

---

# Geopolymeerbeton voor infrastructurele toepassingen (3)

---

## Constructief gedrag van voorgespannen geopolymeerbetonliggers

*Het constructieve gedrag van gewapende liggers van alkalisch geactiveerd beton (ook wel geopolymeerbeton of GPB genoemd) kreeg de afgelopen jaren steeds meer interesse vanuit de onderzoekswereld. Maar slechts enkele onderzoeken gingen over voorgespannen GPB [2,3].*

*Het langetermijngedrag van voorgespannen GPB-liggers is nog onbekend.*

**In 2020 zijn TU Delft, Universiteit Gent en Haitsma Beton een door provincie Fryslân gefinancierd onderzoek gestart naar het toepassen van GPB in bruggen.** Dit onderzoekproject was gericht op het opschalen van GPB voor een (mogelijke) toepassing in een brug voor verkeerswegen, bestaande uit prefab voorgespannen GPB-liggers en een in het werk gestort GPB-brugdek.

Voor de voorgespannen ligger werd een zelfverdichtend geopolymeerbetonmengsel ontwikkeld op basis van hoogovenslak, geactiveerd door een alkalische oplossing op natriumbasis. Dit werd samen met het testen van het mechanische gedrag, de volumestabiliteit (o.a. krimp en kruip) en de duurzaamheidseigenschappen uitge-

voerd in fase I van het project [4]. De haalbaarheid voor industriële, grootschalige productie werd in fase II beoordeeld [5]. In fase III zijn proeven op ware grootte uitgevoerd om het constructieve gedrag van deze GPB-brugliggers te verkennen. In dit artikel wordt ingegaan op het constructieve korte- en langetermijngedrag.

### Vorbereiding

Voor het onderzoek zijn prefab voorgespannen liggers van zelfverdichtend GPB (C45/55) met een totale lengte van 7350 mm geproduceerd (fig. 1a). De liggers zijn ontworpen op basis van elastische berekeningen waarbij de toegestane betonspanning is begrensd. Voor de berekeningen zijn de materiaaleigenschappen gebruikt zoals beproefd in fase I

auteurs



**ZHENXU QIAN**

TU Delft,  
fac. CITG, Sectie  
Betonconstructies



**HENDRIK HERDER**

Haitsma Beton



**DR. MLADENA  
LUKOVIĆ**

TU Delft,  
fac. CITG, Sectie  
Betonconstructies



**DR. IR. SHIZHE  
ZHANG**

TU Delft,  
sectie Materialen en  
Milieu, Microlab



**PROF. DR. IR. STIJN  
MATTHYS**

Universiteit Gent



**IR. AREND  
SCHARRINGA**

Provincie Fryslân



**PROF. DR. GUANG YE**

TU Delft,  
sectie Materialen en  
Milieu, Microlab

van het project [4]. Gedetailleerde berekeningen zijn te vinden in [6].

31 dagen na het storten van de liggers is een druklaag in het werk gestort (fig. 1b), met een GPB met sterkteklasse C30/37.

Er zijn proeven uitgevoerd op samengestelde liggers om het kortetermijngedrag (proeven na circa één maand) en het lange-termijngedrag (proeven na circa negen maanden) te onderzoeken. Vijf samengestelde liggers op ware grootte zijn getest:

- één ligger na één maand onder buiging (STF)
- twee liggers na één maand onder afschuiving (STS\_1 en STS\_2)
- twee liggers na negen maanden onder buiging (LTF), waarbij er één aanhoudend belast werd alvorens te beproeven tot falen (LTF\_LS)

Het experimentele programma, met buigproeven en afschuifproeven, is samengevat in tabel 1. Alle liggers die na één maand werden beproefd, zijn nabehandeld door ze in vochtige jute lappen en plastic folie te wikkelen. De na negen maanden beproefde liggers zijn gedurende drie dagen afgedicht met plastic folie en daarna blootgesteld aan laboratoriumomstandigheden (gemiddelde temperatuur van 19 °C en relatieve luchtvochtigheid van 50%).

## Proefopstelling

De buigproeven en de proeven met aanhoudende belasting zijn uitgevoerd onder vierpunts buiging (foto 2 en 3, fig. 4). Om de scheurontwikkeling te monitoren is *Digital*

*Image Correlation (DIC)* toegepast, specifiek in de zone waar de proefstukken een constant buigend moment hadden, op het ondervlak en het zijvlak (fig. 4). Om de doorbuiging in het midden van de overspanning te meten, zijn er lineair variabele differentiaaltransformatoren (LVDT's) geplaatst aan de onderkant van de proefstukken.

Alle proeven zijn krachtsgestuurd opgestart. Zodra de proefstukken non-lineaire vervormingen vertoonden, werd de aansturing verplaatsingsgestuurd.

Afschuifproeven (STS) zijn uitgevoerd in een driepunts buigconfiguratie (foto 5). Net als bij de buigproeven werd het scheurgedrag gemonitord door DIC (nabij de oplegging) en werd een LVDT gebruikt om de doorbuiging te meten (fig. 6).

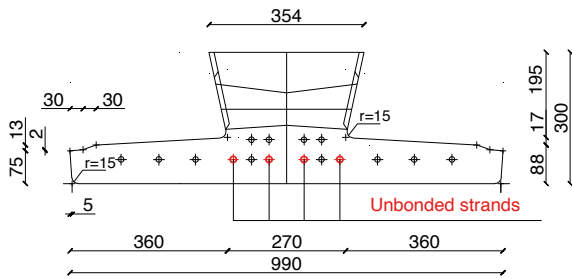
## Testresultaten buiging

**Tijdsafhankelijke vervorming bij permanente belasting** De druklaag voor LTF en LTF\_LS, werd gestort nadat de prefab liggers op de opleggingen waren geplaatst. Hierdoor kon de vervorming al vanaf drie dagen na het storten worden gemeten.

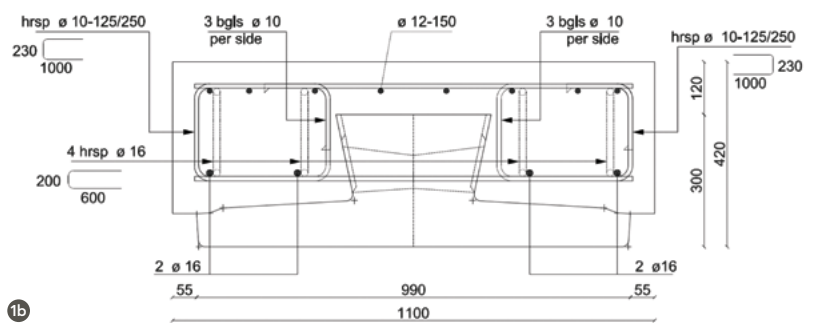
LTF werd alleen aan zijn eigen gewicht blootgesteld. LTF\_LS werd in twee fasen blootgesteld aan een aanhoudende belasting, bovenop zijn eigen gewicht: eerst werden na 28 dagen twee puntlasten van 70 kN (Q in fig. 3) gedurende 158 dagen aangebracht (65% van scheurbelasting), die vervolgens gedurende 76 dagen werden verhoogd tot 130 kN (bruikbaarheidsbelastingsniveau volgens belastingsmodel 1 [7]). →

**Tabel 1** Experimenteel programma

Proefstuk-categorie	Beproevingsmethode	Testouderdom	Proefstukvoorbereiding	
			Nabehandelingmethode	Belasting
STF	Buigproef	28 dagen	Vochtig na behandeld tot beproeving	Eigen gewicht
	Opnieuw beproefd onder buiging (STF_R2)	240 dagen	Blootgesteld aan laboratoriumomstandigheden na 1e testronde	
STS_1	Afschuifproef	30 dagen	Vochtig na behandeld tot beproeving	Eigen gewicht
STS_2		32 dagen		
LTF	Buigproef	267 dagen	Vochtige nabehandeling eerste 3 dagen, vervolgens blootgesteld aan droge laboratoriumomstandigheden	Eigen gewicht
LTF_LS	Aanhoudende belastingproef	262 dagen		
	Buigproef	274 dagen		



1a



1b



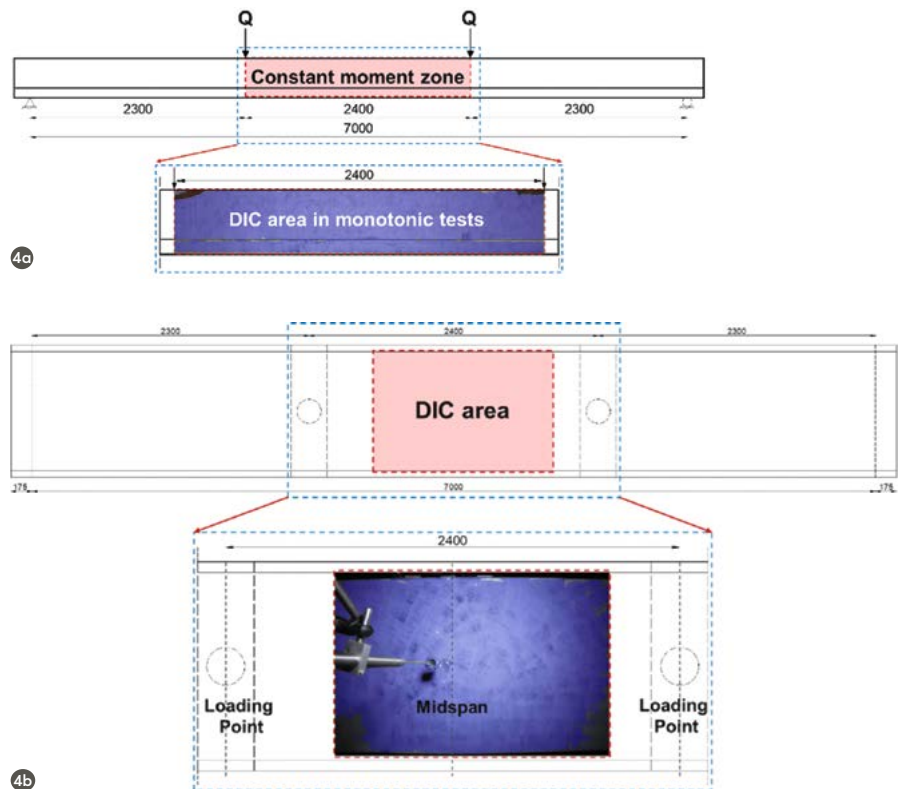
2



3

## SERIE ARTIKELEN

Dit is het derde deel van een serie artikelen over een onderzoek naar de toepassing van geopolymeerbeton in de infrastructuur. Het eerste artikel ging in op de ontwikkeling van een betonmengsel (fase I van het onderzoek), het tweede artikel over de mogelijkheden voor productie op industriële schaal. Dit derde deel gaat in op de constructieve eigenschappen van de liggers.

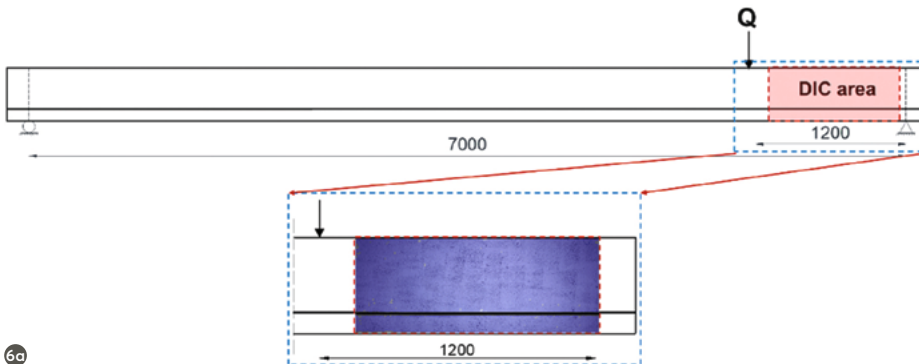


4a

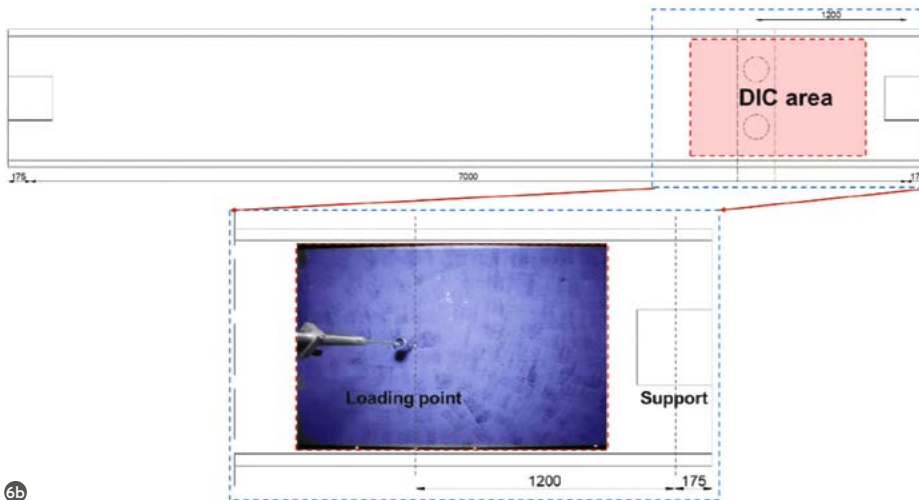
4b



*Proeven na negen maanden zijn aanzienlijk minder stijf dan de kortetermijnproeven*



6a

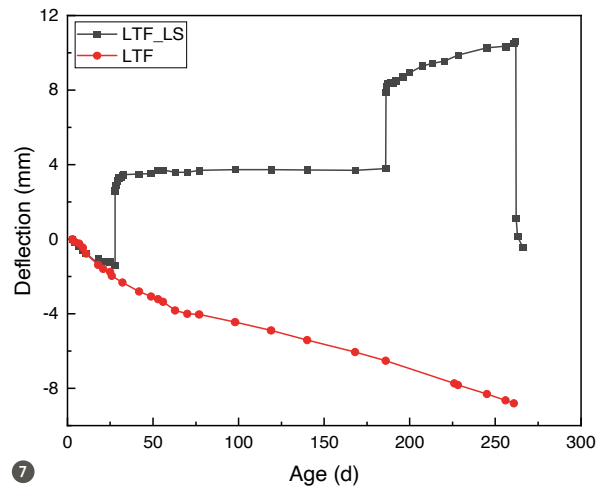


6b

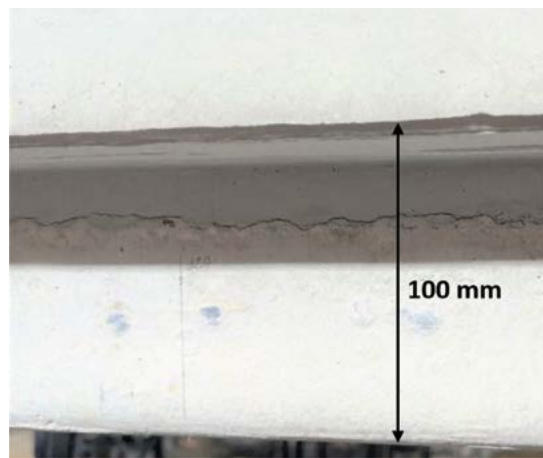
De doorbuigingen van LTF en LTF\_LS zijn weergegeven in figuur 7. Relatief hogere drukspanning aan de onderkant van de ligger in vergelijking met de bovenkant, gecombineerd met kruipeffecten, resulteerde in continue opbolling voor LTF. Overigens

werd continue opbolling na zelfs 5 jaar waargenomen bij voorgespannen (monolithische) liggers van traditioneel beton [8]. De doorbuiging van LTF\_LS bereikte een plateau kort na het toepassen van 70 kN, en was daarna vrijwel constant. Er werden →

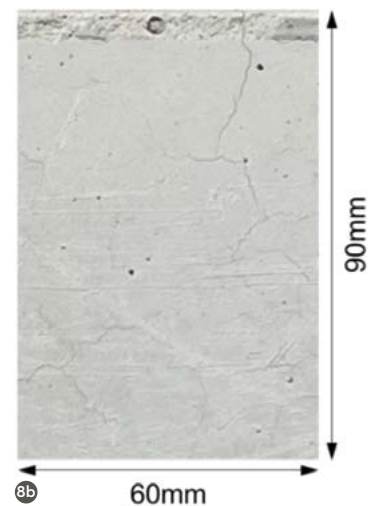
*De proefstukken getest na één maand en na negen maanden lieten verschillende faalmechanismes zien*



7



8a



8b

geen buigingsscheuren waargenomen aan de onderkant van LTF\_LS. Na 186 dagen, toen de belasting werd verhoogd tot 130 kN, nam de vervorming direct toe (elastische vervorming) en bleef daarna toenemen. Tenslotte werd LTF\_LS ontlast en trad herstel op van de doorbuiging.

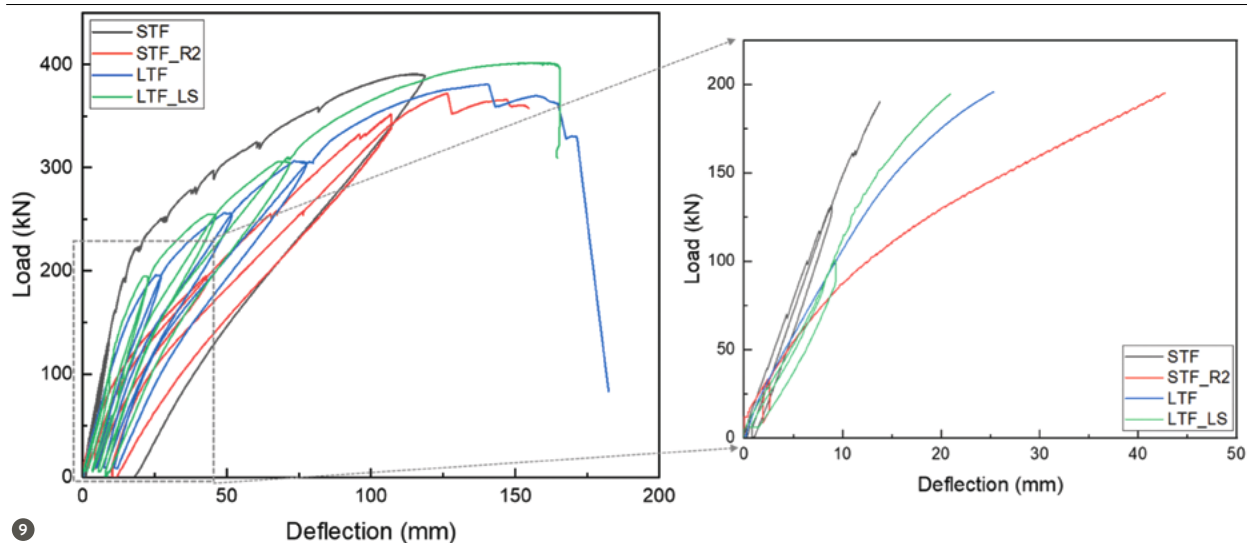
De resterende doorbuiging na het ontlasten wijst op een lichte vermindering van de stijfheid. Een horizontale scheur tussen de prefab liggers en de druklaag voor zowel LTF als LTF\_LS werd waargenomen (fig. 8a), die begon vanaf de rand van de proefstukken. Er zijn ook scheuren aangetroffen in de druklaag van beide proefstukken (fig. 8b).

Delaminatie en scheurvorming zijn waarschijnlijk het gevolg van het krimpverschil tussen de prefab en de druklaag. Het optreden van uitdrogingsscheuren (en dela-

minatie) kan te wijten zijn aan onvoldoende nabehandeling. Verder werden tijdens de tweede belastingsfase (130 kN) kleine scheuren waargenomen aan de onderkant van LTF\_LS in de zone met een constant buigend moment. Het gescheurde/gedelamineerde deel leidde tot een afname van de buigstijfheid en een toename van de doorbuiging.

#### Korte- en langetermijngedrag bij buiging

Zoals gezegd werden de liggers na één respectievelijk negen maanden onderworpen aan de buigproeven met belastings-/ontlastingscycli. Figuur 9 toont de relatie tussen belasting en doorbuiging. Gezien het aanzienlijke niet-lineaire gedrag op belasting/ontlasting cycli van 190 kN, lag de focus bij de vergelijking van de doorbuigingsrelatie



en het scheurgedrag van de drie liggers vóór de belastingcycli van 190 kN.

De proeven na negen maanden zijn aanzienlijk minder stijf. Dit wordt toegeschreven aan de afname van de elasticiteitsmodulus na verloop van tijd [4]. Scheuren door krimp en carbonatatie kunnen ook bijdragen aan de afname [9]. De belastingsniveaus bij het bereiken van de elastische naar niet-elastische fase lagen respectievelijk rond 130 kN, 150 kN en 190 kN voor de proefstukken LTF, LTF\_LS en STF. Een vermindering van de buigstijfheid werd ook waargenomen als gevolg van de ontwikkeling van buigscheuren.

Scheuren werden eerst waargenomen in het ondervlak van de prefab liggers (fig. 10). In STF ontstond een kleine scheur bij het belastingsniveau van 90 kN, wat aanzienlijk vroeger is dan de waargenomen stijfheidsverandering (circa 190 kN). Bij 190 kN heeft deze scheur zich door de hele breedte van de ligger voortgezet. Dit kan de stijfheidsverandering hebben veroorzaakt.

LTF heeft een scheurmoment dat 44% lager ligt ten opzichte van STF. Dit zou door tijdsafhankelijke verliezen van voorspanning kunnen zijn veroorzaakt, door krimp en kruip binnen de eerste negen maanden (zie verderop). Hogere krimp van LTF komt mogelijk ook door de kortere nabehandeling in vergelijking met STF.

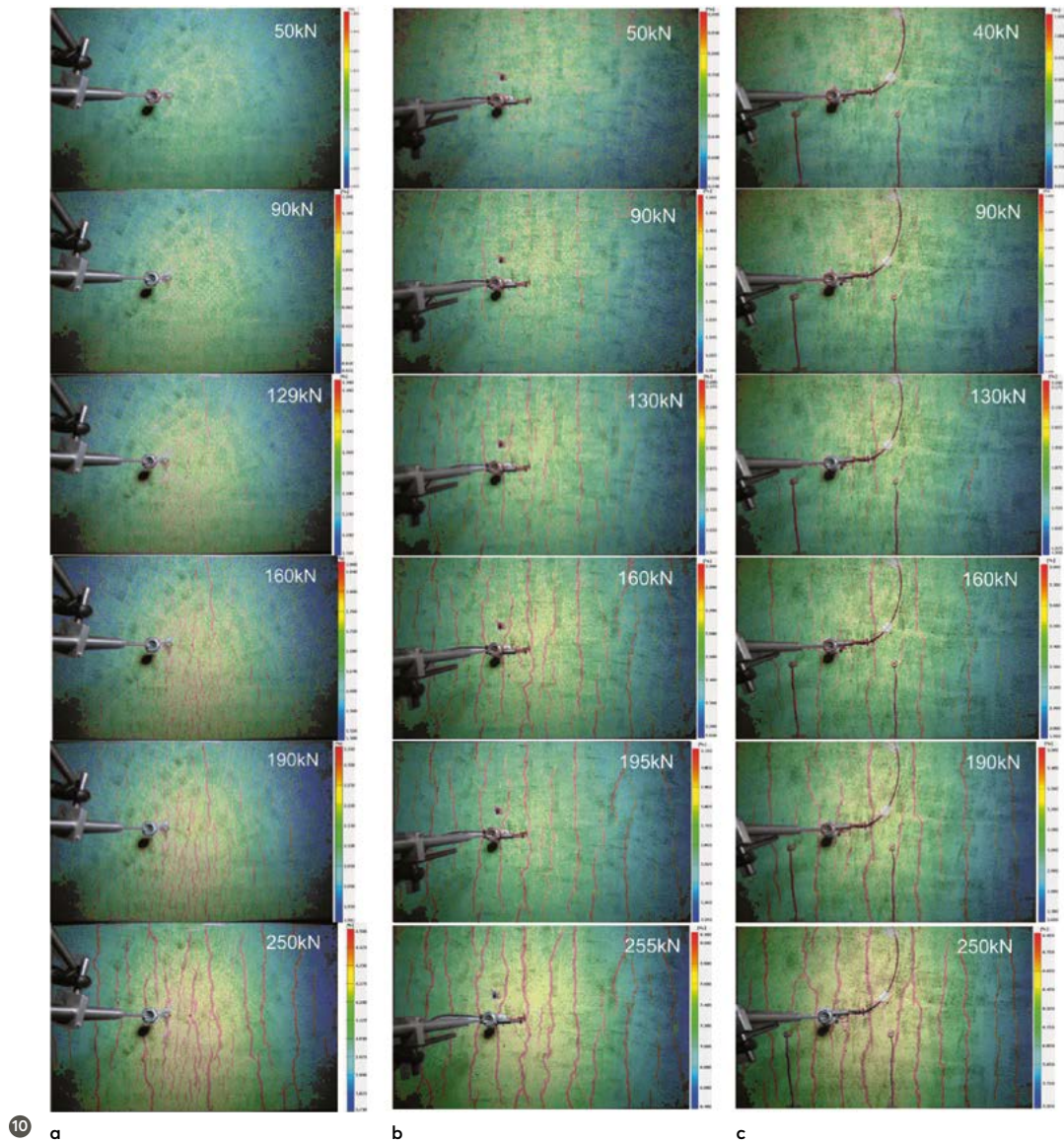
Het scheurmoment van LTF\_LS was 40 kN. De kleine scheuren waren waar-

schijnlijk al veroorzaakt door de aanhoudende belasting.

Anders dan bij STF, die slechts kleine scheuren vertoonde, lieten LTF en LTF\_LS al ernstige scheurvorming zien bij het berekende bruikbaarheidsbelastingsniveau van 130 kN. Meer scheuren, met een kleinere scheurwijdte en dichter bij elkaar, zijn waargenomen in STF in vergelijking met LTF en LTF\_LS.

Het scheurenpatroon in het zijvlak van de proefstukken is een combinatie van verticale buigscheuren en delaminatie tussen de prefab ligger en druklaag (fig. 11). In LTF ontstonden er scheuren bij 130 kN en in LTF\_LS bij 160 kN. Dit bevestigt de positieve invloed van de aanhoudende belasting in voorgespannen liggers, omdat het de drukspanning op het niveau van de voorspanstrengen reduceert en daarmee ook de kruipeffecten vermindert. Anders dan bij LTF en LTF\_LS, werd in STF scheurvorming voorafgegaan door buigingsscheuren in de druklaag bij 160 kN (fig. 11a). Op dit belastingsniveau ontwikkelden zich significante buigscheuren aan de onderkant van de prefab liggers LTF en LTF\_LS. In vergelijking met STF heeft LTF minder scheuren (17 vs. 14) met een grotere scheurafstand bij dezelfde belastingen.

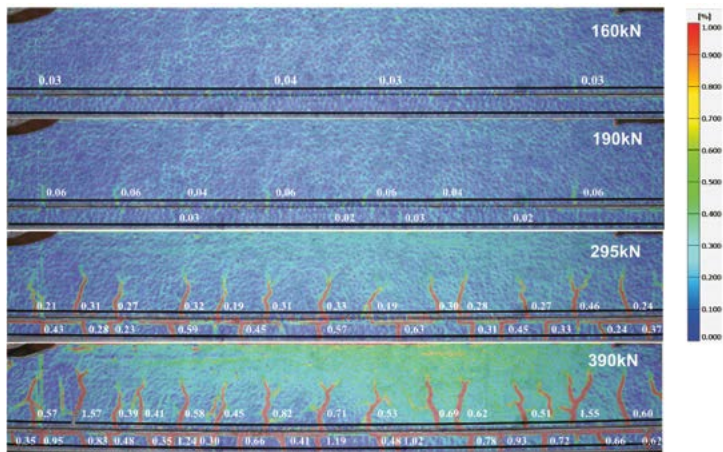
De toename van de scheurafstand in de langetermijnproeven kan erop duiden dat de aanhechtingssterkte tussen strengen en →



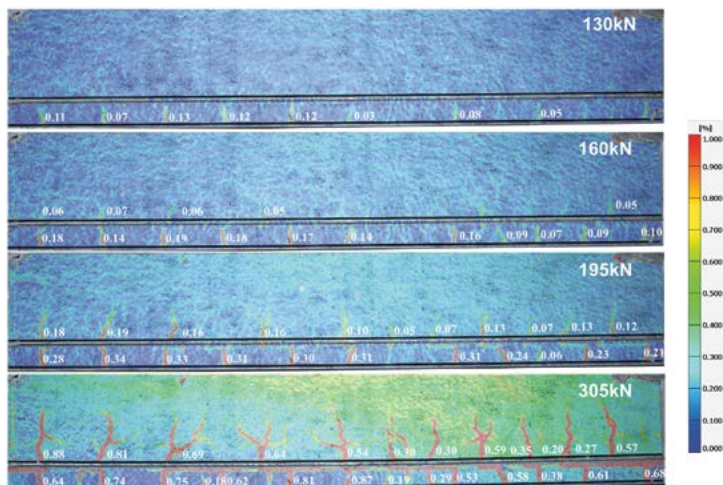
GPB in de loop der tijd vermindert. De aanhechtingssterkte is voornamelijk afhankelijk van het Hoyer-effect: na het lossnijden van de strengen verkorten deze axiaal, waardoor zij door de Poisson-ratio in diameter uitzetten en radiale spanningen op het beton ontwikkelen, wat de hechting versterkt. Dit verandert in de loop der tijd vanwege de tijdsafhankelijke eigenschappen van beton, zoals krimp en kruip [10]. Door de hogere kruipvervorming op langtermijn, had het GPB in proefstuk LTF de neiging om in de lengterichting meer samen te trekken en in de radiale richting uit te zetten, wat resulteerde in een lagere radiale spanning. De verminderde bijdrage van de Hoyer-effecten

door kruip en krimp veroorzaakte verder een vermindering van de aanhechtingssterkte. Aangezien de toepassing van een aanhoudende belasting resulteert in een lager spanningsniveau en dus lagere kruip-effecten in LTF\_LS in vergelijking met LTF, is de afname van de aanhechtingscapaciteit in LTF\_LS waarschijnlijk minder.

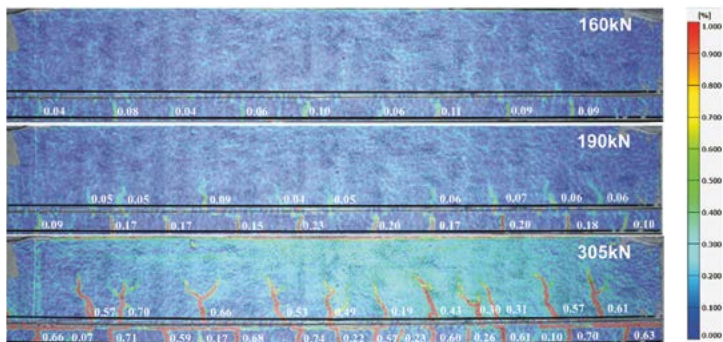
Figuur 12 geeft de relatie tussen scheurwijdte en belasting. Voor LTF en LTF\_LS zijn de scheurwijdtes tot 190 kN meegenomen, totdat ontlastingscycli werden toegepast. De scheurwijdte van 0,2 mm [11] in STF werd bereikt bij 220 kN. Dit is aanzienlijk hoger dan het berekende bruikbaarheidsbelastingsni-



11a STF – na 1 maand buigproef



11b LTF – na 9 maanden buigproef



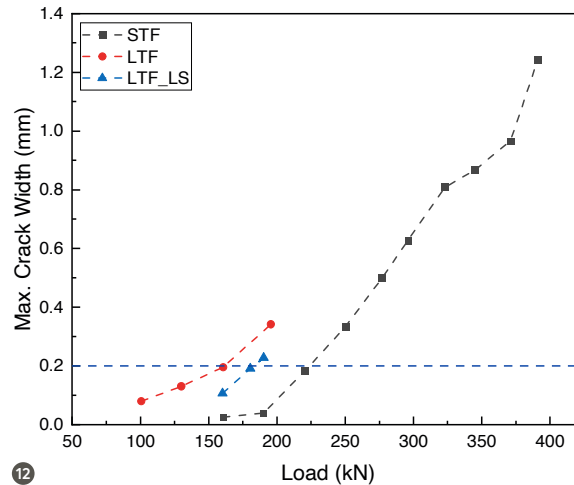
11c LTF\_LS – na 9 maanden buigproef

veau voor een enkele ligger (~130 kN). Daarentegen bereikte de maximumscheurwijdte van LTF en LTF\_LS de grenswaarde eerder, namelijk bij resp. 160 kN en 180 kN.

In de eindfase vertoonden de liggers verschillend faalgedrag. STF bereikte een maxi-

mum belasting van 391 kN, met de gemeten rek ter hoogte van de voorspanstrengen van 4,1 mm/m. Het begin van het vloeien van de strengen was verwacht bij circa 4 mm/m (de voorspanstreng bereikt 0,1% vloeibelasting bij circa 10 mm/m volgens het trekdiagram van de strengen, terwijl een voorrek van →

*De elasticiteitsmodulus van zelfverdichtend GPB vermindert in de loop der tijd*



12

circa 6 mm/m door de voorspanning was verwacht). Hoewel de voorspanstrengen het vloeien benaderde, bezweek het proefstuk niet omdat de maximale slag van de vijzel eerder werd bereikt. Om deze redenen werd het proefstuk opnieuw getest bij een ouderdom van 240 dagen (STF\_R2) samen met de langtermijn buigproeven.

Figuur 12a, 12b en 12c tonen de bezwijktoestanden van respectievelijk STF\_R2, LTF en LTF\_LS. In de LTF bezweek de verankering (slippen van de strengen) bij een belastingsniveau van 381 kN. Voor de opnieuw geteste STF\_R2 werd een vergelijkbaar gedrag waargenomen. Door het gecombineerde effect van de belastingscycli met hoge belastingsniveaus en vermindering van materiaaleigenschappen op de lange termijn (zie verderop), bezweek de opnieuw geteste ligger STF\_R2 op 372 kN zonder het belastingsniveau van de eerste test te halen. Daarentegen werd in LTF\_LS bij 402 kN betonstuik waargenomen (figuur 12c), als een aanduiding van bezwijking op buiging. Het slippen van de voorspanstrengen proefstuk LTF\_LS was minder significant als bij proefstuk LTF.

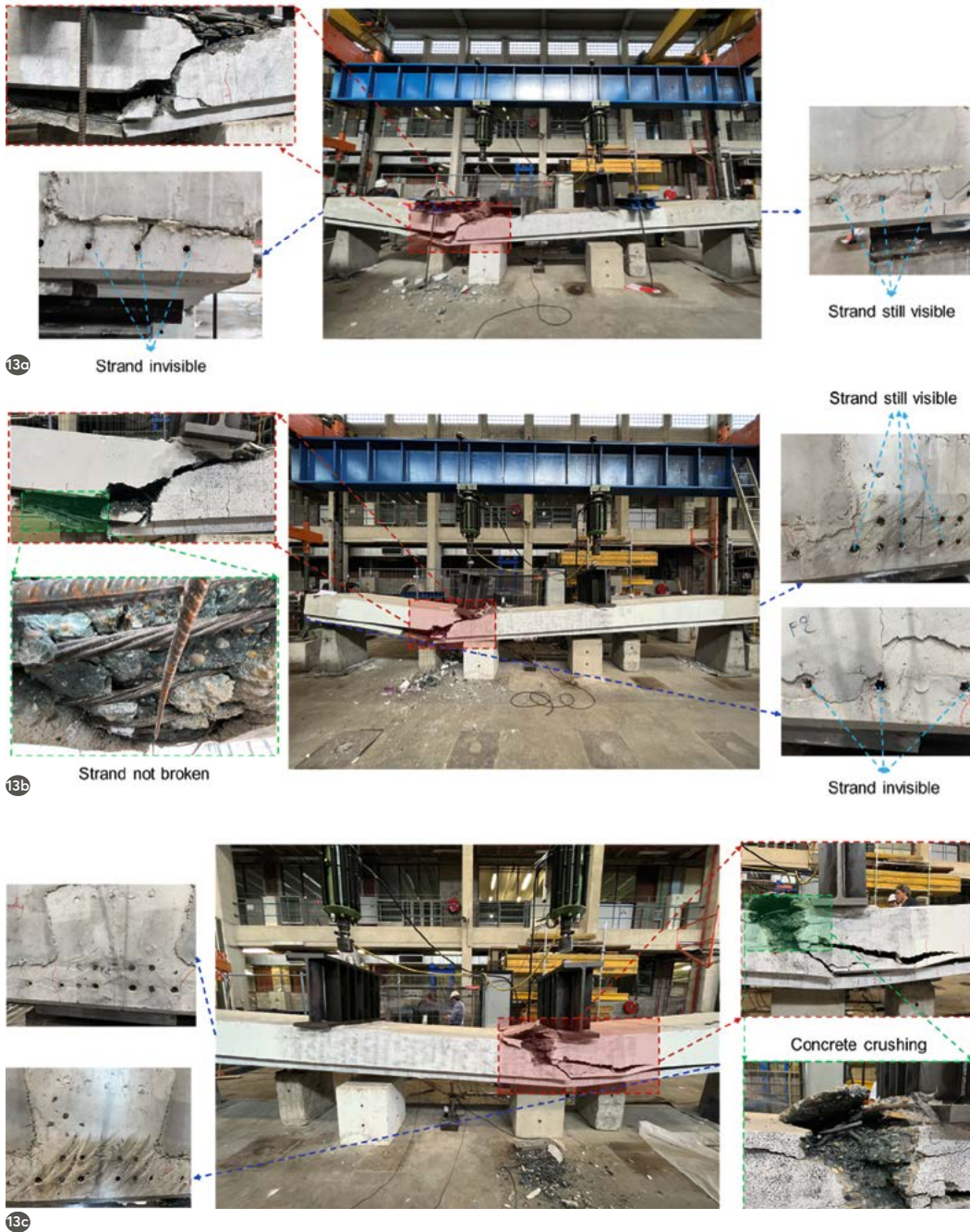
Voor alle proefstukken werd een aanzienlijke onthechting tussen prefab ligger en druklaag waargenomen. De verschillende bezwijktoestanden van de proefstukken kan worden toegeschreven aan de verschillende aanhechtingscapaciteiten tussen GPB en strengen op de lange termijn. Zoals hiervoor uitgelegd, kunnen kruipeffecten onder radiale druk een rol spelen in de aanhechtings-

capaciteit. Dit kan de vermindering van de aanhechting in de loop der tijd verklaren, zoals eerder uit het scheurpatroon is waargenomen.

Een lagere scheurbelasting en grotere scheurwijdtes in LTF en LTF\_LS vergeleken met STF kunnen voortkomen uit de vermindering van de elasticiteitsmodulus, zoals uit materiaalproeven naar voren is gekomen, en uit een toenemende rol van krimp en kruip in de loop der tijd. Daarnaast heeft de aanhoudende belastingproef een gunstige invloed, omdat dit de drukspanning ter hoogte van de voorspanstrengen kan verminderen. Daardoor wordt minder voorspanningsverlies verkregen en laat LTF\_LS betere constructieve prestaties zien in vergelijking met LTF. De evaluatie van de constructieve prestaties van GPB op basis van kortetermijnproeven, zoals meestal wordt gedaan met traditioneel beton, kan leiden tot onnauwkeurige voorspellingen over scheurgedrag, maar ook de maximale capaciteit die door de aanhechting tussen strengen en beton lijkt te worden aangetast. Het uitvoeren van proeven op het langetermijn-gedrag is belangrijk om een betrouwbaar constructief ontwerp met GPB mogelijk te maken.

### Testresultaten afschuifgedrag

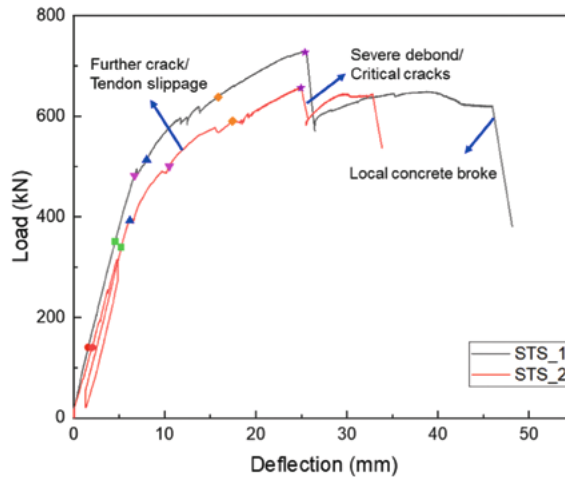
Figuur 14 geeft de belasting-doorbuigingskromme weer van twee afschuifproeven, inclusief de meetgegevens bij kenmerkende belastingsstappen, zoals bereiken scheur-



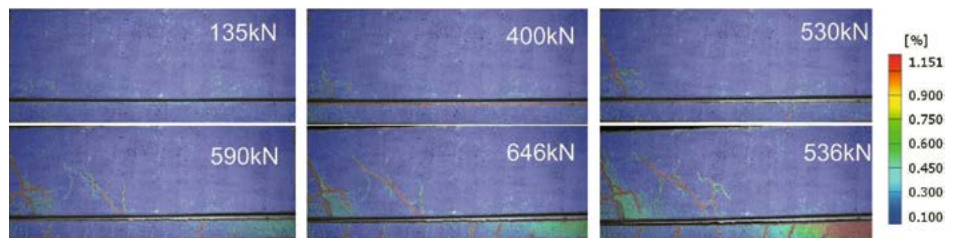
moment. STS\_1 werd voorbelast en ontlast bij 10 kN en vervolgens in een stap getest tot bezwijking optrad, terwijl STS\_2 in meerdere toenemende belastings-/ontlastingscycli werd uitgevoerd. Aangezien een vergelijkbare scheurvorming in beide proefstukken werd waargenomen, is de ontwikkeling van scheuren alleen voor STS\_2 weergegeven (fig. 15).

De proefstukken gedroegen zich lineair in de beginfase. Bij 135 kN werden rek-

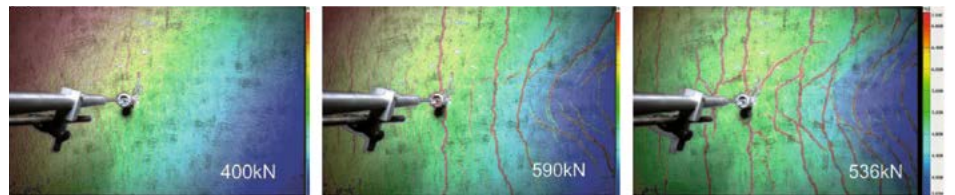
concentraties waargenomen ter hoogte van de aanhechting tussen de prefab ligger en de druklaag (fig. 15a). Er ontstonden geringe buigscheuren in het ondervlak van de prefab ligger, gevolgd door een delaminatie tussen de prefab ligger en druklaag en een grotere scheur in de druklaag bij circa 400 kN (fig. 15b). De stijfheid verminderde aanzienlijk na het ontstaan van de afschuivingscheur. Met toename van de belasting →



14



15a



15b

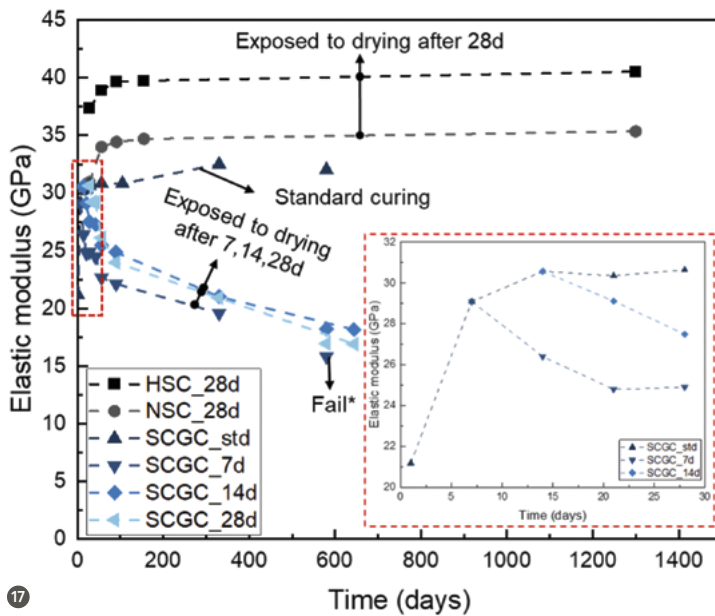
werden de scheuren langer en werd het slippen van de voorspanstrengen duidelijk. STS\_1 en STS\_2 bereikten de maximale belasting van 728 kN en 658 kN.

Het faalmechanisme van zowel STS\_1 als STS\_2 kan worden gekenmerkt door de combinatie van een buigscheur en een ont hechtingsscheur tussen de druklaag en de prefab ligger (foto 16a en fig. 16b). Slippen van voorspanstrengen werd ook waargenomen (foto 16c). Daarnaast werd voor STS\_1 plaatselijk betonstuk waargenomen in de flens aan één einde van het proefstuk (foto 16d).

### Verlengde materiaaltests

De mechanische eigenschappen van het zelfverdichtend GPB tot 90 dagen, zijn in de eerste publicatie van deze serie vermeld [4]. Voor een beter begrip van het constructieve langetermijngedrag van voorgespannen liggers, zijn aanvullende langetermijnmetingen van de elasticiteitsmodulus en vrije krimp uitgevoerd.

**Elasticiteitsmodulus** De metingen zijn uitgevoerd conform NEN-EN 12390-13 [12]. Hogesterktebeton (HSC) met een sterkteklasse vergelijkbaar met zelfverdichtend GPB ( $f_{c,28d} = 64$  MPa) en beton van normale →



sterkte, NSC ( $f_{c,28d} = 28$  MPa), zijn ook vergeleken (fig. 17) [9]. Voor HSC- en NSC-monsters, is een vergelijkbare trend waargenomen. Voor zelfverdichtend GPB begon de elasticiteitsmodulus echter te verminderen zodra de monsters werden blootgesteld aan uitdroging.

De ontwikkeling van de elasticiteitsmodulus is vergelijkbaar voor monsters die na 28, 14 en 7 dagen werden blootgesteld. Hierbij moet worden vermeld dat het proefstuk dat na zeven dagen werd gedroogd, bij de test na 580 dagen bezweek onder 40% drukspanning van  $f_{c,190d}$ . Het is nog steeds niet duidelijk waarom. Door [9] is een vermindering van de splijttreksterkte tussen de ouderdom van twee en vijf jaar gemeld voor een op hoogovenslak gebaseerde GPB, terwijl er geen aanzienlijk effect werd waargenomen voor de langetermijndruksterkte. Deze afname werd toegeschreven aan chemische veranderingen in de microstructuur tijdens uitdroging. In alle monsters die werden blootgesteld aan uitdroging, trad een aanzienlijke vermindering van de elasticiteitsmodulus op. Verder is het niet duidelijk of, en wanneer de elasticiteitsmodulus niet meer verder terugloopt. Alhoewel het aan uitdroging gerelateerd lijkt te zijn, is het onderliggende mechanisme nog niet duidelijk.

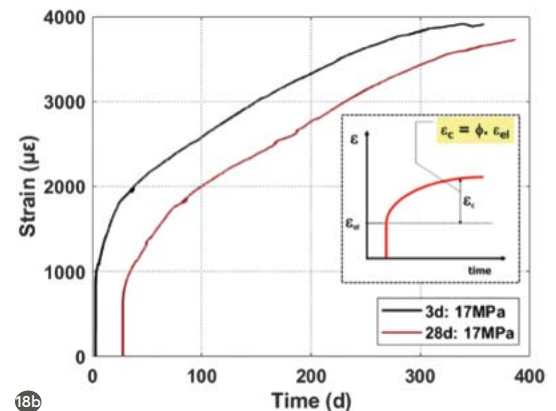
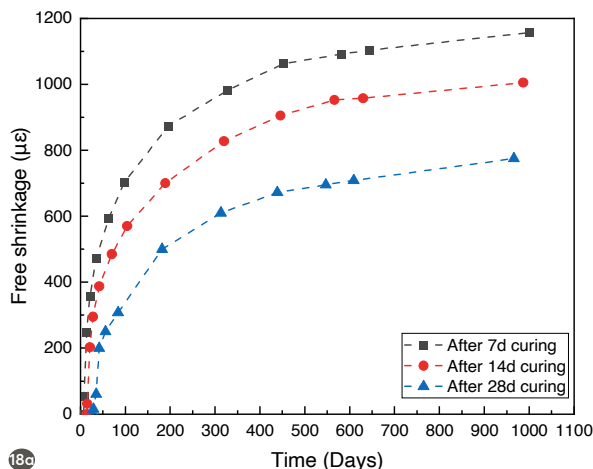
Door de invloed van de afmetingen zal het droogproces in de volumineuzere liggers langer duren dan in de kleine testmonsters. De veroorzaakte constructieve reactie wordt daardoor uitgesteld, maar zal uiteindelijk de stijfheid op de lange termijn aantasten en

voorspanningsverliezen in de liggers veroorzaken. Opgemerkt moet worden dat de gemiddelde luchtvochtigheid in Nederland (2020–2022) circa 80% bedraagt [13], waardoor het droogeffect bij een brugtoepassing in Nederland waarschijnlijk minder ernstig is dan onder laboratoriumomstandigheden.

## Conclusie en aanbevelingen

Uit de beproevingen van samengestelde GPB-liggers op ware grootte kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- GPB vertoont tijdafhankelijk gedrag.
- Het onbelaste proefstuk (LTF) bleef verder vervormen, wat onder andere de significantie van de kruipeffecten van GPB aangaf.
- In vergelijking met het proefstuk dat na één maand werd beproefd (STF), vertoonden de proefstukken beproefd na negen maanden (LTF) onder buigingsbelasting een aanzienlijk lagere stijfheid en lagere scheurbelasting. In het proefstuk LTF werd een circa 44% lagere scheurbelasting waargenomen in vergelijking met de STF. De maximale scheurwijdte van de prefab liggers van de proefstukken beproefd na negen maanden bereikte de bruikbaarheidsgrenstoestand (0,2 mm scheurwijdte) bij lagere belastingsniveaus (160 kN voor LTF en 180 kN voor LTF\_LS), dan die van STF (220 kN). Deze belastingsniveaus waren hoger dan de berekende bruikbaarheidsgrenstoestand (130 kN) gebaseerd op belastingmodel 1. De significante voorspanningsverliezen lijken het gevolg te zijn van krimp- en kruipeffecten in voorgespannen GPB.



→ LTF en LTF\_LS lieten verschillende faalmechanismes zien. In LTF trad falen van de verankering op, op een belastingsniveau lager dan de ondergrens van de belasting voor STF, terwijl in LTF\_LS betonstuk werd waargenomen als een aanduiding van het bezwijken bij buiging. Op basis van het scheurenpatroon en wijziging van het faalmechanisme wordt aangenomen dat er een vermindering van de aanhechting tussen GPB en wapeningsstaal optreedt. Vermindering van de aanhechting tussen GPB en wapeningsstaal in combinatie met de significante kruipeffecten spelen een rol in het tijdsafhankelijke constructieve gedrag van afzonderlijke liggers.

→ In de kortetermijnafschuifproeven bezweken beide proefstukken STS\_1 en STS\_2 door de ontwikkeling van buig- en afschuifscheuren en een onthechtingsscheur tussen prefab ligger en de druklaag (gecombineerde faalmechanismes). Er werd een lagere uiterste opneembare capaciteit vastgelegd voor STS\_2, waarschijnlijk door kruipeffecten afkomstig van langere belastingsduur met belastings-/ontlastingscycli.

→ De elasticiteitsmodulus van zelfverdichtend GPB, die na een bepaalde nabehandlings-

tijd worden blootgesteld aan uitdroging, vermindert in de loop der tijd. Eveneens, de krimp van zelfverdichtend GPB is na 2,7 jaar aan het toenemen.

Op basis van de hiervoor genoemde conclusies, kunnen de volgende aanbevelingen worden gedaan:

→ Het gebruik van constructieve proeven na 28 dagen en toepassen van ontwerprichtlijnen voor traditionele betonelementen op basis van de materiaaleigenschappen na 28 dagen, om de constructieve weerstand van GPB te controleren, kan resulteren in een onveilig ontwerp. Het is essentieel om het constructieve en materiaalgedrag op de lange termijn van GPB te onderzoeken en het is duidelijk dat de regels voor traditioneel beton niet onvoorwaardelijk kunnen worden toegepast.

→ Zowel de elasticiteitsmodulus als de druksterkte, krimp en kruip, moeten langer dan twee jaar worden gemonitord. Daarnaast is er verder onderzoek nodig om het mechanisme achter de mogelijke vermindering van mechanische eigenschappen te begrijpen, alvorens GPB grootschalig kan worden toegepast. ●

## REFERENTIES

- Zhang, P., Wang, K., Li, Q., Wang, J., & Ling, Y. (2020). Fabrication and engineering properties of concretes based on geopolymers/alkali-activated binders-A review. *Journal of Cleaner Production* 258, 120896.
- Liu, H., Lu, Z., & Peng, Z. (2015). Test research on prestressed beam of inorganic polymer concrete. *Materials and Structures* 48, p. 1919-1930.
- Sonal, T., Urmil, D., & Darshan, B. (2022). Behaviour of ambient cured prestressed and non-prestressed geopolymer concrete beams. *Case Studies in Construction Materials* 16, e00798.
- Zhang, S., Ye, G., Luković, M., Hendrik, H., & Scharringa, A. (2022). Geopolymeerbeton voor infrastructurele toepassingen (1): Ontwikkeling van zelfverdichtende mengsels. *Cement* 2022/7, p. 42-50.
- Ye, G., Zhang, S., Luković, M., Herder, H., & Scharringa, A. (2023). Geopolymeerbeton voor infrastructurele toepassingen (2): Productie op industriële schaal van prefab voorgespannen brugliggers. *Cement* 2023/1, p. 6-12.
- Ingenieursbureau Mozes en de Boer. (2021). Constructieberekening (21102-B01).
- Nederlands Normalisatie Instituut. (2019). NEN-EN 1991-2+C1/NB: Eurocode 1: Belastingen op constructies – Deel 2: Verkeersbelasting op bruggen.
- Espion, B., & Halleux, P. (1991). Long Term Behavior of Prestressed and Partially Prestressed Concrete Beams: Experimental and Numerical Results. *ACI SP-129*, 19–38.
- Bezemer, H. J., Awasthy, N., & Luković, M. (2023). Multiscale analysis of long-term mechanical and durability behaviour of two alkali-activated slag-based types of concrete. *Construction and Building Materials* 407, 133507.
- Barnes, R. W., Grove, J. W., & Burns, N. H. (2003). Experimental assessment of factors affecting transfer length. *Structural Journal* 100(6), p. 740-748.
- European Committee. (2005). EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of Concrete Structures-Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. Brussels.
- Nederlands Normalisatie Instituut. (2019). NEN-EN 12390-13: Beproeving van verhard beton – Deel 13: Bepaling van de secans-elasticiteitsmodulus onder druk.
- CBS, PBL, RIVM, WUR (2023). Meteorological data, 1990-2022 (indicator 0004, version 25, March 27, 2023). [www.clo.nl](http://www.clo.nl). Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS), Den Haag; Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag; Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven; en Wageningen University & Research, Wageningen.