

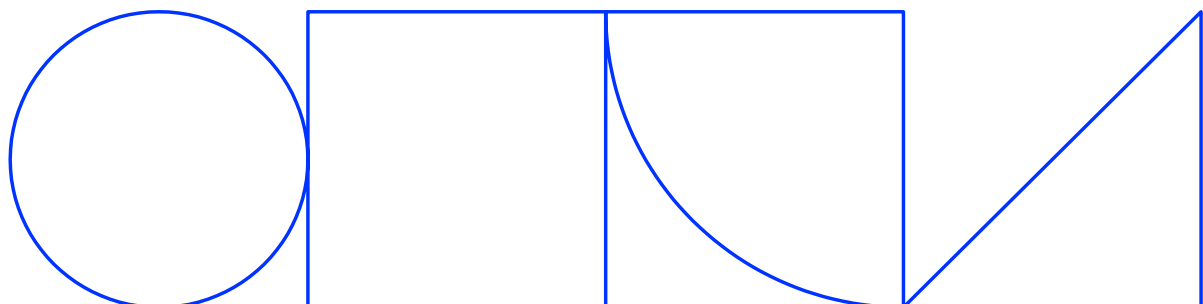
PROJEKTNR. 14155

Mätning av töjningar i ung hårdnande betong

Slutrapport

Carsten Vogt, Anders Hösthagen, Gerard James, Dmitry Panchugin, Betong & Stålteknik AB
Martin Laninge, Peab Anläggning AB
Mikael Westerholm, Heidelberg Materials

2024-02-29



Mätning av töjningar i ung hårdnande betong



Förord

Projekt 14155 ” Mätning av töjningar i ung hårdnande betong” har genomförts av arbetsgruppen, bestående av representanter från Betong och Stålteknik AB, Heidelberg Materials Cement Sverige AB och Peab Anläggning AB, med stöd av styrgruppen, referensgruppen och finansiärer.

Arbetsgruppen vill uttrycka ett explicit tack till projektets finansiärer och riktar ett speciellt tack till SBUF, som gjort denna utredning möjlig. Därutöver vill arbetsgruppen tacka projektets styrgrupp och referensgrupp för värdefull input och goda diskussioner inom projektgruppen.

Ett extra stort tack till platsorganisationen och personalen i Hargshamn. Utan all hjälp och stöttning från Thommie Östman, Klas Lundkvist med flera under installation och mätning hade det inte funnits några mätresultat att presentera och utvärdera.

Projektets arbetsgrupp:

Projektledare Martin Laninge, Peab Anläggning AB

Anders Hösthagen, Betong och Stålteknik AB

Gerard James, Betong och Stålteknik AB

Dmitry Panchugin, Betong och Stålteknik AB

Carsten Vogt, Betong och Stålteknik AB

Mikael Westerholm, Heidelberg Materials

Stefan Carlsson, Celsicom AB

Fredrik Andersson, Celsicom AB

Projektets referensgrupp (utöver arbetsgruppen):

Robert Larsson, Heidelberg Materials

Rickard Mårtensson, Peab Anläggning AB

Anders Wiberg, Trafikverket

Rasmus Rempling, NCC Sverige AB / Chalmers

Staffan Carlström, Swerock AB

Projektets styrgrupp:

Hans Hedlund, Skanska Teknik

Robert Larsson, Heidelberg Materials

Martin Laninge, Peab Anläggning AB

Carsten Vogt, Betong och Stålteknik AB

Finansiärer:

- SBUF
- Formas
- Peab Anläggning AB
- Heidelberg Materials Cement Sverige AB
- Betong och Stålteknik AB
- Celsicom AB
- NCC Sverige AB
- Skanska Sverige AB
- Swerock AB
- Trafikverket

Göteborg/Stockholm, 29:e februari, 2024

Anders Hösthagen¹, Gerard James¹, Dmitry Panchugin¹, Carsten Vogt¹

Martin Laninge²

Mikael Westerholm³

1 Betong och Stålteknik AB

2 Peab Anläggning AB

3 Heidelberg Materials

Sammanfattning

Syftet med projektet var att testa och utvärdera en ny metod baserad på fiberoptiska sensorer för att mäta töjning hos klimatförbättrad betong i ung mognadsålder. Korrelation mellan teoretiska och uppmätta tidsberoende töjningar/spänningar för klimatförbättrad betong skulle undersökas. Efter projektets start och kontakt med tillverkare av mätsystem beslutades att avgränsa försöken till ett kontinuerligt fiberoptiskt mätsystem.

Det fiberoptiska mätsystemet som användes inom projektet var ODiSI 6002 från Luna Innovations. Mätsystemet kan i levererad konfiguration anses vara ett system för bruk i laboratoriet. Många ingående komponenter är känsliga mot stötar, temperatur, fukt och damm. För bruk i fält måste dessa placeras i tempererade och fuktskyddade utrymmen. Det krävdes extra utrustning och tillbehör (UPS, 4G-modem, skydd) för att kunna genomföra mätningar i fält utan att riskera dataförlust eller att skada utrustningen. Systemet är inte avsett för automatiserad dataöverföring, datalagring och utvärdering. Mätningarna måste stoppas och startas manuellt för att kunna backa upp de stora mängderna mätdata. Med tillräckligt kraftfulla verktyg kan det vara möjligt att utveckla ett sätt att presentera uppmätta data automatiserat, trots att det krävs en hel del rensning av data. Själva utvärdering av mätdata anses inte kunna automatiseras i dagsläget då många steg kräver handpåläggning och rensning av data. Ett färdigt system, TC603 från Celsicom, användes för kompletterande temperaturmätning. Systemet är batteridrivet och utvecklat för automatiserad loggning, överföring och utvärdering av temperaturmätningar. En molntjänst för lagring av data och resultat finns, tillgängligt via dator och mobil.

Mätningar av temperaturutveckling och töjning genomfördes på krönbalksgjutningar (frontmuren) av en stödmurskaj. Balken hade en höjd på 2 m, en tjocklek på ca. 1,2 m och en varierande etapplängd. Vid installation av de fiberoptiska sensorerna fokuserades det på att koppla loss framför allt töjningssensorn från armering och övriga styva ingjutningsdetaljer så mycket som möjligt. Töjningssensorn fästes i plastringar under monteringsjärnet vid första mätningen. Metoden måste anses mindre lyckad, sensorn förflyttades under gjutning/kompaktering och utsattes för kraftiga påkänningar. Temperatursensorn tejpades till ett monteringsjärn. Vid andra mätningen isolerades monteringsjärnet och båda sensorerna tejpades mot isoleringen. Monteringens säkerhet var säkrare än vid första gjutning, sensorernas position påverkades inte under gjutning. Isoleringen förhindrar att betong och armering samverkar. Därmed borde armeringsjärnet inte ha påverkat omgivande betongen. Inom ramen av detta projekt hittades inget säkrare eller bättre sätt att gjuta in sensorerna om de ska vara bortkopplad från styva ingjutningsgods. Det anses inte att limning av töjningssensorn till armeringsjärn, kompositstång eller liknande styva material kan ge den information som eftersöks inom projektet, dvs. att mäta töjningar av hårdnande betong.

Temperaturmätning i ung betong med termoelement anses vara väl beprövad och ge tillförlitliga resultat om loggningsutrustningen skyddas från direkt sol. Det finns inget direkt mervärde i en kontinuerlig temperaturmätning längs en sträcka inuti betong under härdning inom ramen av detta projekt. Temperaturmätningen med fiberoptiken är även relativ och måste kompletteras med en annan mätteknik för att få absoluta värden. Töjningsmätningen måste dock temperaturkompenseras. Temperaturkompenseringen är enklare att genomföra med grunddata från samma system. Töjningsmätningar i hårdnande betong är enligt tidigare erfarenhet svårt att utvärdera och kan ge varierande resultat. Det har även visat sig stämma i detta projekt. Mätvärden varierade en del, dock följer kurvorna en logik och är förenliga med bakomliggande teori. Variationerna kan möjligtvis bero på installationen. Uppmätta töjningar har inte visat på förekomst av sprickor vilket bekräftats av observationer i fält. Det anses att det finns en

potential i mätmetoden med kontinuerliga fiberoptiska sensorer. Metoden är lämplig för att kunna studera töjningar i hårdnande betong, då inverkan av styva ingjutningsgods på uppmätta töjningar kan minimeras.

Det var möjligt att anpassa materialparametrar avseende betongens temperaturveckling genom en temperaturmätning i fält. För en fullständig anpassning av materialparametrar för temperatur- och mognadsutveckling krävs dock komplettering av temperaturmätningen med undersökning av hållfasthetsutveckling i tid och vid olika temperaturer. Inom ramen av detta projekt har det inte varit möjligt att anpassa materialparametrar för sprickriskberäkningar. Detta beror bland annat på att tvångssituationen för aktuell konstruktion är komplicerad och kan enbart uppskattas genom linjär elastiska beräkningar. En annan orsak är att det fanns tillförlitliga mätresultat endast från en mätning och att resultaten inom denna mätning varierade en del. Den fiberoptiska mätutrustningen anses mera lämpad för försök under kontrollerade förhållanden än rena fältmätningar (på byggplatser i tidspressad produktion). Om mätningar utförs under mera kontrollerade förhållanden och kompletteras med övriga materialundersökningar kan det eventuellt vara möjligt att anpassa materialparametrar avseende relaxation och uppsprickningsmekanism. Detta kräver dock att konstruktionen tillåts att spricka.

Summary

The purpose of the project was to test and evaluate a new method based on fiber optic sensors to measure strain in hardening climate-improved concrete. Correlation between theoretical and measured time-dependent strains/stresses for climate improved concrete should be investigated. After the start of the project and contact with manufacturers of measurement systems, it was decided to limit the test to one continuous fiber optic measurement system.

The fiber optic system used in the project was the ODiSI 6002 from Luna Innovations. In the delivered configuration, the measuring system can be considered a system for use in the laboratory. Many components are sensitive to shocks, temperature, moisture and dust. For use in the field, these must be placed in temperate and moisture-protected spaces. Extra equipment and accessories (UPS, 4G modem, protection) were required to be able to carry out measurements in the field without risking data loss or damaging the equipment. The system is not intended for automated data transfer, data storage and evaluation. The measurements must be stopped and started manually in order to back up the large amounts of measurement data. With sufficiently powerful tools, it may be possible to develop a way to present measured data in an automated manner, although it requires a great deal of data cleaning. The actual evaluation of the measurement data is not considered to be able to be automated at present time, as many steps require manual input and cleaning of the data. A ready-to-use system, TC603 from Celsicom, was used for supplementary temperature measurement. The system is battery powered and developed for automated logging, transfer and evaluation of temperature measurements. A cloud service for storing data and results is available, accessible via computer and mobile.

Measurements of temperature development and strain were carried out on beam castings (front wall) of a pier. The beam had a height of 2 m, a thickness of approx. 1.2 m and a varying length of casting sections. When installing the fiber optic sensors, the focus was on disconnecting the strain sensor from reinforcement and other rigid cast-in details as much as possible. The strain sensor was attached in plastic rings below a mounting rebar during the first measurement. The method must be considered less successful, the sensor was moved during casting/compaction and subjected to heavy stresses. The temperature sensor was taped to the mounting rebar. In the second measurement, the mounting rebar was insulated and both sensors were taped to the insulation. This assembly felt more secure compared to the first casting, the position of the sensors was not affected during casting. The insulation prevents concrete and reinforcement from interacting. Thus, the rebar should not have affected the surrounding concrete. Within this project, no safer or better way to install the sensors was found if they are to be disconnected from rigid cast-in materials. It is not considered that gluing the strain sensor to rebars, composite bars or similar rigid materials can provide the information sought within the project, i.e. to measure strains of hardening concrete.

Temperature measurement in young concrete with thermocouples is considered to be well proven and give reliable results if the logging equipment is protected from direct sunlight. There is no direct added value in a continuous temperature measurement along a distance inside concrete during hardening within the scope of this project. The temperature measurement with fiber optics is also relative and must be supplemented with another measurement technique to obtain absolute values. However, the strain measurement must be temperature compensated. The temperature compensation is easier to implement with basic data from the same system. According to previous experience, strain measurements in hardening concrete are difficult to evaluate and can give varying results. It has also proven to be true in this project. Measured values varied somewhat, however, the curves follow a logic and are compatible with the underlying theory. The variations may possibly be due to the installation. Measured strains have

not shown the occurrence of cracks, which has been confirmed by observations in the field. It is considered that there is a potential in the measurement method with continuous fiber optic sensors. The method is suitable for being able to study strains in hardening concrete, as the influence of rigid casting materials on measured strains can be minimized.

It was possible to adapt material parameters regarding the concrete's heat development through a temperature measurement in the field. However, for a complete adaptation of material parameters for temperature and maturity development, it is necessary to supplement the temperature measurement with an investigation of strength development over time and at different temperatures. Within the scope of this project, it has not been possible to adapt material parameters for crack risk calculations. This is due, among other things, to the fact that the restraint situation for the current construction is complicated and can only be estimated by linear elastic analysis. Another reason is that there were reliable strain results only from one measurement and that the results within this measurement varied somewhat. The fiber optic system is considered more suitable for tests under more controlled conditions than pure field measurements (on construction sites in time-pressed production). If measurements are carried out under more controlled conditions and supplemented with other material investigations, it may be possible to adapt material parameters regarding relaxation and cracking mechanism. However, this requires that the structure be allowed to crack.

Innehåll

FÖRORD	3
SAMMANFATTNING	5
SUMMARY	7
INNEHÅLL	9
1 INLEDNING	11
1.1 Bakgrund	11
1.2 Syfte och mål.....	12
1.3 Avgränsningar.....	13
2 KUNSKAPSLÄGET IDAG	14
2.1 Temperatursprickor	14
2.1.1 Forskning och utveckling.....	14
2.1.2 Materialparametrar	15
2.1.2.1 Bestämning av materialparametrar	15
2.1.3 Sprickriskberäkning enligt AMA Anläggning	16
2.2 Temperaturmätning i betong	17
2.2.1 Allmänt.....	17
2.2.2 Mätssystem.....	17
2.2.2.1 Elektriska system	17
2.2.2.2 Fiberoptiska system.....	17
2.3 Töjningsmätning i betong	18
2.3.1 Allmänt.....	18
2.3.2 Mätssystem.....	19
2.3.2.1 Elektriska system	19
2.3.2.2 Fiberoptiska system.....	20
2.4 Dataöverföring	23
3 PROJEKTETS GENOMFÖRANDE	24
3.1 Uppsättning av mätsystem och dataöverföring	24
3.1.1 Temperaturmätning med traditionellt system.....	24
3.1.2 Temperatur och töjning med fiberoptik.....	24
3.2 Stresstest mätsystem	30
3.3 Identifikation och beskrivning av mätobjekt	30
3.4 Installation av sensorer	33
3.4.1 Allmänt.....	33
3.4.2 Gjutning 1.....	34
3.4.3 Gjutning 2.....	38
3.5 Gjutning	42
3.5.1 Gjutning 1.....	42
3.5.2 Gjutning 2.....	45

3.6	Dataöverföring	45
4	RESULTAT	47
4.1	Gjutning 1	47
4.1.1	Allmänt	47
4.1.2	Egenskaper färsk betong	47
4.1.3	Temperaturutveckling	47
4.1.4	Töjning	49
4.2	Gjutning 2	50
4.2.1	Allmänt	50
4.2.2	Egenskaper färsk betong	50
4.2.3	Temperaturutveckling	50
4.2.4	Töjning	52
4.3	Jämförelse mot beräkningar	56
4.3.1	Allmänt	56
4.3.2	Temperaturutveckling	56
4.3.3	Töjning	58
5	DISKUSSIONER OCH SLUTSATSER	63
5.1	Uppsättning mätsystem och dataöverföring	63
5.2	Installation av fiberoptiska sensorer	63
5.3	Temperaturmätning	64
5.4	Töjningsmätning	64
5.5	Automatiserad datalagring, utvärdering och implementering	65
5.6	Möjligheter att anpassa materialparametrar för sprickriskberäkningar	65
5.6.1	Temperatur	65
5.6.2	Sprickrisk	65
5.7	Rekommendationer för fortsatt utveckling	65
	REFERENSER	67
	BILAGOR	68
	Bilaga A: Materialmodeller i ConTest	68

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Vid gjutning av betongkonstruktioner behöver risken för sprickbildning under härdning (på grund av värmeutveckling och autogen krympning) beaktas. Den unga betongen deformeras på grund av ändrade temperatur- och fuktillstånd och, om deformationen förhindras i någon grad induceras spänningar i den unga betongen. Om den momentana spänningen överstiger den momentana draghållfastheten kan det utvecklas sprickor. Den typen av sprickor är sällan ett problem när det gäller bärförmågan, men kan i många fall innebära försämrad beständighet och leder antingen till reparationer eller en förkortad livslängd. Båda situationerna är oönskade med avseende på ökad hållbarhet i samhället.

Därför är det av stor vikt att få en god överblick över var i en konstruktionsdel höga spänningar kan förekomma. Före en gjutning kan risken för termisk och autogen sprickbildning analyseras genom temperatur/spänningsberäkningar, där hänsyn även kan tas till autogena krympningar. Denna metodik har använts i flera länder sedan slutet av 1990, men ännu mer kunskap om spänningsnivåerna i ung betong behöver täckas in. Genom beräkningar kan en god överblick över spänningarnas storlek i betongen uppnås. Men beräkningarna är bara uppskattningar av stressnivåer. Flera faktorer spelar in vid upplevd påfrestning, såsom betongblandningens egenskaper, den faktiska fasthållningsgraden, temperaturskillnader mellan betongen och omgivningen, formens isoleringsegenskaper, vindhastighet, fuktighet och tidpunkt för formborttagning. Alla dessa faktorer kan leda till skillnader mellan beräknade och verkliga spänningsnivåer. Ett lämpligt sätt att verifiera den teoretiska modellen är jämföra beräkningarna med faktiskt uppmätta töjningar.

Kraven gällande spricksäkerhet, beräkning, materialparametrar och åtgärder regleras i Sverige i dagsläge i AMA-ANL (referensverk för utförande, material och kontroll). Krav avseende begränsning av temperatursprickor har funnits sedan mitten av 1990-talet (Vägverkets bronorm, Bro94). Normalt utförs beräkningar av temperatur och spänning/töjning i hårdnande betong för att kunna planera åtgärder mot uppkomst av temperatursprickor. Beräkningar kan utföras med FEM modeller, där ingående materialmodeller och materialparametrar antingen har bestämts genom provning eller baseras på s.k. generella materialparametrar för ”standardbetonger”. Materialparametrarna för standardbetonger i ConTeSt Pro är samtliga baserade på Portlandcement (CEM I).

Skärpta miljökrav och en generell trend att reducera miljöpåverkan av betongkonstruktioner har resulterat i ökad användning av klimatförbättrad betong som innehåller en viss andel tillsatsmaterial (t.ex. flygaska eller slagg). Därmed är de befintliga standardparametrar för sprickriskberäkningar inte representativa för klimatförbättrad betong. Provning av materialparametrar för klimatförbättrad betong pågår och inom ett nyligen avslutad SBUF projekt (SBUF-projekt 14096) har en uppsättning parametrar för ”klimatförbättrade standardbetonger” tagits fram. Det finns flera pågående projekt för att ta fram materialparametrar för klimatförbättrad betong. Genom beräkningar kan en god överblick över spänningarnas/töjningarnas omfattning i betongen uppnås. Men beräkningarna är dock bara uppskattningar av spännings- och töjningsnivåerna i betongen. Flera faktorer påverkar verklig påfrestning, såsom betongens egenskaper, tvångssituation, temperaturskillnader mellan betongen och omgivningen vid gjutskedet, formens värmeledande egenskaper, vindhastighet, luftfuktighet och tidpunkt för formrivning. Alla dessa faktorer kan leda till skillnader mellan beräkning och uppmätta spänningsnivåer.

Ett sätt att utöka erfarenhetsbanken kring spänningsutvecklingen hos betong med reducerad klimatpåverkan är att jämföra beräknade och uppmätta töjningar. Utifrån uppmätta töjningar och betongens materialparametrar kan korresponderande spänningar beräknas. De uppmätta töjningarna och beräknade spänningarna kan sedan jämföras med motsvarande teoretiska beräkningar varvid slutsatser kring använda teoretiska modeller och antagna materialparametrar kan göras. För traditionella betonger med CEM I har detta genomförts tidigare i ett SBUF finansierat projekt (Jonasson et al, 2009).

En förstudie avseende lämplighet av olika mätsystem för att mäta töjningar i hårdnande betong har genomförts. Förstudien resulterade i att det anses lämpligt att använda nya mätmetoder som bygger på fiberoptiska system. Dessa kan vara baserade på diskreta sensorer som byggs in i fibern eller på kontinuerliga mätningar längs fibern.

Lämpligheten av ett system baserat på diskreta sensorer för mätning av töjningar i hårdnande betong har påvisats, se t.ex. Wong et al 2007. I Bado et al (2021) har en annan typ av fiberoptisk sensor använts för töjningsmätningar i betongkonstruktioner. Sensorn bygger på kontinuerliga töjningsmätningar längs fibern och måste därför fästas på t.ex. ett armeringsjärn i konstruktionen vid ingjutning.

Erfarenheterna från olika mätningar visar att det ofta uppkommer problem vid utvärderingen av mätdata. Uppmätt data måste vara spårbar, komplett och otvetydigt. En praxis bör upprättas hur mätpunkter i fält kan dokumenteras digitalt, struktureras och lagras. I idealfallet kan insamlad data kopplas till en digital modell. Därmed blir det enklare att analysera mätningar, gå tillbaka i "historiken" för att se på äldre mätningar, och säkerställa att mätningar inte innehåller avsaknad av viktiga parametrar som gör att hela mätningen och efterföljande analys förlorar i värde. För att öka tillgången på kompletta mätningar som är nödvändigt för att kunna göra bra jämförelser med teoretiska beräkningar skulle det vara av fördel om branschen får vägledning som beskriver hur mätningar kan genomföras och dokumenteras.

1.2 Syfte och mål

Syfte med projektet är att,

- testa och utvärdera en ny metod baserad på fiberoptiska sensorer för att mäta töjning hos klimatförbättrad betong i ung mognadsålder.
- undersöka korrelation mellan teoretiska och uppmätta tidsberoende töjningar/spänningar för klimatförbättrad betong med väldefinierade materialparametrar.
- ge vägledning till branschen hur mätningar kan genomföras och dokumenteras digitalt.

Målsättningen är att projektet ska bidra till att,

- skapa ett digitalt arbetssätt gällande mätning, dokumentation och lagring av mätdata.
- påvisa att mätmetoden är användbar för att verifiera teoretiska beräkningar av sprickrisker från egenrörelser.
- Utöka kunskapen om klimatförbättrade betongens deformationer i tidig mognadsålder (värme- och krymprelaterad).
- undersöka möjligheterna för att utveckla en alternativ metod för att bekräfta/bestämma materialparametrar som påverkar sprickbenägenhet hos klimatförbättrad betong i tidig mognadsålder.

Branschnyttan med projektet är

- Ökad kunskap om ung betongs sprickriskrelaterade egenskaper vilket inte minst är viktigt för att öka användning av klimatförbättrad betong i anläggningsbyggandet.
- Förbättra precisionen i sprickriskberäkningarna för klimatförbättrad betong och därmed

- möjlighet till optimering av åtgärderna.
- Bättre möjlighet att kunna följa upp och styra åtgärder för sprickbegränsning.
- Ökat inslag av digitalisering vid betonggjutningar genom ett sensorbaserat system för töjningsmätning. En effektivare mätmetod möjliggör att ett ökat antal mätningar genomförs och erfarenhetsbanken byggs på. Mätningarnas kvalitet förbättras genom strukturerad insamling av data.

1.3 Avgränsningar

Efter projektets start och kontakt med tillverkare av mätsystem beslutades att avgränsa försöken till ett kontinuerligt fiberoptiskt mätsystem. Beslutet togs i samråd med styrgruppen och referensgruppen.

Projektets budget tillät endast att hyra utrustningen i 2 månader. Under denna relativt korta tidsperioden fick mätutrustningen sättas ihop och provköras samt själva fältmätningar utföras. Uppstartsperioden blev förhållandevis lång, det lyckades ändå att genomföra två mätningar över sammanlagt mer än 3 veckors tid.

I projektet skulle det bl.a. undersökas om det gick att bekräfta tillgängliga materialparametrar samt möjligheten att bestämma materialparametrarna hos använd klimatförbättrad betong. Detta förutsätter att mätningarna genererar användbar och logiskt försvarbara data.

2 Kunskapsläget idag

2.1 Temperatursprickor

En mycket kort teoretisk bakgrund avseende temperatursprickor ges i kapitel 1.1.

2.1.1 Forskning och utveckling

Nedanstående är i stora delar kondenserad information hämtad från slutrapporten av SBUF projekt 14096. Det anses inte nödvändigt att upprepa all information från rapporten eller att skriva om det i någon form. Den intresserade läsaren kan hitta mera omfattande information i ovan nämnda rapport.

Branschen har idag goda kunskaper i hur erforderliga åtgärder skall dimensioneras och utformas för att begränsa risken för temperatursprickor. Till hjälp för detta finns relativt avancerade beräkningsprogram (FEM) och beräkningsmetoder beskrivna i AMA Anläggning kopplade till olika tekniska rapporter. I detta kapitel ges en genomgång av relevanta rapporter samt beräkningsprogram för begränsning av temperatursprickor.

Forskning och utveckling inom området temperaturspänningar i ung betong har skett under en relativt lång tid. Flera utvecklingsprojekt har mynnat ut i handledningar eller beräkningsmetoder för hur temperatursprickrisk skall hanteras. Exempel på detta är "Beräkningsmetod 2" och "Handboksmetoden" (beräkningsmetod 3) som idag är implementerade i AMA Anläggning.

Nedan ges exempel på relevanta rapporter, användbara vid analyser för begränsning av temperatursprickor:

-LTU 1997:02 Temperatursprickor i betongkonstruktioner, Del A, B och C

-LTU 2001:14 Temperatursprickor i betongkonstruktioner, Del D och E

-IPACS 2002:79-6 Concrete Cast on Rock

-SBUF 11618 Tvång för sprickanalyser

-SBUF 11940 Beständiga undervattensgjutna kajkonstruktioner

-Övriga rapporter:

- LTU 1995:27 Thermal cracking in high performance concrete.
Viscoelastic models and laboratory tests
- LTU 1995:34 Mognadsutveckling i ung betong.
Temperaturkänslighet, hållfasthet och värmeutveckling
- LTU 1996:38 Stresses in high performance concrete due to temperature and moisture variations at early ages
- LTU 2000:25 Hardening Concrete
Measurements and evaluation of non-elastic deformation and associated restraint stresses.
- LTU 2000:27 Thermal cracking of young concrete.
Partial coefficients, restraint effects and influences of casting joints
- LTU 2001 Improved Production of Advanced Concrete Structures (IPACS),
Published by Department of Civil & Mining Engineering, Division of
Structural Engineering, Luleå University of Technology, 2001.
- LTU 2003:11 Restraint Factors and Partial Coefficients for Crack Risk Analyses of
Early Age Concrete Structures
- LTU 2003:19 Self-compacting concrete – Properties of fresh and hardening concrete
for civil engineering applications

- LTU 2003:20 Thermal Crack Estimation in Early Age Concrete
- LTU 2013 Measurement and modelling of young concrete properties
- LTU 2014 Restraint in structures with young concrete: Tools and estimations for practical use

Utöver ovanstående rapporter pågår undersökningar inom området, t.ex.:

- SBUF 14170 Metoder för sprickriskbedömning och -begränsning hos hårdnande betong
- BBT-projekt Trafikverkets och Anläggning AMAs metoder för undvikande av tidig sprickbildning i betong – nyutveckling m h t miljökriterier

2.1.2 Materialparametrar

Enligt AMA-Anläggning kan två olika typer av materialparametrar användas för sprickriskberäkningar i hårdnande betong,

- Receptspecifika materialparametrar och
- Generella materialparametrar.

Materialparametrar ska återspegla betongens egenskapsutveckling över tid avseende temperatur, hållfasthets- och mognadsgrad, spänning, krypning, krympning samt temperatur-rörelser. Uppsprickningsmekanism ska dokumenteras.

Receptspecifika materialparametrar

I AMA Anläggning 23 EBE.11, rubrik ”Receptspecifika materialparametrar” anges följande:

”Receptspecifika materialparametrar som används vid sprickriskberäkning ska vara framtagna genom provning för aktuellt betongrecept. I provningen ska utvecklingen över tid av temperatur, hållfasthets- och mognadsgrad, spänning, krypning, krympning samt temperaturrörelser ingå. Uppsprickningsmekanism ska dokumenteras. Spricksäkerhetsfaktorn för receptspecifika materialparametrar i tabell AMA EBE.11/1 och tabell AMA EBE.11/2 får då användas.”

Generella materialparametrar

I AMA Anläggning 23 EBE.11 anges följande inledningsvis under rubrik ”Generella materialparametrar”:

”Materialparametrar som framtagits för typer eller intervall av betongsammansättningar får användas om förutsättningarna i det aktuella fallet ligger inom de gränser som anges för materialparametrarnas giltighet. Spricksäkerhetsfaktorn för generella materialparametrar i tabell AMA EBE.11/1 och tabell AMA EBE.11/2 ska då användas.”

2.1.2.1 Bestämning av materialparametrar

De tidsberoende olinjära materialmodellerna för hårdnande betong som normalt används för sprickriskberäkningar kräver avancerade och omfattande laboratorieförsök. För en komplett uppsättning materialparametrar måste värmeutveckling, mognadsutveckling, tryck- och draghållfasthetsutveckling, autogen krympning, utveckling av E-modul och relaxation bestämmas i laboratorietester. Som kontrollmoment bestäms utvecklingen av spänningar och eventuell sprickbildning med helt förhindrad deformation i en TSTM (temperature stress

testing machine). Denna process är tidskrävande, minst 3 månader krävs. Dessutom finns den nödvändiga utrustningen endast tillgänglig i ett fåtal laboratorier. Det bör noteras att majoriteten av testerna inte är standardiserade och testerna är vanligtvis anpassade till den programvara som används för analys av temperatursprickrisken

2.1.3 Sprickriskberäkning enligt AMA Anläggning

Åtgärder för begränsning av temperatursprickrisk vid nybyggnad av anläggningskonstruktioner kan kravställas med hjälp av AMA Anläggning, EBE.11. Detta gäller även vid reparation i de fall det hänvisas till EBE.11. I AMA Anläggning beskrivs tre principiella möjligheter för att begränsa risken för uppkomst temperatursprickor. Dessa betecknas som beräkningsmetod 1, 2 och 3:

- Beräkningsmetod 1: enkla temperaturkrav, i kombination med krav på t.ex. maximal konstruktionstjocklek och formrivningstid.
- Beräkningsmetod 2: Användning av tabellerade typfall.
- Beräkningsmetod 3: Datorberäkningar (FEM beräkningar eller "handboksmetoden" CraX1).

För metod 1, som enbart gäller under vissa förhållanden, begränsas t. ex. konstruktions tjocklek, omgivningstemperatur, den ingående betongens maximala temperatur och den anslutande konstruktionens temperatur. För metod 2 och 3 ska sprickrisken avläsas från typfall eller att beräkningar utförs. Beräknad/avläst sprickrisk ska begränsas i förhållande till tillåtna sprickrisker för aktuell exponering och materialsammansättning. För receptspecifika materialparametrar tillåts högre sprickrisk jämfört med generella parametrar i samma exponeringsklass.

Sprickriskberäkningen och analysen av beräkningsresultaten mynnar ut i arbetsbeskrivningar med anvisningar för t.ex.:

- maximal bindemedelsmängd
- tid för formrivning
- täckningstider
- den färska betongmassans max-, min- temperatur
- begränsning av etapplängd
- förvärmingsåtgärder
- kylningåtgärder
- etc.

2.2 Temperaturmätning i betong

2.2.1 Allmänt

Temperaturmätning utförs normalt med ingjutna temperaturgivare av olika slag. Moderna system är uppkopplade mot internet och medger även beräkning av betongens mognad och tryckhållfasthetsutveckling från loggade temperaturer i realtid. Det finns flera tillverkare med olika system på marknaden.

Principiellt skulle även manuell mätning med vanliga termometer i borrarade hål vara möjligt.

2.2.2 Mätssystem

2.2.2.1 Elektriska system

Temperaturregistrering utförs vanligtvis med kommersiellt tillgängliga färdiga sensorer eller enkla termoelement kopplad till ett mätinstrument. De färdiga sensorerna är vanligtvis mer exakta och designade för att fungera under lång tid. Men de är dyrare och går förlorad när de gjuts in i betong. För det relativt enkla syftet att logga värmeutvecklingen hos härdande betong under cirka 2-3 veckor har termoelement av typ T (Cu-CuNi) eller typ K (Ni-CrNi) visat sig vara tillräckliga.

2.2.2.2 Fiberoptiska system

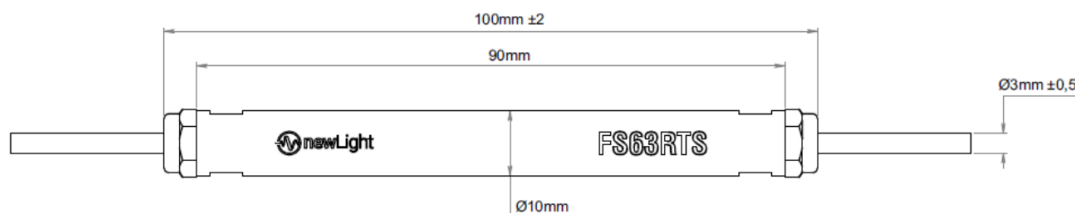
Fiberoptiska mätssystem kan användas för temperaturmätning. Fiberoptiska mätssystem fungerar genom att utnyttja egenskaperna hos ljus som passerar genom en optisk fiber. Dessa system kan mäta en rad olika parametrar, inklusive temperatur, tryck och töjning.

Fiberoptiska temperatursensorer fungerar genom att mäta förändringen i ljusets egenskaper som genereras av en ljuskälla och detekteras av en ljusdetektor. När temperaturen ändras, ändras också ljusets egenskaper, vilket gör det möjligt att mäta temperaturen.

Fiberoptiska system är okänsliga för elektromagnetisk interferens (EMI) och radiofrekvensinterferens (RFI). Enligt uppgift från tillverkarna fås en mätsignal med färre störningar och mindre brus, jämfört med elektriska system.

Diskreta givare

Diskreta givare kopplas till fiberoptiken som ansluts till mätinstrumentet. Normalt kan endast ett visst antal givare kopplas till en optisk kabel. Längden på själva kabeln är dock i det närmaste obegränsat. Givarna mäter temperaturen på ett ställe. För att kunna gjutas in i betong måste de vara robusta och vattentäta.

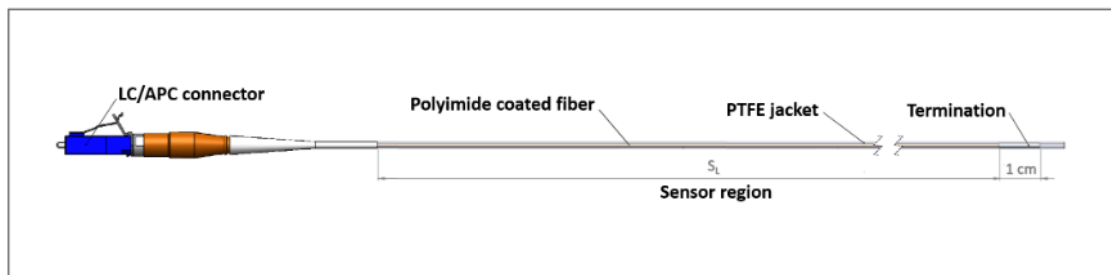


Figur 1: Exempel på diskret fiberoptisk temperatursensor. Från www.hbm.com

Kontinuerliga givare

System som tillåter en kvasi-kontinuerligt distribuerad mätning längs sensorfibern utan behov av att sätta in diskreta sensorer i fibern kallas kontinuerliga system. Det ljus som återsprids av själva fibermaterialet innehåller önskad information om temperatur och töjning.

För detaljer avseende mätmetodik, se avsnitt 2.3.2.2.



Figur 2: Exempel på kontinuerlig temperatursensor. Från www.lunainc.com.

2.3 Töjningsmätning i betong

2.3.1 Allmänt

Två typer av mättekniker kan utföras när man mäter spänning inuti en betongkonstruktion. Antingen mäts spänningarna direkt av en lämplig sensor, eller genom att använda en sensor för att mäta töjningen. Den uppmätta töjningen kan därefter omvandlas till spänning. Det finns flera kommersiella sensorer som är lämpliga för töjnings- eller spänningsmätning:

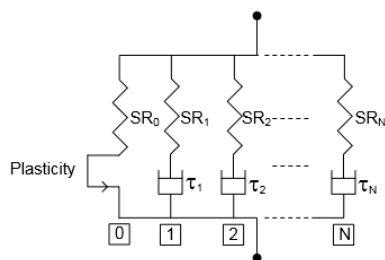
- elektriska töjningsmätare
- piezokeramiska givare
- fiber Bragg-grating sensorer
- fiberoptiska sensorer och
- blyzirkonat-titanat-sensorer.

Spänningsutvecklingen inom den unga betongen kan mätas genom att montera en sensor före gjutning av en betongkonstruktion. Historiskt har kalibreringen av spänningssensorer varit omständlig och ofta med tveksamma resultat, se till exempel Jonasson et al, 2009. För strukturell hälsoövervakningsforskning har dock piezoelektriska sensorer använts med tillfredsställande resultat, se till exempel Fei et al, 2021. Ändå finns ingen offentlig dokumentation där denna teknik har testats in situ, dvs vid gjutning av en betongkonstruktion, till exempel en vägg på en platta.

Vanligare är att man mäter töjning och beräknar spänningar. Genom att mäta töjningen vid en viss punkt i betongkonstruktionen kan motsvarande spänningsnivå bestämmas. Detta uppnås genom förhållandet mellan töjning och spänning enligt Hookes lag. I sin enklaste form är spänningen direkt proportionell mot töjningen via Youngs modul,

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (\text{Eq. 1.1})$$

För de flesta material är det enkelt att bara mäta töjningen och sedan få en tillförlitlig bestämning av spänningen. Men för ung betong kan Youngs modul anses bestå av tre delar, en elastisk del, en viskös del och en plastisk del. Beteckningen effektiv E-modul, E_{eff} , kan användas för att beskriva denna förbättrade syn på Youngs modul. Det finns flera reologiska modeller för att beskriva E_{eff} . Till exempel omfattar ett Maxwell-element elasticitets- och viskositetsbeteende, genom representation av en fjäder respektive en dämpare. En visualisering av en materialmodell med N Maxwell-element kombinerat med en plastisk del visas i Figur 3.



Figur 3: Visualisering av en Maxwell-kedja med en plastisk del.

För ung betong är både de elastiska, viskösa och plastiska delarna tidsberoende. Detta gör det av grundläggande vikt att ha en noggrann materialmodell när det gäller att omvandla uppmätta töjningar till spänningar. Utmaningar när det gäller att bestämma spänningar från uppmätt töjning för ung betong är,

- Använd en pålitlig materialmodell för E_{eff}
- Att fastställa tillförlitliga parameter för den tillämpade materialmodellen.

Etablerade parametrar utvärderas från laborietester. De tester som behövs är grundläggande kryp-/relaxationstester och undersökningar med en temperatur-stresstestmaskin, TSTM. Men för TSTM-testet måste även följande egenskapsområden hos betongen vara kända, hållfasthetsutveckling, hydratiseringsvärme, autogen krympning och termisk längdutvidgning. Detta innebär att parametrar, eller etablerade beteenden, för alla ingående egenskapsområden måste vara välkända innan mätning av töjningsutveckling i en ung betongkonstruktion kan utföras. Tillsammans med töjningsmätningen måste mätning av temperaturen på samma område göras. Temperaturen används för att bestämma mognadsnivån, t_e eller ekvivalent tid, som är en nyckelfaktor vid bestämning av E_{eff} .

2.3.2 Mätssystem

2.3.2.1 Elektriska system

Töjningsmätare

Denna typ av givare fungerar med trådtöjningsmätare fästa på ett medium (vanligtvis någon typ av metallstång med fästa ändlock) och en yttre tätning, se Figur 4. När metallstången utsätts för krafter kommer trådtöjningsmätaren inuti givaren att deformeras och den resulterande förändringen i spänningen kan relateras till töjningen. De vanligaste givarna har längder från 30 mm till 200 mm.

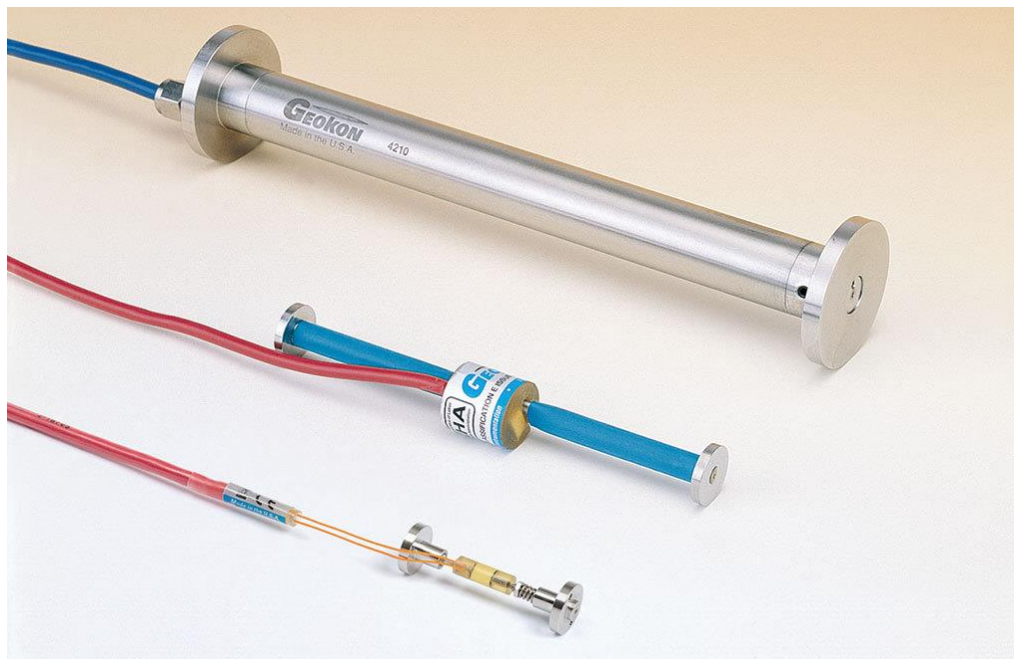


Figur 4: Töjningsmätare. (http://www.tml.jp/e/product/transducers/civil_eng/strain/km.html)

Denna typ av sensor med en mätlängd på 100 mm användes för basinstrumenteringen av kupolpluggen i domeplu-försöken på Äspö 2013, se Malm & Enzell (2018).

Vibrerande sträng-givare

Den vibrerande sträng-typen av töjningsmätare består av en vibrerande, spänd tråd (se Figur 5). Töjningen beräknas genom att mäta trådens resonansfrekvens (en ökning av spänningen ökar resonansfrekvensen). Själva givaren är konstruerad på samma sätt som töjningsmätaren.



Figur 5: Olika typer av vibrerande sträng givare (<http://www.geokon.com/4200-Series>).

Denna typ av sensor med en mätlängd på 135 mm användes för extra instrumentering av kupolpluggen i domeplu-försöken på Äspö 2013, se Malm & Enzell (2018). Resultaten indikerar dock en viss oförklarlig avvikelse mellan resultaten från töjningsgivare och vibrerande sträng-givare. De vibrerande sträng-givarna visade delvis mycket lägre töjningsvärden än töjningsgivarna. Även spänningsimpulser (mätfel i form av toppar) i de vibrerande sträng-givarna noterades. Dessa impulser komplicerar utvärderingen.

2.3.2.2 Fiberoptiska system

Konceptuellt består sådana fiberbaserade system av en avläsningsenhet och den passiva sensorfibern kopplad till den. Avläsningsenheten skickar ljus från en avstämbar laser eller en bredbandskälla in i fibern. I fibern modifieras ljusets egenskaper på ett karakteristiskt sätt beroende på temperaturen och töjningen. Förändringarna i det bakåtspridda (eng. backscattered) ljuset detekteras i avläsningsenheten. Dessa förändringar analyseras och räknas om till spänningar töjningar och temperaturer.

På sensorsidan måste man skilja på punktbaserade och distribuerade ansatser.

Diskreta givare

En Fiber Bragg Grating (FBG) är en typ av distribuerad Bragg-reflektor konstruerad i ett kort segment av optisk fiber. Det reflekterar speciella våglängder av ljus och överför alla andra. Detta uppnås genom att skapa en periodisk variation i brytningsindex för fiberkärnan, vilket genererar en våglängdsspecifik dielektrisk spegel.

Den grundläggande principen bakom driften av en FBG är Fresnel-reflektion, där ljus som rör sig mellan medier med olika brytningsindex kan både reflektera och bryta vid gränssnittet. Den reflekterade våglängden, kallad Bragg-våglängden, definieras av förhållandet mellan det effektiva brytningsindexet för fiberkärnan och gitterperioden.



Figur 6: En typ av diskret fiberoptisk töjningsmätare. Från www.hbm.com.

Optiska sensorer av FBG-typ är anordnade i strukturer. En struktur är en serie av 1 till 13 optiska sensorer sammankopplade med en optisk fiberkabel. På så sätt är upp till 13 sensorer integrerade i en kabel. Längden på själva kabeln är valfri och har ingen inverkan på kvaliteten på den erhållna data. Temperaturgivare måste installeras och används för att kompensera för temperatureffekterna på töjningsgivarna, vilket annars skulle ge felaktiga resultat.

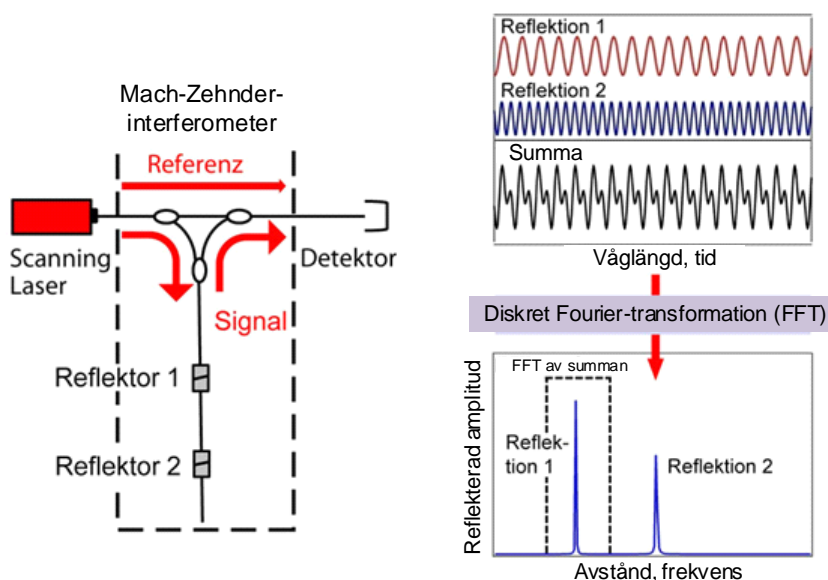
Kontinuerliga givare

Nedanstående är delvis taget från Samiec (2011) och översatt.

System som tillåter en kvasi-kontinuerligt distribuerad mätning längs sensorfibern utan behov av att sätta in diskreta sensorer i fibern kallas kontinuerliga system. Det ljuset som återsprids av själva fiber materialet innehåller önskad information om temperatur och töjning.

Två mätmetoder har etablerats för stora avstånd som utnyttjar Raman- eller Brillouin-komponenten i det bakåtspridda ljuset. Den begränsande faktorn är den extremt låga intensiteten hos spridningskomponenterna som används här, vilket gör det extremt svårt att öka upplösningen. Rayleigh-komponenten i backscatter-signalen är också liten i absoluta tal, men är fortfarande storleksordningar högre än Raman- och Brillouin-komponenterna.

Rayleigh-sensorer kräver en mycket hög upplösning i analysutrustningen vilket kan uppnås med en s.k. ”Coherent Optical Frequency Domain Reflectometer” (c-OFDR), som beskrivs i Figur 7.



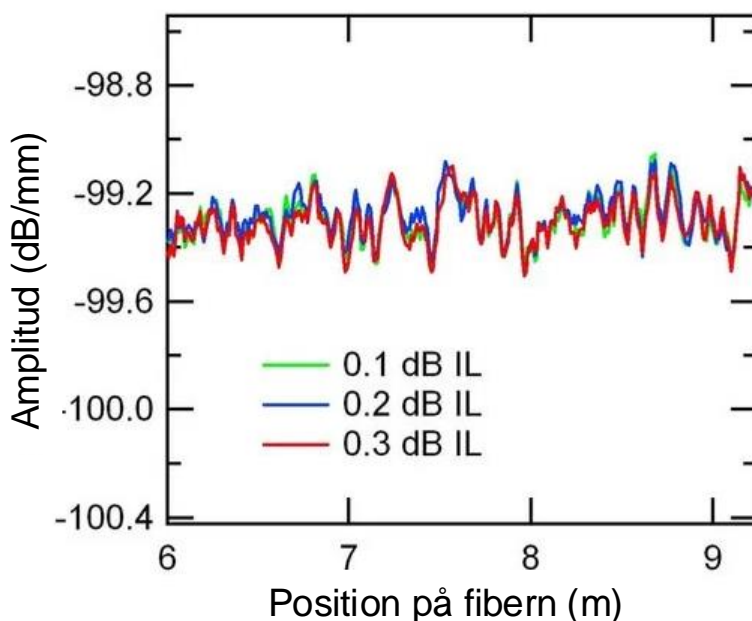
Figur 7: I Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR) kopplas en avstämbar laser in i en Mach-Zehnder-interferometer, i vilken sensorfibern är en del av signalvägen. Frekvenskomponenterna i detektornsignalen är ett mått på platsen för reflektionen. Från www.lunainc.com, anpassad.

Här kopplas en avstämbar cw-laser in i en fiberoptisk Mach-Zehnder-interferometer, varvid en arm är en referens med en fast våglängd, medan den andra armen bildas av sensorfibern. Ljuset

som sprids tillbaka av fibern stör ljuskomponenten från referensarmen vid utgångskopplaren. När laservåglängden eller frekvensen är avstämd, skapas en periodisk signal vid detektorn, vars frekvens beror på platsen för det tillbakaspridande fibersegmentet.

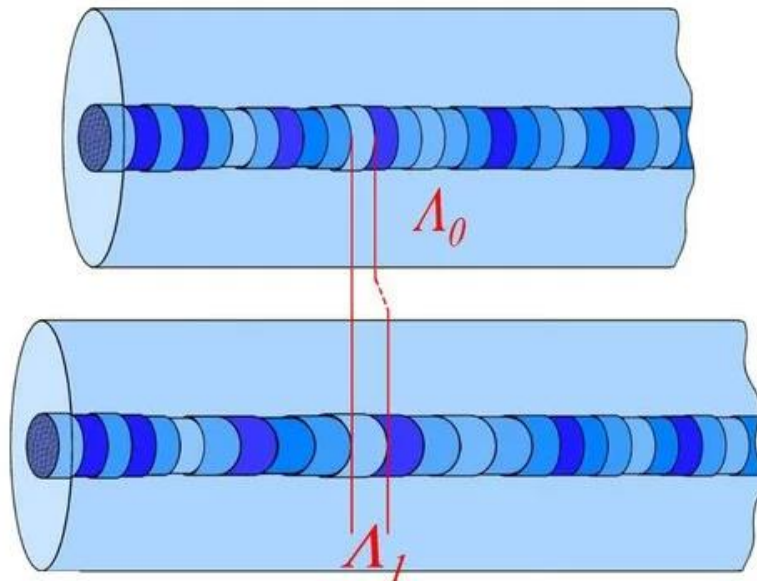
Ju längre segmentet är från detektorn, desto högre frekvens har störsignalen. Eftersom signalerna från alla tillbakaspridningssegment tas emot vid detektorn måste summasignalen brytas ned i dess frekvenskomponenter med hjälp av Fourier-transformation. Frekvenserna efter nedbrytningen motsvarar då platserna i fibern. Amplituden för varje frekvenskomponent indikerar styrkan hos respektive reflektion.

De rumsliga upplösningarna som kan uppnås beror på det våglängdsområde över vilket lasern ställs in per skanning. Ett system som t.ex. arbetar vid våglängd 1550 nm och maximalt 90 nm täckning motsvarar en rumslig upplösning på 10 μm . Fiberlängden kan vara upp till 70 m, så att man med en avsökning av lasern kan få Rayleighs backscatter-signal på 7 miljoner segment. Skannar man en kommersiellt tillgänglig optisk fiber med OFDR-teknik kommer man att se en fluktuerande intensitetskurva av Rayleigh-spridning längs den optiska fibern. Denna kurva är absolut stabil under upprepade mätningar och konstanta yttre förhållanden, så att den är ett karakteristiskt "fingeravtryck" för ett specifikt fiberoptiskt segment (Figur 8). Anledningen till denna observation ligger i naturen av Rayleigh-spridning, som uppstår från elastiska spridningsprocesser vid lokala defekter, brytningsindexvariationer eller störningar i vågledargeometrin, som är något annorlunda men fortfarande stabila i varje segment.



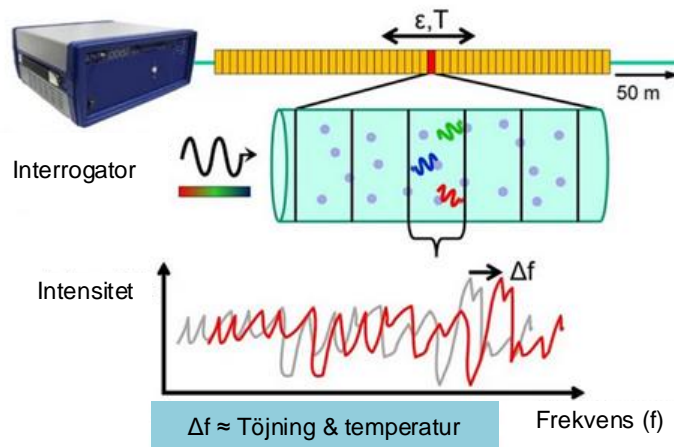
Figur 8: Rayleigh-intensitetens förlopp längs ett fiberoptiskt segment. Om de yttre förhållandena är konstanta förblir signalkurvan densamma i på varandra följande skanningar. Detta karakteristiska fingeravtryck fungerar som ett referensmönster för mätningar som tas under föränderliga förhållanden. Från www.lunainc.com, anpassad.

Om man nu ändrar temperaturen eller expansionstillståndet för glasfibern sträcks eller komprimeras fingeravtrycket rumsligt (Figur 9). Detta fenomen är grunden för Rayleigh-avkänning, eftersom förändringarna i det lokala Rayleigh-mönstret kan omvandlas till lokala förändringar i temperatur eller töjning.



Figur 9: Rayleigh-spridning orsakas av lokala brytningsindexfluktuationer längs fiberoptiken. När det finns förändringar i temperatur eller töjning sträcks eller komprimeras denna karakteristiska profil, vilket kan användas för att mäta dessa variabler. Från www.lunainc.com, anpassad.

För detta ändamål bryts mätsignalen ner längs fibern till små utvärderingsfönster på >5 mm och signalen som finns däri omvandlas till frekvensområdet (se Figur 10). Resultatet är ett fluktuerande reflektionsmönster beroende på frekvens. Förändringar i temperaturen eller fiberns förlängning leder till en frekvensförskjutning Δf , som är proportionell mot dessa yttre tillståndsförändringar. Denna procedur är i princip identisk med ett fiber-Bragg-gitter, där frekvensförskjutningen av reflektionstoppen också mäts när de yttre förhållandena ändras. För att uppnå en distribuerad mätning måste algoritmen i slutändan flytta utvärderingsfönstret över fibersektionen så att en komplett profil skapas längs vägen.



Figur 10: För att utvärdera Rayleigh-spridning bryts mätsignalen ner i små utvärderingsfönster där de lokala förändringarna beräknas i form av frekvensförskjutningar och omvandlas till förändringar i temperatur och töjning. Från www.lunainc.com, anpassad.

2.4 Dataöverföring

Dataöverföring från styrdatorn till utvärdering kan ske manuellt genom USB-minne, externa hårddiskar eller via 4/5-G nät.

3 Projektets genomförande

3.1 Uppsättning av mätsystem och dataöverföring

3.1.1 Temperaturmätning med traditionellt system

Ett färdigt system, TC603 från Celsicom användes för kompletterande temperaturmätning. Systemet bygger på typ T termoelement och batteridrivna loggar. Systemet är avsett för temperaturmätning och hållfasthetsberäkning av hårdnande betong på byggarbetsplatser. En molntjänst för lagring av data och resultat finns tillgängligt. Data överförs via NB-IOT (narrow band internet of things) till molntjänsten. Den delen av mobilnätet har mycket god täckning. Tillgång till mobilnät krävs för att kunna nyttja systemet. Det producerar mycket begränsad mängd data som måste överföras.



Figur 11: TC603 temperaturloggare. Från www.celsicom.se.

3.1.2 Temperatur och töjning med fiberoptik

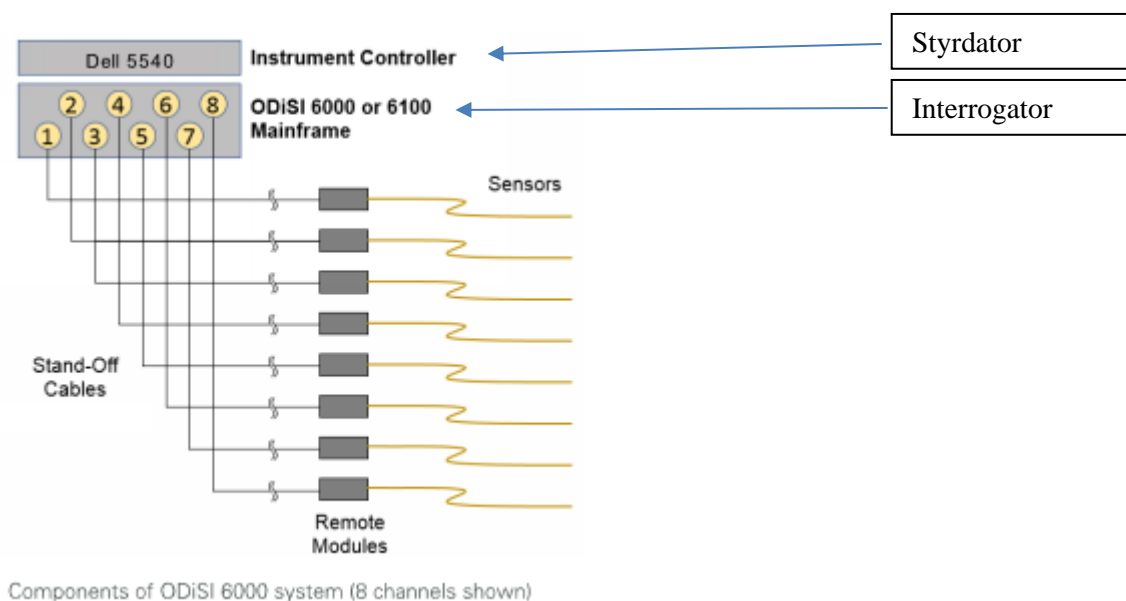
I bilderna nedan presenteras mätsystemet ODiSI 6002 från Luna Innovations som hyrdes av projektet. 2 mätkanaler ingick i uppsättningen (max 8 kanaler är möjliga), en för mätning av temperatur och en för mätning av töjning. Systemet kompletterades med en batteribackup gällande strömförsörjning (UPC-enhet). Enheten som levererar ström för ca 2 timmar, är uppkopplad mot 4G och skickar meddelande när elförsörjningen bryts resp. återställs. Dataöverföring och övervakning skedde via ett 4G modem som var uppkopplat mot styrdatorn.

Systemet i sig (styrdator, ODiSI, givare) var relativt enkelt att sätta ihop. Det krävs speciella rengöringsprocedurer när de optiska delarna ska kopplas, detta för att säkerställa en hög signalkvalitet.

Sensortyp för mätning av temperatur och töjning rekommenderades av tillverkaren med ledning av förväntade mätområden och exponering (ingjutning i betong).

Det uppkom dock en hel del tekniska svårigheter i övergång till fältmätning. Problemen var främst kopplade till kompatibilitetsproblem mellan Linux-operativsystemet och övriga enheter (UPS, 4G). Det krävdes en del insatser av IT-expert för att lösa problemen och det gick åt oväntad mycket tid innan systemet ansågs vara tillräckligt stabilt för att kunna användas i fält utan att riskera dataförluster.

Vissa komponenter av mätsystemet är känsliga för fukt, kyla, hetta, damm, etc. Styr dator, interrogator, UPS och 4G-modem måste placeras i skyddade (damm, fukt, vibrationer) och tempererade utrymmen. Det krävdes extra skyddsåtgärder och installationer för att kunna driva systemet i fält. Eftersom systemet enbart hyrdes fick man lägga extra vikt på att inte skada eller smutsa ned delarna (t.ex. remote modules).



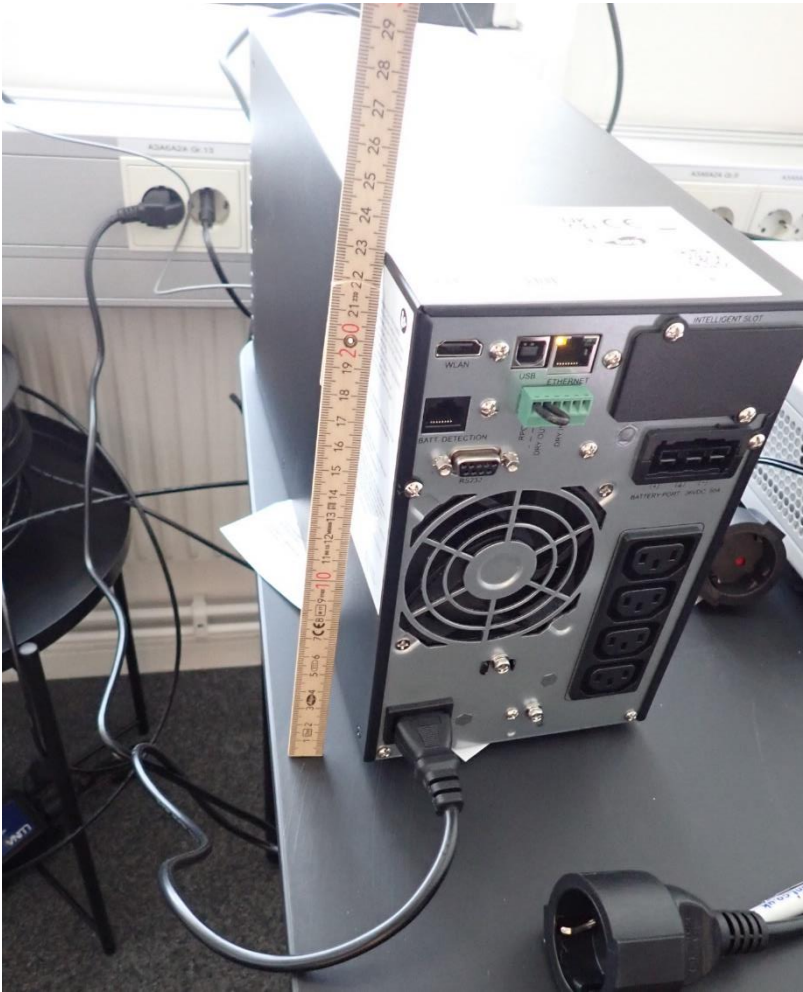
Figur 12: Princip uppkopplingen. Bara 2 kanaler var tillgängliga, ej 8 kanaler.



Figur 13: Översikt: mätdator, UPS och Luna interrogator.



Figur 14: Interrogator. 50 m stand-off cable kopplas in här



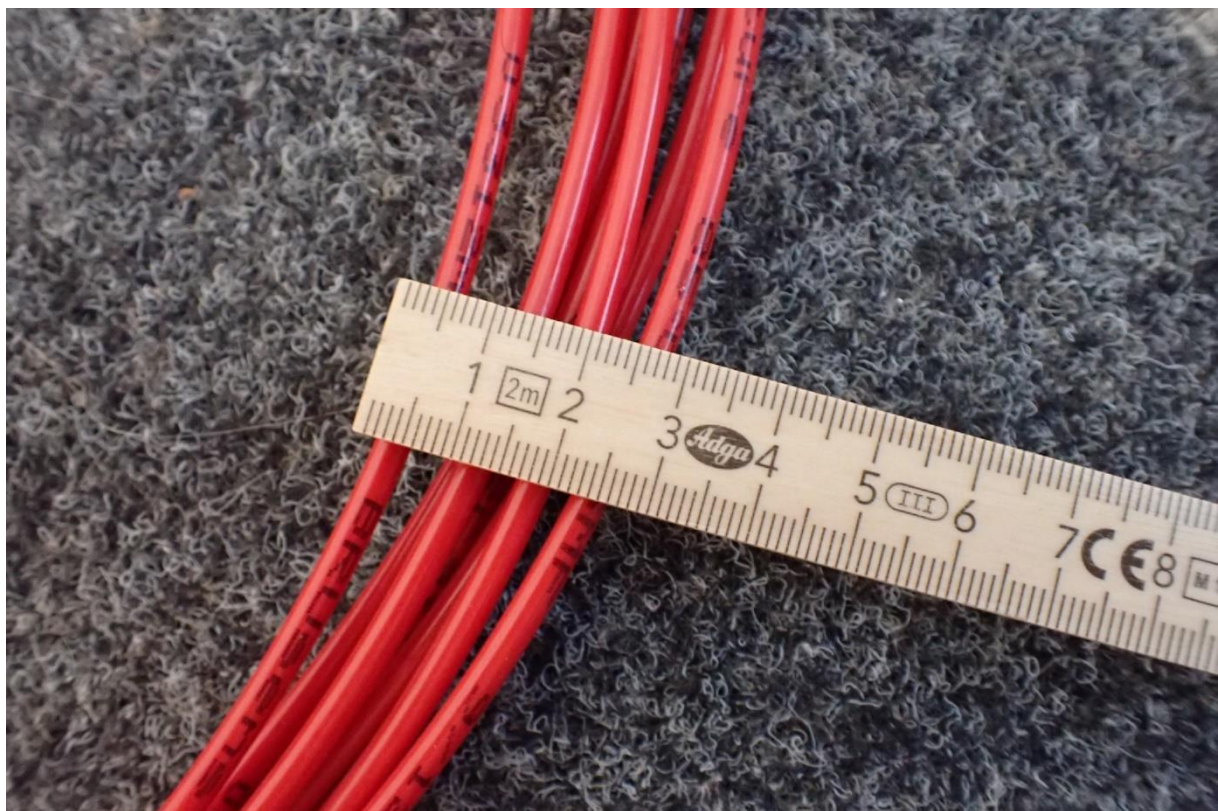
Figur 15: UPS-enhet.



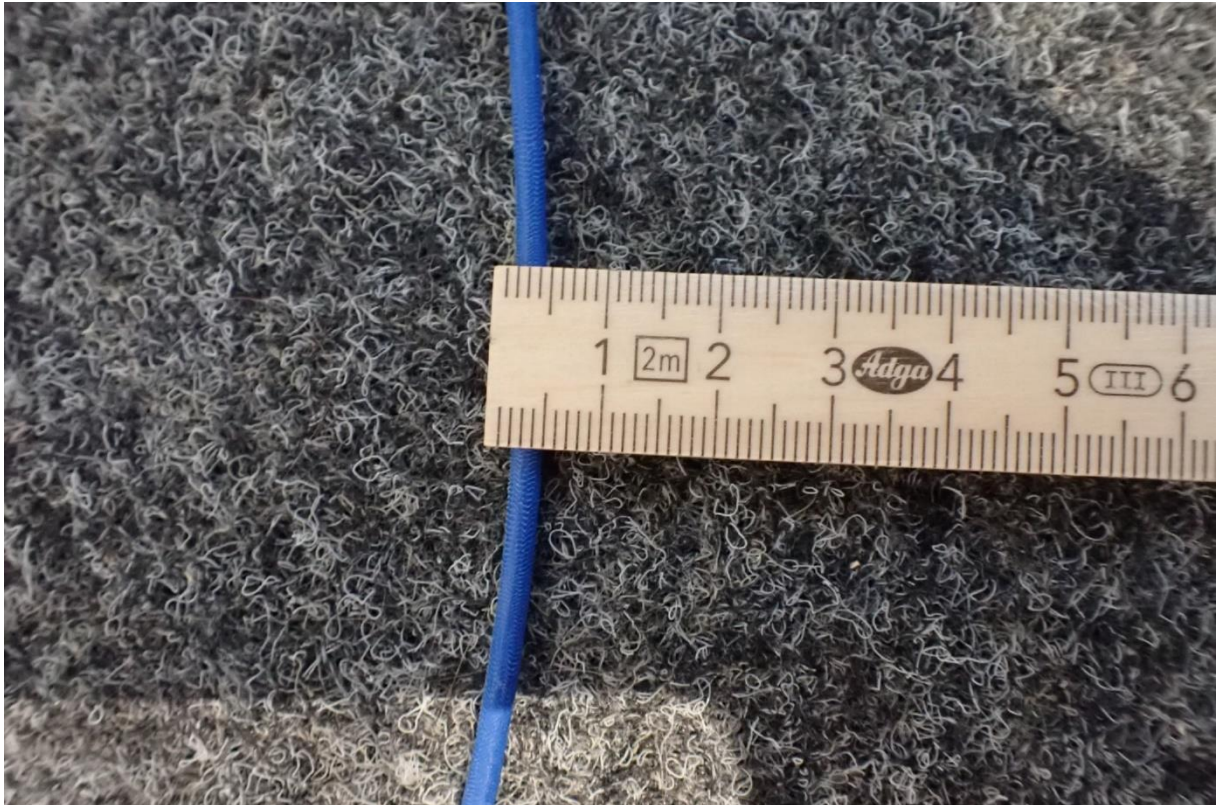
Figur 16: 50-m Stand-off cable på en rulle. För att koppla interrogatorn till fiberoptiken över en längre sträcka.



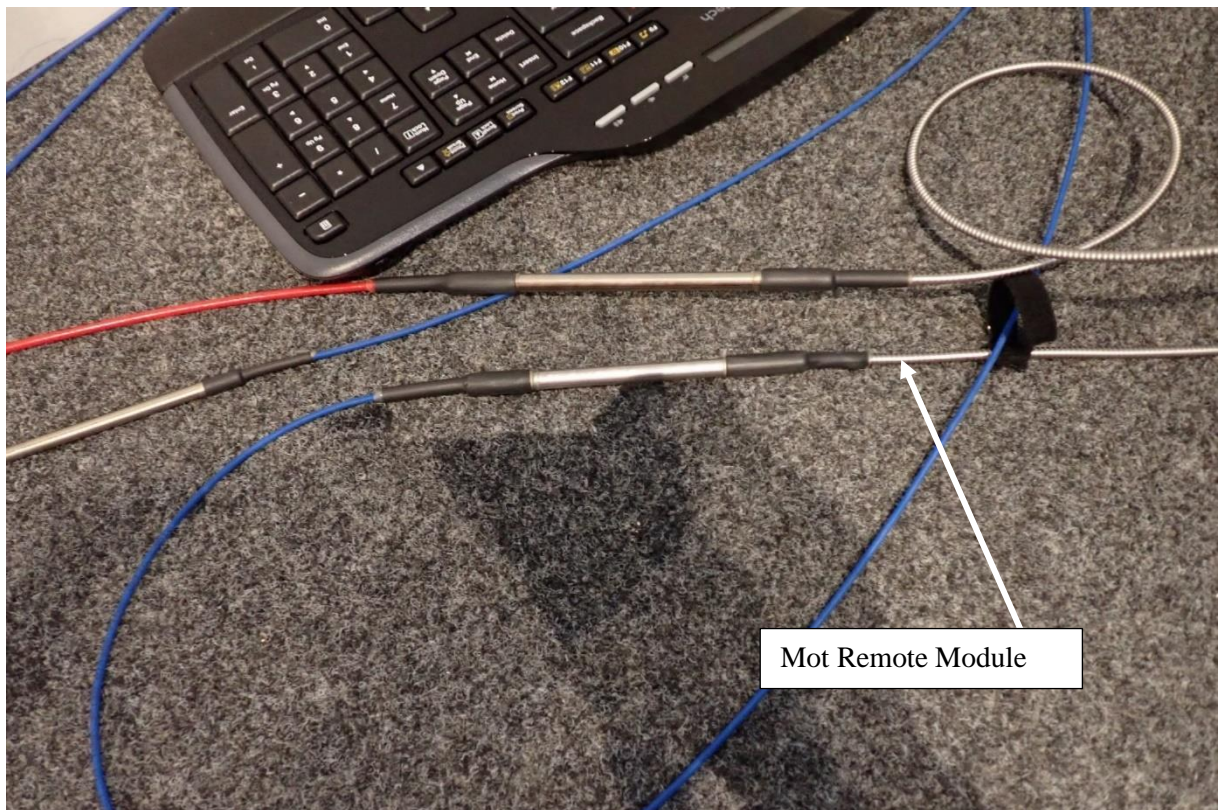
Figur 17: Remote module. Sitter mellan 50 m Stand-off cable. Dessa måste skyddas.



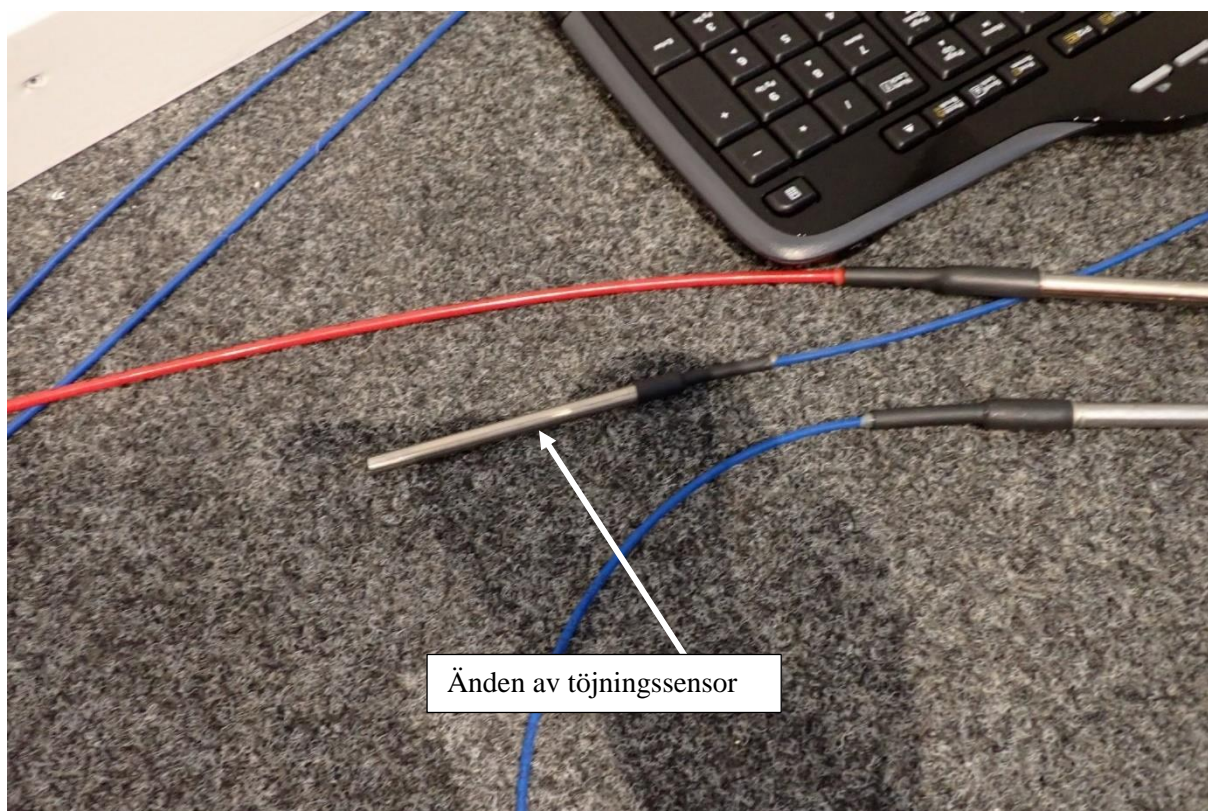
Figur 18: Temperatursensor, röd färg. Blir ingjuten. Sensorn är förhållandevis styv. Ytan är glatt.



Figur 19: Töjningsensor, blå färg. Blir ingjuten. Sensorn är mycket böjligt, känns som ett tjockare snöre. Ytan är rå.



Figur 20: Övergång till koppling mot remote module.



Figur 21: Sensorerna har ett ändstycke.

3.2 Stresstest mätsystem

Efter hopsättning och igångkörning av mätutrustning utfördes ett antal stresstester för att testa stabiliteten. Dummy-mätningar genomfördes under flera dygn, strömavbrott simulerades och dataöverföring via 4G till servern testades flera gånger. Vid identifierade fel och problem, t.ex. självavstängda USB-portar, hittades lösningar och testet påbörjades igen.

3.3 Identifikation och beskrivning av mätobjekt

En mycket viktig del inom projektet var installation av mätsystemet i fält och mätning av temperatur och töjning under betongens härdning i fullskala. Mätobjektet skulle kunna medge två mätningar på liknande konstruktionsdelar inom relativ kort tid (i idealfallet direkt efter varandra). Betongen som användes skulle vara klimatreducerad, dock skulle materialparametrar för den klimatreducerade betongen vara bestämda i laboratoriet. Mätobjektet skulle med fördel vara beläget inom måttlig körsträcka från Stockholm dock helst utanför storstadsområde. För att minska på stöldrisken för hyrd mätutrustning önskades något avlägset geografiskt läge, helst med stängsel och inpasseringsgrind.

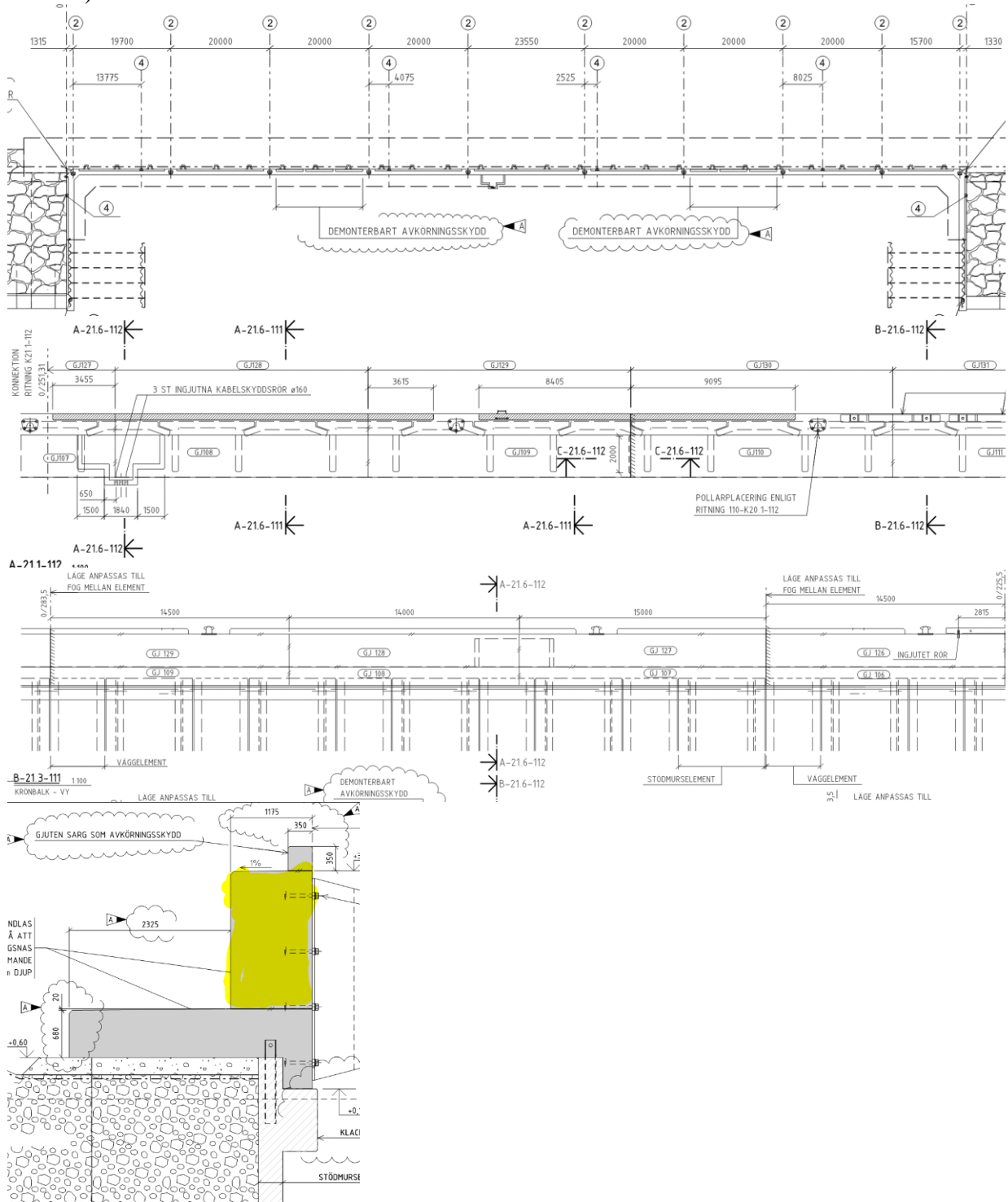
Peab Anläggning utför arbeten inom utbyggnaden av Hargshamn, bland annat uppförande av en ny kaj. Bostek utförde temperatursprickriskberäkningar som krävs enligt AMA-ANL åt Peab. Utbyggnaden av Hargshamn uppfyller i princip samtliga önskemål och krav på mätobjektet. Viktigast är att klimatreducerad betong används och att materialparametrar finns tillgängliga för betongen. I Hargshamn används betong C35/45 vct 0,40 XD3/XS3/XF4 d_{\max} 25 mm med cement Anläggningscement-FA, materialparametrar finns (tillhandahålls av Heidelberg Materials). Betongen har en GWP på 296 kg CO₂/m³, vilket innebär att den är en klimatförbättrad betong nivå 2 enligt Svensk Betongs definition. Arbetsgruppen tillfrågade Peabs projektorganisation i Hargshamn om mätningar kunde få genomföras inom projektet. Efter positiv besked och några möten på plats genomfördes mätningarna med hjälp av Peabs

platsorganisation i Hargshamn, se även senare avsnitt. Nedan redovisas en kort beskrivning av konstruktionen.

Kajen är av typen stödmurskaj, se Figur 22 för ritningsutdrag. Längden är ca. 180 m.

Prefabricerade stödmursegment placeras på havsbotten och återfylls, se Figur 23 och Figur 24.

Sedan gjuts elementen ihop med en platta och ovanpåliggande krönbalk. På gaveln uppförs krönbalken delvis på spont. Mätningar av temperaturutveckling och töjning i den hårdnande betongen planerades att utföras på krönbalksgjutningar (frontmuren). Balken har en höjd på 2 m, en tjocklek på ca. 1,2 m och en varierande etapplängd (utförande avviker från ritning, jämför avsnitt 4).



Figur 22: Ritningsutdrag visande stödmurskajen: plan, vy, detaljer.



Figur 23: Tillverkning av stödmurselement. Bild tillhandahållen av Thommie Östman, Peab.



Figur 24: Stödmursegment placerad på havsbotten och delvis återfyllt på landsidan.

3.4 Installation av sensorer

3.4.1 Allmänt

Form på sjösidan, avstängare och armering var klara när mätsystemet installerades. Form på landsidan placerades efter installationen av sensorerna. Dator, UPS, interrogator och 4G-modem placerades i en container. Se bilderna nedan för detaljer.



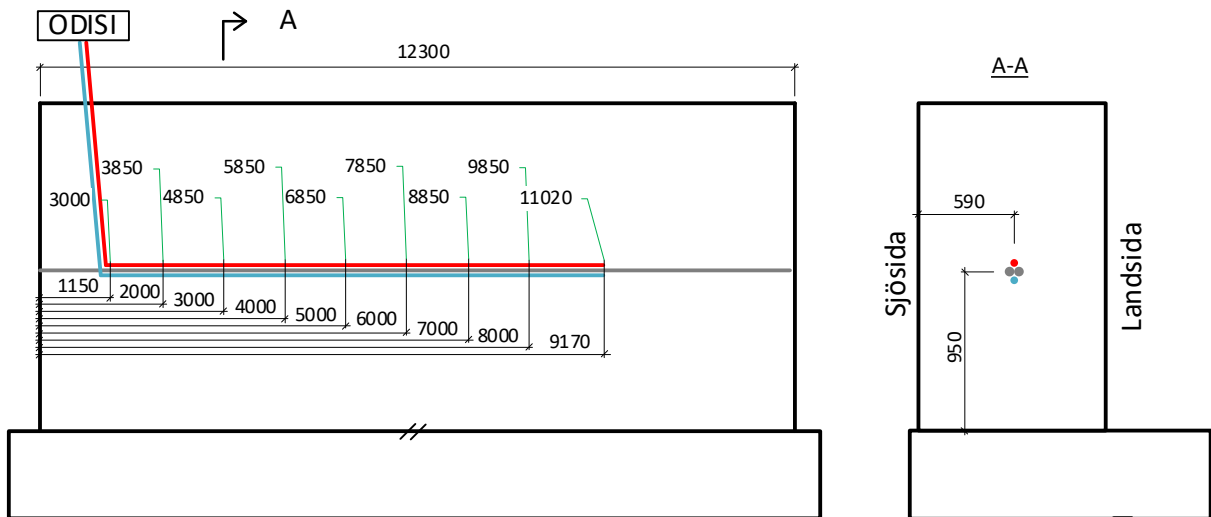
Figur 25: Etapp 128 med form på landsidan installerad. Container med mätsystem till vänster. Kablarna förs från containern via en träregel till plastboxar (skydd för remote modules). Antenn för 4G-modem under träregel.



Figur 26: Container med mätutrustning.

3.4.2 Gjutning 1

Installation av sensorer utfördes 2023-05-03. Optiska sensorer installerades i centrum av balken på dubbla armeringsjärn som tejpades ihop. Armeringsjärnen försas med dubbla lager tejp för att reducera vidhäftning mot betongen. Armeringsjärnen sattes fast med buntband under formstagen (glasfiber) på $\frac{1}{2}$ höjd i formen. Optiska sensorn för temperatur (röd) tejpades fast på ovansida armeringsjärnen. Den optiska sensorn för töjning (blå) placerades i plastringar som sattes fast under armeringsjärnen. Sensorn fästes i plastringarna med buntband och tejp. Plastringarna placerades med ett avstånd på 50 cm. Målsättningen var att koppla loss töjningssensorn från armering så mycket som möjligt så att betongens och inte armeringens deformationer skulle kunna mätas. Kompletterade temperaturmätning utfördes med traditionella termoelement (system Celsicom). Dessa sattes fast på formstag resp. överkantsarmering med tejp. Placering av samtliga sensorer redovisas i Figur 27.

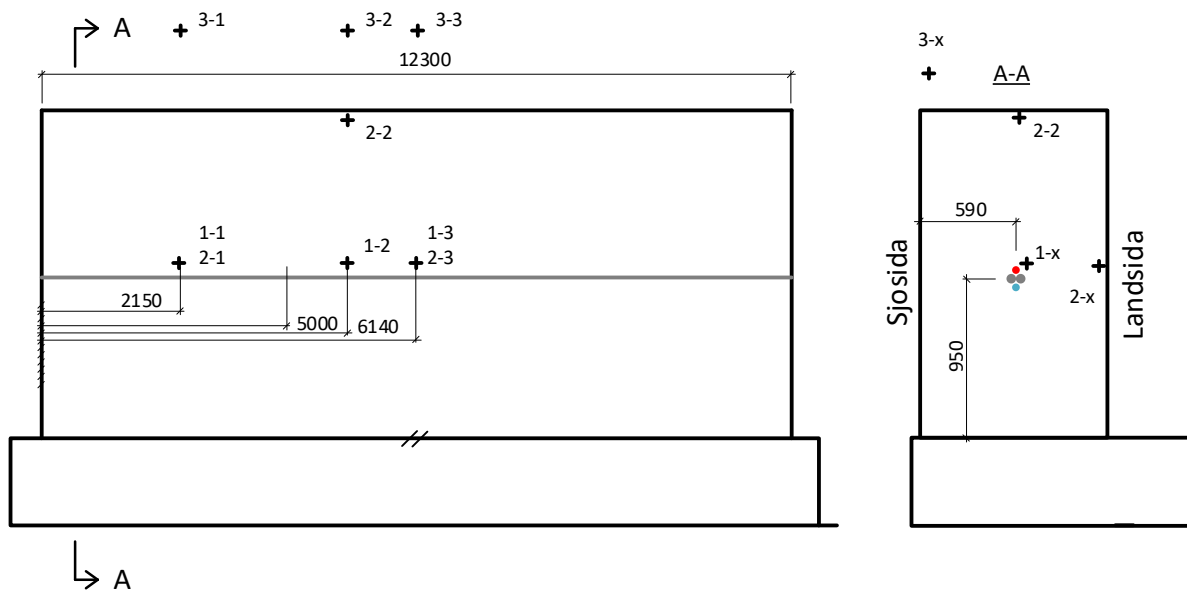


Beteckningar

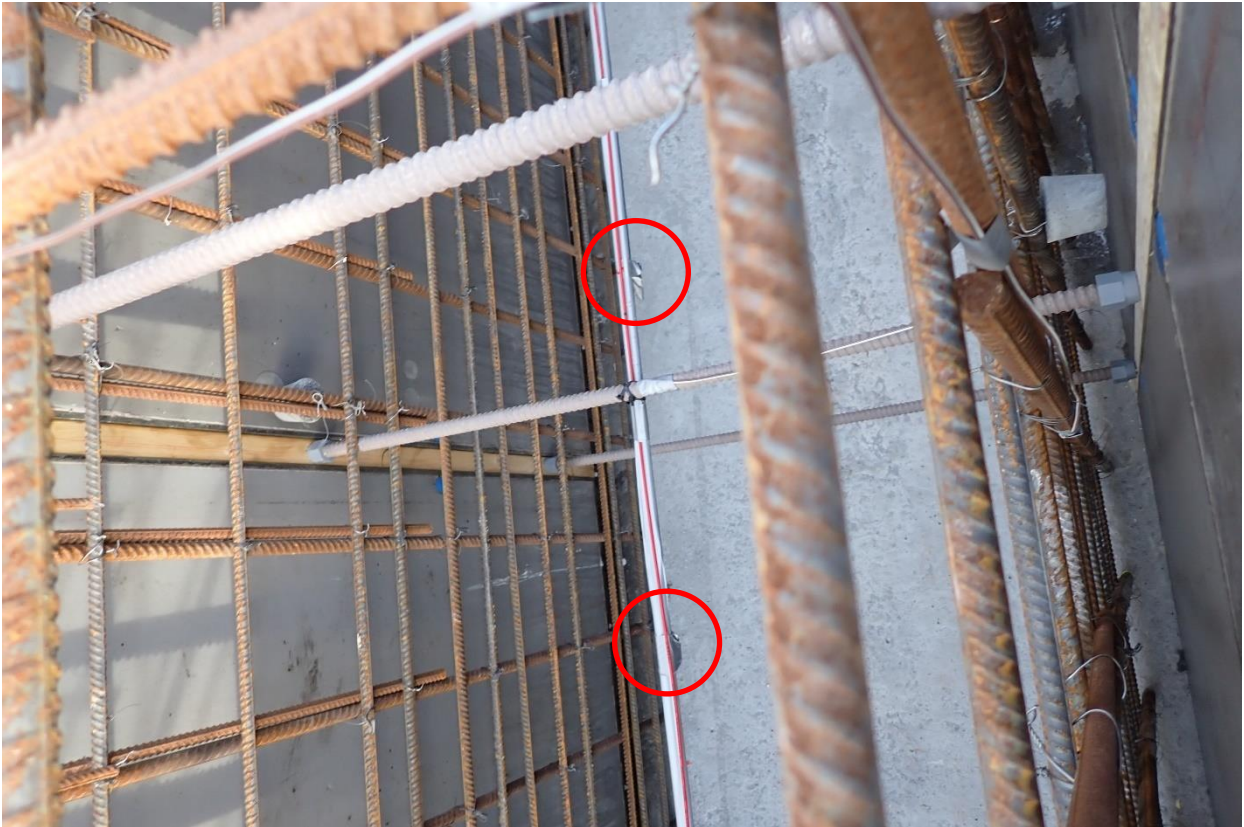
- Tempgivare ODiSI
- Töjningsgivare ODiSI
- Armeringsjärn
- Längd på temp,- töjningsgivare
- +
- +

Temperaturgivares (Celsicom) placering

- +1 mitt i mur
- +2 2cm från form/5cm under ytan
- +3 i omgivande luft



Figur 27. Placering av sensorer vid gjutning 1.



Figur 28: Installation av optiska sensorer ovanpå (röd) och under (blå) tejpade monteringsjärn. Plastringarna (röd markering) placerades med ett avstånd på 50 cm.



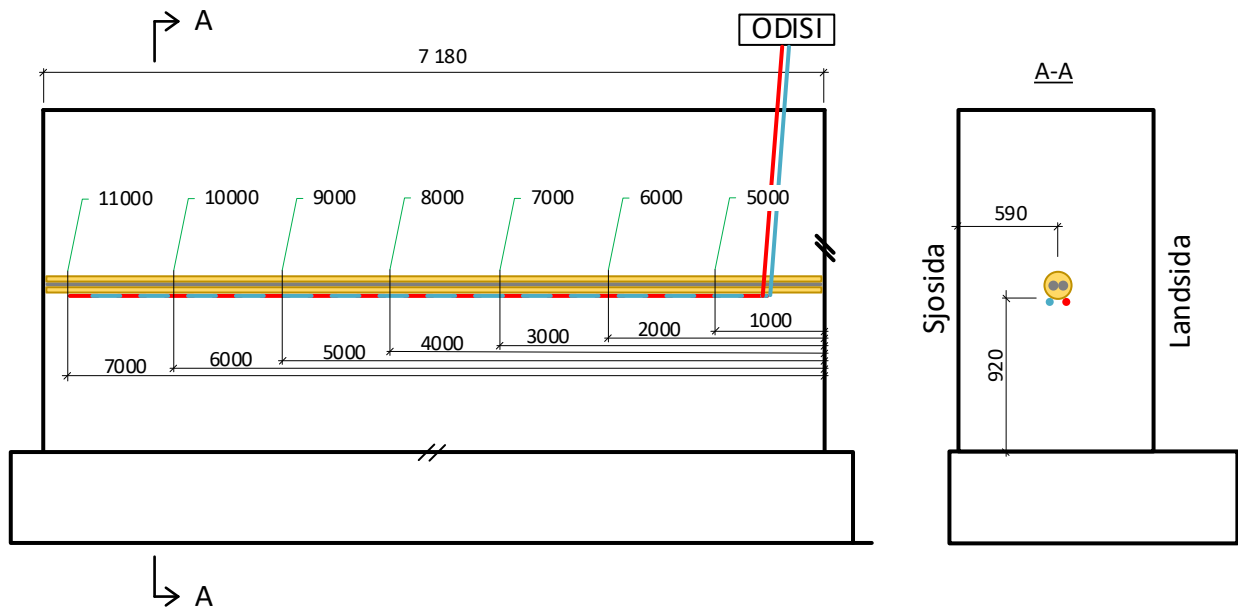
Figur 29: Plastlådor fastsatt på formen för att skydda remote modules. Den fria vertikala delen av sensorerna mellan monteringsjärn (horisontell) och armering (vertikal) visade sig skapa problem vid gjutning.



Figur 30: Installation av kompletterande temperaturmätning med system Celsicom. Termoelement tejpades till armeringsjärn och formstagg.

3.4.3 Gjutning 2

Installation av sensorer utfördes 2023-05-15. Det uppkom problem med dålig signalstyrka på grund av föroreningar (damm) vid hopkoppling av optiska sensorer och remote modules. Det visade sig också svårt att göra rent kopplingarna under fältförhållanden (blåst, torrt väder, byggsplats med mycket damm). Optiska sensorer installerades i centrum av balken på dubbla armeringsjärn som tejpades ihop. Armeringsjärnen försågs med en rörisolering (1,5 cm cellplast) för att bryta vidhäftning mot betongen. Armeringsjärnen sattes fast med buntband under formstagen (glasfiber) på $\frac{1}{2}$ höjd i formen. Optiska sensorerna för temperatur (röd) och töjning (blå) tejpades fast på undersida rörisolering med eltejp, avstånd 33,3 cm mellan fixpunkterna. Målsättningen var att koppla loss töjningssensorn från armering så mycket som möjligt så att betongens och inte armeringens töjning skulle kunna mätas. Kompletterade temperaturmätning utfördes med traditionella termoelement (system Celsicom). Dessa sattes fast på formstagg, överkantsarmering resp. bottenplattan med tejp. Placering av samtliga sensorer redovisas i Figur 31.



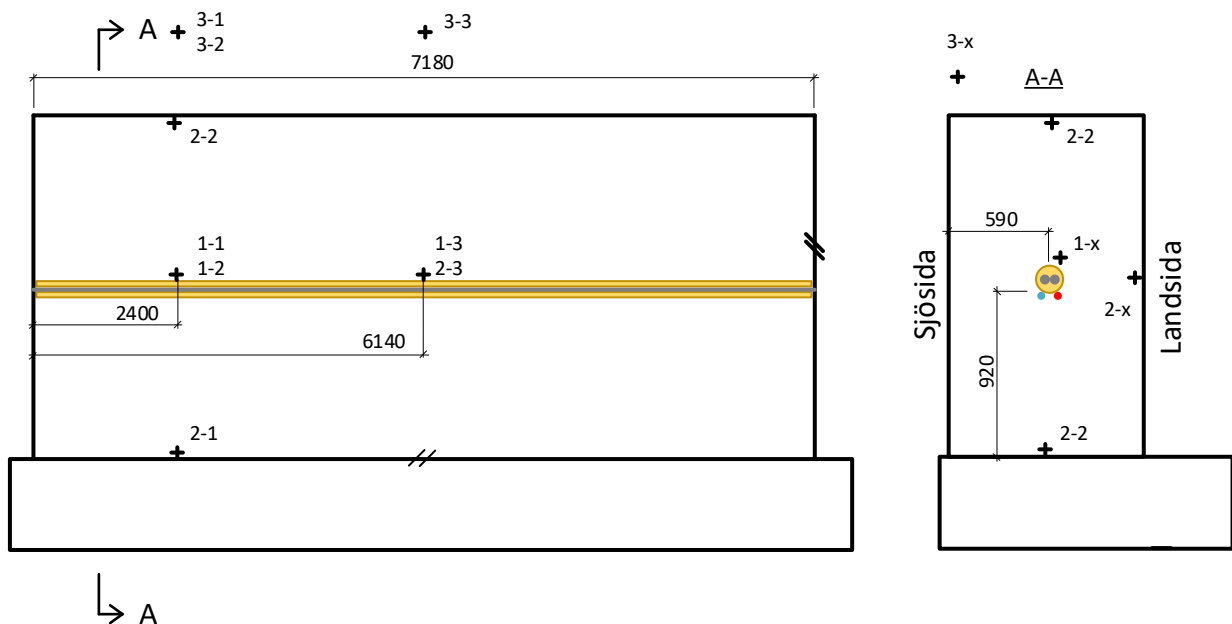
Beteckningar

- Tempgivare ODiSI
- Töjningsgivare ODiSI
- Armeringsjärn
- Längd på temp,- töjningsgivare
- Rörisolering
- + Temperaturgivare Celsicom

Temperaturgivares (Celsicom) placering

- +1 mitt i mur
- +2 2cm från form/5cm under ytan/på bottenplattan
- +3 i omgivande luft

Givare placeras minst 2m in från avstängare



Figur 31. Placering av sensorer vid gjutning 2.



Figur 32: Installation av optiska sensorer under tejpade monteringsjärn. Avstånd på 33,3 cm mellan tejpställen.



Figur 33: Extra monteringsjärn för att sätta fast sensorerna och leda de ur formen till remote modules.

3.5 Gjutning

3.5.1 Gjutning 1

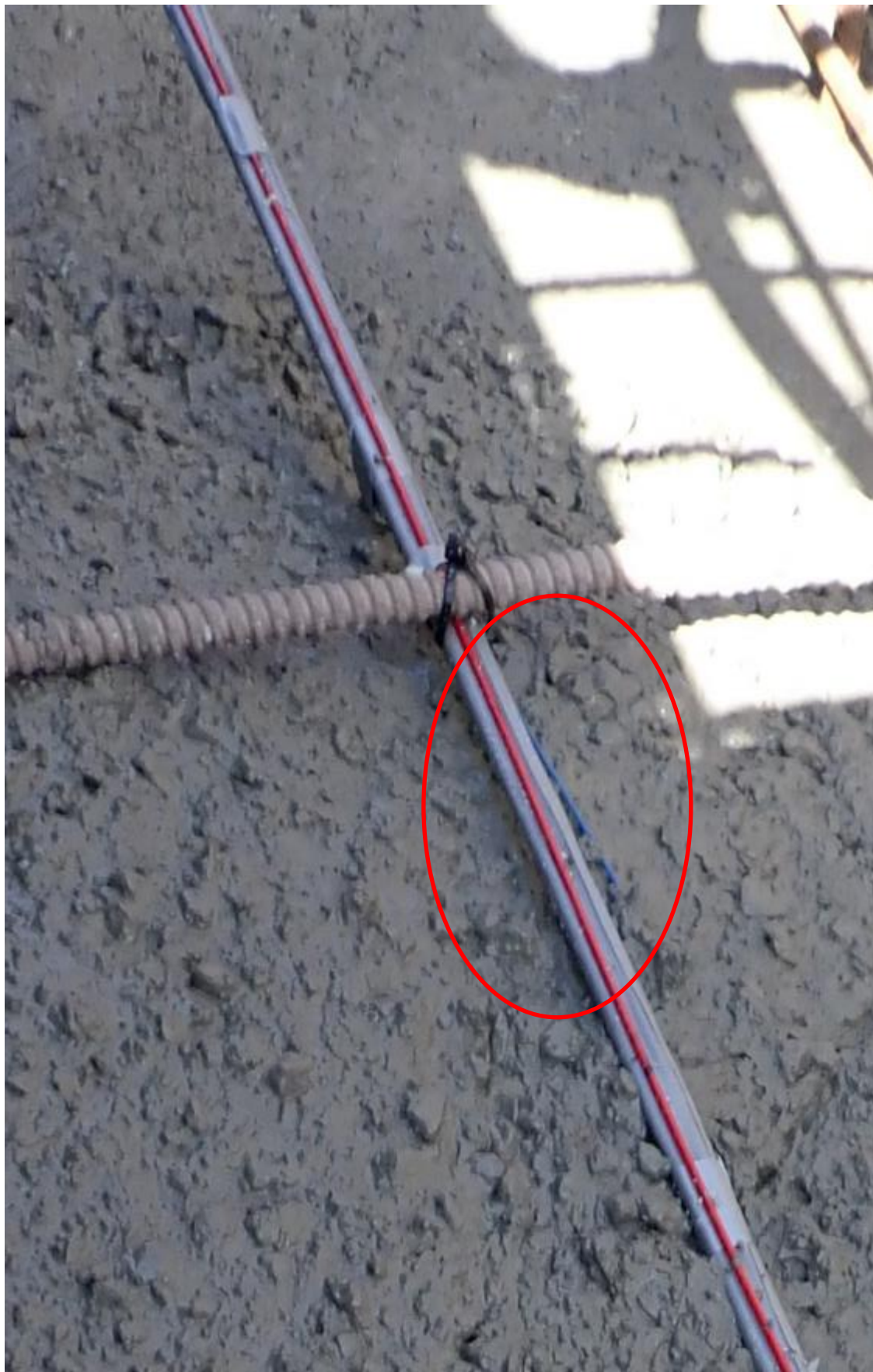
Gjutning 1 startades 2023-05-04, kl. 10:30 och var klart 14:00. I Tabell 1 sammanställs klockslag och observationer. Under gjutningen blev det tydligt att fastsättning av den optiska töjningsgivaren inte var lämpligt med avseende på betongens konsistens och påverkan på sensorn. Vid inpumpning av betong flyttades sensorn i sid-och höjddled, blev utsatt för drag etc. Det är omöjligt att säga om sensorn är rakt ingjuten i betongen eller har krökts mellan fästpunkterna. Betongarbetarna försökte att ta hänsyn till det och hjälpte till med försiktig pumpning upp till nivå under sensorn, sedan mycket långsam påfyllning över sensorn och samtidigt försiktig vibrering. Ändå utsattes sensorn för påfrestningar som kändes för stora. Sensorerna lämnades även fria i vertikalled på en viss sträcka för att fästas igen på en högre höjd. Detta var olämpligt då betongen flyttade på sensorerna under gjutning och kompaktering, trots att man höll i sensorerna och försökte att lätta på dragkrafterna så mycket som möjligt. Sensorerna måste installeras på ett annat sätt för att säkerställa korrekt position och för att undvika skaderisk. Aktuell installationsmetod kan möjligtvis fungera under mycket väl kontrollerade omständigheter i laboratoriet med självkompakterande betong och för mindre provkroppar, men anses olämpligt i fullskala i fält med vibrerad betong.

Tabell 1: Observationer från gjutning 1.

Tid	Moment/observation
10:30	Gjutstart, lufttemperatur insida form ca. +15°C
11:00	Lass 2
11:30	Betongen når optiska givarna på högra sidan
11:45	Optiska givarna kringgjutna, Celsicom givarna på ½ höjd kringgjutna
	Gjutuppehåll, problem med betongleverans
12:50	Lass 3
14:00	Gjutning klar
Ca 16:00	Ytan avjämnad, brädriven och täckt



Figur 34: Lass 1 pumpas i formen.



Figur 35: Betongen når de optiska givarna. Observera hur den blåa töjningsgivaren flyttas ur lägre (markering).



Figur 36: Ej lämpligt att ha sensorerna fria i vertikalled. Det blir stora belastningar vid gjutning. Sensorerna måste fixeras mot t.ex. armeringsjärn.

3.5.2 Gjutning 2

Gjutning 2 utfördes 2023-05-16. Gjutningen var planerad till kl. 11:00, startades dock kl. 10:00. När vi anlände 10:30 var givarna redan kringgjutna. Enligt uppgift flyttades sensorerna inte runt av betongen på samma sätt som vid gjutning 1. Lufttemperatur vid gjutning avlästes på Celsicomsystemet till ca. +13°C. Det började regna vilket medförde ett flertal strömavbrott då en trasig vibratorstav utlöste jordfelsbrytaren. Dataförlust förhindrades av en väl fungerade UPS-enhet.

3.6 Dataöverföring

Dataöverföring genomfördes med hjälp av en 4G-modem. Antenn placerades utanför containern. Som beskrivits innan så ingår det ingen automatiserad lagring och överföring av filer i Lunas system. Mätningen måste stoppas manuellt på plats eller via fjärranslutning,

mätresultat sparas och datafiler överförs via 4G nätet till en server. Sedan startas mätningen åter igen. För att minimera risken för att förlora data överförs mätresultat varje morgon och kväll under mätningen.

4 Resultat

4.1 Gjutning 1

4.1.1 Allmänt

Mätningar på gjutning 1 utfördes från 2023-05-04 till 2023-05-14. Etapplängd för gjutning 1 är 12,3 m. Etappen är fristående. Formrivning utfördes inte under mättiden.

4.1.2 Egenskaper färsk betong

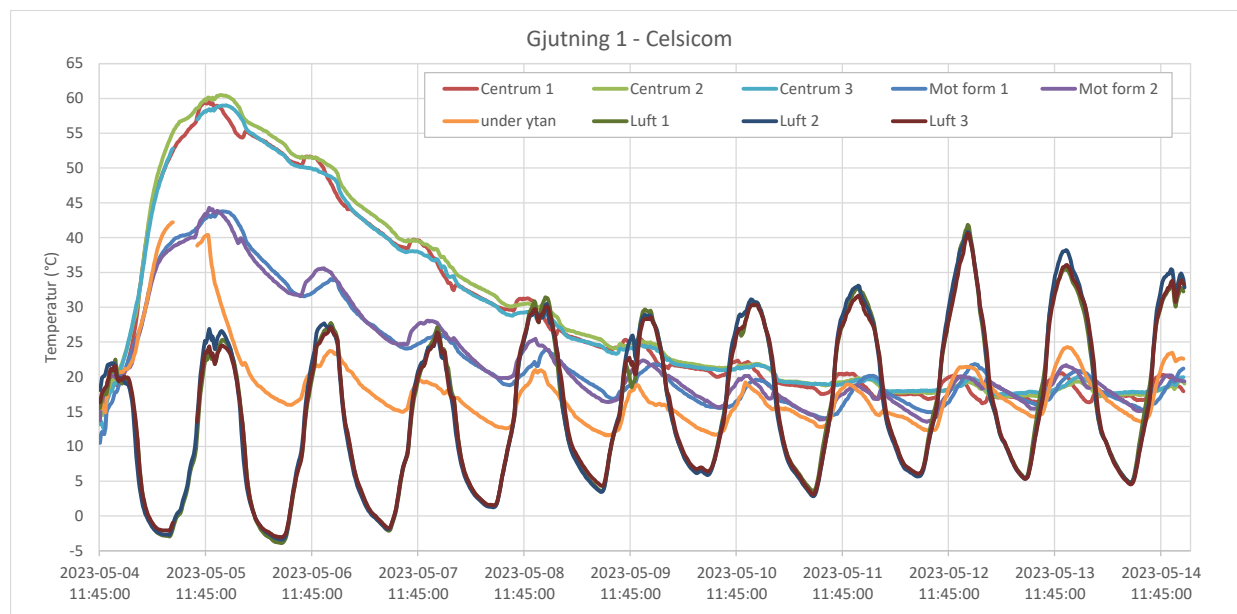
Egenskaper hos den färska betongen sammanställs i Tabell 2. Uppmätt temperatur vid provtagning var ca. 16 °C. Sättnmätt motsvarar kraven på beställt konsistens S4, dock åt styvare konsistens. Lufthalten uppfyller krav på förprovad lufthalt på minst 4,5%.

Tabell 2: Egenskaper färsk betong, gjutning 1.

Lass-nr	Provad	Sättnmätt (mm)	Lufthalt (%)	Temperatur (°C)
1	10:30	160	6,5	17
2	11:00	180	6,5	16
3	12:50	160	5,9	16

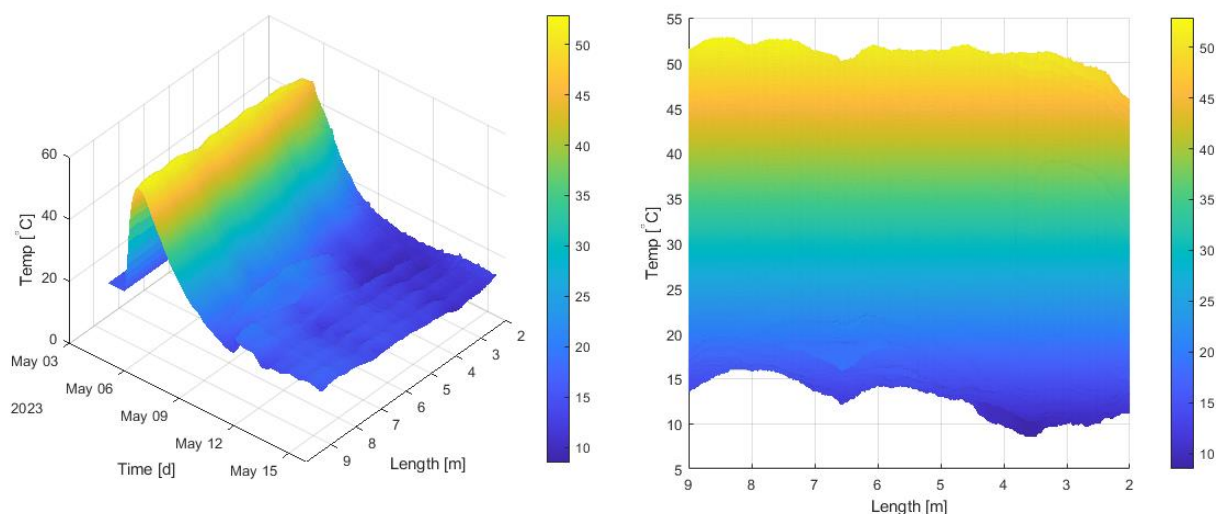
4.1.3 Temperaturutveckling

I Figur 37 redovisas temperaturmätningen med det traditionella systemet (Celsicom termoelement typ T). Temperaturen i den färska betongen vid gjutning bestämd med ingjutna sensorer stämmer bra överens med uppmätt temperatur vid provtagning. Loggningsutrustningen placerades av logistiska skäl exponerad mot sydväst, inverkan av solen på referensgivaren i loggaren och därmed registrerad temperatur i konstruktionen syns tydligt (temperaturen mitt i balken ökar mitt på dagen och sjunker sedan igen). Även lufttemperaturen som registreras är orimligt hög för årstiden, detta tyder på effekt av solinstrålning på mätinstrumentet. Den registrerade maximala temperaturen på ca. 60 °C var sannolikt omkring 56-58 °C. Givare centrum 2 visar något högre temperatur än de övriga centralt placerade givare. Avvikelsen kan inte analyseras närmare, inverkan av solinstrålning på mätinstrumentet kan ha betydelse.



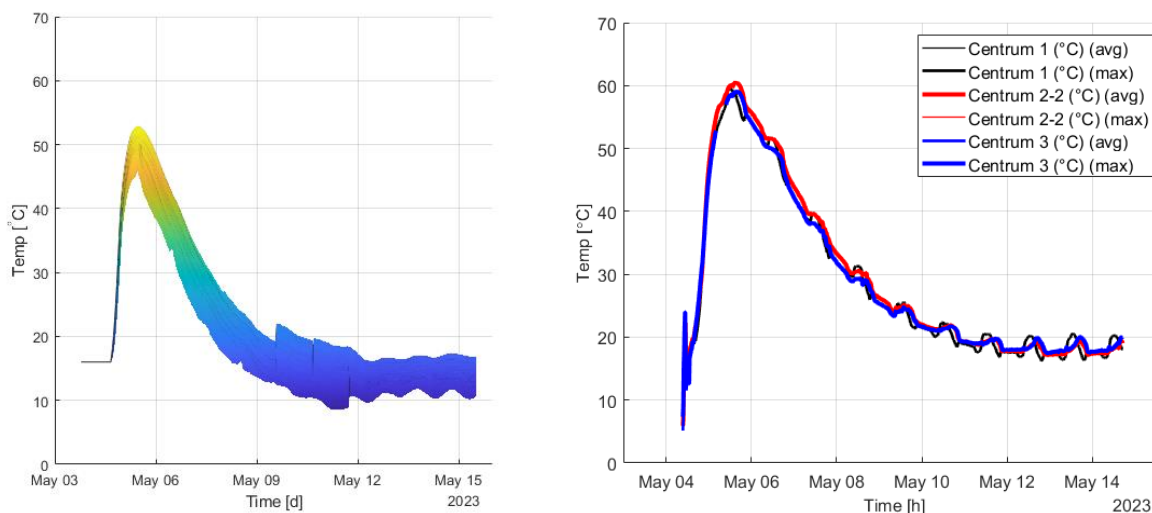
Figur 37: Temperaturutveckling för gjutning 1. System Celsicom.

Temperaturmätningen med fiberoptiken redovisas i Figur 38. En viss variation av uppmätt temperatur längs givaren blir tydligt. Detta kan eventuellt bero på att givaren fixerades ovanpå två monteringsjärn. Registrerad max-temperatur med optisk mätutrustning är ca. 52 °C.



Figur 38: 3D plot av temperaturmätning med fiberoptiken. 3D plot t.v., vy som visar hela uppmätt temperaturintervall t.h. Längdintervall 2-3 m bör bortses från, givarens lägre avviker från centrum balk.

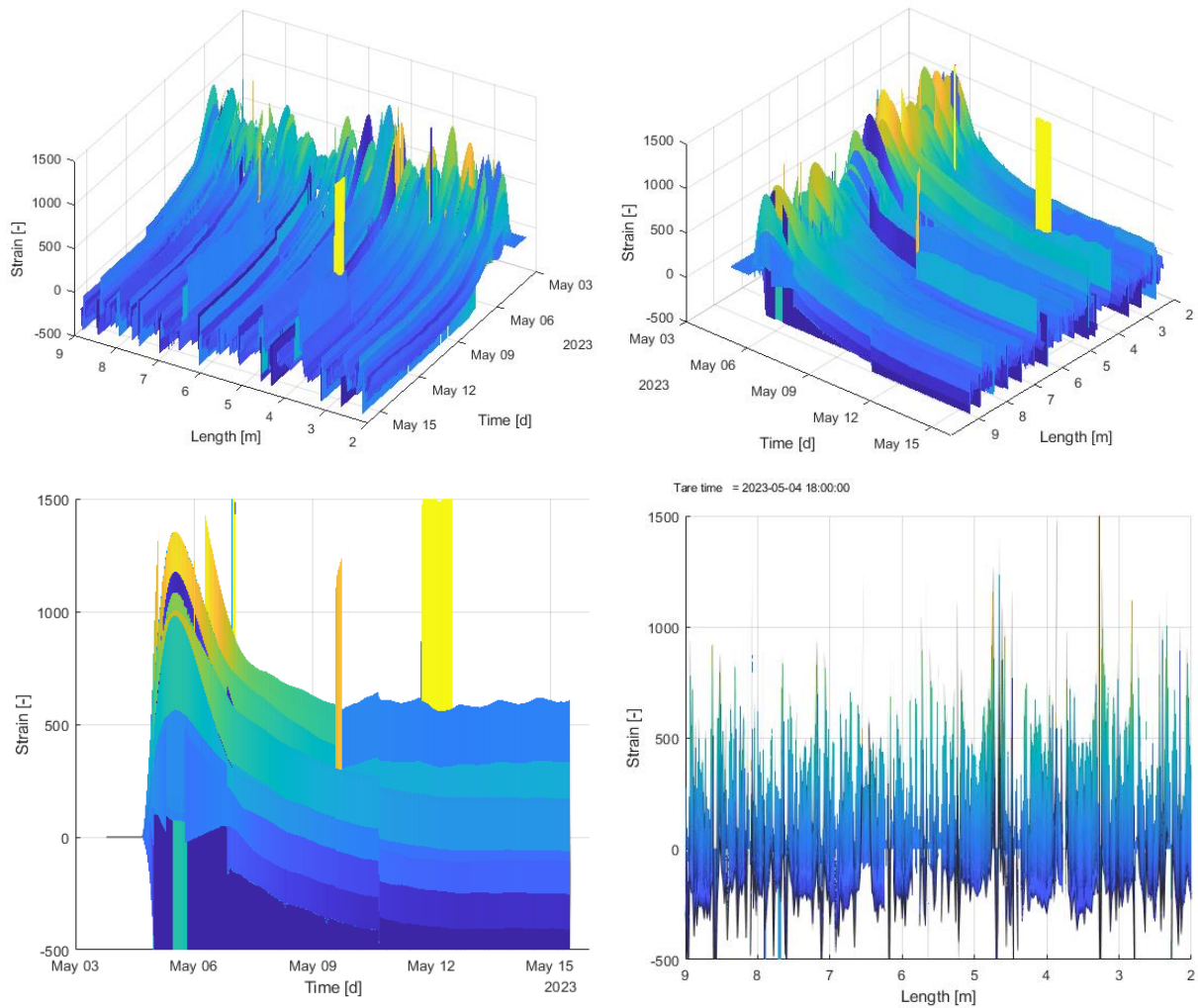
I Figur 39 jämförs resultat från fiberoptiken och termoelement. Termoelementen ger något högre max-temperatur än fiberoptiken. Det bör beaktas att mätningen med termoelementen påverkades av solinstrålning på loggningsutrustning. Vidare så är temperaturmätningen med fiberoptiken relativ, dvs. startvärdet (när betongen kommer i kontakt med fiberoptiken) måste bestämmas med extern utrustning. En feluppskattning med t.ex. en grad ger då samma fel för max-temperaturen.



Figur 39: jämförelse mellan temperaturmätning med fiberoptik t.v. och termoelement t.h.

4.1.4 Töjning

Rådata från töjningsmätning från gjutning 1 redovisas i Figur 40. Mätresultaten varierar kraftigt i magnitud, vilket möjligtvis beror det till en del på vald installationsmetod. Extremvärden fås dock inte bara för mätpunkter med ett avstånd på ca. 50 cm (sensorn fastsatt i plastringar). Även för mellanliggande positioner varierar resultaten mycket kraftigt. data från gjutning 1 vidare då vi inte litar på sensorns läge och integritet efter gjutning.



Figur 40: Rådata från töjningsmätning. Data från sensorn utanför betongen har klippts bort. Kraftiga variationer i uppmätta värden.

4.2 Gjutning 2

4.2.1 Allmänt

Mätningar på gjutning 2 utfördes från 2023-05-16 till 2023-05-29. Etapplängd för gjutning 2 är 7,18 m. Etappen gjuts mot befintlig etapp. Formrivning utfördes inte under mättiden.

4.2.2 Egenskaper färsk betong

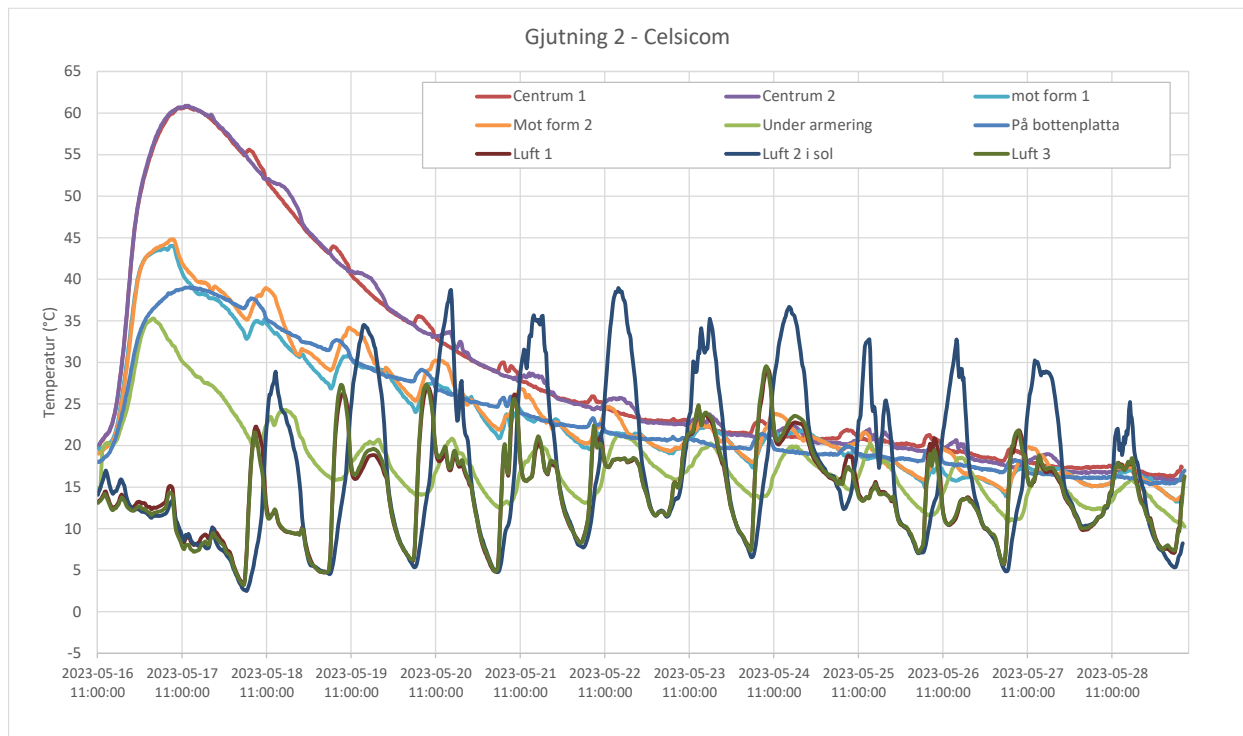
Egenskaper hos den färska betongen sammanställs i Tabell 3. Informationen är inhämtad från provtagning och betonggjutningsjournal. Uppmätt temperatur vid provtagning var 19 °C. Sättningsmått motsvarar kraven på beställt konsistens S4, dock åt lösare konsistens. Lufthalten uppfyller krav på förprovad lufthalt på minst 4,5%.

Tabell 3: Egenskaper färsk betong, gjutning 2.

Lass-nr	Provad	Sättningsmått (mm)	Lufthalt (%)	Temperatur (°C)
1	--	180	5,2	19
2	--	200	5,6	19
3	--	200	6,4	19

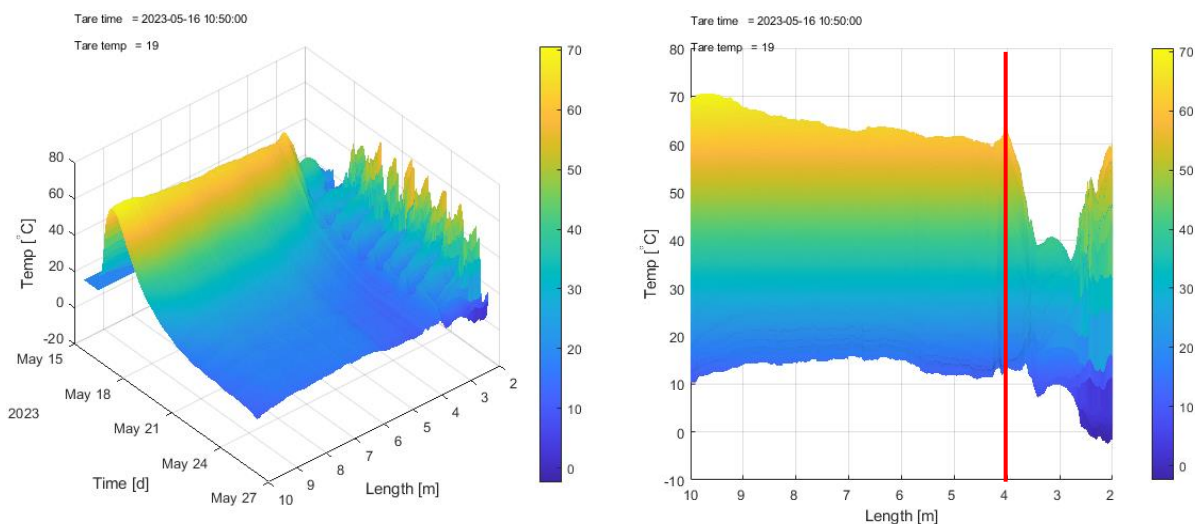
4.2.3 Temperaturutveckling

I Figur 41 redovisas temperaturmätningen med det traditionella systemet (Celsicom termoelement typ T). Temperaturen i den färska betongen vid gjutning bestämd med ingjutna sensorer stämmer bra överens med uppmätt temperatur vid provtagning. Loggare 1 och 3 placerades denna gång exponerad mot nordöst (mot havet), vilket krävde extra skyddsåtgärder. För att kunna jämföra solens påverkan placerades loggare 2 exponerad mot sydväst. Inverkan av solen på referensgivaren i loggare 1 och 3 är reducerad, på morgonen syns dock en påverkan av sol (temperaturen mitt i balken ökar på morgonen för mätpunkt centrum 1 och mitt på dagen för mätpunkt centrum 2). Uppmätt lufttemperatur visar på effekt av solinstrålning på mätinstrumentet (spikar på morgonen resp. mitt på dagen från 2023-05-18). Den registrerade maximala temperaturen på ca. 61 °C verkar trovärdig (molnig dag, jämför lufttemperatur, inga spikar).

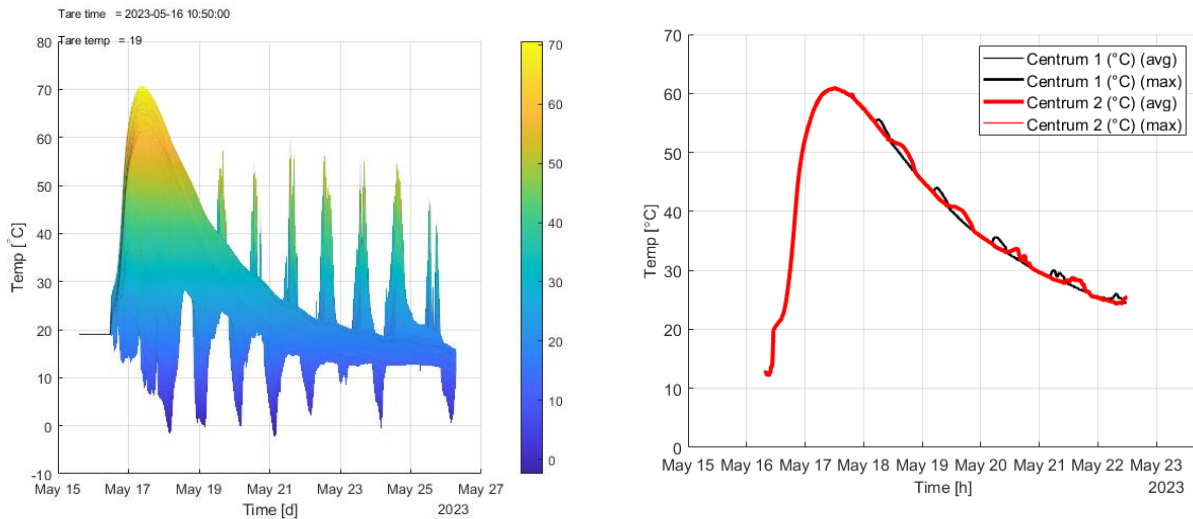


Figur 41: Temperaturutveckling för gjutning 2. System Celsicom.

Temperaturmätningen med fiberoptiken redovisas i Figur 42. Den delen av sensorn som inte var ingjuten påverkas tydligt av temperaturvariationer över dygnet och sol. Registrerad max-temperatur med optisk mätutrustning är ca. 70 °C i ändan av givaren. Detta ska jämföras med resultat från termoelement som gav 61 °C, se Figur 43. Temperaturen längs den ingjutna delen av sensorn ökar från ca. 60 °C till 70 °C. För ca. halva längden av den fiberoptiska sensorn motsvarar registrerad maximal temperatur ungefär kontrollmätningen med termoelementen. Det finns ingen logisk förklaring till temperaturökningen längs den fiberoptiska sensorn. Sensorn tejpades mot undersidan av två isolerade armeringsjärn och betongen hade samma utgångstemperatur. Registrerad maximal temperatur är ca. 10 °C högre än för termoelementen.



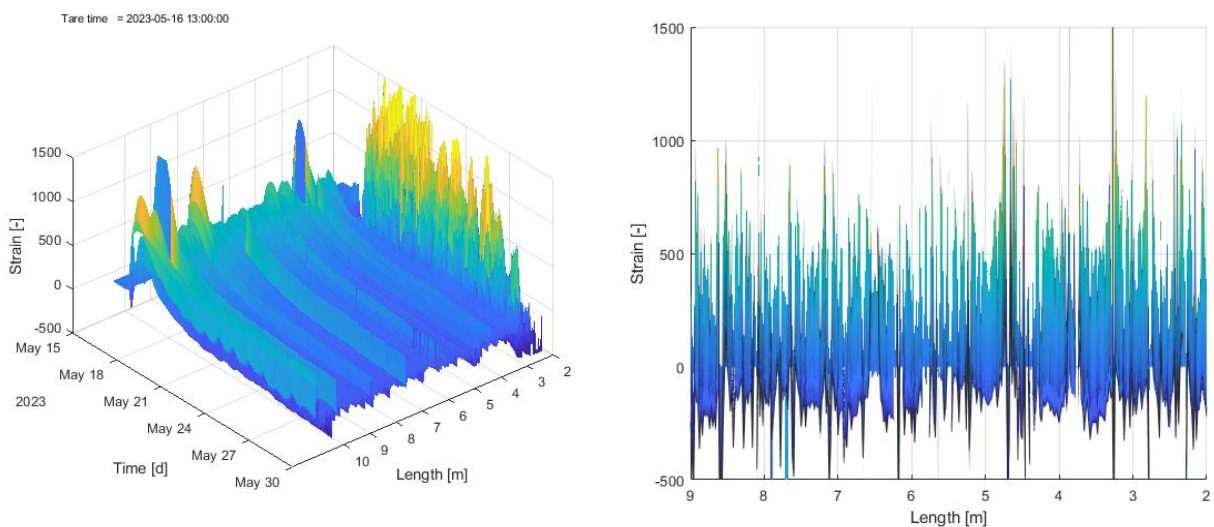
Figur 42: 3D plot av temperaturmätning med fiberoptiken. 3D plot t.v., vy som visar hela uppmätt temperaturintervall t.h. Längdintervall 2-4 m bör bortses från, givarens lägre avviker från centrum balk eller befinner sig utanför betongen.



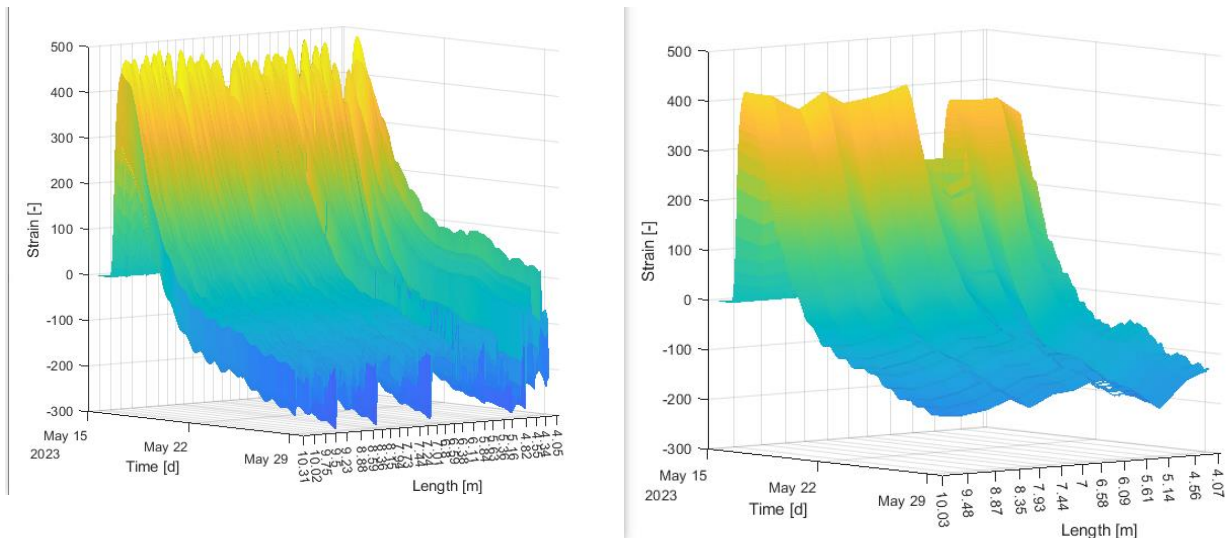
Figur 43: Jämförelse mellan temperaturmätning med fiberoptik t.v. och termoelement t.h. Spikarna i figuren t.v. är på den delen av sensorn utanför betongen.

4.2.4 Töjning

Rådata från töjningsmätning från gjutning 2 redovisas i Figur 44. Det blir tydligt att töjningsresultat från fiberoptiken måste kompenseras för temperatur, se den delen av sensorn som befinner sig utanför betongen. Enligt uppgift från tillverkaren mäter den fiberoptiska sensorn effekter från mekanisk töjning och temperatur samtidigt.

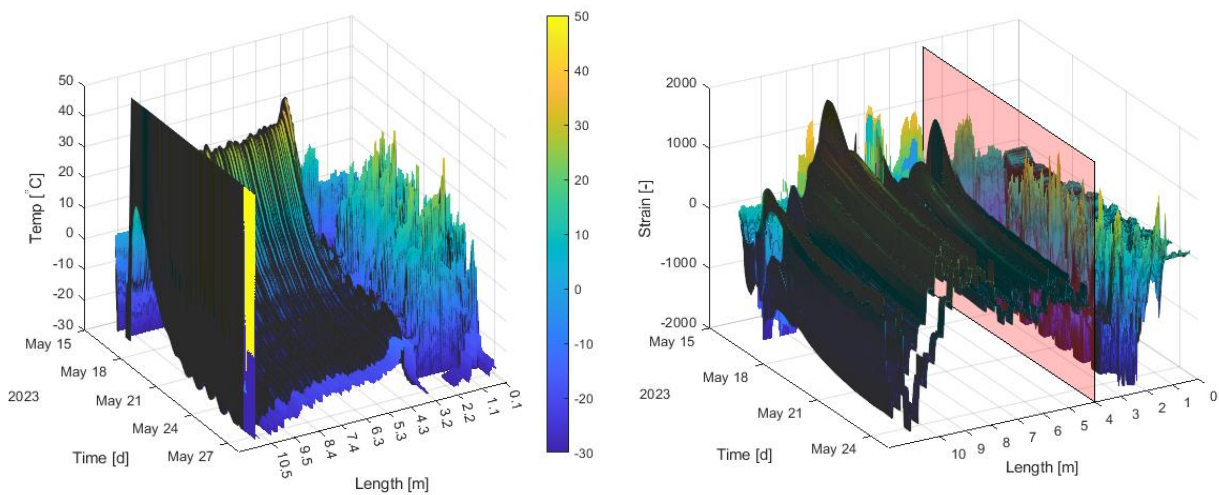


Figur 44: Rådata från töjningsmätning, t.v. 3D plot, t.h. vy som visar hela uppmätt intervall. Inom längdintervall 2-4 m avviker sensorns position från centrumläge eller är utanför betongen och visar påverkan av omgivningstemperaturens variation på uppmätt töjning (även solinstrålningen påverkar tydligen väldigt mycket).

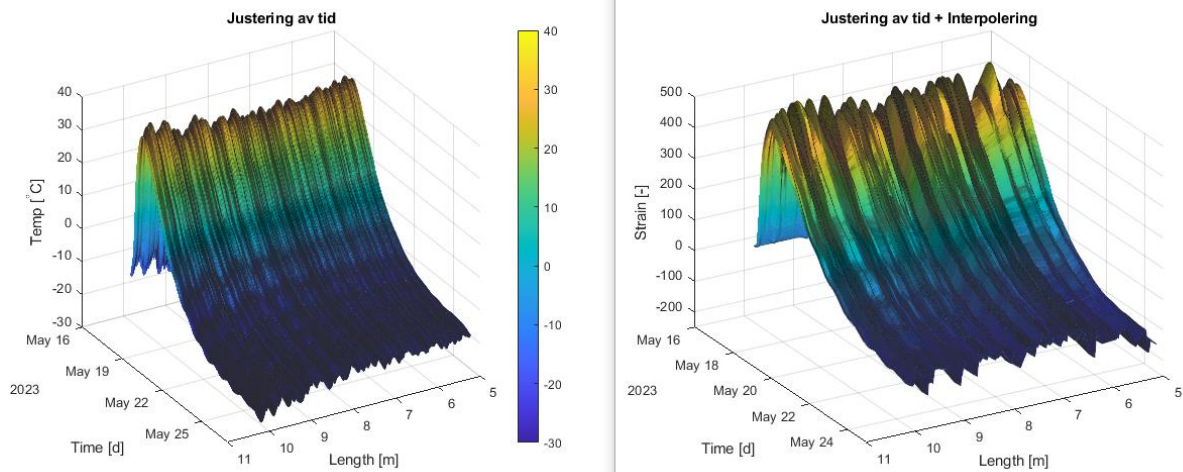


Figur 45: Behandlat data. T.v. är kurvor med extrema värden borttagna. T.h. medelvärdesbildning över 20 mätpunkter, extremvärden är borttagna i medelvärdesbildning. OBS, utan temperaturkompensation.

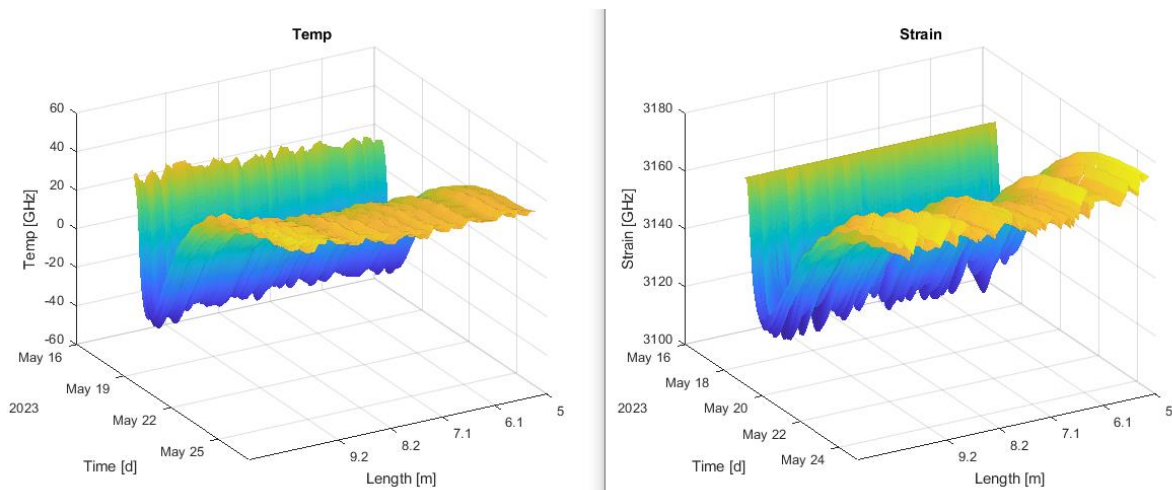
Genom att ta bort extremvärden (se Figur 45) och medelvärdesbildning över en viss mätlängd fås en till synes jämnare bild. Observera att mätresultaten i Figur 45 är överlagrad töjning och temperatur. För att kunna analysera enbart töjning måste temperatureffekten subtraheras. I det fiberoptiska mätsystemet beräknas töjning och temperatur från ljusets frekvensförskjutning. Töjning och temperatur måste därför i ett första steg räknas om till frekvens (GHz). Sedan kan temperatureffekten subtraheras och resulterande värden räknas om till töjning. Observera att det är ett väldigt stort antal mätpunkter som måste hanteras (ca. 20 miljoner datapunkter i grunddata för töjning och temperatur resp.), detta kräver kraftfulla verktyg och tar en del beräkningstid. I Figur 46 till Figur 50 sammanställs stegen och resultat.



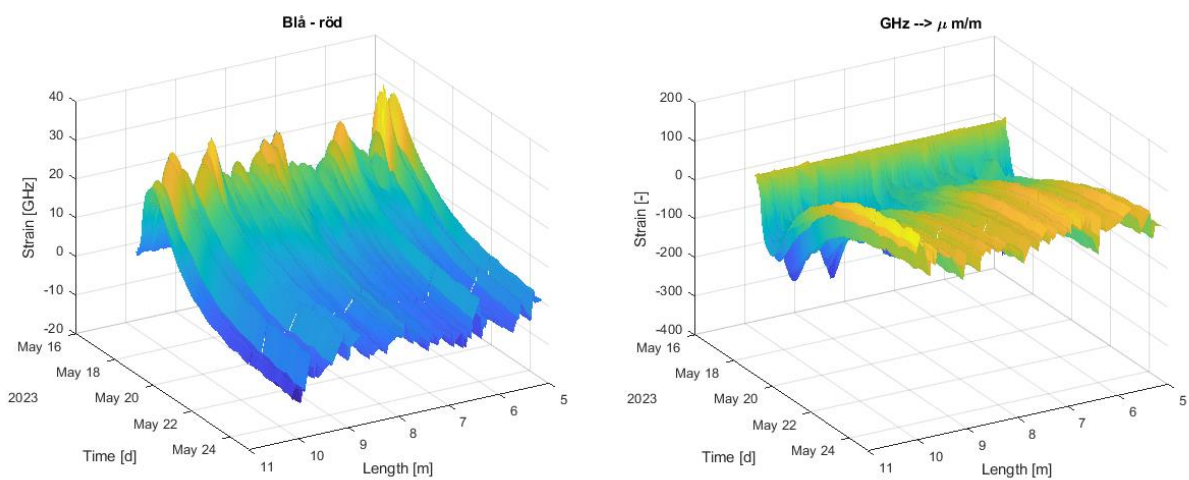
Figur 46: Rådata temperatur och töjning. Den röda markeringen till höger visar punkten där töjningssensorn är ingjuten horisontellt i centrum balk. Mätvärden i längdintervall 0-4 m tas bort från vidare analys.



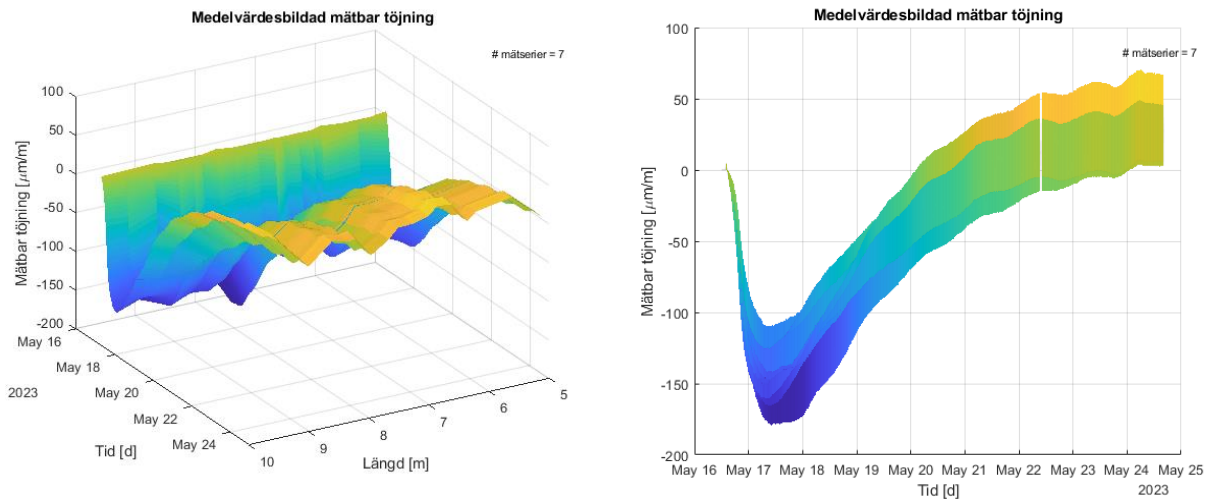
Figur 47: Mätvärden utanför betongen borttagna (även där sensors position avviker från centrum av balk). Extremvärden och tejpställen borttagna.



Figur 48: Omräkning till GHz.



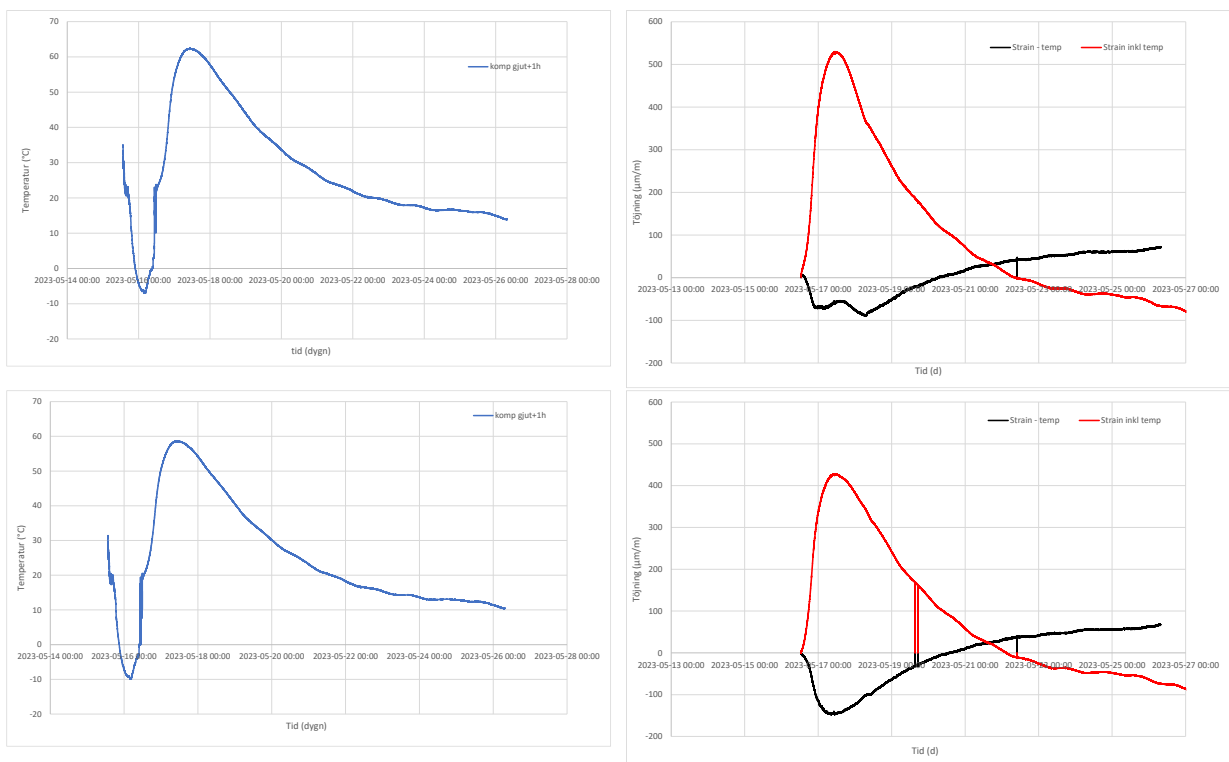
Figur 49: Temperatur subtraherad från töjning. T.v. i GHz, t.h. i $\mu\text{m}/\text{m}$.



Figur 50: Mätbar töjning efter medelvärdesbildning över ett antal mätserier, olika vyer.

I Figur 50 redovisas uppmätt töjning efter temperaturkompensation. Mätvärden varierar en del, dock följer kurvorna en logik och är förenliga med bakomliggande teori. Variationerna kan möjligtvis bero på installationen, även om tejpställen mot isolering (med ett avstånd på 33 cm) har tagits bort från mätserien. På dessa ställen är sensorn inte ingjuten i betong och uppmätta töjningar är sannolikt felaktiga.

Uppmätta töjningar på dragsidan är i storleksordning 50 µm/m vilket stämmer överens med observationen att inga sprickor uppkom (betongens dragbrottöjning är ca. 100 µm/m enligt litteraturen) Observera skillnaden mellan mätbar töjning och fiktiv töjning enligt avsnitt 4.3.3. För att kontrollera utvärderingen och utesluta fel i hantering av stora datamängder utfördes temperaturkompensationen för hand med excel av en annan person för 2 godtyckliga positioner längs töjningssensorn (dock utanför tejpställen), se Figur 51. Resultaten är jämförbara.



Figur 51: Manuell temperaturkompensation av uppmätta töjningar för 2 godtyckliga mätpunkter (4,15 m och 4,5 m från sensorns ände). T.v. uppmätt temperatur (blå), t.h. uppmätt töjning (röd) och temperaturkorrigerad töjning (svart).

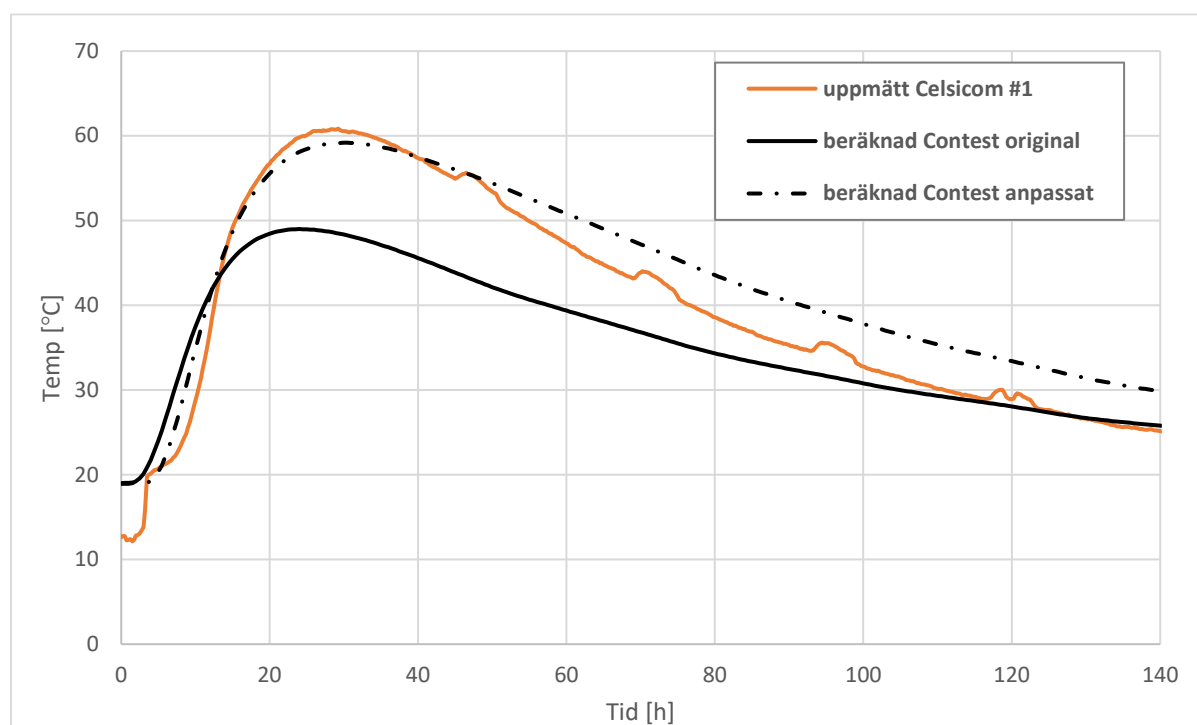
4.3 Jämförelse mot beräkningar

4.3.1 Allmänt

Inga sprickor upptäcktes i gjutning 1 ungefär en månad efter gjutning. Enligt uppgift var de instrumenterade etapper sprickfria även några månader efter gjutning. I töjningsmätningarna upptäcktes det inga språng i uppmätt magnitud som kan vara ett tecken på uppkomst av en spricka.

4.3.2 Temperaturutveckling

Beräknad och uppmätt temperaturutveckling i centrum av balk skiljer sig, se Figur 52. Den beräknade temperaturen med materialparametrar från databasen är ca. 10 °C lägre än den uppmätta temperaturen i konstruktionen.

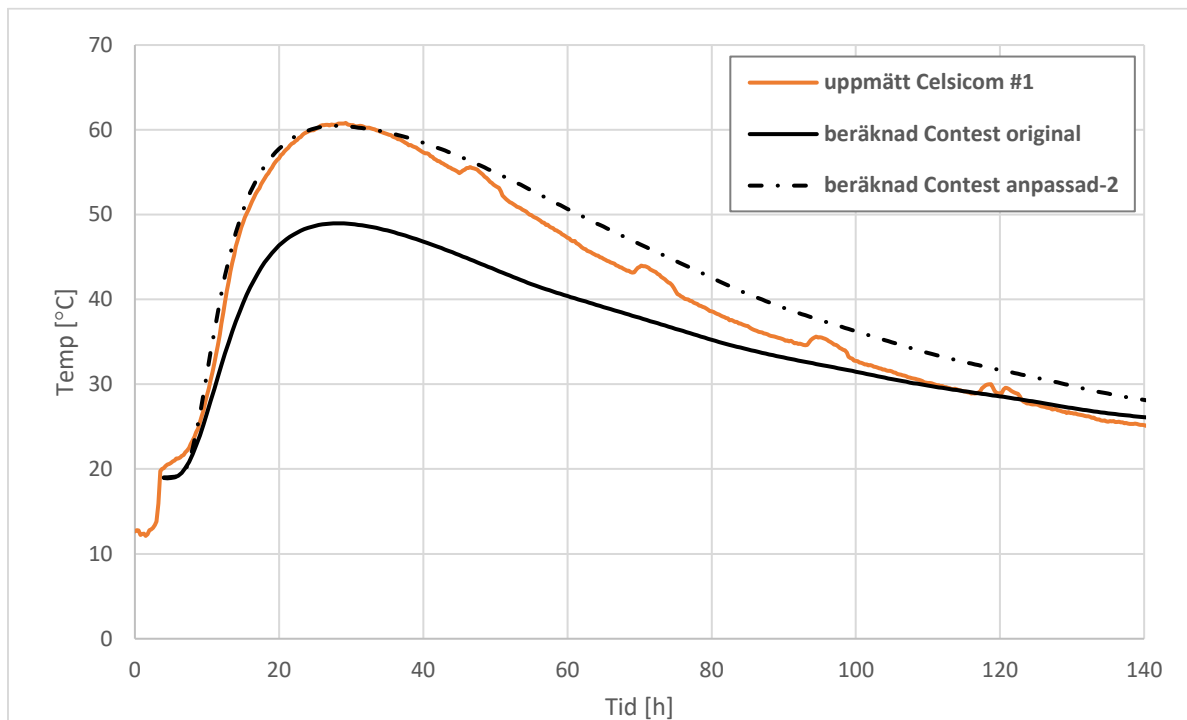


Figur 52: Uppmätt temperatur i centrum av balk med termoelement från gjutning 2, temperaturberäkning med materialparametrar från databasen och temperaturberäkning med anpassade parametrar.

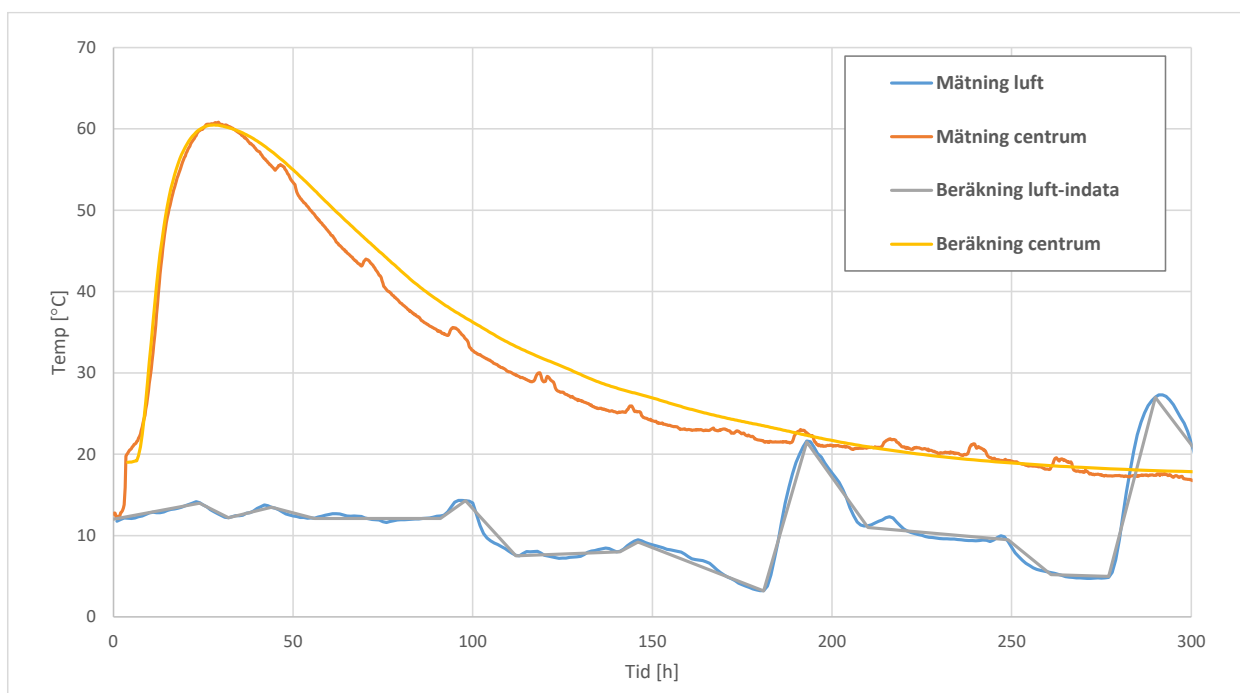
Anpassning av materialparametrar avseende temperaturutveckling kan utföras med hjälp av ”trial-and-error” eller olika optimeringsverktyg. Den bakomliggande materialmodellen för temperaturberäkningar redovisas i Bilaga A.

Betongens materialparametrar modifierades i ett första steg enbart genom att höja värmeutvecklingen (öka W_c). Med enbart anpassning av W_c blir maximal temperatur i närheten av uppmätt temperatur. Kurvaturen av beräknad värmeutveckling kan dock förbättras.

Beräknad värmeutveckling styrs av ett flertal parametrar. Observera att enbart vissa parametrar bör modifieras eftersom inga kompletterande undersökningar avseende mognadsutveckling har genomförts. När flera parametrar ingår i anpassningen (W_c , β_{tD} , t_0) blir överensstämmelsen bättre, se Figur 53. Avsvängningen i tid är alltid något svårare att simulera, t.ex. varierande vindhastighet och utstrålning nattetid (variabler som inte mäts) kan inte tas med i simuleringen.



Figur 53: Uppmätt temperatur i centrum av balk med termoelement från gjutning 2, temperaturberäkning med materialparametrar från databasen och temperaturberäkning med anpassade parametrar-v2.



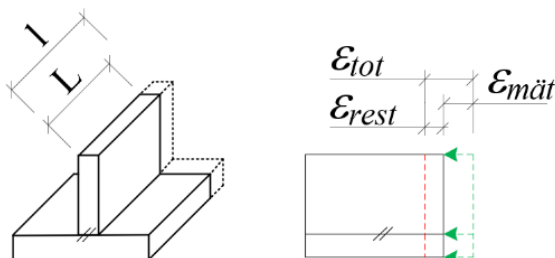
Figur 54: Jämförelse mellan uppmätt och beräknad temperatur över längre tid.

4.3.3 Töjning

Vid jämförelser mellan uppmätta och beräknade deformationer, $\Delta L = l - L$ (se Figur 55), som uppkommer vid en betonggjutning behöver alla bidragande deformationer kvantifieras. De sammantagna deformationerna kan ses som en totaldeformation. Den kan normaliseras och beskrivs då som en totaltöjning $\varepsilon_{tot} = \Delta L/l$, vilken kan uttryckas i en spänningsoberoende $[\]^A$ och en spänningsberoende $[\]^B$ del enligt Larson (2003),

$$\varepsilon_{tot} = [\varepsilon_{vol}]^A + [\varepsilon_{visc} + \varepsilon_{frac} + \varepsilon_{rest}]^B \quad 4.3.3.1$$

där ε_{vol} är töjning p.g.a. temperatur och fuktförändringar (volumetric).
 ε_{visc} är töjningspåverkan p.g.a. viskoelastisk krympning eller relaxation (viscoelastic).
 ε_{frac} är brottmekanisk töjning (fracture).
 ε_{rest} är fiktiv töjning p.g.a. tvång (restraint).



Figur 55: Till vänster. L = referenskonfiguration och l = aktuell konfiguration. Till höger. Schematisk åskådliggörning av förhållandet mellan fri och fiktiv töjning.

Den töjning som kan mätas betecknas här som mätbar töjning, $\varepsilon_{mät}$, och består av alla ovanstående töjningsbidrag utom den andel som utgörs av fiktiv töjning,

$$\varepsilon_{mät} = \varepsilon_{vol} + \varepsilon_{visc} + \varepsilon_{frac} \quad 4.3.3.2$$

och 4.3.3.1 kan nu skrivas om till,

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{mät} + \varepsilon_{rest} \quad 4.3.3.3$$

Den återhållna töjningen kan beskrivas som skillnaden mellan fri deformation och mätbar töjning, se Figur 55. Mothållet kan betraktas som den differens-töjning som uppkommer mellan den deformerande kroppen och den mothållande kroppen, och beror på geometrierna hos kropparna, vidhäftningen dem emellan och styvheten hos kropparna. Detta uttrycks som en tvångsfaktor, γ_R [0 1] (se t.ex. Nilsson et al, 2015 och Hösthagen, 2017), och den återhållna töjningen kan då uttryckas som,

$$\varepsilon_{rest} = \varepsilon_{vol} \cdot \gamma_R \quad 4.3.3.4$$

I ConTeSt Pro manualen (2008) ekv A2.11 betecknas den återhållna töjningen som materialtöjning, ε_m .

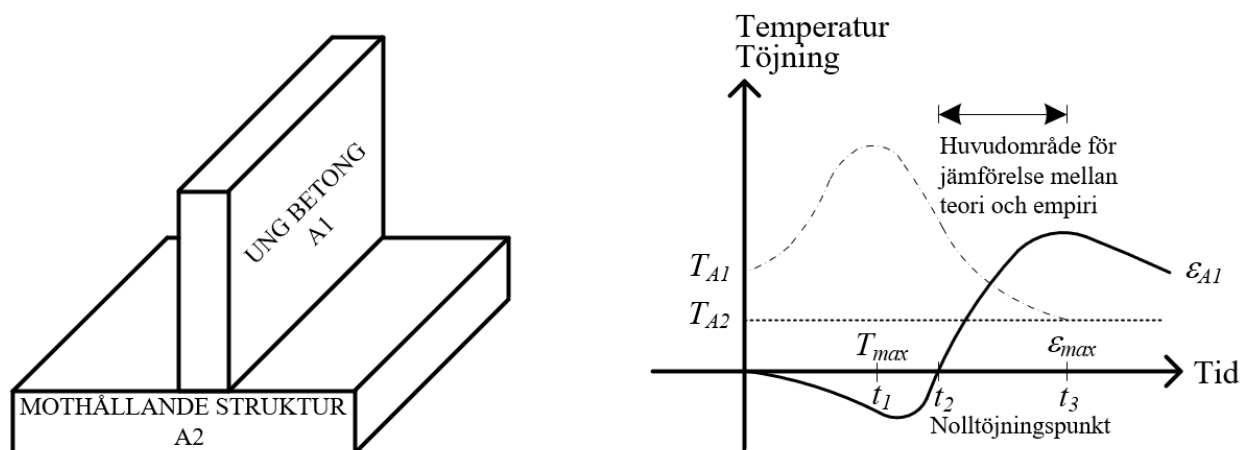
Vidare kan det spänningsberoende bidraget till totaltöjningen delas upp enligt,

$$\varepsilon_{vol} = \varepsilon_T + \varepsilon_{AS} + \varepsilon_{DS} \quad 4.3.3.5$$

där ε_T är töjning p.g.a. temperaturskillnader (thermal)
 ε_{AS} är autogen krympning (autogenous shrinkage)
 ε_{DS} är uttorkningskrympning (drying shrinkage)

Om uttorkningskrympningen utgår från den spänningsberoende delen benämns den som töjning orsakad av *frirörelse*.

För att jämföra empiri med teori kan den mätbara töjningen jämföras med beräknat dito. Att teoretiskt bestämma storleken av varje töjningsbidrag vid varje givet ögonblick kan vara en utmanande uppgift, i synnerhet vid betongens fasövergång från ett rent plastiskt material till ett viskoelastoplastiskt material. Man kan begränsa omfattningen i den uppgiften genom att anta förenklingar beroende på till vilket syfte beräknade töjningar ska användas. I projektet jämförs empiriska och teoretiska töjningar med målet att avgöra hur väl de överensstämmer, och i synnerhet i närheten av eventuell sprickbildning. Med den avgränsningen blir töjningsutvecklingen från nolltöjningspunkten, t_2 , till maximaltöjningspunkten, t_3 , intressant. Detta visas schematiskt i Figur 56 för ett generellt strukturellt fall med hypotetiska temperatur- och töjningsförlopp.



Figur 56: Till vänster. Kropp A1 gjuts mot kropp A2. Till höger. Hypotetiska temperatur- och töjningsförlopp för A1 och A2 med visualisering av intressant jämförelseområde mellan teoretiska och empiriska materialtöjningar, mellan t_2 och t_3 .

I och med antagen avgränsningen lämpar sig programmet ConTeSt Pro till att beräkna teoretiska temperatur- och töjningsförlopp tack vare dokumenterat god överensstämmelse mot verkliga förlopp inom det avsedda jämförelseområdet, betecknat *Huvudområde för jämförelse mellan teori och empiri* i Figur 56, se t.ex. Jonasson et al (2009) och Hösthagen (2017). Programmet inbegriper varken en modell för brottmekanik eller uttorkningskrympning. Beräkningsmässigt räknar ConTeSt Pro ut frirörelserna där även det viskoelastiska bidraget tas med, se Larson (2003), Paper D ekv 3.1 och ConTeSt Pro manual (2008) Appendix A, ekv A3.15, varvid ett tvång ansätts och spänningar kan beräknas. Utifrån 4.3.3.3 kan följande samband för en ConTeSt Pro beräkning ansättas,

$$\varepsilon_{tot} = (1 - \gamma_R) \cdot \varepsilon_{vol} + \gamma_R \cdot \varepsilon_{vol} \quad 4.3.3.6$$

Mätbar töjning

Fiktiv töjning

Genom att ansätta 100% tvång i en ConTeSt-beräkning ges totaltöjningen av den återhållna töjningen.

ConTeSt anger inte explicit fiktiv töjning som en del av beräkningsresultaten, däremot kan beräknad töjningskvot användas för att söka ε_{rest} . Töjningskvoten beräknas enligt ConTeSt Pro manualen (2008) Appendix A, ekv A2.11,

ConTeSt anger inte explicit fiktiv töjning som en del av beräkningsresultaten, däremot kan beräknad töjningskvot användas för att söka ε_{rest} . Töjningskvoten beräknas enligt ConTeSt Pro manualen (2008) Appendix A, ekv A2.11,

$$\eta = \frac{\varepsilon_{rest}}{\varepsilon_{ct}^{ref}} \quad 4.3.3.7$$

där ε_{ct}^{ref} är dragbrottstöjningen

Dragbrottstöjningen behöver bestämmas och därigenom kan den återhållna töjningen kvantifieras. Dragbrottstöjningen kan beskrivas enligt Hösthagen A, 2017 sid 15 ekv 3,

$$\varepsilon_{ct}^{ref} = \frac{f_{ct}(t)}{E_{c,eff}(t)} \quad 4.3.3.8$$

där f_{ct} är momentandraghållfasthet
 $E_{c,eff}(t)$ är momentan elasticitetsmodul med en viscoelastisk del. Effektiv E-modul.

Den effektiva E-modulen kan utifrån ConTeSt-beräkningar där den autogena krympningen ansatts till noll bestämmas genom en omarbetning av relationen beskriven i Hösthagen A, 2017 sid 16 ekv 4.

$$E_{c,eff} = \frac{f_{ct} \cdot \xi}{\Delta T_c \cdot \alpha_c \cdot \gamma_R} \quad 4.3.3.9$$

där α_c är värmeutvidgningskoefficient
 ΔT_c är temperaturskillnaden från nollspänningspunkten till töjningsmax
 ξ är spänningskvot ($\xi = \frac{\sigma}{f_{ct}}$)

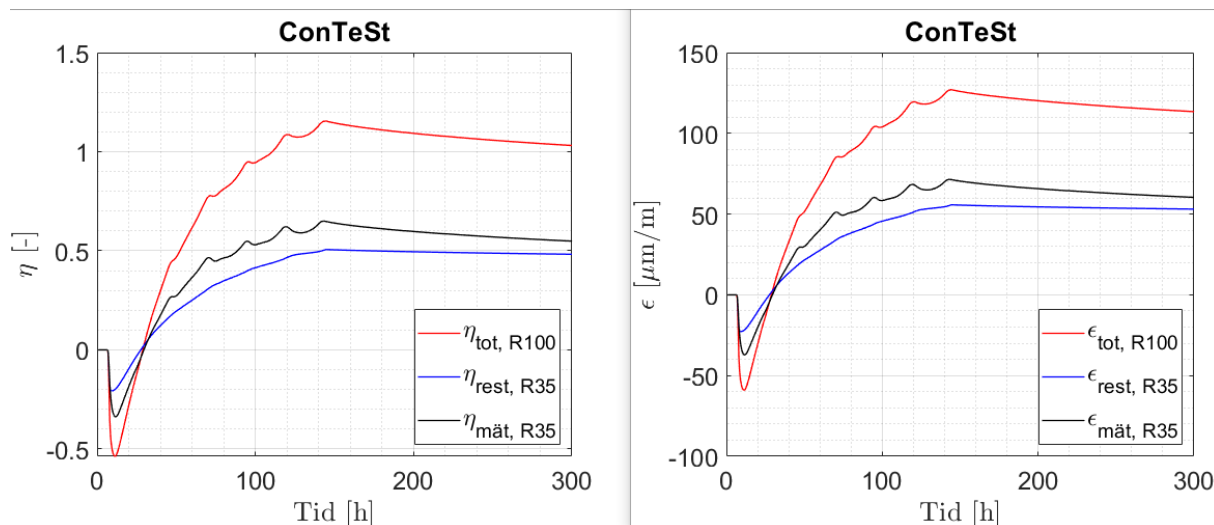
Utifrån 4.3.3.6 – 4.3.3.9 kan nu den teoretiskt mätbara töjningen beräknas.

Vid töjningsjämförelser inom projektet antas att töjning p.g.a. uttorkning är försumbar i och med att betongen fukthärdats fr.o.m. gjutstart till tid bortom intresseområdets tidsintervall.

För att kunna jämföra beräkning och mätning krävs det att tvånget är känt, se ovan.

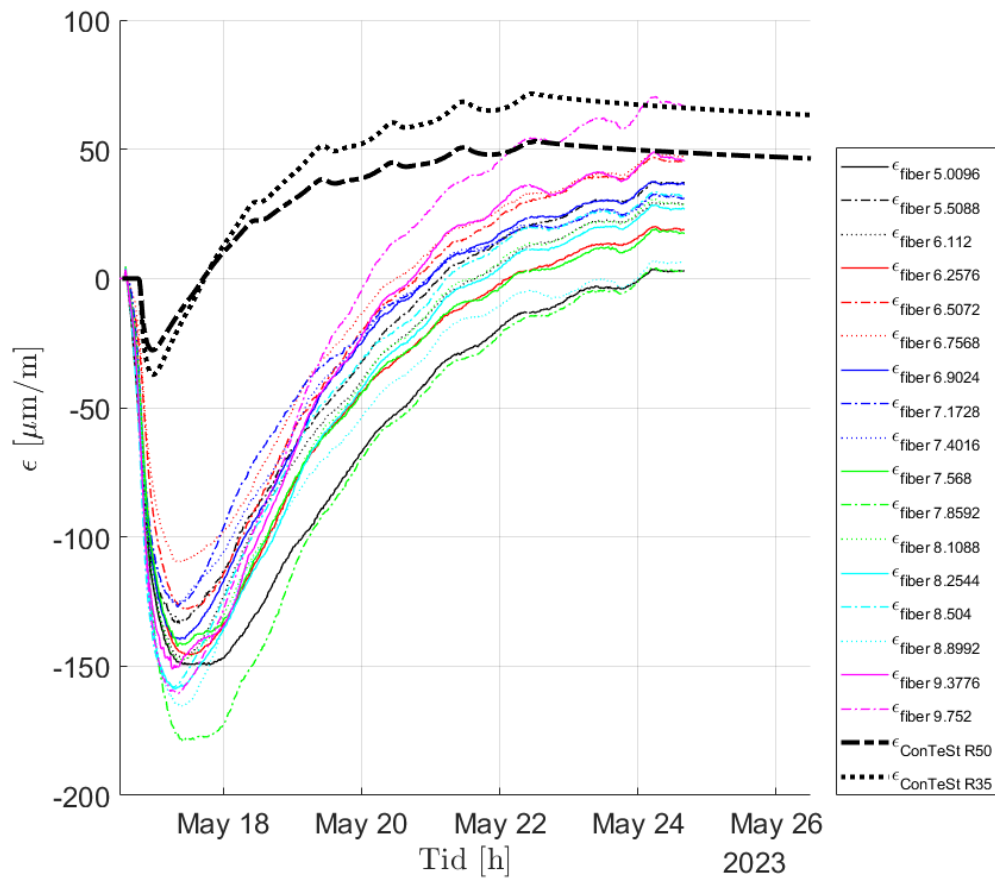
Tvångsfaktorn måste bestämmas för töjningssensors position i konstruktionen. I föreliggande fall är detta inte trivialt eftersom tvångssituation för den instrumenterade konstruktionsdelen är komplicerad. Balken gjuts mot en platta som i sin tur gjuts fast på höga stödmursegment. Plattan gjuts fast i stödmursegmentens frontmur och på sidoväggarna, jämför avsnitt 3.3 och Figur 24. En tvångsanalys med linjär elastiska 3D beräkningar ger en tvångsfaktor i intervallet 0,25 – 0,60, beroende på hur man ser på fastlåsningseffekter från stödmursegmenten på plattan. En tvångsfaktor på 0,60 förutsätter fullständig fastlåsning av plattan i underkant, vilket kan anses vara för konservativt. Vi har utfört analyser med tvångsfaktorer på 0,35 och 0,50 vilket kan anses

representera ett realistiskt spann för tvånget i tøjningssensorns position. Beräknad mätbar tøjning för en tvångsfaktor 0,35 redovisas i Figur 57.



Figur 57: Total tøjning, fiktiv tøjning och mätbar tøjning. T.v. som kvot, t.h. i $\mu\text{m}/\text{m}$. Beräkningsresultat från ConTeSt för tvångsfaktor 0,35. Beräkning utförd med indata från temperaturmätning för gjutning 2 och anpassade materialparametrar avseende temperaturutveckling för att efterlikna uppmätt temperatur.

I Figur 58 presenteras en jämförelse av uppmätta tøjningar och beräknade (mätbara) tøjningar. Skillnader framför allt på trycksidan blir tydliga, även tidpunkten för nollspänning avviker. Vi kan inom ramen av detta projekt inte fortsätta att analysera data vidare. Eventuellt kan nollställning av tøjningsmätning vid senare tidpunkt förbättra överensstämmelsen. Det bör beaktas att enbart den tøjningsandelen efter nollspänningstidpunkt (eller nolltøjningstidpunkt), jämför Figur 56, är av betydelse för sprickriskberäkningar. En analys av data enbart efter nollspänningstidpunkten borde kunna ge intressanta resultat



Figur 58: Jämförelse av uppmätt töjning för ett antal mätpunkter samt beräknad mätbar töjning från ConTeSt för tvångsfaktor 0,35 och 0,50.

5 Diskussioner och slutsatser

5.1 Uppsättning mätsystem och dataöverföring

Temperaturloggare från Celsicom är avsedda för bruk på byggplatser. De är batteridrivna, vattentäta och stöttåliga. Installation av termoelement är enkelt och de tunna trådarna kan tejpas mot armering eller mot form. Dataöverföring sker automatiskt, tillgång till mobilnät krävs dock. Referensgivaren i loggaren och därmed uppmätta temperaturer påverkas av direkt sol. Den teoretiskt enkla lösningen är att placera utrustningen i skugga. Detta är inte alltid möjligt under fältförhållanden eller så kan det krävas långa kablar som riskera skadas på en byggplats.

Det fiberoptiska mätsystemet från LUNA kan i levererad konfiguration anses vara ett system för bruk i laboratoriet. Många ingående komponenter är känsliga mot stötar, temperatur, fukt och damm. För bruk i fält måste styrdator och interrogator placeras i tempererade och fuktskyddade utrymmen. Vissa externa komponenter måste också fuktskyddas. Det krävs extra utrustning och tillbehör (UPS, 4G-modem, skydd) för att kunna genomföra mätningar i fält utan att riskera dataförlust eller att skada utrustningen. Vid ständig närvaro på mätplatsen kan dataöverföring dock utföras manuellt. Det skapas förhållandevis stora mängder data. Kompatibilitetsproblem mellan Linux-operativsystemet och övriga enheter (UPS, 4G-modem) skapade oväntade problem. För att lösa dessa krävs det IT kunskaper som överstiger normalanvändarens kompetens. För att backa upp mätvärden måste mätningen stoppas, data sparas och överförs och mätningen startas igen. Detta kan ske på plats eller via fjärranslutning. Vi har inte kunnat automatisera proceduren och enligt uppgift från tillverkaren är detta inte möjligt i dagsläget.

Dataöverföringen var problemfri när kompatibilitetsproblemen var lösta, bl.a. eftersom täckningen i mobilnätet var bra vid mätstället. Den stora datamängden som genereras kan i avlägsna områden skapa problem med dataöverföring via mobilnät.

Den fiberoptiska mätutrustningen kunde endast hyras i två månader inom projektets budget. Därmed blev uppstartsperioden förhållandevis lång, vi lyckades ändå med stöttning av Peabs platsorganisation att genomföra två mätningar över sammanlagt mer än 3 veckors tid.

5.2 Installation av fiberoptiska sensorer

Vid installation av de fiberoptiska sensorerna fokuserades det på att koppla loss framför allt töjningssensorn från armering och övriga styva ingjutningsdetaljer så mycket som möjligt. Motiveringen var att kunna mäta betongens deformationer i tidig ålder, inte armeringens (som är mycket styvare än hårdnande betong). Ändå måste sensorernas position i mätobjektet vara känd, därmed krävs det någon typ av fixering.

Vid första mätning tejpades temperatursensorn till ett monteringsjärn som var försedd med två extra lager tejp. Bortsett från en eventuell temperaturutjämnning längs monteringsjärnen borde inte temperaturmätningen störas av monteringsjärnet. Fastsättning av töjningssensorn i plastringar anses mindre lyckad, sensorn förflyttades under gjutning/kompaktering och utsattes för kraftiga påkänningar. Det är möjligt att töjningssensorn är ställvis kraftig krökt i höjd- eller sidled. Det är även möjligt att sensorn har blivit skadad under gjutningen i den fri hängande delen.

Vid andra mätningen isolerades monteringsjärnet och sensorerna tejpades mot isoleringen. Monteringen kändes säkrare än vid gjutning 1, sensorernas position påverkades inte under gjutning. Genom att isolera monteringsjärnet borde temperaturutveckling inte ha påverkats. Isoleringen förhindrar att betong och armering samverkar. Därmed borde armeringsjärnet inte ha

påverkat omgivande betongen. Det är tänkbart att lokala anomalier förekommer i övergångszonen isolering-betong där töjningssensorn är fastgjuten och att detta kan leda till störningar i töjningsmätningen.

Vi har inom ramen av detta projekt inte kommit på ett säkrare eller bättre sätt att gjuta in sensorerna om de ska vara bortkopplad från styva ingjutningsgods. Att enbart lägga sensorerna på betongytan när en viss nivå i gjutningen har uppnåtts och sedan fortsätta gjuta anses inte genomförbart under fältförhållanden i en fullskalig gjutning med vibrerad betong. Risken är mycket stort att sensorn förflyttas okontrollerat. Eventuellt kan detta lyckas i småskaliga provkroppar i laboratoriet.

I exempel från litteraturen limmas töjningssensorn för mätningar inuti betongen till armeringsjärn eller andra metalliska ingjutningsgods. Tillverkaren tillhandahöll försöksredovisningar där sensorn enbart tejpades med jämna mellanrum mot armeringsjärn. Försöket syftade dock på att mäta töjning i hårdnad betong där armering och betong samverkar.

Vi anser inte att limning av töjningssensorn till armeringsjärn, kompositstång eller liknande styva material kan ge den information som eftersöks inom projektet, dvs. att mäta töjningar av hårdnande betong.

5.3 Temperaturmätning

Det finns skillnader i resultat för temperaturmätning med termoelementen och fiberoptiken. Vid gjutning 1 påverkades termoelementen mera av solinstrålning på mätinstrumentet än för gjutning 2. Temperaturmätning med fiberoptiken uppvisar variationer längs mätsträckan inuti betongen som är svårt att förklara. Eventuellt kan avvikelserna bero på vald installationsmetod av den fiberoptiska sensorn.

Temperaturmätning i ung betong med termoelement anses vara väl beprövad och ge tillförlitliga resultat om loggningsutrustningen skyddas från direkt sol.

Vi ser inget direkt mervärde i en kontinuerlig temperaturmätning längs en sträcka inuti betong under härdning. Temperaturmätningen med fiberoptiken är dessutom relativ och måste kompletteras med en annan mätteknik för att få absoluta värden.

Däremot behövs det en temperaturmätning i den hårdnande betongen för att kunna temperaturkompensera töjningsmätningen. Temperaturkompenseringen är enklare att genomföra med grunddata från samma system. Vi har inte provat att genomföra temperaturkompensationen med temperaturdata från ett annat mätsystem, t.ex. termoelementen. Det är dock tekniskt möjligt att anpassa temperaturmätningen från t.ex. termoelementen till tidsstegen i töjningsmätningen och genomföra temperaturkompensationen utan att mäta temperatur med fiberoptiken.

5.4 Töjningsmätning

Töjningsmätningar i hårdnande betong är enligt tidigare erfarenhet svårt att utvärdera och kan ge varierande resultat. Vi anser dock att det finns en potential i mätmetoden med kontinuerliga fiberoptiska sensorer. Vi anser att metoden är lämpligt för att kunna studera töjningar i hårdnande betong, då inverkan av styva ingjutningsgods på uppmätta töjningar kan minimeras.

Uppmätta töjningar har inte visat på förekomst av sprickor vilket bekräftas av observationer i fält.

Resultaten av töjningsmätningen måste temperaturkompenseras, vilket kan ge upphov till avvikelser i resultat. För att kunna jämföra resultat från töjningsmätning med beräknade töjningar måste tvånget i töjningssensorns position uppskattas eller bestämmas genom mätning.

5.5 Automatiserad datalagring, utvärdering och implementering

Systemet för temperaturmätning med termoelement (Celsicom TC603) är utvecklat och avsett för automatiserad loggning, överföring och utvärdering av temperaturmätningar. En molntjänst för lagring av data och resultat finns, tillgängligt via dator och mobil. Datamängden som genereras är mycket begränsad.

Det fiberoptiska systemet är i den konfigurationen som testades inte lämpligt för automatiserad dataöverföring, datalagring och utvärdering. Mätningarna måste stoppas och startas manuellt för att kunna backa upp mätdata. Det genereras stora datamängder som måste överföras. Överföringen av data i sig kan sannolikt automatiseras. Med den valda metoden för sensorinstallationen krävs det en hel del handpåläggning för att sortera bort misstänkt felaktiga mätvärden (tejpställen). Med tillräckligt kraftfulla verktyg kan det dock vara möjligt att utveckla ett sätt att presentera uppmätta data automatiserad. Själva utvärdering anses inte kunna automatiseras i dagsläge. Det är för många steg som kräver handpåläggning och rensning av data.

5.6 Möjligheter att anpassa materialparametrar för sprickriskberäkningar

5.6.1 Temperatur

Det är möjligt att anpassa materialparametrar avseende betongens temperaturveckling genom en temperaturmätning i fält. Anpassning av materialparametrar avseende temperaturutveckling kan utföras med hjälp av "trial-and-error" eller genom användning av olika optimeringsverktyg. För en fullständig anpassning av materialparametrar för temperatur-och mognadsutveckling krävs dock komplettering av temperaturmätningen med undersökning av hållfasthetsutveckling i tid och vid olika temperaturer.

5.6.2 Sprickrisk

Vi har inom ramen av detta projekt inte kunnat undersöka möjligheten att anpassa materialparametrar för sprickriskberäkningar.

Detta beror bland annat på att tvångssituationen för aktuell konstruktion är komplicerad och vi kan enbart uppskatta tvånget genom linjär elastiska beräkningar. Om flera mätningar hade kunnat utföras hade dessa kunnat användas för att kvantifiera tvånget. I idealfallet utförs en parallell mätning i en icke tvångsutsatt kropp med liknande geometri.

En annan orsak är att vi bara har tillförlitliga mätresultat från en mätning och att resultaten inom denna mätning varierar en del.

Den fiberoptiska mätutrustningen anses mera lämpad för försök under kontrollerade förhållanden än rena fältmätningar (på byggplatser i tidspressad produktion). Om mätningar utförs under mera kontrollerade förhållanden och kompletteras med övriga materialundersökningar kan det eventuellt vara möjligt att anpassa materialparametrar avseende relaxation och uppsprickningsmekanism. Detta kräver dock att konstruktionen tillåts att spricka.

5.7 Rekommendationer för fortsatt utveckling

Vi har inom ramen av detta projekt kunnat mäta och analysera töjningar i hårdnande betong

genom fältmätningar. Vi anser att det finns utrymme för att förbättra det i rapporten beskrivna förfarandet och därmed erhålla mera tillförlitliga resultat.

Det är möjligt att den valda installationsmetoden av de fiberoptiska sensorerna har inverkat negativt på mätresultaten. Detta gäller framför allt töjningssensorn. Vi har dock inte kommit på ett säkrare sätt att installera sensorerna om påverkan av styva ingjutningsgods ska minimeras. Det finns olika varianter av fiberoptiska sensorer. I princip är den optiska fibern som används för själva mätningen identiskt i olika sensorer, det är skyddshölje och dess styvhet samt ytbeskaffenhet som är olika. För ingjutning i betong rekommenderades de använda sensorerna av tillverkaren. Temperatursensorn är mycket styvare och känns ”stryktåligare” än töjningssensorn. Eventuellt kan en annan, mera tålig töjningssensor vara lämpligare för fältmätningar. Sannolikt sjunker dock upplösning och noggrannhet av mätresultaten om en styvare sensor används. Detta kunde inte undersökas inom ramen av detta projekt.

Flera mätningar bör genomföras på konstruktioner med liknande geometri som gjuts med samma betong. Därmed kan först en relevant tvångsfaktor bestämmas och sedan kan beräknade och uppmätta töjningar jämföras bättre. Eventuellt kan tvångsfaktorn bestämmas samtidigt om en längre töjningssensor (eller flera kortare sensorer) används så att töjningar bestäms för olika positioner i en gjutning samtidigt.

Rådata från mätningarna lämnas ut på begäran till intresserade som kan/vill bidra med vidare analyser av data.

Referenser

Bado M F, Casas J R, Dey A, Berrocal C G, Kaklauskas G, Fernandez I, Rempling R, 2021. Characterization of concrete shrinkage induced strains in internally-restrained RC structures by distributed optical fiber sensing. *Cement & Concrete Composites*, 120 (2021).

ConTeSt Pro, 2008. User's Manual - Program for Temperature and Stress Calculations in Concrete, Developed by JEJMS Concrete AB in co-operation with Lulea University of Technology, Cementa AB and Peab AB. Lulea, Sweden

Hösthagen A, 2017. Thermal Crack Risk Estimation and Material Properties of Young Concrete, Licentiate Thesis. Luleå. ISSN 1402-1757

Fei S, Dongyu X, Xin C, Shifeng H, 2021. Mechanical Sensing Properties of Embedded Smart Piezoelectric Sensor for Structural Health Monitoring of Concrete, *Research in Nondestructive Evaluation*, 32:2, 88-112, DOI: 10.1080/09349847.2021.1887418

Jonasson J-E, Wallin K, Nilsson M, 2009. Gjutning av vägg på platta - Studier av sprickrisker orsakat av temperaturförloppet vid härdningen. LTU forskningsrapport, Luleå tekniska universitet, Institutionen för samhällsbyggnad, Avdelningen för konstruktionsteknik. ISBN 978-91-86233-73-0, 2009.

Larson M, 2003. Thermal crack estimation in early age concrete – Models and methods for practical application. Doctoral Thesis 2003:20, 190 pp. ISBN 91-86580-06-0.

Malm R, Enzell J, 2018. Full-scale test of the Dome Plug for KBS-3V deposition tunnels. Project summary and evaluation of the final results. Technical Report TR-18-02. www.skb.se

Nilsson M, Hedlund H, Emborg M, Jonasson J-E, Bernander S, 2015. Tvång för sprickanalyser. Tvång i betongkonstruktioner. SBUF ID 11618

Samiec D, 2011. Quasi-kontinuierliche faseroptische Sensortechnik für lange Messstrecken. <https://magazine.polytec.com/de/verteilte-faseroptische-temperatur-und-dehnungsmessung>.

SBUF projekt 14096, STAR – Temperatursprickdata för klimatförbättrad betong

Wong A C L, Childs P A, Berndt R, Macken T, Peng G-D, Gowripalan N, 2007. Simultaneous measurement of shrinkage and temperature of reactive powder concrete at early-age using fibre Bragg grating sensors. *Cement & Concrete Composites*, 29 (2007).

Bilagor

Bilaga A: Materialmodeller i ConTest

Nedan redovisas använda materialmodellssamband för såväl termiska som mekaniska egenskaper samt spänningsberäkningsmetodik i ConTeSt 5.1.

Hållfasthetsutvecklingen för betongens tryckhållfasthet modelleras med hjälp av en tendenskurva framtagen för 20°C, *referenshållfasthet* [MPa] (Fjellström, 2013)

$$f_{cc}^{ref} = \begin{cases} 0 & \text{för } 0 \leq t_e < t_S \\ \left(\frac{t_e - t_S}{t_A - t_S}\right)^{n_A} \cdot f_A & \text{för } t_S \leq t_e < t_A \\ \exp\left(s \cdot \left(1 - \left(\frac{672 - t^*}{t_e - t^*}\right)^{n_{cc,28}}\right)\right) \cdot f_{cc,28} & \text{för } t_e \geq t_A \end{cases} \quad (1)$$

där

- t_S = ekvivalent tid då hållfastheten börjar utvecklas [h]
- t_A = ekvivalent tid då hållfastheten nått f_A [h]
- n_A = kurvformparameter [-]
- f_A = tryckhållfasthet vid då betongen ej kan glättas. Vanligtvis 0.5 MPa. [MPa]
- s = kurvformparameter [-]
- $n_{cc,28}$ = kurvformparameter [-]
- $f_{cc,28}$ = 28 dygnshållfastheten [MPa]

$$t^* = \frac{672 - \delta_c \cdot t_A}{1 - \delta_c} \quad (2)$$

där

$$\delta_c = \left(1 - \frac{1}{s} \cdot \ln \frac{f_A}{f_{cc,28}}\right)^{1/n_{cc,28}} \quad (3)$$

En representation för betongens hydrationshastighet är mognadstiden eller **ekvivalent tid** [t] (Jonasson, 1994) som beräknas enligt

$$t_e = \beta_\Delta \int_0^t \beta_T \cdot dt + \Delta_{t_e}^0 \quad (4)$$

där

$$\beta_T = \exp\left(\theta \left[\frac{1}{293} - \frac{1}{T+273}\right]\right) \quad (5)$$

och

$$\theta = \theta_{ref} \left(\frac{30}{T+10}\right)^{k_3} \quad (6)$$

där

- t = realltid [t]
- T = betongens temperatur [°C]
- θ_{ref} = aktiveringsenergin delat med allmänna gaskonstanten [°K]
- k_3 = parameter som ger aktiveringsenergens temperaturkänslighet [-]

Utifrån referenshållfastheten och ekvivalent tid kan momentan tryckhållfasthet beräknas oavsett temperaturförlopp.

Eventuellt **reducerad hållfasthet** [MPa] (Fjellström, 2013) orsakad av förhöjd härdningstemperatur beskrivs av

$$f_{cc} = f_{cc}^{ref} - f_{cc28} \cdot \gamma_{drop} \cdot \Delta_{drop28}^{max} \quad \text{för } t_e \geq 0 \quad (7)$$

där

$$\begin{aligned} \Delta_{drop28}^{max} &= \text{maximalt hållfasthetstapp vid } t_e = 28d [-] \\ \gamma_{drop} \{0,1\} &= \text{faktor som tar hänsyn till temperaturnivån under härdningen [-]} \end{aligned}$$

Tekniken att beskriva hållfasthetstappet enligt ekvation 7 baseras på följande karakteristiska observationer

- 1) Hållfasthetstappet startar vid någon minsta temperatur, funktionen γ_{Temp} .
- 2) Höga temperaturer påverkar hållfasthetstappet först efter viss tid, funktionen γ_{time} .

Den tredje effekten bygger på antagandet att

- 3) Hållfasthetstappet beror på (skenbara) hydratationshastigheten ($d\alpha^*/dt_e$) vilket motsvarar bildad mängd hydratationsprodukter per tidsenhet.

Funktioner som beaktar dessa tre fenomen är

$$1 \quad \frac{\delta_{drop}}{\delta_{ref}} = \gamma_{drop} \quad (8)$$

med

$$2 \quad \int_0^{t_e} \gamma_{Temp} \cdot \gamma_{time} \cdot \frac{d\alpha^*}{dt_e} \cdot dt_e = \delta_{drop} \quad (9)$$

och

$$3 \quad \int_0^{672h} \gamma_{time} \cdot \frac{d\alpha^*}{dt_e} \cdot dt_e = \delta_{ref} \quad (10)$$

Funktionen som beaktar temperaturnivån, γ_{Temp} , formuleras enligt

$$4 \quad \exp\left(-\left[\frac{T}{Temp_D}\right]^{-\kappa_{Temp}}\right) = \gamma_{Temp} \quad (11)$$

där

$Temp_D$ = anpassningsparameter [°C]

κ_{Temp} = anpassningsparameter [-]

och funktionen som beaktar tidsförloppet, γ_{time} , enligt

$$5 \quad \exp\left(-\left[\frac{t_e}{time_D}\right]^{-\kappa_{time}}\right) = \gamma_{time} \quad (12)$$

där

$time_D$ = anpassningsparameter [h]

κ_{time} = anpassningsparameter [-]

Den beräknade skenbara hydratationshastigheten sker genom tidsderivering av hydratationsgraden formulerad enligt

$$6 \quad \alpha^* = \exp\left(-\left[\ln\left(1 + \frac{t_e}{t_1}\right)\right]^{-\kappa_1}\right) \quad (13)$$

och

$$\alpha = \alpha^* \cdot \alpha_u \quad (14)$$

och dess tidsderivata blir

$$7 \quad \frac{d\alpha^*}{dt_e} = \frac{\alpha^*}{t_1 + t_e} \cdot \kappa_1 \cdot \left[\ln\left(1 + \frac{t_e}{t_1}\right)\right]^{-(\kappa_1 + 1)} \quad (15)$$

där

- α^* = skenbar hydratationsgrad [-]
 α = hydratationsgrad [-]
 α_u = hydratationsgrad efter "oändlig tid" [-]

Betongens värmeutveckling [W/(t · m³)] under hydratationen (Jonasson, 1994), beskrivs av

$$Q_h(t) = \frac{dq_{cem}(t)}{dt} \cdot C \quad (16)$$

där

- Q_h = utvecklad värme i betongen per volymenhet [W/m³]
 C = cementhalt [kg/m³]

där

$$q_{cem}(t) = \exp\left(-\left(\ln\left(1 + \frac{t_e}{t_1}\right)\right)^{-\kappa_1}\right) \cdot q_u \quad (17)$$

där

- q_u = utvecklad värme efter "oändlig" tid per cementmängd [J/kg]
 κ_1 = anpassningsparameter [-]
 t_1 = anpassningsparameter [s]

Temperaturrelsekoefficienter [1/°C] (Hedlund, 2000) vid variabel temperatur beskrivs av

$$\alpha_T = \begin{cases} \alpha_E & \text{för } \frac{\partial T}{\partial t} \geq 0 \\ \alpha_C & \text{för } \frac{\partial T}{\partial t} < 0 \end{cases} \quad (18)$$

där

- α_E = betongens temperaturutvidgningskoefficient [1/°C]
 α_C = betongens temperaturkontraktionskoefficient [1/°C]

Autogen krympning [-] (Stelmarczyk, Rapp, Hedlund, 2022), självtorkningen, beskrivs av

$$\varepsilon_{SH} = \begin{cases} 0 & \text{för } t_e < t_{e0} \\ \varepsilon_1 \cdot \left(\frac{t_e - t_{e0}}{t_{SH} - t_{e0}}\right) & \text{för } t_{e0} \leq t_e < t_{SH} \\ \varepsilon_1 + \varepsilon_{ref} \cdot \exp\left(-\left(\frac{t_{s0}}{t_e - t_{SH}}\right)^{\eta_{SH}}\right) & \text{för } t_e \geq t_{SH} \end{cases} \quad (19)$$

där

- ε_1 = maximal autogen krympning för linjär fas [-]
 t_{e0} = tidpunkt där autogen krympning startar [h]
 t_{SH} = tidpunkt där autogen krympning övergår från att vara linjär till exponentiell [h]
 ε_{ref} = maximal autogen krympning vid "oändlig" tid [-]
 t_{s0} = anpassningsparameter [h]
 η_{SH} = kurvformparameter [-]

Krympningen definieras som den deformationsökning som sker med tiden för en belastad betongkropp. Krympning sker för både tryck-och dragbelastad betong.

Krympningen modelleras i ConTeSt m.h.a. parallellkopplade Maxwell element vars fjäderstyvheter är mognadsberoende, se (Bažant, Chern, 1985). För att kunna ansätta betongspecifika fjäderstyvheter behöver krympningen eller relaxationen provas. Att mäta betongens krympning är enklast ur ett mättekniskt perspektiv. Vid provningsproceduren mäts den totala töjningen och ett sätt att beskriva den totala töjningen är att ange töjning per pålagd spänningenshet, vilket definieras som kompliansen [1/Pa]
 $J_c(\Delta t_{load}, t_0) = \varepsilon_c(\Delta t_{load}, t_0) / \sigma_c(t_0) = J_{c0}(t_0) + J_{cc}(\Delta t_{load}, t_0) \quad (20)$

där

ε_c = betongens totala töjning [-]
 σ_c = pålagd spänning [MPa]

$J_{c0}(t_0)$ är elastisk del och $J_{cc}(\Delta t_{load}, t_0)$ är krypdel av kompliansen. Med känd E-modul beräknas den totala töjningen som "elastisk" deformation med hjälp av två räta linjer i logaritmisk tidsskala med avseende på belastningsvidden Δt_{load} (Larson, 2003) enligt:

$$J(\Delta t_{load}, t_0) = \frac{1}{E(t_0)} + \begin{cases} a_1(t_0) \cdot \log\left(\frac{\Delta t_{load}}{\Delta t_0}\right) & \text{for } \Delta t_0 \leq \Delta t_{load} < \Delta t_1 \\ a_1(t_0) \cdot \log\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_0}\right) + a_2(t_0) \cdot \log\left(\frac{\Delta t_{load}}{\Delta t_1}\right) & \text{for } \Delta t_{load} \geq \Delta t_1 \end{cases} \quad (21)$$

där

Δt_{load} = tidsspann efter pålastning, $t-t_0$, [d]
 t_0 = tid vid pålastning [d]
 t = tid efter blandning [d]
 $E(t_0)$ = elasticitetsmodul vid pålastning [Pa]
 Δt_0 = "elastiskt" tidsspann efter pålastning (ofta ansatt värde är 0.001) [d]
 Δt_1 = brytpunkt för kryphastighet [d]
 $a_1(t_0)$ = 1:a "logaritmiska" kryphastigheten [$\text{Pa}^{-12} / \log(\Delta t_{load})$]
 $a_2(t_0)$ = 2:a "logaritmiska" kryphastigheten [$\text{Pa}^{-12} / \log(\Delta t_{load})$]

Utifrån kompliansen bestäms sedan ett relaxationsspektrum [GPa], som anger fjäderstyvheterna m.a.p. mognadsålder och relaxationstid (Jonasson, Westman, 2001)

$$R(t, \tau) = \sum_{\mu=1}^n E_{\mu}(t_0) \cdot \exp\left(-\frac{(t-t_0)}{\tau_{\mu}}\right) \quad (22)$$

där

n = antal Maxwell element [-]
 $E_{\mu}(t_0)$ = styvhet för det μ :e elementet vid tid för pålastning [GPa]
 τ_{μ} = relaxationstid för det μ :e elementet [d]

Relaxationsspektrumet används av ConTeSt för att bestämma effektiv E-modul.

Spänningsberäkning sker som stegräkning i tid, och för beräkning från tiden = t_i till tiden t_{i+1} kan spänningsändringen från σ_i till σ_{i+1} direkt uttryckas av den konstitutiva ekvationen enligt:

$$\sigma_{i+1} = \sigma_i + \Delta\sigma_{i+1} \quad (23)$$

med

$$\Delta\sigma_{i+1} = E_{i+1}^{tot} \cdot (\Delta\varepsilon_{m,i+1} - \Delta\varepsilon_{i+1}^0) \quad (24)$$

där

E_{i+1}^{tot} = totalt fiktiv elasticitetsmodul inklusive krypning under tidssteget samt tillämpning av icke-linjär arbetskurva enligt figur 1 [GPa]
 $\Delta\varepsilon_{m,i+1}$ = ändring av spänningsrelaterad "material"-töjning under tidssteget [-]
 $\Delta\varepsilon_{i+1}^0$ = total icke-elastisk deformation under tidssteget [-]

Den fiktiva E-modulen beskrivs av

$$E_{i+1}^{tot} = E_{cc,i+1} \cdot (1 + \gamma_d) \quad (25)$$

där

$E_{cc,i+1}$ = effektiva E-modulen inklusive krypeffekter beräknad ur relaxationsspektrat [GPa]
 γ_d = korrektionsfaktor för icke-linjär tillämning av betongens arbetskurva, figur 1 [-]

Vid monoton pålastning längs jungfrukurvan för $\sigma/f_{ct} > \alpha_{ct}$ gäller följande

$$\gamma_d = \exp\left(-\frac{\varepsilon_{m,i+1} - \alpha_{ct}}{1 - \alpha_{ct}}\right) - 1 \quad (26)$$

där

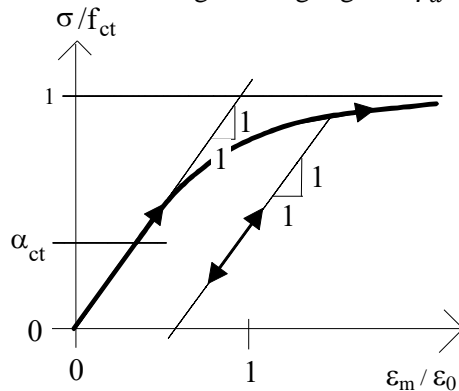
$\varepsilon_{m,i+1}$ = medelvärde av spänningsrelaterad "material"-töjningen under tidssteget [-]

$\varepsilon_0 = f_{ct}/E_{cc,i+1}$ = töjningen där en tänkt rak arbetskurva uppnår draghållfastheten [-]

f_{ct} = betongens draghållfasthet [MPa]

α_{ct} = gränsen för den linjära arbetskurvan för betongen, se figur 1 [-]

För alla andra fall av belastningsändringar gäller $\gamma_d = 0$, vilket är liktydigt med "lutningen = 1" i figur 1.



Figur 1. Antaget spännings-töjnings-samband (s k arbetskurva) för betong

Betongens draghållfasthet, f_{ct} , relateras till tryckhållfastheten enligt

$$f_{ct} = (f_{cc}/f_{cc}^{ref})^{\beta_1} \cdot f_{ct}^{ref} \quad (24)$$

där

f_{cc} = aktuell tryckhållfasthet [MPa]

f_{ct}^{ref} = referensdraghållfasthet, ofta ansatt vid 28 d [MPa]

β_1 = relationsparameter mellan drag och tryckhållfasthet enligt Eurocode 1992-1-1 [-]

Den totala icke-elastiska deformationen under tidssteget uttrycks av

$$\Delta\varepsilon_{i+1}^0 = \Delta\varepsilon_{rel} + \Delta\varepsilon_T + \Delta\varepsilon_{SH} \quad (25)$$

där

$\Delta\varepsilon_{rel}$ = icke-linjär töjningsändring beräknad ur betongens relaxation under tidssteget

$\Delta\varepsilon_T$ = töjningsändring av temperaturändring under tidssteget

$\Delta\varepsilon_{SH}$ = krympningsändring under tidssteget

För att ha möjlighet att beakta s k "spänningsinducerade" deformationer (Bažant, Chern, 1985 och Jonasson, 1994) kan spänningsberoende temperatur- och fuktrelaterade fritöjningar behöva justeras enligt

$$\Delta\varepsilon_T = \Delta\varepsilon_T^0 \cdot \left(1 + \rho_T \cdot \frac{\sigma}{f_{ct}} \cdot \text{sign}(\Delta T)\right) \quad (26)$$

$$\Delta\varepsilon_{SH} = \Delta\varepsilon_{SH}^0 \cdot \left(1 + \rho_\varphi \cdot \frac{\sigma}{f_{ct}} \cdot \text{sign}(\Delta\varphi)\right) \quad (27)$$

där

ρ_T = anpassningsparameter [-]

ρ_φ = anpassningsparameter [-]

ΔT = temperaturändring [°C]

$\Delta\varphi$ = relativ fuktighetsändring [-]

Referenser

Bažant Z P, Wu S T (1974) *Rate-type creep law for aging concrete based on Maxwell-Chain*, Materials and Structures (RILEM, Paris), Vol 7. No. 37.

Bažant Z P, Chern J (1985) *Concrete Creep at Variable Humidity – Constitutive Law and Mechanisms*, Materials and Structures, Vol 18.

Fjellström P (2013) *Measurement and Modelling of Young Concrete Properties*, Licentiate Thesis, Dept. of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden.

Hedlund H (2000) *Hardening Concrete – Measurements and Evaluation of Non-Elastic Deformation and Associated Restraint Stresses*, Doctoral Thesis, Dept. of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden.

Larson M (2003) *Thermal Crack Estimation in Early Age Concrete – Models and Methods for Practical Application*, Doctoral Thesis, Dept. of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, Luleå University of Technology, Luleå.

Jonasson J-E (1994) *Modelling of Temperature, Moisture and Stresses in Young Concrete*, Division of Structural Engineering, Luleå University of Technology, Doctoral Thesis 1994:153D.

Jonasson J-E, Westman G (2001) *Conversion of Creep Data to Relaxation Data by the Program RELAX*, IPACS Document, TG 3.2/1, Dept. of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, Luleå University of Technology, Luleå.

Stelmarczyk M, Rapp T, Hedlund H (2022) *Analys av spänningsberäkning i ConTeSt och framtagning av prototyp för Produktplanering Betong*, SBUF ID:14016.