



**CHALMERS**



# Utvärdering av korroderade betongpålar i hamnkonstruktioner

Examensarbete inom högskoleingenjörprogrammet  
Samhällsbyggnadsteknik

Ruben Bång Brunström  
Gustav Ekdahl

**INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK  
AVDELNINGEN FÖR KONSTRUKTIONSTEKNIK**

---

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige 2025  
[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)



EXAMENSARBETE ACEX20

# Utvärdering av korroderade betongpålar i hamnkonstruktioner

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet  
Samhällsbyggnadsteknik*

Ruben Bång Brunström

Gustav Ekdahl



Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för konstruktion

Examinator: Rasmus Rempling

Handledare: Rasmus Rempling

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2025

Utvärdering av korroderade betongpålar i hamnkonstruktioner

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet*

*Samhällsbyggnadsteknik*

Ruben Bång Brunström

Gustav Ekdahl

© RUBEN BÅNG BRUNSTRÖM, GUSTAV EKDAHL, 2025

Examensarbete ACEX20

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Chalmers tekniska högskola 2025

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för konstruktion

Chalmers tekniska högskola

412 96 Göteborg

Telefon: 031-772 10 00

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Göteborg 2025



Utvärdering av korroderade betongpålar i hamnkonstruktioner

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet*

*Samhällsbyggnadsteknik*

RUBEN BÅNG BRUNSTRÖM

GUSTAV EKDAHL

Intuitionen för arkitektur och samhällsbyggnad

Avdelningen för konstruktion

Chalmers tekniska högskola

## **SAMMANFATTNING**

Denna rapport behandlar utvärdering av armeringskorrosion i armerade betongpålar i marin miljö, med syfte att analysera skadornas omfattning och fördelning efter långtidsexponering i aggressiv omgivning. Två armeringsjärn extraherades från en 50 till 60 år gammal påle i Göteborgs Hamn. Genom segmentering, sandblästring och 3D-skanning togs högupplösta punktmoln fram, vilka analyserades i MATLAB för att kvantifiera förlust i tvärsnittsarea och volym.

Studien visar att metoden med 3D-skanning kombinerat med numerisk analys är ett kraftfullt verktyg för att identifiera riskzoner och bedöma tillståndet i armerad betong. Resultaten tyder på att flera korrosionsmekanismer, bland annat kloridinducerad och anaerob korrosion, samverkar. Trots vissa metodologiska osäkerheter har arbetet potential att komplettera traditionella hamninspektioner, särskilt i kombination med fiberoptiska mätningar. Metoden lämpar sig väl som underlag för framtida tillståndsbedömningar, men vidare studier med fler prov och referensdata rekommenderas för ökad tillförlitlighet.

Nyckelord: armeringskorrosion, betongpåle, marin miljö, 3D-skanning, hamninspektion, fiberoptik

Evaluation of corroded concrete piles in port structures

*Degree Project in the Civil Engineering Programme*

*Civil and Environmental Engineering*

RUBEN BÅNG BRUNSTRÖM

GUSTAV EKDAHL

Department of Architecture and Civil Engineering

Division of Construction

Chalmers University of Technology

## **ABSTRACT**

This thesis investigates corrosion in reinforced concrete piles exposed to a marine environment for approximately 50 to 60 years. Two reinforced bars were extracted from a concrete pile in the Port of Gothenburg and analyzed using high-resolution 3D-scanning and MATLAB-based processing. The bars were segmented, cleaned and scanned to produce detailed point clouds, which enabled quantification of cross-sectional and volumetric loss due to corrosion. Average cross-sectional losses were calculated to 4,8% and 5,6% respectively, with local peaks exceeding 9%.

The method used, combining 3D-scanning with computer-based analysis, proved to be effective in identifying corrosion and critical zones. Several corrosion mechanisms, including chloride-induced, carbonation-induced and anaerobic corrosion, are believed to have contributed. While some methodological uncertainties remain, this approach shows promise as an additional tool for traditional inspection methods, particularly in connection with fiber optic sensors. Further studies with a larger sample size and controlled reference bars are recommended to enhance the method's accuracy and reliability.

Key words: reinforcement corrosion, concrete pile, marine exposure, 3D-scanning, port inspection, fiber optics

# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

SAMMANFATTNING	II
ABSTRACT	III
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	IV
FÖRORD	VI
1 INLEDNING/BAKGRUND	1
1.1 Syfte	1
1.2 Avgränsningar	1
1.3 Frågeställning	2
2 TEORI	3
2.1 Betong och armerad betong	3
2.2 Armeringskorrosion	3
2.2.1 Kloridinducerad korrosion	3
2.2.2 Karbonatiseringsinducerad korrosion	5
2.2.3 Kombination av klorid- och karbonatiseringsangrepp	5
2.2.4 Anaerob korrosion	6
2.2.5 Galvanisk korrosion	6
2.2.6 Sulfat	7
2.3 Typer av rost	8
2.4 Sprickors effekt i betong	8
2.5 Korrosionshastighet	9
2.6 Exponeringsmiljö	9
2.7 Teoretiska beräkningsmodeller	10
2.7.1 Korrosionsmodell	12
3 HAMNINSPEKTIONER	14
4 METOD OCH ARBETSGENOMFÖRANDE	16
4.1 Sprickartering och pålens geometri	16
4.2 Vattenbilning, kapning och sandblästring	17
4.3 Skanning	19
4.4 MATLAB	21
5 RESULTAT	23
5.1 Resultat från Järn 1	23
5.1.1 Översiktlig korrosionsnivå	23
5.1.2 Volymförlust och fördelning	23
5.1.3 Längdprofil och grafisk representation	23

5.2	Resultat från Järn 2	25
5.2.1	Översiktlig korrosionsnivå	25
5.2.2	Volymförlust och fördelning	25
5.2.3	Längdprofil och grafisk representation	25
5.3	Sammanställning och jämförelse	26
6	DISKUSSION	27
6.1	Tolkning av resultat	27
6.2	Miljöexponering och korrosionsmekanismer	27
6.3	Osäkerheter	28
6.4	Praktiska konsekvenser och åtgärdsbehov	30
7	SLUTSATS	31
8	REFERENSER	33
9	BILAGOR	35
9.1	Segmentvis korrosion - Järn 1, Ø20 mm	35
9.2	Segmentvis korrosion - Järn 1, Ø25 mm	37
9.3	Segmentvis korrosion - Järn 2, Ø20 mm	40
9.4	Segmentvis korrosion - Järn 2, Ø25 mm	43
9.5	Korrosionsförlust – Järn 1	46
9.6	Korrosionsförlust – Järn 2	47
9.7	Korrosionsförlust	48
9.8	Teklamodell – Hel påle	49
9.9	Teklamodell – Underpåle	49
9.10	Teklamodell – Överpåle	49
9.11	Flödesschema hamminspektion	50
10	ARBETSBEREDNING	51

# FÖRORD

Detta examensarbete har genomförts under våren 2025 inom högskoleingenjörsprogrammet Samhällsbyggnadsteknik vid Chalmers tekniska högskola. Arbetet är en del av ett större utvecklingsprojekt kring tillståndsbedömning och underhåll av hamnkonstruktioner, där vi haft förmånen att samarbeta med flera aktörer inom branschen.

Vi vill rikta ett varmt tack till **Göteborgs Hamn, NCC, WSP** och **AFRY**, som möjliggjort studien genom att bistå med resurser, expertis och praktiskt stöd. Ert engagemang har värderats högt, och varit essentiellt för att genomföra arbetet i sin helhet.

Ett särskilt tack riktas till **Henrik Granroth** för praktisk hjälp och vägledning genom hela processen, samt till vår handledare och examinator **Rasmus Rempling** för konstruktiva synpunkter och god vägledning. Vi vill även tacka **Arvid Myrseth** och **Patrik Glans** för ert stöd under det praktiska genomförandet.

Vi vill också uttrycka vår uppskattning till **Sebastian Almfeldt, ACE Konstruktionslabb** och **TRACKS** för tillgång till avancerad utrustning och lokaler, vilket varit avgörande för att kunna genomföra den praktiska delen av arbetet.

Slutligen tackar vi alla som på olika sätt bidragit till arbetets genomförande.

Göteborg, juni 2025  
Ruben Bång Brunström  
Gustav Ekdahl





# 1 Inledning/bakgrund

Examensarbetet har som mål att bidra till ökad hållbarhet och effektivisering av inspektion inom hamnkonstruktioner. Göteborgs Hamn, NCC och WSP har ett gemensamt intresse av att utveckla metoder för att utvärdera betongpålar genom avancerade mätmetoder, såsom fiberoptiska sensorer, i kombination med inspektioner.

Syftet med studien är att kartlägga omfattningen och analysera korrosionsförlust. Examensarbetet fokuserar på att analysera en betongpåle med en ålder på cirka 50 till 60 år för att skapa en referenspunkt och bidra med underlag inför framtida övervakning med permanent installerad fiberoptik.

Sveriges omställning till ett mer klimatneutralt land medför stora förändringar och byggindustrin är inte ett undantag. Konstruktioner ska bli mer materialsnåla och tillverkningsprocesserna ska minimera utsläppen, samtidigt skall de konstrueras för längre livslängd. Denna rapport är en del av ett större forskningsprojekt, kallat SensIT, som arbetar mot att främja ett sensorbaserat underhåll av armerade betongkonstruktioner. Detta för att på sikt kunna planera ett effektivare underhåll av konstruktionerna i syfte att minimera kostnader.

Fiberoptiken, DOFS, fungerar som en linjär sensor längs hela sin längd, vilket skiljer sig från traditionella sensorer som registrerar data punktvis. Genom att analysera reflekterat ljus från en inskickad ljuspuls kan parametrar som temperatur, töjning och vibrationer registreras kontinuerligt längs fibern (Ferdinand, 2014). Tekniken är robust mot korrosion och höga temperaturer, vilket gör den lämplig för krävande miljöer.

Beroende på vald metod av ljusspridningsanalys, Raman, Brillouin eller Rayleigh, kan olika egenskaper mätas. Raman används för temperaturmätning, medan Brillouin och Rayleigh även registrerar mekaniska deformationer (Fernandez, Berrocal, Almfeldt, & Rempling, 2022). Genom att detektera spänningsförändringar längs betongkonstruktioner kan fiberoptiken upptäcka mikrosprickor och deformationer tidigare än visuella metoder, vilket ökar säkerheten vid tillståndsbedömningar (Zhang, Long, Broere, & Bao, 2025).

## 1.1 Syfte

Syftet med examensarbetet var att, genom 3D-skanning, kartlägga omfattningen av korrosion samt lokalisera korrosionsangrepp på armeringen i cirkulära betongpålar som har varit långtidsexponerade i marin miljö. Målet var att ta fram och analysera den insamlade data för att skapa ytterligare underlag till framtida hamninspektioner och underhåll.

## 1.2 Avgränsningar

Denna rapport avgränsas till korrosionsuppskattning av en armerade betongpåle i Göteborgs hamnområde samt den efterföljande bedömningen av deras korrosionsstatus. Arbetet omfattar en analys av olika korrosionstyper och deras inverkan på betongpålar

samt hur erhållna resultat kan optimera inspektions- och bedömningsförfaranden. Studien är begränsad till tekniska och metodologiska aspekter av korrosionsanalys och beaktar varken ekonomiska eller miljömässiga faktorer. Vidare behandlas inga åtgärdsstrategier för att förebygga eller begränsa korrosion, utan fokus ligger på identifiering och bedömning av befintlig skadestatus.

### **1.3 Frågeställning**

- Vilken mängd av armeringens ursprungliga tvärsnittsarea har förlorats till följd av korrosion?
- Hur väl överensstämmer den uppmätta armeringsförlusten med mätresultat av teoretiska korrosionshastigheter över en tidsperiod på cirka 50 till 60 år?
- Vilka korrosionstyper kan identifieras i betongpålen, och vilka mekanismer ligger bakom deras uppkomst?
- Hur genomförs en teknisk inspektion av betongpålar i hamnkonstruktioner, och vilka metoder används för att bedöma armeringens tillstånd?

## 2 Teori

I följande kapitel beskrivs relevanta begrepp och teorier på en översiktlig nivå angående ämnet betong och korrosion i armerad betong.

### 2.1 Betong och armerad betong

Betongens motståndskraft påverkas både av dess hållfasthet och beständighet. Den mest väsentliga faktorn för beständigheten är tätheten, vilken beror på förhållandet mellan vatten och bindemedel (cement, kemiska tillsatser och tillsatsmaterial), vilket beskrivs med vattenbindemedeltalet. Tätheten påverkas också av komprimeringsgraden, nämligen hur packadt betongen är i förhållande till sin maximala densitet. Beständigheten påverkas även av bindemedlets typ och sammansättning, ballastens karaktär, luftporsstrukturen samt härdningsmetoden. Hållfastheten är bland annat avgörande för vid vilken last betongen spricker. Den påverkas främst av vattenbindemedeltalet, cementtyp, förhållandet mellan cement och vatten, ballastens karaktär och härdningsmetod (Svensk Byggtjänst, 2021).

Betong har god tryckhållfasthet, men sämre draghållfasthet. För att förbättra betongelementets hållfasthet i både drag och tryck gjuts armering in (Kungliga Tekniska Högskolan, 2021). Detta ökar hållfastheten avsevärt, men i armerad betong är risken för skjuv- och böjsprickor vanligare (Svensk Byggtjänst, 2021). Dessa sprickor kan både orsaka och bidra till initiering av korrosion.

### 2.2 Armeringskorrosion

I följande kapitel beskrivs typer av armeringskorrosion, hur det induceras samt vilka externa faktorer som påverkar mekanismerna.

#### 2.2.1 Kloridinducerad korrosion

Kloridjoner ( $\text{Cl}^-$ ) utgör en allvarlig risk för armerad betong, särskilt i marina miljöer. Dessa joner kan tränga in i betongen och när en viss kritisk koncentration, kloridtröskelvärdet, uppnås vid armeringens yta initieras nedbrytningen av det passiva oxidlagret som normalt skyddar stålet mot korrosion (Nilsson, 2021). När passivskiktet väl är genombrutet bildas en korrosionscell, där det påverkade området blir anod (där oxidation och materialnedbrytning sker) och det omgivande stålet fungerar som katod (där reduktion sker). Denna elektrokemiska process leder till att armeringen gradvis bryts ned, vilket på sikt kan försämra konstruktions bärförmåga och hållbarhet.

Klorider introduceras i betongen på flera sätt, under tillverkningen kan klorider tillföras via förorenat vatten, tillsatsmedel eller ballast. Efter härdning kan klorider tränga in externt, särskilt i konstruktioner som är direkt utsatta för havsvatten eller avfrostningssalt. Den huvudsakliga mekanismen för kloridinträngning är diffusion, där kloridjoner rör sig från en högre koncentration vid betongytan till en lägre koncentration inuti betongen. I fuktiga miljöer kan även kapillärugugning bidra till transporten, där vatten med upplösta klorider sugts in i betongens porstruktur. I vissa fall kan konvektiv transport vara drivande, där kloridjoner förs in genom tryckdrivna vätskeflöden (Svensk Byggtjänst, 2021).

Tiden det tar innan korrosion initieras i armeringen beror på flera faktorer. Omgivningens kloridkoncentration är avgörande, ju högre kloridhalt i kontakt med betongytan, desto snabbare sker inträngningen. Inträngningshastigheten för klorid påverkas av betongens porositet, vattencementtal ( $vct$ ) och graden av härdning, där tätare betong avsevärt bromsar kloridens framfart. Betongens förmåga att binda klorider spelar också en roll, vissa klorider reagerar kemiskt med cementens hydratiseringsprodukter. Kloridtröskelvärde, det vill säga kloridkoncentrationen vid armeringens yta när korrosion börjar, varierar beroende på betongens pH-värde, armeringens ytegenskaper och miljöförhållandena. Slutligen har täcksiktets tjocklek stor betydelse, ett tjockare betongskikt förlänger kloridens transportväg och därmed tiden till korrosionsinitiering (Svensk Byggtjänst, 2021).

För kloridinträngning genom diffusion används Ficks 2: a lag enligt (Svensk Byggtjänst, 2021):

$$\frac{C_{cr}}{C_s} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2 * \sqrt{\frac{D_{Cl} * t}{K_d}}}\right) = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2 * \sqrt{D_a * t}}\right) = 1 - \operatorname{erf}(Z) = \operatorname{erfc}(Z)$$

**Ekvation 2.1** (Svensk Byggtjänst, 2021)

$C_{cr}$  =  $Cl^-$  -koncentration i porlösningen vid angreppets start i  $\text{mol/m}^3$  eller vikt-% av bindemedel.

$C_s$  =  $Cl^-$  -koncentration vid ytan i  $\text{mol/m}^3$  eller vikt-% av bindemedel.

$x$  = Täcksiktets tjocklek, m

$D_{Cl}$  = Diffusionskoefficienten för  $Cl^-$  i betong,  $\text{m}^2/\text{s}$ .

$K_d$  = förhållandet mellan betongens  $Cl^-$  -koncentration i fast fas och lösning.

$D_a$  = kloriddiffusivitet i betong,  $\text{m}^2/\text{s}$

Erf = error function, tabell, Crank (1985)

$t$  = initieringstid, s

För att säkerställa långsiktig hållbarhet i armerade betongkonstruktioner, särskilt i aggressiva miljöer som hamnar och broar, är det avgörande att beakta dessa parametrar vid projektering och underhåll. Genom att optimera betongens sammansättning, säkerställa täckande betongskikt och övervaka kloridexponeringen kan risken för kloridinducerad korrosion minimeras och konstruktionens livslängd förlängas.

## 2.2.2 Karbonatiseringsinducerad korrosion

I ett okarboniserat tillstånd är betongen alkalisk, med andra ord har den ett högt pH-värde (Svensk Byggtjänst, 2021). Karbonatisering är en kemisk process där koldioxid ( $\text{CO}_2$ ) från den omgivande luften tränger in i betongen genom diffusion och reagerar med kalciumhydroxid ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) från betongen. Reaktionen bildar kalciumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) som leder till en signifikant sänkning av pH-värdet i betongens porlösning (Nilsson, 2021). När karbonatiseringsfronten når armeringen bryts det passiva oxidskiktet på stålets yta ned, vilket initierar en korrosionsprocess. Karbonatiseringshastigheten beror huvudsakligen på:

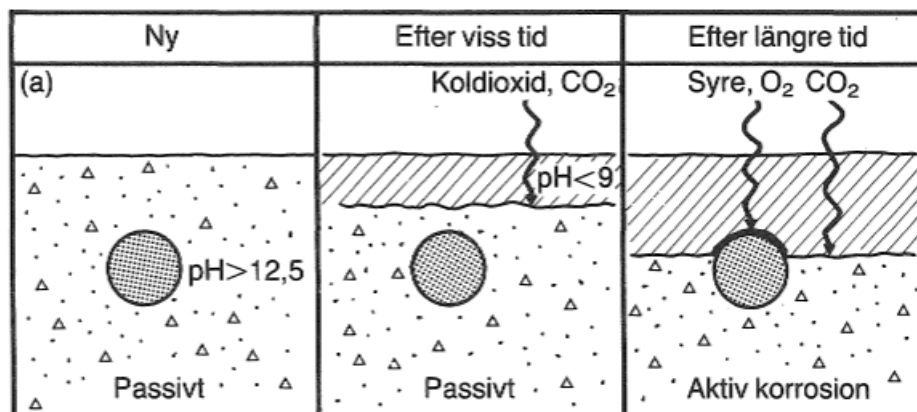
- Diffusionshastigheten för koldioxid genom betongen
- Betongens porositet och täthet, vilket påverkas av vattencementtalet ( $vct$ ), cementsort, tillsatsmedel och cementhalt
- Omgivningens koldioxidkoncentration och klimatförhållanden (temperatur och relativ fuktighet)

Karbonatiseringsdjupet kan beskrivas matematiskt genom en kvadratrorelation:

$$x = k \cdot \sqrt{t} \quad \text{Ekvation 2.2 (Svensk Byggtjänst, 2021)}$$

Där:

- $x$  = Karbonatiseringsdjup (m)
- $k$  = Karbonatiseringskoefficient ( $\text{m}/\sqrt{\text{år}}$ ), som beror på betongens egenskaper och miljöfaktorer
- $t$  = Tid (år)

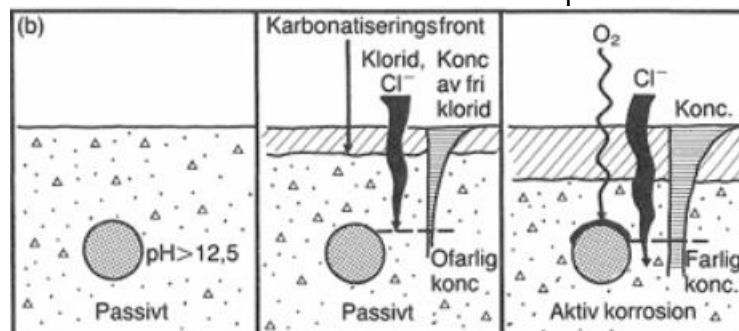


Figur 1 – Figur som beskriver karbonatisering, (Fagerlund, 1992).

## 2.2.3 Kombination av klorid- och karbonatiseringsangrepp

Korrosionsangrepp uppstår ofta genom kombination av karbonatisering och kloridinträning. När karbonatiseringsdjupet,  $x$ , enligt ekvation 2.1 når armeringen initieras korrosionen. Hastigheten bestäms av syreflödet till armering. Differensen i pH mellan det angripna täckschiktet och den icke karbonatiserade accelererar korrosionen i stålet (Fagerlund, 1992). Vidare beskriver Fagerlund att när kloridhalten överstiger tröskelvärdet vid armeringens yta påbörjas korrosionen, angreppet har ingen tydlig

korrosionsfront och kännetecknen på kloridangrepp är gropfrätning.



Figur 2 - Figur som beskriver kombinerad karbonatisering- och kloridinducerat angrepp (Fagerlund, 1992).

## 2.2.4 Anaerob korrosion

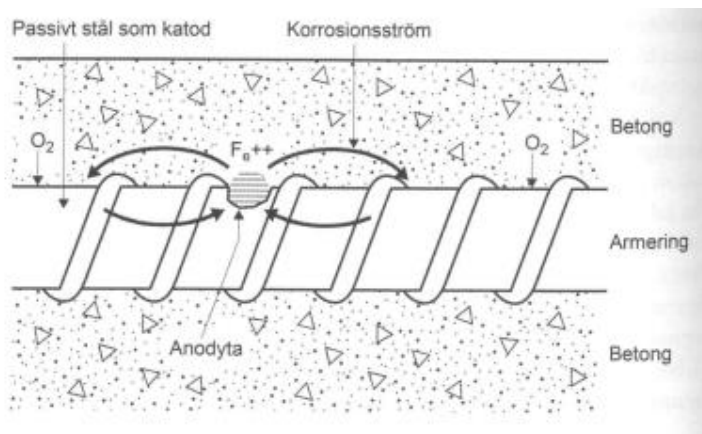
Anaerobisk korrosion är en form av mikrobiologisk inducerad korrosion som sker utan behovet av syre (Corrosionpedia, 2024). Korrosionen uppstår till följd av mikroorganismers metaboliska aktivitet och sker vanligtvis i vattenmättade miljöer, exempelvis lera, på havsbotten eller inuti betong. Processen är särskilt återkommande i marina konstruktioner och armerad betong.

Anaerobisk korrosion orsakas oftast av specifika bakterier som livnär sig på näringsämnen i leran och vattnet. En av de vanligare bakterierna är sulfat-reducerande bakterier, som använder sulfat som elektronacceptor för att bryta ned organiskt material, således behöver de ej förlita sig på syre i sin omgivning (ScienceDirect, u.d.). Sulfid bildas utifrån processen, som i sin tur reagerar med järnet och bildar korrosion. Mangan- och järnoxiderande bakterier är också klassade som anaerobiska och är bidragande till anaerobisk korrosion (Corrosionpedia, 2024).

## 2.2.5 Galvanisk korrosion

Galvanisk korrosion är en form av elektrokemisk korrosion som uppstår när två metaller i eller intill en elektrolyt kommer i kontakt (Euro Inox, 2011). Det bildas då en potentialskillnad mellan metallerna. Den mindre ädla metallen, den mer elektronegativa, blir anod och korroderar. Den ädlare metallen blir katod och skyddas mot korrosion. Detta möjliggörs då till del av den potential mellan metallerna, som leder elektroner från anoden till katoden, genom den befintliga elektrolyten, som i sin tur leder till korrosion. Det finns även andra signifikanta faktorer som påverkar den galvaniska korrosionshastigheten, exempelvis den kemiska kompositionen och konduktiviteten av elektrolyten, syretillförseln och temperaturen som i sin tur påverkar bland annat lösligheten av ämnena involverade i reaktionen (Tuutti, 1982).

För marina konstruktioner är galvanisk korrosion särskilt nämnvärd, då det är en miljö med avsevärt högre mängder lösa salter och hög fuktighet. Konduktiviteten i havsvatten är dessutom avsevärt högre än rent eller sött vatten, detta i samband med nämnda faktorer ökar riskerna för korrosionsbildning.



Figur 3 - Illustration som beskriver galvanisk korrosion i armerad betong (Svensk Byggtjänst, 2021).

### 2.2.6 Sulfat

Sulfat förekommer i göteborgsmiljö till följd av förbränning av svavelhaltiga bränslen, användning av gödningsmedel samt läckage från avloppssystem. En betydande del ackumuleras i mark och vatten (SGU, 2024). När sulfatjoner tränger in i fuktig betong kan de reagera med trikalciualuminat (C<sub>3</sub>A), en fas som huvudsakligen återfinns i portlandcement. Denna reaktion leder till bildning av ettringit, en volymexpanderande förening som kan orsaka sprickbildning och nedbrytning av betongen. Därför har cementets kemiska sammansättning en avgörande betydelse för dess resistens mot sulfatangrepp. Sulfatens påverkan delas in i två huvudsakliga mekanismer, kemiskt sulfatangrepp och sulfatdiffusion (Svensk Byggtjänst, 2021).

I ett fall kan angreppszonen beskrivas som ett syraangrepp:

$$x = \left( \frac{s}{m} * \frac{2 * \delta * C_s}{M} \right)^{1/2} * t^{1/2} \quad \text{Ekvation 2.3 (Svensk Byggtjänst, 2021)}$$

x = Inträngningsdjup, m.

s = Antal mol sulfatjoner som delar reaktionen.

m = Antal material som deltar i reaktionen.

δ = Transportkoefficienten för sulfatjoner, m<sup>2</sup>/s.

C<sub>s</sub> = koncentrationen av sulfatjoner vid ytan, mol/m<sup>3</sup>.

M = mängden i mol i materialet som angrips, mol/m<sup>3</sup>.

t = Exponeringstiden, s.

Reaktionen avtar genom faktorn roten ur tiden. Angreppet kräver att trikalciualuminat inte understiger en halt på cirka 3%.

I ett annat fall kan reaktionen beaktas utifrån tiden, vilken beskriver ju högre koncentration av sulfatjoner desto snabbare angrepp,

$$\frac{dc}{dt} = k * c \quad \text{Ekvation 2.4 (Svensk Byggtjänst, 2021)}$$

c = Sulfatkoncentration.

k = En hastighetskoefficient för reaktionen mellan sulfat och betong.

inträngningen blir då:

$$\frac{dc}{dt} = D * \frac{d^2*c}{dx^2} - k * c$$

**Ekvation 2.5** (Svensk Byggtjänst, 2021)

D = Diffusiviteten hos sulfatjonen, m<sup>2</sup>/s.

## 2.3 Typer av rost

När armering korroderar bildas olika typer av rost med varierande egenskaper beroende på den miljö som stålet befinner sig i. För att förstå hur korrosion påverkar armerade betongkonstruktioner är det viktigt att särskilja dessa typer och deras inverkan på hållfasthet och beständighet.

En vanligt förekommande typ av rost är brunrost (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), även kallat gravrost då det blir en allvarligare typ av korrosion, som uppstår i syrerika miljöer med lägre fuktighet. Vanligtvis är denna typ torr och porös samt kännetecknas av sin bruna färg (Esping, 2025). Brunrostens volym är större än det ursprungliga stålets volym, vilket kan leda till sprickbildning och spjälkning som kan påskynda korrosionsprocessen.

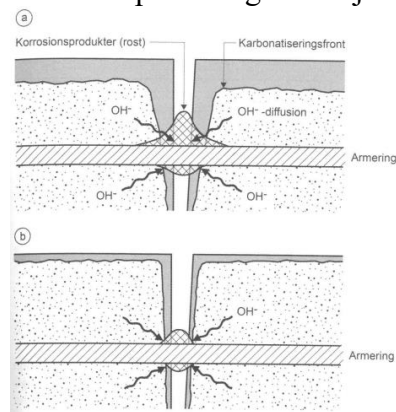
I syrefattigare miljöer, exempelvis i djupare vatten eller i betongen, uppstår vanligtvis svartrost (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>). Denna form av rost är tätare och mer kompakt än brunrost. Den har även ingen volymökning och därav ingen spjälkning (Esping, 2025). Detta är positivt ur synpunkten att korrosionen ej påskyndas, men det betyder också att det är svårare att ge en noggrann uppskattning om hur mycket korrosion som faktiskt har bildats, då ingen indikering ges på att ett angrepp har skett. Svartrost har även visats korrelera med anaerob korrosion, vilket är en form av korrosion som sker i syrefattiga miljöer, ofta drivet av sulfatreducerande bakterier (Halling, 2019).

Svartrost och brunrost är de två vanligare typerna av rost gällande armeringskorrosion. Några andra, mindre vanliga, typer av rost är exempelvis gul- och grönrost. Gulrost uppstår oftast i fuktiga och syresatta miljöer, medan grönrost drivs av klorider från exempelvis havsmiljöer. Grönrosten är mer instabil än den gula, vilket innebär att rosten faller av elementet och låter mer rost bildas på den underliggande ytan, den kan även bli mer aggressiv.

## 2.4 Sprickors effekt i betong

Armerad betong är ett poröst och sprött material som är sprucken i sitt hårdnade tillstånd. Sprickor fungerar som kanaler där vatten, CO<sub>2</sub> och klorider kan transporteras in och nå armeringen (Svensk Byggtjänst, 2021). Den ingjutna armeringen skyddas av den alkaliska miljön som finns invid dess yta, vid stora sprickor förändras dock denna miljö, särskilt när det är en korrosionsbenägen miljö. Parallella sprickor är ett särskilt stort problem, då det ofta medfört att stora skador bildas som leder till att större ytor korroderar.

Vinkelräta sprickor med en bredd mindre än 0,05 till 0,4 mm har inte någon påverkan på en konstruktions livslängd beroende på den yttre och inre miljön (Svensk Byggtjänst, 2021). Effekten av miljön avgörs av dess aggressivitet. Slutsatsen som kan dras är att längsgående sprickor utgör stor fara för betongens hållfasthet, då detta kan leda till stora korroderade ytor. Mindre vinkelräta sprickor kan beaktas som mindre allvarliga, beroende på betongens miljö.



Figur 4 – Karbonatiseringsfront i sprickbildning (Svensk Byggtjänst, 2021).

## 2.5 Korrosionshastighet

Omfattningen och hastigheten av korrosion beror på flera faktorer, en av dessa är storleksförhållandet mellan anod och katod. I ett fall där anodytan är liten och katodytan är stor blir korrosionsangreppet koncentrerat till ett mindre område med snabbare verkan (Svensk Byggtjänst, 2021). I det motsatta förhållandet blir korrosionsangreppet mer utbredd och inte lika allvarligt.

En annan viktig faktor är fukt, i torra miljöer är risken för korrosion betydligt lägre än i en fuktig miljö, även om betongen innehåller klorider eller är karbonatiserad (Svensk Byggtjänst, 2021). Detta då transporten av jonerna mellan anod och katod är lägre i torrare miljöer.  $V_{ct}$  och materialsammansättningen av betongen är de faktorer som styr vid vilken relativ fuktighet då korrosionshastigheten ökar eller avtar.

## 2.6 Exponeringsmiljö

För att säkerställa beständigheten hos betongkonstruktioner används, enligt den europeiska standarden EN 206–1, exponeringsklasser. Dessa klasser beskriver olika faktorer som betongkonstruktioner utsätts för i olika miljöer och används för att ställa krav på betongens sammansättning och utförande. Syftet är att minska risken för skador som bland annat karbonatisering och kloridinträngning.

De olika klasserna står för de diverse mekanismer som kan initiera korrosion. För torr miljö (inomhus) kallas exponeringsklassen X0. I denna miljö är karbonatiseringshastigheten högre, men korrosionshastigheten blir försumbar i torr miljö, risken för korrosion är alltså mycket liten (Svensk Byggtjänst, 2021). Fuktiga miljöer utan salt (utomhus) har exponeringsklasserna XC1-XC4. I utomhusmiljö utan salt orsakas korrosion av karbonatisering. Fuktiga miljöer med salt har klasserna XD1-XS3 eller XS1-XS3, beroende på vad för typ av salter det är. Miljöer med salt från havsvatten klassas med XS och miljöer med tölsalt klassas med XD. I miljöer med salt sker korrosion främst på grund av kloridinträngning.

För rapportens syfte är klassen XS den av störst intresse, då denna omfattar konstruktioner i marina miljöer. I betong med lågt *vct* har marin undervattenszon (XS2) störst kloridinträngning, skvalpzonen (XS3) har bättre förhållande för att gynna korrosion och är den mest utsatta av exponeringsklasserna (Svensk Byggtjänst, 2021).

## 2.7 Teoretiska beräkningsmodeller

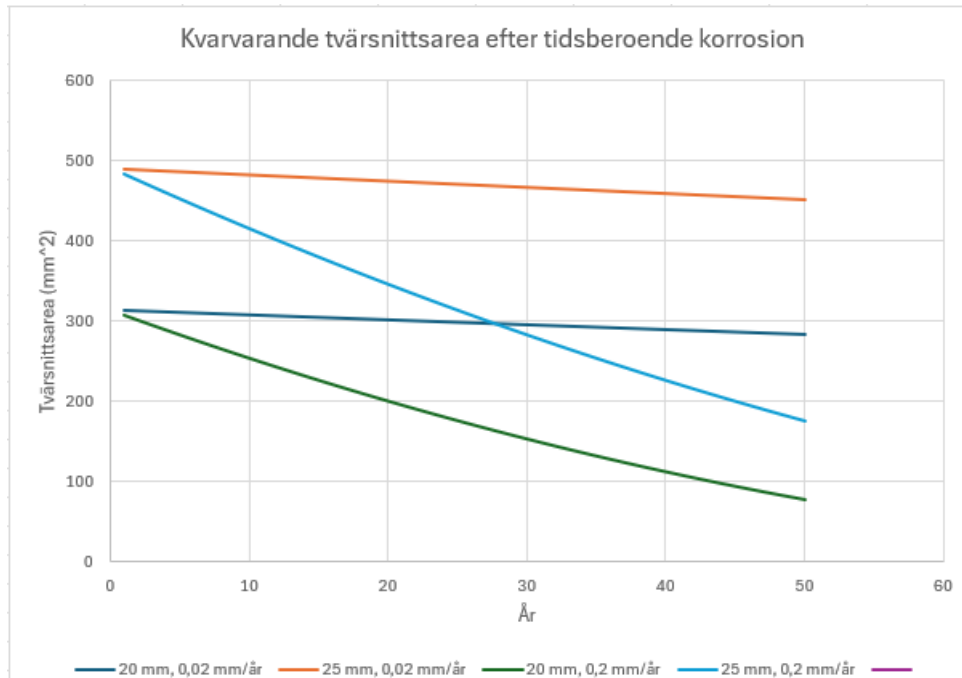
Uppskattning av armeringskorrosion och beräkning av livslängd för armerade betongkonstruktioner baseras i regel på etablerade modeller som tar hänsyn till en rad olika parametrar såsom kloridinträngningshastighet, karbonatiseringsdjup, relativ fuktighet i porsystemet, temperatur, betongens porositet och täcksiktets tjocklek. Dessa parametrar påverkar både initierings- och propageringsstadiet i korrosionsförloppet. Beräkningsmodellerna kräver ofta detaljerade materialdata samt information om exponerings förhållandena, vilka inte alltid är tillgängliga i fältstudier av befintliga konstruktioner.

Armeringskorrosion är en komplex process, där vissa mekanismer fortfarande är föremål för forskning och diskussion. Enligt Nilsson (2021) förekommer avvikelser mellan teori och verklighet, vilket tydliggörs genom exempel såsom, äldre konstruktioner i aggressiva miljöer som uppvisar lång livslängd trots låg teoretisk betongkvalitet, samt konstruktioner med mycket höga kloridhalter men med mindre mängd korrosion. Dessa observationer visar att existerande modeller och teorier måste användas med försiktighet, särskilt vid tillståndsbedömning av befintliga konstruktioner.

Vid uppskattning av korrosionspåverkan måste både initierings- och propageringsfasen beaktas (Tuutti, 1982). Initieringstiden är den period under vilken klorider eller karbonatisering når armeringen och initierar korrosionsprocessen. Därefter följer propageringsfasen, där själva korrosionen fortskrider. Denna fas påverkas starkt av omgivande klimat, särskilt relativ fuktighet och medeltemperatur. Transportmekanismer som diffusion är ofta långsamma och styrs av koncentrationsgradienter i porvattnet, särskilt vid kloridtransport i vattenmättade system.

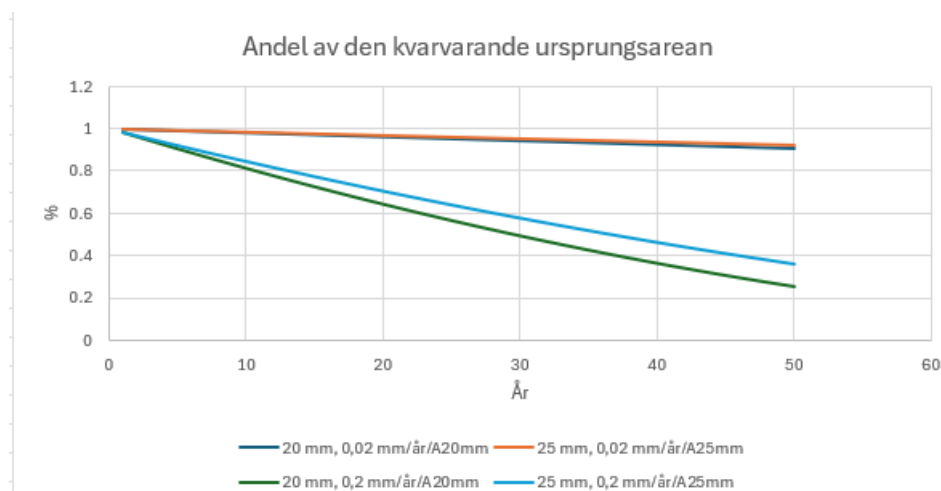
Eftersom varken initieringstidens längd eller startpunkten för propageringsfasen kan fastställas i föreliggande fall, är det inte möjligt att på ett tillförlitligt sätt beräkna konstruktionens återstående livslängd, eller andelen korrosion i armeringsjärnen. Det finns generella riktvärden att tillgå, baserat på mätningar kan korrosionshastigheten för armering uppskattas till mellan 20–200  $\mu\text{m}/\text{år}$ , där normala värden i luftexponerade miljöer ofta är 50–100  $\mu\text{m}/\text{år}$ .

Korrosionen kan antas börja någon gång mellan 1–50 år och att korrosionen fortskrider under syrefattiga förhållandena och att täcksiktet är dimensionerat för långtidlaster, antas korrosionshastigheten återfinnas i intervallet 20–200  $\mu\text{m}/\text{år}$ . Nedan följer ett exempel för att visa korrosionen under 50 år. Korrosionshastigheten visas i både 20  $\mu\text{m}/\text{år}$  och 200  $\mu\text{m}/\text{år}$  med kvarvarande tvärsnittsarea efter 1–50 antal år och korrosion från ett håll.



Figur 5 - Graf över kvarvarande tvärsnittsarea beroende på tid och korrosionshastighet. Egen bearbetning.

Nästa diagram visar den procentuella tvärsnittsförlusten beroende på vilket år korrosionen startade och var 20–200 µm/år.

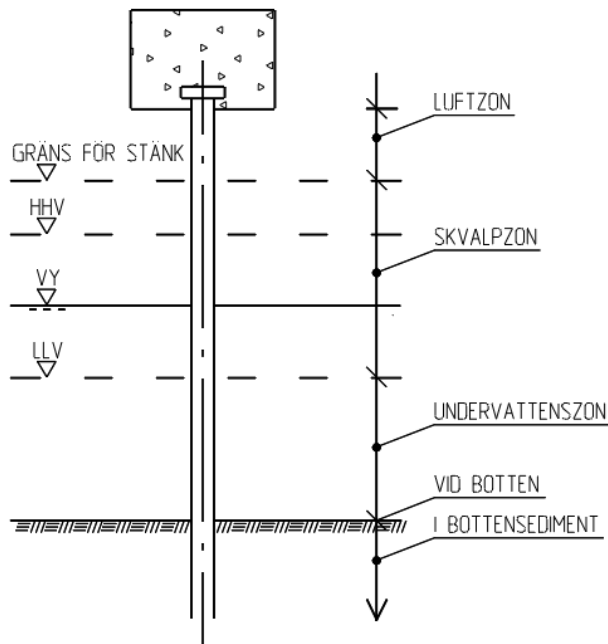


Figur 6 - Graf över hur stor procentuell andel den kvarvarande arean utgör. Egen bearbetning.

Pålkommisionens dimensioneringsvärden för rostmån av stålplålar går att avläsas i tabellen nedan och beskriver antal millimeter/år av korrosion. Värdena i tabellen är inte direkt tillämpbara då pålen som undersöks är en armerad betongpåle, vilket minskar dess rostmån. Det går ändå att uppskatta skillnaden i rostmån i förhållande till de olika lager pålen var utsatt för, lera, vatten och skvalpzon (isskydd) (Bengtsson, Berglars, Hultsjö, & Romell, 2000).

Zon, se fig 7.7	Dimensionerande rostmån, mm			
	Sött sjö- vatten	Sött ström- mande vatten	Bräckt vatten, halt NaCl 0,25- 1%	Salt vatten, halt NaCl > 1%
Luftzon	5	5	10	10
Skvalpzon	20	20	30	30
Undervattenszon	5	10	10	10
Vid botten, ej eroderande sediment	5	10	10	10
Vid botten eroderande sediment	20	20	30	30
I bottensediment	2	2	2	5

Figur 6 - Pålkommisionens "dimensionerande rostmån för 100 år i vatten samt för påldelar i fyllning sprängsten eller grovt grus i vatten" (Bengtsson, Berglars, Hultsjö, & Romell, 2000).

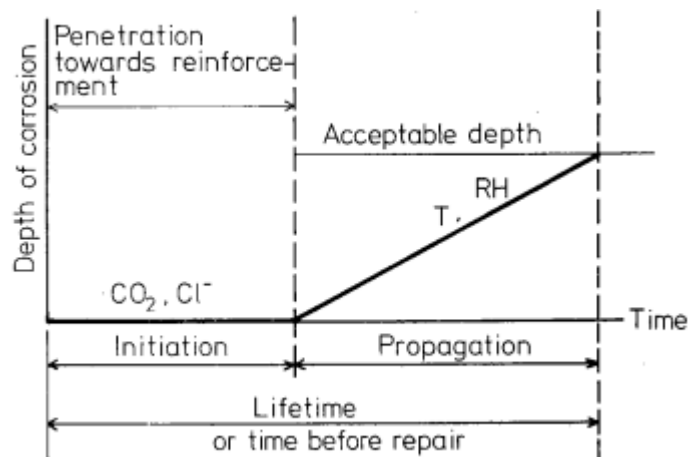


Figur 7 - Pålkommisionens "Zoner för pålar i vatten eller öppen fyllning i vatten enligt tabell" (Bengtsson, Berglars, Hultsjö, & Romell, 2000).

### 2.7.1 Korrosionsmodell

Korrosion i armerade betongkonstruktioner uppstår inte direkt, processen består av två faser, initieringsfasen och propageringsfasen (Tuutti, 1982). I initieringsfasen är armeringen skyddad av betongens pH-värde som skapar ett passivt skydd på armeringens yta. Korrosion uppstår först när detta skydd bryts ned, vilket ofta sker genom karbonatisering eller klorider som når en kritisk koncentration. Tiden till initiering av korrosionen påverkas av flera faktorer som täthet, yttre miljö, *vct* och täcksiktets tjocklek.

Initiering följs av propagering då korrosionen fortsätter och bryter ned armeringen samt skapar sprickor i betongen. Hastigheten av korrosionen påverkas bland annat av fukthalten, temperatur och porstrukturen. Tuuttis modell påpekar att det inte enbart är korrosionshastighet som avgör livslängden av en konstruktion, utan också den ofta långa tiden innan korrosion initieras (initieringsfasen). Denna modell har verifierats genom laborationer och fältstudier samt använts som grund för livslängdsbedömningar av betongkonstruktioner. Modellen hänvisas även till i Svensk Byggtjänsts *Betonghandboken Del 2*, 2021.



Figur 7 - Illustration som visar korrosionsmodellen (Tuutti, 1982).

### 3 Hamninspektioner

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 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 (*Bridge and Tunnel Management*) 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 näst kommande 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. (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).

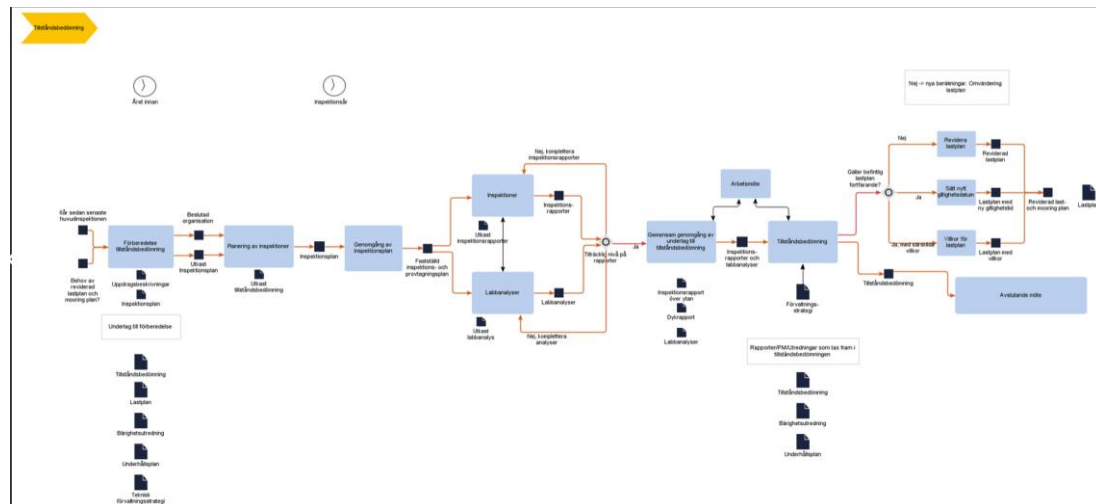
<b>Förkortning/Symbol</b>	<b>Definition</b>
TK 0	Tillståndsklass 0. Bristfällig funktion bortom 10 år.
TK 1	Tillståndsklass 1. Bristfällig funktion inom 10 år.
TK 2	Tillståndsklass 2. Bristfällig funktion inom 3 år.
TK 3	Tillståndsklass 3. Bristfällig funktion vid inspektionstillfället.

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. Detta redovisas i flödesschemat nedan, större kopia återfinns i bilagor.



Figur 9 - Flödesschema för underhåll av konstruktioner från Göteborgs Hamn (Göteborgs Hamn AB, 2025).

## 4 Metod och arbetsgenomförande

I följande kapitel redovisas den praktiska del av arbetet som genomförts. Denna omfattar bland annat utförd sprickanalys, skanning av armering samt efterföljande analys av skanningsdata för att fastställa mängden korroderat armeringsstål. I slutet av rapporten bifogas även arbetsberedning.

### 4.1 Sprickkartering och pålens geometri

Arbetet delas in i en teoretisk och en praktisk del. De första momenten i den praktiska delen bestod i att demontera pålen från hamnkonstruktionen och transportera dem till en plats för bearbetning och kapning. Pålen genomgick en visuell undersökning och sprickkartering. Sprickkarteringen utfördes genom att sprickorna markerades och avståndet mellan tvärkraftsprickorna mättes. Det var utmanande att identifiera sprickorna eftersom de var mindre än 0,1 mm. Sprickbildningen bedöms ha uppstått antingen vid installation eller i samband med upplyftningen. I den övre delen av pålen uppmättes ett sprickavstånd på cirka 200 mm, medan den nedre delen uppvisade ett avstånd på omkring 150–200 mm. Sprickorna antas ha en viss lutning på grund av spiralbyglarna återfinns genom hela pålen. Vid en översiktlig bedömning uppskattades att hela pålen var cirka 17 meter, varav ungefär 6,5 meter av en mindre dimension och 10,5 meter av större dimension, inklusive isskydd. den mindre dimensionen av pålen var omgiven av lera, liksom cirka tre meter av den övre sektionen. Den återstående övre delen, alltså cirka 7,5 meter, befann sig i vatten. Pålen var utrustad med ett isskydd som sitter längst upp på pålen, den används för att skydda pålen mot bland annat mekaniska skador och frostsprängning. Pålens isskydd har inte beaktats i denna studie.



Figur 10 - Foto: Ruben Bång Brunström och Gustav Ekdahl, markering av sprickor och mätning.

Pålen kapades i tre sektioner om fem till sex meter, och pålens geometri mättes manuellt med tumstock för att jämföras med ritningsunderlag. Täcksiktet uppmättes till cirka 60 mm på den övre, grövre delen av pålen, och till cirka 40 mm på den nedre delen. Mätningar av täcksiktet genomfördes även med två olika typer av täcksiktsmätare, dessa visade sig dock svåränvända på den cirkulära pålens yta och gav ofullständiga värden. Armeringsdiametern i den övre delen uppmättes med längsgående armering på 25 mm med 10 mm spiralbyglar, medan den nedre delen hade 20 mm armering i

kombination med 8 mm byglar. Ur pålen togs även ett antal prover för efterföljande analys av betongens egenskaper.

Noggrann uppmärkning av sektionerna är avgörande då två armeringsjärn kommer extraheras för vidare analys. För att möjliggöra en tillförlitlig jämförelse krävs att respektive armeringsjärn kan kopplas till sin ursprungliga position i pålen. Detta är särskilt viktigt vid tolkning av skanningsdata, då korrosionsförloppet kan variera beroende på exponeringsförhållanden inom olika delar av konstruktionen.



Figur 11 - Foto: Ruben Bång Brunström och Gustav Ekdahl, markering av pålen sektioner och mätning.

## 4.2 Vattenbilning, kapning och sandblästring

Pålen transporterades därefter för vattenbilning och demontering av armeringsstängerna. Vattenbilning är en metod där betongen avlägsnas med hjälp av högt trycksatt vatten, vilket möjliggör friläggning av armering och används vanligtvis vid reparationer eller friläggning av konstruktionselement.

Efter bilningen transporterades armeringen till Chalmers tekniska högskola. Det beslutades att två armeringsjärn, 18 meter per järn, skulle skannas. För att särskilja dem märktes det ena järnet med rosa färg och det andra med vitt, vilket indikerade deras ursprungliga position i pålen. Detta gjordes för att undvika att de segmenterade järnen ej blandas ihop under överlämning från hamnen. Armeringsjärnen kapades därefter i cirka 80 cm långa segment på ACE-Labbet för att rymmas i sandblästringsskåpet på TRACKS. Segmenten numrerades i den riktning som motsvarade pålens nedre del, där det vita järnet märktes med nummer 1–20 och det rosa med 21–40.

Vid sandblästringen användes glaskulor som blästermedel för att minimera risken att stål avlägsnas från armeringsjärnens yta, dock resulterade det i att blästringen tog lång tid. Sandblästringsskåpet fungerar genom att ett trycksatt system cirkulerar luft och blästermaterial, som riktas via ett munstycke mot armeringen för att avlägsna betongrester och korrosionsprodukter.

I figur 12 är ett foto på armeringsstålets ursprungliga position i pålen. Där ett av järnen är markerat med vit färg som fick nummer mellan 1–20 och ett med rosa färg som fick nummer 21–40.



Figur 12 - Foto: Henrik Granroth, armeringsstångernas position i pålen.

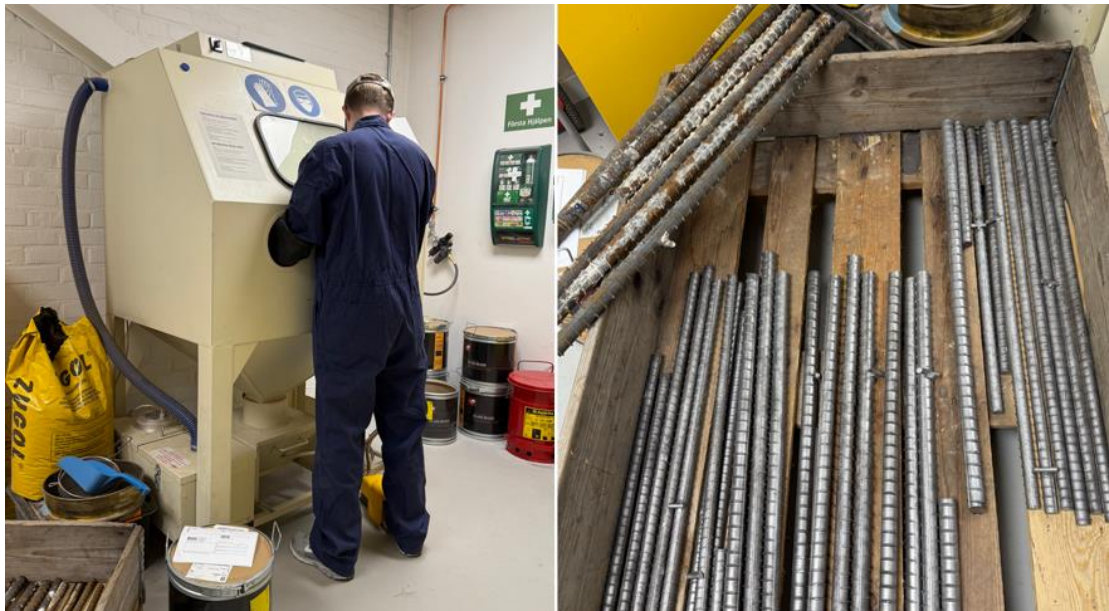
Bilderna visar hur armeringsstångerna kom levererade och närbild på färgmärkning. Sedan följer en bild på sågen som användes för att kapa armeringen och hur armeringen numrerades med siffror. Nästa bilder är på blästerskåpet och armeringsstångar före och efter sandblästring.



Figur 13 - Foto: Ruben Bång Brunström och Gustav Ekdahl. Armeringen vid leverans på Chalmers, egna bilder.



Figur 14 – Foto: Ruben Bång Brunström och Gustav Ekdahl. Kapning av armeringsstängerna och numrering, egna bilder.



Figur 15 - Foto: Ruben Bång Brunström och Gustav Ekdahl. Sandblästring av armeringsstängerna, egna bilder.

### 4.3 Skanning

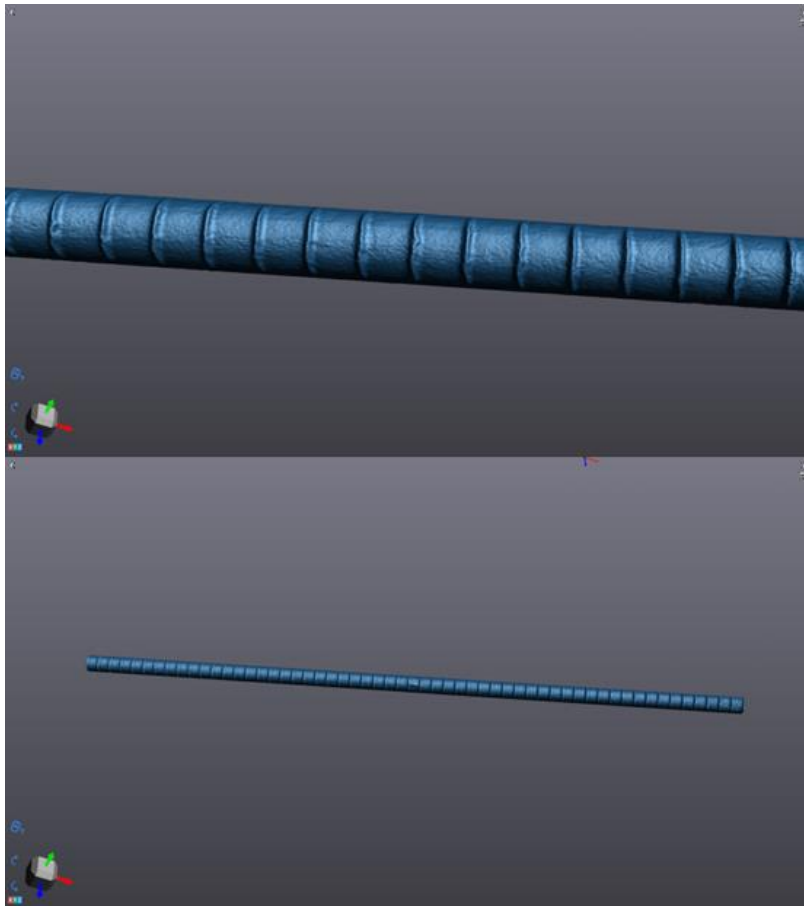
För att möjliggöra skanning av armeringsjärnen konstruerades en ställning som stabiliserade järnen och gav åtkomst till samtliga ytor. Skanningen genomfördes med en handhållen skanner från Creaform, kopplad till programvaran VXelements. Utrustningen används för att skapa högupplösta 3D-modeller av fysiska objekt. Skannern arbetar genom att kombinera laser- och kamerasystem för att generera ett punktmoln. Genom triangulering mot referenspunkter som placeras på ställningen, möjliggörs en rekonstruktion av föremålets geometriska form med en noggrannhet på upp till 0,2 mm.

Armeringsstängerna placerades med sin numreringsiffra nedåt och skannades i dess numererade ordning. Resultatet från skanningen blev 40 modellfiler. Arbetet pågick under ett par veckors tid och varje järn skannades med så hög noggrannhet som möjligt.

För att få skannern att endast skanna armeringsjärnen gjordes en mall i programmet, där ställningens referenspunkter skannades in och clipping planes tillades för att hindra skannern att uppfånga föremål i den omgivande miljön, till exempel bordet. Sedan användes VXscan för att manuellt städa filerna från icke önskade partiklar som skannern uppfångat. Sist sparades skannings resultatet i textfiler med punktdata.



Figur 16 – Foto: Ruben Bång Brunström och Gustav Ekdahl, 3D-skanning av armeringsjärn.



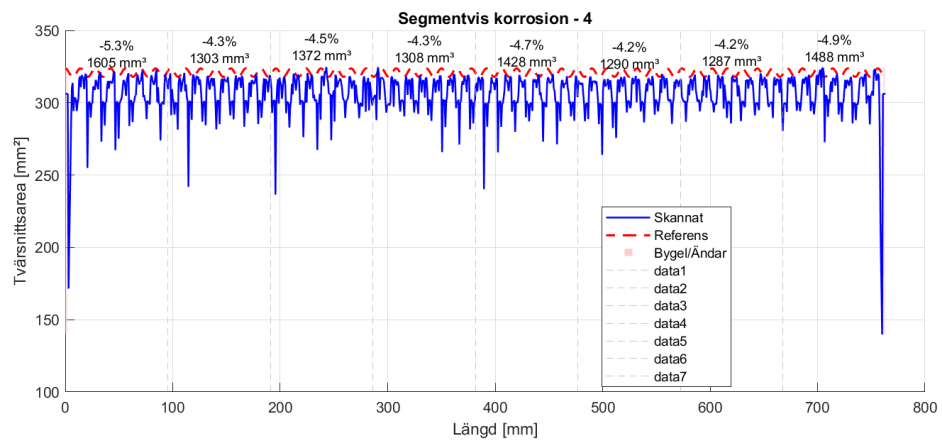
Figur 17 – Bilder av punktmoln från skanningen av armeringsjärnen i VXelements. Egen Bearbetning.

## 4.4 MATLAB

För att kvantifiera tvärsnittsarean samt den volymetriska förlusten hos de korroderade armeringsjärnen utvecklades en MATLAB-kod med hjälp av OpenAI's ChatGPT 4o modell. Skriptet importerade data i form av text-filer från 3D-skanning, vilket omvandlades till geometri- och volymdata. Därefter beräknades den procentuella förlusten genom jämförelse med ett genererat referensjärn.

Referensgeometrin skapades genom att be MATLAB identifiera den högsta punkten på armeringsjärnet och använda det som ribbhöjd, samt den maximala höjden mellan ribborna, i syfte att rekonstruera en idealiserad, icke korroderad profil. Denna princip möjliggjorde en förenklad modellering av ett opåverkat armeringsjärn med så hög geometrisk överensstämmelse som möjligt.

Jämförelsen mellan det skannade och det rekonstruerade referensjärnet utfördes sedan, vilket genererade ett mått på den procentuella materialförlusten orsakad av korrosion. Resultaten presenteras i form av diagram för att tydliggöra variationer i förlust längs järnets längd. Koden avlägsnade även oönskade partiklar samt byglar för att minimera oönskade inskannade data vilket hade kunnat påverka resultaten. Nedan syns ett exempel på en graf som visar segmentvis korrosion för ett av armeringssegmenten.



Figur 18 - Graf över segmentvis korrosion för segment 4 av 40 (vit). Egen Bearbetning.



Figur 19 - Foto: Ruben Bång Brunström och Gustav Ekdahl, närbild av korrosionsangrepp på armeringsjärnen.

## 5 Resultat

I följande kapitel presenteras de resultat som erhållits genom den praktiska delen av examensarbetet, två armeringsjärn från en marin betongpåle har analyserats med avseende på armeringskorrosion. Armeringen avlägsnades från betongpålen, som uppskattades till att ha befunnits i bruk i 50 - 60 år, vilket medför att resultat speglar långtidsexponering i en aggressiv marin miljö. Armeringsjärnen har skannats med en 3D-scanner i en upplösning på 0,2 mm, och resultatdata har därefter bearbetats i MATLAB för att kvantifiera förlust i tvärsnittsarea, volym och identifiering av särskilt korroderade zoner. Syftet är att ge en detaljerad beskrivning av eventuella skadors omfattning och fördelning längs järnen, samt möjliggöra jämförelse mellan dimensioner och järn.

### 5.1 Resultat från Järn 1

I detta kapitel presenteras resultaten för järn 1.

#### 5.1.1 Översiktlig korrosionsnivå

De två järnen analyserades i två sektioner vardera, där den ena sektionen hade en ursprunglig diameter på 20 mm och den andra 25 mm. Den genomsnittliga korrosionsförlusten i järn 1 varierade mellan 3,5% i de minst angripna zonerna och 6,2% i de mest påverkade zonerna, med lokala toppar uppemot 8% - 9%, vilket tyder på gropfrätning i dessa områden, dock är gropfrätning över hela järnet minimal. Den genomsnittliga korrosionsförlusten i tvärsnittsarea för hela järnet beräknades till 4,8%. Korrosionsangreppen var förhållandevis jämnt fördelade men med något högre intensitet i den centrala delen av järnet.

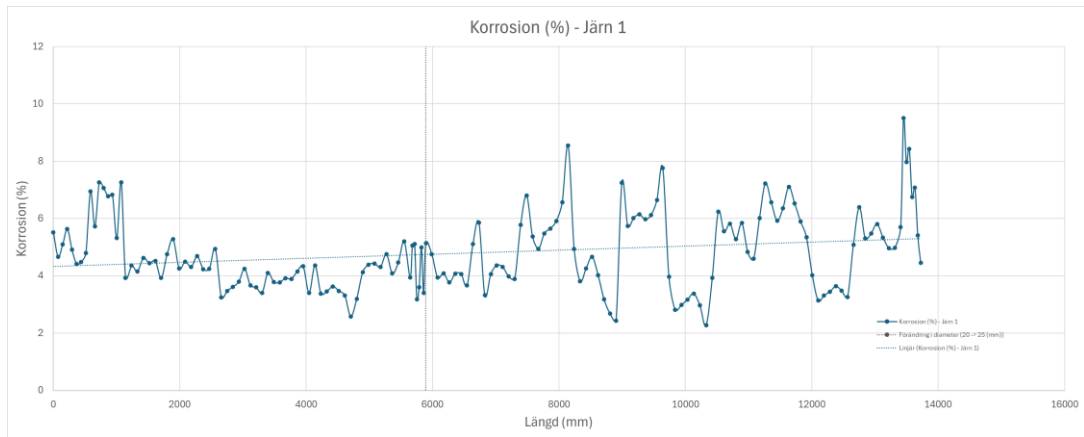
#### 5.1.2 Volymförlust och fördelning

Den största absoluta volymförlusten uppmättes i de segmenten med ursprungsdiameter på 25 mm. Även om de grova segmenten hade högre absolut förlust, var den relativa förlusten i förhållande till ursprunglig volym, mer jämnt fördelad mellan de två dimensionerna. Totalt sett uppvisade järnet ett relativt jämnt fördelat skademönster utan abrupta variationer i förlust längs längdaxeln.

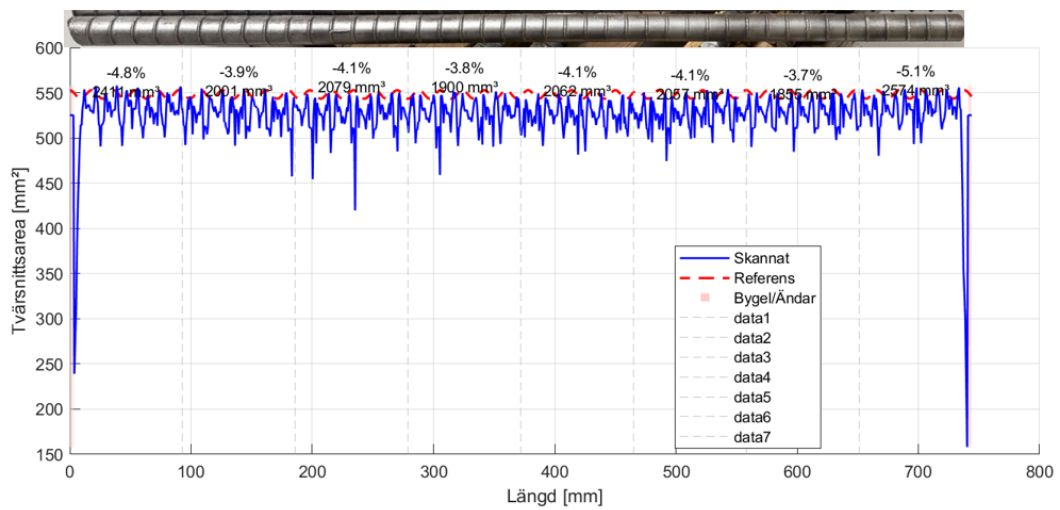
#### 5.1.3 Längdprofil och grafisk representation

Korrosionsprofilen längs järnets längd visar successiva variationer utan större avbrott, med en viss ökning mot den delen av järnet med 25 mm i diameter. Graferna visar flera toppar som överstiger 6,2% förlust, medan mellanliggande sektioner håller sig kring medelvärdet. Förändringar i profilens jämnhet antyder förekomst av zoner med mer koncentrerad skada.

Nedan redovisas två grafer, den första redovisar korrosionsförlusten i procent över hela järn 1, den andra grafen visar segmentvis korrosion över ett Ø20 mm segment i järn 1. Data för den första grafen är exporterad från MATLAB till Excel, den andra grafen är producerad direkt utav MATLAB skriptet. Samtliga grafer över segmentvis korrosion återfinns i bilagor.



Figur 20 - Korrosionsförlust (%) för Järn 1 (vit), den grå-streckade linjen markerar dimensionsändringen från Ø20mm till Ø25mm. Egen Bearbetning.



Figur 21 - Segmentvis korrosion över segment 10 av 40, del av järn 1 (vit). Egen Bearbetning.

## 5.2 Resultat från Järn 2

I detta kapitel presenteras resultaten för järn 2.

### 5.2.1 Översiktlig korrosionsnivå

Järn 2 uppvisade en högre genomsnittlig korrosionsgrad än järn 1. Den genomsnittliga korrosionsförlusten varierade här mellan 3,7% och 7,5%, med en genomsnittlig förlust på 5,6% över hela järnet. Lokala toppar uppmättes till nästan 10%. De högsta värdena befann sig främst i sektionerna med 20 mm i diameter. I motsats till järn 1 var fördelningen av korrosion i järn 2 ojämna, med tydliga toppar och lågpunkter över hela järnet. Det noterades även större omfattning av gropfrätning jämfört med järn 1.

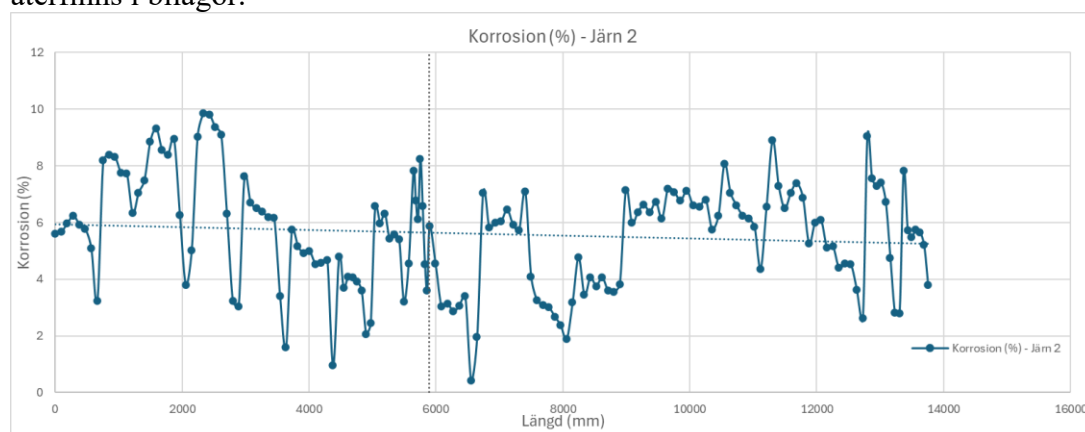
### 5.2.2 Volymförlust och fördelning

För järn 2 uppmättes den största absoluta förlusten i de segment med ursprungsdiameter på 20 mm, men totalt sett var förlusten något lägre jämfört med järn 1. I vissa segment var förlusten högre under korta längder, det var alltså högre enskilda toppar av korrosion på järn 2. Fördelningen av korrosionsförlust varierade även mer mellan segmenten jämfört med järn 1.

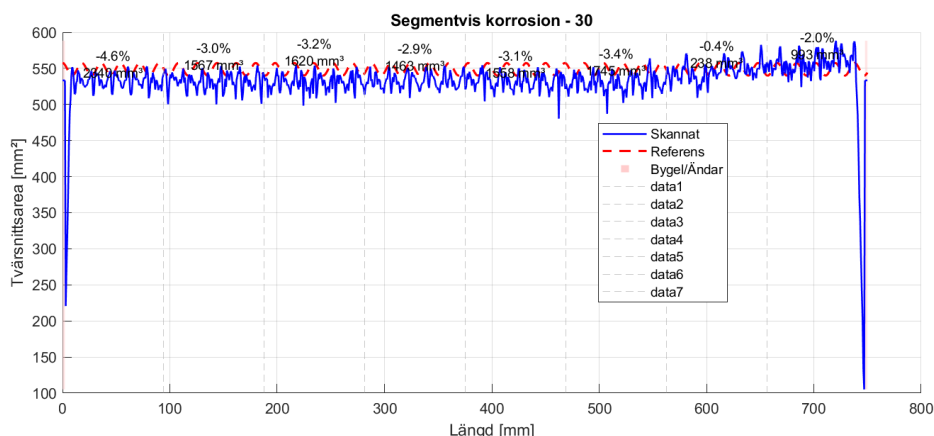
### 5.2.3 Längdprofil och grafisk representation

Korrosionsprofilen visade flera toppar över 7,5% förlust, särskilt i mittsektionen. Vissa områden uppvisade stor variation mellan höga och låga värden, vilket resulterade i en mer ojämna profil jämfört med järn 1. Det fanns flera tydliga zoner där korrosionen var koncentrerad inom begränsade längdintervall.

Nedan redovisas två grafer, den första redovisar korrosionsförlusten i procent över hela järn 2, den andra grafen visar segmentvis korrosion över ett Ø25 mm segment i järn 2. Data för den första grafen är exporterad från MATLAB till Excel, den andra grafen är producerad direkt utav MATLAB skriptet. Samtliga grafer över segmentvis korrosion återfinns i bilagor.



Figur 22 - Korrosionsförlust (%) för Järn 2 (rosa), den grå-streckade linjen markerar dimensionsändringen från Ø20mm till Ø25mm. Egen Bearbetning.

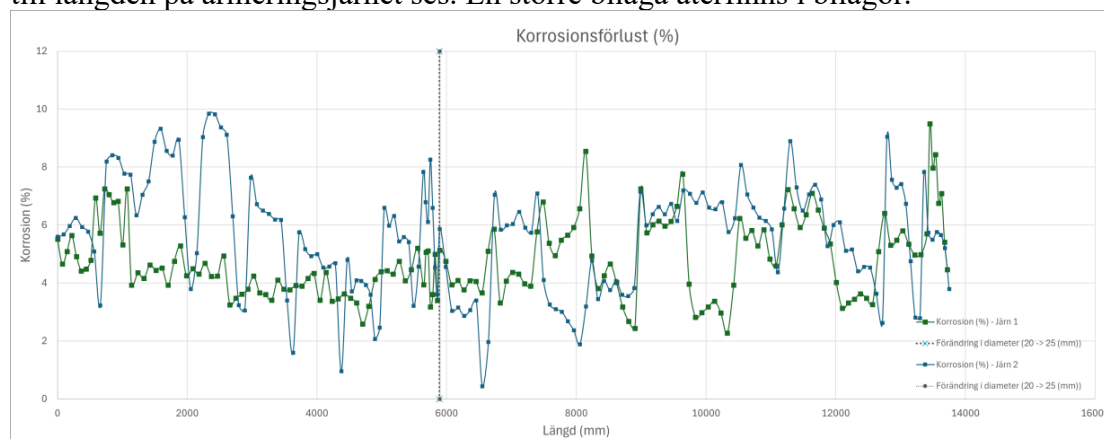


Figur 23 - Segmentvis korrosion över segment 30 av 40, Järn 2 (rosa). Egen Bearbetning.

### 5.3 Sammanställning och jämförelse

Jämförelse mellan de två armeringsjärnen visar att järn 2 uppvisade högre genomsnittlig korrosion samt fler lokala toppar i förlustprocent. Järn 1 hade mer jämnt fördelad skada med något färre extrema värden. Båda järnens resultat visar korrosionsprofiler som möjliggör identifiering av zoner med förhöjd nedbrytning längs längdaxeln. Totalförlusterna ligger i samma storleksordning för båda järn, vilket bekräftar förekomsten av utbredd men varierande korrosionspåverkan i de undersökta proverna. Gropfrätning på båda järnen var minimal, men med större omfattning över järn 2 än järn 1.

Nedan redovisas data för båda järnen i en graf, där mängden korrosion (%) i förhållande till längden på armeringsjärnet ses. En större bilaga återfinns i bilagor.



Figur 24 - Graf över korrosionsförlust (%) för både järn 1, i grönt, och järn 2, i blått. Den grå-streckade linjen markerar dimensionsändringen från Ø20mm till Ø25mm. Den gröna linjen representerar järn 1 och den blåa representerar järn 2. Egen Bearbetning.

## 6 Diskussion

Följande kapitel syftar till att analysera, tolka och diskutera resultaten för detta arbete. Resultaten diskuteras i förhållande till deras betydelse för betongkonstruktioners bärförmåga, livslängd och underhållsbehov med fokus på marina miljöer och hamnkonstruktioner.

### 6.1 Tolkning av resultat

Den genomsnittliga tvärsnittsareaförlusten för båda järnen, uppmätt till ca 4,8% och 5,6%, ligger i ett intervall där påverkan på armeringens kapacitet kan vara betydande. Lokala toppar på över 8% indikerar även potentiella kritiska zoner. Enligt en studie av Murtadha K. Lafi et al (2021), där kvadratiska armerade betongpelares bärförmåga testades vars armering hade korroderat 8%, minskade den maximala bärförmågan med upp till ca 22,5%. Tuutti (1982) nämner också att små materialförluster kan leda till oproportionerliga reduktioner i konstruktiv kapacitet, särskilt i närvaro av sprickbildning och förhöjda dragspänningar. Även om järnen i denna rapport inte uppnådde en korrosion på 8% som i Murtadhas studie, så kan det antyda på att bärförmågan för betongelementet var något försämrad.

Vid inspektion av armeringen noterades gropfrätning i liten utsträckning. Även om endast en begränsad mängd gropfrätning observerades är det viktigt att beakta dess potentiella effekt på betongelementet. Enligt Zandi Hanjari et al. (2011) kan lokal korrosion, trots låg total tvärsnittsareareducering, kraftigt reducera tvärsnittet lokalt och koncentrera spänningar. Även mindre gropfrätningar kan påverka bärförmågan oproportionerligt mycket. Zandi Hanjari nämner därav att det är av stor vikt att gropfrätning dokumenteras under tillståndsbedömningar. Liu et al. (2025) visar dessutom att varierande gropfrätning kan försämma balkars styvhet vid dynamisk belastning och kan leda till ökade deformationer. Liu et al:s studie visade ökad kvarstående nedböjning med upp till 64% vid 20% korrosion, även brottmekanismen förändrades.

I denna rapports fall bedöms påverkan av just gropfrätning som marginell. Dock var flera toppar lokalt över 8% vilket kan tyda på potentiellt kritiska zoner. Sådana koncentrationer, även om de är få, kan fungera som initieringspunkter för sprickbildning eller brott, särskilt under belastning eller i kombination med andra skador. Det är därför viktigt att särskilja mellan gropfrätning och generell korrosion vid bedömning av kapaciteten, samt att lokala variationer i korrosionen vägs in.

### 6.2 Miljöexponering och korrosionsmekanismer

Den undersökta pålen har varit exponerad för en marin miljö, klassificerad enligt EN206-1 som XS3, under en period om cirka 50 - 60 år. Särskilt skvalpzonen, som är en mycket aggressiv exponeringsklass, har spelat en betydande roll i denna exponering. Den varierande miljön, där lera förekommer i vissa zoner och där andra delar av pålen har varit i kontakt med vatten samt en ytterst liten del luft under isskyddet, innebär att olika korrosionsmekanismer kan ha varit aktiva. I lera, där syretillgången är begränsad, gynnar förhållandena anaerobisk korrosion, svartrostbildning och sulfatreducerande bakterier.

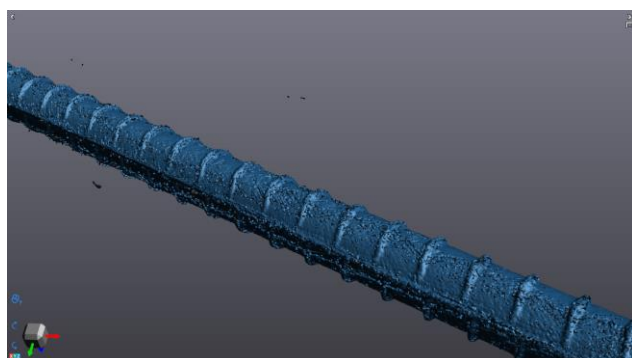
En stor del av pålen har varit innesluten i lera, vilket tyder på att den syrefattiga miljön troligtvis haft en skyddande effekt mot syreberoende korrosionsprocesser. Trots detta påvisas korrosionsangrepp, vilket tyder på att flera olika korrosionsmekanismer kan ha samverkat, exempelvis kloridinitierad och karbonatiseringsinducerad korrosion.

Förekomsten av svartrost (magnetitbildning) och anaerob korrosion kan inte heller uteslutas. Eftersom armeringsjärnen har sandblästrats är det svårt att med säkerhet fastställa den dominerande korrosionsmekanismen enbart genom visuell inspektion. Det observerades dock att den sida av järnet som vetter mot betongens täcksikt uppvisade de mest omfattande skadorna. Eftersom pålen har utrustats med isskydd bedöms ingen del av de analyserade järnen ha varit belägen i en skvalpzon, utan endast i kontakt med lera och vatten. De relativt jämnt fördelade korrosionsangreppen längs armeringsjärnen tyder på en likartad exponering och ett homogent korrosionsförlopp.

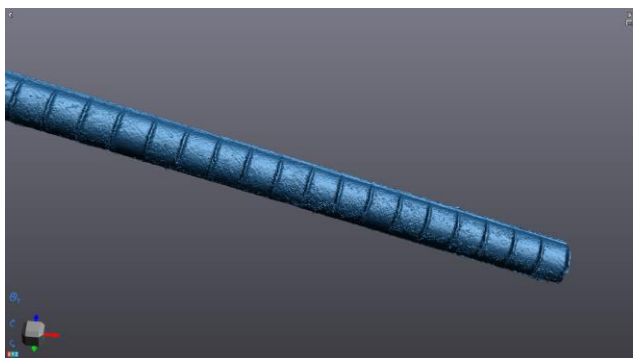
### 6.3 Osäkerheter

Den metod som tillämpats i detta examensarbete, bestående av segmentering (kapning), blästring, 3D-skanning och efterföljande analys i MATLAB, har visat sig vara ett hjälpsamt verktyg för att kvantitativt bedöma korrosionsnivåerna i armerade betongkonstruktioner. Det möjliggör en detaljerad profil av korrosionen vilket är särskilt värdefullt vid bedömning av riskzoner som kan påverka den strukturella integriteten.

Samtidigt finns det flera osäkerhetsmoment, kopplade till stegen i processen, som är viktiga att nämna. Segmentering av armeringsjärnen medför en risk att korrosionsmönstret påverkas vid den punkt som kapning skedde. Trots att i detta fall kapytorna inte ingår i analysen, kan skador vid ändytorna påverka helhetsintrycket. Vidare kräver även skanningen noggrann stabilitet och korrekt kalibrering, då minsta rörelse av riggen eller en felaktig referenspunkt kan ge avvikelser i 3D-modellen. Även om mjukvaran VXelements erbjuder hög upplösning innebär arbetet med långa, cylindriska armeringsjärn utmaningar i form av skuggning eller visuell blockering av ytor. Exempelvis påverkades en viss del av järnen under skanningen i form av en större mängd oönskade partiklar mot botten av segmenten vilket ledde till en, ytterst liten, ökning i tvärsnittsarea. Detta visas i bilagorna för segmentvis korrosion, samt i bilden nedan över segment 22.



Figur 25 - Bild från VXelements av järnsegment 22 efter skanning. Egen Bearbetning.



Figur 26 - Bild från VXELEMENTS över järnsegment 22 där järnet är städat, men uppvisar större tvärsnittsarea än rimligt, se bilaga "segmentvis korrosion – 22". Egen Bearbetning.

MATLAB-skriptet är anpassat för att rensa oönskade data och identifiera referensprofilen, men bygger på antaganden om en "perfekt" ursprungsgeometri. Referensjärnets konstruktion grundas i identifiering av maximala punkter, vilket kan innebära viss överskattning av ursprungsdiametern om ytan är ojämn eller skadad från början. Detta kan i sin tur leda till att den faktiska korrosionsförlusten antingen under- eller överskattas. Även digital borttagning av byglar kan påverka noggrannheten om rester kvarstår.

Det bör även understrykas att en viss del av de identifierade geometriavvikelseerna inte nödvändigtvis är orsakade av korrosion. Under projektet så noterades att vissa deformationer, skador och avvikelser på armeringsjärnen inte hade uppstått på grund av korrosion, utan kunde härledas till orsaker som till exempel mekaniska skador från tillverkning, installation, vattenbilning eller extraktion från betongen. Dessa utgjordes av djupare deformationer med oregelbundna mönster, sannolikt orsakade av mekanisk påverkan som nämnt. Dessa skador kan feltolkas som gropfrätning i analysen, men har annan uppkomst och bör särskiljas vid tolkning av mätdata. Ett exempel på en sådan skada kan ses i figur 27 nedan.



Figur 27 - Foto: Ruben Bång Brunström och Gustav Ekdahl, skador på armeringsjärnen som inte uppstått i följd av korrosion.

Ytterligare en källa till osäkerhet är att analysen bygger på ett begränsat provantal. I rapporten har endast två armeringsjärn analyserats från en enskild påle, vilket ger en god uppfattning om korrosions-statusen i aktuell påle, men låg generaliserbarhet till andra pålar eller liknande konstruktioner. Det är därav rimligt att se denna metod och

rapport som komplement till en bredare kartläggning av flera järn eller punktvis mätning.

Metoden som helhet ger trots detta ändå ett noggrant och repeterbart tillvägagångsätt med hög detaljeringsgrad. Resultaten kan med fördel komplettera andra typer av tillståndsbedömningar och inspektioner, särskilt i projekt där man har som avsikt att införa fiberoptiska sensorer. Kombinationen av geometriska data och realtidsövervakning av deformationer skulle kunna ge en bättre helhetsbild över korrosionsskadan.

För att vidare utveckla processen bör metoden testas på fler prover med tillhörande hållfasthetstester, samt att referensprofiler utgår ifrån ett icke korroderat, identiskt järn genom till exempel digitala CAD-mallar.

## **6.4 Praktiska konsekvenser och åtgärdsbehov**

För att bedöma betongkonstruktioners livslängd i marina miljöer utförs idag hammninspektioner med hjälp av visuella kontroller, provtagning och metoder enligt kapitel tre. Denna studie syftar till att förenkla och förbättra denna inspektionsprocess på ett repeterbart och tillförlitligt sätt. Detta genom kombination av datainsamling från befintliga, korroderade betongkonstruktioner samt installation av fiberoptiska sensorer för kontinuerlig övervakning. Eftersom det ofta är svårt att visuellt uppskatta omfattningen av korrosionsskador finns möjligheten att genom korrelera töjningsdata från fiberoptiken med tidigare insamlade data om korrosion och konstruktionens tillstånd, så finns potentialen att i framtiden bedöma en konstruktions tillstånd enbart genom sensoravläsning, utan behov av omfattande inspektioner.

Eftersom många anläggningar är omfattande och består av ett stort antal konstruktionsdelar är det inte praktiskt genomförbart att inspektera varje enskild del. Därför upprättas en inspektionsplan där urvalet baseras på faktorer som byggnadsår, livslängd, säkerhetsklassning samt exponering för belastningar och miljöpåverkan. Byggnadsdelar som anses mer kritiska prioriteras och omfattas av högre krav på inspektionsfrekvens och noggrannhet. Genom att använda fiberoptiska sensorer möjliggörs tillståndsövervakning av fler komponenter, vilket ger en mer heltäckande och kontinuerlig bedömning av anläggnings status.

## 7 Slutsats

Syftet med detta examensarbete har varit att analysera och kvantifiera armeringskorrosion i en marin betongpåle genom avancerad 3D-skanning och databehandling. Arbetet syftar till att ge en bättre förståelse för omfattningen och fördelningen av korrosion i armerade betongkonstruktioner som befunnit sig i en aggressiv miljö under längre tid, samt att utvärdera metodens potential inför framtida användning vid hamninspektioner och tillståndsbedömning.

Två armeringsjärn extraherades ur en påle som befunnits i drift i cirka 50 till 60 år. Järnen kapades, sandblästrades och skannades med en högupplöst handhållen 3D-skanner. Den insamlade punktmolnsdatan bearbetades i MATLAB för att rekonstruera tvärsnittsarea och volymförlust, samt för jämförelse mot referensgeometrin. Metoden möjliggjorde en detaljerad kartläggning av korrosionens utbredning längs armeringsjärnen.

Resultaten visar att korrosionsförlusten varierade mellan cirka 3,5% och upp till över 9% lokalt, med genomsnittliga förluster på 4,8% respektive 5,6% för de två analyserade järnen. Järn 2 uppvisade större variation och fler lokala toppar i förlustnivåer, vilket kan tyda på ett mer ojämnt exponeringsförhållande. Gropfrätning kunde observeras i viss utsträckning, men var inte dominerande. Studier visar att även relativt små förluster i armeringens tvärsnittsarea kan få betydande konsekvenser när det gäller bärförmåga och hållfasthet, särskilt i kombination med sprickbildning eller dynamiska laster. Det är därav av stor vikt att beakta både genomsnittlig förlust och lokala toppar.

Det hade varit önskvärt för arbetets syfte att göra teoretiska beräkningar över mängden korrosion på armeringen, dock saknas flera av de nödvändiga parametrarna för att kunna genomföra en kvantitativ bedömning och beräkning, exempelvis precis korrosionshastighet, initieringstid, kloridkoncentrationen vid armeringen och betongens diffusionsegenskaper. Det nämns även i Betonghandboken Del 2, 2021 att bedömningar av kvarvarande livslängd hos konstruktioner är särskilt osäkra, då korrosionsberäkningar är komplicerade och beror på ett flertal faktorer.

Metoden som helhet har visat sig vara användbar för att skapa detaljerade profiler av korrosionsskadan. Kombinationen av 3D-skanning och datadriven analys möjliggör en form av visualisering av järnets tillstånd som är svåruppnåeligt med exempelvis punktvis mätning. Samtidigt behöver de diverse osäkerheterna nämnas, som den möjliga påverkan på resultatet av kapning, begränsningar hos skannern och referensmodellen bland annat. Även mekaniska skador från extraktion eller hantering kan i metoden förväxlas med korrosionsangrepp om det inte särskiljs tydligt.

De miljömässiga förhållandena för pålen har sannolikt bidragit till flera samverkande korrosionsmekanismer, exempelvis anaerobisk-, kloridinducerad och karbonatiseringsinducerad korrosion. Den relativt jämna fördelningen av korrosion tyder på en homogen påverkan, troligtvis från en långvarig exponering snarare än punktangrepp. I vissa zoner har miljön dock varierat, exempelvis mellan lera och vatten. Vilket lägger ytterligare vikt i att analysera korrosionen utifrån flera perspektiv.

Arbetet ger viktiga insikter i hur modern mätteknik kan bidra till bättre förståelse och dokumentering av korrosionsprocesser i hamnkonstruktioner. I kombination med andra

verktyg, som fiberoptiska sensorer och hållfasthetsprovning, kan metoden bidra till framtida helhetsbedömningar av konstruktioners tillstånd i marina miljöer. Det finns potential i att använda denna typ av metodik som en del av underhåll, bedömning och livscykelhantering av betongkonstruktioner.

Avslutningsvis visar arbetet att det är möjligt att, med relativt enkla medel, skapa en detaljerad och kvantitativ bedömning av korrosionsskador i befintliga armerade konstruktioner. För att metoden ska kunna tillämpas mer generellt rekommenderas dock fortsatta studier med ett större antal provobjekt, mer empiriska data, validering mot hållfasthetsdata samt förbättring av referensmodeller. Genom att vidare utveckla och standardisera denna metod finns förutsättning att förbättra både tillståndsbedömning och planering av underhåll i framtida infrastruktursystem.

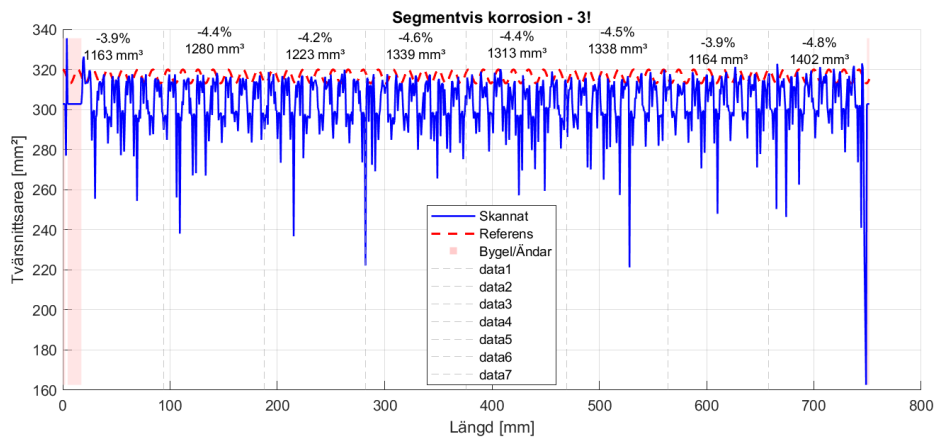
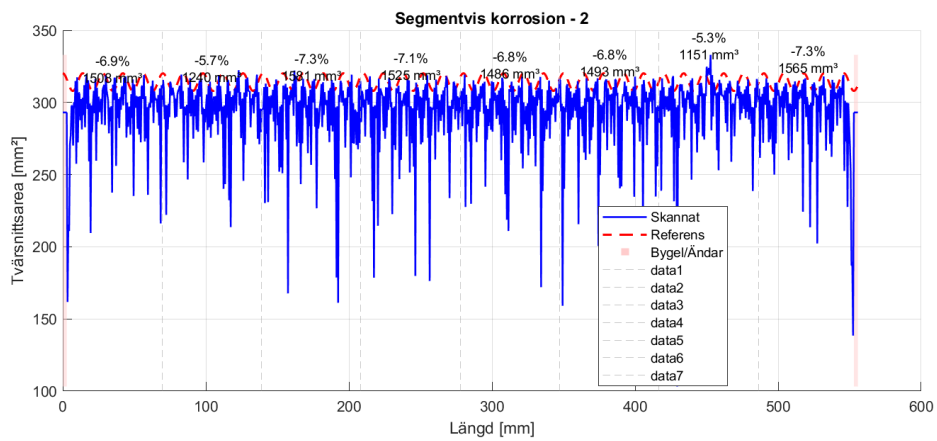
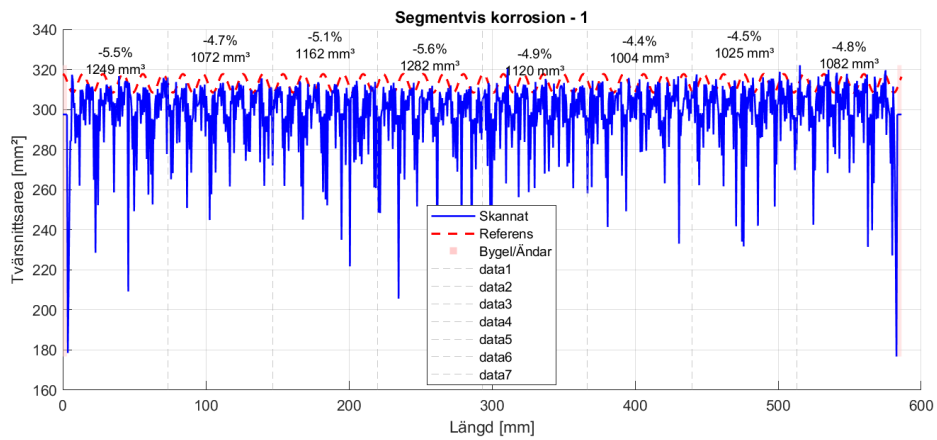
## 8 Referenser

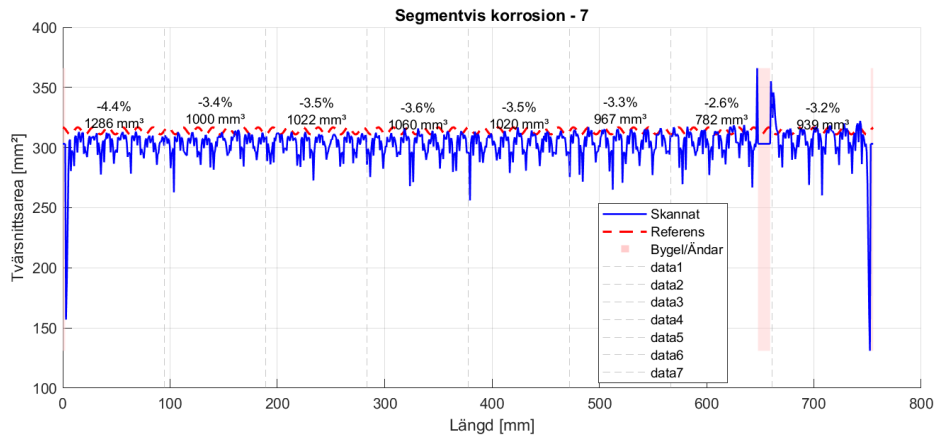
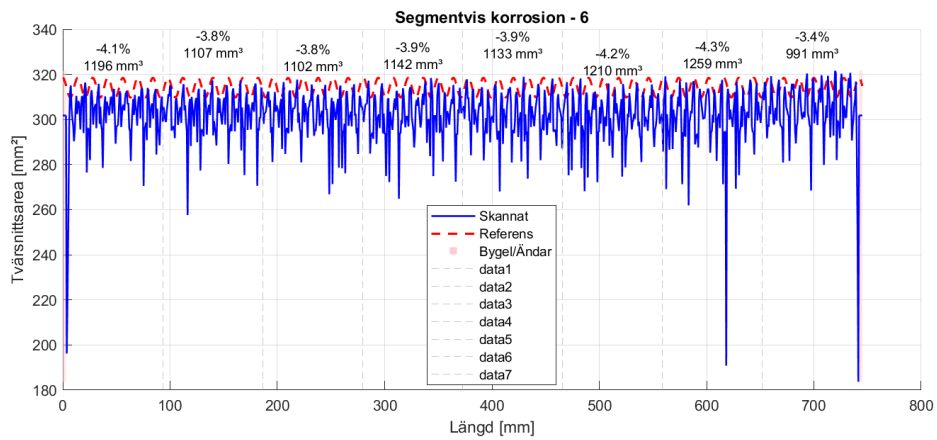
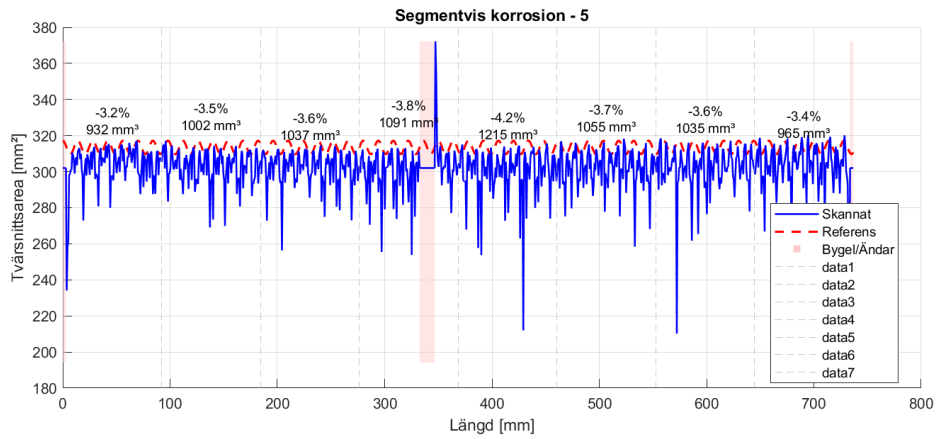
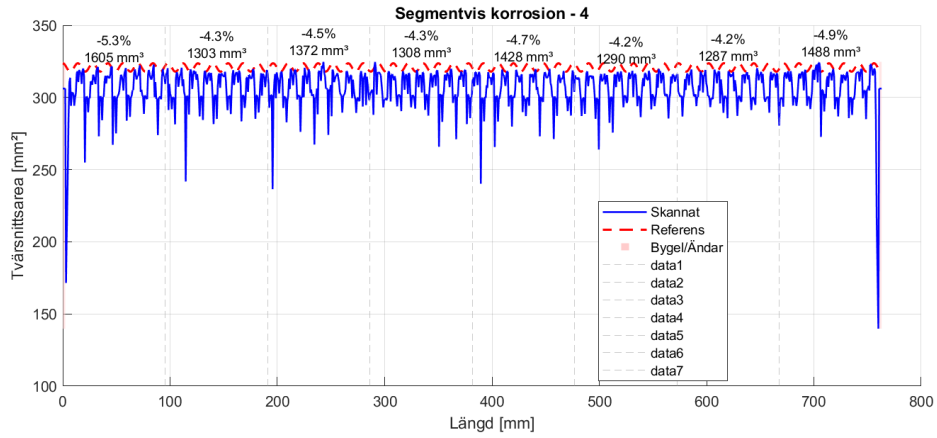
- Armor Protective Packaging. (2025). Hämtat från <https://www.armorvci.com/corrosion/types-of-rust/>
- Bengtsson, Å., Berglars, B., Hultsjö, S., & Romell, J. (2000). *Dimensioneringsanvisningar för slagna slanka stålplåtar*. PÅLKOMMISSIONEN.
- Corrosionpedia. (den 19 06 2024). *Corrosionpedia*. Hämtat från Anaerobic Corrosion: <https://www.corrosionpedia.com/definition/1338/anaerobic-corrosion>
- Esping, O. (05 2025). *Betongföreningen*. Hämtat från [https://betongforeningen.se/fraga\\_experten/fraga-experten-vad-ar-svartrost-2/](https://betongforeningen.se/fraga_experten/fraga-experten-vad-ar-svartrost-2/)
- Euro Inox. (2011). *Rostfritt stål i kontakt med andra metalliska material*. Euro Inox.
- Fagerlund, G. (1992). *Betongkonstruktioners beständighet : en översikt (3:e uppl.)*.
- Ferdinand, P. (2014). *The evolution of optical fiber sensors technologies during the 35 last years and their applications in structure health monitoring*.
- Fernandez, I., Berrocal, C., Almfeldt, s., & Rempling, R. (2022). *Monitoring of new and existing stainless-steel reinforced concrete structures by clad distributed optical fibre sensing. structural health monitoring*.
- Göteborgs Hamn AB. (05 2025). Tillståndsbedömning. Göteborg: Göteborgs Hamn.
- Göteborgs Stad. (den 23 04 2025). *Göteborgs Stad*. Hämtat från IHC BaTMan: <https://tekniskhandbok.goteborg.se/1-om-th/1h-systemstod/1hc-batman/>
- Halling, J. (2019). *Characterization of black corrosion in*. Lund: Lunds Universitet.
- Kungliga Tekniska Högskolan. (2021). *Byggande i betong*. Hämtat från <https://www.byv.kth.se/avd/betong/byggande-i-betong-1.25040>
- Lafi, M. K. (2021). *Effect of Rebar Corrosion Level on Behaviour of Reinforced*. Baghdad: IOP Publishing Ltd.
- Liu, Y., Hao, Y., Hao, H., Li, H., & Zhou, Y. (2025). *Dynamic response of concrete beams considering spatial variability of pitting corrosion damages subjected to impact loads*. Guangzhou: Elsevier Ltd.
- Nilsson, L.-O. (2021). Armeringskorrosion. i S. Byggtjänst, *Betonghandbok Material. Del 2* (ss. 761-789). Svensk Byggtjänst.
- ScienceDirect. (u.d.). *ScienceDirect.com*. Hämtat från Sulfate-Reducing Bacteria: <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/sulfate-reducing-bacteria>
- SGU. (den 09 01 2024). *Sveriges geologiska undersökning*. Hämtat från SGU: <https://www.sgu.se/anvandarstod-for-geologiska-fragor/bedomningsgrunder-for-grundvatten/grundvattnets-kvalitet--oorganiska-amnen/sulfat/>
- Svensk Byggtjänst. (2021). *Betonghandbok Material. Del 2*. Svensk Byggtjänst.
- Svensk Byggtjänst. (2021). Hållfasthet, Betongkonstruktioners beständighet och livslängd. i *Betonghandbok Material. Del 2* (ss. 27-150, 641-684). Svensk Byggtjänst.
- Trafikverket. (2020). *Inspektion av bro och övriga byggnadsverk*.
- Tuutti, K. (1982). *Corrosion of steel in concrete*. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute.
- Zandi Hanjari, K., Kettil, P., & Lundgren, K. (2011). *Analysis of Mechanical Behavior of Corroded Reinforced Concrete Structures*. Göteborg: Chalmers Publication Library.
- Zhang, X., Long, L., Broere, W., & Bao, x. (2025). *Smart sensing of concrete crack using distributed fiber optics sensors: Current advances and perspectives*. .
- Sveriges geologiska undersökning. (granskad 2024-01-09)

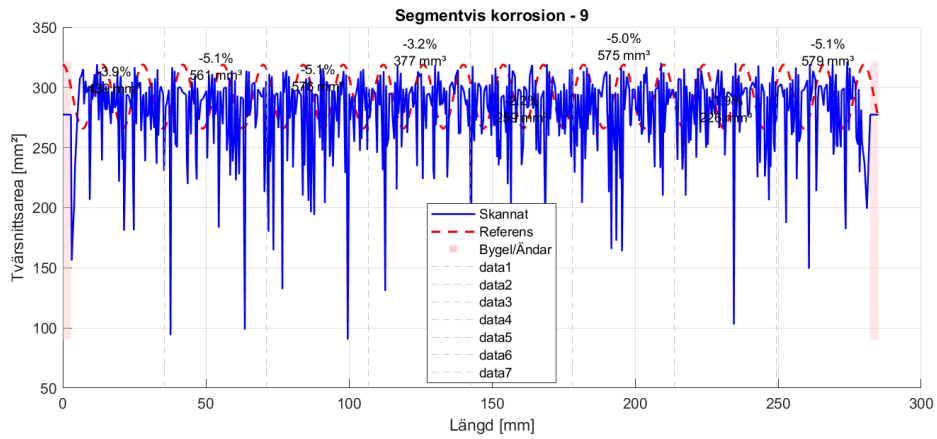
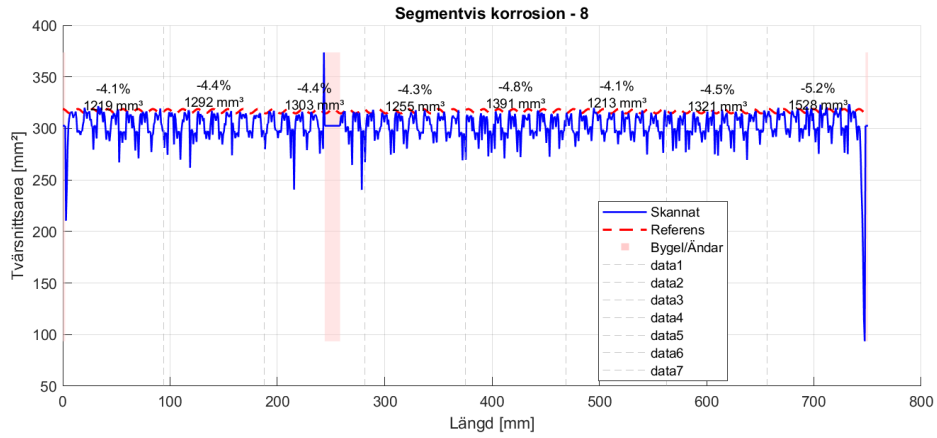
<https://www.sgu.se/anvandarstod-for-geologiska-fragor/bedomningsgrunder-for-grundvatten/grundvattnets-kvalitet--oorganiska-amnen/sulfat/>

# 9 Bilagor

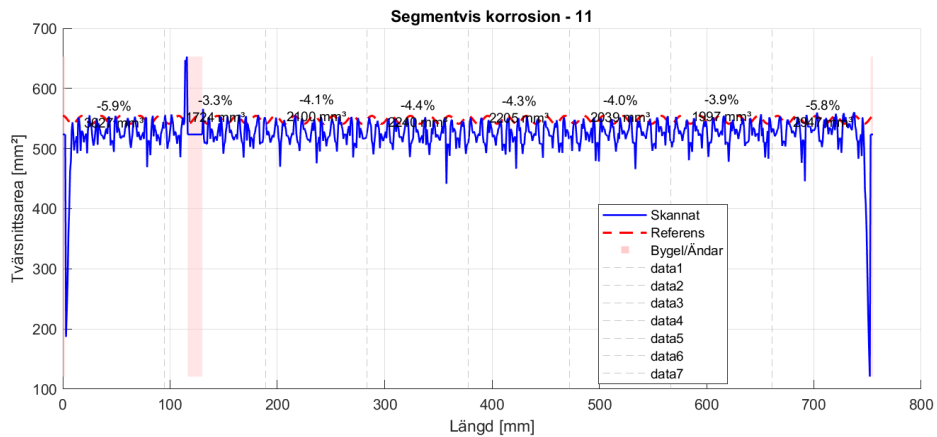
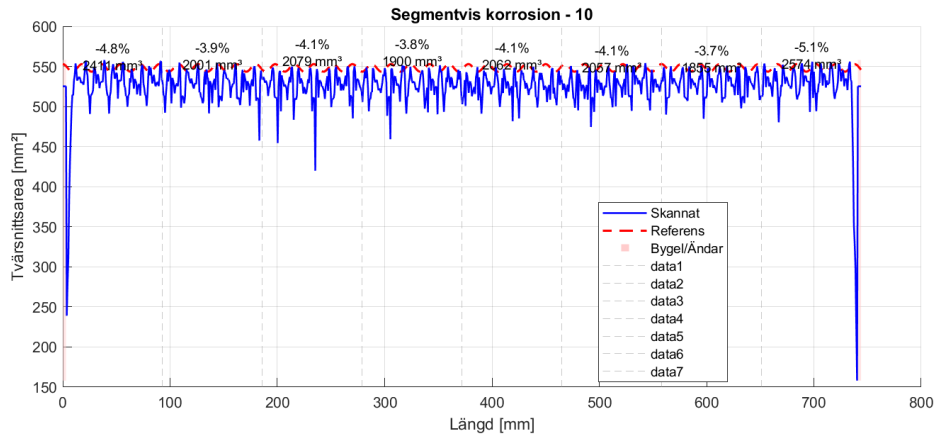
## 9.1 Segmentvis korrosion - Järn 1, Ø20 mm

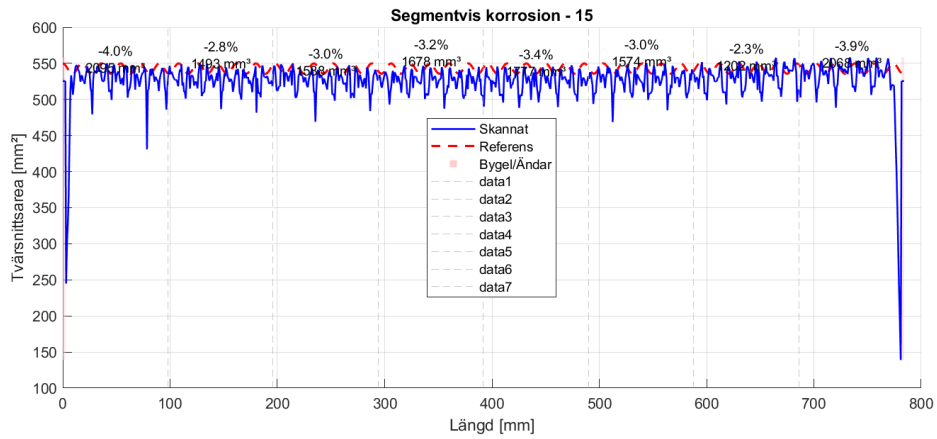
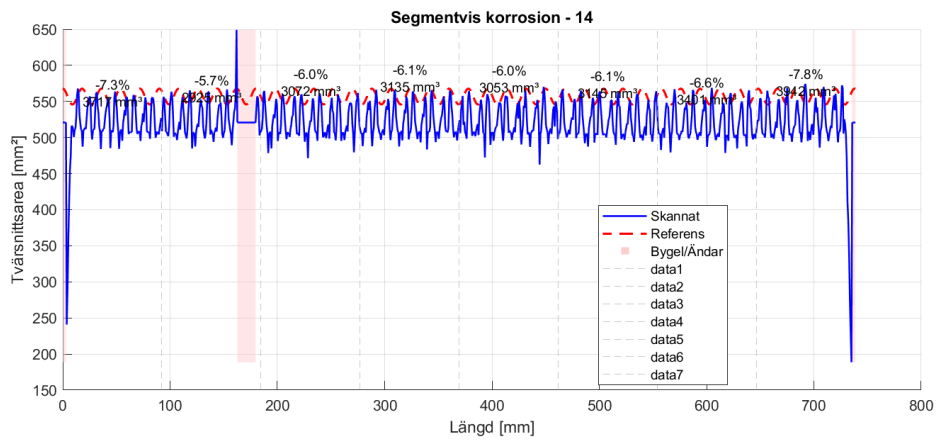
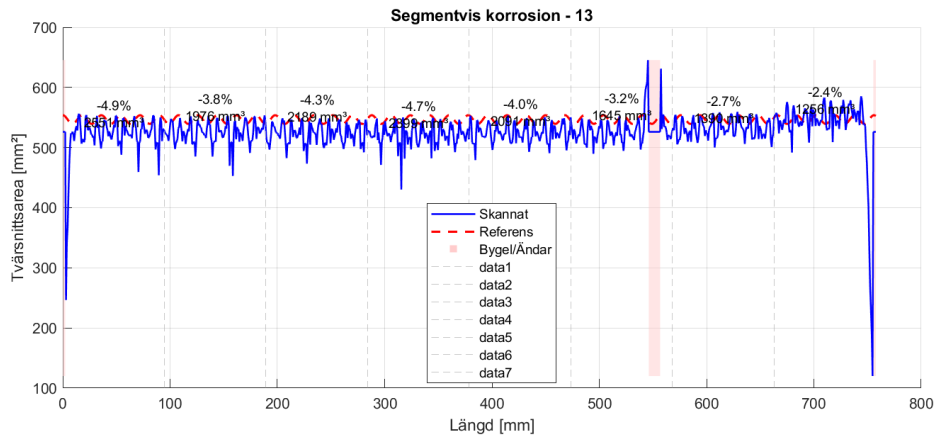
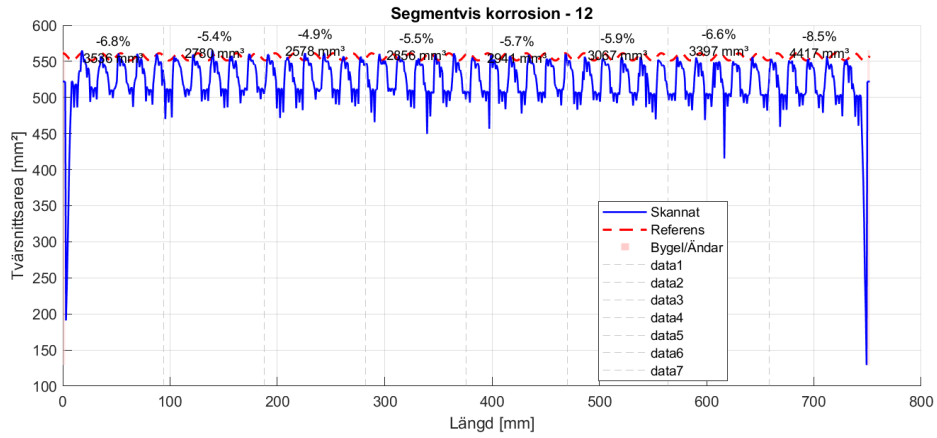


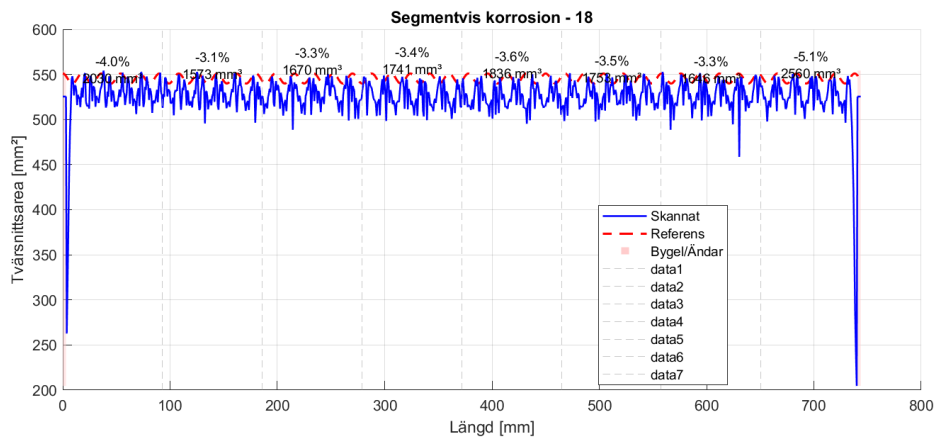
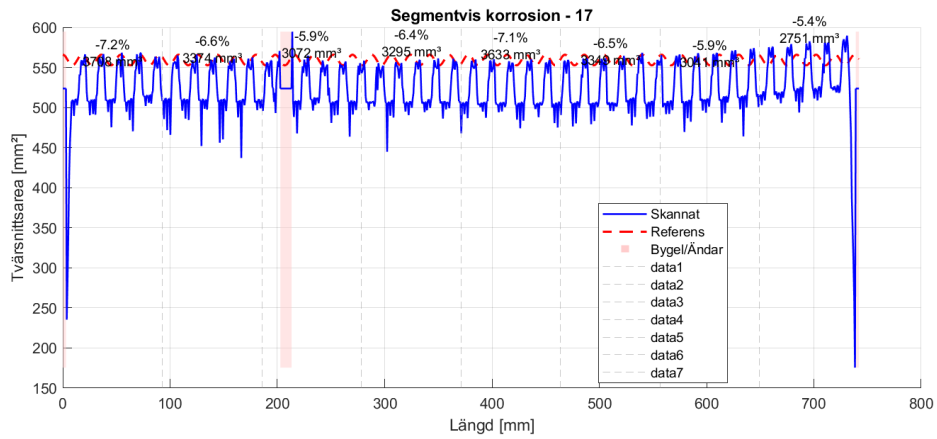
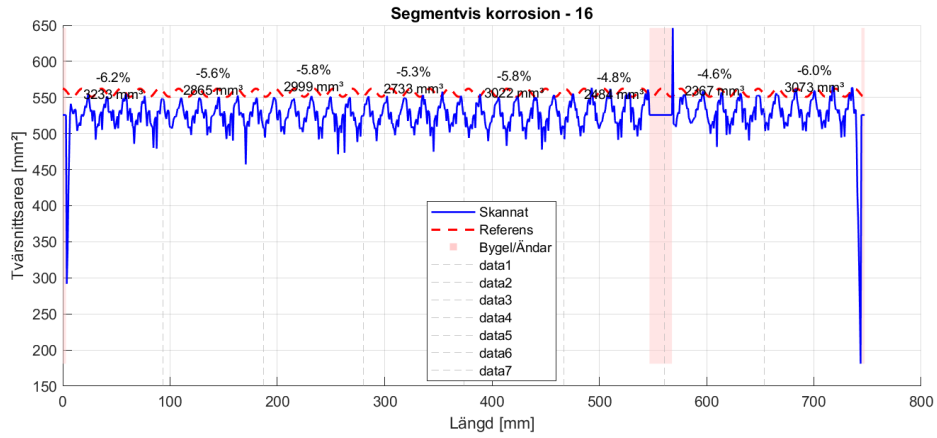


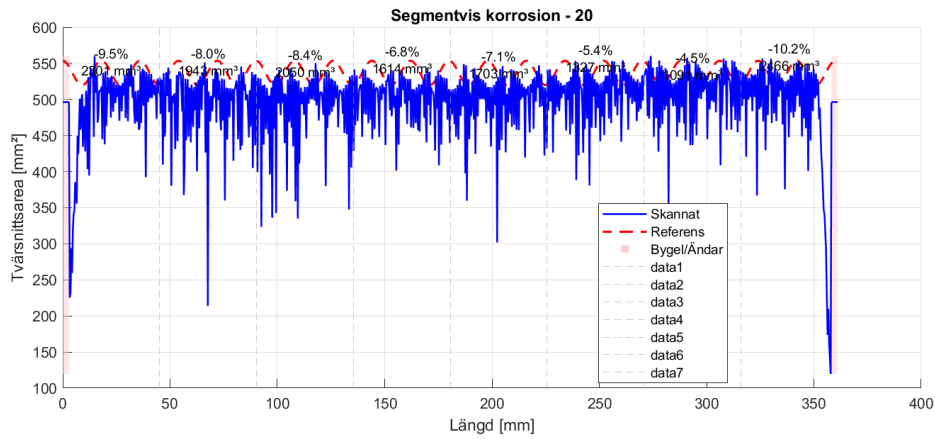
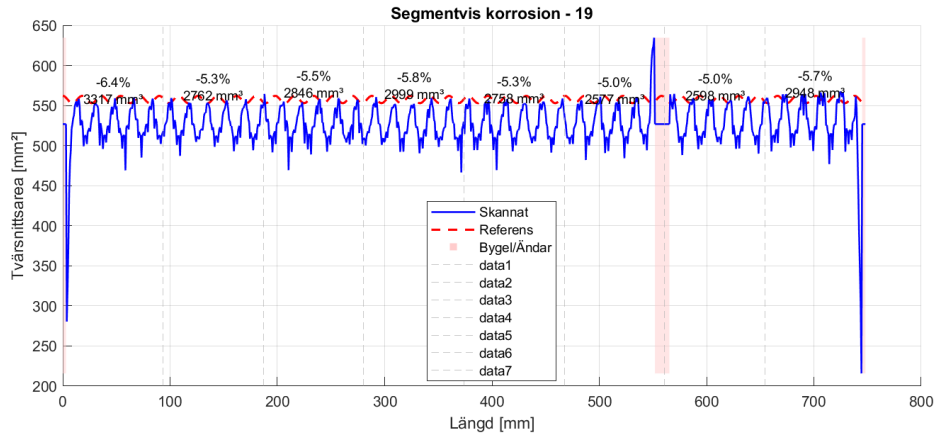


## 9.2 Segmentvis korrosion - Järn 1, Ø25 mm

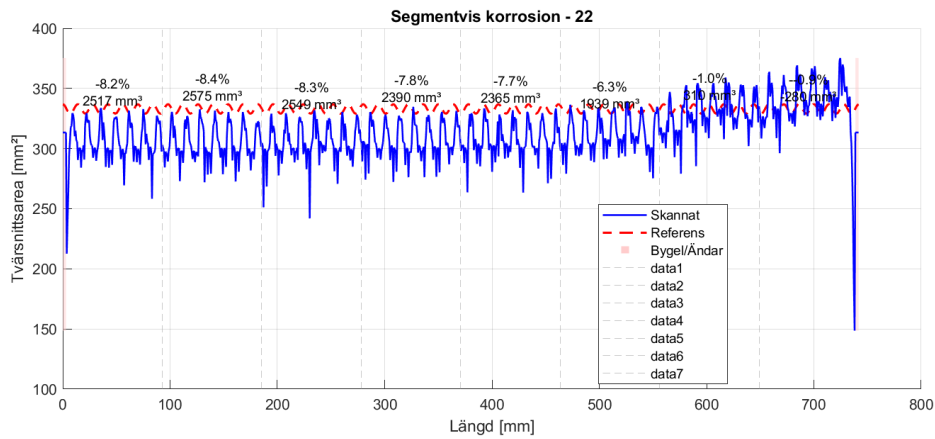
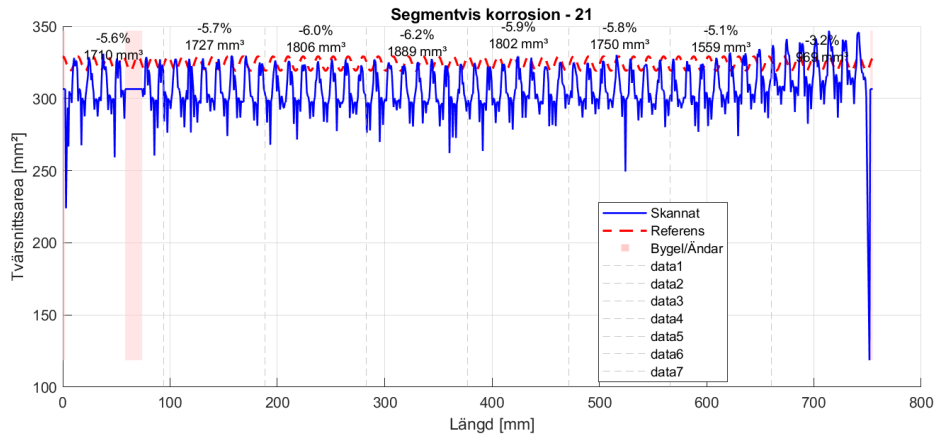


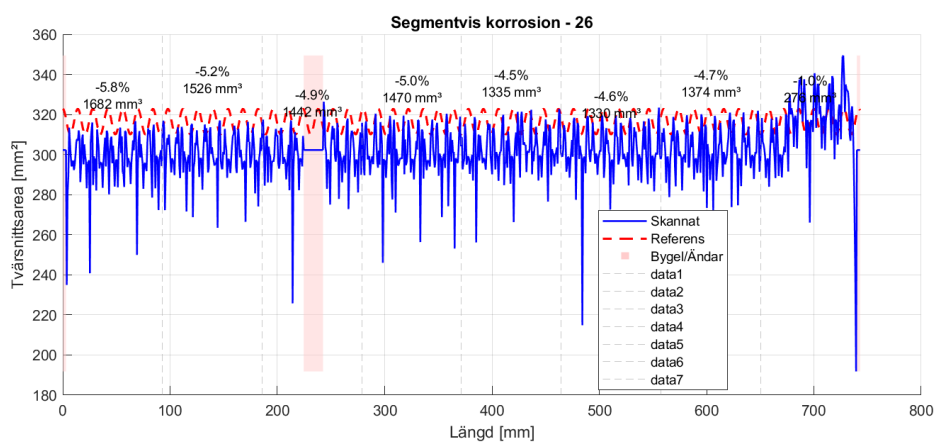
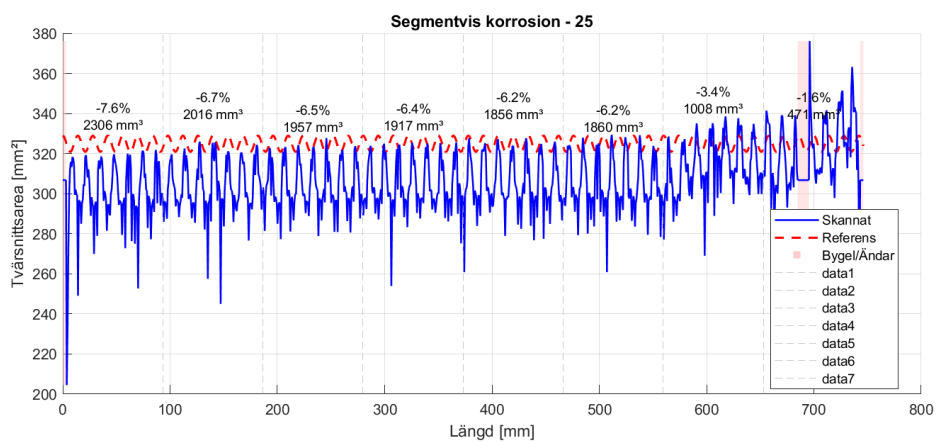
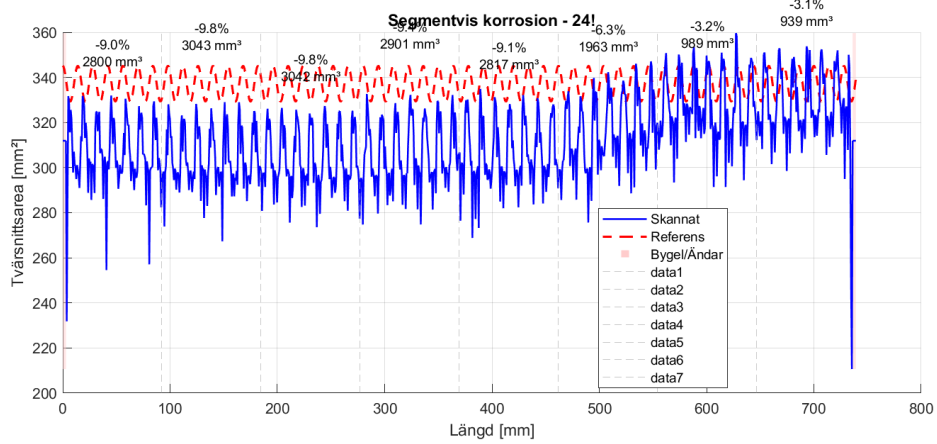
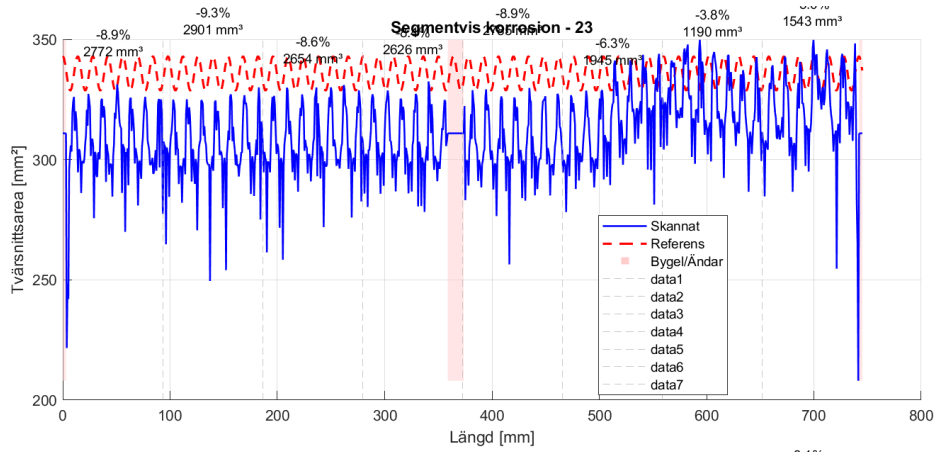


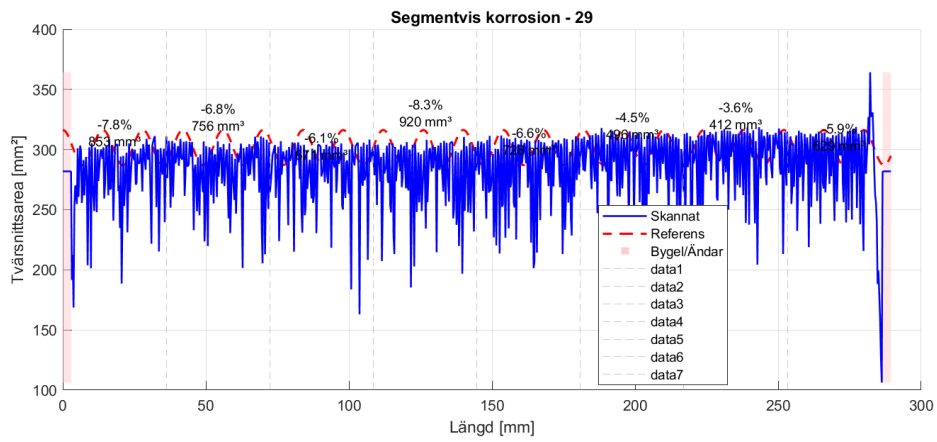
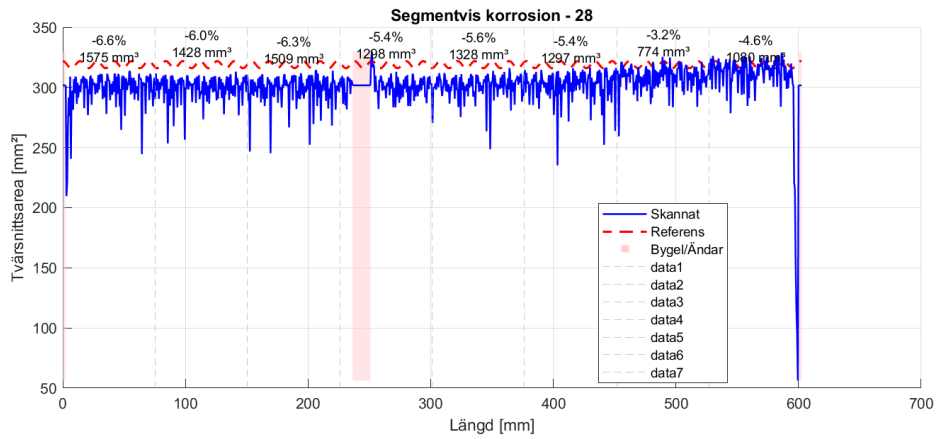
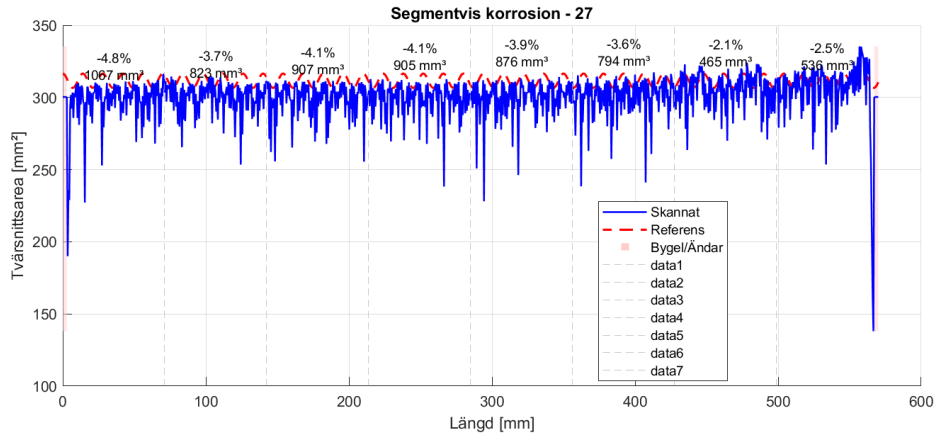




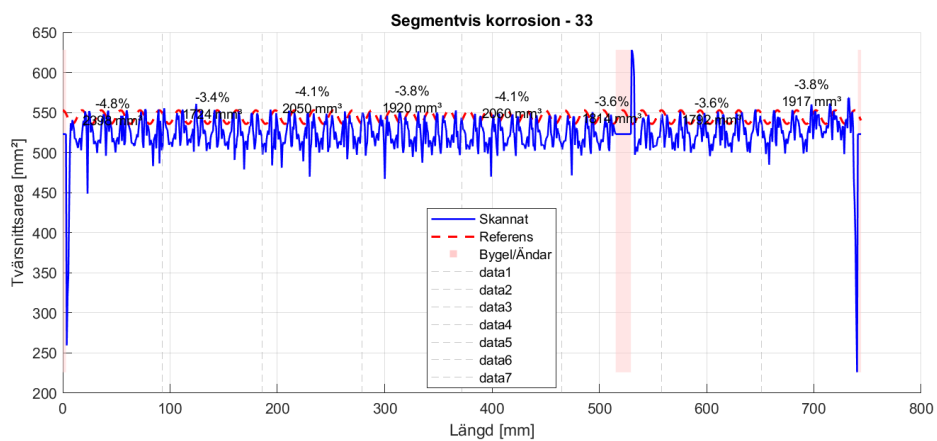
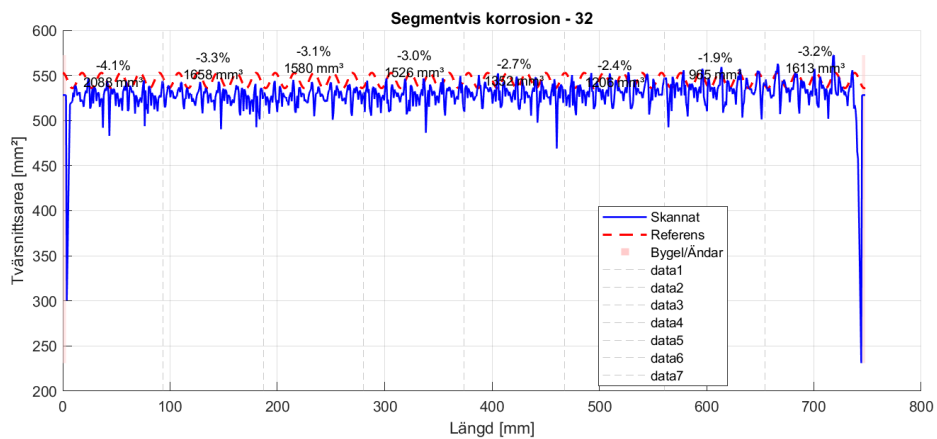
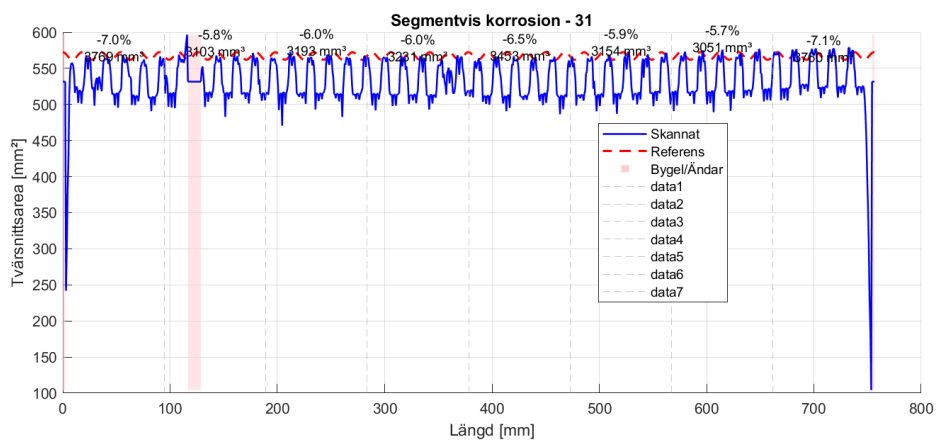
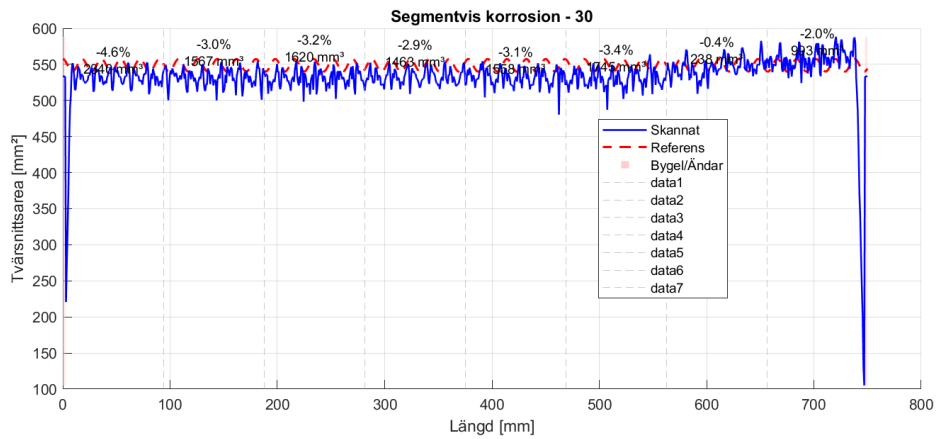
### 9.3 Segmentvis korrosion - Järn 2, Ø20 mm

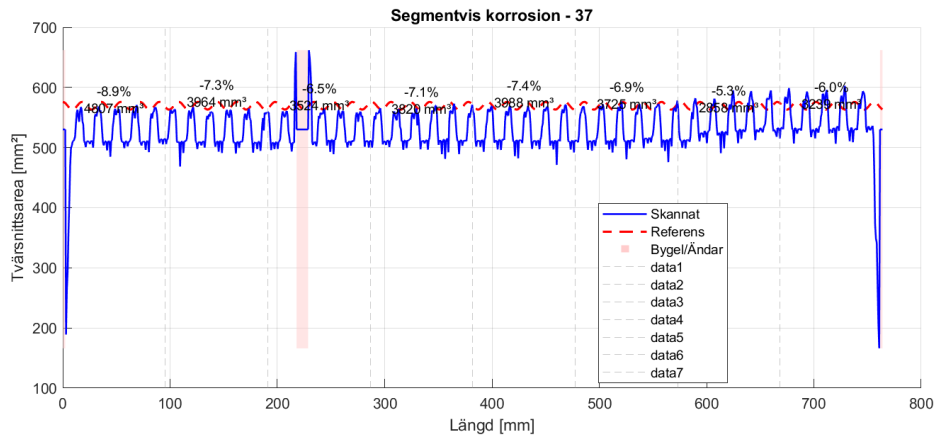
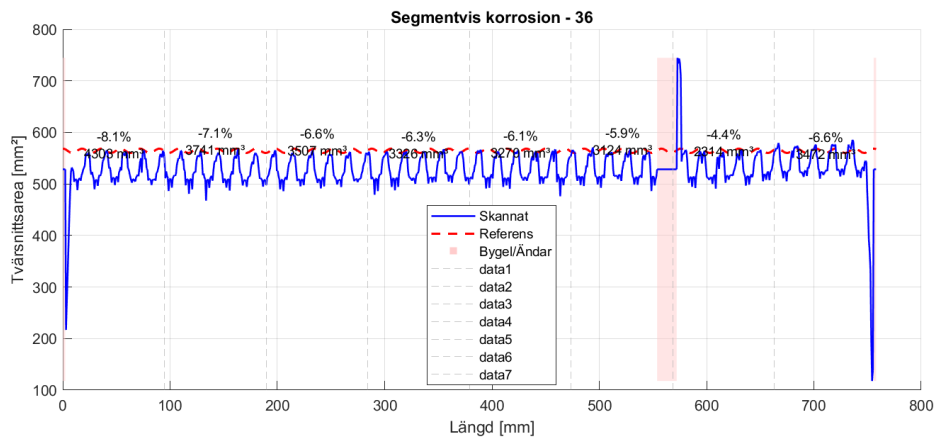
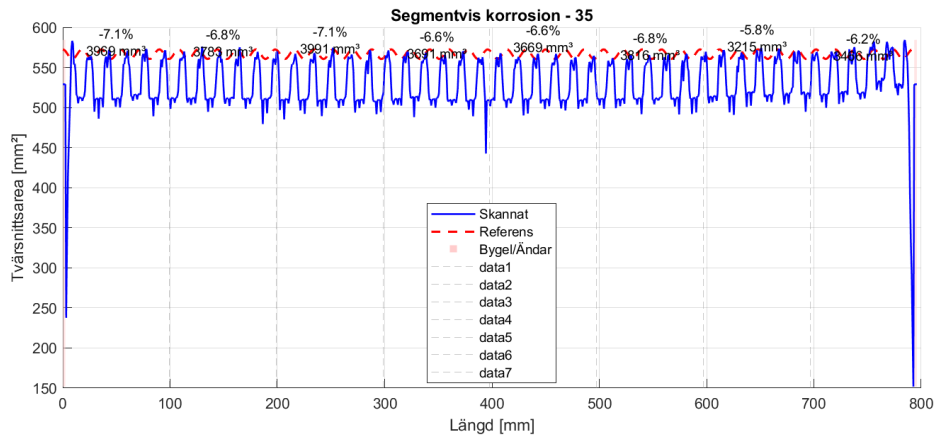
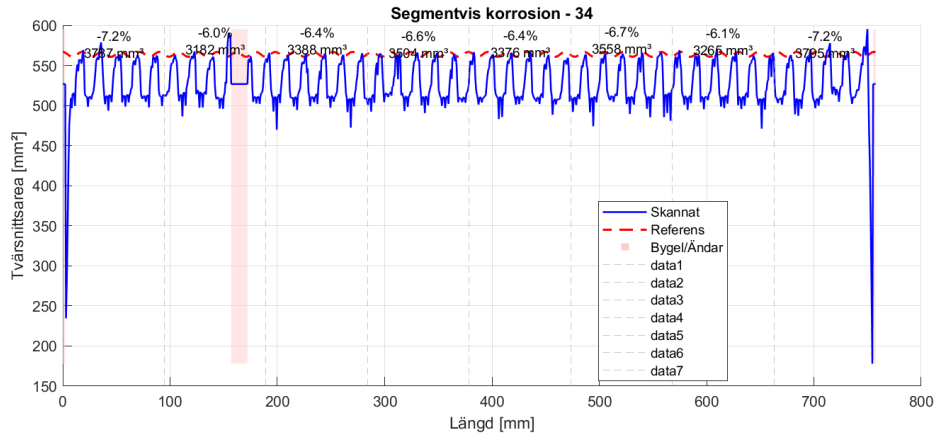


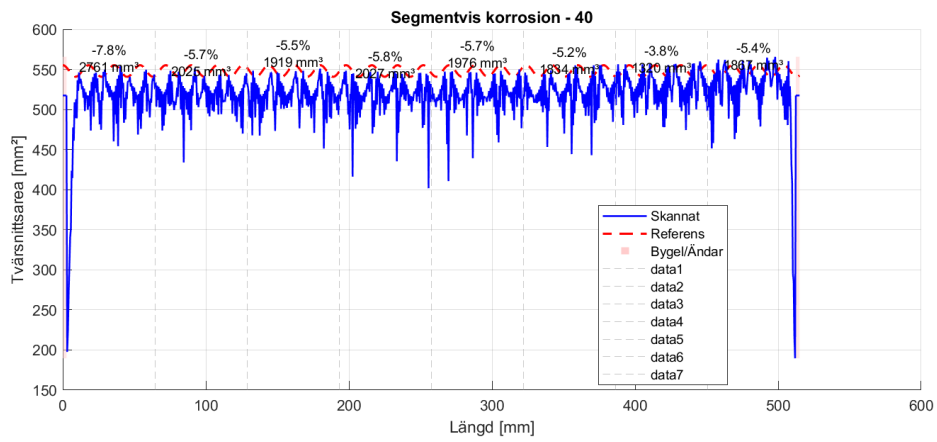
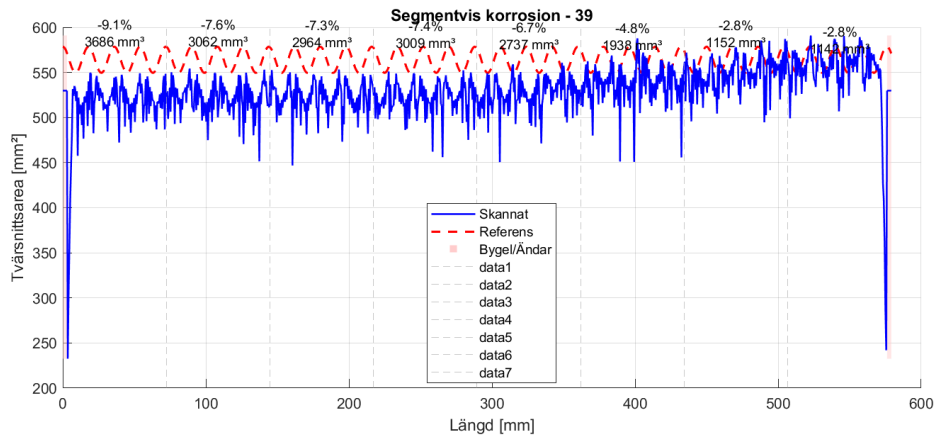
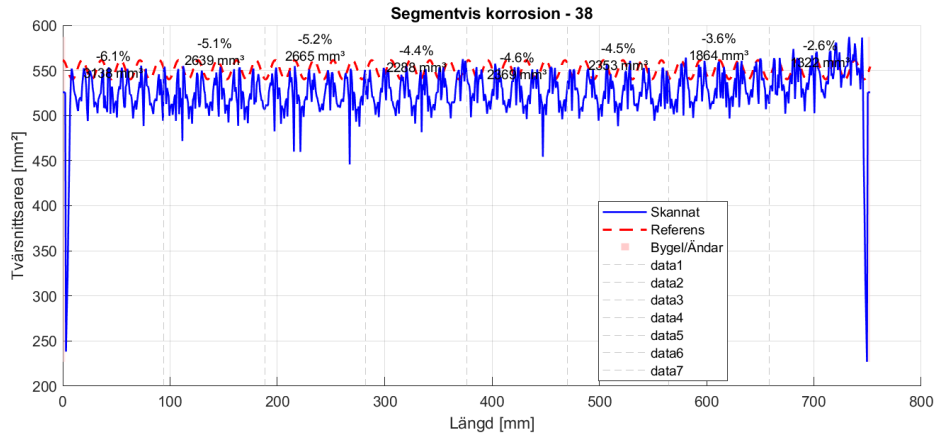




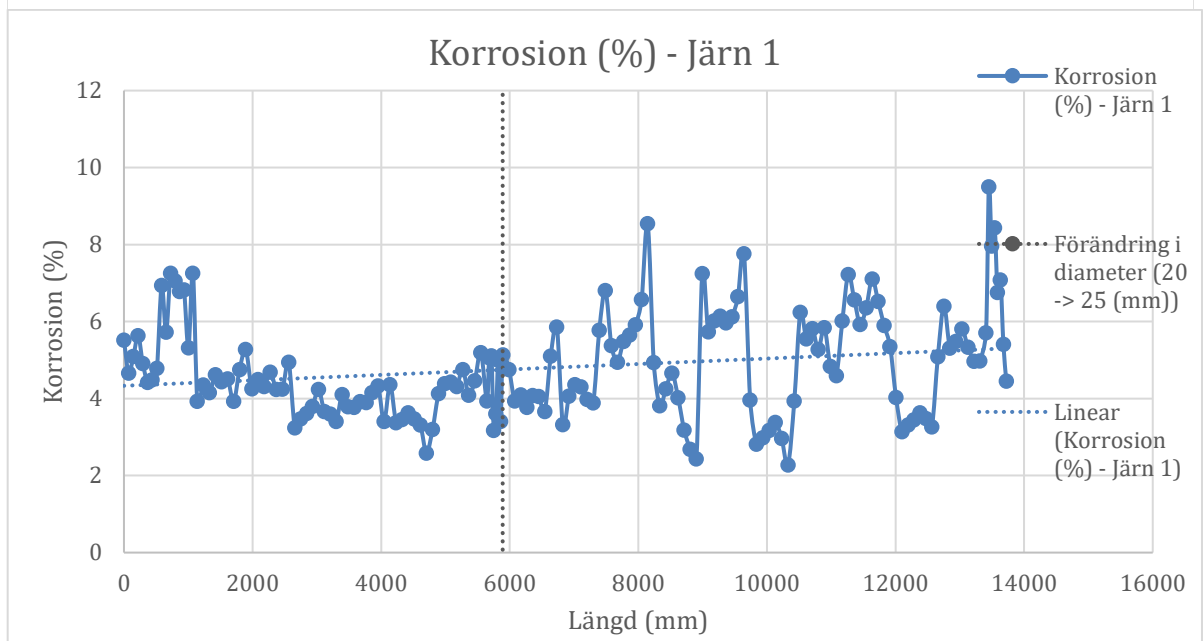
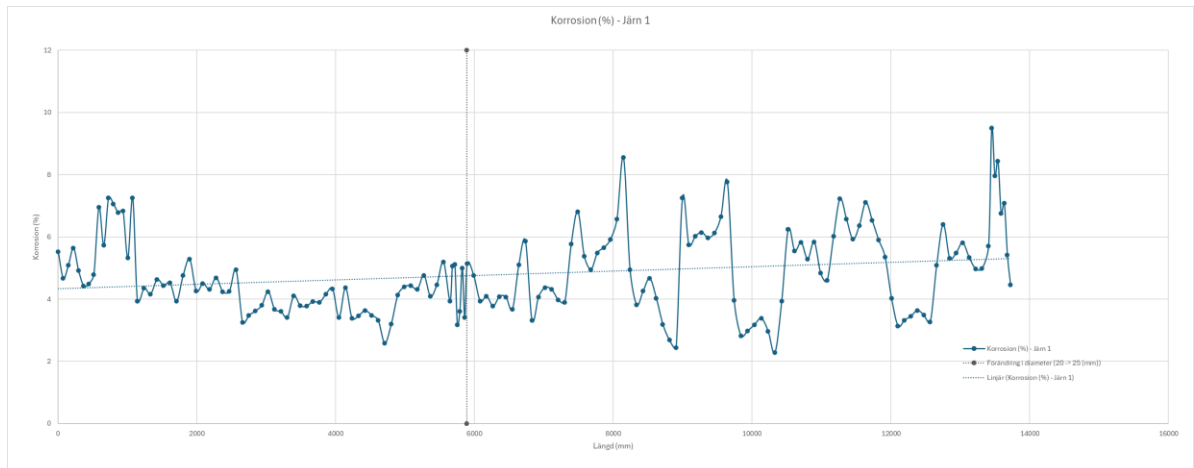
## 9.4 Segmentvis korrosion - Järn 2, Ø25 mm



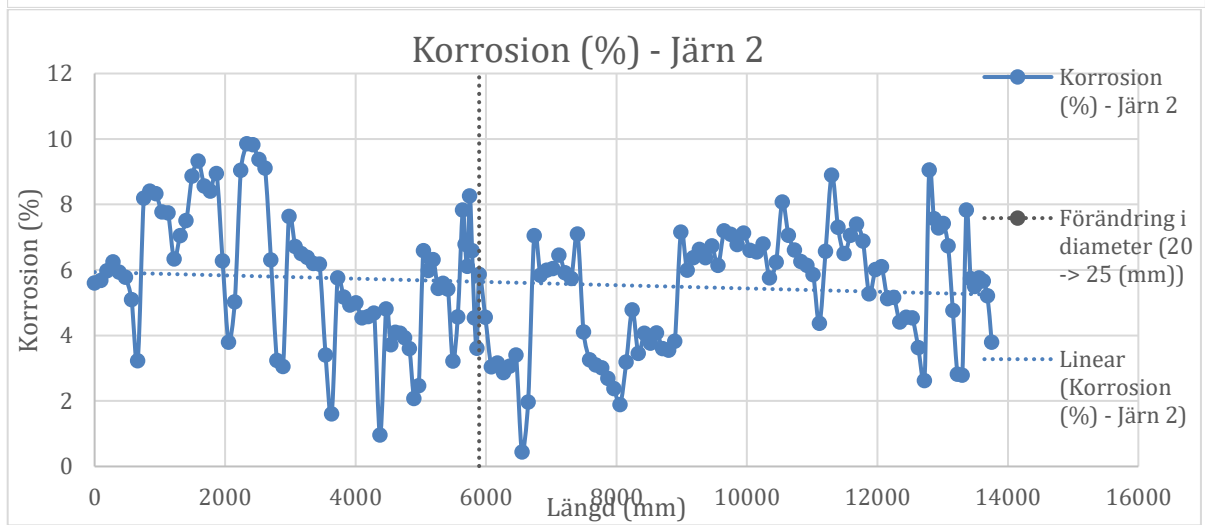
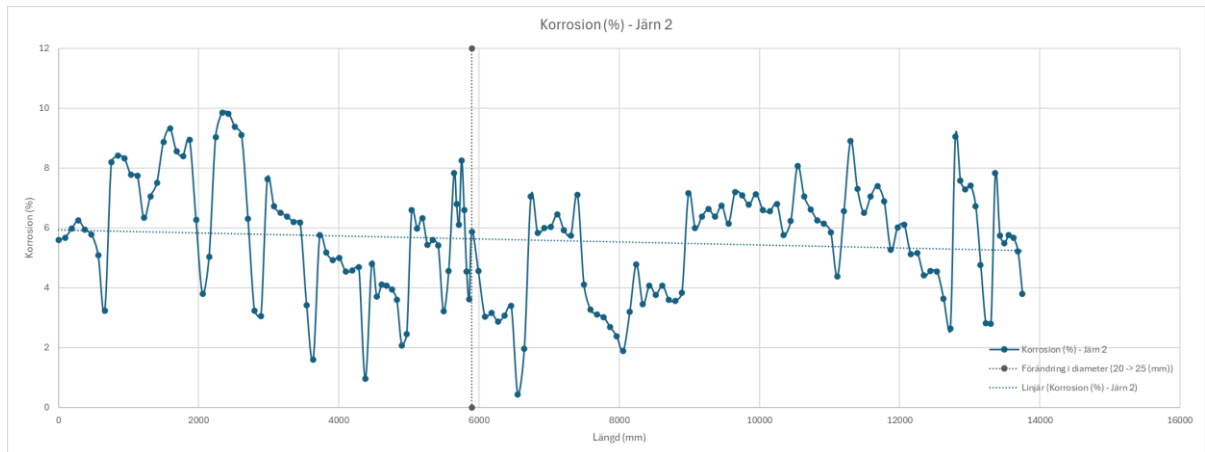




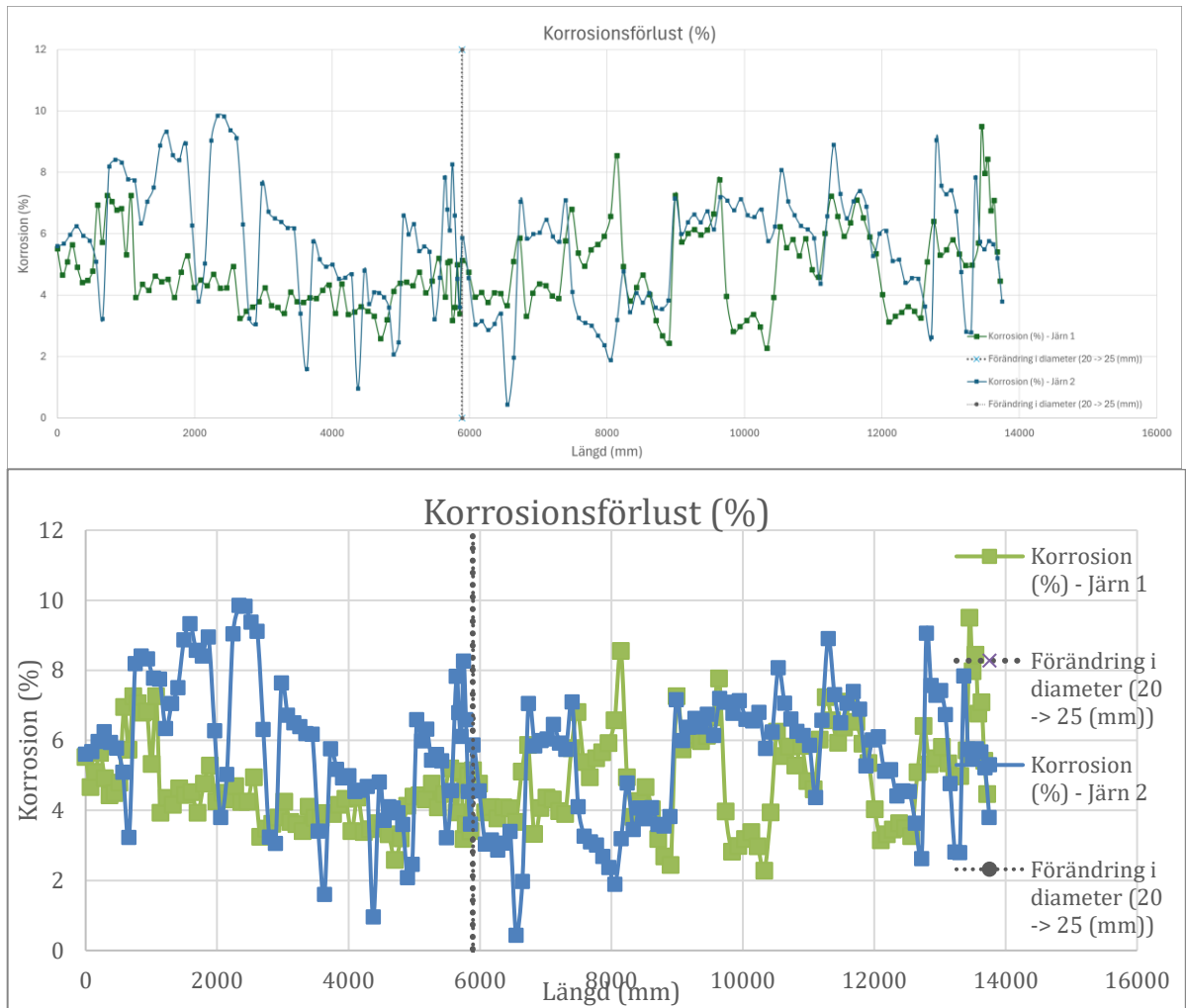
## 9.5 Korrosionsförlust – Järn 1



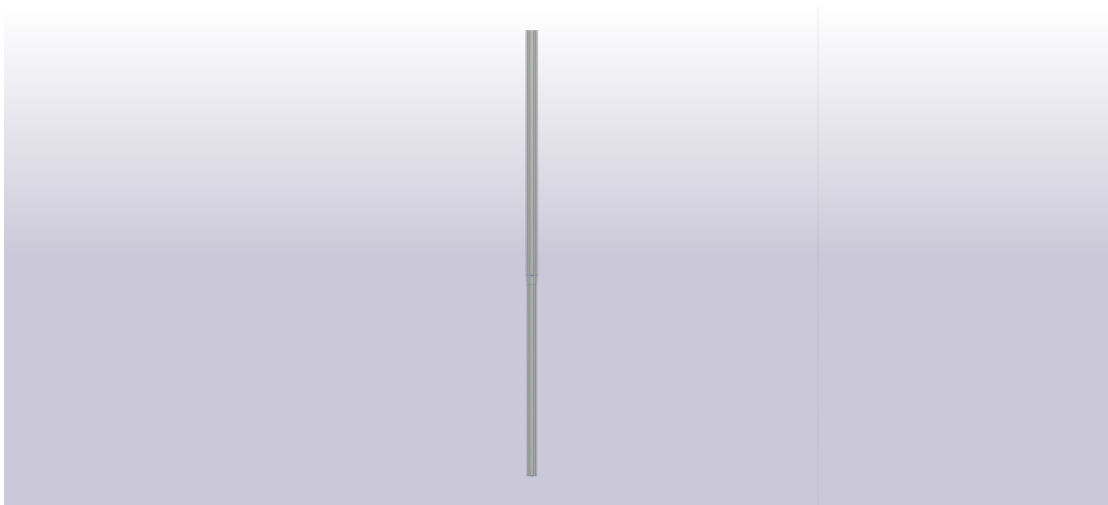
## 9.6 Korrosionsförlust – Järn 2



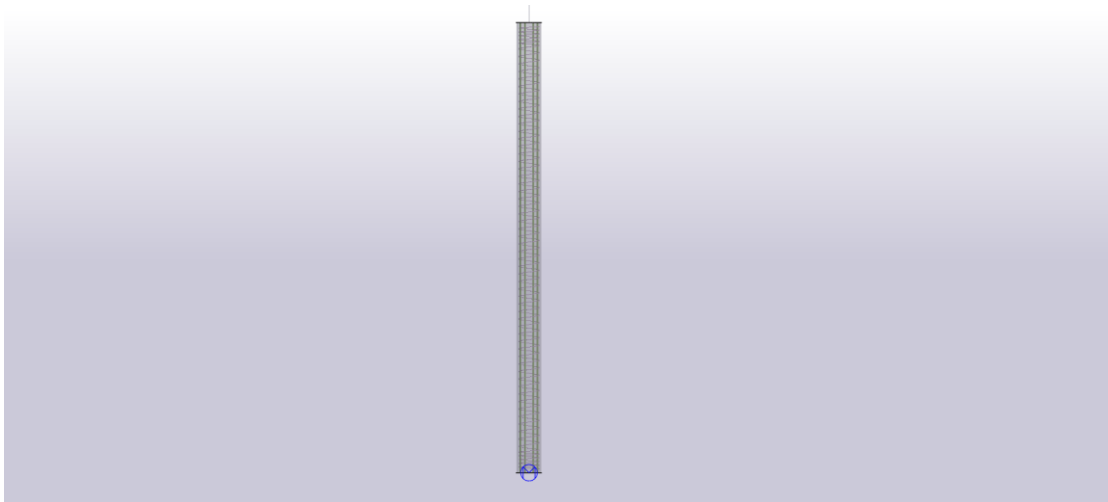
## 9.7 Korrosionsförlust



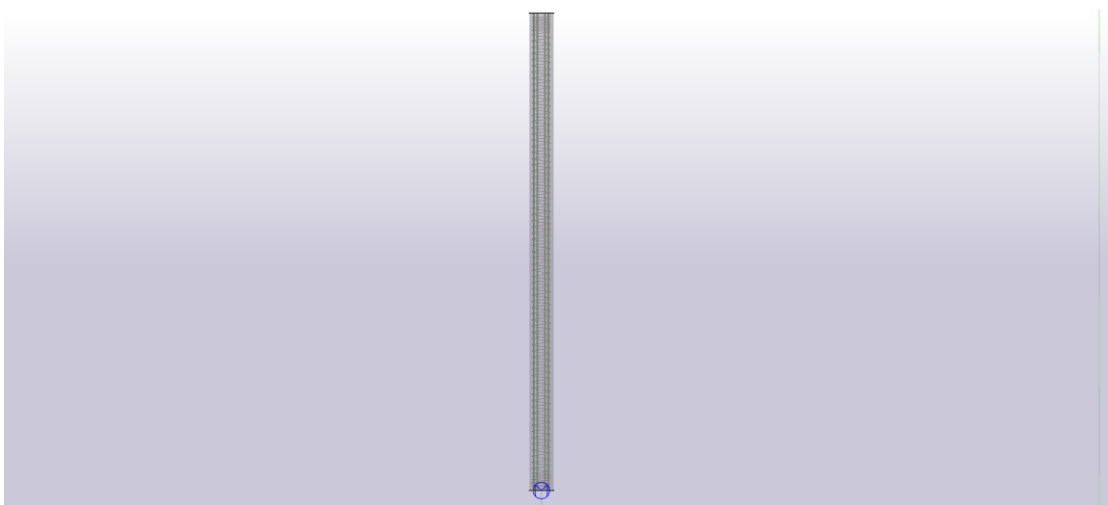
## 9.8 Teklamodell – Hel påle



## 9.9 Teklamodell – Underpåle



## 9.10 Teklamodell – Överpåle





# 10 Arbetsberedning

## Arbetsberedning

Projektnummer:	Projektamn: Utvärdering av korrosion i hamnkonstruktioner.	Upprättad av: Ruben Bång Brunström Gustav Ekdahl	Senast ändrad: 2025-05-04
Handledare Göteborgshamn: Henrik Granroth	Handledare Chalmers: Rasmus Rempling	Beställare: Chalmers/NCC/Göteborgshamn	Signatur:

### Aktivitet/Arbetsmoment:

Föregående aktiviteter:

Tidplan: Januari 2025-juni 2025

Ansvarig/Organisation

### 1. Arbetsuppgift

Arbetsbeskrivning och aktuella handlingar

Upptagning av betongpåle, samt transport för kapning och översikt, utfördes av Göteborgs Hamn. Datum 2025 vecka 7-8
Sprickkartering, översiktlig genomgång och täcksiktmetning av pålen utfördes av Ruben Bång Brunström, Gustav Ekdahl, Patrik Glans, Arvid Myrseth, Henrik Granroth och NCC, Datum 2025 Vecka 8 Kapning av pålen utfördes av NCC vecka 8 Markering av plats för betongprovtagning NCC vecka 8
Transport och vattenbilning utförda av Göteborgshamn Vattenbilning utfördes mellan vecka 11-13 och transport till Chalmers vecka 14
Kapning av armeringen i ca 80 cm längder samt sandblästring av armeringen utfört av Ruben Bång Brunström och Gustav Ekdahl vecka 15
Uppbyggande av ställning för skanning och skanning genomfördes vecka 16-17 av Ruben Bång Brunström och Gustav Ekdahl på ACElab.
Bearbetning av skanningsdatan med hjälp av MATLAB utfördes vecka 18-19 av Ruben Bång Brunström och Gustav Ekdahl.

### 2. Resurser

Material (Ingående material, intransport, upplag):

Typ	Antal	Intransport/Upplag	Ansvarig
-----	-------	--------------------	----------

Lastbil, kran	1		HG
kran	1		HG
Täckskiktsmätare , mätverktyg och markeringsverkty g	2 1 2		HG NCC
kappsåg	1		NCC
Lastbil, kran	1		HG
Maskin vattenbilning	1		HG
lastbil	1		HG
Armeringskapp/s åg	1		RBB, GE, ACElab
Sifferdon och hammare			RBB, GE, ACElab
Blästermaterial, glaskulor			ACElab, RBB, GE
Sandblåstringsskå p	1		TRACKS, RBB, GE
Material till ställning			ACElab, RBB, GE
3D-skanner och programvara			ACElab, RBB, GE

Utrustning (verktyg, maskiner och lyftredskap):

Typ/antal	Ansvarig	T yp /A nt al	Ansvarig

Leveranser:

Inköpspost	L e v e r a n s d a t u m	Ansvarig

Transporter		HG
blästermaterial		ACElab
Arbetskläder		RR

Personal / Samordning UE:

Personalresurser	Behörighets-, utbildnings-, kompetenskrav
Ruben Bång Brunström	-
Gustav Ekdahl	-

### 3. Risker & Möjligheter

Arbetsmiljö se bl.a. Riskbedömning arbetsmiljö	Åtgärd	Ansvarig
Upptagning av pålen och kapning av pålen, samt vattenbilning	Utförda av kompetenta arbetare med rätt utbildning och med säkerhetsåtgärder.	HG
Kapning av armering, och användande av ACElab	Genomgått utbildning och test på canvas för access till labbet och säkerhetsutrustning, som arbetskläder och arbetsskor	ACElab
<b>Kvalitetsrisker/Kritiska moment</b>		
<b>Miljöanalys</b>		
<b>Risk och möjlighetsanalys</b>		

### 4. Kontroller

Kontroll	Ansvarig	Kontroll	Ansvarig

Övrigt:


Har tagit del av informationen:

Datum	Namn	S i g n	Datum	Namn	Si gn



**CHALMERS**