



CHALMERS



Sensorbaserad verifiering av renoverade betongkonstruktioner

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Samhällsbyggnadsteknik

PATRIK GLANS
ARVID MYRSETH

**INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMÄLLSBYGGNADSTEKNIK
AVDELNINGEN FÖR KONSTRUKTIONSTEKNIK**

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2025
www.chalmers.se

EXAMENSARBETE ACEX20

Sensorbaserad verifiering av renoverade betongkonstruktioner

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

PATRIK GLANS

ARVID MYRSETH

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för konstruktionsteknik

Examinator: Rasmus Rempling

Handledare: Rasmus Rempling

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2025

Sensorbaserad verifiering av renoverade betongkonstruktioner

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

PATRIK GLANS

ARVID MYRSETH

© PATRIK GLANS, ARVID MYRSETH, 2025

Examensarbete ACEX20

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Chalmers tekniska högskola 2025

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för konstruktionsteknik

Chalmers tekniska högskola

412 96 Göteborg

Telefon: 031-772 10 00

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Göteborg 2025

Sensorbaserad verifiering av renoverade betongkonstruktioner

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

PATRIK GLANS

ARVID MYRSETH

Intuitionen för arkitektur och samhällsbyggnad

Avdelningen för konstruktionsteknik

Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

Detta examensarbete undersöker möjligheten till att installera och använda fiberoptiska sensorer, kallade Distributed Optical Fibre Sensors (DOFS), för att verifiera och övervaka den strukturella hälsan av renoverade betongkonstruktioner med fokus på marina miljöer. Arbetet har genomförts i samarbete med Göteborgs Hamn och Chalmers forskningsbaserade projekt Sens-IT, där syftet är att möjliggöra proaktivt underhåll av infrastruktur genom kontinuerlig datainsamling.

Projektet omfattar litteraturstudier, teoretiska beräkningar samt ett praktiskt genomförande av fiberoptikinstallation och renoveringsgjutning av pålar från Göteborgs Hamn. Den teoretiska delen innefattar litteraturstudier kring betong i utsatta miljöer, renovering av betongkonstruktioner, armeringskorrosion, exponeringsklasser, samt krypning och krympning.

Den praktiska delen innefattar ett flertal moment med syftet att renovera befintliga betongpålar och integrera fiberoptiska sensorer för framtida strukturell övervakning. Fyra påldelar, ursprungligen från två marina betongpålar förbereddes genom kapning till hanterbara längder och vattenbilning för fiberoptikinstallation, formbyggnation, gjutning. Provning av betongens hållfasthet gjordes även genom kubtest.

Resultatet är ett tekniskt genomförbart metodförslag för fiberoptikinstallation vid renovering av betongkonstruktioner. Tekniken har potential att bidra till mer hållbart och kostnadseffektivt underhåll av hamninfrastruktur genom att möjliggöra tidig upptäckt av skador och tillståndsförändringar.

Ett betydande bidrag till Sens-IT projektet är att detta examensarbete möjliggör långtidsövervakning av renoverade betongelement, något som inte tidigare varit möjligt. Hittills har projektet enbart omfattat nygjutna betongelement vilket begränsat möjligheterna till att utvärdera sensorernas prestanda i återställda eller skadade element. Då Göteborgs Hamn genomför mycket renoveringar av konstruktioner kan detta bidra med ny information som tas i beaktning vid underhållsarbetet.

Nyckelord: Fiberoptiska sensorer, DOFS, töjning, sprickbildning, betongpåle, renoverade betongkonstruktioner, marina miljöer, betonghållfasthet, digital övervakning, digitalisering, Göteborgs Hamn, pågjutning

Sensor based verification of concrete structures

*Degree Project in the Engineering Programme
Business Development and Entrepreneurship*

PATRIK GLANS

ARVID MYRSETH

Department of Architecture and Civil Engineering
Division of Structural Engineering
Chalmers University of Technology

ABSTRACT

This thesis investigates the possibility of installing and using fibre optic sensors, known as Distributed Optical Fibre Sensors (DOFS), to verify and monitor renovated concrete structures, with a focus on marine environments. The work was carried out in collaboration with the Port of Gothenburg and Chalmers University of Technology through the research project Sens-IT, aiming to enable proactive infrastructure maintenance through continuous data collection.

The project includes literature studies, theoretical calculations, and practical implementation involving fibre optic installation and recasting of piles from the Port of Gothenburg. The theoretical part covers topics such as concrete in aggressive environments, rebar corrosion, exposure classes as well as creep and shrinkage.

The practical work involved sensor installation, formwork construction, concrete casting, and compressive strength testing of cubes. Four concrete piles were renovated with new concrete overlay and fibre optics were mounted along the tensile reinforcement for long-term monitoring within the research project Sens-IT.

The result is a technically viable method for integrating fibre optic sensors into the renovation process of concrete structures. The technique has the potential to support more sustainable and cost-effective maintenance of port infrastructure by enabling early detection of damage and structural changes.

The project also contributes new knowledge, as no previously renovated concrete elements have been monitored over time in the project. Since the Port of Gothenburg carries out extensive renovation work, the findings may inform future maintenance strategies.

Key words: Fibre optic sensors, DOFS, strain, cracking, concrete pile, renovated concrete structures, concrete strength, digital monitoring, digitalisation, Port of Gothenburg

Innehåll

SAMMANFATTNING	I
ABSTRACT	III
INNEHÅLL	IV
FÖRORD	V
1 INLEDNING	8
1.1 Syfte	8
1.2 Frågeställning	8
1.3 Avgränsning	9
1.4 Metod och genomförande	9
2 FIBEROPTISKA SENSORER I BETONGKONSTRUKTIONER	10
2.1 DOFS (Distributed Optical Fibre Sensors)	10
2.2 Fiberoptisk kabel	10
2.3 Mätning av töjningsförändringar	10
3 BETONG OCH ARMERING I HAVSNÄRA MILJÖ	12
3.1 Exponeringsklasser	12
3.2 Vattencementtal	13
3.3 Ballast	14
3.4 Kubprov	14
3.5 Vidhäftning i betong	15
3.6 Karbonatisering	15
3.7 Kloridinitierad korrosion	15
3.8 Spjälkbrott	16
4 RENOVERING AV MARINA BETONGKONSTRUKTIONER	17
4.1 Vidhäftning av pågjutning	17
4.2 Bilning som arbetsmetod	17
4.2.1 Mekanisk bilning	17
4.2.2 Vattenbilning	18
4.3 Mikrosprickor	18
4.4 Ren yta	18
4.5 Gjutning av nya betongen	18
5 TIDSBEROENDE DEFORMATIONER	19
	IV

5.1	Krypning	19
5.2	Krympning	19
5.2.1	Uttorkningskrympning	20
5.2.2	Autogen krympning	20
6	BERÄKNINGAR	21
6.1	Indata	21
6.2	Drag- och tryckkraftsarmering	21
6.3	Tvärkraftsarmering	22
6.4	Sprickmoment	22
6.5	Momentkapacitet	23
6.6	Maximalt sprickavstånd	23
6.7	Maximal sprickbredd	23
7	PRAKTISKA MOMENT	24
7.1	Täckskiktsmätning	24
7.2	Kapning och vattenbilning	24
7.3	Ritning	25
7.4	Praktiska förberedelser	26
7.5	Formbyggnation	27
7.6	Fiberoptikinstallation	29
7.7	Gjutning	30
7.8	Avformning	31
7.9	Kubtest	32
8	HAMNINSPEKTIONER	35
9	DISKUSSION	37
10	SLUTSATS	38
11	REFERENSER	39
12	BILAGOR	42
	ARBETSBEREDNING	52

Förord

Detta examensarbete om 15 högskolepoäng har genomförts av Patrik Glans och Arvid Myrseth inom programmet Samhällsbyggnadsteknik på högskoleingenjörnivå vid Chalmers tekniska högskola. Arbetet har skett i samarbete med Chalmers avdelning för konstruktionsteknik och Göteborgs Hamn.

Vi vill rikta ett stort tack till vår examinator och handledare Rasmus Rempling för vägledning och stöd under projektets gång. Ett stort tack även till Henrik Granroth på Göteborgs Hamn samt till medarbetare på NCC för ett givande samarbete.

Vi vill också tacka ACE konstruktionslabb för stöd i det praktiska arbetet samt för tillgång till lokaler och utrustning.

Slutligen även tack till Ruben Bång Brunström och Gustav Ekdahl för ett gott samarbete genom projektet och för en trevlig golfrunda. Tack till Emil Åkerman för agerande som bollplank i beräkningsdelen.

Detta examensarbete har varit både intressant och givande. Vi har haft möjlighet att tillämpa de teoretiska beräkningarna vi lärt oss under vår studietid på Chalmers, samtidigt som vi har dragit nytta av tidigare praktisk arbetslivserfarenhet i de mer tillämpade delarna av projektet.

Genom litteraturstudierna har vi även fördjupat vår kunskap om hur renovering av betongelement och betongens sammansättning påverkar dess egenskaper och slutliga prestanda. Det har också varit intressant att lära sig om fiberoptik och få förståelse kring hur detta kan tillämpas för att få ut data om en betongkonstruktions strukturella hälsa.

Göteborg juni 2025
Patrik Glans, Arvid Myrseth

1 Inledning

Nedbrytandet av armerade betongkonstruktioner som sker på grund av föråldring eller annan yttre påverkan kan påverka strukturens respons och integritet och i värsta fall äventyra brukarens säkerhet. Att ersätta dessa konstruktioner är sällan ekonomiskt, praktiskt eller miljömässigt försvarbart, vilket resulterar i att renovering på plats är nödvändigt.

Implementering av effektiva strategier för skadekartläggning och bedömning som möjliggör en korrekt utvärdering av pågående nedbrytningsprocesser är därför avgörande (Fernandez m.fl., 2022). Denna skadekartläggning gör det möjligt för infrastrukturägare att vidta riktade åtgärder för underhåll, reparation och förstärkning i syfte att bevara och underhålla den befintliga infrastrukturen på effektivast möjliga sätt.

Göteborgs Hamn har ett stort bestånd av betongkonstruktioner i en utsatt miljö med hög salthalt, fukt och som utöver detta utsätts för mekaniska skador från den dagliga verksamheten. Dessa konstruktioner behöver således omfattande översyn och underhåll. För att bättre kunna planera detta underhåll och som en del i Göteborgs Hamns digitala transformation samarbetar hamnen med forskningsprojektet SensIT. Med SensITs fiberoptikteknik är målet att komplettera de teoretiska beräkningarna för underhåll och livslängd med konkret datainformation. Med denna data kan också eventuella försvagningar och skador upptäckas tidigare och därmed höja säkerhetsnivån och sänka kostnader för åtgärder. Med andra ord gå mot ett mer proaktivt underhåll kontra ett reaktivt underhåll.

1.1 Syfte

Denna studie undersöker möjligheten till installation av fiberoptiska sensorer i renoverade betongpålar. SensIT projektet har tidigare inte genomfört studier på renoverade betongkonstruktioner, detta arbete leder i förlängningen till utökad kunskap inom området och möjlighet till datainsamling under kommande 10-15 år. Sensorerna kan förbättra kunskapen om konstruktionernas strukturella hälsa genom kontinuerlig datainsamling.

Målet är att ta fram ett hållbart och repeterbart förslag för fiberoptikinstallation som kan tillämpas vid framtida renoveringar av liknande konstruktioner. Samt att förbereda ett flertal konstruktioner av armerad betong för en långtidsstudie. Långtidsstudien syftar till att studera hur fiberoptiken kan användas för att ge mervärde i form av detaljerad kunskap om en konstruktions strukturella tillstånd.

Resultatet förväntas i förlängningen visa om fiberoptiska sensorer kan bidra till en mer effektiv och förutsägbar underhållsstrategi, vilket kan leda till minskade kostnader, minskad miljöbelastning och en högre säkerhetsnivå i Göteborgs Hamn.

1.2 Frågeställning

- Hur installeras fiberoptiken?
- Hur säkerställs det att den fiberoptiska kabeln inte tar skada under långtidsstudien?
- Hur genomförs en teknisk inspektion av hamnkonstruktioner?
- Påverkan på betongkonstruktioner i havsnära miljö?
- Hur stor kraft krävs för att belasta pålen till sprickmoment?

1.3 Avgränsning

Rapporten avgränsas till teori kring betongkonstruktioner samt ett praktiskt arbete som innefattar renovering av betongelement med fiberoptikinstallation med efterföljande utvärdering av genomförandet.

Rapporten tar inte några ekonomiska eller miljömässiga faktorer i beaktning utan fokuserar på slutresultatet i form av funktion och genomförbarhet.

1.4 Metod och genomförande

Detta examensarbete har genomförts i tre huvudsakliga delar: litteraturstudie, teoretiska beräkningar och praktiska moment med tillhörande utvärdering.

Litteraturstudien fokuserade på tidigare forskning och tekniska riktlinjer inom områdena betongkonstruktioner i marina miljöer, renovering av betongkonstruktioner, armeringskorrosion, fiberoptisk mätteknik (DOFS), krypning och krympning.

I den analytiska delen utfördes teoretiska beräkningar av sprickmoment, momentkapacitet i brottgränstillstånd (ULS), samt maximalt sprickavstånd och sprickbredd enligt Eurokod 2. Dessa beräkningar användes som referens för att dimensionera betongelementens kapacitet och som stöd för det praktiska utförandet.

Den praktiska delen omfattade förberedelse, installation av fiberoptik, och renoveringsgjutning av fyra påldelar tidigare använda i Göteborgs Hamn. Efter vattenbilning installerades fiberoptiska sensorer längs exponerad dragarmering. Därefter konstruerades formar för att återställa pålarnas ursprungliga tvärsnittsmått, inklusive integrering av skyddsskåp för fiberoptikens ändrar så att de inte tar skada under projektets gång.

Resultatet är ett praktiskt genomförbart och tekniskt utvärderat metodförslag för installation av DOFS i renoverade betongelement.

2 Fiberoptiska sensorer i betongkonstruktioner

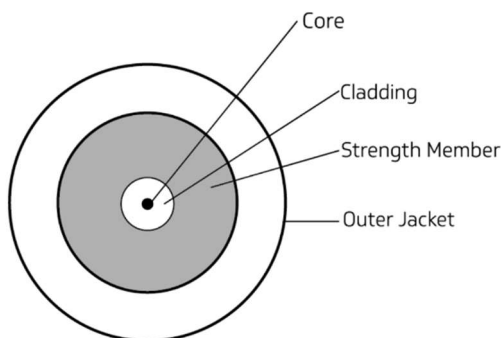
Fiberoptiska sensorer har under de senaste decennierna blivit ett allt mer attraktivt för strukturell övervakning av betongkonstruktioner. Tekniken möjliggör mätning av töjning, temperatur och andra parametrar med hög precision över långa avstånd. Genom att integrera fiberoptik i betongelement kan tillståndsförändringar övervakas i realtid, vilket skapar förutsättningar för proaktivt underhåll av infrastruktur. Detta kapitel ger en översikt över principerna bakom fiberoptisk mätning och hur tekniken tillämpas i armerade betongkonstruktioner.

2.1 DOFS (Distributed Optical Fibre Sensors)

DOFS (Distributed Optical Fibre Sensors) är en teknik där en optisk fiber används som en kontinuerlig sensor längs hela sin längd, i motsats till traditionella fiberoptiska sensorer som bara mäter på en specifik punkt. Genom att skicka en ljuspuls genom fibern och analysera det reflekterade ljuset kan man mäta fysiska parametrar såsom temperatur, deformation och vibrationer längs fiberns hela sträcka (Ferdinand. 2014). Möjligheten till mätning över hela fiberlängden gör DOFS-tekniken särskilt lämplig för tillståndsövervakning av betongkonstruktioner där sprickbildning och deformation kan uppstå över stora ytor (Bao & Chen, 2012).

2.2 Fiberoptisk kabel

Den optiska fibern som används i DOFS-system är ofta uppbyggd av en glasbaserad kärna med mycket liten diameter (cirka 8-10 μm) där ljus transporteras, omgivet av ett reflektionsskikt med lägre brytningsindex än kärnan. För att skydda dessa inre skikt mot mekanisk påverkan, fukt och kemisk nedbrytning kläs fibern i flera lager polymerbaserade beläggningar (Barrias m.fl., 2016).



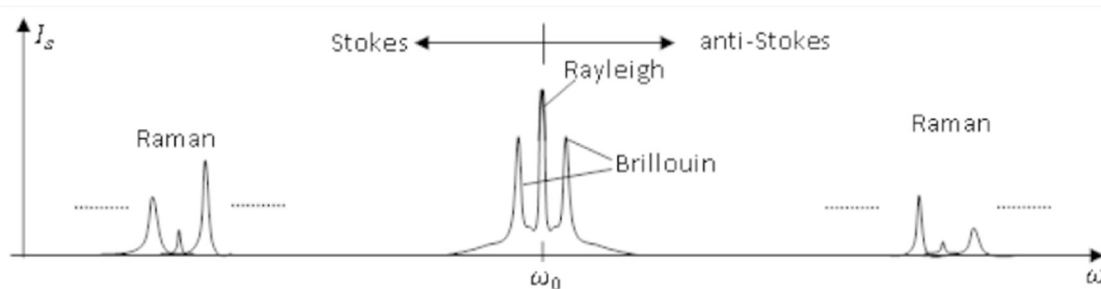
Figur 2.1 Tvärsnitt av DOFS-kabel (Micropol, u.å.).

2.3 Mätning av töjningsförändringar

Det finns tre huvudsakliga metoder för att analysera ljusspridningen i DOFS: Raman-, Brillouin- och Rayleigh-spridning.

Raman används i huvudsak för datainsamling av temperaturförändringar, Brillouin och Rayleigh-spridningar är däremot mer intressanta för byggt teknik då de även kan mäta töjningsförändringar. Det som skiljer dessa åt är noggrannheten i mätningen samt maximala längden på kabeln. Brillouin med längd på upp till 300 kilometer med decimeterprecision och

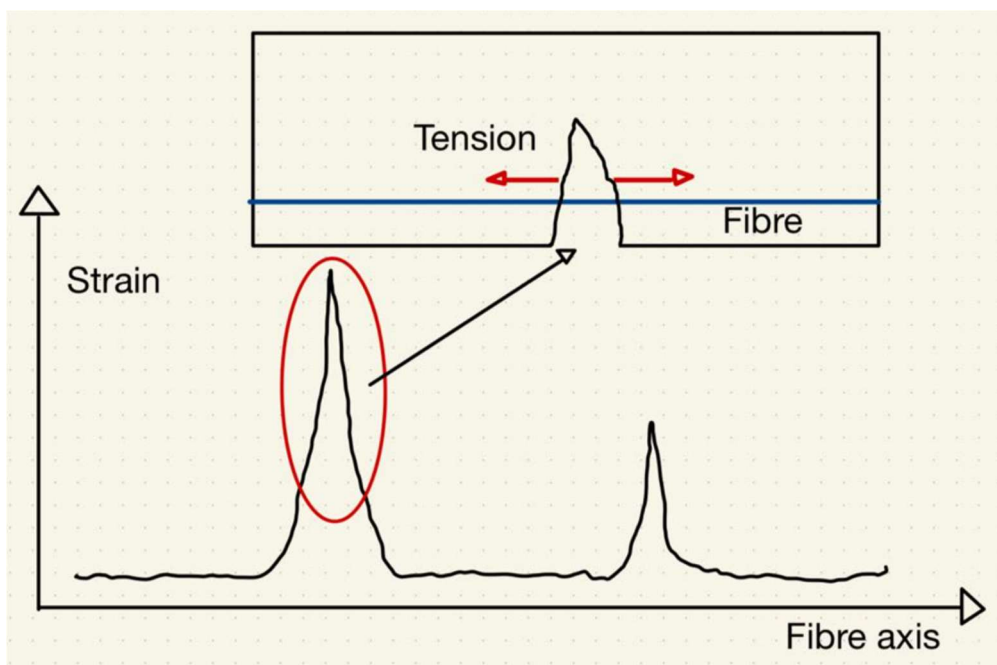
Rayleigh med längd på upp till omkring 100 meter med submillimeterprecision (Fernandez m.fl., 2022). För analysen i detta projekt används Rayleigh (se Figur 2.2).



Figur 2.2 Ljusspridningsfördelning fiberoptik (Bao & Chen, 2012).

I betongkonstruktioner kan optiska fibrer installeras på olika sätt beroende på syfte och förutsättningar. I detta arbete har fiberoptiken ingjutits i konstruktionen genom att monteras längs armeringsjärnen, vilket möjliggör direkt mätning av töjningar i dragzonen. Alternativt kan fiberoptiska kablar även monteras utanpåliggande på betongytan, vilket är en vanlig metod vid eftermontering i befintliga konstruktioner där ingjutning inte är möjlig.

Möjligheten till mätning av spänningsförändringar, se Figur 2.3, längs med en betongkonstruktion möjliggör att mikrosprickor och deformationer kan upptäckas tidigare och med större säkerhet än vid visuella inspektioner (Zhang m.fl., 2025). Tekniken har framgångsrikt tillämpats i broar, tunnlar, dammar och andra konstruktioner där långsiktig övervakning av strukturellt beteende är av särskild betydelse (Bao & Chen, 2012).



Figur 2.3 Spänningsförändringar vid sprickbildning av betongkonstruktioner omritad från (Zhang m.fl., 2025).

3 Betong och armering i havsnära miljö

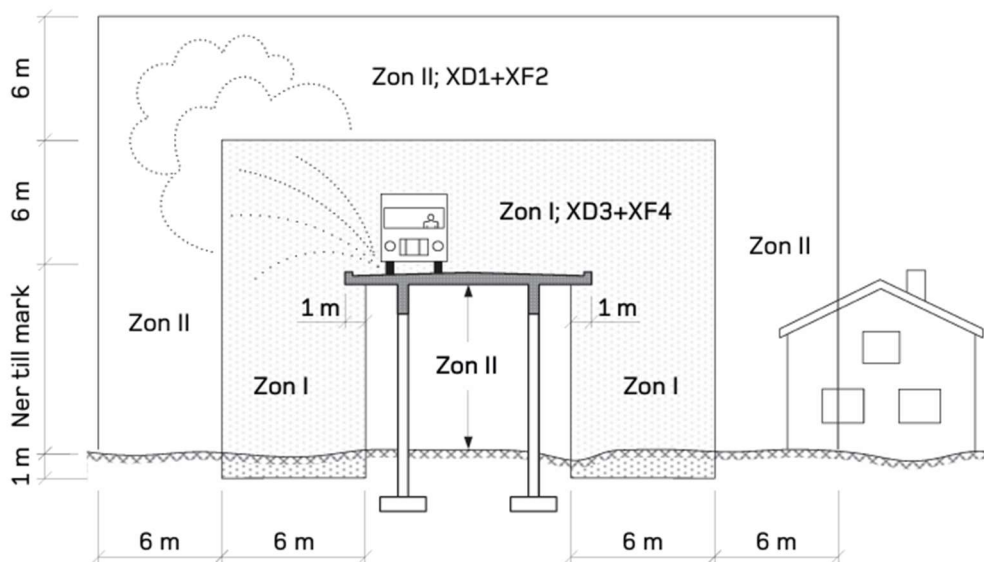
I havsnära miljöer utsätts betongen och dess armering för särskilt aggressiva påfrestningar. Påfrestningar som påverkar både hållbarhet och livslängd. För att skydda betongen och armering tillämpas tekniska åtgärder. En teknisk åtgärd för att öka livslängd är att använda en betong med låg permeabilitet, detta för att ha en betong med tät struktur som minskar risken för inträngning av vatten och därmed minskar risken för korrosion. En annan teknisk åtgärd är att öka det täckande betongskiktet, det vill säga avståndet från betongelementets utsida till armering (Johansson, Lagerblad & Åhs, 1997).

3.1 Exponeringsklasser

Beroende på klimatförhållande och den omgivande miljön ställs varierande krav på betongkonstruktioner. Dessa krav specificeras genom exponeringsklasser.

En mer aggressiv miljö erfordrar en högre exponeringsklass, vilket i sin tur innebär striktare krav på betongens egenskaper och konstruktionens utformning.

Exponeringsklassen påverkar bland annat valet av betongens hållfasthetsklass samt det tillåtna vattencementtalet (vct), för att säkerställa konstruktionens beständighet och funktion över tid. I Figur 3.1 visas indelning av exponeringsklasserna baserat på olika miljöer. Zon 1 representerar områden där betongen är särskilt utsatt, vilket medför krav på högre hållfasthetsklass och lägre vct-tal. Zon 2 avser mindre utsatta miljöer, där det är möjligt att använda en betong med lägre hållfasthetsklass och högre vct-tal, utan att äventyra konstruktionens hållbarhet och beständighet (Thomas Betong, 2024).



Figur 3.1 Exponeringsklasser Thomas Betong (2024).

Figur 3.2 visar vilken lägsta tryckhållfasthetsklass som krävs beroende på styrande exponeringsklass. Betongkonstruktioner som placeras i miljöer med mer aggressiva nedbrytningsprocesser, såsom frost, klorider eller hög fukthalt, ställs under högre krav på betongens motståndskraft. Detta innebär att en högre tryckhållfasthetsklass måste väljas för att uppnå tillräcklig beständighet i sådana miljöer (Thomas Betong, 2024).

STYRANDE EXPONERINGSKLASS	HÖGSTA TILLÅTNA VCT _{ekv}	PRODUKTTYP	LÄGSTA TRYCKHÅLL- FASTHETSKLASS
TORRA MILJÖER - INOMHUSKONSTRUKTIONER			
XC1	0.90	Betong med krav på hållfasthet	C25/30
FUKTIGA ELLER VÅTA MILJÖER UTAN KLORIDER OCH INGEN RISK FÖR FRYSNING			
XC1	0.90	Betong med krav på hållfasthet	C25/30
XC2	0.60 ¹⁾	Betong med krav på vct	C28/35
XC3	0.55 ¹⁾	Betong med krav på vct	C30/37
XC4	0.55 ¹⁾	Betong med krav på vct	C30/37
FUKTIGA ELLER VÅTA MILJÖER MED KLORIDER OCH INGEN RISK FÖR FRYSNING			
XD1	0.45	Betong med krav på vct	C35/45
XD2	0.45	Betong med krav på vct	C35/45
XD3	0.40	Betong med krav på vct	C40/50
FUKTIGA ELLER VÅTA MILJÖER UTAN KLORIDER MED FRYSNING			
XC3/XC4 + XF1 ²⁾	0.55 ¹⁾	Betong med krav på vct	C30/37
XF3 + XC/XC3/XC4	0.55	Betong med garanterad lufthalt	C28/35
FUKTIGA ELLER VÅTA MILJÖER MED KLORIDER MED FRYSNING			
XD1 + XF2	0,45	Betong med lägsta garanterad lufthalt	C32/40
XS1 + XF2	0,45	Betong med lägsta garanterad lufthalt ³⁾	C32/40
XD2/XS2 + XF4	0,45	Frysprovad betong (enl. SS 137244)	C32/40
XD3/XS3 +XF4	0,40	Frysprovad betong (enl. SS 137244)	C35/45

Figur 3.2 Exponeringsklasser Thomas Betong (2024).

3.2 Vattencementtal

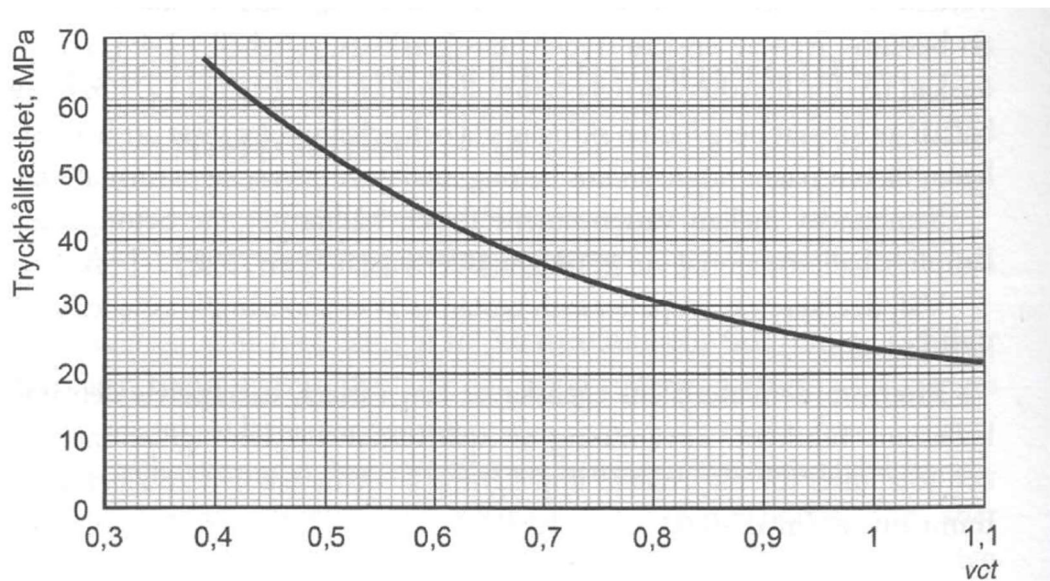
Vct är en avgörande parameter för betongens egenskaper och definieras som förhållandet mellan mängden vatten (w) och mängden cement (c) i blandningen enligt formel (3.1).

$$vct = \frac{w}{c} \quad (3.1)$$

Figur 3.2 visar hur olika exponeringsklasser ställer krav på maximalt tillåtet vattencementtal. Ju högre vatteninnehåll i förhållande till cement, desto högre blir vct-talet, vilket generellt leder till en porösare betong med försämrade hållfasthet och beständighet. Omvänt ger ett lägre vct-tal en tätare betong med högre hållfasthet.

Exponeringsklassen för en betongkonstruktion avgör vilket maximalt vct-tal som får användas. Som exempel visas i Figur 3.2 att ett vct på 0.90 tillåts i miljöer med låga krav, vilket motsvarar en lägsta tryckhållfasthet på C25/30. I mer aggressiva miljöer krävs ett lägre vct, exempelvis 0.45, vilket motsvarar en tryckhållfasthet på minst C32/40 (Johansson m.fl.,

1997). Sambandet mellan vattencementtal och tryckhållfasthetsklass illustreras grafiskt i Figur 3.3.



Figur 3.3 Samband mellan vattencementtal och tryckhållfasthet vid 28 dagar ålder (Johansson m.fl., 2017).

3.3 Ballast

Ballast i betong är stenmaterialet, exempelvis sand och grus, som utgör den volymmässigt största beståndsdelen i betong och har en stor påverkan på den färdiga betongens egenskaper i form av hållfasthet, deformation och beständighet. Ballastens kornstorleksfördelning, kornform, ytråhet samt densitet påverkar betongens packningsgrad och vattenbehov.

Vid stor kornstorleksfördelning av ballasten i betongblandningen uppnås en hög packningsgrad och låg porositet minskar nödvändigt vct-tal och ger därmed en högre hållfasthet. Grövre ballast har större påverkan på tryckhållfastheten och elasticitetsmodul medan den mer finkorniga ballasten minskar risken för separation (Johansson m.fl., 1997).

3.4 Kubprov

Ett kubprov av betong är ett standardiserat sätt att bestämma betongens tryckhållfasthet genom att pressa en gjuten betongkub i en provpress till brott enligt standarden SS-EN 12390. Kubprov görs för att kontrollera att levererad betong motsvarar den betongkvalitet som beställts. Kubprovet består av att en kub gjuts i en standardiserad 150x150x150mm form. Provet förvaras sedan i en fuktig miljö med minst 95% relativ fuktighet vid en temperatur av $20^{\circ} \pm 2^{\circ}$, exempelvis i ett vattenbad i 28 dagar för att härda innan provtryckning sker. Vid provet utsätts kuben för ett axiellt tryck med bestämd belastningshastighet tills brott uppstår. Den maximala kraften divideras sedan med kubens tvärsnittsarea för att beräkna tryckhållfasthet (Johansson m.fl., 1997).

Hållfasthetsvärdet påverkas av en rad faktorer som ålder, fukthalt, geometri och härdningsförhållanden. Generellt sett ger kuber ett högre hållfasthetsvärde än cylindrar. Detta på grund av bland annat lägre spänningskoncentrationer och olika sprickutbredning. För betong klassificerad enligt europeisk standard som exempelvis C45/55 står 45 för

cylinderhållfasthet i MPa och det högre värdet 55 för kubhållfasthet i MPa (Johansson m.fl., 1997).

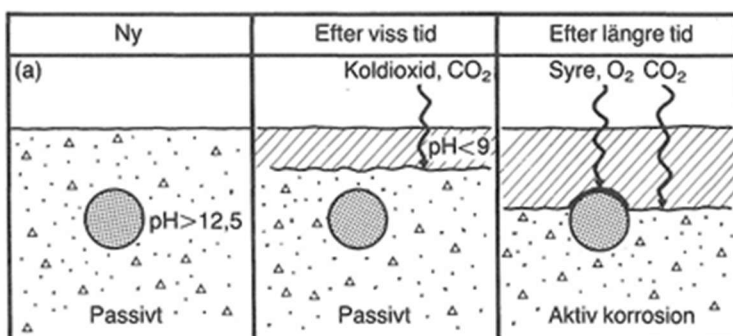
3.5 Vidhäftning i betong

Betongens permeabilitet, det vill säga dess förmåga att släppa igenom vätska, styrs till stor del av permeabiliteten hos cementpastan och ballasten. Ballastens kemiska och fysikaliska egenskaper, såsom kornform, ytråhet och täthet, påverkar hur väl materialet packas och därmed hur tät betongen blir. En hög packningsgrad i kombination med tät cementpasta minskar den totala permeabiliteten i betongstrukturen. En avgörande faktor för att uppnå låg permeabilitet är användning av ett lågt vct vilket bidrar till att reducera porositeten i den härdade betongen (Rockström, 2006). En tät betongstruktur förbättrar vidhäftningen mellan ballast och cementpasta, vilket i sin tur gynnar betongens beständighet, hållfasthet och deformationsegenskaper (Johansson m.fl., 1997).

3.6 Karbonatisering

Karbonatisering är en naturligt förekommande kemisk process som påverkar betong över tid. Processen uppstår när koldioxid från omgivande luft tränger in i betongens porstruktur och reagerar med ämnen i cementpastan. Vid cementtillverkning, där cement fungerar som bindemedel i betong, upphettas kalksten till mycket höga temperaturer. Denna process leder till stora utsläpp av koldioxid. När betongen sedan har härdats och exponeras för luft, inleds en långsam process där den åter binder en del av den koldioxid som släpptes ut vid tillverkningen. Det innebär att betongen till viss del kompenserar för sina ursprungliga utsläpp (RISE, 2023).

När karbonatiseringsprocessen fortskrider neutraliseras betongens basiska miljö. Det är inte ovanligt att färsk betong har ett pH-värde högt som 14. Karbonatiseringen rör sig gradvis inåt mot armeringsjärnen med en relativt jämn koncentration. Det som skyddar armeringsjärnen från denna process är det omgivande betongskiktet. När karbonatiseringen når igenom det skyddande skiktet finns risk att armeringsjärnet börjar korrodera (Burström 2021).

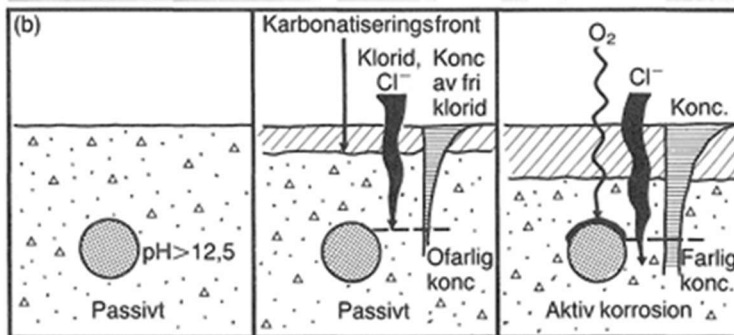


Figur 3.4 Karbonatisering (Fagerlund, 1992).

3.7 Kloridinitierad korrosion

En annan form av armeringskorrosion är kloridinitierad korrosion. I den här studien, som fokuserar på konstruktioner i havsnära miljöer, är det framför allt salter från havet som utgör en stor påfrestning, detta för att havsvatten innehåller höga halter av kloridjoner. Betongytan exponeras för dessa kloridjoner genom vattenstänk, salta havsvindar eller genom direkt kontakt med havsvatten om konstruktionen är helt eller delvis nedsänkt.

Kloridjonerna tränger sedan in i betongen och rör sig mot armeringen. Till skillnad från karbonatisering sker denna typ av inträngning med avtagande koncentration mot betongens inre, vilket framgår av Figur 3.5. När kloridjonerna når en tillräcklig hög koncentration vid armeringen järnet så inleds korrosionen (Fagerlund 1992).



Figur 3.5 Kloridinträngning (Fagerlund, 1992).

3.8 Spjälkbrott

Ett allvarligt problem med tidigare nämnd kloridinträngning är att den leder till rostbildning, där rosten ger en betydligt större volym än det ursprungliga stålet. Detta orsakar inre spänningar mellan armeringsstålet och den omgivande betongen. Om dessa spänningar överstiger betongens tryckhållfasthet kan det resultera i att det skyddande betongskiktet spricker, eller i värsta fall lossnar helt (Fagerlund, 1992). Detta illustreras i Figur 3.6, där det täckande betongskiktet har försvunnit helt och armeringsjärnen är exponerade för ytterligare nedbrytning från den yttre miljön.



Figur 3.6 Spjälkning på grund av korroderande armering (Lenstadhus, u.å.)

4 Renovering av marina betongkonstruktioner

Vid renovering av skadade betongkonstruktioner i Sverige är det idag vanligast att använda metoden med pågjutning. Denna metod innefattar att den skadade betongen först avlägsnas, varefter ett nytt betonglager gjuts på för att nå upp till den ursprungliga nivån. Syftet är att i möjligaste mån återställa konstruktionens ursprungliga bärförmåga och funktion (Pham & Olsson, 2013).

4.1 Vidhäftning av pågjutning

Vid renovering är vidhäftning mellan den nya pågjutna och den gamla betongen avgörande för ett bra resultat. Det finns olika klassningar beroende på vilken konstruktion som skall renoveras.

Det finns det tre principiella fall vid renovering som används för att särskilja den uppnådda vidhäftningen (Johansson m.fl., 1997).

- I fall 1 är det fullständig vidhäftning mellan befintlig betong och pågjutning. Ett exempel på en konstruktion som kräver denna klass är vid renovering av en brokonstruktion.
- I fall 2 är vidhäftningen bristande eller osäker, mellan nya och gamla betongen, bompartier kan förekomma. Bompartier är luftfickor som uppstår i betongen (Svenskt Vatten Utveckling, 2019). Fall 2 är något som oftast används inomhus och detta beror på att arbetsutförandet kan vara begränsande (Pham & Olsson, 2013)
- I fall 3 är det en total glidning mellan den nya och gamla betongen. Detta används oftast vid platta på mark.

För att uppnå det önskade fallet i konstruktionen är det avgörande att arbetsmetoden utförs på rätt sätt. Ett korrekt utfört arbete förbättrar förutsättningarna för god vidhäftning mellan den nya pågjutningen och den befintliga bilade betongen.

4.2 Bilning som arbetsmetod

Bilning som arbetsmetod används för att avlägsna den gamla skadade betongen. Denna typ av arbete utförs vanligtvis i samband med renoverings eller reparationsarbeten inom betongkonstruktioner. Efter bilning så skall det finnas en yta som är ren och fri från mikrosprickor, vilket skapar en god förutsättning för bra vidhäftning. Valet av bilningsmetod grundar sig i krav, omfattning, tillgänglighet till skadan och vad arbetsplatsområdet har för möjligheter. De vanligaste bilningsmetoder är mekanisk bilning och vattenbilning, det är även de metoder som texten fokuserar på (Pham & Olsson, 2013).

4.2.1 Mekanisk bilning

Mekanisk bilning innebär att ett verktyg används för att avlägsna skadad betong genom upprepade, kraftiga stötar mot ytan. Stötarna får betongen att lossna samtidigt som ytråheten ökar, vilket kan gynna vidhäftningen vid ny pågjutning. Dock påverkar bilningen inte enbart området vid verktygets spets. De kraftiga stötarna kan även orsaka mikrosprickor i den omgivande, oskadade betongen, vilket medför en ökad risk för framtida skador (Eriksson, 2017).

4.2.2 Vattenbilning

Vattenbilning innebär att en högtrycksstråle av vatten riktas mot betongen och gradvis avverkar materialet i lager. Metoden rengör samtidigt armeringen, vilket är en fördel vid renoveringsarbeten. Efter vattenbilning skall ytan spolas rent med hjälp av högtryckstvätt eller liknande, för att få en ren yta för renoveringsbetongen att vidhäfta till (Pham & Olsson, 2013). Renspolning efter vattenbilning kommer hjälpa att ta bort rester från vattenbilningen som kan innehålla oreagerade cementrester som påverkar vidhäftningen till det negativa. När det kommer till själva pågjutningen av den nya betongen är det viktigt att den nya betongen kompakteras och härdas väl. (Betonghandboken del 2, 2021).

4.3 Mikrosprickor

Vid mekanisk bilning är risken för att mikrosprickor uppstår stor. Dessa sprickor bildas främst i den övre delen av den bilade betongytan och kan försämra vidhäftningen mellan den gamla och nya betongen, vilket i sin tur påverkar reparationens hållbarhet negativt. Mikrosprickor uppkommer från de hårda stötarna som mekanisk bilning ger upphov till. Vid vattenbilning är risken för mikrosprickor vid ytan mycket lägre (Eriksson, 2017).

4.4 Ren yta

Efter bilningsarbete är det viktigt att avlägsna sand, olja, damm eller andra föroreningar som kan ligga på ytan. Det är viktigt att få bort resterna direkt efter vattenbilning då resterande material från vattenbilning annars riskerar att torka ihop med vattnet som ligger på ytan. För att ta bort föroreningarna används högtryckstvätt med vatten, därefter används tryckluft för att avlägsna vattnet från högtrycken. En ren yta är en av de viktigaste faktorerna för att få en bra vidhäftning till den nya betongen (Eriksson, 2017).

4.5 Gjutning av nya betongen

Betongen som används vid pågjutning bör vara likvärdig den befintliga betongen. Det är också viktigt att gjutformarna är jämna och anpassade efter den ursprungliga formen (Landin, 2019).

Vid gjutning mot den bilade ytan är det särskilt viktigt att den nya betongen kompakteras noggrant. Kompakteringen utförs vanligtvis med hjälp av en vibrator, ett handverktyg som vibrerar för att avlägsna luftfickor i betongen. Detta säkerställer att den nya betongen fyller ut den skrovliga ytan ordentligt och minimerar risken för håligheter, det vill säga bompartier i gjutningen (Johansson m.fl., 1997).

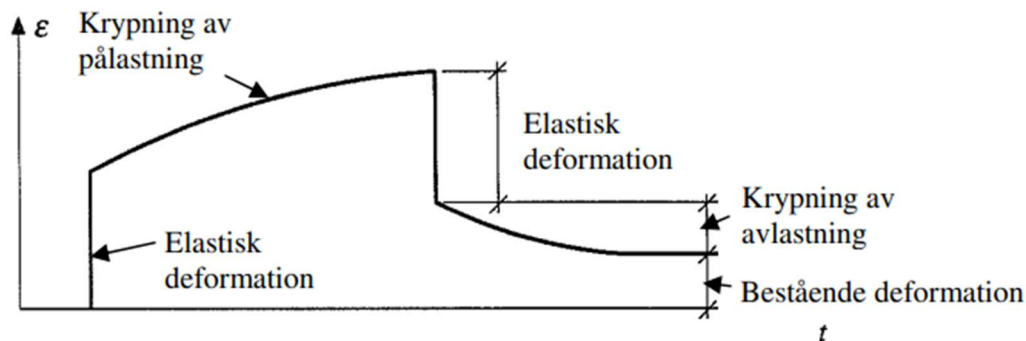
5 Tidsberoende deformationer

Krypning och krympning är två tidsberoende deformationer som påverkar betongens långsiktiga beteende. Krypning är betongens långsamma deformation under belastning över tid, medan krympning är volymminskning som sker vid uttorkning eller kemisk reaktion. Båda påverkar hållfasthet och sprickbildning.

5.1 Krypning

Krypning är en tidsberoende deformation som innebär att ett betongelement under konstant belastning kommer, utöver den initiala elastiska deformationen, långsamt fortsätta deformeras över tid. Hur stor denna deformation är beskrivs med kryptalet φ som är förhållandet mellan den initiala och långvariga deformationen. Krypningen ökar ju längre tid som går men antas nå ett slutligt värde vid omkring 70 år. Kryptalet bestäms av flera faktorer, betongelementets dimensioner, relativ luftfuktighet i omgivning, hur länge lasten verkar samt betongens ålder vid pålastning (t_0). Det sistnämnda har en stor påverkan med upp till en fördubbling av det slutliga kryptalet om balken belastas tätt inpå gjutning kontra om den belastas efter 28 dygn (Al-Emrani m.fl., 2013).

För det slutliga kryptalet används $\varphi(\infty, t_0)$ vid beräkning enligt EC 2 (se bilaga 1). Det slutliga kryptalet är vanligtvis inom intervallet 1-3, detta innebär att krypningen har en märkbar påverkan med upp till en flerdubbling av den initiala deformationen. Högre värden kan uppstå i torra miljöer som exempelvis uppvärmda inomhusutrymmen. (Al-Emrani m.fl., 2013).



Figur 5.1 Respons hos betong påverkad av pålastning och avlastning. Av (Al-Emrani m.fl., 2013).

5.2 Krympning

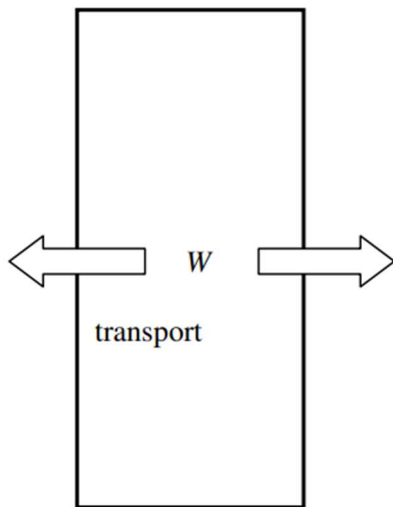
Krympning är en tidsberoende volymminskning i betong som uppstår till följd av vattenavgång vid uttorkning samt kemiska reaktioner under härdningsprocessen. Eftersom armeringen inte krymper i samma utsträckning som betongen uppstår inre spänningar i konstruktionen som med tiden kan leda till sprickbildning (Sawirs, 2014) Krympning delas in i två huvudsakliga komponenter, uttorkningskrympning och autogen krympning. För beräkning av slutligt krypmått enligt EC 2, se bilaga 2.

5.2.1 Uttorkningskrympning

Uttorkningskrympning uppstår när fukt successivt lämnar betongens porstruktur till den omgivande miljön. Allt vatten lämnar inte betongen under hydrationsprocessen utan en del blir kvar i betongens porer. I fall då betongelementet befinner sig i en uttorkande miljö sker detta över tid och betongvolymen minskar.

Faktorer som påverkar hastigheten och storleken på uttorkningskrympning är vattenmängden i elementet, relativa fuktigheten i omgivande miljö, betongens permeabilitet samt volymen i förhållande till arean av ytorna som utsätts för uttorkning (Al-Emrani m.fl., 2013).

RH



Figur 5.2 Uttorkning, fukt (W) transporteras från betongelement till omgivande miljö. Av (Al-Emrani m.fl., 2013)

5.2.2 Autogen krympning

Autogen krympning är en volymminskning som sker i betong utan att fukt avges till omgivningen. Den har störst påverkan i högpresterande betong med lågt wct-tal då en stor del av vattnet i den ursprungliga betongblandningen deltagit i hydrationsprocessen. Under de första dygnet efter betongen hårdnat finns det kvar cement som inte reagerat. Denna cement reagerar med fukt i betongens porstruktur och bildar ett undertryck som leder till krympning och bidrar till sprickbildning i det fortfarande relativt svaga tillståndet (Al-Emrani m.fl., 2013).

6 Beräkningar

I kapitlet nedan redovisas resultat från beräkningar.

6.1 Indata

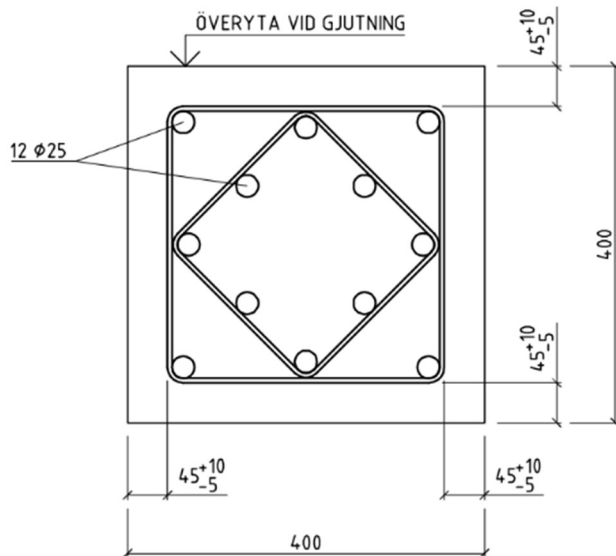
Indatan i tabell 6.1 har tagits fram från ritningar som tillhandahållits från Göteborgs Hamn, indatan utgör sedan underlag för beräkningar.

Tabell 6.1 Indata från ritning (Göteborgs Hamn, u.å.)

Betong		
Betong C45/55	XC2/XS3/XF4	VCT=0.4
Armering		
B500B		
Geometri		
Area	400x400mm	
Längd	4.8m	

6.2 Drag- och tryckkraftsarmering

Tryck och dragkraftsarmering består av symmetriskt placerad 25 mm armering i sju lager enligt Figur 6.1. Täckande betongskikt är 45mm och avstånd mellan armeringslager är 70 mm, se Figur 6.1 nedan.



Figur 6.1 Tvärsnitt av armeringsläggning (Göteborgs Hamn, u.å.)

6.3 Tvärkraftsarmering

Pålen är fabriksarmerad med dubbla spiralbyglar med olika orientering (se figur 6.1), där varje bygel har en diameter på 5 mm. Bygelavståndet är den första metern 100 mm och övergår sedan till 200 mm längs resterande del av pålen. I de teoretiska beräkningarna har en förenkling gjorts där ett konstant bygelavstånd på 200 mm antas längs hela längden. Detta motiveras av att den förhöjda mängden tvärkraftsarmering i ändzonerna inte förväntas påverka det strukturella beteendet i den jigg som kommer att användas för långtidsbelastning. Vidare antas att den stora mängden tvärkraftsarmering ger tillräcklig förankringseffekt för att säkerställa god vidhäftning över gjutskarven. På grund av detta beaktas inte gjutskarvens eventuella inverkan på pålens böjkapacitet i följande beräkningar.

6.4 Sprickmoment

De beräkningar som redovisas har utförts med stöd av ekvationer hämtade från Al-Emrani m.fl. (2011) samt Al-Emrani m.fl. (2013).

Den inledande beräkningen avser pålens sprickmoment, vilket definierar den maximala belastning som pålen kan utsättas för innan sprickor uppstår i betongen. I dessa beräkningar antogs att z motsvarar pålens tyngdpunkt. Yttröghetsmomentet för pålen i osprucket tillstånd representeras av I_I . För att bestämma den modifierade draghållfastheten i betong f_{ctmfl} har den karakteristiska draghållfastheten f_{ctm} multiplicerats med en säkerhetsfaktor k , vilken tar hänsyn till pålens låga tvärsnittshöjd.

$$M_{cr} = \frac{f_{ctmfl} * I_I}{z} = 48.6 kNm \quad (6.1)$$

$$k = 1.6 - \frac{h}{1000mm} = 1.2 \quad (6.2)$$

För fullständiga beräkningar se Bilaga 3.

6.5 Momentkapacitet

I beräkningarna har även kapaciteten i brottgränstillståndet (ULS) analyserats, detta har således utförts i stadium II. För att bestämma momentkapaciteten antogs betongspänningen (σ_{cc}) vara vid sin maximala kapacitet. Hävarmen z sattes till $0,2\text{ m}$ i beräkningarna. Vidare användes yttröghetsmomentet i stadium II (I_{II}), detta motsvarar den spruckna betongsektionen och ger representation av tvärsnittets bärförmåga i detta stadium.

$$\sigma_{cc} = 45\text{MPa} \quad (6.3)$$

$$M_{Rd} = \frac{\sigma_{cc} * I_{II}}{z} = 318,2\text{kNm} \quad (6.4)$$

För fullständiga beräkningar se Bilaga 3.

6.6 Maximalt sprickavstånd

Sprickavståndet beräknades med hjälp av ekvation 6.5, där armeringsdiametern (ϕ) och det täckande betongskiktet (c) utgör ingående parametrar. I denna ekvation är k_3 och k_4 nationella parametrar, för vilka det finns rekommenderade värden enligt Al-Emrani m.fl. (2011). Parametern k_1 tar hänsyn till vilken typ av armeringsstänger som används i konstruktionen, medan k_2 relaterar till den typ av last konstruktionen utsätts för. Förhållandet mellan armeringsarean och betongarean uttrycks genom ρ_p , vilket påverkar sprickbildning i betongen.

$$s_{rmax} = k_3 * c + \frac{k_1 * k_2 * k_4 * \phi}{\rho_p} = 268.44\text{mm} \quad (6.5)$$

För fullständiga beräkningar se Bilaga 3.

6.7 Maximal sprickbredd

Sprickbredden beräknades enligt ekvation 6.6, s_{rmax} användes från ekvation 6.5 och $\Delta\varepsilon$ är i denna ekvation relationen mellan stålets och betongens medeltöjning.

$$w_k = s_{rmax} * \Delta\varepsilon = 0.131\text{mm} \quad (6.6)$$

För fullständiga beräkningar se Bilaga 3.

7 Praktiska moment

Det praktiska arbetet omfattade renovering av fyra betongpålar från Göteborgs Hamn med syfte att integrera fiberoptiska sensorer för framtida övervakning. Momenten inkluderade täckskiktsmätning, vattenbilning, formbyggnation, installation av fiberoptik, gjutning samt provning av kubprover. Kapitlet beskriver genomförandet steg för steg.

7.1 Täcksiktsmätning

Som första del av de praktiska momenten gjordes ett besök till Göteborgs Hamns uppläggningsplats för att genomföra en täcksiktsmätning. Detta gjordes för att kontrollera att ritningsmåttene korrelerade med verkligheten. Från de mätningar som gjordes, både manuellt med millimeterstock i kapade tvärsnitt, samt med täcksiktsmätare var allt inom förväntad felmarginal (se Figur 7.1).



Figur 7.1: Täcksiktsmätningar (Egna bilder, 2025)

7.2 Kapning och vattenbilning

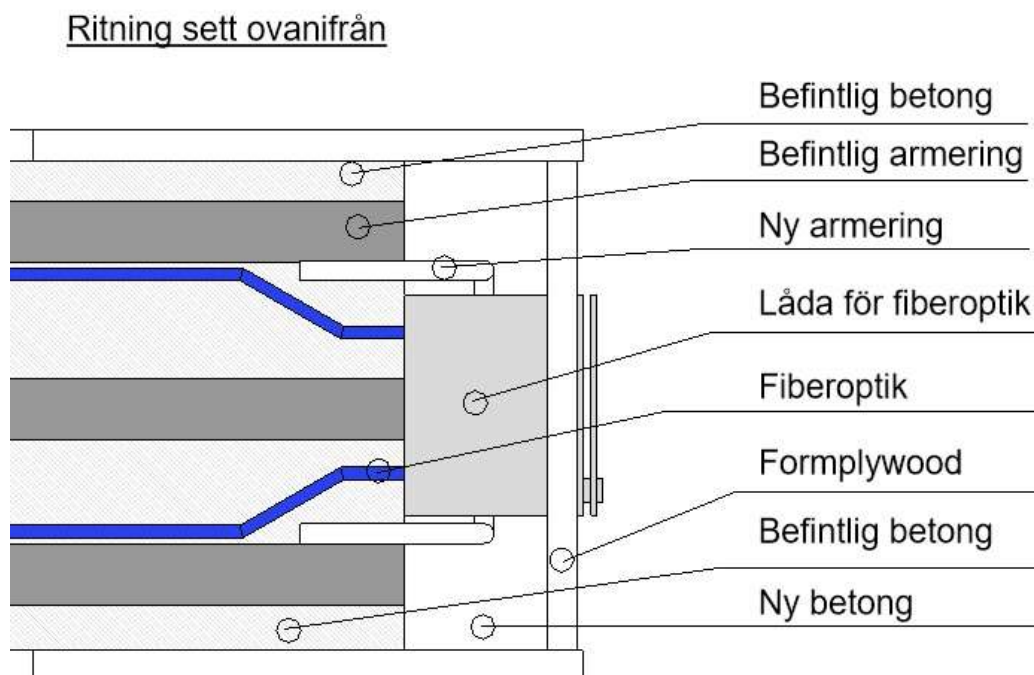
Inför leverans till ACE konstruktionslabb genomfördes kapning och vattenbilning av pålarna av en extern entreprenör. De två pålarna delades upp i tre sektioner vardera för att underlätta hantering och transport. I detta examensarbete användes fyra delar, två bottendelar med pålspets samt två mittsektioner om cirka 4,7 meter vardera. Vidare utfördes även vattenbilning av extern entreprenör för att frilägga armeringsjärn vilket var kritiskt för senare fiberoptikinstallation.

7.3 Ritning

Då pålarna skulle renoveringsgjutas för att återställas till ursprungligt tvärsnittsmått krävdes formbyggnation. Vid tidigare täckskiktetsmätning mätades de vattenbilade pålarna och erforderliga mått för form bestämdes. Med detta underlag togs en detaljerad ritning fram i CAD-programmet Revit. Ritningen omfattade formens geometri, positionering av ny armering samt integreringen av ett ingjutet skyddsskåp för fiberoptikens anslutningar.

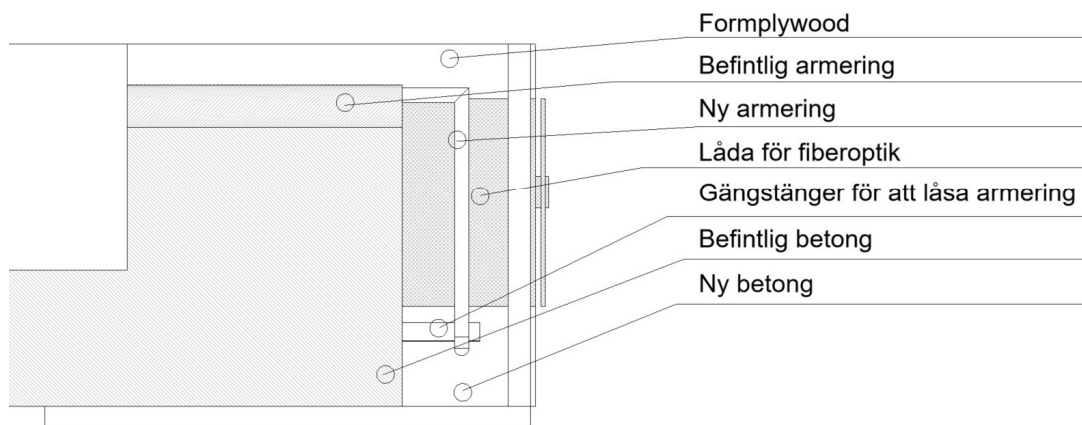
Skyddsskåpet designades för att placeras ingjutet i en förlängning av pålelementen, ingjutet i en armerad betongram för att motstå mekanisk påverkan. En viktig aspekt i detta var att skyddet för kabelanslutningen skulle placeras tillräckligt djupt i betongen för att minska risken för skador vid lyft, transport eller exponering i fält.

Utöver den övergripande utformningen definierade ritningen hur fiberoptiken skulle fästas längs armeringsjärnens längdriktning för att säkerställa goda mätresultat och undvika böjradier under tillverkarens minimikrav. Ritningen användes därefter som direkt underlag för den praktiska formbyggnationen.



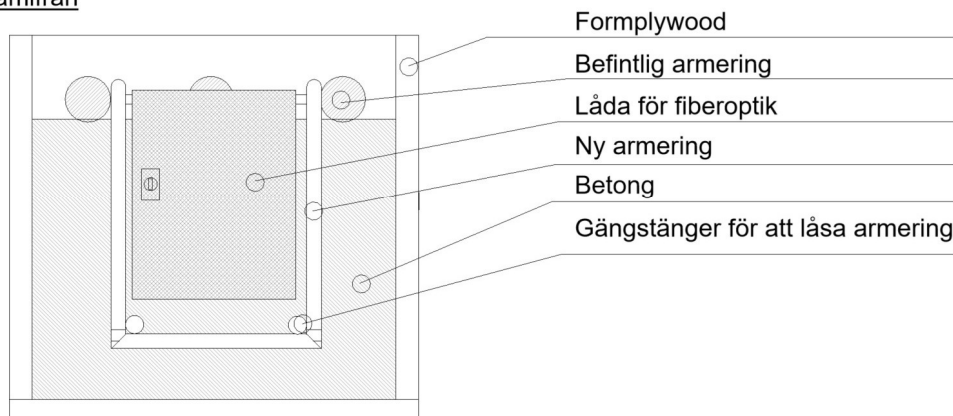
Figur 7.2: Ritning formbyggnation, sett ovanifrån (Egna bilder, 2025)

Ritning från vänstersida



Figur 7.3: Ritning för formbyggnation, sett från sida (Egna bilder, 2025)

Ritning framifrån



Figur 7.4: Ritning för formbyggnation, sett framifrån (Egna bilder, 2025)

7.4 Praktiska förberedelser

När pålarna hade transporterats till Chalmers betonggård inleddes de praktiska förberedelserna. Det första steget var att lägga pålarna i våg med hjälp av ACElabbs gaffeltruck för att underlätta vid kommande gjutning.

Därefter rengjordes de vattenbilade ytorna noggrant med högtryckstvätt för att avlägsna damm, lösa partiklar, cementrester och annan smuts som kan försämra vidhäftningen mellan den gamla och nya betongen. Efter tvätt blåstes ytorna rena med tryckluft för att avlägsna kvarvarande fukt och partiklar ur porerna. En god vidhäftningsyta är avgörande för en lyckad renovering.

Parallellt med rengöringen kapades formplywoodskivor enligt de mått som tagits fram i ritningsarbetet. Detta genomfördes i arkitekturverkstaden för att säkerställa raka och precisa snitt. Formskivorna märktes upp för respektive pålsektion för att förenkla monteringsarbetet.

Vidare rensades mindre skadade eller ojämna partier längs pålarnas sidor med handverktyg för att underlätta en tät och jämn formanslutning vid montering. De praktiska förberedelserna

avlutades med att samla och organisera materialet som skulle användas vid formbyggnation, fiberoptikinstallation och gjutning för att säkerställa ett effektivt genomförande utan avbrott.



Figur 7.5: Förberedelser inför formbyggnation (Egna bilder, 2025)

7.5 Formbyggnation

Efter tidigare nämnda förberedelser var färdigställda påbörjades formbyggnationen. Till att börja med monterades den uppkapade formplywooden med betongskruv längs sidorna vid önskad gjuthöjd av 400 mm från underkant av pålen för att återställa elementet till sitt originalmått. Utöver detta formades även ut en förlängning av balken för att gjuta in fiberoptikkåpet. Denna formdel dimensionerades och armerades enligt ritning med tillhörande gängstänger. Kopplingslådan fästes med gängstång och fixerades med gaveln av formplywood. Slutligen tätades formen med cementbruk.



Figur 7.6: Formbyggnation (Egna bilder, 2025)

7.6 Fiberoptikinstallation

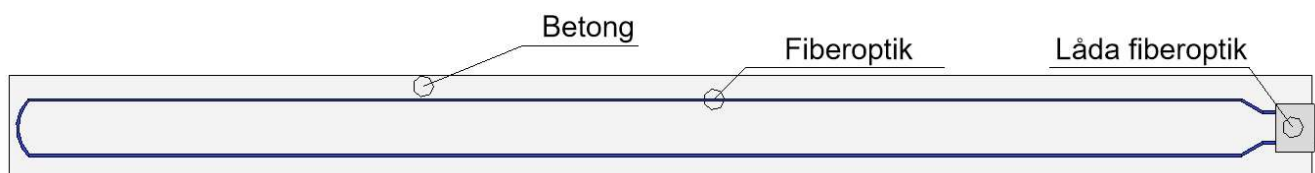
Efter att formbyggnationen färdigställts inleddes installation av fiberoptikkablarna. Kablarna monterades läng de frilagda armeringsjärn som hamnar i dragzon vid belastning, vilket är de mätvärden som är mest intressanta gällande information om töjning. Kabeln fästes med plastbuntband med jämna mellanrum för att säkerställa god kontakt mellan kabel och armeringsjärn.

Fiberoptiken är flexibel till en viss gräns, ca 10cm radie, vilket måste tas i beaktning vid installation för att undvika att fibrerna knäcks och att en defekt kabel gjuts in i konstruktionen (Wijaya m.fl., 2021). Kabeln monterades med en lämplig böjningsradie i änden av pälén. Kabeländar installerades med kabelgenomföring in i lådan (se Figur 7.8).

Utöver själva fiberoptiken installerades även referenspunkter i form av motståndstrådar 40 cm från ändarna. Dessa fungerar som kalibreringsmarkörer och hjälper till vid tolkning av mätdata längs fiberns längd. Installationen avslutades med en noggrann visuell inspektion för att säkerställa att kabeln låg väl infäst inför gjutning.



Figur 7.7: Fiberoptikinstallation (Egna bilder, 2025)



Figur 7.8: Ritning fiberoptikinstallation (Egen bild, 2025)

7.7 Gjutning

Gjutningen genomfördes med fabrikslevererad betong av klass C35/45 och ett vct på 0.40. Totalt beställdes 1m^3 vilket hade beräknats tillräckligt för samtliga fyra påldelar samt tillhörande kubprover.

Formarna fylldes till kanten och betongen vibrerades försiktigt för att inte skada fiberoptiken, resistanstrådar eller riskera separation av betongen. Ytan jämnades till med handverktyg. Utöver pålarna gjöts tre kubformer för kontroll av hållfasthet för betongen, se kap 7.9.

Efter gjutning och ytbearbetning färdigställts täcktes betongytorna omgående med täckplast för att minimera fuktförlust och sprickbildning under härdningens tidiga skede, detta var extra viktigt då det var en varm och solig dag. Gjutmomentet gjordes utan avvikelser och dokumenterades i både anteckningar och fotografier.



Figur 7.9: Gjutning (Egna bilder, 2025)

7.8 Avformning

Efter att betongen fått härda under helgen kunde formarna tas bort från balkarna. Den långa härdningstiden säkerställde att betongen hade utvecklat tillräcklig styrka för att hanteras utan risk för skador. Slutresultat enligt Figur 7.10. Avformningen är ett viktigt moment i processen, då balkarna nu är färdiga att gå vidare till nästa steg, att belastas till sprickmoment i ACElabbb.



Figur 7.10: Slutresultat gjutning (Egna bilder, 2025)

7.9 Kubtest

Ett kubtest för aktuell betongleverans genomfördes i enlighet med standard SS-EN 12390, där tre standardiserade kubprover med dimensionerna 150x150x150 mm användes, se figur 7.11. Vid gjutningen fylldes formarna i tre omgångar, motsvarande en tredjedel av formhöjden per gång och vibrerades mellan varje fyllning för att minimera förekomsten av luftbubblor. Efter gjutning täcktes kuberna med plast, liksom pålarna i syfte att förhindra torksprickor under härdningsfasen.



Figur 7.11: Gjutning av kuberna (Egna bilder, 2025)

Proverna fick förhärda i cirka 48 timmar innan de avformades, märktes upp och placerades i vattenbad för fortsatt härdning under 28 dygn.



Figur 7.12: Kuberna i vattenbad (Egna bilder, 2025)

Efter att 28 dagar hade passerat avlägsnades kuberna från vattenbadet, torkades med en trasa, kontrollmättes och vägdes, se Figur 7.12.

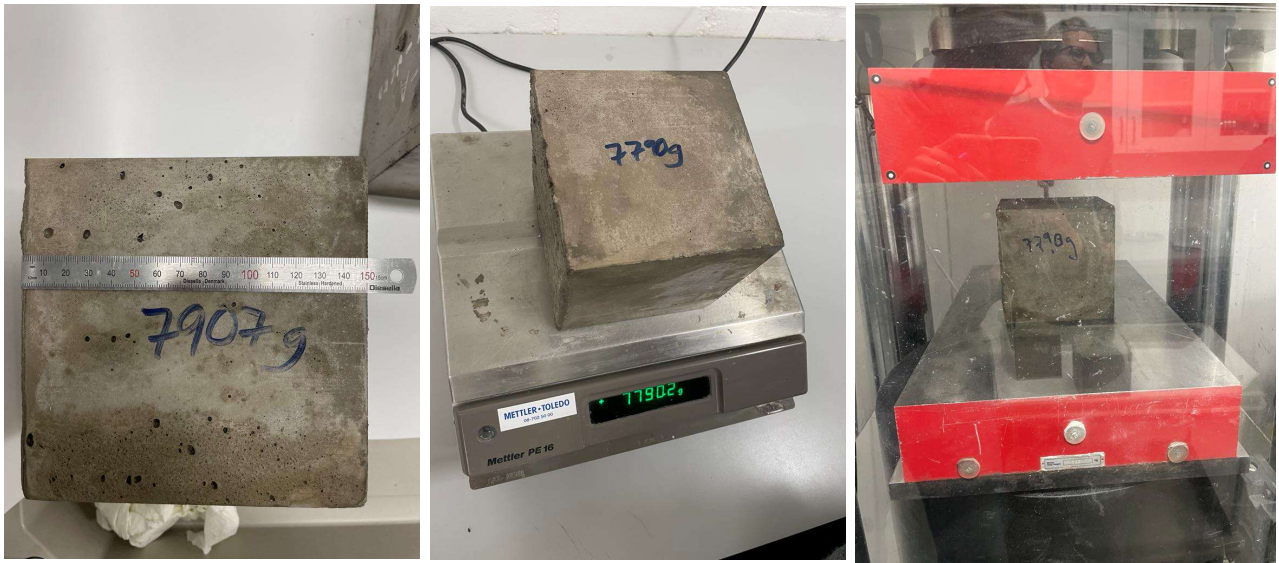
Kontrollmätningen är ett krav enligt SS-EN 12390 för att säkerställa att form varit korrekt fylld vid gjutning. Därefter matades data in från mätning och vägning in i en programmet kopplat till hydraulpresen. Sedan startades hydraulpresen och belastningen ökade gradvis till att brott uppstod. De uppmätta tryckhållfastheterna för de tre kuberna uppgick till 44,9, 47,4 och 46,0 MPa. Detta ger ett medelvärde på 46,1 MPa.

Tryckhållfastheten för kuberna f_{cub} , beräknas enligt formel 6.6. där F_u är det uppmätta värdet av brottsbelastningen i newton, och A är kubens tvärsnittsarea i mm^2 . Det erhållna medelvärdet från tryckprovet ger ett f_{cub} värde på 46,1 MPa. För detaljerade resultat, se tabell 8.1.

$$f_{cub} = \frac{F_u}{A} \quad (6.6)$$

Tabell 8.1 Tabell över kubtestresultat

Kubprov nummer	Härddningstid [dagar]	F_u [kN]	F_{um} [kN]	f_{cub} [MPa]	f_{cubm} [MPa]
1	28	1010,2	1037,2	44.9	46,1
2	28	1066,5		47.4	
3	28	1035		46	



Figur 7.13: Kontrollmätning, vägning och hydraulpress (Egna bilder, 2025)

Beställd renoveringsbetong var på inrådan från Göteborgs Hamn C35/45 vct 0,4 med exponeringsklasser XS3/XF3 och ska således ge ett f_{cub} resultat om minst 45 MPa. Erhållet resultat från tryckprovning var 46.1 MPa och uppfyllde således hållfasthetskravet.

8 Hamninspektioner

I följande stycke beskrivs hur inspektioner av hamnkonstruktioner genomförs och dokumenteras som en del av anläggningarnas långsiktiga förvaltning. Kapitlet behandlar bland annat regelverk, inspektionsmetodik och klassificeringssystem.

Inspektioner av hamnkonstruktioner är en central del i förvaltningen av en anläggnings livslängd och säkerhetsnivå. Inspektioner regleras bland annat av Trafikverkets riktlinjer och ISO-standarder, till exempel ISO 16311–2 och BaTMan:s (*Bridge and Tunnel Management*) handbok vilka ställer krav på metodik, kvalifikationer och dokumentation. Syftet med inspektioner är att identifiera skador och nedbrytning samt att bedöma deras inverkan på konstruktionens funktion och säkerhet (Trafikverket, 2020).

BaTMan är ett hjälpmedel för förvaltare av broar och liknande konstruktioner. Hjälpmedlet är ett bra verktyg för beställare att få god översikt på konstruktioner. I BaTMan finns tillgång till rapporter, information samt hjälpmedel för att organisera och utföra aktiviteter beroende på tidplanen. I BaTMan lagras informationen för uppföljning och inför nästkommande inspektioner, programmet innehåller väsentlig information och riktlinjer, till exempel gränsvärden, mått och tillståndsklasser för att underlätta dokumentation (Göteborgs Stad, 2025).

Huvudinspektioner genomförs generellt var sjätte år, medan ett byggnadsverk är i drift och utförs av kvalificerad personal, i marina miljöer krävs ofta olika discipliner som till exempel både dykare och konstruktörer för att bedöma konstruktionen. Klassificeringen av skadornas påverkan på konstruktionen sker enligt nivåerna 0 till 4, där nivå noll motsvarar bra prestanda och nivå fyra innebär potentiell farlig och osäker konstruktion. Dessa inspektioner kompletteras med särskilda tillståndsbedömningar när det finns indikation på skada eller försämring (Trafikverket, 2020).

För att avgöra vilka åtgärder som krävs tillämpas en tillståndsbedömning där skadorna delas in i nivåerna TK0-TK3 beroende på hur allvarlig skadan eller nedbrytningen är, samt hur akut behovet är. TK0 innebär att underhåll av konstruktionen eller konstruktionsdelen kan invänta bedömning från nästa huvudinspektion. TK3 kräver åtgärd inom tre månader. Bedömningsprocessen följer ett strukturerat flödesschema där kravbild, preliminär tillståndsbedömning och detaljerade undersökningar vägs in inför beslut om eventuell åtgärd (Trafikverket, 2020).

Förkortning/Symbol	Definition
TK 0	Tillståndsklass 0. Bristfällig funktion bortom 10 år.
TK 1	Tillståndsklass 1. Bristfällig funktion inom 10 år.
TK 2	Tillståndsklass 2. Bristfällig funktion inom 3 år.
TK 3	Tillståndsklass 3. Bristfällig funktion vid inspektionstillfället.

Figur 8 - Trafikverket, klassificering av tillståndsbedömning (Trafikverket, 2020).

Bedömning av en konstruktion sker dessutom med hänsyn till nedbrytningsmodeller. Dessa modeller tar hänsyn till belastning, miljöpåverkan och konstruktionens förväntade livslängd för att identifiera när i tiden ett ingripande krävs för att undvika att den funktionella prestandan understiger det lägsta accepterade värdet.

Tillståndsbedömning av tekniska anläggningar är en strukturerad process som inleds året innan det aktuella inspektionsåret. I förberedelsefasen identifieras behov av reviderade dokument som lastplan och förtöjningsplan (mooring plan), och uppdragsbeskrivningar, samt preliminära inspektionsplaner tas fram. Efter beslut om ansvarig organisation fastställs en detaljerad inspektions- och provtagningsplan.

Under inspektionsåret genomförs fältinspektioner och laboratorieanalyser. Dessa genererar rapporter och analysresultat, vilka vid behov kompletteras för att nå tillräcklig kvalitet. Därefter sker en gemensam genomgång av resultaten som underlag för tillståndsbedömningen. Vid ett arbetsmöte fattas beslut om anläggningens status och eventuell revidering av lastplan, inklusive ny giltighetstid eller särskilda villkor. Bedömningen kan leda till godkännande av befintlig plan eller krav på uppdatering. Processen avslutas med en fastställd förvaltningsstrategi. Denna metodik säkerställer en långsiktig hållbar och kvalitetssäkrad förvaltning av anläggningarnas tekniska tillstånd.

9 Diskussion

Detta examensarbete har visat att det är tekniskt möjligt att integrera fiberoptiska sensorer i renoverade betongkonstruktioner genom ett repeterbart tillvägagångssätt. Arbetet har resulterat i ett färdigt metodförslag som kan användas vid framtida installationer inom ramen för Sens-IT projektet eller liknande forskning och underhållssammanhang inom infrastruktur.

En styrka i projektet är att samtliga praktiska moment har genomförts under realistiska förhållanden på befintliga betongelement från Göteborgs Hamn. Till skillnad från tidigare forskning inom Sens-IT, där nygjutna element använts, har detta arbete fokuserat på renoverade konstruktioner. Det möjliggör framtida långtidsövervakning av verkliga renoveringsobjekt och ger därmed underlag till ytterligare kunskap i det pågående forskningsprojektet.

Valet att förenkla viss indata i beräkningar som exempelvis antagandet om konstant bygelavstånd kan ha påverkat exaktheten i de teoretiska beräkningarna. Denna förenkling bedöms dock som rimlig eftersom skillnaden i armeringsmängd i ändzonerna inte förväntas ha någon betydelse i jigger för långtidsbelastning. Vidare beaktades inte gjutskarvens potentiella påverkan på böjkapaciteten, baserat på bedömningen att mängden tvärkraftsarmering i kombination med god förberedelse av gjutytan säkerställer tillräcklig vidhäftning.

Ett antal praktiska utmaningar uppstod under projektets gång. Installationen av fiberoptiken krävde noggrann hantering i form av tillåten böjradie av kabel, integration av skyddslåda i balken och genomföring av fiberoptikkabel in i skyddslåda. Detta visade sig vara genomförbart och antas vara nödvändigt för att undvika skador på kabeln och därmed säkerställa att data kan insamlas under hela långtidsstudien.

Gjutningen av pålarna samt provtryckning av kubprover utfördes enligt etablerade riktlinjer och tryckhållfasthetsprovning visade på att efterfrågad betongkvalitet levererats. Den höga betongkvaliteten (C35/45, vct 0.40) i kombination med väl genomförd gjutning bedöms ha skapat goda förutsättningar för både hållfasthet och sensorfunktion.

Arbetet har också visat att en enkel metod för fiberoptikinstallation kan kombineras med traditionell betongrenovering vilket i förlängningen kan möjliggöra ett mer digitaliserat och tillståndsbaserat underhåll av hamnkonstruktioner. Fiberoptiken ger möjlighet till kontinuerlig datainsamling, vilket kan komplettera visuell inspektion och bidra till tidigare upptäckt av skador.

En begränsning i detta arbete är att inga faktiska mätdata från de renoverade pålarna ännu analyserats eftersom långtidsbelastning och sensorkalibrering sker efter examensarbetets slutförande. Detta lämnar utrymme för fortsatt forskning och utvärdering av töjningsdata i förhållande till teoretiskt beräknade värden.

10 Slutsats

Detta examensarbete har resulterat i ett tekniskt genomförbart och praktiskt beprövat metodförslag för installation av fiberoptiska sensorer i renoverade betongkonstruktioner. Arbetet har visat att det är möjligt att kombinera traditionella renoveringsmetoder som vattenbilning och pågjutning, med modern mätteknik i form av Distributed Optical Fibre Sensors (DOFS).

Den framtagna metoden har framgångsrikt implementerats på fyra påddelar från Göteborgs Hamn vilket möjliggör framtida långtidsövervakning av verkliga, renoverade marina konstruktioner. Detta är något som inte tidigare funnits inom Sens-IT projektet och utgör ett viktigt kunskapsbidrag. Framtida mätdata kan användas för att analysera sprickbildning och deformation över tid samt utvärdera renoveringens långsiktiga prestanda.

Arbetet har också identifierat praktiska aspekter som är avgörande för ett lyckat resultat, bland annat noggrann planering av formbyggnation, korrekt hantering av fiberoptik samt behovet av att skydda sensorkomponenter mot yttre påverkan. Genom att dokumentera dessa moment kan framtida projekt dra nytta av den kunskap och erfarenhet som genererats.

Sammantaget visar studien att fiberoptisk mätteknik har potential att förbättra tillståndsbaserat underhåll av betongkonstruktioner i utsatta miljöer. Metoden möjliggör tidigare detektion av skador, förbättrad säkerhet och minskade livscykelkostnader vilket ligger i linje med målsättningarna för Göteborgs Hamns digitaliseringsarbete.

11 Referenser

(Fernandez m.fl., 2022)

Fernandez, I., Berrocal, C. G., Almfeldt, S., & Rempling, R. (2022): Monitoring of new and existing stainless-steel reinforced concrete structures by clad distributed optical fibre sensing. *Structural Health Monitoring*, 147592172210811.

https://research.chalmers.se/publication/530319/file/530319_Fulltext.pdf

(Bao & Chen, 2012)

Bao, X., & Chen, L. (2012). Recent Progress in Distributed Fiber Optic sensors.

<https://doi.org/10.3390/s120708601>

(Barrias m.fl., 2016)

Barrias, A., Casas, J.R., & Villalba, S. (2016). A review of distributed optical fibre sensors for civil engineering applications. *Sensors*, 16.(5), 748.

<https://www.mdpi.com/1424-8220/16/5/748>

Micropol. (n.d.). *Vad ä ren fiberoptisk kabel?*

<https://micropol.com/sv/teknologi/vad-ar-en-fiberoptisk-kabel/>

(Wijaya m.fl., 2021)

Wijaya, H., Rajeev, P., & Gad, E. (2021). Distributed optical fibre sensor for infrastructure monitoring: Field applications. *Optical Fiber Technology*, 64, 102577.

<https://doi.org/10.1016/j.yofte.2021.102577>

(What Is Fiber Optic Sensing? | VIAVI Solutions Inc., 2017)

What is Fiber Optic Sensing? | VIAVI Solutions Inc. (2017). VIAVI Solutions Inc.

<https://www.viavisolutions.com/en-us/resources/learning-center/what-fiber-optic-sensing>

(Ferdinand. 2014)

Ferdinand, P. (2014). *The Evolution of Optical Fiber Sensors Technologies During the 35 Last Years and Their Applications in Structure Health Monitoring* (pp. 914–929).

<https://inria.hal.science/hal-01021251/PDF/0075.pdf>

(Zhang m.fl., 2025)

Zhang, X., Long, L., Broere, W., & Bao, X. (2025). Smart sensing of concrete crack using distributed fiber optics sensors: Current advances and perspectives. *Case Studies in Construction Materials*, 22, e04493.

<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04493>

(Johansson m.fl., 1997)

Johansson, S., Lagerblad, B., & Åhs, M. (Red). (1997). *Betonghandbok – Material. Del II: Hårdnad betong, fysikaliska egenskaper och beständighet* (2. Uppl.). AB Svensk Byggtjänst.

(Thomas Betong, 2024)

Thomas Betong. (2024). *Välj rätt betong*. <https://www.thomasbetong.se>

(Johansson m.fl., 2017)

Johansson, S., Lagerblad, B., & Åhs, M. (Red). (2017). *Betonghandbok – Material. Del I: Ny betong, bindemedel, ballast och tillsatsmedel* (3. Uppl.). AB Svensk Byggtjänst.

(RISE, 2023)

RISE Research institute of Sweden. (2023). *Så kan betong bli en koldioxidsänka*.

<https://www.ri.se/sv/sa-kan-betong-bli-en-koldioxidsanka>

(Fagerlund, 1992)

Fagerlund, G. (1997). *Betongkonstruktioners beständighet*. (Rapport TVBM-3051). Lunds tekniska högskola, Avdelningen för Byggnadsmaterial.

<https://lucris.lub.lu.se/ws/portalfiles/portal/5491335/4174176.pdf>

(Lenstadius)

Lenstadius. *Varför spricker betong?*

<https://lenstadius.se/varfor-spricker-betong/>

(Burström 2021)

Burström, P. (2021). *Byggnadsmaterial* (4. Uppl.) Studentlitteratur.

(Rockström, 2006)

Rockström, J. (2006). *Betongens permeabilitet – Litteraturstudie av provningsmetoder* (Examensarbete, Högskolan i Borås). <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:961712/FULLTEXT01.pdf>

(Svenskt Vatten Utveckling, 2019)

Svenskt vatten utveckling(2019). *Reparationsmetoder för betongkonstruktioner i vattenverk* (SVU-rapport 2019-16). Svenskt vatten. <svu-rapport-2019-16.pdf>

(Pham & Olsson, 2013)

Pham, K., & Olsson, J. (2013). *Bestämning av skjuvhållfasthet med vridprovning för pågjutna betongkonstruktioner* [Examensarbete, Kungliga Tekniska högskolan].

DiVA. <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-136826>

(Eriksson, 2017)

Eriksson, A. (2017). *Jämförelse av tre metoder vid reparation av betongdammar* [Kandidatexamensarbete, Mittuniversitetet]. DiVA.

<https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:miun:diva-31010>

(Al-Emrani m.fl., 2013).

Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., & Johansson, P. (2013). *Bärande konstruktioner: Del 1* (Rapport 2013:1). Chalmers tekniska högskola, institutionen för bygg- och miljöteknik, Avdelningen för konstruktionsteknik.

(Sawirs. 2014)

Sawirs, E. (2014): *Långtidsdeformation av håldäcksplattor*. Masters Thesis. Department of Construction Sciences, Lund University, Lund, Sweden, 2014.

(Al-Emrani m.fl., 2011).

Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., & Johansson, P. (2011). *Bärande konstruktioner: Del 2* (Rapport 2011:1). Chalmers tekniska högskola, institutionen för bygg- och miljöteknik, Avdelningen för konstruktionsteknik.

Svenska institutet för standarder (2019). *Provning av hårdnad betong – Del 2: Tillverkning och härdning av provkroppar för hållfasthetsbestämning (SS-EN 123:90)* Svenska institutet för standarder

Granroth, H. (05 2025). Tillståndsbedömning. Göteborg: Göteborgs Hamn.

Göteborgs Stad. (den 23 04 2025). *Göteborgs Stad*. Hämtat från 1HC BaTMan: <https://tekniskhandbok.goteborg.se/1-om-th/1h-systemstod/1hc-batman/>

12 Bilagor

Bilaga 1

Slutligt kryptal $\varphi(\infty, t_0)$ kan enligt EC 2 uppskattas som

$$\varphi(\infty, t_0) = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) \quad (\text{B2-23})$$

där φ_{RH} = faktor som beaktar omgivningens relativa fuktighet RH

$\beta(f_{cm})$ = faktor beaktar betongens hållfasthetsklass

$\beta(t_0)$ = faktor som beaktar betongens ålder vid pålastning

Faktorn φ_{RH} som beaktar inverkan av relative fuktighet bestäms som

$$\varphi_{RH} = 1 + \frac{1 - RH/100}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \quad \text{for } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa} \quad (\text{B2-24})$$

$$\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1 - RH/100}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \cdot \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,7} \right] \cdot \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{-0,2} \quad \text{for } f_{cm} > 35 \text{ MPa}$$

där RH = omgivningens relativa fuktighet [%]

h_0 = tvärsnittets nominella tjocklek [mm], enligt (B2-19)

f_{cm} = betongens medeltryckhållfasthet [MPa] vid 28 dygns ålder

$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ MPa}$

Faktorn $\beta(f_{cm})$ som beaktar betongens hållfasthetsklass framgår av tabell B2.9.

Tabell B2.9 Faktorn $\beta(f_{cm})$ som beaktar betongens hållfasthetsklass.

f_{ck} [MPa]	12	16	20	25	30	35	40
$\beta(f_{cm})$	3,76	3,43	3,18	2,93	2,73	2,56	2,43
f_{ck} [MPa]	45	50	55	60	70	80	90
$\beta(f_{cm})$	2,31	2,21	2,12	2,04	1,90	1,79	1,70

Faktorn $\beta(t_0)$ som beaktar betongens ålder vid pålastning visas i fig B2.20 med logaritmisk skala på tidsaxeln. Om konstruktionsdelen påverkas av flera laster som påförs vid olika tider väljs tidpunkten för första pålastningen.

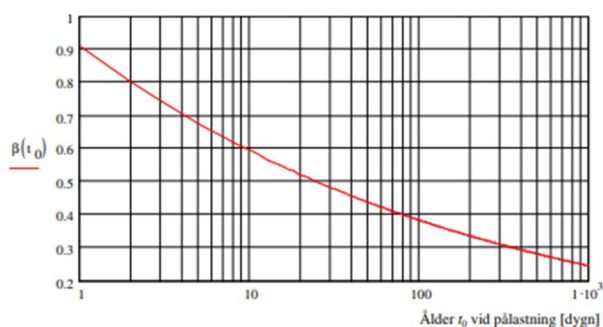


Fig B2.20 Faktor $\beta(t_0)$ som beaktar betongens ålder vid pålastning, logaritmisk skala på tidsaxeln.

För krypsningens utveckling med tiden och bestämning av kryptal vid godtycklig tidpunkt t hänvisas till EC 2 eller Engström [B2-6].

(Al-Emrani m.fl., 2013).

Bilaga 2

Enligt EC 2 kan slutligt krympmått beräknas som

$$\varepsilon_{cs}(\infty) = \varepsilon_{cd}(\infty) + \varepsilon_{ca}(\infty) \quad (\text{B2-17})$$

där $\varepsilon_{cs}(\infty)$ = slutligt krympmått
 $\varepsilon_{cd}(\infty)$ = slutligt värde på uttorkningskrympning
 $\varepsilon_{ca}(\infty)$ = slutligt värde på autogen krympning

Slutligt värde på uttorkningskrympningen kan bestämmas som

$$\varepsilon_{cd}(\infty) = k_h \cdot \beta_{RH} \cdot \varepsilon_{di} \quad (\text{B2-18})$$

där k_h = koefficient som beror på tvärsnittets storlek
 β_{RH} = faktor som beaktar omgivningens relativa fuktighet
 ε_{di} = grundvärde för uttorkningskrympning

Grundvärdet för uttorkningskrympning beror på cementtyp och betongens hållfasthetsklass och anges i tabell B2.5. För klassificering av vanliga cementtyper i Sverige hänvisas till tabell B2.10, avsnitt B2.1.7.

Tabell B2.5 Grundvärde ε_{di} [10^{-3}] för uttorkningskrympning beroende på betongens hållfasthetsklass och cementtyp, klass S, klass N och klass R.

f_{ck} [MPa]	12	16	20	25	30	35	40
Klass S	0,360	0,342	0,325	0,304	0,285	0,267	0,250
Klass N	0,441	0,421	0,401	0,378	0,356	0,335	0,315
Klass R	0,600	0,574	0,550	0,520	0,492	0,466	0,441

f_{ck} [MPa]	45	50	55	60	70	80	90
Klass S	0,235	0,220	0,206	0,193	0,170	0,149	0,131
Klass N	0,297	0,280	0,263	0,248	0,220	0,195	0,173
Klass R	0,418	0,395	0,374	0,354	0,317	0,284	0,255

Faktorn β_{RH} som tar hänsyn till omgivningens relativa fuktighet RH [%] visas i tabell B2.6 för de vanliga förhållandena "inomhus", "utomhus" och "mycket fuktig miljö".

Tabell B2.6 Faktorn β_{RH} som tar hänsyn till omgivningens relativa fuktighet RH för de vanliga förhållandena "inomhus", "utomhus" och "mycket fuktig miljö".

Miljö	Inomhusmiljö (uppvärmd) RH = 50 %	Utomhusmiljö RH = 80 %	Mycket fuktig miljö RH = 95 %
β_{RH}	1,36	0,756	0,221

Faktorn k_h som tar hänsyn till tvärsnittets storlek kan bestämmas med hjälp av tabell B2.7 som en funktion av tvärsnittets nominella tjocklek h_0 .

Tabell B2.7 Faktorn k_h som tar hänsyn till tvärsnittets storlek

h_0 [mm]	k_h
100	1,0
200	0,85
300	0,75
≥ 500	0,70

Tvärsnittets nominella tjocklek är tjockleken av en ekvivalent vägg som utsätts för uttorkning på båda sidor. Ekvivalent tjocklek bestäms enligt

$$h_0 = \frac{2 \cdot A_c}{u} \quad (\text{B2-19})$$

där A_c = tvärsnittsarea (bruttotvärsnitt)
 u = omkrets av den del av tvärsnittet som utsätts för uttorkning

Exempelvis gäller för en vägg som endast kan torka ut åt ett håll att den nominella tjockleken är lika med halva vägg tjockleken.

Enligt EC 2 är slutligt värde på den autogena krympningen linjärt beroende av betongens hållfasthetsklass. Slutliga värden på den autogena krympningen visas i tabell B2.8 för olika hållfasthetsklasser.

Tabell B2.8 Slutligt värde på autogen krympning $\varepsilon_{ca}(\infty)$ [10^{-3}] för betong av olika hållfasthetsklasser

f_{ck} [MPa]	12	16	20	25	30	35	40
$\varepsilon_{ca}(\infty)$	0,005	0,015	0,025	0,0375	0,050	0,0625	0,075

f_{ck} [MPa]	45	50	55	60	70	80	90
$\varepsilon_{ca}(\infty)$	0,0875	0,10	0,1125	0,125	0,15	0,175	0,20

(Al-Emrani m.fl., 2013).

Bilaga 3

Geometri

$$\begin{aligned}l &:= 3 \text{ m} \\c &:= 45 \text{ mm} \\h &:= 400 \text{ mm} \\b &:= 400 \text{ mm} \\\phi_{\text{bygget}} &:= 5 \text{ mm} \\\phi &:= 25 \text{ mm}\end{aligned}$$

Avstånd till de olika armeringslager från överkant

$$\begin{aligned}d'_1 &:= c + \phi_{\text{bygget}} + \frac{\phi}{2} & d'_1 &= 0.063 \text{ m} \\d'_2 &:= c + \phi_{\text{bygget}} + \phi_{\text{bygget}} + \frac{\phi}{2} \\d'_3 &:= d'_1 + \left(\frac{200 \text{ mm} - d'_1}{2}\right) & d'_3 &= 0.131 \text{ m} \\d_4 &:= 200 \text{ mm} & d_4 &= 0.2 \text{ m} \\d_5 &:= 400 \text{ mm} - d'_3 & d_5 &= 0.269 \text{ m} \\d_6 &:= 400 \text{ mm} - d'_2 & d_6 &= 0.333 \text{ m} \\d_7 &:= 400 \text{ mm} - d'_1 & d_7 &= 0.338 \text{ m}\end{aligned}$$

Area armeringslager

$$\begin{aligned}A_{si} &:= \pi \cdot \frac{\phi^2}{4} \\A_{s1} &:= 2 \cdot A_{si} \\A_{s2} &:= 1 \cdot A_{si} \\A_{s3} &:= 2 \cdot A_{si} \\A_{s4_tryck} &:= 1 \cdot A_{si} \\A_{s4_drag} &:= 1 \cdot A_{si} \text{ (mitt)} \\A_{s5} &:= 2 \cdot A_{si} \\A_{s6} &:= 1 \cdot A_{si} \\A_{s7} &:= 2 \cdot A_{si} \\A_{stot} &:= A_{s1} + A_{s2} + A_{s3} + A_{s4_tryck} + A_{s4_drag} + A_{s5} + A_{s6} + A_{s7}\end{aligned}$$

$$f_{yd} := 434.8 \text{ MPa}$$

$$z := \frac{h}{2}$$

$$\begin{aligned}A'_{stot} &:= A_{s1} + A_{s2} + A_{s3} + A_{s4_tryck} & A'_{stot} &= 0.003 \text{ m}^2 \\A_{stot} &:= A_{s4_drag} + A_{s5} + A_{s6} + A_{s7} & A_{stot} &= 0.003 \text{ m}^2\end{aligned}$$

Kontroll av sprickmoment

$$k := 1.6 - \frac{h}{1000 \text{ mm}}$$

$$f_{ctm,fl} := k \cdot f_{ctm}$$

$$f_{ctm,fl} = 4.56 \text{ MPa}$$

$$I_f := \frac{b \cdot h^3}{12}$$

$$x_{tp} := \frac{h}{2}$$

$$M_{cr} := \frac{f_{ctm,fl} \cdot I_f}{h - x_{tp}}$$

$$M_{cr} = 48.64 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$P_{mcr} := \frac{M_{cr}}{0.9 \text{ m}}$$

$$P_{mcr} = 54.044 \text{ kN}$$

Räkna ut area och yttröghetsmoment i stadium 2

$$x := 0.170 \text{ m}$$

$$x := \text{root} \left(\frac{2 \cdot (\alpha \cdot A_{s4, drag} \cdot (d_4 - x) + \alpha \cdot A_{s5} \cdot (d_5 - x) + \alpha \cdot A_{s6} \cdot (d_6 - x) \cdot \downarrow + \alpha \cdot A_{s7} \cdot (d_7 - x) - ((\alpha - 1) \cdot A_{s1} \cdot (x - d'_1) + (\alpha - 1) \cdot A_{s2} \cdot (x - d'_2) \cdot \downarrow + (\alpha - 1) \cdot A_{s3} \cdot (x - d'_3) \cdot \downarrow + (\alpha - 1) \cdot A_{s4, tryck} \cdot (x - d_4))}{b}, x \right)$$

$$x = 0.209 \text{ m}$$

$$x := \frac{h}{2}$$

$$A_{II} := b \cdot x + (\alpha - 1) \cdot A_{s1} + (\alpha - 1) \cdot A_{s2} + (\alpha - 1) \cdot A_{s3} \cdot \downarrow + (\alpha - 1) \cdot A_{s4, tryck} + \alpha \cdot A_{s4, drag} + \alpha \cdot A_{s5} + \alpha \cdot A_{s6} + \alpha \cdot A_{s7}$$

$$A_{II} = 0.11 \text{ m}^2$$

$$I_{II} := \frac{b \cdot x^3}{3} + (\alpha - 1) \cdot A_{s1} \cdot (x - d'_1)^2 + (\alpha - 1) \cdot A_{s2} \cdot (x - d'_2)^2 + (\alpha - 1) \cdot A_{s3} \cdot (x - d'_3)^2 \cdot \downarrow + (\alpha - 1) \cdot A_{s4, tryck} \cdot (x - d_4)^2 + \alpha \cdot A_{s4, drag} \cdot (d_4 - x)^2 + \alpha \cdot A_{s5} \cdot (d_5 - x)^2 \cdot \downarrow + \alpha \cdot A_{s6} \cdot (d_6 - x)^2 + \alpha \cdot A_{s7} \cdot (d_7 - x)^2$$

$$I_{II} = 0.001 \text{ m}^4$$

Räkna ut MRd/betongspänning/Stålspänning

z = -x (Betong tryckspänning överkant)

$$z := -x \quad z = -0.2 \text{ m}$$

$$\sigma_{cc} = \frac{M_{Rd}}{I_{II}} \cdot z$$

$$\sigma_{cc} := f_{ck} \quad \sigma_{cc} = 45 \text{ MPa}$$

$$M_{Rd} := \left| \frac{\sigma_{cc} \cdot I_{II}}{z} \right| \quad M_{Rd} = 318.189 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rd} = 318.189 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \text{Antas att detta är dimensionerande moment. Kontroll följer nedanför.}$$

z = -x + d'1 (Första armeringslager)

$$z := -x + d'_1 \quad z = -0.138 \text{ m}$$

$$\sigma_{c1} := \left| \frac{M_{Rd}}{I_{II}} \cdot z \right| \quad \sigma_{c1} = 30.938 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{s1} := \alpha \cdot \sigma_{c1} \quad \sigma_{s1} = 171.875 \text{ MPa}$$

Kontroll:

$$0.8 \cdot f_{yk} = 400 \text{ MPa}$$

$$0.8 \cdot f_{yk} > \sigma_{s1} = 1 \quad \text{ok!}$$

z = -x + d'2 (Andra armeringslager)

$$z := -x + d'_2 \quad z = -0.133 \text{ m}$$

$$\sigma_{c2} := \left| \frac{M_{Rd}}{I_{II}} \cdot z \right| \quad \sigma_{c2} = 29.813 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{s2} := \alpha \cdot \sigma_{c2} \quad \sigma_{s2} = 165.625 \text{ MPa}$$

Kontroll:

$$0.8 \cdot f_{yk} = 400 \text{ MPa}$$

$$0.8 \cdot f_{yk} > \sigma_{s2} = 1 \quad \text{ok!}$$

$z = -x + d_4$ (Fjärde armeringslager)

$$z := -x + d_4$$

$$z = 0 \text{ m}$$

$$\sigma_{c4} := \frac{M_{Rd}}{I_{II}} \cdot z$$

$$\sigma_{c4} = 0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{s4} := \alpha \cdot \sigma_{c4}$$

$$\sigma_{s4} = 0 \text{ MPa}$$

Kontroll:

$$0.8 \cdot f_{yk} = 400 \text{ MPa}$$

$$0.8 \cdot f_{yk} > \sigma_{s4} = 1$$

ok!

$z = d_5 - x$ (Femte armeringslager)

$$z := d_5 - x$$

$$z = 0.069 \text{ m}$$

$$\sigma_{c5} := \frac{M_{Rd}}{I_{II}} \cdot z$$

$$\sigma_{c5} = 15.469 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{s5} := \alpha \cdot \sigma_{c5}$$

$$\sigma_{s5} = 85.938 \text{ MPa}$$

Kontroll:

$$0.8 \cdot f_{yk} = 400 \text{ MPa}$$

$$0.8 \cdot f_{yk} > \sigma_{s5} = 1$$

ok!

$z = d_6 - x$ (Sjätte armeringslager)

$$z := d_6 - x$$

$$z = 0.133 \text{ m}$$

$$\sigma_{c6} := \frac{M_{Rd}}{I_{II}} \cdot z$$

$$\sigma_{c6} = 29.813 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{s6} := \alpha \cdot \sigma_{c6}$$

$$\sigma_{s6} = 165.625 \text{ MPa}$$

Kontroll:

$$0.8 \cdot f_{yk} = 400 \text{ MPa}$$

$$0.8 \cdot f_{yk} > \sigma_{s6} = 1$$

ok!

$z = d_7 - x$ (Sjunde armeringslager)

$$z := d_7 - x$$

$$z = 0.138 \text{ m}$$

$$\sigma_{c7} := \frac{M_{Ed}}{I_{II}} \cdot z$$

$$\sigma_{c7} = 30.938 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{s7} := \alpha \cdot \sigma_{c7}$$

$$\sigma_{s7} = 171.875 \text{ MPa}$$

Kontroll:

$$0.8 \cdot f_{yk} = 400 \text{ MPa}$$

$$0.8 \cdot f_{yk} > \sigma_{s7} = 1$$

ok!

Resultat: Dimensionerade blir tryckhållfastheten i överkant betong, detta resulterar i en momentkapacitet på 318.2 kNm. Punktlast går att dimensionera vid bestämd uplagsvillkor

Sprickbreddkontroll i Stadium II

$$A_c := \frac{h}{2} \cdot b$$

$$W_k = S_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$$

$$\sigma_s := \sigma_{s7}$$

Använder detta på grund av högsta stålspanning

$$k_l := 0.6$$

Korttidslast, EC2

$$\rho_p := \frac{A_{sTot}}{A_c}$$

$$\Delta\varepsilon := \frac{\sigma_s - k_l \cdot \frac{f_{ctm}}{\rho_p} \cdot (1 + \alpha \cdot \rho_p)}{E_s}$$

$$\Delta\varepsilon = 4.864 \cdot 10^{-4} > 0.6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} = 5.156 \cdot 10^{-4} \quad \text{ok!}$$

Maximal sprickavstånd

$$s_{rmax} = k_3 \cdot c + \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \phi}{\rho_p}$$

$$k_3 := 3.4$$

Rekommendation, EC2

$$k_1 := 0.8$$

Kamstänger, EC2

$$k_2 := 0.5$$

Ren drag, EC2

$$k_4 := 0.425$$

Rekommendation, EC2

$$\phi := 0.025 \text{ m} \text{ Armeringsdiameter}$$

$$s_{rmax} := k_3 \cdot c + \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \phi}{\rho_p}$$

$$s_{rmax} = 268.44 \text{ mm}$$

Maximal sprickavstånd

Sprickbredd

$$w_k := s_{rmax} \cdot \Delta \varepsilon$$

$$w_k = 0.131 \text{ mm}$$

Maximal sprickbredd

Antar att armering flyter. Kontrollerar antagande

$$\lambda = 0.8$$

$$\varepsilon_{cu} = 3.5 \cdot 10^{-3}$$

$$\eta = 1.0$$

$$A'_{stot} := A_{si} \cdot 3$$

$$A_{stot} := A_{si} \cdot 9$$

find(x)

$$\eta \cdot f_{ck} \cdot b \cdot \lambda \cdot x + f_{yk} \cdot A'_{tot} = f_{yk} \cdot A_{stot} + E_s \cdot A_{si} \cdot 2 \cdot \varepsilon_{cu} \cdot \frac{(d'_3 - x)}{x}$$

$$x = 0.7 \text{ m}$$

$$x = \frac{f_{yk} \cdot (A_{stot}) - E_s \cdot A'_{stot} \cdot \varepsilon_{cu} \cdot (x - d'_1)}{\eta \cdot f_{ck} \cdot b \cdot \lambda} \quad x = 0.088 \text{ m}$$

Kontroll antagande: Armering flyter om Epsilonstål > Epsilonnyd

$$\varepsilon_{nyd} = 0.002$$

$$\varepsilon_{s1} := \frac{x - d'_1}{x} \cdot \varepsilon_{cu}$$

$$\varepsilon_{s1} = 0.001$$

$$|\varepsilon_{s1}| > \varepsilon_{nyd} = 0$$

$$\varepsilon_{s2} := \frac{x - d'_2}{x} \cdot \varepsilon_{cu}$$

$$\varepsilon_{s2} = 8.215 \cdot 10^{-4}$$

$$|\varepsilon_{s2}| > \varepsilon_{nyd} = 0$$

$$\varepsilon_{s3} := \frac{d_4 - x}{x} \cdot \varepsilon_{cu}$$

$$\varepsilon_{s3} = 0.004$$

$$|\varepsilon_{s3}| > \varepsilon_{nyd} = 1$$

$$\varepsilon_{s4} := \frac{d_4 - x}{x} \cdot \varepsilon_{cu}$$

$$\varepsilon_{s4} = 0.004$$

$$|\varepsilon_{s4}| > \varepsilon_{nyd} = 1$$

$$\varepsilon_{s5} := \frac{d_5 - x}{x} \cdot \varepsilon_{cu}$$

$$\varepsilon_{s5} = 0.007$$

$$|\varepsilon_{s5}| > \varepsilon_{nyd} = 1$$

$$\varepsilon_{s6} := \frac{d_6 - x}{x} \cdot \varepsilon_{cu}$$

$$\varepsilon_{s6} = 0.01$$

$$|\varepsilon_{s6}| > \varepsilon_{nyd} = 1$$

$$\varepsilon_{s7} := \frac{d_7 - x}{x} \cdot \varepsilon_{cu}$$

$$\varepsilon_{s7} = 0.01$$

$$|\varepsilon_{s7}| > \varepsilon_{nyd} = 1$$

Armering flyter ner till andra lagret

Tvärkraftsbrott kontroll:

$$M_{Rd} = 318.189 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$P := \frac{M_{Rd}}{0.9 \text{ m}} \quad \text{Förutsatt 0.9m hävarm från upplag}$$

Kontroll av livtrycksbrott:

$$\nu_1 := 0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250 \text{ MPa}} \right) \quad \nu_1 = 0.492$$

$$P < 0.5 \cdot \nu_1 \cdot f_{ctd} \cdot b \cdot d_G = 1 \quad \text{OK!}$$

Val av trycksträvans lutning:

$$\theta := 35^\circ \quad \cot(\theta) = 1.428 \quad \text{Valt på grund av bro 2004}$$

Krossning i sned trycksträva:

$$\chi_{cw} := 1 \quad V_{Rdmax} := \chi_{cw} \cdot b \cdot z \cdot \nu_1 \cdot f_{ck} \cdot \frac{1}{\cot(\theta) + \tan(\theta)} \quad V_{Rdmax} = 572.132 \text{ kN}$$

$$V_{Rdmax} > P = 1 \quad \text{OK!}$$

Dimensionering av tvärkraftsarmering:

$$A_{sv} := \frac{\pi \cdot 0.005 \text{ m}^2}{4} \quad \text{Bygelarea}$$

$$f_{ywd} := f_{ytd}$$

$$z := 0.9 \cdot d_G$$

$$s := 0.2 \text{ m}$$

$$V_{Rd} := \frac{z \cdot \cot(\theta)}{s} \cdot f_{ywd} \cdot A_{sv} \quad V_{Rd} = (3.649 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

Arbetsberedning

Projektnummer:	Projektnamn: Sensorbaserad verifiering av Renoverade betongkonstruktioner	Upprättad av: Patrik Glans Arvid Myrseth	Senast ändrad: 2025-03-19
Handledare Göteborgs Hamn: Henrik Granroth	Handledare Chalmers: Rasmus Rempling	Beställare: Chalmers/NCC/Göteborgs Hamn	Signatur:

Aktivitet/Arbetsmoment:

Föregående aktiviteter:

Tidplan: Januari 2025-juni 2025

Ansvarig/Organisation

Arbetsuppgift

Arbetsbeskrivning och aktuella handlingar

Upptagning av betong pålar, samt transport för kapning och översikt, utfördes av Göteborgs Hamn. Datum 2025 vecka 7-8
Översiktlig genomgång och täcksiktmmätning av pålarna utfördes av Ruben Bång Brunström, Patrik Glans, Arvid Myrseth och Alexandre Mathern på NCC, Datum 2025 Vecka 8
Kapning av pålarna utfördes av NCC vecka 8
Markering av plats för betongprovtagning NCC vecka 8
Transport och vattenbilning utförda av Göteborgs Hamn
Vattenbilning utfördes mellan vecka 11-13 och transport till Chalmers vecka 14
Förberedelser, kapschema och ritningsunderlag gjordes under vecka 14-vecka 15
Bygga form för pågjutning av renoveringsbetong. Bygga förlängning av påle för ingjutning av fiberoptiklåda. Inklusivt armering för denna förlängning. Montera fiberoptik på befintlig armering med hjälp av buntband. Detta sker under vecka 15.
Gjutning sker med hjälp av betongbil, kompaktera betong med hjälp av handhållna vibb. Plasta in betong efter för att undvika torksprickor. Tillverkning av kubformar i betong, detta för att utföra framtida tryckhållfasthetsprov i ACELab. Detta sker under vecka 17.

Avformning av pålar samt kubformar. Kubformar läggs i vattenbad i ACELab. Detta för att kubformarna skall ligga i 95% Relativ fuktighet.
Städa vid arbetsplats och slänga formmaterial.
Detta sker under v18.

Provtryckning av kubformar i ACELab. För att kolla skillnad gentemot betongrecept.
Detta sker under vecka 21.

Resurser

Material (Ingående material, intransport, upplag):

Typ	Antal	Intransport/Upplag	Ansvarig
Lastbil, kran	1		HG
kran	0		HG
Täckskiktsmätare, mätverktyg och markeringsverktyg	2 1 2		HG NCC
kappsåg	1		NCC
Lastbil, kran	1		HG
Maskin vattenbilning	1		HG
lastbil	1		HG
Formplywood	Flera		AM, PG, ACElab
Skruv	Flera		AM, PG, ACElab
Betong	1m ³		AM, PG, ACElab

Utrustning (verktyg, maskiner och lyftredskap):

Typ/Antal	Ansvarig	Typ/Antal	Ansvarig
Batteriverktyg.		3	ACELab
Högtryckstvätt		1	ACELab
Handverktyg		Flera	ACELab

Leveranser:

Inköpspost	Leveransdatum	Ansvarig
Transporter		HG
Verktyg för formbyggnation och betong.		ACElab
Arbetskläder		RR

Personal / Samordning UE:

Personalresurser	Behörighets-, utbildnings-, kompetenskrav

Risker & Möjligheter

Arbetsmiljö se bl.a. Riskbedömning arbetsmiljö	Åtgärd	Ansvarig
Upptagning av pålar och kapning av pålar, samt vattenbilning.	Utförds av kompetenta arbetare med rätt utbildning och med säkerhetsåtgärder.	HG
Hantering av pålar med gaffeltruck på betonggården.	Truckkort och hjälp av ansvarig på ACELab	ACElab
Att arbeta i ACELab	Genomgått utbildning och test på canvas för access till labbet och säkerhetsutrustning, som arbetskläder och arbetsskor	ACElab
Betongspill vid gjutning på betonggården.	Plastar asfalt för att undvika spill. Använder arbetskläder.	ACELab PG. AM
Kvalitetsrisker/Kritiska moment		
Formbyggnation	Utförs på ett yrkesmannamässigt sätt.	PG,AM
Gjutning	Utförs på ett yrkesmannamässigt sätt.	PG,AM
Miljöanalys		
Risk och möjlighetsanalys		

Kontroller

Kontroll	Ansvarig	Kontroll	Ansvarig

Övrigt:

--

--

Har tagit del av informationen:

Datum	Namn	Sign	Datum	Namn	Sign



CHALMERS