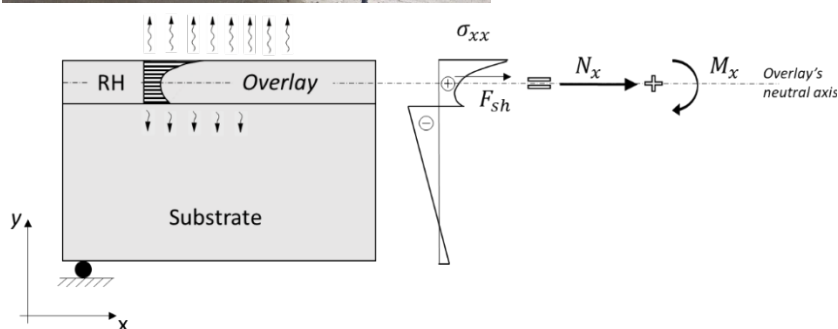


SLITBETONG PÅ BROBANEPLATTOR

Grundläggande forskning som bas för högpresterande och robust lösning



**Mats Emborg, Wojciech Cyron, Ulf Ohlsson,
Martin Nilsson, Martin Persson**

2021-11-08

FÖRORD

Föreliggande rapport redovisar resultatet av projektet *Slitbetong på brobaneplattor - Grundläggande forskning som bas för högpresterande och robust lösning* vars syfte har varit att adressera de övergripande 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. Projektet är finansierat med medel från Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF). Projektredovisningen görs med material från ett parallellt forskningsprojekt inom samma område som finansierats av Trafikverket.

Vi vill rikta ett stort tack till SBUF för finansiellt stöd samt till NCC, dels för deras bidrag i ansökningsprocessen, dels för deras engagemang och givande diskussioner – särskilt i projektets inledning. Arbetsgruppen som genomfört projektet är:

Wojciech Cyron, doktorand Ltu
Mats Emborg, professor Ltu samt Betongindustri AB
Ulf Ohlsson, universitetslektor, Ltu
Martin Nilsson, biträdande professor, Ltu
Martin Persson, fd. doktorand, Ltu

Luleå, november 2021

SAMMANFATTNING

Bakgrund och projekt

En viktig del av en vägbro utgörs av brobaneplattan – det är den som för ned laster från trafiken till de bärande delarna och som skyddar dem mot exponering av t.ex. tösalt. En ofta använd lösning på brobana är att förse den med direktgjuten slitbetong, en utformning som jämfört med alternativet med bitumenöveryta är a) mer miljövänlig och mer kostnadseffektiv – ger lägre underhåll, mindre trafikstörningar, robustare lösning b) enklare, både konstruktivt och utförandetekniskt – t.ex. minskar antalet arbetsmoment c) ljusare – en optisk fördel erhålls för trafikanter d) mer ”ärlig” och robust – alla eventuella skador och förändringar kan direkt observeras vid inspektion.

Den direktgjutna slitbetongen ska framförallt möta allmänt ställda krav på hållfasthet, speciellt slitstyrka, och beständighet. Fler andra funktioner ingår 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 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 är tydliga med hänsyn till exponeringsklass, dvs. samma som för tösaltad brobana; XD3, XF4 och frysprovad. Kraven låser i viss mån betongvalet liksom bindemedelskombination. Ballast för slitbetong ska dessutom uppfylla krav på nötningsmotstånd och begränsat buller.

Det har tidigare identifierades ett antal kunskapsluckor och frågeställningar kring den direktgjutna slitbetongen: 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?

Vid LTU startades upp forskningsprojekt i syfte att titta på frågorna. Två doktorander har varit engagerade i arbetet i olika omgångar liksom handledande seniorforskare. Finansiering har skett genom Trafikverket (del I) och SBUF (del II). Rapporten redovisar båda delarna med fokus på del II.

Initialt skedde en genomgång över kunskapsläget med koncentration på material- och konstruktionstekniska aspekter, t.ex. hur man kan åstadkomma perfekt vidhäftning och hur man kan säkerställa optimal härdning för att t.ex. minska krympeffekter.

Det inledande arbetet bl.a. genom studier av data från broar inom Trafikverkets databas Batman visar på vissa skador på slitbetongen hos några broar som troligen skett under härdningsperioden. För närvarande synes broarna ändå uppvisa god funktion i de flesta fall. Beständigheten mot tänkbar framtida nedbrytning bedöms vara acceptabel enligt de rapporter som föreligger i databasen Batman. Ötliga broar med direktgjuten slitbetong är i mycket bra skick.

Detaljstudierna i fält på ett par broar visar att dagens metodik för sprickobservationer, mätmetoder för kvantifiering av tillstånd ger en god bild av status på applikationen med direktgjuten slitbetong. Inom del I av projektet genomfördes dessutom en detaljstudie av en pågjutning med slitbetong vid broreparation. Information under lång tid efter gjutning erhöles om deformationer i konstruktionsbetong och pågjutningsbetong samt fukttillstånd i pågjutningen.

En slutsats från inledande 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.

Därför skedde omfattande studier av krympning och modeller för prognoser studeras. En prototyp till modell togs fram och presenteras i Betonghandboken. Pilotstudier av egenspanningar med modellerna genomfördes för ett antal typfall, däribland pågjutning. Intressanta iakttagelser kan göras, t.ex. att tjockleken av pågjutningen har en kraftig inverkan på spänningarna.

Finita Elementanalyser genomfördes av situationen med uppsprickande pågjutning på underbetong där krympning sker. Variationer skedde av t.ex. pågjutningens sammansättning och gjutning liksom preparering av ovansida underbetong inverkan på vidhäftning. Trovärdiga resultat har erhållits.

Olika försöksmetoder att dokumentera vidhäftningsegenskaper jämfördes och gav underlag till teoretisk modellering av skeendet vid belastning av normalkrafter och skjuvkrafter. Studier skedde hur t.ex. härdning av pågjutningen påverkade det brottmekaniska beteendet hos gränssnittet.

Resultat och rekommendationer

Observationer från fullskalestudier visar att gjutning och härdning i fuktig gynnsam miljö ger låga nivåer på egenspanningar och sprickfri konstruktion utan kantresning.

Projektet visar att krympningen har stor inverkan på den direktgjutna betongens funktion. Det är sålunda viktigt att ha denna parameter under kontroll, speciellt om torrt och blåsig väder förväntas råda de närmaste månaderna efter gjutning. Krympningens beroende av betongsammansättning är svår att prognosticera. Indikationer finns beträffande inverkan av vattencementtalet. Framtagning av betong med låg krympning kan ske genom förprovning i laboratorium; t.ex. kan inverkan av krympreducerare undersökas.

Flertalet av de inspekterade broarna uppvisar sprickbildning som troligen initierats redan under första dagen efter gjutning, t.o.m. under första timmarna. Tidig plastisk krympning är således en viktig parameter och bör hållas under kontroll.

Projektet visade att på samma sätt som krympningen är vidhäftningen mot underbetongen en minst lika 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.

Laboratorieförsök visar på vissa tendenser beträffande vidhäftning; t.ex. att water-jetting av underbetong ger höga vidhäftningshållfastheter jämfört med andra ytbehandlingsmetoder. Försiktig retardering av pågjutningsbetongen kan möjligen också ge bättre vidhäftning. Vattenbegjutning av pågjutningen är gynnsamt jämfört med plastfolie.

En tillkommande faktor beträffande utförande är att härdning av pågjutningen är en nyckel till att förhindra tidiga krympreleler som inverkar negativt på vidhäftningsskiktet.

Att gå upp i hållfasthet hos pågjutningsbetongen, dvs. att sänka $v_{ct} < 0,40$, kan vara gynnsamt med hänsyn till öka nötningsmotstånd samt vidhäftning enligt observationer i projektet. Troligen innebär detta dock att krympningen kan öka.

Den färskas betongens egenskaper (konsistens och öppethållandetid) bör hållas under kontroll, speciellt vid användning av självkompakterande betong.

Armering med nät eller stålfibrer minskar risken för att stora, besvärande sprickor skall uppstå. Ju tjockare pågjutning, desto viktigare är armering eftersom avståndet från överyta till underbetongen ökar. Lägre fibermängder är gynnsamt med hänsyn till gjutegenskaper, speciellt om självkompakterande betong är fallet. Mängden kan vara mycket låg vid perfekt vidhäftning och inte alltför tjock pågjutning.

Förbehandlingen av underbetong är avgörande för att åstadkomma en högkvalitativ ihopgjutning av de två skikten. Rengöring, förvattning och primer diskuteras i rapporten.

Vid gjutningen säkerställs en homogen betong genom en väl anpassad gjuttakt så att utläggning och avjämning hinns med.

Härdningen av pågjutningsbetongen har mycket stor betydelse för både undvikande av sprickbildning och god vidhäftning.

INNEHÅLL

1	INLEDNING	1
1.1	BAKGRUND	1
1.2	KRAVSTÄLLNING OCH UTMANINGAR SAMT FORSKNINGSFRÅGOR	3
1.3	SYFTE, MÅL OCH NYTTA	5
1.3.1	<i>Syfte</i>	5
1.3.2	<i>Mål</i>	5
1.3.3	<i>Generell nytta</i>	5
1.3.4	<i>Direkt nytta för intressenter</i>	5
2	INLEDANDE UTBLICK – TEKNISKA LÖSNINGAR.....	7
3	METOD	10
3.1	INLEDANDE KOMMENTARER	10
3.2	STRATEGI OCH ARBETSPLAN, SBUF-DEL	10
4	DEL I (TRV)	12
4.1	KORT INVENTERING	12
4.2	OBSERVATIONER I FULL SKALA.....	13
4.3	OBSERVATIONER I LABORATORIUM JÄMFÖRT MED BERÄKNINGAR	16
4.4	OBSERVATIONER I FULL SKALA JÄMFÖRT MED BERÄKNINGAR.....	18
4.5	REFLEKTIONER	22
5	DEL II (SBUF) – INVENTERING OCH KRYMPNING.....	24
5.1	INLEDNING.....	24
5.2	KUNSKAPSLÄGE, INVENTERING	24
5.3	KRYMPNING.....	26
5.4	FUKTTILLSTÅND	31
5.5	KOMPLETTERANDE ANALYS AV KRYMPNING OCH KRYPNING, FÖRSÖK M.M.....	33
6	DEL II (SBUF) – EGENSPÄNNINGAR.....	38
6.1	INITIALA BERÄKNINGAR AV KRYMPSPÄNNINGAR FÖR STRUKTURELLA SITUATIONER	38
6.2	FÖRHINDRAD KRYMPNING - FÖRSÖK	43
7	DEL II (SBUF) – VIDHÄFTNING	45
7.1	INLEDNING.....	45
7.2	LABORATORIEFÖRSÖK	46
7.2.1	<i>Utdragsförsök, standardmetod</i>	47
7.2.2	<i>Spjälkningsförsök</i>	48
7.2.3	<i>Balkböjning</i>	49
7.3	ANALYS OCH TILLÄMPNING AV BROTTMEKANISKA EGENSKAPER	50
8	DEL II (SBUF) – ANALYS AV PÅGJUTNING	53
9	DISKUSSION.....	56

9.1	INLEDANDE KOMMENTARER	56
9.2	SAMMANFATTANDE REFLEKTIONER.....	56
9.2.1	<i>Fältstudier</i>	56
9.2.2	<i>Tidiga belastningsfenomen; krympning</i>	57
9.2.3	<i>Egenspänningar</i>	57
9.2.4	<i>Vidhäftning</i>	58
10	SLUTSATSER	59
11	REKOMMENDATIONER.....	62
11.1	ALLMÄNT	62
11.2	BETONGVAL	62
11.3	ARMERING OCH TJOCKLEK	63
11.4	FÖRBEHANDLING.....	63
11.5	UTFÖRANDE	64
11.6	HÄRDNING.....	65
12	LITTERATURFÖRTECKNING.....	66

1 INLEDNING

1.1 Bakgrund

Ett hållbart samhälle förutsätter väl fungerande anläggningar för vår infrastruktur. Samtidigt som delar av den byggs ut med en rasande fart har andra delar en ålder som i många fall är högre än 100 år. Här har vägbroar historiskt varit avgörande för att transporter överhuvudet taget ska kunna ske och broarna är givetvis lika viktiga nu som då. I vårt vattenrika land är de många; Trafikverket äger, förvaltar och underhåller över 16 000 vägbroar och lika många - om inte mer - finns i annan ägarregi, t.ex. kommuner. Som bekant är betong huvudsakligt ingående byggnadsmaterial i vägbroarna och otaliga betongbroar har varit i tjänst mycket länge i vårt land – längre än de där 100 åren, Figur 1.1.

En viktig del av vägbron utgörs av brobaneplattan – det är den som för ned laster från trafiken till de bärande delarna och som skyddar dem mot exponering av t.ex. tösalt. Känt är att det går åt stora resurser till drift och underhåll av brobanorna eftersom vissa delar (skyddande ytskikt, kantbalkar, räcken, tätskikt etc.) behöver uppgraderas och ibland repareras.

Trafikverket initierade ett samarbete med Sveriges Bygguniversitet (SBU: Tekniska högskolorna i Lund (LTH), Stockholm (KTH), Göteborg (Chalmers) och Luleå tekniska universitet (Ltu)) för att utreda hur hållbarheten hos brobaneplattan och broöverbyggnaden skall kunna förbättras.

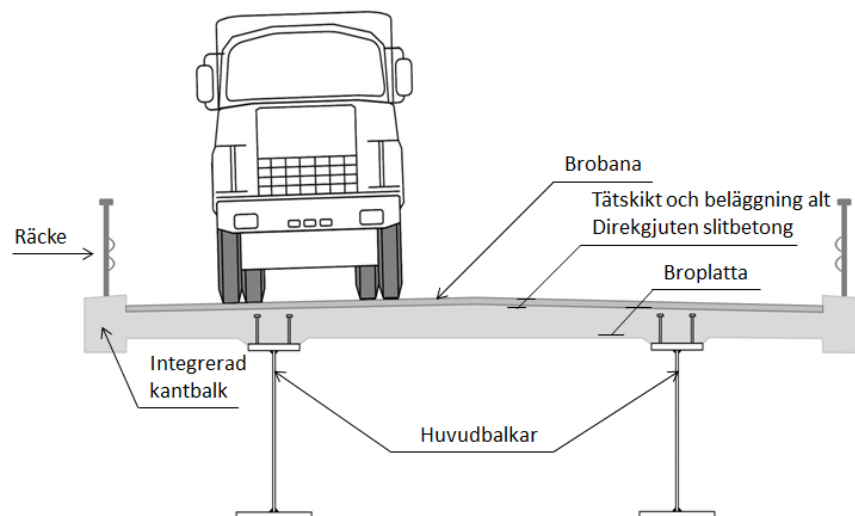


Figur 1.1 Bro över Testeboån, NV Ockelbo. Oarmerad betong, byggd 1916

En förstudie genomfördes för att klargöra laster och kravspecifikationer, utvärdera tekniska prestanda hos ingående material, undersöka vidhäftningsproblematik mellan pågjutning och konstruktionsbetong samt för att studera sprickbildning och andra parametrar t.ex. frågor rörande dimensionering, beständighet hos betong- och asfaltbeläggning, livscykelkostnad samt forsknings- och utvecklingsmöjligheter. Arbetet presenterades vid seminarium 2011 och finns redovisat i ”Robustare brobaneplatta – State-of-the-art och förslag till FUD program”, Sundquist (2011) (redaktör). Efter seminariet gavs möjligheter att starta några prioriterade forsknings- och utvecklingsprojekt. Här redovisas ett projektområde dedikerat till slitbetong, som under ett antal år har kunnat bedrivas med resurser erhållna från SBUF och FOI BBT (Trafikverket).

En typisk sådan brobaneplatta visas i Figur 1.2 med de ingående komponenterna kantbalk med räcke, broplatta och den yttre synliga brobanan. Brobanan utformas så att vattenavrinning kan

ske problemfritt, att jämnhet säkerställs, att friktionen är hög för bra väggrepp och att en god beständighet åstadkoms. Livscykel- och användarkostnad ska hållas nere.



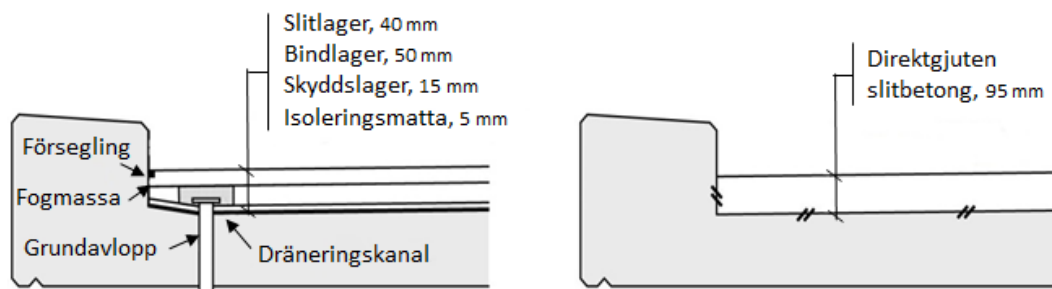
Figur 1.2 Exempel på tvärsektion av brobaneplatta för en samverkansbro stål och betong, från Sundquist (2011).

Brobanep Plattans konstruktionsbetong måste skyddas mot nötning, vatten och vägsalt. Detta åstadkoms traditionellt med tätskikt närmast konstruktionsbetongen och överliggande asfaltbeläggning, se Figur 1.3. Som ett alternativ kan man gjuta på ett skikt av tät betong, dvs. den direktgjutna slitbetongen, se figuren – en utformning som har använts på ca 5 % av alla broar idag, både vid nyproduktion och vid reparation.

Båda systemen har sina för- och nackdelar. Största fördelen med flerlayersystemet är brobanans jämnhet. Till nackdelarna hör bland annat att tätskiktet har en begränsad livslängd, risk för blåsbildning finns i tätskiktet och att utförandet är väderberoende i och med många fogtyper. Epoxi krävs normalt och dräneringen kräver extra omsorg liksom behandling av underlag för god vidhäftning.

Sammanfattningsvis är lösningen med direktgjuten slitbetong jämförd med bitumenalternativet:

- mer miljövänlig – inga epoxiprimrar, inga öppna gaslågor vid applicering av tätskikt, lång livslängd, mindre trafikbuller
- mer kostnadseffektiv – lägre underhåll, mindre trafikstörningar, robustare lösning
- enklare, rent konstruktivt – t.ex. undviks funktionsproblem genom att inga dräneringskanaler finns
- enklare att utföra – antalet arbetsmoment minskar vid byggandet vilka kan genomföras under en längre säsong
- ljusare – dvs. en optisk fördel erhålls för trafikanter
- mer ”ärlig” och robust – alla eventuella skador och förändringar kan direkt observeras vid inspektion



Figur 1.3 Typiska lösningar för brobanepaltor och exempel på brobanereparation med direktgjuten slitbetong på en bro i närheten av Lycksele, 2015.

Gängse uppfattning har varit att farbanor av betong ger ett lägre underhållsbehov jämfört med asfaltbeläggning genom sin stora slitstyrka och beständighet. Med andra ord är slitbetong att föredra vid stort dubbdäcksslitage och för broar där underhåll och tillståndsbedömning försvåras av hög trafikintensitet och långa avstånd. Betongfarbanor blev speciellt populära under 80-talet då vattenbilning introducerades och skadat täckskikt enkelt kunde tas bort och betong applicerades direkt. Slitbetonglösningen är på vissa håll mer ovanlig än tidigare – enligt några bedömningar bl.a. beroende på att kunskap om optimalt utförande delvis ”fallit i glömska”, Berglund, Nilsson (2007). Mer än 500 broar har denna lösning vilket utgör mindre än 5 % av det totala brobeståndet i TRVs regi. Flera är faktiskt byggda under senare år.

1.2 Kravställning och utmaningar samt forskningsfrågor

Det ställs speciella krav på slitbetongfarbanor när det gäller utförandeklass, tjocklek, stålfiberinblandning (om så är fallet), behandling av motgjutningsyta, samt råhet och jämnhet hos färdig farbaneyta. Att uppfylla alla dessa kan vara svårt då flera utförare – för att inte också tala om materialleverantörer och konstruktörer – saknar djupare erfarenhet av betongalternativet.

Slitbetongen i sig ska visa på hög hållfasthet, beständighet och slitstyrka och samtidigt ha begränsad krympning och temperaturrelaxation. Hög slitstyrka och låg krympning åstadkoms bl.a.

med hög stenhalt av utvald ballast som dessutom bör vara ljus, se Löfsjögård (2003) och Dolk (2017) samt med låg pastavolym. Beträffande krympning visar senare utredning på komplex och svåröverskådlig inverkan av betongsammansättning på tidsförlopp och slutvärde, Emborg (2021). Ett intressant alternativ som använts utanför Sverige är ultrahöghållfast betong med mycket hög beständighet och högt motstånd mot nötning. För dessa betongsammansättningar finns stor risk för ansenlig självuttorkningskrympning dvs. krympning enbart beroende av bindemedlets tidiga hydrataation.

Utförandet ska säkerställa att man får god vidhäftning mot konstruktionsbetongen, god homogenitet i pågjutningen men framförallt att man inte får sprickor och andra olägenheter. Givetvis bör betongen vara självkompakterande (SKB), se t.ex. Jannok (2004). Ytbehandling av den färska betongen sker så att ojämnheter/vågigheter inte uppkommer, som inte accepteras av bl.a. komfortskäl.

Oavsett om vibrerad betong eller självkompakterande betong används är det viktigt att tydliga arbetsbeskrivningar upprättas för gjutning och härdning. Betongen får t.ex. inte överbearbetas – cementpasta dras då upp till ytan vilket försvagar slitbetongen. Vågigheter kan uppstå när vibrobrygga används på fel sätt.

I förstudien (Sundquist (2011)) identifierades ett antal kunskapsluckor och frågeställningar:

- Hur ska man åstadkomma perfekt vidhäftning? Hur inverkar underlagsbetongens fukttinnehåll vid kompaktering eller om man använder SKB?
- Hur inverkar ofullständig härdning av pågjutningen risken för krympsprickor?
- Hur mycket ökar prestandan vid användning av (ultra)höghållfast betong?
- Vilken fibermängd är egentligen nödvändig?

Vid utformning av fortsatt arbete medelst ansökningar till både Trafikverket och SBUF formulerades dessa om något till problemområden och behov:

- Osäkerheter föreligger beträffande betongutformning och armering samt hur man åstadkommer god vidhäftning.
- Optimal gjutmetod och härdningsmetod borde klarläggas.
- Möjligheten att mer utbrett använda självkompakterande betong borde undersökas.
- Information brister beträffande utförda broar vilket konstateras i t.ex. Sundquist (2011) och Silfwerbrand et al. (2011).
- I de fall skador har uppkommit finns det mycket knapphändig information om faktiska förhållanden och tänkbara orsaker.

Det bedömdes att utförare och väghållare har ett detaljintresse att bl.a. utreda:

- Hur kan utförandet optimeras med rätt betong och rätt gjut/härdningsmetod?
- Hur påverkar vidhäftningen mot konstruktionsbetongen pågjutningens beteende och hur åstadkoms perfekt vidhäftning?
- Hur kan fibrer hjälpa till att fördela eventuella sprickor och vilka utmaningar finns vid gjutning av fiberbetong?

- Hur påverkar betongens krympning och omgivningens temperatur och relativa fuktighet vid härdning brobanebetongens prestanda och på vilket sätt ska man analysera detta?

För forskare kunde följande forskningsfrågor därefter identifieras:

- Vilka tekniska parametrar är viktiga för utförandet och hur modelleras dessa?
- Den färiska betongens egenskapstillväxt är viktig – hur ser den ut för dagens och framtidens betonger?
- Ett prognosverktyg för utförandet behövs – hur ska detta byggas upp?
- Kan dagens analysmetoder för krympning och temperatureffekter tillämpas direkt?
- Om inte, vilka förändringar bör ske av metoderna och beräkningsprogram?

1.3 Syfte, mål och nytta

1.3.1 Syfte

Initialt syfte med projektet att ”helt enkelt” adressera de övergripande utmaningarna ovan för att säkerställa funktion och livslängd hos slitbanebetongen dvs. hög beständighet, låga bygg- och underhållskostnader och att betongen är optimerad med hänsyn till konstruktiva prestanda.

1.3.2 Mål

En bruttolista på projektmål formulerades i ansökningsprocessen och föreslogs att detaljeras efter uppstartsmöte. Följande förslag på mätbara mål fanns med i ansökan, varav prioritering skedde på mål 5, 4 och 2 i aktuell del av studien:

- 1) Optimala gjut- och härdningsmetoder – rapport med minst tre optimala lösningar för bästa slutresultat och minst tre varnande exempel för sämre utförande
- 2) Möjligheter med nya betongblandningar – minst fem förekommande lämpliga alternativ till olika bindemedelskombinationer och konsistens.
- 3) Metoder för att effektivisera byggprocessen generellt – 10 förslag att effektivisera gjutning och härdning
- 4) Tillstånd/kvalitet hos utförda broar – minst 20 broar i översiktlig studie, minst 5 i djupare analys
- 5) Inverkan av uppträdande laster och effekt på utformning – krympning, temperatur, yttre last samt härdning

1.3.3 Generell nytta

Den generella nyttan beskrevs som: billigare pågjutningar med bättre prestanda; dvs. funktion, hållbarhet och miljövänlighet kopplad till rätt utförande på ett tydligare sätt – jämfört med vad som är fallet idag.

1.3.4 Direkt nytta för intressenter

Den direkta nyttan listades initialt under ansökningsskedet:

- *Entreprenörer* får reda på hur slitbetonger appliceras på bästa sätt utifrån bygghandlingar. Av värde är t.ex. att få information om hur kritiska olika skeden är i utförandet genom att vikta influerande faktorer på ett vetenskapligt sätt. Nyttan av ”nya”

betonger, gjutmetoder och armeringslösningar etc. är här intressanta ur ett utförandeperspektiv.

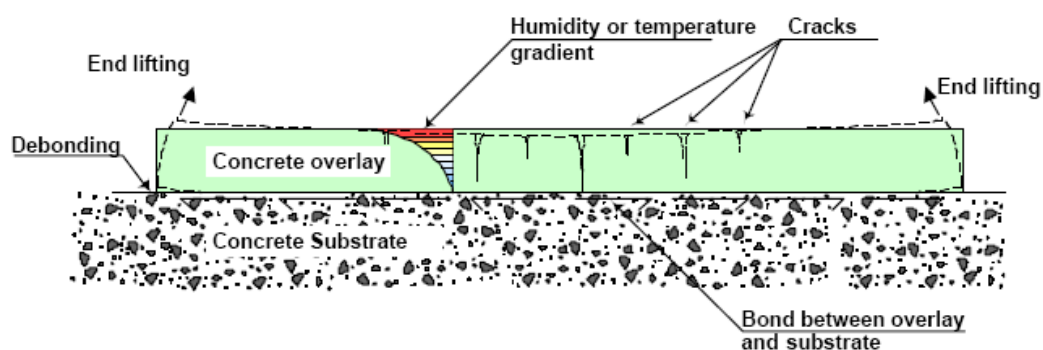
- *Trafikverket* har nytta av resultaten för att säkerställa brobaneplattor med optimal funktion och lång livslängd. För *samhället* är den ökade funktionaliteten och beständigheten en viktig ingrediens i den hållbara byggda miljön.
- *Materialleverantörer* får information om påverkan av t.ex. betong med möjlig låg krympning, hög slitstyrka och låg miljöbelastning och kan utveckla skräddarsydda högpresterande betonger för brobana, helst självkompakterande.
- *Konstruktörer* kan tillämpa metoder baserade på nya material, t.ex. kombination av högpresterande betong och stålfibrer. Kunskap om hur pågjutning kan tas med i analys av brons lastupptagning (förutsatt full vidhäftning och att inte sprickbildning sker).
- För *universiteten*, kan kunskapsuppbyggnaden vara av nytta vid internationella kontakter. Kunskapen i sig kommer att förmedlas i utbildning av nya ingenjörer till nytta för samhälle och industrin.

2 INLEDANDE UTBLICK – TEKNISKA LÖSNINGAR

(Denna korta redogörelse fanns med som teknisk bakgrund till arbetet i ansökan vilket sedermera utvidgades vid litteraturstudie inom arbetet).

Förutom högt nötningsmotstånd utformas betonglösningen för att kontrollera eventuellt uppkomna sprickor och vidhäftningssläpp av krympning och temperatureffekter. Sprickor kan inte accepteras för betongkonstruktioner av beständighets- och funktionsskäl, se t.ex. Tuutti (1982), Buenfield & Newman (1987), Sandberg & Tang (1994), Lorentz & French (1995), Tammo (2009), Fagerlund (1987) och Betongföreningens rapport nr 3 (1994) och 13 (2008). Därför är sprickvidden av speciellt intresse liksom eventuell öppning av gjutfog mot kantbalk.

Figur 2.1 visar de fenomen som kan inträffa generellt hos pågjutningar utsatta för ojämn temperatur- och fuktprofil. Figur 2.2 visar intressanta forskningsresultat, bl.a. inverkan av fibermängd på sprickbredd och samband mellan betongens seghet och sprickbredden, se även referenslistan beträffande fenomenen.

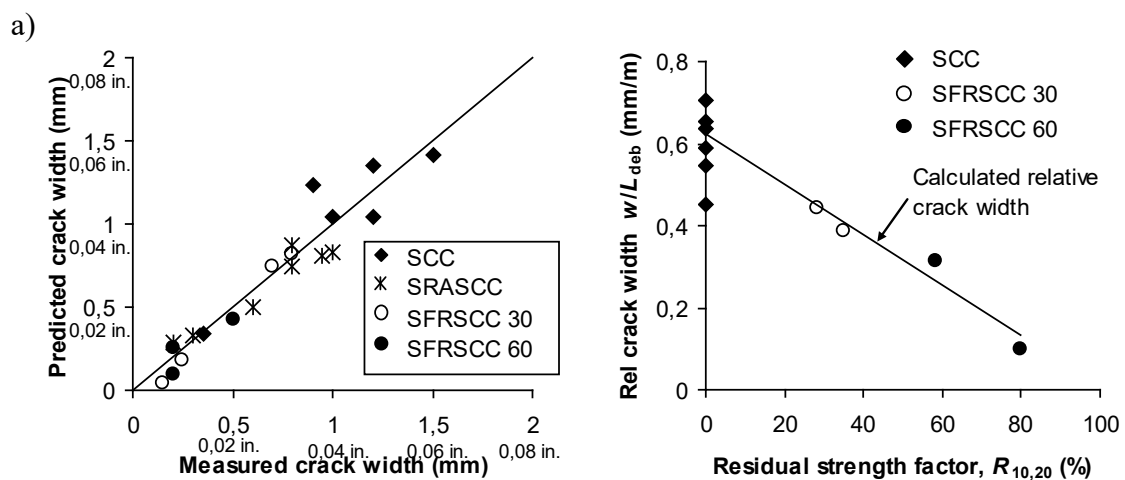
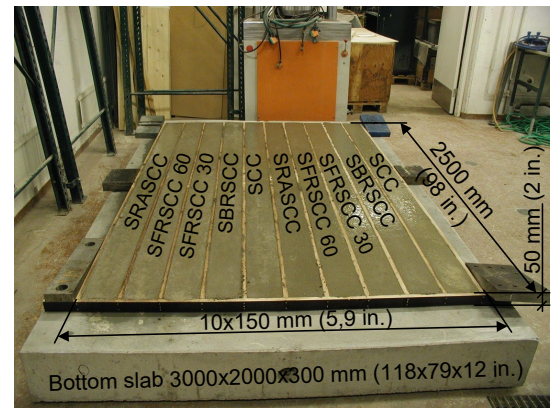
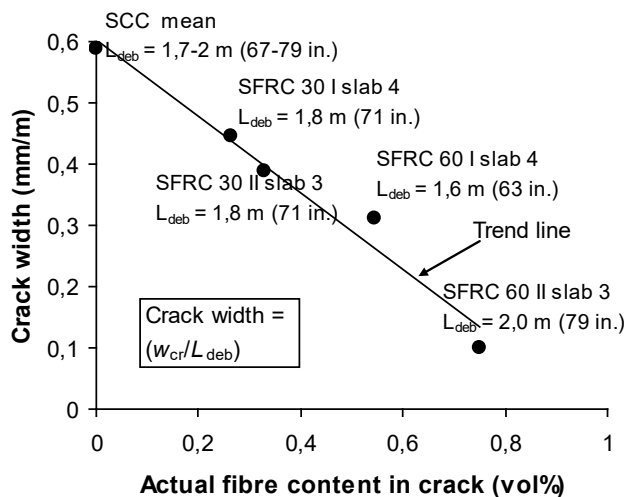


Figur 2.1 Schematisk skiss över de olika fenomen och skador som kan inträffa hos en pågjutning på konstruktionsbetong, Carlswärd (2002).

Den direktgjutna betonglösningen ska enligt ovan möta krav på jämnhet och medge möjlighet att använda stålfibrer i en självkompakterande betong, se t.ex. Carlswärd & Emborg (2014a,b) och det utmärkta examensarbetet av Jannok (2004) där det visas hur man kan få hög kvalitet med en stålfiberarmerad självkompakterande betong tillsammans med en lätt ytvibrering medelst en rulle som dras över betongytan, Figur 2.3.

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), och Grzybowski & Shah (1990).

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. nämnda Jannok (2004) och Lindqvist (1998). I den sistnämnda inventeringen observeras att dokumentation av utförande är mindre omfattande.



b) *Figur 2.2 a) Sprickvidd som funktion av stålfibermängd vid pågjutningsförsök i laboratorium. b) beräknad sprickvidd i jämförelse med uppmätt för oarmerad självkompakterande betong (SCC) och motsvarande med krympreducerande medel (SRASCC) samt stålfiberarmerad betong med 30 resp. 60 kg inblandning (SFR SCC), samt beräknad relativ sprickbredd som funktion av $R_{10,20}$ som är ett mått på fiberarmerad betongs seghet. Carlswärd & Emborg (2014a).*

Skandinavisk kunskap finns inom området, t.ex. NTNU Trondheim och även Norska Vejdirektoratet. Internationellt är denna lösning inte ny. Erfarenheter från betongbeläggningar i exempelvis Tyskland har tillämpats på slitbetonglösningar för broar, Beusheusen & Alexander (2004, 2006a, 2006b).

Nämnas kan även den omfattande studien angående pågjutningar i stom- och industribyggnadssammanhang utförd inom SBUF projekt 2012, se Carlswärd (2017).

Beträffande tvångslaster (temperaturrelater och krympning) på broar kan nämnas två SBUF projekt vid LTH och Ltu; "Utvärdering av tvångslaster" (nr 13136) resp. "Undvikande av lastoberoende sprickor" (nr 12965) vilka har gett input. Kunskapsöverföring mellan pågående projekt planerades genom en nationell workshop (vilket också skedde på KTH, 2018).



Figur 2.3 Gjutning av självkompakterande slitbetong med en försiktig ytvibrering i två omgångar, Jannok (2004).

3 METOD

3.1 Inledande kommentarer

Vid genomförandet urskildes delar som var av grundforskningskaraktär (F nedan), och därigenom lämplig som doktorandinsats, och samtidigt delar med hög tillämpningsgrad (U) lämpliga för insatser av seniora forskare, laboratoriepersonal och industripartner.

Ursprunglig ansökan och projektplan för detta projekt 13338 – ”Slitbetong på brobaneplattor - grundläggande forskning som bas för högpresterande och robust lösning” avsåg grundforskningsdelen med deltagande av doktorand och handledare.

Det observeras att, före och under uppstart av aktuell del av studien, utfördes forskningsaktiviteter inom området genom finansiering av Trafikverket. Ltu har samarbetat med KTH (Johan Silfwerbrand). Martin Persson, Ramböll AS (sedermera WSP) har varit utredningsman på deltid som industridoktorand Ltu. Även den doktorand som sedermera anställdes för projekt 13338 (Wojciech Cyron) slutförde i viss mån delar av Trafikverksinsatsen.

Vi kommer därför att även redovisa delar av forskningsinsatsen finansierad av Trafikverket och markerar detta som TRV-projekt (del I).

3.2 Strategi och arbetsplan, SBUF-del

Utgångspunkt: Arbetet startades upp genom traditionell genomgång över kunskapsläget. Det koncentreras här på material- och konstruktionstekniska aspekter, t.ex. hur man kan åstadkomma perfekt vidhäftning och hur man kan säkerställa optimal härdning för att t.ex. minska krympeffekter. (FoU).

En annan del i genomgången var att kartlägga de broar som utförts med direktgjuten slitbetong avseende t.ex. genomförande och slutlig kvalitet.

Modellering: Modellering skedde av spänningar och deformationer av krympning och temperatureffekter. Genom att beräkningar med FEM program redan hade skett i del I (TRV-studien) inriktades modelleringen på vidareutveckling av dessa. Beräkningar planerades t.ex. att ske av fuktförhållanden i pågjutningen för att få en bild av krymplaster. (F).

Modeller studerades för krympning av självuttorkning och uttorkningskrympning samt även för plastiska krympsprickor i tidigt skede (samverkan med parallellt SBUF-projekt).

Det avsågs även att ta fram modeller för lämplig konsistens (viskositet och flytgränsspänning för SKB) för den optimala gjutningen. Studier av framtida lämplig betong fanns med i planen t.ex. med inblandning av tillsatsmaterial och nya typer av stålfiber.

Laboratieförsök: Litteraturstudien avsågs ge indata till försöksserier för laboratoriet. Intressanta parametrar att undersöka, förutom uttorkning och krympning, är vidhäftning vid gjutning mot tidigare gjuten betong, seghetsegenskaper hos fiberbetong och färska egenskaper hos självkompakterande pågjutningsbetong (gjutegenskaper). (F och U).

Utförande av pågjutning av slitbetong: Det planerades att undersöka halvskale-/fullskaleförsök genom nya metoder för pågjutning av slitbetongen, t.ex. hur man styr konsistensegenskaper under gjutning av självkompakterande- eller fullflytbetong och inverkan av ytbehandlings- och härdningsmetoder. Intressant är att studera hur man åstadkommer optimal vidhäftning. Delar av detta fick i viss mån utgå.

Rekommendationer: Forskningsrapporter/artiklar planerades att skrivas. Resultaten från fullskaleobservationerna, laborieförsök och teoretisk modellering kan ge ett underlag för formulering av rekommendationer. (U, F-implementering).

Följande delmoment utfördes:

- 1) **State-of-the-art** – Kartläggning av utförda broar med direktgjuten slitbetong – typ, geometri, betongval etc. Genomgång av tidigare metoder och nya metoder för utförande: betongens konsistens, gjutteknik, härdningsmetodik m.m. Genomgång av dimensioneringsmetoder enligt aktuellt kunskapsläge, även internationellt, som ett komplement till redan utförd inventering.
Rapport: Lägesrapport (konferens/tidskriftsartikel)
- 2) **Laborieförsök** – Materialparametrar – pågjutningsbetong och konstruktionsbetong (hållfasthet, krypning, krypning etc.). Vidhäftning pågjutning/underlagsbetong vid olika ytbehandlings- och sprickbildningsförhållanden. Fiberbetongs egenskaper liksom egenskaper hos självkompakterande betong
Rapport: Laborieförsök (konferens/tidskriftsartikel)
- 3) **Teoretisk modellering av materialegenskaper** – Modellering av krympning och deformationer av last.
Rapport: Tidskriftsartikel, text till Betonghandbok – Material
- 4) **Teoretiska beräkningar, modellering** – Vidareutveckling av beräkningar av påkänningar med FEM program. Modellering av spänningar och deformationer av krympning och temperaturrelaxation.
Rapport: Modellering, metoder och beräkningsexempel (tidskriftsartikel), exempel till Betonghandbok – Material kap 19 (Egenspänningar av temperaturrelaxation och krympning)
- 5) **Slutrapport** – Generell forskningsrapport (licentiatavhandling och tidskriftsartiklar), praktiska rekommendationer.
(Licentiatavhandling är vid färdigställande av denna slutrapport inte redovisad – underlag finns för delavsnitt).

4 DEL I (TRV)

I följande avsnitt ges en exposé över de resultat som framkommit inom den del finansierad av Trafikverket med huvudsaklig medverkan av Martin Persson.

Redogörelsen fokuserar på huvudsaklig utgångspunkt, metodval, resultat och sammanfattande slutsatser från delområden. Referens sker till publicerade artiklar och konferensbidrag samt i några fall artiklar i populärvetenskapliga tidskrifter. I några fall refereras till ännu inte publicerade dokument.

4.1 Kort inventering

Inledningsvis genomfördes en lägesstudie som gav några hållpunkter för forskningen t.ex. att slitbetongskiktets beteende beror på en mängd faktorer och fenomen, allt ifrån tidig förpreparering av konstruktionsbetongen till vad som händer många månader efter gjutningen.

Det framkom även att skicket hos underliggande betongyta liksom hur den färska betongen appliceras har stor inverkan på vidhäftningen. Skillnad föreligger mellan pågjutning av självkompakterande kvalitet jämfört med en traditionell konsistens med allt vad det innebär: arbetssätt vid gjutning, betongrecept osv.

Inverkan av tidig krympning och temperaturrörelser är svår att överblicka. Fukttillståndet i pågjutningen är tydligt relaterat till betongrecept, uttorkningsförhållanden i både den unga och tidigare gjutna betongen. Miljön kring bron påverkar – broar sträcker sig ju ofta över en fuktig, kylig vattenyta, dvs. ett lokalt klimat förekommer kring bron. Väderleksbetingelser varierar under lång tid efter gjutningen och det konstaterades att uttorkningsprognoser i de flesta fall är mycket osäkra.

För att förstå kraftspelet i slitbetongen måste man känna till horisontella tvångsspänningar i själva pågjutningen samt skjuvspänningar och vertikala normalspänningar (i gränsytan mellan pågjutningen och konstruktionsbetongen). Dessa är beroende av rörelserna av temperaturvariationer och uttorkning men också av geometri, betongens mekaniska egenskaper, dvs. elasticitet och krypning, samt även egenskaper nära dragbrott (styvhetsmjuknande vid höga dragspänningar).

Idag finns ingen exakt information om skjuv- och normalspänningarna och då blir det naturligtvis vanskligt att bestämma vidhäftningsbehovet. Liknande kraftspel uppträder i andra typer av pågjutningar, t.ex. i stomsammanhang, se Carlswärd och Emborg (2019).

Lämpliga betongrecept för slitbetong behöver redas ut för att säkerställa funktion inkluderande rätt stålfibermängd eller annan armering. Trafikverket ger instruktioner i sina publikationer t.ex. beträffande betongkvalitet för beständighet och funktion, minsta tjocklek (70 mm vid stålfiber, 95 mm vid annan armering), ballast för högt slitagemotstånd, vidhäftning (kriterier och kontroll) samt jämnhet och friktion.

Den praxis som tillämpas i vårt land beträffande fiberarmering är trubbig och anses ge onödigt höga stålfibermängder. Vidare bör fördelar och nackdelar med självkompakterande betong och

vibrerad betong redas ut i sammanhanget. Det är möjligt att rekommendationerna ovan behöver ses över.

4.2 Observationer i full skala

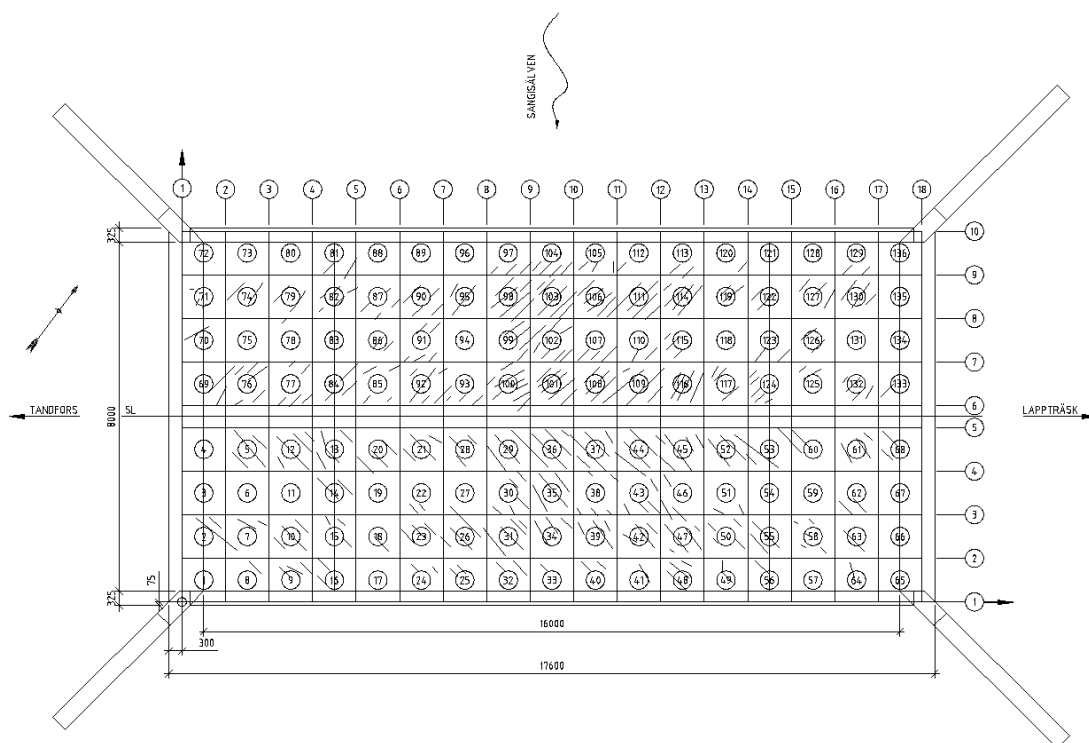
För att bilda sig en uppfattning om brobanors funktion och hur inverkan laster skulle kunna modelleras utfördes en uppföljning av ett par broar för att studera eventuell skadebild. Ett underlag för val av objekt var den intressanta sammanställningen över 23 broar gjutna med slitbetong 1992-98 i Norr- och Västerbottens län (Lindqvist, 1998).

Figur 4.1 visar en av de detaljstuderade broarna. (Projektets resurser möjliggjorde undersökning av tre broar under samma kampanj bl.a. innebärande anlitande av experthjälp Ramböll och personal från TRV för säkerhetsarbete, avstängning osv.). Mätningar skedde bl.a. av vidhäftning och sprickbildning genom impulsrespons, ultraljudsmätning och termografimätning med värmekamera. Impulsresonansmätning och ultraljudsmätning utfördes i ett rutnät med en mätpunkt i varje nod som representerar 1 m² (totalt 136 mätpunkter), se Figur 4.2. Borrkärnor togs även ut för att studera vidhäftningshållfasthet, sprickbildning och allmän kvalitet.



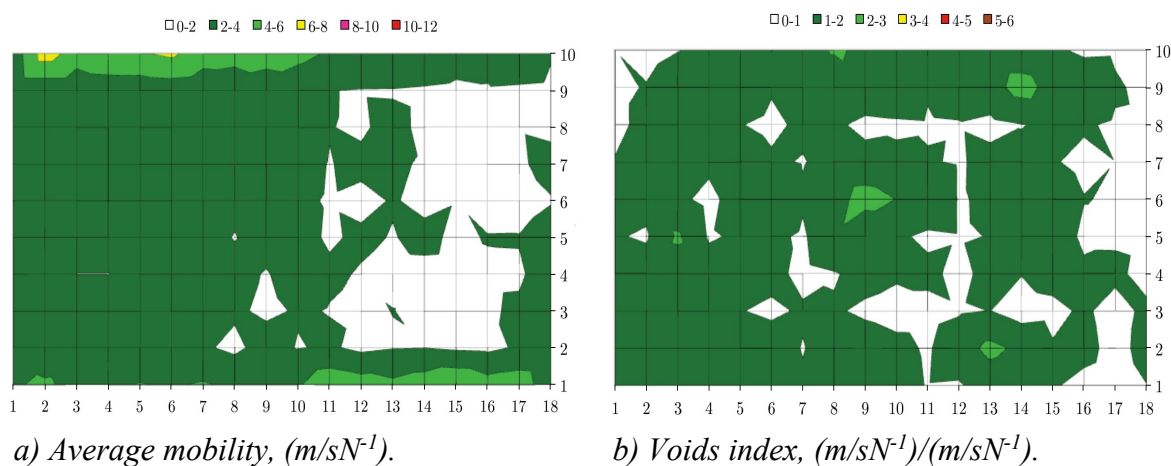
Figur 4.1 Bro över Sangisälven, Norrbotten, något bedagad visuellt men i gott bruksskick (foto Martin Persson).

Det noterades även allmäntillstånd och sprickor – de var rikligt förekommande här, se Figur 4.2 och var orienterade i en 40 – 50° vinkel relativt brons längdriktning med ett mönster speglat i en symmetrilinje i brons mittlinje. Sprickdjup var 25 till 30 mm enligt mätningarna och borrkärnestudier, dvs. sprickorna har ingalunda nått ner till konstruktionsbetongen. Sprickbredden varierade mellan 0,05 och 0,8 mm.



Figur 4.2 Mätpunkter för mätningar av impulsrespons, ultraljud och sprickobservationer för bron i Figur 4.1, Persson et al (2019a).

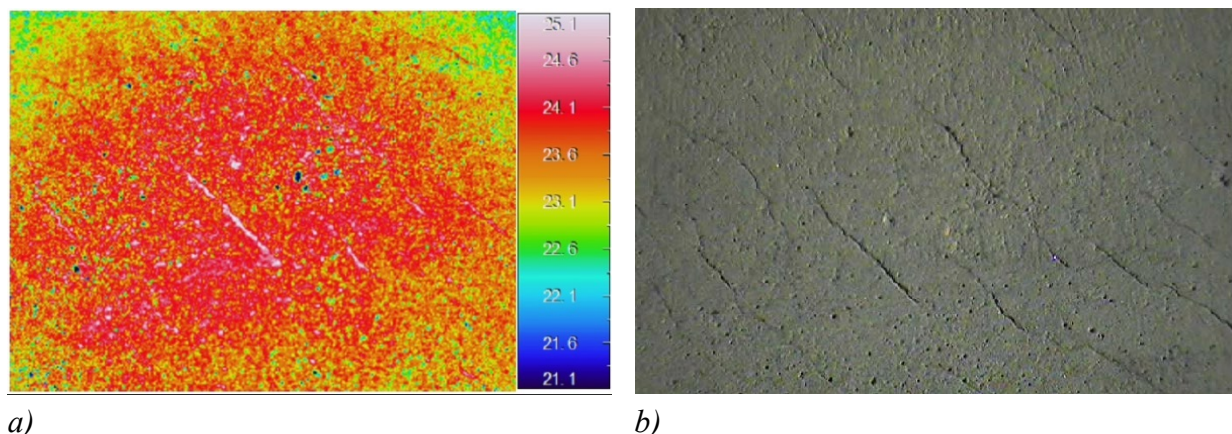
Figur 4.3 visar resultat av mätningar med impulsresponsutrustningen där nivålinjer över data från "average mobility" och "void index" plottas, se även Clausen et al (2011). Ett högt värde indikerar en minskad tjocklek av material vilket tyder på delaminering av det översta lagret dvs. att pågjutningen har släppt. Här är brobanepattan i god kondition (gröna värden) och delaminering förekommer inte.



Figur 4.3 Topografier över impulsresonansmätningar (s.k. average mobility och voids index) över hela brobanan som kan indikera delaminering, dvs. vidhäftningssläpp (i så fall med röd färg som inte förekommer här).

Exempel från mätningar med termografikamera visas i Figur 4.4. Om temperaturen varierar tillräckligt mycket under en dag rent allmänt kan mätningar med termografikamera visa på

temperaturskillnader mellan den solida betongplattan och ytor där delaminering skett. Vid termografimätningarna på denna bro kunde dock inga dolda defekter hittas, endast synliga sprickor observerades i ytan och om ballastkorn ligger nära ytan och områden där ballast saknas i ytan.



Figur 4.4 a) Ytemperatur på del av farbana genom mätning med termografikamera. Varmare områden (röd färg) indikerar sprickor eller där ballast saknas i ytan; kall yta (gul och grön) finns där grövre stenar ligger nära ytan. b) Foto av samma område visande detalj av sprickor, se även Figur 4.2, Persson et al. (2019a).

Kommentarer

Inventeringsarbetet i det inledande projektet har visat att det är möjligt att skapa sig en bra bild av tillståndet hos slitbetonglösningen med existerande oförstörande provningsmetoder. Dessa borde särskådas i fler broar för att eventuellt kunna rekommenderas till kvalitetssäkring av nygjutna slitbetonger. Det indikeras vidare att funktionen är god hos studerade broar trots viss sprickbildning. Se vidare i Emborg et al (2019), Persson et al (2019a, b).

Forskargruppen har senare i SBUF-projektet besökt några andra broar i Norr- och Västerbotten där ett antal uppvisar liknande sprickmönster och några med annat mönster. När man inte har tillgång till exakta data om gjutförhållanden är det svårt att hitta förklaringar. Vi misstänker att orsaken kan sökas i en kombination av den färska betongens gjutning och bearbetning, tidiga plastiska krympsprickor beroende på otillräckligt skydd av brobanan direkt efter gjutning samt efterföljande uttorkningskrympning. Variationer i sprickbredd kan bero på ojämn fördelning av stålfibrer eller på oregelbundna inspänningsförhållanden längs broplattan. Trots sprickbildningen synes broarna fungera tillfredställande.

Många broar är också i perfekt skick, t.ex. den över Öre älv sydost om Lycksele som specialstuderats i fullskaleförsök, se Figur 4.5. Bron besöktes drygt 3 år efter gjutning – vi kunde inte hitta en enda spricka eller annan defekt.



Figur 4.5 Bro över Öre älv, Västerbotten, inspektion av projektgrupp från LTU oktober 2018 på bro som studerats i fullskaleförsök tre år tidigare. (foto Mats Emborg).

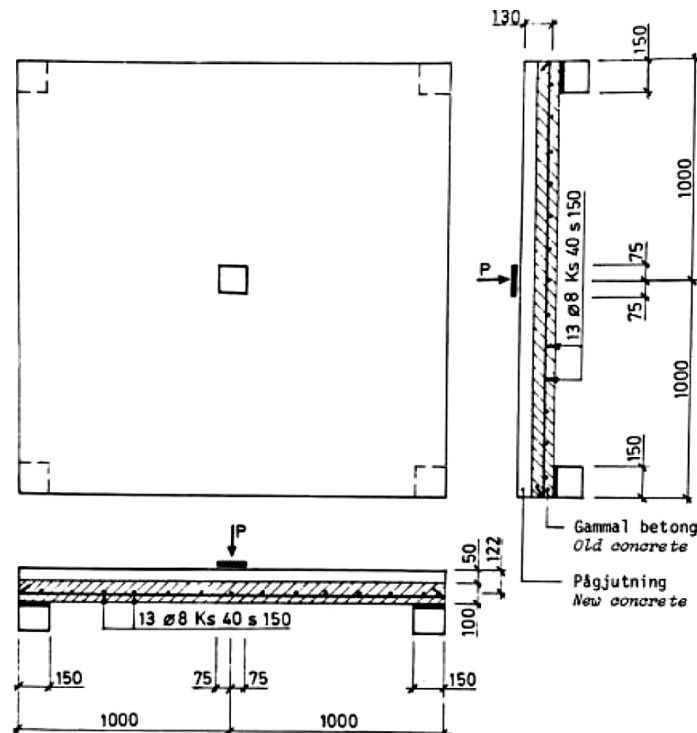
4.3 Observationer i laboratorium jämfört med beräkningar

Det fortsatta arbetet inom del I innebar beräkningar med FEM-program av spänningar och rörelser i jämförelser med vad som observerats i:

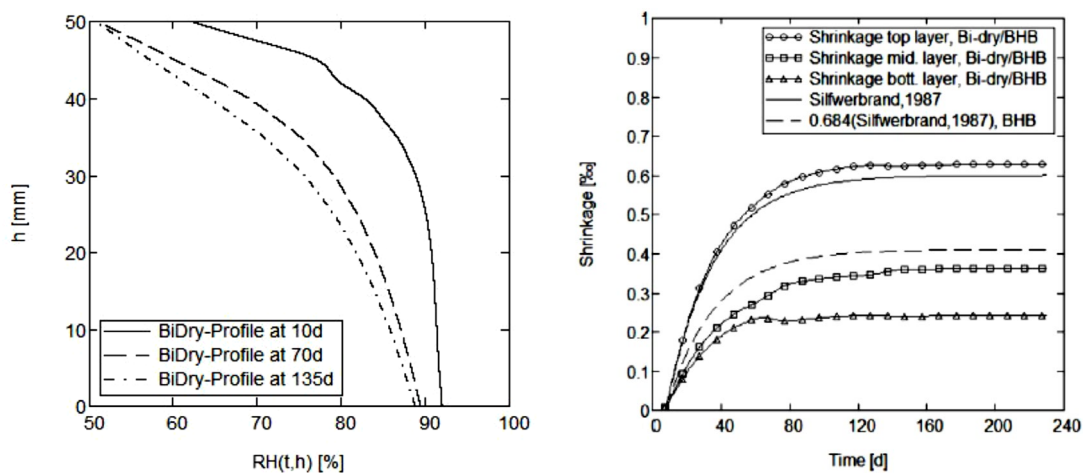
- a) Laboratorium – tidigare laboratorieförsök där pågjutning skett på plattor som därefter belastats till brott
- b) Full skala – mätningar vid pågjutning av direktgjuten slitbetong vid reparation av bro, se nästa avsnitt.

I laboratoriet skedde belastning av en platta $2 \times 2 \text{ m}^2$ av tjocklek 100 mm där pågjutning 50 mm påförts drygt ett halvår tidigare, se Figur 4.6. Analys av spänningar skedde med FEM (ATENA) där modellering utfördes av dels effekter av krympning fram till belastningstillfället, dels effekter vid senare belastning med punktlast, se figuren. Krympning antogs ha en fördelning över tvärsnittet enligt Figur 4.7 och modellerades delvis enligt teori i Betonghandbok – Material, utgåva 1994, där grundförutsättning var framtagna från uttorkning enligt programmet BI Dry (Betongindustri AB).

Exempel på resulterande spänningar av krympning, i detta fall skjuvspänning i pågjutningsskikt, visas i Figur 4.8 vänstra delen. Det iakttas stora nivåer i hörn vilka kan innebära stora risker för delaminering, dvs brott i skiktet, ett fenomen som är förväntat och som är känt. I högra delen av figuren visas intressant överensstämmelse mellan beräkning och försöksresultat vid belastning av platta $\frac{1}{2}$ år efter applicering av pågjutningen. Effekter av den tidigare krympningen och därav orsakade egenspanningar (skjuvspänningar) måste tas med i modellen.

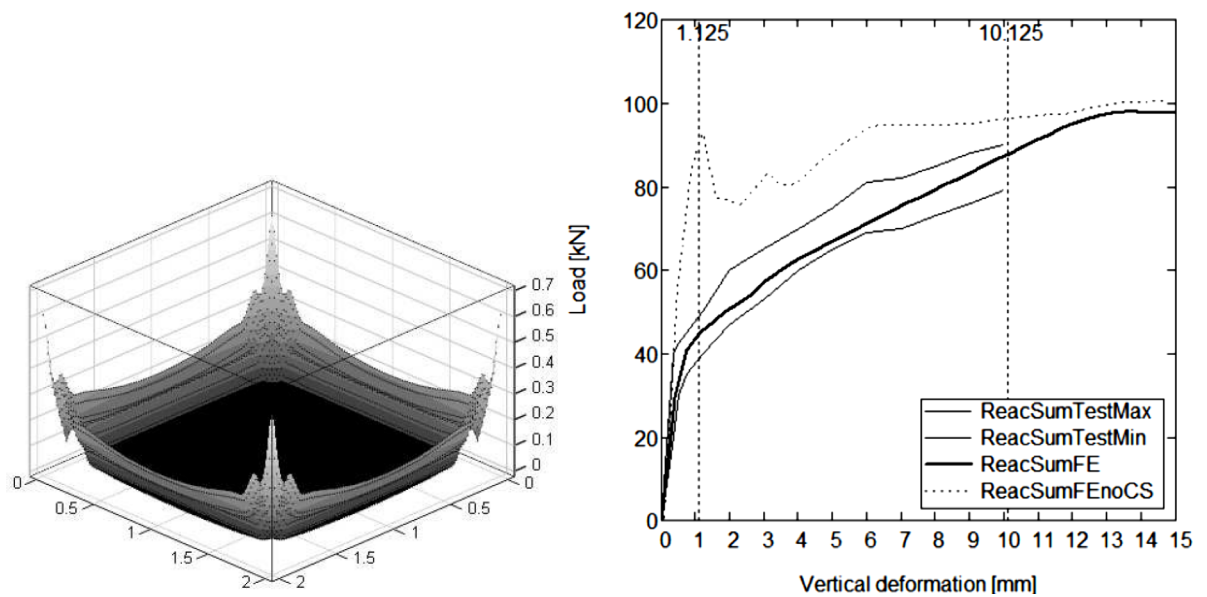


Figur 4.6 Laboratorieförsök med pågjutna plattor som belastas till brott, utförda vid KTH av Silfwerbrand 1987.



Figur 4.7 Antagen fördelning av krympning över tvärsnitt och utveckling över tid baserad på uttorkningsberäkning BI Dry vid tre tidpunkter efter gjutning.

Studien visade att det var fullt möjligt att modellera spänningssituationen i laboratoriemiljö för aktuellt fall. Relativt enkla modeller i ATENA programmet verkar duga för krympning samt för tidsberoende effekter och elasticitet. Övningen gav en nödvändig kontroll för att senare kunna applicera modellen på aktuellt brofall.



Figur 4.8 Skjuvspänningar i pågjutningsskikt mellan pågjutning och underliggande betong (vän) beräknade med FEM från tvångspänningar förorsakade av krympning enligt Figur 4.7. Höger figur visar last – nedböjningsdiagram vid efterföljande belastning. Tjock heldragen linje från FE-beräkning i jämförelse med tunna heldragna från försök. Streckad – FE-beräkning utan att ta hänsyn till försvagning av tidigare krympning.

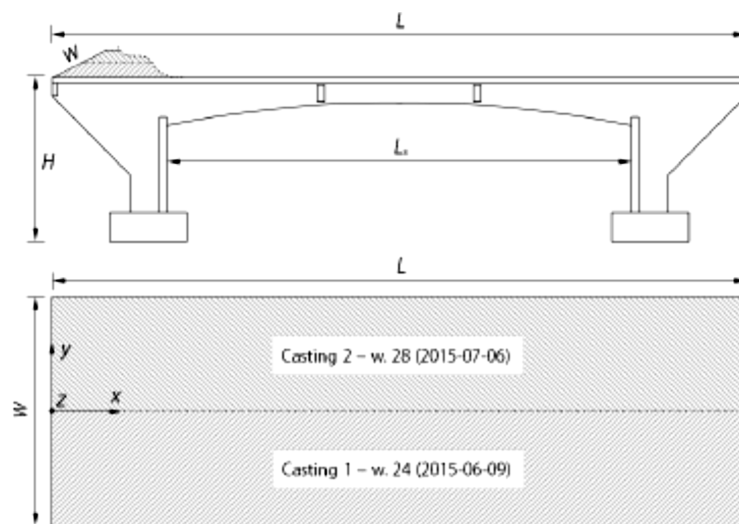
4.4 Observationer i full skala jämfört med beräkningar

Denna del innebar mätning vid en reparation av bro öster om Lycksele, över Öre älv, se Figur 4.9 och Figur 4.10.





Figur 4.9 Bro över Öre älv byggd 1965, gjutning av slitbetongskikt, juli 2015.



Figur 4.10 Geometri och gjutningsförfarande. $L = 37,5 \text{ m}$, $L_s = 25 \text{ m}$, $H = 8,7 \text{ m}$, $W = 6,9 \text{ m}$.

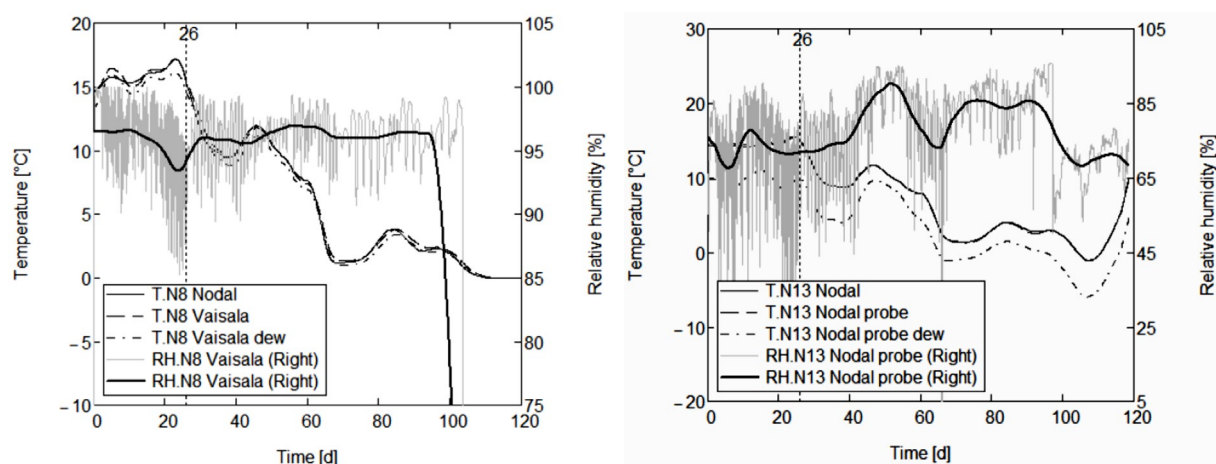
Instrumentering skedde med töjningsgivare på utvalda delar i pågjutningen samt temperatur- och relativ fuktighetsgivare i både betong och luft. Registrering skedde trådlöst via nätuppkoppling med strömförsörjning via batteriinstallation och solceller. Mätning skedde även av rörelser på provkroppar i bromiljö (under bron) och i laboratoriet (transporterade till Luleå) på aktuell pågjutningsbetong, se Figur 4.11 - Figur 4.13.

Table 1: Probe and gauge specifications.

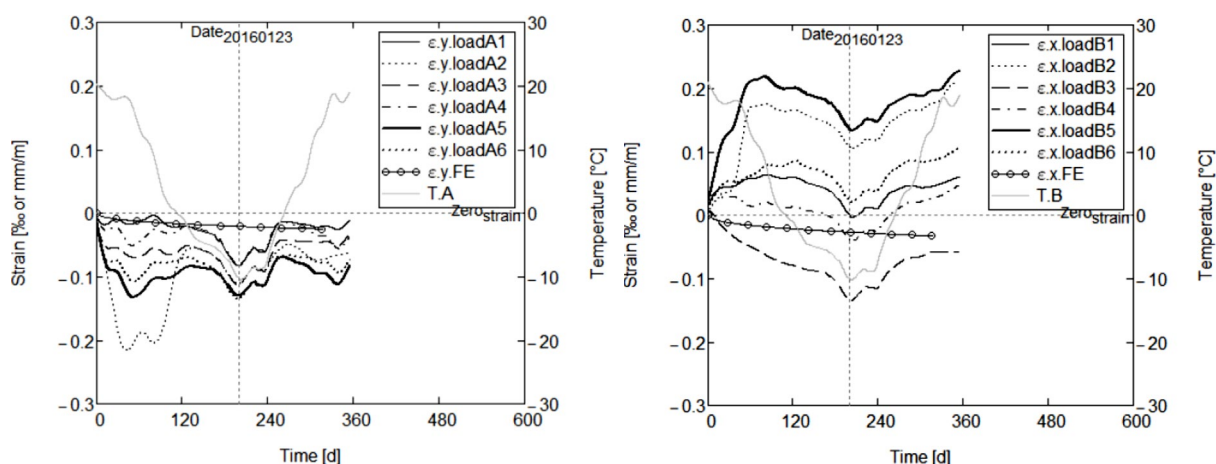
Type	Name	RH [%]	Accu- racy RH [%]	T [°C]	Accu- racy T [°C]	Inter- val T [°C]	Table 2: Auxiliary probe and gauge data associated with Fig. 3.									
							Type	Area	Notation	Position [m]						
										x	y	z				
HMP110	Vaisala	0-90	±1.5	0-40	±0.2	-40 to +80	HMP110	Overlay	N1, N5, N9	2.15, 8.43, 16.75	3.25	-0.4 <i>h</i>				
		90-100	±2.5						N2, N6, N10	2.30, 8.58, 16.90		-0.6 <i>h</i>				
		N-TRF	Vcma	0-10	±4.0	-40			±1.5	-40 to +40	N3, N7, N11	2.45, 8.73, 17.05		-0.8 <i>h</i>		
				10-90	±2.0	25			±0.3		N4, N8, N12	2.60, 8.88, 17.20		-0.4 <i>h</i>		
				90-100	±4.0	40			±0.4		N-TRF	Air	N13	6.85	2.45	-2.10
											EM-2	Overlay	A1, B1	3.65, 4.65	0.55	-0.5 <i>h</i>
							A2, B2	3.60, 4.60	0.45							
								A3, B3	3.55, 4.55	0.35						
								A4, B4	3.50, 4.50	0.25						
								A5, B5	3.45, 4.45	0.15						
								A6, B6	3.40, 4.40	0.05						
EM-2	Roctest	3000	0.4	50	±0.5	-20 to +80	EM-2	Prism	PF1, PF2	≈5.35	≈5.45	≈-4.00				

En stor mängd data samlades in under drygt ett halvår och analyserades, se Figur 4.14-Figur 4.15. Resultaten beträffande töjningar var svårtolkade eftersom troligen effekter av hela brons ”naturliga” temperaturrörelser påverkade de mätta värdena, dvs. man erhöll ingen ren effekt av pågjutningens krympning.

Att krympningen var så liten kan även bero på att bron ligger över ett vattendrag vilket påverkar luftens fuktighet, det senare kan anas i Figur 4.14 högra graferna, samt även effekter av ovanligt mycket regn under sommaren 2015.

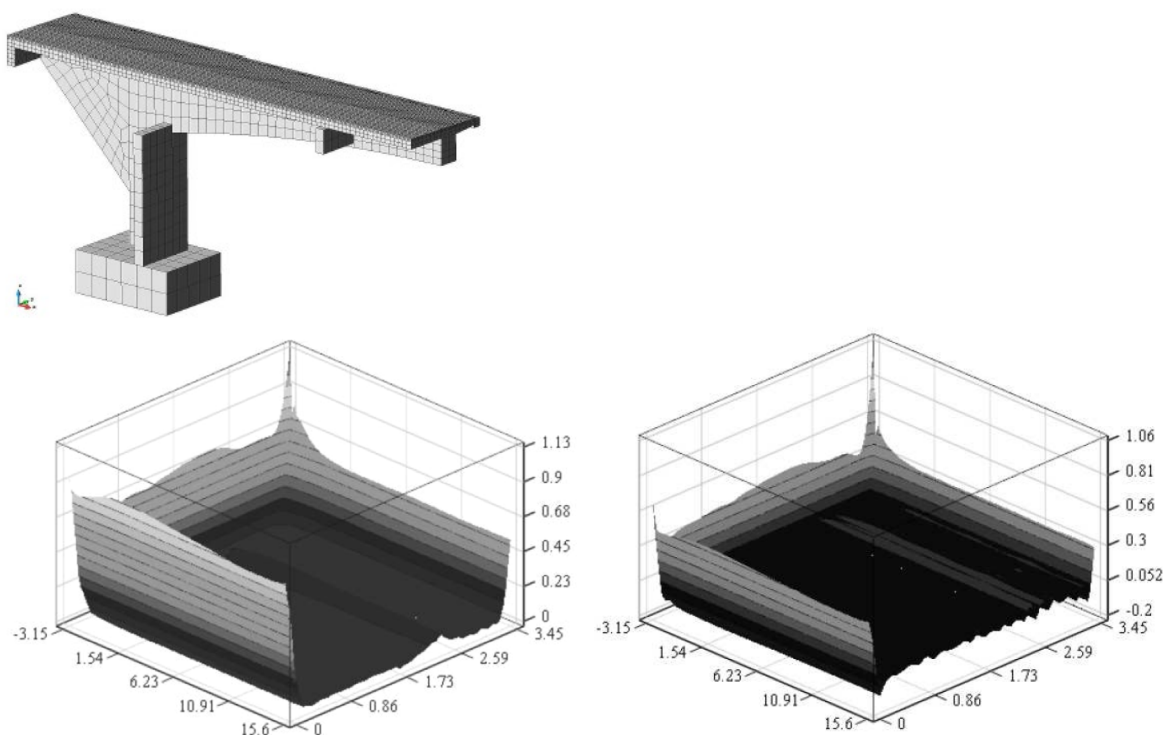


Figur 4.14 Temperatur och relativ fuktighet under 120 dagar, uppmätt på avståndet 0,4h från pågjutningens överyta (h = tjocklek), givare N8 (Figur 4.12) (vä), vid ett omgivande klimat enligt givare N13 (hö).



Figur 4.15 Töjningar i betongen under 1 år, punkter A (i längsled) och B (i tvärlä), se Figur 4.12.

Modellering av $\frac{1}{4}$ av bron skedde med FE (Atena) med i stort sett samma modell som vid laborieförsöken, se Figur 4.16, som även visar exempel på resultat. En viss kalibrering skedde mot de mätta värdena av brörelser men det visade sig vara svårt med tanke på de ”orena” effekterna av pågjutningen ovan. Istället valdes att använda sig av en krympmodell ”rakt av” (EU – norm) och basera modellens antaganden på betongens hållfasthetsklass och medelvärden av omgivnings relativ fuktighet och temperatur. Exempel på beräkningar visas på relativt moderata spänningar i gränssnittet pågjutning och konstruktionsbetong, se figuren.



Figur 4.16 FE modellering av bro Öre älv (ca 25 000 element) och exempel på beräkning av skjuvspänning (v) och vertikal dragspänning (h) i gränssnitt mellan pågjutning underliggande betong.

Inga sprickor eller delaminering (och kantresning) observerades vid brobesök sommaren efter gjutning och inte heller vid besök tre år senare, se Figur 4.5.

Det intressanta fullskaleförsöket visar på hur man kan undvika sprickbildning eller andra skador om härdningsförhållanden är mycket gynnsamma. I detta fall exponerades bron för nederbörd och fuktig väderlek under ca 2 månader efter gjutning, därefter uppträdde sedvanlig höst med låga temperaturer och naturligt hög luftfuktighet.

Beträffande den numeriska modelleringen kunde många erfarenheter dras t.ex. hur svårt det är att identifiera fokusparametrar och renodla analysen, samt svårigheter att förenkla analysen. Bl.a. utgör förenklingen till $\frac{1}{4}$ av bron ett avsteg från symmetrin eftersom endast en halv vägbana göts i taget. Att ta hänsyn till naturliga temperaturrelaterade rörelser dag och natt och över längre perioder kräver omfattande analyser vilka var utanför projektets möjligheter

4.5 Reflektioner

Den intressanta första studien inom området var värdefull. Bl.a. skapades en stor erfarenhetsbank över möjligheter och utmaningar att mäta och modellera de fenomen som uppkommer vid pågjutning med direktgjuten slitbetong.

Forskarna fick en intressant insyn i hur en mätning kan utföras på lämpligt sätt och hur en modell ska utformas för trovärdig analys. En reflektion är att många parametrar inverkar om ett lyckat slutresultat ska erhållas, dvs. en väl fungerande, nötningsbeständig, sprickfri slitbetong som inte släpper från underbetongen. Flera parametrar kan utkristalliseras och i många fall tillses att de ger ett gynnsamt bidrag, t.ex. med avseende på sammansättning av betong, utförande vid

förbehandling av konstruktionsbetongens överyta, gjutningsskede och efterhärdning. Val av fördelaktig tidpunkt på året är ett annat sätt att skapa möjlighet till lyckat resultat.

5 DEL II (SBUF) – INVENTERING OCH KRYMPNING

5.1 Inledning

Huvudprojektet, dvs. det som ingått i aktuell SBUF-finansierad del av området, har koncentrerats till följande områden: kunskapsläge, laboratorieförsök, modellering av materialegenskaper, samt modellering och teoretiska beräkningar med avseende på pågjutningsfallet. Resultatredovisning följer denna indelning i stort.

5.2 Kunskapsläge, inventering

En litteraturstudie genomfördes, redovisad i Cyron et al. (2019), med 93 referenser inom området. Denna gav en förnyad överblick över inverkan av fenomen: krympning, temperatur, betongegenskaper, vidhäftning utförande m.m. Studien innebar uppdatering av tidigare funna artiklar och rapporter i del I, bl.a. redovisade av Persson (2014).

Således finns uppemot 200 referenser till litteratur genomgångna i de båda projekten – till stor nytta för pågående forskning och inte minst för framtida insatser.

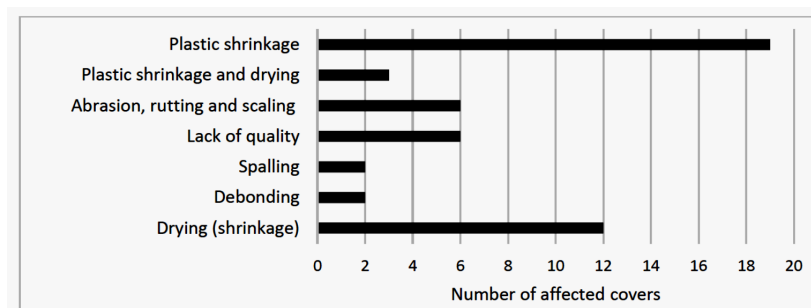
Flera exempel på lyckade pågjutningar med betong redovisas i studien, t.ex. pågjutningar vid överfart Luleå älv, Boden, där man medvetet varierade fibermängd vid farbana och trottoar, se Figur 5.1. Inga sprickor erhöles, inte ens utan armering, vilket återigen kan förklaras av gjutning under gynnsamma förhållanden: låg temperatur/hög luftfuktighet



Figur 5.1 Demonstrationsprojekt i Trafikverkets regi, Bodens kraftstation, Luleå älv med variation av utförande och armering. Inga sprickor eller vidhäftningssläpp observerades, Carlswärd (2008).. Foto Jonas Carlswärd.

Det utfördes även en uppdatering av tidigare undersökningar av befintliga broar (t.ex. examensarbete av Yusuf, 2012) baserat på information från databasen BaTMan. I examensarbetet rapporteras 550 broar i TRVs regi utförda med slitbetongslösning. I den förnyade undersökningen fokuserades på region NORD (Norr- och Västerbotten) där antalet slitbetongslösningar 2011 var 170. Detta har 2018 ökat till 265 fortfarande utgörande endast något över 10 % av totala mängden broar i TRVs regi: 2255.

Det konstateras enligt BaTMan att vid inspektioner av broar med slitbetonglösning i region NORD har avvikelsekommentar noterats för ungefär var femte bro av TRVs broobservatörer. Dessa kan oftast relateras till någon skada. Figur 5.2 ger en sammanställning, utförd av Cyron, där uppdelning gjordes i sju kategorier där någon innehåller en viss överlappning, troligen beroende på svårigheter att kategorisera orsakssammanhang. Ca 60 % av antalet skadade broar kan relateras till krympning och den stora andelen plastisk krympsprickbildning är anmärkningsvärd.



Figur 5.2 Inventering enligt BaTMan region NORD; rapporterade skadefall.

Det konstateras här att, förutom fenomen direkt efter gjutning i den plastiska betongen, synes krympning och vidhäftning vara huvudorsaker till anmärkningarna på slitbetongbroar i Norr- och Västerbotten.

Projektgruppen besökte ett antal av broarna i syfte att få en visuell uppfattning om rapporterade skador. Exkursionen stödjer de flesta observationerna från BaTMan, se Figur 5.3.

Beträffande plastisk krympsprickbildning har ansökan sänts in till Trafikverket om att genomföra utvecklingsprojekt i syfte att detaljstudera fenomenet för brotillämpningar så att dessa kan undvikas. Meningen var att applicera erfarenheter från ett femårigt SBUF finansierat doktorandprojekt, Sayahi (2016, 2019). Ansökan har avslagits tre gånger – den sista gången nämndes bl.a. att området ”inte är relevant för TRV”.

Det valdes i projektet att gå vidare i studien med att undersöka effekter efter de första timmarna, dvs. att studera laster av långtidskrympning och undersöka hur slitbetongen och skiktet mellan pågjutningen och underliggande betong kan motstå lasterna bl.a. genom god vidhäftning.



Gertsbäcken N Grannäs, bro 24-42-1



Risån, Andersfors, bro 24-392-1



Vindelälven, N Åmsele, bro 24-673-1



Ångermanälven, Storån, bro 24-984-1



Kvarnån, Risliden Norsjö, bro 24-1463-1



Sävarån, Sjöbotten, bro 24-1540-1

Figur 5.3 Exempel på broar med synliga skador, några besökta av projektgrupp.

5.3 Krympning

Den fortsatta litteraturinventeringen, Cyron et al. (2019) gav en djup och bred information om krympningens härkomst vilket till stor del kan förklaras av fenomen relaterade till betongens porsystem och till bindemedlets hydratation. Bl.a. presenterades material rörande krympningens beroende av förändring av undertryck i kapillärporerna vilket i sin tur är beroende av uttorkning.

Materialet är så pass intressant att det sedermera införlivades i Betonghandboken Materials (BHB) kapitel 18 om krympning, Emborg (2021). Nedan ges därför sammanfattning och

omskrivning av delar av avsnitt från kapitel 18, som således har sin härkomst från Cyron et al. (2019).

Krympningens påverkan av minskning av fukthalt i porer kan bl.a. förklaras av uppkomsten av det kapillära undertrycket P [Pa]. Teorier om porundertryck nyttjas för att beskriva undertryckets relation till relativ fuktighet, temperatur samt porstorlek och dess fördelning i den hydratiserande cementpastan. Relationen kan tecknas med Young-Laplaces ekvation ekvationer:

$$P = -\frac{2\lambda \cos \theta}{r'} \quad (5.1)$$

där γ är ytspänningskonstant [N/m], θ är kontaktvinkel [°] och r' är radie av kapillär menisk vid vattenmättnad [m], (jämför r = radie av kapillär menisk

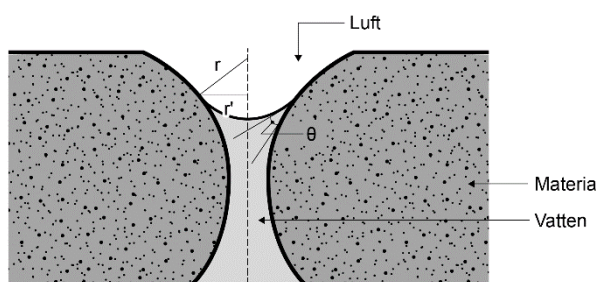
respektive Kelvins ekvation

$$P = \rho \frac{RT}{M} \ln \left(\frac{RH}{100} \right) \quad (5.2)$$

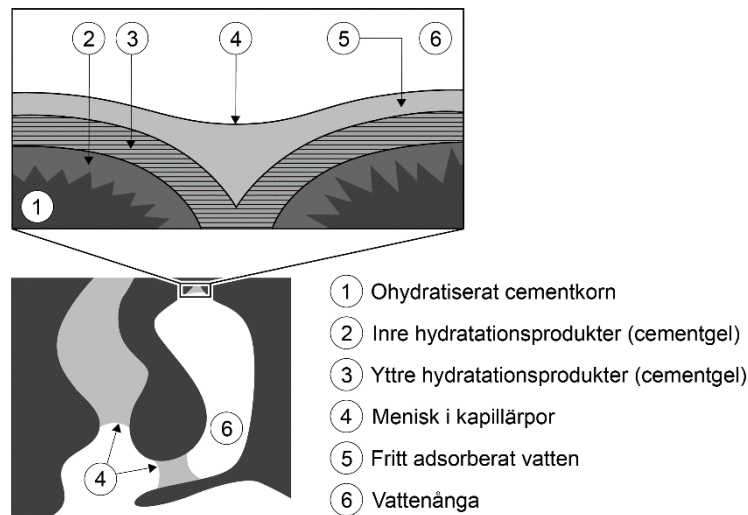
där ρ är densitet hos vätskan [kg/m³], R är allmänna gaskonstanten [J/(mol·K)], T är temperatur [K], M är molmassa [kg/mol], och RH är relativa fuktigheten [%].

Ekvation (5.1) visualiseras i Figur 5.4 med en vattenmenisk i en por belägen i ett hypotetiskt porsystem som omges av inte reagerade cementkorn, fritt kapillärt vatten och adsorberat vatten, se Figur 5.5. Ett jämviktsstillstånd råder mellan gas- och vätskefas i porerna dvs. mellan avdunstning och kondensation. Detta påverkar den inre avvattningen och det tryck som gäller vid mättnad dvs. mättnadsångtrycket.

När den relativa fuktigheten minskar i poren innebär jämvikten enligt formel (5.1) och (5.2) att radien r' på menisken minskar, dvs. vi får en sammandragning, en kontraktion.



Figur 5.4 Vattenmenisk i en kapillärpor enligt Sayahi (2019), se ekvation (5.1). Från Betonghandbok – Material, kap 18, Emborg (2021).



Figur 5.5 Inneslutet vatten i kapillärt porsystem (övre bilden), modifierad i Cyron et al. (2019) (nedre bilden) från Bazant et al. (1997). Betonghandbok – Material (BHB), kap 18, Emborg (2021).

Modeller har föreslagits för krympning relaterad till fukthaltminskning baserat på utredningen av Cyron et al. (2019). Man kan då uttrycka den totala krympändringen $\Delta \epsilon_{sh}$ som (se kap 18, BHB):

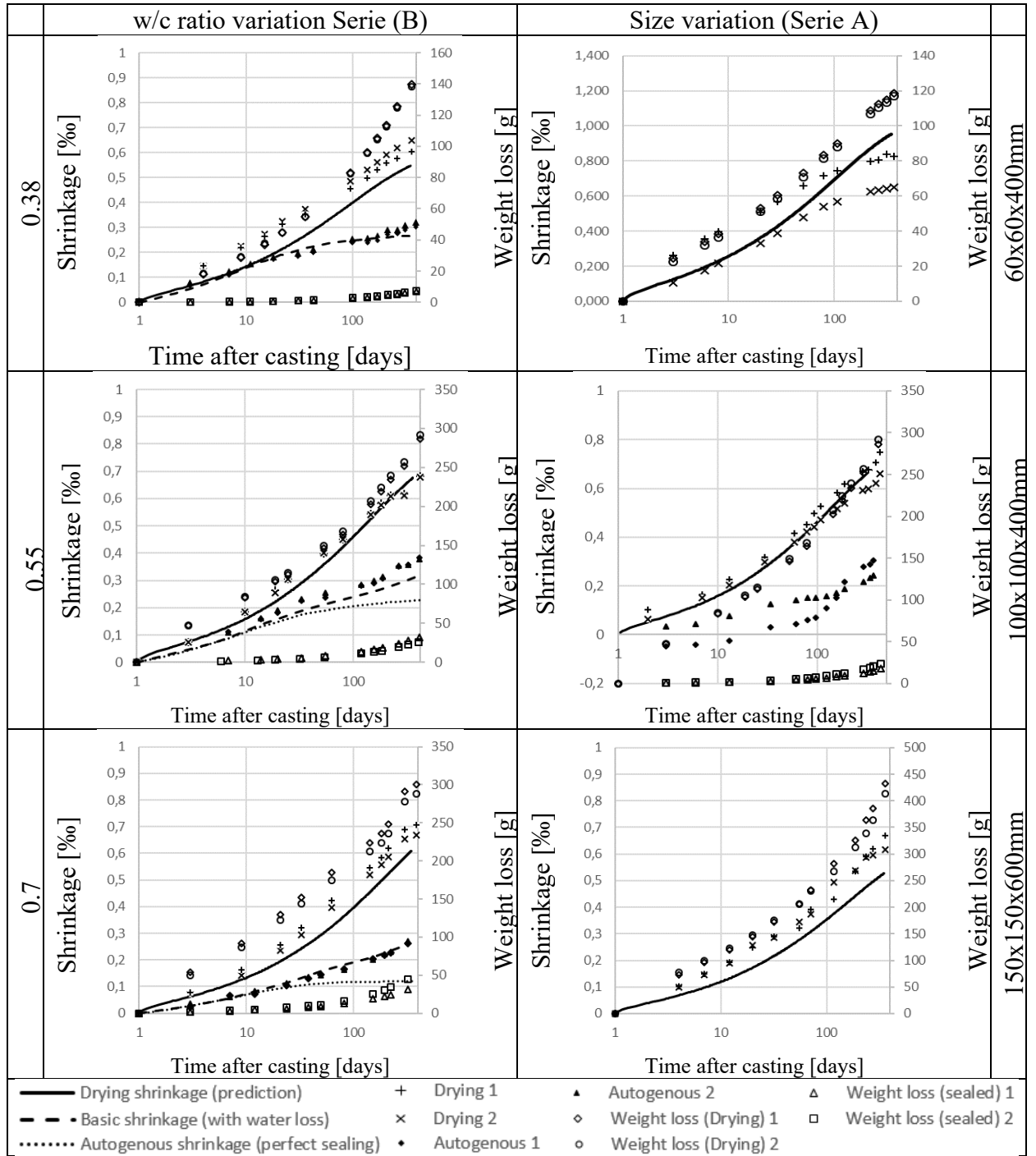
$$\Delta \epsilon_{sh} = k_{sh}(t) \Delta w_e \quad (5.3)$$

där $k_{sh}(t)$ är en proportionalitetsfaktor, här benämnd krympkoefficient, och Δw_e är fukthaltminskning [kg/m^3 betong] erhållen från desorptionsisotermen.

Modellen har kalibrerats in mot tidigare försök vid Lunds Tekniska Högskola, Figur 5.6, Cyron (2022). Den har därefter vidareutvecklats till ett framtida förslag till krympmodellering av bl.a. Lars-Olof Nilsson, Byggmaterial, Lunds Tekniska Högskola, se BHB kap 18.

Beträffande krympning bör man hålla reda på dess komplexitet. Krympningen framkallas av den yttre uttorkningen men även av den vattenförbrukning som sker av självuttorkning pga. hydratationen. Det senare är framträdande tidigt under härdningen och sker under uttorkningens första del visualiserat genom desorptionsisotermen, dvs. relationen mellan vattenmängd i porer och relativ fuktighet under uttorkning, se Figur 5.7. I figuren kan man se att i början av uttorkningen, dvs. vid RH nära 100 % är det framförallt den kemiska processen (dvs. hydratationen) som sänker fukthalten och ger en reduktion av RH. Det är denna uttorkning som benämns självuttorkning, dvs. betongen torkar ut av sig själv. Senare i förloppet sker minskningen huvudsakligen pga. yttre uttorkning, se BHB kap 17 och 18. I figuren har Cyron (2022) visat hur desorptionsisotermen skiljer sig mellan högt och lågt vct.

Cyron har i sitt arbete även studerat hur man kan kalibrera in en modell för krympning föreslagen av Jonasson (2017), ekvation (5.4), baserad på Figur 5.7 och Figur 5.8. Därvid kalibreras funktionerna F1 och F2 in enligt ekvation (5.4) som tar hänsyn huruvida man befinner sig i ”självuttorkningsläge” eller ”uttorkningsläge”.



Figur 5.6 Krympning (vä skala) och vattenavgång (hö skala) för betonger av olika vattencementtal och för olika storlekar av provkroppar, beräkning med ekvation (6.3) i jämförelse med försök Nilsson & Johansson (2017), från Cyron et al. (2022).

Även den modellen har utretts inom projektet och visat sig vara framgångsrik i att kunna kalibreras in mot försök, se Figur 5.9.

$$\varepsilon_{sh}^0 = \left(F_1 + (F_2 - F_1) \exp \left(- \left(\frac{t_F}{t_{equ}(t)} \right)^{\eta_F} \right) \right) \left(\frac{W_e(t_{equ})}{C} - \frac{W_e(t_{equ}^0)}{C} \right) \quad (5.4)$$

där t_{eq} , W_e och C är ekvivalent tid, vattenhalt i porer respektive cementmängd. Övriga parametrar passas in mot försök, se Cyron et al. (2022a, b & c) och Jonasson (2017).

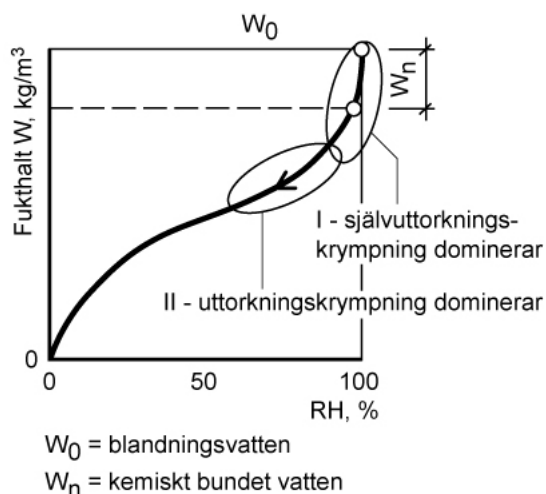
Enligt ovan bör det alltså vara fullt möjligt att relatera en krympmodell till minskningen av porvatten, vilket ger en betydligt naturligare koppling till bakomliggande fenomen jämför med dagens semi-empiriska modellering.

Ovan är en viktig slutsats i Cyrons utredning och har medverkat till förslag för framtida forskning, se Betonghandbokens kap 18.

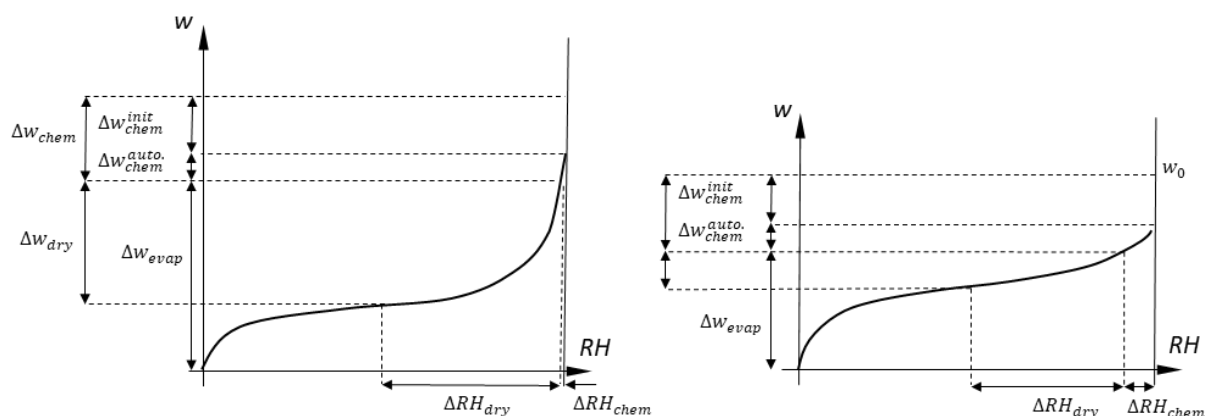
Dock vid användande av programsystemet ATENA för att beräkna krafter och egenspanningar för fallet krympande pågjutning var det nödvändigt att använda sig av befintliga modeller i programsystemet. Att applicera någon av modellerna ovan till ATENA hade varit alltför tidskrävande och det var inte möjligt inom utrymmet för projektet.

Istället valdes att nyttja de tillgängliga modellsystemen B3 och B4, framtagna av Bazant och medarbetare vid Northwestern University under flera tiotals år. B4 gör det möjligt att modellera såväl autogen krympning av självuttorkning som traditionell uttorkningskrympning. Dessutom kan man samtidigt modellera tidsberoende deformationer av last, dvs. krypning och elasticitet hos den hårdnande betongen. Detta sker i och för sig på ett approximativt sätt för aktuella betonger.

När det gäller programmet ContestPro, utvecklat vid Ltu, finns möjligheter att modellera krympningen enligt ekvation (5.3), Cyron et al. (2022), alt. enligt Jonassons ansats, ekvation (5.4). Fördelen med programmet är att de viskoelastiska egenskaperna kan modelleras för hårdnande betong, dvs. en betong där hydratationen pågår med bl.a. krympning som konsekvens. Detta tillämpades vid framtagande av exempel till BHB-M, se nästa avsnitt. Ingående materialdata är då utprovade i Ltu:s laboratorium för den unga betongen.

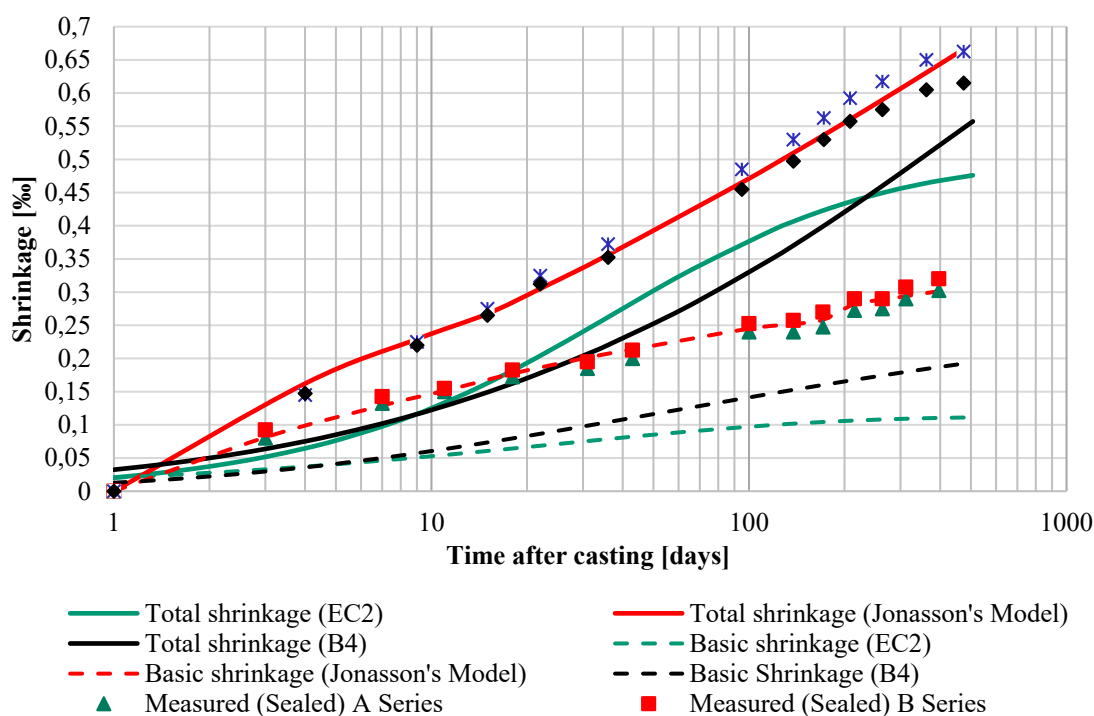


Figur 5.7 Principiellt förlopp av krympning i relation till schematisk desorptionsisoterm, (fukthalt per volymenhet betong som funktion av relativ porfuktighet), uppdelat i självuttorkningsdel och uttorkningsdel, w_n är kemiskt bundet vatten av självuttorkning, w_0 är blandningsvatten, från BHB-M, kap 18, Emborg (2021).



Figur 5.8 Principiellt förlopp av krympning för betong med högt vct (vå) och lågt vct (hö). Δw_{chem} och Δw_{evap} är fukthaltsminskning av självuttorkning (av kemiska reaktioner) resp. av yttre uttorkning. Motsvarande beteckningar vid minskning av relativ fuktighet är ΔRH_{dry} och ΔRH_{chem} , från Cyron et al. (2022a, b & c), se även Figur 5.7.

Comparison of Results Concrete C45/55, w/c=0.38



Figur 5.9 Beräkning av total krympning och autogen krympning baserat på ekvation (5.4), dvs. modell enligt Jonasson (2017) i jämförelse med försök LTH och i jämförelse med andra krympmodeller t.ex. EC2 och Bazant B3 (för dessa modeller, se BHB – M kap 18), Cyron (2022).

5.4 Fukttillstånd

Beräkning av krympning kräver således information om fukttillståndet som i sin tur är baserat på betongens hydratation, porsystem, täthet m.m. Vanligt är att beräkna hydratationen först som, förutom de basala effekterna av betongrecept, bindemedel, tillsatsmedel etc., är beroende av temperaturtillståndet. Fukttillståndet kan därefter beräknas med olika program.

I detta fall har programmet MOIST använts som är en del av BI DRY, ett i Sverige vanligt program för uttorkningsberäkningar (Betongindustri.se).

Tätheten för fukttransport, diffusiviteten, är beroende av porstorleksförelning, vattencementtal, bindemedel m.m. och det är en rätt komplex procedur att korrekt mäta in denna. I MOIST har antagits standardvärden för aktuella vct.

Desorptionsisotermen är beroende av porstorleksfördelning, vct, temperatur och tid (betongens ålder).

För modellering av denna och de bakomliggande ekvationerna till det använda programmet MOIST, se t.ex. kap 17 BHB, Jonasson (1994) och Jonasson et al. (2006). T.ex. uttrycks hydratationsgraden α , enligt:

$$\alpha = \exp \left(-\lambda_1 \ln \left(1 + \frac{t_e}{t_1} \right)^{-\kappa_1} \right) \quad (5.5)$$

där t_e är ekvivalent mognadsålder enligt

$$t_e = \int_0^t \beta_T \beta_\phi \beta_\alpha dt \quad (5.6)$$

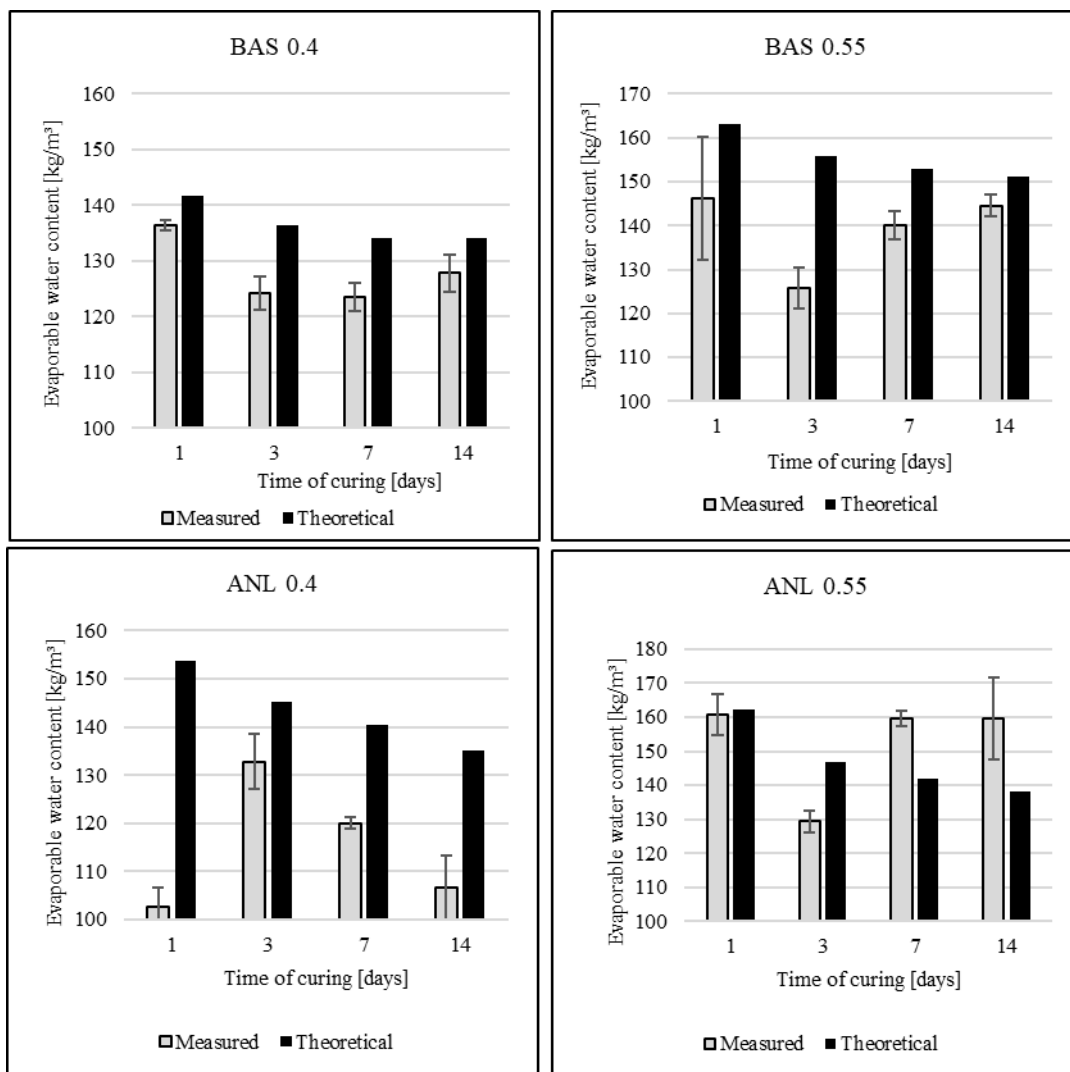
vars temperaturberoende uttrycks av "temperaturfaktorn" β_T enligt

$$\beta_T = \exp \left(\Theta_c \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273 + T} \right) \right) \quad (5.7)$$

och av β_ϕ och β_α som är inverkan av fukt och hydratation, se t.ex. Jonasson (1994).

Därefter kan förångningsbart vatten vid olika tidpunkter efter gjutning beräknas (y-axeln i desorptionsisotermen i Figur 5.7) med tämligen komplicerade uttryck, se kommande artikel av Cyron och kap 17 i BHB -M.

Figur 5.10 visar resultat från undersökningar inom projektet där det förångningsbara vattnet uppmätt i försök vid olika tider efter gjutning jämförs med teoretiska beräkningar. Skillnader mellan betonger avseende cementtyp och vct är logiska liksom att det förångningsbara vattnet minskar i takt med hydratation. Däremot är avvikelser mellan försök och teori stora vilket inte har kunnat förklaras i detta skede



Figur 5.10 Förångningsbart vatten uppmätt genom upphettning av provkroppar med olika cementtyp och vct till 105 °C i jämförelse med beräkningar, Cyron et al. (2022).

5.5 Kompletterande analys av krympning och krypning, försök m.m.

I projektet har även kompletterande analyser genomförts för att t.ex. studera inverkan av den tidiga krympningen av hydratationen; självuttorkningskrympningen.

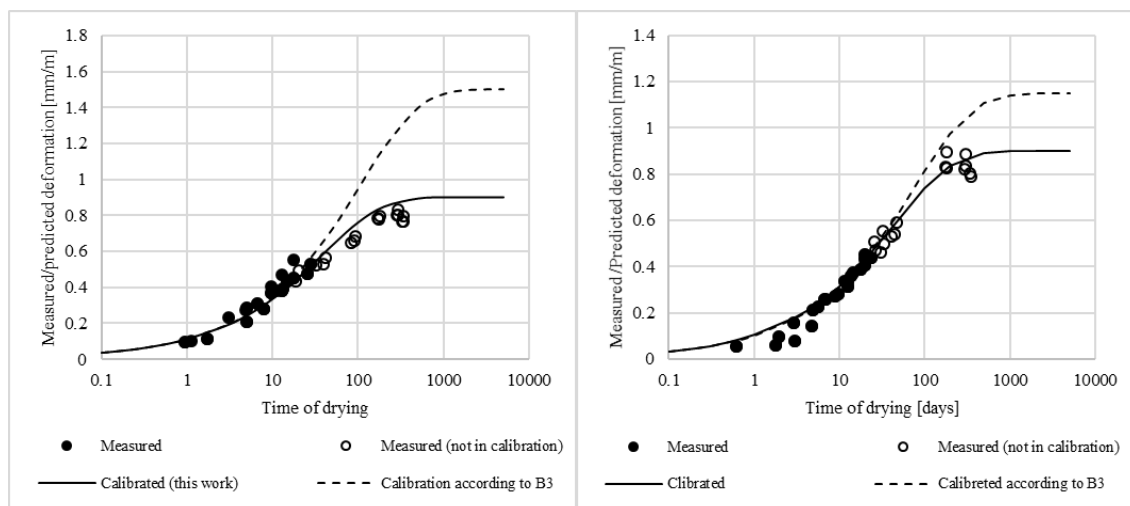
Figur 5.11 visar exempel på dessa analyser där man har testat inkalibrering av eget förfarande baserat på analys av korttidsförsökt samt Bazant et al. formel B3 (som finns bl.a. i ATENA) mot försök.

Figur 5.12 och Figur 5.13 visar exempel på analyser av deformationer och vattenavgång vid olika uttorkningstider.

Försök och analyser pågår nu av bl.a. betonger med Anl FA cement där tillsatser av flygaska och slagg har skett med avsikt att minska klimatbelastning. Arbetet är finansierat av Trafikverket i ett parallellt projekt samt genom SBUF projektet "Nya metoder för undvikande av sprickbildning" (Skanska) där en doktorand slutför sina studier.

Resurser har även erhållits från SBUF för en förstudie om tidsberoende deformationer vilket innebär en utökad analys av befintliga modeller och förslag för fortsatt arbete.

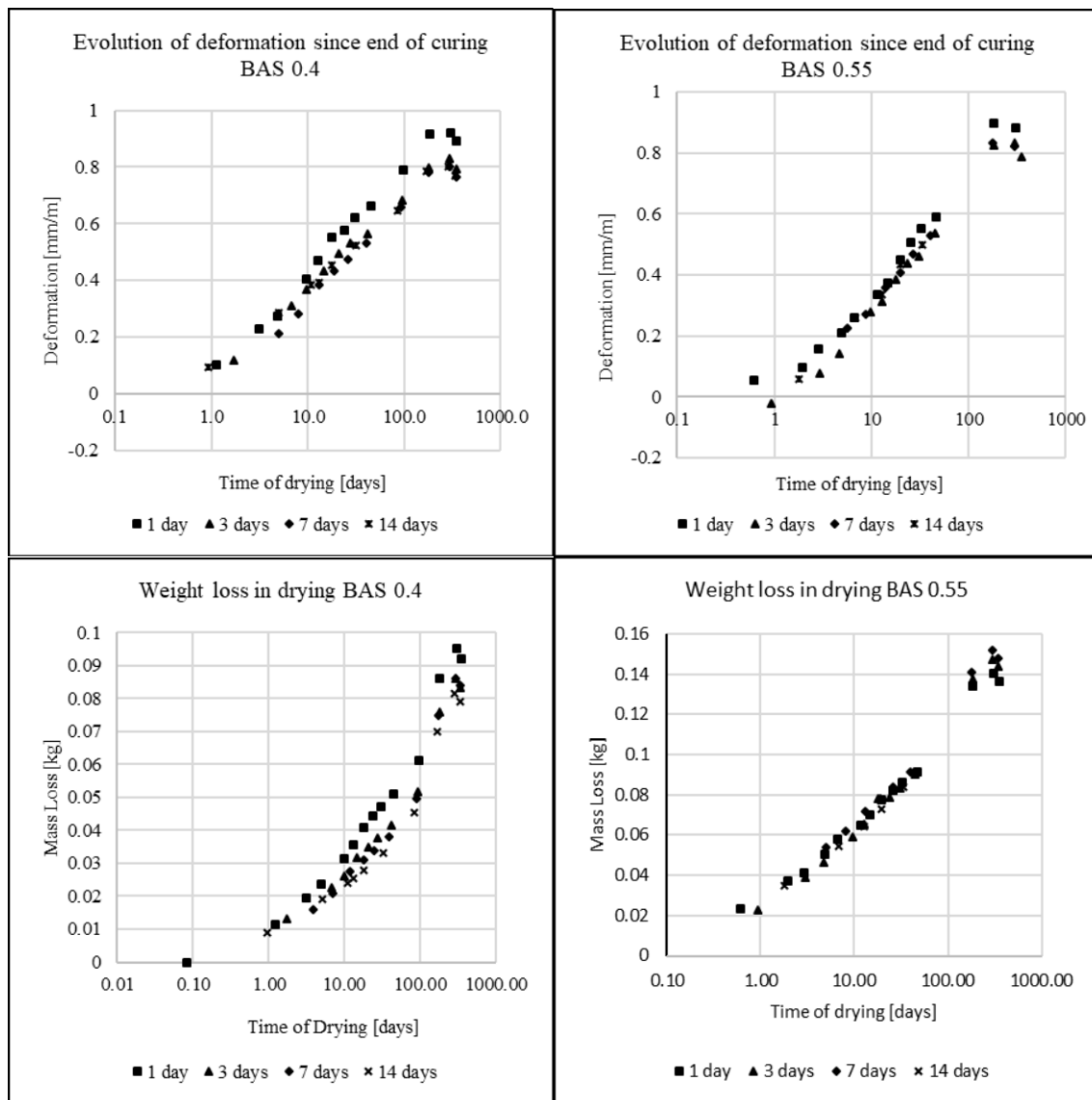
Självfallet bör detta arbete inom projekten kunna ge ett tillskott i förståelse och modellering av kraftspelet vid pågjutning.



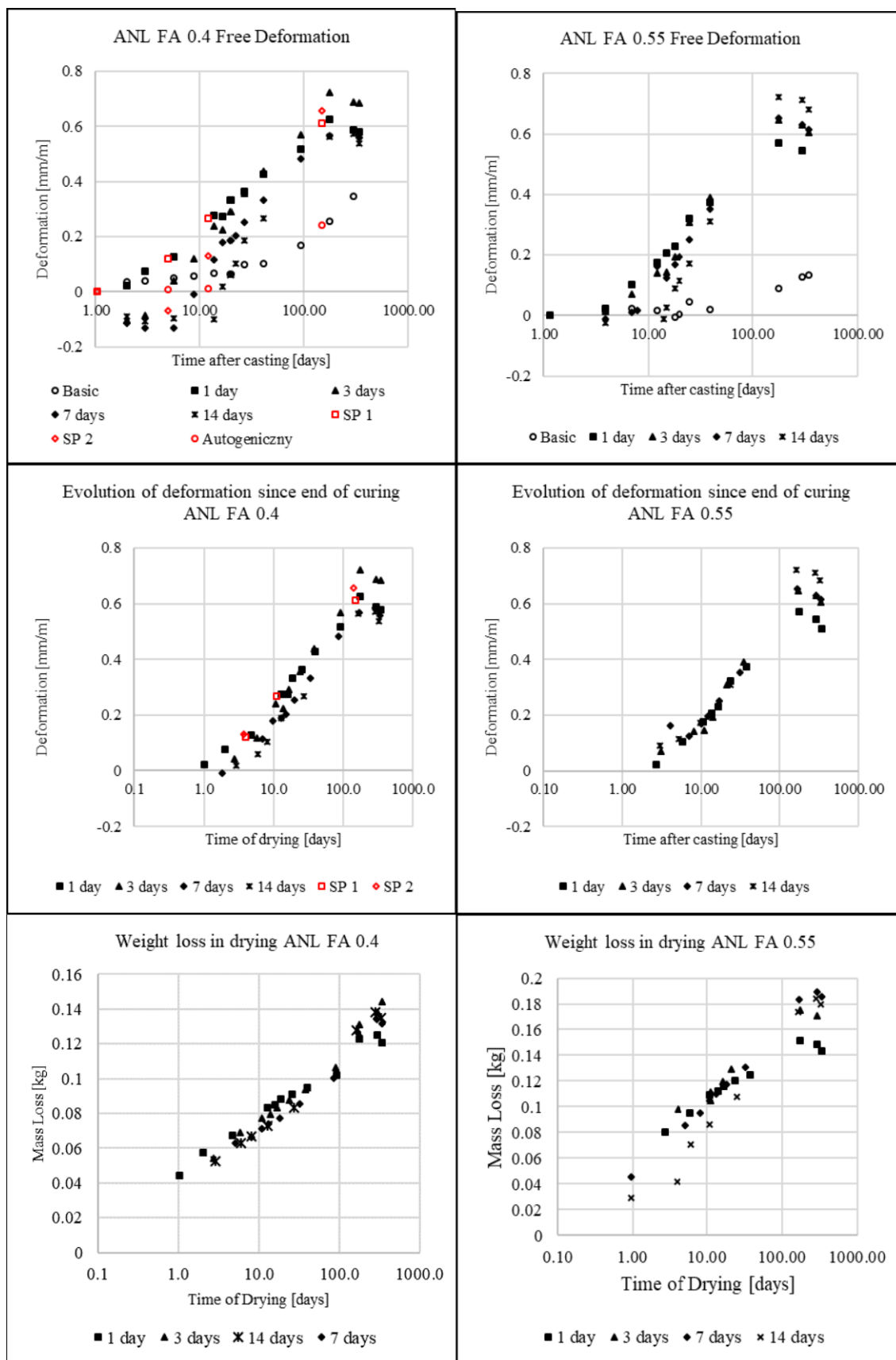
Figur 5.11 Exempel av utökad kalibrering av krympning baserad på försök för två vct och Bascement.

Figur 5.14 visar resultat beträffande krypning i tidig ålder där man har låtit provkropparna torka under belastningen; uttorkningskrypning som är att jämföra med det traditionella sättet att utföra försök med fuktisolerade provkroppar: baskrypning. Intressant ökning av deformationer erhålls vid samtidig uttorkning av provkroppar. Modellering verkar möjlig för de båda uttorkningsfallen.

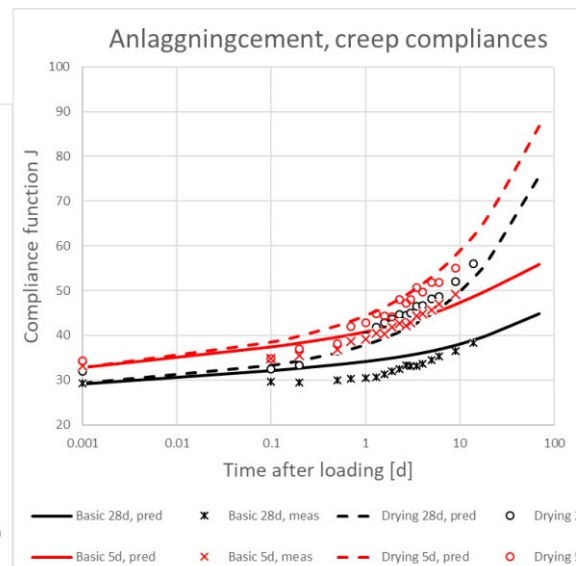
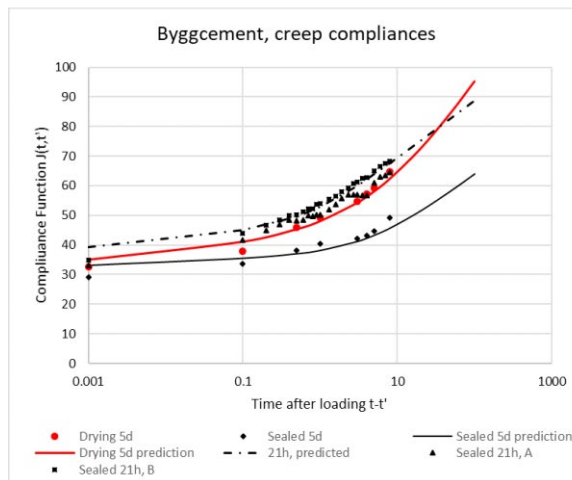
Känt är att om man studerar och modellerar effekter av krypning och krympning separat och adderar dessa får man deformationer som är lägre än om en krypande provkropp utsätts för samtidig uttorkning. I beräkningar med ConTest Pro (kapitel 6) kommenteras denna effekt benämnd Pickett-effekten. I framtida modellering bör denna effekt tas med.



Figur 5.12 Krympdeformationer och viktförlust som funktion av tid efter uttorkning påbörjats. Tider anger olika starttid för uttorkning efter gjutning.



Figur 5.13 Krympdeformationer och viktförlust som funktion av tid efter gjutning (två övre figurer) respektive efter att uttorkning påbörjats (nedre figurer). Tider anger olika starttid för uttorkning efter gjutning.



Figur 5.14 Krypning hos provkroppar belastade i tidig ålder, 5 d, i jämförelse med belastning vid 28 dygn. Helt isolerade provkroppar (basic/sealed) i jämförelse med provkroppar som samtidigt belastas med uttorkning (drying). Mätresultat och beräkningar.

6 DEL II (SBUF) – EGENSPÄNNINGAR

6.1 Initiala beräkningar av krympspänningar för strukturella situationer

Applicering av krympmodeller enligt ovan har skett för tre fall av uttorkande konstruktioner. Egenspanningar har beräknats med ConTestPro som är ett vedertaget program för analys av temperaturspänningar i tidigt skede. I och med att programmet även innehåller en modul för autogen krympning har det varit möjligt att inkludera krympning genom ett ingenjörsmässigt och semi-empiriskt förfaringssätt. Därvid har modellen enligt Cyron, ekvation (5.3) och Jonasson, ekvation (5.4) kalibrerats in mot laboratorieförsök för både autogen del och uttorkningsdel för aktuell betongkvalitet. Beräkningar av allmänna fuktillståndet och uttorkning har skett med MOIST programmet enligt tidigare. Krympning har sedan anpassats och lagts in i ContestPro som en belastande deformation.

Exemplen ger en intressant analys av t.ex. känsligheter och presenteras i Betonghandboken Material kap 19: Egenspanningar. Tre exempel behandlas: två pågjutningsexempel och vägg på platta. Text och figurer nedan är hämtad från kap 19, texten något nedminskad.

Pågjutning

Pågjutning sorteras i BHB Material inom kategorin slanka konstruktioner. Orsaken till uppkomst av egenspanningar domineras av krympning; uttorkningskrympning som är olikformig i tvärsnittet och autogen krympning som i stort sett är homogen. Skillnad i krympning mellan pågjutningen och underliggande struktur är många gånger avgörande för sprickuppkomst.

Temperaturutvecklingen av hydratationen är marginell och kommer inte ha någon större påverkan på egenspanningsnivå. Hastiga ändringar av väderbetingelser (temperaturfall och ökad vind) under härdningen har större effekt.

Den generella texten i BHB Material noterar att tjockare pågjutningar är vanliga t.ex. som slitbetong på brobaneplattor med tvärsnittsdimension av 50-150 mm. Betongkvalitet dimensioneras med hänsyn till aggressiv exponering medförande höga hållfastheter och ansenlig autogen krympning.

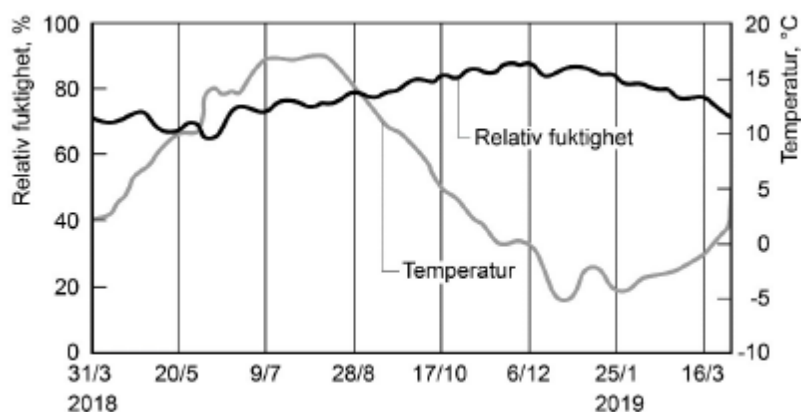
Tunnare pågjutningar, 30-70 mm, är vanliga inomhus t.ex. vid applicering på håldäck. Exponeringen är mild medförande lägre betongkvalitet. Dock innebär det tunna tvärsnittet en anpassad betong ofta med lägre maximal stenstorlek, vilket i sig kan öka krympbelastningen och påverka de mekaniska egenskaperna. Den tunna sektionen medför även ett hastigare uttorkningsförlopp och associerad uttorkningskrympning.

BHB konkluderar (liksom denna studie) att god vidhäftning är väsentlig för alla typer av pågjutning så att effektiv fördelning erhålls av eventuellt uppkomna sprickor samt att kantresning av differenskrympning förhindras. Ju tunnare pågjutning, desto större del av tvärsnittet påverkas av den mothållande effekten av underlaget. Paradoxen är att det faktiskt är den goda vidhäftningen som ger upphov till de ansenliga egenspanningarna, dvs. det är den tidigare gjutna betongen som framkallar tvånget.

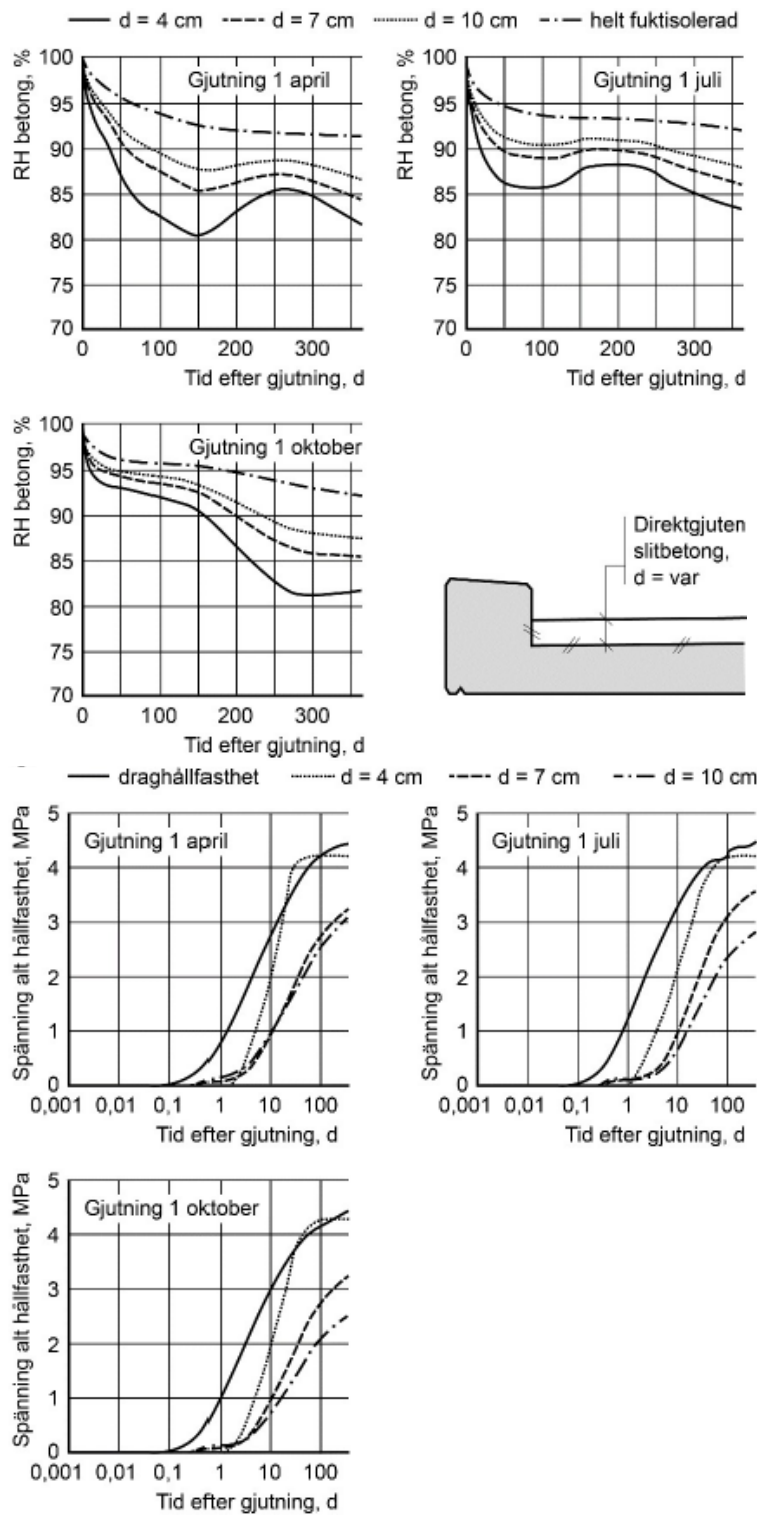
Vid gjutning av slitbetong påverkas egenspanningarna förutom av geometri (tjocklek pågjutning i relation till konstruktionsbetong) och vidhäftning, även av väderleksförhållanden under gjutning och lång tid därefter samt gjutmetod, härdning och betongsammansättning.

Figur 6.2 visar total uttorkning och egenspanningar i slitbetongen för tre tjocklekar vid gjutning under vår, sommar respektive höst där meteorologiska data inhämtats för en given plats enligt Figur 6.1.

Tydlig inverkan av tjocklek observeras; den mycket tunna pågjutningen kommer säkerligen att spricka inom 3 månader efter gjutning för alla gjuttillfällen eftersom den snabbt torkar ut. De tjockare pågjutningarna är mindre känsliga för klimatet och klarar sig förmodligen utan sprickor. En höstgjutning synes vara mer gynnsam vilket stämmer överens med observationer gjorda för ett antal pågjutningsfall. För andra situationer är säkerligen variationer av temperatur och speciellt luftfuktighet mycket större, vilket förstärker påverkan på egenspanningarna.



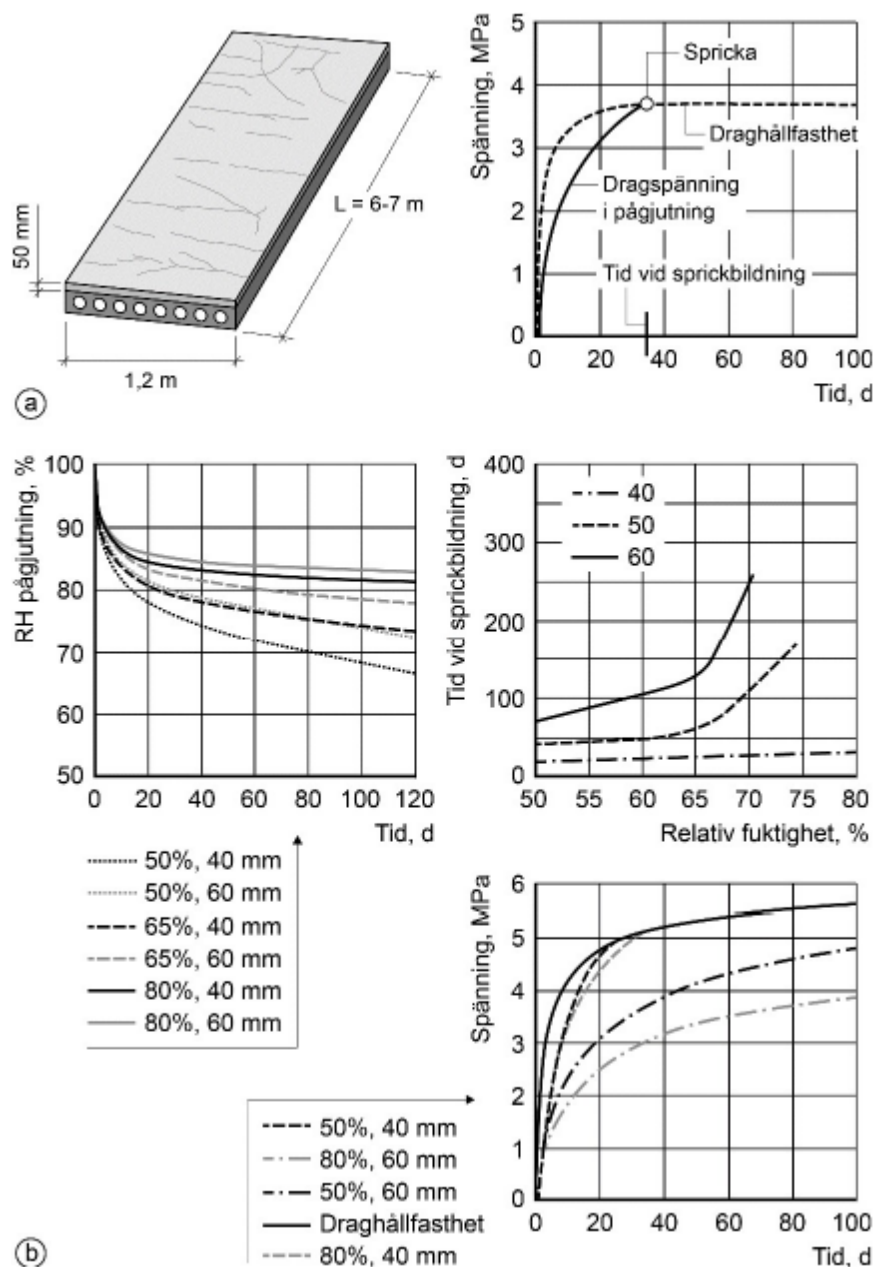
Figur 6.1 Slitbetong gjuten på brobanaplatta. Exempel på temperatur- och fuktförhållanden baserat på meteorologiska data för Gävle. Från Betonghandbok Material, kap 19 Egenspanningar.



Figur 6.2 Slitbetong gjuten på brobaneplatta. Uttorkningsförlopp a) och beräknade egenspänningar av krympning b) för tre tjocklekar av pågjutning; 4 cm, 7 cm och 10 cm vid gjutning 1:a april, 1:a juli respektive 1:a oktober. Meteorologiska data enligt figur 19.10:19. Betong vct 0,38, cement Anl Degerhamn. Från Betonghandbok Material, kap 19 Egenspänningar.

Fallet pågjutning på håldäck har studerats i ett flertal utredningar, se t.ex. Carlswärd & Emborg (2019). Det konstateras att det är oerhört viktigt att kunna åstadkomma perfekt vidhäftning för att nå förväntad kvalitet – en osprucken yta utan kantresning eller bom mot underlaget.

Exempel på analys av egenspanningar i pågjutning på håldäck visas i Figur 6.3. Effekter av relativ fuktighet och tjocklek på egenspanningar och tid för sprickbildning är tydliga.



Figur 6.3 Pågjutning, 50 mm tjock, på håldäck. Princip för uppkomst av dragspänningar av krympning som når draghållfasthet vid en viss tid för sprickbildning i pågjutningen (överst), Carlswärd (2006). Uttorkningsförlopp, tid för uppsprickning och egenspanningar av krympning (med reservation för Pickett-effekt) för två tjocklekar och tre relativa fuktigheter hos luft. Betong vct 0,50, cement Byggcement. Från Betonghandbok Material, kap 19 Egenspanningar.

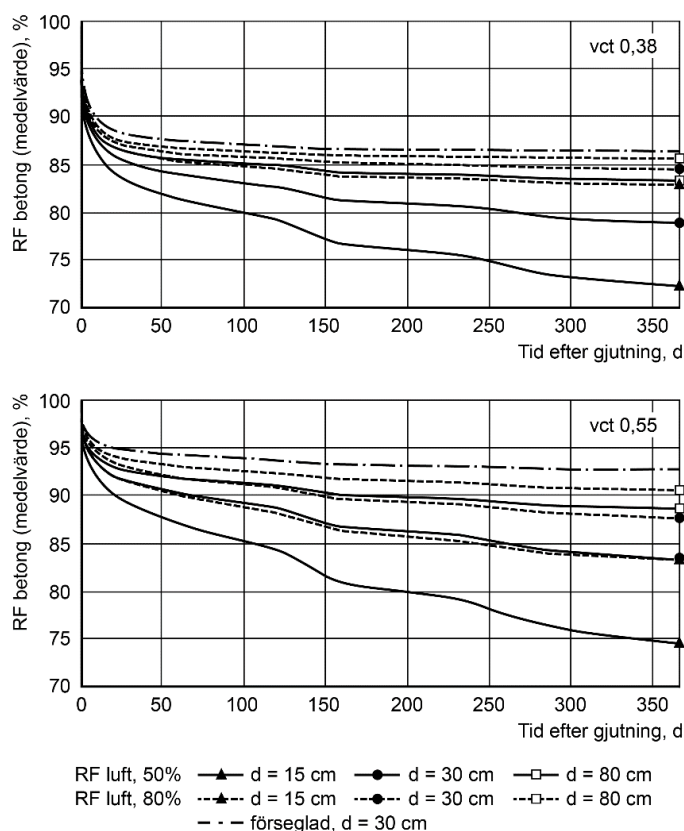
Tunn vägg på platta

Vägg på bottenplatta i källarvåning eller garageplan är en vanligt förekommande gjutsituation, ofta med krav på begränsad sprickuppkomst eller sprickfrihet. Slankare tvärsnittsdimensioner medför att temperatureffekter har lägre inverkan på sprickbildning jämfört med krympning där diffusionsuttorkning utgör huvudparametern.

Vid allvarlig exponering, t.ex. i garage och parkeringsdäck, väljs anläggningsbetong med lågt vattencementtal där följaktligen även självuttorkning och autogen krympning är betydande.

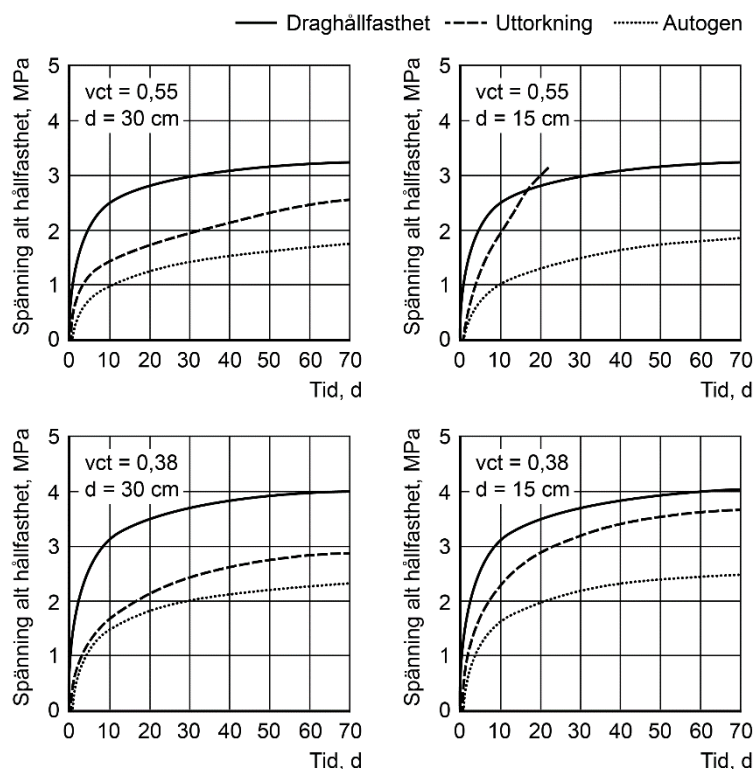
Exempel på beräknade uttorkningsförlopp med BI Dry (framtaget av Betongindustri AB) vid variation av väggtjocklek, luftens relativa fuktighet och betong visas i Figur 6.4. Dubbelsidig uttorkning sker. Även för det högre vattencementtalet uppträder en relativt hastig minskning av relativ fuktighet i betongens porer huvudsakligen framkallad av hydratation och självuttorkning.

Resultatet beräknade krympspänningar av uttorkningen visas i Figur 6.5. Observationer av fördelning av spänningar framkallade av autogen krympning respektive total krympning kan göras. Exempelvis utgör egenspanningar av autogen krympning en stor del hos den 30 cm tjocka väggen med lågt vct medan för det tunnare tvärsnittet är uttorkningskrympning en starkt bidragande orsak till egenspanningar för båda betongkvaliteterna. Sannolikt spricker den tunna väggen upp av krympning 3-5 veckor efter gjutningen för båda betongkvaliteterna.



Figur 6.4 Vägg gjuten på platta. Beräknade uttorkningsförlopp (medel över tvärsnitt), modeller enligt Jonasson et al. (2005, 2006, 2008), för två slanka väggar i jämförelse med massiv vägg vid RH = 50 % och 80 %, samt vid helt fuktisolerade förhållanden (markerat

för $d = 30 \text{ cm}$ som är samma för $d = 15 \text{ cm}$ och 80 cm). Byggcement, lufttemperatur = 20°C , gjuttemperatur = 20°C . Från Betonghandbok Material, kap 19 Egenspänningar.

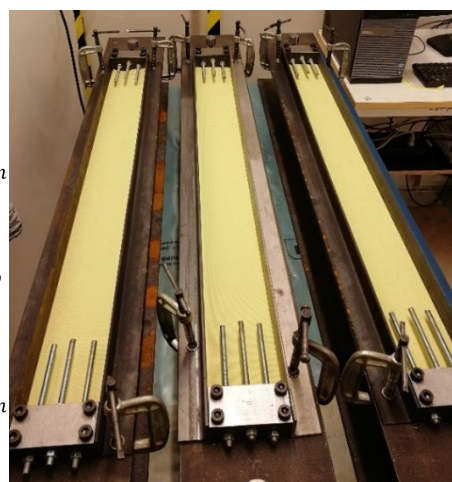
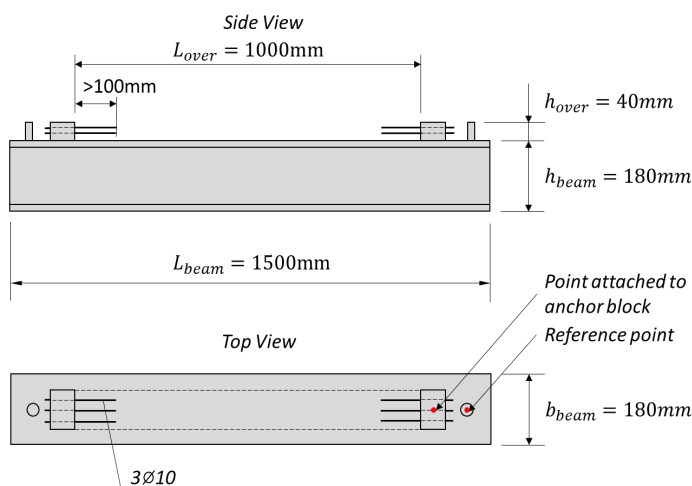


Figur 6.5 . Vägg ($h = 2,3 \text{ m}$) gjuten på platta ($0,4 \times 6 \text{ m}^2$). Beräknade egenspänningar av uttorkning enligt figur 6.10 modellerad autogen och total krympning av fukthaltsminskning (enligt avsnitt 5.3, ekvation (5.3), Cyron et al, 2022). $RH = 50 \%$.

Egenspänningsberäkningar har skett med Contest Pro. Viss hänsyn är tagen till Pickett-effekt vilket kan ha gett för höga spänningar. Från Betonghandbok Material, kap 19 Egenspänningar.

6.2 Förhindrad krympning - försök

För att detaljstudera fallet med krympning och framkallade krympspänningar genomfördes försök med prismor gjutna mot stålblock så att efterföljande deformationer förhindrades och sprickor bildades, se Figur 6.6. Provkropparna förvarades i klimatrums med styrd temperatur och luftfuktighet. Fri krympning mättes på prismor lokaliserade i samma miljö.



a)



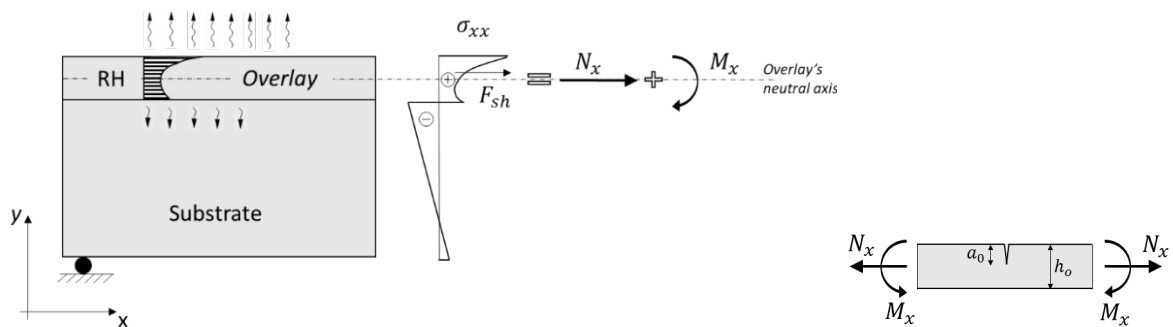
b)

Figur 6.6 Krympande prismor i klimatrum fastlåsta i underliggande stål balkar. Ensidig uttorkning, Geometri och form a), betong och sprickor b).

I efterföljande analys togs hänsyn till graden av tvång och böjande moment genom att pålastningen från prismet inte sker centriskt i systemet, se Figur 6.7. Tvånget beräknas som

$$r = \frac{1}{1 + \frac{A_o E_o}{A_b E_b}} \quad (6.1)$$

där o och b refererar till prisma respektive balk.



Figur 6.7 Uttorkning, egenspanningar, samt kraftspel och jämvikt enligt balkteori vid pågjutning mot underliggande betong.

Beräkning av egenspanningar och tidpunkter för sprickbildning sker med ATENA. Även brottmekaniska aspekter ingår i analysen, se kommande rapportering i Cyron & Emborg (2022).

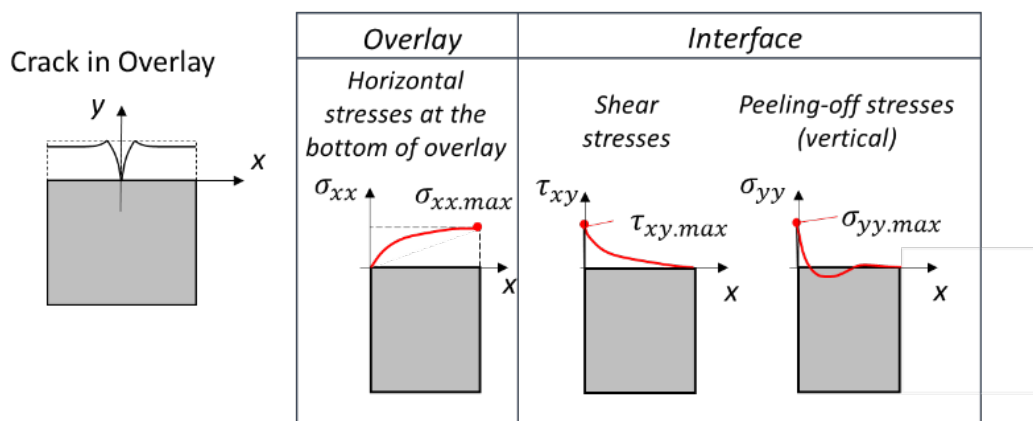
7 DEL II (SBUF) – VIDHÄFTNING

7.1 Inledning

Eftersom vidhäftning är en avgörande faktor huruvida egenspanningar, sprickor, brott i gjutfog etc. (Figur 2.1) ska uppstå har en utförlig utredning genomförts i projektet inkluderande laboratorieförsök.

Om en spricka uppstår i pågjutningen på grund av krympningen sker en spänningsomlagring med tillväxt av dragspänning i pågjutningen med avstånd från sprickan, se Figur 7.1.

Skjuvspänning i skiktet mellan de båda betongerna växer till under det att normalspänning (lyftkraft) sjunker och övergår till tryckspänning med ökat avstånd från sprickan, se figuren.



Figur 7.1 Spänningar i pågjutning och i skikt mellan denna och underbetong vid uppsprickning av pågjutningen, från Cyron et al (2022a).

Det är de två sistnämnda spänningarna som vidhäftningen ska motstå. Samma situation uppstår på ömse kanter av pågjutningen. Kriterier för erforderlig vidhäftning ges t.ex. i normer (SS EN 1503 3): $1+1,4\sigma$ [MPa] där σ är standardavvikelse vid utdragsförsök. Alternativt ges 0,8 MPa eller 2 MPa för situation utan direkt last respektive vid belastning. Att åstadkomma god vidhäftning innebär ett noggrant utförande med optimal och noggrant utförd förbehandling av yta, t.ex. fuktning, gjutning och efterhärdning. Materialegenskaper hos underliggande betong och pågjutning har stor inverkan och påverkar även hur förbehandlingen ska utföras. I Cyron et al. (2022a) ges en utförlig redogörelse av forskningsinsatser och praktiska erfarenheter beträffande vidhäftning.

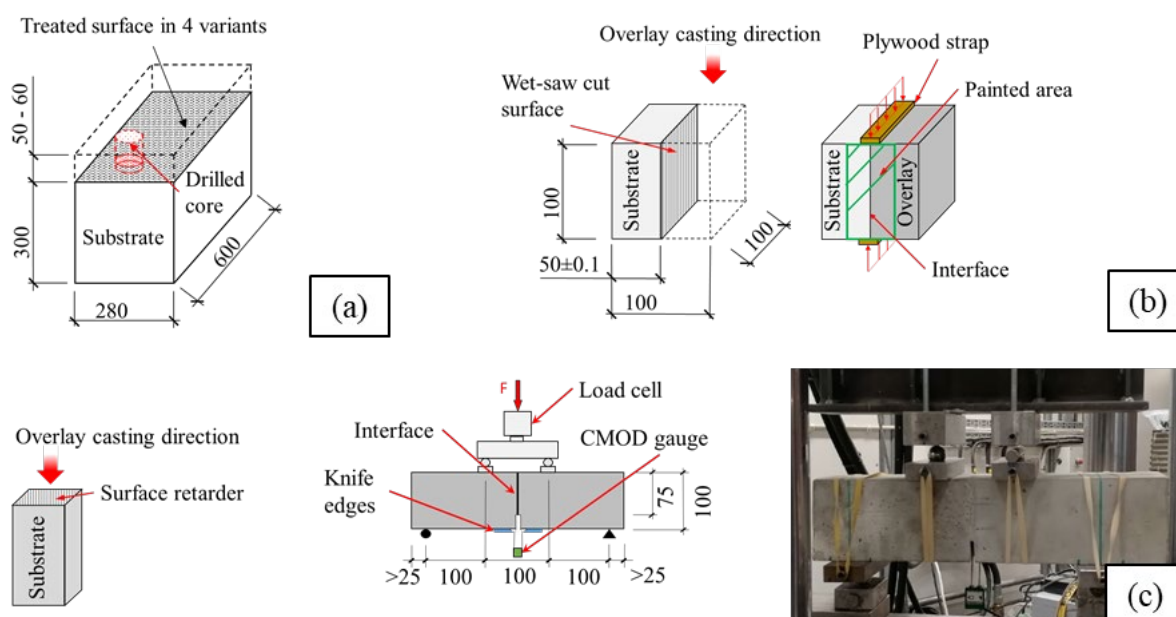
Det bör nämnas att spänningstillståndet vid en pågjutningssituation har studerats i otaliga utredningar världen runt; tidigare, för mer än 50-70 år sedan, med analytiska beräkningsmodeller, och senare med numeriska metoder, t.ex. genom finita elementberäkningar. I båda fallen utgör den försökstekniska basen en mycket viktig del. Utan data från noggrant utförda och väl utformade försök står sig modelleringen tämligen slätt, ett faktum som många forskare tyvärr förbiser. Dessutom finns en intressant erfarenhetsbank från observationer i full skala vid t.ex. kontinuerliga inspektioner av pågjutningar, både i industri- och stomsammanhang och för anläggningstillämpningar. Att inte utvärdera dessa, ofta noggrant dokumenterade observationer, är en källa till osäkerheter vid tillämpning av såväl laboratorieobservationerna som de teoretiska analyserna.

Vidhäftning är en huvudparameter i sammanhanget.

Svenska forskare, t.ex. Cyron, Persson, Carlswärd, har listat många intressanta artiklar och rapporter i ämnet i sina litteraturstudier vad gäller teoretisk modellering, laboratorieundersökningar och fullskalestudier. Internationella erfarenheter ingår givetvis.

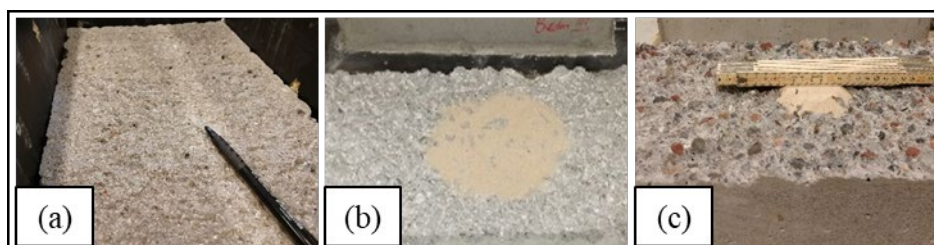
7.2 Laborieförsök

I syfte att studera vidhäftningens inverkan av utförande och betongmaterialet i sig utfördes inom projektet en försöksserie med testuppställningar enligt Figur 7.2, där (a) är det standardmässiga utdragsförsöket, ofta tillämpat i kvalitetssäkring, kontroll etc., medan (b) och (c) är speciella metodiker där brott åstadkoms i avgränsningsskiktet genom spjälkning och böjning. Dessa metoder ger intressanta bidrag till förståelse för vidhäftningsegenskaperna i gränssnittet.



Figur 7.2 Laborieförsök: a) utdragsförsök borrhärnor, b) spjälkningstest kuber, c) fyrpunkts böjtest där kontrollerad styrning sker genom givare i sprickan (CMOD).

För att åstadkomma olika kvaliteter på gränsskikten har de gjutits horisontellt så att olika behandlingsmetoder har kunnat appliceras, se Figur 7.3 (Del I). Gjutning av pågjutningsbetong skedde vid 1-3 månader efter första delens färdigställande.

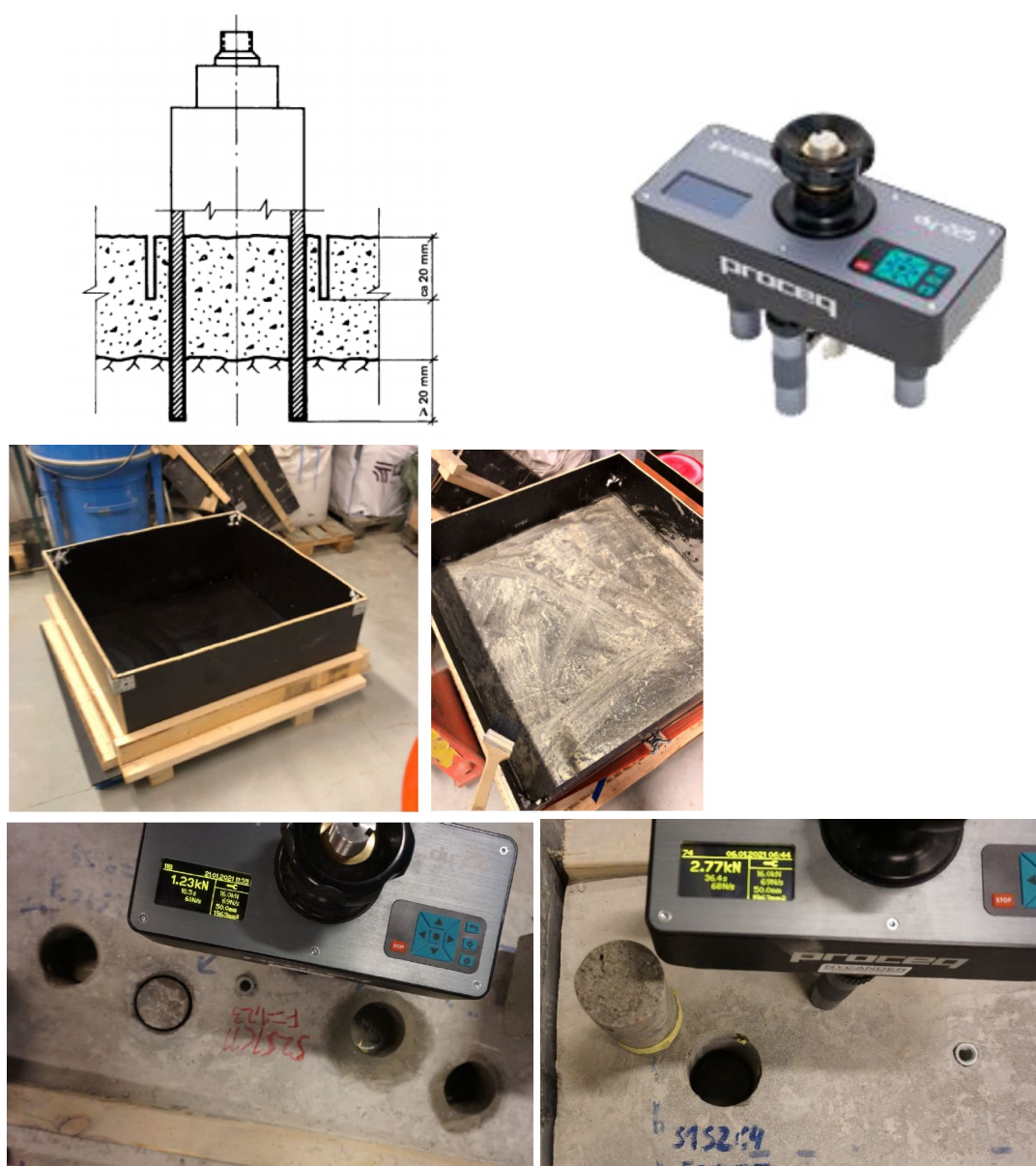


Figur 7.3 Behandling av underbetongens överyta med a) tryckluftsdreven mejsel (air needle) (AN) b) huggmejsel (CH) och c) högtrycksvatten, water-jetting, (WJ). Mätning av ojämnhet skedde med sand-path metod delvis visad i figur c). Även polering genomfördes som ett alternativ (PS).

Variation av den självkompakterande pågjutningsbetongens retardation skedde även i del II av undersökningen genom att retarder applicerade; W- ”smärre” retardering, S – ”kraftigare” retardering, se Cyron (2022). I denna del studerades även härdningsmetod; C – vattenbegjutning, D – plastfolie.

7.2.1 Utdragsförsök, standardmetod

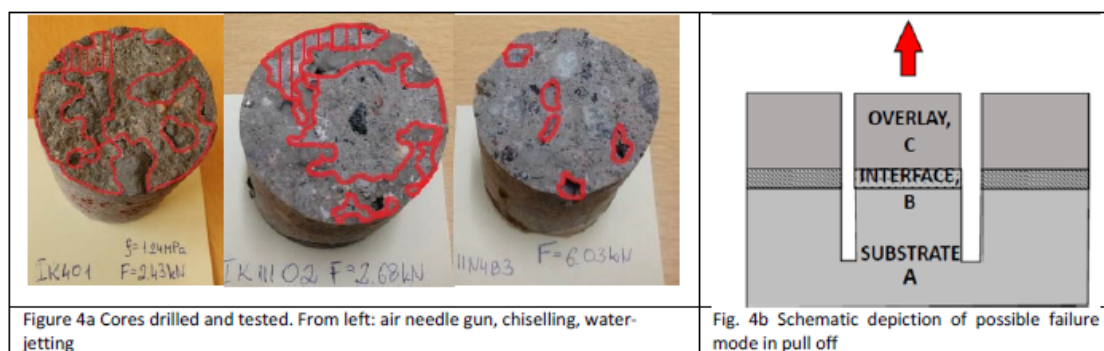
Figur 7.4 visar exempel på försöksgenomförande vid Ltu inom ett examensarbete finansierat av SBUF, Lundström (2021). Vidare visar Tabell 7.1, Figur 7.5 och Figur 7.6 exempel på brottytor och försöksresultat. Värden mellan 1,1 och 2,7 MPa erhöles beroende på förbehandling och variation av betong. Dessa värden ligger inom ett område som ofta fås vid kvalitetsprovningar. Krav finns i standarder och normer beroende på tillämpningar. I stort kan sägas att värdena enligt tabellen skulle accepteras i de flesta situationer (tillämpning, exponering etc.).



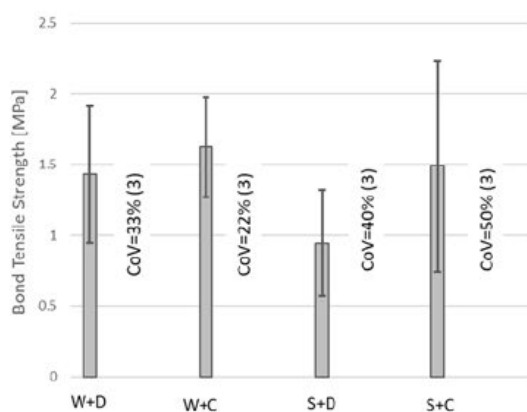
Figur 7.4 Utdragsförsök vid LTU: uppställning enligt standard, utrustning Proceq, form för underliggande platta, exempel på ytbehandling innan pågjutning, två exempel på resultat inklusive utdragen borrhärna i nedre högra bilden, från Lundström (2021).

Tabell 7.1 Utdragsförsök vidhäftning vid olika preparering av ytor, "treat", se Figur 7.4. Beteckning "mode", se Figur 7.5.

Serie	Treat	Block	Old concrete				Fresh mix		Young Concrete		Pull-off		
			Depth	Description	$f_{cc,28}$	$f_{ct}(t)$	d	T_{50}	$f_{cc,28}$	$f_{ct,28}$	Mean	Mode	CoV
I	AN	1	1.4 mm	Smooth	58.6	4.5	61	-	43.06	3.54	1.10	A/B	0.36
		2	1.5 mm	Smooth	56.7	4.4					1.11	A/B	0.29
		3	1.3 mm	Smooth	58.8	4.4					1.45	A/B	0.12
		4	1.4 mm	Smooth	55.2	x					1.23	A/B	0.16
II	CH	1	1.41mm	Smooth	50.3	4.13	68	<2s.	52.21	4.42	1.35	A/B	0.18
		2	2.6mm	Rough	50.6	4.31	46	<2s.			1.23	A/B	0.26
		3	2.0mm	Rough	47.9	4.42	61	<2s.			1.51	A/B	0.2
	PS	4	0	Very smooth	50.8	4.35	70	>2s.			2.68	C	0.16
III	WJ	1	7.5mm	Very rough	53.1	4.45	61.5	<2s.	53.56	4.21	2.18	B	0.03
		2	6.5mm	Very rough	45.6	4.21	55	<2s.			2.74	B	0.31
		3	8mm	Very rough	48.6	4.34	49	ok. 2s.			2.24	B	0.21
	PS	4	0	Very smooth	48.6	4.12	61.5	<2s.			1.72	A/B	0.04



Figur 7.5 . Exempel på brottytor och läge brott vid utdragsförsök, se Tabell 7.1.



Figur 7.6 Vidhäftning vid utdragsförsök del II, exempel. W – "smärre" retardering, S – "kraftigare" retardering, C – vattenbegjutning, D – plastfolie.

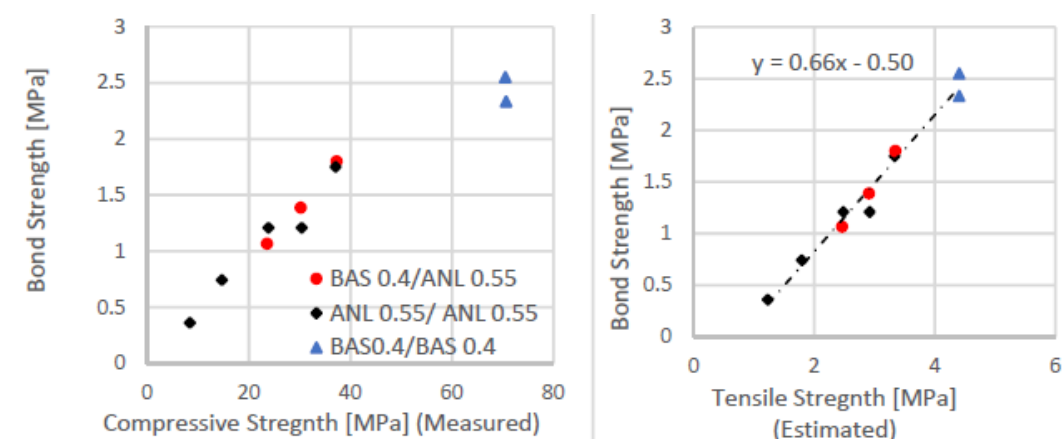
7.2.2 Spjälkningsförsök

Figur 7.7 visar exempel på brottyta vid spjälkningsförsök (på samma sätt som vid mätning av draghållfasthet) med vertikalt beläget pågjutningsskikt mitt i kub. Vidhäftning i relation till

uppmätt tryckhållfasthet och draghållfasthet vid samma tidpunkt visas i Figur 7.8. Linjära samband observeras.



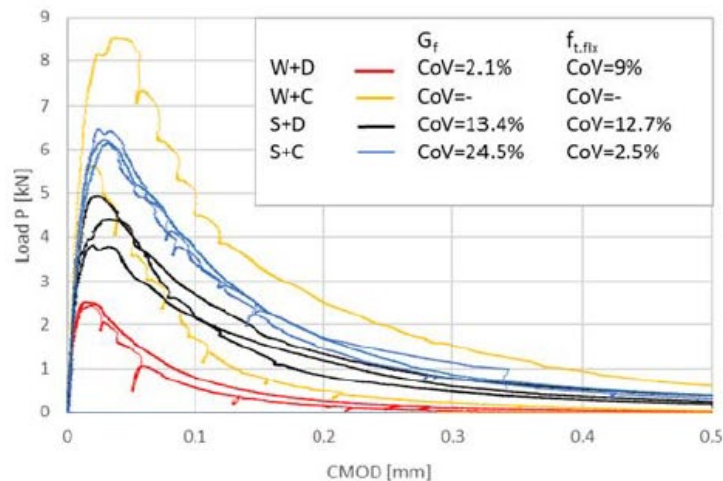
Figur 7.7 Exempel på brottyta hos spjälkad kub där ett tunt lager av bruk kan skönjas i zonen mellan de två betongerna, Cyron (2022).



Figur 7.8 Exempel på vidhäftning vid spjälkningsförsök i relation till tryckhållfasthet och draghållfasthet hos pågjutning, BAS 0,4/ANL 0,55 etc. anger cementtyp och vct hos pågjutning respektive undergjutning, Cyron (2022).

7.2.3 Balkböjning

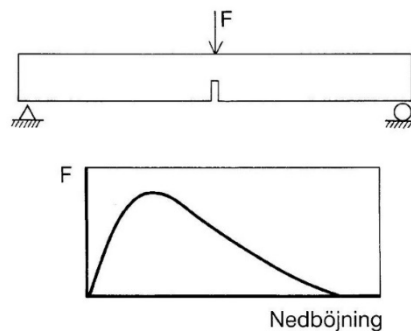
Resultat från balkböjning med vertikal pågjutningszon i mitten av balk visas i Figur 7.9. Tydlig skillnad observeras mellan retardation och härdning vilket inte iaktas direkt för övriga provningsmetoder. Härdningen har en stor inverkan på brottförloppet.



Figur 7.9 Last-sprickvidd vid fyrpunktsbalkböjning (två stöd och två laster) med vertikal gjutfog med brottanvisning i underkant. Effekt av retardation och härdning av pågjutning. Försöket styrs genom långsam ökning av sprickvidden ($18 \mu\text{m}/\text{min}$) med CMOD-givare (Crack Mouth Opening Deformation) enligt standardmetod. Spridning på böjdraghållfasthet $f_{t,fix}$ och brottenergi G_f anges. COV = kovarians (spridningsmått).

7.3 Analys och tillämpning av brottmekaniska egenskaper

I arbetet inriktades analysen mot att modellera det observerade beteendet vid balkböjning genom nyttjande av brottmekaniska teorier. Figur 7.10 visar principiellt brottmekaniskt beteende hos en balk med slits sågad i underkant och som belastas till brott under det att nedböjning ökas i kontrollerade steg. Efter att maximal last passerats, då underkant börjat spricka upp, sker en fortsatt lastupptagning under en ansenlig del av försöket. Den nedåtgående delen visar på att balken verkligen kan ta last efter det att spricka uppkommit i skåran.



Figur 7.10 Beteende hos en oarmerad balk med slits sågad i underkant under kontrollerad ökning av nedböjning, från Betonghandboken Material kap 16.

Brottenergin G_f beräknas som ytan under last-nedböjningskurvan dividerad med den uppspruckna arean. Energin är ett mått på balkens seghetsegenskaper. Ett högt värde innebär en stor kapacitet att ta upp belastningen under stora deformationer, betongen är seg. Ett lågt värde innebär en sämre förmåga, ett sprött brott uppkommer. Betong med hög hållfasthet tenderar att ha ett sprött beteende. Armering, speciellt fiberarmering ger en markant ökning av segheten; kurvan får då ett helt annat utseende.

Att styra försöket med en givare som mäter spricköppning, dvs. öppning av skåran, ger en förfining av resultatpresentation och modelleringsmöjligheter. Man får en last-sprickviddsprojicering vilket innebär en förbättrad modellering, dvs. på det vis som försöken genomförts ovan.

Modellering av last-sprickvidds kurvan kan nu t.ex. ske genom ett bi-linjärt matematiskt uttryck, se Figur 7.11. En iterativ process genomfördes av Cyron för att passa materialegenskaper i den bi-linjära modellen mot försöken i Figur 7.9. Det antogs bl.a. att den enaxiella draghållfastheten är ca 2/3 av böjdraghållfastheten uppmätt vid balkförsöken, dvs. maximala värdet i last-nedböjningskurvan, ekvation (7.1) nedan. Det bi-linjära sambandet kan uttryckas med ekvation (7.2). Det man även vill komma åt vid modellering är brottegenskaperna vid skjuvning (mod II) vilket innebär att vissa antaganden görs angående brottenenergin i mod II, ekvation (7.3)-(7.5) med stöd av forskare som Bazant (2002), Bazant Pfeiffer (1986). Metodiken som används kallas Inverse Analysis och är utvecklad bl.a. av Kurihara et al. (2000). Allt beskrivs i Cyron et al. (2022).

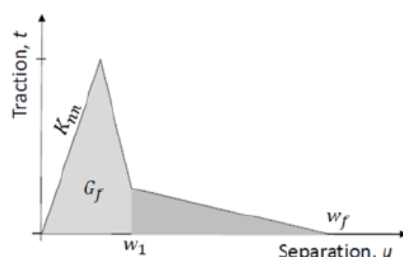
$$f_{tb,flx} = 1,5 f_{tb,u} \quad (7.1)$$

$$w_1 = \frac{G_f}{2f_t} \quad (7.2)$$

$$G_F = 2,5 G_f \quad (7.3)$$

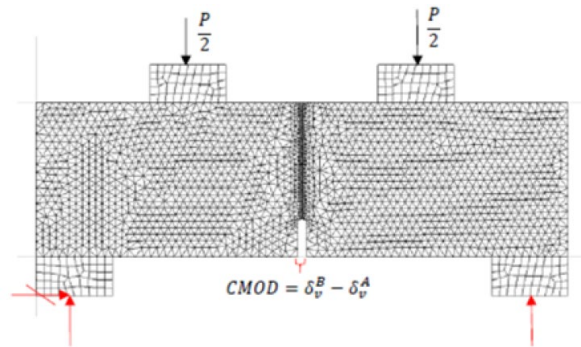
$$w_f = \frac{5,6 G_F}{f_t} \quad (7.4)$$

$$G_F^{II} = 5 G_F^I \quad (7.5)$$

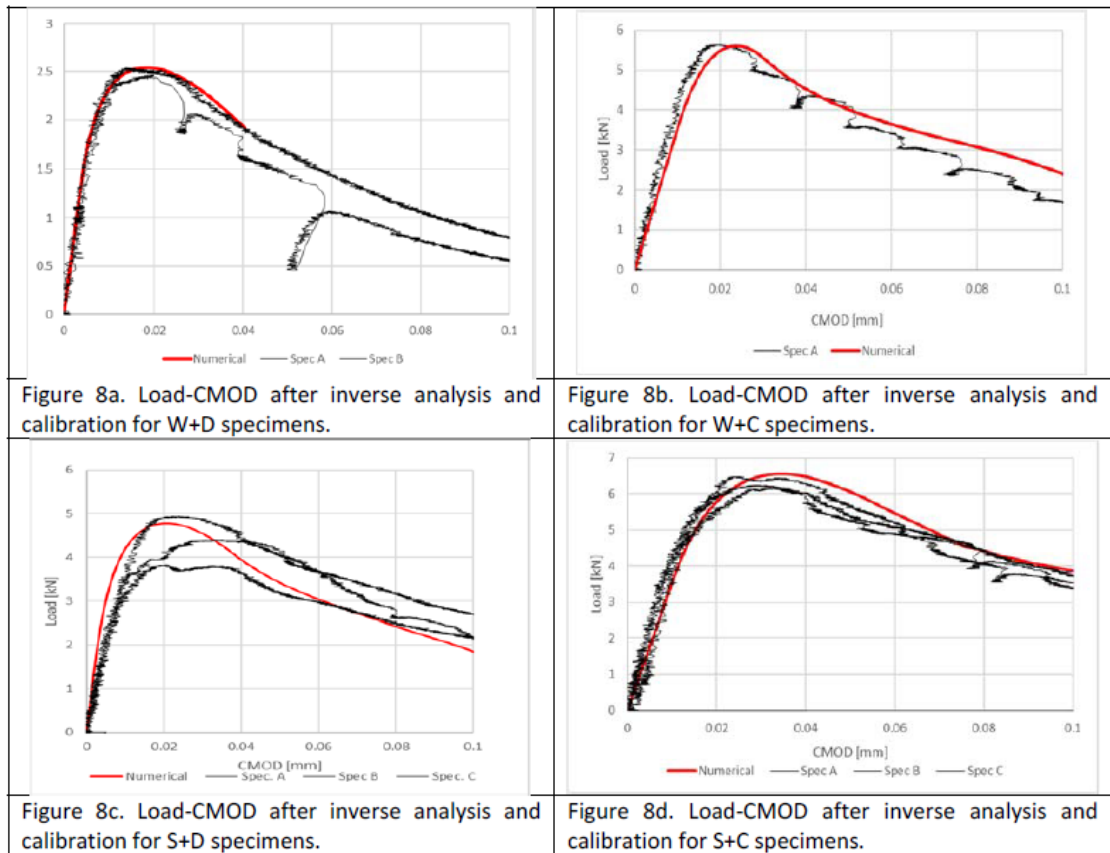


Figur 7.11 Bi-linjär modell för beskrivning av last-sprickvidd vid balkböjning (mod I). Brottenenergi G_f är ytan under kurvan (obs. under hela kurvan, även den mörka delen).

Invers-analysen ger en möjlighet till kalibrering av brottmekaniska egenskaper i en finit elementmodell beskrivande balkböjningen, se Figur 7.12. Resultat av kalibreringen i detta fall visas i Figur 7.13, där god överensstämmelse med försök har erhållits.



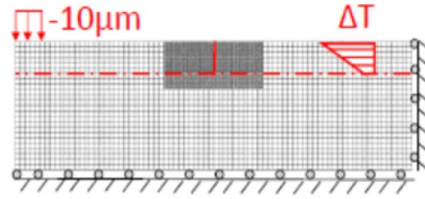
Figur 7.12 Finit elementmodell av balkböjningsförsöken för inpassning av brottmekaniska egenskaper.



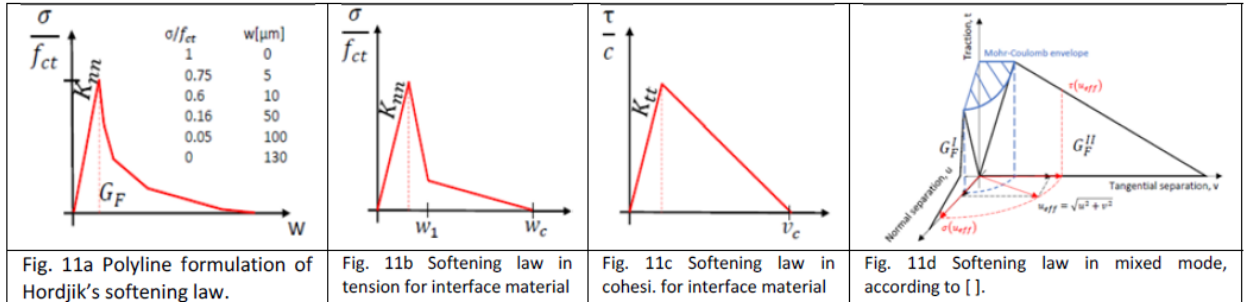
Figur 7.13 Exempel på erhållna kalibreringar av modellparametrar mot försök för de olika härdningsförhållandena (Figur 7.9).

8 DEL II (SBUF) – ANALYS AV PÅGJUTNING

Med de utvärderade egenskaperna ovan är det möjligt att utföra en modellering av situationen för pågjutning mot underbetong inorporerande de utprovade brottmekaniska modellerna för dragbrott och skjuvbrott, se Figur 8.1. I modellen ansätts en linjär temperaturlast simulerande krympning genom en enkel fördelning över tvärsnitt; en autogen krympning över hela tvärsnittet och en linjärt ökande deformation genom uttorkning uppåt. I änden av modellen ansätts en vertikal last för att förhindra upplyftning i kanten – ett vanligt förekommande fenomen som motverkas för en ren analys, se Figur 2.1. Bakomliggande brottmekaniska samband i ATENA för dragning, skjuvning och blandad belastning både i skjuvning och i dragbelastning (s.k. mixed-mode belastning) visas i Figur 8.2.



Figur 8.1 Finit elementmodell i ATENA simulerande pågjutningssituation med en vertikal spricka ansatt i mitten av pågjutningen, dvs. 40 cm från änden av modellen som är 80 cm lång och har bredden 25 cm och tjockleken 6 cm. Konstruktionsbetongens tjocklek är 18 cm. Krympningen simuleras med temperaturlast.



Figur 8.2 Använda brottmekaniska samband för situationer med ren dragning, skjuvning och mixed mode (figur b-d). (Figur a ger en generell beskrivning av modellen).

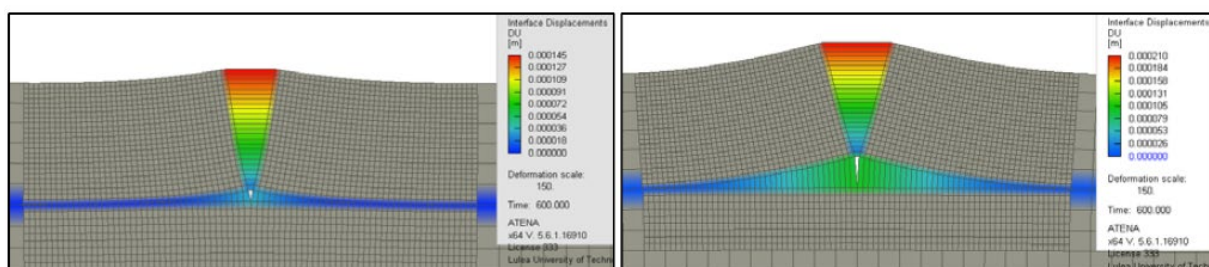
Krympbelastningen $\varepsilon_{sh}(y)$, dvs. genom den fiktiva temperaturdeformationen, togs fram genom relation till fukttillstånd $h(y)$ beräknat med MOIST (ett delprogram i konceptet BI Dry, se tidigare avsnitt och även Betongindustri.se). En ansats likande den tidigare nämnda relationen till minskningen av avdunstningsbara vattnet, ekvation (5.3), användes enligt

$$\varepsilon_{sh}(y) = (1 - h(y)) \varepsilon_{sh,ult} \beta_s^0 \quad (8.1)$$

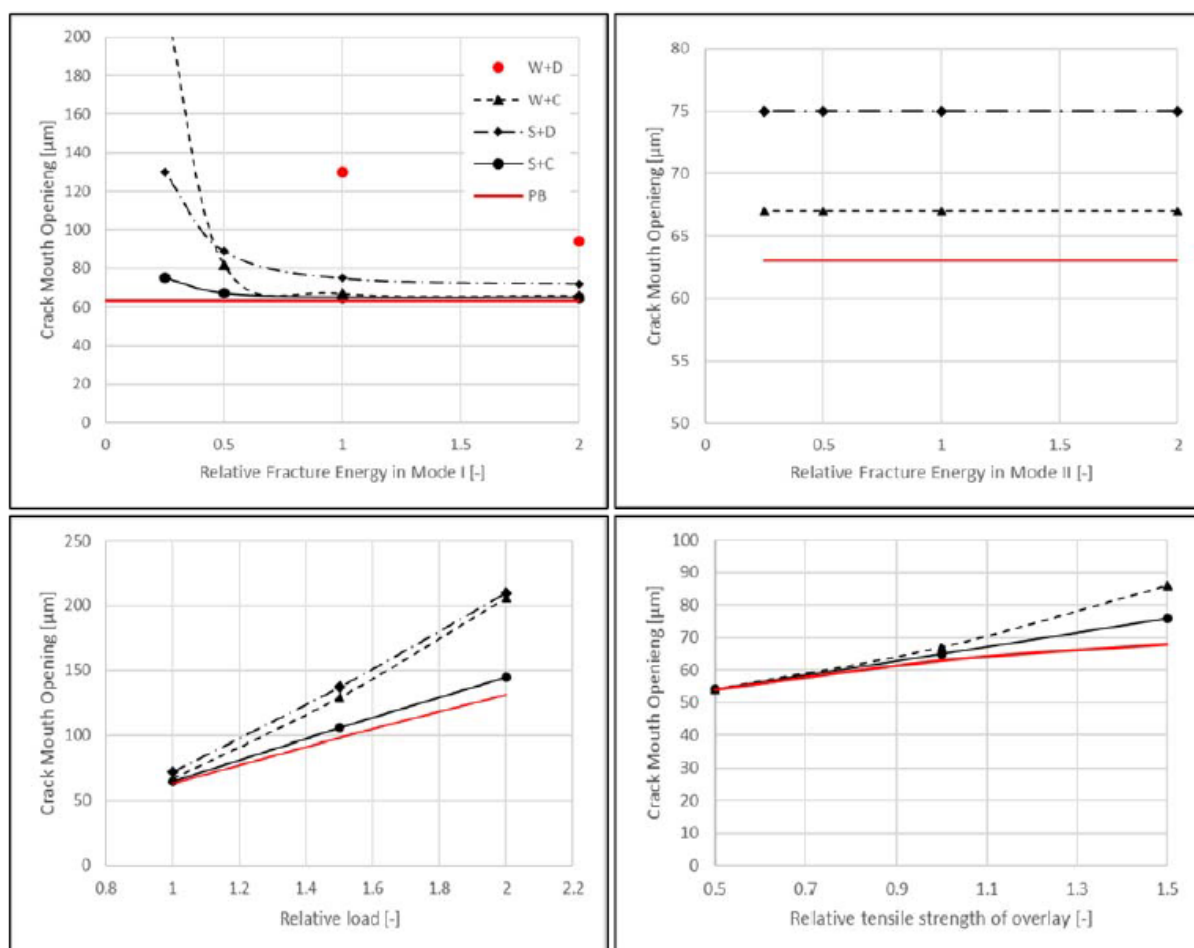
där krympningens slutvärde $\varepsilon_{sh,ult}$ uttrycks enligt Bazant B4-modell, Wendner et al. (2013)

$$\varepsilon_{sh,ult} = \varepsilon_{cem} \left(\frac{a}{6c} \right)^{p_{aa}} \left(\frac{w}{0,38c} \right)^{p_{ew}} \left(\frac{6,5c}{\rho} \right)^{p_{ec}} \quad (8.2)$$

Där ingående koefficienter är beroende av betongsammansättning (a är ballast, c är cement, w är vatten), se även kap 18, Betonghandboken – Material. Exempel på deformationer i preliminära analyser visas i Figur 8.3. Resultat vid några känslighetsstudier för de olika härdningsvariationerna kan studeras, Figur 8.4, och det synes vara fullt möjligt att analysera det aktuella pågjutningsfallet på ett relevant sätt.



Figur 8.3 Deformationer vid analys av krympande pågjutning. Brottmekaniska parametrar inkalibrerade från balkböjningsförsök för de olika härdningsalternativen.



Figur 8.4 Variation av resultat vid känslighetsanalyser m a p brottmekanik i drag respektive skjuvning, krympbelastning samt draghållfasthet för FEM typfall enligt Figur 8.3. Härdningsvariationer enligt tidigare figurer.

Studierna fortsätter med analys av pågjutningar med olika mängder armering, vilket förändrar brottförloppet, dvs. det blir mer segt. Brottenergin ökar vilket kan ses som att ytan under last-sprickkurvan i Figur 8.2. Då borde sprickfördelningen förbättras och sprickbredden minska.

Försök sker således där dessa ökningar sker som sedan analyseras med bl.a. FEM.

9 DISKUSSION

9.1 Inledande kommentarer

Som tidigare nämnts har delar av den grundläggande forskningen inte helt kunnat slutföras. Det gäller fördjupade studier kring vidhäftningens beroende av bl.a. förbehandling av tidigare gjuten betong, pågjutningens sammansättning (hållfasthetsklass, täthet, flytbarhet etc.). Inverkan av armeringsmängd ingår också.

Laboratorieförsök sker där brottförloppet studeras. Sprickbildning (tid för uppkomst, sprickvidd m.m.) dokumenteras hos pågjutningar med variation av t.ex. armeringsmängd och armeringstyp.

Försöken har blivit försenade. Orsaken är uppkommen personalbrist vid Ltu och att avsedd utrustning för sprickdetektering prioriterats till att användas vid fullskaleprovning av vägbro, i ett större forskningsprojekt finansierat av Trafikverket och SBUF.

När resultaten erhålls kommer de att användas vid kalibrering av FE-modell liknande den som presenterats i föregående kapitel. Därefter nyttjas FE-modellen för att simulera inverkan av parametrarna ovan och i några fall jämföra med fältobservationer.

Detta kommer att ske så snart provningarna är genomförda. Rapportering planeras att göras i separata artiklar ingående i Cyrons licentiatavhandling.

9.2 Sammanfattande reflektioner

Arbetet som utförts hittills vid Ltu (genomgång av kravställningar, definition av frågeställningar och syften samt metodval, litteraturstudier, fältstudier, laborativa studier, teoretiska analyser), och även på annat håll (bl.a. inhämtade genom litteraturstudier) kan sammanfattas enligt följande:

9.2.1 Fältstudier

Data från broar inom Trafikverkets databas Batman och information från TRV rapporter tydliggör skador på slitbetongen som troligen skett under härdningsperioden. För närvarande synes broarna ändå uppvisa god funktion i de flesta fall. Beständigheten mot fortsatt nedbrytning bedöms vara acceptabel enligt de rapporter som föreligger i databasen Batman. Många broar är i perfekt skick.

Detaljstudierna i fält på ett par broar inom projektet visar att dagens metodik för sprickobservationer, mätmetoder för kvantifiering av skada (oförstörande provning av sprickutbredning, sprickdjup, bredd, eventuellt släpp etc.) ger en god bild av status på applikationen med direktgjuten slitbetong. Resultat från sådana undersökningar bör kunna ge ett bra underlag för bedömning om reparation är nödvändig. (För de två studerade broarna bedömdes att reparation eller annan åtgärd inte var nödvändiga).

Inom del I av projektet genomfördes dessutom en detaljstudie av en pågjutning med slitbetong vid broreparation. Detaljerad information under lång tid efter gjutning erhöles om deformationer i konstruktionsbetong och pågjutningsbetong samt fukttillstånd i pågjutningen. Deformationer i provkroppar belägna under bron samlades även in liksom deformationer i provkroppar med

samma betong transporterade till Ltu:s laboratorier. Intressanta indata till efterföljande analyser erhöles.

9.2.2 Tidiga belastningsfenomen; krympning

En basal reflektion från arbetet är att direktgjuten slitbetongs 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. Därför skedde inledningsvis i del II av projektet omfattande studier av krympning och modeller för prognoser. Genomgång av i Sverige och internationellt förekommande krympmodeller visade på mycket stor spridning i angreppssätt, bakomliggande huvudorsaker och hur dessa inkorporeras i modellerna. Logiskt medför dessa ofta stora skillnader beträffade krympningens storlek och utveckling med tiden.

En prototyp till krympmodell som är beroende av fukttillstånd utvecklades och testades mot ett antal försök. Det är avvattningen av betongens porer som ger upphov till krympningen och modellen utgår från en uttorkningsberäkning och relaterar sedan denna till krympdeformationen. Modellen skiljer på effekter av hydratation och vanlig uttorkning. Modellen presenterades i Betonghandboken Material avsnitt om krympning och kan implementeras i FE-program om samma program har möjlighet att beräkna fukttillståndet under den jungfruliga uttorkningen. Ett tidigare utvecklat alternativ till krympmodell, även det baserat på fukttillstånd, studerades även inom projektet.

9.2.3 Egenspänningar

Pilotstudier av egenspänningar med de utvecklade krympmodellerna genomfördes för ett antal typfall, däribland pågjutning. Intressanta iakttagelser kunde göras, t.ex. att tjockleken av pågjutningen har en kraftig inverkan på hur snabbt spänningarna uppkommer och hur stora de blir. Inverkan av luftens relativa fuktighet, med andra ord tidpunkten under året när pågjutning sker, var relativt liten för ett simulerat fall. Det var ett resultat som var något förvånande. Studier för andra fall visade på kraftigare beroende av luftfuktighet. Några av fallen är redovisade i Betonghandboken Material avsnitt egenspänningar.

Efteranalyser av hela den detaljstuderade bron del I av projektet skedde med FE-modell nyttjande förenklade modeller för krympning. Det var tämligen komplicerat att simulera förhållandena för fullskalegjutningen bl.a. eftersom mycket små deformationer erhöles beroende på en mycket fuktig sensommar och höst innan vintern inträdde. Låga nivåer på spänningar erhöles vilket kan vara helt korrekta; inga sprickor kunde skönjas i bron under mätningarna och sedermera tre år efteråt vid inspektion.

Nyttjade FE-modeller för egenspänningar med hydratiserande betong tenderade att bli komplicerade och förenklings skedde. Inom del I av projektet jämfördes en modell med laboratorieförsök där pågjutning skett på platta som belastades till brott lång tid efter pågjutningstillfället (så att krympning hade kunnat ske och egenspänningar utvecklats). Rimliga överensstämmelser med laboratorieresultaten erhöles.

I del II av studien skedde FE analyser av situationen med uppsprickande pågjutning på underbetong där krympning sker, dvs. en ansats på mer lokal nivå jämfört med brostudien i del I. Mer detaljerade variationer skedde nu; pågjutningens sammansättning och gjutning liksom preparering av ovansida underbetong inverkan på vidhäftning. Trovärdiga resultat har erhållits i delstudier som kommer att fullföljas när mer information fås om t.ex. vidhäftningen i de kompletterande delarna.

9.2.4 Vidhäftning

Olika försöksmetoder att dokumentera vidhäftningsegenskaper jämfördes och gav underlag till teoretisk modellering av skeendet vid belastning av normalkrafter och skjuvkrafter. Resultat från böjning av balkar med vertikalt snitt i mitt gav underlag till brottmekaniska modeller som därefter kalibrerades in genom FE-modell. Studier skedde hur t.ex. härdning av pågjutningen påverkade det brottmekaniska beteendet hos gränssnittet. Dessa utvidgas när mer utförliga försöksvärden erhålls.

10 SLUTSATSER

Studierna genomfördes i syfte att adressera ett antal övergripande utmaningar och frågeställningar. Lämpligen sorteras projektets slutsatser utifrån dessa indelade på materialteknik och utförande:

Materialtekniska utmaningar:

Den direktgjutna slitbetongen ska framförallt möta allmänt ställda krav på hållfasthet, speciellt slitstyrka, samt beständighet. Fler andra funktioner ingår 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 värdefulla funktioner påverkande materialval, t.ex. liten bulleralstring vid trafikering, ljushet för synbarhet och därigenom minskade energikostnader för belysning, samt lägre partikelalstring.

De förstnämnda, dvs. hållfasthet och beständighet, är i de flesta fall ingen större utmaning med känd kunskap om materialoptimering. Möjligen kan god slitstyrka innebära extra hänsynstagande vid framtagning av betongrecept. Erfarenheter från betongvägsteknik kan inhämtas beträffande ballastval vid hårt belastade broar. Övriga parametrar kan adresseras med känd kunskap om receptutformning.

Projektet visar tydligt att även krympningen har stor inverkan på den direktgjutna betongens funktion. Det är sålunda viktigt att ha denna parameter under kontroll, speciellt om torrt och blåsigtt väder förväntas råda de närmaste månaderna efter gjutning. Kravställning kan möjligen i framtiden vara nödvändig även för denna parameter.

Observationer från den detaljerade fullskalestudien visade att gjutning och härdning i fuktig gynnsam miljö ger låga nivåer på egenspanningar och sprickfri konstruktion utan kantresning. Samma slutsats drogs beträffande pågjutningar vid Bodens kraftverk där inga sprickor eller andra olägenheter uppträdde t.o.m. för oarmerade delar. En sen höstgjutning var troligen förklaringen till det fina resultatet.

Krympningens beroende av betongsammansättning är svår att prognosticera. Indikationer finns beträffande inverkan av vattencementtal, se Betonghandbok kap 18, men dessa är osäkra. Framtagning av betong med låg krympning kan ske genom förprovning i laboratorium; t.ex. kan inverkan av krympreducerare undersökas även för anläggningsbetong. Efterföljande beräkningar av egenspanningar inom projektet ger intressanta indikationer även om modeller idag är osäkra. Betongutformning baserat på krympförsök i laboratorium är en god investering vid provning av recept.

Även tidig plastisk krympning är en viktig parameter och bör hållas under kontroll. Flertalet av de inspekterade broarna uppvisar sprickbildning som troligen initierats redan under första dagen efter gjutning, t.o.m. under första timmarna. Betongrecept har en stor inverkan på den plastiska krympningen.

På samma sätt som krympningen är vidhäftningen mot underbetongen en minst lika 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.

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

Utförande

En omsorgsfullt planerad och genomförd gjutning av slitbetongen är ”a och o” för ett lyckat resultat. Inledningsvis i rapporten nämndes flera utförandeområden till vilka hänsyn ska tas. Utförandet ska säkerställa att god vidhäftning erhålls, god homogenitet fås i pågjutningen men framförallt att inte sprickor och andra olägenheter uppträder. Betongen bör vara självkompakterande. Ytbehandling av den färska betongen ska ske så att ojämnheter/vågigheter inte uppkommer som påverkar komfort och säkerhet. Förbehandling av underbetongen är avgörande för vidhäftningen.

Ovan innebär vissa svårigheter. Flera av faktorerna kan mötas med kända tekniker för ”gott handhavande”. Beträffande gjutning och härdning är utmaningarna likartade de som råder vid flera andra anläggningsapplikationer, t.ex. beläggning, busshållplatser och industriplaner. Allmän kunskap finns och lärs ut i t.ex. klass I kurser.

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. 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 är effektiv men kan i många fall inte genomföras. Applicering av täckning kan vara komplicerad uppe på en brobana.

Den nämnda tidiga plastiska sprickbildningen är ett fenomen som starkt är beroende av utförandet, speciellt vid de härdningsförhållanden som oftast förekommer på brobanan.

Tillkommande för slitbetongen jämfört med gjutning av andra stora betongytor är hur vidhäftningen säkerställs. De studier som hittills genomförts i projektet, dock endast baserade på laboratorieförsök, visar på vissa tendenser; t.ex. att water-jetting av underbetong ger höga vidhäftningshållfastheter jämfört med andra ytbehandlingsmetoder. Försiktig retardering av pågjutningsbetongen kan möjligen också ge bättre vidhäftning. Vattenbegjutning av pågjutningen är gynnsamt jämfört med plastfolie.

För fullskalesituationer kan förhållandena vara vitt skilda de som råder i laboratoriet. Erfarenheter kan därför inhämtas från liknande undersökningar i full eller ”halv” skala. Från det inledningsvis nämnda SBUF-projektet 12001 (Carlswärd, 2017), inriktat mot tunnare

pågjutningar för stommar och industriapplikationer, kan citeras (vilket ger 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. Det har tyvärr inte varit möjligt att testa erfarenheterna från SBUF-projektet i denna studie.

En tillkommande faktor beträffande utförande är att härdning av pågjutningen är en nyckel för att förhindra tidiga krymprärelser som inverkar negativt på vidhäftningsskiktet och t.o.m. kan orsaka delaminering.

11 REKOMMENDATIONER

11.1 Allmänt

Med tanke på projektets inriktning på grundläggande studier för att erhålla en bakgrund till beräkningsmodeller, lämpliga förprovningsmetoder, materialval etc. kan rekommendationer nedan betraktas mer som indikativa för tillämpning i full skala. Erfarenheter från tidigare studier, bl.a. finansierade av SBUF, har bidragit med basmaterial för rekommendationerna. Indelning sker på samma sätt som tidigare i materialteknik och utförande.

11.2 Betongval

De krav som råder för den direktgjutna slitbetongen är tydliga med hänsyn till exponeringsklass, dvs. samma som för tösaltad brobana; XD3, XF4 och frysprovad. Minimumkravet på betong är $\max v_{ct} = 0,40$.

Betongen är således avsedd för utomhuskonstruktioner som kommer utsättas för upprepad frysning i närvaro av fukt och salt enligt kraven i anläggnings AMA. Lufthaltsprovning på arbetsplats krävs. Frostresistens ska provas i konstruktion.

Kraven låser i viss mån betongvalet liksom bindemedelskombination (andel cementklinker enligt SS 137003 i XF4 är större än 65 %). Förändringar av SS 137003 sker kontinuerligt för att bli en medge en ansats mot klimatreducerade lösningar.

Det noteras att ballast för slitbetong ska uppfylla krav på nötningsmotstånd och begränsat buller. Kulkvarnsvärdet alternativt slipvärde och sprödhetstal har tidigare relateras till förväntad maximal trafik under de närmaste 10 åren. Dessutom har rekommendationer funnits om 50 % passerande mängd på 8 mm sikt. Med hänsyn till bullernivå har maximal stenstorlek begränsats till 16 mm. I framtiden kan dessa krav ses över.

Generellt bör en betong med så låg krympning som möjligt väljas. Även om det inte har provats inom aktuell undersökning finns erfarenheter från verkliga pågjutningar i andra sammanhang. Dessa har visat att tillsats av krympreducerande medel effektivt reducerar krympningen, vilket skapar bättre förutsättningar för ett lyckat slutresultat.

Att gå upp ytterligare i hållfasthet, dvs. att sänka $v_{ct} < 0,40$, kan vara gynnsamt med hänsyn till öka nötningsmotstånd (minskad spårbildning) samt vidhäftning enligt observationer i projektet. Troligen innebär detta dock att krympningen kan öka. Det är den autogena krympningen som ökar och den uppträder tidigt, speciellt vid varm väderlek.

Det kan rekommenderas att krympegenskaperna dokumenteras i förväg. Även en begränsad laboratorieundersökning och justering av betongrecept kan vara en god investering med tanke på kvalitet hos slitbetongen.

Den färska betongens egenskaper (konsistens och öppethållandetid) bör hållas under kontroll, speciellt vid användning av självkompakterande betong. Alltför stora variationer framkallar svårigheter vid utförandet. Lufthalt bör kontrolleras.

11.3 Armering och tjocklek

Armering med nät eller stålfibrer minskar risken för att stora, besvärande sprickor skall uppstå. Resultat från andra undersökningar visar att armeringen är särskilt betydelsefull om man inte lyckas uppnå fullgod vidhäftning.

Ju tjockare pågjutning, desto viktigare är armering eftersom avståndet från överyta till underbetongen ökar. Underbetongen kan verka som mothåll mot krympdeformationer och reducera bredden på eventuellt uppkommande sprickor – om vidhäftningen är god.

I de flesta fall är pågjutningsbetongens tjocklek ca 100 mm eller något därutöver. Enligt rekommendationer bör tjockleken vara minst 70 mm – ett mått valt så att 3 ggr ballaststorleken uppnås och att slitbetongen kan slipas vid framtida eventuell spårbildning och ändå fungera väl.

Traditionellt har direktgjuten slitbetong utformats med stålfiber 30 mm försedda med ändkrokar av en mängd ca 55 kg/m³. I framtiden bör rekommenderad armeringsmängd ses över eftersom erforderlig fibermängd starkt beror på fibertyp och betongmatris.

Istället bör krav ställas på seghetsegenskaper vid böjprovning av balkar genom t.ex. betraktelser av residualhållfastheter, se kap 4 i Sundquist (2011) (delförfattare Silfwerbrand, Carlswärd och Emborg) och andra rapporter rörande stålfiberarmerad betong. I kapitel 4 ges även rekommendationer i det fall nätarmering väljs.

Att rekommendera lägre fibermängder är gynnsamt med hänsyn till gjutegenskaper, speciellt om självkompakterande betong är fallet. Mängden kan enligt ovan vara mycket låg vid perfekt vidhäftning och inte alltför tjock pågjutning, se tidigare nämnda fullskaletest, Figur 5.1. Vid mycket goda vidhäftningsförhållanden kan armeringen slopas helt.

Diskussion om alternativa fibrer av andra material än stål ges även i Sundquist (2011). Många av dessa har dock för låg hållfasthet för att kunna ge erforderlig sprickfördelning av långtidskrympning. Beträffande tidiga plastiska sprickor har gynnsam effekt observerats t.ex. med polymerfibrer.

Det kan även vara värt att nämna att stålfibrer enligt vissa undersökningar verkar ha en positiv inverkan på vidhäftningen. Stålfibrerna synes reducera ev. uppkommen mikrosprickbildning i det kritiska gränssnittet mellan de båda betonglagren och vidhäftningen ökar.

11.4 Förbehandling

Förbehandlingen av underbetong är avgörande för att åstadkomma en högkvalitativ ihopgjutning av de två skikten. Baserat på observationer från projektet och erfarenheter från andra undersökningar rekommenderas följande:

- Noggrann rengöring av underlaget för att få bort lösa partiklar och andra föroreningar. Speciellt vid vattenbildning av underbetong (vid broreparation) bör den vattenbilade ytan högtrycksspolas så att all gammal betong avlägsnas.
- Rengöringen ska inte förbises; det finns ett antal misslyckade pågjutningar orsakade av otillräcklig rengöring, i några fall har t.o.m. grus- och stenrester samt gummipartiklar från betongbilars däck funnits kvar på underbetongen vid påförning av slitskiktet.

- Förvattning av underlaget avslutas lämpligen på kvällen dagen före pågjutning så att ytan inte är för fuktig vid pågjutningstillfället. Vid låg luftfuktighet och solbestrålning kan ytan behövas fuktas upp.
- Om primer ska användas är det viktigt att välja ett fabrikat som har vidhäftningshöjande effekt. Primern skall påföras dagen före pågjutning så att den hinner filmbilda.
- Förbehandlingsåtgärder med vattning och priming i ett tidigt skede måste absolut undvikas om man skall få ett bra slutresultat. Resultatet har tydligt visat att påföring av primer eller vatten strax före pågjutning helt kan förstöra förutsättningarna att få god vidhäftning.

11.5 Utförande

Allmänt gäller vid avjämning av pågjutningsbetongen att tillse att ojämnheter/vågigheter inte uppkommer. Detta ses som något som inte accepteras av trafikanterna bl.a. med hänsyn till komfort. Vågigheterna uppstår bl.a. när avjämningsbalk eller vibrobrygga (vid traditionell betong) körs i omgångar eller när den stannas upp för lång tid.

Dessutom bör beaktas att ju mer betongen bearbetas, t.ex. för att åtgärda ojämnheter, desto mer cementpasta arbetas upp till ytan. Då minskar nötningsmotståndet radikalt.

Vid gjutningen säkerställs en homogen betong genom en väl anpassad gjuttakt så att utläggning, vibrering (om sådan utförs), och avjämning hinns med. Provtagning av nämnda parametrar sker på betong innan gjutansvarig godkänner leverans från enskilt lass.

Rekommendationer nedan gäller i huvudsak för vibrerad betong och är hämtade från nämnda kap 4 i Sundquist (2011): Erfarenheter finns även i Berglund och Nilsson (2007).

Vid vibrering sker denna i så fall med vibrobalk/brygga och om nödvändigt vibrostav. Viktigt är att hitta rätt metodik hur bryggan ska dras över betongen. Den ska dras över all utlagd betong även om gjutfronten inte är rak. Det är även väsentligt att man har lagom mycket betongmassa framför bryggan d.v.s. det ska finnas ett betongöverskott på någon/några cm. Bryggan dras förbi fronten utan att den slås av.

Efter avdragning av ett lass lyfts bryggan upp och backas bakåt förbi gjutfronten och 1+2 m ytterligare. Därefter kan bryggan slås på för avdragning av nästa lass. Start och stopp kan ge lokala vågor i betongen genom att bryggan står still på en för lös betong när den startas/stoppas. Observera att man vid direktgjutning på färsk betong inte ska vibrera ihop de två olika betongtyperna dvs. slitbetongen ska inte blandas ihop med konstruktionsbetongen av lägre kvalitet och utan fibrer.

Slodning utförs tvärs färdriktning.

Det är som tidigare nämnts mycket viktigt att förprovning utförs av slitbetongen för att förutom de sedvanliga betongparametrarna även säkerställa konsistens och öppethållandetid.

Gränsvärden för acceptans av betonglass fastställs. Fiberinblandning ger förändringar av betongens konsistens vilket dokumenteras. Eftersom betongen är frysprovad dokumenteras lufthalt på levererad betong.

En arbetsbeskrivning upprättas beträffande överenskommen gjuthastighet, utläggningssätt, härdningsförfarande etc. Här kan en provgjutning utföras där man simulerar de verkliga förhållandena.

Erfarenheter beträffande nyanserade metoder att åstadkomma en direktgjuten slitbetong av hög klass med moderna betongkvaliteter bör kartläggas och dokumenteras i framtida studier.

11.6 Härdning

Härdningen har, som nämnts tidigare, mycket stor betydelse för både sprickbildning och vidhäftning.

Härdningsåtgärder måste vidtas inom några timmar efter gjutningens färdigställande. Ett omsorgsfullt utförande innebär ofta att härdning påbörjas i första delen av gjutna bron redan under pågående gjutning av senare delar.

Om härdningsåtgärder vidtas för sent är de sannolikt helt verkningslösa. Detta har visats i flera tidiga undersökningar där t.ex. plastfolie lades ut dagen efter pågjutning. Det föreligger då stor risk för sprickbildning. Sannolikt har även vidhäftningen blivit betydligt sämre. (Flera observerade broar visar på sprickbildning orsakad av troligen för sent insatta härdningsåtgärder, se t.ex. Figur 5.3).

Stark solbestrålning och kraftig vind kan hanteras genom att tillfällig membranhärdningsvätska sprutas på betongen för att stoppa den tidiga avdunstningen. Vid behov kan denna slipas bort innan trafikering.

För övrigt kan man konstatera att härdningen för något tunnare pågjutningar verkar vara extra betydelsefull i de fall pågjutningen utförs på ett för torrt underlag. Troligen är detta kopplat till vattenförlusten som sker både neråt och uppåt om underlaget är sugande.

12 LITTERATURFÖRTECKNING

- Austin, S., Robins, P., and Pan, Y. (1995). Tensile bond testing of concrete repairs. *Materials and Structures*, Vol. 28, 1995, pp. 249-259.
- Barr B, Vitek j and Beygi M (1997). Seasonal shrinkage variation of bridge segments, *Materials and Structures* 30 (2), 106 – 111.
- Berglund M, Nilsson B-L (2007). Direktgjuten slitbetong -den enkla och kostnadseffektiva metoden, Fullskaleförsök med att återskapa all kvalité från 80-talet, Trafikverket intern rapport, 18 sid.
- Beusheusen, H. and Alexander, M.G. (2004). Bonded concrete overlays subjected to differential shrinkage – an analytical model based on localised strain and stress. In: *Proceedings of the International RILEM Workshop Bonded Concrete Overlays*, June, 2004, Stockholm, Sweden.
- Beusheusen, H. and Alexander, M.G. (2006). Crack development in bonded concrete overlays subjected to differential shrinkage: A parameter study. In: *Proceedings of the Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting*, Eds. Alexander, M.G., Beushausen, H.-D., Dehn, F., and Moyo, P., Nov. 21-23, 2005, Cape Town, South Africa, Taylor & Francis Group, London, pp. 1053-1058.
- Beushausen H, Alexander M (2006) Failure mechanisms and tensile relaxation of bonded concrete overlays subjected to differential shrinkage. *Cement and concrete research* 36(10):1908–1914
- 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.
- Bissonnette, B., Pierre, P., and Pigeon, M. (1999). Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, p.p. 1655-1662.
- Bolander, J.E. and Berton, S. (2004). Simulation of shrinkage induced cracking in cement composite overlays. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 26, No. 7, pp. 861-871.
- 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.
- Clausen J S ,Nikolaos Z & Knudsen A (2011). Onsite measurements of concrete structures using impact-echo and impulse response. *Emerging Technologies in Non-Destructive Testing*, 5:117–122, 2011.
- Concrete Report No 13 (2008). Industrigolv – Rekommendationer för projektering, materialval, produktion, drift och underhåll. Svenska Betongföreningen. rapport nr 13, 296 p.p.
- Concrete Report No 3 (1994). *Cracks in concrete structures – particularly temperature cracks*. Svenska Betongföreningen, Betongrapport nr 3. (In Swedish), 1994.
- Concrete Report No 4 (1995). Stålfiberbetong – Rekommendationer för konstruktion, utförande och provning. Svenska Betongföreningen, Betongrapport nr 4, 1995, 132 sid.
- 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 (2022). Enhanced calibration procedure of shrinkage and creep prediction models B3 and B4. (avses att publiceras)
- 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.
- Cyron W, Emborg M, Ohlsson U & Nilsson M (2022b). Influence of surface roughness on fracture properties of interface, crack propagation and delamination of bonded concrete overlay (avses att publiceras).
- Cyron W, Emborg M, Ohlsson U & Nilsson M (2022c) Design of shrinkage and temperature reinforcement in bonded concrete overlays and crack control. (avses att publiceras)
- Dolk E (2017). Betongvägarna har en framtid. Betong nr 4: 43-44, sept 2017.

- Emborg (2021). Krympning, kap 18 i Betonghandboken material, Svensk Byggtjänst.
- 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 brobanepatta – State-of-the-art och förslag till FUD program, Sundquist, (redaktör), sid 37 – 72. (se Sundquist, 2011)
- Eurocode 2 (2005). Design of concrete structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Building. Brussels, SS-EN 1992-1-1.
- Fagerlund, G. (1987). Betongkonstruktioners beständighet – en översikt (Durability of Concrete Structures). Uppsala, Sweden: Cementa AB, ISBN 91-87334-00-3
- Gilbert, I. (1992). Shrinkage Cracking in Fully Restrained Concrete Members. *ACI Structural Journal*, V. 89, No. 2, 1992, p.p. 141-149.
- 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.
- Groth, P. (2000). *Fibre Reinforced Concrete – Fracture mechanics methods applied on self-compacting concrete and energetically modified binders*. Luleå University of Technology, Doctoral Thesis 2000:04, 2000.
- Grzybowski, M. (1989). *Determination of Crack Arresting Properties of Fiber Reinforced Cementitious Composites*. Stockholm, Sweden: TRITA-BRO-8909, Department of Structural Engineering, Royal Institute of Technology.
- Grzybowski, M. and Shah, S.P. (1990). Shrinkage Cracking of Fiber Reinforced Concrete. *ACI Materials Journal*, Vol. 87, No. 2, pp. 138-148.
- Gunnarsson J, Lindell E (2015). *Konstruktioner i fiberbetong – provning och dimensionering enligt ny standard*. Luleå Tekniska Universitet, Konstruktionsteknik, Examensarbete, 162 sidor (*Examensarbetet har av Betongföreningen blivit utsett till 2015 års bästa betongjobb*).
- Hedlund, H. (2000). *Hardening concrete – modelling of non-elastic deformations and related stress development*. Luleå University of Technology, Doctoral Thesis 2000:25, 2000.
- Jannok C (2004). Direktgjuten slitbetong på broar: stålbjärmerad och självkompakterad. Avdelningen för konstruktionsteknik, Luleå Tekniska Universitet, LTU-Ex-04/219, 146 sid
- Jonasson, J-E. (1977). *Computer programs for non-linear analyses of concrete in view of shrinkage, creep and temperature*. Stockholm, Sweden: Swedish Cement and Concrete Institute, CBI Research Report 7:77 (In Swedish)
- Jonasson, J-E, (1994). *Modelling of temperature, moisture and stresses in young concrete*. Luleå University of Technology. Doctoral thesis 1994:153 D, 225 pp

- Jonasson J-E. (2017). Modellerings av krympning baserat på fukthaltsminskning, Luleå Tekniska Universitet, personlig korrespondens.
- Jonasson, J.-E., Carlsson, C.-A. & Mjörnell, K. (2005), Modell för beräkning av fuktighet i moderna betonger vid variabel temperatur, *Bygg & Teknik*, Nr 7, 2005. sid. 36-41
- Jonasson, J.-E., Carlsson, C.-A. & Mjörnell, K. (2006), Beräkning av uttorkning för betong med Byggcement, *Bygg & Teknik*, Nr 7, 2006. sid. 56-59.
- Jonasson, J.-E., Mjörnell, K. & Carlsson, C.A. (2008), Modelling of simultaneous temperature and moisture transportation in modern concrete, i proceedings från *International RILEM Symposium on Concrete Modelling – CONMOD '08*, 26-28 maj 2008, Delft, 2008. sid. 665-672.
- Kovler, K. (1994). Testing system for determining the mechanical behaviour of early age concrete under restrained and free uniaxial shrinkage. *Materials and Structures*, Vol. 27, 1994, p.p. 324-330.
- 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
- Lorentz, T. & French, C. (1995). Corrosion of reinforcing steel in concrete. Effects of materials, mix composition and cracking. *ACI Material Journal*, 92(2), 181
- Löfsjögård M (2003): Functional Properties of Concrete Roads - Development of an Optimisation Model and Studies on Road Lighting Design and Joint Performance, Byggetenskap, KTH, Doktorsavhandling.
- Malmberg, B. and Skarendahl, Å. (1978). *Method of studying the cracking of fibre concrete under restrained shrinkage*. Stockholm, Sweden: Cement and Concrete Institute, CBI Report 2:78.
- Nejadi, S. and Gilbert, I. (2004). Shrinkage Cracking and Crack Control in Restrained Reinforced Concrete Members. *ACI Structural Journal*, V. 101, No. 6, 2004, pp. 840-845.
- Nilsson, M. (2003). *Restraint factors and partial coefficients for crack risk analyses och early age concrete structures*. Luleå University of Technology. Doctoral thesis 2003:19, 170 p.p.
- Nilsson L-O, Johansson B. (2017). Crack---Free---Con. Data från krympexperiment. Lunds Tekniska Högskola, avd. Byggmaterial, Rapport TVBM---3171, 94 sid.
- 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.
- Persson M, Emborg M, Silfwerbrand J, Ohlsson U (2019a). Interface stress analysis on a concrete composite bridge deck subjected to differential shrinkage - Field measurements and numerical analysis. 12 sidor, (avses att publiceras).

- Persson M, Emborg M, Silfwerbrand J, Ohlsson U (2019b). Interface stress analysis on a composite concrete slab subjected to differential shrinkage and external loading - A comparison between full scale laboratory tests and numerical analysis. 10 sidor, (avses att publiceras)
- Sandberg, P. and Tang, L. (1994). A field study of the penetration of chlorides and other Ions into a high quality concrete marine bridge column. *CAMET/ACI Conference on durability of concrete, Nice, France, May 22- 28, 1994*
- Shah, S. P., Ouyang, C., Marikunte, S., Yang, W., and Becq-Giraudon, E. (1998). A Method to Predict Shrinkage Cracking of Concrete. *ACI Materials Journal*, Vol. 95, No. 4, 1998, p.p. 339-346.
- Silfwerbrand, J. (1994). *Pågjutningar 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., 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, Carlswärd J (2011), Systemet brobaneplatta utan tätskikt, kap 4 i Robustare brobaneplatta – State-of-the-art och förslag till FUD program, sid 73 – 90. (se Sundquist, 2011)
- Sundquist H (2011) (redaktör), Robustare brobaneplatta – State-of-the-art och förslag till FUD program, Sveriges Bygguniversitet, (medförfattare Mario Plos, Kent Gylltoft, Johan Silfwerbrand, Jonas Carlswärd, Mats Emborg, Ylva Edwards), Stockholm, 125 sidor
- Tammo, K. (2009). *A new approach to crack control for reinforced concrete*. Lund, Sweden: Lund Inst. of Technology, Lund University. Doctoral Thesis, Report TVBK – 1037
- Tuutti, K. (1982). *Corrosion of steel in concrete*. Stockholm, Sweden: Swedish Cement and Concrete Institute, PhD thesis, Report Fo 4.82, 468 p.p.
- Weiss, J. and Shah, S. P. (2002). Restrained shrinkage cracking: the role of shrinkage reducing admixtures and specimen geometry. *Materials and structures*, Vol 35

Weiss, W. J. Yang, W., and Shah, S. P. (1998). Shrinkage Cracking of Restrained Concrete Slabs. *Journal of Engineering Mechanics*, V. 124, No. 7, 1998, p.p. 765-774.

Wiegrink, K., Marikunte S., and Shah, S. P. (1996). Shrinkage Cracking of High-Strength Concrete. *ACI Materials Journal*, V. 93, No. 5, 1996, p.p. 409-415.

Yusuf Hassan A (2012). Slitbanebetong för broar: Inventering och inverkan av krympning. *Master thesis*, Luleå University of Technology, Dept. of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, Luleå, Sweden, 2012, (In Swedish.)