

KARTLÄGGNING AV KRAFTER I HÖGHUS AV BETONGELEMEN GENOM MÄTNING

Undersökning av pelare i Norra Tornen - Helix



Foto: Laurian Ghintoiu

Björn Täljsten, Luleå Tekniska Universitet
Avdelningen för Byggkonstruktion och Brand

Kontaktuppgifter till författaren är:

Professor Björn Täljsten (bjorn.taljsten@ltu.se), Tel: 070-537 43 70

Avdelningen för Byggkonstruktion och Brand

Institutionen för Samhällsbyggnad och Naturresurser

Luleå Tekniska Universitet

971 87 Luleå

FÖRORD

Höga hus i storstäderna i Sverige har blivit mer frekventa senaste åren. Turning Torso i Malmö som stod färdigt 2005 visade vägen och nu har flera spektakulära byggnader med avsevärd höjd uppförts eller håller på att uppföras även i Stockholm och Göteborg. Höga byggnader medför ökade belastningar på byggnadsverket, inte minst på grund av vind och egentyngh. Dessutom kan i vissa fall själva produktionsmetodiken vara komplicerad, speciellt i svåråtkomliga områden. För att skapa en effektivare byggprocess använder man för höga hus en ökad grad av prefabricering, i första hand av betongelement.

I denna rapport har vi kartlagt påkänningar hos ett prefabricerat byggnadselement av betong, en pelare, som installerats i ett av de sk Norra Tornen, Helix, i Solna. Mätning har genomförts under hela byggnadens uppförande. Detta innebär att vi genomfört mätningar under gjutning, härdning, transport, installation och till och med byggandet av den sista och 36:e våningen. Detta SBUF-projektet påbörjades under tidig höst 2018 och avslutades i december 2020.

Syftet med projektet har varit att försöka erhålla ökad kunskap om påkänningar under de olika delarna av byggskedet samt att jämföra teoretiska beräkningar genom FE-analys med uppmätta resultat.

Målsättningen har vidare varit att resultatet från projektet i förlängningen skall kunna leda till mer precisa beräkningsmodeller med möjlighet att till större grad optimera framtidens stommar med avseende på såväl tillverkning, byggande och i brukande.

Författaren vill passa på att tacka såväl byggherren Oscar Properties (OP) samt SBUF för finansiellt stöd och även personalen på OP (ingen nämnd och glömd) för stöd under platsbesöken.

Författaren vill också tacka examensarbetaren Adam Söderström vid Umeå Universitet och inte minst Mikael Linde på SWECO i Sundsvall som var med och initierade projektet. Tack även till SCF Betongelement AB i Strömsund som på ett tacknämligt sätt hjälpte oss i samband med gjutning och transport. Utöver detta vill jag rikta ett tack till LISAB och Carlos Lindau, som var behjälpliga med installation av såväl givare som mätutrustning.

Stockholm i februari 2021

Björn Täljsten

SAMMANFATTNING

Under 2018-2020 genomfördes en undersökning av en installerad prefabricerad betongpelare dimensionerad av SWECO i ett av Norra Tornen, Helix i Solna. Innan installation av pelaren hade den försetts med töjningsgivare i betong och på stålarmering i samband med gjutning vid SCF:s fabrik i Strömsund. Pelaren installerades i entréplanet och total byggnadshöjd är 110 m i 36 våningar.

Syftet med undersökningen var att öka kunskapen angående påkänningar i byggnadselement i samband med såväl gjutning, transport och installation samt under uppförande till färdig byggnad.

Byggnaden har dimensionerats av SWECO och det är även SWECO som har gjort lastnedräkning på pelaren.

Vi har använt oss av ett sladdlöst mätsystem, men på grund av restriktioner kring arbetsplatsen och att pelaren var omsluten av kraftiga betongväggar har data fått hämtas manuellt.

I studien har vi beräknat och i fält mätt krympning, där beräknade och uppmätta värden stämmer relativt bra överens. Vi har inte tagit hänsyn till krympningen i beräkningarna, dels för att det inte har varit möjligt att skilja den elastiska töjningen som hänförs till last från krympningen, men också eftersom det från mätningen visar på relativt små påkänningar det första 1,5 åren. Vi har dock beräknat kryptal och jämfört det med tabulerade värden samt värden framräknade av SWECO – samtliga baserat på EC2. Kryptal efter några år beräknas till ca 1.5.

Vi anser också att syftet med projektet har uppnåtts, dvs har vi erhållit en ökad kunskap om påkänningar i det prefabricerade byggnadselementet från gjutning till färdig byggnad. Vi ser t ex att vid gjuttillfället hur temperaturutvecklingen negativt kan påverka betongelementen, vilket är enkelt att åtgärda med temperaturstyrning. Vi kan inte se några negativa effekter av transport eller installation. Här uppmäts väldigt små påkänningar. Pelaren erhåller last efter ca 1 – 1,5 år då byggandet tar fart. Vi ser också hur det är möjligt att följa påkänningarna i pelaren över tiden och att, med ovanstående antagande, den beräknade lasten från mätdata stämmer relativt bra överens med den från FE-analysen beräknade.

Jämförelse mellan beräknad last och den last som erhållits genom omräkning från mätvärden stämmer förvånansvärt bra överens. Den omräknade lasten är ca 85% av den från SWECO beräknade, 5 718 kN mot 6 774 kN.

Vi kan dock inte dra tillräckliga slutsatser från mätningen för att kunna förbättra befintliga beräkningsmodeller, eller så är de tillräckligt bra för de ändamål de används och att den dimensionering som används i stor grad motsvarar vad som sker i verkligheten.

Vi ser också en förbättringspotential där det föreslås att man vid eventuellt liknande framtida projekt parallellt till en installerad komponent gjuter en referensprovkropp samt provkroppar vid ung ålder. Då skulle det vara möjligt till större utsträckning att följa såväl krympnings påverkan som effekter av krympning för den valda betongen.

FÖRKORTNINGAR OCH NOTATIONER

Förkortningar

ACI	American Concrete Institute
RH	Relativ Fuktighet
SHM	Structural Health Monitoring

Notationer

Romerska Gemener

	<i>Beskrivning</i>	<i>Enhet</i>
f_{cm}	Tryckhållfasthetens medelvärde	N/m^2
f_{ct}	Betongens draghållfasthet	
f_{ct}	Betongens draghållfasthet	
f_{cmo}	10 MPa	N/m^2
f_{cd}	Betongens tryckhållfasthet, dimensionerande värde	N/m^2
f_{ck}	Betongens tryckhållfasthet, karaktäristiskt värde	N/m^2
f_{yd}	Flytspänning stål	N/m^2
f_{ywd}	Flytspänning stålbyglar	N/m^2
h	Höjd	m
h_0	Fiktiv tjocklek	m
k_h	Koefficient	
Δl	Längdändring	m
l	Längd	m
t_0	Betongens ålder vid tid för pålastning	d
t	Betongens ålder	d
t_s	Betongens ålder vid uttorkningens början	d
u	Omkretsen för den del av tvärsnittet som är utsatt för uttorkning	m

Romerska Versaler

	<i>Beskrivning</i>	<i>Enhet</i>
A_c	Effektiv betongarea	m^2
A_{cg}	Area betongens dragzon före uppsprickning	m^2
A_s	Armeringsarea stål	m^2
E_c	Elasticitetsmodul betong	N/m^2
E_{cm}	Sekantvärde för betongens elasticitetsmodul	
E_s	Elasticitetsmodul stål	N/m^2
E_{sd}	Elasticitetsmodul stål	N/m^2
J	Komplians	m^2/N
J_0	Komplians	m^2/N
M_y	Böjmoment	Nm
M_z	Böjmoment	Nm
N_{Rd}	Normalkraft	N
N_c	Normalkraft betong	N
N_s	Normalkraft stålarmering	N
S	Spricksäkerhet	--
ΔT	Temperaturskillnad	$^{\circ}C$

Grekiska bokstäver

	<i>Beskrivning</i>	<i>Enhet</i>
α_c	Temperaturutvidgningskoefficient för betong	
α_{ds1}	Koefficient beroende av cementtyp	
α_{ds2}	Koefficient beroende av cementtyp	
$\beta_{as}(t)$	Koefficient	
$\beta_{as}(t, t_s)$	Koefficient	
β_{RH}	Koefficient beroende på relativa fuktigheten	
$\varepsilon(t)$	Töjning	
ε_{ca}	Autogen krympning	--
$\varepsilon_{ca}(t)$	Autogen krympning	--
$\varepsilon_{ca}(\infty)$	Autogen krympning	--
ε_{cd}	Uttorkningskrympning	--
ε_{cs}	Total krympning	--
$\varepsilon_{cd}(t)$	Uttorkningskrympningens tillväxt med tiden	--
ε_{ct}	Töjning	--
$\varepsilon_{cr}(t)$	Kryptöjning	--
ε_e	Elastisk töjningen – från last	--
ε_{tot}	Totala töjningen	--
ε_i	Initiell töjning	--
ε_s	Töjning i stål	--
ε_t	Töjning från temperatur	--
η	Faktor	
σ	Spänning	N/m^2
σ_c	Spänning i betong	N/m^2
σ_{ct}	Dragspänning i betong	N/m^2
τ	Tid	d
$\varphi(t)$	Kryptal	

INNEHÅLL

FÖRORD	II
SAMMANFATTNING	IV
FÖRKORTNINGAR OCH NOTATIONER	VI
FÖRKORTNINGAR	VI
NOTATIONER.....	VI
<i>Romerska Gemener</i>	<i>vi</i>
<i>Romerska Versaler</i>	<i>vi</i>
<i>Grekiska bokstäver</i>	<i>vii</i>
INNEHÅLL	VIII
INTRODUKTION	1
SYFTE OCH MÅLSÄTTNING	1
METODIK	1
BEGRÄNSNINGAR	2
PROJEKTETS GENOMFÖRANDE	2
RAPPORTENS STRUKTUR	3
BAKGRUND	5
INLEDNING.....	5
NORRA TORNEN HELIX	7
TILLVERKNING AV PROVKROPP	9
GEOMETRI OCH EGENSKAPER	9
KRYMPNING, KRYPNING OCH TEMPERATURPÅKÄNNINGAR	11
INLEDNING.....	11
KRYMPNING	11
KRYPNING.....	14
TEMPERATURPÅKÄNNINGAR	17
FEM-BERÄKNINGAR	19
INLEDNING.....	19
GLOBAL FE-MODELL.....	19
3D FE-MODELL AV PELARE	20
INTRODUKTION TILL MÄTNING	23
ALLMÄNT	23
MÄTNING PÅ PELARE FÖR INSTALLATION	25
INLEDNING.....	25
INSTALLATION AV GIVARE SAMT GJUTNING AV BETONG	26
MÄTSYSTEM	28

<i>Mätsystem under gjutning</i>	28
<i>Mätsystem under hela projektets genomförande</i>	29
RESULTAT FRÅN MÄTNINGAR	33
INLEDNING.....	33
TÖJNINGSGIVARE PÅ ARMERING	33
TÖJNINGSGIVARE PÅ BETONG	34
TEMPERATURGIVARE	36
UTVÄRDERING AV DATA	39
KRYPNING	39
KRYMPNING	39
TEMPERATUR	40
BELASTNING	41
SLUTSATSER OCH FÖRSLAG TILL FORTSATT UTVECKLING	43
SLUTSATSER.....	43
FÖRSLAG TILL FORTSATT UTVECKLING	44
<i>Byggnadsdel</i>	44
<i>Mätteknik</i>	44
<i>Tid</i>	44
REFERENSER	45
APPENDIX A – FOTOMONTAGE	49
APPENDIX B – MÄTRESULTAT	53
APPENDIX C – EKVATIONER FÖR BERÄKNING AV KRYPTAL	67
APPENDIX D KRYMPNING – TABELL	73
APPENDIX E SKISSER OCH RITNINGAR	75
APPENDIX F PRODUKTDATABLAD MÄTUTRUSTNING	79

INTRODUKTION

Höga hus i storstäderna har i Sverige blivit mer förekommande senaste åren. Turning Torso visade vägen och fler uppmärksammande byggnader med avsevärd höjd har och håller på att uppföras även i Stockholm och Göteborg. Höga byggnader medför ökade belastningar på byggnadsverket, inte minst på grund av vind och egentyngd. Dessutom kan i vissa fall själva produktionsmetodikerna vara komplicerade, speciellt i svåråtkomliga områden. För att skapa en effektivare byggprocess använder man ökad grad av prefabricerade betongelement, även för höga hus.

När man bygger med prefabricerade element så är det flera skeden där bärförmågan skall säkerställas. Först ska elementen gjutas och därefter hanteras genom avformning av ung betong. Nästa steg är transport till arbetsplatsen och montering av elementen på plats. Detta är en fortgående process till hela byggnaden är klar. Påkänningarna under byggskedet kan ofta vara större än vid byggnadens färdigställande.

Analys av färdig betongstomme utförs vanligen med beräkningsverktyg som baseras på finita elementmodellering. Modellerna blir ofta stora och komplexa och fokuserar i första hand på kraftspelet i färdig stomme under bruksskedet. Förutom statiska och dynamiska laster behöver ofta även parametrar som krympning, krypning och temperatur undersökas.

Bakgrunden till aktuellt SBUF projektet är i första hand att undersöka påkänningar i ett prefabricerat byggnadselement i en verklig byggnad.

För att vidimera antaganden och beräkningsresultat har vi i detta projekt uppmätt de påkänningar som ett betongelement blir utsatt för i byggnadsskedet, dvs under gjutning, avformning, transport, installation samt vid färdig byggnad. Det element som valdes ut var en betongpelare placerad i byggnadens entréplan.

SYFTE OCH MÅLSÄTTNING

Syftet med projektet har varit att försöka erhålla ökad kunskap om påkänningar under de olika delarna av byggskedet fram till färdig byggnad samt att jämföra teoretiska beräkningar genom FE-analys med uppmätta resultat.

Målsättningen har vidare varit att resultatet från projektet i förlängningen skall kunna leda till mer precisa beräkningsmodeller med möjlighet att till större grad optimera framtidens stommar med avseende på såväl tillverkning, byggande och i brukande

METODIK

Metodikerna för projektet har varit att genom teoretiska och praktiska studier kartlägga påkänningar i ett betongelement i en 36-våningsbyggnad. Det teoretiska arbetet har också föregåtts av en litteratursökning inom området.

Arbetet har till lika delar fördelats mellan praktiskt arbete och skrivbordsarbete.

BEGRÄNSNINGAR

Projektet har varit komplext och betydligt mer utmanande än vad som antogs i samband med ansökan. Projektet har innehållit såväl omfattande praktiskt arbete och även mycket skrivbordsarbete med såväl beräkningar som utvärdering av mätdata. Vissa delar i projektet har också varit svåra att påverka, t ex start och slut av bygget, och även således hanteringen av det studerade betongelementet vilket i sin tur medförde en försening i föreliggande utvecklingsprojekt. För övrigt har projektet även bl a begränsats av följande faktorer:

Ekonomi: Projektets finansiering var inte fullt tillräcklig för de målsättningar vi satte upp. Vi hade t ex inte kunnat förutse de förseningar som uppstod i huvudprojektet.

Hantering av tredje part: I samband med transport och installation medförde hanteringen av pelarelementet, trots omfattande skyddsåtgärder, att fukt kom in i utrustningen, vilket påverkade mätdata negativt. Detta korrigerades dock något genom uttorkning, men data gick förlorad.

Val av betongelement: Det var endast möjligt att välja ut ett element för installation och uppföljning. Dock genomfördes en noggrann studie innan val av aktuell betongpelare.

Överföring av mätdata: Det var planerat att använda installerat bredband i byggnaden. Detta installerades dock så sent i processen så hantering av data behövde utföras manuellt. Vi provade med en 4G router, men eftersom pelaren var omgärdad av tjocka betongelement var signalerna allt för svaga. Vi kunde inte heller montera utrustning på utsidan då detta skulle ha stört själva bygget. Nåväl problemet löstes med manuell, på plats, lokal nedladdning av data.

Beräkningar: Vi har varit beroende av beräkningar från konsult, Sweco, vilket är tacknämligt och även nödvändigt med tanke på omfattning av de beräkningar som har gjorts. Detta medförde dock en viss begränsning i variation av beräkningsparametrar.

PROJEKTETS GENOMFÖRANDE

Redan i produktionsskedet förseddes betongpelaren med sensorer för att mäta töjning i betong samt stålarmering på utvalda platser. Därtill har temperaturgivare monterats. Mätdata samlas in i en lokal nod och avsikten var att även kunna skicka data över nätet upp till molnet, vilket av tidigare förklarade orsaker inte var möjligt. Mätning har genomförts därefter från installation av pelaren tills färdigställande av byggnad.

Projektet har delats upp i fem faser, 1) Insamling och genomgång av befintlig litteratur inom området 2) Teoretisk FE-analys i samarbete med konsulten SWECO 3) Installation av mätsystem samt uppföljning av mätning 4) Analys mellan beräkningar och mätning samt 5) Sammanställning av arbetet i rapportform.

RAPPORTENS STRUKTUR

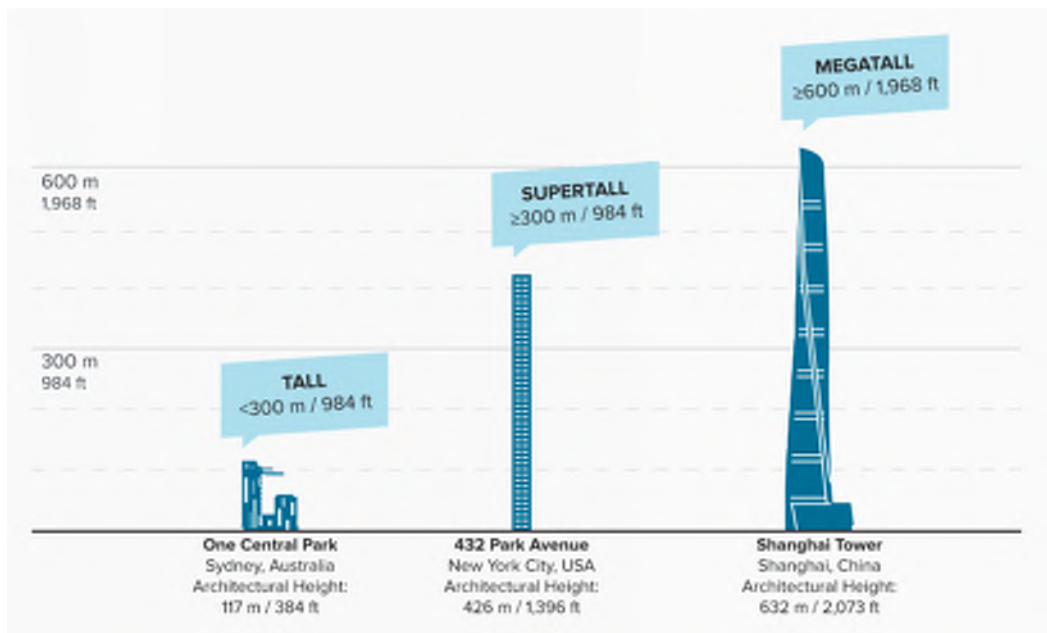
Rapporten inleds med en bakgrund till det studerade området, vad andra har gjort och vilka utmaningar som andra forskare har uppmärksammat. Därefter följer en kort presentation of Norra Tornen Helix där själva byggnaden beskrivs övergripande. Nästa avsnitt beskriver tillverkning av provkropp. Detta efterföljs av en beskrivning gällande krympning, krypning och temperaturpåkänningar i betong. Avsnittet därefter diskuterar globala och lokala numeriska beräkningar. Därefter följer en introduktion till mätning som följs upp med ett avsnitt gällande mätning på pelare för installation. Resultatet från mätningen beskrivs i ett eget kapitel vilket följs upp med ett avsnitt där data utvärderas. Huvudrapporten avslutas med ett kapitel där slutsatser sammanfattas och även förslag till fortsatt forskning ges.

Därtill bifogas 6 appendix.

BAKGRUND

Inledning

Sveriges högsta byggnad i dag är Turning Torso i Malmö med sina 190 meter och 54 våningar över marken, (HSB, 2015). Turning Torso är en byggnad av plattsgjuten betong där fasaden roterar 90 grader uppifrån till botten. Vid konstruktion med prefabricerad betong är höjden på byggnaderna vanligtvis mycket lägre än byggnader gjutna på plats. Den högsta byggnaden som någonsin gjorts med prefabricerad betong är The Breaker Tower i Seef, Bahrain. Byggnaden når strax över 150 meter och har 35 våningar, (Gulf Construction, 2014). Jämför detta med den högsta plattsgjutna betongbyggnad som är Burj Khalifa i Dubai, Förenade Arabemiraten, som når 828 meter och har 163 våningar, (CTBU, 2020). Höghus medför inte bara fler bostäder på mindre område utan är också ett landmärke och kan i vissa fall även representera makt. Höga byggnader kan definieras på tre sätt; hög motsvarar mindre än 300 m, superhög, större än 300 m men mindre än 600 m och megahög då byggnaden är högre än 600m, se figur 1. För att räknas som skyskrapa ska byggnaden ha mer än 40 våningar och överstiga 150 m, (CTBU, 2020).



Figur 1 Definition på höga byggnader, (CBTU, 2020)

Den byggnad där vi installerat en givarförsedd betongpelare är 110 m hög med 36 våningar, Norra Tornen, Helix. Den hamnar då i kategorin höga byggnader enligt definitionen ovan och kommer att vara en av de högsta byggnader som konstruerats och byggts i Sverige. Byggnaden presenteras något mer ingående i nästa avsnitt.

Människan har alltid velat bygga högre och högre byggnader, innan trovärdiga beräkningsmodeller hade utvecklats baserade mycket av byggandet på empiri där man i många fall var tvungna att återuppbygga delar eller hela byggnader efter ras beroende såväl på brister i dimensionering som i utförande, (Levy and Salvadori, 2002).

Även om bakomliggande beräkningsteorier har förbättrats över tiden är uppförandet av höga byggnader komplext och kräver avancerade beräkningsverktyg som t ex finita elementmetoden. För att verifiera beräknade laster (spänningar), förskjutningar (töjningar, deformationer), vibrationer (dynamiska effekter) och andra storheter kan man genom någon typ av mätförfarande dokumentera och följa upp den parameter man vill undersöka, (Greulich and Rober, 1988)

Intresse av att försöka mäta upp påkänningar och rörelser i byggnader, och anläggningskonstruktioner också för den delen, är förstås inte nytt, men har aktualiserats i samband med ökade höjder på byggnader och därmed ökade såväl statiska som dynamiska laster. Inte bara för den färdiga byggnaden utan även under uppförandet.

I samband med laster under byggandet uttrycker man lasterna ofta som summan av egenvikten och egenvikten av form (för platsbyggnader). Rivning av formkonstruktionen är då en viktig process. Progressiva bjälklagsnedböjningar orsakade problem i Sverige under början av 1950-talet vilket ledde fram till en studie av (Nielsen, 1952) för att ta fram en rationell metod gällande avformning.

(Agarwal och Gardner, 1974) använde fältmätningar för att kontrollera noggrannheten i olika analysmetoder för att uppskatta fördelningen av laster mellan temporära stödkonstruktioner och befintliga bjälklag under ökande antal våningar. Man uppmätte laster under såväl gjutningar på stödkonstruktionen som efter den blivit avlägsnad för två byggnader: Alta Vista Towers i Ottawa, Ontario, Kanada och Place du Portage i Hull, Quebec, Kanada. Randvillkoren hade stor inverkan på resultaten och genom att man endast uppmätte nedböjningar och deformationer i fält var det svårt att bedöma effekten av inspanning i pelare och väggar. Man kunde heller inte genomföra mätningar i bottenplanet vilket medförde att total last var svår att uppskatta.

Syftet med ovanstående studier har mer varit att verifiera optimal tid för rivning av stämp och form. Det finns även studier i litteraturen där man undersökt beteendet hos konstruktioner på motsvarande sätt men där fokus har varit att verifiera prestanda, säkerhet och också på sikt optimera underhåll baserat på insamlad data.

Genom en studie av (Glisic et. al. 2007) där fiberoptiska sensorer i betongpelare på marknivå integrerades i ett nitton-vånings bostadshus var det möjligt att genomföra övervakning under byggskedena lokalt och man registrerade också globala rörelser pga jordskalv vilket gav upphov till globala rörelser i byggnaden. Genom teoretiska modeller var avsikten att separera töjningarna från last, krypning och krympning. Mätning utfördes under 5 år. Mätssystem och strategi för mätningen fungerade som planerat och möjligheter att följa rörelser globalt var också framgångsrikt, dock lyckades man inte fullt ut med att uppskatta laster samt effekten av krympning och krypning. Globala rörelser har och kan även mätas med GPS, (Khoo et. al., 2010) vilket även diskuteras i (Park et. al., 2004). Här har man också under senare tid mätt globala rörelser i byggnader med drönare se t ex (Bognot et. al., 2018), båda dessa tekniker lämpar sig mer för globala rörelser och deformationer över tid. Forskning i detta område pågår även på Luleå tekniska universitet, där fokus dock i första hand ligger på broar och dess förändringar över tiden, se t ex (Popescu et. al., 2019), (Popescu et. al. 2020)

I en studie av (Choi et. al., 2013) undersökte man sammantryckning av betongpelare i samband med byggande av en 66 respektive 72 våningars höga byggnader. Här undersöktes tre olika mätsystem, manuell- kabelförsett samt sladdlöst system. Mätningen var relativt omfattande men skedde endast över 88 dygn. Artikeln diskuterar inte resultatet från mätningen utan i första hand fördelen med ett sladdlöst system som når åtkomst via internet. Dock verkar inte resultaten mellan de olika systemen skilja sig åt. En motsvarande studie av mätsystem och dess funktion för höga byggnader har utförts av (Park et. al., 2013) där även här slutsatsen var att sladdlösa system kan fungera bra för uppföljning över längre tidsspann. Dock hade man delvis problem med dataöverföring och tappade på så sätt även en del data. Det har utförts relativt många studier gällande sammantryckning (shortning) av betongpelare i samband med uppförande av höga byggnader där man med olika mätsystem följt upp deformationer, se bl a (Kim och Cho, 2004), (Raksha et. al., 2016), (Patil and Bajad, 2016),.

Deformationerna beror på betongens hållfasthet, dimensioner på pelaren, antalet våningar och effekter av krympning och krypning. Där effekterna av de sistnämnda parameterarna för den litteratur som studerats har generellt varit svåra att skilja ut från den totala töjningen – både på kort och lång sikt. Töjningen från lasten har dock visat sig vara proportionell mot antalet byggda våningar, (Ha & Lee, 2019). I den litteratursökning som genomförts finns det inga studier presenterade där man för prefabricerade element undersökt töjningar från gjutning till installation och uppförande av en hel byggnad. I nästa sektion presenteras den byggnad där installationen av den prefabricerade pelaren gjorts.

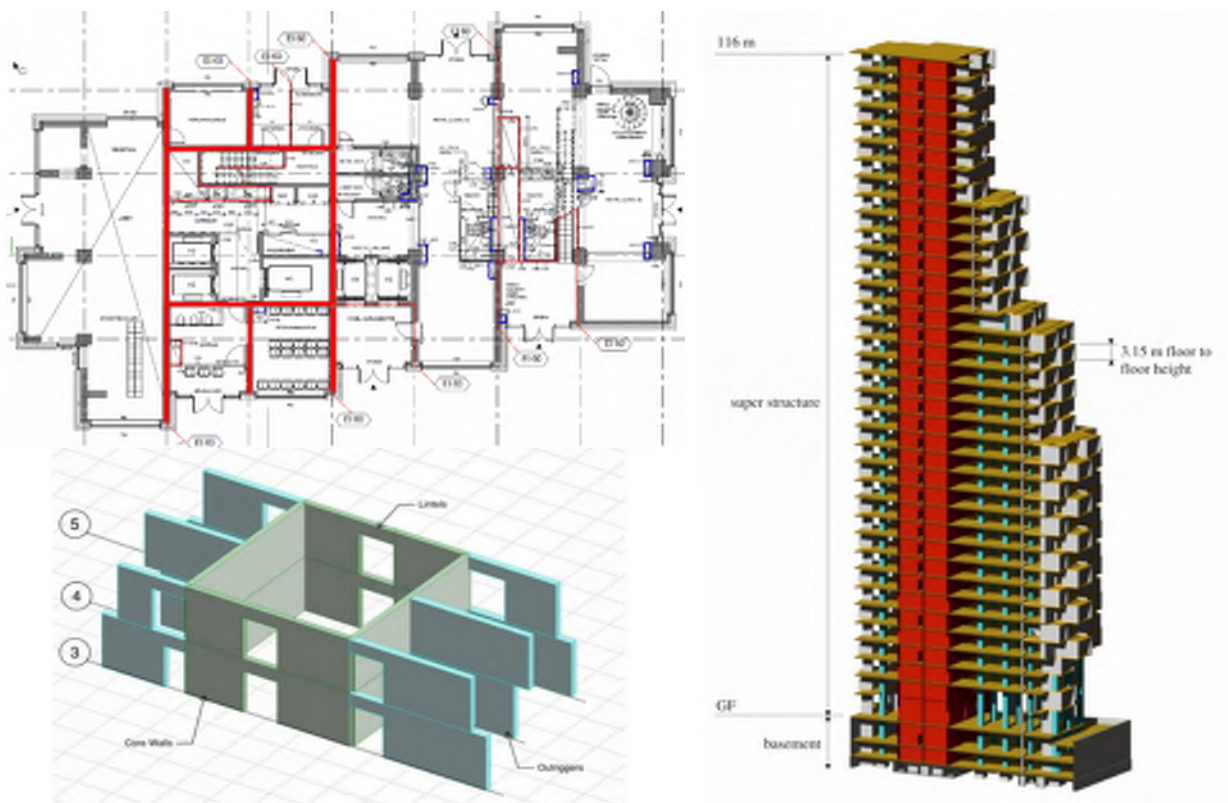
NORRA TORNEN HELIX

Norra tornen i Vasastaden som är två imponerande landmärken i Stockholm som strax är färdigbyggda. Det ena, Innovationen, är med sina 125 m och 38 våningar hittills det högsta bostadshuset som byggts i Stockholm. Det andra bostadshuset har getts namnet Helix, är med sina 110 m och 36 våningar något mindre. Tornen har en exklusiv framtoning och en egen gestaltning i form av utkragande moduler bestående av prefabricerade betongelement. I figur 2 visas ett foto av de två tornen med byggande av helix i förgrunden. Husen är breda vid sin bas och avsmalnar i form av trappsteg med stigande höjd.

Oscar Properties är byggherre och initiativtagare till projektet. Arkitekt för har varit Reinier de Graaf vid nederländska Office for Metropolitan Architecture (OMA) medan det svenska konsultföretaget Sweco har stått för konstruktionerna. Fasaden består av fasadelement levererade av SCF Betongelement i Strömsund. Elementen är fullt färdiga med fönstren insatta vid montage. Varje element utgör balkong för lägenheten ovanför. Den yttre fasadstrukturen består av ett vertikalt linjemönster som skall ge huset en typisk struktur. Bostadshuset är uppbyggda genom ett stabiliserande system med ”outriggerwalls” (stabiliserande väggar/väggskivor) och en kärna i betong för horisontella laster och för en del vertikala laster samt system med balk-pelare för att överföra resterande laster, se också figur 3. Några av väggarna i nedre våningarna är platsgjutna men huvuddelen är prefabricerade betongväggar. Förspänningssystemet används i horisontalled för att klara horisontella överhäng i nedre delen av byggnaden, dvs för flytta in vertikala krafter



Figur 2 Norra tornen med Innovationen och Helix i förgrunden, foto från SWECO

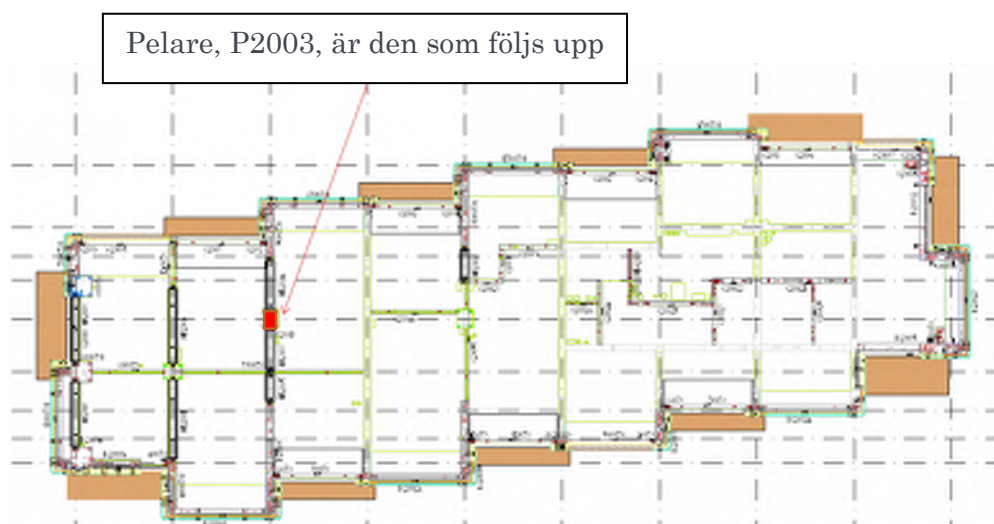


Figur 3 Principen för stabilisering och byggande av bostadshus Helix, bilder från Sweco

TILLVERKNING AV PROVKROPP

Geometri och egenskaper

Val av aktuellt pelarelement baserar sig på bl a åtkomst samt att elementet skall kunna monteras tidigt i byggskedet. Det undersökta betongelementet är placerat i entréplan och dess placering i plan visas i figur 4. Pelarens tvärsnitt är 900 x 750 mm och installerad höjd 4,1 m.



Figur 4 Pelaren P2003 är placerad i entréplanet, dvs plan GF (Ground Floor) i figur 3

Vidare är betongen tillverkad i C50/60 betong, säkerhetsklass 3, exponeringsklass X1, Livslängdsklass $L50$ med ett vct-tal på 0,60. Cementklass är R . Armering är K500C-T både gällande stående armering, $\phi 12$, och byglar, $\phi 11$. CC-avstånd byglar i gles del 600 mm, CC-avstånd byglar i tät del 100 mm. Betongrecept redovisas i tabell 1 nedan och hållfastheten efter 28 dygn uppgick till 74,2 MPa.

Tabell 1 Betongrecept för den gjutna pelaren

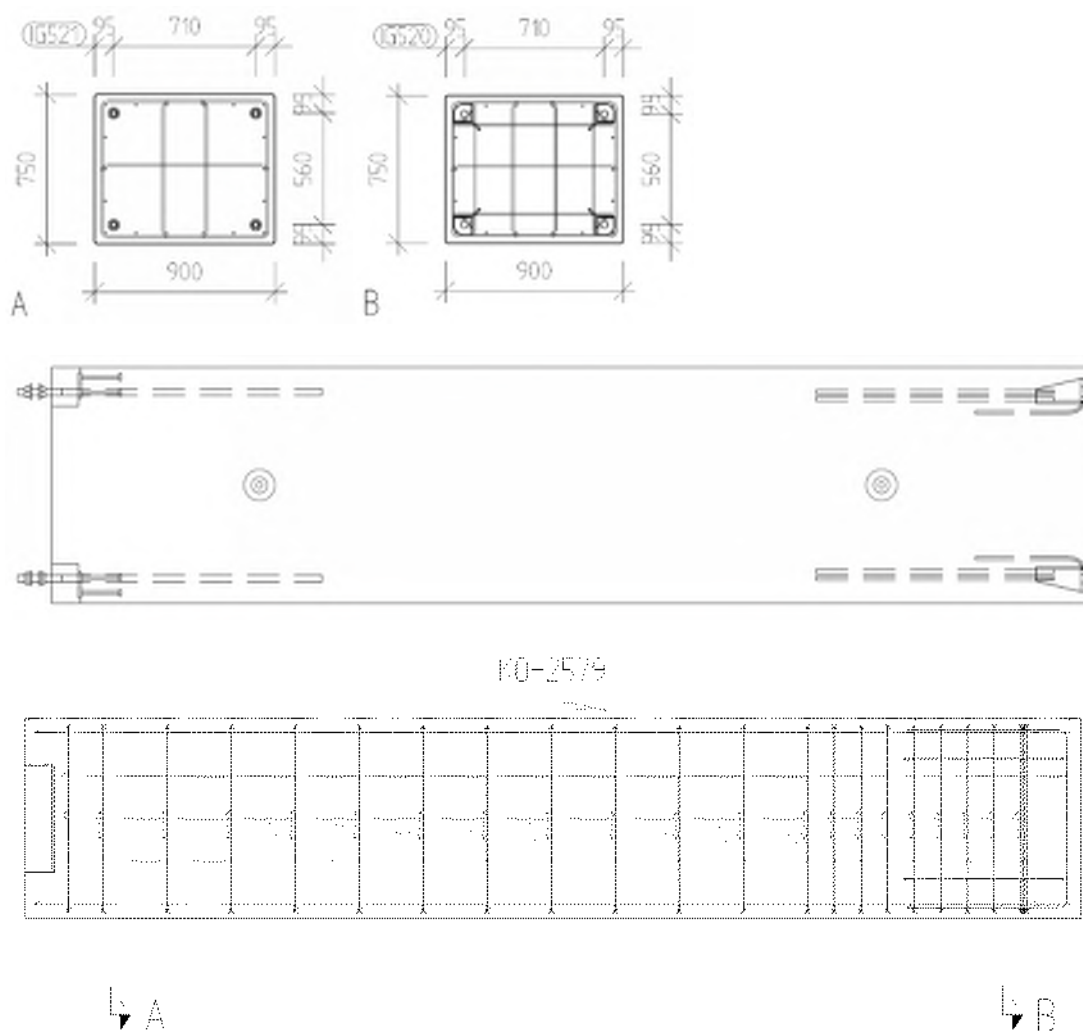
Bindemedel	Bascement från Cementa
Vattencementtal (vct)	0,45
d_{\max} (största stenstorlek)	16 mm
Ballast: 0-4 mm	878 kg/m ³
Ballast: 8-16 mm	788 kg/m ³
Flyttillsats	Viscocrete 1030
Kalk	Limus 40

Dimensioner och armeringsinnehåll framgår av figur 5 Pelaren är dimensionerad för:

N 6774 kN, normalkraft

M_y 64.3 kNm (olyckslast) kring styva axeln

M_z 53.6 kNm (olyckslast) kring veka axeln

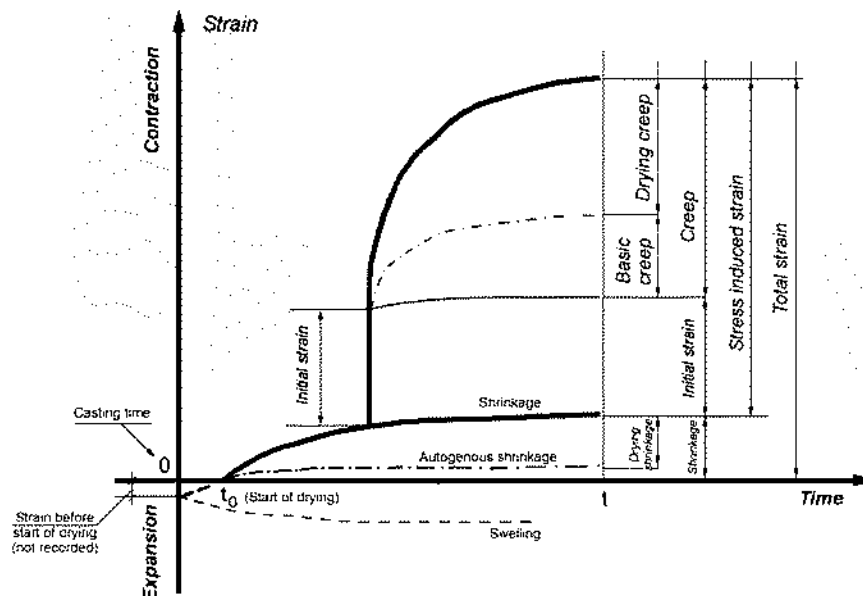


Figur 5 Prefabricerad betongpelare som studerats, ritning från Sweco, se också Appendix E.

KRYMPNING, KRYPNING OCH TEMPERATURPÅKÄNNINGAR

Inledning

En betongkonstruktion påverkas förutom av yttre laster även av krymp- och temperatureffekter. Vidare så deformeras en konstruktion under belastning vilket benämns krypning. Betongens krympning och krypning beror av fuktigheten i omgivningen, bärverksdelens dimensioner och betongens sammansättning. För betongen skadliga temperaturbelastningar kan uppstå i samband med gjutning av grova konstruktioner där temperaturskillnaden mellan konstruktionens inre och yttre del kan bli väsentlig. Skador kan även uppstå i samband med motgjutningar och efterföljande avkylning om inte konstruktionen kan röra sig obehindrat. Temperaturpåkänningar uppstår även i den uthärdade konstruktionen genom yttre värmekällor som t ex solinstrålning, och framförallt genom ojämn temperaturpåkänning, vilket t ex kan uppstå i ung betong i samband med härdning. I figur 6 nedan visas schematiskt de töjningar som kan erhållas i en axiellt belastad konstruktion beroende av krympning och krypning (Su et. al., 2017). Fenomenen förklaras mer ingående i kommande avsnitt.



Figur 6 Schematisk skiss över krympning, krypning och töjning orsakad av belastning, (Su et. al., 2017)

Krympning

I nygjuten betong finns alltid fritt vatten. När betongen härdar åtgår vatten till den kemiska processen men kan också försvinna genom uttorkning. Graden av krympning är hög i tidiga åldrar och minskar med en ålder tills man slutligen når ett asymptotiskt krympvärde. Krympningen beror mycket på den relativa fuktigheten i miljön, betongelementets storlek och betongens sammansättning. I torr miljö kan medelstora betongelement (ca 600 mm i diameter) uppnå hälften av sin krympning inom 2 - 4 månader, med motsvarande betongelement lagrade i vatten stället kan uppvisa expansion.

Den totala krympningen består dels av den autogena krympningen, plastisk krympning och krympning genom uttorkning. Krympningen kan i sig medföra sprickbildning och förhindrad krympning kan medföra stora sprickor. Den plastiska och autogena krympningen uppstår oftast inom 24 timmar. Krympning genom uttorkningen sker under längre tid. Vi har i detta test försökt beakta krympningens effekter genom att mäta töjningsförändring i betongen och stålarmering i tidigt skede. Beräkningsmässigt följer vi (EC2, 2004) där den totala krympningen beräknas utifrån två sammansatta komponenter; uttorkningskrympning och autogen krympning. Värdet ur den totala krympningen, ε_{cs} erhålls ur:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}$$

där

ε_{cs} är total krympning

ε_{cd} är uttorkningskrympning

ε_{ca} är autogen krympning

Det slutliga värdet på uttorkningskrympningen, $\varepsilon_{cd,\infty}$ är lika med $k_h \varepsilon_{cd,0}$. Vidare kan uttorkningskrympningens tillväxt med tiden erhållas ur:

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0}$$

där

k_h är en koefficient som beror på den fiktiva tjockleken h_0 enligt tabell 2.

Tabell 2 Värderna på k_h i ovanstående uttryck (EC2)

h_0	k_h
100	1.0
200	0.85
300	0.75
≥ 500	0.70

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0,04\sqrt{h_0^3}}$$

t är betongens ålder vid betraktad tidpunkt, i dagar

t_s är betongens ålder (dagar) vid uttorkningens början

h_0 är den fiktiva tjockleken (mm) på tvärsnittet = $2A_c/u$

där

A_c är betongtvärsnittets area

u är omkretsen för den del av tvärsnittet som är exponerad för uttorkning

Värdet från $\varepsilon_{cd,0}$ dels kan erhållas från tabell (EC2, 2004), se också Appendix D men också beräknas med följande uttryck:

$$\varepsilon_{cd,0} = 0.85 \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot \exp\left(-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{f_{cmo}}\right) \right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH}$$

$$\beta_{RH} = 1,55 \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right], \text{ där}$$

f_{cm} är tryckhållfasthetens medelvärde, [MPa]

f_{cmo} = 10 MPa

α_{ds1} är en koefficient som beror av cementtyp

= 3 för cementklass S

= 4 för cementklass N

= 6 för cementklass R

α_{ds2} är en koefficient som beror av cementtyp

= 0,13 för cementklass S

= 0,12 för cementklass N

= 0,11 för cementklass R

RH är omgivningens relativa fuktighet, [%]

RH_0 = 100 %

Den autogena krympningen erhålls ur:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \varepsilon_{ca}(\infty)$$

där

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5(f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6}$$

och

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2t^{0,5})$$

t anges i dagar

Krypning

Krypning hos betong har studerats över ett sekel. (Woolson, 1905) var troligen den förste som beskrev detta fenomen eller ”betongflödet under tryck”. Under de senaste 100 åren har många olika försök genomförts och modeller presenterats där de mest tillämpbara bygger på superpositionsprincipen presenterat av (Boltzman, 1878). Kryptöjningen kan uttryckas som integralen över samtliga spänningen multiplicerad med en krypfunktion enligt nedan:

$$\varepsilon(t) = J_0 \sigma + \int_0^t J(t-\tau) \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} d\tau$$

Teoretiskt kan kryptöjningen beräknas för godtyckliga belastningsförhållanden baserade på superpositionsprincipen. Men det är svårt att skilja mellan kryp och elastisk belastning under initiala belastningsprocessen. Figur 7 visar krypparametrarna hos betong utsatt för belastning under avsevärd tid samt vid avlastning. Fenomenet krypning kan härifrån förklaras mer ingående:

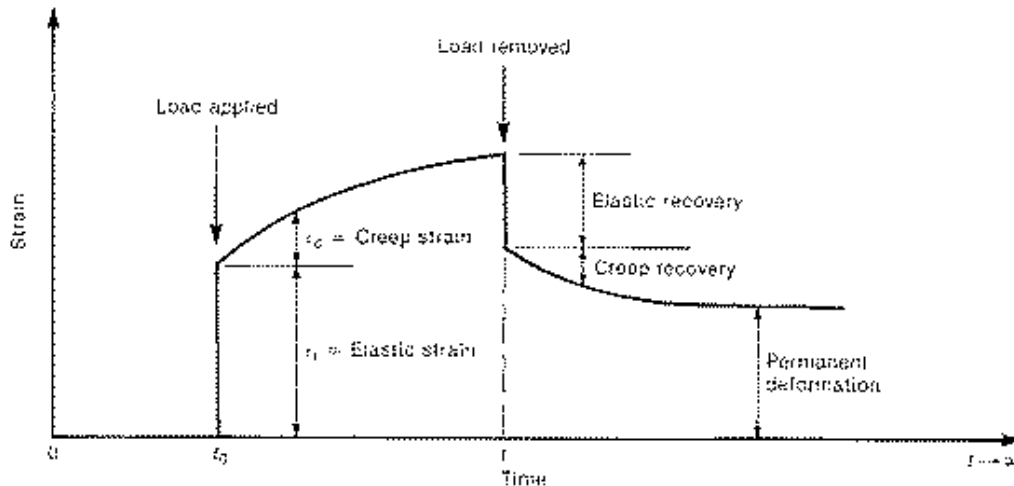
Vid belastning av provkroppen uppkommer först en momentan deformation, denna efterföljs därefter av en ytterligare långsam deformationsökning, vilket benämns krypning. (Bazant & Wittmann, 1982).

Ett kryningsbenäget material uppvisar deformationsökningar under konstant last (spänningstillstånd) över tid, (Neville, 2012).

Vid konstant belastning, efter den initiala töjningen, sker den tidsberoende töjningsökningen (ACI Committee 209, 2005).

Under konstant belastning över längre tid kommer betongen att fortsätta deformeras. Skillnaden mellan det initiala deformationstillståndet och den tillkommande deformationen kallas alltså generellt för krypning, (Neville, 2012).

Således, krypning kan definieras som den elastiska och långvariga deformationen av betong under en kontinuerlig belastning, (Hedlund mfl., 2018). Generellt ändrar ett långvarigt tryck formen på betongkonstruktionen och deformationen inträffar i riktningen för den applicerade lasten. Deformationens storlek beror både på spänningsnivån i konstruktionen och hur lång tid den varit belastad. Betong belastad under lång tid uppvisar krypning. Tas lasten bort har man en återgående deformation som benämns elastisk deformation. Därtill kan man även ha kvarstående deformationer som inte återgår vid avlastning. I figur 7 visas typiskt krypbeteende hos en belastad och avlastad betongkonstruktion.



Figur 7 Typiskt krypdiagram, (www.thestructuralworld.com)

Man beskriver ofta krypningsfenomenet genom att uttrycka tilläggstöjningen vid tiden t (kryptöjningen $\varepsilon_{cr}(t)$) som en funktion av den initiella töjningen ε_i :

$$\varepsilon_{cr}(t) = \varphi(t) \varepsilon_i = \varphi(t) \frac{\sigma_c}{E_c}$$

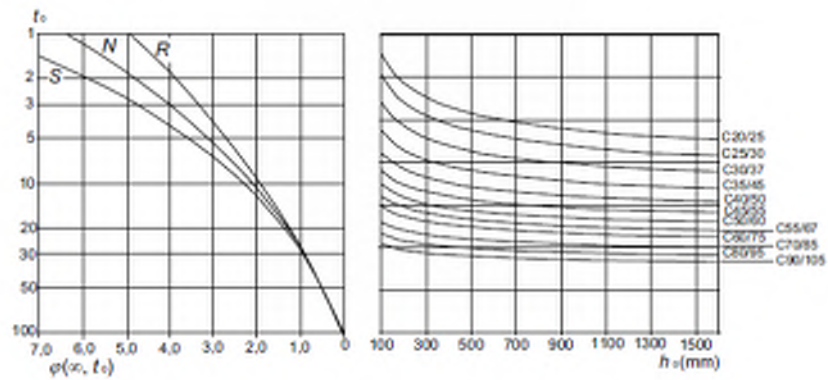
där $\varphi(t)$ är det sk kryptalet. Den totala töjningen vid tiden t ges av

$$\varepsilon_{tot} = (1 + \varphi) \varepsilon_i = (1 + \varphi) \frac{\sigma_c}{E_c}$$

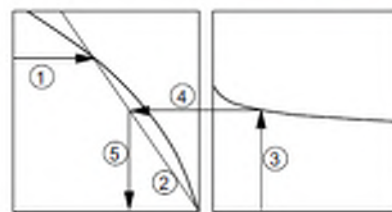
Kryptalet $\varphi(t)$ är en faktor som bestäms av betongens ålder vid pålastning, betongens sammansättning, dimensionerna på betongelementet, lastnivån, lastvaraktigheten och fuktkvoten i betongen. För att bestämma kryptalet använder sig EC2 av en metodik med diagram under förutsättning att tryckpåkänningen i betongen inte överstiger $0,45f_{ck}(t_0)$ vid tiden för lastens påförande (t_0 är betongens ålder vid pålastning), se figur 8. Vidare relateras kryptalet, $\varphi(\infty, t_0)$, till tangentmodulen, E_c , som får antas vara $1,05 E_{cm}$. En mer omfattande härledning av redovisas i Appendix C.

Betongs krypdeformation, $\varepsilon_{cc}(\infty, t_0)$ vid tiden $t = \infty$ under konstant tryckpåkänning σ_c påförd vid betongålder t_0 , erhålls ur:

$$\varepsilon_{cc}(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) \cdot (\sigma_c / E_c)$$



a) inomhusförhållanden - RH = 50%

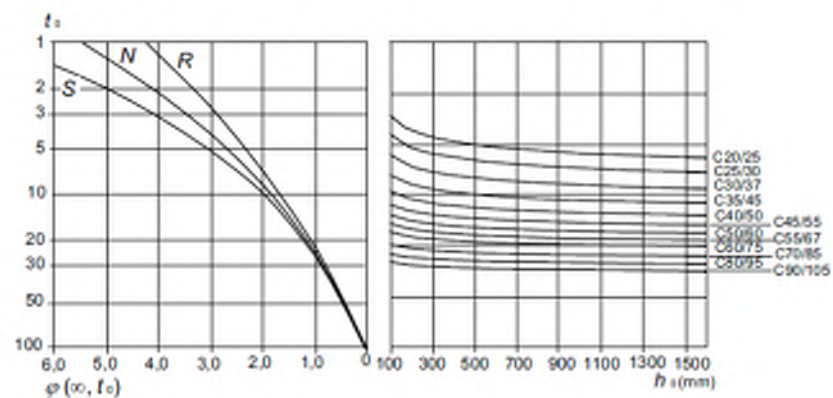


ANM.

– skärningspunkten mellan linjerna 4 och 5 kan även ligga över punkt 1

– för $t_0 > 100$ är det tillräckligt noggrant att anta

$t_0 = 100$ (och använda tangenten)



b) utomhusförhållanden - RH = 80%

Figur 8 Metod att bestämma kryptalet, $\varphi(\infty, t_0)$, för betong under normala miljö betingelser, (EC2, 2004).

där

t_0 är betongens ålder vid tiden för pålastning i dagar

h_0 är betongtvärsnittets fiktiva tjocklek = $2A_c/u$, där A_c är dess area och u är omkretsen för den del som är exponerad för uttorkning

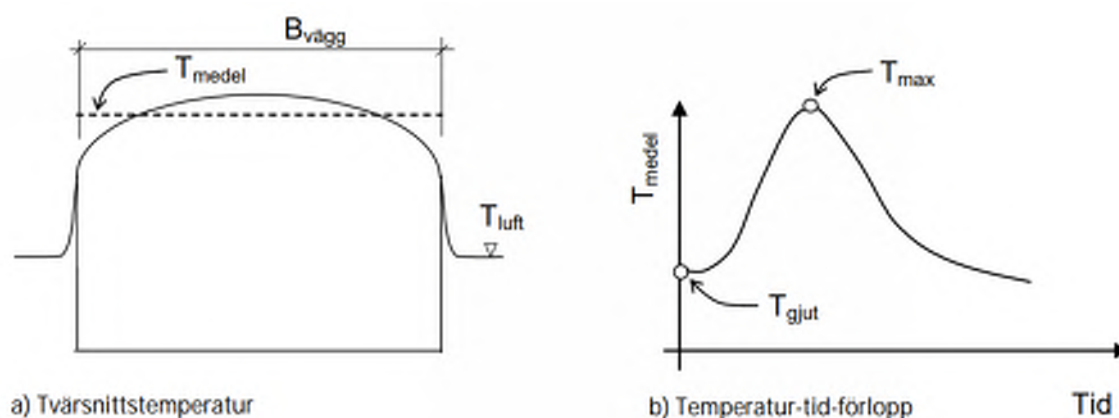
S betongklass S

N betongklass N

R betongklass R

Temperaturpåkänningar

Pelaren som undersökts i detta projekt är prefabricerad och har inte utsatts för några tvångsspänningar som skulle kunna vara fallet i samband med platsgjutna konstruktioner. Pelarens dimensioner skulle dock teoretiskt kunna medföra uppsprickning genom skillnaden i temperatur mellan inre del och ytteryta. Termiska spänningar kan således uppstå till följd av temperaturskillnaden inom konstruktionen. Eventuell uppsprickning skulle också kunna medföra onödiga påkänningar hos elementet i samband med avformning och förflyttning vilket skulle kunna öka sprickbildningen. I det aktuella fallet anses inte att eventuella sprickor kommer att påverka beständighet eller funktion genom eftersom dels elementet dels kommer att vara placerat i inomhusmiljö, dels kommer att utsättas för tryckkrafter vilket kommer att hålla samman eventuella sprickor. Uppsprickning hos betong har bl a behandlats i (Betonghandboken material, 1982), (Jonasson mfl., 2001). I första hand kan befaras uppsprickning på grund av temperaturvariationer över tvärsnittet. Detta visar sig oftast som ytsprickor och brukar normalt inte vara genomgående, se även figur 9



Figur 9 Illustration av a) temperaturvariationer över ett tvärsnitt b) medeltemperaturens variation över tiden, (Jonasson mfl., 2001)

Spricksäkerheten, S , kan beräknas enligt (Jonasson mfl., 2001):

$$S = \frac{1}{\eta}$$

där

η är sprickrisknivån och beräknas enligt:

$$\eta = \left(\frac{\sigma_{ct}(t)}{f_{ct}(t)} \right)^{\max}, \text{ där}$$

$\sigma_{ct}(t)$ är beräknad dragspänning i betongen vid aktuell tidpunkt

$f_{ct}(t)$ är betongens draghållfasthet vid aktuell tidpunkt

I (Emborg, mfl., 1997) kan även sprickrisknivån uttryckas i töjning enligt:

$$\eta = \left(\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{ct}} \right)^{\max}$$

I detta fall bedöms den maximala töjningen, ε_t , mot den kritiska töjningsnivån, ε_{ct} , för betongen. Beräknad dragspänning i betongen kan beräknas enligt:

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta l}{l} = \alpha_c \cdot \Delta T$$

där

Δl är längdändring, [m]

l längd, [m]

α_c betongens temperaturutvidgningskoefficient, [1/°C]

ΔT temperaturskillnad, °C

Betongens temperaturkoefficient påverkas av relativa fuktigheten och även av ålder genom cementpastan.

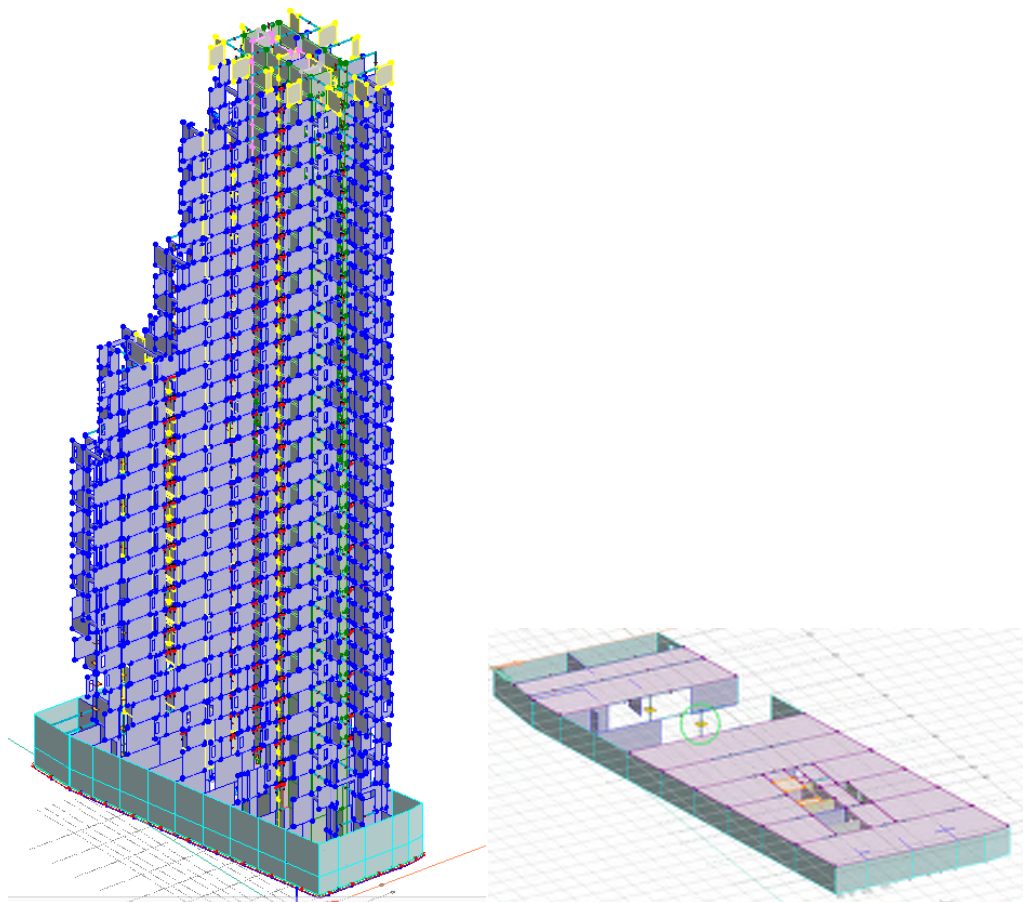
FEM-BERÄKNINGAR

Inledning

En pelare har instrumenterats i samband med gjutning. Töjningar och temperatur har mätts upp under gjutskedet, transport, installation och under byggets gång. I detta avsnitt redovisas installationen, var givarna är installerade samt mätdata. Pelaren är installerad i byggnadens entréplan, se figur 10.

Global FE-modell

Global FE-modell har skapats av Sweco där Swecos Structures har genomfört omfattande analyser för att få kunskap om hur lasterna uppför sig i hela konstruktionen och i dess olika delar. Till sin hjälp hade man FEM-Design som använts både lokalt och globalt. Lasterna har beräknats i och mellan varje prefabricerat betongelement och används för individuell dimensionering.



Figur 10 Global FE-modell skapad av Sweco. I den figuren har den studerade pelaren ringats in

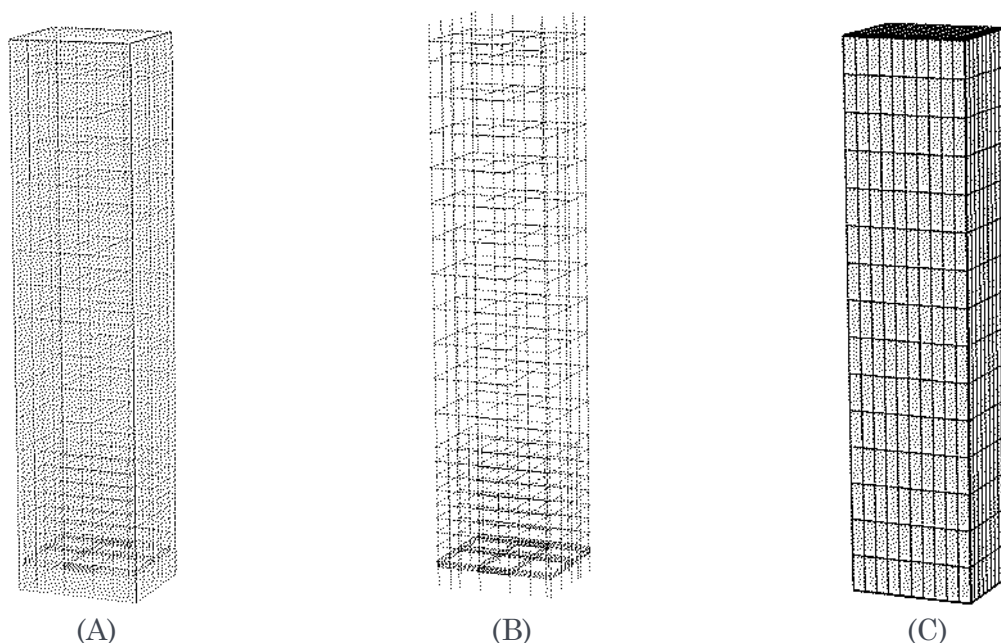
I projektet utförde Sweco också flera lokala analyser. Byggnadernas speciella utseende med överhäng ställde högra krav på konstruktionens bärförmåga. Genom att huset växer i olika riktningar och med våningar som kragar ut uppstår det stora laster som måste förflyttas i sidled vilket ger stora draglaster. För att analysera krafterna byggdes i FEM-Design tre fackverk i 3D i form av en separat modell utifrån den globala modellen. Krafterna

simulerades och underlag erhöles för att dimensionera de spännkablar som håller konstruktionen på plats. Kablarna förankras i husets kärna med hjälp av slakarmering. Lokala analyser genomfördes också på stabiliserande väggar som har dörröppningar och hål för ledningar i dörröverstycket. De har i tvärsnitt inte samma styvhet som en hel rektangulär vägg. Det kompenseras med att lägga till stålbalkar i dörröppningens överstycke. För att få rätt dimension på balkarna gjordes även separata designmodeller i programmet för varje ingjuten stålbalk där själva stålbalken modellerades med alla håltagningar från installationen. Från den globala modellen modellerades därefter pelaren.

3D FE-modell av pelare

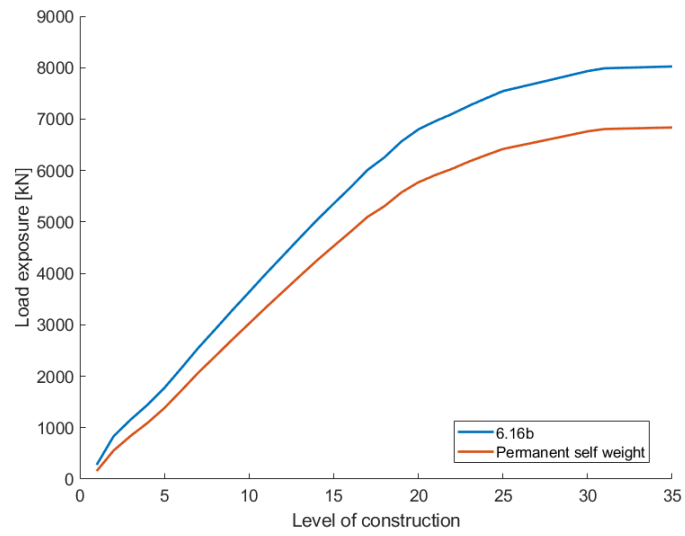
FE-modellering av pelaren gjordes under senare delen av 2019 och finns utförligt redovisat i (Söderström, 2019) och delar av denna modellering redovisas nedan.

Modellen implementerades i "COMSOL Multiphysics". Betongmaterialet modelleras som ett linjär elastiskt material för elastiska deformationer. För att täcka möjliga plastisk deformation användes Ottosen-brottkriterium. Krypning och krympning har exkluderats i modelleringen gällande brottgränstillståndet eftersom denna last anses ha en kort exponeringstid (Hartl & Handel, 2002). Stålarmeringen har modellerats som enkla fackverkselement. Modellen visas i figur 11 där geometrin för betongen A har kopplats ihop med geometrin för armeringen B till den studerade betongpelaren C.



Figur 11 Nätindelning, se också (Söderström A., 2019)

Lastnedräkningen på pelaren baseras på den globala modellen och spänningen i betong har med ovanstående förutsättningar beräknats till ca 15,4 MPa. För att kunna göra en jämförelse mellan de mätdata som samlas in har även en beräkning av påkänningen på pelaren utförts med avseende på statisk last och de våningar som byggs, här har modellen från FEM-Design använts. Detta resultat redovisas i figur 12 nedan. Där en last av 6 674 kN har räknats fram från det permanent last, dvs utan några rörliga laster.



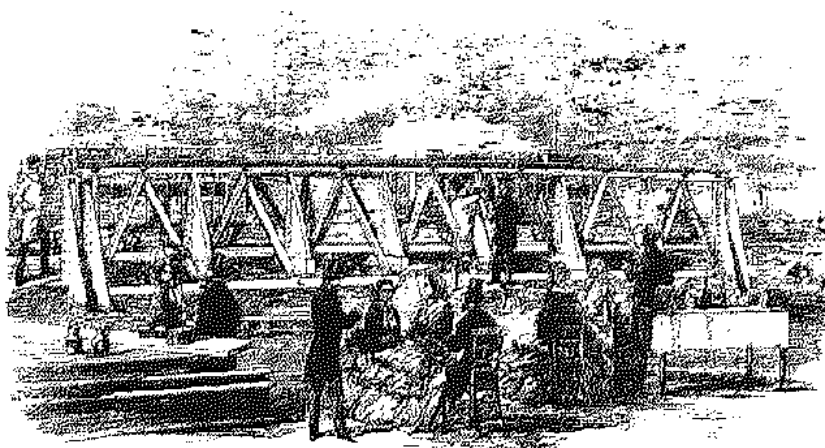
Figur 12 Påkänning i studerad pelare beroende av antalet påbyggda våningar, (Söderström A., 2019)

INTRODUKTION TILL MÄTNING

Allmänt

Utvecklingen av mät- och sensorteknik för strukturell mätning har under de senaste 10 - 15 åren varit omfattande. Den mest avancerade tekniken används tidigt för övervakning av avancerade konstruktioner med stora påkänningar, t ex flygplan och rymdfarkoster, (Bao et. al., 2019). I och med den snabba utvecklingen inom elektronik- och datorindustri har priserna på mätutrustning och sensorer sjunkit kraftigt samtidigt som fler typer av sensorer och mätsystem utvecklats. Behovet av kontinuerlig mätning är fortfarande störst inom flyg- och rymdindustrierna. Det kan heller inte ha undgått någon den omfattande utveckling som skett under de senaste 5 – 10 åren inom bilindustrin, där vi sannolik snart sitter självkörande fordon. En modern elbil idag är mer eller mindre en dator med skal och avancerade algoritmer används såväl för övervakning som för hjälp i körningen. Inte heller byggnadsindustrin har gått opåverkad av den snabba teknikutvecklingen inom dator och sensorteknik även om tillämpningarna och behovet inte är lika framträdande som i t ex automotivindustrin. Det finns dock många områden där avancerad mätteknik kopplat till utvärdering och uppföljning skulle kunna göra nytta och ett intressant arbetet inom detta område har presenterats av (Neves, 2017) där man även presenterar möjligheterna med maskininlärning.

Provning och uppföljning av byggnadskonstruktioner är inte något nytt. I tusentals år har ingenjörer undersökt beteendet och bärförmågan hos våra konstruktioner för att lära sig mer och för att tillgodose behov av säkerhet, (Bisby Edt., 2006). Detta exemplifieras i figur 13 där en fackverksbro i stål (metall) har byggts ihop och undersökts med avseende på deformationer och bärförmåga innan den plockas ner och därefter skeppas från England till Indien för att ånyo byggas upp.



Figur 13 Provning av en fackverksbro i stål under slutet av 1800-talet, (ISIS Canada, 2001)

Behovet att förstå hur konstruktioner beter sig under såväl uppförande som över dess livslängd har tilltagit under de senaste 20-åren. En orsak är de ökade krav som ställs på våra konstruktioner i form av ökade trafikvolym och laster, se t ex (Hejll & Täljsten, 2005) och (Hejll, 2007). En annan orsak är den ständigt pågående nedbrytningen över tid, t ex armeringskorrosion orsakad av tölsalter i betongkonstruktioner.

Ytterligare en orsak kan vara att vi idag bygger allt mer komplicerade konstruktioner där varken fullständiga beräkningsmodeller eller laboratorieförsök är möjliga att utveckla eller blir alltför kostsamma, (Collins et. al, 2014).

Ett exempel ges i denna rapport där vi har studerat påkänningar i ett betongelement, betongpelare, i en 36-våningsbyggnad från produktion, installation och till färdigt bygge. Mätningar kan ge oss information om status för konstruktionen och också ge information om förändringar över tid. Mätningar kan också användas för att förbättra beräkningsmodeller. Ett mätsystem består av ett flertal komponenter, och för tydligheten delas det in i 6 delar:

1. **Förvärv av data:** Omfattar olika typer av sensorsystem och system för insamling av data
2. **Kommunikation av data:** Överföring av data
3. **Intelligent hantering av data:** T ex borttagning av överflödigt data, störningar etc.
4. **Lagring av data:** Lagring för åtkomst
5. **Diagnos:** Översättning av data till efterfrågade storheter
6. **Hämtning av data efter behov:** Antingen behandlad information eller data

Mätning kategoriseras därefter beroende av typ av mätning, I princip kan mätningarna delas in i statisk- eller dynamisk mätning. Den kan göras periodisk eller kontinuerlig. Mätningen kan sedan även delas in i passiv eller aktiv, där en aktiv mätning t ex endast registrerar påkänningar vi t ex en tågpassage eller vindpåkänningar över en viss vindhastighet eller rörelse i byggnaden.

Utöver detta kan förstås syftet med mätningen variera. Vanligtvis vill man verifiera beräkningsmodeller, undersöka aktuell status och/eller speciella fenomen som t ex sättning, lutning, oväntade sprickbildningar etc. Mätning kan också vara värdefullt när man vill följa upp en konstruktion över tid och på så sätt kunna registrerar förändringar och eventuella skador, (Hejll, 2007). Ett exempel här kan vara registrering av laster på en bro för att undersöka frekvensen av överlast och vilken effekt detta kan ha på konstruktion. Inte ett helt ovanligt fenomen vid vägtransporter av t ex timmer.

Ett idealiskt SHM (Structural Health Monitoring) -system bör kunna tillhandahålla information på begäran om konstruktionens tillstånd samt också kunna varna om väsentliga skador uppstår. Helst också med intelligent utvärdering där förslag till åtgärder presenteras. Här är vi inte helt ännu, men på väg, (Neves, 2017). Utmaningarna är dock inte bara kompetenta algoritmer eller digitala tvillingar där man i realtid kan följa vad som händer och i vissa fall även simulera olika påkänningar. Utan det finns även stora utmaningar i system som är stabila och kostnadseffektiva över tiden. Detta inte minst för de sensorer som används i eller på en konstruktion. Även dessa system måste underhållas över tid och ytterligare utmaning är den snabba teknikutvecklingen som kan göra installationen föråldrad efter enbart några år. En fördel är om man bygger ett system med komponenter som går att byta ut och uppgradera vid behov. Ett system är dock oftast inte bättre än den kompetens som används för att utvärdera resultaten.

I det kommande presenteras en passiv statisk långtidsmätning (2 år) som har genomförts för en installerad betongpelare i ett bostadshus.

MÄTNING PÅ PELARE FÖR INSTALLATION

Inledning

En pelare har instrumenterats i samband med gjutning. Töjningar och temperatur har mätts upp under gjutskedet, transport, installation och under byggets genomförande. I detta avsnitt redovisas installationen samt var givarna är installerade. Mätdata presenteras i nästa kapitel. Pelaren är installerad i byggnadens entréplan, se figur 14.

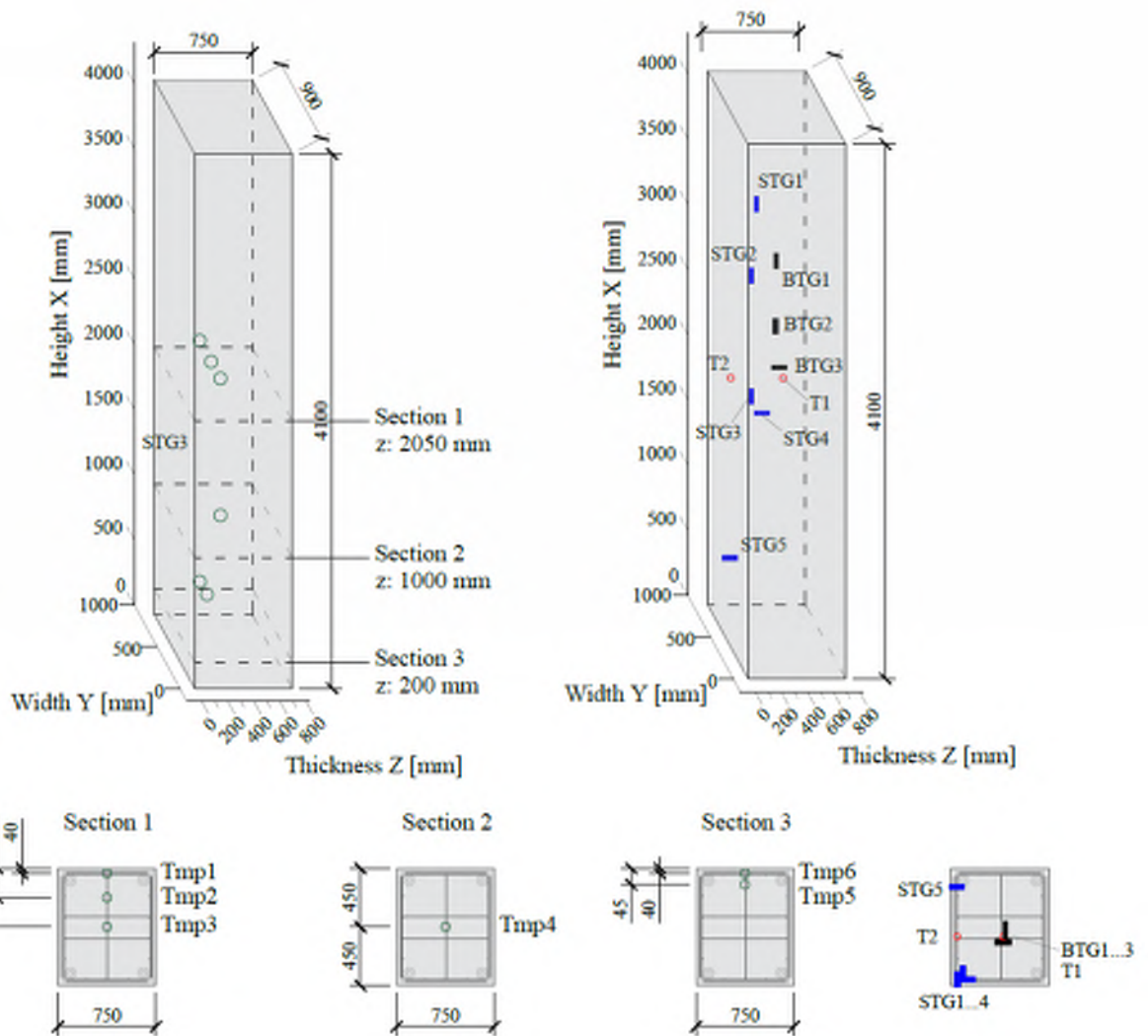


Figur 14 Placering av pelaren i Helix entréplan

Pelarens dimensioner framgår av figur 15. Pelaren är 4,1 m hög och har tvärsnittet 900 x 750 mm. I figur 15 framgår även placeringen av givarna. Vilket även tydliggörs i tabell 3 nedan. I tabell 4 redovisas de materialdata som har använts i FE-beräkningarna för pelaren. Inte i den globala modellen.

Tabell 3 Placering och typ av givare

Givare	Typ	Riktning	Placering, [mm]		
			x	y	z
STG1	Töjning stål	x	3555	95	95
STG2	Töjning stål	x	3055	46	50
STG3	Töjning stål	x	2125	46	50
STG4	Töjning stål	y	1995	46	130
STG5	Töjning stål	y	430	755	46
BTG1	Töjning betong	x	2835	420	420
BTG2	Töjning betong	x	2325	435	420
BTG3	Töjning betong	y	2095	335	400
T1	Temperatur	punkt	1977	375	400
T2	Temperatur	punkt	1977	375	46
tmp1	Temperatur gjutning	punkt	2050	450	375
tmp2	Temperatur gjutning	punkt	2050	225	375
tmp3	Temperatur gjutning	punkt	2050	40	375
tmp4	Temperatur gjutning	punkt	1000	450	375
tmp5	Temperatur gjutning	punkt	200	450	375
tmp6	Temperatur gjutning	punkt	200	40	375



Figur 15 Pelarens dimensioner med placering av givare

Tabell 5 Materialdata – värden för betong och stål använda i FE-beräkning

Betong C50/60		Stål B500B	
f_{cm} , [MPa]	58,0	f_{yd} , [MPa]	434,0
E_{cm} , [GPa]	37,0	E_{sd} , [GPa]	200,0
f_{ctm} , [MPa]	4,1		

Installation av givare samt gjutning av betong

Installation av givarna påbörjades ett par dagar innan gjutning som genomfördes den 22:a oktober 2018, i Appendix A redovisas en fotosammanställning av givarnas installation samt gjutningen. I figur 16 samt 17 visas arbetsmoment från montering av givare till gjutning av färdig pelare samt när den installerats på plats.



Armeringskorg innan gjutning



Punktetsning av givare på armering



Monterad givare på armering



Skyddad givare innan gjutning



Monterad givare för betong



Låda för placering av mätsystem

Figur 16 Arbetsmoment



Pågående gjutning



Pågående gjutning



Pelaren i samband med avformning



Pelaren monterad på plats

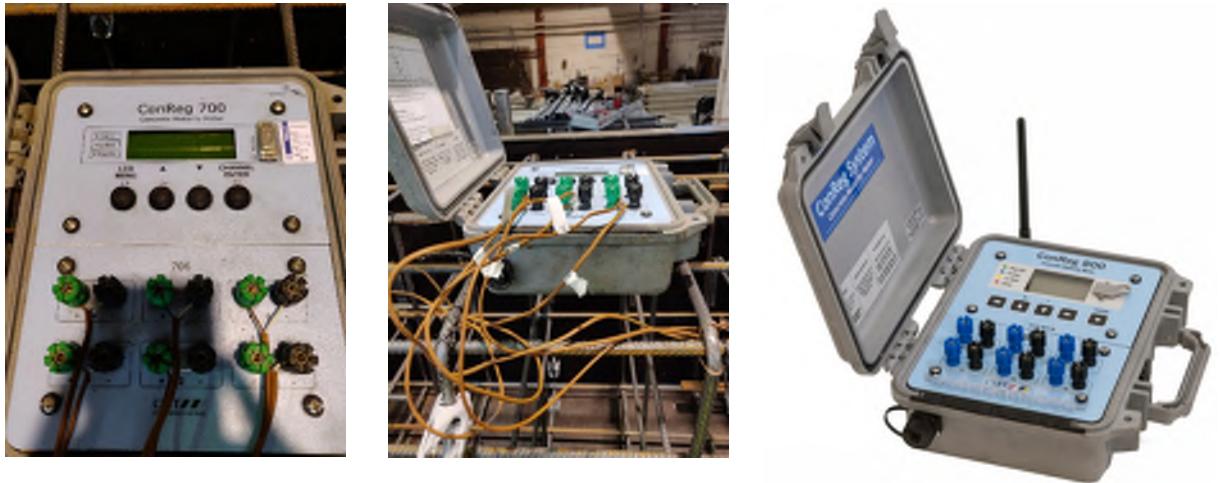
Figur 17 Gjutfas, avformning och installation av pelare

Mätsystem

Två olika mätsystem har använts. Ett system registrerade endast temperaturen i utvalda punkter under gjutning och härdning till och med 21 timmar. Det andra systemet användes för mätning under hela projektet från gjutning till och med att den sista våningen var på plats. Systemen beskrivs var för sig.

Mätsystem under gjutning

Systemet som användes för att mäta temperatur i samband med gjutning benämns ConReg706 och hade några år på nacken. Systemet kan även användas till att mäta mognadsutveckling för betong. Dock fanns ingen programvara tillgänglig för detta vid mättillfället. I systemet kopplades 6 stycken termoelement in, tmp1-tmp6 enligt figur 18. Registrering av temperaturen gjordes under de första 21 timmarna och redovisas i nästa avsnitt. Orsaken till att mätningen med detta system endast genomfördes under 21 timmar var att vid den tidpunkten skulle man riva formen och flytta elementet för att göra plats för en ny gjutning.



Figur 18 Inkopplande termoelement i System ConReg 706. Till höger visas ett nyare system Conreg 806 (<http://www.cmtinter.com/conreg/se/produkter/>)

Mätsystem under hela projektets genomförande

Det system som har använts för mätning under hela projektet är baserat på LORD (www.microstrain.com) vilket är ett kommersiellt sladdlöst system som bygger på insamling av data via sladdlösa noder som skickar signaler vidare till en nätbrygga (gateway) från vilken man sedan via ett modem kan skicka data vidare upp i molnet. Principen för systemet visas i figur 19. I det aktuella fallet kopplade vi in töjningsgivare och termoelement i tre olika noder. Två noder för töjningsgivare och en nod för termoelementen.



Figur 19 Sladdlöst system som använts för datainsamling (www.microstrain.com)

För att ladda ner data från molnet har en mjukvara används som benämns Sensor Cloud. I det aktuella fallet har vi inte haft någon fysisk gateway på plats och heller inget modem på grund av avskärmande effekt av omkringliggande betongväggar och bjälklag samt att vi inte hade möjlighet att varken koppla in systemet i någon bredbandslösning (fanns inte på plats) eller placera modem och gateway på utsidan på grund av omfattande byggnadsarbeten.

Detta löstes dock med en mobil gateway och manuell nedladdning till dator kontinuerligt under projektets genomförande. Placeringen av lådan med mätutrustning visas i figur 20 och i figur 21 visas lådans innehåll.

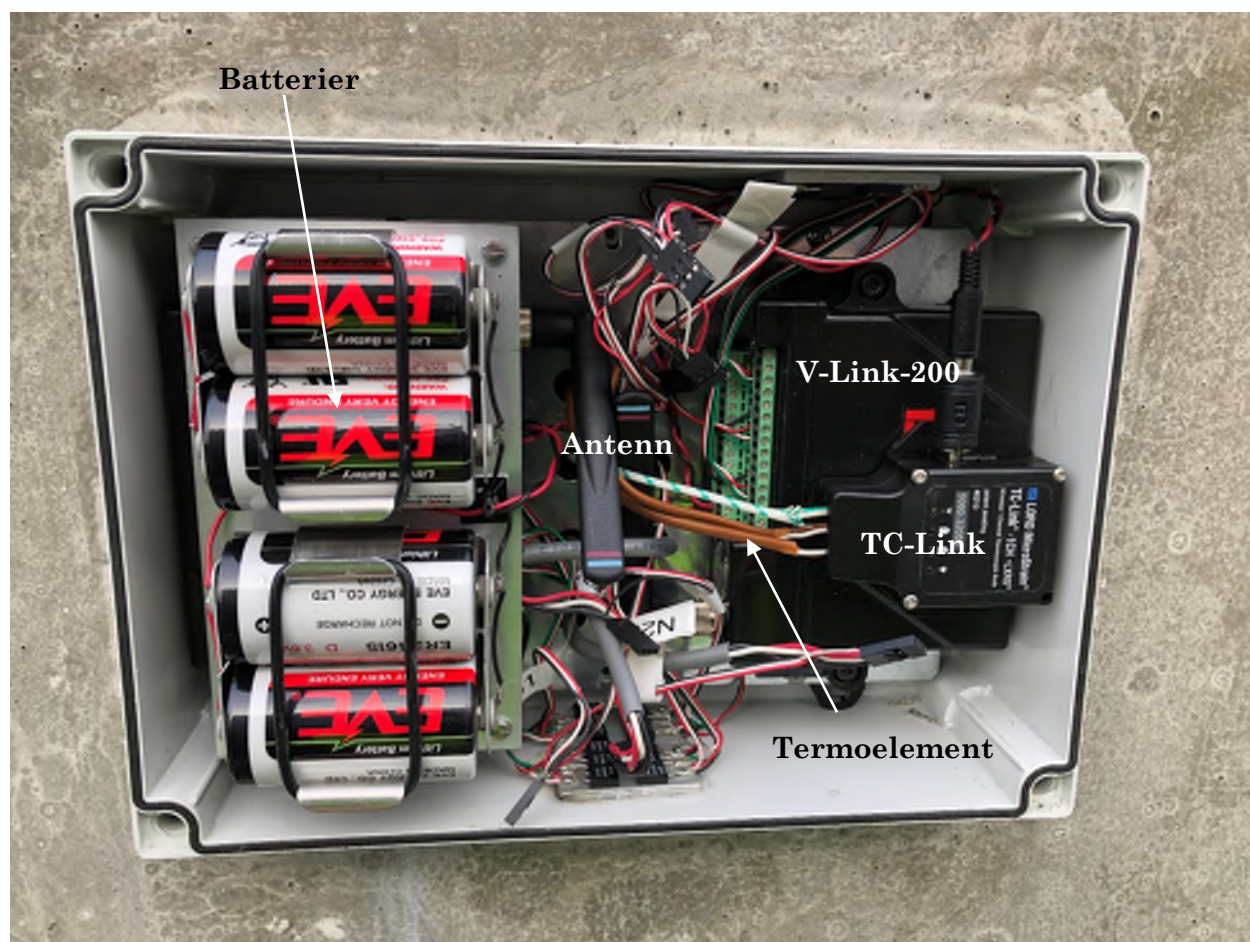


Pelare och nod på plats i Solna



Bortmonterat lock i samband med batteribyte

Figur 20 Monterad nod på plats



Figur 21 Närbild av nod

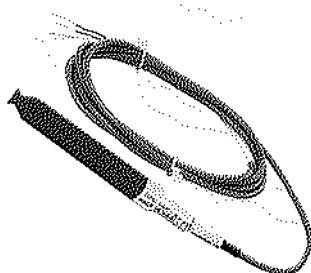
I lådan har det placerats två noder, V-Link-200, en som syns i fotot på höger sida ovan samt en placerad bakom batterierna. I varje nod finns det fyra digitala kanaler för att koppla in t ex töjningsgivare .I varje V-Link sitter det även en antenn för sladdlös överföring av data. Därtill ser vi temperaturnoden, TC-Link 1CH-LXRS där vi kan notera inkopplade termoelement, brun- samt grönvit kabel. Noderna drivs av batterier som behöver bytas regelbundet (efter 4 månader). Denna lösning valdes för att data under transport och i samband med installation skulle kunna samlas in. Denna lösning är inte helt optimal när väl pelaren är på plats. Här hade då en kontinuerlig strömförsörjning varit att föredra. I figur 22 visas V-link, TC-link, töjningsgivare som placerades i betongen samt på armeringen. I Appendix F redovisas datablad från de olika komponenterna.



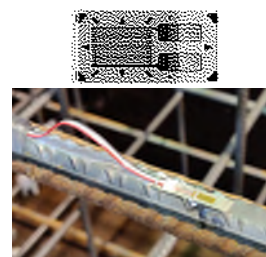
V-Link-200 från LORD



TC-Link 1CH-LXRS från LORD



Micro Measurements Concrete Embedment Strain Gage EGP-5-350



Svetsade töjningsgivare CEA-XX-125UN-350 från Micro Measurement

Figur 22 Viktiga komponenter ingående i mätsystemet

I figur 23 visas nedladdningen av data med en mobil gateway. Gateway:en är inringad i bilden och kopplad via kabel till dator.



Figur 23 Nedladdning av data från V-Link via mobil gateway (WSDA – Base-LXRS) till dator

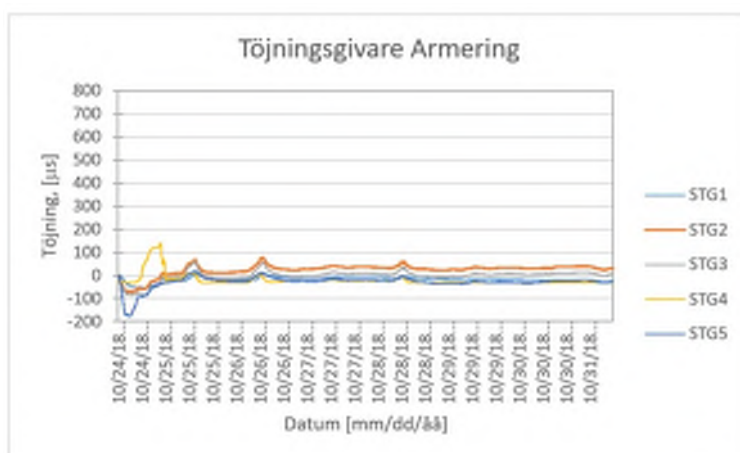
RESULTAT FRÅN MÄTNINGAR

Inledning

Mätdata redovisas separat för givare placerad på stål och betong samt för temperatur. Fyra av töjningsgivarna kopplades till nod 1 (8586) och fyra givare till nod 2 (15036). Numret inom parantes anger det fysiska nodnumret. Temperaturgivarna för långtidsmätning kopplades till nod 3 (3502). Därtill användes ett separat system för korttidsmätning av temperatur som tidigare rapporterats. Insamling av data har utförts mellan 20181024 till och med 20201211, dvs. strax över två år.

Töjningsgivare på armering

Totalt har fem stycken töjningsgivare monterats på stålarmeringen. Tre stycken, STG1-3 på stående armering och två stycken på byglar, STG4-5. Givare STG1-STG4 kopplades till nod 1 och STG5 till nod 2. Det har inte varit möjligt att samla all data i en sekvens eller i ett diagram, mängden data har varit alltför omfattande. Data har därför delats upp i fyra olika diagram med högst samplingsfrekvens i början av mätningen. Det har i figur 24 a) – d) valts att presentera data i samma skala – dock är skalan i Appendix B mer anpassad till respektive insamlingstillfälle. Vi kan också notera att töjningarna är relativt blygsamma innan ett flertal våningar byggts på.

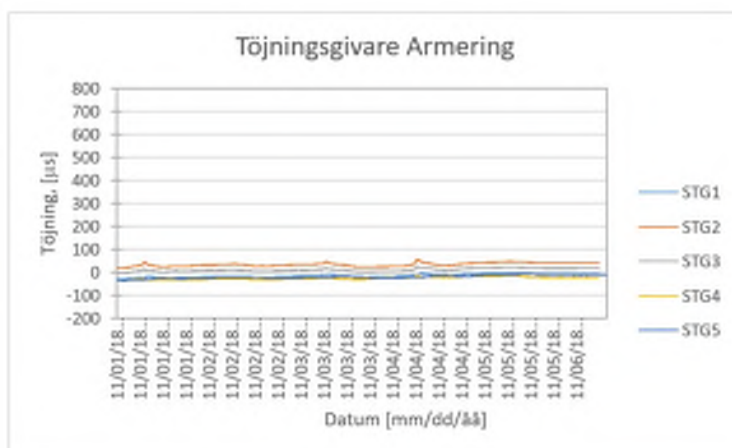


a)

Töjning i armering
STG1-3 Stående armering
Stg4-5 Byglar

181024 – 181031

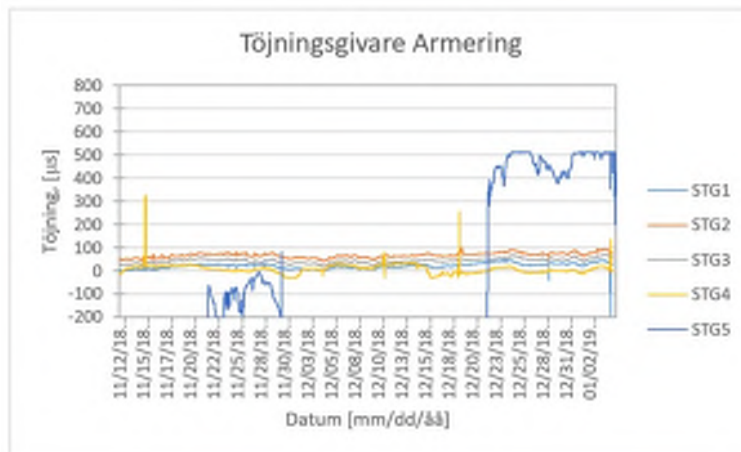
De stora rörelserna i början
är att hänföra till
temperatur. De mindre
rörelserna är avformning,
pålyft i Strömsund samt
avlyft i Solna



b)

Töjning i armering
STG1-3 Stående armering
Stg4-5 Byglar

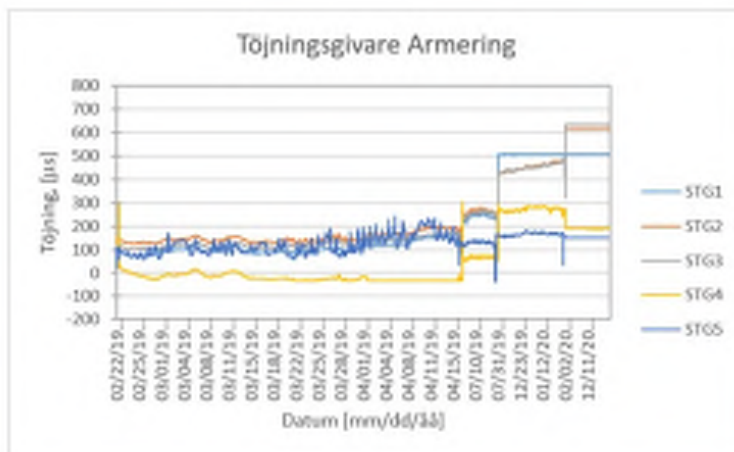
181101 - 181106



c)

Töjning i armering
STG1-3 Stående armering
Stg4-5 Byglar

181211-190201



d)

Töjning i armering
STG1-3 Stående armering
Stg4-5 Byglar

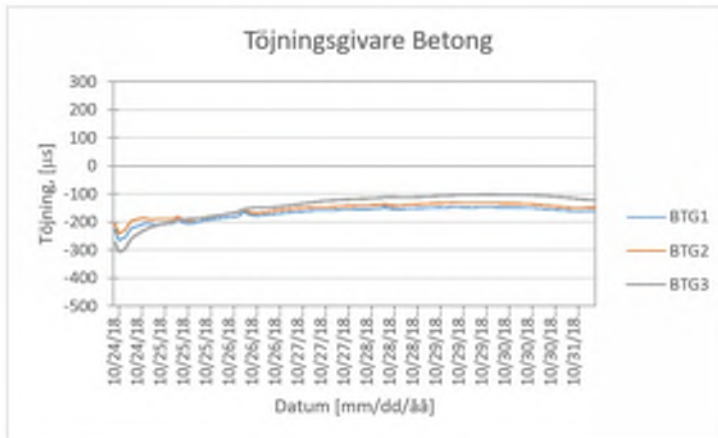
190222-201211

Figur 24 Töjningsgivare armering

Töjningsgivare på betong

Totalt har tre givare gjutits in i betongen. Två givare i pelarens axiella riktning, BTG1-2 samt en givare i motsatt riktning. Samtliga betonggivare kopplades in i nod 2. På motsvarande sätt som för töjningsgivarna på armeringen har den uppmätta töjningen i betongen delats upp i fyra sekvenser. I figur 25 a) – d) har valts att redovisa töjningarna i samma skala.

I Appendix B har skalan anpassats efter töjningsnivå. Det bör också nämnas att när det gäller nod 2 så hade vatten kommit in i systemet strax efter montage av pelare. Orsaken till detta var mest troligt att någon hade öppnat locket och ”tittat in” så att vatten kunde rinna in och därefter frysa. Efter uttorkning så fungerade noden hyfsat igen, men viktig data i början av mätningen är störd.

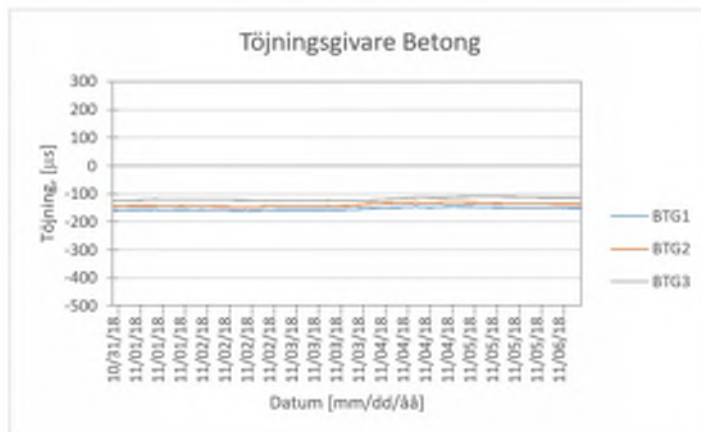


a)

Töjning i betong
BTG1-3

181024 – 181031

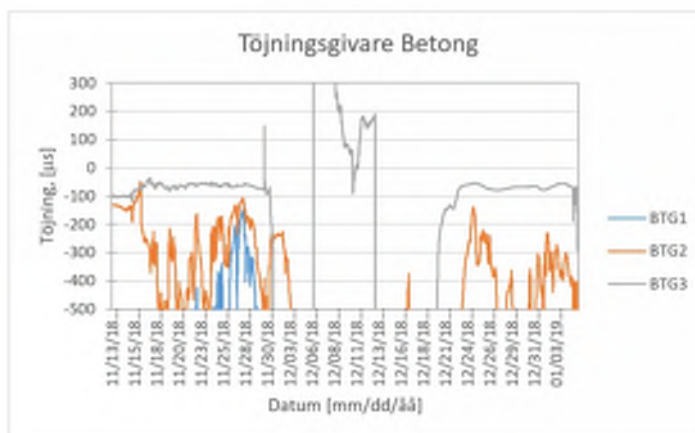
Rörelser i början är att
hänföra till temperatur



b)

Töjning i betong
BTG1-3

181031 - 181106

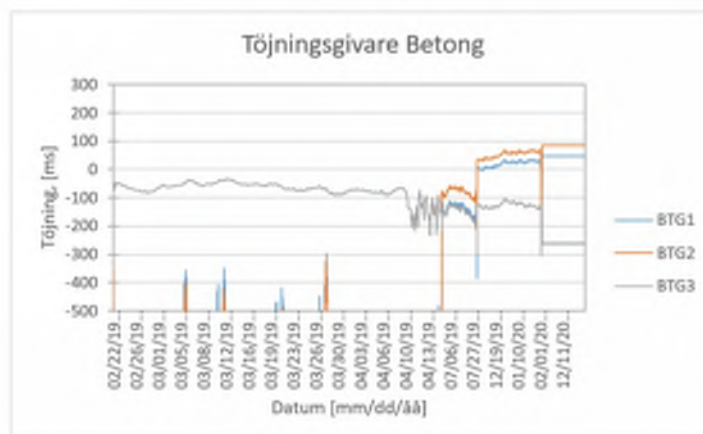


c)

Töjning i betong
BTG1-3

181113 – 190301

Fukt hade kommit in i
systemet



d)

Töjning i betong
BTG1-3

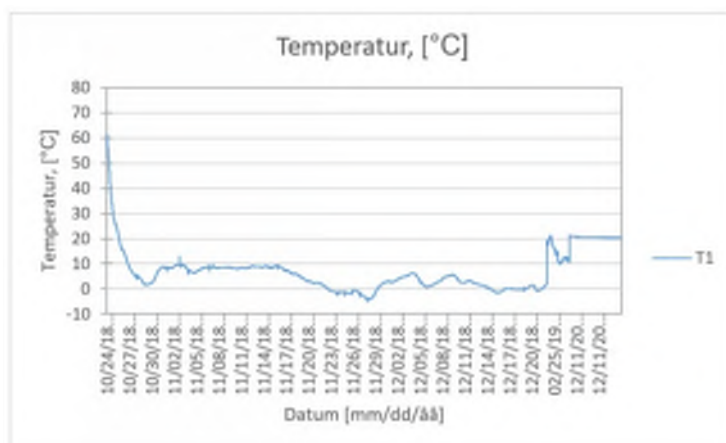
190222 – 201211

Stabilare mätdata efter
uttorkning, dock
fortfarande något störd i
början av mätserien

Figur 25 Töjningsgivare betong

Temperaturgivare

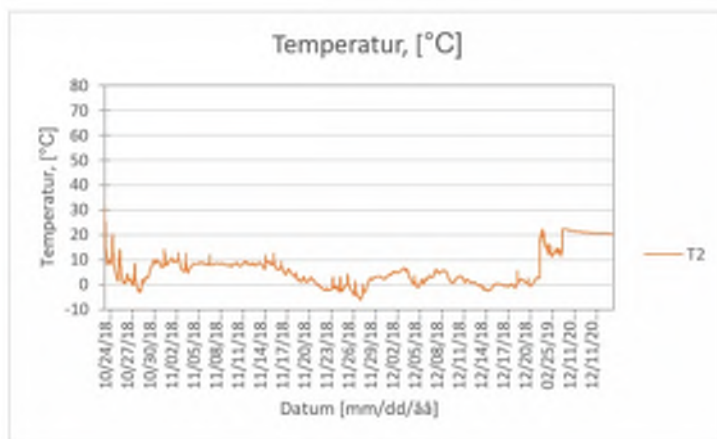
Två temperaturgivare, T1 och T2 göts in för att följa temperaturen över tid. Därtill monterades ytterligare 6 temperaturgivare för att följa temperaturen under gjutning, tmp1-tmp6, se figur 27. Placeringen av dessa givare har tidigare visats i figur 15 samt i tabell 4.



a)

Temperatur i pelare
Centriskt

181024 - 201211

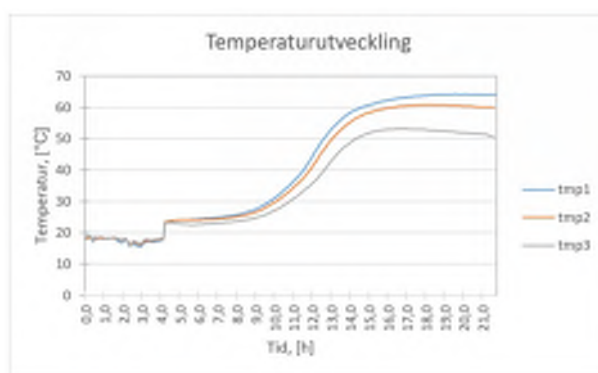
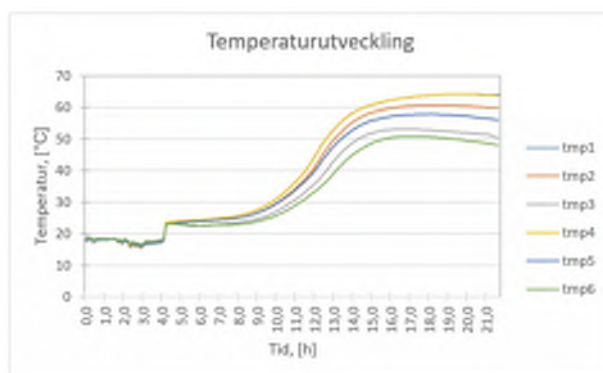


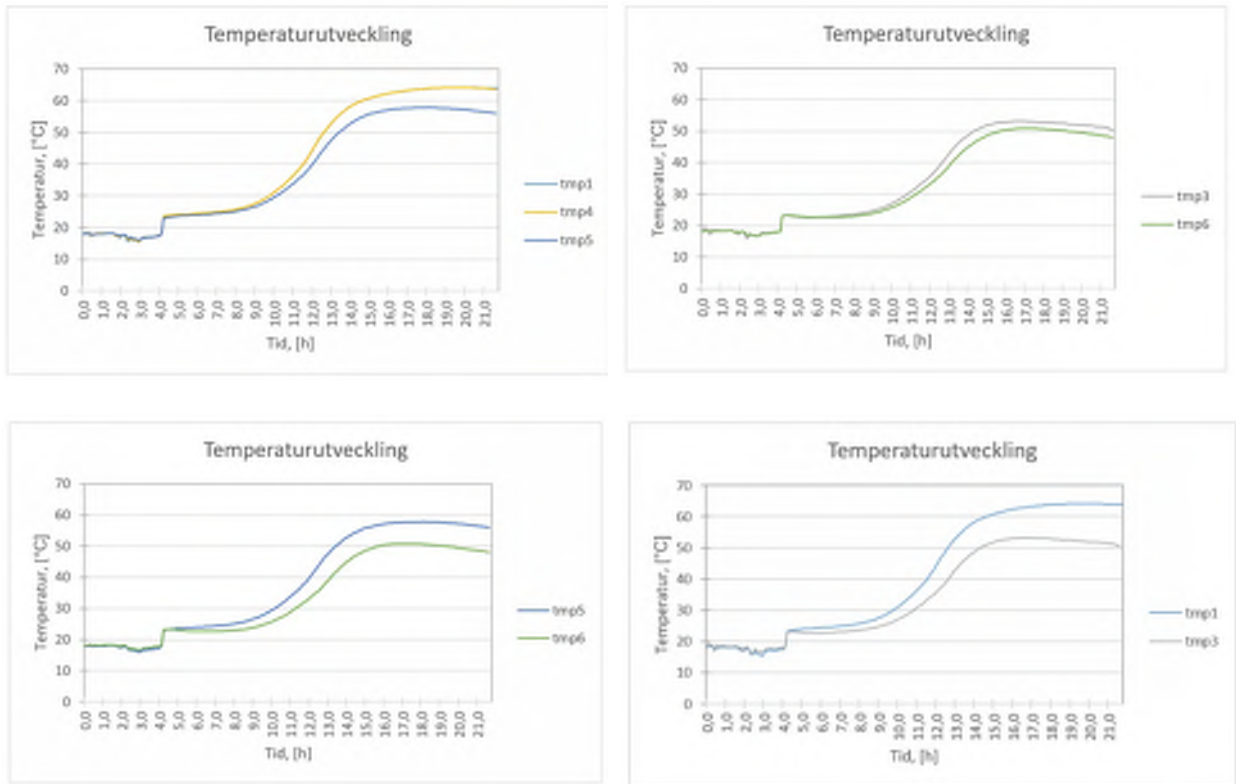
b)

Temperatur i pelare
Sida

181024 - 201211

Figur 26 Sammanställning av temperatur inuti och vid ytan av betongpelaren under ca 2 år



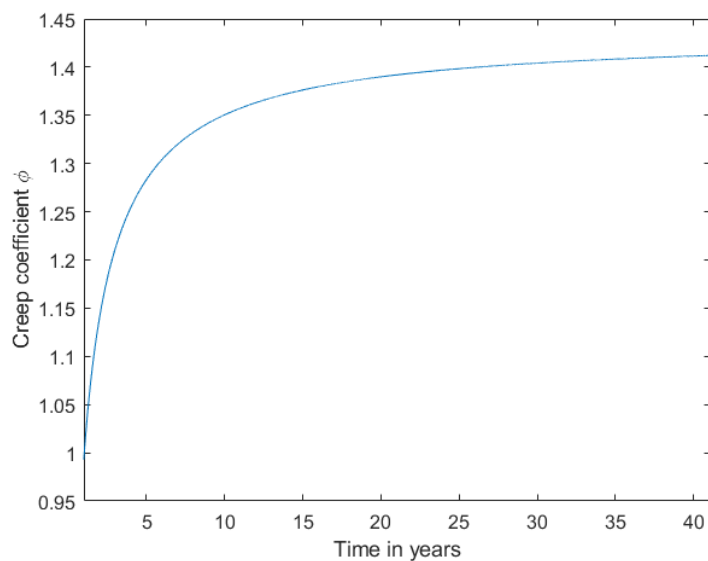


Figur 27 Sammanställning av temperaturutveckling i betongpelaren under gjutning och efterföljande dygn

UTVÄRDERING AV DATA

Krypning

Beräkning av krypningen görs enligt Appendix C. Vi har också uppskattat kryptalet redan efter 1 års belastning med såväl diagrammetoden som beräkningar. Kryptalet uppgår då till ca 0,4-0,5. Häri ligger då en stor osäkerhet. Gör vi en uppskattning över längre tid, t ex 50 år och med inomhusförhållanden erhåller vi ett kryptal på ca 1.5-1.7. Detta kan jämföras med det kryptal som SWECO räknade fram över tiden motsvarande ca 1.4 enligt figur 28.



Figur 28 Beräknat kryptal enligt SWECO

Krympning

Beräkningen av uppskattad krympning görs enligt EC2:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} = 99,0 + 74,3 = 173,3 \mu s$$

där

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0} = 0,431 \cdot 0,73 \cdot 236 = 74,3 \mu s$$

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{250}{250 + 0,04\sqrt{408^3}} = 0,431$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{cd,0} &= 0,85 \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot \exp\left(-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{f_{cmo}}\right) \right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH} = \\ &= 0,85 \cdot \left[(220 + 110 \cdot 6) \cdot \exp\left(-0,11 \cdot \frac{74}{10}\right) \right] \cdot 10^{-6} \cdot 0,598 = 198 \mu s \end{aligned}$$

$$\beta_{RH} = 1,55 \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right] = 1,55 \left[1 - \left(\frac{85}{100} \right)^3 \right] = 0,598$$

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \varepsilon_{ca}(\infty) = 0,988 \cdot 100 = 99 \mu s$$

och

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5(f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} = 2,5(40 - 10) \cdot 10^{-6} = 100 \mu s$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2t^{0,5}) = 1 - \exp(-0,2 \cdot 500^{0,5}) = 0,988$$

Uppskattar vi krympningen från mätdata över de 2 år då mätningarna pågått har vi mätt en töjning i tvärled, STG3, motsvarande $146 \mu s$ ($262-116$) μs , vilket stämmer relativt bra överens med det beräknade värdet ovan. Vi har antagit att töjning i tvärled till största delen beror av krympning. Även om det finns en viss effekt av tvärkontraktion i samband med belastning har vi bortsett från detta.

Temperatur

Risken för sprickbildning i samband med avformning samt i början av transporten undersöks överslagsmässigt genom att uppskatta sprickrisken S . Töjningen orsakad av ojämn temperatur mellan inre och yttre tvärsnitt av pelaren beräknas enligt:

$$\varepsilon_t = \alpha_c \cdot \Delta T = 10 \cdot 10^{-6} \cdot 12 = 120 \mu s$$

Där betongens temperaturutvidgningskoefficient även i ungt tillstånd har satts till $10 \cdot 10^{-6} 1/^\circ C$. Vi har ingen beräkning gällande betongens hållfasthetstillväxt för den aktuella betongen, men försök gällande elasticitetsmodul under ung ålder visar att den uppnår ca 15 GPa efter 1 dygn enligt (Namazi, 1993). Betongens draghållfasthet efter 1 dygn uppgår till ca 1 – 2 MPa enligt (Hassanzadeh, 1998), vi antar här 1.5 MPa för den aktuella betongen. Detta kan betyda att betongen spricker upp vid:

$$\varepsilon_{ct} = \frac{f_{ct,24h}}{E_{c,24h}} = \frac{1,5}{15 \cdot 10^3} = 100 \mu s$$

dvs

$$\eta = \left(\frac{120}{100} \right) = 1,2 > 1,0$$

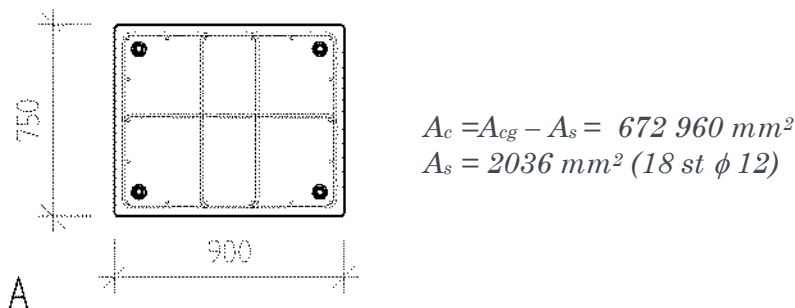
Det innebar således att det fanns en risk för sprickbildning i samband med avformning. Dock kunde inga sprickor noteras efter avformning, och inte heller när pelaren var på plats.

Belastning

Pelarens statiska bärförmåga kan beräknas generellt enligt (McCormac & Brown, 2015):

$$N_{Rd} = A_c f_{cd} + A_s f_{yd} = A_c \varepsilon_c E_c + A_s \varepsilon_s E_s$$

Här har vi i utvärderingen inte tagit hänsyn till snedställningar eller imperfektioner. Vidare används materialdata som kan antas motsvara den verkliga hållfastheten, dvs inga partialkoefficienter används. Självklart finns det en osäkerhet i detta betraktelsesätt, men det ger en grov uppskattning om påkänningen på den studerade pelaren och hur väl det överensstämmer med beräknade laster. Tvärsnittet framgår av figur 29.



Figur 29 Pelarens tvärsnitt (Installationsskruv i hörn)

Betongens kapacitet beror av den elastiska töjningen av lasten, effekten av krympning och krypning. Vi tar inte hänsyn till krypningen direkt, dels är kryptalet relativt litet vid låg tidpunkt, vilket ger en relativt låg reduktion i E-modul, dels kommer en del av den krypning som uppstår att registreras i töjningen i axiell led, vilket då även kommer med i nedanstående töjning.

$$N_{Rd} = A_c f_{cd} + A_s f_{yd} = A_c (\varepsilon_e + \varepsilon_{cs}) E_c + A_s \varepsilon_s E_s$$

$$N_c = A_c (\varepsilon_e + \varepsilon_{cs}) E_c = 672960 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{65 + 89}{2} + 143 \right) \cdot 10^{-6} \cdot 37 \cdot 10^9 = 5478 \text{ kN}$$

Där $\varepsilon_e = (65 + 89)/2 = 77 \mu\text{s}$, är medelvärdet av töjningen i betongen i axiell led för BTG1 och BTG2 när samtliga 36 våningar är byggda. Detta värde erhålls ur figur 25 a) och d) där vi har tagit medelvärdet av absolutvärdet från de två tidpunkterna. Här har valts en tidpunkt där töjningskurvan planat ut och ingen effekt av hydrationsvärmen påverkar. På motsvarande sätt erhålls lasten i stålarmeringen där

$$N_s = A_s \varepsilon_s E_s = 2036 \cdot 10^{-6} \cdot 576 \cdot 10^{-6} \cdot 205 \cdot 10^9 = 240 \text{ kN}$$

Där $\varepsilon_s = (529 + 579 + 621)/3 = 576 \mu\text{s}$, medelvärdet av absoluttöjningen i stålarmeringen i axiell led

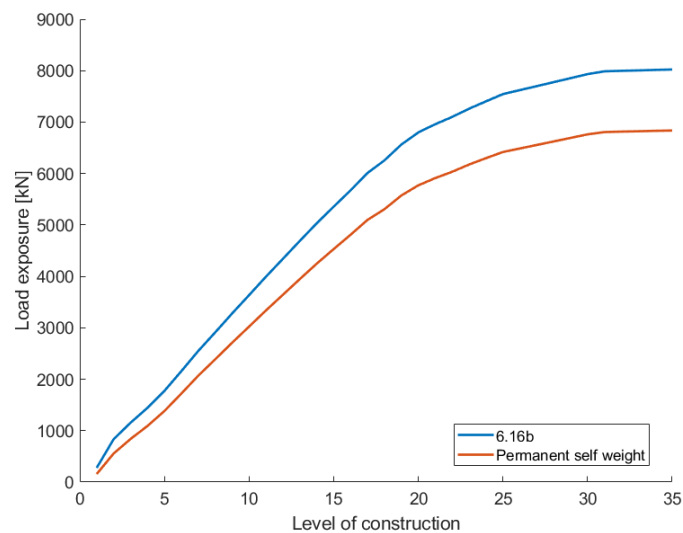
$$N_{Rd} = N_c + N_s = 5478 + 240 = 5718 \text{ kN}$$

Detta värde stämmer relativt väl överens med det beräknade värdet på 6774 kN, se också återigen den nedre kurvan i figur 30 där påkänningen beräknats teoretiskt för antal byggda våningsplan. Den övre kurvan visar lasten som funktion av antal våningsplan samt variabel last på varje våning.

Vi kan också beräkna spänningen i byglarna, vilket uppgår till

$$\sigma_s = \varepsilon_s E_s = \left(\frac{219 + 171}{2} \right) \cdot 10^{-6} \cdot 205 \cdot 10^9 = 40 \text{ MPa.}$$

Där ε_s är medelvärdet av absoluttöjningen för de två töjningsgivarna på stålbyglar. Detta betyder också att vi har en viss effekt av tvärkontaktion som inte beaktats i ovanstående beräkningar.



Figur 30 Last som funktion av antal våningsplan

SLUTSATSER OCH FÖRSLAG TILL FORTSATT UTVECKLING

Slutsatser

Det genomförda projektet har varit väldigt intressant och utmanande. Dessutom har författaren inte funnit motsvarande undersökningar i litteraturen, även om några snuddar vid liknande frågeställningar.

I en studie där mätdata samlas in och skall översättas till något tillämpbart finns det inte bara fallgropar gällande hantering av utrustning och mätdata utan också ett antal källor som kan ge upphov till fel. Den från försök framräknade lasten 5 718 kN stämmer förvånansvärt väl överens med den genom FE-analysen nedräknade lasten på pelaren, 6 774 kN. Dock finns det en stor osäkerhet i hur töjningarna ska utvärderas. I början av gjutningen påverkades pelaren, och därmed töjningarna, väldigt mycket av temperaturutvecklingen. I början sker även en del av den autogena krympningen, hur stor den är kan i detta fall inte kvantifieras. Vi har då gjort antagandet att krympningen startade efter att temperaturkurvan planade ut – här har vi förstås en felkälla. Vi har också antagit att krympningen i stort sett är klar efter 2 år. Vi har också antagit att den uppkomna krympningen motsvarar den töjningsförändring som vi har i obelastad riktning, dvs den töjning som vi mäter upp i BTG3. Den töjningsgivare torde dock också påverkas av tvärkontraktionen och vi kan se en viss påverkan på den byglar där töjningen mäts. Effekten av detta är dock svårt att kvantifiera och detta är förstås också en felkälla.

En ytterligare faktor som är svår att följa upp är effekten av krympningen. Pålastning startade efter ca 1 år – i alla fall med last som ser ut att ha påverkat pelaren. Betongen kan då ha ansetts uthärdad. Därefter har pålastning av nya våningar skett tills att samtliga 36 våningar byggts. Det borde då finnas en viss krypeffekt, men den har vi inte kunnat skilja från den elastiska töjningen. Oavsett detta torde en större del av krympningen komma med tiden.

Frågan är om syftet med projektet har uppnåtts, dvs har vi erhållit en ökad kunskap om påkänningar i det prefabricerade byggnadselementet från gjutning till färdig byggnad och hur väl stämmer detta överens med de beräkningar som utförts?

Att en ökad kunskap erhållits är utan tvivel. Vi ser t ex vid gjuttillfället att temperaturutvecklingen negativt kan påverka betongelementen, vilket är enkelt att åtgärda med temperaturstyrning. Vi kan inte se några negativa effekter av transport eller installation. Här uppmäts väldigt små påkänningar. Pelaren erhåller last efter ca 1 år då byggandet tar fart. Vi ser också hur det är möjligt att följa påkänningarna i pelaren över tiden och att, med ovanstående antagande, den beräknade lasten från mätdata stämmer relativt bra överens med den från FE-analysen beräknade.

Vi kan dock inte dra tillräckliga slutsatser från mätningen för att kunna förbättra befintliga beräkningsmodeller, eller så är de tillräckligt bra för de ändamål de används och att den dimensionering som används i stor grad motsvarar vad som sker i verkligheten.

Förslag till fortsatt utveckling

Fortsatt forskning kan förslagsvis delas in i tre områden

- Byggnadsdel
- Mätteknik
- Tid

Byggnadsdel

I det aktuella projektet fanns det endast möjlighet att studera en prefabricerad betongpelare – vilket i och för sig var väldigt bra. Vi ser dock utmaningen i samband med den utvärdering som genomförts. Det hade varit bra om man tillverkat två exakt samma pelare, där en provkropp användes som referens, där endast krympningen studerades. Då skulle effekten av denna felkälla kunna minimera. I tillägg till detta hade man kunnat utföra krypförsök på ung betong över tid för att klargöra komplians och kryptal.

Mätteknik

Den utrustning som används fungerade i det stora bra, men en stor nackdel var att vi inte kunde koppla upp via molnet och genomföra automatisk nedladdning av data. Detta bör planeras bättre vid eventuella framtida projekt. Därtill föreslås att man, trots extra kostnad, installerar dubbla system, dvs så man har en backup. Vad som också hade varit möjligt är att bygga en digital modell av pelaren där man hade kunnat undersöka direkt effekt av pelaren på plats och referenspelaren föreslagen ovan. Då hade det, i alla fall i teorin, varit möjligt, att följa olika effekter under pålastning.

Tid

En ytterligare viktig aspekt när det eventuellt gäller liknande framtida projekt är att avsätta betydligt längre tid för uppföljning. De två år som vi följde projektet här är förstas bra, men skulle projektet kunnat ha följas under minst 10 år kunde tidsberoende effekter undersökts mer noggrant.

REFERENSER

- AB Svensk Byggtjänst AB och Cementa AB, 1982, *Betonghandboken Material*, Svensk Byggtjänst Stockholm, ISBN 9789173327992, p 1127
- ACI Committee 209, Report on Factors Affecting Shrinkage and Creep of Hardened Concrete, ACI 209.1R, 2005.
- Agarwal, R.K. and Gardner, N.J. 1974. Form and shore requirements for multistory flat slab type buildings. *ACI J. Proc.*, 71(11): 559–569.
- Bao Y., Chen Z., Wei S., Xu Y., Tang Z., and Li H., 2019, The State of the Art of Data Science and Engineering in Structural Health Monitoring, *Journal of Engineering*, Vol 5., pp 234-241
- Bazant Z.P. and Wittmann F.H., 1982, *Creep and Shrinkage in Concrete Structures*, Wiley, New York, 1982.
- Bisby L.A., Edt., 2006, An introduction to structural health monitoring, ISIS and SAMCO Educational Module 5, SAMCO Final Report 2006, www.samco.org, p 54
- Bognot J-R-, Candido C.G., Blanco A. C. and Montelibana J.R.Y, 2018, Building construction progress monitoring using unmanned arial system (UAS), Low-cost photogrammetry, and geographic information system (GIS), *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume IV-2, 2018 ISPRS TC II Mid-term Symposium “Towards Photogrammetry 2020”, 4–7 June 2018, Riva del Garda, Italy
- Boltzmann L., 1878, Concerning the theory of the elastic aftereffect, *Annalen der Physik* 241 (1878) 430–432.
- Choi S.W., Kim Y., Kim J.M. and Park H.S., Field monitoring of column shortenings in a high-rise building during construction, *Journal of Sensors*, ISSN 1424-8220, 13, 9085-9103;doi:10.3390/s131114321, p 14321-14338
- Collins J., Mullins G., Lewis C. and Winters D., 2014, State of the Practice and Art for Structural Health Monitoring of Bridge Substructures, Publication No. FHWA-HRT-09-040, U.S Department of Transportation, Federal Highway Administration, Research, Development, and Technology Turner-Fairbank Highway Research Center, 6300 Georgetown Pike, McLean, VA 22101-2296, p 100
- CTBUH. Burj Khalifa. url: <http://skyscrapercenter.com/building/burj-khalifa/3>
- Emborg, M., Bernander, S., Ekerfors, K., Groth, P., & Hedlund, H., 1997, *Temperatursprickor i betongkonstruktioner: Beräkningsmetoder för hydratationsspänningar och diagram för några vanliga typfall*. Väg- och Vattenbyggnad, Konstruktionsteknik. Luleå: Luleå Tekniska Universitet. Teknisk rapport 1997:02

European Committee for Standardization. 2004. EN. 1992-1-1, Eurocode 2: Design of Concrete Structures.

Glisic B., Ming L.J., Tat N.C., Inaudi D. and Yew Y.T., 2007, Large scale lifespan monitoring of high-rise buildings using long-gauge fibre optic sensors, **The 3rd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure**, Vancouver, British Columbia, Canada, November 13-16, 2007, pp7

Greulich G. and Rober C., 1988, Monitoring of high-rise buildings, *Journal of Surveying Engineering*, Vol. 114, No. 1, February, 1988. ©ASCE, ISSN 0733-9453/88/0001-0026/

Gulf Construction. Precast concrete. 2014. url: http://www.gulfconstructiononline.com/news/160379_BPC-claims-record-with-tallest-precast-building. Html

Ha T. and Lee S., 2013, Advanced construction stage analysis of high-rise building considering creep and shrinkage of concrete, *The 2013 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM13)*, Jeju, Korea, September 8-12, 2013, pp 2139-2147

Hassanzadeh M., 1998, Säkerhet vid Betongarbete – Utveckling av bärförmåga hos armerade betongkonstruktioner i tidig ålder, SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, Byggnadsteknik, SP Rapport 1998:08, p126

Hartl H., Handel Ch., “3D finite element modeling of reinforced concrete structures”, fib 2002 Osaka Congress, 13.-19. October 2002, Japan, 2002

Hedlund H., Blanksvärd T. och Jonasson J-E., 2018, Långtidsstudie av krypdeformationer i betongpålar med höga påkänningar, SBUF rapport ID: 12526, 2018, p46

Hejll A., 2007, Civil Structural Health Monitoring – Strategies, Methods and Applications, Doctoral Thesis, Luleå University of technology, ISBN: 978-91-85685-08-0, 2007:10, p189

Hejll A. och Täljsten B., 2005, Civil Structural Health Monitoring (SCHM) – Tillståndsbedömning genom mätning anpassad för anläggningskonstruktioner. Teknisk Rapport Luleå Tekniska Universitet, Institutionen för Samhällsbyggnad, Avdelningen för byggkonstruktion., 2005:33, ISSN:1402-1536

HSB. Några fakta om Turning Torso. 2015. url: <https://www.hsb.se/malmo/om-boende/vara-hyresratter/malmos-landmarke-turning-torso/nagra-fakta-om-turning-torso>

ISIS Canada, 2001, Guidelines for Structural Health Monitoring, Design Manual no. 2. ISBN 0-9689006-0-7

Jonasson J-E., Wallin K., Emborg M., Gram A., Saleh I., Nilsson M., Larson M. och Hedlund H., 2001, Temperatursprickor i betongkonstruktioner – Handbok med diagram för sprickriskbedömning inklusive åtgärder för några vanliga typfall., Luleå Tekniska Universitet, Institutionen för Väg- och Vattenbyggnad, Avdelningen för Konstruktionsteknik, Teknisk Rapport 2001:14, p 162

Khoo V. H.S., Tor Y.K, and Ong g., 2010, Monitoring of High Rise Building using Real-Time Differential GPS, FIG Congress 2010, Facing the Challenges – Building the Capacity, Sydney, Australia, 11-16 April 2010, pp14

Kim H-S. and Cho S-H, 2004, Column Shortening of Concrete Cores and Composite Columns in a Tall Building, CTBU 2004 Seoul Conference, p6

Levy M. and Salvador S., 2002, Why Buildings Fall Down: How Structures Fail, ISBN-10039331152X, p 352

Namazi M., 1993, Bestämning av betongens dynamiska E-modul vid tidig ålder – Jämförelse med statisk E-modul, Tekniska Högskolan i Lund, Avdelning för Bärande Konstruktioner, Rapport TVBK – 5068, p 47.

Neves C., 2017, Structural Health Monitoring of Bridges – Model-free damage detection method using Machine Learning, Licentiate thesis in structural engineering and bridges, Stockholm, Sweden, 2017, KTH, TRITA-BKN BULLETIN 149, 2017, ISSN 1103-4270, ISRN KTH/BKN/B-149-SE, p 92

Neville A.M., 2012, Properties of Concrete, fifth ed., Prentice Hall, San Francisco, 2012.

Nielsen, K.E.C. 1952. Loads on Reinforced Concrete Floor Slabs and Their Deformations during Construction. Proc. No. 15, 113 pp. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm.

McCormac J.C. and Brown R.H., 2015, Design of Reinforced Concrete, tenth ed., Wiley, New York, 2015.

Park H.S., Shin Y., Choi S.W. and Kum Y., 2013, An integrative structural health monitoring system for the local/global responses of a large-scale irregular building under construction, Journal of Sensors, ISSN 1424-8220, 13, 9085-9103;doi;10.3390/2130709085, p 9985-9103

Park H.S., Shon H.G., Kim I.S and Park J.H., 2004, Monitoring of structural behaviour of high-rise buildings using GPS, CTBUH, October 10-13, Seoul Conference, South Korea, 2004, pp 1064-1071

Patil D. and Bajad M.N., 2016, Predicting Axial Shortening of Vertical Elements in High Rise Buildings by Using PCA Method, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 5, Issue 7, July 2016, ISSN 2319-8753.

Popescu, C. Täljsten., B.; Blanksvärd, T.; Elfgren, L. (2019). "3D reconstruction of existing concrete bridges using optical methods." *Structure and Infrastructure Engineering*. 15(79), p. 912–924.

Popescu, C., Täljsten, B., Blanksvärd, T. and Elfgren, L. (2020). "A comparison between laser scanning, photogrammetry and infrared scanning to create 3D digital models of existing concrete bridges." IABSE Symposium: Synergy of culture and civil engineering – History and challenges. Wroclaw, Poland

Raksha H.L., Karthik S. and Madhukeshwara J.E., 2016, International Journal of Research in Engineering and Technology, Vol. 5, Issue 09, Sep-2016, Available @<http://ijret.esatjournals.org>.

Su L., Wang Y-F., Mei S. and Li P-F., 2017, Experimental investigation on the fundamental behavior of concrete creep, Construction and Building Materials 152 (2017) 250–258, pp 250-258

Söderström A., 2019, Field study of RC column in high rise building – Monitoring and analysis, Master Thesis, Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Umeå University, p 71

Woolson I.H., 1905,, Some remarkable tests indicating 'flow' of concrete under pressure, Eng. News. 54 (1905) 459–460.

Zou D., Du C., Liu T., Teng J. and Chen H., 2019, Time-dependent deformations of concrete columns under different construction load histories, Advances in Structural Engineering, 2019, Vol, 22(8), pp 1845.1854

<https://www.thestructuralworld.com/creep-shrinkage-explained/creep/>

<https://www.nicrostrain.com>

APPENDIX A – FOTOMONTAGE



Armeringskorg innan gjutning



Slipning av armering innan givar montage



Svetsning av givare på armering



Monterad givare på armering



Givarna skyddas med epoximassa



samt aluminiumfolie



STG1



STG2



STG3



STG4



STG5



Givare för betong i axiell led, BTG1



BTG2



Givare för betong i tvärlid, BTG3



”Hjärnan” i systemet. Innehållet har tidigare presenterats i huvudrapporten



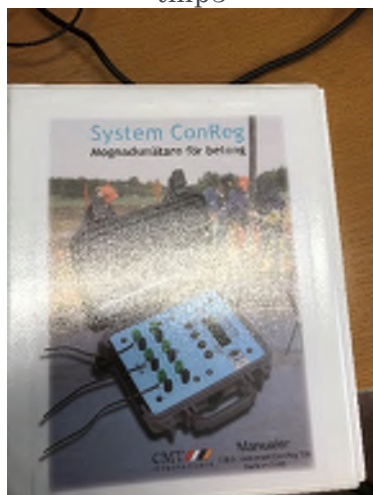
Placering av låda för insamling av data. Observera också kabeldragningen under lådan. Samtliga kablar går in i baksidan. Lådan är IP68 klassad. I mitten syns också grön/vitt termoelement



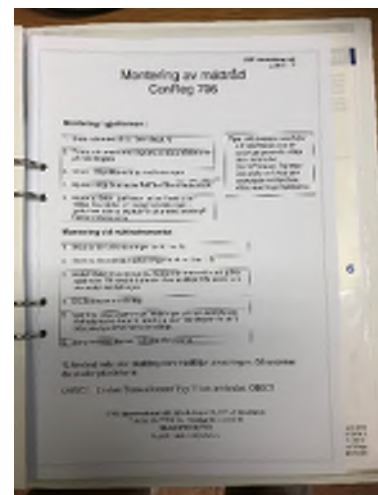
Termoelement för mätning av temperatur under gjutning och det första dygnet, tmp1-tmp3



Utrustning för mätning av temperatur 1.a dygnet



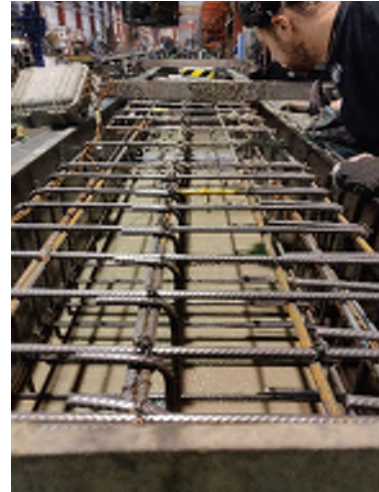
Utrustning för mätning av temperatur 1.a dygnet



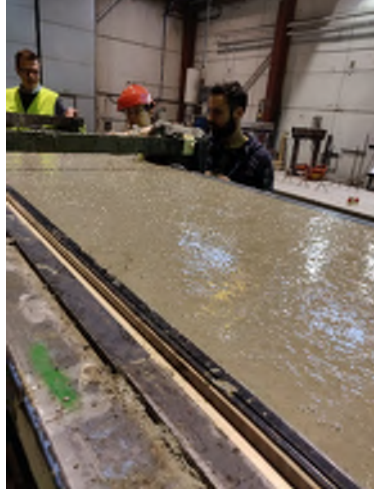
Instruktioner till mätsystem



Färdig form innan gjutning



Pågående gjutning



Färdig gjutning



Lyft i samband med avformning



Pelaren innan transport

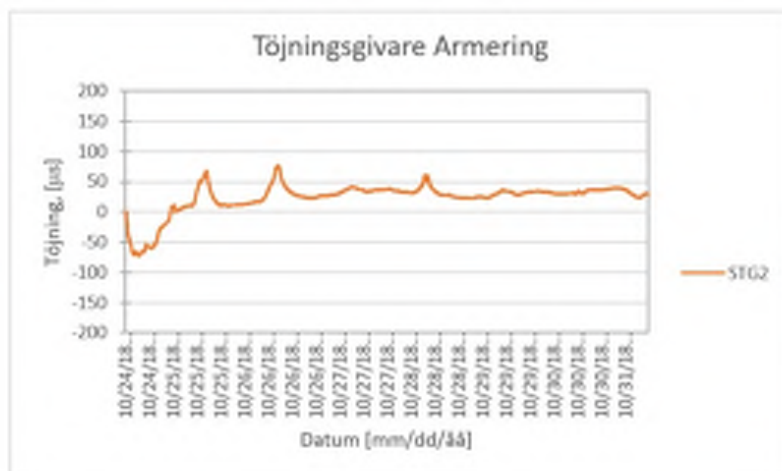
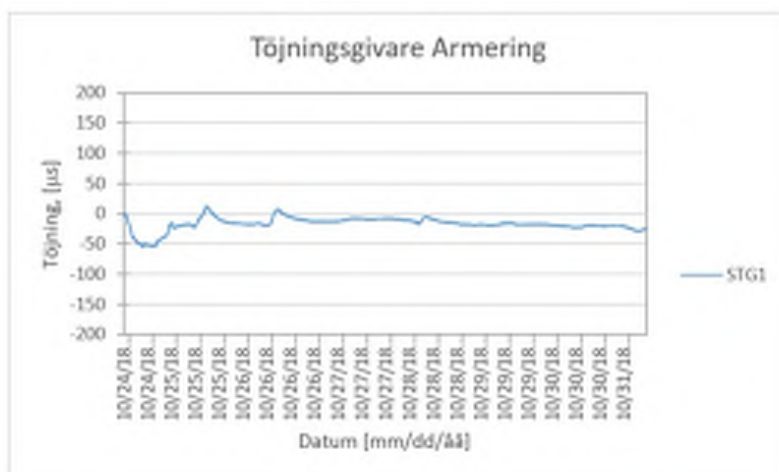
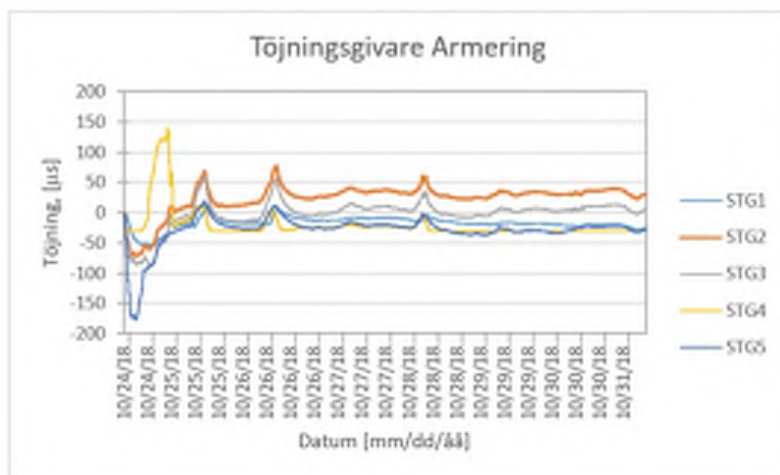


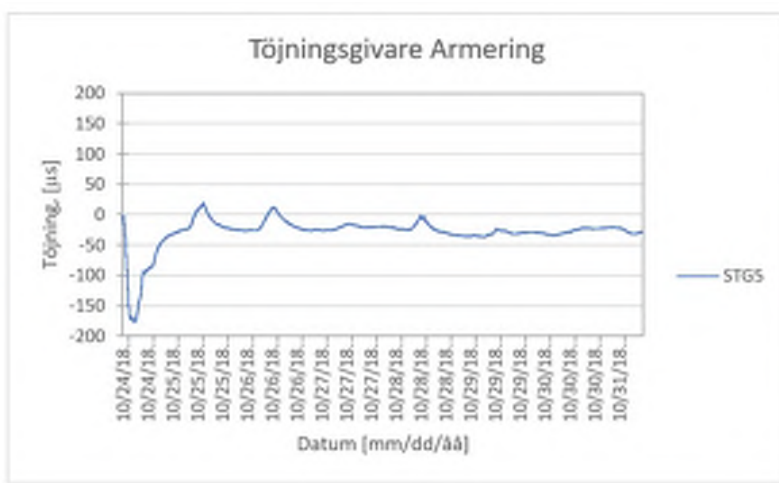
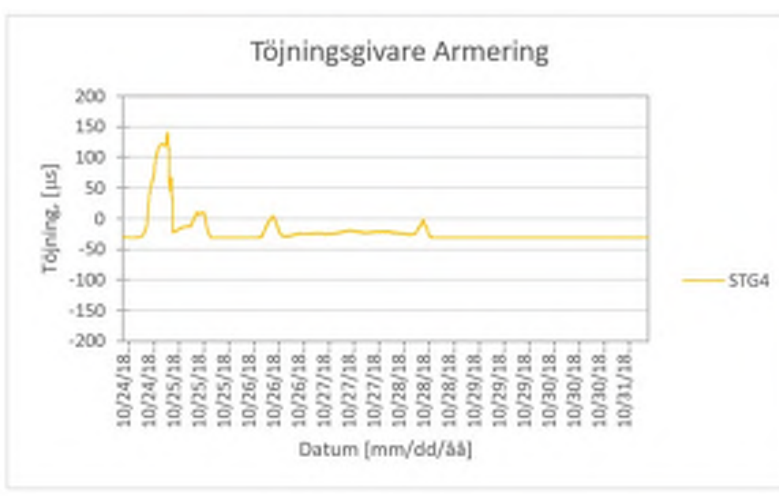
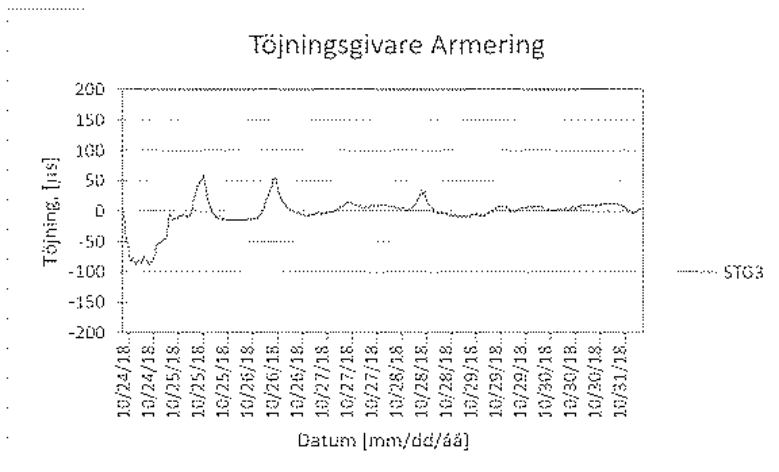
Pelaren monterad på plats

APPENDIX B – MÄTRESULTAT

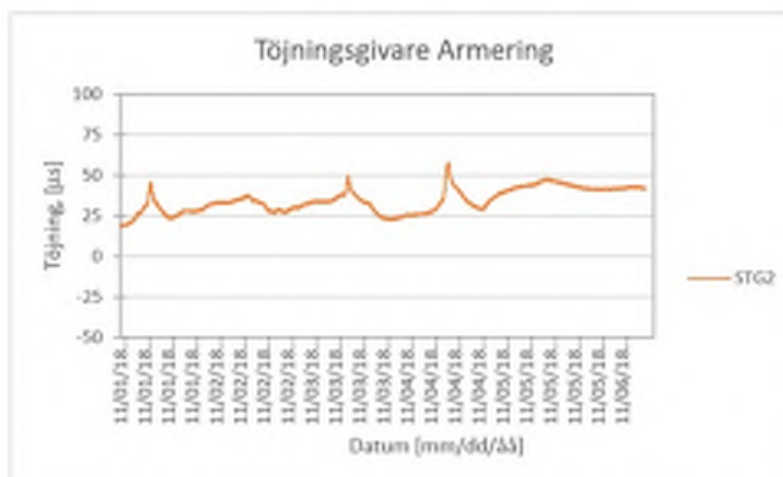
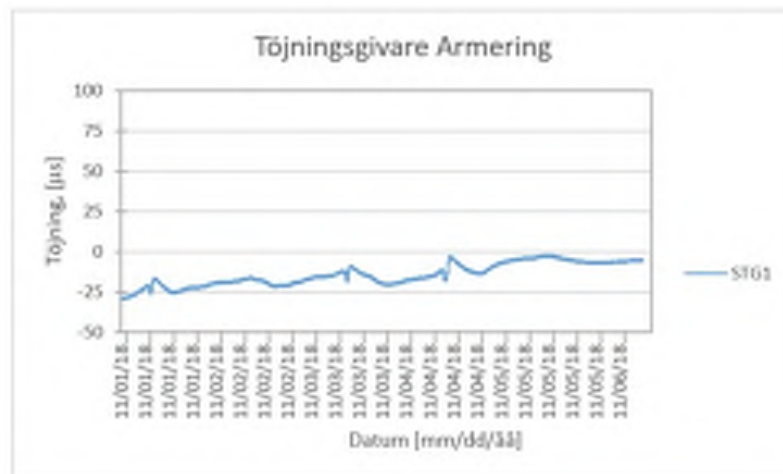
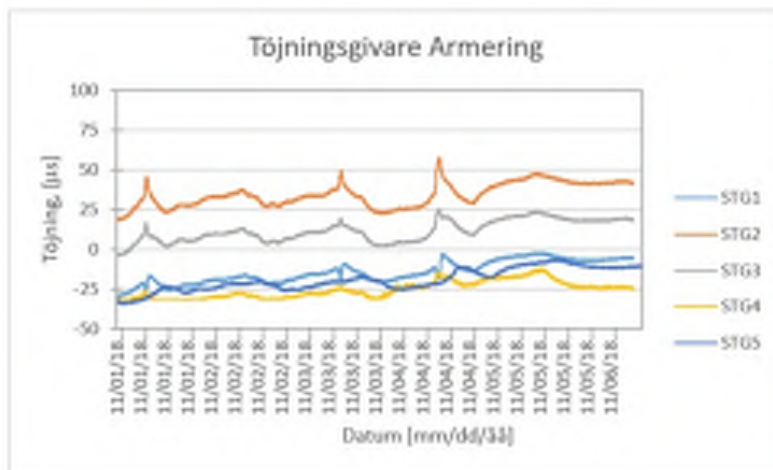
I detta appendix redovisas samtliga givare individuellt.

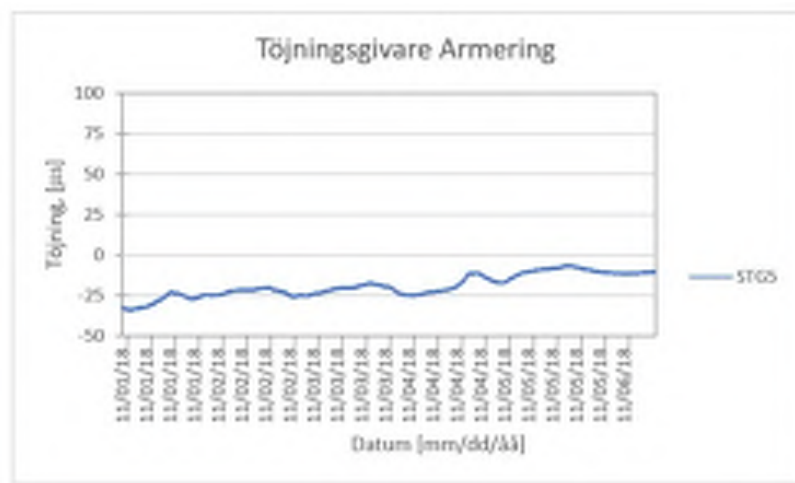
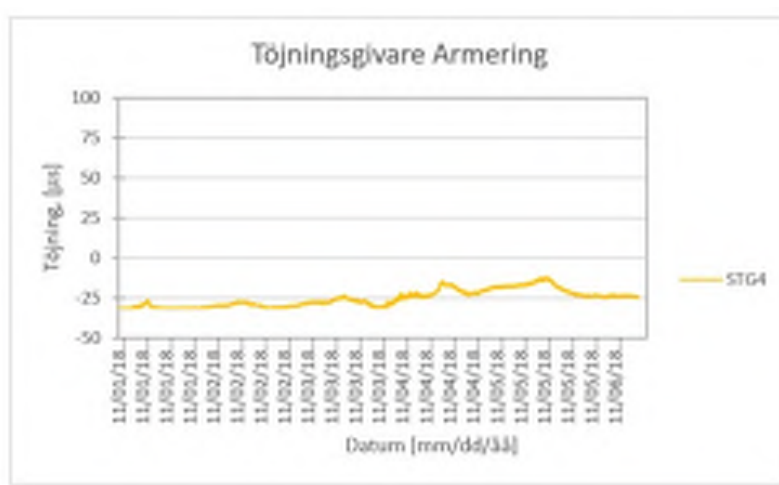
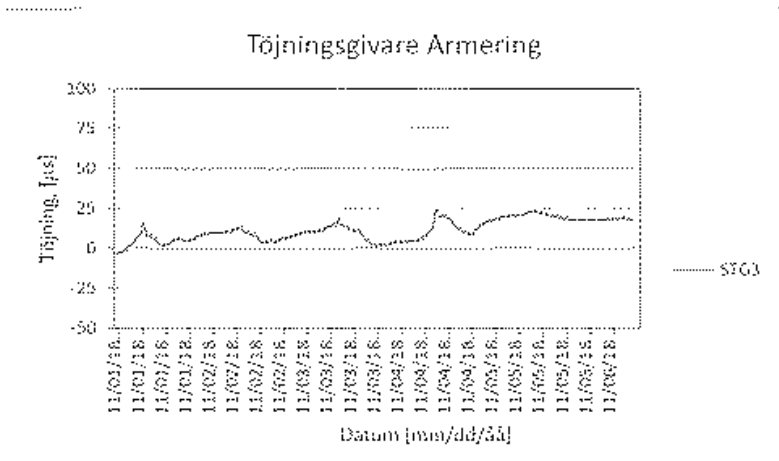
Töjningsgivare Armering 20181024-20181031



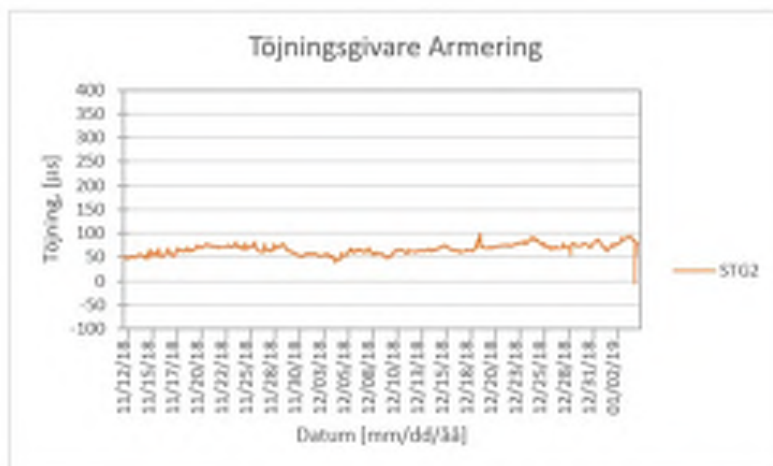
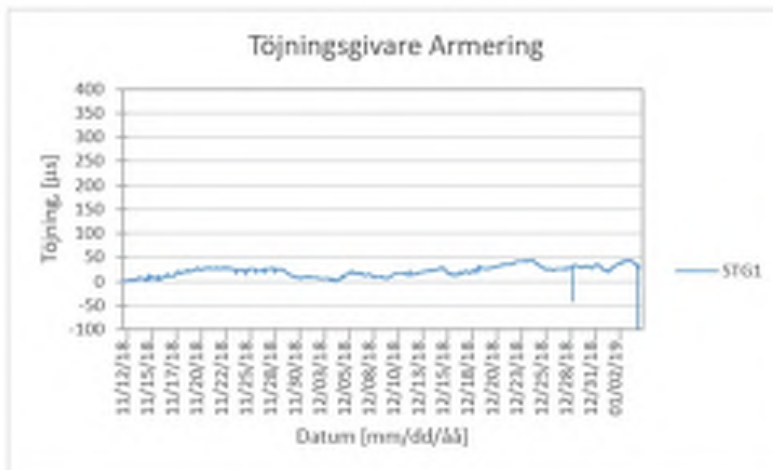
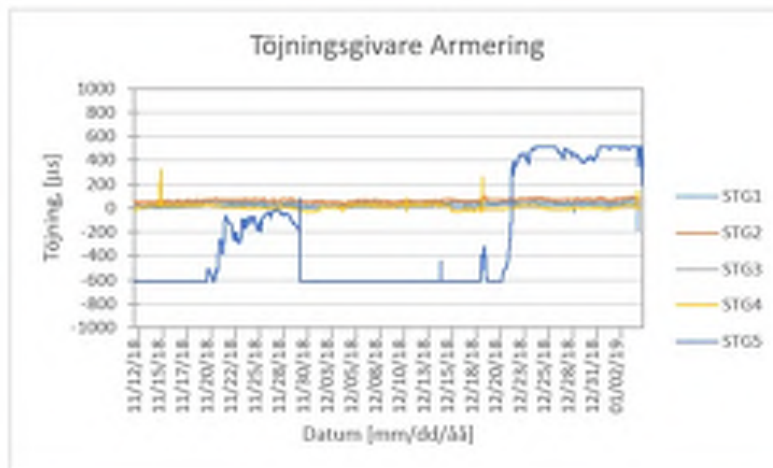


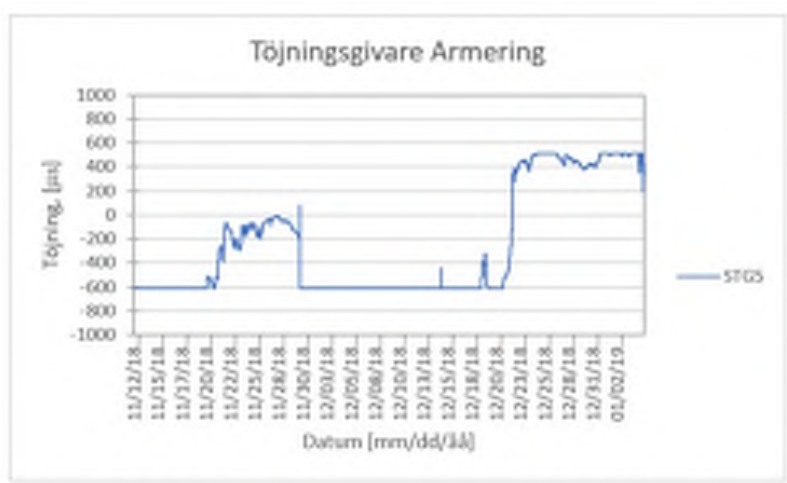
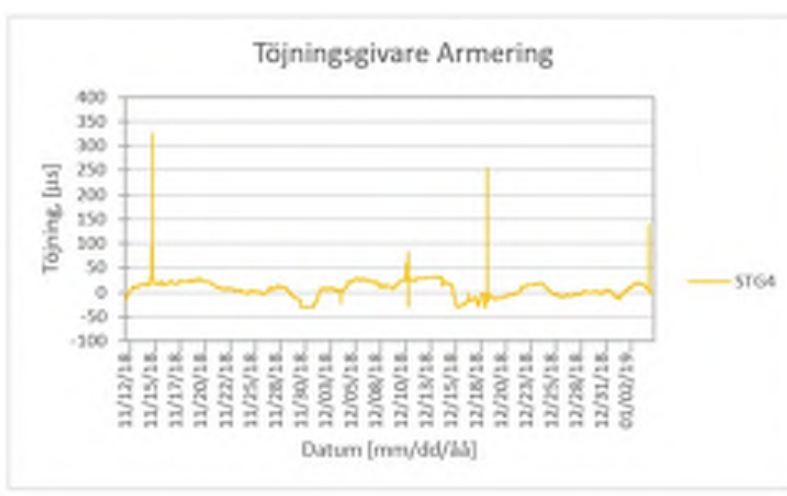
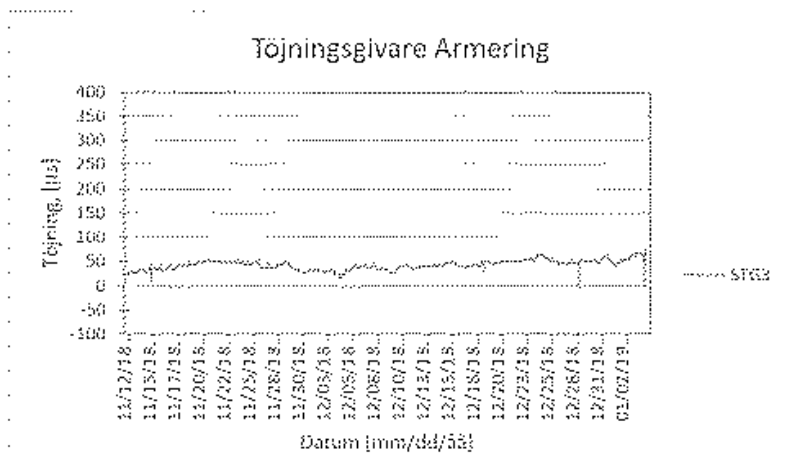
Töjningsgivare Armering 20181101 - 20181106



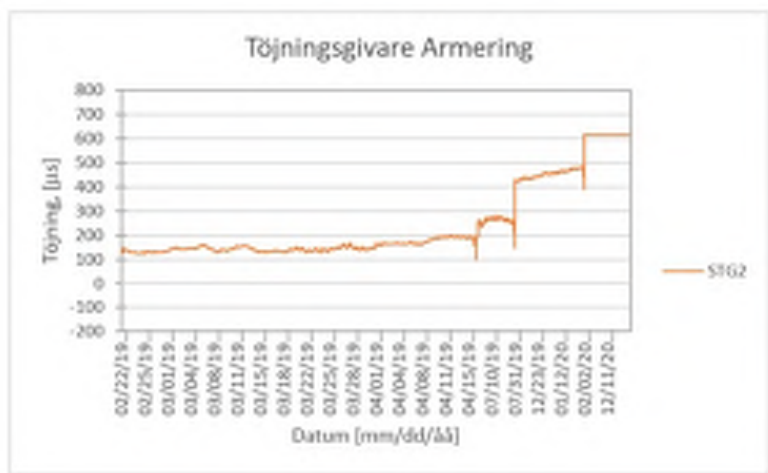
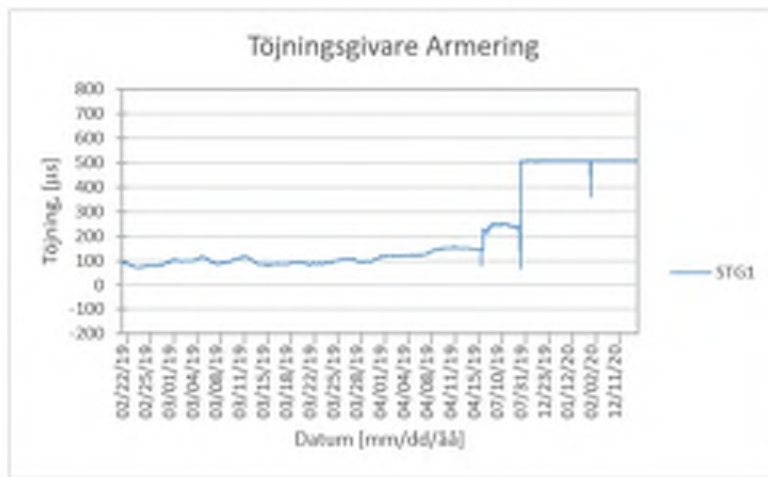
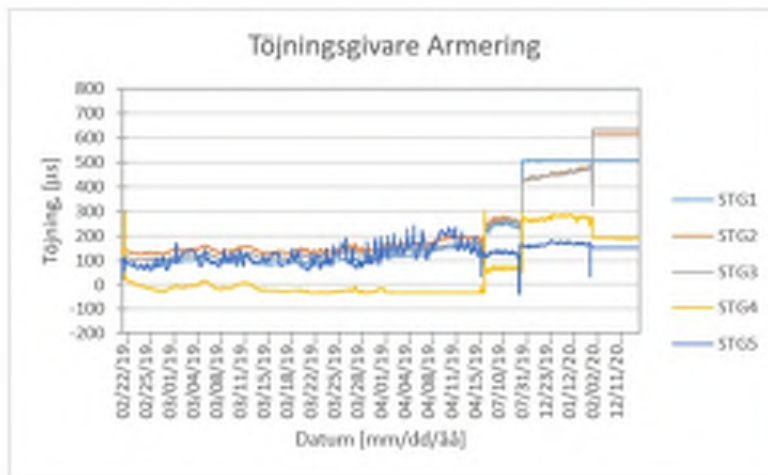


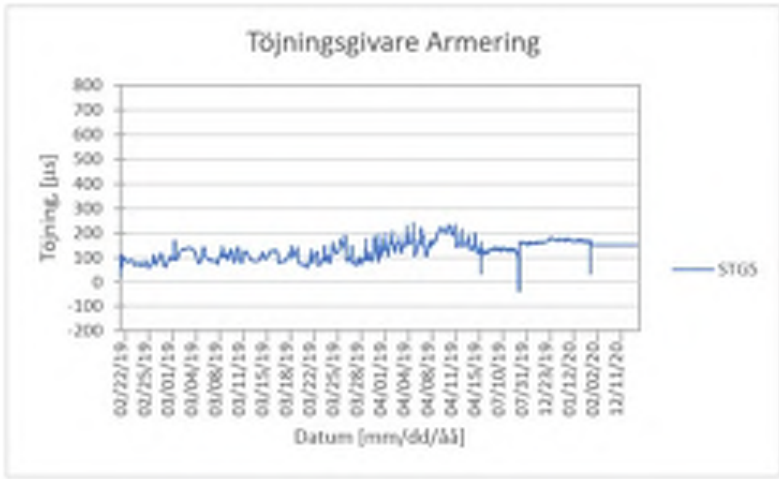
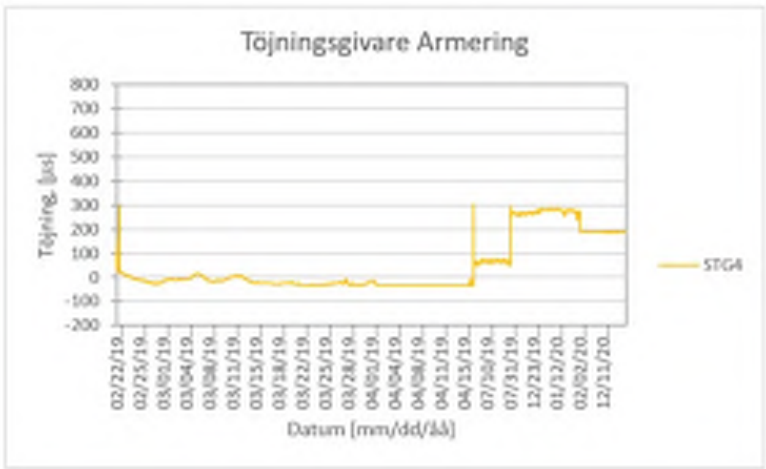
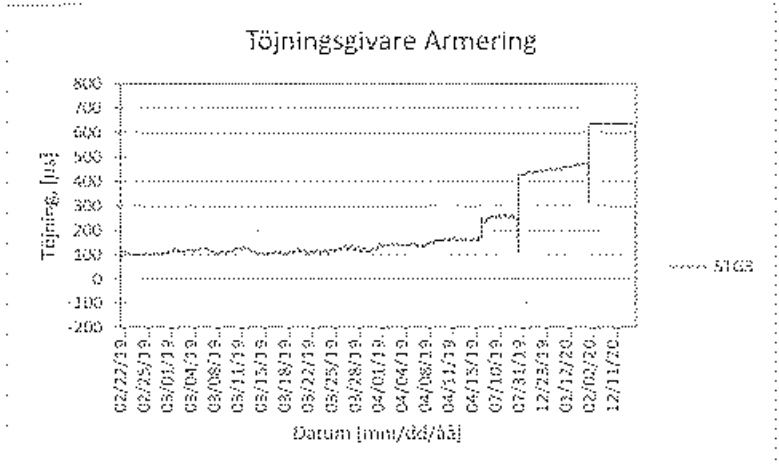
Töjningsgivare Armering 20181211 - 20190201



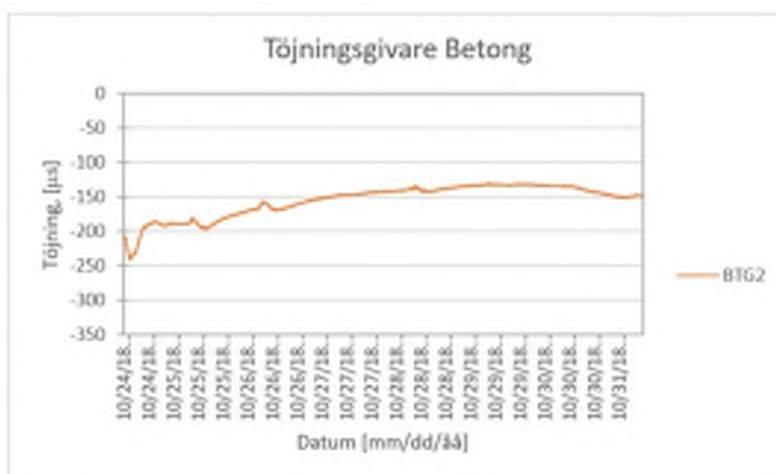
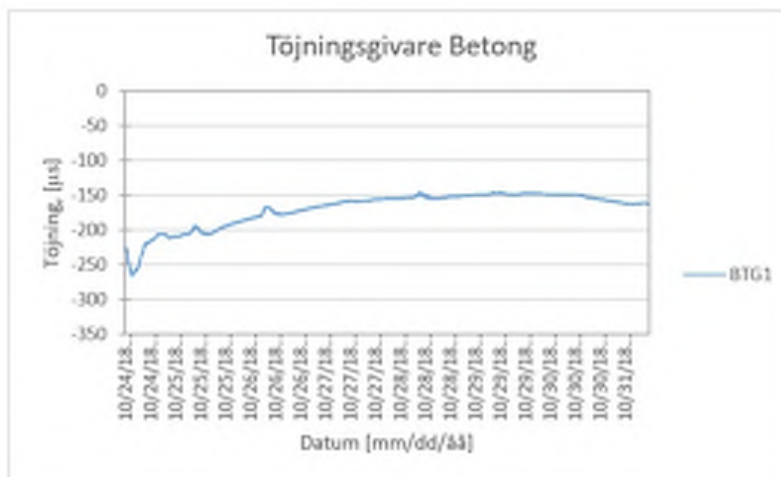
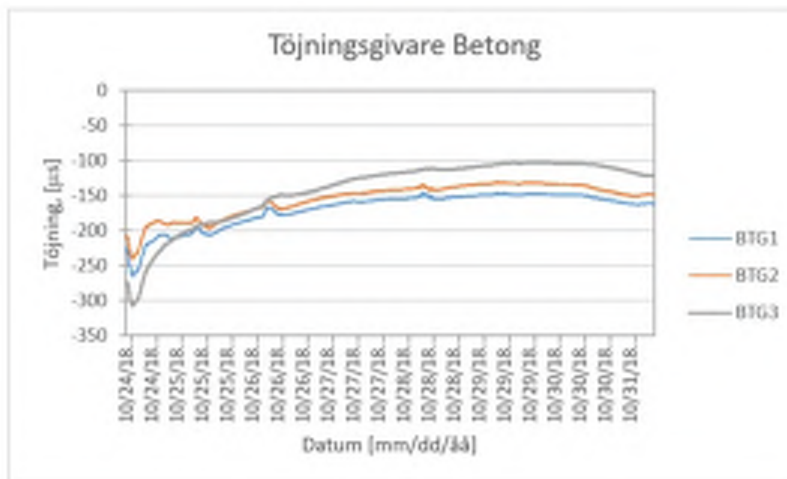


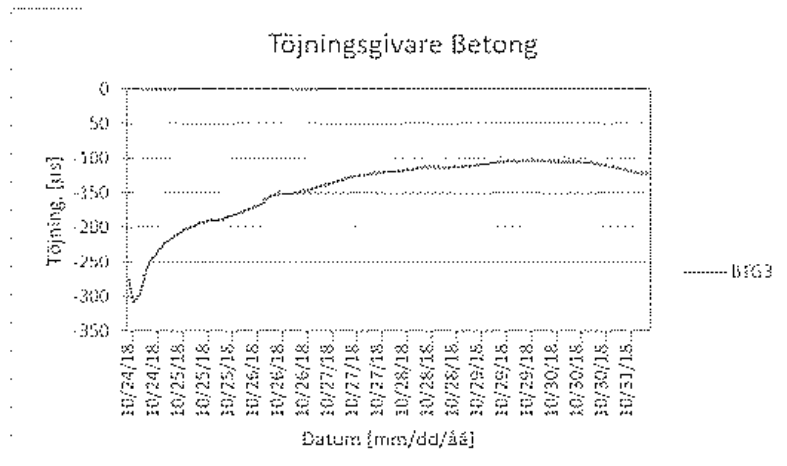
Töjningsgivare Armering 20190222 - 20201112



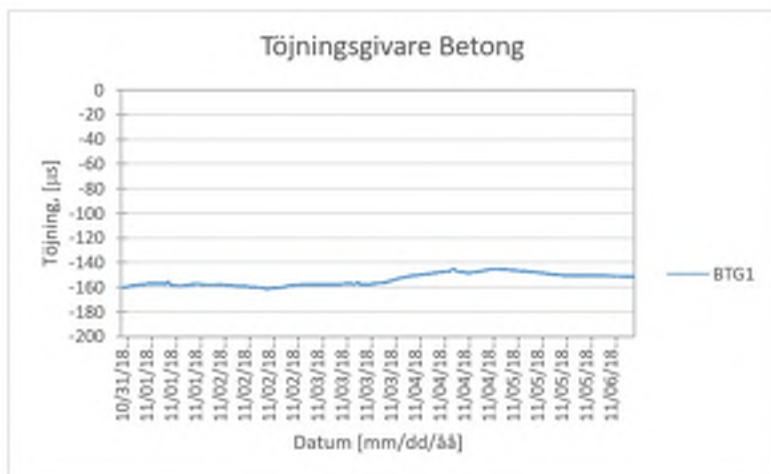
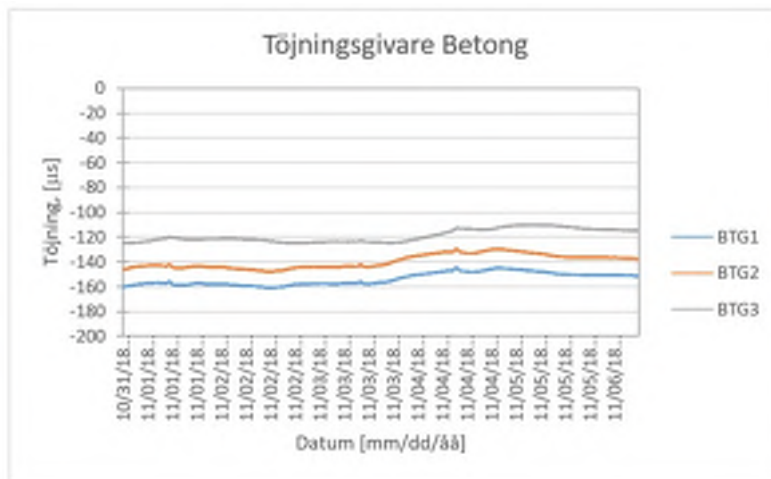


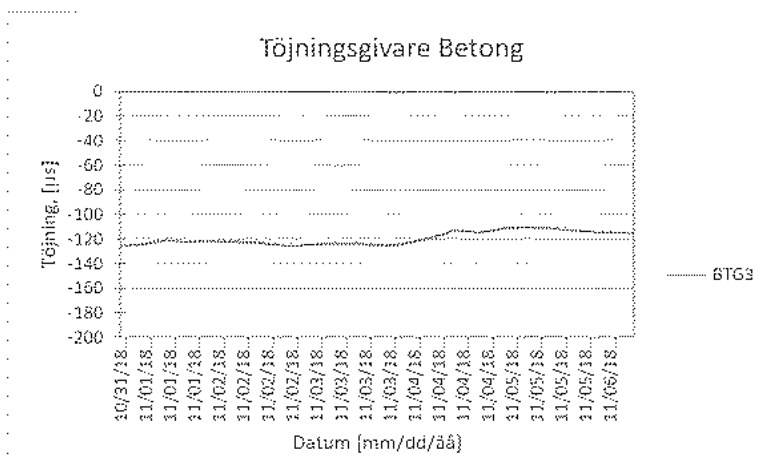
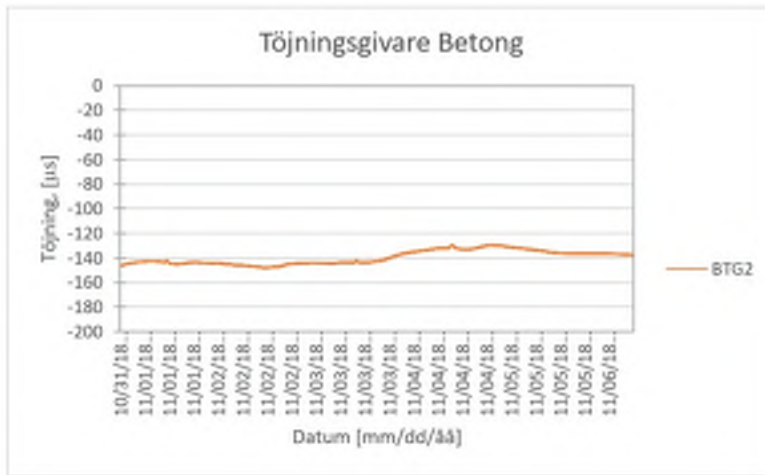
Töjningsgivare Betong 20181024-20181031



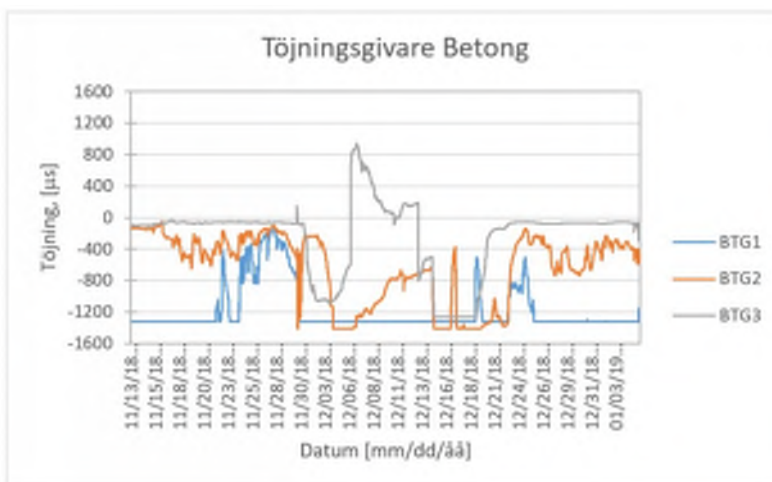


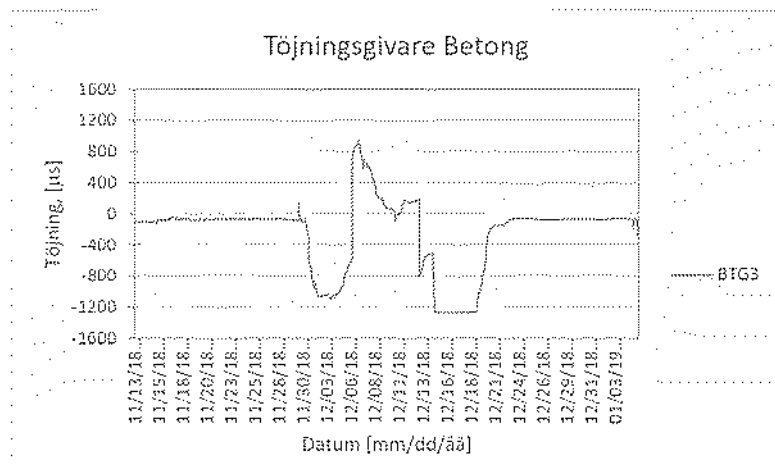
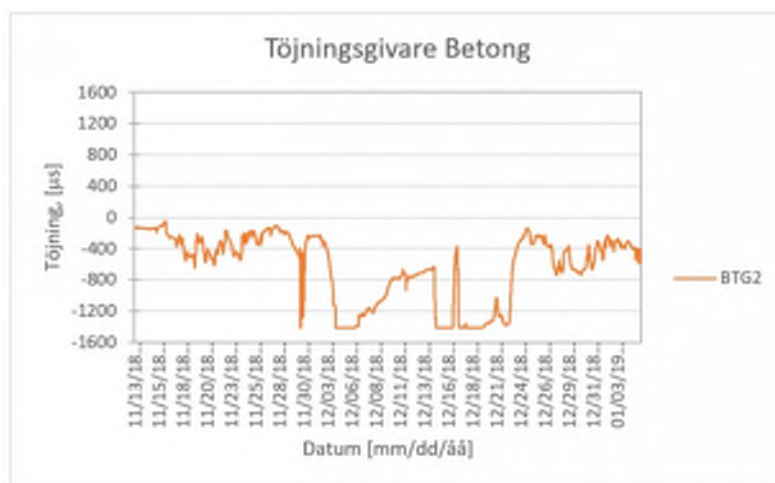
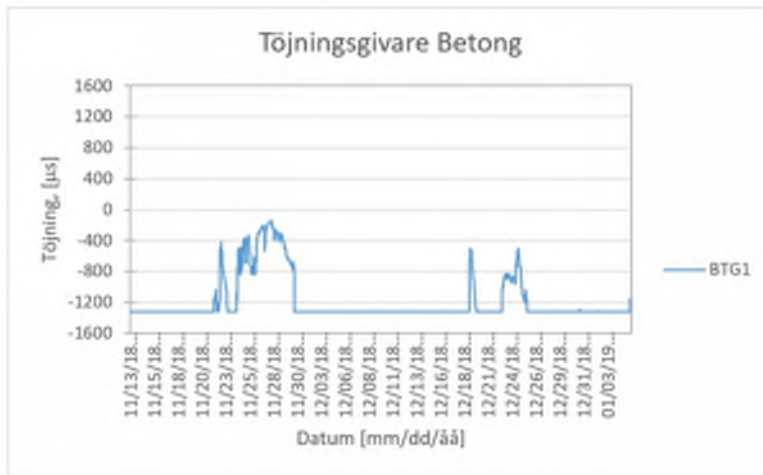
Töjningsgivare Betong 20181101 - 20181106



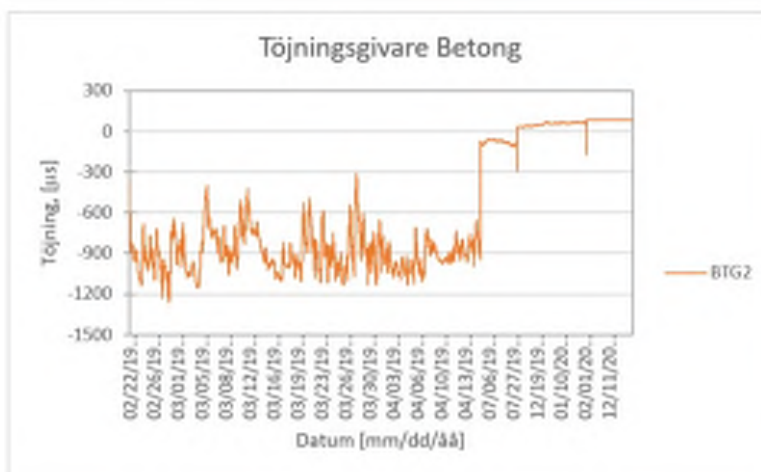
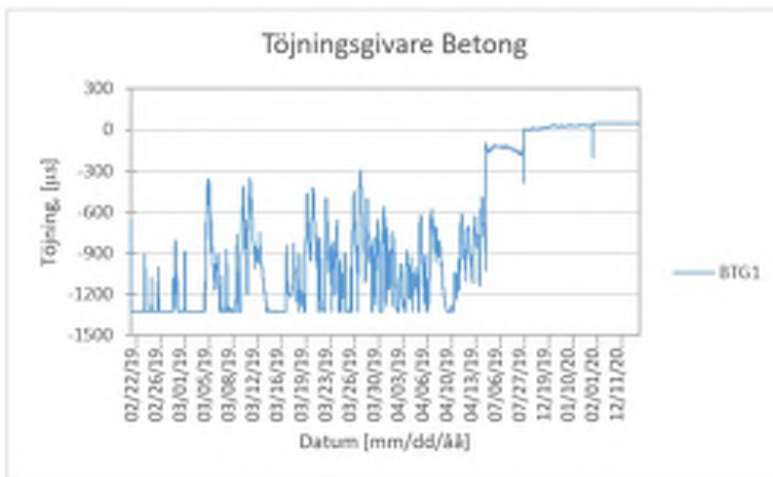
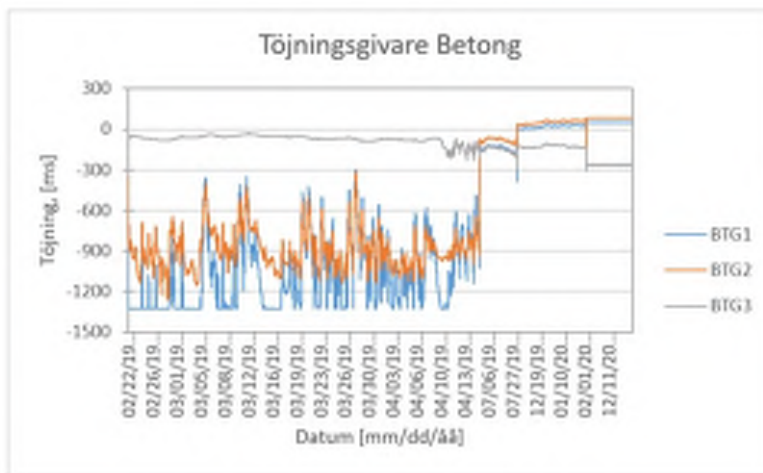


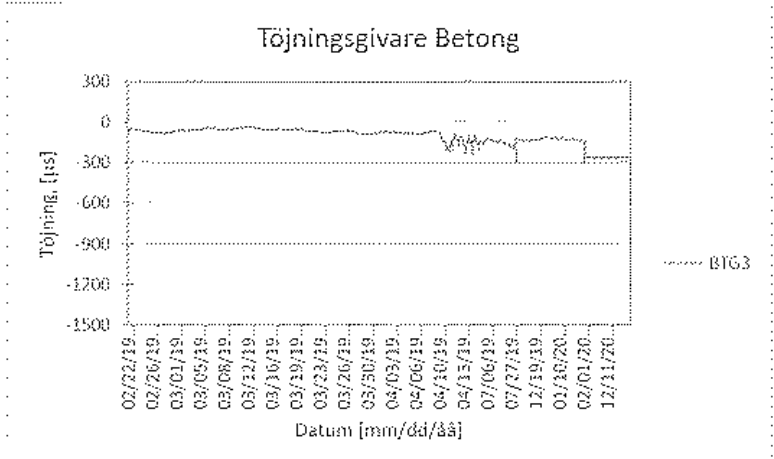
Töjningsgivare Betong 20181103 - 20190220





Töjningsgivare Betong 20190222 - 20201211





APPENDIX C – EKVATIONER FÖR BERÄKNING AV KRYPTAL

Grundläggande uttryck för beräkning av kryptalet. Kryptalet, $\varphi(t, t_0)$ kan beräknas enligt:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_c(t, t_0)$$

där

φ_0 är det nominella kryptalet, som kan uppskattas enligt följande:

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0)$$

φ_{RH} är en faktor som beaktar inverkan av relativ luftfuktighet

$$\varphi_{RH} = 1 + \frac{1 - RH / 100}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \text{ för } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa}$$

$$\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1 - RH / 100}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \cdot \alpha_1 \right] \cdot \alpha_2 \text{ för } f_{cm} > 35 \text{ MPa}$$

RH är relativ luftfuktighet i omgivande miljö [%]

$\beta(f_{cm})$ är en faktor som beaktar inverkan av betongens luftfuktighet

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}}$$

f_{cm} är betongens medeltryckhållfasthet vid 28 dagars ålder, [MPa]

$\beta(t_0)$ är en faktor som beaktar inverkan av betongens ålder vid pålastning, t_0

$$\beta(t_0) = \frac{1}{(0,1 + t_0^{0,20})}$$

h_0 är bärverksdelens ekvivalenta tjocklek, [mm]

$$h_0 = \frac{2A_c}{u}$$

A_c är tvärsnittsarean

u är den del av tvärsnittets omkrets som är i kontakt med luft

$\beta_c(t, t_0)$ är en koefficient som beskriver krypningens utveckling med tiden efter pålastning och som kan beräknas enligt följande:

$$\beta_c(t, t_0) = \left[\frac{(t - t_0)}{(\beta_H + t - t_0)} \right]^{0.3}$$

t är betongens ålder vid beaktad, i dagar

t_0 är betongens ålder vid pålastning, i dagar.

$t - t_0$ är det ojusterade värdet på belastningens varaktighet, i dagar

β_H är en koefficient som beror av den relativa luftfuktigheten (RH i %) och av bärverksdelens ekvivalenta tjocklek (h_0 i mm). Koefficienten kan beräknas enligt:

$$\beta_H = 1,5 \left[1 + (0,012RH)^{18} \right] h_0 + 250 \leq 1500 \text{ för } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa}$$

$$\beta_H = 1,5 \left[1 + (0,012RH)^{18} \right] h_0 + 250\alpha_3 \leq 1500\alpha_3 \text{ för } f_{cm} \geq 35 \text{ MPa}$$

$\alpha_{1/2/3}$ är koefficienter som beaktar inverkan av betongens hållfasthet:

$$\alpha_1 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0.7} \quad \alpha_2 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0.2} \quad \alpha_3 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0.5}$$

Inverkan av använd cementtyp på betongens kryptal kan beaktas genom att modifiera åldern vid pålastning, t_0 , enligt följande

$$t_0 = t_{0,T} \cdot \left(\frac{9}{2 + t_{0,T}^{1.2}} + 1 \right)^\alpha \geq 0,5$$

där

$t_{0,T}$ är temperaturjusterat värde på betongens ålder vid pålastning [dagar] enligt t_T nedan

α är exponent som beror av cementtyp

= -1 för cement klass S

= 0 för cement klass N

= 1 för cement klass R

Inverkan av ökad eller minskad temperatur på betongens mognadsgrad inom intervallet 0 – 80 °C, kan beaktas genom justering av betongens ålder enligt följande:

$$t_T = \sum_{i=1}^n e^{-\left(\frac{4000}{273+T(\Delta t_i)} - 13,65 \right)} \cdot \Delta t_i$$

där

t_T är betongens temperaturjusterade ålder, som ersätter t i motsvarande uttryck

$T(\Delta t_i)$ är temperaturen under tidsintervallet, Δt_i , i °C

Δt_i är antalet dagar under vilka temperaturen T råder

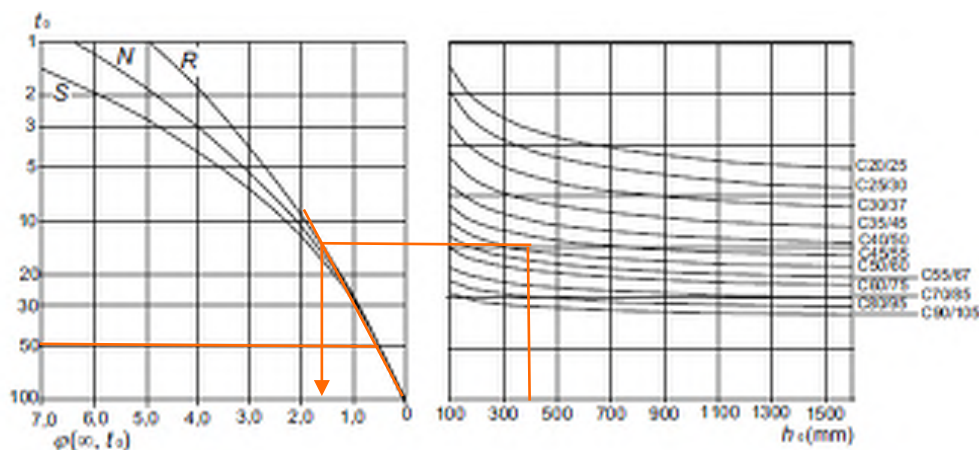
Den genomsnittliga variationskoefficienten för krypdata enligt ovan är av storleksordningen 20% enligt en undersökning baserad på resultat från laborieförsök.

Värden på $\varphi(t, t_0)$ enligt ovan bör användas tillsammans med tangentmodulen E_c .

Då en mindre noggrann uppskattning anses tillräckligt kan de värden som ges i figur xx i avsnitt under Krypning tidigare i rapporten tillämpas för att uppskatta betongens krypning vid 70 års ålder.

Nedan görs en uppskattning för krypningen vid 50 år samt vid ca 1 års belastning

Vid 50 år används endast diagrammetoden

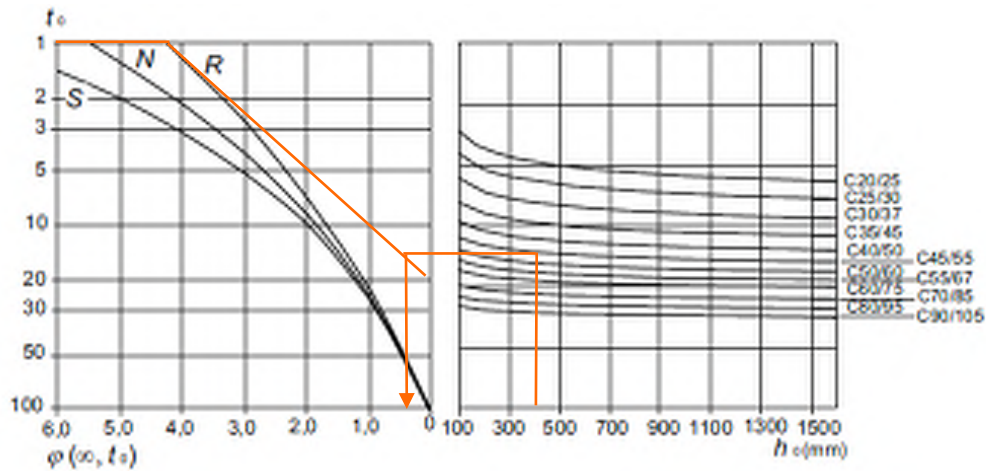


Med beräkningar och diagrammetoden för det aktuella fallet efter ca 1 års belastning erhålles kryptalet genom beräkning till:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_c(t, t_0) = 0,729 \cdot 0,677 = 0,493$$

Och med hjälp av diagrammetoden till ca 0,5 (grovt uppskattat). Beräkningar redovisas nedan.

Det är underförstått att dessa beräkningar kan genomföras mer noggrant, men med tanke på de stora osäkerheter som föreligger samt att belastningen endast har legat på under kort tid begränsas beräkningsförfarandet till det redovisade.



där

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) = 1,032 \cdot 2,206 \cdot 0,32 = 0,729$$

$$\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1 - RH / 100}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \cdot \alpha_1 \right] \cdot \alpha_2 = \left[1 + \frac{1 - 85 / 100}{0,1 \cdot \sqrt[3]{408}} \cdot 0,702 \right] \cdot 0,904 = 1,032$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}} = \frac{16,8}{\sqrt{58,0}} = 2,206$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{(0,1 + t_0^{0,20})} \approx \frac{1}{(0,1 + 250^{0,20})} = 0,32$$

$$h_0 = \frac{2A_c}{u} = \frac{2 \cdot (750 \cdot 950 - 18 \cdot \phi 12)}{2 \cdot (750 + 900)} = 408 \text{ mm}$$

$$\beta_c(t, t_0) = \left[\frac{(t - t_0)}{(\beta_H + t - t_0)} \right]^{0,3} = \left[\frac{250}{(1166 - 250)} \right]^{0,3} = 0,677$$

$$\begin{aligned} \beta_H &= 1,5 \left[1 + (0,012RH)^{18} \right] h_0 + 250\alpha_3 = \\ &= 1,5 \cdot \left[1 + (0,01285 \cdot 85)^{18} \right] \cdot 408 + 250 \cdot 0,777 = 1185 \leq 1500 \cdot 0,777 = 1166 \end{aligned}$$

$$\alpha_1 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,7} = \left[\frac{35}{58} \right]^{0,7} = 0,702$$

$$\alpha_2 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,2} = \left[\frac{35}{58} \right]^{0,2} = 0,904$$

$$\alpha_3 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,5} = \left[\frac{35}{58} \right]^{0,5} = 0,777$$

$$t_0 = t_{0,T} \cdot \left(\frac{9}{2 + t_{0,T}^{1,2}} + 1 \right)^\alpha \geq 0,5$$

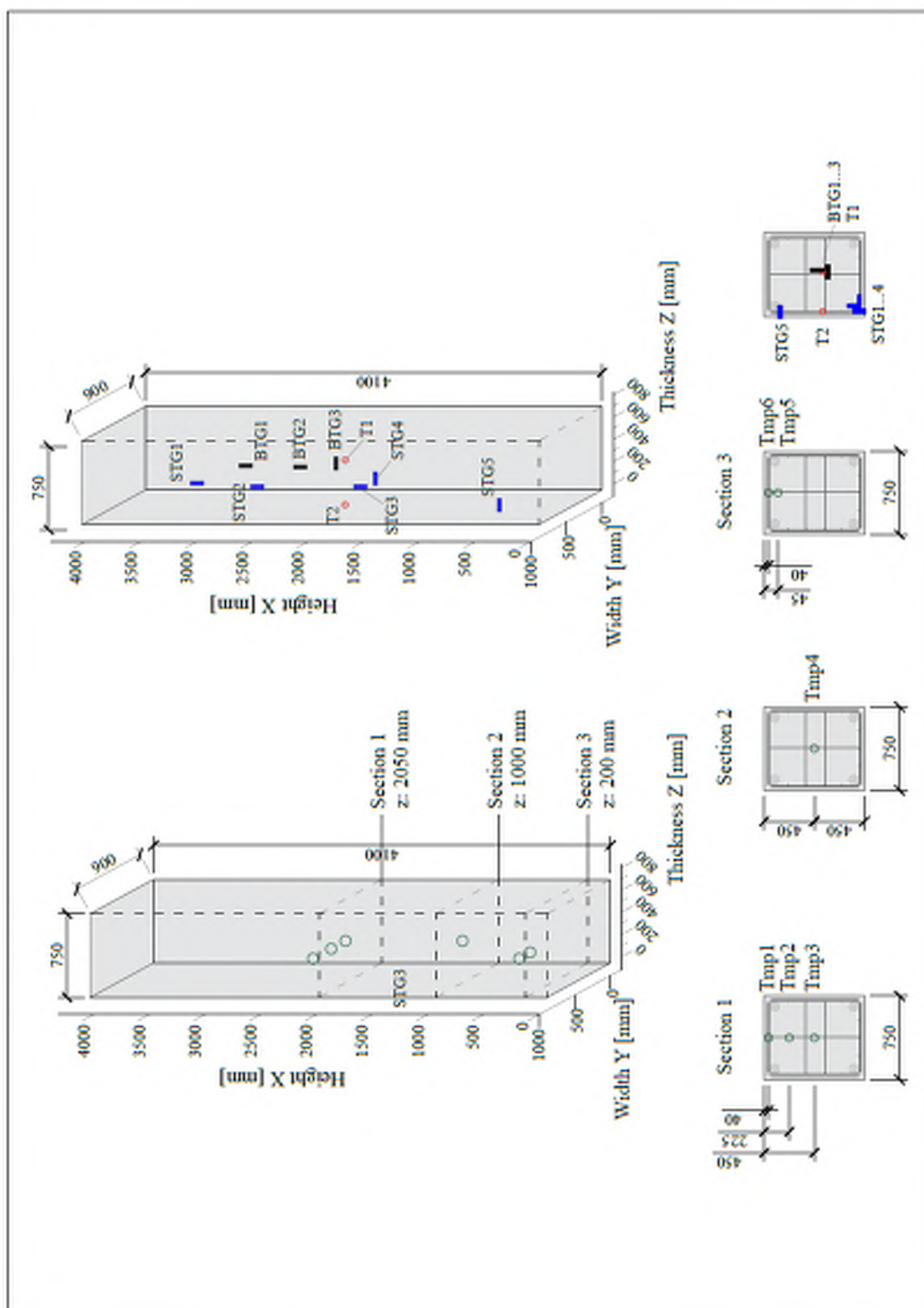
$$t_T = \sum_{i=1}^n e^{-(4000/[273+T(\Delta t_i)]-13,65)} \cdot \Delta t_i$$

APPENDIX D KRYMPNING – TABELL

Tabell 3.2 från EC2 – Nominellt värde på oförhindrad uttorkningskrympning $\varepsilon_{cd,0}$ (i ‰) för betong av cement CEM klass N

$f_{ck}/f_{ck,kub}$ (MPa)	Relativ fuktighet (i %)					
	20	40	60	80	90	100
20/25	0.62	0.58	0.49	0.30	0.17	0.00
40/50	0.48	0.46	0.38	0.24	0.13	0.00
60/75	0.38	0.36	0.30	0.19	0.10	0.00
80/95	0.30	0.28	0.24	0.15	0.08	0.00
90/105	0.27	0.25	0.21	0.13	0.07	0.00

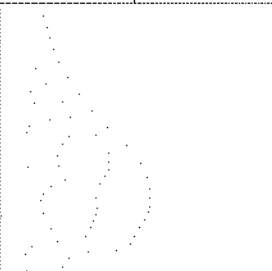
APPENDIX E SKISSER OCH RITNINGAR



Skiss över givarplacering

NO. PROJEKSI	NO. RUMAH	NO. LEMBAR	NO. SKALA
1	1	66A	P20002

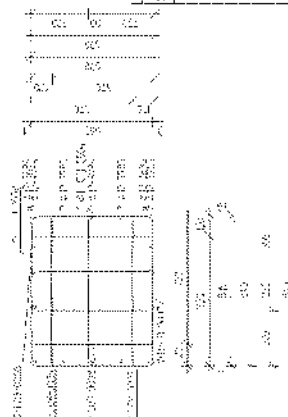
BANGUNAN
 BANGUNAN
 NO. 2579



KU-2579



NO.	URAIAN	UNIT	QTY	REMARKS
1	...	...	...	...
2	...	...	...	...
3	...	...	...	...
4	...	...	...	...
5	...	...	...	...
6	...	...	...	...
7	...	...	...	...
8	...	...	...	...
9	...	...	...	...
10	...	...	...	...
11	...	...	...	...
12	...	...	...	...
13	...	...	...	...
14	...	...	...	...
15	...	...	...	...
16	...	...	...	...
17	...	...	...	...
18	...	...	...	...
19	...	...	...	...
20	...	...	...	...
21	...	...	...	...
22	...	...	...	...
23	...	...	...	...
24	...	...	...	...
25	...	...	...	...
26	...	...	...	...
27	...	...	...	...
28	...	...	...	...
29	...	...	...	...
30	...	...	...	...
31	...	...	...	...
32	...	...	...	...
33	...	...	...	...
34	...	...	...	...
35	...	...	...	...
36	...	...	...	...
37	...	...	...	...
38	...	...	...	...
39	...	...	...	...
40	...	...	...	...
41	...	...	...	...
42	...	...	...	...
43	...	...	...	...
44	...	...	...	...
45	...	...	...	...
46	...	...	...	...
47	...	...	...	...
48	...	...	...	...
49	...	...	...	...
50	...	...	...	...
51	...	...	...	...
52	...	...	...	...
53	...	...	...	...
54	...	...	...	...
55	...	...	...	...
56	...	...	...	...
57	...	...	...	...
58	...	...	...	...
59	...	...	...	...
60	...	...	...	...
61	...	...	...	...
62	...	...	...	...
63	...	...	...	...
64	...	...	...	...
65	...	...	...	...
66	...	...	...	...
67	...	...	...	...
68	...	...	...	...
69	...	...	...	...
70	...	...	...	...
71	...	...	...	...
72	...	...	...	...
73	...	...	...	...
74	...	...	...	...
75	...	...	...	...
76	...	...	...	...
77	...	...	...	...
78	...	...	...	...
79	...	...	...	...
80	...	...	...	...
81	...	...	...	...
82	...	...	...	...
83	...	...	...	...
84	...	...	...	...
85	...	...	...	...
86	...	...	...	...
87	...	...	...	...
88	...	...	...	...
89	...	...	...	...
90	...	...	...	...
91	...	...	...	...
92	...	...	...	...
93	...	...	...	...
94	...	...	...	...
95	...	...	...	...
96	...	...	...	...
97	...	...	...	...
98	...	...	...	...
99	...	...	...	...
100	...	...	...	...



NO. PROJEKSI	NO. RUMAH	NO. LEMBAR	NO. SKALA
1	1	66A	P20002

BANGUNAN
 BANGUNAN
 NO. 2579

BYGGEHANDLING
 ANGORA DÖRREN, HELIX
 PREFAB

SCF
SWECO

SVEVIG
 BRICZAMANA
 2004-06-08 11:00:00

PELANE
 210
 P-20008 A

APPENDIX F PRODUKTDATABLAD MÄTUTRUSTNING

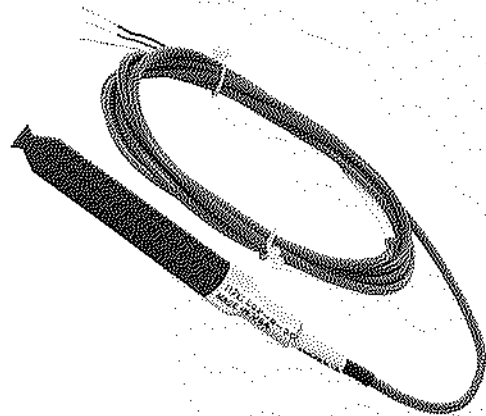


Concrete Embedment Gages

Special Use Sensors—Concrete Embedment Strain Gages


The EGP-Series Embedment Strain Gage is specially designed for measuring mechanical strains inside concrete structures. The sensing grid, constructed of a nickel-chromium alloy (similar to Karma), has an active gage length of 4 in (100 mm) for averaging strains in aggregate materials. A rugged 5 in (130 mm) outer body of proprietary polymer concrete resists mechanical damage during pouring, minimizes reinforcement of the structure, and provides protection from moisture and corrosive attack. The grid, cast within the polymer concrete to ensure maximum strain sensitivity, is self-temperature-compensated to minimize thermal output when installed in concrete structures. Each gage incorporates a heavy-duty 10 ft (3 m) cable with 22-AWG (0.643 mm dia.) leadwires; a three-wire construction to the sensing grid helps minimize temperature effects in the instrumentation leads. Special lengths of preattached cable will be quoted upon request. Micro-Measurements M-LINE accessory cable 322-DJV is available for adding cable length in the field.

Rugged and reliable, EGP-Series Strain Gages are available in both 120-ohm (EGP-5-120) and 350-ohm (EGP-5-350) resistances.

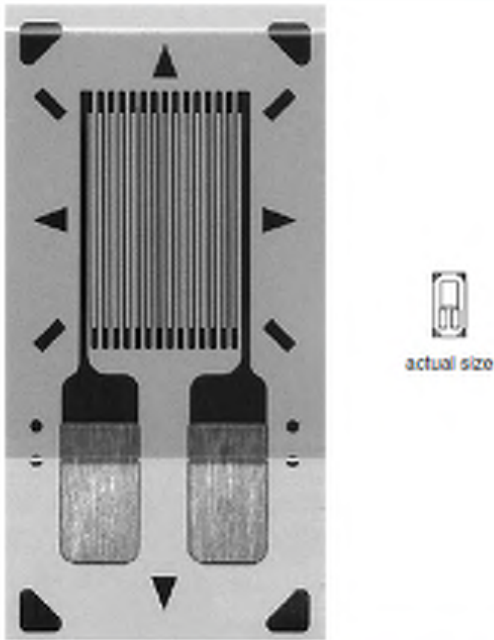


SPECIFICATIONS

- **Construction:** Strain sensing grid cast in a sturdy, water-resistant material.
- **Sensing Grid:** Nickel-chromium alloy on polyimide backing. Active gage length of 4 in (100 mm) nominal. Grid resistance of 120 or 350 ohms, $\pm 0.8\%$.
- **Outer Body:** Proprietary polymer concrete. 5 x 0.7 x 0.4 in (130 x 17 x 10 mm) nominal.
- **Cable:** Three 10 ft (3 m) leads of 22-AWG (0.643 mm dia.) stranded tinned copper in 0.015 in (0.4 mm) thick PVC insulation. Nominal cable diameter of 0.2 in (5 mm). (Other lengths quoted upon request.)
- **Temperature Range:** The normal usage range is $+25^{\circ}$ to $+125^{\circ}\text{F}$ (-5° to $+50^{\circ}\text{C}$). Extended range is -25° to $+150^{\circ}\text{F}$ (-30° to $+60^{\circ}\text{C}$).
- **Strain Range:** $\pm 0.5\%$ (5000 $\mu\epsilon$).

GAGE DESIGNATION		RES. IN OHMS	DIMENSIONS			
			ACTIVE GAGE LENGTH	OUTER BODY WIDTH	OUTER BODY LENGTH	OUTER BODY THICKNESS
EGP-5-120		120 \pm 0.8%	4	0.7	5	0.4
			100	17	130	10
EGP-5-350		350 \pm 0.8%	4	0.7	5	0.4
			100	17	130	10

General Purpose Strain Gages—Linear Pattern

GAGE PATTERN DATA							
 <p>actual size</p>			GAGE DESIGNATION See Note 1	RESISTANCE (OHMS)	OPTIONS AVAILABLE See Note 2		
			CEA-XX-125UN-120 CEA-XX-125UN-350	120 ± 0.3% 350 ± 0.3%	P2 P2		
<p>DESCRIPTION</p> <p>General-purpose gage with narrow geometry. Exposed solder tab area 0.06 x 0.05 in (1.5 x 1.1 mm). See also 125UW pattern.</p>							
GAGE DIMENSIONS		Legend			<table border="1"> <tr> <td>Inch</td> </tr> <tr> <td>millimeter</td> </tr> </table>	Inch	millimeter
Inch							
millimeter							
ES = Each Section S = Section (S1 = Section 1)	CP = Complete Pattern M = Matrix						
Gage Length	Overall Length	Grid Width	Overall Width	Matrix Length	Matrix Width		
0.125	0.275	0.100	0.120	0.38	0.19		
3.18	6.99	2.54	3.05	9.7	4.8		
GAGE SERIES DATA — See Gage Series datasheet for complete specifications							
Series	Description	Strain Range	Temperature Range				
CEA	Universal general-purpose strain gages.	±5%	-100° to +350°F (-75° to +175°C)				

Note 1: Insert desired S-T-C number in spaces marked XX.

Note 2: Products with designations and options shown in bold are not RoHS compliant.

TC-Link[®] 1CH-LXRS[®]

1 Channel Wireless Thermocouple Node



TC-Link[®] 1CH-LXRS[®] - small, specialized node designed for data acquisition from standard thermocouples

LORD MicroStrain[®] LXRS[®] Wireless Sensor Networks enable simultaneous, high-speed sensing and data aggregation from scalable sensor networks. Our wireless sensing systems are ideal for test and measurement, remote monitoring, system performance analysis, and embedded applications.

The gateways are the heart of the LORD MicroStrain wireless sensing system. They coordinate and maintain wireless transmissions across a network of distributed wireless sensor nodes. Some nodes have integrated sensors, while others are designed with multi-sensor connectivity for application flexibility. The LORD MicroStrain LXRS wireless communication protocol between LXRS nodes and gateways enable high-speed sampling, ± 32 microseconds node-to-node synchronization, and lossless data throughput under most operating conditions.

Users can easily program nodes for data logging, continuous, and periodic burst sampling with the Node Commander[®] software. The web-based SensorCloud[™] interface optimizes data aggregation, analysis, presentation, and alerts for gigabytes of sensor data from remote networks.



Wireless Simplicity, Hardwired Reliability[™]

Product Highlights

- Standard mini thermocouple input and an embedded cold junction temperature compensation sensor
- On-board linearization algorithms are software programmable to support a wide range of thermocouple types, including J, K, N, R, S, T, E, and B
- Small form factor, low power consumption, and wireless framework optimizes deployment in remote and long-term monitoring applications.
- High resolution data with 24-bit A/D converter

Features and Benefits

High Performance

- Lossless data throughput and node-to-node sampling synchronization of $\pm 32 \mu\text{s}$ in LXRS[®]-enabled modes
- Support for hundreds of simultaneous sampling wireless sensor nodes
- Wireless range up to 2 km (800 m typical)

Ease of Use

- Rapid deployment with wireless framework
- Standard miniature thermocouple blade connector
- Remote configuration, acquisition, and display of sensor data with SensorConnect[™] or Node Commander[®]
- Easy custom integration with open-source, comprehensive communications and command library

Cost Effective

- Reduction of costs associated with wiring
- Volume discounts

Applications

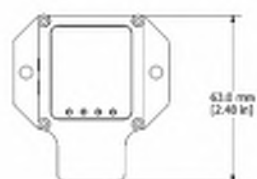
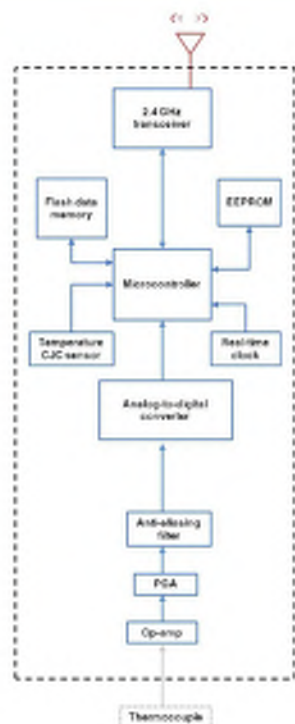
- Thermal profiling
- Refrigeration monitoring
- Production process monitoring
- Quality control
- Environmental monitoring

LORD SENSING

TC-Link[®]1CH-LXRS[®] 1 Channel Wireless Thermocouple Node

Specifications

General	
Sensor input channels	Thermocouple input, 1 channel
Integrated sensors	Temperature CJC, 1 channel
Data storage capacity	2 Megabytes (up to 500,000 data points)
Thermocouple Input	
Measurement range	-210 °C to 1820 °C (depending on the thermocouple type)
Accuracy	± 0.1 % of full scale or ± 2 °C, whichever is greater (does not include error from sensor or wire)
Resolution	0.0625 °C, 24 bit
Repeatability	± 0.1 °C (does not include error from sensor or wire)
Integrated Temperature Cold Junction Compensation (CJC) Channel	
Compensation range	-40 °C to 85 °C
Accuracy	± 0.5 °C (from 0 to 70 °C)
Resolution	12 bit
Sampling	
Sampling modes	Synchronized, low duty cycle, datalogging
Sampling rates	Continuous sampling: 1 sample/hour to 64 Hz Datalogging: 1 sample/hour to 64 Hz
Sample rate stability	±3 ppm
Network capacity	Up to 2000 nodes per RF channel (and per gateway) depending on the number of active channels and sampling settings. Refer to the system bandwidth calculator: http://www.microstrain.com/configure-your-system
Synchronization between nodes	± 32 µsec
Operating Parameters	
Wireless communication range	Outdoor line-of-sight: 2 km (ideal) ^{**} , 800 m (typical) ^{**} Indoor/obstructions: 50 m (typical) ^{**}
Radio frequency (RF) transceiver carrier	2.405 to 2.470 GHz direct sequence spread spectrum over 14 channels, license free worldwide, radiated power programmable from 0 dBm (1 mW) to 16 dBm (39 mW); low power option available for use outside the U.S. - limited to 10 dBm (10 mW)
RF communication protocol	IEEE 802.15.4
Power source	Internal: 3.7 V dc, 250 mAh, rechargeable lithium polymer battery. External: 3.2 V dc to 9 V dc
Power consumption	See power profile: http://files.microstrain.com/TC-Link-1CH-LXRS-Power-Profile.pdf
Operating temperature	-20 °C to +60 °C (extended temperature range available with custom battery/enclosure, -40 °C to +85 °C electronics only)
Acceleration limit	500 g standard (high g option available)
Physical Specifications	
Dimensions	63 mm x 56 mm x 21 mm
Weight	49 grams
Enclosure material	ABS plastic
Environmental rating	Indoor use (unless mounted in a sealed enclosure)
Integration	
Compatible gateways	All WSDA [®] base stations and gateways
Compatible sensors	Type J, K, N, R, S, T, E and B thermocouples
Connectors	Type-I standard mini (5M) connectors for flat pin thermocouples
Software	SensorCloud [™] , SensorConnect [™] , Node Commander [®] , WSDA [®] Data Downloader, Live Connect [™] , Windows XP/Vista/7 compatible
Software development kit (SDK)	Data communications protocol available with EEPROM maps and sample code (OS and computing platform independent) http://www.microstrain.com/tdfwasa/tdfwatrac
Regulatory compliance	FCC (U.S.), IC (Canada), RoHS



^{*}Measured with antennas elevated, no obstructions, and no RF interferers.
^{**}Actual range varies with conditions such as obstructions, RF interference, antenna height & orientation.

LORD SENSING

LORD Corporation
 MicroStrain[®] Sensing Systems
 409 Humana Lane, Suite 100
 Williston, VT 05495 USA

ph: 802-892-0029
sensing_sales@LORD.com
[support@LORD.com](http://www.support@LORD.com)

Copyright © 2015 LORD Corporation
 Document 6420-009 Revision E. Subject to change without notice.

www.microstrain.com

MicroStrain Sensing Product Datasheet

V-Link®-200

Wireless 8 Channel Analog Input Sensor Node



The V-Link-200 is a versatile wireless sensor with 4 differential and 4 single-ended analog input channels. It includes onboard PGAs, filtering, and a high-resolution ADC for precise measurement of a large range of sensor types, including strain gages, load cells, pressure transducers, and accelerometers.

Lord wireless sensor networks eliminate the time and complexity of running long sensor wires. They are fast to deploy and provide reliable, lossless data throughput. These networks have been proven to work in demanding industries where reliable data acquisition is critical.

SensorConnect software can be used for device configuration, live data monitoring, and data analysis. SensorCloud is Lord's optional cloud-based platform that optimizes data aggregation, analysis, and alerts for sensor data collected from remote networks.



HIGH PERFORMANCE SENSING

- 4 differential input channels ($\pm 156\text{mV}$)
- 4 single-ended input channels ($\pm 10.24\text{V}$)
- Onboard temperature sensor
- Configurable gain and anti-aliasing filter
- Low noise
- Onboard shunt calibration for strain gages
- Onboard bridge offset balancing
- Factory installed bridge completion available

RELIABLE DATA COLLECTION

- Lossless, synchronized and scalable networks using LXRS or LXRS+ protocol
- Remotely configure nodes and view sensor data using SensorConnect (PC), SensorCloud (web), or MSCL (API library)

CONFIGURABLE FOR MANY APPLICATIONS

- Report mV or calibrated engineering units
- Continuous, periodic, or event-triggered operation
- Transmit data real-time and/or save to onboard memory
- Up to 4KHz continuous sampling
- Up to 8KHz data logging periodic, or event-triggered sampling

RUGGED

- Polycarbonate enclosure
- Bolt down or DIN rail mounting
- -40C to $+85\text{C}$ operating temperature
- 4kV ESD protection

APPLICATIONS

- Strain, load, force, pressure, acceleration, vibration, displacement, or torque sensing
- Condition-based monitoring (CBM)
- Structural load and stress monitoring
- Test and measurement
- Strain gage rosettes



ENGINEERING YOUR SUCCESS.

©2020 Parker Hannifin MicroStrain Sensing. | Document 6400-0097 Revision K. | Subject to change without notice.

Wireless 8 Channel Analog Input Sensor Node

Specifications

Analog Input Channels	
Sensor input channels	4 differential 4 single-ended
Integrated sensors	1 temperature sensor
Sensor excitation	4.095V (up to 150 mA)
ADC Resolution	18 bit
Accuracy	± 0.1 % full scale typical
Noise	± 0.02 % full scale
Temperature stability	< 0.1 % full scale over temperature range
Sensor input bandwidth	DC to 4KHz
Differential Input Channels	
Adjustable Gain	16 to 2048
Sensor Input Range	±1.122 mV to 156 mV
Anti-aliasing Filter	128 Hz to 4 KHz, 2nd order Butterworth
Strain Calibration	Onboard shunt resistor used for deriving linear strain calibration coefficients
Shunt Calibration	499k Ohm (± 0.1%)
Single-ended Input Channels	
Sensor Input Ranges	±2.56Vdc, ± 5.12Vdc, ±10.24Vdc, 0-5.12Vdc, 0-10.24Vdc
Anti-aliasing filter	-3dB @ 15KHz
Input Impedance	1M Ohm
Integrated Temperature Sensor	
Anti-aliasing filter	-3dB, 15KHz
Resolution	0.10 deg. C
Sampling	
Output Options	mV, ADC counts, or calibrated engineering units
Sampling Modes	Continuous, periodic, and event triggered
Sampling Rates	Continuous sampling: 1 sample/hr to 4 KHz Periodic burst sampling: 32 Hz to 8 kHz Event triggered: 32 Hz to 8 kHz
Network capacity	Up to 128 nodes per gateway LXRS: 4096 Samples/second per gateway LXRS+: 16k Samples/second per gateway https://www.microstrain.com/configure-your-system
Data Storage Capacity	16MB (5M data points with 18 bit data type)
Node Sync	± 50 uSec
Operating Parameters	
Battery Power	+8.0 to +18.9Vdc Recommend 4x 3.6Vdc 2.4Ah Lithium
External Power	+7.5 to +36 Vdc
Battery Lifetime	https://www.microstrain.com/wireless/v-link-200
Wireless Range	External antenna: 1.5km max, 800m typical Indoor/obstructed: 100m typical
Radio Frequency Transceiver Carrier	2.405 to 2.480 GHz, 16 channels, license-free
RF Transmit Power	User-settable: 0dBm to 20dBm (regional restrictions may apply)
Operating Temp Range	-40 to +85°C

ESD Withstand	4kV
Mechanical Shock Limit	250g/1.5ms with batteries; 500g/1.5ms without batteries installed
Physical Specifications	
Dimensions	129 mm x 117.6 mm x 31 mm (including antenna)
Weight	283 grams (with batteries), 217 grams (without batteries)
Interface	Screw terminal
Integration	
Compatible gateways	All WSDA gateways
Software	SensorCloud, SensorConnect, Windows 7, 8, or 10
(SDK) Software development kit	https://www.microstrain.com/software/macd
Regulatory compliance	FCC (U.S.), IC (Canada), MIC (Japan), CE (European Union), ROHS, IMDA (Singapore)



Parker Hannifin Corporation
MicroStrain Sensing
459 Hurricane Lane
Williston, VT 05495 - USA

phone: +1.802.862.6629
email: sensing_sales@LORD.com
sensing_support@LORD.com
www.microstrain.com
www.parker.com

WSDA[®]-Base-102-LXRS[®]

Wireless Sensor RS232 Base Station



WSDA[®]-Base-102-LXRS[®] - RS232 data gateway for easy, reliable sensor data acquisition

LORD MicroStrain[®] LXRS[®] Wireless Sensor Networks enable simultaneous, high-speed sensing and data aggregation from scalable sensor networks. Our wireless sensing systems are ideal for sensor monitoring, data acquisition, performance analysis, and sensing response applications.

The gateways are the heart of the LORD MicroStrain wireless sensing system. They coordinate and maintain wireless transmissions across a network of distributed wireless sensor nodes. The LORD MicroStrain LXRS wireless communication protocol between LXRS nodes and gateways enable high-speed sampling, ± 32 microseconds node-to-node synchronization, and lossless data throughput under most operating conditions.

Users can easily program nodes for data logging, continuous, and periodic burst sampling with the Node Commander[®] software. The web-based SensorCloud[™] interface optimizes data aggregation, analysis, presentation, and alerts for gigabytes of sensor data from remote networks.



Wireless Simplicity, Hardwired Reliability[™]

Product Highlights

- Data acquisition gateway collects synchronized data from scalable networks of wireless sensors
- Provides seamless communication between the wireless sensor nodes and host computer
- Quick deployment with RS-232 host computer interface
- Compatible with all LORD MicroStrain[®] sensor nodes

Features and Benefits

High Performance

- Lossless data throughput and node-to-node sampling synchronization of ± 32 μ S in LXRS-enabled modes
- Wireless range up to 2 km (800 m typical)

Ease of Use

- Easy out-of-the-box installation with data collection in minutes
- Scalable networks for easy expansion
- Remotely configure nodes, acquire and view sensor data with Node Commander[®].
- Data visualization through web-based SensorCloud[™] portal provides quick data navigation and analysis
- Easy custom integration with comprehensive SDK

Cost Effective

- Thousands of sensors managed from a single gateway
- Out-of-the box wireless sensing solution reduces development and deployment time.

Applications

- Structural health monitoring
- Equipment performance monitoring, verification, evaluation, and diagnostics
- Experimental test and measurement
- System control
- Environmental monitoring

LORD MicroStrain[®]
SENSING SYSTEMS

Specifications

General	
Connectivity	RS-232 @ 921,600 bps (all sampling modes), 115,200 (not available in synchronized sampling mode)
Sampling	
Supported node sampling modes	Synchronized, low duty cycle, continuous, periodic burst, event-triggered, and cataloging
Synchronization beacon interval	1 Hz beacon provides ± 32 μ sec node-to-node synchronization
Synchronization beacon stability	± 3 ppm
Network capacity	Up to 2000 nodes per RF channel (and per gateway) depending on the number of active channels and sampling settings. Refer to the system bandwidth calculator: http://www.microstrain.com/configure-your-system
Operating Parameters	
Wireless communication range	Outdoor/line-of-sight: 2 km (ideal**), 800 m (typical)** Indoor/obstructions: 50 m (typical)**
Radio frequency (RF) transceiver carrier	2.435 to 2.470 GHz direct sequence spread spectrum over 14 channels, license-free worldwide, radiated power programmable from 0 dBm (1 mW) to 10 dBm (39 mW); (low power option available for use outside the U.S.A. - limited to 90 dBm (10 mW))
RF communication protocol	IEEE 802.15.4
Power consumption	Idle: 45.7 mA; Eight active node channels operating at 750 Hz low duty cycle: 65.6 mA
Operating temperature	-40 °C to +85 °C (electronics) -30 °C to +70 °C (enclosure/antenna)
Physical Specifications	
Dimensions	128 mm x 70 mm x 20 mm without antenna
Weight	121 grams
Enclosure material	Black anodized aluminum
Integration	
Connectors	Screw terminal blocks, micro-USB (optional power input only, no USB communication)
Communications cable	Pin terminal to DB9
Compatible sensor nodes	All LXRS® sensor nodes, all legacy 2.4 GHz nodes
Firmware	Firmware upgradeable through software interface
Software	SensorCloud™, SensorConnect™, Node Commander®, WSDA® Data Downloader, Live Connect™, Windows XP/Vista/7 compatible
Software development kit (SDK)	Data communications protocol available with EEPROM maps and sample code (DS and computing platform independent): http://www.microstrain.com/wireless/sdk
Regulatory compliance	FCC (U.S.), IC (Canada), RoHS

**Measured with antennas elevated, no obstructions, and no RF interferers.

**Actual range varies depending on conditions such as obstructions, RF interference, antenna height.

