

SBUF Projekt nr 12001

Pågjutningar av stålfiberarmerad självkompakterande betong – sprickbegränsning och vidhäftning

Delrapport 2 – Pågjutning på HD/F



Förord

Arbetet som presenteras i rapporten utgör den andra delen i SBUF projekt nr 12001, som syftar till att skapa rekommendationer för dimensionering och utförande av tunna betongpågjutningar. I den första delrapporten beskrevs laboratorieförsök där en rad olika parametrars betydelse för vidhäftningen mellan nygjuten betong och äldre betongunderlag har undersökts.

I denna andra del sammanfattas två olika studier där mer verklighetstroga pågjutningsförsök har genomförts på HD/F-element. Syftet har varit att studera hur olika utföranden påverkar sprickbildning och vidhäftningsförhållanden under verkliga förhållanden.

Ansvarig för projektet är Björn Syvertsen, Betongteknik i Nacka AB medan Mats Emborg, Betongindustri AB är projektledare. Övriga deltagare är Peder Andersson, Mariekälla Bygg & Transport AB, Örjan Pettersson, Strängbetong AB samt Jonas Carlswärd, Betongindustri AB.

Göteborg den 2 mars 2011

Jonas Carlswärd
Betongindustri AB

Innehållsförteckning

1	Inledning	4
1.1	Bakgrund	4
1.2	Syfte	4
1.3	Genomförande.....	4
2	Försöksserie 1 (Göteborg).....	6
2.1	Försöksbeskrivning	6
2.1.1	Förbehandling	6
2.1.2	Pågjutning	8
2.1.3	Härdning	9
2.1.4	Materialegenskaper pågjutningsbetong, fri krympning.....	10
2.1.5	Fuktförhållanden i underlaget.....	13
2.1.6	Uttorkningsförhållanden	14
2.2	Resultat.....	15
2.2.1	Allmänt.....	15
2.2.2	Deformationer i pågjutning	16
2.2.3	Sprickbildning.....	17
2.2.4	Vidhäftning.....	21
2.3	Teoretisk utvärdering av tidpunkt för uppsprickning och sprickvidd	26
2.3.1	Bakgrund.....	26
2.3.2	Beräkning av spricktidpunkt	26
2.3.3	Beräkning av sprickvidd	28
3	Försöksserie 2 (Nykvarn)	30
3.1	Allmänt.....	30
3.2	Försöksbeskrivning	30
3.2.1	Förbehandling	30
3.2.2	Pågjutning	33
3.2.3	Härdning	35
3.2.4	Fri krympning	36
3.3	Resultat.....	37
3.3.1	Sprickor.....	37
3.3.2	Vidhäftning.....	45
4	Slutsatser	48
4.1	Allmänt.....	48
4.2	Vidhäftning.....	48
4.3	Sprickbildning	49
5	Rekommendationer	50
5.1	Förbehandling.....	50
5.2	Val av betong.....	50
5.3	Armering	50
5.4	Härdning	50

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Tunna betongpågjutningar (30-70 mm) är ett erkänt problemområde. Svårigheten ligger framför allt i att undvika sprickbildning, vidhäftningssläpp och kantresningar. Samtliga dessa effekter orsakas av att betongens fria krymproreelse helt eller till viss del hindras av motgjutens konstruktion. Krympförloppet blir hastigare vid minskande skiktjocklek samtidigt som det geometriska tvånget ökar, vilket är orsaker till att ovan beskrivna problem ofta anses öka med minskande skiktjocklek.

Inom husbyggnadssektorn är pågjutningstekniken vanlig framför allt vid byggande med håldäckselement (HD/F) och TT-kassetter, där ett tunt skikt ofta läggs för att jämna av överytan. Tunna pågjutningar förekommer även vid reparationer och renoveringar av exempelvis gamla betonggolv.

Det finns idag ett stort antal uppfattningar om hur pågjutningar skall utföras för att undvika krymprelaterade problem enligt ovan. Helt säkert är vissa av dessa uppfattningar riktiga medan andra kan vara mer tveksamma. Ett problem är att det finns ett stort antal faktorer som påverkar slutresultatet, t ex typ av underlag, förbehandling, typ av pågjutningsbetong, härdning, uttorkningsklimat etc. Detta innebär i praktiken att en viss teknik kan visa sig fungera bra under vissa förutsättningar men vara helt fel i andra sammanhang.

Den kanske viktigaste faktorn för att säkerställa ett bra slutresultat är att skapa goda förutsättningar för att uppnå hög och jämn vidhäftning. Hög vidhäftning kommer i och för sig inte hindra sprickor från att uppstå. Däremot fungerar vidhäftningen sprickfördelande och begränsar därmed sprickbredder till en acceptabel nivå. Även kantresningseffekter begränsas effektivt om goda vidhäftningsförhållanden uppnås.

I tidigare undersökningar inom aktuellt projekt har ett relativt stort antal försök gjorts syftande till att hitta optimala metoder att förbehandla ett betongunderlag före pågjutning för att uppnå hög och jämn vidhäftning. Försöken har bestått av pågjutning på småskaliga plattor som har utförts under i stort sett ideala förhållanden i laboratoriemiljö. Det är uppenbart att förutsättningarna för att lyckas uppnå god vidhäftning under sådana förutsättningar är högre än i verkliga situationer.

1.2 Syfte

En viktig ambition inom projektet har därför varit att göra lite mer verklighetstroga pågjutningar. Den kanske vanligaste applikationen för pågjutningar inom husbyggnadssektorn är avjämningar på prefabricerade betongelement, typ TT-kassetter eller HD/F (håldäck). I aktuell undersökning utfördes pågjutningsförsök på den senare typen av element, dvs HD/F.

Det är tyvärr inte möjligt att få med samtliga inverkande parametrar i en begränsad försöksstudie. Fokus i aktuell undersökning har därför lagts på att studera betydelse av förbehandling, vidhäftning och härdningslängd på spricktillväxt och vidhäftning i tunna pågjutningar. Även betydelsen av stålfiberarmering studerades i begränsad omfattning.

1.3 Genomförande

Två studier har utförts vid olika tillfällen. Den första serien genomfördes i ett stort tält i Göteborg där betongpumpar normalt står uppställda medan den andra serien utfördes i

Strängbetongs fabrik i Nykvarn. Studien i Göteborg utfördes mellan juni och augusti 2009 medan Nykvarnsförsöken genomfördes mellan juni och september ett år senare.

Försöken utgjordes av tunna pågjutningar på HD/F-plattor. Parametrar som varierades var förbehandlingsmetod, armering och härdning. Uppföljningarna bestod av krympmätning, sprickartering och bestämning av vidhäftning.

2 Försöksserie 1 (Göteborg)

2.1 Försöksbeskrivning

I provserien ingick fyra HD/F 120/27-element med längd på ca 6-7 m och bredd 1,2 m, benämnda platta A-D i Figur 1. Elementen kom från Strängbetongs upplag i Veddige, där de hade förvarats utomhus under olika lång tid. Två av elementen hade en borstad överyta (A och B) medan de övriga två hade en helt slät yta (C och D). Det kan vara värt att nämna att skillnaden mellan borstad och slät yta visuellt inte var särskilt stor. Borstningen utgjordes av ett antal räfflor som löpte i elementens längdriktning.

Elementen placerades i ett stort tält för uppställning av betongpumpar hos Betongindustri AB i Kållered, se Figur 1. Efter ankomsten i början av juni 2009 blev de liggande ca 2-3 veckor innan försöken initierades.



Figur 1 – (a) Försöken utfördes i ett stort tält där betongpumpar vanligtvis står uppställda. (b) Fyra håldäckselement upplagda på golvet i tältet.

2.1.1 Förbehandling

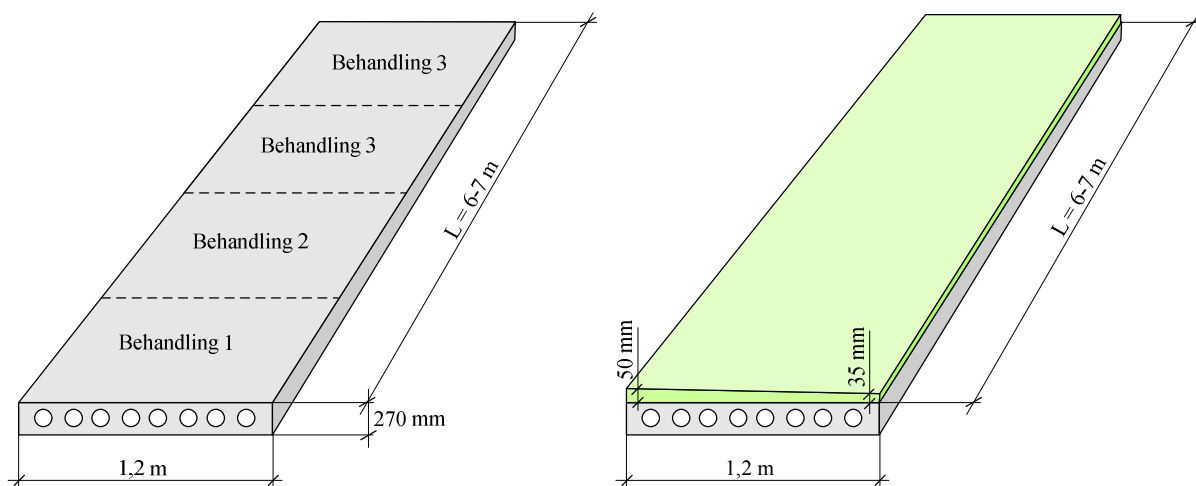
Varje element delades in i fyra delområden enligt Figur 2 och Figur 3, för att kunna studera olika kombinationer av förbehandling/härdning. De förbehandlingar som ingick var dels ingen alls (torrt underlag), förvattnat underlag, slammat underlag samt priming med två olika typer av primer. Även inverkan av städning studerades genom att två delytor (B4 och C1) lämnades utan städning medan övriga dammsögs noggrant dagen före pågjutning.

Förvattning innebar att vatten hölls på betongytan dagen före pågjutning och även samma dag som gjutning, ca 4 timmar före, varefter ytan fick torka. Vid pågjutning var ytan mörk men utan fritt vatten. Slamning utfördes genom att lite av pågjutningsbetongen tillsammans med en skvätt vatten hölls direkt på betongytan och borstades in med hjälp av en piasavakvast. Pågjutning på aktuella delytor utfördes i direkt anslutning till slamningen.

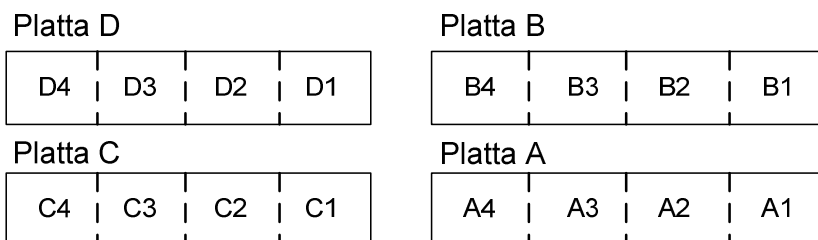
De två primertyper som användes var UZIN PE 360 samt Codex PE 370 som i Sverige säljs av Englundgruppen (www.englund-gruppen.se). Råvara för båda preparaten är något som benämns akrylsyraester-styrol-copolymer. Den första typen (primer 1) är avsedd att användas på sugande underlag före spackling eller limning medan den andra (primer 2) är avsedd för icke-sugande underlag typ metaller, keramik, plastmattor etc. Primer applicerades

enligt bruksanvisning med mjuk borste några timmar före pågjutning (ca 4 timmar) så att primern skulle hinna bilda en film (yttorr).

Foton på de olika delytorna just före pågjutning redovisas i Figur 4.



Figur 2 – Pågjutning med tjocklek ca 35-50 mm görs i halvskala på ca 6-7 m långa håldäckselement (HD/F 120/27).



Plattdel	Struktur	Yta	Förbehandl	Pågjutning	Härdning
A1	Rå	Rengjord	Slamma	C45/55 8 SKB	Ingen
A2	—//—	—//—	Primer 1	—//—	—//—
A3	—//—	—//—	Torr	—//—	—//—
A4	—//—	—//—	Primer 2	—//—	—//—
B1	Rå	Rengjord	Förvattnad	C45/55 8 SKB	Ingen
B2	—//—	—//—	Slamma	—//—	Plastfolie 1d
B3	—//—	—//—	Torr	—//—	—//—
B4	—//—	Ej rengjord	—//—	—//—	—//—
C1	Slät	Ej rengjord	Slamma	C45/55 8 SKB	Plastfolie 1d
C2	—//—	Rengjord	Primer 1	—//—	—//—
C3	—//—	—//—	Primer 2	—//—	—//—
C4	—//—	—//—	Torr	—//—	Plastfolie 7d
D1	Slät	Rengjord	Primer 1	C45/55 8 SKB Stålf	Ingen
D2	—//—	—//—	Torr	—//—	—//—
D3	—//—	—//—	Slamma	—//—	—//—
D4	—//—	—//—	Förvattnad	—//—	—//—

Figur 3 – Varje håldäckselement delades in i fyra delytor enligt övre illustration. Ytstruktur, förbehandling, typ av pågjutningsbetong (med/utan stålfibrer) samt längd på eventuell härdning med plastfolie för respektive delyta framgår av tabellen.



Figur 4 – Foton som visar hur ytan på några av de olika delytorna såg ut precis före pågjutning.

2.1.2 Pågjutning

Erfarenhet visar att känsligheten för sprickor, kantresning och vidhäftningsbrott i princip ökar med minskade pågjutningstjocklek. Detta beror dels på att krympningsförloppet blir snabbare men även på grund av att tvånget blir högre. I aktuellt försök valdes att begränsa tjockleken till ca 50 mm med hjälp av en sarg (bräda) som monterades längs elementens kanter. Eftersom golvet i den aktuella lokalen lutade relativt kraftigt i elementbreddens riktning varierade dock tjockleken från ca 35 mm på ena sidan till 50 mm på andra sidan, se Figur 2.

Betong som användes för pågjutningen var av typen C45/55 (TorkBI 2) med D_{\max} 8 mm och konsistens SKB. Den relativt högvärdiga betongkvaliteten valdes eftersom man ofta upplever att sprickproblematiken ökar med ökande betongkvalitet (sjunkande vct). Valet gjordes således med hänsyn till att det skulle bli så svårt som möjligt att undvika sprickor och andra problem.

Sammansättning på betongen, som tillverkades i Betongindustri AB:s fabrik i Mölndal, ges i **Fel! Hittar inte referensskälla..** Den beställda volymen (2 m³) levererades med roterbil till tältet där elementen var upplagda. Utläggningen gjordes med betongbilens ränna, se Figur 5.

Tabell 1 – Betongsammansättning för aktuell pågjutning.

Betongsammansättning, kg/m ³						
Cement Skövde Bygg	Grus 0/8 Kilanda	Sten 4/8 Kilanda	Sikament 56/50	Sika Stab 4R	Vatten	vct
515	1221	407	1,9 %	0,2 %	196	0,38

Pågjutningarna utfördes av två erfarna golvläggare från Betongbyggen AB. Gjutningen inleddes genom att delytorna A1 och B2 slammades varefter hela platta A och B göts på och slodades. Därefter slammades delytorna C1 och D3 direkt följt av pågjutning på platta C.



Figur 5 – Utläggning av pågjutning på aktuella HD/F-element visas till vänster. Till höger visas färdigt gjutresultat för element A och B.

Stålfibrer av typen Dramix RC-65/35-BN blandades sedan in direkt i betongbilens roteraggregat följt av ca 5 minuters blandning på högt varvtal. Mängden fibrer var 30 kg, vilket bedömdes ge en viktandel på ca 30 kg/m³ betong. Stålfiberbetongen lades ut och avjämnades på platta D. I sin helhet utfördes gjutningen på ca 45 minuter.

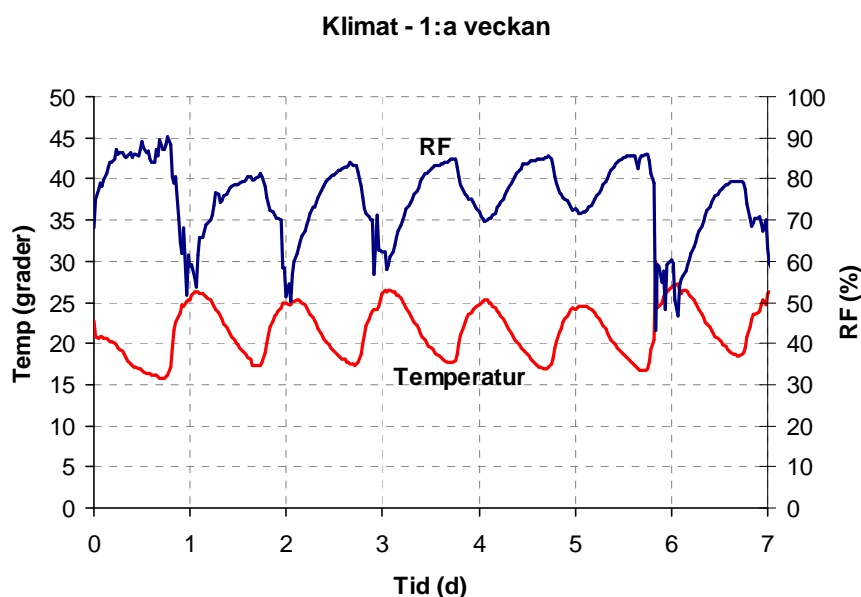
Två urvaskningsprov som gjordes på uttagna prov, provmängd ca 10 l, visade att faktisk fibermängd var något lägre, ca 25 kg/m³.

2.1.3 Härdning

Ca 2 timmar efter avslutad gjutning lades plastfolie på samtliga delytor på platta C (C1-C4) och på tre av delytorna på platta B (B2-B4). Plastfolien avlägsnades efter 1 dygn med undantag för delyta C4, där plastfolien fick ligga kvar under 1 vecka. Övriga två plattor (A och D) lämnades helt utan härdningsåtgärd.

Avsikten var givetvis att utreda eventuell påverkan av härdning på potentiell sprickutbredning. Noggrann härdning anses av många experter vara en av de viktigaste faktorerna bakom en lyckad pågjutning. Tyvärr gav aktuell undersökning inte någon riktigt bra värdeområde avseende denna parameter eftersom miljön i den aktuella lokalen var relativt snäll, se Figur 6.

En bidragande orsak till det snälla klimatet var att tältet var helt tätt. Detta innebar att den relativa fuktigheten ökade då luften kylde ner nattetid. Dessutom tillfördes en del fukt inne i lokalen eftersom man så gott som varje dag tvättade betongpumpar där. Resultatet blev, som syns i Figur 6, att RF pendlade mellan ca 50-60 % dagtid, då portarna stod öppna, till ca 80-90 % nattetid under den första veckan. En stor del av det första dygnet låg RF nära 90 %, vilket givetvis hade en gynnsam påverkan ur härdningssynpunkt.

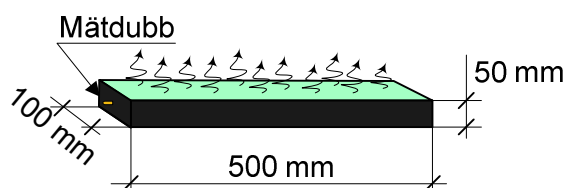


Figur 6 – Uttorkningsklimat under första veckan efter gjutning. RF pendlade mellan ca 80-85 % nattetid till 50-60 % dagtid samtidigt som temperaturen varierade mellan ca 17 och 26 grader.

2.1.4 Materialegenskaper pågjutningsbetong, fri krympning

I samband med pågjutning tillverkades prismor för bestämning av fri krympning samt kuber för tryck- och spräckprovning för provning vid ca 7 respektive 28 dygn. Tjockleken på krympprismorna anpassades till 50 mm för att efterlikna krympning i verklig konstruktion, se Figur 7. Krymprärelsen bestämdes genom mätning av deformation vid olika tidpunkter på dubbar som var ingjutna centriskt i prismornas ändar.

Prisma för fri krympning



Figur 7 – Prisma för fri krympning med ungefär samma tjocklek som pågjutningarna förseglades längs alla ränder utom uppåt. Krymprärelse fastställdes genom mätning på ingjutna dubbar.

Hållfasthet

Uppmätta värden på tryck- respektive spräckhållfasthet, som är ett medelvärde av två 100 mm kuber, sammanfattas i Tabell 2. När det gäller tryckhållfasthet uppfylls kravet precis, se även Figur 8 där tendenskurva för Byggcement i motsvarande hållfasthetsklass redovisas. Det framgår även att hållfastheten var i stort sett lika för oarmerad och fiberarmerad betong, vilket är naturligt i det aktuella fallet eftersom det rör sig om betong ur samma lass.

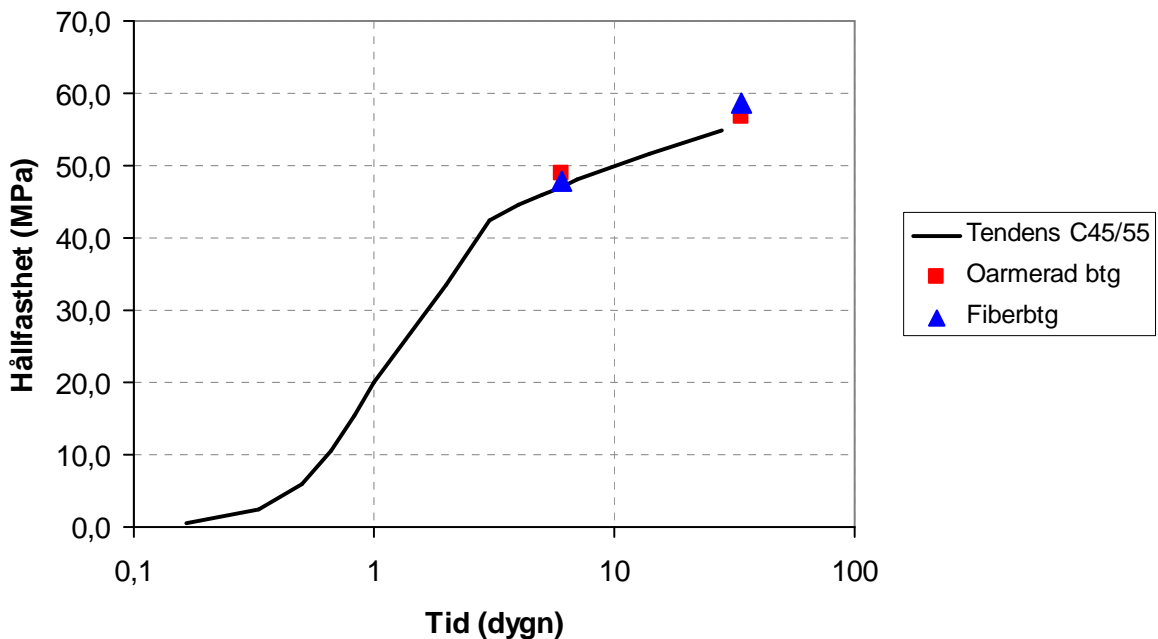
Däremot var skillnaden i spräckhållfasthet markant. I princip lika högt värde uppmättes för fiberbetong vid 6 dygn som för referensbetongen vid 28 dygn. Eftersom det är allmänt känt att fibrer inte har någon större påverkan på hållfastheten vid första uppsprickning (draghållfastheten) tyder resultaten på att spräckprovning inte är någon lämplig metod för att värdera draghållfastheten hos fiberbetong. Orsaken till högre värden är sannolikt att fiberbetongens residualhållfasthet ger ett bidrag redan innan maxlasten uppnås. Detta syns även tydligt vid provning, där lasten kunde ökas en hel del efter det att en väl synlig spricka hade uppstått.

Tabell 2 - Tryck- och spräckhållfasthet för oarmerad respektive stålfiberarmerad betong.

Tid	Hållfasthet och densitet					
	Oarmerad betong			Stålfiberbetong		
	Tryck- hållfasthet, MPa	Spräck- hållfasthet, MPa	Densitet, kg/m ³	Tryck- hållfasthet, MPa	Spräck- hållfasthet, MPa	Densitet, kg/m ³
6 dygn	49.0	3.6		47.5	4.7	
34 dygn	57.0	4.8	2330	58.0	5.4	2330

Draghållfastheten kan enligt t ex BBK 04 uppskattas som 80 % av spräckhållfastheten. Således fås ca 2.9 och 3.8 MPa för referensbetong vid 6 respektive 34 dygn. Enligt diskussion ovan anses samma värden även vara tillämpliga för fiberbetongen.

Tryckhållfasthet



Figur 8 – Tendenskurva för C45/55 med Skövde Byggcement (från Byggcement, Teknisk beskrivning) samt uppmätta hållfasthetsvärden på aktuell betong vid 6 respektive 28 dygn.

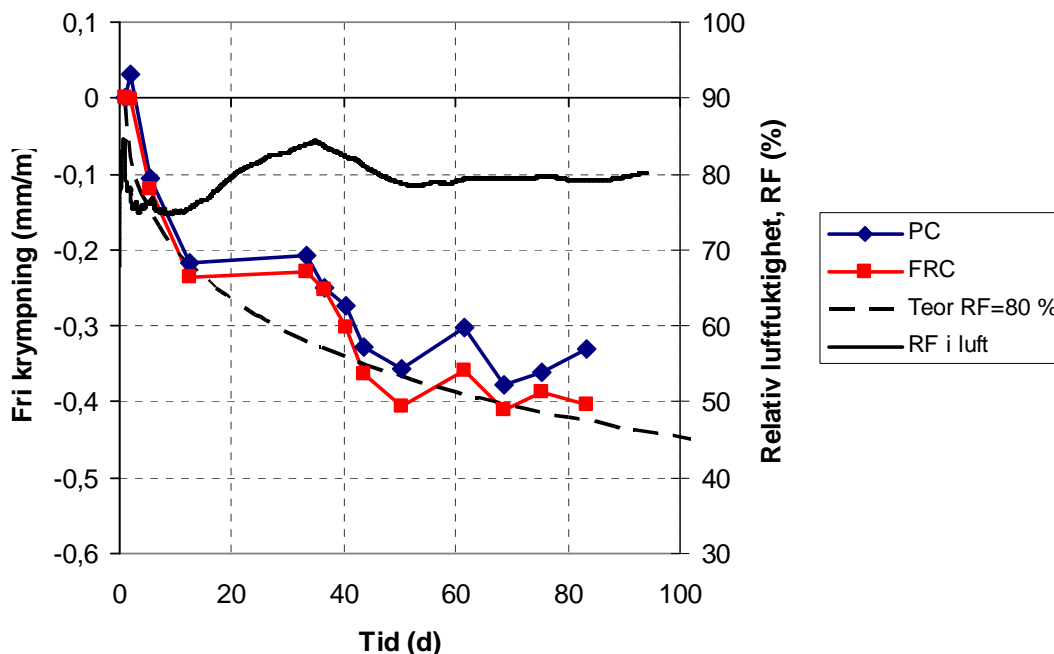
Fri krympning

Uppmätt fri krympning för referens- och fiberbetong redovisas i Figur 9 tillsammans med ett medelvärde för relativa fuktigheten (RF) i omgivningen. I diagrammet visas även beräknad krympning för motsvarande betongkvalitet vid ett RF-värde på 80 % och temperatur 20°C. Beräkningsmodellen kommer från Betonghandbok – Material (1997) som kompletterats med en del som tar hänsyn till autogen krympning från Betonghandbok – Högpresterande betong (2000).

Man kan konstatera att krympningen är relativt låg (ca 0.4 mm/m) även om tiden i och för sig är ganska kort. Erfarenhetsmässigt når man, vid standardmätning, värden på ca 0,7 ‰ efter 230 dygn för vanlig betong med D_{\max} 16 mm medan motsvarande värde för betong med D_{\max} 8 mm brukar ligga högre (1 ‰ är inte ovanligt).

En viktig orsak till den låga krympningen är naturligtvis det gynnsamma klimatet. Krympningens starka koppling till luftens relativa fuktighet framgår av att uppmätt krympning var i stort sett oförändrad från ca 10 till 30 dygn då RF ökade. När RF därefter sjönk igen (30-50 dygn), till följd av uttorkning med byggfläktar, tog även krympningen fart.

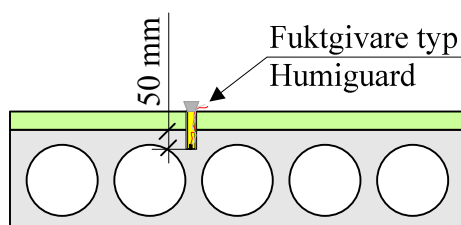
Intressant att notera är att den uppmätta krympningen sammanfaller med krympning som beräknats med metod som beskrivs i Betonghandboken – Material.



Figur 9 – Fri krympning bestämd på prismor 50x100x500 mm. Även teoretisk krympning beräknad med modell i Betonghandboken – Material (1997) redovisas för uttorkning vid RF = 80 % och T = 20°C.

2.1.5 Fuktförhållanden i underlaget

För att fastställa hur den relativa fuktnivån i underlaget skulle påverkas av de olika förbehandlingarna och av pågjutningen monterades fuktgivare på några olika ställen i HD/F-elementen ett par veckor innan pågjutning. Givarna, av typen Humiguard, monterades på ett djup av ungefär 50 mm och på så stort avstånd som möjligt från hålen, se Figur 10.



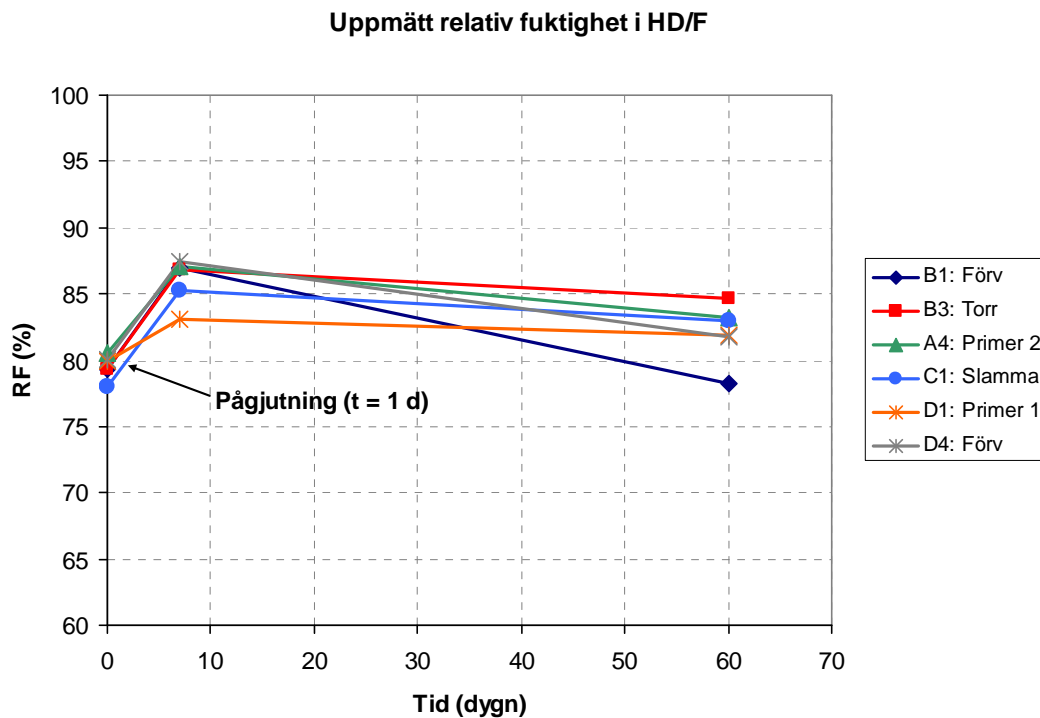
Figur 10 – Fuktgivare typ Humiguard monterades på ca 50 mm djup i vissa ytor av HD/F-elementen.

RF-nivån fastställdes dagen före pågjutning (22 juni), innan förbehandling av underlaget, samt en vecka (29 juni) och ca 2 månader efter pågjutning (21 augusti).

Avsikten med fuktbestämningen var dels att kontrollera hur RF-nivån i underlaget påverkas av förbehandlingar och pågjutning och dels att studera om primer hindrar fukt att tränga ner i underlaget. Resultat redovisas i Figur 11. En tydlig ökning av RF-nivån uppstår till följd av förbehandling och pågjutning. Den enda mätpunkten som skiljer ut sig är den som sattes i delyta D1 med primer 1. Här var RF-ökningen under den första veckan mindre än i övriga mätpunkter, vilket skulle kunna betyda att denna typ av primer hindrade fuktinträngning i underlaget mer effektivt än primer 2.

Om man studerar utvecklingen under följande tvåmånadersperiod framgår att delyta B1, som förvattnats, torkade ut betydligt fortare än övriga delytor. Det är svårt att hitta någon rimlig förklaring. Däremot kan det vara värt att nämna att gummilocket som tätar pvc-röret där givaren sitter, på något ställe råkade sparkas bort. Tyvärr råder viss osäkerhet både avseende tidpunkt när detta skedde och vilken av givarna som berördes men det skulle kunna förklara att just givaren i delyta B1 avviker.

En intressant iakttagelse är att det generellt var svårt att komma tillbaka ner till den RF-nivå som rådde före pågjutning. Detta kan vara värt att ha i beaktande i situationer då en fastställd RF-nivå skall uppnås innan golvläggning. Det bör dock påpekas att klimatet i det aktuella fallet säkert har haft viss betydelse för den långsamma uttorkningen, se Figur 13.



Figur 11 – RF-nivå i underlaget dagen före samt en vecka och två månader efter pågjutning.

2.1.6 Uttorkningsförhållanden

Som nämnts ovan var uttorkningsklimatet av olika skäl relativt ogynnsamt sett ur spricksynpunkt. I slutet av juni var det väldigt varmt och torrt utomhus samtidigt som pumptältet, där försöken utfördes, dagtid stod öppet en del. Detta innebar, som framgår av Figur 13, att RF i luften dagtid gick ner till ca 50 %. Nattetid, då tältet var tillbommat, ökade dock RF upp till ca 80-90 % till följd av sjunkande temperatur och tillskjutande fukt från lokalen (biltvätt, avloppsränna).

Därefter blev vädret lite mer normalt för årstiden, dvs ca 15-20 grader, mulet och en del regn, vilket medförde att RF även dagtid gick upp mot ca 80-90 %. För att få i gång uttorkningen och krympningen byggdes ett stort tält runt pågjutningarna med hjälp av presenningar, se Figur 12. I vardera ända av tältet sattes två värmefläcktar med effekten 8 kW för att torka ut och värma luften i anslutning till pågjutningarna.

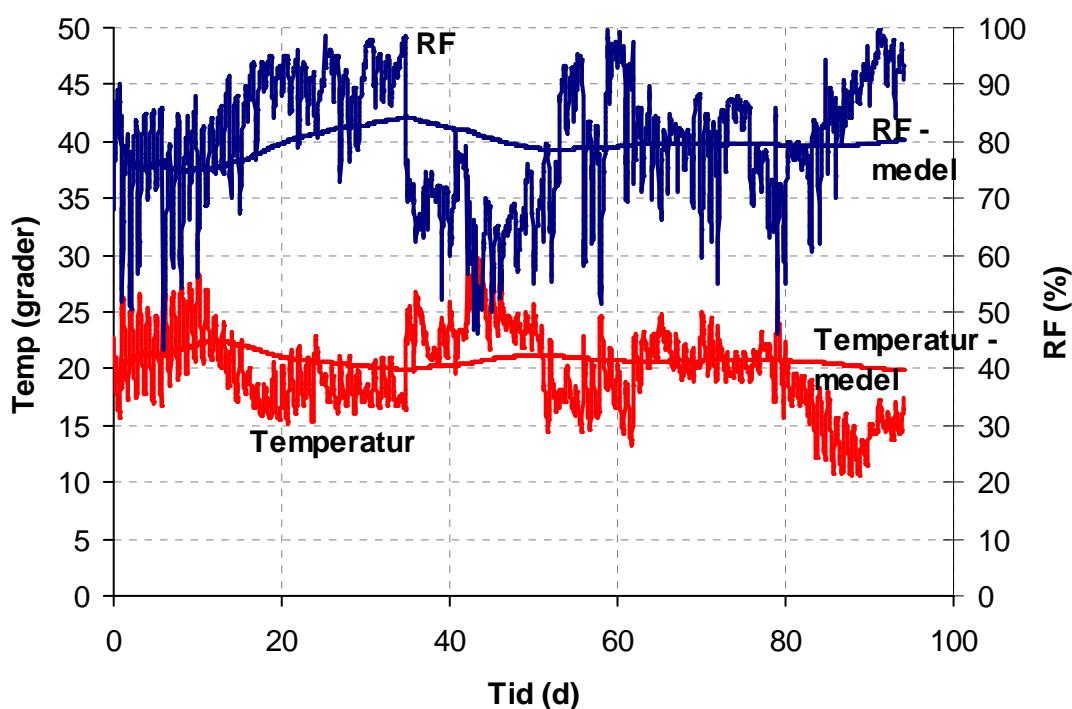
Tidpunkten för detta framgår tydligt i Figur 13, genom att RF sjönk relativt brant samtidigt som temperaturen ökade efter ca 35 dygn. På grund av strömavbrott och att överhettningsskyddet på en av fläckarna löste ut blev det under en senare period något fuktigare och kallare igen (50-60 dygn). En av fläckarna togs därefter bort för att spara lite

energi. Efter ca 80 dygn stängdes även den andra fläkten av eftersom försöken betraktades som mer eller mindre avslutade.



Figur 12 – Ca en månad efter pågjutning (slutet av juli) byggdes elementen in med presenningar. En värmefläkt (8 kW) placerades i respektive öppning för att torka ut luften över pågjutningarna.

Klimat - hela försöksperioden



Figur 13 – Temperatur och relativ fuktighet (RF) i lokalen där pågjutningarna lagrades under hela försöksperioden (23 juni – 23 september 2009).

2.2 Resultat

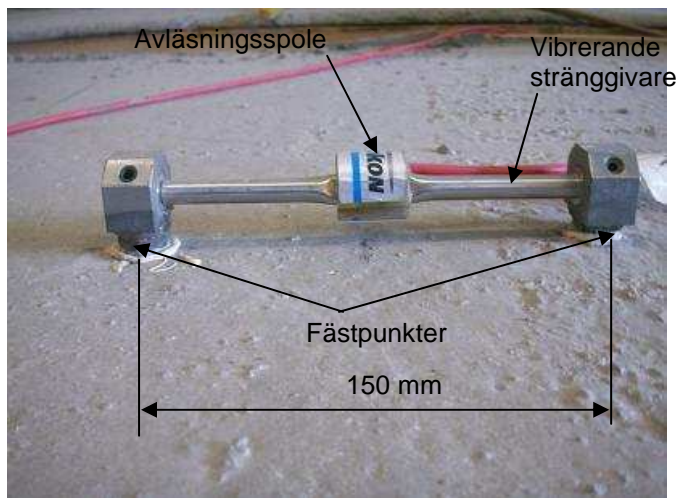
2.2.1 Allmänt

Utvärdering skedde genom kartläggning av sprickor och genom provning av vidhäftning. Även deformationsmätning utfördes på ytan av en av pågjutningarna, främst för att ge en

uppfattning om tvånget (stor rörelse innebär lågt tvång). Deformationen används till viss del även för att verifiera en teoretisk modell som har utvecklats inom tidigare SBUF-projekt (nr 11406).

2.2.2 Deformationer i pågjutning

Deformationer bestämdes enligt ovan på en av pågjutningarna med hjälp av töjningsgivare av typen vibrerande strängar. Givarna är egentligen avsedda att gjutas in i betong. För att kunna utnyttja givarna vid flera tillfällen valdes dock, liksom i en del tidigare försök, att montera dem på ytan istället, se Figur 14. Eftersom endast 16 givare fanns tillgängliga så kunde mätning bara utföras på en av plattorna, platta A. Lägen på givarna framgår av Figur 17.



Figur 14 – Töjningsgivare (vibrerande sträng) som moterats på pågjutningsytan på platta A, se Figur 17 för givarlägen.

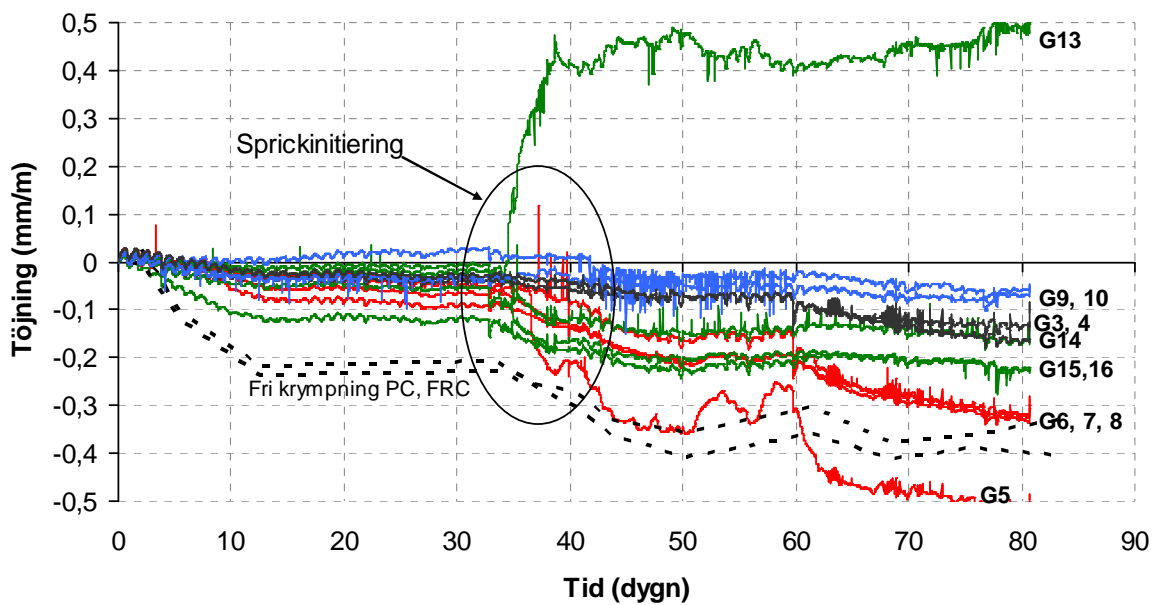
Givarna monterades och mätning startades upp ca 1 dygn efter pågjutning. Därefter samlades resultat in och lagrades kontinuerligt under en tremånaders-period. Resultat sammanfattas i Figur 15. I diagrammet representerar grå färg delområde A1 (slamma), röd färg delområde A2 (primer 1), blå färg delområde A3 (torr) och grön färg delområde A4 (primer 2). Av olika skäl gav inte alla givare tillförlitliga resultat och de har därför utelämnats i diagrammet. Detta gäller givare nr 1 och 2 i den slammade delytan samt 11 och 12 som satt på pågjutningen som lagts på den torra ytan. Som jämförelse visas även uppmätt fri krympning som streckade svarta linjer. Observera dock att den fria krympningen inte är helt jämförbar eftersom den motsvarar ett medelvärde (mätt centriskt) medan pågjutningstöjningar är mätta på ytan.

Av resultaten framgår att man kan detektera töjning redan från början, vilket tyder på att man har viss eftergivlighet hos HD/F-plattan. Det bör påpekas att vid helt oeftergivligt underlag skulle töjningen ha varit noll fram till uppsprickning. Man kan även notera att töjningarna ökar relativt plötsligt efter ca 35 dygn. Detta kan delvis förklaras av att pågjutningarna vid denna tidpunkt byggdes in och att värmefläktar startades upp, se Figur 12 och Figur 13.

Den plötsliga töjningsförändringen är dock även en följd av att lite större sprickor börjar uppträda inom vissa delområden. Om man studerar blå och svarta linjer i diagrammet framgår att töjningsförändringen vid denna tidpunkt var relativt liten. Detta visar att större sprickor inte har uppstått inom delområde A1 och A3 (slammat respektive torrt underlag). De röda och gröna linjerna, å andra sidan, visar på en ganska hastig förändring. Detta visar att

deformationerna har ökat markant inom de primade delområdena A2 och A4. Endast en givare placerades så att den fångade en större spricka, nr G13 inom delområde A4, vilket framgår av den positiva töjningen för aktuell givare.

Även övriga givare inom de primade delområdena, där den negativa töjningen (kontraktion) ökar, indikerar dock att lite större sprickor har börjat utvecklas. Speciellt stor kontraktion noteras för givare G5. Detta beror på att den är belägen precis intill en större spricka, se Figur 17. Sannolikt har man i sprickans närområde fått ett vidhäftningssläpp, vilket har orsakat den större rörelsen vid givare aktuell givare.



Figur 15 – Uppmätta töjningar på ytan av pågjutningen på håldäckselement A, se Figur 17 för läge av givare.

2.2.3 Sprickbildning

Sprickor observerades med hjälp av USB-mikroskop vid tre tillfällen, efter ca 1-2 veckor, 1 månad samt efter ca 3 månader. Sprickbilden vid det avslutande mätillfället redovisas i Figur 17 (platta A och B) och Figur 18 (platta C och D).

Som synes uppstod en mängd sprickor. Det kan dock vara värt att påpeka att de flesta var så små att de i normala fall inte hade uppmärksamats. En intressant iakttagelse är att de enda större sprickor som observerades uppstod i delområden som hade primats, se platta A och C. Störst sprickbredd hade de sprickor som uppstått inom delområden med primer 1 (röda områden på platta A och C). Detta beror helt klart på att vidhäftningen var lägst i dessa områden, se Figur 21. Foton som visar närbilder på några av de aktuella sprickorna redovisas i Figur 16 (a) och (b).

En annan observation är att de större sprickorna inom primade områden löpte relativt rakt genom pågjutningsbredden, tvärs längdriktningen, till skillnad från alla småsprickor inom övriga delområden som hade ett oregelbundet mönster.

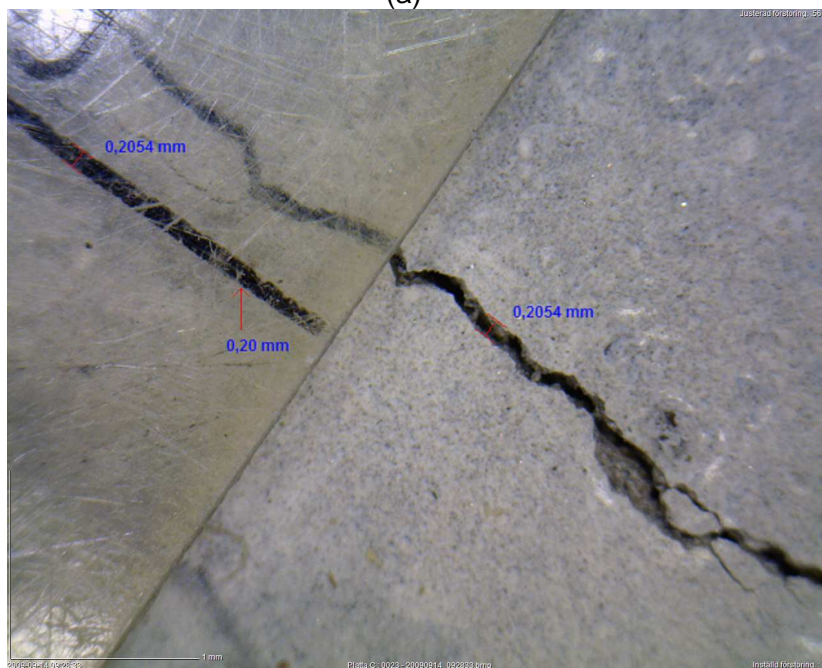
Inverkan av fibrer

I den fiberarmerade pågjutningen uppstod inte några större sprickor, vilket skulle kunna tyda på att fibrerna har gett viss armeringseffekt. Eftersom vidhäftningen inom samtliga fyra delområden på aktuell platta (D) var hög så är det dock svårt att dra en sådan slutsats. Ett

liknande resultat erhöles även för pågjutningen på platta B, där vidhäftningen också var hög inom samtliga delområden.

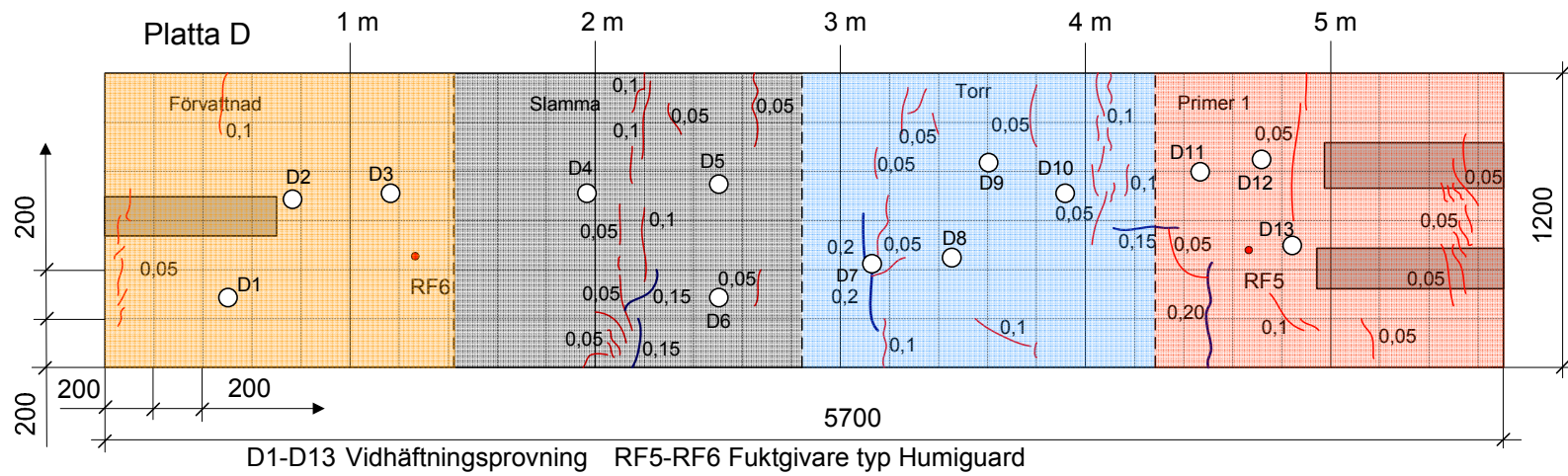
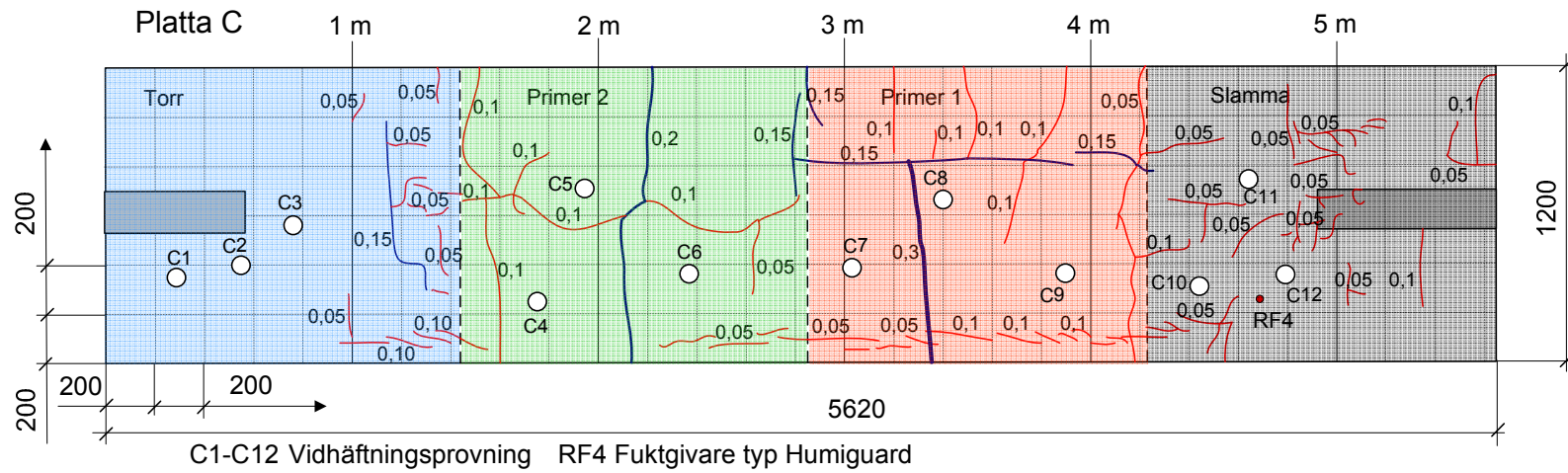


(a)



(b)

Figur 16 – (a) Uppförstoring av den största sprickan (0,35 mm) inom delområde med primer 1 på platta A. (b) Spricka i delområdet med primer 2 i platta C jämförs med 0,2 mm linjen på sprickbreddsmätare.



Figur 18 – Observerade sprickor i slutet av försöken (ca 3 mån) samt läge för vidhäftningsprovning och fuktmätning i platta C och D.

2.2.4 Vidhäftning

Pågjutningens vidhäftning i de olika delområdena bestämdes med Capo-test, vilket är en fältutrustning framtagen för att kunna bestämma hållfasthet på plats. Utrustningen bestod av en stålplatta med centrisk, cylindrisk öppning som fästs i betongytan med hjälp av vakuum, se bild a) i Figur 19. Därefter spänns först en maskin med slipskiva fast i plattan för att plana av ytan och avlägsna eventuellt svag gjuthud. Hål borrades sedan med hjälp av en kärnborr med diameter 75 mm. I aktuellt fall borrades till ett djup av ca 50-60 mm. Avsikten var att passera fogen med ca 1 cm. För att kunna dra ut kärnorna limmades slutligen ståklackar direkt på den avplanade ytan. Klackarna var försedda med ett centriskt placerat gängat hål där Capo-utrustningen (f, g, h) fästes in.

Inom varje delyta togs tre vidhäftningsprov, vilket gav ett totalt antal på 48 prov. Dessutom gjordes några extra provningar genom några av de större sprickorna för att undersöka om uppsprickningen hade föranlett vidhäftningssläpp. Placering av kärnorna framgår av Figur 17 och Figur 18. Vid val av placering eftersträvades om möjligt sprickfria områden för att slippa eventuella störningar från sprickzoner.



Figur 19 – Vidhäftningsprovning utfördes genom utdragning av cylindrar. I figuren visas de olika stegen: a) en platta fixeras med vakuum, b) ytan planas av, c och d) kärnbörning till ett djup på ca 60 mm (ca 10 mm i underlag), e) stålklackar fästs på cylindrars yta och f, g, h) utdragning med Capo-utrustning.

Resultat från vidhäftningsprovet redovisas i Figur 21. Betydelsen av några olika faktorer på vidhäftningen diskuteras nedan.

Inverkan av motgjutningsytans råhet

Platta A och B hade en borstad ytstruktur medan C och D hade en slätare yta. Resultaten ger inga indikationer på någon markant skillnad i vidhäftning eller sprickbildning som en följd av de olika ytstrukturerna.

Inverkan av härdning på vidhäftningen

Det är svårt att avgöra om härdning har haft någon betydelse för vidhäftningen i aktuella försök. Svårigheten ligger dels i att många av brotten uppstod i limskiktet, vilket innebär att den "sanna" vidhäftningen inte alltid har uppmätts. Dessutom var klimatet enligt tidigare inte särskilt utslagsgivande, se Figur 6, vilket innebär att skillnaden mellan härdning under plastfolie och lufthärdning inte blev så stor.

Inverkan av förbehandling

När det gäller förbehandlingens betydelse är det helt uppenbart i Figur 21 att de båda primeralternativen gav sämre vidhäftning än övriga behandlingar. Den primade ytan på platta D utgör ett undantag som är svårförklarligt. Även denna yta skiljer sig dock från övriga på samma platta genom att samtliga brott skedde i fogen medan brotten inom övriga delområden på samma platta uppstod antingen i underlaget eller i limfogen. Det vill säga fogen utgjorde den svagaste zonen.

Av de båda primertyperna känns det som om primer 2 gav något bättre effekt även om skillnaden kanske inte blev så markant. För både platta A och C, där båda alternativen var representerade, gav primer typ 2 något bättre vidhäftning. Enligt avsnitt 2.2.3 var sprickorna som uppstod i delområden med primer 1 något större, vilket också ger en indikation på sämre vidhäftning.

När det gäller övriga alternativ verkar slamning ha varit sämre än förvattning och torrt underlag eftersom spridningen var större. För såväl platta A som C blev vidhäftningen i någon av mätpunkterna inom slammad delyta markant lägre än övriga två mätvärden. Orsaken till det låga värdet i den slammade delen av platta C kan mycket väl ha varit att ytan inte var rengjord, se C1 i Figur 4. Spridningen i platta A däremot, där den slammade ytan var väl rengjord innan, tyder på att slamning i sig kan ge något osäker vidhäftning. En möjlig orsak kan vara att slamskiktet skulle kunna utgöra en svaghetszon eftersom aktuell pågjutningsbetong blandades med vatten.

Det går inte att dra slutsatsen att rengöringen hade en avgörande betydelse för vidhäftningen trots det låga värdet på den slammade delytan på platta C. I den andra delytan som var smutsig (torr och smutsig yta på platta B) var vidhäftningen nämligen väldigt hög. Samtliga tre brott skedde i limfogen vid en hållfasthet på ca 4 Mpa eller högre, se Platta B i Figur 21. Några generella slutsatser avseende vikten av rengöring skall dock inte dras baserat på detta försök eftersom underlag i verkligheten säkert kan vara betydligt mer förorenade än ytorna i aktuella försök.

Vidhäftning i närheten av sprickor

Inga bområden har kunnat konstateras på någon av plattorna. Detta indikerar att den vidhäftning som uppnåtts har varit tillräcklig för att förhindra vidhäftningsbrott. Ett vanligt problem är annars att man kan observera släpp i anslutning till större sprickor. Därför undersöktes vidhäftningen enligt ovan i anslutning till några av de större sprickorna. I delytan med primer 1 på platta A uppmättes 0,4 respektive 0,3 MPa i prov nr A8 och A9. Värdena var i och för sig lägre än i sprickfria delar på samma delområde (se primer 1 platta A i Figur 21) där vidhäftningen uppgick till mellan ca 0,6 och 0,9 MPa. Detta visar att vidhäftningen har påverkats i närheten av sprickan men att uppsprickningen inte har lett till några stora

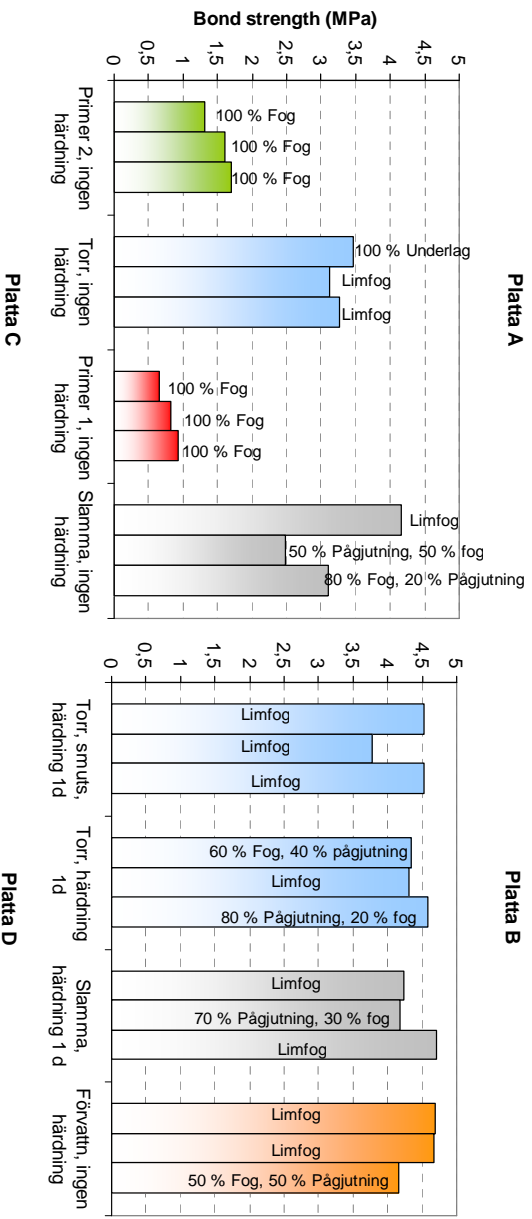
bområden. Förklaringen till de något lägre värdena är sannolikt att en mindre zon med släpp har uppstått precis i anslutning till sprickorna.

Exempel på en borrkärna som togs genom en av sprickorna på delytan med primer 1 på platta A visas i Figur 20. Kärnan är vänd med fogytan uppåt för att tydliggöra att sprickan var genomgående. Man kan även se en ljusare linje i borrhålet där sprickan har mött underlaget.

Vidhäftningen som uppmättes för borrkärnan som togs genom sprickan på platta D (se prov nr D7 i Figur 18) uppgick till 4,2 MPa, vilket till och med var något högre än övriga prov i samma delområde. I detta fall var vidhäftningen således helt opåverkad av sprickorna. Till skillnad från föregående vidhäftningsprov var sprickorna dock inte genomgående. Detta är en tänkbar förklaring till att vidhäftningen inte påverkades.



Figur 20 – Kärna från vidhäftningsprov nr A9 (se Figur 17) genom en av sprickorna i delytan med primer 1 på platta A.



Figur 21 – Vidhäftning bestämd genom utdragsprovning av cylindrar på tre ställen inom varje delyta.

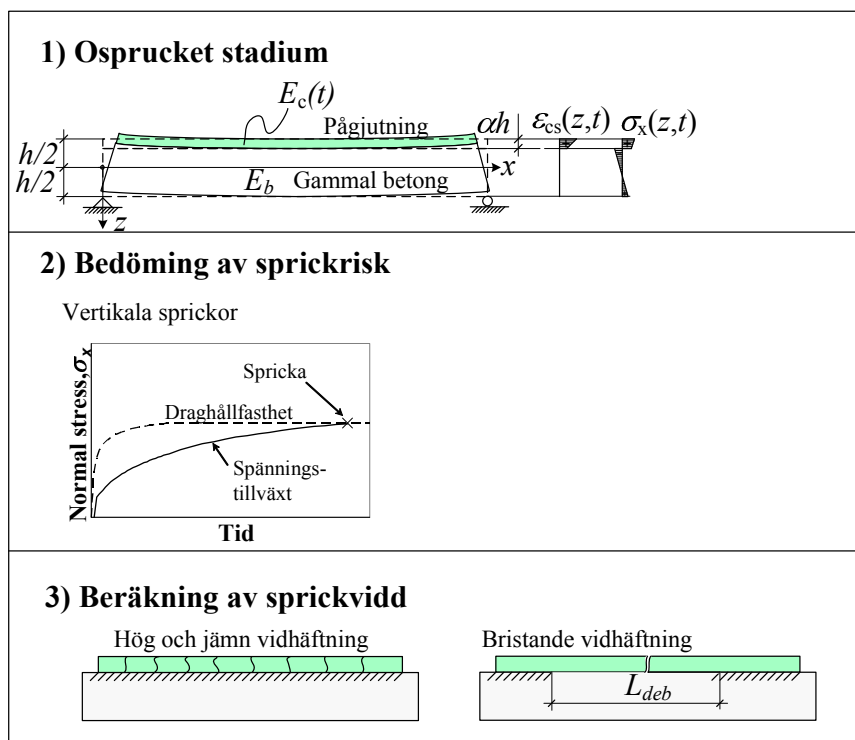
2.3 Teoretisk utvärdering av tidpunkt för uppsprickning och sprickvidd

2.3.1 Bakgrund

En beräkningsmodell för uppskattning av risken för sprickor och sprickvidd har föreslagits inom ett tidigare SBUF-finansierat projekt (Carlswärd, 2006). Modellen utgår från fullständig samverkan mellan pågjutning och underlag fram till eventuell uppsprickning. Detta innebär att man kan räkna fram töjningar och spänningar i pågjutningen med hjälp av balkteori för den sammansatta sektionen. Beräkningsmetodikerna har tidigare använts av bl a Silfwerbrand (1996, 1997).

Efter uppsprickning, som inträffar då dragspänningen i pågjutningen når draghållfastheten ((2) i figuren) finns två möjligheter som beaktas: att vidhäftningen är tillräcklig för att hindra vidhäftningssläpp och att vidhäftningssläpp uppstår med utgångspunkt från en spricka, se (3) i Figur 22. Problemet är givetvis att uppskatta vilken av dessa två situationer som kan tänkas uppstå samt hur stort ett eventuellt bområde (L_{deb}) kommer att bli.

För mer detaljer avseende beräkningsmetodikerna hänvisas till Carlswärd (2006).



Figur 22 – Principskiss för teoretisk modell för beräkning av sprickrisk.

I beräkningarna har antagits att underlaget består av 270 mm homogen betong. Detta är givetvis inte helt riktigt eftersom håldäcken till stor del utgörs av hålrum. Även förspänningen ger dock en påverkan på underlagets styvhet. Eftersom effekten av hålen och förspänningen är något svårkvantifierbara har det för enkelhets skull antagits att dessa båda effekter tar ut varandra.

2.3.2 Beräkning av spricktidspunkt

Tidpunkten för uppsprickning bedöms enligt ovan som den tid då dragspänningen i pågjutningen (medelvärde) uppnår betongens draghållfasthet. En svårighet är givetvis att bedöma draghållfastheten korrekt. Enligt Tabell 2 bestämdes spräckhållfastheten till 4,8 MPa för referensbetongen (utan fibrer) vid tidpunkten 34 dygn. I Betonghandboken – Material (1997) anges följande samband mellan enaxiell drag- och spräckhållfasthet:

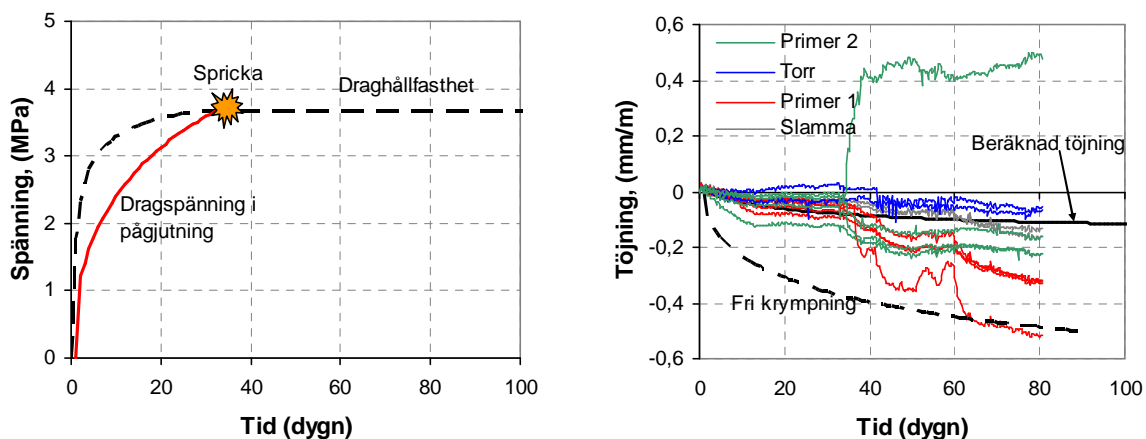
$$f_{ct} = 0,76 \cdot f_{c,sp} \quad (1)$$

Detta innebär att draghållfastheten efter 28 dygn blir ca 3,6 MPa för referensbetongen. Draghållfasthetens utveckling i ung ålder, före 28 dygn, kan beräknas med ekv 2, som kommer från CEB FIP Model Code 90 (1993).

$$f_{ct}(t) = e^{0,25 \left(1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{0,5} \right)} \cdot f_{ct} \quad (2)$$

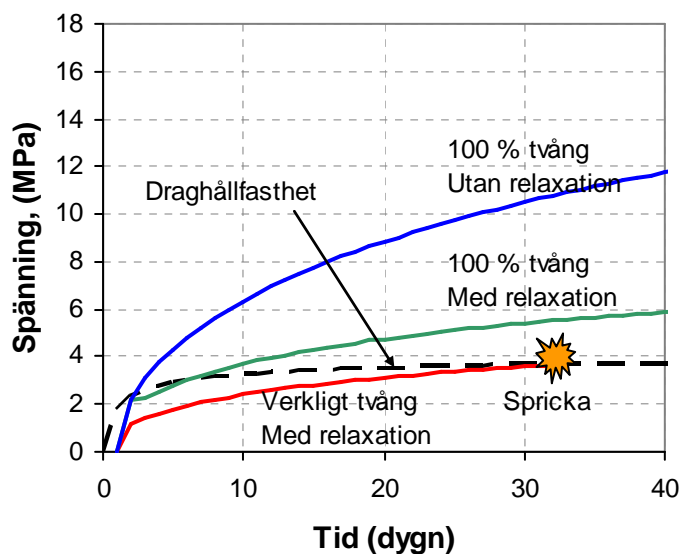
Ovanstående ekvationer ger draghållfasthetsutveckling enligt Figur 23 (a). I samma diagram framgår även hur dragspänningen successivt ökar med ökande ålder. Det kan nämnas att beräkningen har utförts med fri krympning enligt Figur 9 och med relaxation beräknad med modell som beskrivs i CEB FIP Model code (1993), se Carlswärd (2006) för mer detaljer.

I diagram (a) framgår att beräknad tidpunkt för uppsprickning är någonstans mellan 30 och 40 dygn efter gjutning. Detta stämmer väldigt väl överens med töjningsutvecklingen som redovisas i (b), där plötsliga töjningsförändringar inträffar just vid en ålder av ca 30-40 dygn. I samma diagram kan även ses att beräknad töjning stämmer hyggligt överens med uppmätta töjningar fram till uppsprickning. Detta tyder på att modellen ger en bra uppskattning på tvånget från aktuellt underlag.



Figur 23 – (a) Beräknad utveckling av dragspänning och draghållfasthet i pågjutningen för fri krympning enligt Figur 9. (b) Beräknad och uppmätt töjning på pågjutningens yta.

Det faktum att man över huvud taget mäter töjning hos pågjutningarna (och beräknar) enligt Figur 23 (b) visar att tvånget inte är 100 %, dvs den krympande pågjutningen drar med sig underlagsplattan till viss del. I aktuellt fall hade dragspänningsnivån blivit ca 2-3 gånger högre om underlaget hade varit helt oeftergivligt om man samtidigt försummar pågjutningens krympning, se blå kurva i Figur 24. Vid en jämförelse av blå och grön kurva i samma diagram framgår att relaxationen (krympningen) har väldigt stor betydelse för spänningsnivån i pågjutningen.



Figur 24 – Inverkan av tvång och krypning eller relaxation på pågjutningens spänningsnivå.

2.3.3 Beräkning av sprickvidd

Sprickvidd är inte lätt att beräkna eftersom den till stor del beror på hur väl pågjutningen sitter fast i underlaget. Enligt ovan måste man särskilja två situationer beroende på vidhäftningskvalitet. För en situation där vidhäftningen är tillräckligt bra för att hindra släpp kan sprickvidden enligt Betongrapport nr 13 (2009) uppskattas enligt följande:

$$w = 3 \cdot h \cdot \varepsilon_{cs} \quad (3)$$

Där w är sprickbredden, h är pågjutningens tjocklek och ε_{cs} är betongens fria krympning. Med fri krympning enligt Figur 9 skulle ovanstående formel ge en sprickbredd på ca 0,06 mm i slutet av mätperioden ($3 \cdot 0,05 \text{ m} \cdot 0,4 \text{ mm/m}$). Med utgångspunkt från Figur 17 och Figur 18 kan konstateras att detta stämmer hyggligt med uppmätta sprickbredder i delområden med hög vidhäftning, där de flesta sprickor hade en bredd på mellan 0,05 och 0,1 mm.

Inom delområden med sämre vidhäftning (primade ytor) blev dock bredden hos vissa av sprickorna större. Detta borde hänga ihop med att ett vidhäftningssläpp har uppstått i anslutning till sprickan. Enligt diskussion i avsnitt 2.2.4 kunde exempelvis konstateras att vidhäftningen var nedsatt vid en av de större sprickorna. Detta tyder på att visst släpp har uppstått. Utbredningen på släppet kan dock inte ha varit så omfattande med tanke på att utdragskärnan endast var 75 mm i diameter och att den fortfarande satt fast till viss del.

I tidigare SBUF-projekt (Carlswärd, 2006) visades att sprickbredden kunde fastställas med hygglig noggrannhet genom att multiplicera bomlängden L_{deb} med krympningens storlek ε_{cs} enligt:

$$w = L_{deb} \cdot \varepsilon_{cs} \quad (4)$$

Med utnyttjande av ekv 4 och en fri krympning på ca 0,4 mm/m krävs en bomlängd på ca 0,5-0,6 m för att sprickbredden skall komma upp till 0,2-0,3 mm som uppmättes för vissa av sprickorna i primade delområden.

Så stora områden med släpp gick inte att konstatera vid bomknackning eller vid de utdragsprovningar som utfördes enligt tidigare. En bidragande orsak är naturligtvis att den

fria krympningen som används vid beräkningen är ett medelvärde för tvärsnittet. I verkligheten påverkades sprickvidden helt säkert av att krympningen var ojämn över tvärsnittet, vilket innebär att krympningen, och därmed sprickvidden, i ytan är större. En annan konsekvens av krympgradienten, som kan ha haft inverkan på sprickvidden, är att viss kantresning kan ha uppstått vid sprickorna.

3 Försöksserie 2 (Nykvarn)

3.1 Allmänt

I det tidigare beskrivna fullskaleförsöket var uttorkningsmiljön orealistiskt gynnsam, se Figur 6, vilket alldeles säkert hade stor inverkan på resultatet. En ny pågjutningsserie utfördes därför, med ambitionen att få ett tuffare klimat. Försöken genomfördes på Strängbetongs fabrik i Nykvarn, där man huvudsakligen tillverkar håldäckselement.

Pågjutningar gjordes även i denna serie på HD/F-element. Fokus i undersökningen var att studera betydelsen av förbehandling, härdning och armering på spricktillväxt och vidhäftning i tunna pågjutningar.

3.2 Försöksbeskrivning

I provserien ingick sex håldäcks-element av typen HD/F 120/27, dvs plattor med 1200 mm bredd och 270 mm höjd. Längden på elementen varierade från ca 5 m till 7 m. Fyra hade en rå yta medan övriga två hade en slät, obehandlad yta. Det bör dock nämnas att skillnaden mellan rå och slät yta var oansenlig. Råheten utgjordes av ett antal längsgående grunda spår, som sannolikt inte har någon större betydelse för vidhäftningen.

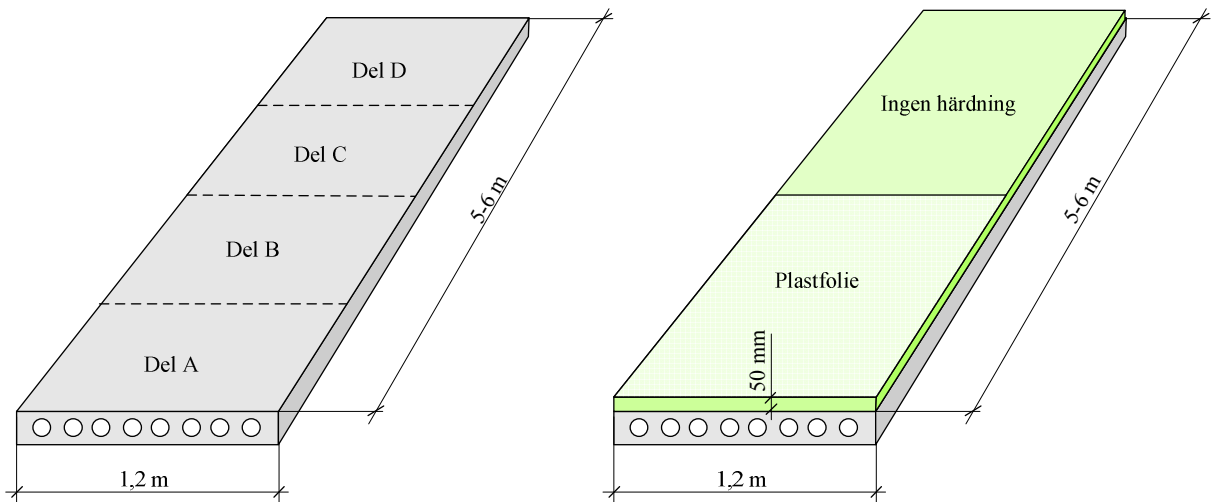
Elementen placerades på golvet inne i en lokal som var avskild från tillverkningsdelen i fabriken. Uppskattningsvis låg elementen inomhus under någon månad innan pågjutning genomfördes.

3.2.1 Förbehandling

Varje element delades in i fyra delområden enligt Figur 25 och Figur 26, för att kunna studera olika kombinationer av förbehandling/härdning. De förbehandlingar som ingick var dels ingen alls (torrt underlag), primat underlag samt förvattnat underlag. Samtliga plattor dammsögs noggrant dagen före pågjutning.

Förvattning innebar att vatten hölls på betongytan strax före pågjutning (ca 1 h) så att ytan var blöt vid pågjutningstillfället (viss pölbildning förekom), se Figur 28. När det gäller primning utfördes den på två olika sätt, som båda förekommer vid verkliga pågjutningar. På vissa ytor lades primern ut dagen före pågjutning så att den hann torka och filmbilda (Figur 27) och på andra ytor applicerades primern flödigt strax före pågjutning så att viss pölbildning kvarstod då betongen lades ut (Figur 28). Enligt anvisningarna i produktbladet skall primern fördelas jämnt över golvytan och borstas in i underlaget till en heltäckande film. Egentligen står det inget om hur lång tid i förväg lösningen skall läggas ut. Däremot framgår att temperaturen i underlaget inte får vara lägre än 10°C eftersom primerns filmbildning då kan påverkas negativt. Av detta kan man dra slutsatsen att det är tänkt att primern skall hinna torka en stund före pågjutning.

Primern var i båda fallen av fabrikatet Maxit Floor 4716, som späddes med en del primer och 3 delar vatten. Produkten är av typen styren-akrylatdispersion som egentligen är avsedd för avjämningsbruk. Trots detta är det relativt vanligt att den används för att förbättra vidhäftningen vid pågjutning med betong.



Figur 25 – Varje håldäckselement delades in i fyra delområden (A-D). Förbehandling av motgjutningsytan var lika på del A och C respektive del B och D. Efter pågjutning härdades betongen över del A och B under plastfolie i 1 vecka medan betongen på del C och D lufthärdades.

Platta 1

1A	1B	1C	1D
----	----	----	----

Platta 2

2A	2B	2C	2D
----	----	----	----

Platta 3

3A	3B	3C	3D
----	----	----	----

Platta 4

4A	4B	4C	4D
----	----	----	----

Platta 5

5A	5B	5C	5D
----	----	----	----

Platta 6

6A	6B	6C	6D
----	----	----	----

Plattdel	Struktur	Förbehandl	Armering	Pågjutning	Härdning
1A	Rå	Primer 1d	Oarmerad	C35/45 8 SKB	Plastfolie 1v
1B	—//—	Torr	—//—	—//—	—//—
1C	—//—	Primer 1d	—//—	—//—	Ingen
1D	—//—	Torr	—//—	—//—	—//—
2A	Rå	Primer 1d	Fiberarmerad	C35/45 8 SKB	Plastfolie 1v
2B	—//—	Torr	—//—	—//—	—//—
2C	—//—	Primer 1d	—//—	—//—	Ingen
2D	—//—	Torr	—//—	—//—	—//—
3A	Rå	Primer 1d	Nätarmering	C35/45 8 SKB	Plastfolie 1v
3B	—//—	Torr	—//—	—//—	—//—
3C	—//—	Primer 1d	—//—	—//—	Ingen
3D	—//—	Torr	—//—	—//—	—//—
4A	Slät	Primer 1h	Oarmerad	C35/45 8 SKB	Plastfolie 1v
4B	—//—	Förvattnad	—//—	—//—	—//—
4C	—//—	Primer 1h	—//—	—//—	Ingen
4D	—//—	Förvattnad	—//—	—//—	—//—
5A	Slät	Primer 1h	Fiberarmerad	C35/45 8 SKB	Plastfolie 1v
5B	—//—	Förvattnad	—//—	—//—	—//—
5C	—//—	Primer 1h	—//—	—//—	Ingen
5D	—//—	Förvattnad	—//—	—//—	—//—
6A	Rå	Primer 1h	Nätarmerad	C35/45 8 SKB	Plastfolie 1v
6B	—//—	Förvattnad	—//—	—//—	—//—
6C	—//—	Primer 1h	—//—	—//—	Ingen
6D	—//—	Förvattnad	—//—	—//—	—//—

Figur 26 – Varje håldäckselement delades in i fyra delytor enligt den övre figuren. Ytstruktur, förbehandling, typ av armering och betong samt härdning framgår av tabellen.



Figur 27 – Priming av HD/F dagen före pågjutning av fält A och C på platta 1, 2 och 3.



Figur 28 – Foto av platta 4 precis före pågjutning. Det framgår att primer och vatten har applicerats flödigt.

3.2.2 Pågjutning

Betong som användes för pågjutningen var av typen Vibreringsfri C35/45 (TorkBI 4) med D_{\max} 8 mm. Sammansättning på betongen, som tillverkades vid Betongindustri AB:s fabrik i Tumba, ges i Tabell 3. Betongen levererades med roterbil och utläggningen gjordes med betongbilens ränna, se Figur 29.

Pågjutningarna, som utfördes av Mariekälla Betong & Transport AB, inleddes på platta 4 följt av i tur och ordning platta 1, 6 och 3. Därefter tillsattes stålfibrer, av fabrikat Sika Fiber CHO 65/35 NB, i roterbilen och blandades under ca 5 minuter. Den stålfiberarmerade betongen lades slutligen ut på platta 2 och 4. Den totala tiden för hela gjutningen var ca 1 timme.

Den tillsatta mängden stålfibrer var avpassad för att ge en mängd om ca 30 kg/m³. Urvaskningsprov för kontroll gjordes inte. Däremot tillverkades balkar som skickades till Vattenfall R&D för bestämning av residualhållfasthet. I balkarna bestämdes fibermängden till i genomsnitt 27 kg/m³ vid provning enligt SS-EN 14488-7 (Metod A), se Tabell 4.

Tabell 3 – Betongsammansättning för betong som användes vid pågjutningsförsök i Nykvarn.

Betongsammansättning, kg/m ³					
Cement Slite Bygg	Kalkfiller Limus 40	Grus 0/8 Riksten	Sikament 56	Vatten	Vct
445	124	1580	0,7 %	196	0,47



Figur 29 – Utläggning av pågjutning på HD/F-element.

Tryck- samt böjdrag- och residualhållfasthet framgår i Tabell 4. Tryckhållfastheten bestämdes vid Betongindustri AB:s laboratorium i Stockholm vid 1, 7 respektive 28 dygns ålder på kuber med kantlängden 10 cm. Balkarna för provning av böjhållfasthetsvärden hade måtten 75x125x550 mm. Provningen utfördes med metod VU-SC:21, som motsvarar den amerikanska provningsmetoden ASTM C1018-89 modifierad i enlighet med CBI rapport 3:97.

Man kan konstatera att den stålfiberarmerade betongen, trots ett relativt lågt fiberinnehåll, gav väldigt bra värden. Som jämförelse kan nämnas att ett vanligt krav på fiberbetong som levereras som sprutbetong vid tunnelbyggen är att böjdrag- respektive residualhållfastheten skall vara högre än 4 respektive 3 MPa. Normalt kräver detta fibermängder på ca 50-60 kg/m³.

Tabell 4 – Resultat från provning av tryckhållfasthet och böjdraghållfasthet (metod VU-SC:21 motsvarande ASTM C 1018-89 med modifiering enligt CBI rapport 3:97).

Betongegenskaper			
Egenskap		Betong utan fibrer	Betong med fibrer
Tryckhållfasthet, MPa	1 d	15,5	-
	7 d	47,5	-
	28 d	56,5	-
Böjdraghållfasthet, MPa	Balk 1	4,9	5,6
	Balk 2	5,9	5,7
	Balk 3	5,6	5,5
	Medelvärde	5,5	5,6
Residualhållfasthet, MPa	Balk 1	-	3,1 (23)*
	Balk 2	-	3,4 (29)*
	Balk 3	-	3,1 (29,5)*
	Medelvärde	-	3,2 (27)*

*Fibermängd bestämd enligt SS-EN 14488-7(Metod A)

3.2.3 Härdning

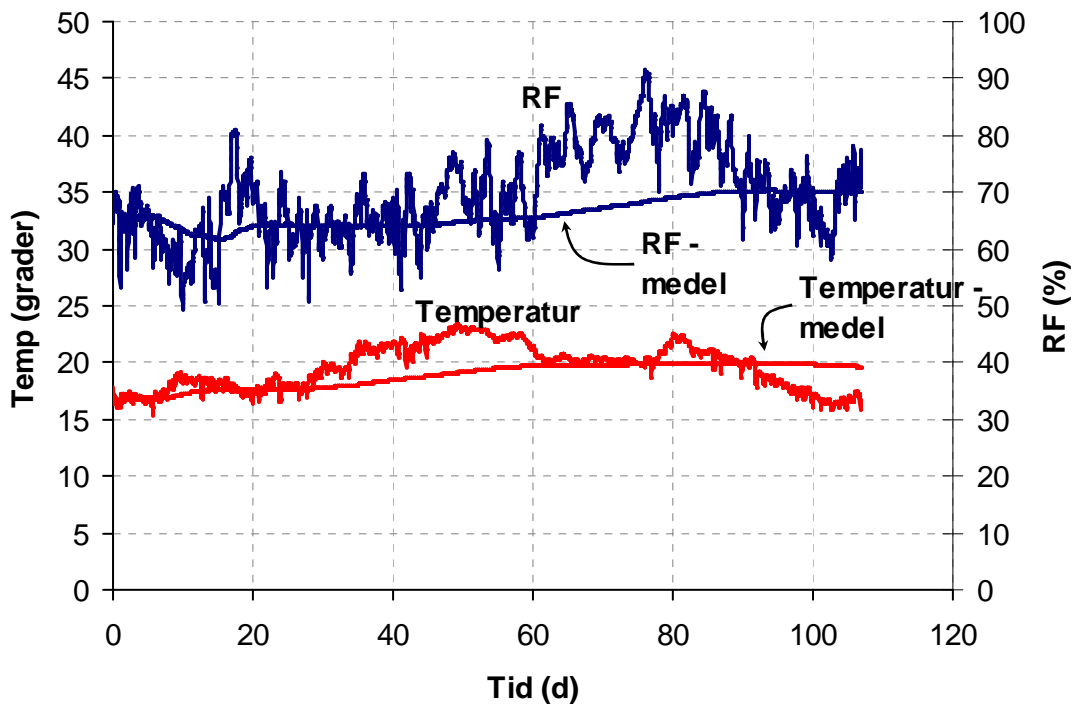
I Figur 25 framgår att halva pågjutningen på varje platta (delområde A och B) härdades under plastfolie medan den andra delen (delområde C och D) lufthärdades, se även Figur 30. För att efterlikna ett verkligt fall lades plastfolien ut direkt på morgonen dagen efter gjutning, dvs efter ca 17 timmar. Plastfolien fick därefter ligga kvar i 7 dygn. Orsaken till att man ofta väljer att vänta vid verkliga gjutningar är att det är svårt att komma ut på den nygjutna betongen utan att förstöra ytan. Tyvärr visade det sig att sprickor hade uppstått inom vissa områden redan innan plastfolien hade kommit på plats (se Figur 34-Figur 39), vilket visar att denna väntetid inte är att rekommendera.



Figur 30 – Plastfolie utlagd över halva pågjutningen på varje platta (fält A och B).

Härdningsklimatet under hela försöksperioden, 26 maj – 9 september 2010, redovisas i Figur 31. Det framgår att den relativa fuktigheten (RF) i genomsnitt låg på ca 60-70 % medan temperaturen uppgick till ca 20°C. Vid jämförelse med föregående försök (se Figur 13) var uttorkningsförhållandena således något tuffare.

Klimat - hela försöksperioden

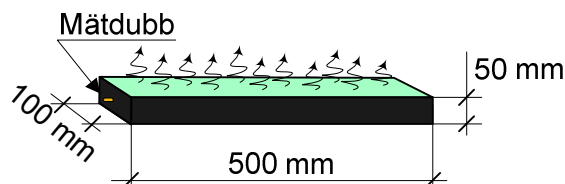


Figur 31 – Uttorkningsklimat under försöksperioden bestämt med logger typ Testo 175-H2.

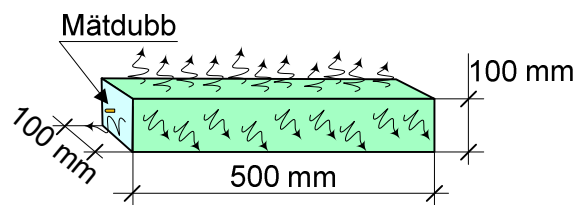
3.2.4 Fri krympning

I samband med pågjutning tillverkades prismor för bestämning av fri krympning. Två prismor hade måtten 100x100x500 mm medan två tillverkades med dimensionen 50x100x500 mm. De förstnämnda lagrades så att de kunde torka åt alla håll medan övriga två isolerades på undersida, långsidor och ändrar så att de endast torkade genom överytan. Därmed kunde uttorkningsförhållandena i pågjutningarna simuleras.

Prisma för simulering av pågjutning



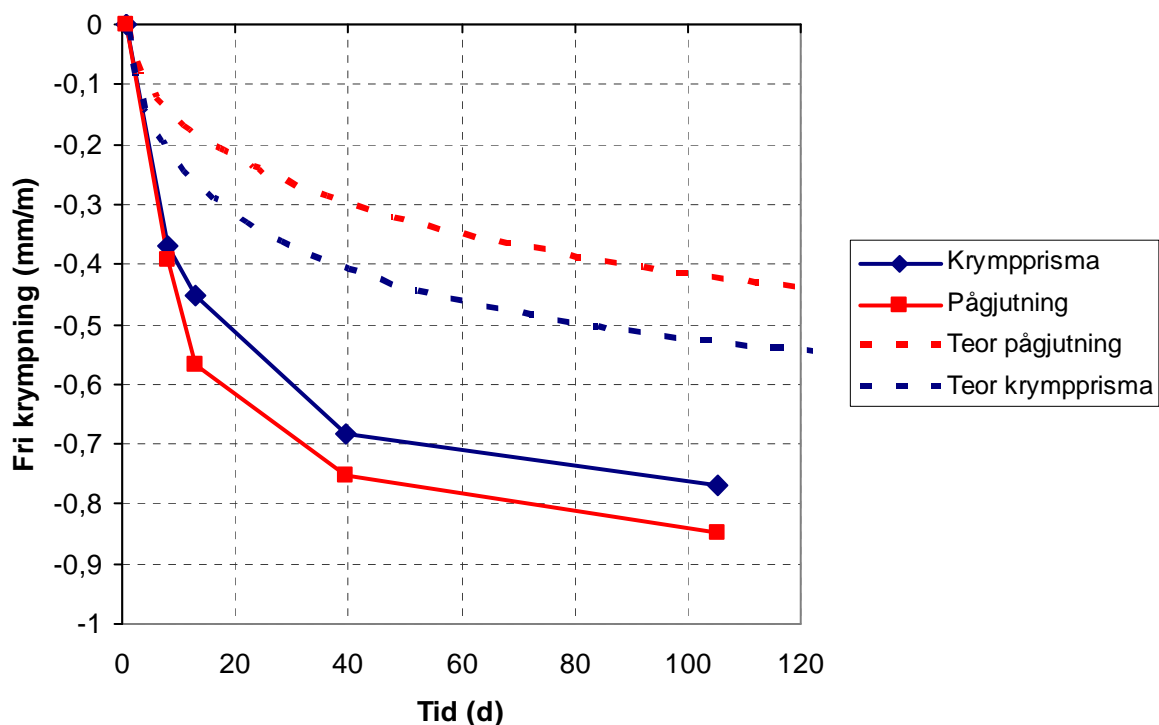
Prisma för fri krympning



Figur 32 – Prismor för bestämning av fri krympning. Prisma till vänster hade samma tjocklek som pågjutningarna och förseglades längs alla ränder utom uppåt. Till höger visas prisma som torkade från alla ytor, med tjocklek 100 mm.

Resultat från mätning av fri krympning redovisas i Figur 33. Som jämförelse visas teoretiska värden beräknade med modell som beskrivs i Betonghandboken – Material. Det framgår att verklig krympning i det aktuella fallet är avsevärt större än teoretisk. Man kan även konstatera att krympförloppet blev något högre för den tunna provkroppen med ensidig uttorkning (benämnd pågjutning).

Orsaken till att krympningen i den aktuella undersökningen blev avsevärt större än vid den föregående studien kan man endast spekulera om. En bidragande orsak är självklart att klimatet var något tuffare i Nykvarn jämfört med i tältet som användes i Göteborg. Betongsammansättningarna är en annan parameter med potentiell inverkan. Utöver olika vct kan det vara intressant att nämna att betongen i aktuellt fall innehöll kalkfiller medan man i Göteborg istället stabiliserade den självkompakterande betongen med viskositetsmodifierande medel (VMA). Givetvis kan även egenskaper hos ballastmaterial ha betydelse på krympningen.



Figur 33 – Fri krympning bestämd med krympprismor (100x100x500 mm) med uttorkning i alla riktningar respektive provkropp som efterliknar pågjutningen (50x100x500 mm) med ensidig uttorkning. Jämförelse med teoretisk beräkning med modell som ges i Betonghandboken.

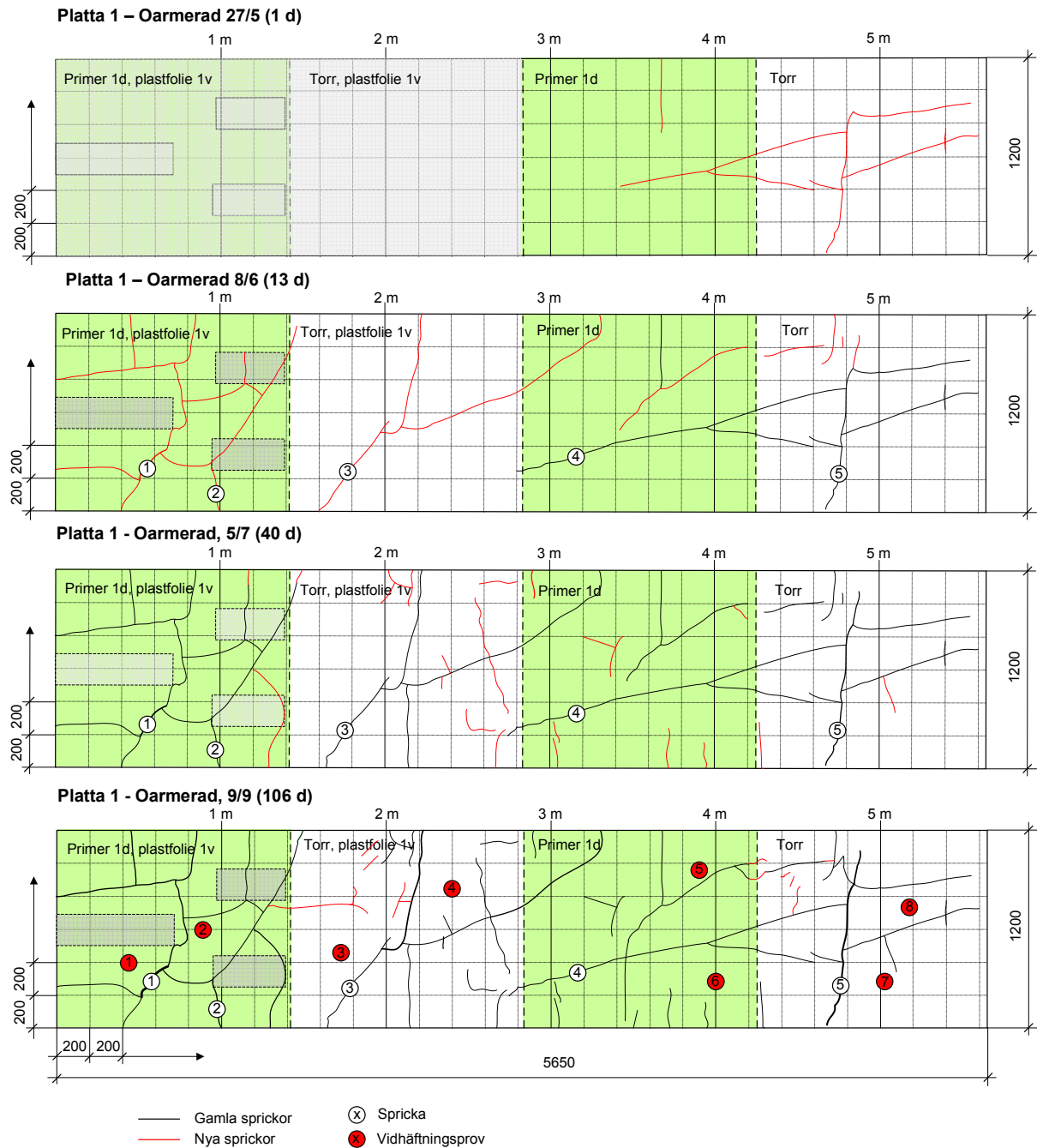
3.3 Resultat

3.3.1 Sprickor

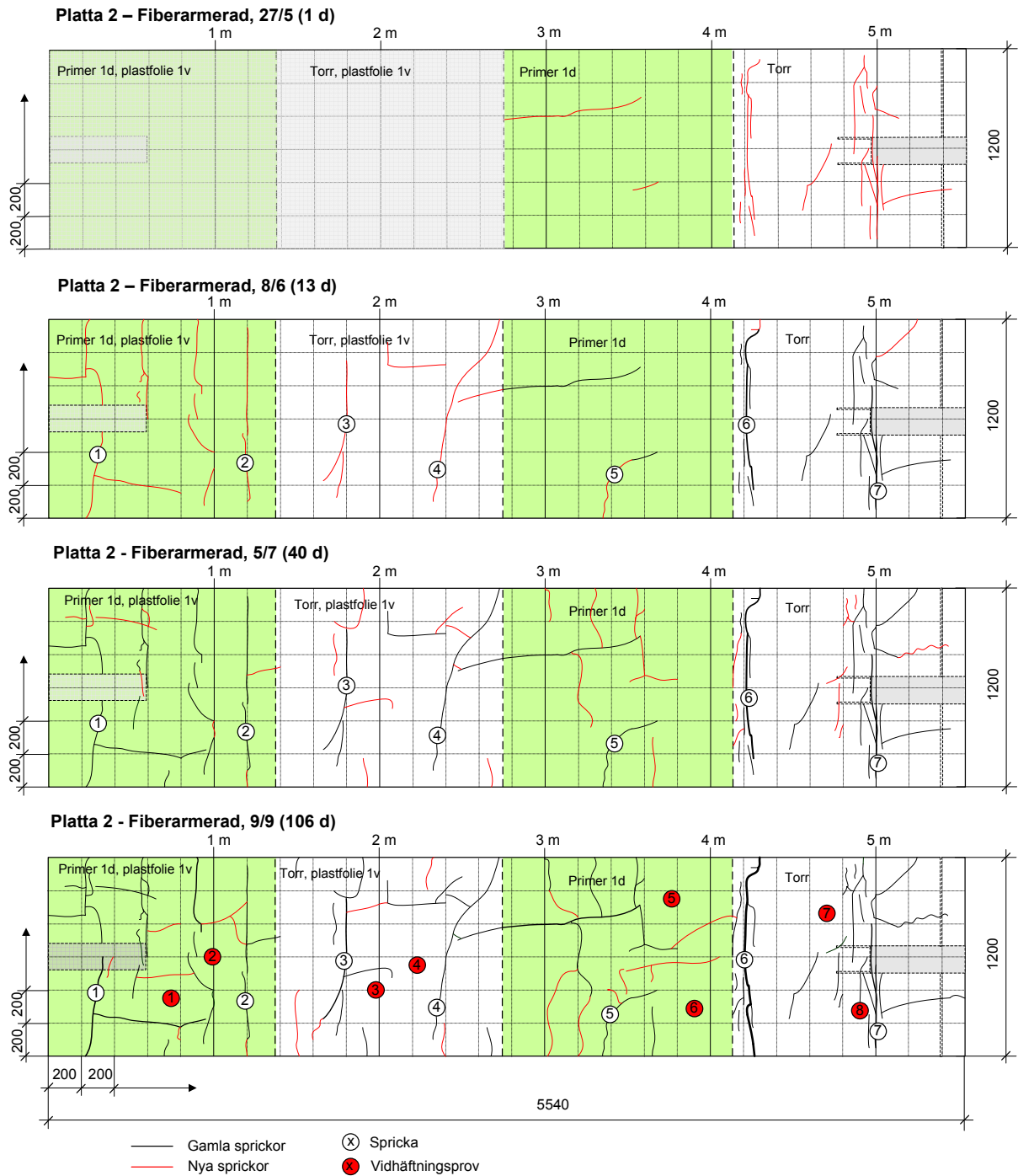
Resultat från sprickkartering utförd vid fyra olika tidpunkter (1, 13, 40 respektive 106 dygn efter pågjutning) redovisas i Figur 34 - Figur 39 för de olika plattorna.

Som nämnts tidigare var det lite olyckligt att intäckning med plastfolie sköts upp till dagen efter pågjutning. Detta medförde att sprickor redan hade hunnit bildas vid 1-dygnsmätningen i flera av pågjutningarna. Sannolikt innebar detta även att härdningen hade en mycket begränsad påverkan på sprickbildningen.

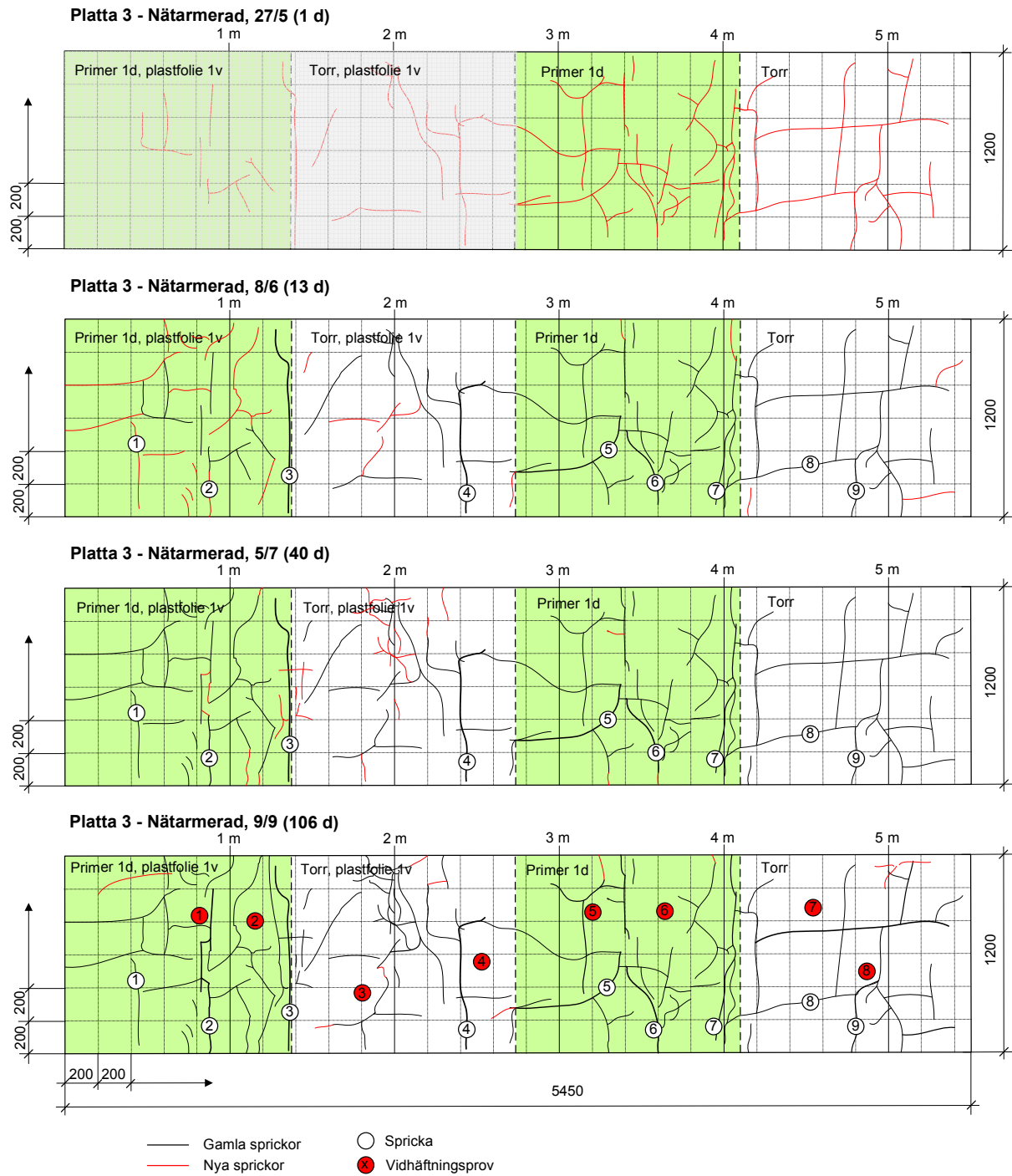
I övrigt kan konstateras att nya sprickor bildades mellan varje mättillfälle och att sprickfrekvensen i slutet var relativt omfattande i de flesta delar av de olika pågjutningarna. Det är svårt att enbart utifrån sprickkarteringen bilda sig en uppfattning om vilken av förbehandlingarna eller armeringsalternativen som gav bäst effekt med avseende på sprickminimering.



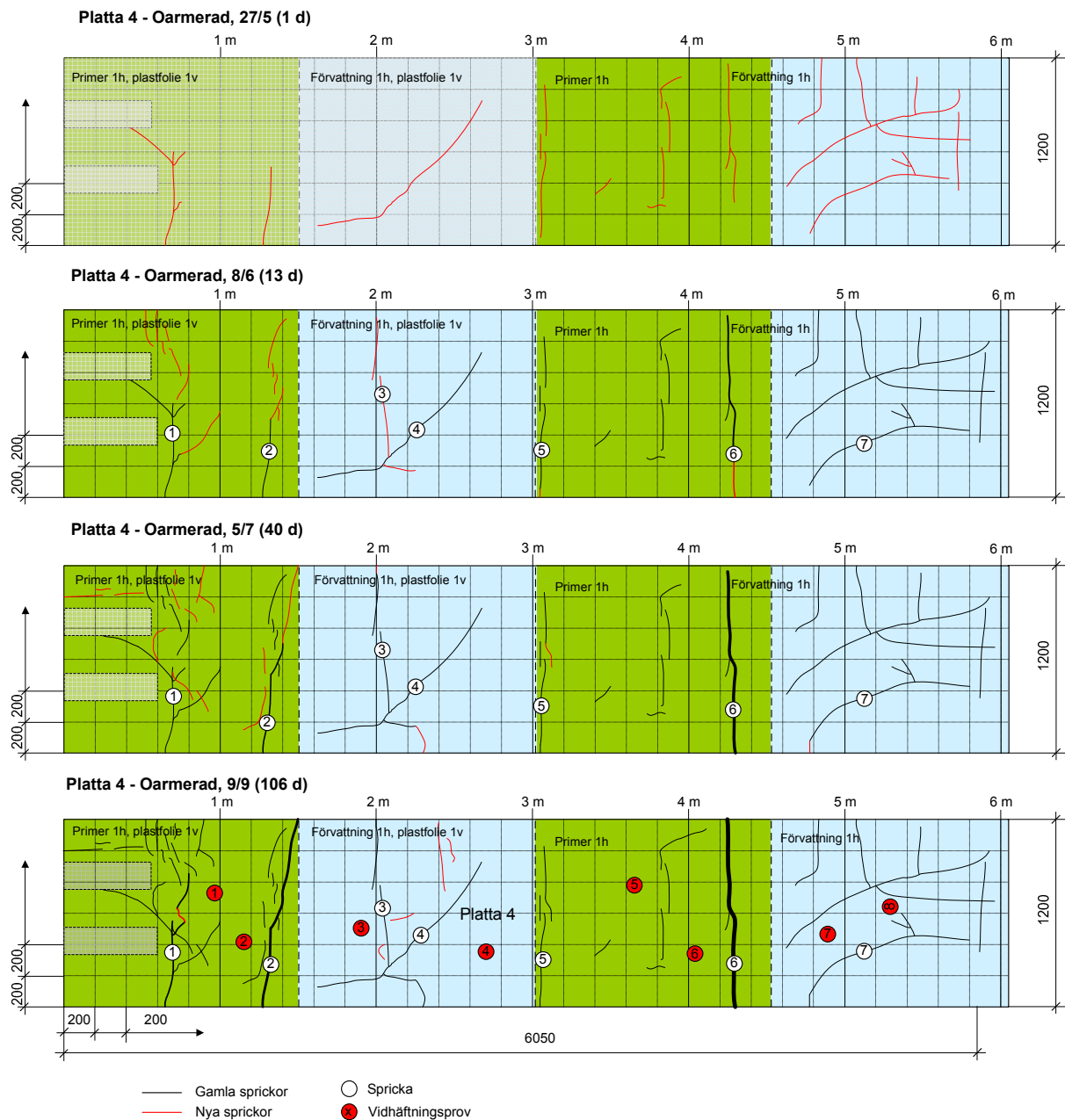
Figur 34 – Sprickkartering vid fyra olika tillfällen i pågjutning på platta 1. De sprickor som har nummererats har fotats och mätts med USB-mikroskop. Notera även att lägen för vidhäftningsprovning har indikerats i den nedersta bilden.



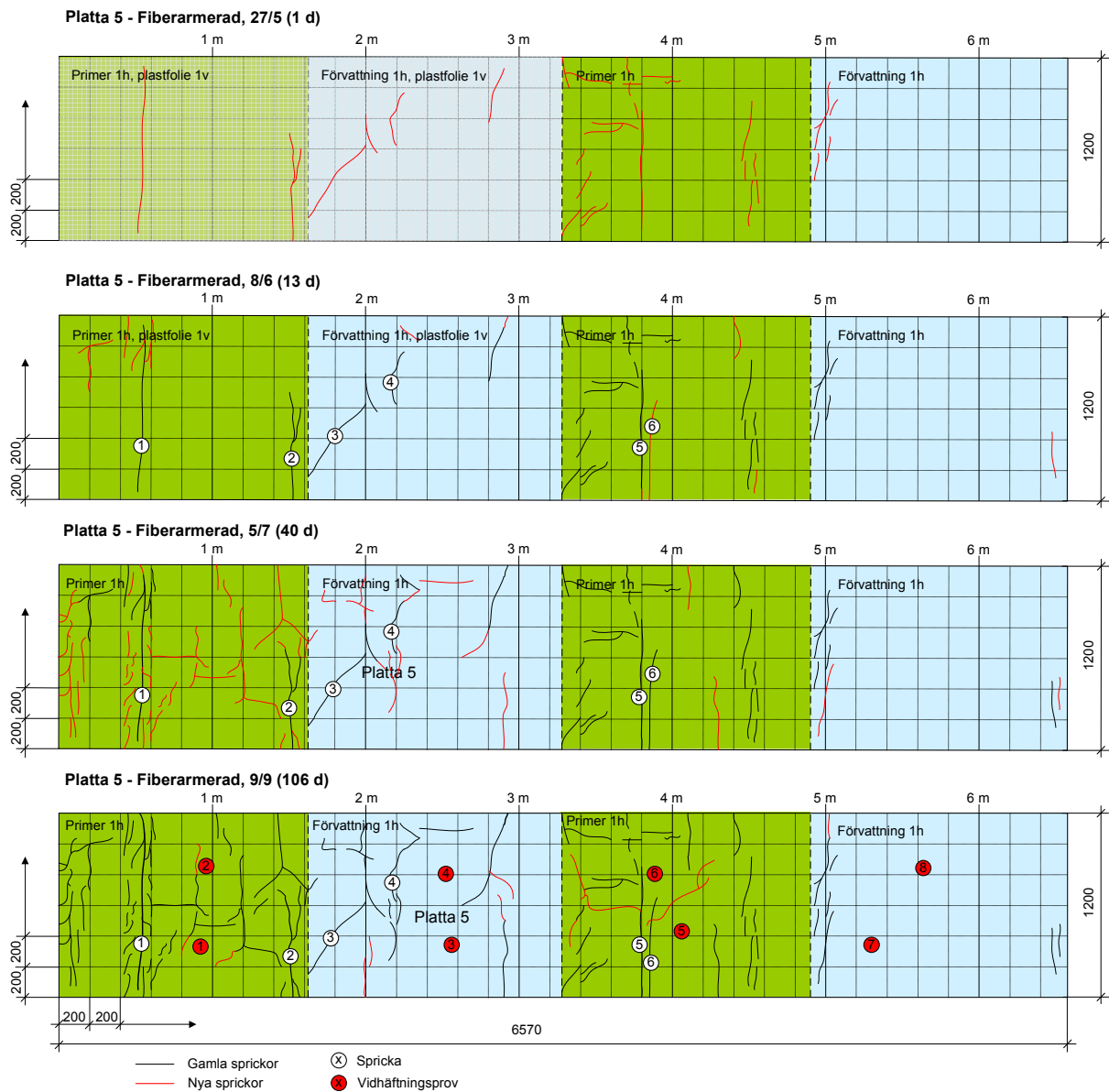
Figur 35 – Sprickkartering vid fyra olika tillfällen i pågjutning på platta 2. De sprickor som har numrerats har fotats och mätts med USB-mikroskop. Notera även att lägen för vidhäftningsprovning har indikerats i den nedersta bilden.



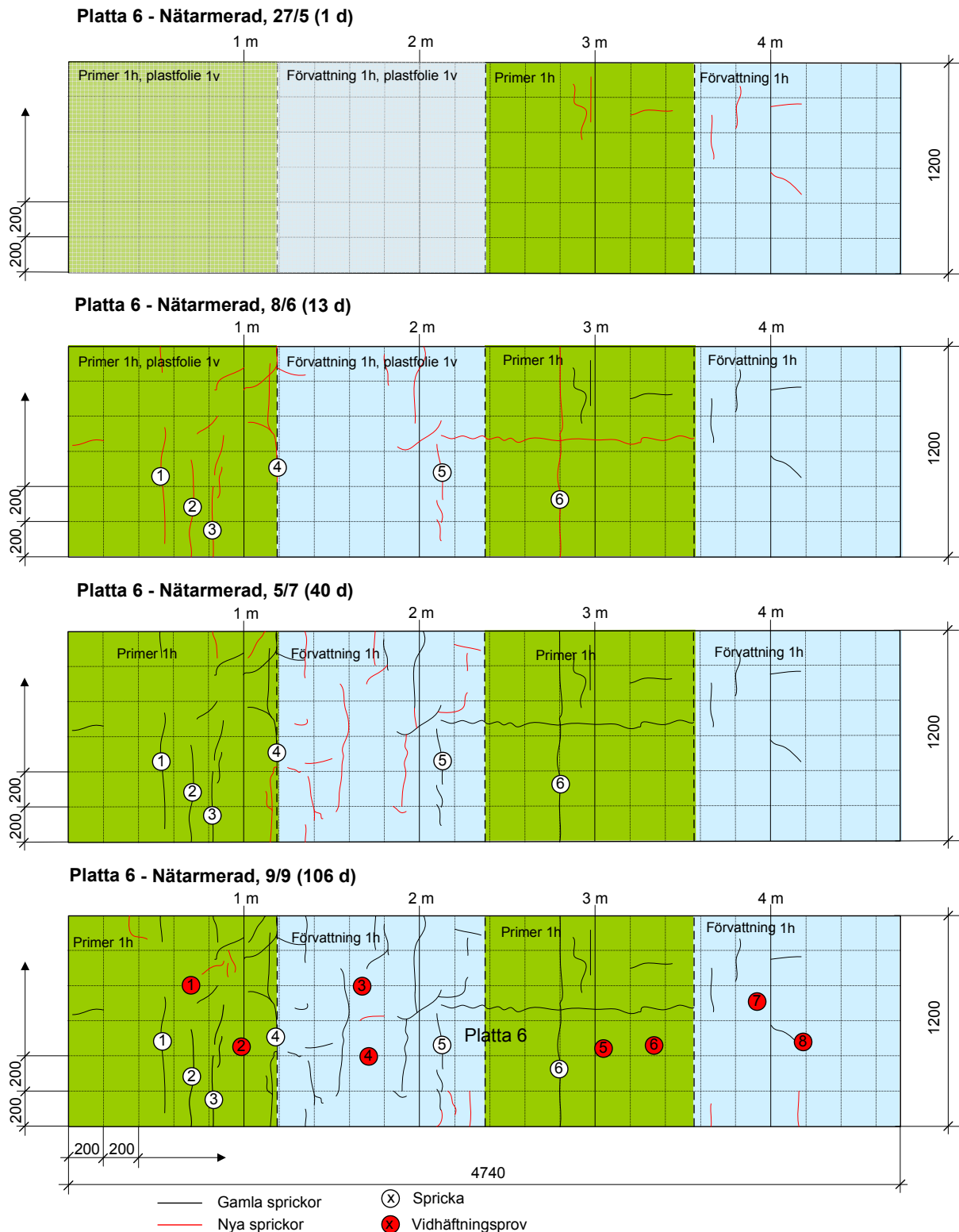
Figur 36 – Sprickkartering vid fyra olika tillfällen i pågjutning på platta 3. De sprickor som har numrerats har fotats och mätts med USB-mikroskop. Notera även att lägen för vidhäftningsprovning har indikerats i den nedersta bilden.



Figur 37 – Sprickkartering vid fyra olika tillfällen i pågjutning på platta 4. De sprickor som har nummererats har fotats och mätts med USB-mikroskop. Notera även att lägen för vidhäftningsprovning har indikerats i den nedersta bilden.



Figur 38 – Sprickkartering vid fyra olika tillfällen i pågjutning på platta 5. De sprickor som har nummererats har fotats och mätts med USB-mikroskop. Notera även att lägen för vidhäftningsprovning har indikerats i den nedersta bilden.



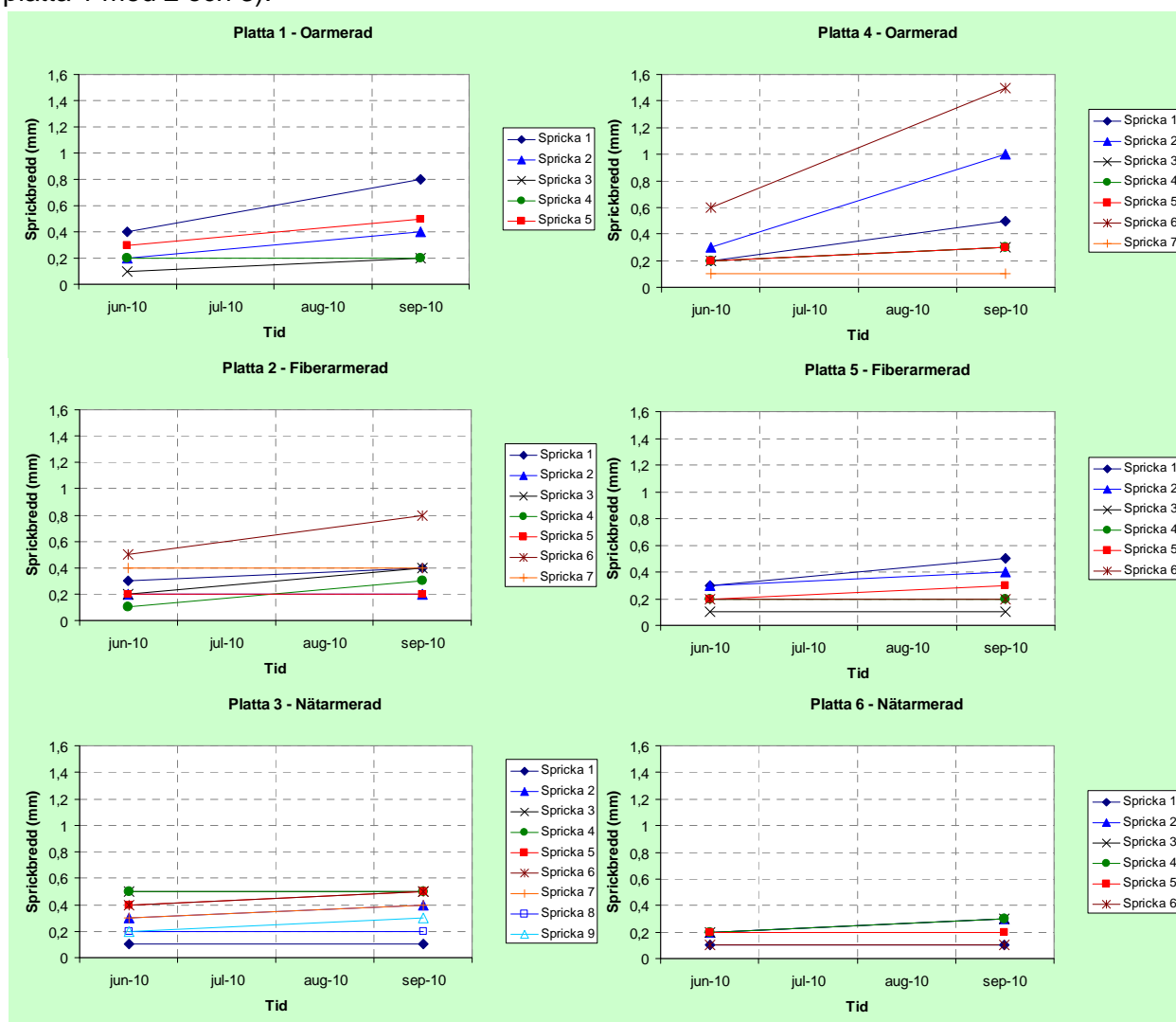
Figur 39 – Sprickkartering vid fyra olika tillfällen i pågjutning på platta 6. De sprickor som har numererats har fotats och mätts med USB-mikroskop. Notera även att lägen för vidhäftningsprovning har indikerats i den nedersta bilden.

För att få en bättre uppfattning om effekten av olika förbehandlingar och armering på spricktillväxten bestämdes sprickbredden på ytan hos några av de sprickor som bedömdes vara dominerande på varje pågjutningsdel. Mätning utfördes med ett USB-mikroskop. Lägen

för aktuella sprickor framgår i Figur 34 - Figur 39. Sprickbredden mättes vid två olika tillfällen, 13 respektive 106 dygn efter gjutning.

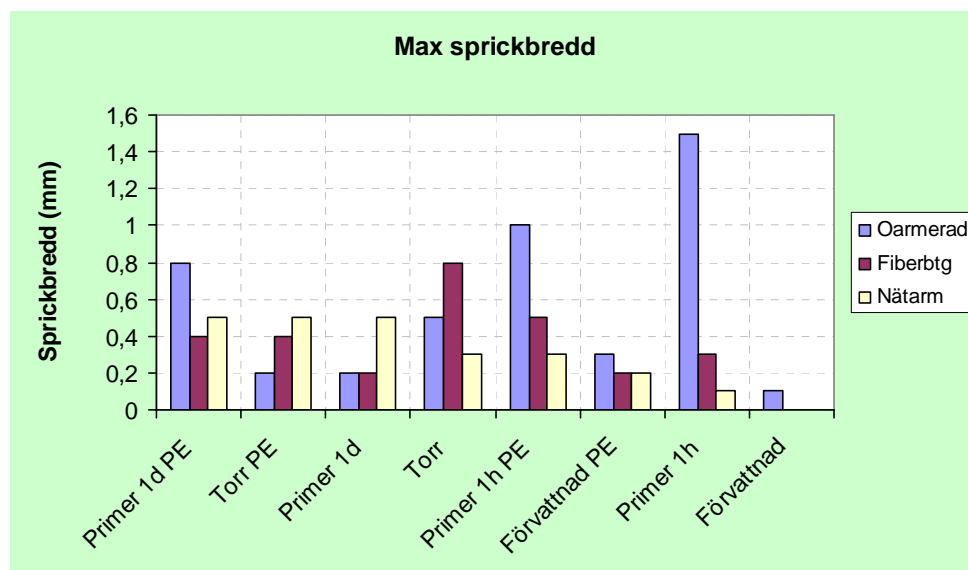
Resultat från sprickbreddsmätningen redovisas i Figur 40. Även i detta fall är det svårt att uttyda hur olika faktorer har påverkat spricktillväxten. Det enda som är tydligt är att de största sprickbredderna uppstod i platta 4, som var oarmerad och där ytan var primad respektive förvattnad just före pågjutning. Man kan även konstatera att sprickbreddsökningen mellan de två mättillfällena var klart störst i detta fall. Jämförelse mellan platta 1 och 4 (oarmerade) tyder på att de förbehandlingsalternativ som användes på platta 1 (torrt respektive primer dagen före) var bättre alternativ.

När det gäller betydelsen av förbehandling kan man annars få intrycket av att priming eller förvattning i sent skede är gynnsamt eftersom den maximala sprickbredden i platta 5 och 6 är mindre än i platta 2 och 3 (med samma armeringsalternativ men annan förbehandling). En mer sannolik orsak till att sprickbredderna har begränsats i platta 5 och 6 är dock att vidhäftningen var obefintlig, se avsnitt 3.3.2. Detta kan ha medfört att man istället för en sprickbreddsökning har fått ett vidhäftningsbrott som har fortplantats under i stort sett hela pågjutningen. Hur man än ser på den saken kan konstateras att armering (både nät och fibrer) verkar vara viktigare om vidhäftningen är dålig (jämför platta 4 med 5 och 6 respektive platta 1 med 2 och 3).



Figur 40 – Ökning av sprickbredd hos vissa av de uppkomna sprickorna (se numrering i Figur 34 - Figur 39) mellan den 8 juni och 9 september 2010.

I Figur 41 visas maximal sprickbredd inom varje delområde på de olika plattorna. Det är svårt att dra några slutsatser. Värt att notera är att härdning under PE-folie inte gav någon direkt effekt på maximala sprickbredden, vilket självklart kan vara kopplat till att folien lades på för sent.



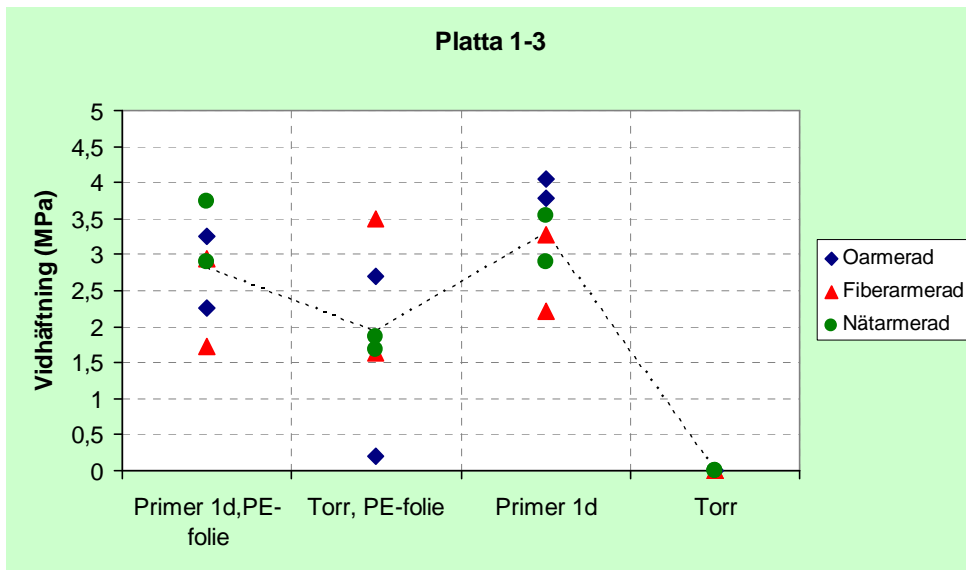
Figur 41 – Maximalt uppmätt sprickbredd i slutet av försöksperioden inom delytor med olika förbehandling.

3.3.2 Vidhäftning

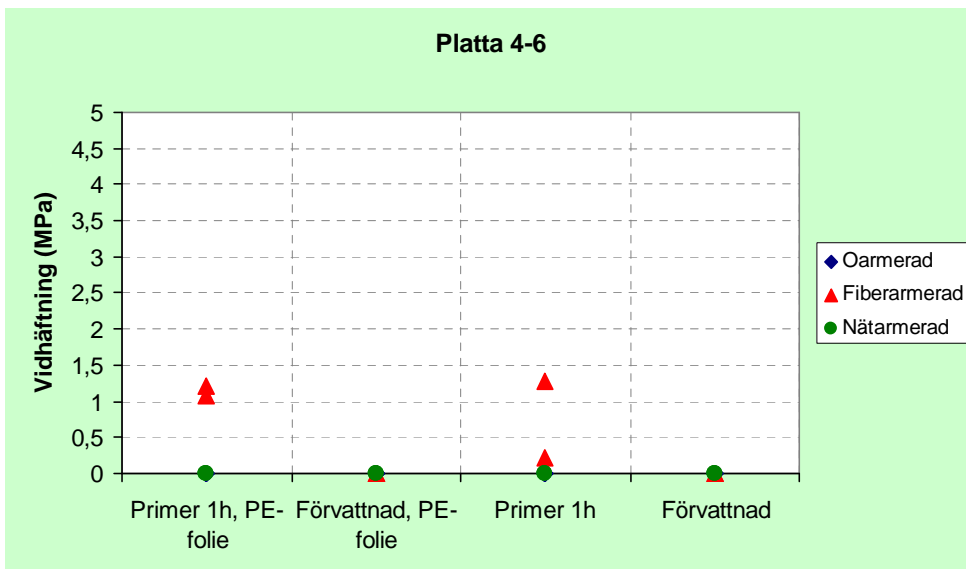
Vidhäftning mättes på samma sätt som i föregående försök genom utdragsprovning, se Figur 19. Två prover togs inom respektive delområde. Resultat sammanfattas i Figur 42 och Figur 43. Det som man direkt kan konstatera är att vidhäftningen blev betydligt bättre på platta 1-3 jämfört med platta 4-6. Med andra ord är vattning eller priming i ett sent skede helt förkastligt ur ett vidhäftningsperspektiv (platta 4-6).

Resultaten i Figur 42 tyder på att primer som påförs dagen innan pågjutning så att den hinner filmbilda var den bästa förbehandlingsmetoden. Även torrt underlag gav bra vidhäftning inom de delområden som härdades under PE-folie. Detta skulle kunna tyda på att härdningen är extremt viktig om man gjuter på ett torrt underlag. En annan möjlig förklaring skulle kunna vara att delområdet som var torrt och inte härdades under PE-folie var beläget i ytterkant av plattan. Denna del är sannolikt känsligare än ett inre fält eftersom kantresning och fogbrott gärna vandrar in från kanten.

En annan intressant observation som kan göras om man studerar resultaten i Figur 43 är att hygglig vidhäftning uppnåddes inom delområden som hade primats ca 1 timme innan pågjutning hos fiberarmerad betong. Detta tyder på att fibrerna hade en gynnsam effekt på vidhäftningen. Det kan vara intressant att nämna att liknande resultat även uppnåddes vid föregående försök i Göteborg. Enligt Figur 21 var vidhäftningen för primat underlag (primer 1) betydligt högre i platta D (fiberarmerad pågjutning) jämfört med i övriga plattor (oarmerad pågjutning). Det är inte lätt att ge en förklaring till detta. Möjligen finns det en koppling till fibrernas effekt på sprickbildning nära motgjutningsytan.



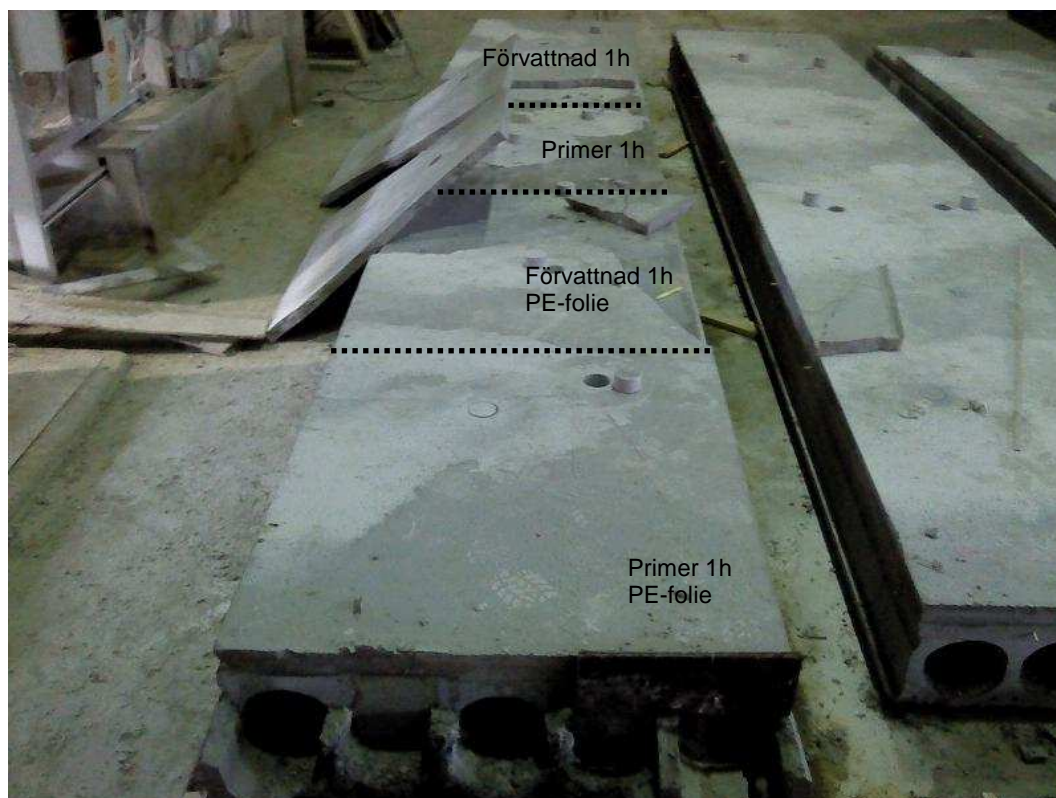
Figur 42 – Uppmätt vidhäftning hos de olika delområdena på platta 1, 2 och 3.



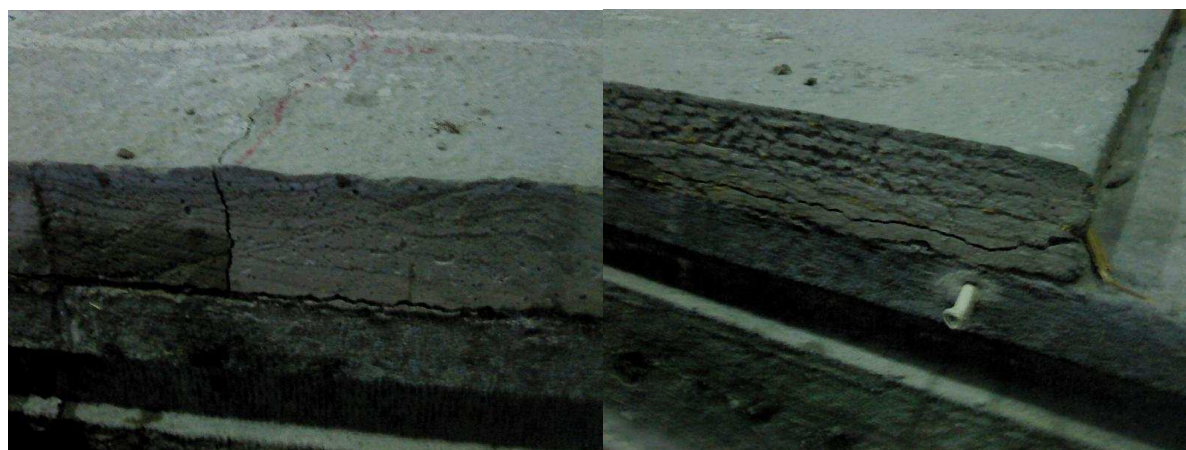
Figur 43 – Uppmätt vidhäftning hos de olika delytorna på platta 4-6. Notera att samtliga värden var noll med undantag för de ytor på platta 5 (fiberarmerad) som hade primats.

Den obefintliga vidhäftningen hos pågjutningarna på platta 4-6 framgår tydligt på fotot som redovisas i Figur 44. På bilden visas hur pågjutningen på platta 4 (oarmerad) delvis har lyfts bort från HD/F-plattan. Det kan vara värt att nämna att även pågjutningarna på platta 5 och 6 till viss del gick att lyfta bort från underlaget.

Noterbart är även att fogbrott uppstod både vid större sprickor och i ytterkant på varje pågjutning, se Figur 45. Att fogsprickor söker sig in från ytterkanten innebär att pågjutningen i de yttre fälten på varje platta får lite andra förutsättningar än de inre fälten.



Figur 44 – Pågjutningen på förvattnade ytor och en av de primade ytorna på platta 4 (oarmerad betong) lyftes bort helt och hållet i slutet av försöksperioden. Den enda ytan som inte gick att lyfta bort var den som hade primats och täckts med PE-folie.



Figur 45 – Fogbrott som uppstod vid en spricka i (a) och i ytterkant (b).

4 Slutsatser

4.1 Allmänt

I rapporten beskrivs två undersökningar av tunna pågjutningar på HD/F-element. Avsikten var att försöka hitta det bästa möjliga tillvägagångssättet med avseende på sprickbildning och vidhäftning. Därför studerades flera olika metoder för behandling av motgjutningsytan innan pågjutning, olika armeringsalternativ samt inverkan av härdning.

Några slutsatser avseende effekten av olika parametrar på vidhäftning och sprickbildning ges i nästa avsnitt.

4.2 Vidhäftning

Med ledning av resultat från de båda försöksserierna kan följande slutsatser dras avseende faktorer som påverkar vidhäftningen mellan pågjutning och HD/F-platta.

Förbehandling av motgjutningsyta

- Om primer används är utförandet mycket viktigt. Resultat tyder på att primer skall påföras i god tid före pågjutning så att den hinner filmbilda. I den andra försöksserien påfördes primer ca 1 h före pågjutning. Detta resulterade i flera fall av totalt vidhäftningssläpp. När samma typ av primer påfördes dagen före pågjutning blev vidhäftningen å andra sidan hög och jämn.
- Även fabrikatet verkar ha betydelse vid användning av primer. Två olika typer av primer jämfördes i den första serien (Göteborg). Resultat tyder på att vidhäftningen varierade beroende på vilken typ som användes. Det bör dock påpekas att båda typerna som användes i den första serien gav lägre vidhäftning än den som användes i den andra serien (Nykvarn) vid rätt utförande.
- Förvattning i ett sent skede kan få katastrofala följder för vidhäftningen. I den andra serien (Nykvarn) blev vidhäftningen i princip obefintlig i områden som hade förvattnats ca 1 h innan pågjutning.
- Förvattning i god tid innan pågjutning (dagen före) gav dock väldigt hög vidhäftning i den första serien (Göteborg).
- Torrt underlag gav hög vidhäftning i Göteborg men sämre i Nykvarn. Möjligen kan det finnas en koppling till härdningsbetingelserna enligt nedan.
- Slamning, som provades i Göteborg, gav hygglig vidhäftning men relativt stor spridning. Detta tyder på att metoden var sämre än vissa av de övriga förbehandlingsmetoderna.

Härdning

- En intressant observation från Nykvarn är att vidhäftningen blev bättre i de torra områden som härdades under plastfolie. Detta skulle kunna tyda på att härdningen är extremt viktig om underlaget är torrt. Möjligen kan orsaken vara att ett torrt underlag suger vatten från pågjutningen, varvid en otillräcklig härdning ger upphov till ett underskott av vatten för att vidhäftning skall kunna utvecklas optimalt.
- I Göteborg kunde man inte se samma gynnsamma inverkan av härdning vid torrt underlag. Möjligen kan förklaringen på detta vara att klimatet i Göteborg var betydligt fuktigare än i Nykvarn, vilket gjorde härdningsåtgärder överflödiga.

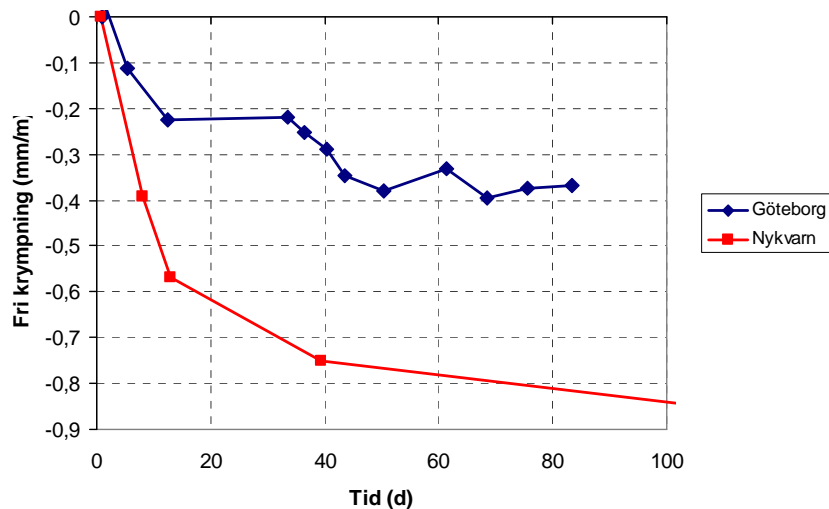
Armering

- I båda undersökningarna blev vidhäftningen generellt bättre där pågjutningen var stålfiberarmerad. Möjligen kan man därmed dra slutsatsen att stålfibrer har en positiv effekt på vidhäftningen.

4.3 Sprickbildning

Baserat på resultat från de två försöksserierna kan följande slutsatser dras avseende effekten av olika parametrar på sprickbildning i pågjutningar.

- Pågjutningens *krympning* har givetvis stor betydelse för uppsprickningen. Den betydligt lägre krympningen i den första serien (se Figur 46) är sannolikt ett av huvudskälen till att sprickorna blev färre men framför allt finare än i den andra serien. Förklaringen till krympskillnaden kan troligen förklaras av att klimatet skiljde sig åt vid de två tillfällena. Det är även troligt att skillnader i betongsammansättning kan ha haft betydelse.
- En annan viktig parameter för sprickbildningen är givetvis *vidhäftningen* som generellt var bättre i den första serien. I båda serierna uppstod de största sprickorna inom områden med låg vidhäftning.
- Armering har sannolikt en större betydelse om vidhäftningen är låg. I den andra serien (Nykvarn) uppstod ett par sprickor med väldigt stor bredd (1-2 mm) i oarmerad pågjutning medan sprickor som uppstod inom motsvarande delområden i pågjutningar med nätarmering eller stålfibrer var betydligt finare (max ca 0.3-0.5 mm).



Figur 46 – Jämförelse fri krympning uppmätt i Göteborg respektive Nykvarn hos prismor med ensidig uttorkning.

5 Rekommendationer

5.1 Förbehandling

Baserat på resultat från pågjutningsförsök som har gjorts på HD/F-plattor rekommenderas att följande åtgärder utförs innan pågjutning:

- Noggrann rengöring av underlaget för att få bort lösa partiklar och andra föroreningar
- Förvattning av underlaget skall avslutas på kvällen dagen före pågjutning så att ytan inte är fuktig vid pågjutningstillfället.
- Även primer kan användas, men det är viktigt att välja ett fabrikat som har vidhäftningshöjande effekt. Primern skall påföras dagen före pågjutning så att den hinner filmbilda.

Förbehandlingar som absolut måste undvikas om man skall få ett bra slutresultat är förvattning och priming i ett sent skede. Resultat har tydligt visat att påföring av primer eller vatten strax före pågjutning helt kan förstöra förutsättningarna att få vidhäftning.

5.2 Val av betong

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

5.3 Armering

Armering med nät eller stålfibrer minskar risken för att stora, besvärande sprickor skall uppstå. Resultat tyder på att armeringen är särskilt betydelsefull om man inte lyckas uppnå fullgod vidhäftning. Vid goda vidhäftningsförhållanden är armeringen mindre viktig.

Det kan även vara värt att nämna att stålfibrer verkar ha en gynnsam inverkan på vidhäftningen. I genomförda undersökningar har fibermängden varit ungefär 25-30 kg/m³.

5.4 Härdning

Härdningen verkar ha stor betydelse för både sprickbildning och vidhäftning. Åtgärder måste vidtas inom några timmar efter pågjutning. Om härdningsåtgärder vidtas för sent är de sannolikt helt verkningslösa. Denna rekommendation kan ges baserat på resultat från den andra försöksserien, där plastfolie lades ut dagen efter pågjutning. Resultat visar att det både hade hunnit bildas sprickor och att vidhäftningen överlag blev betydligt sämre i denna försöksserie jämfört med den första.

En möjlig åtgärd kan vara att se till så att lokalen som man gjuter i är helt tät så att den fukt som finns i betongen stannar kvar i den omgivande luften. Detta tillvägagångssätt har visat sig fungera i ett antal verkliga projekt. Om detta inte är möjligt bör härdning med vatten, plastfolie eller en effektiv membranhärdningsvätska påföras inom några timmar efter pågjutning.

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

Referenser

Betongrapport 13 (2008) "Industrigolv – Rekommendationer för projektering, materialval, produktion, drift och underhåll," Svenska Betongföreningen.

Betonghandboken – Material (1997) "Betonghandbok – Material," Svensk Byggtjänst, 2:a utgåvan, Stockholm.

Carlswärd, J. (2006) "Shrinkage cracking of steel fibre reinforced self compacting concrete overlays – Test methods and theoretical modelling," *Doctoral Thesis 2006:55*, Division of Structural Engineering, Luleå University of Technology, Luleå.

SBUF projekt nr 12001 " Delrapport 1 – Vidhäftningsprovning," version 2009-01-22.