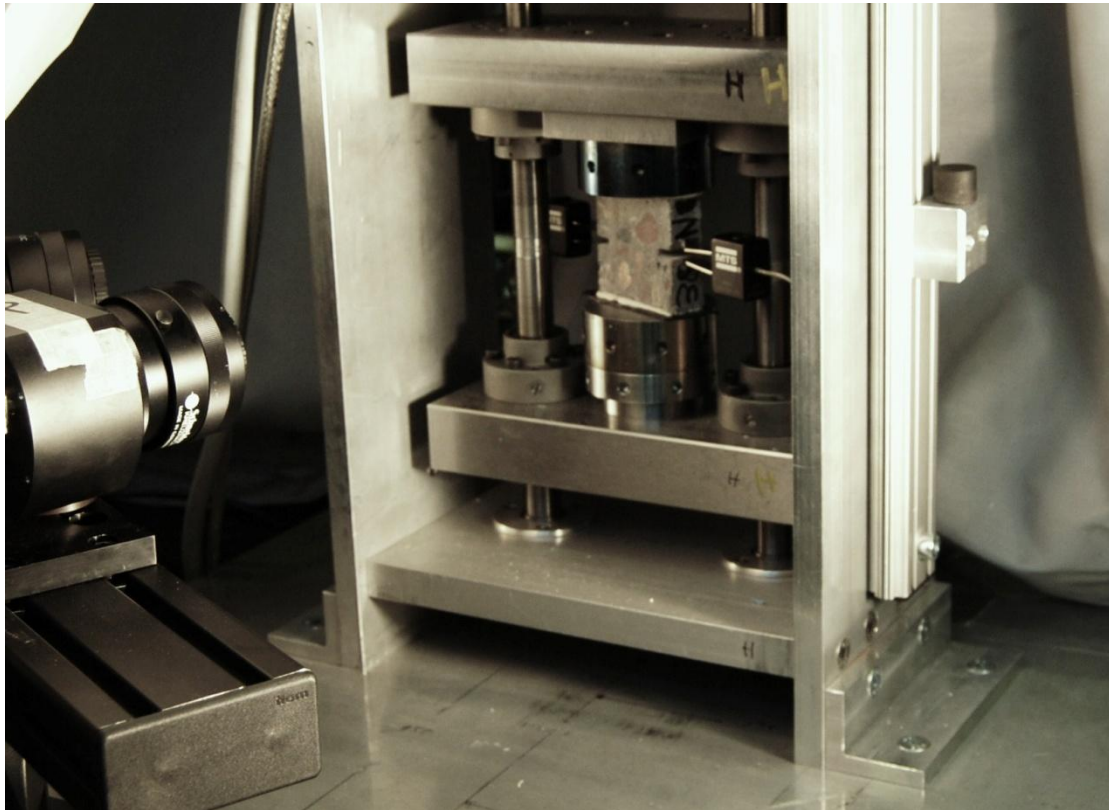




Metodik för optisk mätning av sprickbildning i dragen betong på mesonivå

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Byggingenjör*

HENRIK NILSSON & OSCAR PAGROTSKY

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för konstruktionsteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2012
Examensarbete 2012:114

EXAMENSARBETE 2012:114

Metodik för optisk mätning av sprickbildning i dragen betong på mesonivå

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Byggingenjör

HENRIK NILSSON & OSCAR PAGROTSKY

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för konstruktionsteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2012

Metodik för optisk mätning av sprickbildning i dragen betong på mesonivå
Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Byggingenjör

HENRIK NILSSON & OSCAR PAGROTSKY

©HENRIK NILSSON & OSCAR PAGROTSKY, 2012

Examensarbete / Institutionen för bygg- och miljöteknik,
Chalmers tekniska högskola 2012:114

Institutionen för bygg och miljöteknik
Avdelningen för konstruktionsteknik
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Telefon: 031-772 10 00

Omslag:
Dragprov monterat i dragsteget kort före provgenomförandet.

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Göteborg 2012

Metodik för optisk mätning av sprickbildning i dragen betong på mesonivå

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Byggingenjör*

HENRIK NILSSON & OSCAR PAGROTSKY
Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för konstruktionsteknik
Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

Genom detaljerade datorsimuleringar över sprickbildningen i betong ges möjlighet att optimera användningen av betong i framtida konstruktioner. Ett nyckelområde för att skapa dess detaljerade simuleringar är en ökad förståelse för hur betongens olika delar interagerar mekaniskt med varandra och noggrannare materialparametrar.

Denna studie hade som syfte att ta fram en metodik för optisk mätning av sprickbildning i dragen betong på mesonivå. Metoden förväntas underlätta kommande studier av betong på mesonivå.

På mesonivå betraktas betong som ett kompositmaterial bestående av ballast, cementpasta och en vidhäftningszon och mesonivån är den nivå där interaktionen mellan betongens olika delar kan studeras. Metodiken skulle sammanföra kvalitéerna från en dragmaskin och ett system för optisk deformationsmätning. Dragmaskinens möjlighet till att utföra precisa provningar är idealt för att genomföra studier på interaktionen mellan betong och ballast. Tillsammans med det optiska deformationsmätningssystemet Aramis möjliggörs en kontinuerlig observation av hela sprickbildningsförloppet, utan att försöken behöver avbrytas. Gemensamt skapas ett effektivt system där hela sprickbildningsprocessen kan studeras.

Studien resulterade i en rekommendation för hur metodiken ska vara utformad tillsammans med en lättöverskådlig och effektiv metodgång som gör det enkelt för andra intressenter att genomföra liknande provningar. Även förslag på systemförbättringar och andra användningsområden har tagits fram.

Nyckelord: Optisk deformationsmätning, DIC, dragbelastad betong, dragprov betong, Aramis,

Methodology for optical measurement of cracking in concrete under tension at a meso level

Diploma Thesis in the Engineering Programme
Building and Civil Engineering

HENRIK NILSSON & OSCAR PAGROTSKY
Department of Civil and Environmental Engineering
Division of Structural Engineering
Chalmers University of Technology

ABSTRACT

The interaction between cement paste and aggregate and its influence on the strength of concrete is currently a key area in order to create more detailed computer simulations of crack propagation in concrete.

The aim of this study was to develop a methodology for optical measurement of crack propagation in concrete specimens at a meso level. The methodology should bring together qualities from a tensile test machine for small samples and a digital image correlation system. The tensile test machines possibility of precise tests is ideal for studies on the interaction between concrete and aggregates. Together with the digital image correlation system Aramis it enables a continuous observation during the cracking process, without interrupting the experiments. Jointly they create an effective system where the cracking process can be studied.

The study resulted in a recommendation for how the methodology should be designed together with an easy and effective method that makes it easy for other interested parties to conduct similar tests. Also suggestions for system improvements and other uses for the system have been developed.

Key words:

Tensile loaded concrete, Digital Image Correlation, Aramis, DIC

Innehåll

SAMMANFATTNING	I
ABSTRACT	II
INNEHÅLL	III
FÖRORD	V
1 INLEDNING	1
1.1 Bakgrund	2
1.2 Syfte	2
1.3 Frågeställning	3
1.4 Metod	3
1.5 Genomförande	3
1.6 Avgränsning	4
2 BETONG	5
2.1 Inre struktur för betong	5
2.2 Spricktillväxt i betong	6
2.3 Dragprovning av betong	8
3 OPTISK DEFORMATIONS MÄTNING MED ARAMIS	11
4 METODIKUTVECKLING	13
5 METODIK FÖR OPTISKDEFORMATIONS MÄTNING PÅ MESONIVÅ	15
5.1 Systemuppställning	15
5.2 Provkroppsutformning	17
5.3 Förberedelser av provkroppen	18
5.4 Genomförande	20
6 VALIDERING AV METODIKEN	21
7 DISKUSSION	24
8 SLUTSATSER	26
9 REFERENSER	28
BILAGOR	29

Förord

Under våren 2012 har vi tillsammans med SP i Borås på avdelningen Mekanik och Bygg genomfört större delen av vårt examensarbete. Genom arbetes gång har vi fått en intressant och god inblick i forskarvärlden, och då framförallt den inom betongstudier.

Vi vill rikta våra största tack till vår handledare Mathias Flansbjer på SP och vår examinerator Rasmus Rempling på Chalmers. Tillsammans har de gjort arbetet möjligt. Vi vill även tacka Torsten Sjögren på SP och Björn Engström på Chalmers som har bidragit med värdefulla synpunkter och tips.

Göteborg juni 2012

Henrik Nilsson & Oscar Pagrotsky

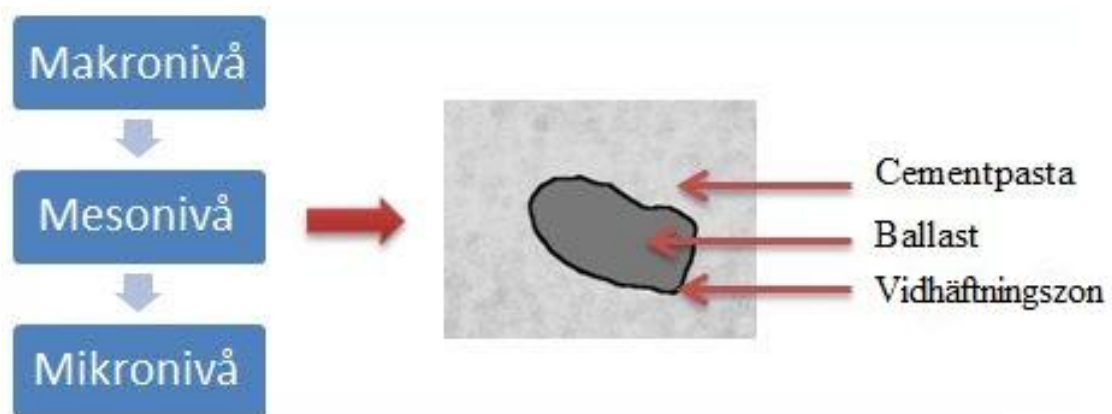
1 Inledning

Idag finns en stark strävan att optimera användningen av betong och i synnerhet att minska användningen av cement, då denna har en mycket energikrävande framställningsprocess och en härdningsprocess som släpper ut stora mängder CO₂. (Bilodeau, o.a., 2000).

För att öka förståelsen för betongen i sin helhet behöver vi ökad kunskap om hur betongens olika delar interagerar mekaniskt. Ökad förståelse förväntas kunna ge bättre beräkningsmodeller och högre optimeringsgrad utav materialen i betongen.

Betong studeras vanligen på tre olika nivåer, makro-, meso- och mikronivå. På makronivå ses betongen som ett homogent material. Mesonivå avser en nivå mellan makro- och mikronivå där samverkan mellan betongens komponenter studeras. På mikronivå studeras enskilda ballastkorn eller endast cementpastans struktur.

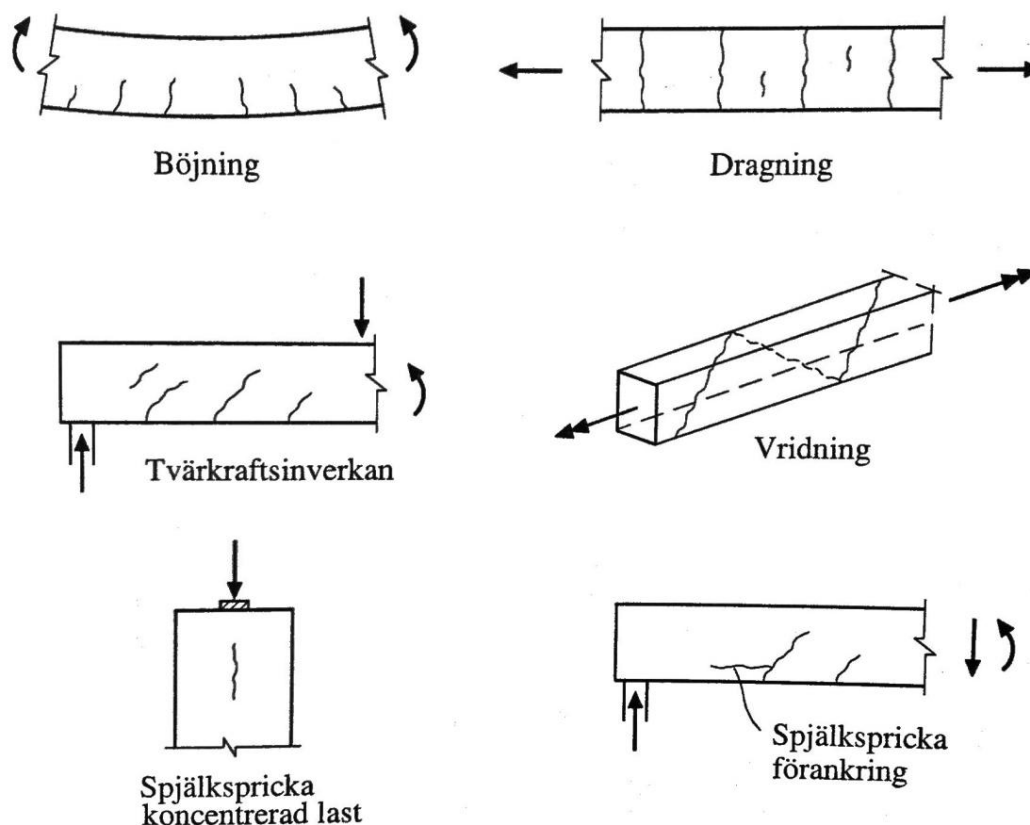
Då betong studeras på mesonivå kan den ses som en sammansättning av tre olika faser, cementpasta, ballast och vidhäftningszon. Vidhäftningszonen mellan ballast och cementpasta utgör ofta en svaghetszon där cementpastan inte är fullt utvecklad (se figur 1).



Figur 1. Förklaring av de tre nivåer (Makro, meso och mikro) som betong vanligen studeras på samt de tre faser (Cementpasta, ballast och vidhäftningszon) som betong är en sammansättning av.

I ett samarbete mellan SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB (SP) och CBI Betonginstitutet AB (CBI) pågår ett gemensamt forskningsprojekt där sprickbildning i betong studeras på mesonivå. Detta examensarbete är ett led av detta forskningsprojekt.

Sprickbildning är viktigt att studera då nästan alla typer av belastningar leder till att sprickor bildas i betongen (se figur 2). Till följd av sprickorna möjliggörs armeringens förstärkande effekt i armerad betong. Samtidigt ökar dock risken för korrosion på spännstålet och att vatten tränger in i konstruktionen och spränger betongen då det fryser till is.



Figur 2. Vanliga krafter och hur de påverkar sprickbildningen i betong (Engström, 2008).

1.1 Bakgrund

Inom ett tidigare forskningsprojekt på SP och CBI studerades hur betongens mikrostruktur inverkade på betongbalkars mekaniska verkningssätt vid skjuvning av tvärkraft. I projektet studerades olika betongrecept, dels med naturgrusballast dels med krossballast. Från provningarna kunde det konstateras att typen av ballast och dess orientering hade stor inverkan på hur sprickorna initierades och propagerade i betongstrukturen. (Flansbjer, o.a., 2011)

Som fortsättning på forskningsprojektet genomfördes ett examensarbete (Lindgren, o.a., 2010) för att konstruera en dragmaskin, ett så kallat dragsteg, där mindre provkroppar kan belastas i rent drag. Dragsteget utvecklades då det inte fanns några system för att utföra precisa dragprov på mesonivå. Sprickbildningen observeras genom optisk deformationsmätning (DIC) med systemet Aramis.

Förhoppningen är att dessa system tillsammans ska kunna ge en detaljerad bild av sprickprocessen och ge underlag till materialparametrar som senare bland annat kan användas för datoriserade modeller.

Idag finns ingen färdig metodik för att utföra dragproven med dessa system, vilket är motivet för den aktuella studien.

1.2 Syfte

Projektet syftade till att ta fram en metodik för att dragbelasta betong och observera sprickprocessen på mesonivå. Projektet skulle fokusera på att kombinera dragsteget, som är utvecklat för att utföra precisa dragprov, med systemet Aramis, som utför

optisk deformationsmätning. Denna metodik skulle ge möjlighet att på ett kvalitativt och effektivt sätt utföra dragprovningar på betong samtidigt som sprickbildningsprocessen registreras genom optiska deformationsmätningar. Denna möjlighet förväntas i längden öka förståelsen för betong och ge bättre materialparametrar som kan användas vid datormodellering.

1.3 Frågeställning

För att skapa en metodik som kombinerar egenskaperna hos de båda systemen förväntades följande frågeställningar behöva besvaras:

Hur ska systemuppställningen vara utformad? Behov av externa deformationsgivare som komplement undersöks. Ljussättningen i kombinationen med inställningar i Aramissystemet måste motverka att reflektioner och skuggningar uppstår.

Hur kan provkroppen monteras i dragsteget? Snedställning och excentricitet måste undvikas för att kraften som verkar på provkroppen ska bli jämnt fördelad.

Vad är den optimala provkroppsutformningen? Den yta som kan registreras med Aramis måste vara representativ för hela kroppen vilket uppnås genom en tunn provkropp. Samtidigt måste brott ske i en sådan hastighet att förloppet kan observeras med tillräcklig noggrannhet, vilket uppnås med en större tvärsnittsarea.

Krävs det en ytbehandling av provkroppen? Optisk deformationsmätning med Aramis är endast möjlig om ytan och förändringar av denna kan registreras genom kamerorna.

1.4 Metod

Metodiken för att observera sprickbildning på mesonivå i dragen betong skulle utvecklas genom att sammanföra kvalitétéerna hos befintligt dragsteg och Aramis. För att sammanföra systemen och svara på frågeställningen olika metoder prövas tills en fungerande metodik hade skapats.

När metodiken är utformad användas den för att utföra prover i rent drag på två betongtyper, därefter skulle resultaten analyseras för att validera att metodiken fungerar tillfredsställande.

1.5 Genomförande

För att förstå systemen och problemen som kunde uppstå under arbetets gång behövde litteraturstudier genomföras för att få baskunskaper om sprickbildning i betong och för de olika systemen som skulle användas.

Metodiken kunde sedan arbetas fram bland annat genom att svara på frågeställningen. Fortsatta litteraturstudier för att få fördjupade kunskaper behövde ske parallellt med metodikutvecklingen.

Genom att genomföra dragprover förfinades metodiken samtidigt som resultaten från proverna kunde användas för analys och slutsatser om systemets kvalitet.

1.6 Avgränsning

Metodiken skulle avse dragbelastad betong. Provklossar i två olika utföranden skulle användas. Dessa skulle vara indelade i högpresterande betong med natur- eller krosstensballast.

Observationen av sprickbildningen skulle ske på mesonivå med hjälp av DIC i systemet Aramis, varifrån slutsatser skulle dras.

Litteraturstudien skulle avgränsas till materialstudie, sprickbildning i dragbelastad betong och metodanvändning av DIC.

2 Betong

Betong finns överallt omkring oss både i stora och små konstruktioner. Det är ett av de absolut vanligaste byggnadsmaterialen tillsammans med stål och trä. Betong är i huvudsak uppbyggt av cement, vatten och ballast. En viss del tillsatsmedel används också för att skapa speciella egenskaper.

Cement är bindemedlet i betong och när det blandas med vatten sker en kemisk reaktion och betongen hårdnar. När cement blandas med vatten bildas cementpasta. Huvudsaklig råvara i cementframställningen är kalksten. Redan på romartiden användes ett cementliknade material som byggnadsmaterial. Kunskapen gick dock förlorad och det var först under 1400-talet som den återupptäcktes. Den första cementtillverkningen i Sverige startades år 1872 i Lomma i Skåne.

Ballast används som fyllnadsmaterial för att öka hållfastheten och minska mängden cement. Ballasten består av en blandning av sand (≤ 4 mm), fingrus (≤ 8 mm), och sten (> 8 mm). Vanligtvis används krossat berg men även naturgrus förekommer.

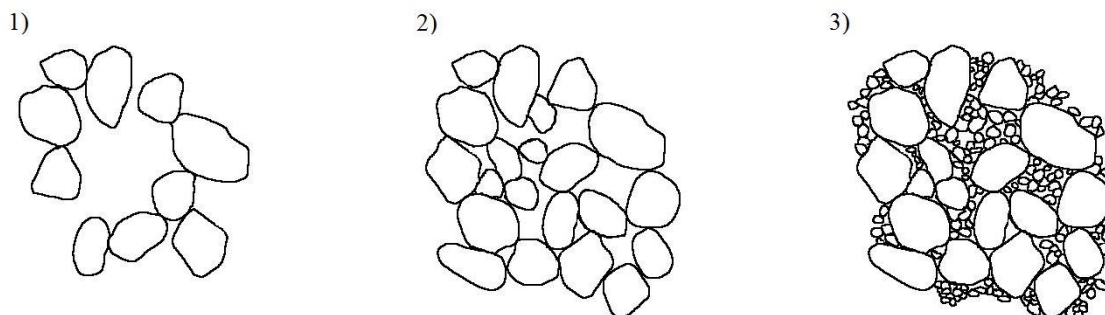
De vanligaste tillsatsmedlen är flytmedel, vattenreducerandemedel och luftporsbildandemedel. Acceleratorer och retarderande tillsatsmedel används också för att ge antingen en snabbare eller långsammare härdning (Burström, 2007).

2.1 Inre struktur för betong

På makronivå ses betong som ett homogent material medan det på mesonivå ses som en uppbyggnad av flera delmaterial med olika egenskaper som interagerar och tillsammans skapar betongens funktion. På mesonivå betraktas betong ofta som en sammansättning av tre olika faser; cementpasta, ballast och en lokal vidhäftningszon som sammanbinder dem.

Ballastmaterialet används primärt som utfyllnad även om ballasttyper och kvalitet påverkar betongens egenskaper. Ballasten bör vara väl graderad så att betongen fylls jämnt med så små hålrum som möjligt (Joan, o.a., 1990). Ballasten omsluts av cementpastan och vidhäftningen mellan dessa påverkar hur spricktillväxten i betongen utvecklar sig. Vidhäftningszonen utgör ofta en svaghetszon kring ballastkornen där cementpastan inte är fullt utvecklad och har högre porositet. Ett skrovligt ballastmaterial får en högre vidhäftningsförmåga och leder således till högre skjuv- och draghållfasthet (Flansbjer, o.a., 2011).

Betong med högt vattencementtal (VCT) har låg hållfasthet då det vid härdning blir mer poröst när vattnet torkar ut. Motsatsen gäller då för betong med lågt VCT, där materialet blir tätare och därigenom får högre hållfasthet. En nackdel är dock att materialet även blir sprödare vid lägre VCT (Burström, 2007). För att bilda mycket tät betong används vattenreducerande medel och filler (se figur 3). Filler består av små partiklar ($0,1-0,2$ μm) som packas mycket tätt och därigenom fyller ut mycket små hålrum mellan cementkornen. Vanligt förekommande filler är flygaska och silica. (FIP-CEB, 1990)



Figur 3. Från vänster till höger visas princip för 1) standardbetong, 2) betong med flyttillsats och 3) betong med flyttillsats och filler.

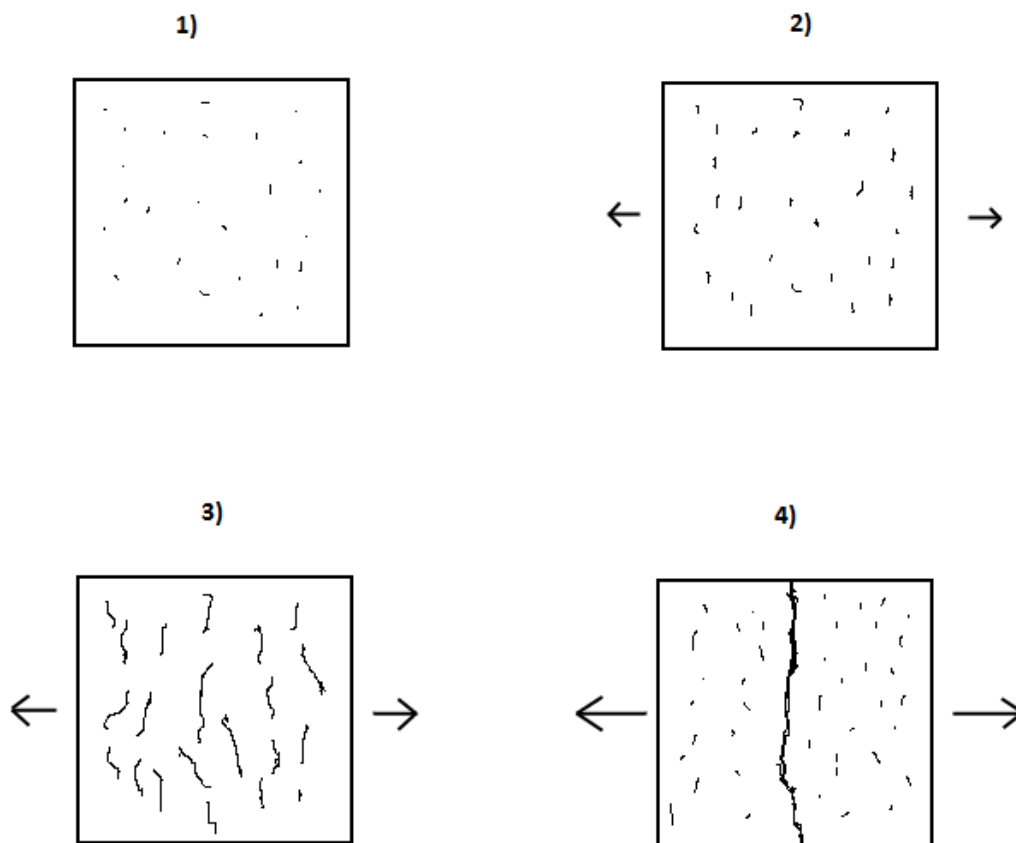
2.2 Spricktillväxt i betong

Nästan alla former av belastning på betong leder till sprickbildning (se figur 2). Detta är fullt normalt och oftast inget problem, till exempel så måste armerad betong spricka för att armeringens förstärkande effekt ska kunna utnyttjas.

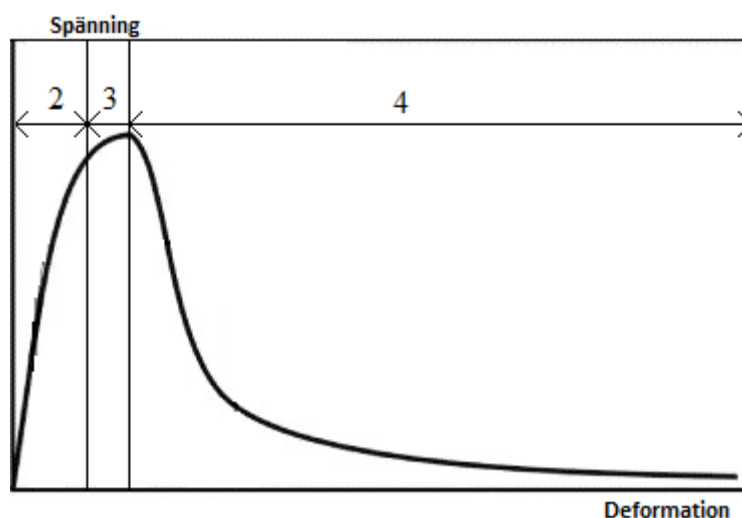
Det finns dock negativa sidor med sprickbildningen. Utmattningshållfastheten hos spännstål som korsar sprickor kan påverkas negativt då sprickorna öppnas och stängs växelvis. Sprickbildningen har också en stor inverkan på betongkonstruktioners styvhet vilket i sin tur kan påverka konstruktioners nedböjning och svängningsegenskaper ogynnsamt (Engström, 2008).

Mikrosprickor och lokala försvagningar finns alltid i betongen, även när den inte belastas. Dessa sprickor finns utspridda slumpmässigt genom hela materialet och uppstår oftast från krympning, temperaturskillnader, svaghetszoner mellan cementpastan och ballasten samt genom spänningar och rörelser i betongen från härdningsprocessen (Pavlović, o.a., 1995).

I figur 4 ges en schematisk beskrivning av sprickprocessen för dragbelastad betong. Under den första linjära delen av spännings-deformationskurvan (se figur 5) vidgas och förlängs befintliga mikrosprickor vinkelrät mot dragriktningen samtidigt som det även uppstår nya mikrosprickor (2). När dragspänningen närmar sig draghållfastheten sammanfaller vissa stråk av mikrosprickor och bildar makrosprickor (3). Efter att draghållfastheten är uppnådd avtar hållfastheten i takt med att en enstaka makrospricka utvecklas i det svagaste snittet (4).



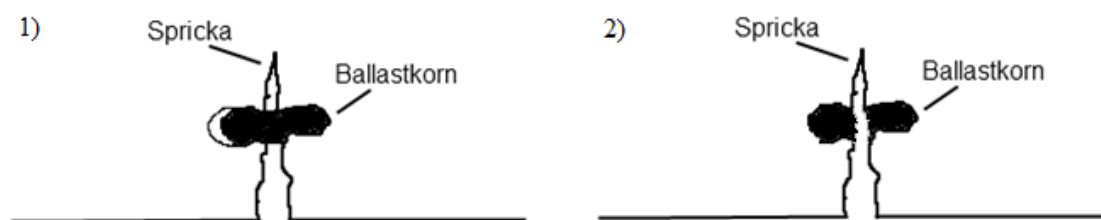
Figur 4. Dragbelastad betong. 1) Obelastad, mikrosprickor. 2) Mindre belastning, mikrosprickorna växer och nya tillkommer. 3) Högre belastning, sprickorna växer, faller samman och bildar makrosprickor. 4) Dragbelastningen avtar i takt med att en makrospricka utvecklas i det svagaste snittet.



Figur 5. Schematisk spänning- deformationskurva för dragbelastad betong.

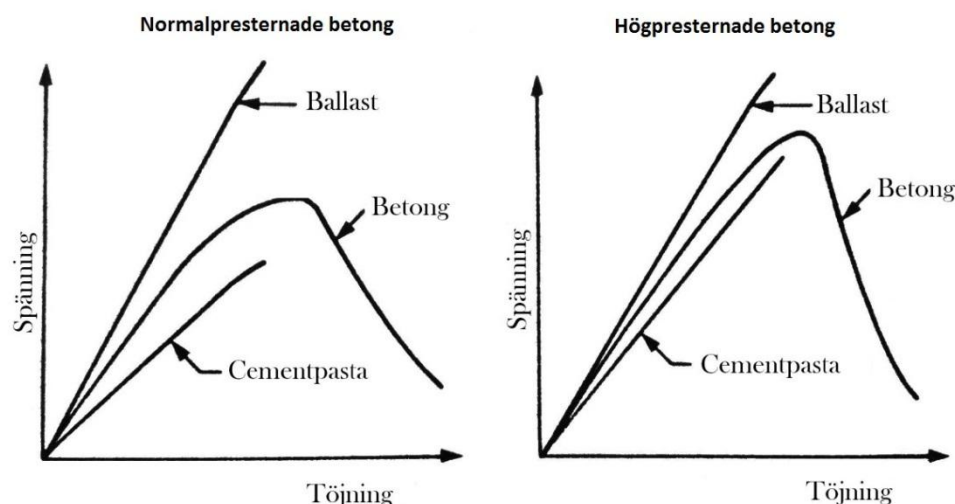
När spricktillväxten har initierats är det många faktorer som spelar in på hur tillväxten ter sig. I normalpresterande betong (NPB) är cementpastan svagare än ballasten vilket huvudsakligen ger spricktillväxt i cementpastan och runt ballastkornen. Storleken på ballasten påverkar därför materialets seghet, då större ballastkorn ger en större kontaktyta med cementpastan och en längre spricklängd. Trots att cementpastan runt ett ballastkorn är spräckt i ett snitt finns det fortfarande andra delar av ballasten där

vidhäftningen fortfarande är stor, ballasten motverkar på så sätt brottet (se figur 6). Ballastens vidhäftning till cementpastan påverkas av ballastytans skrovlighet och oregelbundenhet. Allt detta leder till att ballastens storlek, form och orientering spelar en stor roll för hållfastheten i NPB.



Figur 6. 1) Spricka i cementpastan runt och förbi ballastkornet. 2) Spricka genom ballastkornet.

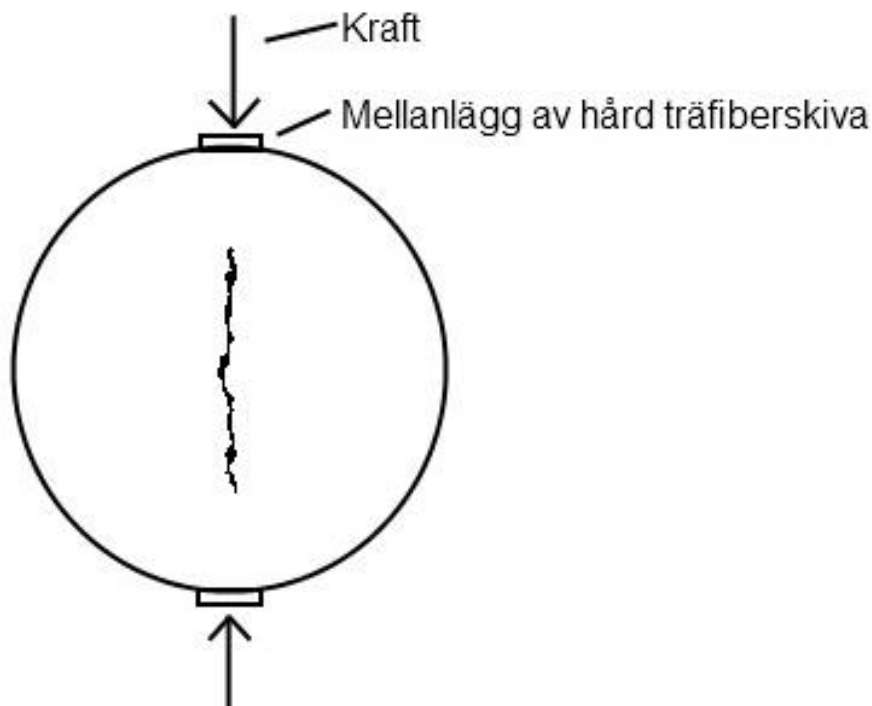
I högpresterande betong (HPB) är cementpastans hållfasthet mycket hög och sprickor passerar ofta igenom ballastkornen (se figur 6). Ballastkornens hållfasthet blir på så vis viktig för betongens totala hållfasthet. HPB är starkare men också sprödare och sprickbildningen sker plötsligare och rakare (FIP-CEB, 1990). Dessa skillnader presenteras schematisk i figur 7.



Figur 7. Spännings/ töjningsdiagram för normalpresterande- respektive högpresterande betong. Här visas att betongen får en högre hållfasthet med starkare cementpasta, men också att töjningen från maxbelastning till brott blir mycket kortare då ballast och cementpasta har liknande hållfasthet. Kurvorna är från tryckprover, dock är relationen ballast/cementpasta liknande för dragprover. (FIP-CEB, 1990).

2.3 Dragprovning av betong

Det vanligaste sättet att bestämma betongens draghållfasthet är genom spräckprov. Det är en indirekt metod för mätning av draghållfasthet där cylindriska eller kubiska prover trycks mellan remsor av hård träfiberskiva och draghållfasthet beräknas utifrån uppmätt spräckhållfasthet (se figur 8). Denna metod är blanda annat standardiserad genom ISO, SIS och CEN (European Committee for Standardization, 2000). Metoden är enkel att utföra men har kritiserats för att inte fungera tillfredställande, till exempel har provets storlek och mellanläggets hållfasthet inverkan på resultatet, vilket inte beaktas i metoden (Planas, o.a., 2001).



Figur 8. Princip för cylindriskt spräckprov. En provmetod som används för att enkelt kunna uppskatta betongens draghållfasthet.

För en korrektere bestämning av draghållfastheten används direkta dragförsök på betongcylindrar. Cylindrarna limmas fast till metallplattor som är ledat infästa till en dragmaskin (se figur 9). Provet belastas kontrollerat tills dess att brott uppstår. Metoden ger mer tillförlitliga resultat men är samtidigt mer komplicerad och tidskrävande jämfört med spräckprov. Vanligen utförs denna typ av prover utifrån standarder från organisationer såsom SIS, CEN och RILEM (van Mier, o.a., 2007) (SIS, 2002).

För att kunna karaktärisera spänning-spricköppningssambandet efter att betongens draghållfasthet har uppnåtts krävs mer avancerade provningsmetoder med deformationskontrollerad belastning. Dessa metoder är betydligt mer komplicerade och används framförallt för att ta fram indata till mycket noggranna beräkningsmodeller.

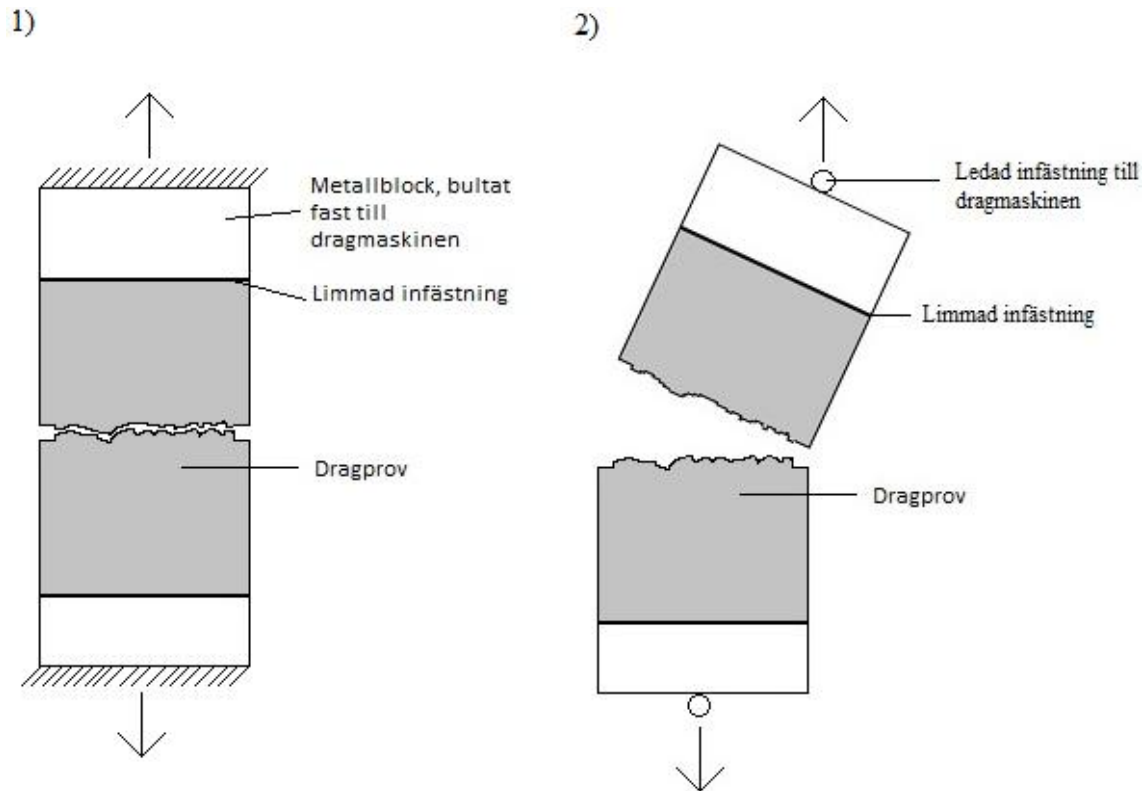
Det finns olika teorier om hur dessa avancerade provningar ska genomföras. Framförallt handlar diskussionerna om hur provet ska vara inspänt och om provet ska prepareras med skåror.

Skillnaderna i inspänning visas principiellt i figur 9. Både fast inspänt och ledad inspänt har för och nackdelar. Enligt van Mier, o.a. (2007) ger momentstyva prover de tillförlitligaste resultaten då de deformeras jämnt över hela snittet vilket leder till en jämn dragspänning över hela snittet. Till följd av detta blir brottenergin och draghållfastheten större än vid provning med ledad infästning. Sprickbildningen sker jämnt över snittet och blir på så vis lättare att mäta. På grund av att spänningen är jämnt fördelad över snittet blir brottet mycket sprött och det krävs därför känsligare instrument för att observera förloppet.

Motsatsen gäller för prover med ledad inspänning, där betongen spricker fritt. Provkroppen kan deformeras ojämnt och därför blir draghållfastheten och brottenergin

lägre än vid momentstyv infästning, vilket ger ett något segare brott och successiv spricktillväxt.

Det segare brottet underlättar observationen av sprickbildningen samtidigt som spänningen i sprickan blir svår att beräkna då kraftfördelningen är ojämn i sprickzonen.



Figur 9. Principiell sprickning i 1) momentstyv infästning och 2) ledad infästning.

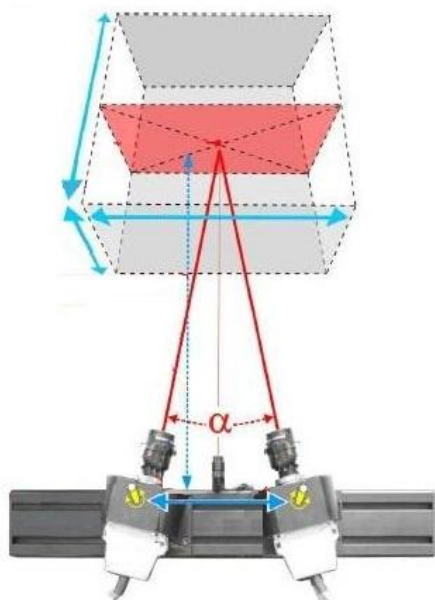
Vanligen görs skåror på provkroppens sidor då detta underlättar deformationsmätning och observation eftersom skåran ger ett svagare snitt dit sprickan styrs att uppstå. Nackdelen med skåror är att sprickan inte får uppstå fritt, vilket leder till lägre draghållfasthet än ett motsvarande prov utan skåror (van Mier, o.a., 2007).

Vidare menar Van Mier att den vanligaste utformningen av provkroppar är cylindriska eller kubiska och att dessa inte ger någon nämnvärd skillnad för resultatet.

3 Optisk deformationsmätning med Aramis

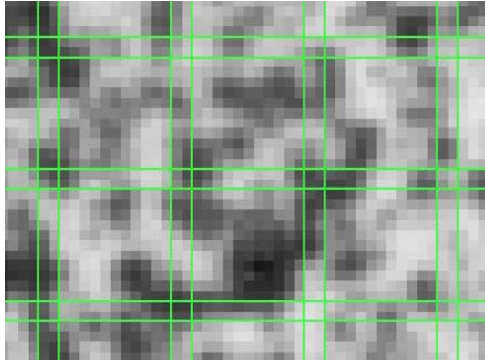
Optisk deformationsmätning är en mycket effektiv metod för att studera spricktillväxten i betong. Långt innan sprickor blir synliga för ögat kan de registreras och i efterhand mätas med hög noggrannhet.

Aramis använder sig av två stycken högupplösta kameror i stereoupställning för att möjliggöra deformationsmätning av ett objekt i tre dimensioner (se figur 10). Kamerorna kalibreras med hjälp av ett kalibreringsobjekt för att skapa ett gemensamt koordinatsystem för de båda kamerorna samt för att korrigera för distorsioner i linserna. Storleken på kalibreringsobjektet bestäms utifrån storleken på den tänkta mätvolymen. Det avgör också hur stora avstånd som ska hållas till och mellan kamerorna. Under kalibrering ska sedan kalibreringsobjektet vinklas och vridas i förbestämd ordning för att definiera koordinatsystemet för kamerauppställningen. Efter kalibrering kan avstånd och vinkel mellan mätvolym och kameror ändras fritt. Dock måste förhållandet mellan de två kamerorna samt samma fokus behållas för att inte en ny kalibrering ska krävas (GOM, 2009).



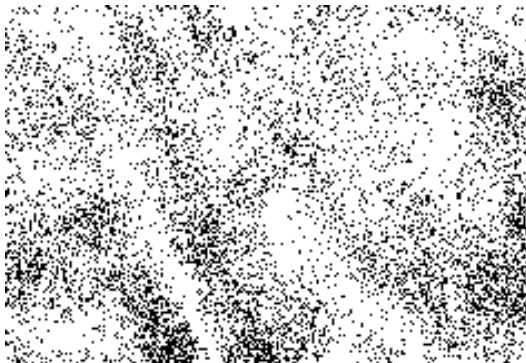
Figur 10. Schematisk bild över kamerauppställning och mätvolym.

Metoden ger en visuell beskrivning av deformationer och töjningar som uppstår i ett material under belastning. Ytan delas upp i ett rutmönster av små fasetter (t.ex. 15 x 15 pixlar) där pixlarna ger varje fasett en unik kod genom kombinationen av gråskalor. Ett visst överlapp mellan fasetterna används för att ge en hög noggrannhet (se figur 11).



Figur 11. Fasetter i storleken 15 x 15 pixlar med 2 överlappande pixlar.

Med hjälp av bildinformationen kan Aramis registrera eventuella förflyttningar av varje enskild fasett på den aktuella ytan. En ny position ställs i relation till den ursprungliga för att beräkna deformationen. Om ytan har en homogen struktur behöver den prepareras med lämplig metod, exempelvis ett stokastiskt mönster med svart och vit sprayfärg (se figur 12).



Figur 12. Stokastiskt mönster.

Bilder tas under hela förloppet och provningen behöver aldrig stoppas för att markera och följa sprickor. Parallellt med den optiska mätningen kan även en fysisk deformationsmätning och lastmätning från givare i dragsteget utföras. När provningen är avslutad har det skapats en bildserie där spricktillväxten kan följas och lokala sprickvidder kan mätas med stor noggrannhet. Då fysiska givare används under provningen kan även förhållandet mellan en viss last och deformation studeras (GOM, 2009).

4 Metodikutveckling

Provkroppens utformning har stor betydelse för hur mesostrukturen påverkas. Ytan som registreras av den optiska deformationsmätningen måste vara representativ för hela betongkroppen för att resultaten ska vara tillförlitliga. Detta innebär att provkroppen måste göras relativt tunn. Den får dock inte göras allt för tunn för då det finns risk att brott sker i sådan hastighet att sprickbildningen inte kan observeras med tillräcklig noggrannhet. En tunn provkropp blir också känsligare för brytningar vid sned infästning. I denna studie valdes en provkroppstjocklek på 20 mm. För att styra var sprickbildningen skulle initieras användes lokala försvagningar. En av fördelarna med att styra sprickbildningen till en vis position i denna studie var att kamerorna kunde fokuseras dit. En vanlig metod är att förse provkroppen med skåror längs kortsidorna. Detta utförande ansågs enkelt och effektivt, varför det tillämpades.

Ojämnheter och struktur av ytan inverkar kraftigt på Aramis förmåga att registrera sprickbildningsprocessen. Porer innesluts av skuggningar och blir därför problematiska att urskilja medan toppar skapar skuggningar över andra delar av ytan. Utan en tydlig och varierande struktur kan inte ytan delas upp i olika gråskalor och därmed inte registreras. I sådant fall måste ytan täckas med ett stokastiskt mönster av sprayfärg. För att minska ojämnheter och tydliggöra strukturen genomfördes olika grader av slipningar. Dessa jämfördes sedan med varandra med Aramissystemet för att kunna välja den mest optimala slipningen. En tabell över de slipningar som undersöktes återfinns i bilaga A, tabell 1.

För att säkerställa ett bra resultat i de optiska mätningarna måste försöksuppställningen tas i beaktning. Avstånd mellan kameror och provkropp samt ljusförhållande är viktiga parametrar. I Aramis manual anges vilka mått som ska användas utifrån mätvolymens storlek. Ljusförhållandet får anpassas beroende på aktuellt ljus i lokalen samt provkroppens yta. Om starkt ljus riktas direkt mot betongytan bildas det lätt reflektioner i stenpartiklarna som resulterar i överexponerade områden som inte kan analyseras av Aramis.

Under metodikutvecklingen testades flera olika ljusuppsättningar. Försök gjordes med både en och två lampor som riktades i olika angreppsvinklar på flera olika avstånd. I kombination med ljusuppsättningen testades även olika slutartider för kamerorna. Resultaten som uppnåddes med Aramissystemet hade dock brister då det skapades reflektioner och ojämn ljusfördelning över provkroppsytan. Vissa partier av provkroppens yta kunde inte registreras av Aramissystemet och information kring sprickbildningen blev bristfällig. Det var först vid användandet av diffust ljus som resultaten blev tillfredställande.

Dragsteget hade en lastcell som registrerade hur stor dragkraft som provkroppen utsattes för och en deformationsmätare som mätte den globala deformationen för hela provkroppen. Det saknades dock utrustning på dragsteget för att mäta sprickvidden på provkroppen. Eftersom det var önskvärt med ett komplement till den optiska deformationsmätningen användes lägesgivare, för att registrera sprickvidden. Fästena för givarna limmades direkt på provkroppen vid kanterna till skåror då sprickan kunde förmodades uppkomma där. Dessa fästen var utformade i par där det ena fästet hade formen av en spets. Formen innebar att lägesgivarna kunde klämmas fast mellan fästena trots att de inte var helt parallella.

Idéer om hur provkropparna skulle monteras i maskinen diskuterades. För att skapa en jämn belastning tillverkades infästningsplattor som provkroppen kunde fästas på

genom limning Dessa plattor skruvades sedan fast i dragsteget med hjälp av gängor. Den första idén om hur limningsprocessen skulle utföras involverade en ställning med tre skruvar vars uppgift var att justera provkroppen till en lämplig position över infästningsplattan för att sedan sänkas ner och limmas fast. Metoden skulle fylla sin funktion men både tillverkning och användandet av denna ställning tycktes bli ineffektiv. Fördelen skulle vara att ställningen var anpassningsbar och därmed användbar till flera olika typer av provkroppar. Det andra konceptet som diskuterades fram och som valdes var ett passblock. Eftersom alla infästningsplattor och provkroppar i försöket var av samma storlek gavs möjligheten att skapa en anordning som inte behövde vara anpassningsbar. Utformningen av passblocket säkerställde att provkroppen mycket enkelt kunde fixeras centriskt och vinkelrätt mot infästningsplattan innan den limmas. Passblocket ställdes på en plan yta och därefter fördes infästningsplattan in i botten på passblocket. En förskjutning i passblocket skapade ett överhäng över infästningsplattan och möjligheten att placera provkroppen på rätt plats. I bilaga D återfinns ritning på detta passblock.

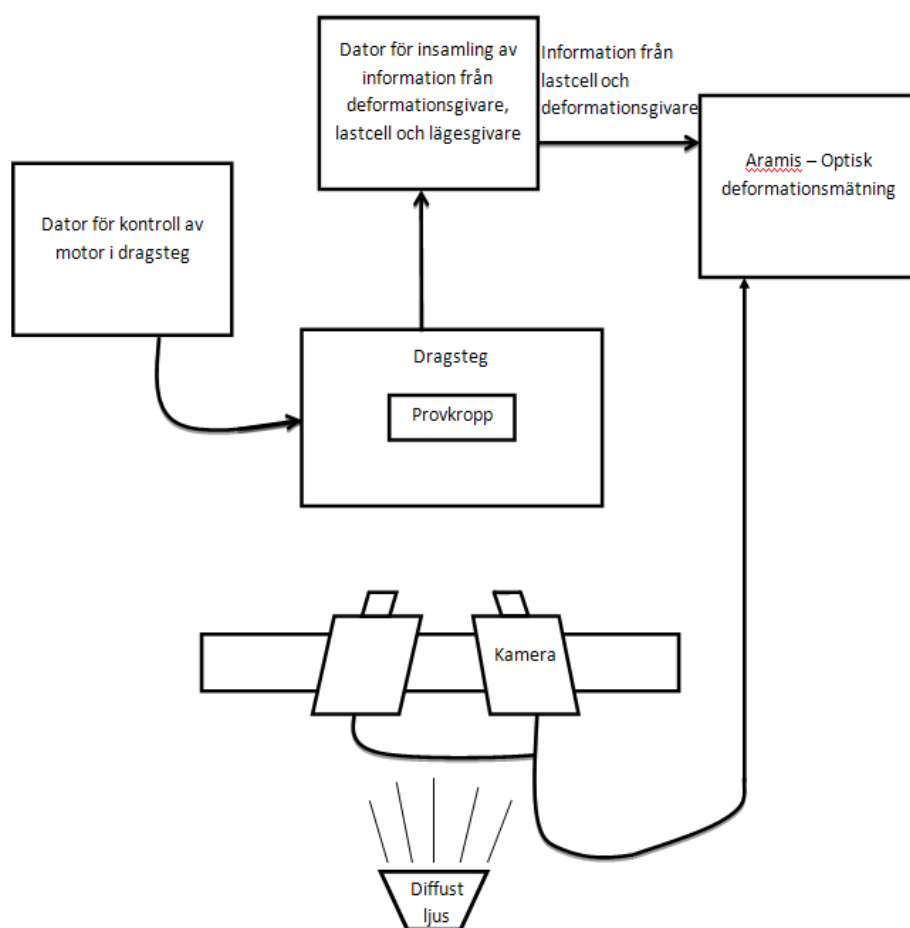
Då gängningen för infästningsplattorna i dragsteget gick åt motsatt håll för över- och underkant var limningen mellan provkropp och den andra infästningsplattan tvungen att ske i dragsteget. Denna utformning minskade risken för att provet skulle gängas ur under provningen. Eftersom det var svårt att limma på provkroppens översida drogs slutsatsen att den undre plattan var lämpligast att limma i maskinen. Nackdelen med att limma på plats i maskinen var att bristen på utrymme ökade risken för felmontering samt att limmet kunde skada någon annan del. För att säkerställa att limmet skulle täcka provklossen med ett jämnt lager användes en mycket lättflytande blandning av limmet vilket gav goda resultat.

5 Metodik för optisk deformationsmätning på mesonivå

Baserat på den metodutveckling som skett inom projektet ges i detta kapitel en översiktlig beskrivning av metodiken för genomförande av dragprovning av betongprismor med optisk deformationsmätning. Dragtesterna utförs på betongprismor vars ändar är fast inspända i dragsteget. Utöver den optiska deformationsmätningen observeras även sprickbildning genom lägesgivare, deformationsgivare och lastcell. En detaljerad metodgång återfinns i Bilaga A.

5.1 Systemuppställning

Systemuppställningen som visas i figur 13 består av flera subsystem, så som dragsteg, olika informationsinsamlingssystem och kontrollsystem.



Figur 13. Schematisk bild över systemuppställningen.

Dragsteget är resultatet av ett tidigare examensarbete (Lindgren, o.a., 2010) utfört på Chalmers tekniska högskola, i samarbete med SP i Borås under vårterminen 2010.

Hastigheten på motorn var konstant och utväxlingen möjliggjorde en lägsta deformationshastighet av 0,055 mm/min. Motorn styrde två stycken skruvar som var försedda med en vänstergängning i botten och högergängning i toppen. Med hjälp av denna gängning kunde tvärbalkarna vandra symmetriskt i två riktningar, uppåt och

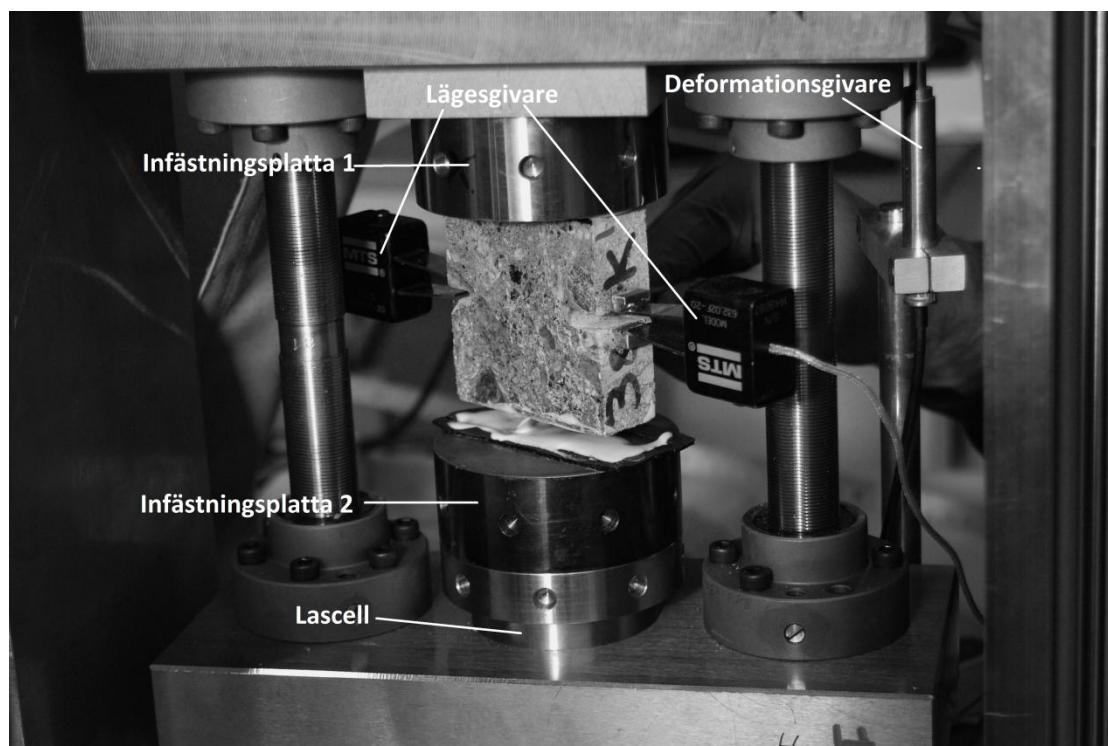
nedåt, vilket resulterade i att ingen förflyttning av provkroppens mitt skedde innan brott uppstod. Denna egenskap möjliggjorde en fokuserad observation med kamera.

Kamerorna tog bilder av provkroppen och skickade dem till Aramisdatorn där bilderna analyserades. Aramissystemet kunde registrera bilder i en hastighet av 1 Hz. Kamerorna hade en upplösning på fyra megapixel och en 50 mm lins.

För att Aramis och dragsteget skulle fungera tillsammans behövde systemen monteras och kalibreras innan provningen kunde genomföras. Kalibreringen gjordes mot ett kalibreringsobjekt, 65x52 mm, som var jämförbart med mätvolymen.

Det krävs ett väl upplyst provområde för att ge skarpa bilder samtidigt som Aramis fungerar bäst då ljuset inte faller direkt på provytan. Därför användes ett diffusare ljus som gav ett jämnare ljus med färre reflektioner.

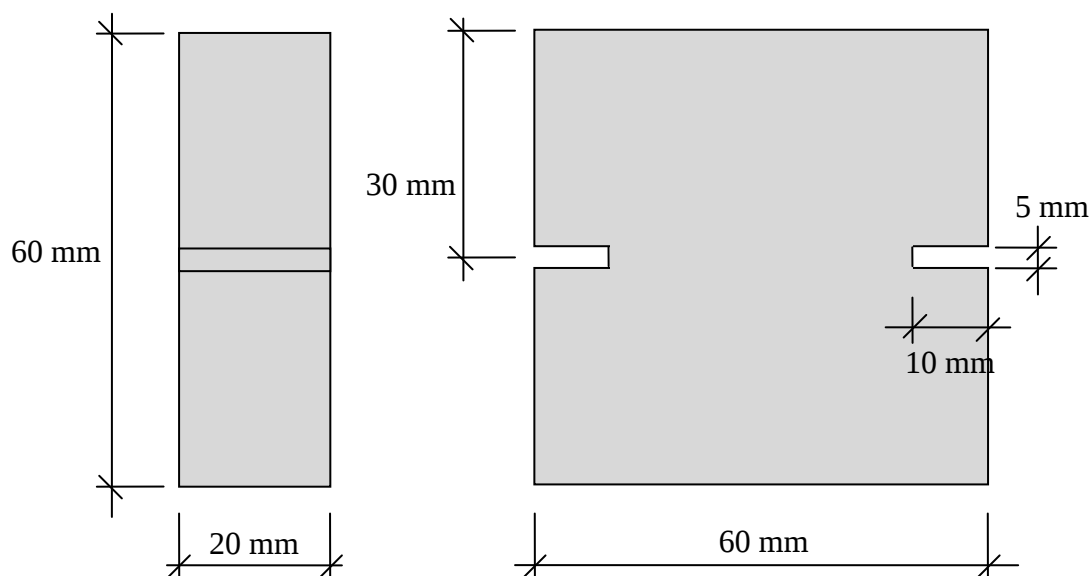
Signalerna från de fysiska mätarna (lastcell, deformationsgivare och lägesgivare) skickades genom en förstärkare innan de nådde datorn som skötte insamlingen av denna information. Signalerna från lastcellen skickades även vidare till Aramisdatorn för att koppla ihop varje bild till den aktuella lasten. Lastcellen hade en kapacitet på 10 kN och en felmarginal på 1 %. Deformationsgivaren mätte den globala deformationen över hela provkroppen med en noggrannhet på 1 %. Lägesgivarna som används för att mäta sprickvidden registrerade information med en hastighet på 10 Hz och en säkerhet på 1 %. Se figur 14 för redovisning av mätinstrumenten i dragsteget.



Figur 14. Redovisning av mätinstrument och infästningsplattor i dragsteget.

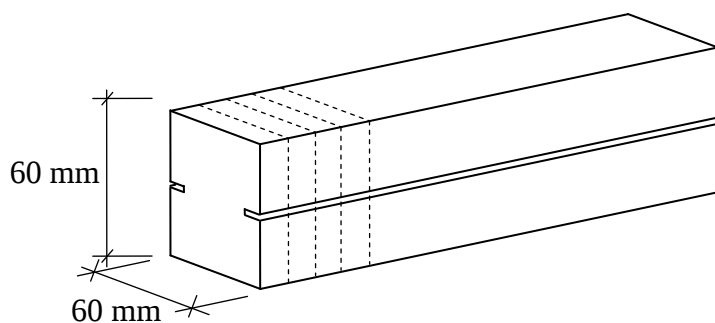
5.2 Provkroppsutformning

Prismorna utformades enligt Figur 15. För att prismor av respektive betongtyp skulle hålla en jämförbar kvalitet tillverkades de ur samma betongblock, se figur 16. De två betongrecept som användes presenteras i tabell 1. Den största skillanden mellan de två typerna var att ballasten bestod av antingen bergkross eller naturgrus.



Figur 15. Skiss över prismorna.

Övre och nedre ytan var planparallella för att minska risken för snedställning då dessa limmades mot dragprovningssmaskinens infästningsplattor. Prismorna försågs med 2 stycken skåror i centrum på kortsidorna, 10 mm djupa och ca 5 mm vida. Skåror medförde att sprickbildningen koncentrerades till området kring prismans centrum. Detta underlättade mätningarna då kamerorna kunde fokuseras dit.



Figur 16. Skiss över blocket ur vilken prismorna sågades ur.

Tabell 1. Betongrecept som användes för att tillverka provkroppar. Den avgörande skillnaden är användningen av natur- och krossballast.

Betongtyp	C0.38	N0.38
VCT	0,38	0,38
Finballast 0-5mm [kg/m ³]	1064 Krossad	900 Natur
Grovsballast 8-16mm [kg/m ³]	708	900
Vatten [kg/m ³]	164	162
Cement [kg/m ³]	429	326
Vattenreducerande medel [kg/m ³]	1,1	0,7
$f_{c, \text{cube}}$ vid 28 dagar [MPa]	80,9	91,5

5.3 Förberedelser av provkroppen

För att framhäva betongens struktur slipades provkropparna. Endast sidan som riktades mot kamerorna behandlades. Slipmaskinen som användes var Abramin från tillverkaren Struers. Slippapprets kornstorlek var 220 och i tabell 2 förklaras slipmetoden noggrannare.

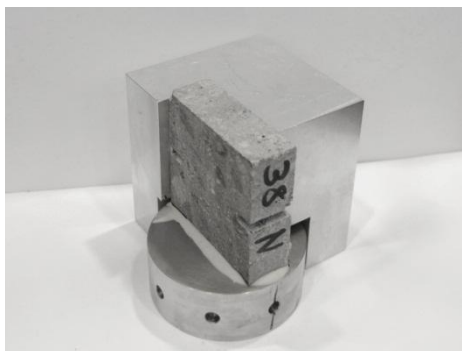
Tabell 2. Slipmetod som användes för att behandla provkroppar

Slippapper	SiC 220
Smörjning	Vatten
Hastighet [RPM]	300
Tryck [N]	210
Rotation mellan slipplatta och provkropp	Medsols
Tid [min]	1

I vissa fall medförde slipningen att det uppkom starka reflektioner när ytan blev belyst vilket resulterade i att Aramis inte kunde registrera dessa områden. Reflektionsproblemen åtgärdades genom att ytan slipades manuellt med ett grövre sandpapper. Efter slipningen användes Aramis för att kontrollera att ytan var av lämplig kvalitet. Innan varje provning gjordes en beräkning av två bilder för att kontrollera att bilderna blev tillräckligt tydliga och att inte information från allt för många fasetter saknades.

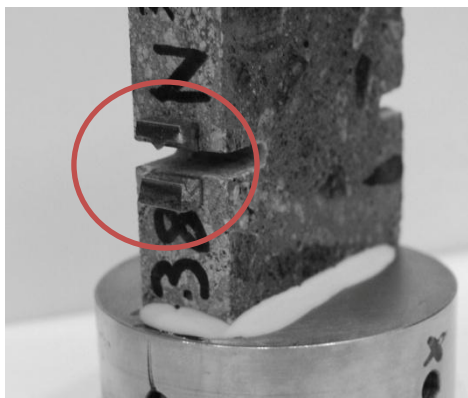
Provkroppen limmades ihop med en infästningsplatta som sedan monterades i dragsteget. Det var av största vikt att provkroppen var centriskt och vinkelrätt placerad på infästningsplattan. Detta säkerställdes med hjälp av det framtagna passblocket, se figur 17. Innan limningen mellan provkropp och infästningsplatta

utfördes slipades kontaktytorna med sandpapper och rengjordes med acetone för att säkerställa en god vidhäftning.



Figur 17. Princip för hur passblocket används för att placera provkroppen på infästningsplattan.

Fästena som höll fast lägesgivarna monterades med ett snabbhärdande lim på fem millimeters avstånd från varandra, enligt Figur 18. För att säkerställa att fästena inte lossnade slipades och rengjordes ytorna vid skårorna med hjälp av acetone innan limningen.



Figur 18. Position för fästen till lägesgivarna.

Limningen mellan provkropp och infästningsplatta nummer 2 skedde i dragsteget. I botten på dragsteget monterades infästningsplatta 2 och i toppen monterades infästningsplatta 1 tillsammans med provkroppen (se figur 19). Provkroppen fördes ner mot infästningsplatta 2 och limmades fast. Limmet fick härda i cirka trettio minuter innan provning. När limmet härdade minskades dess volym och det uppstod dragspänningar i dragsteget. Blev spänningen stor, över ca 500 kPa, minskades denna genom manuell justering av dragkraften hos dragsteget innan provningen startades.



Figur 19. Position för infästningsplattor i dragsteget.

5.4 Genomförande

Aramis ställdes in för att dela upp ytan i fasetter med storleken 20x20 pixlar med en maximal avvikelse på 0,5. Strax innan provningen startades togs två bilder med Aramis. Dessa användes sedan som referens för att beräkna felmarginalen i mätningarna. Inställningarna justerades så att Aramis tog en ny bild varje sekund under provningen. Under provningen registrerades last, globala deformationen över provkroppen samt deformationen lokalt över de två skåror, med en samplingsfrekvens på 10 Hz. Bildsekvensen startades samtidigt som mätningen med de övriga givarna. Med hjälp av lägesgivarna kunde sprickförloppet följas i realtid och efter att sprickan var fullt öppen avbröts all datainsamling. Belastningen styrdes med en konstant rotationshastighet på 0,22 rpm, vilket motsvarade en relativ förskjutning mellan tvärbalkarna på 0,055 mm/min.

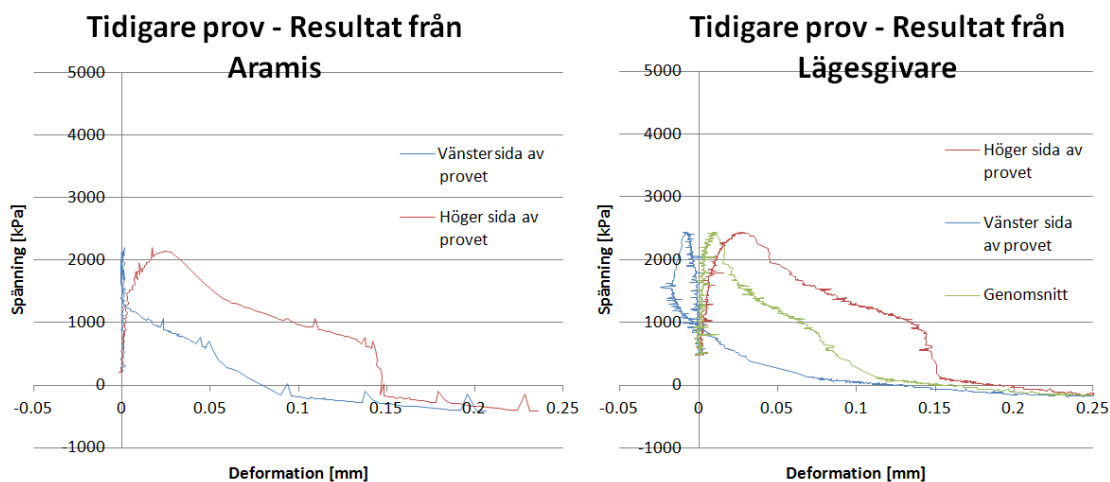
6 Validering av metodiken

För att validera den utvecklade metodiken genomfördes en serie provningar. Syftet var att kontrollera metodiken för att se att tillförlitliga resultat kunde erhållas.

Insamlandet av data fungerade tillfredställande genom hela processen. De fysiska mätningarna exporterades i efterhand till Excel där grafer skapades. På grund av ett visst brus från lägesgivarna efterbehandlades informationen genom att använda medianvärdet från tre punkter för varje punkt i grafen. Detta medförde tydligare kurvor, utan betydande precisionsminskning. I Aramis skapades bildserier och grafer utifrån den optiskt uppmätta deformationen tillsammans med den fysiskt mätta lasten. De tagna bildserierna var skarpa och tillsammans med graferna från de fysiska givarna gav de möjlighet att följa sprickbildningsprocessen. Det ska dock tilläggas att i vissa fall uppkom brott i sådan hastighet att förloppet inte kunde följas optimalt.

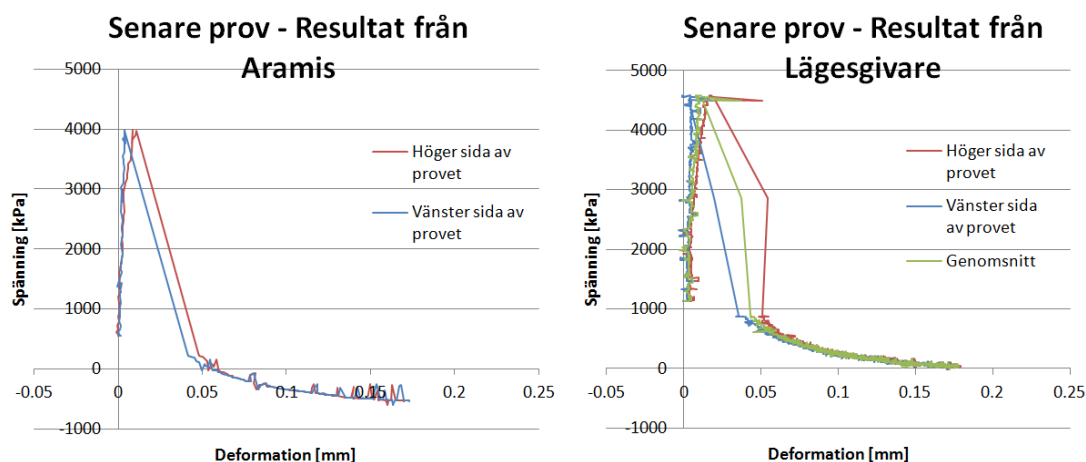
Totalt genomfördes fjorton prover, sju med krossballast och sju med naturballast. Efter åtta, fyra av varje sort, genomförda dragprovningar upptäcktes ett fel i inspänningen som medförde att de genomförda provningarna ej var helt momentstytta. Felet korrigerades och sex nya provningar genomfördes.

Resultaten skiljdes mycket åt mellan de åtta första och de sex senare provningarna. En jämförelse mellan figur 20 och 21 visar att draghållfastheten blev högre samtidigt som brottet blev plötsligare och jämnare i de senare provningarna när inspänningen hade justerats. Med ett jämnare brott menas att provkroppen deformerades liknande på både vänster och höger sida, vilket ses i figur 21. Liknande resultat syns genomgående i kurvor och bildserier från Aramis samt de kurvor som skapats utifrån lägesgivarna. Dessa kan studeras noggrannare i bilaga B.



Figur 20. Skillnaden mellan deformationsmätningen genom Aramis och lägesgivare då inspänningen var fel. Resultaten från lägesgivarna ger ett brusigare resultat än Aramis. Detta kan dels bero på att lägesgivarna har en högre samplingsfrekvens dels att de eventuellt är känsligare för vibrationer eller andra störningar. Grafen som är skapad från Aramis har en förskjutning på cirka 200 kPa i spänningen (y-led) på grund av att Aramis inte var injusterat korrekt.

Figur 20 visar tydligt hur deformationen utvecklas ojämnt, både uppmätt med hjälp av Aramis och lägesgivare. En negativ deformation innebär en hoptryckning medan en positiv deformation visar på en töjning i materialet. I detta fall trycktes vänster sida av provkroppen ihop samtidigt som en töjning utvecklades på höger sida.



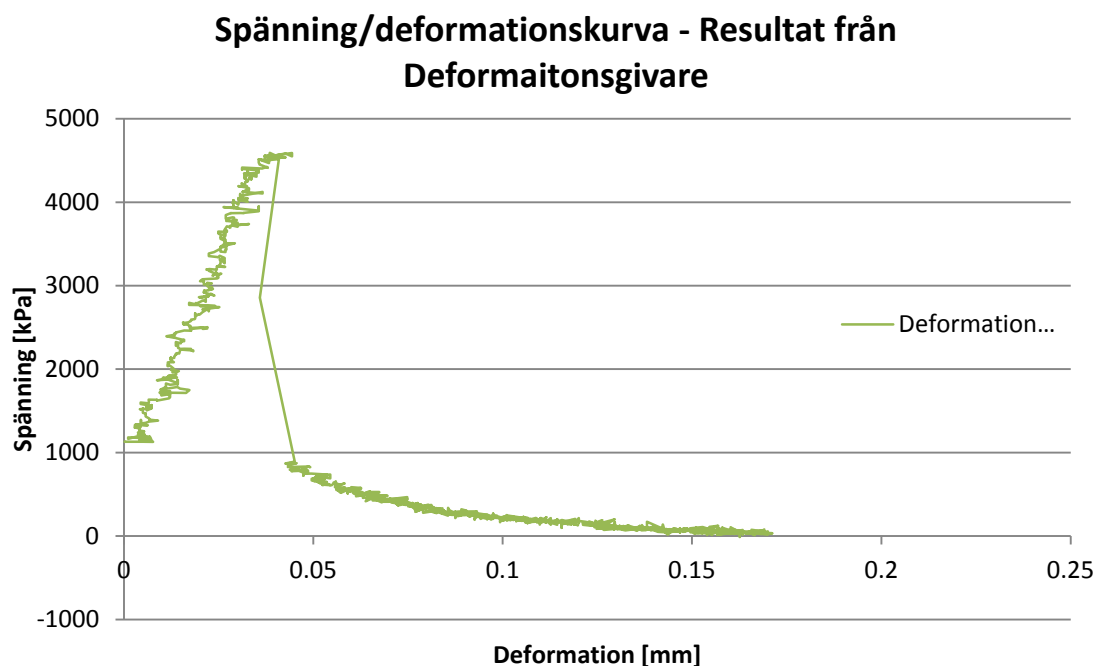
Figur 21. Skillnaden mellan deformationsmätningen genom Aramis och lägesgivare då inspänningen var justerad. Resultaten från lägesgivarna ger ett brusigare resultat än Aramis. Detta kan dels bero på att lägesgivarna har en högre samplingsfrekvens dels att de eventuellt är känsligare för vibrationer eller andra störningar. Grafen som är skapad från Aramis har en förskjutning på cirka 500 kPa i spänningen (y-led) på grund av att Aramis inte var injusterat korrekt.

De senare provernas mycket spröda och plötsliga brott visas i figur 21. Brottet skedde här så snabbt att Aramis inte kunde registrera själva sprickbildningen. Samtidigt hann lägesgivarna göra en kortare insamling av data där en viss tendens till ojämn sprickbild registrerades, dock betydligt mindre än i de tidigare provningarna. Den mindre ojämnheter som syns i kurvan kan komma sig av det faktum att betong inte är ett homogent material och därför inte är jämnstarkt över hela snittet. Den ojämna hållfastheten leder då till ett ojämnt brott. Hur infästningen påverkar sprickbildningen kan ses i figur 22.



Figur 22. Skillnad på sprickbildningen mellan ett prov där inspänningen inte var korrekt (till vänster) samt ett prov efter justering (till höger). Det tidigare provet sprack från höger till vänster, medan det senare provet sprack mer eller mindre jämnt.

Resultaten från den globala deformationsgivaren (se figur 23) kan jämföras med den schematiska dragkurvan figur 5 i kapitel 2. Dessa grafer kan i stort likställas med varandra vilket tyder på att metodiken ger likande resultat som erkända dragprovningssmetoder i detta avseende.



Figur 23. Spänning/deformationssamband som skapats utifrån data från den globala deformationsgivaren.

De framtagna resultaten visade på flera sätt att provmetodiken fungerade väl. Framförallt bekräftas detta genom att inga tendenser till excentrisk belastning kunde tolkas från proverna, att informationen från insamlingen gav tydliga och mätbara resultat som visar hur betongproverna reagerar likt vanliga dragprover och att mesostrukturen som syns på provkroppens yta till stor del påverkar sprickbilden.

Det är av stor vikt att sprickbildningen kan relateras till mesostrukturen på provkroppens yta, då förmågan att analysera interaktionen mellan ballastkornen, svaghetszonen och cementpastan till stor del beror på resultat som insamlats via den optiska deformationsmätningen.

7 Diskussion

Metodiken som har tagits fram och presenteras i denna rapport är fullt användbar, dock finns det några punkter där justeringar och förbättringar vore positiva. Framförallt är det en lägre utväxling på motorn i dragsteget som bör prioriteras. Med nuvarande motor är lägsta möjliga stigning 0,055 mm/min och det leder till ett mycket plötsligt brott i betongen. I kombination med att hastigheten för Aramis bildsekvens är begränsad till högst 1 bild/sekund kan inte händelseförloppet registreras optimalt. Nyare versioner av Aramis har högre bildupptagningsfrekvens, en sådan utrustning bedöms ge en avsevärd kvalitetsökning på mätningen.

Det har funnits svårigheter i att hitta ett optimalt ljus som kan återskapas varje gång och användas på alla provkroppar. Detta beror på olika faktorer såsom provytans struktur och ljusförhållandena i lokalen. För att minska reflektionerna från ballastkornen och annan påverkan från provytans struktur är användning av diffust ljus mycket effektiv. Detta skapades genom att reflektera ljuset från en lampa på en vit skärm som riktades mot provkroppen. Troligtvis skulle användandet av en professionell belysning för diffust ljus gett än bättre resultat. Eftersom dagsljuset varierar över tid skulle belysningen i en lokal utan ljusinsläpp vara lättare att styra.

Noggrannheten i kalibreringen av koordinatsystemet för Aramiskamerorna påverkar i hög grad möjligheten för Aramis att registrera deformationer i materialet. Då kalibreringen utförs är det viktigt att kalibreringsobjektet är stilla, att alla dess punkter registreras och att anvisningar för avstånd samt vinklar följs. Svårigheten att för hand hålla kalibreringsobjektet stilla nog för att skapa en tillfredställande kalibrering medför ofta upprepade försök och kalibreringen kan då bli mycket tidskrävande. Det finns särskilda kalibreringsstativ som vore bra hjälpmedel om noggrannheten och tidsåtgången för kalibreringen ska förbättras ytterligare.

Infästningen måste beaktas noggrant vid dragprovning då denna påverkar den uppmätta draghållfastheten för betongen avsevärt. Detta syns tydligt vid jämförelse av resultaten av våra provningar. I första omgången användes skruvar som var för långa vid infästningen vilket resulterade i att infästningen inte var helt momentstyv. När detta upptäcktes tillverkades kortare skruvar varvid problemet åtgärdades och resultaten för draghållfastheten blev helt annorlunda. Det är möjligt att konstruktionen av dragsteget inte säkerställer en tillräckligt momentstyv infästning. Denna risk kan vara värd att utvärdera närmare när fler provningar har genomförts.

Den fysiska mätningen som sker genom lägesgivarna har en hög upptagningsfrekvens men ger ett brusigt resultat. Det skedde en förbättring då infästningen förbättrades men bruset kvarstod fortfarande. Det är svårt att avgöra om detta beror på att infästningen behöver förändras ytterligare eller om det är faktiska deformationer som sker i betongen. Lägesgivarna är ett bra komplement till den optiska deformationsmätningen då dessa ger en bra bild av sprickbildningen i realtid under provningen.

Några av proven hade ballastkorn placerade runt hela skåran. Dessa prover tenderade att inte spricka i skåran. Detta medförde att såväl deformationen uppmätt med lägesgivarna och den uppmätta spänningen inte kan anses vara tillförlitliga på dessa prover. Problemet undviks lätt genom att välja bort prover där ena eller båda skåorna är helt omslutna av ett ballastkorn.

Den beskrivna metodiken används i sitt grundutförande till att dragbelasta betong samtidigt som sprickbildningen registreras med hjälp av optisk deformationsmätning

på mesonivå. Förhoppningen är dock att den även kan användas till andra ändamål efter viss modifikation. Utöver betong är det möjligt att studera flera typer av material på samma skala. Metodiken skulle kunna användas för andra typer av prover, så som tryckprover, skjuvprover och spräckprover. Det finns möjlighet att kombinera Aramiskameran med mikroskop för att utföra studier på mikronivå. För provning på mikronivå behöver förmodligen betongens provkroppsyta behandlas med finare slipning. Detta för att framhäva strukturen ytterligare och säkerställa Aramis förmåga att registrera ytan.

8 Slutsatser

Metodiken, som finns noggrant beskrivet i bilaga A är framtagen och förmår att ge tydliga och fullt användbara resultat. Genom arbetet har även en lättöverskådlig och effektiv metodgång utarbetas som gör det enkelt för andra intressenter att genomföra liknande prover.

Systemuppställningen som presenteras i kapitel 5 är väl fungerande då den kompletteras med diffust ljus. Aramissystemet som har används för insamling av optisk information samlar även in data för belastningen vid varje bildupptagning. Detta tillsammans med den kontinuerliga bildinsamlingen gör det möjligt att beräkna spänningen i provklossen vid varje bild, vilket är avgörande för att kunna skapa fungerande datormodeller.

Monteringen av provkroppen i dragsteget fungerar tillfredställande. Genom användandet av en momentstyv draganordning säkerställs en jämn deformation och därmed en jämn spänning över hela tvärsnittet. Detta underlättar stort beräkningen av den spänning som verkar i tvärsnittet. Inga tendenser till excentricitet eller snedställning kunde utläsas av resultaten vilket tyder på att metoden för att sammanföra provkropp med dragsteget fungerar.

När det kommer till provkroppsutformningen är det svårt att säga om den är optimal då endast en utformning har testats. Det som kan sägas är att dragprovningarna som genomförts visar på att sprickbildningen till stor del påverkas av den struktur som är synlig på provkroppens yta. Sprickinitieringen koncentreras till området runt skårorna som det var tänkt förutom i somliga fall då ballastkorn innesluter skårorna. Detta tyder på att ytan är representativ för hela provkroppen vilket var målet och därmed kan slutsatsen att provkroppsutformningen är godkänd dras. Det går dock inte att dra några tillförlitliga slutsatser angående skillnad på sprickbildningen mellan betong med natur- eller krossballast. Om definitiva slutsatser om detta ska dras krävs det fler dragprovningar som underlag.

Tendenser till att sprickbildningen koncentrerades till svaghetszonen runt stora ballastkorn medan sprickan passerade rakt igenom mindre ballastkorn kunde utläsas.

Ytbehandling av provkroppen visade sig ha en positiv inverkan på möjligheten för Aramis att dela in ytan i fasetter. Således dras slutsatsen att ytbehandling bör göras.

Nedan följer en kort rekommendation till metodik. Provkropparna utformas i storleken 60x60x20 mm och förses med två stycken skåror i centrum av kortsidorna. Dessa lokala försvagningar koncentrerar sprickbildningen till området kring provkroppens centrum varpå den optiska deformationsmätningen kan fokuseras dit. För att öka möjligheten att observera sprickbildningen med Aramis framhävs betongens struktur genom slipning. En fysisk mätning av sprickbildningen görs genom lägesgivare som monteras på provkroppen. För att uppnå en sprickbildning som orsakas av rent drag används ett passblock för att säkerställa en centrisk och vinkelrätt placering av provkroppen på infästningsplattan. Limningen mellan provkroppen och den andra infästningsplattan görs i dragsteget. Vidare används diffust ljus för att framhäva strukturen ytterligare utan att stora reflektioner uppkommer. Under dragprovningen sker insamling av data från Aramis, lägesgivare, lastcell och deformationsgivare. Detta resulterar i att sprickbildningen kan observeras på mesonivå både lokalt och globalt via fysisk och optisk mätning.

Överlag fungerar metodiken mycket tillfredsställande, även om det inom vissa delar av metodiken finns utvecklingsmöjligheter som kan leda till ökad precision och kvalitet i resultaten.

9 Referenser

- Bilodeau, A och Malhotra, V.M. 2000.** High-Volume Fly Ash System: Concrete Solution for Sustainable Development. *Materials Journal*. 2000, Vol. 97, 1.
- Burström, P-G. 2007.** *Byggnadsmaterial - Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*. Lund : Studentlitteratur, 2007. 978-91-44-02738-8.
- Engström, B. 2008.** *Beräkning av betongkonstruktioner*. Göteborg : Chalmers Tekniska Högskola, 2008. Rapport 2007:13.
- European Committee for Standardization. 2000.** *Testing hardened concrete*. Bryssel : European Committee for Standardization, 2000. EN 12390.
- FIP-CEB. 1990.** *High Strength Concrete: State of the Art Report*. London : Fédération Internationale de la Précontrainte, 1990.
- Flansbjer, M, Lindqvist, J-E och Silfwerbrand, J. 2011.** *Quantitative fracture characteristics in shear load*. Prag : FIB Symposium, 2011. 978-80-87158-29-6.
- GOM. 2009.** Aramis - User manual. Braunschweig : u.n., 2009.
- Joan, H och Li, V.C. 1990.** Special Issue Fracture and Damage of Concrete and Rock. *Engineering Fracture Mechanics*. 1990, Vol. 35, 1-3.
- Lindgren, P och Östergren, A. 2010.** *Konstruktion av dragsteg*. Göteborg : Chalmers tekniska högskola, institutionen för tillämpad mekanik, 2010. Examensarbete 2010:05.
- Pavlović, M.N. och Kotsovos, M.D. 1995.** *Structural concrete - Finite-element analysis for limit-state design*. London : Tomas Telford publications, 1995. ISBN: 0 7277 2027 9.
- Planas, J, o.a. 2001.** Review of the splitting-test standards from a fracture mechanics point of view. *Cement and Concrete Research*. Januari, 2001, Vol. 31, 1.
- SIS. 2002.** *Betongprovning med svensk standard*. Stockholm : SIS Förlag AB, 2002. ISBN 91-7162-553-4.
- van Mier, J.G.M. och Mechtcherine, V. 2007.** *Experimental Determination of the Stress-Crack Opening Curve for Concrete in Tension - Final report of RILEM Technical Committee TC 187-SOC*. u.o. : RILEM, 2007. ISBN 978-2-35158-049-3.

Bilagor

Bilaga A. Metodgång

Slipning

För att framhäva en tydlig struktur i betongen och minska antalet porer slipas provkropparna. Endast sidan som ska riktas mot kamerorna behöver behandlas. Maskinen som används är Abramin från tillverkaren Struers.

Steg	1	2	3	4	5
Slippapper	SiC 220	SiC 1000	SiC 4000	MD-Dac	MD-Nap
Slipmedel				Dp-Susp. P 3 μm	Dp-Susp. P 1 μm
Smörjning	Vatten	Vatten	Vatten	DP-Blue	DP-Blue
Hastighet [RPM]	300	150	150	150	150
Tryck [N]	210	210	210	180	150
Rotation mellan slipplatta och provkropp	Medsols	Medsols	Medsols	Medsols	Medsols
Tid [min]	1	2	8	7	2

Då sprickbildningen ska observeras med Aramis genomförs endast första slipningen för att undvika att reflektioner uppkommer när ytan blir belyst. Steg 2-5 bör genomförs när sprickbildningen ska studeras med mikroskop eftersom kravet på en jämn yta är högre.

1. Eventuella större ojämnheter avlägsnas för hand genom att använda det manuella läget på maskinen och sedan hålla klossen mot slipytan.
2. Montera provkroppen på hållarplattan med dubbelhäftande tejp.
 - 2.1. Lossa hållarplattan från Abramin.
 - 2.2. Grovrengör plattan och provkroppen.
 - 2.3. Klipp till en bit dubbelhäftande tejp på cirka 4x3-4x4 cm. Även tejpens tillverkas av Struers.
 - 2.4. Fäst tejpens på provkroppen.
 - 2.5. Fäst provkroppen centrerat på hållarplattan, ögonmått är tillräckligt. Tryck till ordentligt.
3. Kontrollera kvalitén på slitpappret, det bör bytas minst efter två slipningar.
4. Fäst slitpappret i Abramin. Var noggrann med att metallringen som håller fast pappret är ordentligt fastsatt.
5. Ställ in hastighet, smörjning och tid på Abramin efter tidigare schema. OBS! Ställ inte in tryckkraft.
6. Smörj slipytan innan start.
 - 6.1. Starta Abramins slipyta manuellt.
 - 6.1.1. Vid användning av SiC-papper startas även vattnet.

- 6.1.2. Rikta vattenstrålen så att hela pappret blir blött.
- 6.1.3. Vid användning utav MD-dukar duschas duken med först med slipmedel och sedan med DP-Blue.
7. Stoppa maskinen.
8. Fäst hållarplattan med provkroppen i Abramin.
9. Se till att tryckkraften är inställd på cirka 100-150 N innan start, detta för att provklossen skall föras ned mjukt mot slipytan.
10. Starta maskinen genom att trycka ned båda knapparna på Abramins framsida till dess att slipningen har påbörjats.
11. Ställ in önskat tryck när slipningen påbörjats.
12. När slipningen är klar tas hållarplattan bort från Abramin och provkroppen vrids av från hållarplattan.
13. Torka av provkroppen med hårtork, inte papper då detta slippar materialet.
14. Eventuell rengöring sker med etanol.

Första limningen

1. Montera infästningsplattan i dragsteget
2. Markera provkroppens placering.
 - 2.1. Markera lämplig orientering för provkroppen. Tänk på att lägesgivarna kräver utrymme.
 - 2.2. Markera riktningen för kamerauppställningen på provkroppen. Detta för att underlätta senare del av limningen.
3. Slipa och rengör limningsytorna på både provkropp och infästningsplatta med sandpapper respektive aceton.
4. Placera provkroppen på infästningsplattan enligt tidigare markering.
 - 4.1. Var uppmärksam på att rätt sida av provkroppen hamnar i kamerariktningen.
 - 4.2. Placera en bit papper som distans mellan kroppen och plattan.
5. Spraya passblocket med smörjmedel för att minska risken för passblocket ska limmas fast med infästningsplattan och provkroppen.
6. Använd passblocket för att centrera kroppen på plattan.
 - 6.1. Kontrollera att provkroppen inte lutar.
 - 6.2. Uppfylls kraven kan försöket fortsätta, annars måste provkroppen planslipas
7. Fäst kroppen mot blocket med hjälp av en tving eller annan anordning.
8. Markera området som provkroppen täcker på plattan. Detta område ska täckas med lim.
9. Lyft bort blocket med kroppen.
10. Blanda limmet, en skopa kräver 5-7 droppar härdningsmedel. 3 skopor bör vara en lagom mängd.
11. Smeta ut limmet jämt över den markerade ytan på infästningsplattan.
12. Ställ ned blocket med kroppen på den markerade ytan. Undvik att limma fast passblocket med plattan.
13. För att säkerställa att blocket inte limmas fast bör tvingen lossas och blocket plockas bort efter cirka 10 minuter.
14. Låt sedan limmet härda i ytterligare minst 20 minuter.
15. Slipa och rengör ytorna där lägesgivarna ska fästas.
16. Använd ett snabbhärdande lim för att montera givarfästena.
 - 16.1. Justera avståndet mellan fästena till $5 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$.

Förberedelser inför andra limningen

1. Mät tvärsnittetsarean mellan skårorna på provkroppen.

2. Slipa och tvätta ytan på provkroppen och plattan som ska limmas ihop.
3. Märk provkroppen med en identitet om detta inte redan är gjort.
4. Fäst infästningsplattorna i dragsteget.
 - 4.1. Fäst den lösa infästningsplattan i botten på dragsteget.
 - 4.2. I toppen fästs den ihop limmade infästningsplattan och provkroppen.
 - 4.3. Kontrollera att båda plattorna är ordentligt åt skruvade.
5. Kontrollera att provkroppsytan i kombination med ljussättning och Aramis inställningar uppnår tillfredställande kvalité på bilderna tagna med Aramissystemet. Detta görs genom att följa nästkommande metodbeskrivning.

Aramis förberedelser

1. Starta systemet
 - 1.1. Tryck på den större strömbrytaren, vänta tills lampan under lyser grönt starta då den mindre strömbrytaren.
2. Skapa ett nytt projekt och namnge det. Ställ in önskad fasettstorlek [20x17] och max deviation [0,5]. Fasettstorleken blir då 20x20 med ett överlapp på 3 pixlar.
3. Skruva fast provet och tänd belysningen.
4. Gå in i kameraläge.
5. Använd false colour [C] och overexposed [O] för att kontrollera att slipningen, ljusförhållanden och slutartid samverkar för att skapa tydliga bilder. Undvik vita och mörkgröna fläckar.
6. Avmarkera Use time och använd snapshot för att ta 2 bilder.
7. Avsluta kameraläget
8. Definiera maskning. Blått område mäts ej.
9. Välj startpunkt.
10. Compute project.
11. Undersök om bilderna blir tillräckligt tydliga och att inte allt för många fasetter faller bort.
 - 11.1. Ett stort antal gula markeringar visar att kalibreringen är undermålig.
12. Om resultatet inte är tillfredställande får inställningarna för slutartid, ljusförhållanden eller provkroppsytan förändras. Det går även att förändra fasettstorlek, överlapp och noggrannhetskrav om det är lämpligt. Upprepa punkt 5-11 om ändringar görs.
13. Återvänd till projectmode och ta bort bilderna som togs.

Andra limningen

1. Då resultaten i Aramis ger tillfredställande resultat kan andra limningen genomföras.
2. Säkerställ att limmet inte har någon möjlighet att rinna ner för kanten på den undre infästningsplattan.
 - 2.1. En metod är att klippa ut en form ur byggtejp som klistras på plattan.
3. Skruva fast provkroppen i dragsteget.
4. Sänk ner provet manuellt mot den undreplattan för att "sikta" in var formen ska klistras på.
5. Blanda lim.
 - 5.1. Blanda i en skål med pip för att underlätta proceduren med att hälla limmet i formen på den undre plattan.
 - 5.2. Limmet bör ha en lös konsistens för att få en bra spridning över ytan. 4 skopor limpulver och 22 droppar härdningsmedel rekommenderas.
 - 5.3. Limma fast provkroppen med den undre infästningsplattan.

- 5.3.1. Håll limmet i formen och skruva ner provkroppen manuellt.
- 5.3.2. Hela underkanten av provkroppen behöver vara i kontakt med limmet men det ska inte vara i kontakt med själva plattan. Om detta händer finns det risk för att allt lim trycks bort mellan ytorna.
- 5.4. Låt limmet härda i minst 30 minuter.
- 5.4.1. När limmet härdar minskar dess volym och det uppstår dragspänningar i dragsteget. Om dessa blir stora kan spänningen minskas genom manuell justering.

Dragprovning

Aramis

1. Öppna tidigare skapat projekt och gå till kameraläget
2. Ställ in önskade värden på Use time. Use time används för att ta en bildsekvens med önskat tidsintervall och antal bilder.
3. Ta två bilder med snapshot ett par sekunder innan provningen startar. Dessa används som referens för att beräkna minsta felet i mätningarna.
4. Starta bildsekvensen samtidigt som mätningen med de andra givarna.
5. Stäng av bildsekvensen när provet anses genomfört.

B GTCS

1. Starta systemet
2. Välj load screen layout under views.
 - 2.1 Välj där dragsteg_btg
3. Nollställ lastmätare när provklossarna är frilagda och ingen last finns mot lastcellen.
4. Välj Projects.
 - 4.1 Starta där ett nytt projekt. Välj namn → dragsteg → execute.
5. Nollställ mätare för de givare som används.
6. Nollställ graferna med resetknappen.
7. Tryck på start för att starta insamlingen av data.
8. Tryck på stop för att avsluta insamlingen av data.

Inställningar för motor

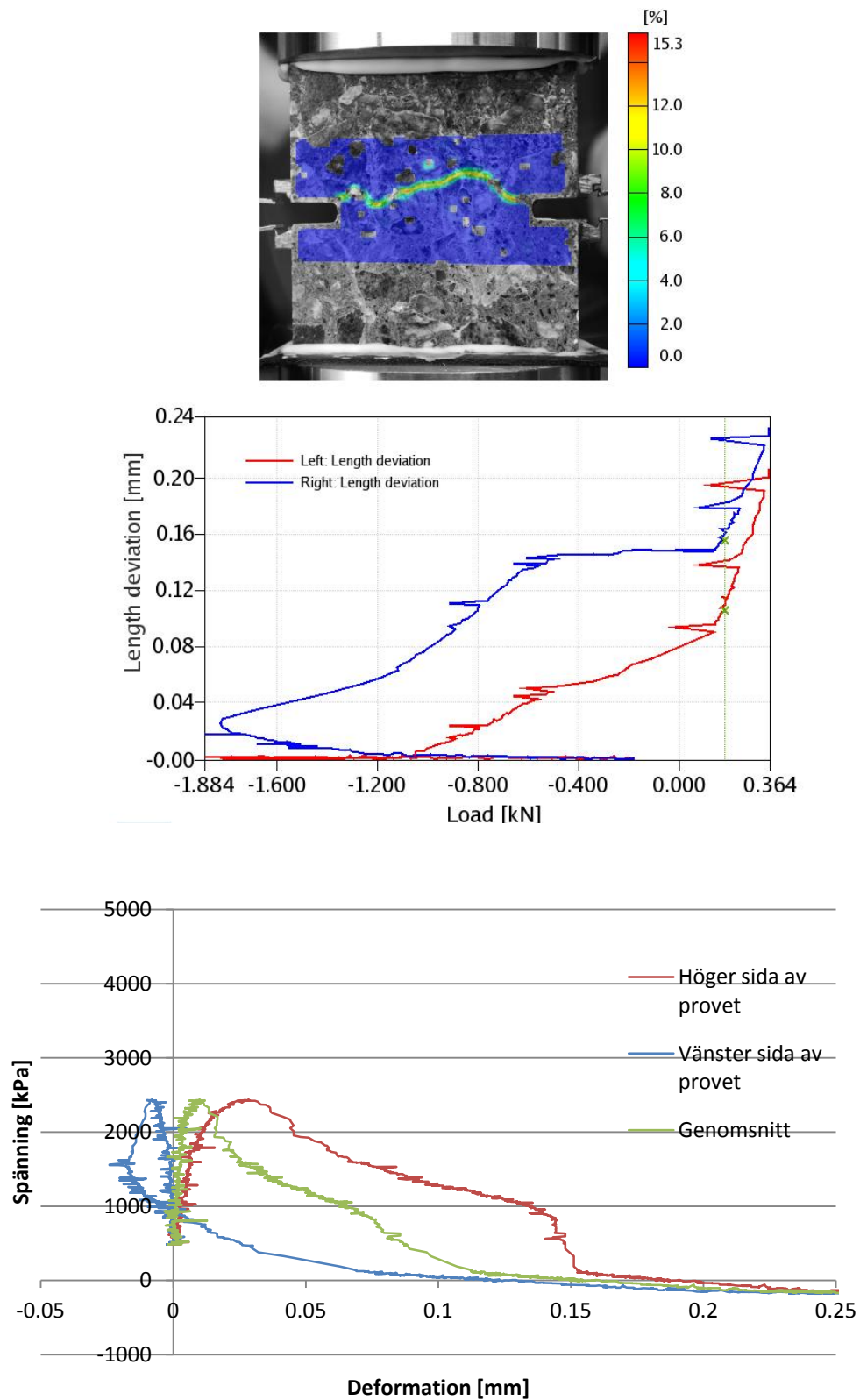
Under fliken TUT, ruta 12 bestäms motorns hastighet. Lägsta hastighet är -0,22 vilket ger en stigning på 0,055 mm/min.

Avslut och demontering

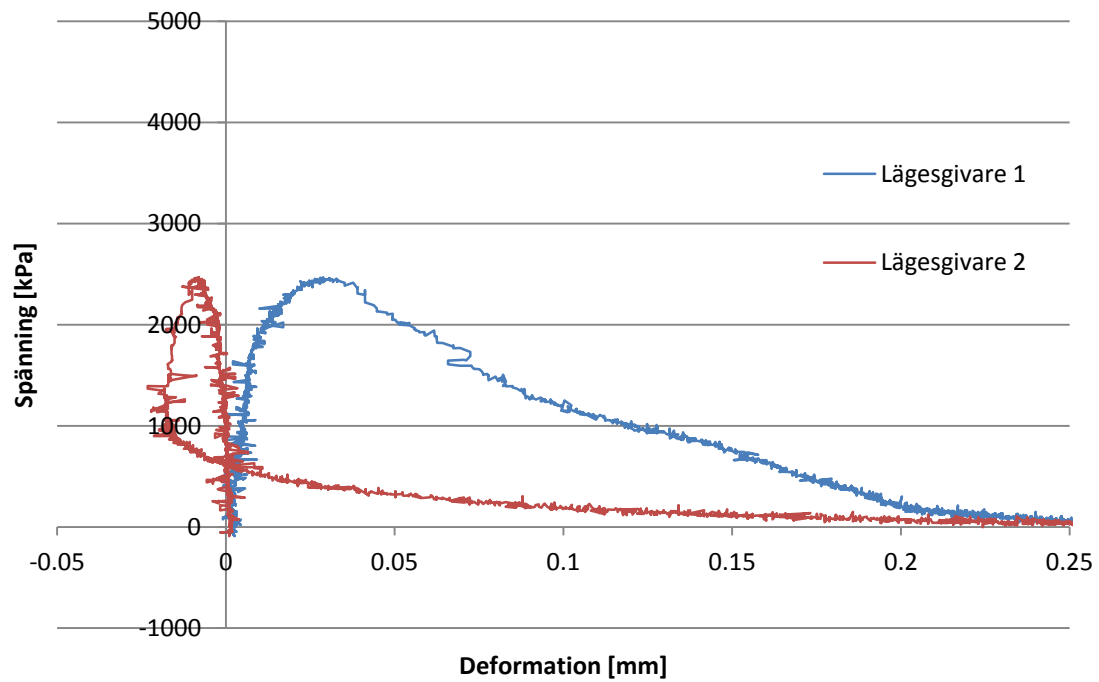
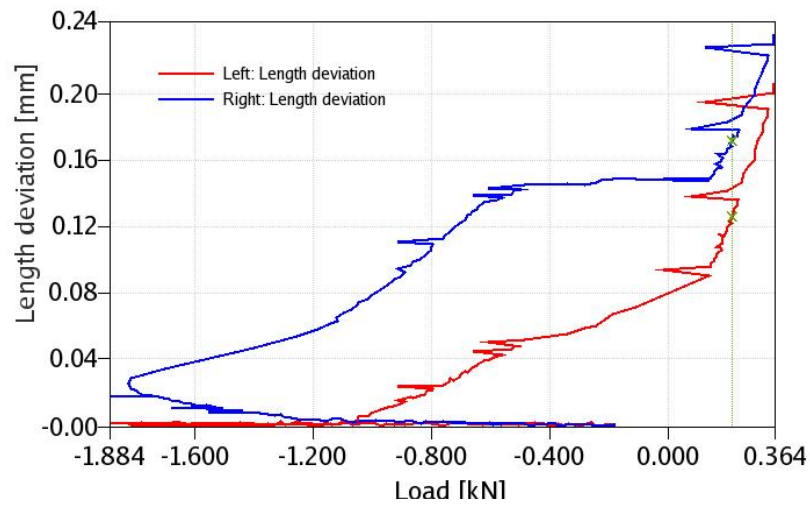
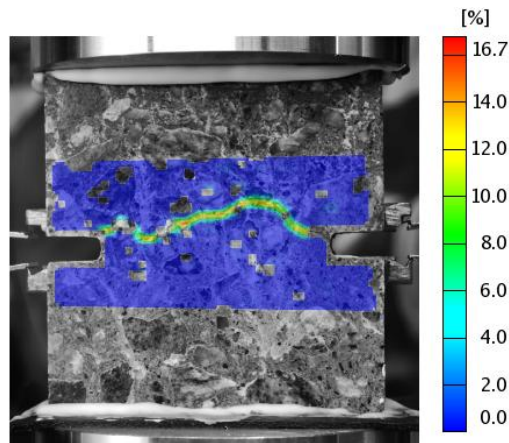
9. Dra isär provkroppen genom att styra kolven manuellt till sitt övre ändläge.
10. Skruva loss provhalvorna.
1. Avlägsna provkropparna från infästningsplattorna genom att värma dem på en kokplatta i ett dragskåp.

Bilaga B. Data från Aramis

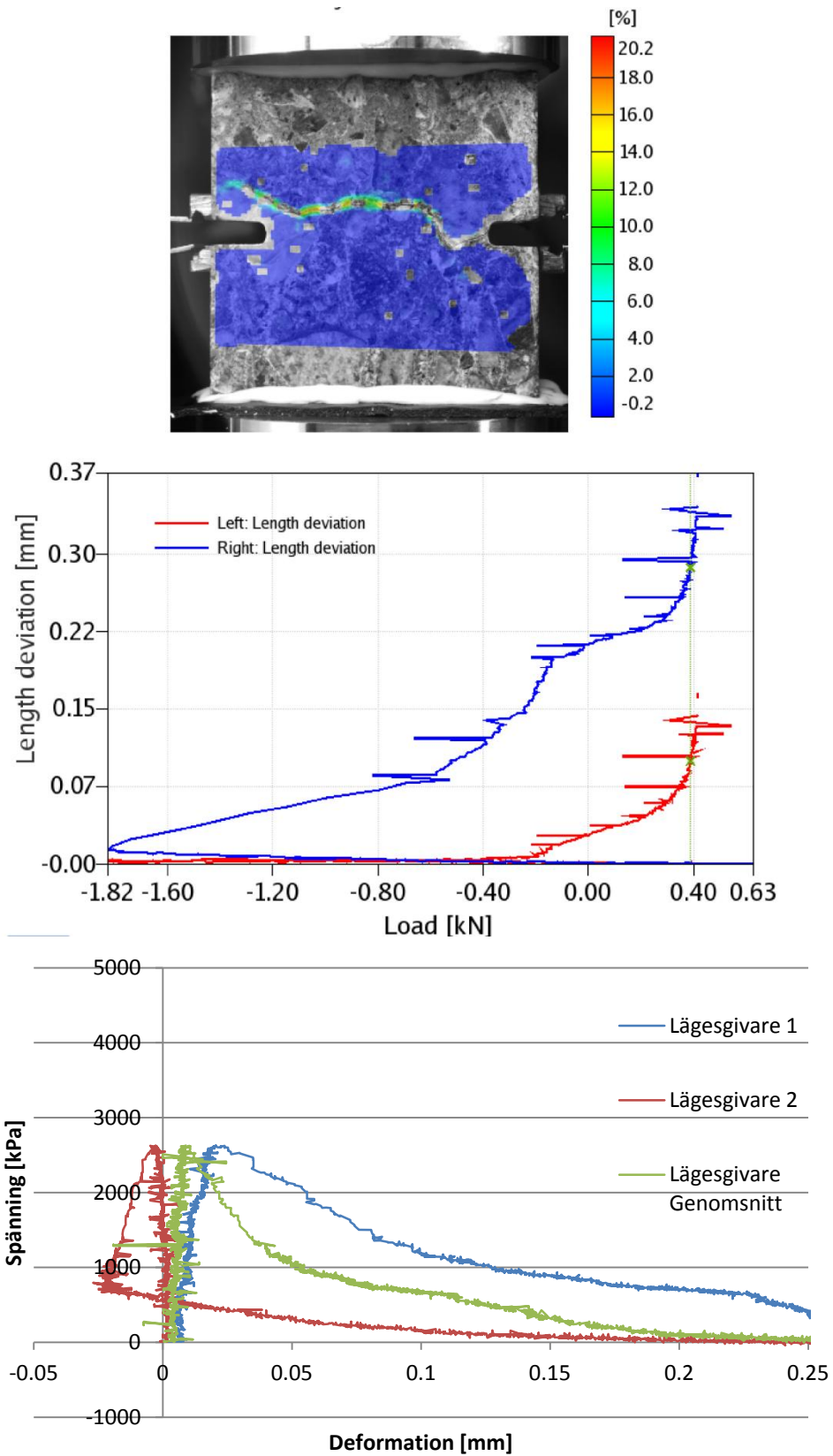
C038-1



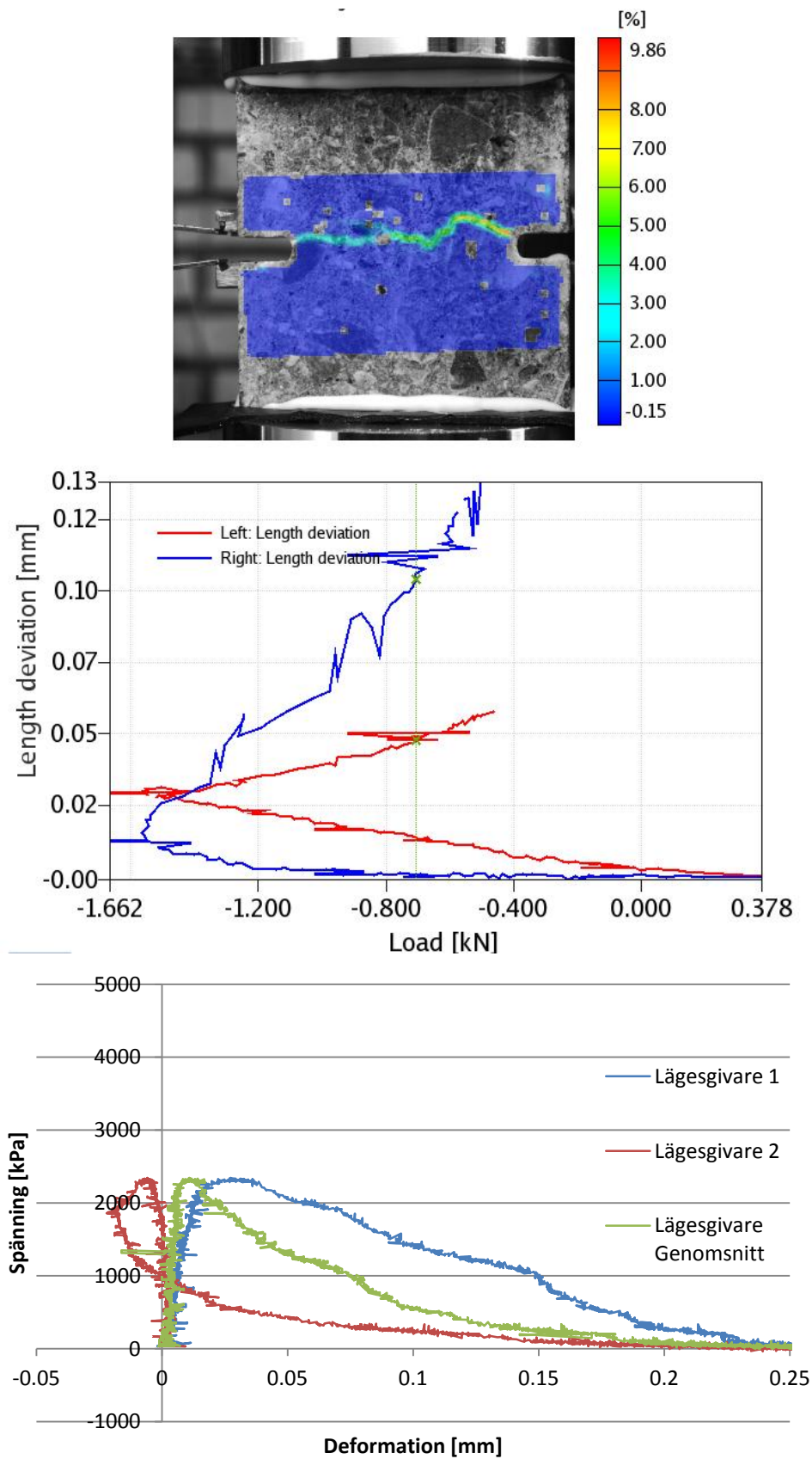
C038-2



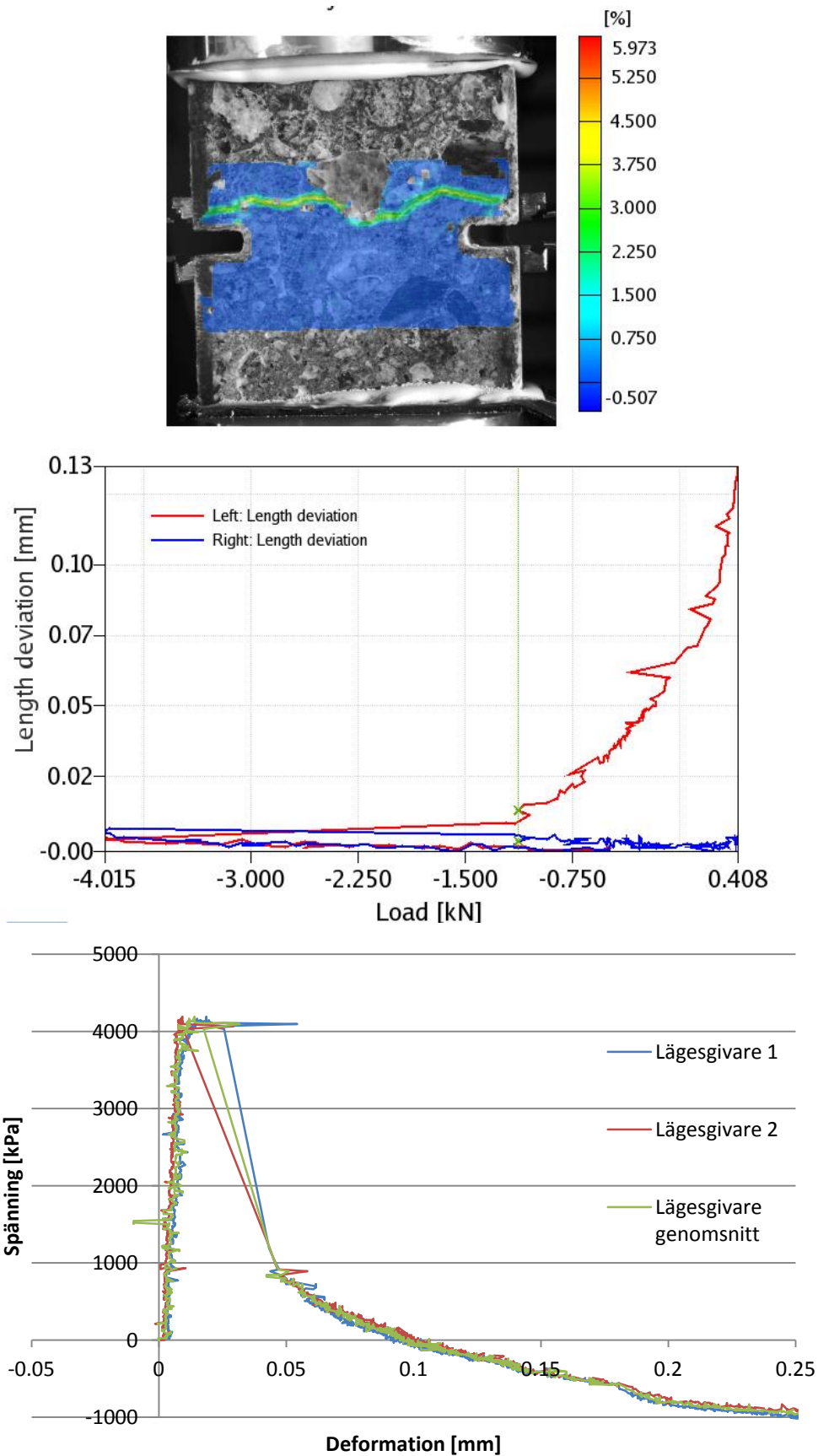
C038-3



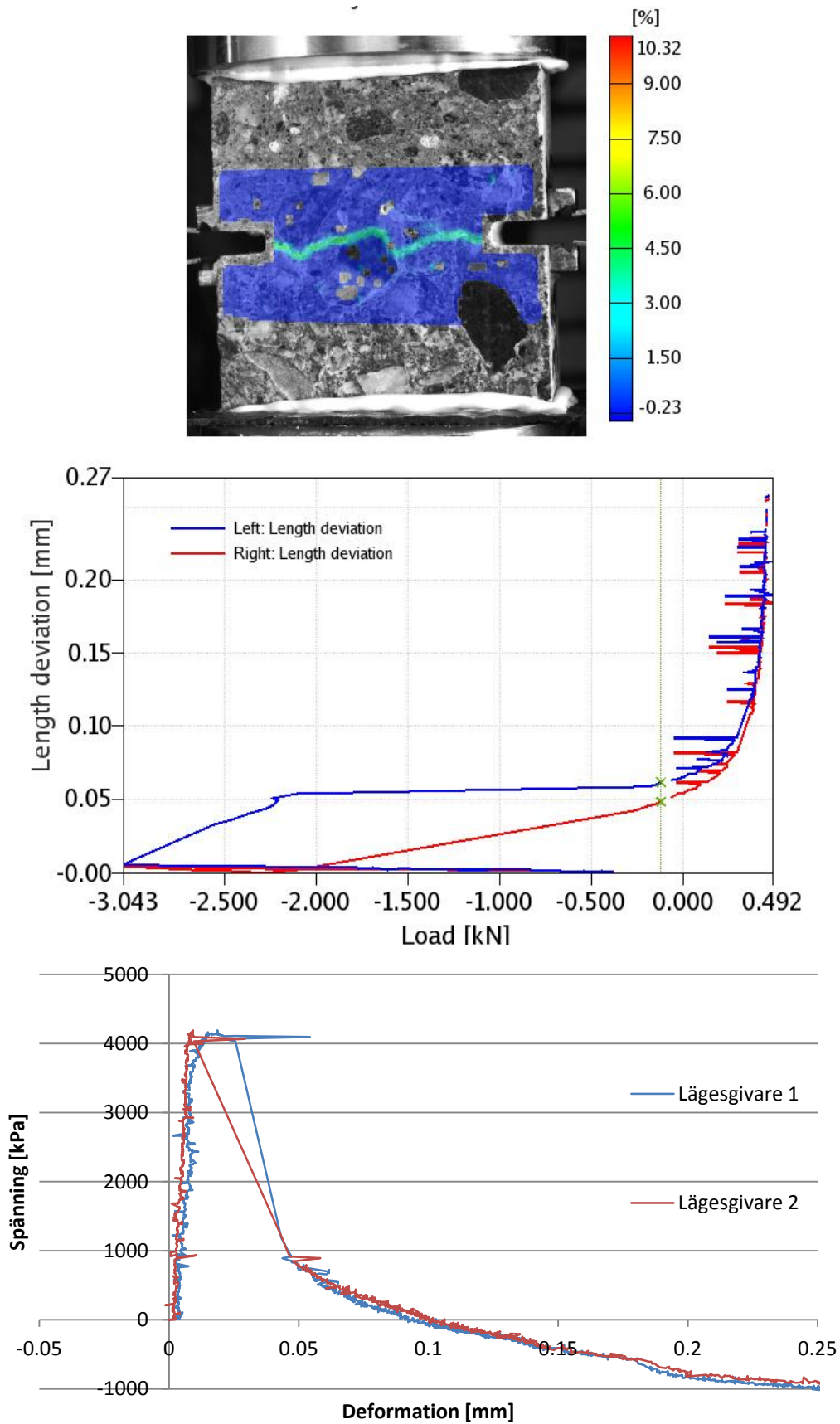
C038-4



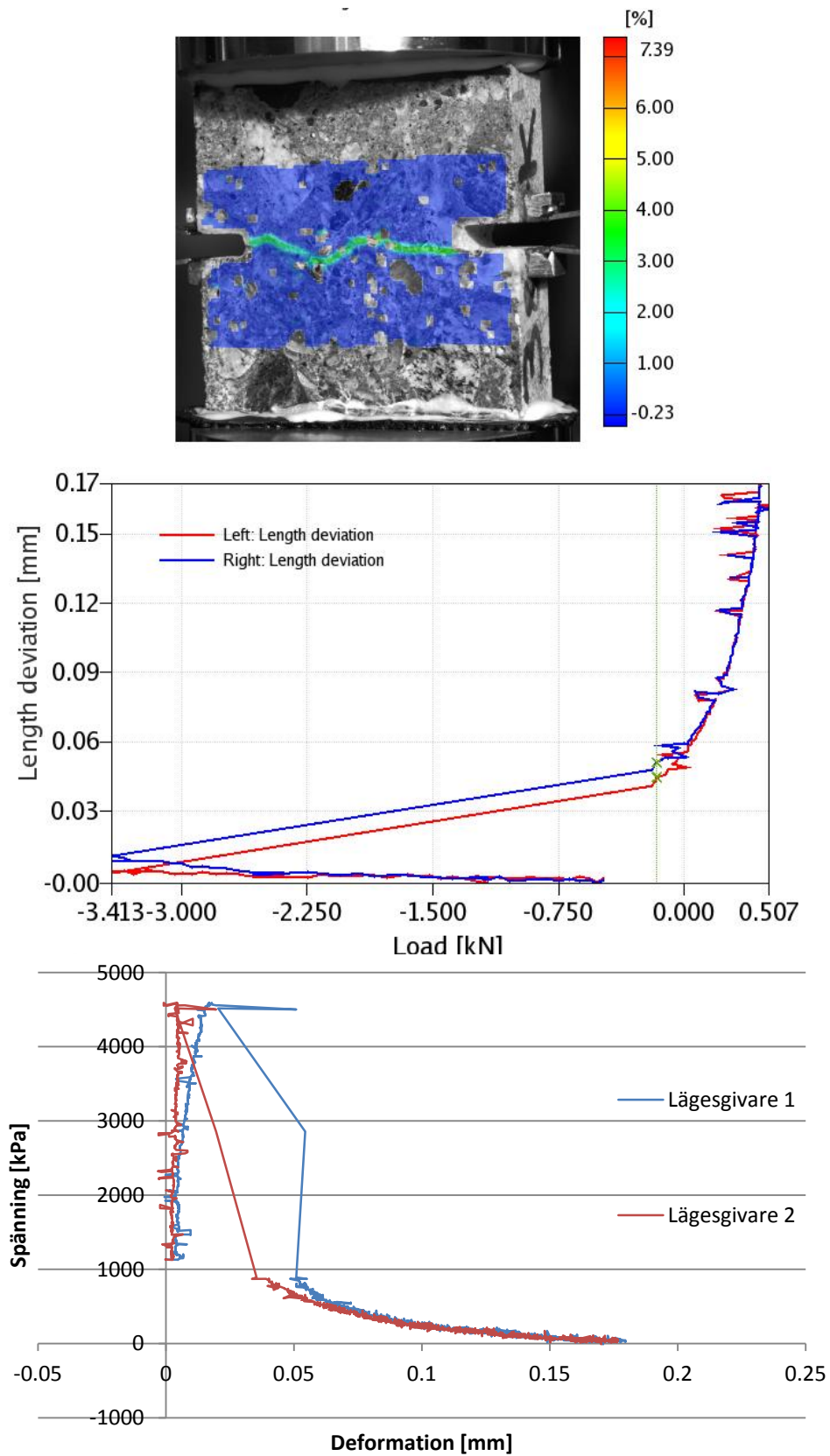
C038-5



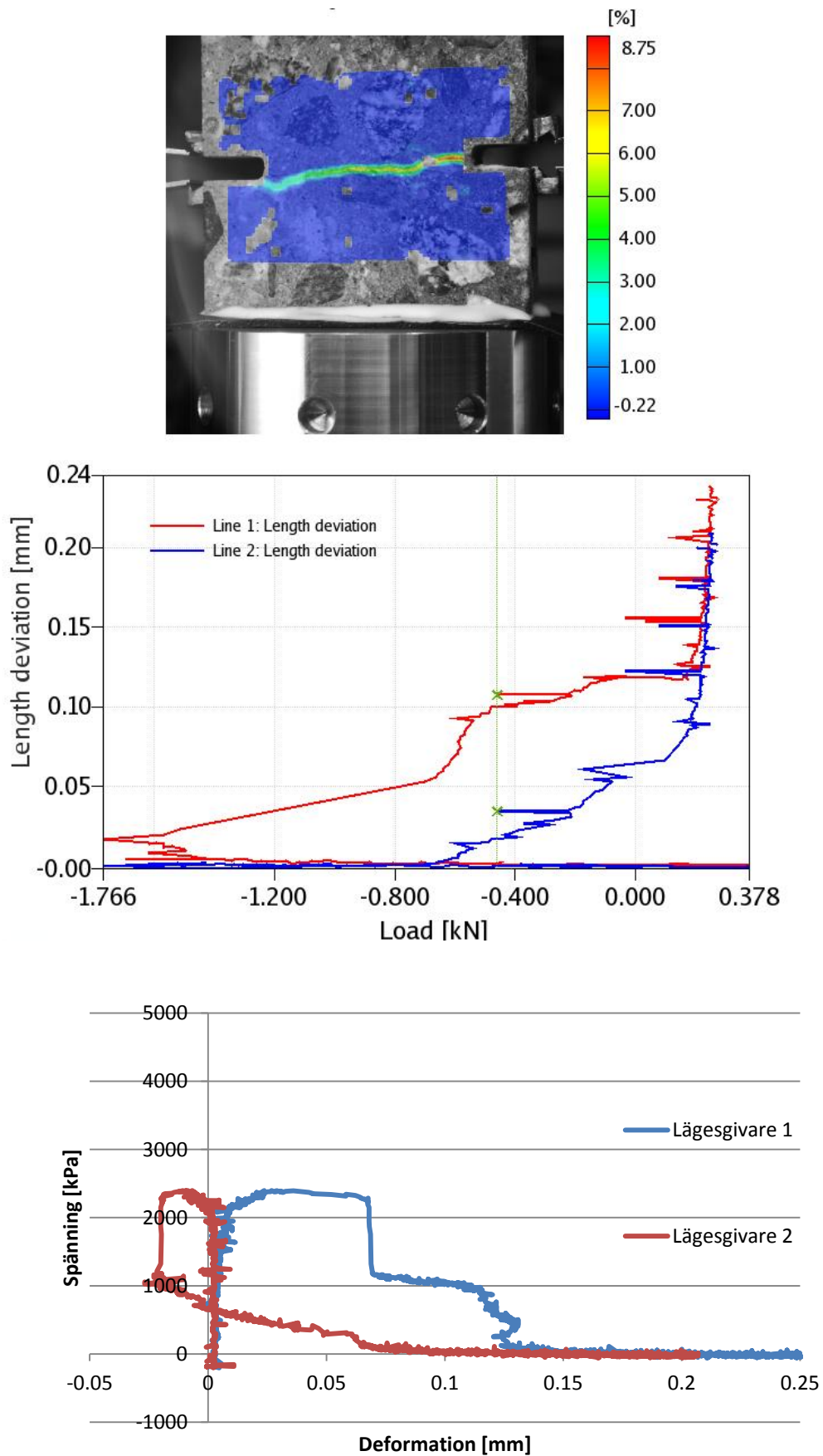
C038-6



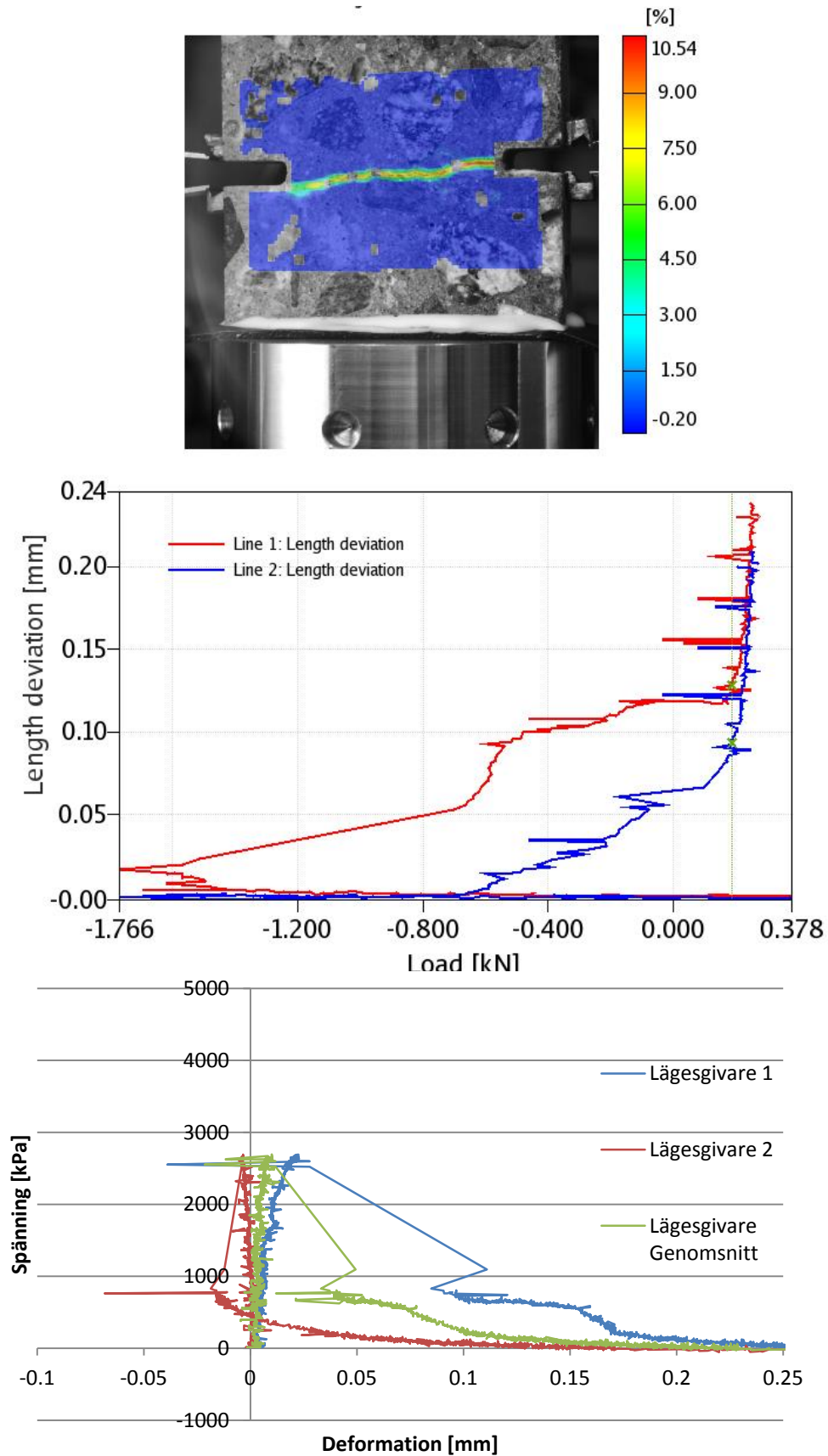
C038-7



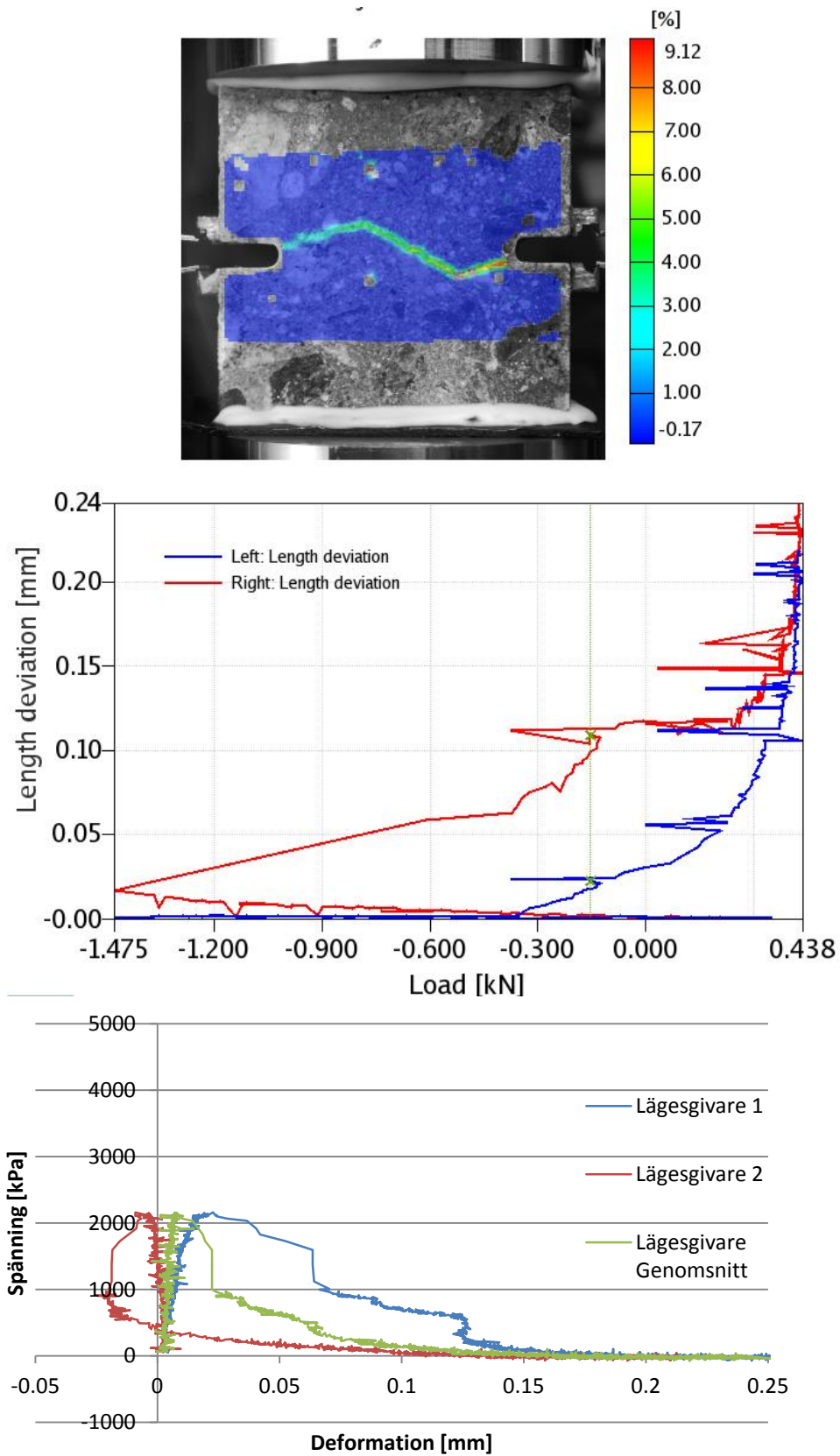
N038-1



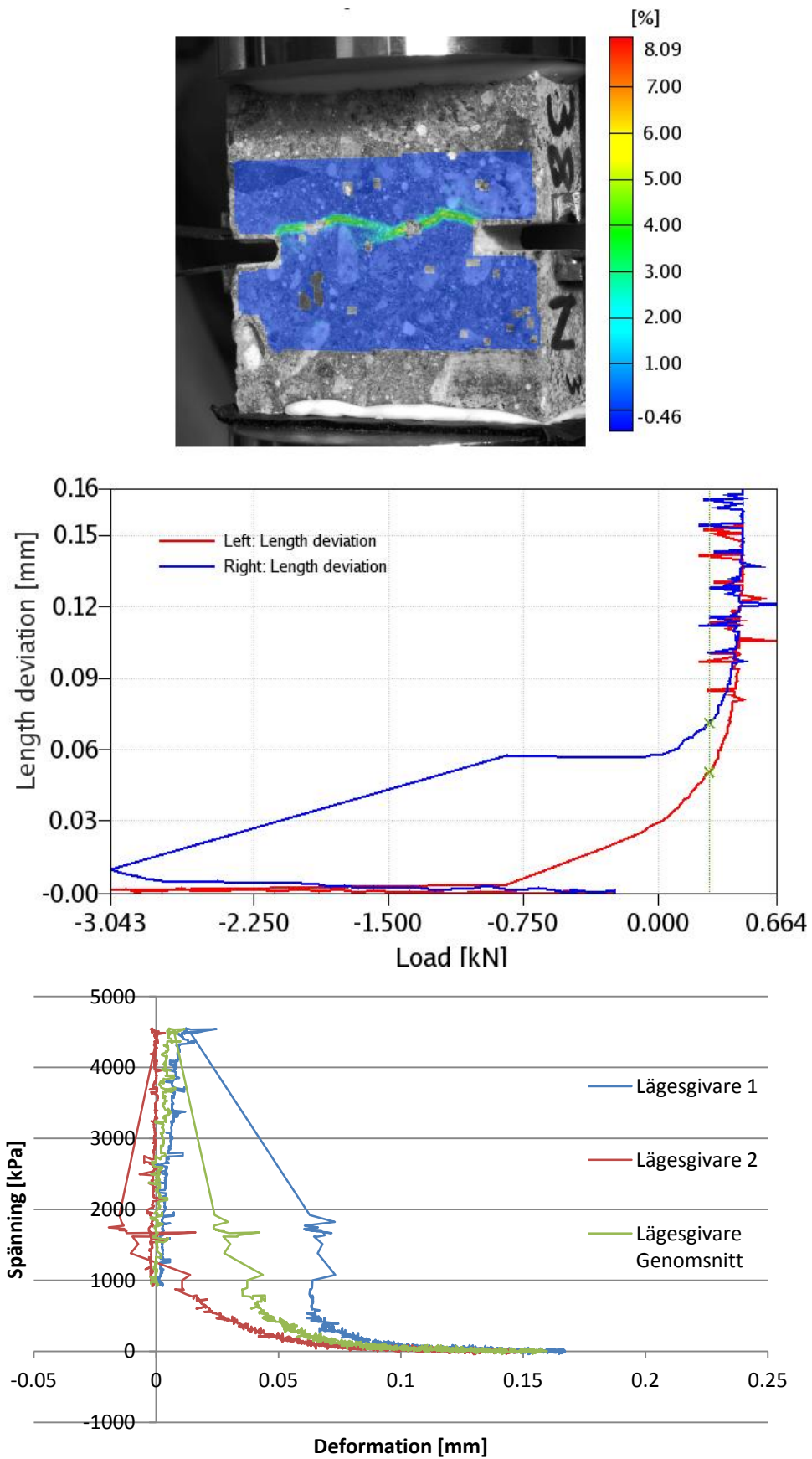
N038-3



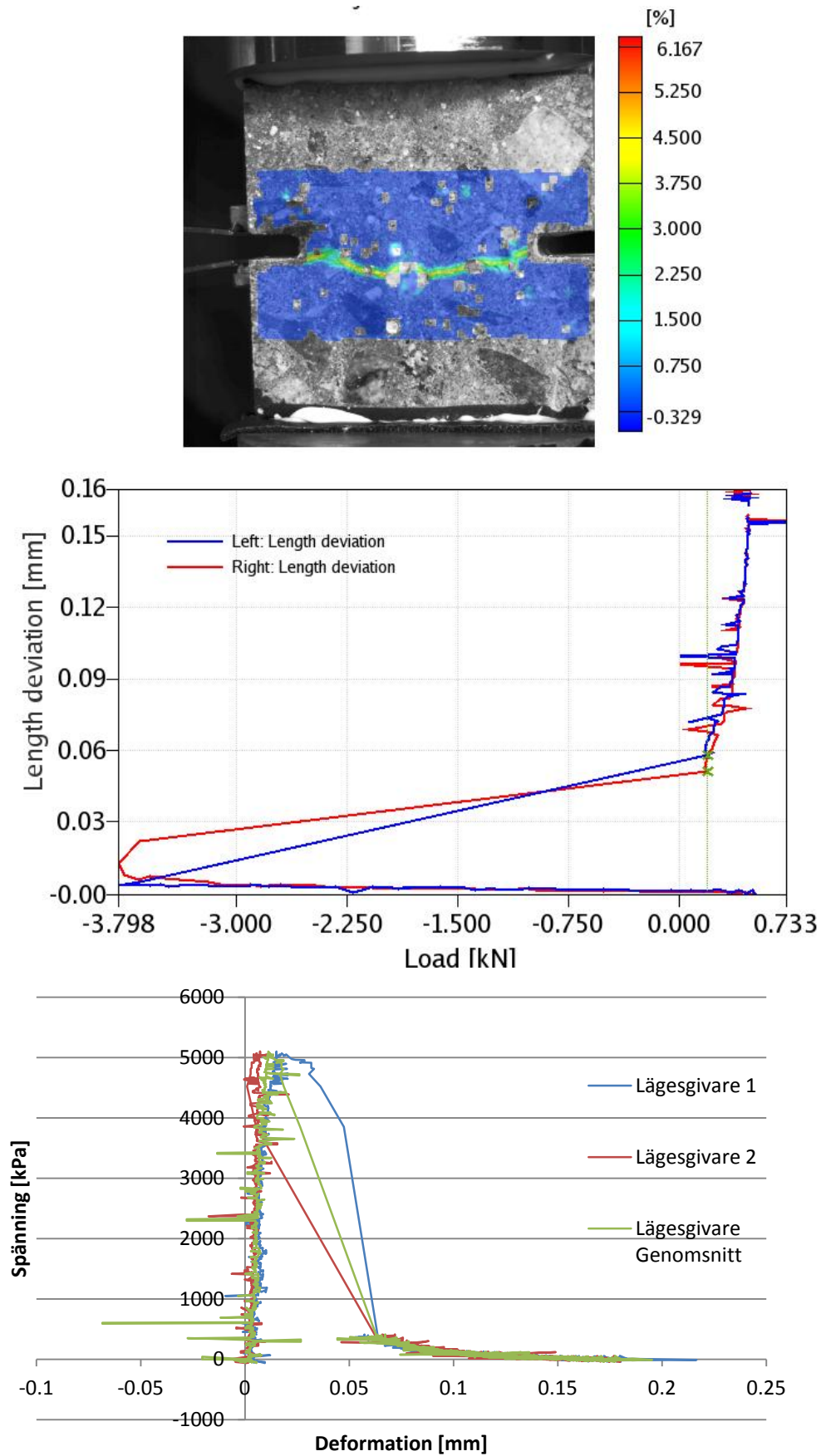
N038-4



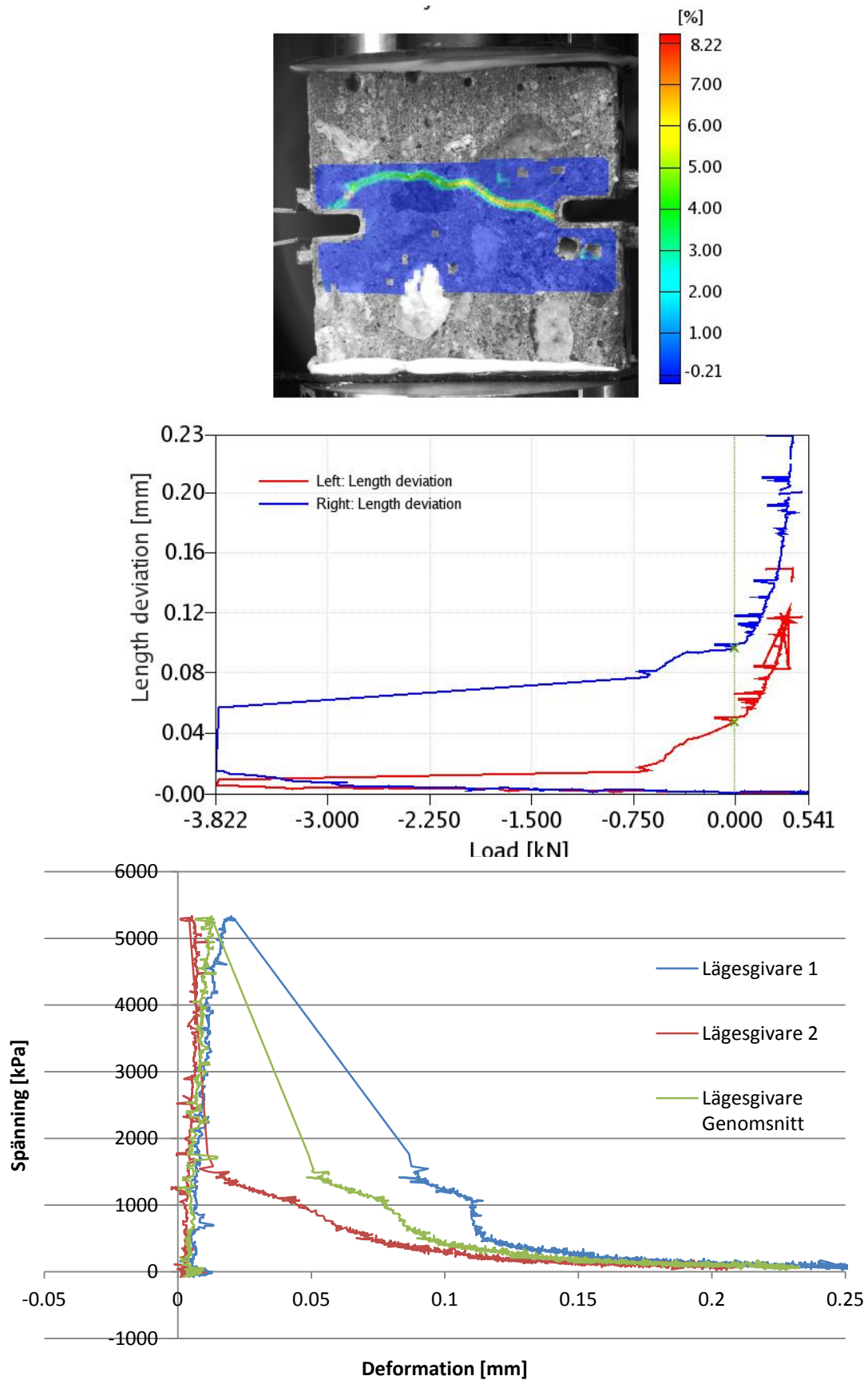
N038-6



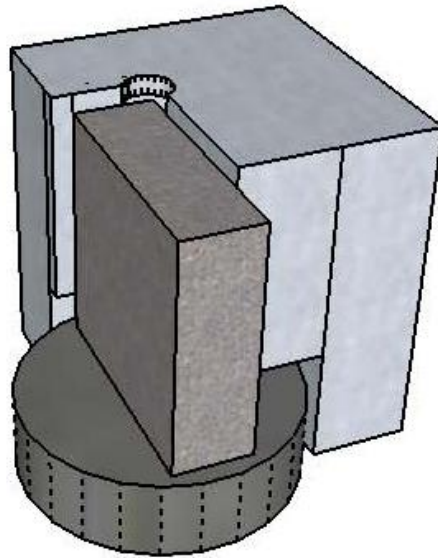
N038-7



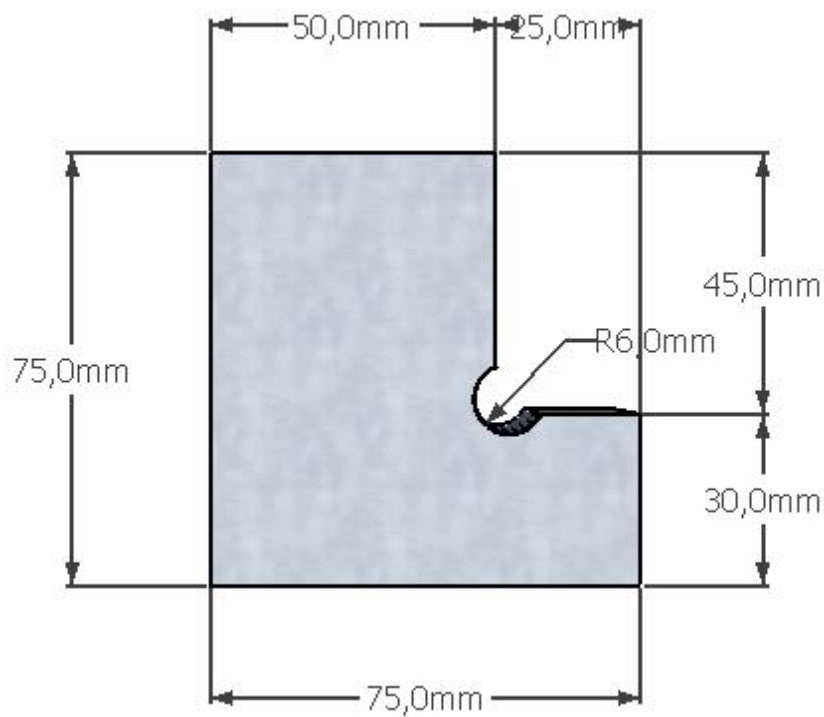
N038-8



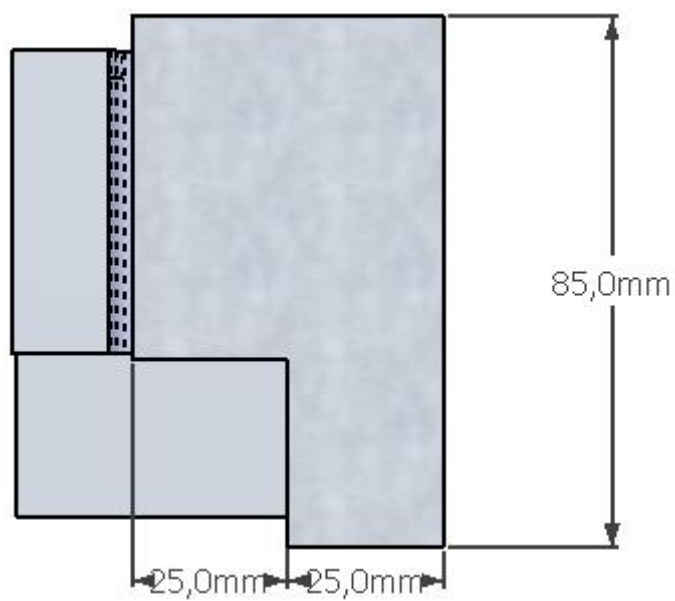
Bilaga C. Skiss/ritning på passblock



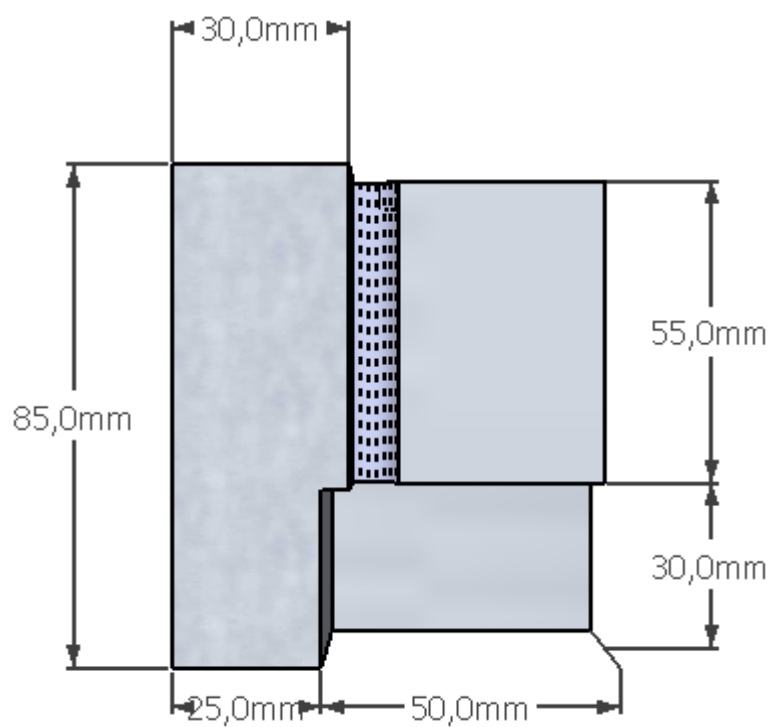
Figur C1. 3D vy över passblock med injusteringsplatta och provkropp



Figur C2. Ovansida på passblock



Figur C3. Högersida på passblock



Figur C4. Vänster sida på passblock