



Mortelverbindingen voor prefab betonnen wandconstructies (1)

Onderzoek naar het afschuifgedrag van
ongewapende geprofileerde mortelvoegen

Verticale voegen tussen prefab betonwanden worden meestal gevuld met een voegmortel. Deze mortel dient als bouwkundige vulling en heeft verder geen constructieve functie. Krimparme cementgebonden voegmortels hebben echter hoogwaardige constructieve eigenschappen. Die kunnen worden benut door in de aansluitvlakken tussen beton en mortel een profilering aan te brengen. Hierdoor ontstaat een afschuifverbinding voor de overdracht van afschuifkrachten tussen wandelementen. In samenspraak met de prefab betonindustrie zijn een aantal geprofileerde aansluitvlakken voor verticale mortelverbindingen ontwikkeld. In het kader van een promotieonderzoek aan de TU Delft is het afschuifgedrag onderzocht.

Vanwege de thixotrope eigenschappen van hedendaagse mortels is het mogelijk verticale voegen met een mortelpomp te vullen, zonder dat daar een traditionele bekisting voor nodig is.

Foto 2 laat zien hoe de mortel via een slang in de voegen wordt gedrukt. Bekende mortelverbindingen worden gebruikelijk voorzien van wapening in de voegvulling (haarspelden uit de wand en een verticale 'lockbar'). Het is echter niet aan te bevelen verticale voegen met voegwapening te vullen met een mortelpomp. Dan is de kans op luchtinsluiting te groot. Dit is de reden dat er voor dit onderzoek ongewapende geprofileerde mortelvoegen worden voorgesteld. Er moet uiteraard rekening worden gehouden met de horizontale ontbondene (fig. 3a), die nu niet door de wapening kan worden opgenomen. Deze 'wijkende' kracht moet voor een werkende afschuifverbinding worden gecompenseerd. Deze krachten kunnen via beide wandelementen en de trekbandwapening in de vloeren met elkaar in evenwicht worden gebracht (fig. 3b). Het is een bestaand con-



DR. IR. DICK VAN KEULEN

Adviseur Constructies
Ingenieursstudio DCK

cept dat onder meer wordt beschreven in *fib* bulletin 74 [1] en Steinle et al. [2].

Mortelverbindingen

Figuur 4 toont de vijf verschillende verbindingen waarvoor het afschuifgedrag is onderzocht. Het aansluitvlak heeft voor iedere verbinding een specifieke profilering en soms een opruwing. Verbinding Sp 1-x in figuur 4 laat zien dat afschuifkrachten (verticale pijlen langs de voeg) via diverse schuine drukdiagonalen in de mortelvulling van de ene zijde naar de andere worden doorgegeven. In de codering staat Sp voor 'Specimen', de 1 voor de eerste verbinding en de x voor het unieke nummer van een proefstuk. Elke verbinding is in staat 'positieve' en 'negatieve' afschuifkrachten door te geven. De schuine pijlen in verbinding Sp 2-x laten zien hoe de beide afschuifkrachten via drukdiagonalen worden doorgegeven.

Mortelverbinding Sp 1-x wordt in de praktijk het meest toegepast en is daarom als eerste geselecteerd voor het onderzoeksprogramma. Mortelverbinding Sp 2-x heeft dezelfde inkepingen (*shear keys*), maar die →

TWEE ARTIKELEN OVER PROMOTIESTUDIE

Dit is het eerste artikel in een tweeluik naar aanleiding van de promotiestudie van Dick van Keulen aan de TU Delft, faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, afdeling Engineering Structures, sectie betonconstructies. De titel van het onderzoek: 'Narrow vertical mortar connections for precast concrete shear walls'. De promotoren waren dr.ir. Dick Hordijk en prof.dr.ir. Max Hendriks. Het proefschrift is te downloaden op <https://repository.tudelft.nl>. In dit eerste artikel wordt op hoofdlijnen het onderzoek naar het afschuifgedrag van een aantal geprofileerde mortelverbindingen beschreven. Het tweede artikel gaat in op de modellering en toepassing van verdiepingshoge geprofileerde mortelverbindingen in prefab-betonnen stabiliteitsconstructies.



zijn aan één zijde 100 mm verticaal verschoven. Deze variant heeft een iets steilere drukdiagonaal en daardoor mogelijk de potentie de afschuifkrachten efficiënter door te geven. Omdat deze verbinding in dit artikel nadrukkelijk aan bod komt, wordt het de SSK-mortelverbinding (*Staggered Shear Key*) genoemd.

Mortelverbinding Sp 3-x met een 'gekarteld profiel' heeft als doel het effect van meer *shear keys* over dezelfde hoogte te onderzoeken.

Met mortelverbinding Sp 4-x is het effect van een opgeruwd aansluitvlak bij een toepassing met voegmortel in plaats van beton onderzocht met een 'uitgewassen betonoppervlak'.

Ten slotte is gekozen voor mortelverbinding Sp 5-x met een 'kartelprofiel en uitwassing', omdat een combinatie van een opgeruwd aansluitvlak en een profilering mogelijk een hoge afschuifcapaciteit en een aanzienlijke afschuifstijfheid zou kunnen leveren.

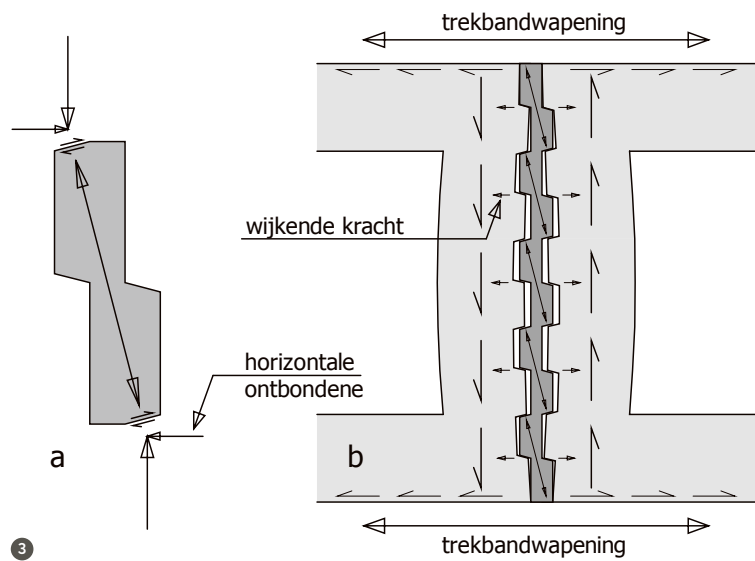
Het is de vraag welke van deze verbindingen het beste kan worden toegepast als verticale mortelvoegverbinding in het concept met trekbandwapening in de vloeren.

Afschuiftesten

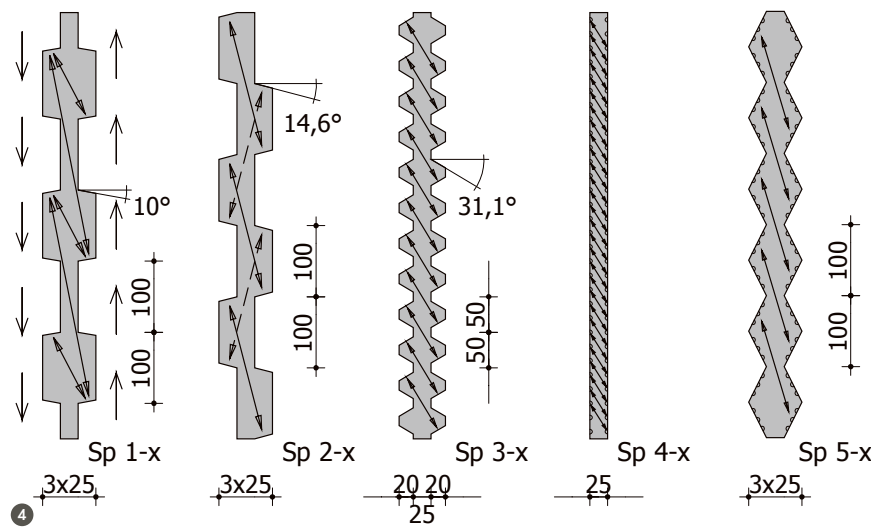
Het afschuifgedrag van de mortelverbindingen is vastgesteld met behulp van afschuiftesten aan de TU/e. Hiervoor zijn in totaal 33 proefstukken van het type *push-off* gemaakt en beproefd in de proefopstelling uit foto 5. Met dit type proefstuk worden verticale drukkrachten omgezet in afschuifkrachten op de verticale verbinding, zonder dat er significante buigende momenten in de voeg ontstaan. Het mechanisme van de *push-off test* is dat de opgelegde kracht de verbinding via afschuiven en zijdelings wijken uit elkaar probeert te duwen.

Elk proefstuk bestaat uit twee L-vormige prefab betonelementen met daarin een profilering en/of uitwassing (foto 6), waar-tussen de mortelvulling is aangebracht. →

Het afschuifgedrag wordt beïnvloed door de mate waarin de mortelvulling zijdelings is opgesloten



3



4



5



6

Voor het zijdelings opsluiten van de mortelvulling zijn steeds vier draadstangen rondom het proefstuk gemonteerd. De afschuifkrachten werden via vieldruk bovenop het proefstuk vervormingsgestuurd aan de verbinding opgelegd. Na iedere belastingstap zijn de verticale krachten vanuit de vieldruk, de horizontale krachten in de draadstangen en de horizontale en verticale verplaatsingen gemeten.

Horizontale stijfheid

Het afschuifgedrag van een mortelverbinding wordt beïnvloed door de mate waarin de mortelvulling tussen de prefab betonwanden zijdelings is opgesloten. Figuur 7 toont schematisch drie verdiepingshoge mortelverbindingen waarin dat zichtbaar wordt. In elk van de getekende situaties is de mate van opsluiting anders. In wandconstructie (a) zullen de horizontale wijkende vervormingen vrijwel volledig afhankelijk zijn van de verlenging van de trekbandwapening in de (gescheurde) betonvloeren. Door raamopeningen in wandconstructie (b) ontstaan kolommen die bij dezelfde afschuifkracht zijdelings meer vervormen. In het geval van een hoekverbinding (c) zijn, bij dezelfde afschuifkracht, de horizontale vervormingen het grootst.

De zijdelingse afhankelijkheid is in het onderzoek gedefinieerd als de horizontale stijfheid $k_{h,1}$, waarmee weerstand wordt geboden tegen wijkende krachten. Door draadstangen met verschillende diameters rondom de proefstukken aan te brengen, is het mogelijk verschillende horizontale stijfheden op de mortelverbindingen te simuleren. Voor de in

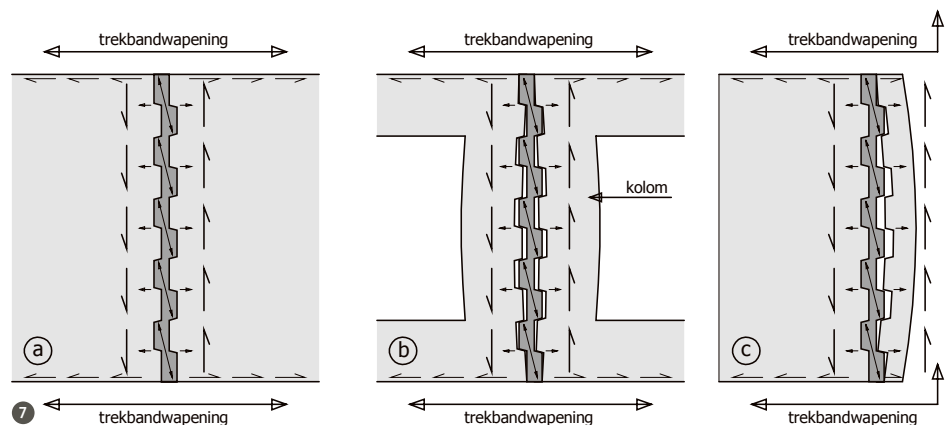
figuur 7 getekende situaties zijn de horizontale stijfheden met eenvoudige analytische modellen berekend. Het bleek dat deze stijfheden in de proefstukken konden worden gesimuleerd met drie sets van vier draadstangen met diameters $\varnothing 16$ mm, $\varnothing 24$ mm en $\varnothing 38$ mm. Hiermee is onderzocht wat het effect is van de horizontale stijfheid op het afschuifgedrag van de mortelverbindingen.

Onderzoeksvaariabelen

Het effect dat de ‘vorm van de profilering’ en de ‘horizontale stijfheid’ hebben op het afschuifgedrag, zijn twee voor dit artikel geselecteerde onderzoeksvaariabelen. Voor meer informatie over de werking van ‘vezelmortel’ en ‘zijdelingse voordruk’ wordt verwezen naar het proefschift.

Afschuifgedrag Figuur 8 toont foto’s van een SSK-mortelverbinding (Sp 2-4) tijdens het uitvoeren van de afschuiftest. Ze zijn genomen op het moment dat de in de foto aangegeven afschuifkrachten (kN) via de verbinding worden doorgegeven. De relatie tussen de afschuifkrachten V_p en de afschuifvervormingen δ_v is uitgezet in de grafiek van figuur 9.

De proefneming start in punt A van de grafiek. In de fase tot punt B zijn visueel geen veranderingen op het proefstukoppervlak waargenomen. In deze fase worden de afschuifkrachten gelijkmatig verdeeld over de hoogte van de verbinding doorgegeven, zoals schematisch weergegeven in figuur 10A. Dit is mogelijk omdat de afschuifkrachten via de hechting tussen het prefab beton en de mortel kunnen worden overgedragen.



In punt B onthechten de aansluitvlakken. Dit gebeurt bij een vrij lage afschuifkracht ($V_{F,B} = 75 \text{ kN}$). Als gevolg van het onthechten worden de afschuifkrachten daarna vrijwel alleen nog via drie schuine drukdiagonalen doorgegeven (figuur 10B).

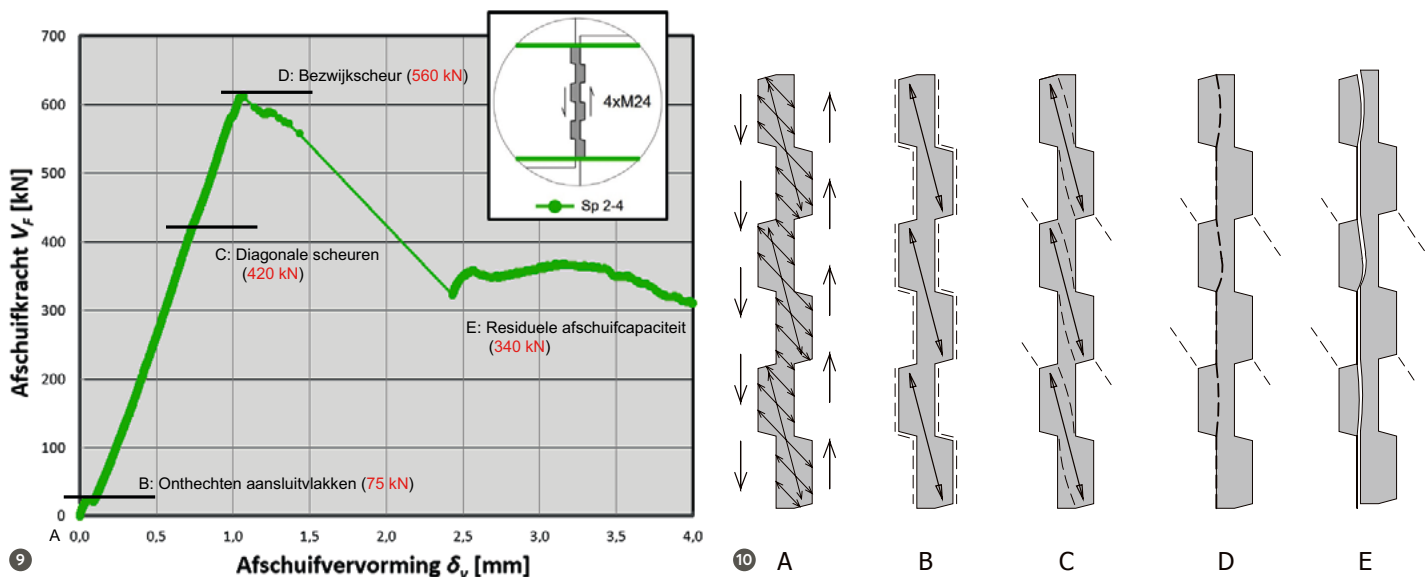
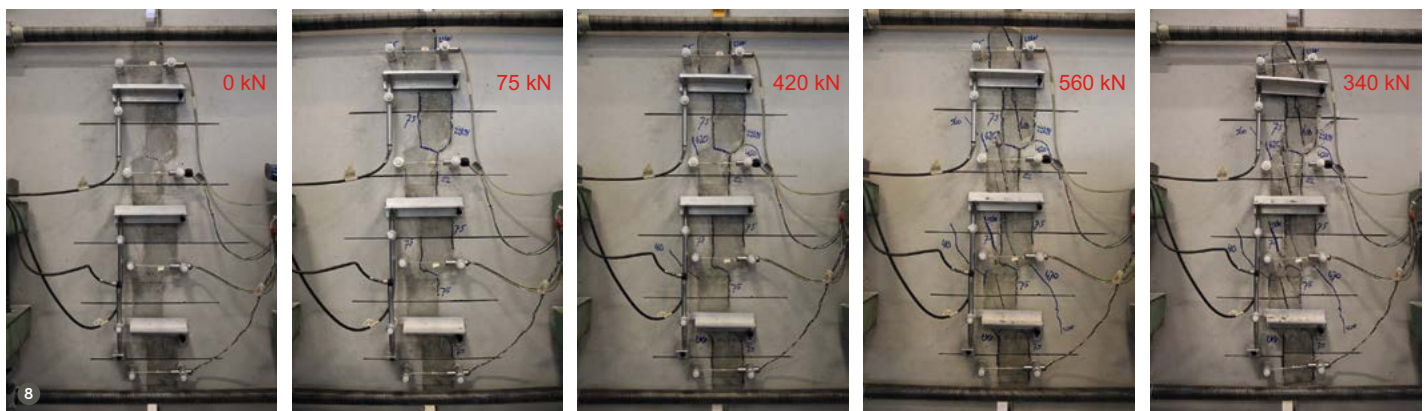
Gedurende het verder opvoeren van de afschuifkracht ontstaan er bij punt C in de mortel en het prefab beton diagonale scheuren ($V_{F,C} = 420 \text{ kN}$). In de fase erna nemen de scheurwijdtes verder toe en ontstaan ook weer nieuwe scheuren.

In punt D bezwijkt de verbinding omdat drie met mortel gevulde inkassingen van de mortelvulling afscheuren ($V_{F,D} = 560 \text{ kN}$). Daardoor ontstaat een verticale afschuif-scheur. Vanwege het ruwe oppervlak in de scheur is de verbinding na bezwijken nog steeds in staat afschuifkrachten door te

geven. Dat gebeurt bij een veel lagere residuële afschuifkracht ($V_{F,E} = 340 \text{ kN}$) in fase E.

Behalve de afschuifkrachten en afschuifvervormingen zijn ook de zijdelingse krachten en vervormingen gemeten. Door alle relaties in één gecombineerde grafiek van figuur 11 af te drukken, ontstaat een overzichtelijke weergave van het gemeten verbindingsgedrag. De grafiek toont de testresultaten van twee SSK-mortelverbindingen (Sp 2-1 en Sp 2-2). De mortelverbindingen in deze proefstukken zijn gelijk aan elkaar. Ze zijn beproefd met dezelfde draadstangen en zijdelingse voordruk. In het algemeen kan worden vastgesteld dat het verbindingsgedrag van de beide verbindingen ongeveer hetzelfde is. Ook kan worden waargenomen dat bij een toename van de afschuif- →

De vorm en ruwheid van de aansluitvlakken beïnvloeden het afschuifgedrag



8 Proefstuk 2-4 met SSK-mortelverbinding tijdens de afschuiftest, bij verschillende afschuifkrachten

9 Grafiek met meetresultaten van de SSK-mortelverbinding in proefstuk 2-4

10 Overdracht van afschuifkrachten via de SSK-mortelverbinding

De SSK-mortel- verbinding geeft de afschuif- krachten op de meest effectieve manier door

krachten V_F de afschuifvervormingen δ_v , de zijdelingse krachten $F_{\sigma_{n, \text{sum}}}$ en zijdelingse vervormingen δ_{σ_n} toenemen.

Effect van de horizontale stijfheid

Over het effect dat de horizontale stijfheid heeft op het afschuifgedrag van de SSK-mortelverbinding kan het volgende worden vastgesteld. Voor elke set horizontale draadstangen met diameters 4Ø16, 4 Ø24 en 4Ø38, zijn steeds twee SSK-mortelverbindingen beproefd. De meetresultaten van deze proefstukken zijn afgedrukt in de grafiek van figuur 12.

Uit de relatie tussen de afschuifkracht V_F en zijdelingse kracht F_{σ_n} blijkt dat de horizontale stijfheid de krachtsverdeling niet beïnvloedt. Dit is te begrijpen omdat de hellingshoek van een drukdiagonaal van een mortelverbinding met dezelfde profilering en afmetingen hetzelfde is.

In de tweede plaats kan worden vastgesteld dat met een verhoging van de horizontale stijfheid de afschuifstijfheid toeneemt. Dit is af te lezen uit de helling van de

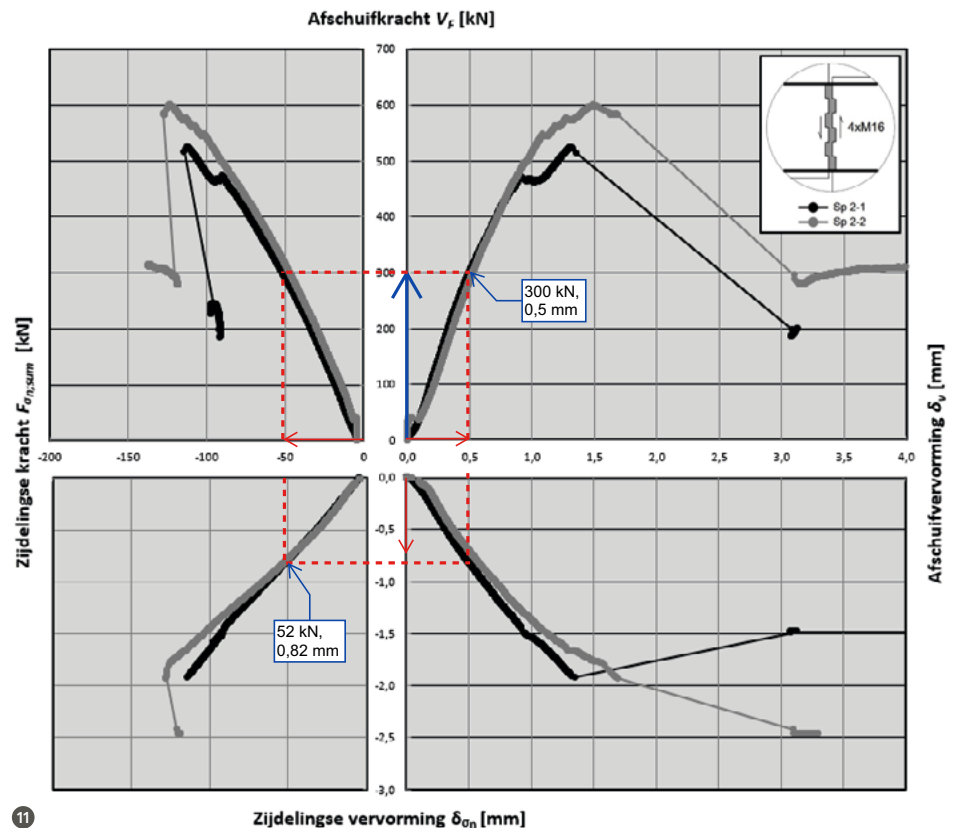
relatie tussen de afschuifkracht V_F en afschuifvervorming δ_v . Deze relaties laten ook zien dat de afschuifcapaciteit $V_{F,U}$ bij een verhoging van de horizontale stijfheid toeneemt.

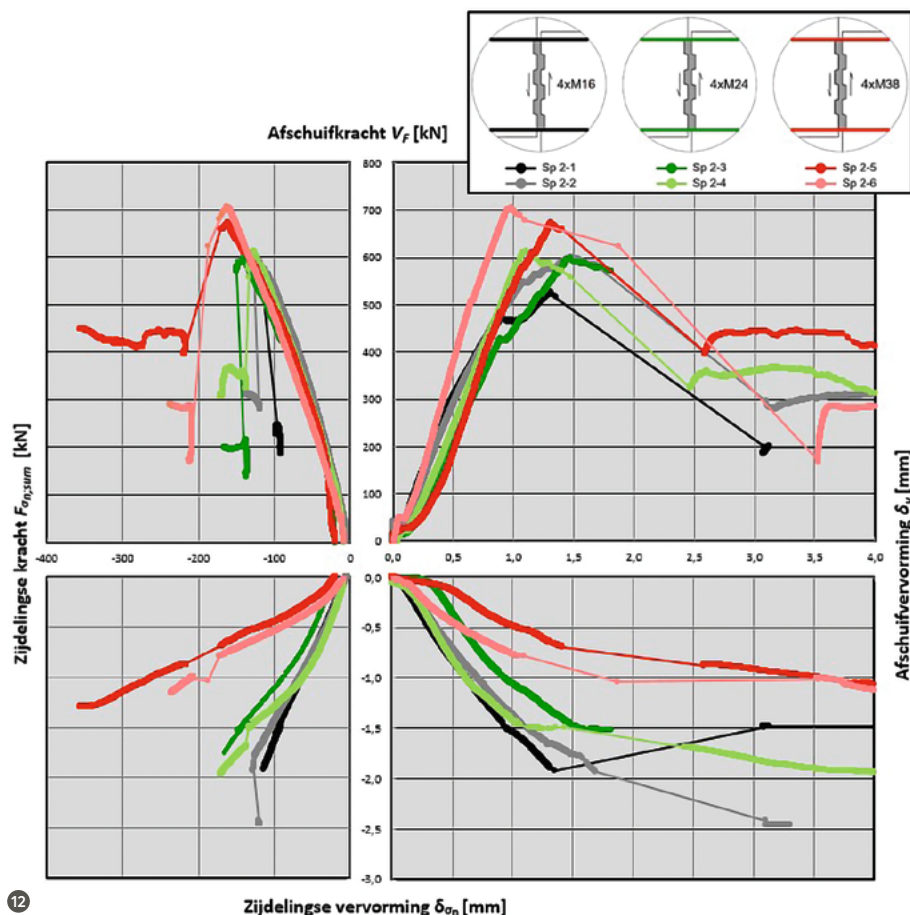
Het derde is dat er een grote spreiding is voor de residuele afschuifcapaciteit na het bezwijken van de mortelverbindingen. Dit laat zien dat de ruwheid in de hoofdscheur van de mortelvulling meer invloed op de residuele afschuifcapaciteit heeft dan de horizontale stijfheid.

In de laatste plaats blijkt uit de relatie tussen zijdelingse krachten F_{σ_n} en vervormingen δ_{σ_n} dat bij een hogere horizontale stijfheid de zijdelingse vervormingen kleiner zijn. Het is duidelijk dat dit komt door de afhankelijkheid tussen de zijdelingse vervormingen en de stijfheden van de horizontale draadstangen.

Effect van de profilering

Het is te verwachten dat de vorm en ruwheid van de aansluitvlakken tussen prefab beton en mortel het afschuifgedrag beïnvloedt.





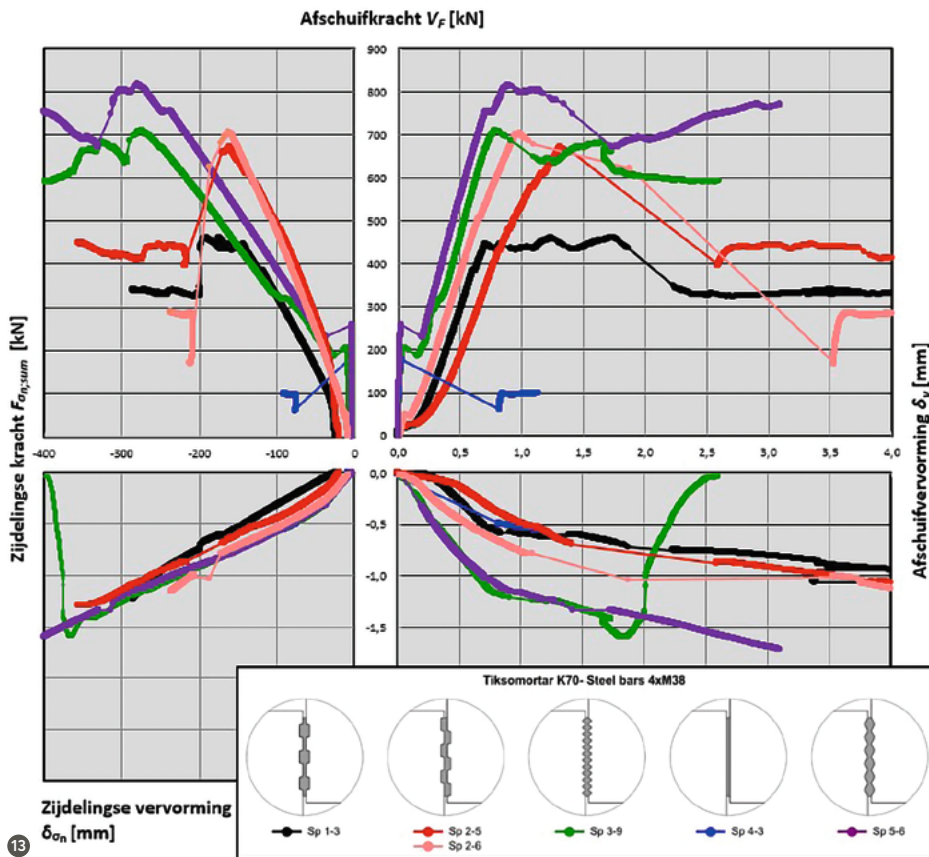
12

vloeden. Dit wordt beschouwd met behulp van de grafiek in figuur 13. Hierin zijn de relaties van vijf mortelverbindingen met verschillende combinaties van profielen en opruwing afgedrukt. Ze zijn allemaal beproefd met draadstangen 4Ø38. Behalve de vorm en de ruwheid zijn deze vijf verbindingen dus gelijk aan elkaar.

Uit de meetresultaten blijkt dat de aansluitvlakken tussen mortel en prefab beton bij verbindingen Sp1-3, Sp 2-5 en Sp 2-6 bij lage afschuifkrachten V_F vrijwel direct onthechten. Dit gebeurt omdat de aansluitvlakken niet zijn voorzien van een opruwing of profilering om de hechting te verbeteren. Bij de andere verbindingen Sp 3-9 en Sp 4-3 vond onthechten plaats bij een hogere afschuifkracht V_F . Bij Sp 4-3 heeft de verbinding ook gelijk de afschuifcapaciteit $V_{F,U} = 177$ kN bereikt. Er volgt daarna alleen nog een fase met een lagere residuele afschuifcapaciteit. Bij verbinding Sp 5-6 is geen onthechten waargenomen. Er is wel een

terugval zichtbaar bij $V_F = 260$ kN, maar die ontstaat door het ontstaan van diagonale scheuren in de mortelvulling. Bij de andere verbindingen ontstaan de eerste scheuren in de mortel en het prefab beton bij $V_F = 380$ kN (Sp 1-3), $V_F = 401/505$ kN (Sp 2-5/2-6) en $V_F = 187$ kN (Sp 3-9). Tijdens het verder toenemen van de afschuifkracht ontstonden nieuwe scheuren en werd de bestaande scheurwijdten groter.

De uiterst opneembare afschuifkracht is gedefinieerd als de afschuifcapaciteit $V_{F,U}$. De eerste drie verbindingen bezwijken doordat de met mortel gevulde inkassingen van de mortelvulling afscheuren. Dit is een verticale hoofdscheur waarvan het principe is getekend in figuur 10D/E. Bij verbinding Sp 5-6 ontstond eveneens een min of meer verticale hoofdscheur. Die begint in het aansluitvlak tussen prefab beton en mortel en steekt vervolgens via de mortelvulling over naar het andere aansluitvlak. →



Beoordeling van de mortelverbindingen

Het is de vraag welke van de voorgestelde verticale mortelverbinding het meest geschikt is. Dit wordt bepaald door het afschuifgedrag van de verschillende verbindingen onderling te vergelijken. De testresultaten in de grafiek van figuur 13 zijn exemplarisch voor de vijf verbindingen. De verbindingen Sp 3-9, Sp 4-3 en Sp 5-6 leveren in deze grafiek initieel een hoge afschuifstijfheid als gevolg van de adhesieve hechting tussen prefab beton en mortel. De gevoeligheid voor onthechten is echter een bedreiging. De mortelvulling zal krimpen. Zettingen, die in een prefab betonconstructie altijd aanwezig zijn, kunnen ook een ongewenste horizontale wijking aan de mortelverbinding opleggen. Daarom moet worden vastgesteld dat de gemeten **initiële afschuifstijfheid** niet kan worden benut. Het betekent ook dat de mortelverbinding zonder profilering (Sp 4-x) niet kan worden gebruikt voor een verticale toepassing. Deze verbinding daarmee valt af.

Omdat de **afschuifstijfheid** een belangrijke constructieve eigenschap voor de toepassing van een mortelverbinding is, zijn in tabel 1 de gemeten secant stijfheden afgedrukt. Opmerkelijk is dat de waarden van de gekartelde verbinding (Sp 3-x) bij de lagere horizontale stijfheden (draadstangen 4Ø16 en 4Ø24) lager zijn dan bij de andere verbindingen. Deze liggen tussen de 166-350 kN/mm. Voor de 4Ø38 draadstangen was de secant stijfheid van deze verbinding vergelijkbaar met de anderen. Deze stijfheden liggen tussen de 400-900 kN/mm. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de gekartelde verbinding (Sp 3-x) minder geschikt is als verticale mortelverbinding. Voor de overige drie verbindingen kan op basis van de secant stijfheid geen voorkeur worden uitgesproken.

In de grafiek van figuur 14 zijn met punten de **afschuifcapaciteiten** $V_{F,U}$ van alle verbindingen uitgezet tegen de zijdelingse krachten $F\sigma_{n, sum}$. Aan elke groep resultaten is een lineaire trendlijn toegevoegd. Uitgangspunt is dat de zijdelingse krachten zo klein mogelijk moeten zijn om de benodigde horizontale compensatie door de omliggende prefab betonconstructie te minimaliseren. De grafiek laat zien dat met de SSK-mortelverbinding (Sp 2-x) bij lage zijdelingse krachten $F\sigma_{n, sum}$ de hoogste afschuifcapaciteiten $V_{F,U}$ levert. Deze verbinding presteert op dit uitgangspunt het beste.

Het effect dat de **horizontale stijfheid** k_h heeft op de afschuifcapaciteiten $V_{F,U}$ is eveneens bepalend voor een zo gunstig mogelijke inzet van een verticale mortelverbinding. In de grafiek van figuur 15 zijn de gemeten waarden met punten tegen elkaar uitgezet. Er zijn opnieuw per verbinding trendlijnen aan toegevoegd. De verbinding presteert het beste wanneer het de hoogste afschuifcapaciteit biedt met een lage behoefte aan horizontale stijfheid k_h . De grafiek laat zien dat de hoogste afschuifcapaciteit wordt geleverd door de 'geprofileerde en opgeruwde' mortelverbinding (Sp 5-x). Een goede tweede is de SSK-mortelverbinding (Sp 2-x).

Uit het laatste vergelijk blijken de goede prestaties van de 'geprofileerde en opgeruw-

LITERATUUR

- 1 fib bulletin 74 (2014). Planning and design handbook, Manual – textbook, fib bulletin 74. International Federation for Structural Concrete.
- 2 Steinle et al., Precast concrete structures. Ernst & Sohn, 2019.
- 3 Keulen, D.C. van, Narrow vertical mortar connections for precast concrete shear walls. Proefschrift Technische Universiteit Delft, 2023.

de' mortelverbinding (Sp 5-x). Daarbij moet wel een kanttekening worden geplaatst. Ten eerste bleek dat de hoge afschuifcapaciteiten alleen worden geleverd als de hoofdscheur door de mortelvulling loopt. Bij proefstuk Sp 5-2 liep de hoofdscheur alleen door het aansluitvlak en dat gaf een significant lagere afschuifcapaciteit (fig. 15). Er kan helaas niet worden gegarandeerd dat de hoofdscheur altijd door de mortel loopt. Bovendien is het alleen met nauwkeurig werken mogelijk een reproduceerbaar ruw betonoppervlak te maken. Die nauwkeurigheid is bij de meeste betonfabrieken niet zondermeer beschikbaar. Het derde is dat bij deze verbinding de zichtbare scheuren bij relatief lage afschuifkrachten ontstaan. Hoewel de mortel mag scheuren, is het toch beter dat de eerste scheuren pas bij een hogere afschuifkracht ontstaan. Geconcludeerd kan worden dat deze verbinding ondanks de hoge afschuifcapaciteiten $V_{F,U}$ bij lage horizontale stijfheden k_h minder aantrekkelijk is voor toepassing in de praktijk.

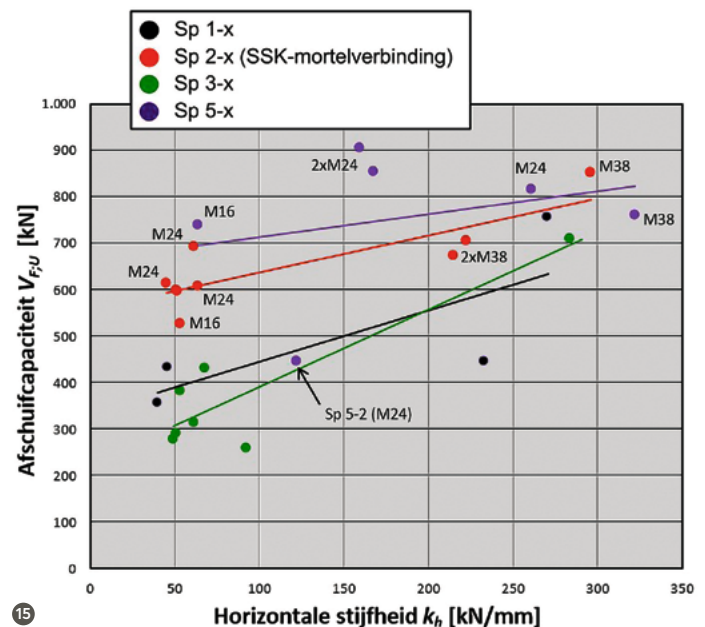
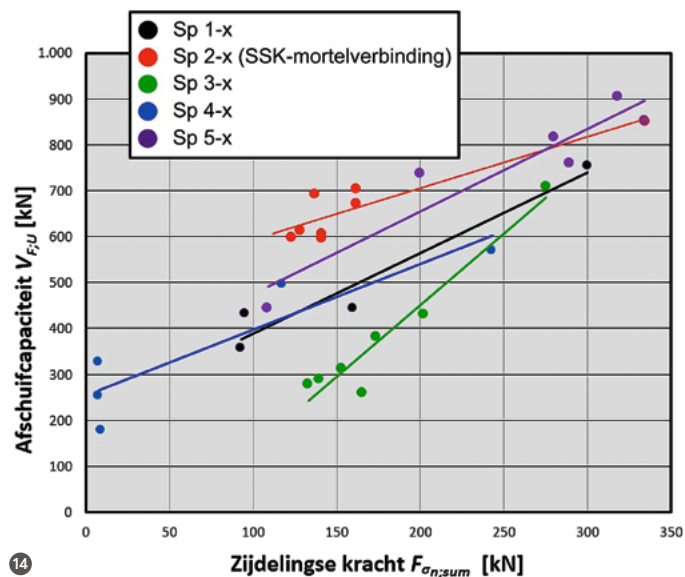
Conclusies

Er kan worden geconcludeerd dat de SSK-mortelverbinding (Sp 2-x) de afschuifkrachten op de meest effectieve manier doorgeeft. De verbinding levert hoge afschuifcapaciteiten voor relatief lage zijde-

Tabel 1 Secant afschuifstijfheden

proefstuk	draadstang	afschuifstijfheid [N/mm ²]	proefstuk	draadstang	afschuifstijfheid [N/mm ²]
1-1	(M24)	420	3-1	(M16)	166
1-2	(M24)	451	3-2	(M16)	205
1-3	(M38)	626	3-3	(M16)	197
			3-4	(M16)	204
2-1	(M16)	401	3-5	(M24)	264
2-2	(M16)	403	3-6	(M24)	350
2-3	(M24)	406	3-7	(M38)	530
2-4	(M24)	552	3-8	(M38)	645
2-5	(M38)	514	3-9	(M38)	910
2-6	(M38)	718	5-1	(M16)	388
2-9	(M24)	356	5-2	(M24)	464
			5-3	(M38)	548
			5-6	(M38)	908

lingse krachten en horizontale stijfheden. Ook blijkt dat de secant afschuifstijfheid niet minder is dan die van de overige verbindingen. Uit het onderzoek blijkt dat van de vijf onderzochte verbindingen, de SSK-mortelverbinding de meest geschikte verticale mortelverbinding is. In het tweede artikel wordt de werking van deze verbinding nader bestudeerd, het voorzien van een modeleringsmethode en een case studie uitgewerkt voor toepassing tussen verdiepingshoge prefab betonnen wandelementen. ●



14 Relaties tussen afschuifcapaciteiten $V_{F,U}$ en zijdelingse krachten $F_{\sigma_n, \text{sum}}$
 15 Relaties tussen afschuifcapaciteiten $V_{F,U}$ en horizontale stijfheid k_h