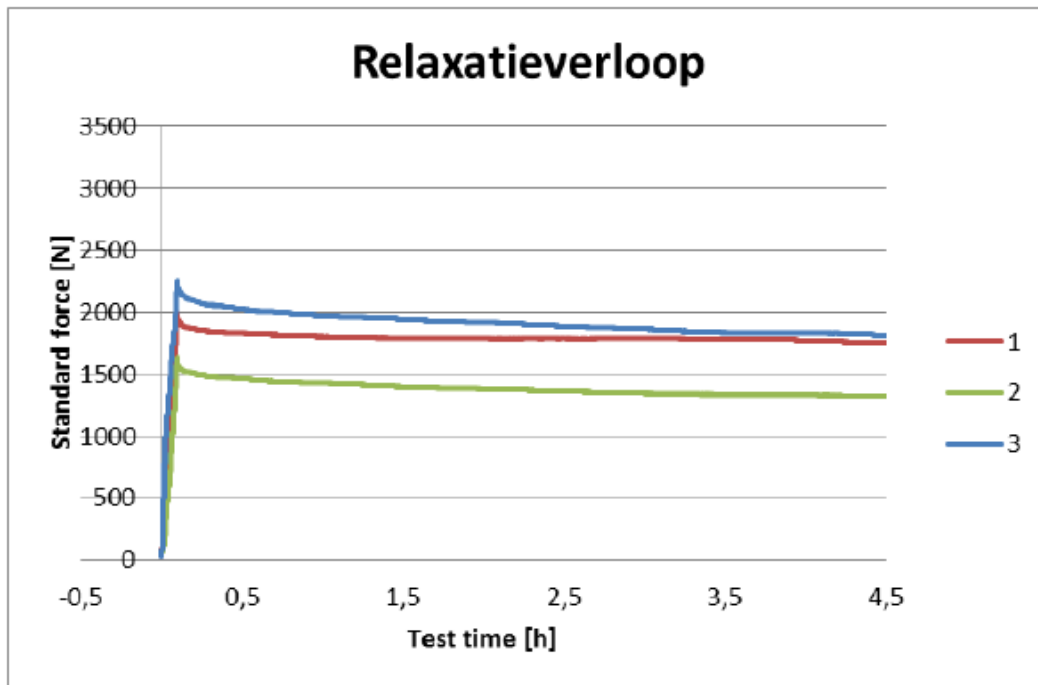
De proefstukken A2, A2 en A3 betreffen de meting van de uitdrogingskrimp (niet ingepakte proefstukken) en de proefstukken B1, B2 en B3 betreffen de meting van de verhardingskrimp (ingepakte proefstukken). Uit de resultaten van de krimpproef blijkt dat er bij proefstuk B1 sprake is van zwel. Dit is vermoedelijk het gevolg van de aanwezigheid van een incidenteel aanwezige zwelgevoelige component in de samenstelling van het granulair materiaal.



Uitvoering krimpproef

## 2.9 Spanningsrelaxatieproef (proefvoorschrift TNO, gebaseerd op NEN-EN 12697-46)

Proefstukken	L= 450 mm & B = H = 100 mm
Beproevingstemperatuur	20°C
Belasting	Verplaatsinggestuurd



Resultaat spanningsrelaxatieproeven

Proefstuk	Relaxatie - F <sub>4,5</sub> tov Fini (%)	Belastingsniveau - Fini tov F <sub>max</sub> (%)
1	88	46
2	81	80
3	80	77

Uit de resultaten van de relaxatieproeven blijkt dat er circa 20% van een opgelegde spanning in de eerste uren weg relaxeert. Dit is minder dan verwacht, hetgeen betekent dat in geval van bijvoorbeeld opgelegde vervormingen door bewegingen in de ondergrond de combinatie van de optredende spanningen en verkeerslastspanningen tot scheurvorming kan leiden.

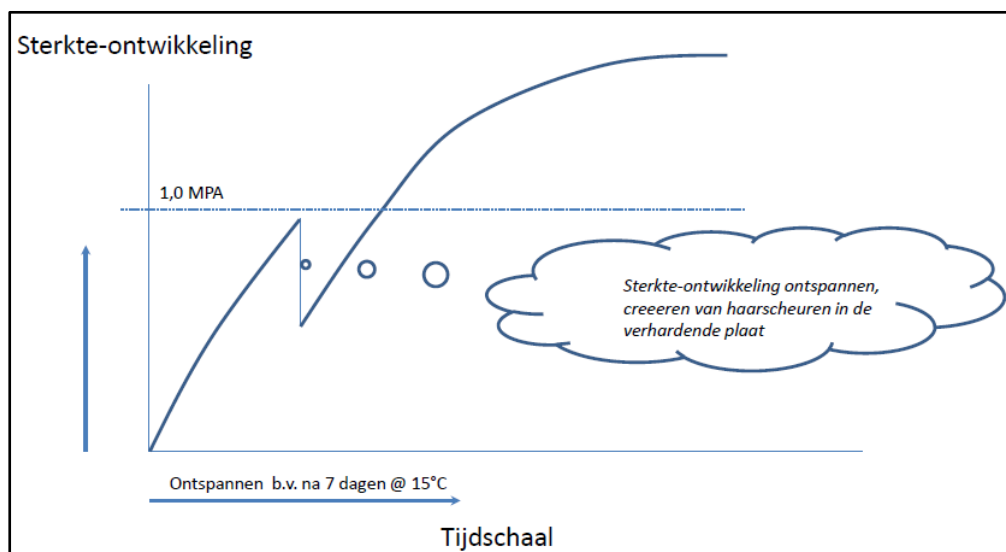
### 3. Ontspannen gebonden fundering

Om krimp-scheurvorming in een gebonden fundering te beperken, dan wel te voorkomen, moet de fundering worden ontspannen. Boskalis heeft hiervoor een procedure ontwikkeld, waarmee enerzijds het effect van ontspannen wordt aangetoond en anderzijds dat de sterkte van de fundering zich daarna verder ontwikkelt tot boven de gestelde eis.

Op basis van de ervaringen met deze procedure in meer dan vijf werken is vastgesteld dat een gebonden fundering het beste ontspannen kan worden als de druksterkte circa 0,7-1,0 MPa bedraagt (soms ook wel de ‘groene fase’ genoemd). Te vroeg ‘ontspannen’ resulteert aantoonbaar in slechts een extra verdichting van de fundering. Te laat ontspannen leidt tot het risico dat de fundering wordt stukgeslagen, waarna ook niet of nauwelijks verdere ontwikkeling van sterkte plaats vindt.

Voor het aantonen van het effect van ontspannen en het draagvermogen van een gerealiseerde gebonden fundering wordt gebruik gemaakt van valgewichtdeflectiemetingen. De belangrijkste aspecten van de procedure voor ontspannen zijn:

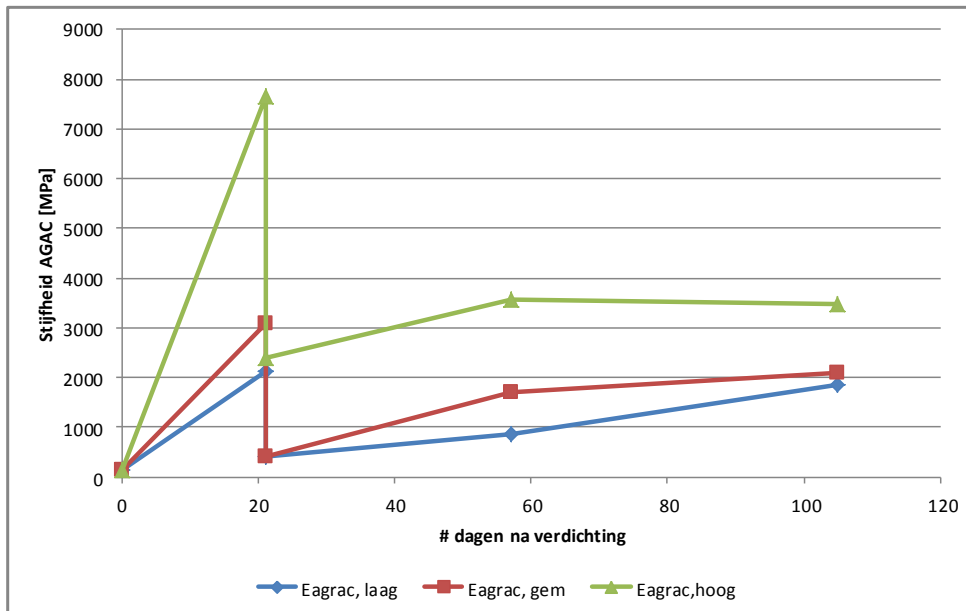
- De gebonden fundering door middel van een gespecificeerde trilrol ontspannen. Uitgaande van een druksterkte van de fundering van 0,7-1,0 MPa is de periode tussen verdichten en ontspannen afhankelijk van het jaargetijde (buitentemperatuur). Het moment van ontspannen wordt daarom per uitvoeringseenheid gespecificeerd.
- De trilrol voert één enkele walsovergang uit, waarbij dynamisch wordt getrild. Alle instellingen van de wals (frequentie en amplitude van trillen) worden gespecificeerd en de rijsnelheid van de wals wordt laag gehouden.
- Zo kort mogelijk na het ontspannen wordt minimaal 120 mm asfalt aangebracht en kan de verharding door middelzwaar (werk)verkeer worden bereiden. Bij veel zwaar werkverkeer wordt ten minste 160 mm asfalt op de fundering aangebracht.



*Principe verloop sterkte ontwikkeling van ontspannen fundering*

Bovenstaande figuur toont het principe van het verloop van de sterkte-ontwikkeling van een ontspannen gebonden fundering. Voor de beoordeling van het effect van het ontspannen onder specifieke omstandigheden wordt een proefvak uitgezet. Direct vóór ontspannen wordt in dit vak met het valgewicht het draagvermogen gemeten. Vervolgens wordt de fundering conform de procedure ontspannen. Direct na ontspannen wordt wederom met het valgewicht het draagvermogen van de fundering gemeten. Aan de hand van een speciaal daartoe ontwikkelde beoordelingsgrafiek wordt tijdens de metingen op basis van de resultaten van de gemeten centrumdeflectie vóór en na ontspannen het effect van het ontspannen beoordeeld.

Afhankelijk van de bevindingen op basis van concrete kwantitatieve criteria wordt eventueel het aantal walsgangen of de instelling van de wals aangepast of wordt besloten op een later tijdstip te ontspannen. Onderstaande figuur toont het resultaat van de toepassing van deze procedure in een recent uitgevoerd werk.



*Voorbeeld resultaat aantonen kwaliteit gebonden fundering*

In de bovenstaande grafiek zijn de resultaten opgenomen van de uitgevoerde procedure voor de beheersing van de kwaliteit van een fundering van asfaltgranulaatcement. Per meetvak wordt de gemiddelde kromme, de kromme met de hoogste deflecties en de kromme met de laagste deflecties beschouwd. Uit de grafiek blijkt dat er na 20 dagen is ontspannen, hetgeen conform de procedure is als de buitentemperatuur in de periode van aanleg circa 5-10°C is. De grafiek toont aan de hand van de terugval van de stijfheid duidelijk aan dat er ontspannen is. Vervolgens neemt de stijfheid van de fundering in de maanden daarna (nog steeds winterperiode) toe tot boven de ontwerpwaarde van 1200 MPa. De ervaring leert dat een ‘goede’ fundering van asfaltgranulaatcement na een jaar stijfheden vertoont van circa 2500-5000 MPa.

#### **4. Conclusies en aanbevelingen**

Uit de resultaten van het gerapporteerde onderzoek blijkt dat de functionele eigenschappen van een cementgebonden fundering conform de aanbevelingen van Jacobs en Sluer [1] praktisch goed te bepalen zijn. Dit is voor de juiste dimensionering van verhardingen met een gebonden fundering ook noodzakelijk vanwege het uiteenlopende mechanisch gedrag van dit type funderingen. Met de gepresenteerde onderzoeken kan nu invulling worden gegeven aan de ontwerpparameters voor gebonden funderingen voor het ontwerpprogramma OIA .

Hoewel het doel van deze paper niet is geweest om de resultaten van het onderzoek inhoudelijk te behandelen, zijn de resultaten op enkele punten toch opmerkelijk te noemen en in ieder geval volkomen buiten de verwachtingen voor dit type materiaal. Ten eerste blijkt uit het vermoeiingsonderzoek dat bij een rek van 400  $\mu\text{m}/\text{m}$  (!) er nog meer dan een miljoen lastherhalingen worden gemeten. Dat betekent dat voor het beproefde immobilisaat bij dimensionering niet op het vermoeiingscriterium behoeft te worden getoetst. Dit wordt bevestigd door een breukrek voor dit materiaal van 768  $\mu\text{m}/\text{m}$  (!). Daar staat dan weer tegenover dat de breuksterkte slechts 0,69 MPa bedraagt. Dit betekent dat het in OIA ook mogelijk moet worden gemaakt om naast de breukrek ook de breuksterkte van gebonden funderingen te toetsen.

Uit het gepresenteerde onderzoek blijkt dat het ook goed mogelijk is om middels de cyclische indirecte trekproef (CY-ITT) de stijfheid en vermoeiing van een gebonden fundering te bepalen op basis van onderzoek aan kernen. Door nu bij het typeonderzoek van het betreffende funderingsmateriaal de stijfheid en vermoeiing middels de CY-ITT te bepalen, is er een referentie beschikbaar voor de functionele beoordeling van de in het werk gerealiseerde eigenschappen.

Voor een gebonden fundering is het zeer goed mogelijk aan te tonen of er effectief is ontspannen en of de ontspannen fundering uiteindelijk ook het vereiste draagvermogen levert. Dit kan middels de beschreven procedure voor ontspannen op basis van gebruik van valgewichtdeflectiemetingen. Belangrijk hierbij zijn de instelling van de trilwals voor het ontspannen en het moment van ontspannen. Ervan uitgaande dat het beste ontspannen kan worden als de fundering een druksterkte van 0,7-1,0 MPa heeft bereikt, moet er rekening mee worden gehouden dat de periode tussen aanleg en ontspannen (sterk) afhankelijk is van het jaargetijde waarin de fundering is aangelegd.

Op basis van het jarenlange onderzoek dat is uitgevoerd en de ervaringen met de prestaties van gebonden funderingen wordt aanbevolen om bij de keuze voor het type fundering in ieder geval met de volgende punten rekening te houden:

- pas geen gebonden fundering toe als deze moet gaan dienen als zwaarbelaste transportroute in de uitvoeringsfase van een werk
- pas geen gebonden fundering toe indien de benodigde periode voor sterkteontwikkeling van de gebonden fundering tussen aanleg en ontspannen niet in de projectplanning past
- het dimensioneren van verhardingen met een gebonden fundering is kritisch. Pas hierbij de juiste materiaalspecifieke ontwerpparameters en – criteria toe.

## **5. Geraadpleegde bronnen**

1. Jacobs, M., Sluer, B.; Voorstel typeonderzoek gebonden funderingsmaterialen, CROW-Infradagen 2010, Ede