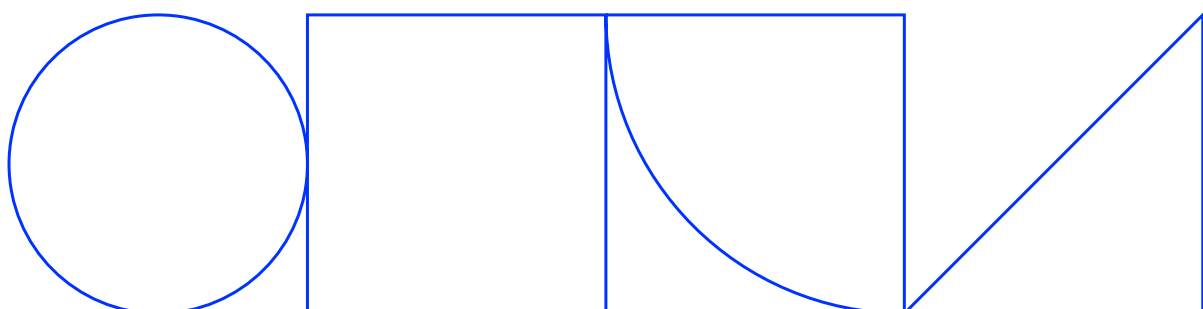
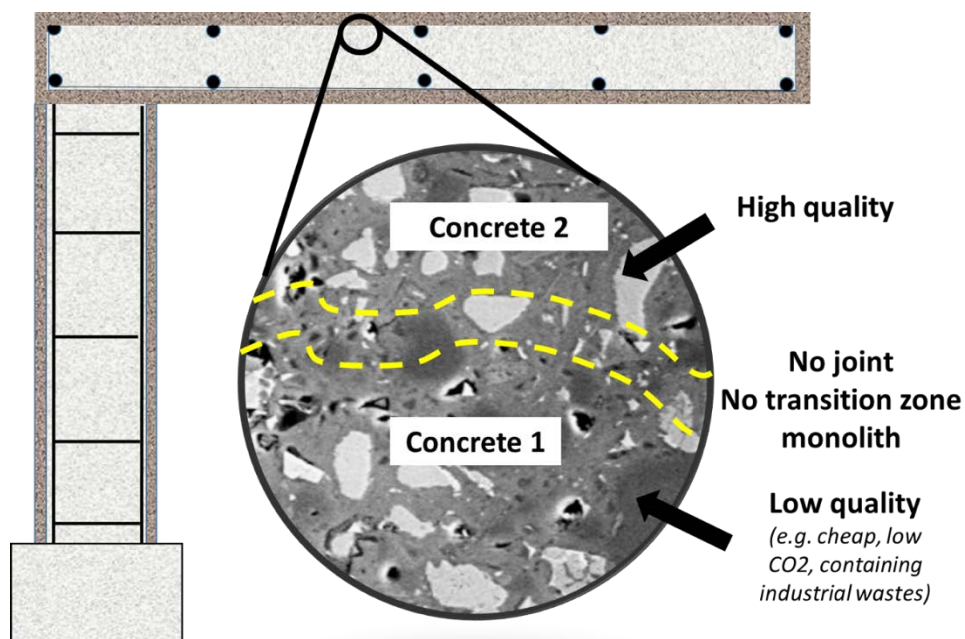


Hybrid betong - enkel teknik med lågt pris, lågt CO2 och utmärkt hållbarhet

HYBRID CONCRETE – SIMPLE TECHNOLOGY WITH LOW PRICE, LOW CO2, AND EXCELLENT DURABILITY

Kaludja Telhaj, Andrzej Cwirzen, Hans Hedlund
LTU, Skanska

2023-04-28



Summary

The amount of CO₂ related to Portland cement can be reduced by its partial replacement in concrete with secondary cementitious binders; limestone, blast furnace slag or fly ash or by a full replacement with alternative cements. Both variants bring certain limitations but also advantages. Such concretes may show a slower strength development or worse durability. The worse durability can be related to more porous microstructure, formation of phases that are less stable and more prone to interact with for example chlorides or CO₂.

One of the solutions enabling to produce durable structures, that have also lower CO₂ footprint, and are cost effective, is to combine different types of concretes in one element. This concept has been used for decades but as casting wet-on-dry, while very little has been done for the wet-on-wet technology. The results collected so far indicate that the concepts of using moving plate and dissolving meshes to cast two types of concretes at the same time are feasible. All concretes produced using the moving plate method showed excellent bond and mechanical performances. No cracks, higher porosity, or increased formation of Portlandite were observed in any of the studied combinations. The dissolving mesh concept is still at the very beginning, but the results showed its big potential and several benefits in comparison to the moving plate method. Tests will be continued in the second part of this PhD study where technology for casting full size elements will be designed and verified.

Sammanfattning

Mängden CO₂ relaterad till Portlandcement kan minskas genom att den delvis ersätts i betong med sekundära cementbaserade bindemedel; kalksten, masugnslag eller flygaska eller genom en fullständig ersättning med alternativa cement. Båda varianterna medför vissa begränsningar men också fördelar. Sådana betongar kan visa en långsammare hållfasthetsutveckling eller sämre hållbarhet. Den sämre hållbarheten kan relateras till mer porös mikrostruktur, bildning av faser som är mindre stabila och mer benägna att interagera med till exempel klorider eller CO₂.

En av lösningarna som gör det möjligt att producera hållbara strukturer, som också har lägre CO₂-fotavtryck och är kostnadseffektiva, är att kombinera olika typer av betong i ett element. Detta koncept har använts i årtionden men som gjutning våt-på-torr, medan mycket lite har gjorts för våt-på-våt-tekniken. De resultat som hittills samlats in indikerar att koncepten att använda rörliga plattor och upplösande nät för att gjuta två typer av betong samtidigt är genomförbara. Alla betongar som producerades med hjälp av den rörliga plattmetoden visade utmärkta bindnings- och mekaniska prestanda. Inga sprickor, högre porositet eller ökad bildning av portlandit observerades i någon av de studerade kombinationerna. Konceptet med dissolvingnät är fortfarande i början, men resultaten visade dess stora potential och flera fördelar jämfört med den meving plate-metoden. Testerna kommer att fortsätta i den andra delen av denna doktorandstudie där teknik för gjutning av fullstora element kommer att designas och verifieras.

Innehåll

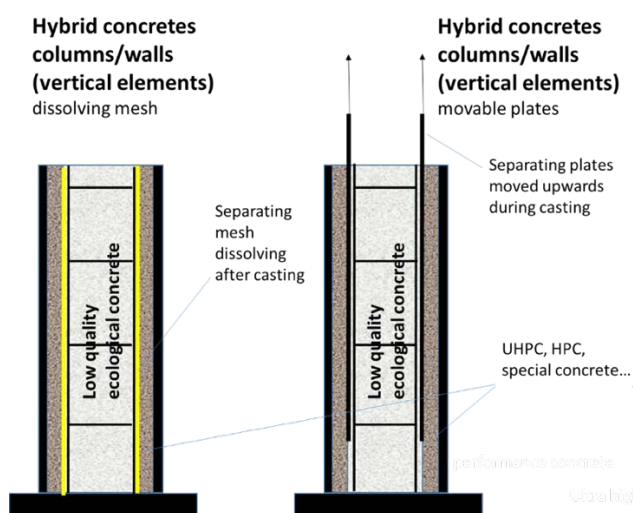
SUMMARY	1
SAMMANFATTNING	1
INNEHÅLL	2
BAKGRUND.....	3
SYFTE	3
METODER	4
UTFÖRDA UNDERSÖKNINGAR.....	5
SLUTSATSER	9

Bakgrund

Mängden_{CO2} relaterad till Portlandcement kan minskas genom att den delvis ersätts med sekundära bindemedel; kalksten, masugnslagg eller flygaska. Tyvärr kan det resultera i en långsammare hållfasthetsutveckling och sämre hållbarhet hos den producerade betongen. En annan, mer extrem men också effektivare metod är att helt ersätta Portlandcemenen med andra typer av CO₂-neutrala bindemedel.

Användningen av industriella biprodukter i samband med ett högt förhållande mellan vatten och cement ger ofta matriser, som är mekaniskt svaga och har mycket porös mikrostruktur som kan påverka hållbarheten negativt. Den sämre hållbarheten kan relateras till flera orsaker. Till exempel högre kapillärporositet, bildning av mindre kemiskt stabila hydratiseringsfaser, mindre bindningskloridförmåga eller högre karbonatisering som leder till ökad korrosionsrisk. En av lösningarna som gör det möjligt att producera hållbara strukturer som också har lågt CO₂ fotavtryck relaterat till material och är kostnadseffektiva är att kombinera olika typer av betong i ett element. Detta koncept har använts i årtionden men som gjutning våt-på-torr, medan mycket lite har gjorts för våt-på-våt-tekniken. Ett undantag är hög bärförmåga och golv med hög nötningsbeständighet.

Doktorandprojektet studerar teknik som gör det möjligt att kombinera två typer av betong som gjutna våt-på-våt i ett element. Det allmänna begreppet för den studerade metoden visas i Figur 1. Två koncept för produktion av pelare och väggelement med hybridbetongteknik studeras i detta projekt.1. Den första delen av detta projekt, vars resultat beskrivs i denna rapport, fokuserade på laborietester. Testerna utfördes vid Luleå tekniska universitet i samarbete med Skanska AB. Flera andra industripartners var involverade i projektet genom referensgruppen, dvs NCC, Swerock, RISE, Cementa.



Figur 1. Två koncept för produktion av pelare och väggelement med hybridbetongteknik studeras i detta projekt.1

Syfte

Doktorandprojektet fokuserar på en ny applikationsklar teknik som gör det möjligt att producera monolitiska betongplattor, väggar och pelare med två eller flera typer av betongblandningar gjutna samtidigt. Tekniken kommer att vara lätt att tillämpa och kommer att göra det möjligt för industrin att producera högkvalitativa, krävande hållbara betongkonstruktioner med mycket lågt CO₂-fotavtryck, goda mekaniska egenskaper, god hållbarhet och lång livslängd.

Metoder

Projektet startade med en omfattande litteraturstudie (WP1), som visade en mycket begränsad mängd tillgängliga data relaterade till våt-på-våt-tekniken och främst för golvkonstruktion. Testprogrammet för den experimentella delen av denna studie innehöll två huvudströmmar, tester med rörliga plattor och med upplösande nät. Alla tester utfördes i laboratoriet, men provstorleken varierade från små kuber till 1 meter höga stora tvärsnittskolonner (WP2 och WP3). De studerade betongarna inkluderade kombinationer av ultrahöghållfast betong (UHPC) med normalhållfasthetsbetong, UHPC med ekologisk betong innehållande 50 viktprocent slag (Merit 5000-typ). Alla testade betongar använde Portlandcement typ CEM I 42,5N (Anläggningscement). UHPC innehöll också kondenserad mikrokiseldioxid 920D från Elkem (Oslo, Norge), kalkstenspulver "Nordkalk Limus 40" från Nordkalk AB, Norquartz 45 från Sibelco Nordic (Lillesand, Norge) samt mikrosand B15 (150 µm) och B35 (350 µm) från Baskarpsand AB (Habo, Sverige). En polykarboxylatbaserad supermjukgörare typ "MasterGlenium ACE 30" från BASF (Rosersberg, Stockholm) tillsattes till alla betong. Stålfibrer med längder på 7 mm och 13 mm tillhandahölls av Krampe Harex-Germany (Hamm, Tyskland). Exempel på blandningsdesigner visas i tabell 1. *Tabell 11*

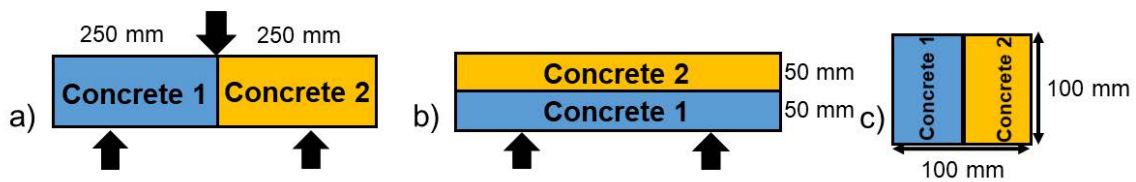
Tabell 11 Exempel på studerade betongkompositioner.

Ingrediens (kg/m ³)	NSC(N1)	NSC(N2)	BFSC(C2)	UHPC(U1)	UHPCF(U2)	S1
Cement (Cem I 42,5N)	400	360	200	680	664	
BFS			200			
Kiseldioxid Rök 920D				136	132.8	
Kalksten fyllmedel				680	664	
Kvarts fyllmedel			92	68	66.4	
Sand – B15	358	337	92	238	232.4	
Sand – B35				238	232.4	
Sammanlagt 0-4	1254	1179	1106			
Sammanlagt 4-8	179	168	553			
Stålfibrer 7 mm					66.4	
Stålfibrer 13 mm					99.6	
PCE - supermjukgörare	3	0.9	3	34	33.2	
Luft (%)	2	2	2	4	4	
w/c	0.45	0.65	0.4	0.3	0.3	

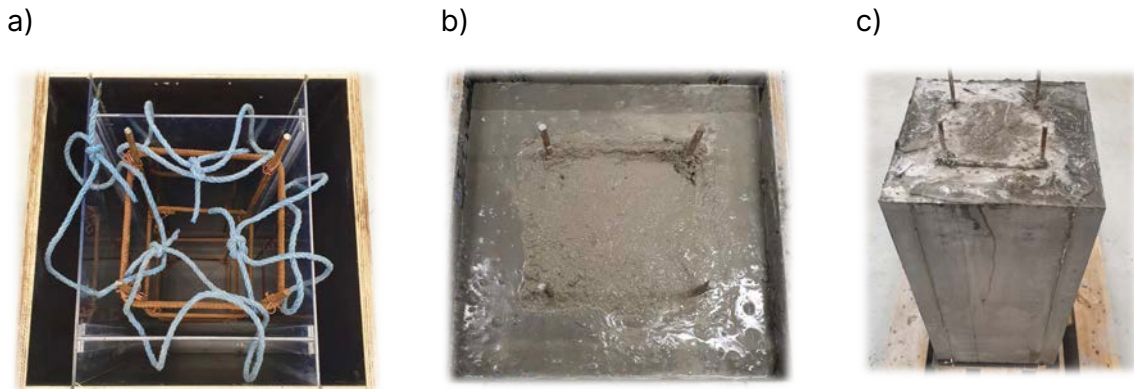
Självkompakterande betong levererad av en lokal entreprenör. W/C-förhållande på 0,42. Slumpföde på 750 cm

Arbetsförmåga (svacka eller svacka) cm	30	25	380	720	620
--	----	----	-----	-----	-----

Tester utfördes på små balkar och kuber där två typer av betong antingen i lager eller bredvid, figur 2. Vissa tester utfördes också på halvfullskaliga pelare där gjuttekniken med rörliga plattor verifierades. *Figur 2. Använd prover: a) balk med vertikalt arrangemang, b) balk med horisontellt arrangemang av lager, c) kub med vertikala arrangemang.* *Figur 3. Laborarieuppsättning för kolumn fortsättning och arrangemang för att flytta plattor.* *Figur 4. Gjutningsmetod som används för att bereda små prover för provning av upplösningsnätets prestanda.* *Figur 5. Gjutningsmetod som används för att bereda små prover för provning av upplösningsnätets prestanda.*



Figur 2. Använd prover: a) balk med vertikalt arrangemang, b) balk med horisontellt arrangemang av lager, c) kub med vertikala arrangemang.

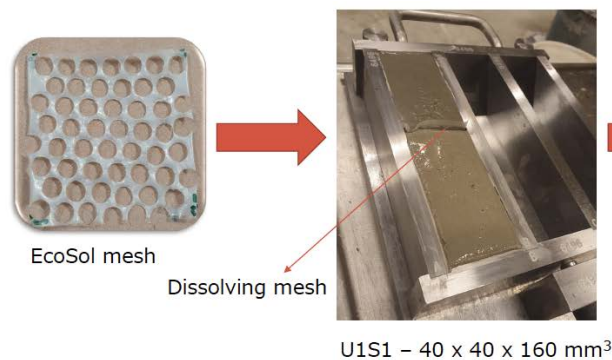


Formning före gjutning med förstärkning och rörliga plattor installerade

Klar kolumn av två typer av betong direkt efter gjutning.

Klar kolumn tillverkad i hybridtekniken

Figur 3. Laborarieuppsättning för kolumn fortsättning och arrangemang för att flytta plattor.

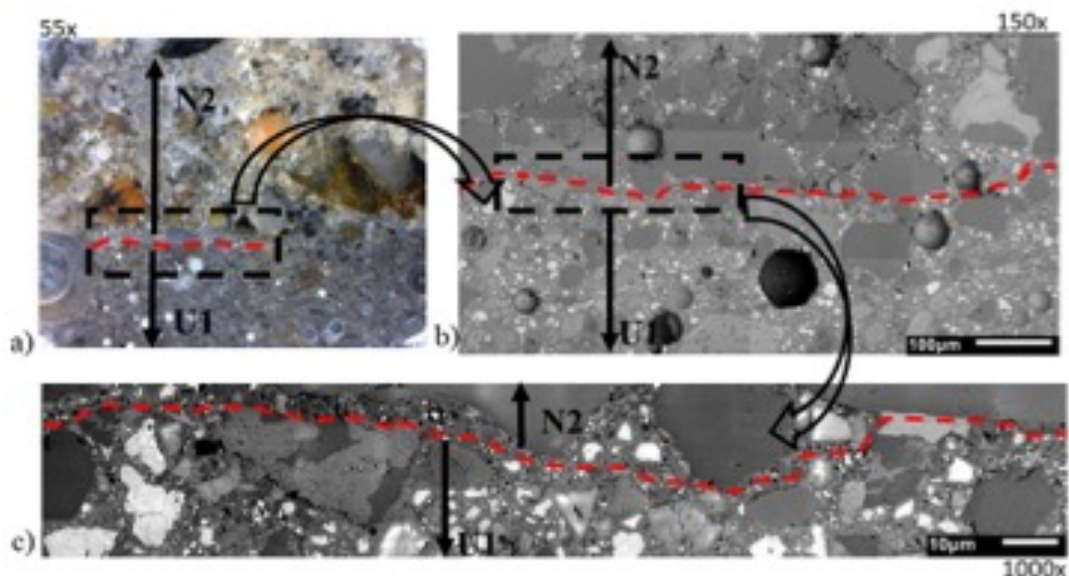


Figur 4. Gjutningsmetod som används för att bereda små prover för provning av upplösningens prestanda. 4

Utförda undersökningar

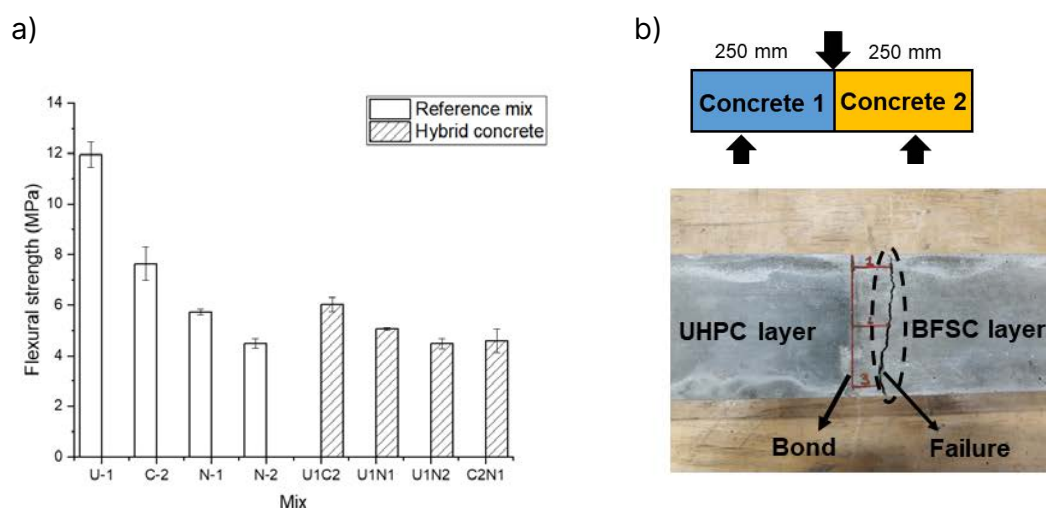
Det primära fokuset för denna del av doktorandstudien var att karakterisera övergångszonen som bildas mellan två typer av betong gjutna våt-på-våt. Detta inkluderade bestämning av bindningsstyrka, styrkan hos balkar gjutna från två betongar, mikrostruktur och kemisk sammansättning av övergångszonen.

Övergångszonens mikrostruktur bestämdes med hjälp av digitala och svepelektronmikroskop (SEM) kombinerat med energidispersiv spektrometer (EDS). Ingen av de studerade hybridbetongarna hade övergångszonen sprucken eller med ökad porositet. Hydratiseringsfaserna som bildades i den zonen tycktes övergå smidigt från en betongtyp till en annan. Exempelbilder, figur 5, visar en hybridbetong tillverkad av normalbetong (N2) och ultrahöghållfast betong (U1). Den första bilden som tagits vid förstoring på 55x visar tydligt färgskillnaden, gråare för UHPC på grund av närvaron av kiseldioxidrök. Denna skillnad gjorde det möjligt att hitta övergångszonen som senare studerades vid högre förstoringar i SEM. *Figur 5. Exempel på bilder av gränssnitt i hybridbetong mellan normal betong och UHPC, a) digital mikroskopförstoring x55, b) c) SEM-förstoringar på 150 och 1000x.5*



Figur 5. Exempel på bilder av gränssnitt i hybridbetong mellan normal betong och UHPC, a) digital mikroskopförstoring x55, b) c) SEM-förstoringar på 150 och 1000x.5

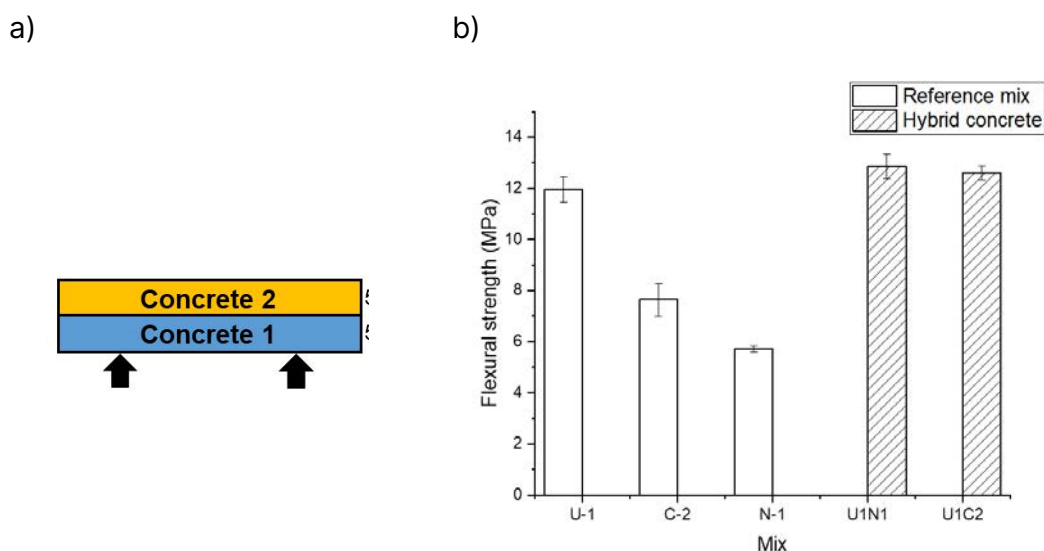
Mekaniska egenskaper bestämdes antingen vid kompression, böjning eller i utdragsprovning. I alla studerade fall inträffade felet i den svagare zonen, i princip ingen sprickas hade bildades i övergångszonen, Figur 6b. De registrerade böjhållfastheterna hos prover gjutna med Figur 6. Exempel på böjhållfastheter hos hybridbetong gjutna i det vertikala arrangemanget; a) U-1, C-2, N-1, N-2 betecknar referensbalkar gjorda av en typ av betong, medan U1C2 betecknar hybridbetong av betong U1 och C2, samma system användes för U1N1, U1N2, C2N1. Blandningssammansättning för alla blandningar finns i tabell 1, b) feltillstånd för vertikalgjuten hybridbetong (U1C2) efter trepunktsböjningstest. 6den vertikala anslutningen var aldrig lägre än styrkan hos den svagare betongen, figur 6a. Figur 6. Exempel på böjhållfastheter hos hybridbetong gjutna i det vertikala arrangemanget; a) U-1, C-2, N-1, N-2 betecknar referensbalkar gjorda av en typ av betong, medan U1C2 betecknar hybridbetong av betong U1 och C2, samma system användes för U1N1, U1N2, C2N1. Blandningssammansättning för alla blandningar finns i tabell 1, b) feltillstånd för vertikalgjuten hybridbetong (U1C2) efter trepunktsböjningstest. 6



Figur 6. Exempel på böjhållfastheter hos hybridbetong gjutna i det vertikala arrangemanget; a) U-1, C-2, N-1, N-2 betecknar referensbalkar gjorda av en typ av betong, medan U1C2 betecknar hybridbetong av betong U1 och C2, samma system användes för U1N1, U1N2, C2N1. Blandningssammansättning för alla blandningar finns

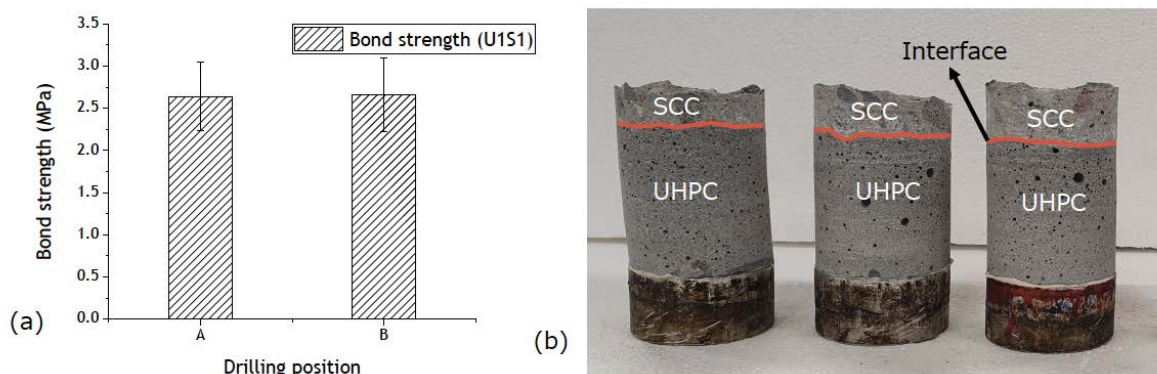
i tabell 1, b) fältillstånd för vertikalgjuten hybridbetong (U1C2) efter trepunktsböjningstest. 6

Böjhållfastheten hos balkar gjutna i horisontella skikt var som förväntat lika med styrkan hos det nedre skiktet beläget i spänningszonen, figur 7. Ingendera av de testade balkarna visade sprickbildning i övergångszonen, ingen delaminering observerades.



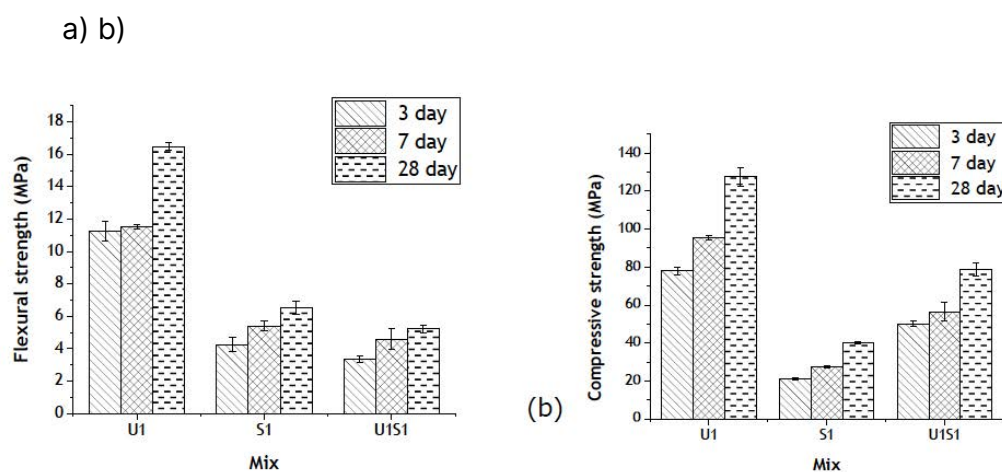
Figur 7. 28-dagars böjhållfasthetsresultat för provbalkar gjutna i två horisontella lager. I båda fallen var UHPC-betongen (U1) placerad längst ner på den böjda balken. a) arrangemang av lager, b) U-1, C-2, N-1 är referensbalkar gjutna med en typ av betong, U1N1 hybridbetong tillverkad av U1 och N1, U1C2, hybridbetong tillverkad av U1C2.7

Den utmärkta bindningsstyrkan bekräftades av ett direkt utdragningstest utfört på halvstorskaliga pelare gjutna med en rörlig plattmetod, figur 8. Figur 8. a) Dragning av test-bindningsstyrka utveckling av hybridbetong tillverkad av U1- och S1-betong. Kärnor togs från två platser markerade som A och B, b) Fel monde av testprovet efter dragning av testet. Styrkan var densamma på alla testade platser. Felet inträffade alltid i den svagare betongen. I detta fall göts SCC-betong som levererats av en extern entreprenör in i den stålförstärkta kolumn. Detyttre skiktet var tillverkat av UHPC-betong U1.



Figur 8. a) Dragning av test-bindningsstyrka utveckling av hybridbetong tillverkad av U1- och S1-betong. Kärnor togs från två platser markerade som A och B, b) Fel monde av testprovet efter dragning av testet.8

Studier relaterade till upplösningsnätmetoden begränsades till att testa en annan typ av material och bestämma deras löslighet i färsk betongmiljö. Ett material med ett kommersiellt namn EcoSolFilm visade de bästa prestanda och valdes för vidare testning. Bindningsstyrkan verkade endast vara något lägre än den svagare använda betongen, figur 9. Ytterligare tester kommer att utföras på större element och i full skala i den andra delen av detta doktorandprojekt. Böjhållfastheten bestämdes på referensbalkar av U1 och S1 och balkar av hybridbetong av U1 och S1. Den uppmätta hållfastheten var cirka 20 % lägre vid mätning efter 28 dagar jämfört med referensen svagare S1-betong. Mikroskopianalysen visade att en del av film inte var helt upplöst och förblev övergångszonen, vilket försvagade den. EcoSolFoilm kommer att undersökas ytterligare i nästa del av detta projekt.



Figur 9. Mekaniska egenskaper hos hybridbetong gjuten i vertikalt arrangemang där en EcoSolFilm används som ett separerande nät a) böjhållfasthet b) tryckhållfasthet.9

Slutsatser

Litteraturstudien (WP1) bekräftade att gjutning av två betongar som våt-på-våt huvudsakligen används för industrigolv med hög belastning eller nötningsbeständigt. Analys hittade inte väsentlig information relaterad till det studerade här-konceptet.

Den utförda experimentella forskningen (WP2) och dataanalysen (WP3) levererade avgörande data som kommer att användas under det fortsatta arbetet som planeras för den andra delen av detta projekt. De viktigaste resultaten kan sammanfattas enligt följande för de två studerade metoderna:

Metod med rörlig platta:

- Alla betongar som producerades med hjälp av den rörliga plattmetoden visade utmärkt bindning och goda mekaniska prestanda.
- Inga sprickor, högre porositet eller ökad bildning av till exempel Portlandit observerades i de bildade övergångszonerna.

- Dessa resultat gör det möjligt att anta att strukturer gjorda med denna metod kommer att visa en utmärkt långsiktig hållbarhet och strukturell prestanda.

Upplösning nätmetod:

- Problem att hitta ett material som skulle ha tillräcklig styrka men skulle lösas upp i den färska betongmiljön.
- Det bästa materialet som testades var EcoSolFilm och hybridbalkar gjutna med det materialet visade 20% lägre böjhållfasthet efter 28 dagar jämfört med den svagare betongen.

Forskning/tester som planeras för den andra delen av detta projekt:

- Förfina den utvecklade tekniken för användning i fullskaliga applikationer – tester med stora element, möjliga på en byggarbetsplats
- Ytterligare laborietester med upplösningssnät följt av gjutning av större element.
- Begränsade hållbarhetstester
- Förberedelse av doktorsavhandling, disputation i kombination med en avslutande workshop av projektet

Litteratur

Telhaj, K. "Hybridbetong", LTU – Ordförande för Byggmaterial, Halvtidsrapport. 30p.
Telhaj, Klaudja, Hans Hedlund och Andrzej Cwirzen. 2022. "Hybrid Interfacial Transition Zone between Wet-On-Wet Casted Concrete-Microstructure and Mechanical Properties" *Material* 15, nr 19: 6511. <https://doi.org/10.3390/ma15196511>
Telhaj, K, 2023, "Hybrid Concrete", Mid-term report, LTU, Subject of Building materials