



CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Sprickbildning i frostskadad betong

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

Andreas Ekholm
Melvin Gustafsson

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för konstruktionsteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Examensarbete ACEX20 Ekholm, Andreas och Gustafsson, Melvin
Göteborg, Sverige 2023

EXAMENSARBETE ACEX20

Sprickbildning i frostskadad betong

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

ANDREAS EKHOLM
MELVIN GUSTAFSSON

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för konstruktionsteknik

Ekholm, A. & Gustafsson, M.

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2023

Sprickbildning i frostskadad betong

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

ANDREAS EKHOLM

MELVIN GUSTAFSSON

© ANDREAS EKHOLM, MELVIN GUSTAFSSON, 2023

Examensarbete ACEX20

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Chalmers tekniska högskola 2023

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för konstruktionsteknik

Ekholm, A. & Gustafsson, M.

Chalmers tekniska högskola

412 96 Göteborg

Telefon: 031-772 10 00

Omslag:

Kilklyvningsförsök med DIC-system

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Göteborg 2023

Sprickbildning i frostskadad betong

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Samhällsbyggnadsteknik*

ANDREAS EKHOLM

MELVIN GUSTAFSSON

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för konstruktionsteknik

Ekholm, A. & Gustafsson, M.

Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

Betong är ett byggnadsmaterial som är vanligt förekommande i svensk infrastruktur, och som ofta utsätts för fukt till följd av väderexponering. Då vattnet växelvis fryser till is och tinar under de kalla vintermånaderna, utövas tryck i betongens porsystem, vilket riskerar leda till sprickbildningar. Dessa frostcykler orsakar både nya sprickor, och att gamla sprickor kan växa sig större.

Detta arbete undersöker hur frostcykler inverkar på betong, med och utan befintliga sprickor, samt med och utan armering. Fokus har legat på hur sprickorna utbreder sig, och hur betongens egenskaper förändras. Resultat och slutsatser från tidigare utförd forskning har insamlats och sammanställts genom en litteraturstudie, parallellt med att ett experiment har utformats och utförts i Chalmers konstruktionslab.

Arbetet inleddes genom att en försöksplan utarbetades, och att ett betongrecept togs fram, varpå prov- och referenskroppar gjöts. Betongkropparna fick sedan härda under 28 dagar, nedsänkta i vatten. Genom kilklyvningsförsök förspäcktes därefter hälften av provkropparna, varpå samtliga provkroppar utsattes för noll respektive 100 eller 112 frostcykler. Under frostcyklerna var det viktigt att upprätthålla mängden vatten i provkropparna för att maximera den potentiella skadan i betongen. För att undersöka betongens hållfasthet utsattes referenskropparna därefter för tryckprover, samtidigt som egenfrekvensen hos prov- och referenskropparna bestämdes med ultraljudstester. Kilklyvningsförsök och avslutande ultraljudstest genomfördes slutligen, dels för att bestämma nedbrytningen hos provkropparna, dels för att kartlägga och utvärdera sprickornas utbredning. Resultaten sammanställdes och utvärderades sedan utifrån de på förhand bestämda förutsättningarna: förspäckning, antal frostcykler och förekomst av armering.

Resultaten av ultraljudstesteterna visade att betongen var praktiskt taget opåverkad av frostcyklerna. Kilklyvningsförsöken gav i sin tur ett sprickmönster som inte skiljde särskilt mycket mellan provkropparna, vilket indikerar att betongen inte drabbades av frostsador. Orsaken till att frostcyklerna inte skadade betongen beror sannolikt på att mätnadsgraden inte var tillräckligt hög, vilket kan förklaras genom svårigheter med att bibehålla vattenhalten i proverna under frostcyklerna. Det kan även indikera att ett större antal frostcykler krävs för att skada betongen, och bör undersökas närmare i framtida forskning.

Nyckelord: Kilklyvning, kilklyvningsförsök, frostcykler, förspäckning, betong, armering

Cracking in frost-damaged concrete

*Degree Project in the Engineering Programme
Civil and Environmental Engineering*

ANDREAS EKHOLM

MELVIN GUSTAFSSON

Department of Architecture and Civil Engineering
Division of Structural Engineering
Ekholm, A. & Gustafsson, M.
Chalmers University of Technology

ABSTRACT

Concrete is a building material commonly used in Swedish infrastructure. Concrete is often exposed to moisture due to weather exposure: when water alternately freezes and thaws during the cold winter months, pressure is exerted on the concrete's pore system, which can lead to crack formation. These freeze-thaw cycles can lead both to the formation of new cracks and to the increase in width of existing cracks.

This study examines how freeze-thaw cycles affect concrete, both with and without existing cracks, as well as with and without reinforcement. It focuses on crack propagation and how the properties of the concrete changes. Results and conclusions from previous research have been collected and compiled through a literature review, alongside the design and execution of an experiment in Chalmers Structures Lab.

The work began by developing a test plan and deciding a concrete mix, followed by casting test and reference specimens. The concrete specimens were left to cure for 28 days, immersed in water. Subsequently, half of the test specimens were pre-cracked using wedge splitting tests, after which all specimens were subjected to either zero, 100 or 112 freeze-thaw cycles. During the frost cycles, it was important to maintain adequate water contents of the test specimens in order to damage the concrete. To investigate the strength of the concrete, the reference specimens were subjected to compression tests, and the eigenfrequency of both test and reference specimens were determined through ultrasonic tests. Finally, wedge splitting tests and concluding ultrasonic tests were performed to determine the degradation of the test specimens and to map and evaluate the extent of crack formation. The results were then compiled and analysed based on three different criteria: pre-cracking, number of freeze-thaw cycles, and presence of reinforcement.

The results of the ultrasonic tests showed that the concrete was unaffected by the freeze-thaw cycles. The wedge splitting tests resulted in crack patterns that did not differ significantly between the test specimens, indicating that the concrete was not damaged by the frost cycles. The lack of frost-induced damage is likely due to insufficient water content of the specimens, which can be explained by difficulties in maintaining water in the samples during the freeze-thaw cycles. It may also indicate that a higher number of freeze-thaw cycles are required to damage the concrete, and should be subjected to further tests in future research.

Key words: Wedge splitting, wedge splitting test, freeze-thaw cycles, pre-cracking, concrete, reinforcement

INNEHÅLL

1	BAKGRUND	1
1.1	Syfte	1
1.2	Metod	1
1.2.1	Avgränsningar	2
2	TIDIGARE FORSKNING	3
2.1	Sprickbildning i betong	3
2.2	Frost	3
2.2.1	Mättnadsgrad	4
2.3	Kilklyvning	4
2.4	DIC-system	5
2.5	Ultraljud	5
3	EXPERIMENT	6
3.1	Betong och armering	6
3.2	Gjutning och beredning av provkroppar	7
3.3	Egenfrekvens	8
3.4	Klimatexponering	8
3.4.1	Tätning av provkroppar	8
3.4.2	Isolering av provkroppar	10
3.4.3	Mättnad av provkroppar	10
3.4.4	Frostcykler	11
3.5	Kilklyvningsförsök	12
3.5.1	Förspräckning	12
3.5.2	DIC-system	12
3.6	Tryckhållfasthet	13
4	RESULTAT	14
4.1	Tryckhållfasthet	14
4.2	Kilklyvningsförsök	14
4.2.1	Färgkodning för jämförelse	15
4.2.2	Jämförelse med och utan förspräckning	16
4.2.3	Jämförelse med och utan frostcykler	17
4.2.4	Jämförelse med och utan armering	18
4.2.5	Sprickbildning	18
4.3	Uppmätta egenfrekvenser	20
4.4	Felkällor	20

4.4.1	Gjutning	20
4.4.2	Sågning	21
5	SLUTSATSER	22
5.1	Diskussion	22
5.2	Förslag på framtida studier	23
6	REFERENSER	24
	APPENDIX 1	26
	APPENDIX 2	27
	APPENDIX 3	28
	APPENDIX 4	44
	APPENDIX 5	48
	APPENDIX 6	53

FÖRORD

Denna rapport är resultatet av ett examensarbete på högskoleingenjörsprogrammet i samhällsbyggnadsteknik vid Chalmers tekniska högskola. Arbetet omfattar totalt 30 högskolepoäng (15 poäng per student) och har genomförts vid Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik, i samarbete med Norconsult.

Vi vill rikta ett stort tack till alla som på något vis har deltagit i detta arbete. Vi vill rikta ett särskilt varmt tack till vår examiner, tillika handledare, Karin Lundgren, våra båda handledare Langzi Chang (Chalmers) och Samanta Robuschi (Norconsult), och forskningsingenjör Sebastian Almfeldt (Chalmers), som alla genom sin hjälp och sakkunskaper varit med och format detta arbete.

Vi vill även rikta ett stort tack till Ingemar Löfgren på Thomas Concrete Group som tillhandahållit oss med gjutformar och bidragit med högt uppskattad kompetens under arbetets gång.

Göteborg, maj 2023
Andreas Ekholm
Melvin Gustafsson

1 BAKGRUND

Betong är ett vanligt byggnadsmaterial i bland annat vägar, broar, tunnlar och dammar, som ofta utsätts för fukt. Under de kallare delarna av året riskerar sprickbildningar uppstå i betongen till följd av att vattnet fryser till is och utövar tryck i betongens porsystem [1]. Frostcyklerna ger upphov till att nya sprickor bildas till följd av vattnets expansion eller att gamla sprickor – orsakade av tidigare frostcykler, spänningar från yttre last eller korrosion av armeringen – riskerar växa sig större, vilket i sin tur inverkar på betongens egenskaper [1][2]. Detta är ett regelbundet problem för exponerad betong, särskilt under vinterhalvåret, då varje ny frostcykel löper risk att skapa nya sprickor i betongstrukturen.

Effekten som frostcykler har på materialnivå har studerats ingående tidigare [1][2][3] medan dess effekter på redan existerande sprickor och övergripande strukturnivå inte alls fått samma uppmärksamhet. Därför är det intressant att undersöka hur frostcykler påverkar sprucken betong med avseende på hur sprickvidd och hållfasthet förändras. Det är även intressant att undersöka huruvida störningar i betongen, såsom armering, påverkar utbredningen av sprickbildningen.

1.1 Syfte

Arbetet syftar till att undersöka och utvärdera hur sprickbildningar till följd av upprepade frostcykler påverkar betong såväl med som utan redan befintliga sprickor, samt med och utan armering, med avseende på sprickornas utbredning och de förändringar i hållfasthet som följer därav.

Målet med arbetet är att erhålla ökad förståelse för

- hur betong och dess egenskaper påverkas av upprepade frostcykler,
- hur inverkan av frostcykler skiljer sig mellan ospruckna och redan spruckna betongkonstruktioner,
- hur sprickbildningens utbredning påverkas vid störning av till exempel armering.

1.2 Metod

En försöksplan utformades utefter vilken betongprover gjöts, varpå kilklyvningsförsök utfördes för att undersöka sprickbildningens utbredning samt eventuella förändringar i hållfasthet och elasticitet. Därutöver genomfördes litteraturstudier av tidigare forskning, hämtad från såväl tillgänglig fysisk litteratur som digitala databaser. De erhållna data sammanställdes och jämfördes med resultaten från tidigare forskning, i kombination med de slutsatser som kunde dras därav.

Experimentet utfördes i Chalmers konstruktionslabb.

1.2.1 Avgränsningar

Huvudsakligt fokus ligger på hur sprickbildningen varierar med avseende på antalet frostcykler och huruvida betongen har förspräckts, och/eller om provkropparna har armerats. Detta arbete tar inte hänsyn till huruvida korrosion förekommer, eller hur metallen kan tänkas skilja sig mot andra sorter. Det tas inte heller upp huruvida olika betongrecept, härdningsgrader eller om inverkan av klorider kan tänkas påverka sprickornas utbredning.

2 TIDIGARE FORSKNING

Den tidigare utförda forskningen beskriver frostcykler som komplexa utmattningssprickor, där varje ny cykel bidrar till en förökningsprocess av mikrosprickbildning inuti betongens porsystem [1]. Mikrosprickbildningen uppstår i porväggarna som därmed expanderar och kopplar samman de isolerade primära porerna, vilket gör att den inre porstrukturen ökar i storlek och blir mer sammanhängande. Detta leder till att betongens inre skelett kraftigt ökar i längd och innebär en betydande ökning av antalet förbindelser inom porsystemet.

Den bidragande effekt som exempelvis klorider och korrosion har på sprickbildning i betong finns även dokumenterad [4], men som tidigare fastslagits kommer detta inte tas upp i denna rapport.

2.1 Sprickbildning i betong

Sprickbildning i betong är vanligt förekommande hos betongkonstruktioner som utsätts för väderförhållanden [1] och sker fortlöpande, på ett flertal olika sätt [5]. Den vanligaste orsaken är när yttre last skapar spänningar som sliter sönder betongen till följd av dess låga draghållfasthet. Detta är anledningen till att armering används i betongkonstruktioner. Korrosion i armeringen är en annan vanlig orsak, då en förhöjning av oxider ger upphov till att det täckande betongskiktet spricker. När vatten avdunstar från betong riskerar det uppkomma uttorkningssprickor, men dessa är vanligtvis mycket små [6]. Därutöver kan förhindrade deformationer, i kombination med temperaturlaster eller krympning, ge upphov till sprickor.

2.2 Frost

Det finns två typer av frostsador i betong; inre skador och yttre skador [2]. De yttre ger sig tillkänna som ytavskalning till följd av frysning av betongytan då den är i kontakt med svag saltlösning. De inre skadorna, vilka denna rapport ämnar undersöka, orsakas av frysning av det vatten som fryser i

- de kapillära porerna i cementpastan,
- porer i finporösa och mättade grova ballastkorn,
- luftporer,
- djupa sprickor och
- gränssnittszoner mellan ballastkornen och cementpastan.

Frysning av rent vatten i fuktig betong orsakar sällan ytavskalning, men leder frekvent till interna skador. På samma sätt leder frysning av svaga saltlösningar vid betongytan sällan till inre skador, men resulterar desto oftare i ytavskalning [2].

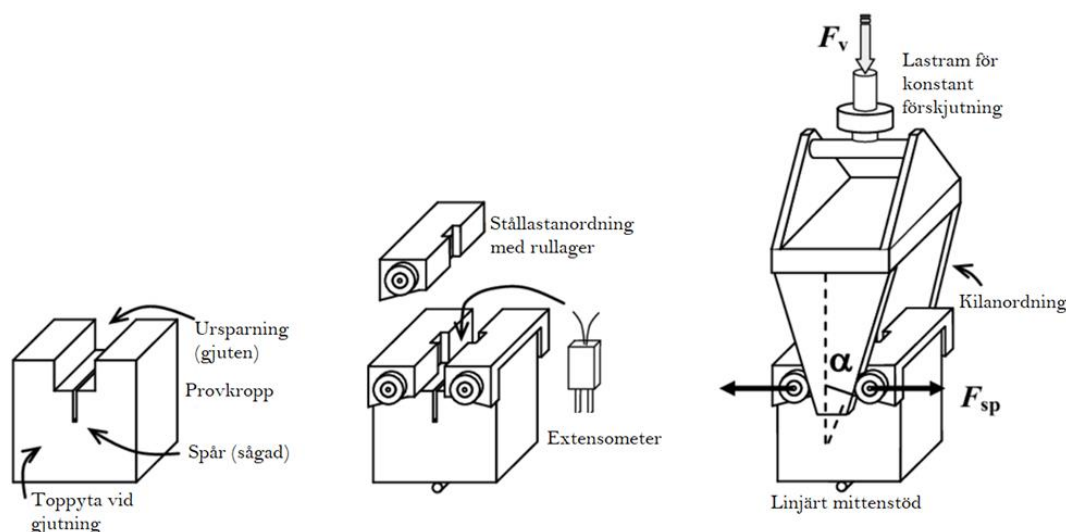
Frostangrepp leder till att betongens sammanhållning förloras till följd av att hållfastheten, och bindningen mellan betong och armering, minskar [2]. Skador i betongkonstruktioner till följd av frost är mer frekvent förekommande i kallare klimat, där temperaturen oftare växlar över och under fryspunkten [1]. Frostcyklerna gör att nya sprickor bildas till följd av vattnets expansion, och att gamla sprickor orsakade av tidigare frostcykler, spänningar från yttre last eller korrosion av armeringen, riskerar växa sig större – vilket i sin tur har inverkan på betongens egenskaper [1][2]. I [7] beskrivs hur betongens hållfasthet påverkas av frostcykler. Resultaten visar att frostcykler – varierande mellan temperaturerna -20°C och $+20^{\circ}\text{C}$ – kraftigt försämrade betongens tryckhållfasthet och dess E-modul.

2.2.1 Mättnadsgrad

Vattenhalten i betong kan beskrivas med en mättnadsgrad, som kallas S [3]. När $S = 0$ är betongen helt torr och när $S = 1$ är den helt mättad. För att inre skador ska uppkomma i betongens porsystem måste en viss kritisk mättnadsgrad uppnås. Under denna kritiska punkt uppstår inga skador eftersom isen då istället kan expandera vidare in i resten av porsystemet, snarare än utöva tryck på de omgärdande porväggarna. Det kritiska värdet beror inte på antalet frostcykler eller fryshastigheten, men påverkas däremot något av den lägsta temperatur vid vilken frysning sker [3].

2.3 Kilklyvning

Kilklyvningsmetoden, framtagen av Brühwiler, E. och Wittmann, F.H., används för att testa betong och dess hållfasthetsegenskaper genom att provkroppar utsätts för tryck [8]. Provkropparna utformas antingen som kuber eller cylindrar och gjuts med en integrerad ursparing (se Appendix 1). Inför kilklyvningsförsöken sågas ett 50 mm långt spår från botten av ursparingen – där lasten ska tillföras – rakt ned mot provets underkant, för att uppnå en mer kontrollerad sprickbildning som breder ut sig i vertikalled. Maskinen som används vid försöken, och dess ingående delar, presenteras i figur 2.1.



Figur 2.1: Maskinen och dess ingående delar som används vid kilklyvningsförsöken. Hämtad ur rapporten *Flexural behaviour of members with a combination of steel fibres and conventional reinforcement* (2010).

2.4 DIC-system

Digital Image Correlation (DIC) är en optisk metod där kameror fångar och registrerar deformationen hos en struktur genom mönstermatchning och bildregistreringstekniker för två- eller tredimensionella objekt [9]. Metoden innebär mycket noggranna resultat, och kan användas för att mäta form, deformation, förskjutningar och spänningar. Systemet använder en kombination av bildkorrelation och fotogrammetriska principer, som i sin tur bygger på principerna för triangulering. Genom att implementera metoden för DIC vid kilklyvningsförsök kan sprickbildningens utbredning kartläggas över tid, och berättar vilken sprickbredd som uppnåtts vid en given kraft [10]. För att systemet ska kunna bevaka sprickornas utbredning målas betongproverna i ett vit-svartprickigt, irreguljärt mönster. Därigenom skapas en stor mängd fasta punkter vars förflyttning systemet kan följa som – då de sätts i relation till varandra – ger en bild av sprickbildningens utbredning.

2.5 Ultraljud

Mätning av egenfrekvens hos betong med hjälp av ultraljud har använts upprepade gånger tidigare [11][12][13]. Genom att mäta ljudvågornas hastighet genom betongen, såväl före som efter den utsatts för frostcykler, kan den resulterande nedbrytningen bestämmas. De uppmätta hastigheterna beräknas relativt varandra, och kan sedan användas för att beräkna förändringen i E-modul hos betongen.

3 Experiment

Arbetet inleddes genom att en försöksplan förbereddes och utarbetades enligt tabell 3.1. Ett betongrecept togs fram, se Appendix 2, varefter prov- och referenskroppar gjöts vid två separata tillfällen. Betongkropparna lämnades att härda under 28 dagar, nedsänkta i vatten. Därefter förspräcktes tolv av provkropparna tills en sprickbredd på 0,1 mm uppnåts genom kilklyvningsförsök, varpå samtliga provkroppar utsattes för noll respektive 100 frostcykler. Efter 100 frostcykler återplacerades sex av provkropparna i klimatkammaren för att utsättas för ytterligare tolv frostcykler, se kapitel 3.4.

Prov	Förspräckt?	Armering?	Antal frostcykler	Antal	Betongsats
0	Nej	Nej	0	2	2
F0	Ja	Nej	0	3	1
100	Nej	Nej	100	1	1
F100	Ja	Nej	100	3	2
A0	Nej	Ja	0	3	1
A112	Nej	Ja	100 + 12	3	2
FA0	Ja	Ja	0	3	2
FA112	Ja	Ja	100 + 12	3	1

Tabell 3.1: Försöksplan.

För att undersöka hållfastheten hos respektive betongsats genomfördes tryckprover på referenskropparna. Betongens egenfrekvens bestämdes också genom ultraljudstester, som referens för de frostskaade provkropparnas nedbrytning.

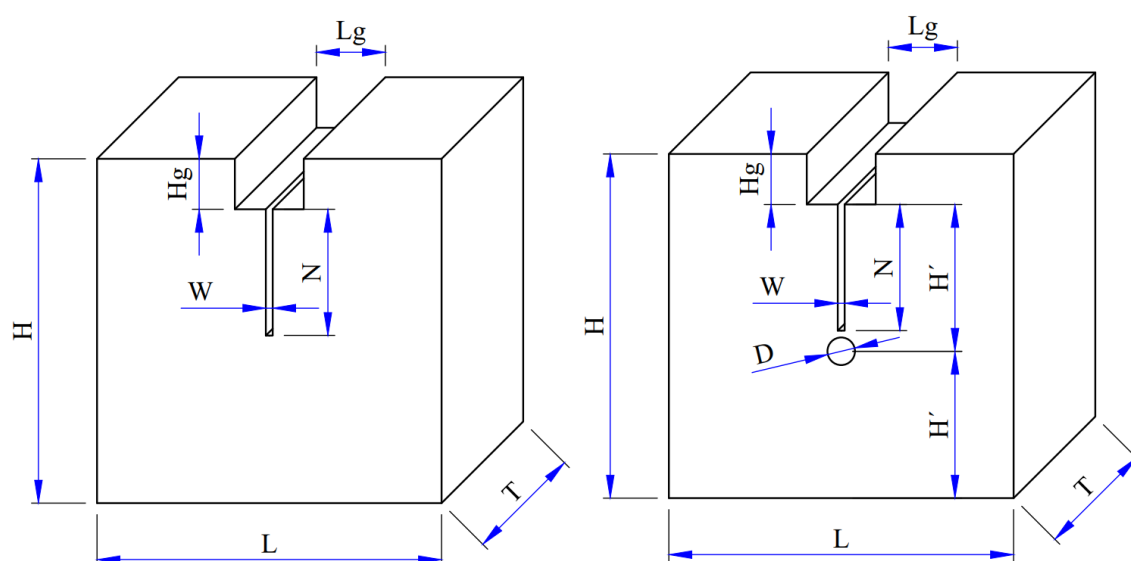
Avslutningsvis genomfördes kilklyvningsförsök och avslutande ultraljudstester för att dels bestämma nedbrytningen hos provkropparna, dels kartlägga och utvärdera utbredningen av den uppkomna sprickbildningen. Resultaten kompilerades och utreddes sedan utifrån de på förhand uppgjorda förutsättningarna; förspräckning, antal frostcykler och förekomst av armering.

3.1 Betong och armering

Inför experimentet togs ett betongrecept fram och armeringsjärnens dimension bestämdes till $\varnothing 12$ mm. Målsättningen var att skapa en betong som påverkas av frostcykler i så hög utsträckning som möjligt, för att på så sätt erhalla stor sprickbildning under efterföljande frostcykler. Vid framtagning av betongen visade det sig emellertid att receptet innebar en väldigt styv betong, som inte flöt ut i formarna. Ett flytmedel tvingades därför tillsättas, då receptet inte ville låta sig ändras genom att addera mer vatten. Det slutgiltiga receptet blev enligt Appendix 2.

3.2 Gjutning och beredning av provkroppar

Experimentet inleddes genom att kvadratiske betongprover gjöts enligt figur 3.1 och med den på förhand avgränsade försöksplanen (se Appendix 2). I ett försök att störa betongen – och på så sätt maximera sprickbildningen – gjöts armering in i hälften av provkropparna. Detta gjordes eftersom tidigare forskningsresultat visat att sprickbildningen påverkas av geometriska störningar [14] och är mycket liten upp till 100 frostcykler [1], men även på grund av projektets snäva tidsbegränsning. Betongproverna lämnades sedan att härda under 28 dagar, nedsänkta i vatten. I enlighet med [8] sågades ett 50 mm långt spår från botten av ursparingen ned mot provkropparnas underkant, för att därigenom uppnå en mer kontrollerad sprickbildning, som sprider ut sig i vertikalled vid kilklyvningsförsök.



Dimension av provkroppar: provkropp utan armering; provkropp med armering
$H \times L \times T = 150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$
$H_g \times L_g = 22 \times 30 \text{ mm}^2$
$N \times W = 50 \times 3 \text{ mm}^2$
$H' = 64 \text{ mm}$
$D = 12 \text{ mm}$

Figur 3.1: Utformning och dimensionering av provkropparna.

Gjutningen skedde i två omgångar vilket gav att betongens egenskaper kunde skilja något mellan de två betongsatserna. För varje betongsats gjöts därför tre extra provkroppar som referens för att testa hållfasthet (brottgräns) och elasticitet (E-modul) i tryckhållfasthets- och elasticitetstester, då ingen förspräckning och inga frostcykler utfördes. Under gjutning vibrerades emellertid en av referensproverna ur sats 1 för lite och tvingades därmed kasseras. Följaktligen fanns endast två referensprover för betongsats 1.

Halvparten av alla de armerade och oarmerade provkropparna förspräcktes sedan genom kilklyvning, där provkropparna belastades till uppnådd sprickbredd på 0,1 mm. I enlighet med försöksplanen utsattes därefter på förhand bestämda provkroppar för 100 frostcykler, tillsammans med en referensprovkropp från vardera betongsats.

3.3 Egenfrekvens

Genom ultraljudstest uppmättes egenfrekvens i samtliga de provkroppar som utsattes för frostcykler. Detta gjordes såväl före och under, som efter avslutade frostcykler. Analys av skillnaderna i egenfrekvens redogjorde sedan för hur frostcyklerna påverkat betongens egenskaper, och storleken på den skada som uppstått i den invändiga strukturen. För att uppnå ett så korrekt resultat som möjligt, markerades den exakta punkten på varje enskild provkropp där testet genomfördes enligt Appendix 3, så att testet kunde upprepas i samma punkt även under och efter avslutade frostcykler.

Då 67 frostcykler genomförts, togs några provkroppar ut ur klimatkammaren och testades återigen för egenfrekvens genom ultraljud. Eftersom nedbrytningen inte ansågs tillräcklig, sattes provkropparna tillbaka i klimatkammaren för återstoden av testperioden.

3.4 Klimatexponering

De provkroppar som inte utsattes för frostcykler förvarades hela tiden nedsänkta i vatten. Prover som inte förspräcktes belastades till brott vid samma tillfälle som då de förspräckta återbelastades till brott. Samtliga provkroppar hade därmed samma ålder vid tillfället.

Provkropparna som skulle utsättas för frostcykler i klimatkammaren förbereddes genom att tätas, så att kritisk mätnadsgrad skulle upprätthållas. Isolationsformer i cellplast byggdes även för att styra i vilken riktning proverna skulle frysa.

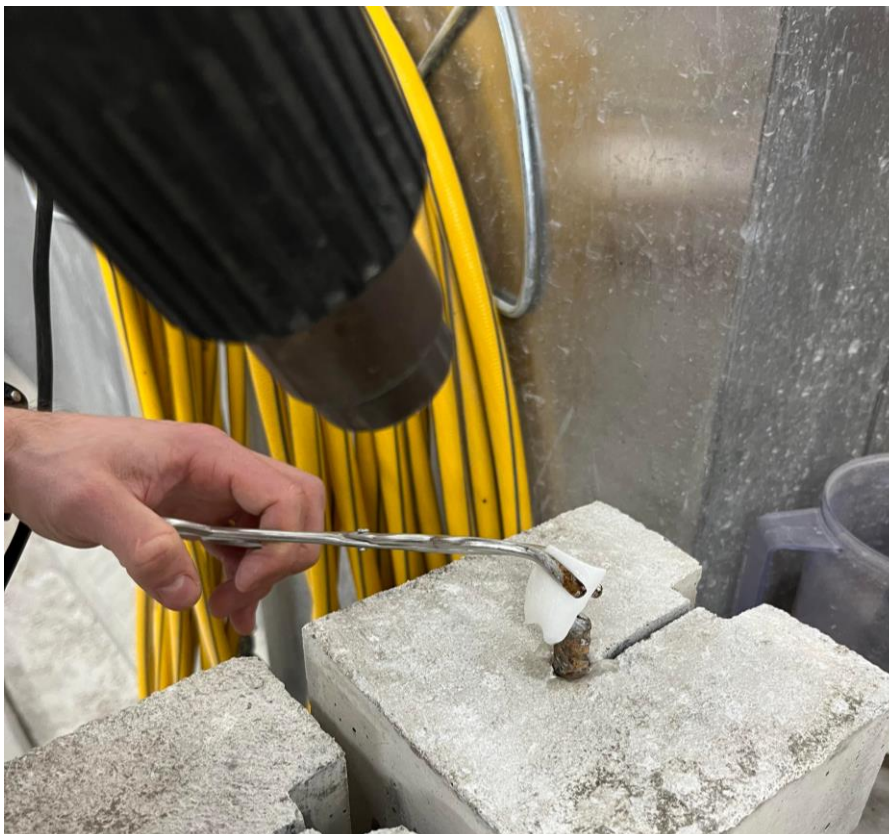
3.4.1 Tätning av provkroppar

Då provkropparna skulle utsättas för frostcykler i klimatkammaren var förhoppningen att vattnet i proverna skulle expandera och orsaka sprickbildning, alternativt att sprickorna i de förspräckta proverna skulle växa sig större. Därmed var det viktigt att dels innesluta vatten i proverna, dels kontrollera frysningen så att frysningen skedde utifrån och in i provkroppens ovansida. På så vis skulle vattnets expansion ske inom proverna och hindra vattnet från att tränga sig ut uppåt. För att innesluta vattnet i den sågade skåran tejpades butylband på vardera sida av provkropparna, där sprickor förväntades uppkomma, se figur 3.4. Som tätning runt armeringsjärnen droppades stearin kring armeringen och tilläts stelna, innan butylbanden fästes.

Initiala försök att täta proverna misslyckades till följd av att provkropparna inte var helt yttorra, vilket gjorde att den elastiska massan inte fick fäste. Sot från vecken misstänktes också ha inverkat negativt på stearinet. Nya försök, då proverna var helt yttorra, vecken tagits bort och då stearinet smältes med en värmepistol, se figur 3.5, var emellertid framgångsrika.



Figur 3.4: Tätning av sprickor med butylband.



Figur 3.5: Tätning runt armering med stearinljus och värmepistol.

3.4.2 Isolering av provkroppar

Målsättningen var att kontrollera frysningen i klimatkammaren så att den skedde utifrån och in i provkroppens ovansida, för att på så vis tvinga vattnet att expandera inom provkropparna och hindra vattnet från att tränga sig ut uppåt. Isolationsformer i cellplast byggdes således för att styra nedfrysningens riktning, se figur 3.6, samtidigt som ett lager av plastfolie användes för att försegla proverna och hindra avdunstning av vattnet.



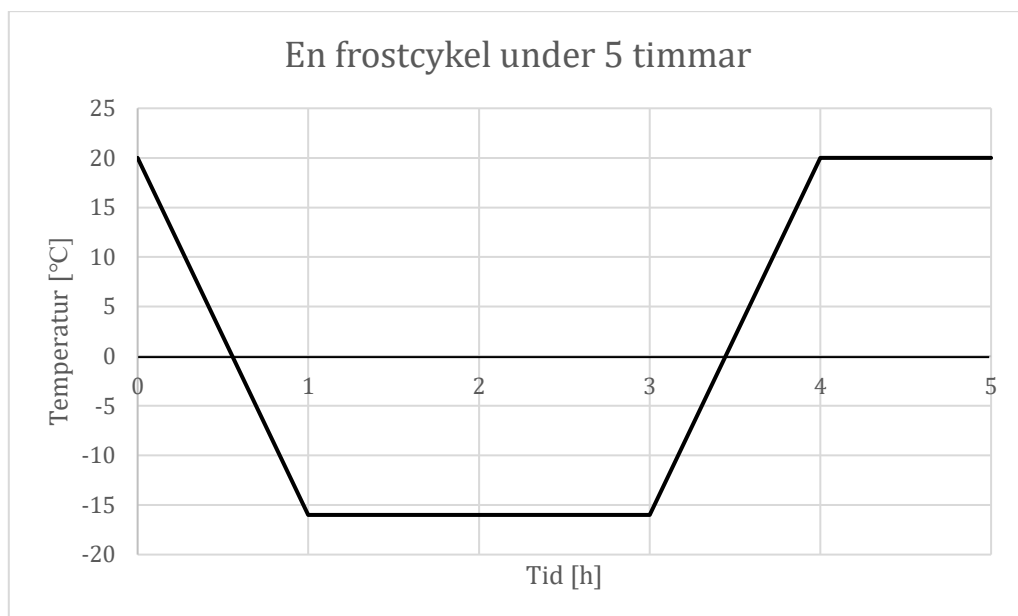
Figur 3.6: Isolering av cellplast och tätning med plastfolie.

3.4.3 Mättnad av provkroppar

För att säkerställa att den kritiska mättnadsgraden skulle vara uppnådd i provkropparna – och för att uppnå största möjliga sprickbildning – lämnades provkropparna att härda helt nedsänkta i vatten, och förvarades så fram till dess att de skulle utsättas för frostcyklerna. Innan provkropparna sattes in i klimatkammaren fylldes den sågade skåran med vatten, varpå ett lager av plast virades runt proverna och förseglades med tejp för att därigenom förhindra avdunstning. Provernas mättnadsgrad kan därmed antas ha varit $S = 1$ under hela arbetsgången.

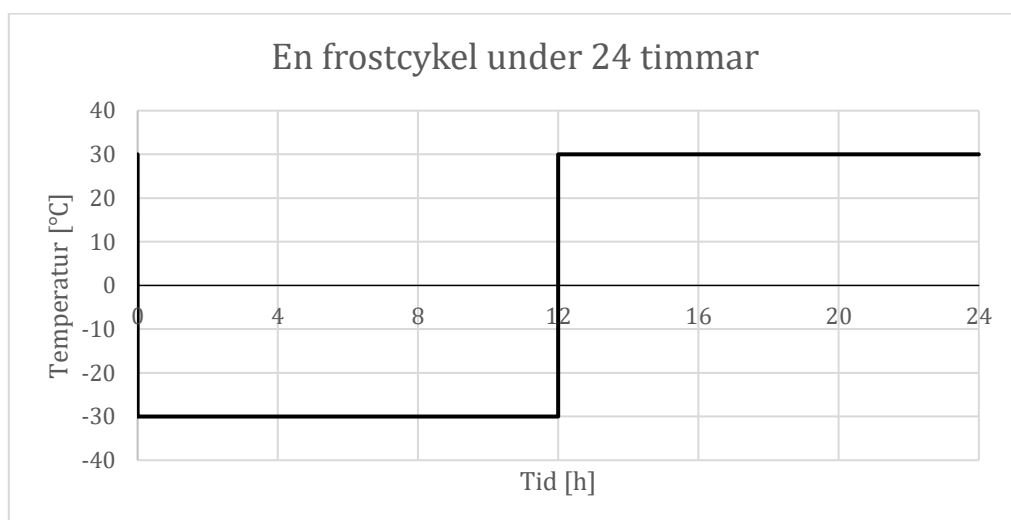
3.4.4 Frostcykler

Frostcykler utfördes i klimatkammare i Chalmers konstruktionslabb. Klimatkammaren programmerades så att temperaturen varierade mellan -16°C och $+20^{\circ}\text{C}$ över fem timmar, där en frostcykel definierades som att temperaturen i betongen växlat över fryspunkten en gång. Varje enskild frostcykel omfattade frysning under en timme, varpå temperaturen hölls konstant i två timmar, för att sedan höjas under en timme och därefter hållas konstant i en timme, se figur 3.2. Totalt utsattes provkropparna för 100 frostcykler över 21 dagar.



Figur 3.2: En frostcykel som sträcker sig över 5 timmar för de första 100 frostcyklerna.

Efter frostcyklerna visade testresultaten att frostskaadan i betongen var nästintill obefintlig, varmed ytterligare tolv frostcykler utfördes på sex av provkropparna. Varje frostcykel förlängdes till 24 timmar då det misstänktes att den uteblivna skadan berodde på för korta frostcykler. Cyklerna programmerades med temperaturen -30°C under 12 timmar och $+30^{\circ}\text{C}$ under de resterande 12 timmarna, enligt figur 3.3.



Figur 3.3: En frostcykel som sträcker sig över 24 timmar för de tolv sista frostcyklerna.

3.5 Kilklyvningsförsök

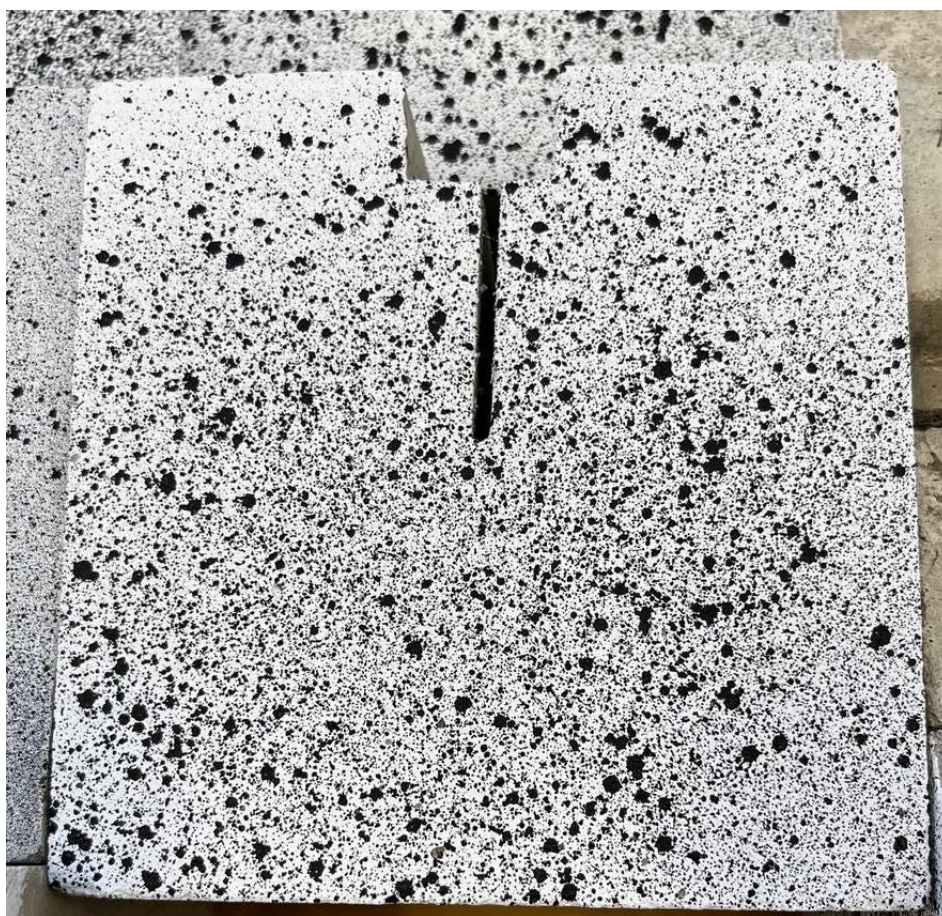
Försöken inleddes genom att samtliga provkroppar undersöktes genom kilklyvning enligt den metod som Brühwiler och Wittmann beskriver i [8], för att undersöka den effekt som frostcyklerna haft på betongen. Inför försöken målades alla provkroppar först vita, för att sedan sprayas till ett svart-vitprickigt mönster. Därigenom kunde DIC-utrustning användas för att fånga sprickbildningsförloppet i varje enskild provkropp. Provkropparna belastades till brott, varpå försöken avbröts vid kraften 50 N.

3.5.1 Förspräckning

Vid förspräckning av såväl de oarmerade som armerade provkropparna, programmerades systemet så att deformationen ökade till dess att en sprickbredd på 0,1 mm uppnåts, innan lasten backades av. Syftet med förspräckningen var att studera effekten av kombinerad sprickbildning och frostcykler.

3.5.2 DIC-system

Under kilklyvningsförsöken användes DIC-system för att följa sprickornas uppkomst och utbredning i betongen. Systemet programmerades så att bilder togs med hastigheten $\frac{1}{2}$ Hz. Innan försöken målades alla provkroppar med vit och svart färg, se figur 3.7, för att på så vis skapa fasta punkter vars förflyttning kunde följas av DIC-systemet.



Figur 3.7: Mönster som målades för användning av DIC-system.

3.6 Tryckhållfasthet

Tryckprover genomfördes för att mäta betongprovernas tryckhållfasthet. För att genomföra testerna mättes referensprovernas sidor till millimeterprecision, då de kunde variera på grund av avvikelser vid gjutning. Varje referensprov vägdes till närmaste gram. Innan testerna påbörjades matades provkroppens mått och vikt in i testprogrammet för att ge ett så exakt resultat som möjligt. Efteråt undersöktes sprickmönstret på provkropparna och jämfördes mot gällande standard, SS-EN 12390-3 [15], för att avgöra om resultaten var godtagbara.

4 RESULTAT

Efter utförda experiment sammanställdes samtliga resultat från de olika testmetoderna. Tryckhållfasthetstesterna visade att skillnaden mellan betongsatserna var små, medan ultraljudstesterna visade på att betongen var nästintill opåverkad av frostcyklarna. Kilklyvningsförsöken gav ett sprickmönster som inte skiljde sig särskilt mycket mellan provkropparna, medan resultaten visade att den maximala kraften skiljde sig mellan prover med och utan armering. Mer detaljer ges i efterföljande delar av detta kapitel.

4.1 Tryckhållfasthet

Endast små skillnader registrerades mellan de två betongsatserna, enligt tabell 4.1, vilket innebär att jämförelser mellan provkroppar från olika betongsatser kunde genomföras utan att ta hänsyn till avvikelser dem emellan. Sprickmönstren hos referensproverna var dock osymmetriska (se figurer i Appendix 3), och motsvarade därmed inte standard SS-EN 12390-3 [15]. Resultaten bedöms emellertid ligga i närheten av faktiska värden på grund av mycket liten spridning, i synnerhet sedan referensprov 4 förkastades till följd av sitt särskilt avvikande värde. Den genomsnittliga tryckhållfastheten ligger därmed omkring 43,2 N/mm².

Referensprov	Tryckhållfasthet [N/mm ²]	Betongsats
1	42,7	1
2	45,1	1
3	43,1	2
(4)	(38,5)	(2)
5	41,8	2

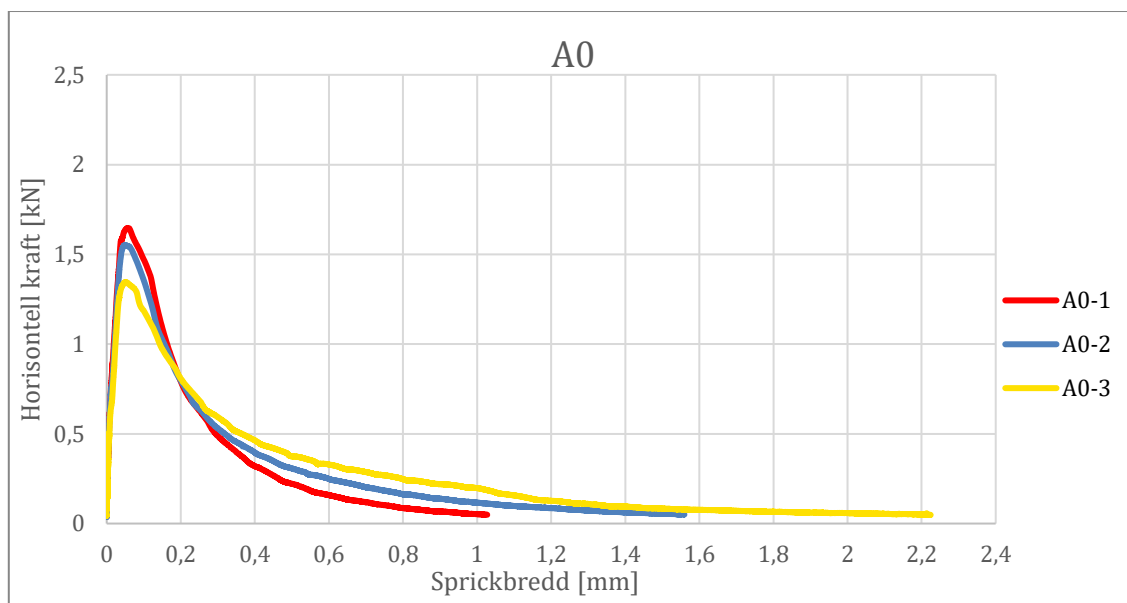
Tabell 4.1: Resultat av tryckprover för jämförelse mellan betongsatser.

4.2 Kilklyvningsförsök

Kilklyvningsförsöken används för att studera resultatet av sprickbredden i förhållande till den horisontella kraften. Denna uppkommer genom att den vertikala kraften från lastramen omvandlas till en horisontell kraft med hjälp av kilanordningen och rullagren, enligt figur 2.1. Extensometern mäter förändringen av ursparningens bredd, och därmed sprickbredden under testet. Resultaten av kilklyvningsförsöken visade liten spridning mellan provkroppar av samma typ. Vid jämförelse mellan olika typer av provkroppar har därför det prov – med den kurva som kan anses vara mest representativ för varje individuell provtyp – valts, för att på så vis lättare kunna visa på skillnaderna mellan olika sorters provtyper. I fall med tre prover av samma typ, har den provkropp som gav resultat mellan de två andra konsekvent valts, i enlighet med exempel i figur 4.1, där A0-2 valdes. För provgruppen med 100 frostcykler fanns endast en tillgänglig provkropp, som därmed fått utgöra representativ kurva. Därför är det viktigt att poängtera att en större provgrupp

sannolikt givit ett något annorlunda resultat. Samtliga jämförelser mellan olika provkroppar av samma typ presenteras i Appendix 4.

Vid kilklyvningsförsök på provkroppar, såväl med som utan frostcykler, stod det tidigt klart att den uppkomna skadan var liten eller nära nog obefintlig. Beslut togs därför att avbryta försöken och att resterande provkroppar skulle återplaceras i klimatkammaren, i ett sista försök att åstadkomma skada. Frostcyklerna förlängdes från fem timmar till ett dygn, då hypotesen var att frostcyklerna varit för korta för att provkropparna skulle hinna frysa helt igenom. Tolv frostcykler genomfördes innan kilklyvningsförsöken återupptogs med de återstående provkropparna. Även denna gång var emellertid skadan – i form av skillnader i resultat före och efter frostcykler – liten eller nästintill obefintlig.



Figur 4.1: Resultat från kilklyvningsförsök på provkroppar med armering utan förspräckning och inga frostcykler.

4.2.1 Färgkodning för jämförelse

För att kunna utföra tydliga, lättöverskådliga grafiska jämförelser mellan de olika försöken utarbetades följande färgkodning utifrån provschemat, se tabell 4.2, samt åtföljande matris över vilka provkroppar som jämförs med varandra, se tabell 4.3. Eftersom provkropparna A100 och FA100 genomgick tolv extra frostcykler döptes dessa om till A112 och FA112.

Provtyp	Förspärkt?	Armering?	Antal frostcykler	Antal	Betongsats
0	Nej	Nej	0	2	2
F0	Ja	Nej	0	3	1
100	Nej	Nej	100	1	1
F100	Ja	Nej	100	3	2
A0	Nej	Ja	0	3	1
A112	Nej	Ja	100 + 12	3	2
FA0	Ja	Ja	0	3	2
FA112	Ja	Ja	100 + 12	3	1

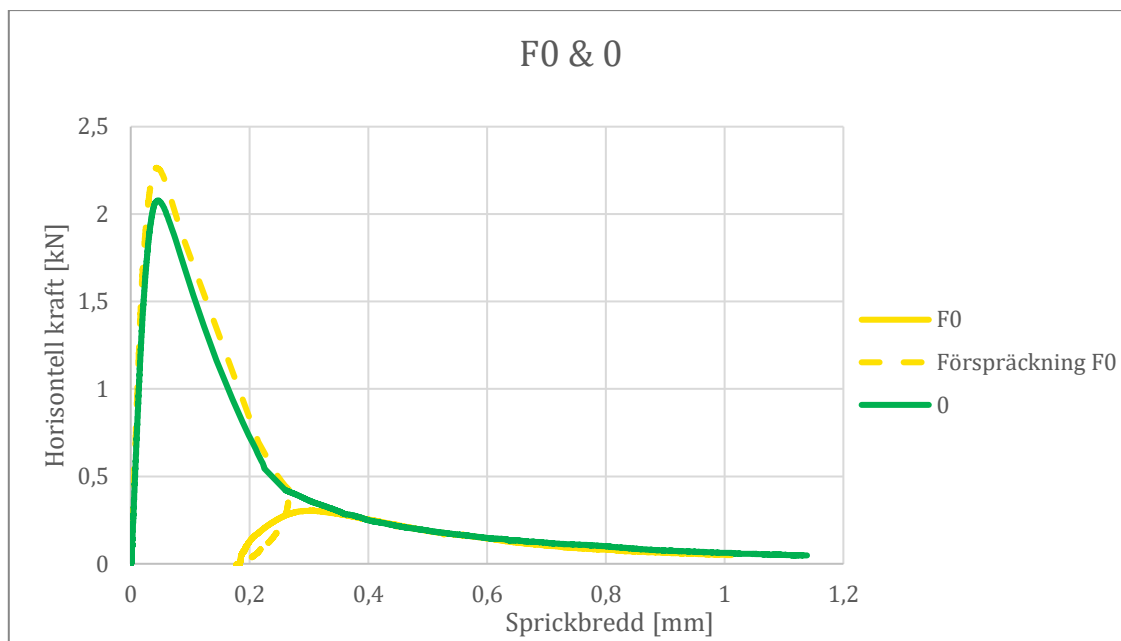
Tabell 4.2: Provschema med färgkodning för provkroppar.

	0	F0	100	F100	A112	A100	FA0	FA112
0		X	X		X			
F0				X			X	
100				X		X		
F100								X
A0						X	X	
A112								X
FA0								X
FA112								

Tabell 4.3: Matris över vilka provkroppar som jämförs med varandra.

4.2.2 Jämförelse med och utan förspärkning

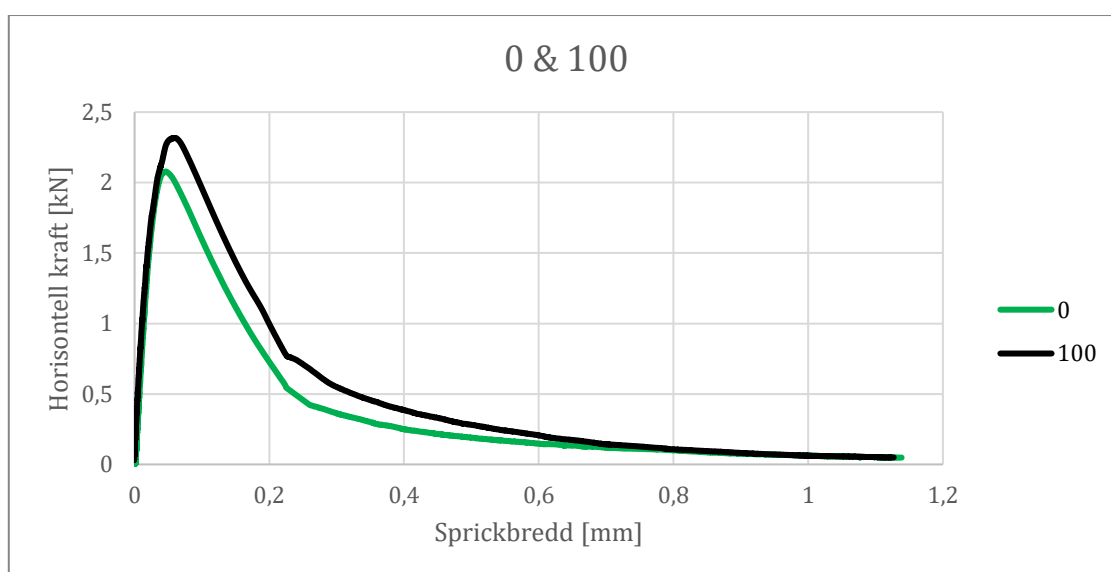
I jämförelse mellan provkroppar utan armering och utan frostcykler, och provkroppar med förspärkning men utan armering, visade resultaten av kikklyvningsförsöken att proverna klarade samma kraft vid samma sprickbredd, vilket åskådliggörs av att båda kurvor i figur 4.2 är närapå identiska. I diagrammet utgör förspärkning den streckade gula linjen, medan den heldragna gula är återbelastning. Återbelastningen har plottats under antagande att sprickbredden bibehölls konstant från dess att provkroppen avlastades, till dess att den började återbelastas. Detta förfarande har använts för redovisning av resultaten för alla provkroppar som återbelastats. Återbelastningen utfördes samtidigt för alla prover med förspärkning. För alla jämförelser mellan prover med respektive utan förspärkning, se Appendix 5. Samtliga indikerar att förspärkning och återbelastning ger resultat som ligger mycket nära de resultat som uppnås vid direkt belastning till brott.



Figur 4.2: Jämförelse mellan provkroppar med respektive utan förspräckning och utan frostcykler.

4.2.3 Jämförelse med och utan frostcykler

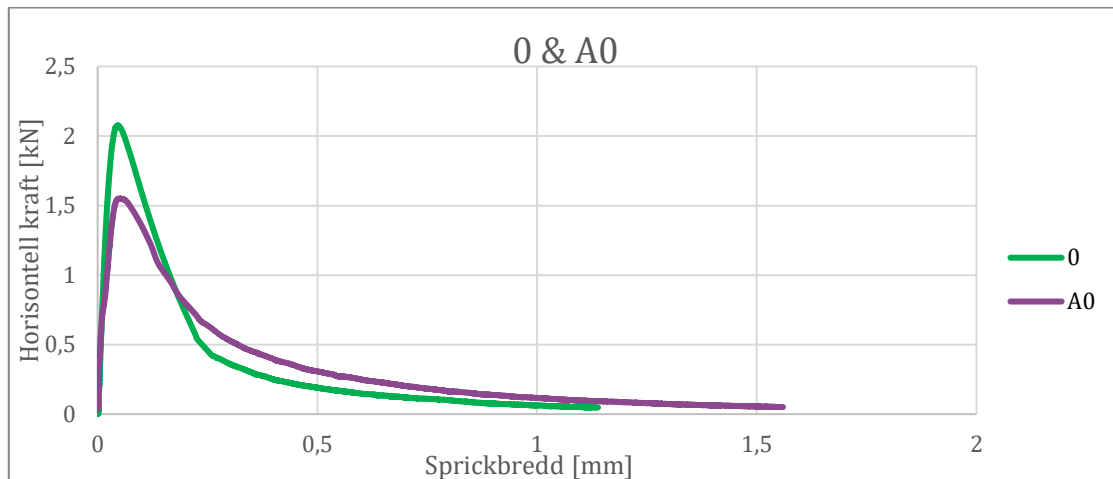
Resultaten av klicklyvningsförsöken för provkroppar utan armering och utan förspräckning, men med eller utan frostcykler, visade inga större skillnader mellan de provkroppar som genomgått frostcykler, och de som inte gjort det. Enligt figur 4.3 klarar betongen som varit utsatt för frostcykler till och med en något större kraft. Skillnaden är liten, men kan ses även i flera av de andra jämförelserna mellan provkroppar med och utan frostcykler, se figurerna A5.1, A5.6 och A5.9 i Appendix 5. Detta kan emellertid bero på att det endast fanns en tillgänglig provkropp för provgrupp 100. En större provgrupp hade sannolikt inneburit snarlik maximal kraft som för kurvan utan frostcykler. För samtliga jämförelser mellan provkroppar med respektive utan frostcykler, se Appendix 5.



Figur 4.3: Jämförelse mellan provkroppar utan förspräckning och utan armering, med 0 respektive 100 frostcykler.

4.2.4 Jämförelse med och utan armering

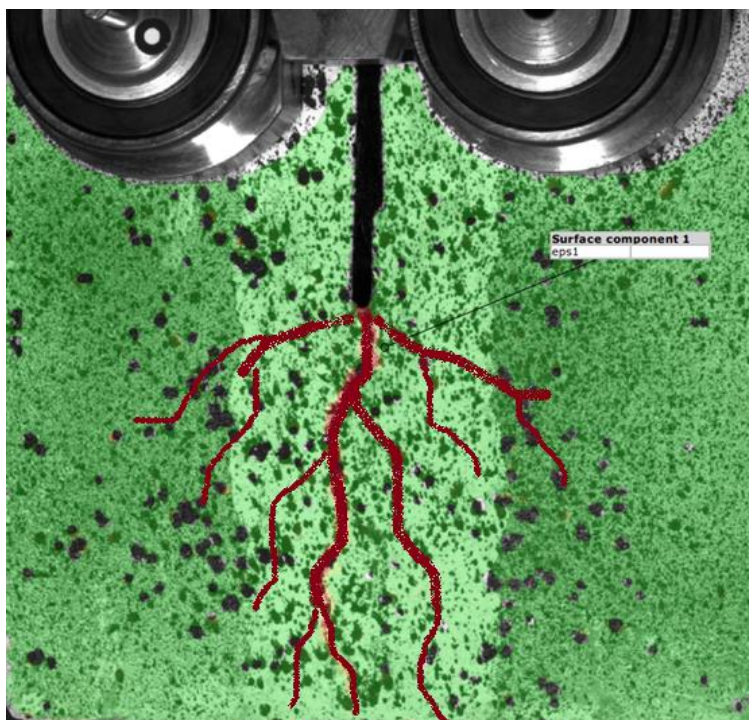
Resultaten av kilklyvningsförsöken för provkropparna med och utan armering, men utan förspäckning och utan frostcykler, visade att provkroppar med armering sprack vid lägre kraft än provkroppar utan armering, enligt figur 4.4. Denna iakttagelse stämmer för samtliga jämförelser mellan provkroppar med respektive utan armering, se Appendix 5.



Figur 4.4: Jämförelse mellan provkroppar med respektive utan armering och utan frostcykler.

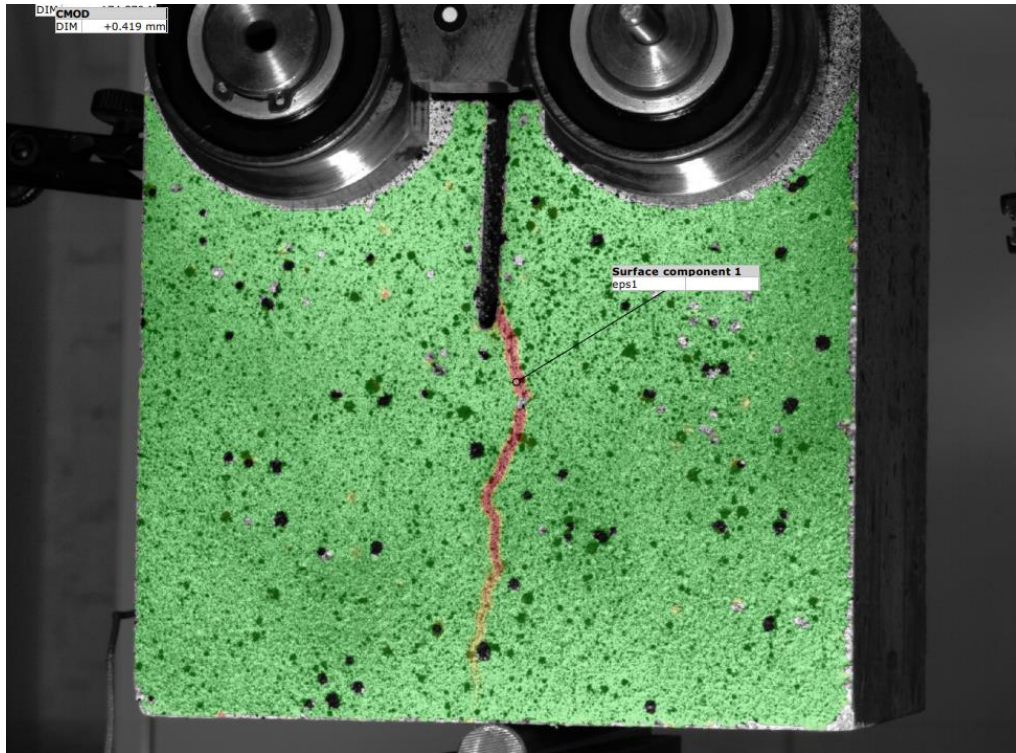
4.2.5 Sprickbildning

Sprickbildningens utbredning fångades med hjälp av DIC-system. Förväntningen var att sprickorna i de frostsadade proverna skulle utbreda sig horisontellt, så som illustreras i figur 4.5.

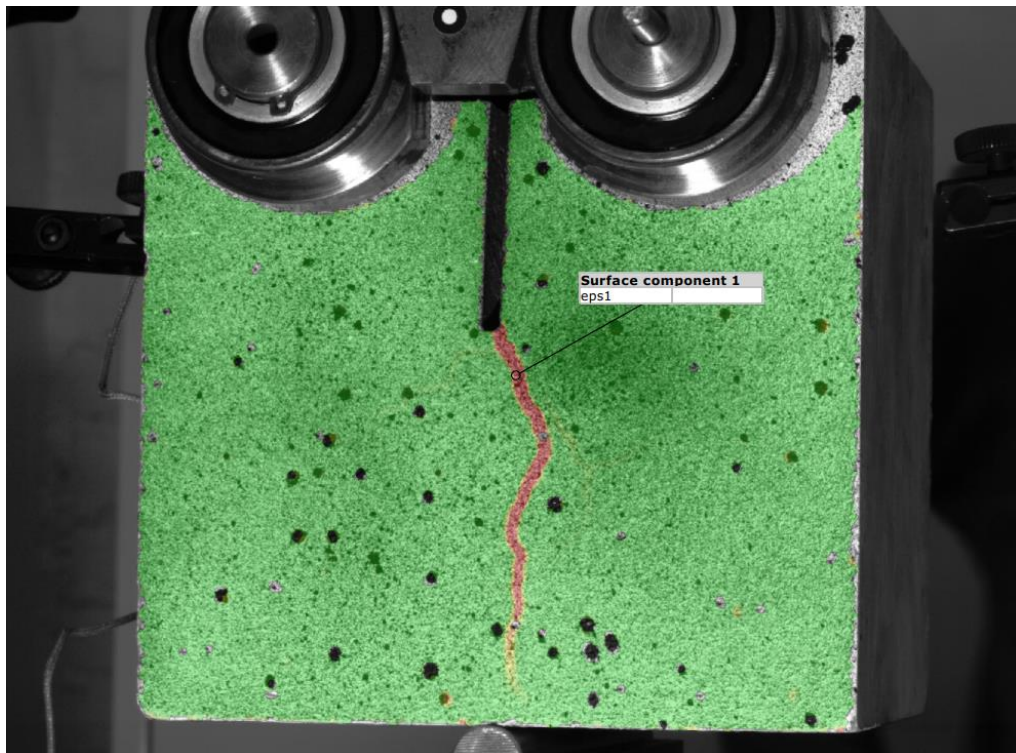


Figur 4.5: Illustration över förväntat resultat vid kilklyvning med hjälp av DIC-system.

Resultaten visade istället att oberoende typ av provkropp – alltså huruvida de förspräcktes, utsattes för frostcykler eller innehöll armering – så utbreddes sig sprickorna snarlikt och med endast en större spricka. Nedan visas två exempel för hur sprickbildningen såg ut då den fångades med DIC-systemet, se figur 4.5 och 4.6. För fler exempel, se Appendix 6.



Figur 4.6: Sprickbildning vid kilklyvningsförsök med DIC-system för F100-1.



Figur 4.7: Sprickbildning vid kilklyvningsförsök med DIC-system för A0-1. Eftersom armeringsjärnet fördes in från andra sidan vid gjutning syns inte det i denna vinkel.

4.3 Uppmätta egenfrekvenser

Ultraljudstester utfördes såväl före och under, som efter det att frostcykler genomförts i klimatkammaren. De tester som utfördes före gentemot efter 100 genomförda frostcykler gav en minskning på 0,3–1% i elasticitetsmodul, se tabell 4.4, vilket bör anses försumbart. Eftersom de förbestämda 100 frostcyklerna inte gav en större skada utsattes sex av provkropparna för ytterligare frostcykler, se tabell 3.1. Resultaten efter tolv extra frostcykler innebar emellertid inte någon ytterligare minskning av elasticitetsmodulen.

Antal frostcykler	0 [st.]	100 [st.]	112 [st.]
Provkropp	Tid genom provkropp, t [μ s]	Tid genom provkropp, t [μ s]	Tid genom provkropp, t [μ s]
FA112-1	35	33	33
FA112-2	36	33	33
FA112-3	35	33	33
F100-1	34	33	
F100-2	35	33	
F100-3	36	34	
100	33	32	
A112-1	34	33	33
A112-2	33	32	32
A112-3	34	33	33
Referens 1	36	32	
Referens 2	35	33	

Tabell 4.4: Resultat av ultraljudstester i μ s efter antal frostcykler.

4.4 Felkällor

Skillnaderna mellan resultaten för samma typ av test är små för de olika provkropparna. De små skillnaderna kan bero på en mängd olika faktorer, men beror med största sannolikhet på antingen gjutning eller sågning, alternativt variationer hos ballasten i betongproven.

4.4.1 Gjutning

Då betongblandaren inte inrymde den volym som krävdes för alla provkroppar, utfördes gjutningen i två omgångar med ett dygns mellanrum. Små avvikelser i betongsatsernas egenskaper kan därmed ha förekommit; dels då receptet kan ha skiljt sig något mellan de två satserna, dels då härdningsgraden skiljde med ett dygn. Det senare bedöms dock ha begränsad inverkan då alla prover tilläts härda under cirka tre månader innan försöken genomfördes. För armerade provkroppar kan även armeringens position ha skiljt sig något, detta då den kan ha placerats med en lätt lutning i och med att den placerades för hand.

4.4.2 Sågning

Sågningen utfördes med betongsåg i Chalmers konstruktionslabb. Initialt sågades samtliga provkroppar med ett djup halvvägs ned till armeringen, 32 mm, vilket gav sprött brott vid pilottest med kilklyvningsförsök av en provkropp. Provkropparna sågades därför ned till 50 mm djup, vilket gjorde spåret något bredare på vissa av provkropparna till följd av att sågen var aningen skev. Sågbredden kunde även variera något beroende på om provkroppen sågades från samma håll som det initiala sågsnittet. Nya kilklyvningsförsök gav segt brott för det nya djupet. På grund av att sågbordet hade en lätt lutning i sågsnittets längsriktning, varierade djupet $\pm 0,5$ mm från den ena sidan till den andra hos en provkropp.

5 SLUTSATSER

I detta avslutande kapitel diskuteras de slutsatser som kunnat dras av resultaten för arbetet, och förslag på framtida studier lämnas.

5.1 Diskussion

- Sprickbildningen var närapå identisk för samtliga provkroppar. Detta indikerar att betongen inte erhållit frostsador. Förspräckningen påverkade inte heller sprickbildningen, utan sprickans utbredning följde förspräckningens spricka, och var snarlik sprickbildningen hos provkroppar utan förspräckning. I provkroppar med armering letade sig sprickan runt armeringen och fortsatte ned till nederkantens mitt, på ett liknande sätt som för provkropparna utan armering.
- Under frostcyklerna var det viktigt att vatten inneslöt i provkropparna, så att den kritiska mätnadsgraden uppnåddes. Detta lyckades inte helt och är sannolikt den största bidragande orsaken till att skada uteblev. Uppmätta egenfrekvenser och klicklyvningsförsök visade inte heller några tecken på frostsador i betongen. Det kan också till viss del bero på att skador i betong generellt sett är små upp till 100 frostcykler [1].
- För provkropparna med armering krävdes en betydligt mindre maximal kraft innan brott uppnåddes. Det beror på att sprickan kunde runda armeringen, i och med att där inte fanns någon betong som höll samman provkroppen, till skillnad från proverna utan armering där sprickan tvingades ta sig igenom betong hela distansen, från över- till underkant.
- Den största spridningen i maximal kraft innan brott för samma provkroppstyp var för provkroppar med armering. Det beror sannolikt på att armeringen placerades för hand vid gjutningen, vilket gjorde att armeringens position och lutning kan ha skiljt sig mellan olika provkroppar.
- I jämförelse mellan provkropp 0 och 100 visade resultaten att provkroppen med frostcykler klarade större kraft innan brott uppnåddes (samma kan sägas för de flesta provkroppar). Det kan bero på att vi endast hade en provkropp med 100 frostcykler för testet. En större provgrupp hade sannolikt givit en snarlik maximal kraft som provkroppen utan frostcykler.

5.2 Förslag på framtida studier

- Nya undersökningar behöver genomföras, där en ny lösning tas fram för att täta provkropparnas sidor – där sågspår och sprickor förväntas uppkomma – för att på så sätt bibehålla mängden vatten i betongproverna.
- Det är sannolikt inte längden på frostcyklarna som gjorde att skada inte uppstod, utan antalet, baserat på [1] och erhållna resultat efter de förlängda frostcyklarna. Detta behöver emellertid undersökas grundligare i vidare forskning.
- En möjlig orsak till att skada uteblev efter frostcyklarna är att isoleringen förhindrade provkropparna från att frysas helt igenom under de två timmar som de utsattes för frysning i klimatkammaren. Nya, mer utförliga, undersökningar där temperaturen i provkroppen kontrolleras, behöver således utföras.

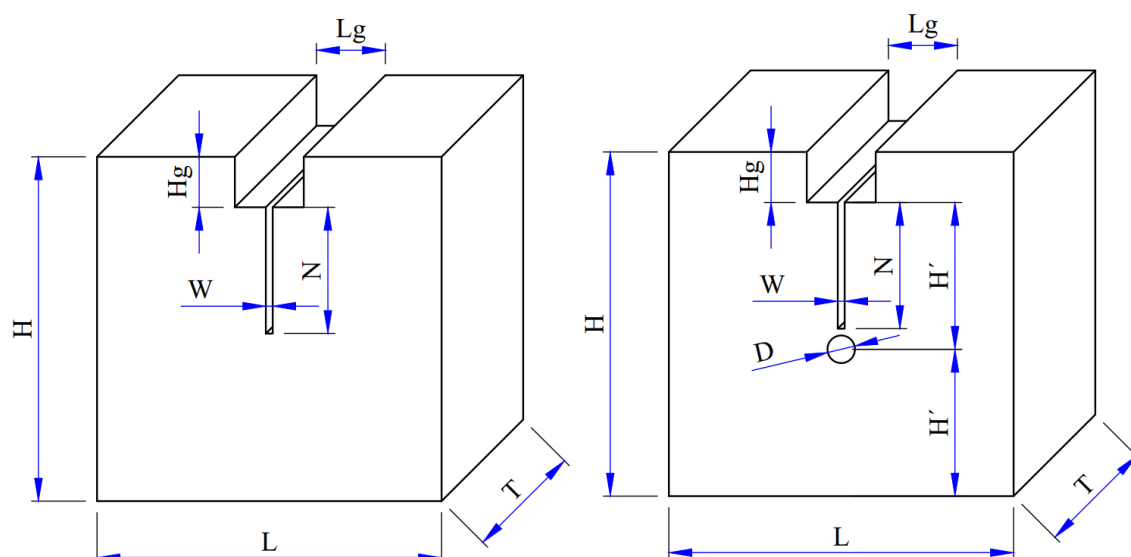
6 REFERENSER

- 1 Tian, Z., Zhu, X., Chen X., Ning, Y., Zhang, W. (2022). *Microstructure and damage evolution of hydraulic concrete exposed to freeze–thaw cycles*, Construction and Building Materials, från: <https://eds.s.ebscohost.com/eds/detail/detail?vid=18&sid=7fa6ace0-1e2c-4feb-89d3-ca57e6102298%40redis&bdata=JnNpdGU9ZWRzLWxpdmUmc2NvcGU9c2l0ZQ%3d%3d#AN=S0950061822021262&db=edselp>
- 2 Fagerlund, G. (1995). *Freeze-thaw resistance of concrete: destruction mechanisms, concrete technology, test methods, quality control: a contribution to the BRITE/EURAM project BREU-CT92- 0591 "The Residual Service Life of Concrete Structures"*, Lund university, från: <https://lucris.lub.lu.se/ws/portalfiles/portal/4591559/1762611.pdf>
- 3 Fagerlund, G. (2018). *Frost destruction of concrete – A study of the validity of different mechanisms*, Nordic Concrete Federation, från: <https://sciendo.com/pdf/10.2478/ncr-2018-0003>
- 4 Liu, X., Yan, Z., Wang, D., Zhao, R., Niu, D. & Wang, Y. (2022). *Corrosion cracking behavior of reinforced concrete under freeze-thaw cycles*, Journal of Building Engineering, från: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710222016163?fr=RR-2&ref=pdf_download&rr=79643879d902abde
- 5 Zhao, Y. & Jin, W. (2016). *Steel Corrosion-Induced Concrete Cracking*, från: <https://app.knovel.com/kn/resources/kpSCICC001/toc>
- 6 Yang, W. (2015). *The Issues and Discussion of Modern Concrete Science*, från: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-47247-7>
- 7 Hanjari, K.Z., Utgenannt, P. & Lundgren, K. (2010). *Experimental study of the material and bond properties of frost-damaged concrete*, Cement and Concrete Research, från: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884610002504?via%3Dihub>
- 8 Brühwiler, E. & Wittmann, F.H. (1990). *The wedge splitting test, a new method of performing stable fracture mechanics tests*, Engineering Fracture Mechanics, från: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/001379449090189N>

- 9 B. P. Hohmann, P. Bruck, T. C. Esselman, T. Schmidt. (2012). *Digital Image Correlation (DIC): An Advanced Nondestructive Testing Method for Life Extension of Nuclear Power Plants*. International Conference on Nuclear Power Plant Life Management (PLiM) for Long Term Operations (LTO), från https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/070/43070819.pdf
- 10 Robuschi, S., Lundgren, K., Fernandez, I. & Flansbjerg, M. (2020). *Anchorage of naturally corroded, plain reinforcement bars in flexural members*, Materials and Structures, från: https://www.researchgate.net/publication/340219390_Anchorage_of_naturally_corroded_plain_reinforcement_bars_in_flexural_members
- 11 Jafari, F., Hadianfard, M. & Mahini, S. (2020). *Determination of compressive strength of lightweight aggregate concrete in service using gene expression programming based on semi-direct ultrasonic pulse velocity testing*, från: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1002/suco.202000684>
- 12 Thorsell, P-E. (2013). *Studier av frysningssegenskaper hos betong från 1 BMA*, Vattenfall Research and Development AB, Civil Engineering, från: <https://www.skb.com/publication/2665905/P-13-07.pdf>
- 13 Helsing, E. (2020). *Nedbrytning hos betong med slagg och flygaska efter fyra vintersäsonger vid RV40*, RISE Research Institutes of Sweden, från: <http://trafikverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:1732129/FULLTEXT01.pdf>
- 14 K. A. Meyer, R. Kruse, T. Tofeti Lima, R. Jänicke (2022). *CT-data-based modeling of ionic transport in concrete*. Presentation at 92nd Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics, (<https://jahrestagung.gamm-ev.de/annual-meeting-2022/program/programme/>)
- 15 Svenska institutet för standarder. (2019). *Provning av hårdnad betong – Del 3: Tryckhållfasthet hos provkroppar*, SVENSK STANDARD SS-EN 12390-3:2019, från: <https://www-sis-se.eu1.proxy.openathens.net/api/document/get/80012730>

Appendix 1

Vid gjutning av provkropparna placerades armeringen felaktigt ut på halva avståndet mellan ursparing och provkroppens botten, enligt figur A1. Detta var egentligen inte enligt plan: planen var att placera armeringen halvvägs mellan spårets och provkroppens botten. På grund av denna oavsiktliga placering kunde spåret från ursparingen inte sågas efter vedertagen standard i [8]. Istället sågades ett spår halvvägs ned till armeringen av en provkropp och testades genom kilklyvningsförsök. Detta resulterade emellertid i sprött brott och gav därmed inte tillräckliga datapunkter. Spåret sågades därför 75 procent av sträckan ned till armeringen, men även detta resulterade i sprött brott och otillräckliga data. Ett sista försök, där spåret sågades så nära armeringen som möjligt, gav emellertid användbara datapunkter (se Figur 3.1).



Dimension av provkroppar: provkropp utan armering; provkropp med armering
$H \times L \times T = 150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$
$H_g \times L_g = 22 \times 30 \text{ mm}^2$
$N \times W = 50 \times 3 \text{ mm}^2$
$H' = 64 \text{ mm}$
$D = 12 \text{ mm}$

Figur A1: Dimensioner av provkroppar.

Appendix 2

Betongrecept

Ingrediens	Mängd [kg]
Stenmjöl (0-8 mm)	122,5
Cement	25
Vatten	14,5
Flytmedel	0,3

Ursprunglig försöksplan

Tre parametrar tas i beaktning; förspräckt (Ja eller Nej), armering (Ja eller Nej) och antal frostcykler (0, 50 eller 100). F = förspräckt, A = armering.

Fall	Förspräckt?	Armering?	Antal frostcykler
0	Nej	Nej	0
50	Nej	Nej	50
100	Nej	Nej	100
A0	Nej	Ja	0
A50	Nej	Ja	50
A100	Nej	Ja	100
FA0	Ja	Ja	0
FA50	Ja	Ja	50
FA100	Ja	Ja	100

Tabell A2: Ursprunglig försöksplan.

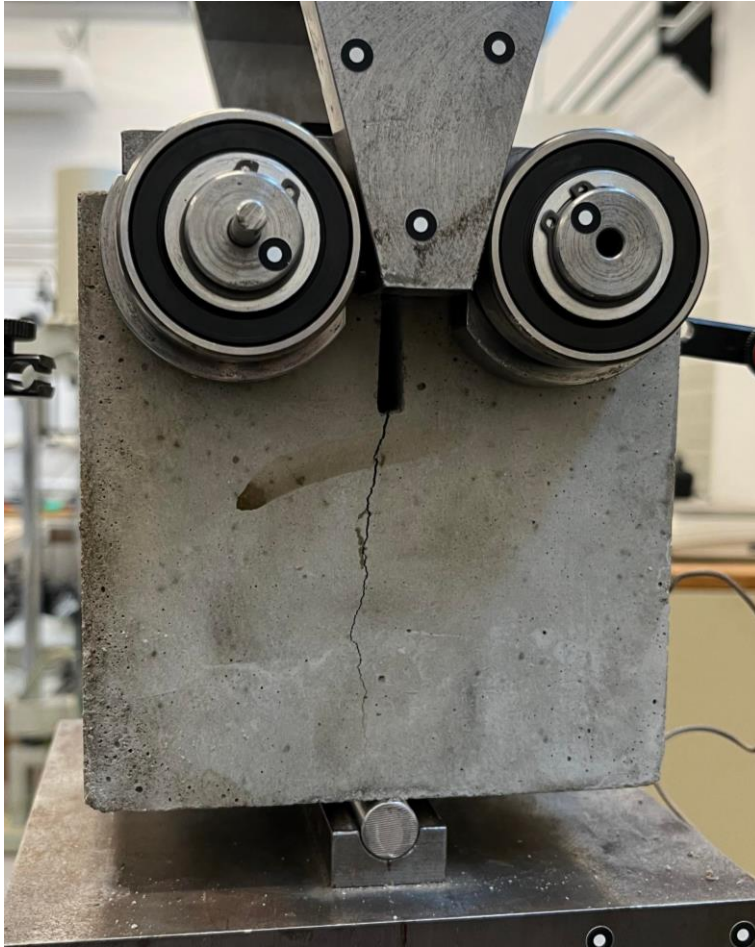
Appendix 3



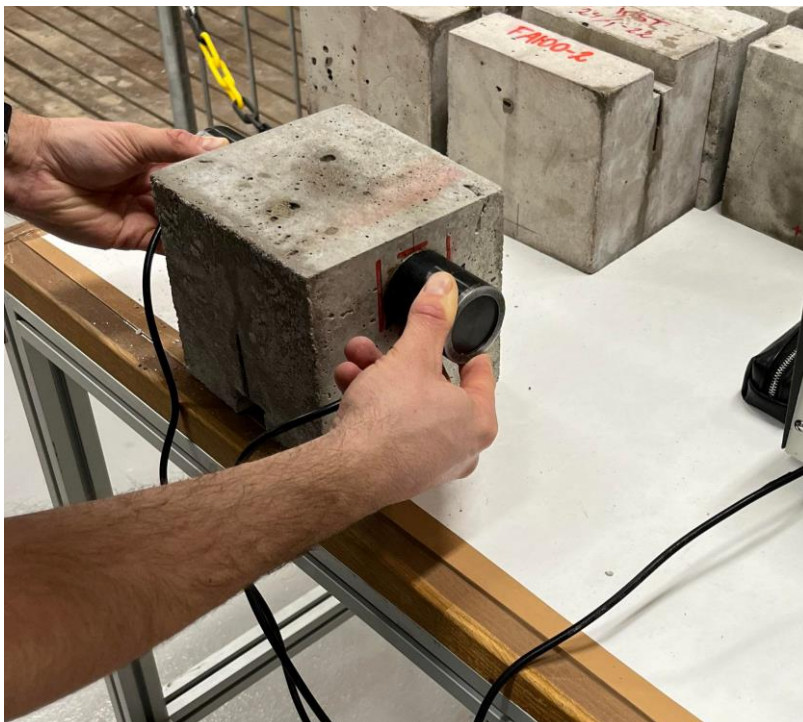
Figur A3.1: Sågning.



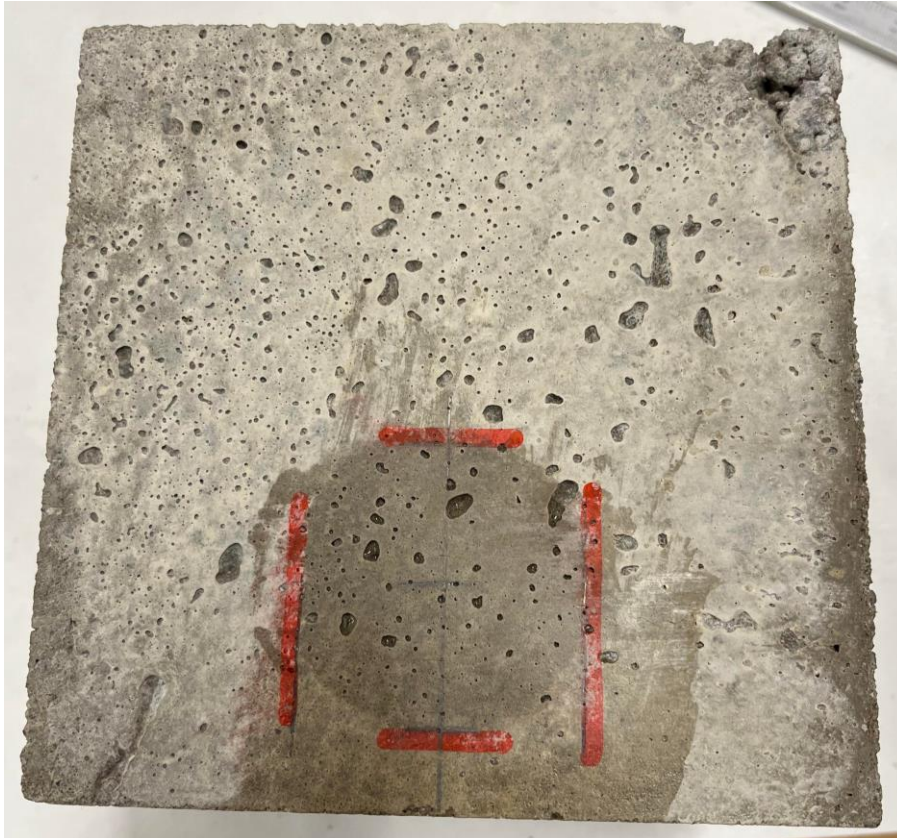
Figur A3.2: Pilottest av förspräckning med kortare sågspår som resulterade i sprött brott.



Figur A3.3: Förspräckning.



Figur A3.4: Ultraljudstest.



Figur A3.5: Markering för ultraljudsmätning.



Figur A3.6: Tätning runt armering med stearinljus och tändare.



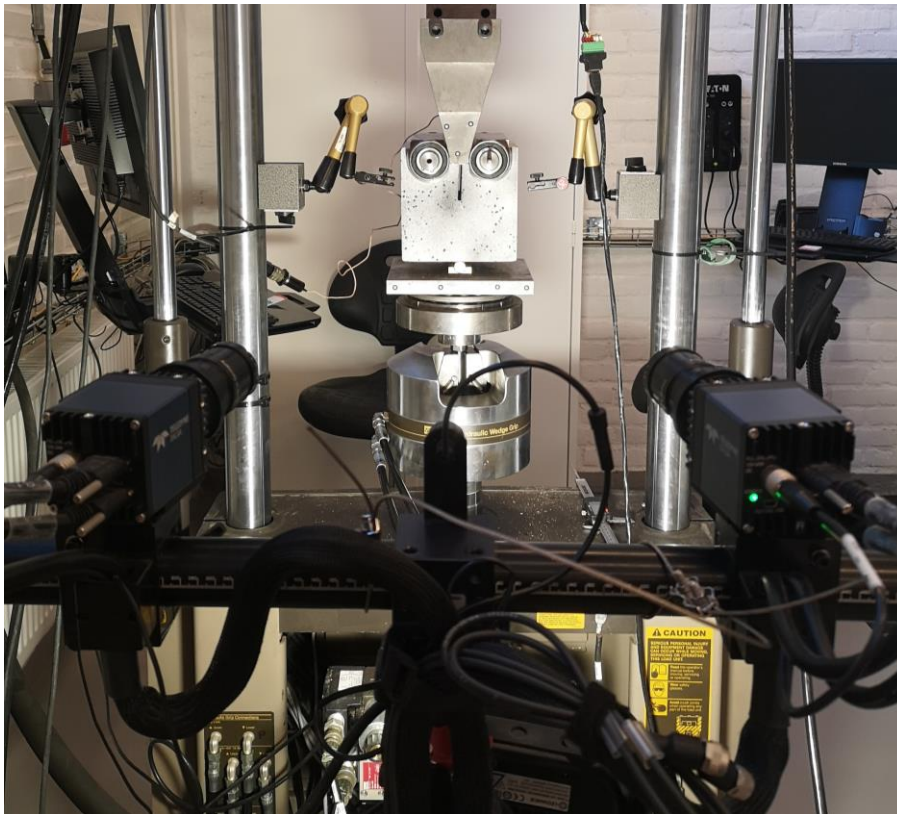
Figur A3.7: Tätning runt armering med stearinljus och tändare.



Figur A3.8: Tätning av sprickor med butylband.



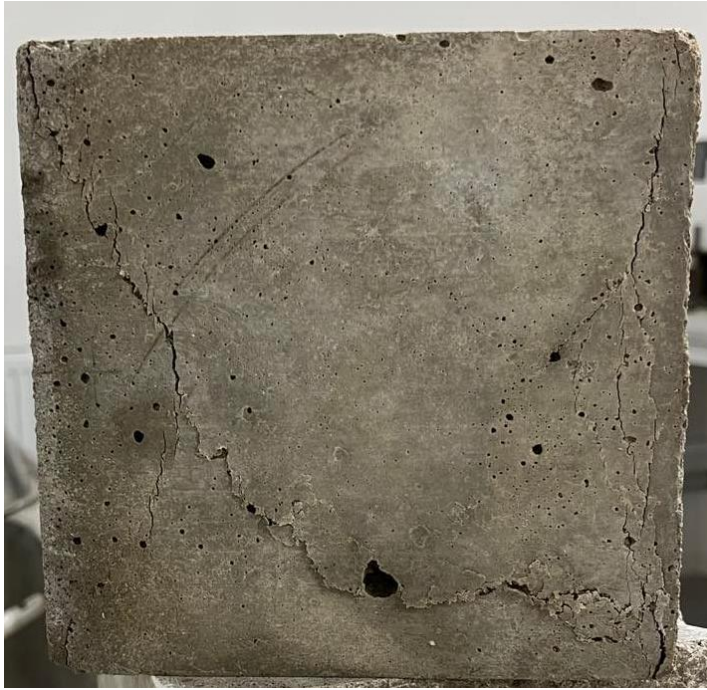
Figur A3.9: Provkroppar i klimatkammaren.



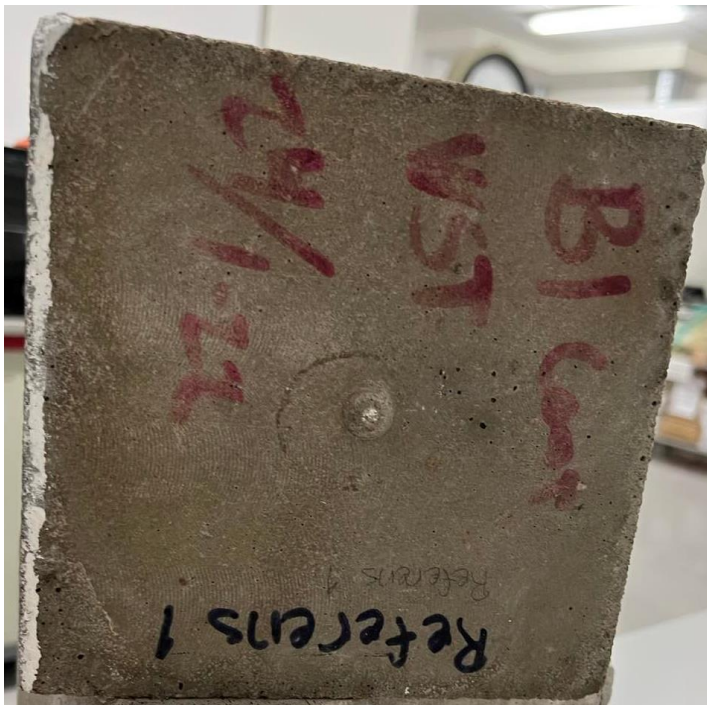
Figur A3.10: DIC-system.



Figur A3.11: DIC-system.



Figur A3.12: Tryckhållfasthetstest utförd på referensprov 1.



Figur A3.13: Tryckhållfasthetstest utförd på referensprov 1.



Figur A3.14: Tryckhållfasthetstest utförd på referensprov 1.



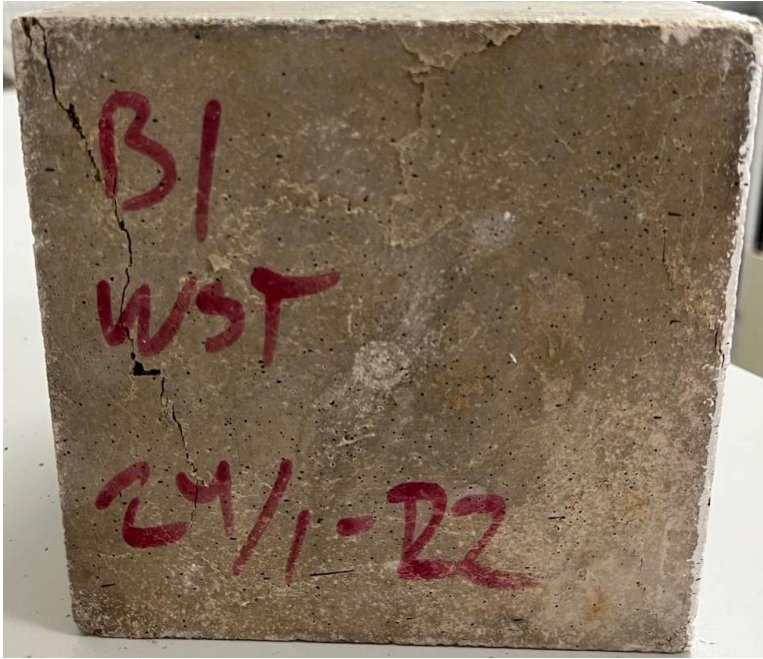
Figur A3.15: Tryckhållfasthetstest utförd på referensprov 1.



Figur A3.16: Tryckhållfasthetstest utförd på referensprov 2.



Figur A3.17: Tryckhållfasthetstest utförd på referensprov 2.



Figur A3.18: Tryckhållfasthetstest utförd på referensprov 2.



Figur A3.19: Tryckhållfasthetstest utförd på referensprov 2.



Figur A3.20: Tryckhållfasthetstest utförd på referensprov 3.



Figur A3.21: Tryckhållfasthetstest utförd på referensprov 3.



Figur A3.22: Tryckhållfasthetstest utförd på referensprov 3.



Figur A3.23: Tryckhållfasthetstest utförd på referensprov 3.



Figur A3.24: Tryckhållfasthetstest utförd på referensprov 4.



Figur A3.25: Tryckhållfasthetstest utförd på referensprov 4.



Figur A3.26: Tryckhållfasthetstest utförd på referensprov 4.



Figur A3.27: Tryckhållfasthetstest utförd på referensprov 4.



Figur A3.28: Tryckhållfasthetstest utförd på referensprov 5.



Figur A3.29: Tryckhållfasthetstest utförd på referensprov 5.

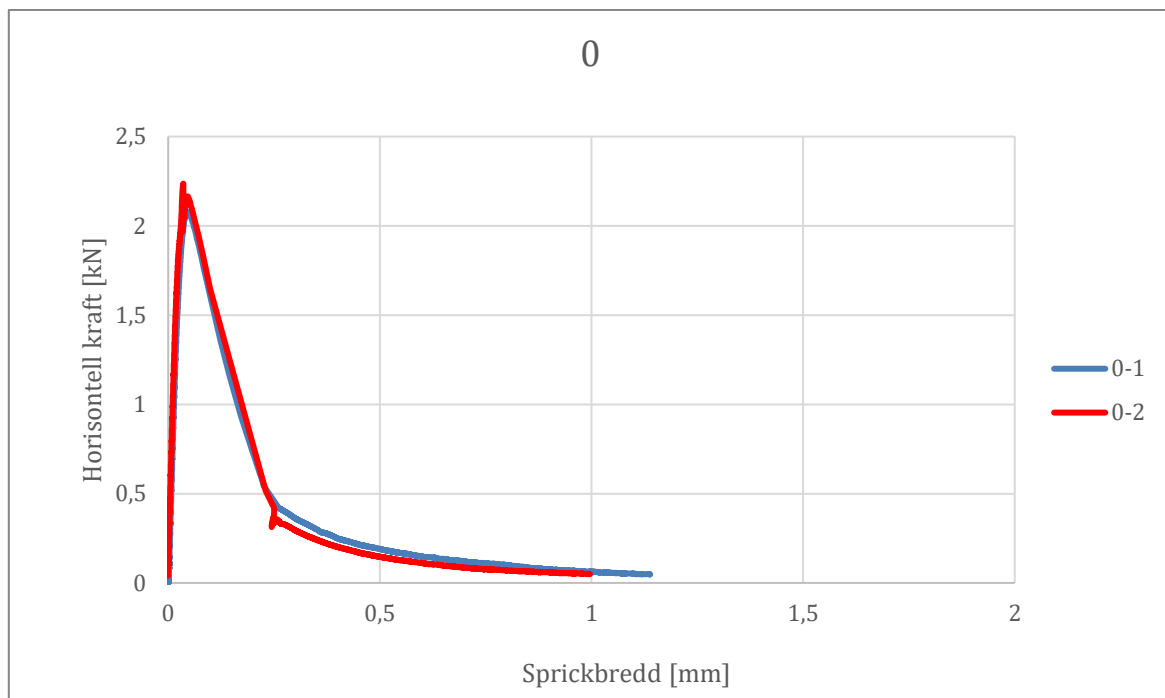


Figur A3.30: Tryckhållfasthetstest utförd på referensprov 5.

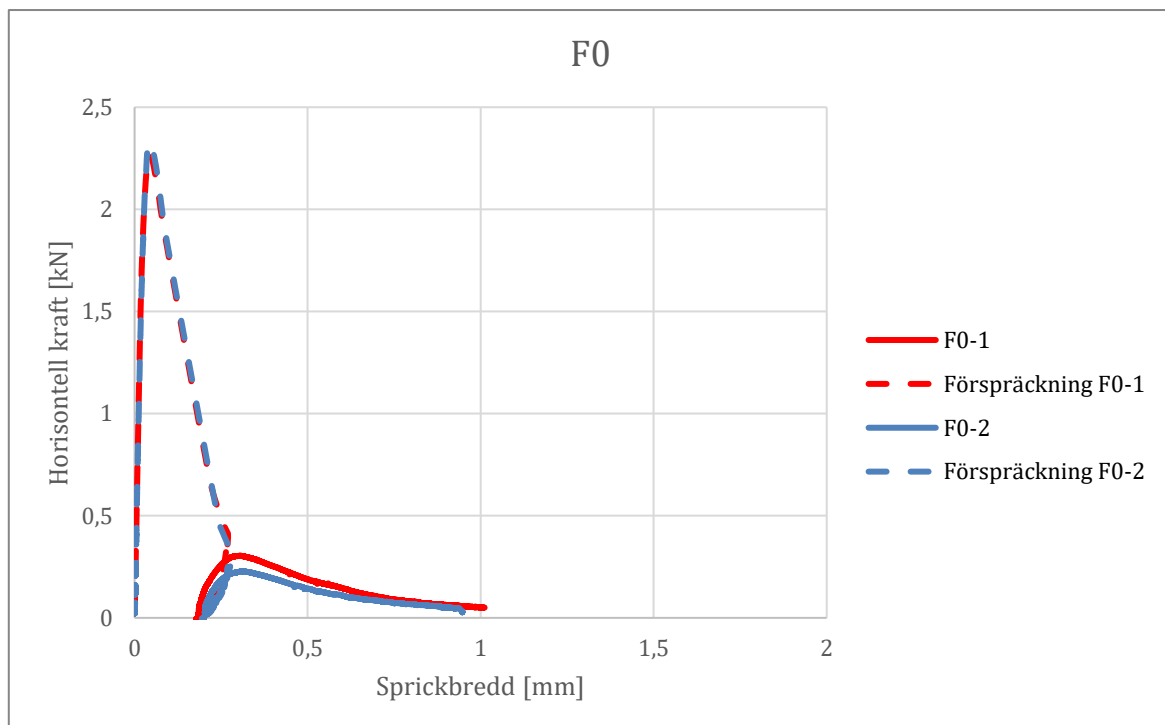


Figur A3.31: Tryckhållfasthetstest utförd på referensprov 5.

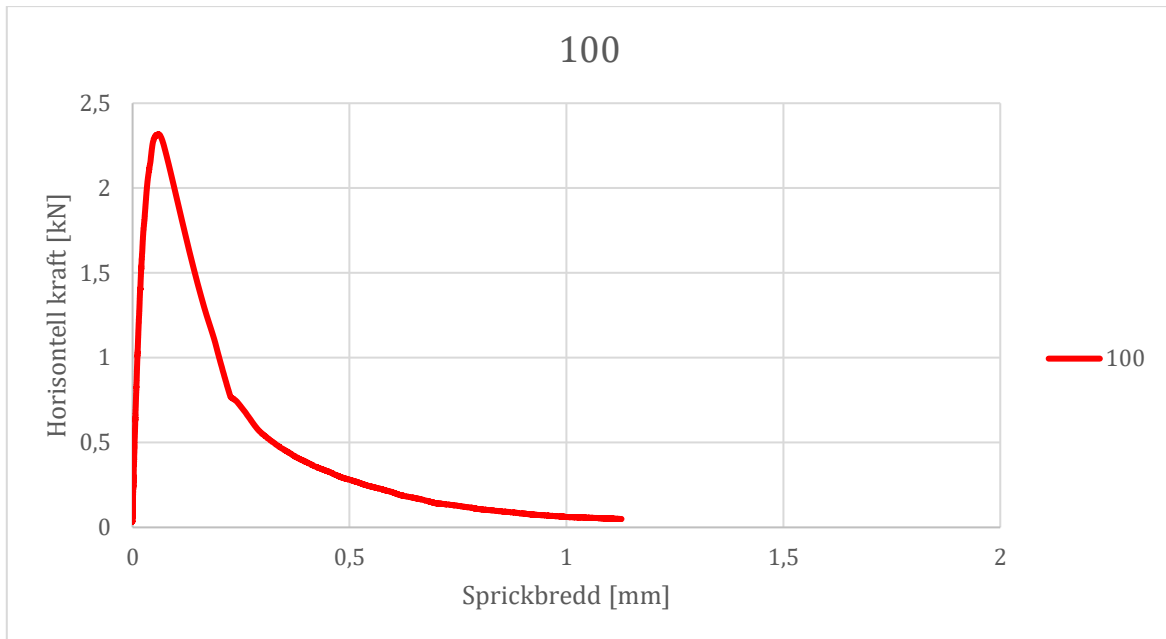
Appendix 4



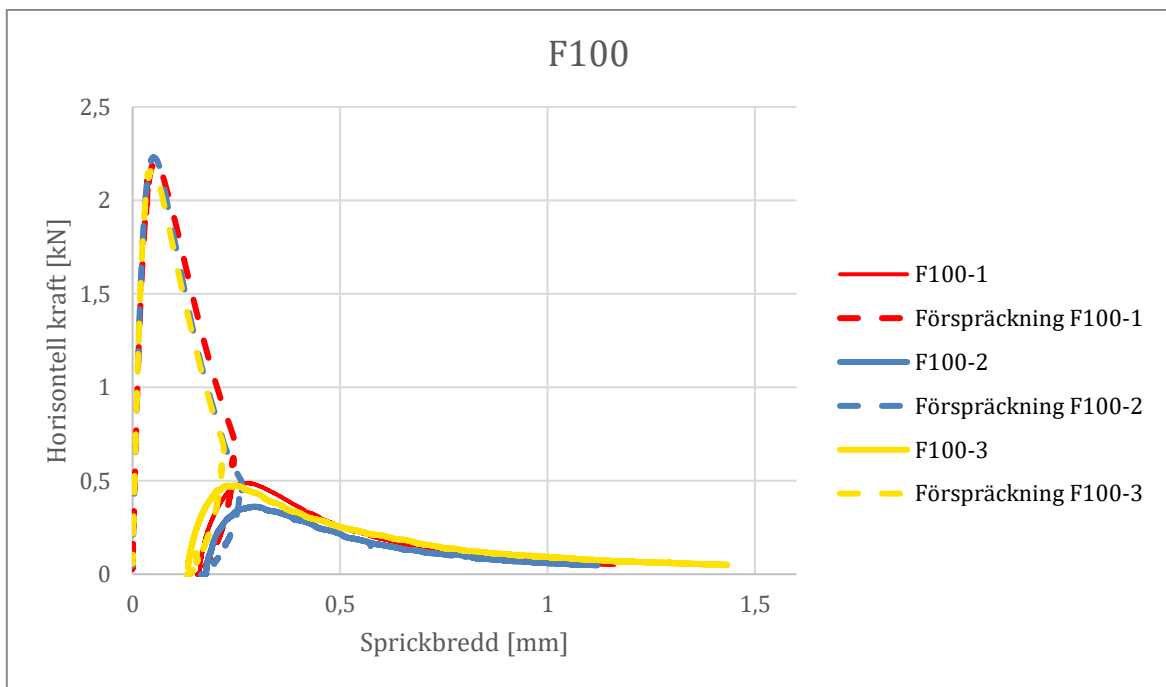
Figur A4.1: Resultat från kilklyvningsförsök på provkroppar utan förspräckning och inga frostcykler.



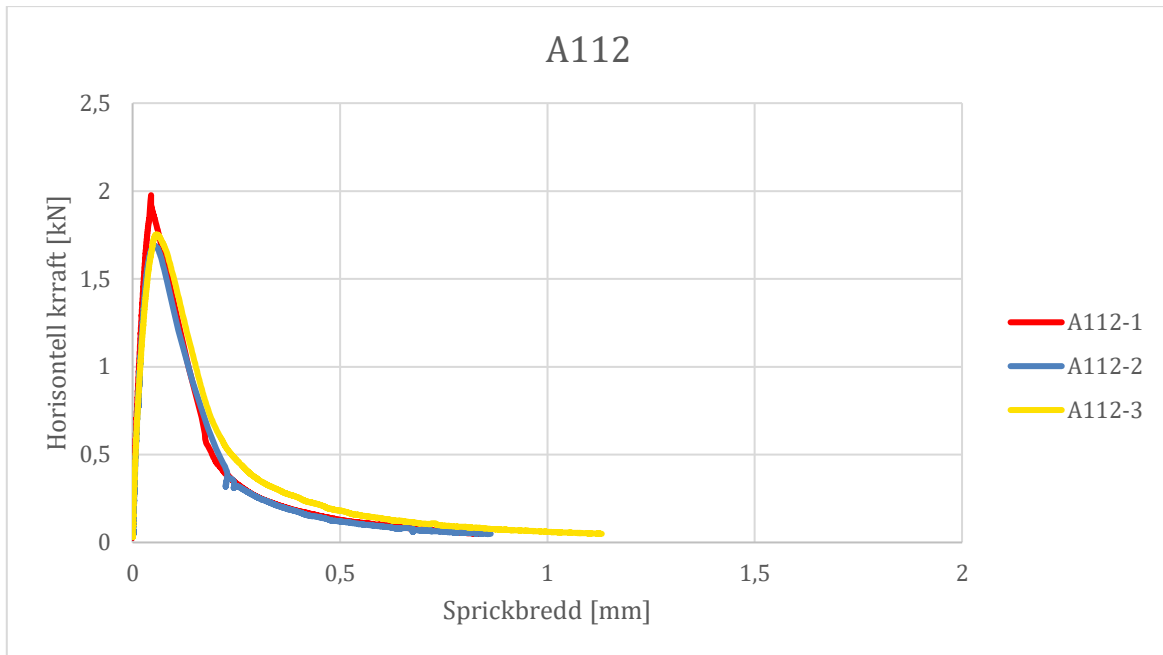
Figur A4.2: Resultat från kilklyvningsförsök på provkroppar med förspräckning och inga frostcykler.



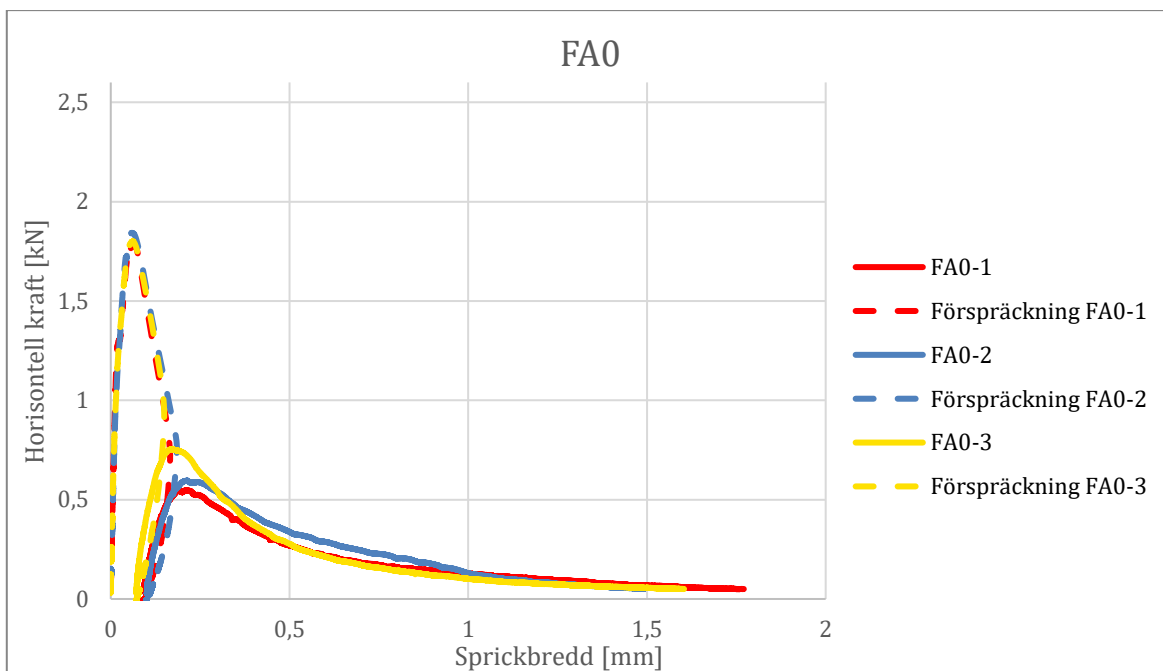
Figur A4.3: Resultat från kilklyvningsförsök på provkroppar utan förspäckning och med 100 frostcykler.



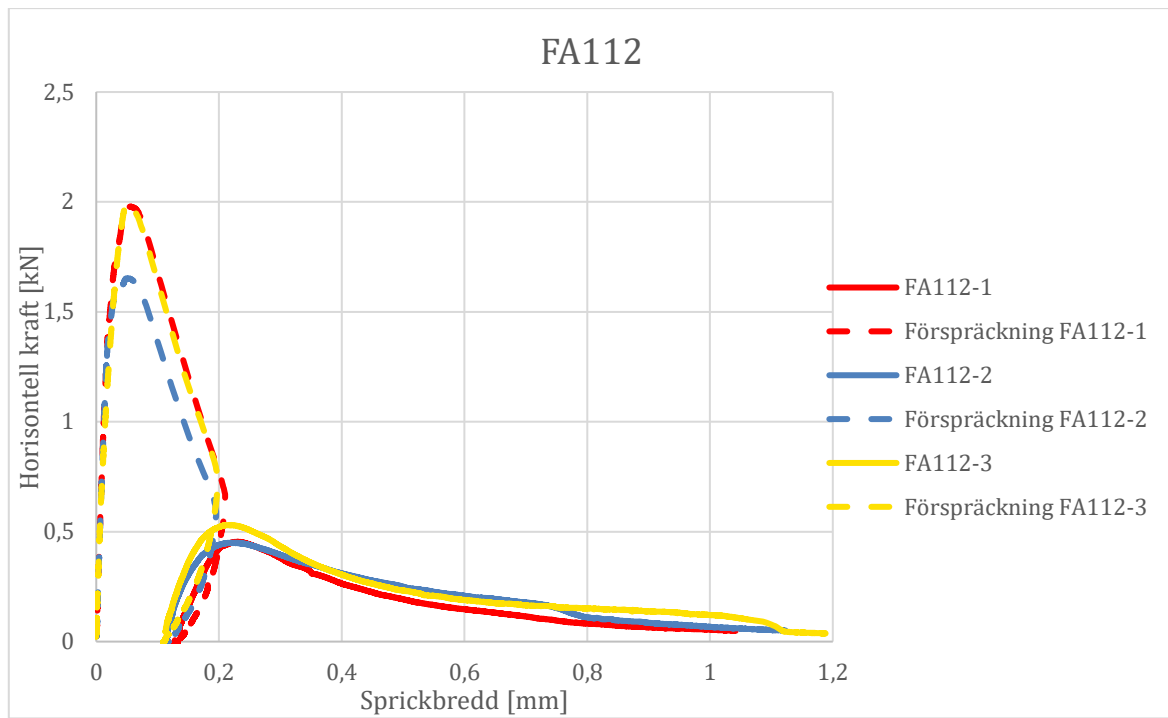
Figur A4.4: Resultat från kilklyvningsförsök på provkroppar med förspäckning och med 100 frostcykler.



Figur A4.5: Resultat från kilklyvningsförsök på provkroppar med armering, utan förspräckning och med 112 frostcykler.

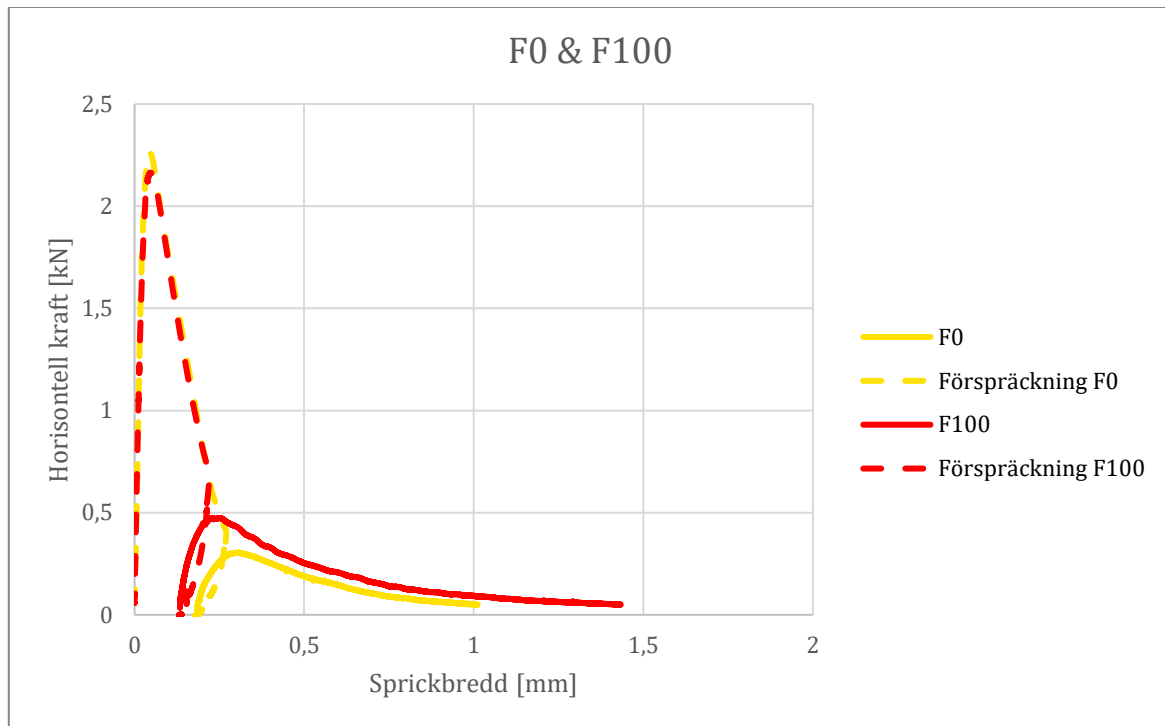


Figur A4.6: Resultat från kilklyvningsförsök på provkroppar med armering, med förspräckning och utan frostcykler.

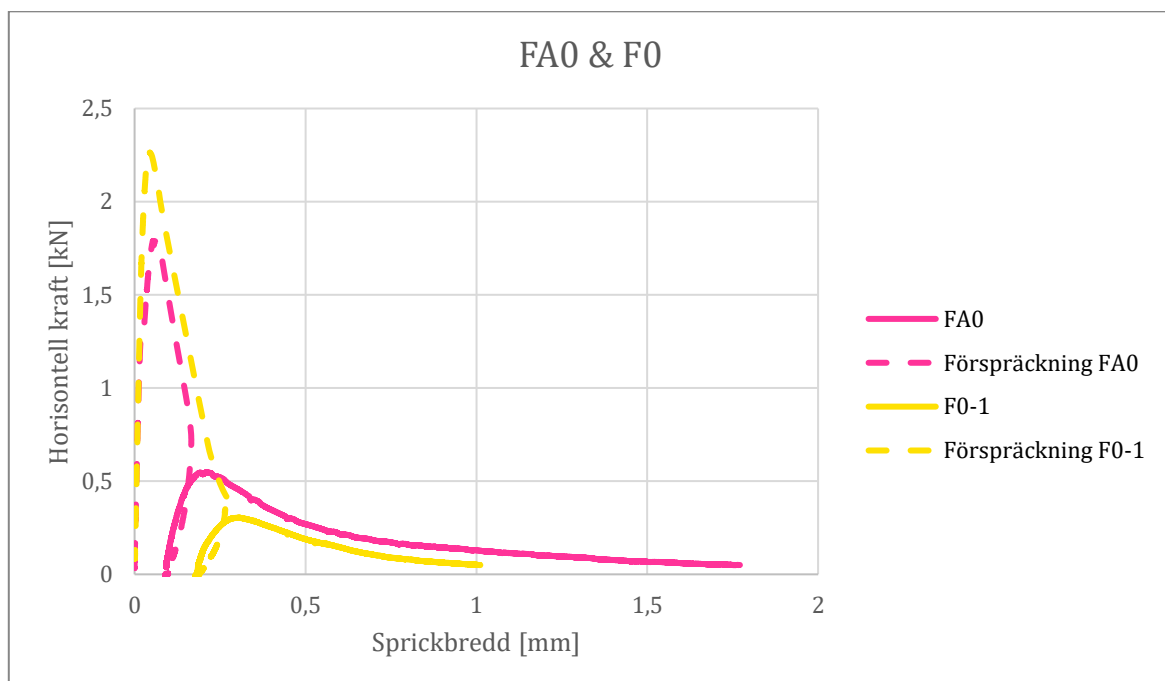


Figur A4.7: Resultat från kilklyvningsförsök på provkroppar med armering, med förspräckning och med 112 frostcykler.

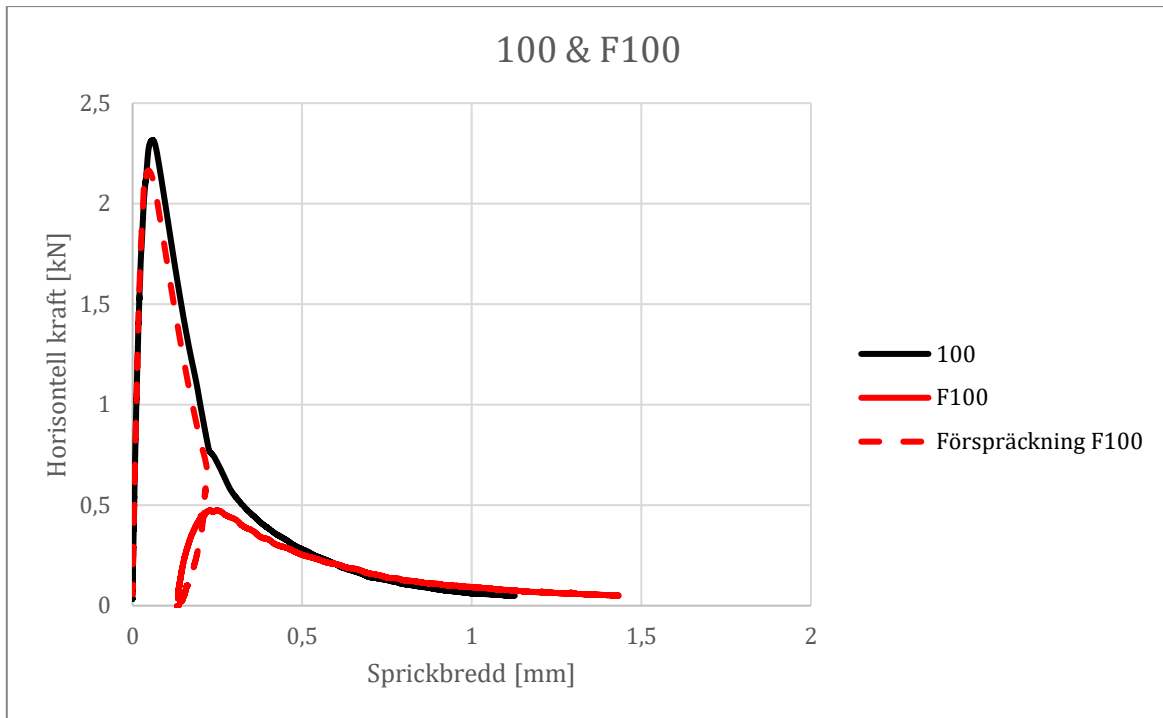
Appendix 5



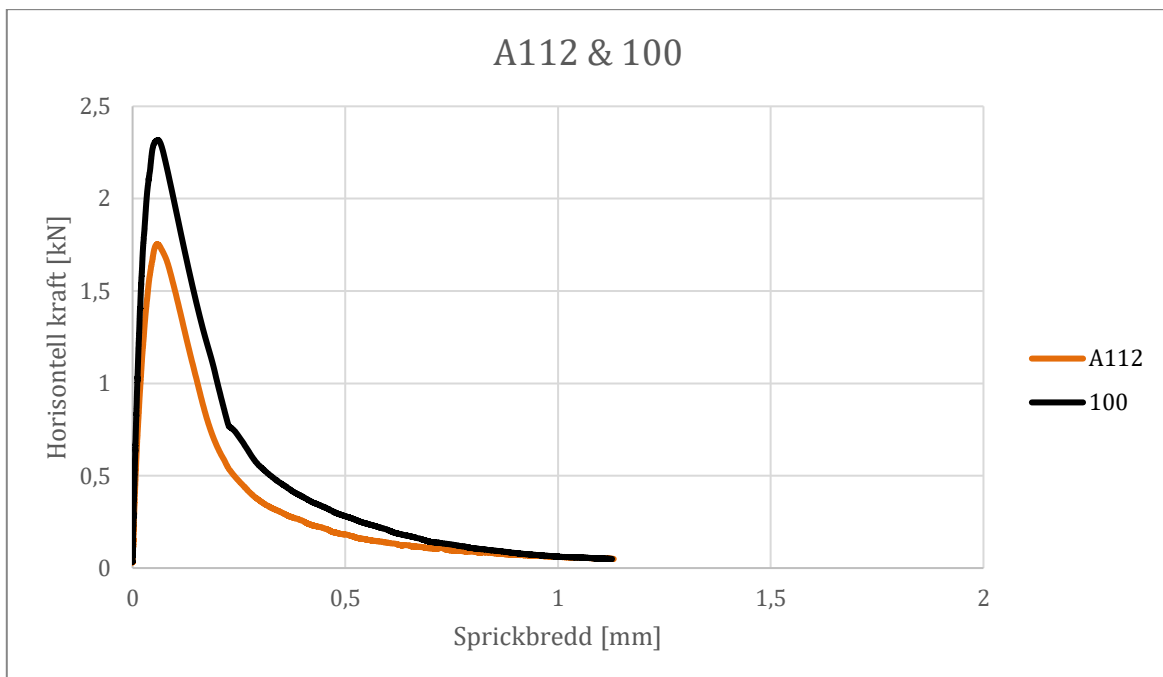
Figur A5.1: Jämförelse mellan provkroppar med 0 respektive 100 frostcykler och med förspräckning.



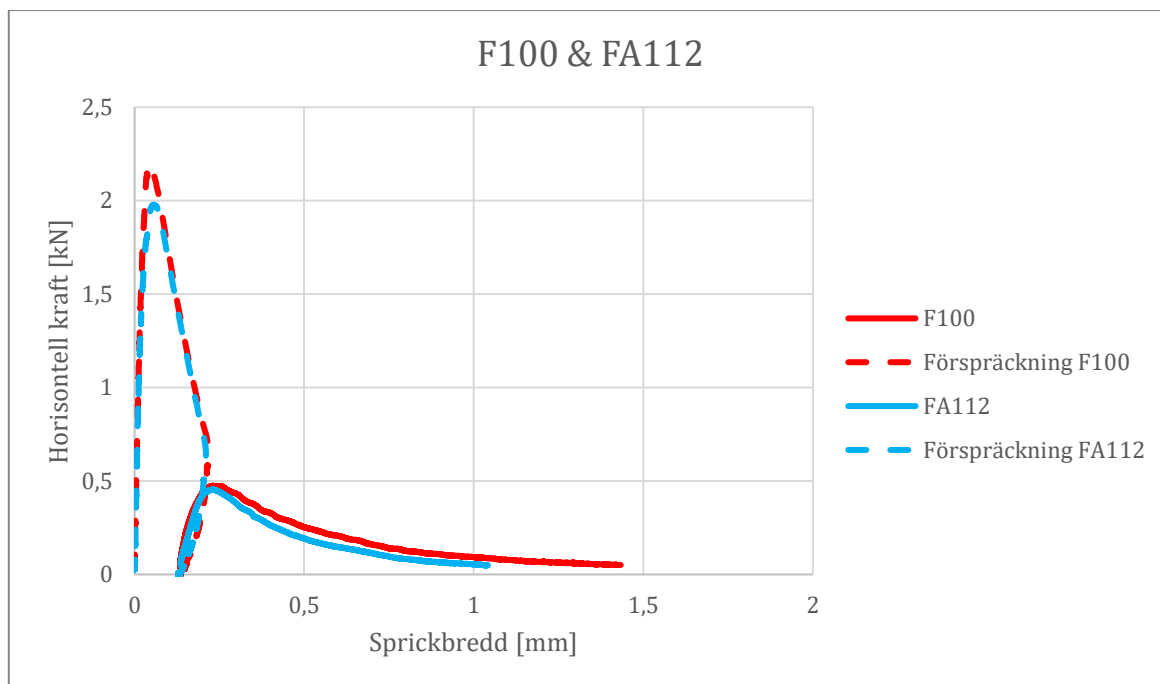
Figur A5.2: Jämförelse mellan provkroppar med respektive utan armering och med förspräckning.



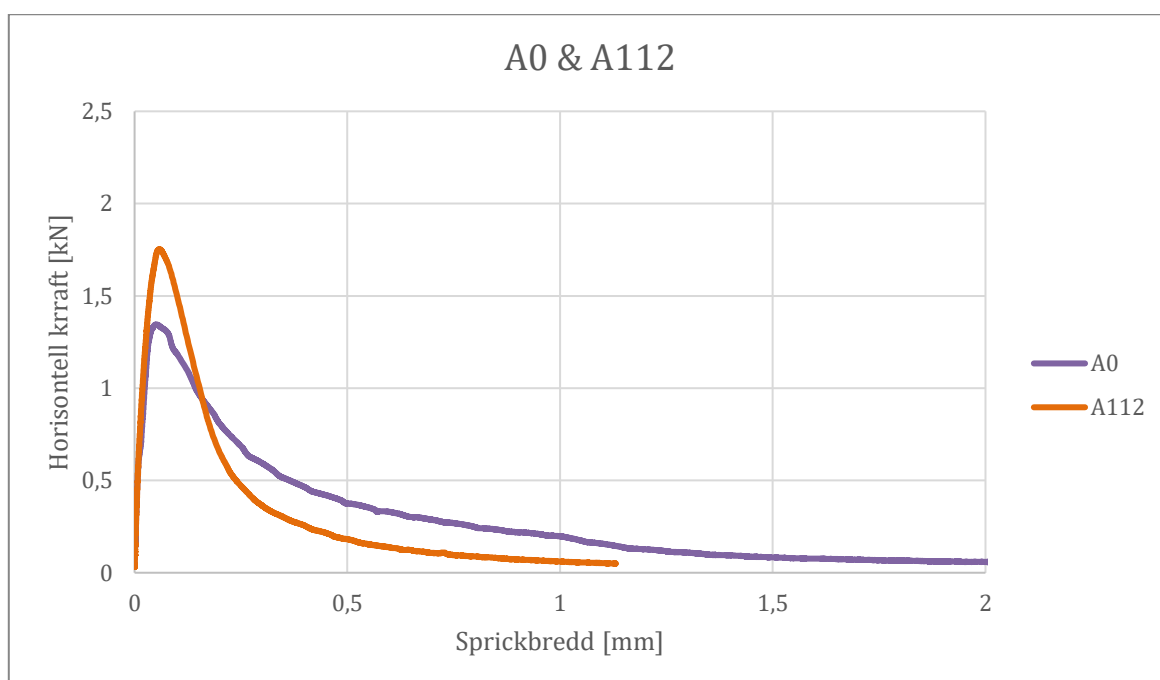
Figur A5.3: Jämförelse mellan provkroppar med respektive utan förspräckning och med 100 frostcykler.



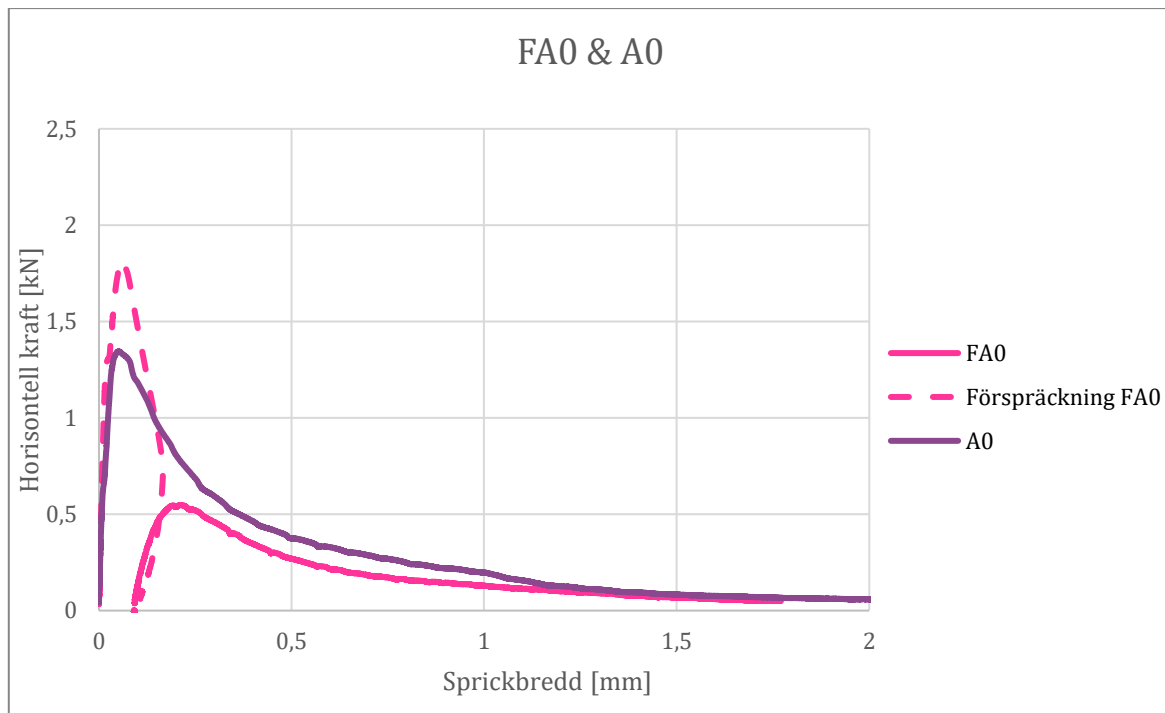
Figur A5.4: Jämförelse mellan provkroppar med respektive utan armering och med 100/112 frostcykler.



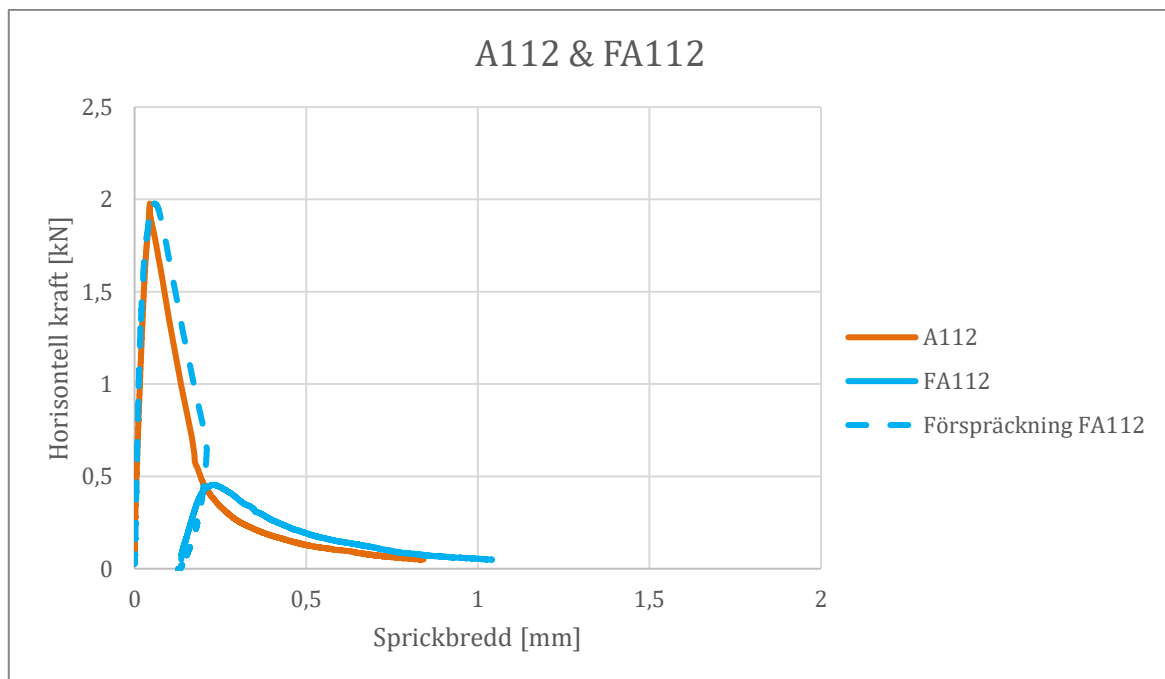
Figur A5.5: Jämförelse mellan provkroppar med respektive utan armering och med 100/112 frostcykler, samt förspräckning.



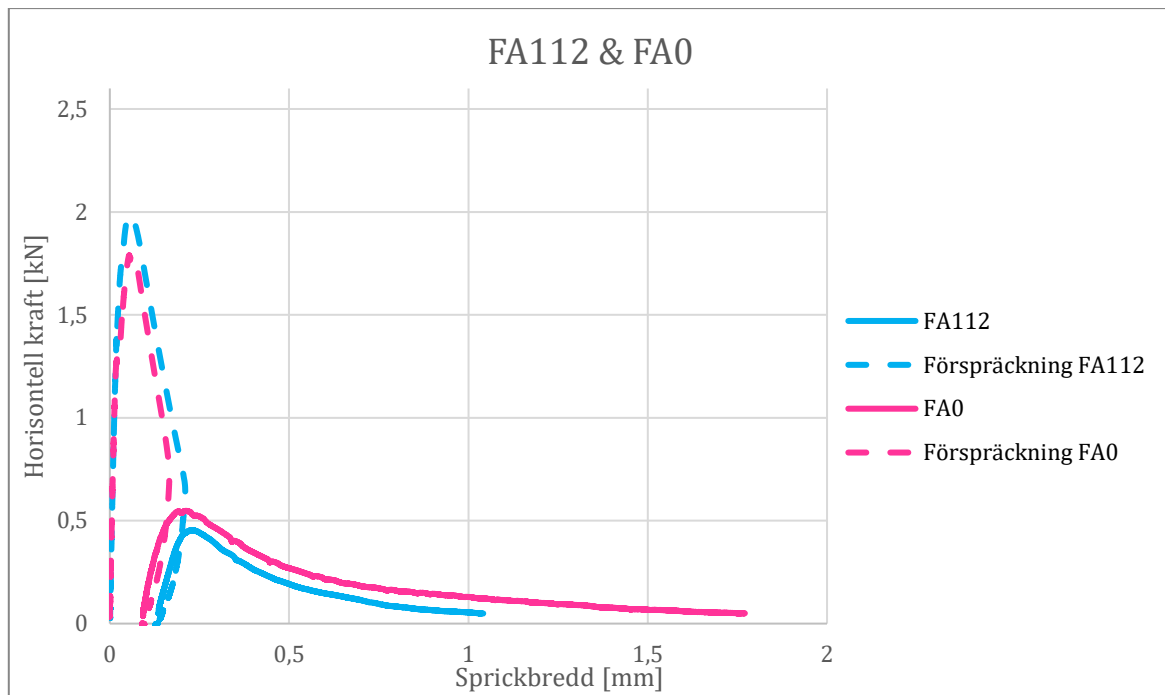
Figur A5.6: Jämförelse mellan provkroppar med 0 respektive 112 frostcykler och med armering.



Figur A5.7: Jämförelse mellan provkroppar med respektive utan förspräckning och med armering, samt utan frostcykler.

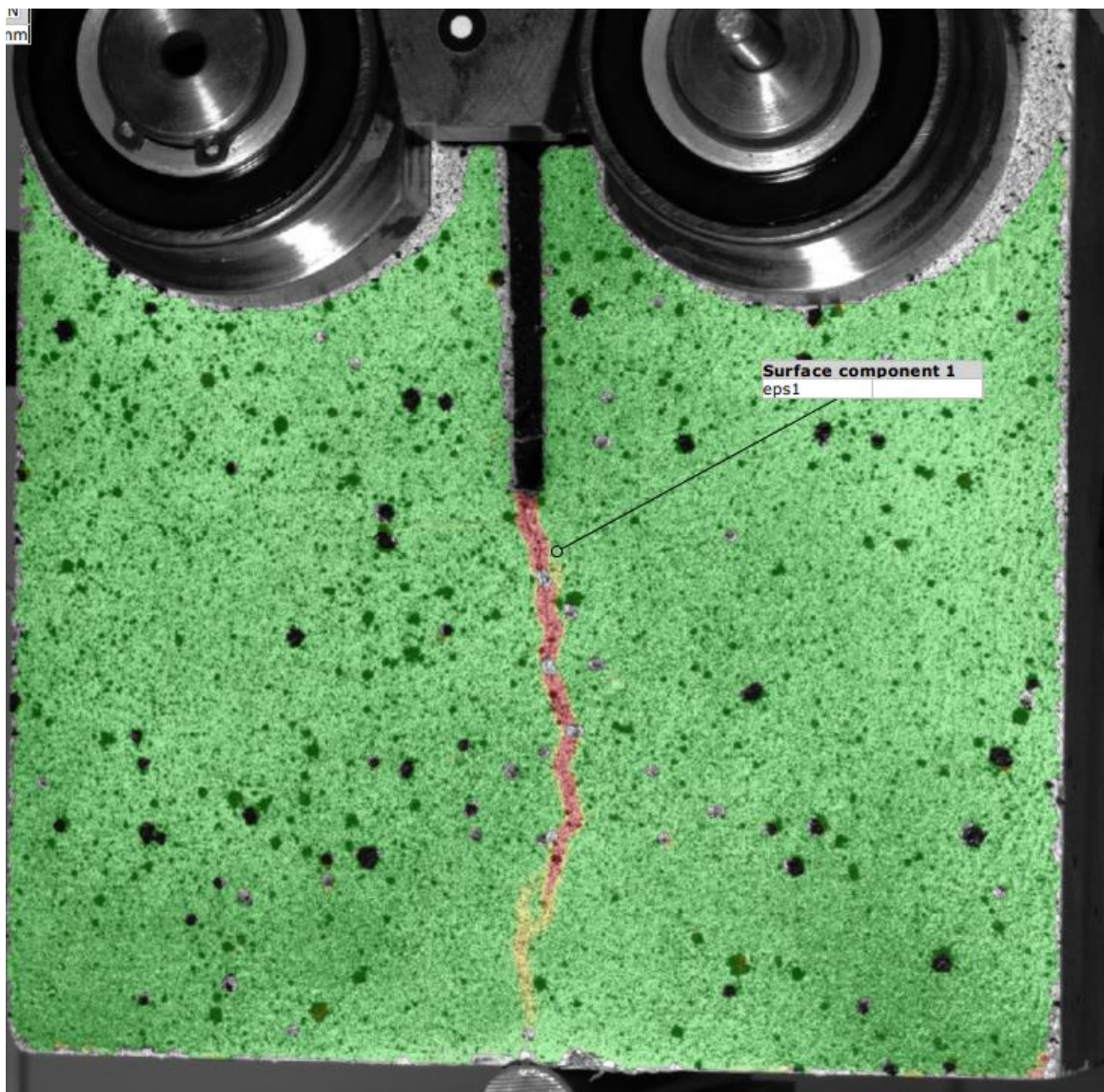


Figur A5.8: Jämförelse mellan provkroppar med respektive utan förspräckning och med armering, samt 112 frostcykler.

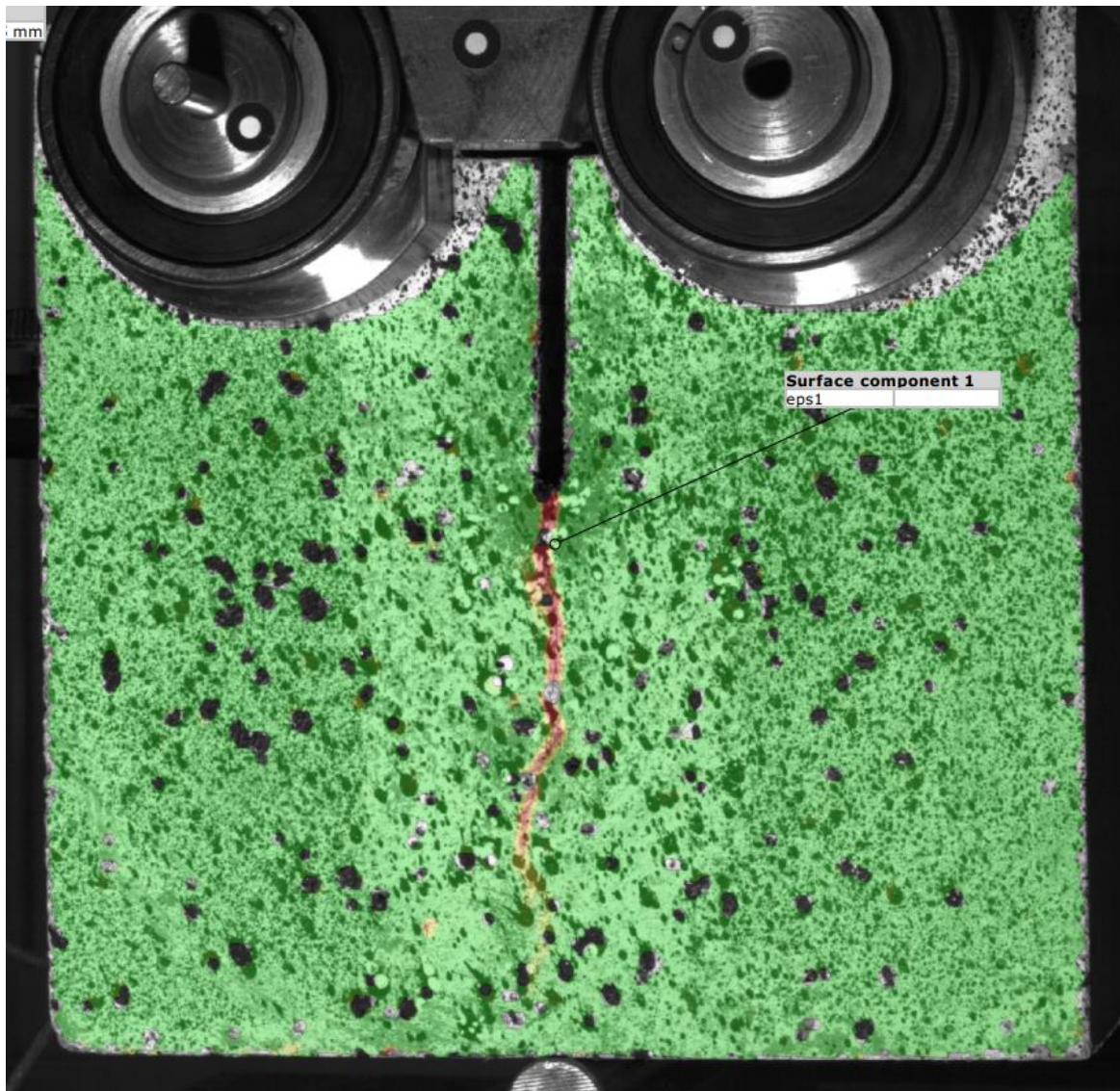


Figur A5.9: Jämförelse mellan provkroppar med 0 respektive 112 frostcykler och med armering, samt förspräckning.

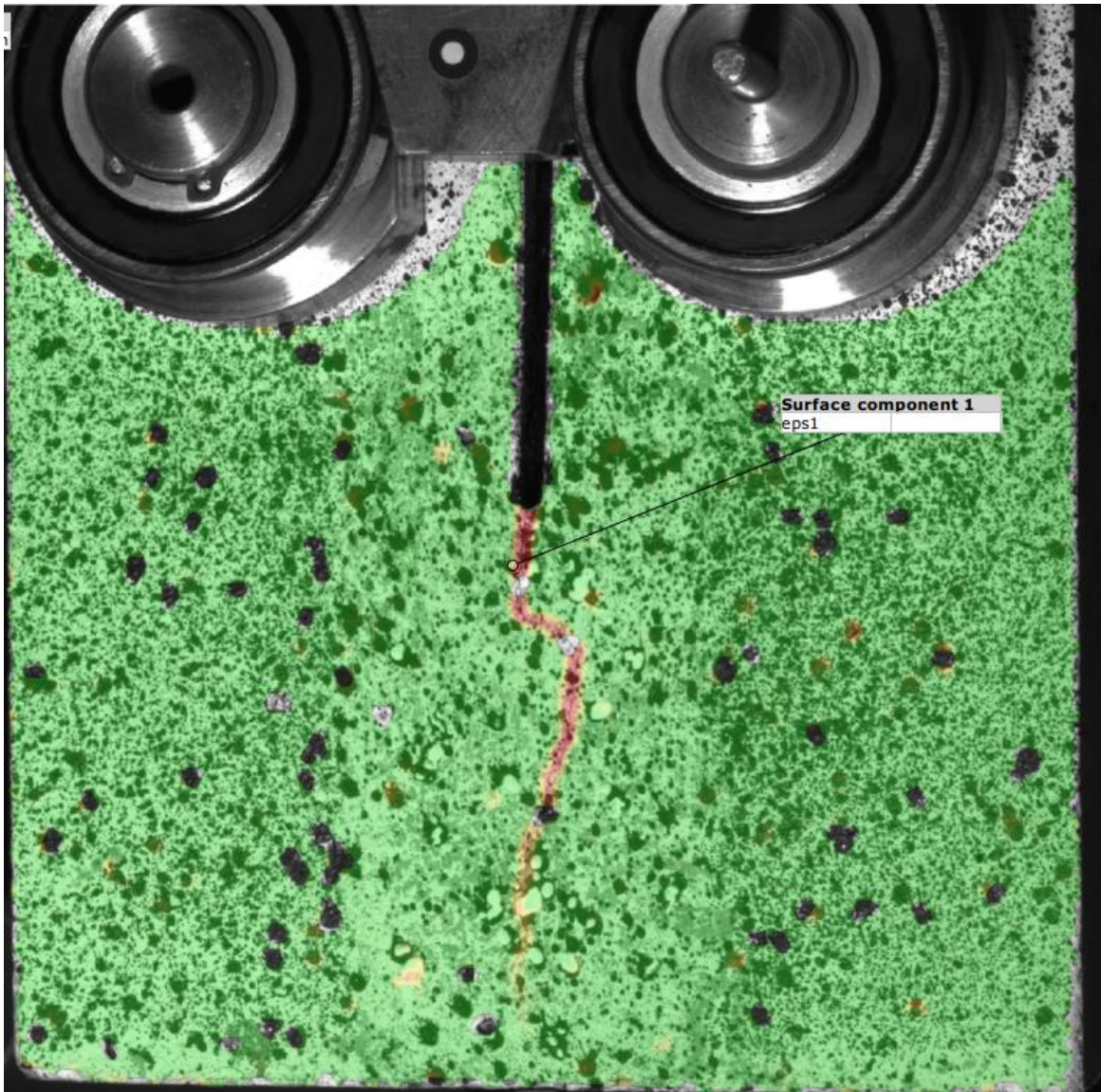
Appendix 6



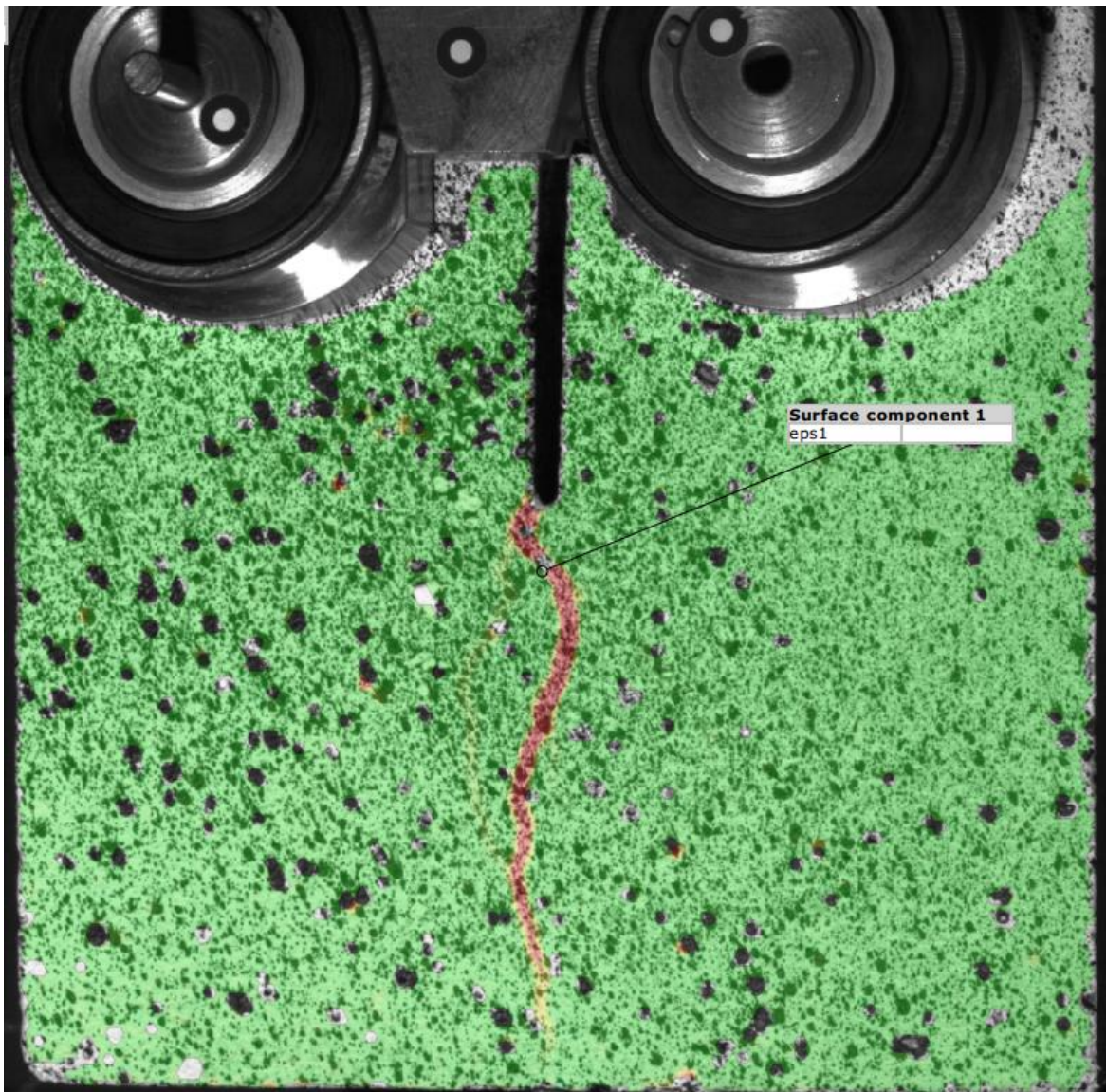
Figur A6.1: Sprickmönster visad med DIC-system för 100.



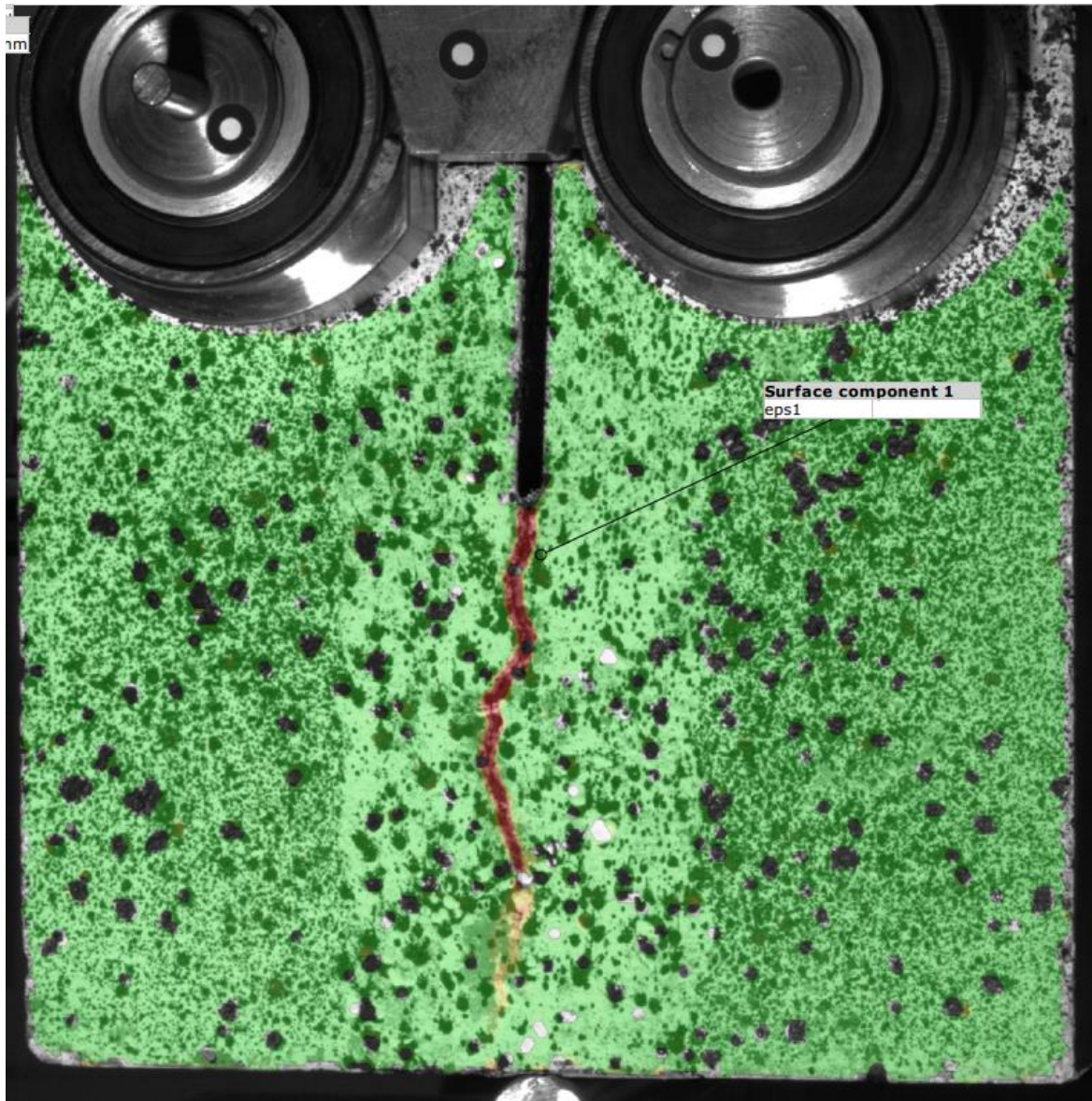
Figur A6.2: Sprickmönster visad med DIC-system för A100-1.



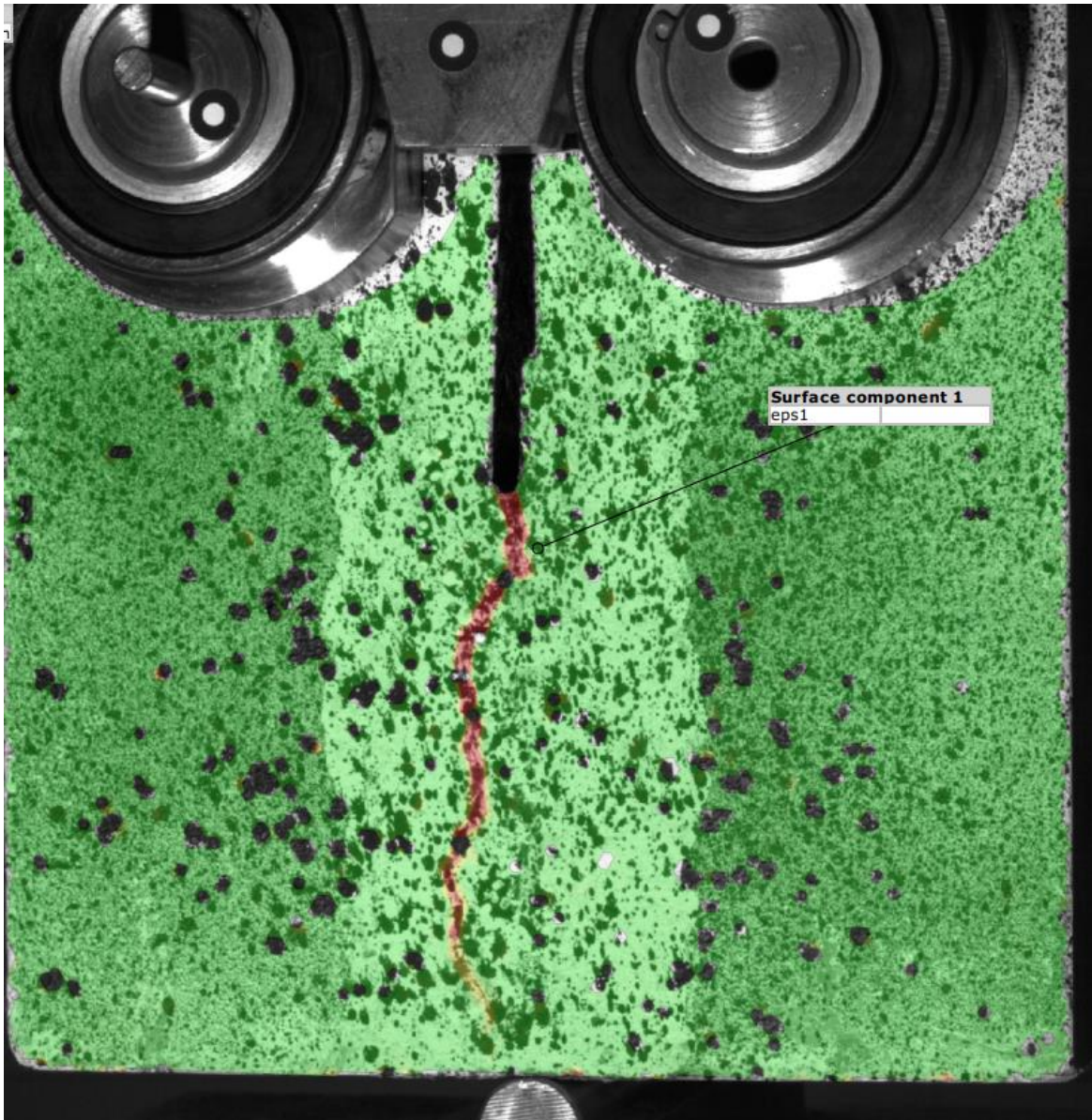
Figur A6.3: Sprickmönster visad med DIC-system för A100-2.



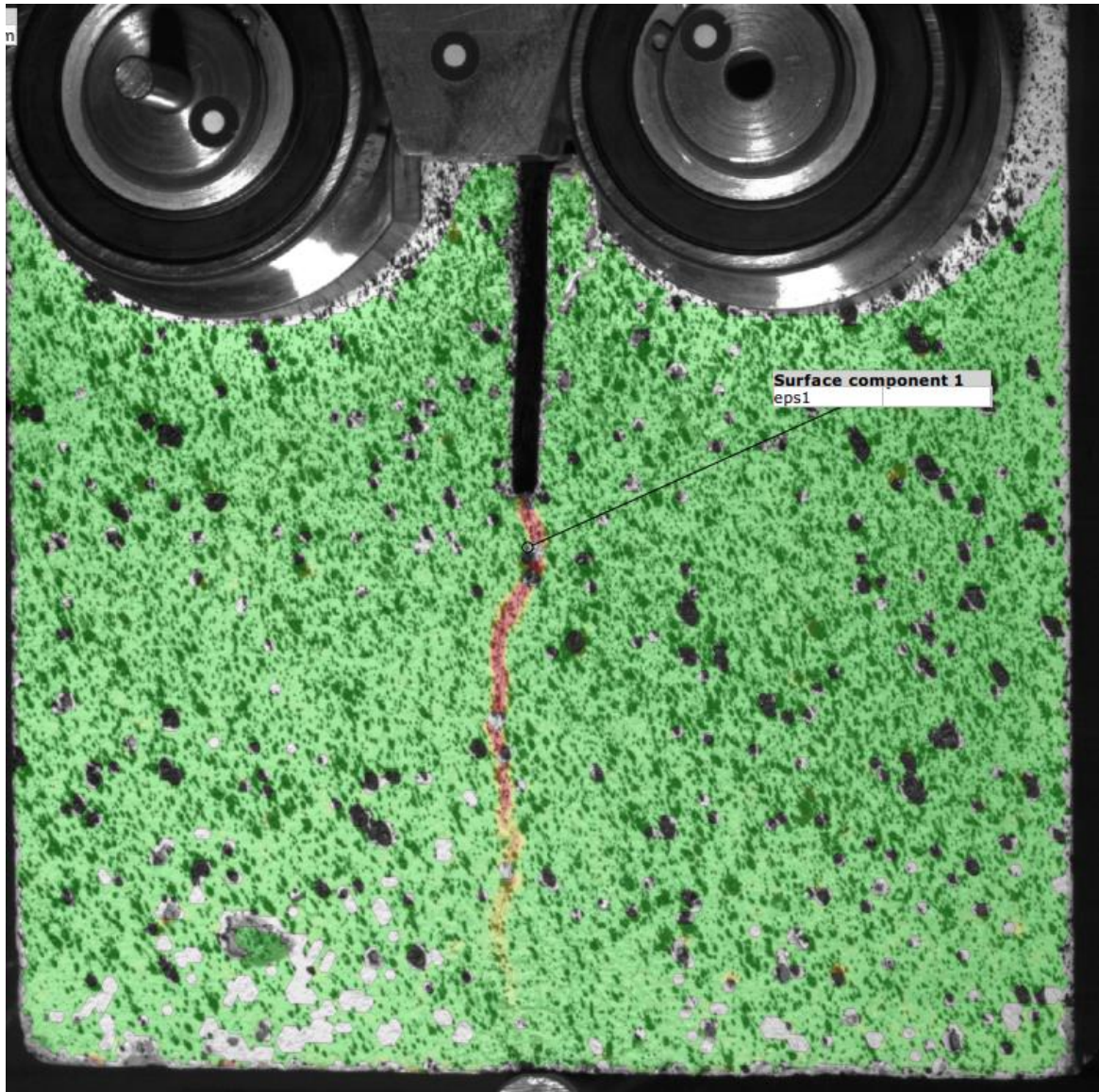
Figur A6.4: Sprickmönster visad med DIC-system för A100-3.



Figur A6.5: Sprickmönster visad med DIC-system för FA100-1.



Figur A6.6: Sprickmönster visad med DIC-system för FA100-2.



Figur A6.7: Sprickmönster visad med DIC-system för FA100-3.