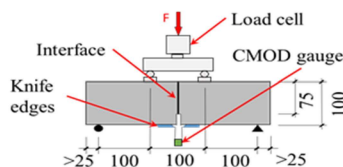
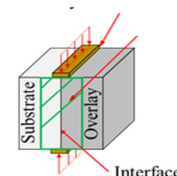
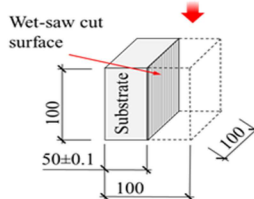
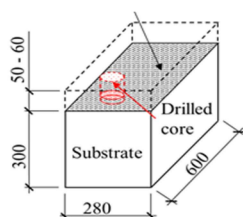


# SLITBETONG PÅ BROBANEPLATTOR

*Vidhäftning mellan pågjutning och underlag*



**Mats Emborg, Ulf Ohlsson, Martin Nilsson**

**2022-03-01**

# FÖRORD

Föreliggande rapport redovisar delresultat i anknytning projekt 1338 ”*Slitbetong på brobaneplattor - Grundläggande forskning som bas för högpresterande och robust lösning*”, som tidigare redovisats. Syfte för det övergripande projektet har varit att adressera de utmaningar som finns för att säkerställa funktion och livslängd hos slitbanebetong, dvs. hög beständighet, låga bygg- och underhållskostnader samt optimerad betong med hänsyn till konstruktiv prestanda. Projekt 1338 har utförts bl a genom samverkan med doktorandprojekt vid Luleå Tekniska Universitet med finansiär även från Trafikverket.

I detta delprojekt har fokusering skett på vidhäftningsegenskaper mellan slitbetongen och underliggande konstruktionsbetong. Delsyftet har varit att klargöra egenskaperna i förbandet för ett antal varianter av betongval, härdning och behandling underbetong.

Projektet är finansierat med medel från Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF) samt genom fakultetsmedel vid Luleå Tekniska Universitet.

Vi vill rikta ett stort tack till SBUF för det finansiella stödet samt till NCC, för intresse under initieringsprocessen och för aktivt deltagande under arbetets gång.

Arbetsgruppen,

Mats Emborg, professor, Ltu /Betongindustri AB

Martin Nilsson, biträdande professor, Ltu

Ulf Ohlsson, universitetslektor, Ltu

Wojciech Cyron, fd doktorand, Ltu

Ludvig Lundström, examensarbetare, Ltu

Luleå, mars 2022

# SAMMANFATTNING

Den direktgjutna slitbetongen till en brobanepatta ska framför allt möta allmänt ställda krav på hållfasthet, speciellt slitstyrka, och beständighet. Till detta adderas flera andra funktioner i kravställningen: jämnhet för trafikanternas komfort, planhet och lutning för vattenavrinning, friktion för väggrepp och halksäkerhet, skydd för konstruktionsbetongen mot vatten, fukt och salt. Vidare tillkommer andra värdefulla funktioner påverkande materialval, t.ex. liten bulleralstring vid trafikering, ljushet för synbarhet och därigenom minskade energikostnader för belysning, samt lägre partikelalstring.

De krav som råder för den direktgjutna slitbetongen med hänsyn till exponering är samma som för tösaltade konstruktioner; XD3, XF4 och frysprovad. Kraven låser i viss mån betongval liksom bindemedelskombination.

Det har tidigare identifierades ett antal kunskapsluckor och frågeställningar kring den direktgjutna slitbetongen, se huvudprojektets slutrapport SBUF (2021): a) hur ska man åstadkomma perfekt vidhäftning mot underbetongen? b) hur inverkar ofullständig härdning av pågjutningen risken för krympsprickor? c) vilken betong är lämplig? d) vilken fibermängd är egentligen nödvändig?

Forskningsprojektet ringade in frågorna och genomförde laboratoriestudier, teoretiska analyser, litteraturstudier och fullskaleobservationer, se SBUF (2021). En slutsats från arbetet är att slitbetongens funktion och livslängd är starkt förknippade med hur tidiga belastningar under härdningen kan hållas i schack och hur de hanteras om de blir ohälsosamt stora. En sådan tidig belastning är krympning. Omfattande studier skedde därför inom huvudprojektet för att utröna krympningens storlek och tidsförlopp samt dess inverkan på funktionen hos slitbetongen. Fältstudier genomfördes för att verifiera utförandet. I laboratoriet skedde mätningar av tvångspänningar där pågjutning simulerades. Materialförsök utfördes. Finita elementberäkningar genomfördes för att simulera lastfallet. Olika antaganden om vidhäftning gav underlag till teoretisk modellering av skeendet vid belastning av normalkrafter och skjvukrafter.

Projektet visade, att på samma sätt som krympningen, utgör vidhäftningen mot underbetongen en avgörande faktor för ett lyckat resultat. God vidhäftning är helt enkelt en basal förutsättning för tillfredställande sprickfördelning – om pågjutningen spricker upp – och en förutsättning för att inte kantresning uppstår eller t.o.m. förödande delaminering.

Utförandet ska säkerställa att god vidhäftning erhålls, god homogenitet fås i pågjutningen men framförallt att inte sprickor och andra olägenheter uppträder. En omsorgsfullt planerad och väl genomförd gjutning av slitbetongen är således ”a och o” för ett lyckat resultat.

I det projekt som redovisas här har fokus varit att detaljförstå och dokumentera vidhäftningsegenskaper för olika härdningssituationer och att utreda vilka åtgärder som kan vidtas för att säkerställa vidhäftningen.

Tre olika typer av provkroppar provades: plattor, kuber och balkar med etablerande av gränssnitt för att simulera pågjutningssnitt. Det varierades konsistens pågjutningsbetong, behandling av

konstruktionsbetongs yta och härdning av denne. För plattor skedde gjutning av underbetong i olika omgångar och gjutning av slitbetong utfördes efter en vecka. Kuber och balkar gjöts i två omgångar där ena halvan av provkroppen fylldes med konstruktionsbetong och andra halvan med slitbetong en vecka senare.

Provningar skedde genom enaxiellt utdragsförsök efter utborrning av provcylinder, spräckhållfasthetsprovning genom applicering av last i gränssnittet mellan kubhalvorna och genom balkböjning där en spricka sågats i underkant precis i gränssnittet.

Resultaten från de olika provningsmetoderna skiljer sig markant mellan provningarna, speciellt hos de ytor som behandlats med ytretarder för att erhålla en rå yta. Olika tendenser erhöles som i viss mån var inte var förväntade.

Intressanta frågor var t ex om uppställda krav på vidhäftningshållfasthet kunde uppnås. Slätbehandlade ytor klarar kriteriet. Rågjorda ytor med ytretarderande medel gav vidhäftningshållfasthet som inte med säkerhet kunde uppfylla kravet.

Framtida studier föreslås, t ex att undersöka hur vidhäftningen påverkas av förändrad viskositet hos slitbetongen och effekt av förvattning av underliggande betong. Olika härdningsbetingelser av såväl konstruktionsbetong som slitbetong är alltid intressanta att undersöka.

# INNEHÅLL

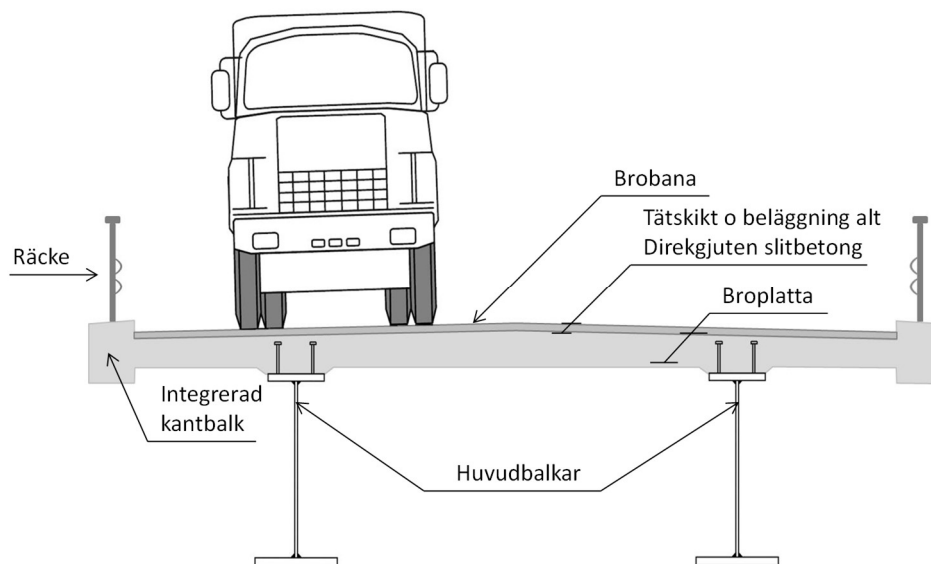
<b>1</b>	<b>INLEDNING</b> .....	<b>1</b>
1.1	BAKGRUND .....	1
1.2	HUVUDPROJEKT .....	3
1.3	SYFTE OCH MÅL .....	5
<b>2</b>	<b>METOD</b> .....	<b>6</b>
2.1	ALLMÄNT .....	6
2.2	LITTERATURSTUDIE OCH INLEDANDE REFLEKTIONER .....	7
2.3	LABORATORIEFÖRSÖK .....	7
2.3.1	<i>Vidhäftning</i> .....	7
2.3.2	<i>Provkroppar</i> .....	9
2.3.3	<i>Betong</i> .....	11
2.3.4	<i>Provning</i> .....	12
2.4	YTRÅHET .....	14
<b>3</b>	<b>VIDHÄFTNING</b> .....	<b>15</b>
3.1	ÖVERSIKT .....	15
3.2	KRAV PÅ PÅGJUTNINGAR .....	18
3.3	PROBLEMATISERING .....	18
<b>4</b>	<b>RESULTAT</b> .....	<b>20</b>
4.1	BETONGEGENSKAPER .....	20
4.2	YTRÅHET .....	21
4.3	VIDHÄFTNING .....	22
<b>5</b>	<b>KOMMENTAR VIDHÄFTNINGSPROVNING</b> .....	<b>26</b>
5.1	INLEDANDE KOMMENTARER .....	26
5.2	UPPNÅS KRAV? .....	27
<b>6</b>	<b>DISKUSSION OCH SLUTSATSER</b> .....	<b>29</b>
6.1	ALLMÄNT .....	29
6.2	UTFÖRDA VIDHÄFTNINGSFÖRSÖK .....	29
6.3	FÖRSLAG PÅ FRAMTIDA STUDIER INOM DELOMRÅDE VIDHÄFTNING .....	31
<b>7</b>	<b>LITTERATURFÖRTECKNING</b> .....	<b>33</b>

# 1 INLEDNING

## 1.1 Bakgrund

Brobanepattan, figur 1.1, är logiskt en av de viktigaste brodelarna med tanke på dess exponering. Den ska ta upp och distribuera trafiklaster till det underliggande bärverket under stundtals kraftig exponering av fukt, kyla och tössalter och det är viktigt att dess funktion säkerställs under brons hela livstid.

Den traditionella lösningen på brons överytan har varit med asfalt och tätskikt, figur 1.2. Denna har dock stundtals resulterat i problem och skador, t ex blåsbildning och otätheter innebärande vatten- och kloridläckage in i konstruktionsbetongen. Tyvärr har man, trots stora utredningsinsatser, inte nått full förståelse för mekanismerna bakom problemen, Edwards (2011). Dessutom är utförandet av lösningen komplext och dyrbart.



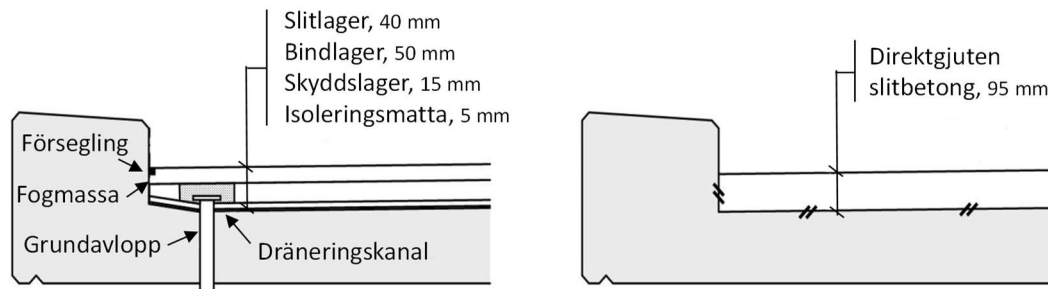
Figur 1.1. Brobanepatta, exempel på utformning, från Sundquist (2011)

Slitbetong utan tätskikt är ett alternativ till tätskiktalternativet; som en efterföljande pågjutning på konstruktionsbetongen eller som en betong direktgjuten vått i vått, se figur 1.2. Mer än 500 broar har denna lösning i Sverige, både vid nybyggnation och reparation av asfaltbeläggning; flera med mycket gott slutresultat, se figuren.

Lösningen med direktgjuten slitbetong:

- är miljövänlig (inga epoxiprimrar, inga öppna gaslägor vid applicering av tätskikt, lång livslängd, mindre trafikbuller)
- är kostnadseffektiv (lägre underhåll, mindre trafikstörningar, robustare lösning) har inga dräneringskanaler (funktionsproblem undviks)
- har längre säsong för genomförandet
- ger en ljusare beläggning (optisk fördel för trafikanter)

- ger en ärlig och robust yta där alla eventuella skador och förändringar kan observeras vid inspektion
- minskar antalet arbetsmoment vid byggandet



*Figur 1,2. Typiska lösningar för brobanepaltor (övre) lyckad brobanereparation med direktgjuten slitbetong på bro i närheten av Lycksele, 2015, (mellan). Inspektion av forskare LTU fem år senare – inga sprickor eller skador observerades (nedre).*

En del tveksamhet finns dock till betongalternativet bl. a genom att det varit behäftat med vissa brister vars orsaker har varit mindre väl utredda och kända. T ex har man inte varit nöjd med slutlig kvalitet gällande jämnhet, slitstyrka och förekommande sprickbildning.

För betonglösningen är det viktigt att ta hänsyn till eventuellt uppkomna sprickor och vidhäftningssläpp beroende på krympning och temperatureffekter. Generellt kan inte sprickor accepteras för betongkonstruktioner av beständighets- och funktionsskäl och detta gäller givetvis även här. Figur 1.3 visar de fenomen som kan inträffa generellt hos pågjutningar utsatta för ojämn tempereratur- och fuktprofil.

En annan viktig faktor för den direktgjutna betonglösningen är jämnhet och möjlighet att använda stålfibrer i kombination med självkompakterande betong, se t ex utredning av Carlswärd & Emborg (2014a, b) och det utmärkta examensarbetet av Jannok (2004) där det visas hur man kan få hög kvalitet med stålfiberarmerad självkompakterande betong, figur 1.4.

Det är rätt anmärkningsvärt att, trots att lösningen har använts i så många broar i Sverige och många fler utanför våra gränser, finns det en kunskapsbrist beträffande utformning, utförande och reparation/underhåll. Följande uppmärksammas:

- Information beträffande utförda broar brister, se t ex Sundquist (2011)
- I de fall skador uppkommit finns det endast knapphändiga uppgifter om orsaker.
- Osäkerheter föreligger beträffande betongutformning, armering och vidhäftning.
- Optimal gjutmetod och härdningsmetod är inte klarlagda.
- Möjligheten att mer utbrett använda självkompakterande betong är inte utredd.

Forskningsbehovet är nu än tydligare genom att man bör ta hänsyn till framtida betongkvaliteter med lägre belastning på arbetsmiljö och global miljö. Vi syftar här på betong med alternativa bindemedel, självkompakterande betong och högpresterande betong. Det finns därför en extra anledning att lösa frågeställningarna och undvika olägenheter, t ex de i figur 1.3.

## 1.2 Huvudprojekt

I ett doktorandprojekt, finansierat av SBUF (nr 13338) och Trafikverket (FOI BBT 2015-18), utvecklades nya metoder och material för slitbetongen. Forskningsdelen av arbetet planeras att delredovisas i en licentiatavhandling. Slutrapport redovisas som nämnts i SBUF (2021).

Huvudprojektet har haft som mål att bl a kartlägga tillstånd/kvalitet hos utförda broar, förstå och studera utformning av slitbetongen för de laster som uppträder, undersöka inverkan av nya betongblandningar och kartlägga optimala metoder för gjutning och härdning.

Projektet har inbegripit laboratoriestudier, teoretisk analys och fältstudier där första delen av projektet ägnats åt att studera kraftspelet i slitbetongen när den utsätts för temperaturrörelser och krympning.

En inventering har skett av ett antal broar med slitbetong i Västerbotten och Norrbotten och analyser genomfördes av tänkbara effekter som kan uppkomma efter gjutningen.



Långtidskrympningen identifierades som en sådan effekt och fokusering har skett på dess inverkan på vidhäftningsbrott (dvs. släpp), uppsprickning och kantresning.

Carlswärds arbete har visat att sprickvidder i pågjutningar verkligen kan styras genom inblandning av fibrer och med noggrann fukthärdning av den tidigare gjutna motgjutningsytan samt av den nygjutna betongens yta, vilket har observerats tidigare se t.ex. Groth (2000).

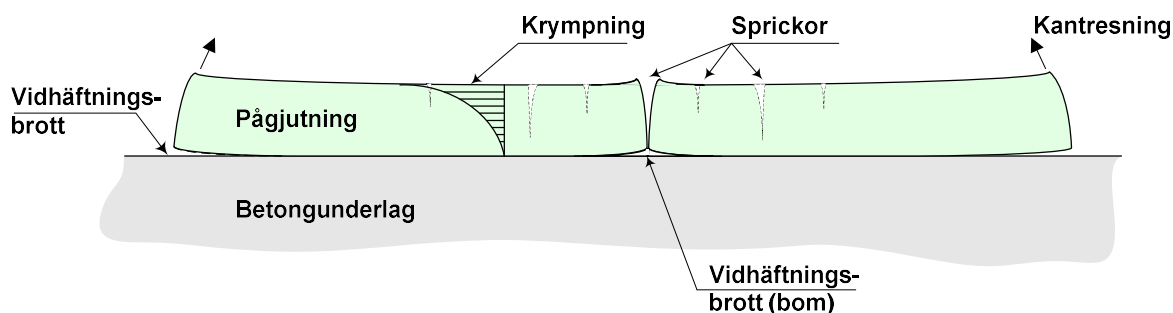
I Sverige finns ett antal rapporter och interna dokument vid TRV om slitbetong eftersom lösningen har rönt intresse i många år. Utförandet har studerats i ett flertal fullskaleprojekt och rapporter/texter har tagits fram, se t.ex. Lindqvist (1998). I den sistnämnda inventeringen observeras att dokumentation av utförande tyvärr är mindre omfattande.

Arbetet kan sammanfattas att det i de flesta fall går att åstadkomma ett högkvalitativt slutresultat, dvs. en slitbetong, mötande krav på funktion och lång livslängd förutsatt att man (SBUF (2021)):

1. behandlar underliggande betongyta korrekt så att god vidhäftning säkerställs
2. tidigt skyddar den nygjutna slitbetongen så att inte plastiska sprickor uppkommer
3. säkerställer att god härdning sker av slitbetongen så att hållfastheten tillväxer snabbt och krympningen sker långsamt
4. optimerar betongrecept för att åstadkomma långsam krympning med lågt slutkrympvärde, samtidigt som man uppfyller krav på exponering, nötning och allmän funktion
5. lägger in sprickarmering i de fall där behov finns

En viktig förutsättning är dessutom att kunskap finns om hur man hanterar väderleksförhållanden vid gjutning och månaderna efteråt.

Arbetsgruppen kom tidigt fram till att en mycket viktig parameter i sammanhanget är nr 1 ovan – *vidhäftningen*. Det goda slutresultatet förutsätter helt enkelt en i de närmaste perfekt vidhäftning mot konstruktionsbetongen. Då fås hälsosam fördelning av eventuellt uppkomna sprickor av krympning och temperaturrelaterade. Kantresning i ändrar av gjutetapper och kring sprickor förhindras och rena vidhäftningsbrott ("bom") förekommer inte alls. Misslyckas man däremot med vidhäftningen ökar sannolikt risken för fatala skador, kostsamma reparationer efter färdigställande och svårigheter att uppbringa funktion under livslängd, trots intensivt underhåll.



Figur 1.3. Schematisk skiss över de olika fenomen och skador som kan inträffa hos en pågjutning på konstruktionsbetong, Carlswärd (2006).



*Figur 1.4 Gjutning av självkompakterande slitbetong med en försiktig ytvibrering i två omgångar, Jannok (2004).*

### 1.3 Syfte och mål

*Syftet* med aktuellt projekt är att klargöra vidhäftningsegenskaper i förbandet mellan slitbetong underliggande konstruktion för ett antal varianter av betongval och behandling underbetong, adresserande frågeställningarna ovan. Förutom direkt information om mest optimal lösning syftar arbetet även till att ge basal kunskap till fortsatta studier.

*Projekt*mål var att ta fram vidhäftningsegenskaper vid variation av betongkvaliteter för slitbetong och underbetong (3 av varje), ytbehandlingsmetod (4 st) och härdningsmetod (minst 3).

Ett tillkommande mål identifierades till att analysera inverkan av de framtagna resultaten på övergripande funktion av slitbetongen; framför allt effekter av krympning.

## 2 METOD

### 2.1 Allmänt

Följande delmoment ingick i initial plan:

*Utgångspunkt.* Arbetet startas upp genom en sammanställning av tidigare genomförda vidhäftningsstudier; av speciellt intresse är givetvis dokumentation från slitbetongsgjutningar. Huvudfrågan är hur man har åstadkommit perfekt vidhäftning och under vilka situationer vidhäftningen har varit undermålig.

*Laboratorieförsök.* Baserat på litteraturstudien planerades försöksserier i laboratoriet. Intressanta parametrar att undersöka är behandling av konstruktionsbetong, slitbetongens kvalitet och sammansättning liksom motsvarande för underbetongen samt härdning.

*Modellering.* Försöksresultaten planerades att utvärderas och sammanställas. Värden på vidhäftning ges som indata till beräkningar med FEM-program i doktorandarbetet som inriktas till bl a känslighetsstudier vid exponering av krympning och temperaturrelater.

*Långtidsstudier.* Det planerades även att lagras provkroppar under längre tid i mer aggressiv miljö i syfte att dokumentera eventuell påverkan på vidhäftning. Kommer att ingå i det fortsatta arbetet.

*Rapportering.* Resultaten från laboratorieförsöken ger ett tillskott till underlag för formulering av rekommendationer av optimal ytbehandling, betongval och härdning.

Kommentar 1: Nyttjande av laboratorieförsöken vid FEM beräkningar genomfördes i viss mån. I huvudprojektet valdes att utföra kompletterande studier av fallet med direktgjutning för att kalibrera den FE modell som användes. Dessa försök har tyvärr blivit försenade. Under våren 2022 avses försöken genomföras så att modellen kan förfinas. Då kan resultaten från dessa laboratorieförsök tas in.

Kommentar 2: Långtidsstudierna blev inte genomförda. Det bedömdes bl a vara mycket svårt att simulera de förhållande som råder i en brobaneplatta efter gjutning, speciellt under första månaden efter gjutning då de största krafterna uppträder. Detaljstudier och avväganden hade behövts göras så att rätt miljö kan åstadkommas i laboratoriet.

## 2.2 Litteraturstudie och inledande reflektioner

Inventering av fenomenet vidhäftning skedde inledningsvis, se kap 3.

## 2.3 Laborrieförsök

### 2.3.1 Vidhäftning

Vidhäftningshållfastheten i betongfogar kan undersökas med ett flertal metoder där vissa är genomförbara i direkt anslutning till betongkonstruktionen medan andra kräver försöksuppställningar i laboratorium, se Silfwerbrand (2003) och figur 2.1.

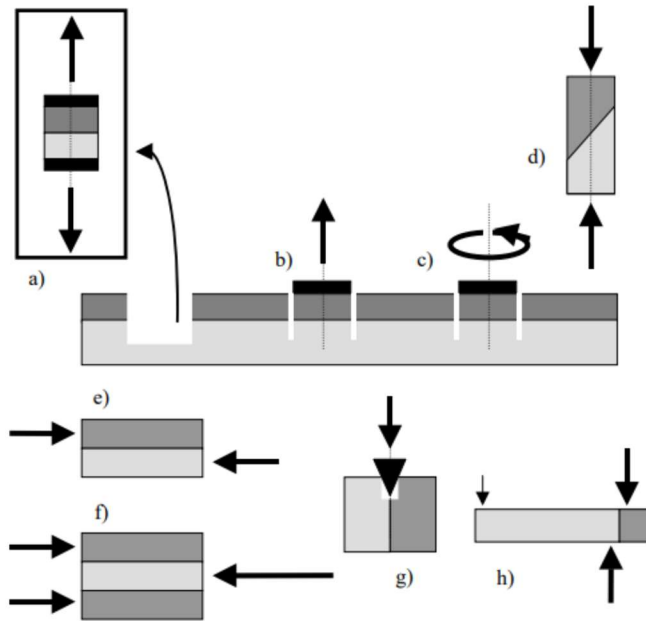
Den mest förekommande är dragförsök där en kärna borrar i betongen som antingen knäcks lös och testas i lämplig apparat genom axiell dragning, se figur 2.1a eller att kärnan sitter kvar i betongen och en lastanordning placeras ovanför kärnan som påför en dragkraft, figur 2.1b.

Figur 2.1g illustrerar kilspräckprovning för ett pågjutet element. Kilspräckprovning för enkla betongelement beskrivs t ex i Brühwiler och Wittmann (1990) som en metod som både mäter sprickviddsutvecklingen och spräckkapaciteten hos försöksobjektet. En variant av kilspräckprovning är att påföra krafter på samma sätt som vid spräckprovning av kuber för att erhålla draghållfasthet. Kuberna gjuts i två omgångar med konstruktionsbetong respektive pågjutning där vertikalt gränssnitt representerar fogen.

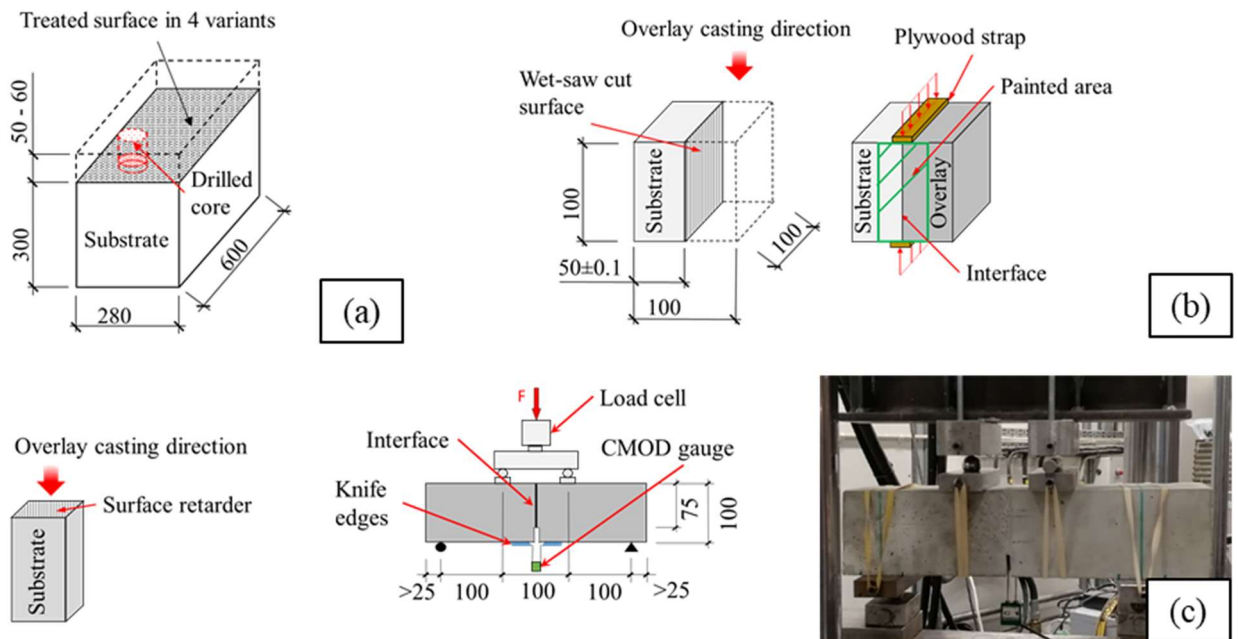
En mycket intressant metod är att nyttja teknik för undersökning av brottmoment vid balkböjning. En fyrpunktsböjning medför ett konstant moment i mittsektionen där man kan etablera en brottanvisning – en skåra sågas i undersidan. Härigenom medges en kontrollerad styrning av balkförsöket genom att sprickviddens öppning elektroniskt kontrolleras i försöket. Den ökar med en viss hastighet. Last avläses som funktion av sprickvidd och brottmekaniska egenskaper kan studeras och analyseras. I detta fall gjuts balken i två omgångar där det vertikala gränssnittet representerar fogen, dvs på samma sätt som i spräckförsöket.

I denna undersökning valdes att kombinera undersökningen med rent dragförsök, spräckförsök och balkböjning, se figur 2.2 och SBUF (2021).

Variation skedde av ytbehandling av konstruktionsbetong, konsistens hos pågjutningsbetong och härdning av denna. Dessutom studerades effekt av fibertillsättning. Variationerna valdes bl a med hänsyn till ofta förekommande situationer, se även kap 3.



Figur 2.1. Vidhäftningshållfashet, försöksmetoder: a) dragförsök i laboratoriemiljö, b) dragförsök på plats, c) rotationstest på plats, d) lutande skjuvtest, e) och f) skjuvtest g) kilspräcktest och h) giljotintest, från Silfwerbrand (2003).



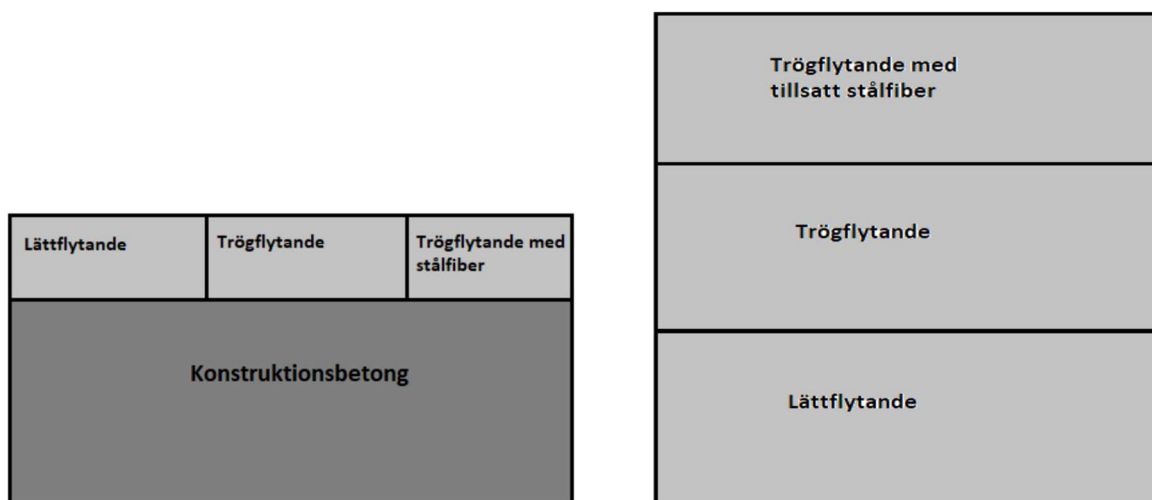
Figur 2.2 Laboratorieförsök: a) utdragsförsök borrkärnor, b) spjälkningstest kuber, c) fyrpunkts böjtest där kontrollerad styrning sker genom givare i sprickan (CMOD).

### 2.3.2 Provkroppar

För att undersöka vidhäftningshållfastheten gjöts således tre olika provkroppar; plattor, kuber och balkar med etablerande av gränssnitt enligt figur 2.2.

Fem *plattor* tillverkades med basarea 1000x1000 mm och tjocklek 300 mm varpå sedan ett 100 mm tjockt lager av självkompakterande betong gjöts. Tjockleksfördelningen av betongen hos plattorna liknas den hos en platsgjuten farbana för en betongbro.

Pågjutningslagret delas in i tre lika stora delar och pågjutningsbetongens konsistens varierar över de tre delarna. En tredjedel består av mer lättflytande självkompakterande betong, en tredjedel av mer trögflytande betong och den sista tredjedelen av stålfiberarmerad trögflytande betong, figur 2.3.



Figur 2.3. Uppbyggnad av plattor för konstruktionsbetong,  $1 \times 1 \text{ m}^3$ ,  $d = 300 \text{ mm}$  samt pågjutning  $d = 100 \text{ mm}$ , för undersökning genom dragförsök; sidovy och elevation.

För de fem plattorna varierades, se tabell 2.1:

- Yta konstruktionsbetong: rågjorda eller slät, samt ytretarderande medel
- Härdning av pågjutning

Med kombination av konsistens och fibertillsättning enligt figur 2.3 fås flera parameterkombinationer att undersökas.

Tabell 2.1. Provkroppar plattor med pågjutning: härdning, ytbehandling och konsistens

Platta	Ytbehandling K-betong	Härdning K-betong	Konsistensklass K-betong	Konsistensklass Slitbetong *
1	Svag retarder	Plastfolie	S3	SF1- SF2
2	Stark retarder	Plastfolie	S3	SF1- SF2
3	Svag retarder	Vatten	S3	SF1- SF2
4	Stark retarder	Vatten	S3	SF1- SF2
5	Slipas slät		S3	SF1- SF2

\*) varierades genom att gjutning fördröjdes för två ytor, se figur 2.3.

Beträffande *kuber* gjutna i två omgångar (figur 2.2) utfördes sju varianter av härdning och ytbehandling av gränssnitt efter första gjutning, se tabell 2.2. Konstruktionsbetongen respektive slitbetongens konsistens var S3 resp SF2 i alla fall.

Tabell 2.2. Tillverkning kuber 100 x 100 mm<sup>2</sup> för spräckprov. 3 kuber per variant provades.

Variant	Härdning	Ytbehandling
1	Vatten	Svag retarder
2	Vatten	Stark retarder
3	Plastfolie	Svag retarder
4	Plastfolie	Stark retarder
5	Plastfolie + vatten	Svag retarder
7	Ingen	Svag retarder
9	Plastfolie	Kapad slät

Beträffande *balkar* tillverkades femton balkar 380 x 100 x 100 mm<sup>2</sup> med vertikalt gränssnitt enligt figur 2.2 genom att balkarna gjöts i två omgångar med respektive betong enligt tidigare. Skåran sågades upp till ett djup av 25 mm och en vidd av 5 mm dagen innan provning på vilken givare typ CMOD för mätning och styrning monterades. Detta är ett standardförfarande för dokumentation av böjhållfasthet, brottseghet och i slutändan brottenergi.

Variationer balkar ges i tabell 2.3. Konstruktionsbetongen respektive slitbetongens konsistens var S3 resp SF2 i alla fallen på samma sätt som ovan.

Tabell 2.3 Balkprovning av böjhållfasthet, brottseghet och brottenergi. Tre balkar per variation.

Balktyp	Härdning	Ytbehandling
1	Plastfolie	Svag retarder
2	Plastfolie	Stark retarder
3	Vatten	Svag retarder
4	Vatten	Stark retarder
5	Plastfolie	Kapad slät

### 2.3.3 Betong

Gjutning skedde vid tio olika tillfällen där en platta, tre balkar och minst tre kuber som testas för samma härdnings-/behandlingsmetoder tillverkades vid samma tillfälle från samma blandning. Samtidigt gjuts kuber för att kontrollera hållfasthetsutvecklingen hos betongen. Eftersökta egenskaper hos betongen presenteras i tabell 2.4. Motsvarande recept ges i tabell 2.5.

Standardmässig förfarande skedde vid blandning och gjutning av betongerna. För att åstadkomma de tre varianterna av pågjutning lät man betongen vila för åstadkomma en trögflutenhet varefter fiberdoserades i sista pågjutningen. Pågjutningen skedde 7 dygn efter det att konstruktionsbetongen hade gjutits.

Tabell 2.4 Eftersökta betongegenskaper

	Hållfasthet	Konsistens	d <sub>max</sub>	vct	Lufthalt
Konstruktionsbetong	C35/45	S3	32 mm	0,4	
Slitbetong	C35/45	SF3	16 mm	0,4	> 3,5 %

Tabell 2.5 Betongrecept, konstruktionsbetong (vä) resp slitlagerbetong (hö), från Lundström (2021)

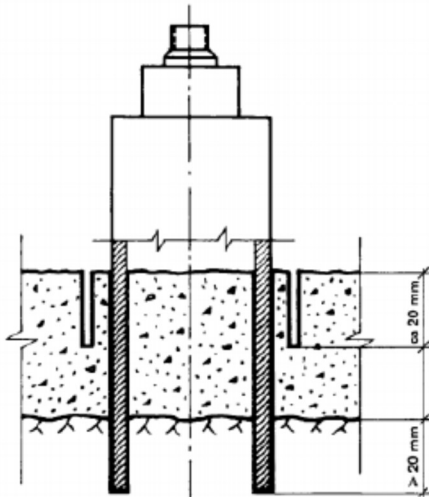
Ingrediens	Värde	Enhet
Anläggningscement Brevik (CEM-II/AL)	430	Kg/m <sup>3</sup>
Aggregat storlek 0/4	616,38	Kg/m <sup>3</sup>
Aggregat storlek 0/8	528,32	Kg/m <sup>3</sup>
Aggregat storlek 4/8	176,11	Kg/m <sup>3</sup>
Aggregat storlek 8/16	440,27	Kg/m <sup>3</sup>
Vatten	172	l/m <sup>3</sup>
Flyttillsatsmedel	2,6	l/m <sup>3</sup>

Ingrediens	Värde	Enhet
Anläggningscement FA (CEM-II/AL)	430	kg/m <sup>3</sup>
Kalksten	55	kg/m <sup>3</sup>
Aggregat storlek 0/8	954,1	kg/m <sup>3</sup>
Aggregat storlek 8/16	636	kg/m <sup>3</sup>
Vatten	172	l/m <sup>3</sup>
SP	5,1	l/m <sup>3</sup>
MasterAir 105	1,3	l/m <sup>3</sup>
Stålfiber	45	kg/m <sup>3</sup>



### 2.3.4 Provning

*Utdragsförsök:* Dragförsök utförs på en provkropp i form av en cylindrisk borrkärna enligt SS-EN 137243 figur 2.4. Kärnan borrar till ett djup av minst 20 mm in i konstruktionsbetongen. Kärnborr med innerdiameter 50 mm används samt fästplattor med diameter 50 mm. SS-EN 137243 fastställer krav på fästplattan att dess diameter skall överstiga 34 mm och överstiga den nominella stenstorleken i ytskiktet minst tre gånger samt vara större än en tredjedel av ytskiktets tjocklek. När den största nominella stenstorleken är 16 mm och ytskiktets tjocklek är 100 mm är kravet för fästplattan uppfyllt.



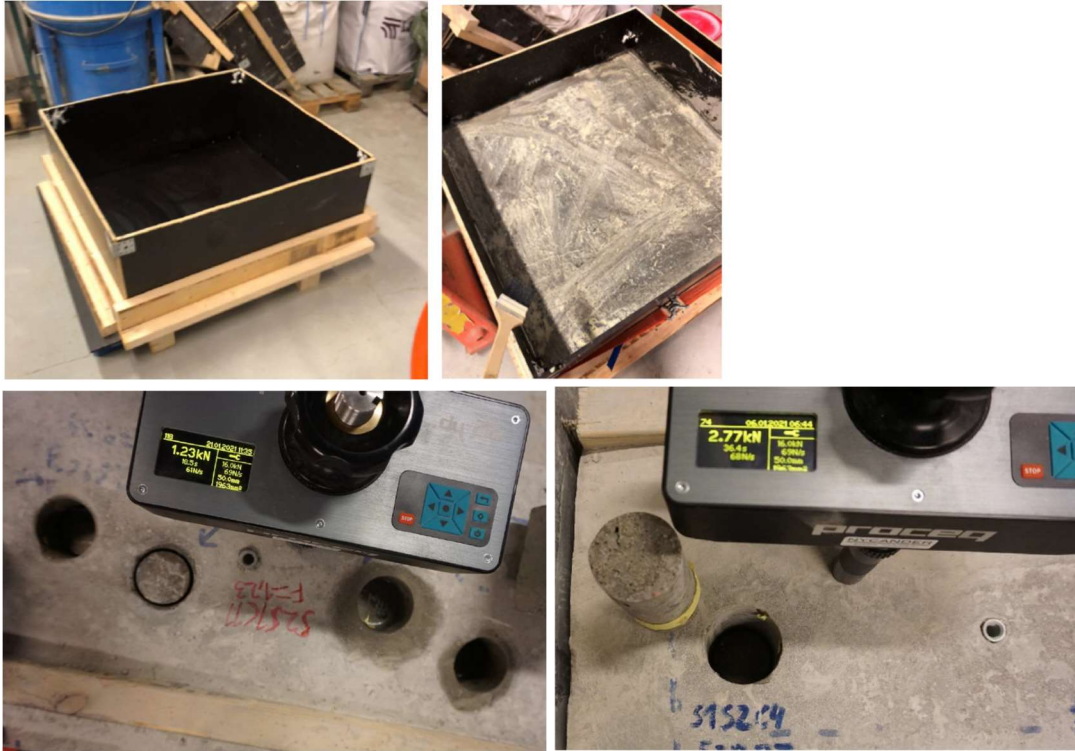
*Figur 2.4. Exempel på kärnbörning med angivet minimum-mått, från SS-EN 137243(2020).*

Före börning slipas provytan tills den överliggande cementhuden avlägsnats. Borrmaskinen fäst med ett stativ förankrat med expanderbultar i plattan. Kärnorna borrar med minst en borrar diameter i kantavstånd, inbördes avstånd samt avstånd till expanderbultarna.

Fästplattan limmas mot betongytan med tvådelat epoxilim. Dragtestet utförs med utrustning typ Proceq DY-216, se figur 2.5 och 2.6.

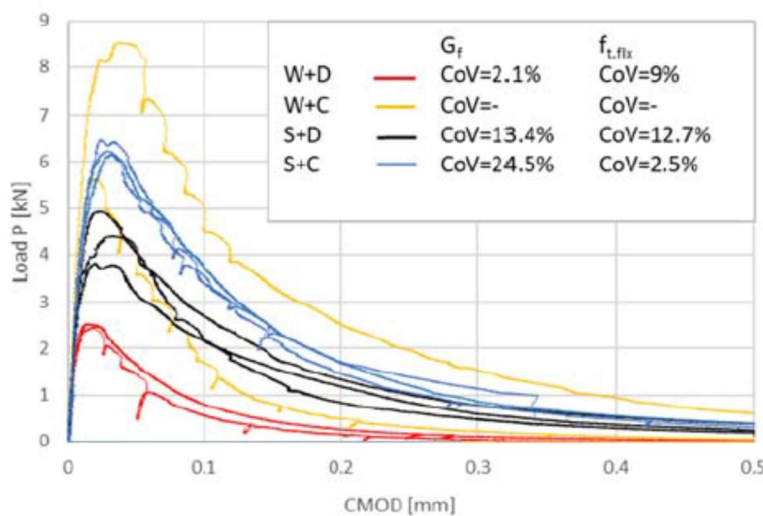


*Figur 2.5. Proceq DY-216, bild från Proceq(2021).*



Figur 2.6 Utdragsförsök: form för underliggande platta, exempel på ytbehandling innan pågjutning, uppställning enligt standard, utrustning Proceq, två exempel på resultat inklusive utdragen borrkärna i nedre högra bilden, från Lundström (2021).

**Balkprovning.** Provning genomförs enligt standardiserat förfaringsätt där en viss hastighet på sprickans öppning och där utvärdering av materialparametrar sker utifrån last-spricköppningsdiagram, se exempel figur 2.7. Pålastningshastigheten hålls konstant på 33 N/s fram tills en sprickvidd på 0,003 mm uppmäts då lasten istället regleras av sprickviddsöppningshastigheten. Denna sätts konstant på 0,3 mm/s. Mer information kan fås tex i slutrapport för huvudprojekt, SBUF (2021) och Lundström (2021).



Figur 2.7 Last-sprickvidd vid fyrapunktsbalkböjning (två stöd och två laster) med vertikal gjutfog med brottanvisning i underkant (figur 2.2). Effekt av retardation och härdning av pågjutning.

## 2.4 Ytråhet

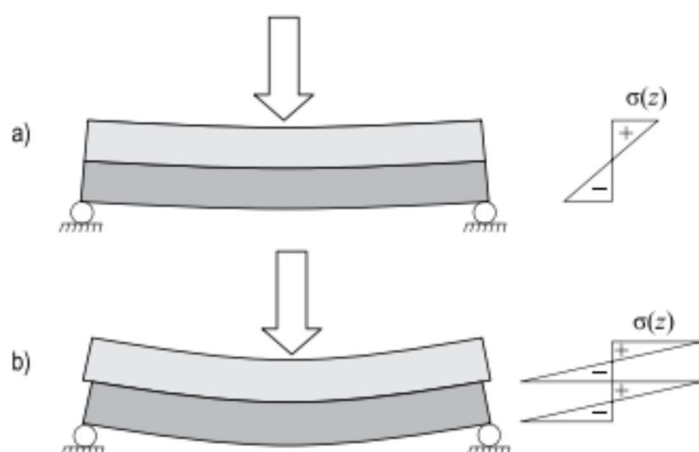
Plattornas tätt förekommande ojämnheter, dess råhet, undersöks med sandytmetoden. Den finkorniga sanden appliceras i en hög med volym 25 ml varpå sanden breddas ut cirkulärt med en 50 mm cirkulär stålplatta över betongytan. När den jämna sandens övre yta är i höjd med betongens högsta aggregat mäts den cirkulära sandytans diameter vid fyra olika positioner fördelade med jämnt tangentialt avstånd. Den genomsnittliga diametern används för att beräkna det genomsnittliga djupet hos den sandtäckta ytan som betraktas som en cylinder (Kaufmann, 1971).

### 3 VIDHÄFTNING

Inledande kommentar: I följande avsnitt ges ett utdrag ur den litteraturgenomgång som genomfördes av exjobbare, en av deltagarna i arbetsgruppen (Lundström (2021)). Utdraget kan ses som ett komplement till bakgrundsbeskrivningen i huvudprojektet, här med fokusering på vidhäftning. Intressanta reflektioner gör t ex beträffande metoder att åstadkomma god vidhäftning och kostnader för dessa. Texten har ursprungligen kvalitetsgranskats av handledare (Nilsson och Emborg). Här har vissa förkortningar skett liksom vissa omskrivningar och grafiska justeringar.

#### 3.1 Översikt

Behovet av god vidhäftning hos betong grundar sig generellt i eftersökandet att skapa en samverkande konstruktion, vilket är direkt kopplat till bärighet och deformationer hos konstruktionen (Silfwerbrand, 2017). Vidhäftningen har även en inverkan på konstruktionens beständighet. En undermålig vidhäftning leder enligt referensen dessutom till ökad risk för sprickbildning i pågjutningen samt att vatten och andra skadliga substanser transporteras in mellan lagerna genom fogen. Figur 3.1 illustrerar normalspänningsfördelningen och deformationerna för en kompositbalk med två lika tjocka lager med och utan samverkan hos skikten.



Figur 3.1. Deformation och normalspänning i en kompositbalk: (a) med samverkan; och (b) utan samverkan. (Silfwerbrand, 2017).

Vidhäftningsproblematik i brokonstruktioner med pågjutna slitlager kan orsaka stora kostnader då vidhäftningshållfastheten till konstruktionsbetongen inte är tillräckligt hög. Detta kan leda till att betongen släpper från underliggande konstruktionsbetong och måste gjutas om igen. Orsakerna till undermålig vidhäftning kan bero på ett flertal faktorer såsom bevattning, otillräcklig vibrering, opassande betongval och orena pågjutningsytor menar broentreprenören Lennart Nilsson (personlig kommunikation enligt Lundström, 20 augusti 2020).

Konventionella metoder för rågöring och förbättring av betongytors vidhäftningsförmåga består av framförallt av sandblästring, vattenbilning och primer. Metoderna som används har en stor spridning i kostnad och tidsåtgång. Tabell 3.1 presenterar kostnader och tidsåtgång för olika rågöringsmetoder (L. Nilsson, personlig kommunikation, 20 augusti 2020).

Ur den ekonomiska erfarenhetsdatan tillhandahållen från entreprenör går det att avläsa att både vattenbilning och sandblästring ger godtagbara resultat till kostnader av respektive 100-150 kr/m<sup>2</sup> och 80-100 kr/m<sup>2</sup>. Att avlägsna den yttersta cementhuden och skapa en rågjord yta med hjälp av ytretarderande medel bedöms ha en kostnad omkring 10 kr/m<sup>2</sup>.

Den intressanta tolkningen är att, om ytretarderande medel kan ge godtagbara resultat, är denna metod mycket intressant.

Tabell 3.1. Ekonomiska erfarenhetsdata från broentreprenör.

Metod	Kostnad [kr/m <sup>2</sup> ]	Tid [d/100m <sup>2</sup> ]	Resultat
Vattenbilning	100–150	2–3 d	Mycket bra, årtidsberoende
Sandblästring	80–100	3 d	Bra till mycket bra, nedsmutsande
Ytretarder	10	Under efterbehandling vid gjutning	Undersöks

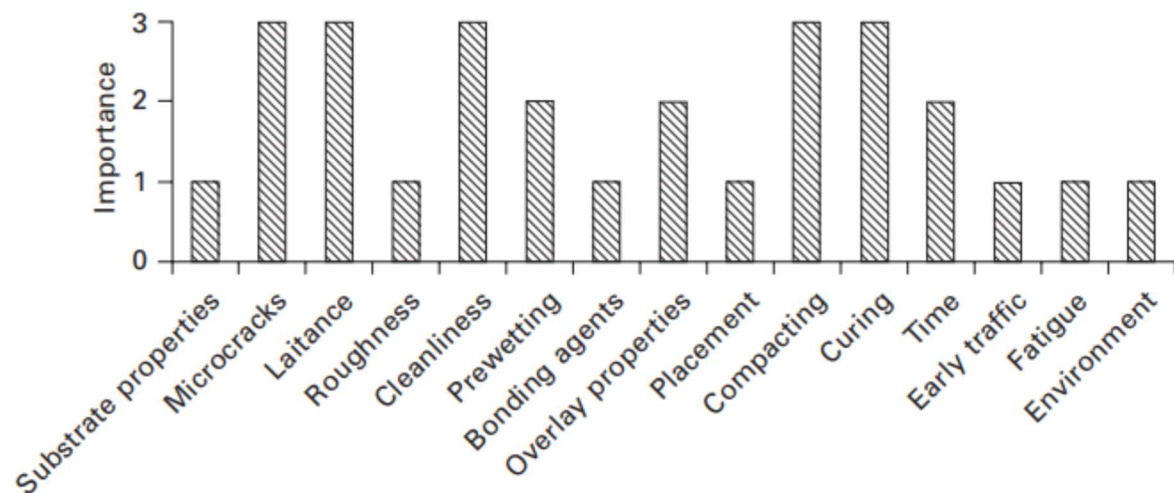
Betongytor kan även rågöras med andra metoder. Júlio et al. (2004) använder i en undersökning mekanisk mejsling med handhållen bilmaskin. Mejsling visade sig ge god råhet i ytan men gav dessvärre mikrosprickor i betongen som visade sig försämra vidhäftningshållfastheten.

Silfwerbrand (2009b) beskriver i sin artikel ”Bättre bedömning av vidhäftning mellan betong och betong” fler faktorer som påverkar vidhäftningshållfastheten hos en gjutfog samt dess påverkningsfaktor jämfört med varandra, se figur 3.2.

Faktorerna ställs upp i ordningen av sin kronologiska förekomst: underliggande betongens egenskaper, mikrosprickor, ytlig cementhud, råhet, renlighet, förvätning, bindämnen, pågjutningsbetongens egenskaper, placering av betong vid gjutning, kompaktering, härdning, tidsspann, tidig pålastning, utmattning och den omgivande miljön.

De första 11 faktorerna i figuren infaller vid utförandefasen för nybyggnation, varav flertal ofta redan är reglerade för att säkerställa andra egenskaper än just vidhäftningen. Till exempel måste betongens egenskaper anpassas efter en rad olika faktorer som verkande laster, miljöexponering och armeringsmängd för att nämna några.

Betongens konsistens väljs utifrån strukturens komplexitet och på efterfrågan av utförande entreprenör inom ramen att betongens övriga egenskaper inte äventyras i blandningen. Betongens kompaktering är av relevans både för det enskilda skiktets beständighet och för dess förmåga att ge god vidhäftning. Silfwerbrand (2009b) beskriver kompakteringen som särskilt viktig vid pågjutning av rårare ytor då sannolikhet för utveckling av luftfickor ökar.



Figur 3.2. Faktorer som påverkar vidhäftningen utvärderade efter deras individuella påverkan, från Silfwerbrand (2009a).

Självkompakterande betongs inverkan på vidhäftningsförmågan ses som svårbedömd. Den självkompakterande betongens viskositet ska minska sannolikheten för inneslutna luftfickor menar en hypotes medan utförda studier inte kan urskilja en fördel till självkompakterande betong kontra klassisk betong (Silfwerbrand, 2009b). Då mängder av faktorer påverkar vidhäftningen har inverkan av betongens viskositet varit svår att bedöma.

Silfwerbrand (2009b) beskriver att motgjutningsytans råhet historiskt betraktats ha en större inverkan på vidhäftningshållfastheten än vad senare studier visat. Studier där betydligt råare ytor skapade med vattenbilning visat på vidhäftning likvärdig en slätare sandblästrad yta. En viss råhet bedöms ge bättre vidhäftning men enligt studier utförda av Shito et al. (2000) finns det ett övre gränsvärde för var en ökad råhets positiva effekt på vidhäftningen avtar.

Härldningens inverkan på vidhäftning bedöms ha en stor inverkan huruvida en god vidhäftning uppstår i fogen. Betongens härldningsförhållanden reglerar fuktdiffusionen från betongen och således de tidiga krypspänningarna hos betongen och därmed fogen. Att vattenhärda pågjutningen har enligt olika studier visat sig vara gynnsamt för vidhäftningen då den tidiga relativa krypspänningen (av plastiska deformationer) kunde sänkas vid undersökning av pågjutningar vid broreparationer (Silfwerbrand, 2009b).

Valda härldningsförfaranden gällande den underliggande betongens inverkan vid nykonstruktion där gjutningar utförs med enbart veckors mellanrum, har inte behandlats i inläst litteraturunderlag.

### 3.2 Krav på pågjutningar

Svensk Byggtjänsts allmänna material och arbetsbeskrivningar, AMA, fungerar frekvent som kontraktunderlag till anläggningsprojekt. AMA Anläggning (2020) presenterar följande krav för betonggjutningar i anläggning:

Motgjutningsyta ska behandlas och rengöras så att den yttersta cementhuden avlägsnas och att ytan får tätt förekommande ojämnheter med i genomsnitt minst 2 mm djup. EBE.11 AMA Anläggning 20.

AMA Anläggning (2020) förespråkar alltså inte något specifikt metodval för att skapa en rågjord yta utan kräver endast tätt förekommande ojämnheter med minsta djup på 2 mm.

Trafikverkets gällande dokument Krav Brobyggande (2016) presenterar ingen metod för utvärdering av vidhäftningshållfastheten. Fram till 2009 innehöll Vägverkets kravdokument, då Bro 2004, en metod för att utvärdera vidhäftningen mellan ny och gammal betong genom dragförsök, se ekvation 1 och 2. Här representerar  $m$  medelvärdet av provserien,  $s$  syftar till standardavvikelsen som sätts till 0,36 MPa om den uppmätta standardavvikelsen understiger 0,36 MPa,  $x$  representerar det enskilda mätvärdet och  $f_v$  fordrad draghållfasthet angiven till 1,0 MPa.

$$m > f_v + 1,4 \cdot s \quad (1)$$

$$x > 0,8 \cdot f_v \quad (2)$$

Med förutsättning av en standardavvikelse över 0,36 kan ekvation 1 avläsas till att medelvärdet av provserien ska vara större eller lika med 1,504 MPa och ekvation 2 till att enskilda mätvärden ska vara större eller lika med 0,8 MPa.

### 3.3 Problematisering

I den litteratur som studerats som behandlar inverkan av råheten på vidhäftningshållfastheten utförs studier i regel på antingen sandblästrad eller vattenbilad yta. Kostnadsuppskattningen för olika rågöringsmetoder tillhandahållen av broentreprenör visar att rågöring med ytretarderande medel är betydligt billigare och mindre tidskrävande än övriga metoder.

Frågan är om ytretarderande medel kan uppfylla kraven ställda på vidhäftning. Om detta stämmer och ytretarderande medel kan användas som substitut till exempelvis sandblästring skulle kostnaden per rågjord kvadratmeter kunna minska med uppemot 90 kronor, inte inräknat besparingen i arbetstimmar.

De förhållanden betongen härdas med har för pågjutningsbetongen påvisats ha en tydlig påverkan på vidhäftningen (Silfwerbrand, 2009b). Vid betongreparationer där konstruktionsbetongen kan vara flertal år gammal har entreprenören då endast möjlighet att välja under vilka omständigheter pågjutningsbetongen härdar.

Frågan som inte besvaras är om olika härdningsomständigheter för konstruktionsbetongen har påverkan på om god vidhäftning uppstår. Givet kunskapen om hur pågjutningsbetongen bör härdas och en klarhet kring konstruktionsbetongens härdning kan således ge entreprenörer vid nyproduktion bästa förutsättning att skapa god vidhäftning.

Både Silfwerbrand (2009b) och broentreprenör L. Nilsson (personlig kommunikation, 20 augusti 2020) nämner stålfiberarmering som vanligt förekommande i betongpågjutningar. Om stålfiberarmering i pågjutningsbetongen kan besitta en effekt att påverka vidhäftningen har inte ha nämnts i instuderat underlag i Lundström (2021).

*Kommentar:* Det finns anledning att komma tillbaka till reflektionerna ovan från Lundström (2021).



## 4 RESULTAT

### 4.1 Betongegenskaper

Uppmätta konsistenser konstruktionsbetong respektive slitbetong visas i tabell 4.1, där speciellt förlopp för ökad trögflutenhet kan iakttas. Lufthalt slitbetong redovisas i tabell 4.2.

Tryckhållfastheter visade på normala utvecklingar, se bilaga A.

Tabell 4.1 Konsistenser konstruktionsbetong (överst) respektive slitbetong (underst) och andra noteringar.

Datum	Sättnmätt [mm]	Konsistensklass	Härtningsmetod Konstruktionsbetong	Behandlingsmetod Konstruktionsbetong
2020-11-09	95/135	S3	Folie	Slipad slät
2020-12-07	175	S4	Folie	Svag retarder
2020-12-09	135/160	S3/S4	Vattenhärdad	Svag retarder
2020-12-11	110/210	S3/S5	Folie	Stark retarder
2020-12-15	130/140	S3	Vattenhärdad	Stark retarder

Datum	Flytsättnmätt Del 1 [mm]	Flytsättnmätt Del 2 [mm]	Flytsättnmätt Del 3 [mm]	Härtningsmetod Konstruktionsbetong	Behandlingsmetod Konstruktionsbetong
2020-12-08	660	480	200 (*)	Folie	Slipad slät
2020-12-14	625	460	435	Folie	Svag retarder
2020-12-16	760	550	480	Vattenhärdad	Svag retarder
2020-12-18	665	560	505	Folie	Stark retarder
2020-12-22	670	555	490	Vattenhärdad	Stark retarder

\*Sättnmätt mätt istället för flytsättnmätt.

Tabell 4.2 Lufthalt m m slitbetong

Datum	Härtningsmetod Konstruktionsbetong	Behandlingsmetod Konstruktionsbetong	Lufthalt
2020-12-08	Folie	Slipad slät	3,8%
2020-12-14	Folie	Svag retarder	3,2%
2020-12-16	Vattenhärdad	Svag retarder	5,0%
2020-12-18	Folie	Stark retarder	3,5%
2020-12-22	Vattenhärdad	Stark retarder	3,0%

## 4.2 Ytråhet

Ytråheten mätt enligt avsnitt 2.4 dokumenteras i tabell 4.3 för de olika fallen av ytbehandling. Tydlig effekt av stark retardering observeras i jämförelse med svagare retardering och slåt yta.

Tabell 4.3 Ytråhet enligt sandytmetod

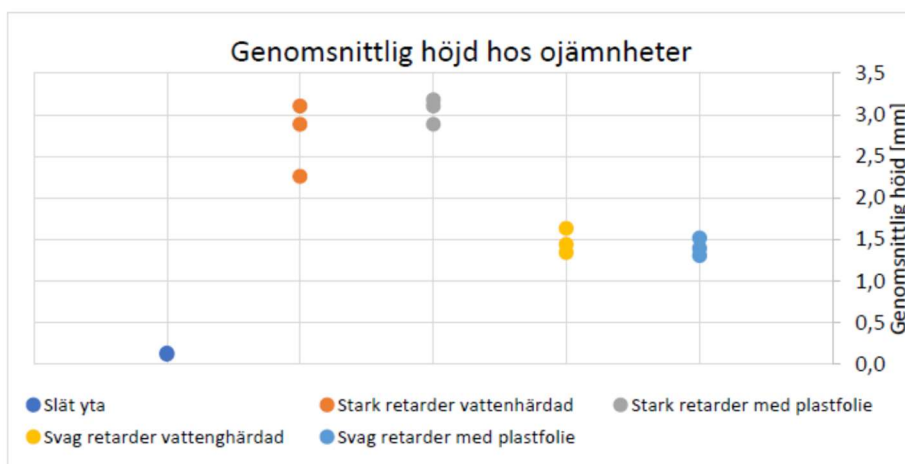
Slåt yta							
Punkt	d <sub>1</sub> [mm]	d <sub>2</sub> [mm]	d <sub>3</sub> [mm]	d <sub>4</sub> [mm]	d <sub>avr</sub> [mm]	Volym [ml]	h <sub>avr</sub> [mm]
1	720	620	390	390	530	250	0,11
2	680	610	520	190	500	250	0,13

Svag retarder härdad med plastfolie							
Punkt	d <sub>1</sub> [mm]	d <sub>2</sub> [mm]	d <sub>3</sub> [mm]	d <sub>4</sub> [mm]	d <sub>avr</sub> [mm]	Volym [ml]	h <sub>avr</sub> [mm]
1	150	155	150	150	151,25	250	1,39
2	160	150	165	150	156,25	250	1,30
3	160	140	130	150	145	250	1,51

Svag retarder vattenhärdad							
Punkt	d <sub>1</sub> [mm]	d <sub>2</sub> [mm]	d <sub>3</sub> [mm]	d <sub>4</sub> [mm]	d <sub>avr</sub> [mm]	Volym [ml]	h <sub>avr</sub> [mm]
1	150	150	150	145	148,75	250	1,44
2	140	142	140	137	139,75	250	1,63
3	150	152	160	155	154,25	250	1,34

Stark retarder härdad med plastfolie							
Punkt	d <sub>1</sub> [mm]	d <sub>2</sub> [mm]	d <sub>3</sub> [mm]	d <sub>4</sub> [mm]	d <sub>avr</sub> [mm]	Volym [ml]	h <sub>avr</sub> [mm]
1	95	105	110	90	100	250	3,18
2	95	105	105	100	101,25	250	3,10
3	100	100	115	105	105	250	2,89

Stark retarder vattenhärdad							
Punkt	d <sub>1</sub> [mm]	d <sub>2</sub> [mm]	d <sub>3</sub> [mm]	d <sub>4</sub> [mm]	d <sub>avr</sub> [mm]	Volym [ml]	h <sub>avr</sub> [mm]
1	120	115	120	120	118,75	250	2,26
2	95	105	105	100	101,25	250	3,10
3	110	105	110	95	105	250	2,89

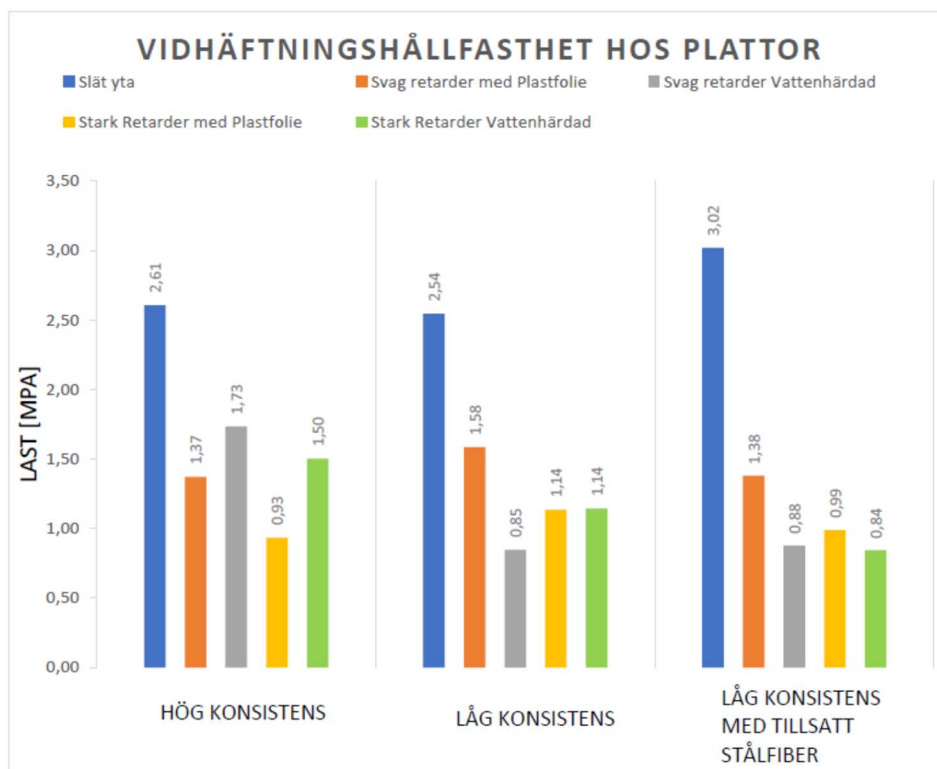


Figur 4.1. Sammanställning mätning av ytråhet för olika ytbehandling.

### 4.3 Vidhäftning

Nedan sammanställs provningar genom de tre provningsmetoderna för olika ytbehandlingar.

*Dragförsök* genom utborrade cylindrar för det pågjutna plattorna visas i figur 4.2. En tydlig tendens observeras; plattor behandlade till en slät yta ger betydlig högre värden jämfört med övriga åtgärder, oavsett konsistens pågjutningsbetong och om stålfibrer adderats. I några fall har tre gånger högre vidhäftningshållfasthet erhållits. Varken vattenhärdning eller plastfolie synes ge något positivt bidrag till vidhäftning. Graden av retardation ger olika effekt för de tre fallen av pågjutningsbetong.



Figur 4.2. Vidhäftningshållfasthet genom dragförsök utborrade cylindrar, från Lundström (2021), Obs: benämning y-axel ska vara hållfasthet, MPa.

En relativt stor spridning erhålls vid försöken vid de individuella provningarna (3 ibland 4 tester per variation). Det synes som att metoden är beroende av var på plattan man har borrar. Det kan vara så att det är svårt att erhålla exakt samma behandling av konstruktionsbetongen och att pågjutningens egenskaper avseende undre skikt har varierat. Dessa variationer kan vara större i labb-skala men det är högst troligt att samma variationer uppträder även full skala.

Följande kommentarer kan ges beträffande individuella värden för de fem plattorna med olika behandlingar:

Slät yta: Låg konsistens har ett värde som är 1,2 – 2,8 MPa *högre* än övriga två. Låg konsistens med stålfibrer har ett värde som är 0,8 – 1,25 MPa *högre* än övriga.

Svag retarder plastfolie: Hög konsistens har ett värde 0,5 – 1 MPa *lägre* än övriga två, låg konsistens – ett värde 0,8 MPa *lägre* än övriga, endast två värden - 1,2 MPa skillnad.

Svag retarder vattenhärdad: Hög konsistens har ett värde 1,5 MPa *högre* än andra – drar upp medelvärde.

Stark retarder plastfolie: Hög konsistens – jämna värden, låg konsistens – ett värde ligger 0,5 – 0,75 MPa *lägre* än övriga två. Låg konsistens stålfibrer – ett värde 0,7 – 1,1 MPa *högre* än övriga.

Stark retarder vattenhärdad: Hög konsistens – ett värde 0,8 – 1,4 MPa *högre* än övriga, ett lågt värde, låg konsistens – relativt jämna värden, låg konsistens stålfibrer – jämna värden.

Det observeras att fler dragförsök har utförts på plattorna. Här har redovisats försök där brottet har uppkommit i fogen av cylindern.

Vidhäftningshållfasthet registrerad genom *spräckprovning* visas i figur 4.3. I denna provning erhålls inte alls samma tendenser som vid enaxiella utdragsförsöken. Resultaten är relativt lika för de olika ytbehandlingarna. Svag retardation och vattenhärdning synes ge 0,5 – 1 MPa *högre* hållfasthet jämfört med övriga behandlingar. Plastfolietäckning synes vara positivt. Slät yta verkar inte vara fördelaktigt i denna mätning.

På samma sätt som vid dragprovningen ges nedan kommentarer på eventuell spridning vid försöken. Här skedde ingen variation av konsistens hos pågjutning:

Slät yta: Variation 1,97 – 2,83 MPa, 4 kuber

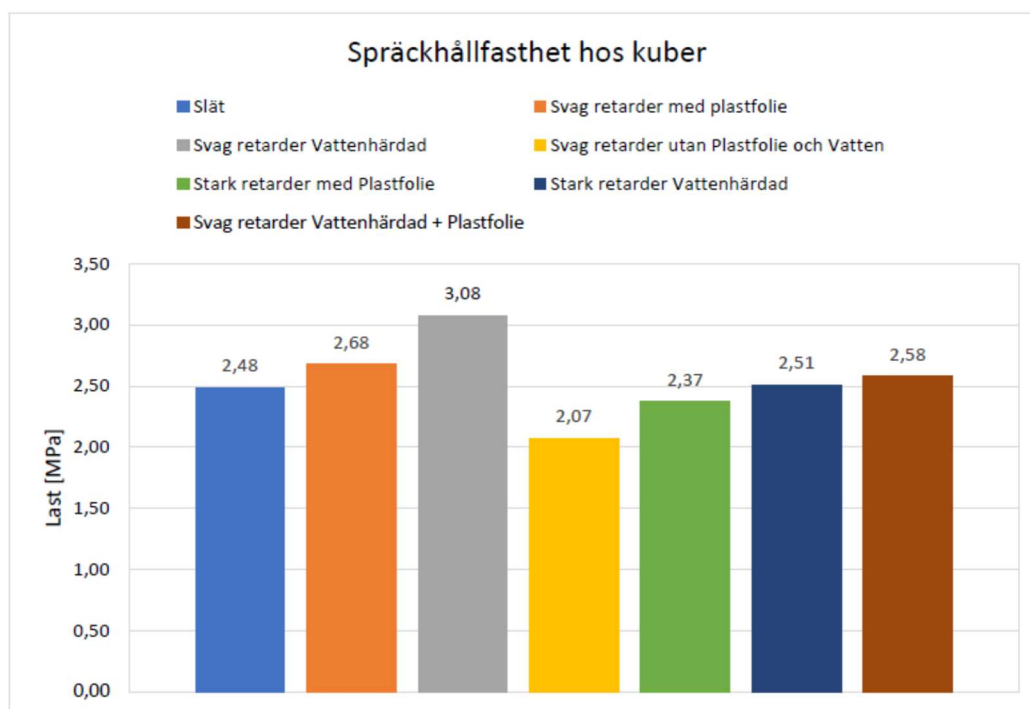
Svag retarder plastfolie: Variation 2,52 – 2,81 MPa, 3 kuber

Svag retarder vattenhärdad: Variation 2,82 – 3,05 MPa, 3 kuber

Stark retarder plastfolie: Variation 1,89 – 2,85 MPa, 2 kuber

Stark retarder vattenhärdad: Variation 2,34 – 2,60 MPa, 4 kuber

Man iakttar att spridningen är lägre jämfört med den direkt dragprovningen. Värdena är dessutom betydligt högre än dragprovningen. Detta kan bero på att spräckprovning är en försöksteknik som ger mer kontrollerad belastning av betongen jämfört med enaxiellt dragprov där lokala svagheter direkt kan innebära fatal kollaps genom momentomlagring, böjning osv. och därigenom låga värden.



Figur 4.3 Vidhäftningshållfasthet provad genom sedvanligt spräckprov, från Lundström (2021). Obs: benämning y-axel ska vara hållfasthet, MPa.

Vidhäftningshållfasthet utvärderad genom balkprovning visas i figur 4.4. Betydligt högre värden på böjhållfastheter erhålls jämfört med övriga provningar. Här utmärker sig de svagt retarderade och vattenhärdade ytorna hos konstruktionsbetongen; 1,5 – 2 ggr större värden erhålls jämfört med övriga behandlingar. Två balkar har provats för denna variation. Övriga behandlingar uppvisar i stort sett likartad hållfasthet.

På samma sätt som vid spräckprovningen ges nedan kommentarer på eventuell spridning vid försöken. Här skedde ingen variation av konsistens hos pågjutning:

Slät yta: Variation 2,1 – 3,8 MPa, 3 balkar

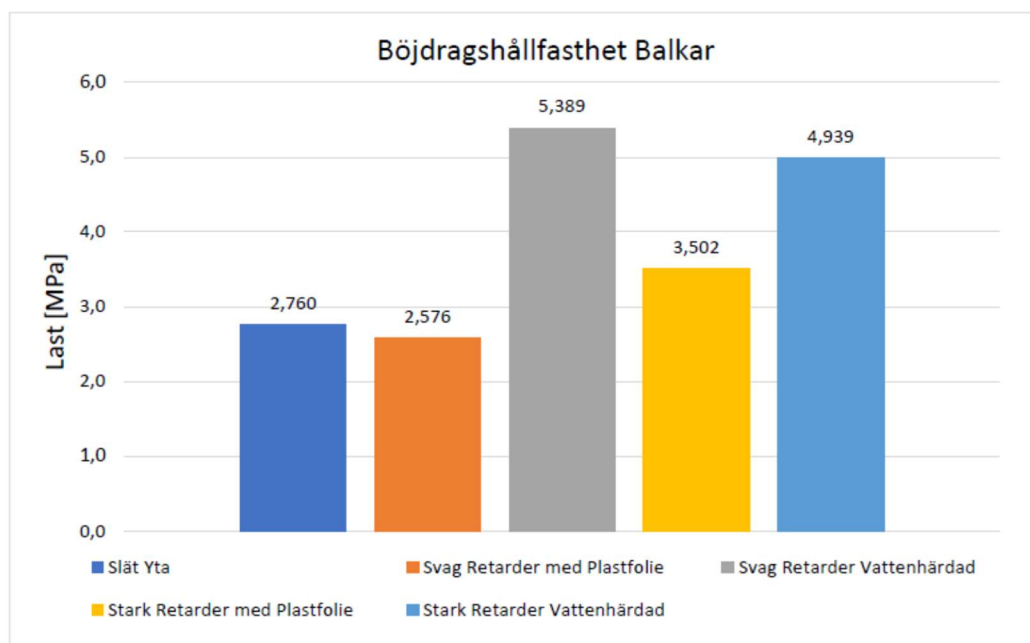
Svag retarder plastfolie: Variation 1,93 – 3,82 MPa, 3 balkar

Svag retarder vattenhärdad: Variation 4,1 – 6,6 MPa, 2 balkar

Stark retarder plastfolie: Variation 3,0 – 4,0 MPa, 3 balkar

Stark retarder vattenhärdad: Variation 4,9 – 5,0 MPa, 3 balkar

Det konstateras att böjdragshållfastheterna är ansenligt högre än de som erhållits i övriga försök enligt ovan.



Figur 4.4 Vidhäftningshållfasthet, dvs böjdragshållfasthet, uppmätt genom balkprovning, från Lundström (2021). Obs: benämning y-axel ska vara hållfasthet, MPa.

## 5 KOMMENTAR VIDHÄFTNINGSPROVNING

### 5.1 Inledande kommentarer

Inledningsvis bör kommenteras provningsmetodernas skillnader och möjligheter till tillförlitliga värden.

I den nya upplagan av Betonghandboken Material (Svensk Byggtjänst) konstateras t ex att centrisk dragning ”torde vara det mest korrekta sättet att mäta draghållfasthet”. Men man konstaterar samtidigt att ”då centriska dragprov är svåra att utföra korrekt användas ofta böjdragprov och spräckprov för rutinprovning”. Samband kan därefter användas för att räkna om resultat till enaxiella förhållanden.

Utmaningarna vid centriskt dragprov är många; det gäller bl a att kunna applicera dragkraften i änden av provet på ett korrekt sätt utan att störa kraftspelet, t ex genom limning. Provningsen måste utföras exakt centriskt så att ingen böjning sker med ojämn spänningsfördelning som följd. Naturliga variationer i betongen, t ex håligheter och svaghetszoner får omedelbart stor inverkan genom att förloppet snabbt då inte blir enaxiellt. Geometrin har påverkan på resultatet. Ju slankare provkroppar desto bättre.

Vid ett vidhäftningsförsök med dragning inses att flera av faktorerna ovan inverkar. Gränssnittet påverkar sannolikt spänningsfördelningen. Här tillkommer även den exponering av gränssnittet som skett redan vid utborrningen, skador kan ha uppkommit.

Spräckprov och böjdragprov innebär en annan robusthet där frågan om centrisk belastning och andra utmaningar inte finns. (Andra hänsyn måste dock tas vid genomförande av såväl spräckprov som balkböjning på ett korrekt sätt, se t ex Betonghandboken). Därigenom blir framräknade värden högre.

Det finns flera samband mellan de tre provningsmetoderna, se Betonghandboken Material. Förenklat kan dessa innebära:

Enaxiell draghållfasthet = 0,9 ggr draghållfasthet genom spräckning enligt Eurocode. Detta beror dock på betongkvalitet, ballast m m, dvs avvikelser förekommer.

Enaxiell draghållfasthet = ca 0,75 ggr draghållfasthet genom böjning. Avvikelser förekommer på samma sätt som ovan.

Att applicera ovan på provning av vidhäftning enligt de försök som här har skett tillför ytterligare osäkerheter. Framförallt när det gäller ytbehandling inses att denna är svår att exakt efterliknas på hela plattor av 1 m<sup>2</sup> jämfört med de små ytor som finns i kuber och balkar (som gjuts i två omgångar och i helt annan riktning jämfört den som är fallet vid provning).

För aktuella tester kan några jämförelser göras för fall med liknande ytbehandling:

Slät yta är troligen den behandling som är enklast att upprepas vid alla tre metodikerna. Här uppvisar enaxiellt dragförsök, spräckprovning respektive balkböjning hållfasthetsvärden på 2,61

MPa, 2,48 MPa resp, 2,76 MPa dvs *lägre* för spräckning jämfört med dragning och *något* högre för böjning. Detta stämmer inte med relationerna ovan.

Svag retardering och plastbehandling ger motsvarande jämförelse: 1,37 MPa, 2,68 MPa resp, 2,57 MPa dvs *betydligt högre* för spräckning och *högre* för böjning jämfört med dragning än relationerna ovan.

Svag retardering och vattenhärdning ger motsvarande jämförelse: 1,73 MPa, 3,08 MPa resp, 3,39 MPa dvs *markant högre* för både spräckning och högre för böjning än relationerna ovan; t ex är 75 % av 3,39 MPa = 2,54 MPa.

Det synes som andra relationer gäller för de specialbehandlingar som skett av brottytorna. Inverkan av ytornas struktur, fuktillstånd etc ger tydliga effekter spänningar och töjningar i brottzonen som är helt annorlunda än de som gäller för homogen betong.

Som även nämnts tidigare är det oerhört viktigt att ytbehandlingen kan upprepas på de tre typerna av provkroppar dvs att struktur etc av övergångsskiktet blir identiska. Detta är en utmaning.

## 5.2 Uppnås krav?

Som nämnts tidigare har Trafikverket idag inget angivet gränsvärde för vidhäftningshållfasthet hos brokonstruktioner. Fram till 2009 gällde standarden Bro 2004, som med antagen låg standardavvikelse, där ett värde på minst 1,504 MPa föreskrevs.

*Uppnås kriteriet 1,504 MPa för obehandlade ytor?*

De släta ytorna klarar kriteriet. Intressant är resultaten är snarlika testerna emellan. Dragförsök ger 2,61 MPa, spräckprovnigen 2,48 MPa och fyrpunktsböjningen 2,76 MPa.

*Uppnås kriteriet 1,504 MPa för ytbehandlade ytor?*

Beträffande undersökning om ytor rågjorda med ytretarderande visade dragförsöken, spräckprovnigen och fyrpunktsböjningen helt olika utfall.

*Dragförsöken* påvisade absolut lägst hållfasthet av de tre metoderna för ytor behandlade med ytretarder. Med dragförsök hade endast två av tolv mätserier ett högre medelvärde än 1,504 MPa; svag retarder med vattenhärdning och svag retarder med plastfolie.

Dragförsöken tyder på att ytretarderande medelst rågjorda ytor inte ger en vidhäftningshållfasthet som med säkerhet uppfyller 1,504 MPa.

*Spräckprovnigen* visade högre resultat där alla kombinationer översteg 2 MPa i hållfasthet. Hos kuberna gav den med svag retarder och vattenhärdning högsta värde med 3,08 MPa och kuberna med svag retarder utan vare sig plastfolie eller vattenhärdning lägsta värde: 2,07 MPa.

Spräckprovnigen resultat visar alltså att ytor rågjorda med ytretarderande medel verkligen ger en vidhäftningshållfasthet över 1,504 MPa.



*Balkarna* testade med fyrpunktsböjning visade högsta värden på vidhäftningen. Balkserien med lägsta uppmätta värdet var den svaga retardern med plastfolie där böjdraghållfastheten i fogen mättes till 2,58 MPa. Balkserien med högst värde var svag retarder med vattenhärdning som uppnådde 5,39 MPa.

Balkarnas resultat överskrider tydligt gränsen 1,504 MPa.

*Hur påverkar olika härdningsförhållanden av den äldre betongen vidhäftningshållfastheten?*

Vid jämförelse av härdningens inverkan undersöktes kuberna, balkarna, plattornas oarmerade delar och plattornas delar med lägre konsistens. Den sistnämnda var ensam om att visa resultat som antydde på en ökad vidhäftning vid härdning under plastfolie. Balkarna stack ut och visade ett resultat nästan tre gånger så högt som medelvärdet.

En slutsats är dessutom att vattenhärdning är ett alternativ att föredra för härdning av den pågjutna ytan

*Har slitbetongens konsistens en inverkan på vidhäftningen?*

Försök som behandlar konsistensens inverkan utfördes endast genom dragförsök av utborrade kärnor från plattorna. I analysen beräknades den genomsnittliga effekten av att ändra flytsättnmålet från 648 mm till 530 mm till en *minskning* med 0,205 MPa. Analysen utfördes på medelvärdet av det uppmätta flytsättnmålet.

*Påverkar tillsatt stålfiber vidhäftningen?*

Tillförseln av stålfiber medförde i övrigt en sänkning av flytsättnmålet från 531 mm till 477,5 mm i genomsnitt. Resultatet beräknades till i genomsnitt en *sänkning* med 0,075 MPa för vidhäftningshållfastheten när stålfiber tillsattes i pågjutningsbetongen.

## 6 DISKUSSION OCH SLUTSATSER

### 6.1 Allmänt

God vidhäftning är helt enkelt en basal förutsättning för tillfredställande sprickfördelning – om pågjutningen spricker upp – och en förutsättning för att inte kantresning uppstår eller t.o.m. förödande delaminering.

God vidhäftning åstadkoms både genom rätt materialval och rätt utförande. Beträffande inverkan av material observeras i huvudprojektet tydliga samband mellan vidhäftningshållfasthet och såväl tryck- som draghållfasthet hos pågjutningen. Att öka pågjutningens hållfasthet är således en rättfram metod för hög vidhäftningshållfasthet, se SBUF (2021). Nackdelar finns: ökad pågjutningshållfasthet medför ofta ökad krympning. Speciellt den svårkontrollerade självuttorkningskrympningen – den som beror på hydratationen och vattencementtal – ökar då.

Utförandet ska säkerställa att den goda vidhäftningen erhålls, god homogenitet fås i pågjutningen men framförallt att inte sprickor och andra olägenheter uppträder. Betongen bör vara självkompakterande.

Det som är speciellt för den direktgjutna slitbetongen är att den exponerade miljön under gjutningen ställer extra stora krav på noggrannhet. Höga vindlaster, solbestrålning, höga temperaturer – eller låga, långa transportavstånd för färsk betong osv. är tillkommande ofta förekommande faktorer som måste bemästras och kan påverka vidhäftningen. Betongen får t.ex. inte bli för kall vid gjutning, den får inte tappa för mycket i konsistens. Betongen måste skyddas noga direkt efter gjutning utan att ytan då skadas. Vattenbegjutning på slitbetongen är effektiv men kan i många fall inte genomföras. Applicering av täckning kan vara komplicerad uppe på en brobana.

De studier som hittills genomförts i huvudprojektet baserade på laboratorieförsök visar på vissa tendenser när det gäller vidhäftning; t.ex. att water-jetting av underbetong ger höga vidhäftningshållfastheter jämfört med andra ytbehandlingsmetoder. Försiktig retardering av pågjutningsbetongen kan också ge bättre vidhäftning. Vattenbegjutning av pågjutningen är gynnsamt jämfört med plastfolie.

### 6.2 Utförda vidhäftningsförsök

En första reflektion från delstudien är att resultaten från de olika provningsmetoderna markant skiljer sig. Dragförsöken över alla sektioner och utförandemetoder ger ett medelvärde av 1,50 MPa. Spräckförsökens medelvärde är 71 % högre än hos dragförsöken och fyrpunktsböjningen ger ett medelvärde som är 149 % högre än dragförsökens medelvärde. Skillnaderna är således större än de skillnader som förväntas mellan de olika provningsmetoderna i sig, se avsnitt 5.1.

För att försöka få en uppfattning kring varför resultaten spridit sig är det värt att utvärdera påverkansfaktorerna som finns under utförandet. Dragförsöket är unikt då det även innefattar borring av kärnor. Borrtrustningen förankrades med expanderbult och borringen utfördes med stor försiktighet för att inte skada kärnan. Kärnorna kontrollerades okulärt för skador. Huruvida borringen gett invändiga skador eller att vibrationer kring gjutfogsområdet gett negativ inverkan på resultatet gick inte att förvissa sig om.

Dragförsöket följde enligt standard beskriven i SS-EN 137243 som inkluderar även borring. Eventuell skadepåverkan av borrningen hos dragförsök beskrivs dock inte i standarden. Standardiseringskommissionen kan antingen ha bedömt påverkan som obetydligt liten eller att en korrekt utförd borring generellt inte påverkar testet.

I examensarbetet konstateras att borrningen, trots förankring, är svår att utföra i en perfekt rak skåra. Vibrationerna hos borren visade efter dragning av kärnorna ha gett vissa lokala ojämnheter i form av att skrovligheter i ytan. Skrovligheterna medför ingen lutning mätt över hela kärnans längd men lokala utskjutningar där tjockleken behålls men den avsedda raka banan för kärnborren avviker från.

Resultatens variation mellan testmetoderna var minst hos de släta ytorna. Skillnaden mellan dragförsökens och spräckförsökens medelvärde var endast 0,07 MPa och skillnaden mellan dragförsöken och fyrpunktsböjningen 0,15 MPa. Hypotesen ovan om att borring ger en negativ inverkan på resultaten i dragförsöken motbevisas således här dvs under förutsättning att borrningen utförts likvärdigt på alla sektioner.

En annan tänkbar påverkansfaktor är ytans renlighet. Före pågjutning blåstes alla ytor rena med tryckluft och granskades okulärt. Risker att delar av ytan inte blivit helt ren utan varit delvis kontaminerad finns hos alla objekten men då plattorna, som testades med dragförsök, är väsentligt större borde också sannolikheten för kontaminering vara störst hos dem. Renheten kontrollerades inte med tekniska metoder utan endast okulärt. Naturligt blir en skrovlig yta svårare att rengöra än en slät yta. Rengörs en slät yta med tryckluft finns färre ojämnheter där lösa korn mm. kan fastna och inte bli gömda. En mer rågjord yta är rent teoretiskt svårare att rengöra.

Jämförelsen mellan ytor behandlade med svagare respektive starkare ytretarder visade i analysen en högre vidhäftningshållfasthet för ytor behandlade med svag retarder för dragförsöken, spräckförsöken men inte fyrpunktsböjningen. I examensarbetet nämns att det känt att råhetens positiva inverkan på vidhäftningen har en övre gräns, dvs ytorna kan inte bli hur ojämna som helst. Eftersom resultatet i detta fall visat att den svaga retardern, som gett slätare yta, gett bättre vidhäftning än råare yta, kan man anta att råhetens gränsvärde lika med eller under ca 1,4 mm.

Vid studien om betongen härdat under plastfolie eller vattenhärdning har någon påverkan på vidhäftningshållfastheten, visade spräckförsöken och fyrpunktsböjningarna genomgående att vattenhärdning var fördelaktigt men dragförsöken gav spridda resultat.

Plastfolies inverkan kan också vara missvisande för de ytretarderbehandlade ytorna. När den ytretarderbehandlade ytan härdat användes vattentryck för att avlägsna cementhuden i ytan. Detta innebär att ytan kommit i kontakt med vatten och den kan då inte betraktas som att enbart ha härdat under plastfolie. För att minimera denna effekt användes tryckluft och torkpapper för att i största mån avlägsna vattnet men även detta förfaringssätt innebär att härdningen inte skedde helt med täckning av plastfolie.

Även för detta har objektens storlek en inverkan. Balkarna observerades ha relativt otäta former som underlättade bortförandet av vattnet och hade likt kuberna mindre ytor som också underlättade bortföringen av vatten. De objekt som vattenhärdat bevakades dagligen så att ytan var helt täckt av vatten. En påtaglig skillnad fanns ändå jämfört med objekten som härdat täckt av plastfolie, även om dessa också kom i kontakt med vatten.

Ett ökat flytsättningsmått hos slitbetongen indikerade en ökning av vidhäftningshållfastheten vid dragförsök hos de oarmerade sektionerna. För testobjekten där viskositeten varierades visade medelvärde av effekten att ett ökat flytsättningsmått ger en ökad vidhäftningshållfasthet men av de fyra mätserierna indikerade två motsatsen. Säkerheten i resultatet känns därför inte betryggande då risk finns att medelvärdet vore ett utfall av någon anormal mätserie.

Undersökningen av tillsatta stålfibers inverkan blev delvis påverkad av att viskositeten inte hölls på samma nivå som oarmerade referens. Effekten analyserades till en sänkning för vidhäftningshållfastheten efter att stålfiber tillsatts i betongen. När stålfiber tillfördes, och efter omblandning, var det genomsnittliga flytsättningsmålet ca. 50 mm lägre än för den oarmerade delen.

### 6.3 Förslag på framtida studier

Undersökningen av viskositetens inverkan begränsades i denna studie enbart till dragförsök. Ett förslag för framtida studier vore att undersöka hur vidhäftningen påverkas av förändrad viskositet även i spräckförsök och fyrpunktsböjning.

Istället för att jämföra två flytsättningsmått hos självkompakterande betong skulle man kunna undersöka skillnader mellan en trögflytande traditionell betong och en mer viskös traditionell betong och eventuellt en väldigt viskös självkompakterande betong. Det vore intressant att undersöka ifall konsistensförändringens effekt har gränsvärden likt råhetens effekt eller om förhållandet är relativt linjärt.

Förvattning, dvs. att fukta motgjutningsytan före pågjutningen är bekräftat ha en positiv effekt på vidhäftningshållfastheten i flera studier. Detta kan vara intressant att undersöka. Man ska vara medveten om att förvattningens effekt på vidhäftning är komplex; flera faktorer inverkar t ex täthet hos konstruktionsbetongen, täthet och sammansättning pågjutningsbetongen samt hur lång tid innan slitbetongen gjuts vattnet ska appliceras under olika väderleksbetingelser.

Dragförsöken konstaterades ha en större spridning i resultat än övriga tester samt att flertal borrade kärnor inte genererade i resultat alls. Ett förslag till framtida studier är därför i detalj studera provningsmetoden. Hur stor är repeterbarheten för exakt samma situation är en fråga. Detta kan studeras genom att öka antalet prover per mätserie från tre till minst det dubbla antalet.

Beträffande förvattning kan förhållandena i fullskalesituationer vara vitt skilda de som råder i laboratoriet. Erfarenheter kan därför inhämtas från liknande undersökningar i full eller ”halv” skala. Från det ett SBUF-projektet 12001 (Carlsvärd, 2017), inriktat mot tunnare pågjutningar för stommar och industriapplikationer, har citerats i huvudprojektet (vilket förtjänas att även presenteras här eftersom det helt olika vinklingar av förbehandlingsmetoder):

”Sannolikheten att lyckas med tunna betongpågjutningar ökar dramatiskt om man lyckas skapa rätt förutsättningar för att uppnå god vidhäftning mot underlaget. En slutsats som kan dras från aktuellt projekt är att förhållanden som leder till god vidhäftning går att skapa på olika sätt. Såväl torra motgjutningsytor som förvattnade och primade ytor resulterade i de flesta försök i relativt hög vidhäftning. Verklighetstroga försöksresultat visar dock att såväl torr motgjutningsyta som felaktigt utförd förvattning eller priming kan ge upphov till bristande vidhäftning. Metoder för behandling av motgjutningsytan bör därmed i första hand vara vattning eller priming utförd någon dag i förväg så att ytan hinner torka inför pågjutningstillfället”.

Slutsatsen är att, om t.ex. förvattning nyttjas, är det viktigt att denna utförs korrekt – dvs. tidpunkt, omfattning och appliceringsteknik. Det är snarare viktigare än vilken metod som väljs.

Även om förhållandena skiljer sig vid direktgjuten slitbetong bör erfarenheterna från SBUF-projektet ovan kunna vägas in vid val av förbehandlingsmetodik.

I framtida projekt om direktgjuten slitbetong bör studier av förvattningsmetoder självklart inkluderas

## 7 LITTERATURFÖRTECKNING

Bissonnette B, Courard L, Fowler D, Granju J, Silfwerbrand J (2011) Bonded Cement-Based Material Overlays for the Repair, the Lining or the Strengthening of Slabs or Pavements: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 193-RLS. RILEM State -of- the-Art Reports, Springer, Netherlands.

Brühwiler, E., Wittman, F.H. (1990). The Wedge Splitting Test, A New Method of Performing Stable Fracture Mechanics Tests. *Engineering Fracture Mechanics*. Vol. 35(1/2/3). 117-125.

Buenfield N. R. & Newman J. B. (1987). The development and Stability of Surface Layers on concrete Exposed to Sea-Water. *Cement and concrete Research*. Vol. 16, p.p. 721-732.

Carlswärd, J, (2006). *Shrinkage cracking of steel fibre reinforced self-compacting concrete overlays: test methods and theoretical modelling : test methods and theoretical modelling*. Luleå University of Technology, Doctoral Thesis 2006:55.

Carlswärd J. (2008). Fiberarmerad direktgjuten slitbetong, undersökning av sprickarmeringsbehov, intern rapport Luleå Tekniska Universitet, 28 sidor.

Carlswärd J (2017). Pågjutningar av stålfiberarmerad självkompakterande betong – sprickbegränsning och vidhäftning SBUF Projekt nr 12001, fyra delrapporter och slutrapport, se SBUF.se

Carlswärd J, Emborg M (2014a). Shrinkage cracking of thin concrete overlays, *Nordic Concrete Research*, Volume 2014/1, No 49.

Carlswärd J, Emborg M (2014b). Shrinkage cracking of thin concrete overlays, *Proceedings of the XXII Nordic Concrete Research Symposium*, Reykjavik, Aug 2014, *Nordic Concrete Research*, Volume 2014/2, No 50.

Carlswärd J, Emborg M (2016). Egenskaper hos pågjutningar – vidhäftning, töjningar, spänningar. SBUF rapport

Carlswärd J, Emborg M (2019). Pågjutning av stålfiberarmerad självkompakterande betong, *Bygg och Teknik*, nr 1, 2019, 6 sidor.

Concrete Report No 3 (1994). *Cracks in concrete structures – particularly temperature cracks*. Svenska Betongföreningen, Betongrapport nr 3. (In Swedish), 1994.

Cyron W, Nilsson M, Emborg M, Ohlsson U (2019). Bonded Concrete Overlays: A Brief Discussion on Restrained Shrinkage Deformations and Their Prediction Models, *Nordic Concrete Research*, No 61, volume 2/2019, Nordic Concrete Federation, sid 107-129.

Cyron W, Emborg M, Nilsson L-O, Åhs M. (2022a) Phenomenological modelling of concrete shrinkage: is shrinkage proportional to water loss? *Nordic Concrete Research Conference*, Stockholm.

- Emborg M, Ohlsson U, Persson M, Silfwerbrand J (2019). Slitbetong som brobeläggning, *Betong*, 2019, sid 43-46.
- Edwards Y (2011), Tätskikt och beläggning, kap 3 i *Robustare brobaneplatta – State-of-the-art och förslag till FUD program*, Sundquist, (redaktör), sid 37 – 72. (se Sundquist, 2011)
- Granju J (1996). Thin bonded overlays: About the role of fiber reinforcement on the limitation of their debonding, *Advanced Cement Based Materials* 4(1): 21 – 27.
- Jannok C (2004). Direktgjuten slitbetong på broar: stålbierarmerad och självkompakterad. Avdelningen för konstruktionsteknik, Luleå Tekniska Universitet, LTU-Ex-04/219, 146 sid
- Jonasson, J-E, (1994). *Modelling of temperature, moisture and stresses in young concrete*. Luleå University of Technology. Doctoral thesis 1994:153 D, 225 pp
- Júlio, E., Branco, F., Silva, V. (2004). Concrete-to-concrete Bond Strength: Influence of the roughness of the substrate surface. *Construction and Building Materials*, vol. 18. 675-681.
- Kaufmann, N., (1971) Das Sandflächenverfahren. Ein einfaches Verfahren zur Messung und Beurteilung der Textur von Fahrbahnoberflächen.. *Straßenbau-Technik*. Nr. 3, S. 131–135.
- Lindqvist M (1998): Direktgjuten slitbetong på broar – en uppföljning av de broar som har byggts med direktgjuten slitbetong sedan 1992, *Vägverket, avd teknik*, Luleå 1998, 115 sidor
- Lundström L (2021): Ytretarderande medel och härdningsförfarandets inverkan på vidhäftningshållfastheten - En praktisk studie av härdningsmetoders och ytretarderande medels inverkan på vidhäftningshållfastheten med inriktning mot brokonstruktioner. Luleå Tekniska Universitet. Byggkonstruktion och brand, Examensarbete. 125 sidor
- Persson M, Ohlsson U & Emborg M (2014a). Bridge deck concrete overlays – full scale studies and theoretical analysis. *Nordic Concrete Research*, 50:509–521, 2014.
- Persson M, Ohlsson U & Emborg M (2014b). Bridge deck concrete overlays – monitoring of cracking and general performance of two bridges. *Nordic Concrete Research*, 49:163–180, 2014.
- SBUF (2021). Slitbetong på brobaneplattor. Grundläggande forskning som bas för högpresterande och robust lösning. Projekt 13338. [www.sbuf.se](http://www.sbuf.se)
- Silfwerbrand, J. (1994). *Påggjutningar av betong*. Stockholm, Sweden: Structural Engineering, Royal Institute of Technology, Rapport nr 10, 1994. (In Swedish)
- Silfwerbrand, J. (1997). Stresses and strains in composite beams subjected to differential shrinkage. *ACI Structural Journal*, Vol. 94, No. 4, pp. 347-353.
- Silfwerbrand, J. (2003). Shear Bond Strength in Repaired Concrete Structures. *Materials & Structures*, Vol. 36, July 2003, p.p. 419-424.
- Silfwerbrand, J. (2009). Dimensionering av slitskikt i fiberbetong för brobaneplattor, CBI rapport 20 sidor.

Silfwerbrand, J. (2009). Bonded Concrete Overlays for Repairing Concrete Structures. Chapter 8, In: *Failure, Distress and Repair of Concrete Structures*. Ed. by N. Delatte. Oxford, Cambridge & New Dehli:: Woodhead Publishing Limited. p.p. 208-243.

Silfwerbrand, J. (2009b). Bättre bedömning av vidhäftning mellan betong och betong. *Bygg & Teknik*, vol. 101(7).

Silfwerbrand, J. (2017). Bonded Concrete Overlays: Over 30 years of Swedish research and experiences. *Concrete International*, vol. 39(5), 31-36.

Silfwerbrand, J., Farhang, A., & Söderqvist, J. (2008). New Swedish Design Method for Concrete Pavements. In: *Proceedings, 9th International Conference on Concrete Pavements. San Francisco, California, USA, August 18-21, 2008*.

Silfwerbrand J, Emborg M, Carslwård J (2011), Systemet brobanepatta utan tätskikt, kap 4 i Robustare brobanepatta – State-of-the-art och förslag till FUD program, sid 73 – 90. (se Sundquist, 2011) .

Sundquist H (2011) (redaktör), Robustare brobanepatta – State-of-the-art och förslag till FUD program, Sveriges Bygguniversitet, (medförfattare Mario Plos, Kent Gylltoft, Johan