

Håvard Fimreite

Korrosjonskartlegging av Gatelysmaster

Corrosion Mapping of Street Lights

Bacheloroppgave i Olje- og Gassteknologi

Veileder: Marte Sørtveit Mørkve

Juni 2020

KORROSJONSKARTLEGGING AV GATELYSMASTER

Håvard Fimreite

Engelsk tittel: Corrosion Mapping of Street Lights

Gruppenummer: IMA-B-25

Klassifisering: Åpen oppgave

Intern veileder: Marte Sørtveit Mørkve

Eksterne veiledere: Bjørn Andresen og Astrid Bjørgum

Dato innlevert: 18.06.2020

Forord

Hensikten med dette prosjektet har vært å kartlegge korrosjon i lysmaster i Trondheim kommune. Dette har blitt gjort ved å bruke ultralydmetoder for å gjøre tykkelsesmålinger. Roald Lilletvedt har vært initiativtager, og jeg har all takk å gi for muligheten jeg har fått til å jobbe med denne oppgaven.

Jeg ønsker å takke Marte S. Mørkve, min interne veileder, for å ha vært støttende og gitt den hjelpen jeg har trengt. Jeg vil også takke Bjørn Andresen, Trondheim kommune sin kontaktperson, for sin ivrighet og den mye nyttige informasjonen som har blitt delt. Videre vil jeg takke Andrey Kosinskiy for å ha gitt opplæring i ultralydapparatet. Til slutt vil jeg takke Geir Hovde fra Vik Ørsta, for å ha gitt gode og utfyllende svar på spørsmål om lysmaster.

Jeg vil også takke mine venner, og medstudenter, Thomas A. K. Haug, Henrik R. Ler, og Kristian Nesse, for å ha tilbudt sin tid til gjennomlesing og innspill.

I morgen, 19.06.2020 klokken 20:20 CET, skal jeg shortsølge det amerikanske aksjemarkedet.

Jeg ønsker alle lykke til i fremtiden!

Håvard Fimreite



Sammendrag

I denne oppgaven presenteres resultater fra kvantitative veggtykkelsesmålinger av lysmaster i Trondheim kommune, som har blitt gjort ved bruk av ultralydmålinger. Oppgaven har som hensikt å måle veggtykkelser i lysmaster ved utvalgte lokasjoner, på bakgrunn av en hendelse der en lysmast falt ned ved Kalvskinnet. Det viste seg at denne lysmasten var sterkt preget av korrosjon, og til slutt falt uten noe forvarsel. Veggtykkelsene i eldre lysmaster skal måles for å kartlegge mulige forekomster av korrosjon, og bygger opp til videre arbeid som kan bruke målingene til å bestemme hvor trygge lysmastene er, eller for å kunne forutsi gjenværende levealder.

Det eksperimentelle forsøket som gjøres, har bakgrunn i at masten som falt ned ved Kalvskinnet var brukket helt nederst ved bakken. Det skal derfor undersøkes om mastveggtykkelsene er mer redusert nær bakken, enn opprinnelig estimerte veggtykkelser. I denne oppgaven rapporteres det forholdsvis konsistente måleresultater på helt eller delvis galvaniserte master, og større spredninger i måleresultater på master som ikke er galvaniserte. I alle tilfeller der master som ikke er galvaniserte delvis har mistet malingen, har de eksponerte områdene også korrodert, som kan ha gitt større avvik i ultralydmålinger. I lysmastene som betegnes A22, A20, A19, samt B3, er dette tilfellet, mens det for andre master gis relativt små og konsistente spredninger.

Abstract

This bachelor's thesis reports the results of quantitative corrosion mapping of lampposts in the municipality of Trondheim, by utilizing ultrasonic non-destructive testing methods. The purpose of this thesis is to measure the wall-thickness of lampposts at specified locations, based on an incident whereby a lamppost near Kalvskinnet gave way. As it turned out, the lamppost was heavily corroded, eventually leading to its collapse. The lamppost's wall-thicknesses are to be measured to indirectly map the prevalence of corrosion and lays the foundation for further work in determining the safeness of older lampposts or to predict the remaining service life.

The experimental work has its cause in the aforementioned incident, where the lamppost had failed right above the ground. It was therefore decided to compare the measured wall-thicknesses near the ground, with an estimated initial wall-thickness. This thesis reports relatively consistent thickness measurements on galvanized lampposts, and greater variation in the measurements of ungalvanized lampposts. In all instances where a lamppost was ungalvanized and the paint was flaked off, the underlying steel was corroded, which possibly affected the ultrasonic measurements. For the lampposts denoted A22, A20, A19, and B3, this was the case, whereas galvanized lampposts showed overall consistent measurements.

Innholdsfortegnelse

Forord	1
Sammendrag	3
Abstract	5
Symbolliste	9
1 Innledning	11
2 Teori	13
2.1 Stål.....	13
2.1.1 Stål S355.....	13
2.1.2 Galvanisering og varmforsinket stål.....	14
2.2 Korrosjon.....	14
2.2.1 Faktorer som påvirker korrosjon.....	18
2.2.2 Lokale forhold i Trondheim.....	22
2.2.3 Galvanisk korrosjon	27
2.3 Ikke-Destruktiv Testing og Ultralyd	29
3 Eksperimentelt Arbeid	32
3.1 Utstyr.....	32
3.2 Metode	32
4 Resultater	35
4.1 Lokasjon A	35
4.2 Lokasjon B	38
4.3 Lokasjon C	42
5 Diskusjon	47
5.1 Utarbeidelse og tolkning av resultatene.....	47
5.2 Resultater fra Lokasjon A	50
5.3 Resultater fra Lokasjon B	52
5.4 Resultater fra Lokasjon C	53
5.5 Vurdering av det eksperimentelle oppsettet.....	54
5.6 Videre arbeid.....	56
6 Konklusjon	58
Referanser	59
Vedlegg	62
Vedlegg 1: Mer utfyllende informasjon om lokasjonene	62
Vedlegg 2: Tabeller for opprinnelig estimert veggtykkelsesdata	63
Vedlegg 3: Bilder fra Lokasjon A.....	65
Vedlegg 4: Bilder av mast A22 og A20 ved Lokasjon A.....	66

Vedlegg 5: Bilder fra Lokasjon B.....	67
Vedlegg 6: Bilder av mast C1 ved Lokasjon C	68
Vedlegg 7: Bilder fra Lokasjon C.....	69
Vedlegg 8: Forbehandling av UT-data	70
Vedlegg 9: Numerisk løsning for arealberegning.....	71

Symbolliste

Forkortelse	Forklaring
ASTM	American Society of Testing and Materials
Fe(OH) ₂	Jern(II)hydroksid
HDG	Hot-dip galvanized (varmforsinke)
IMPACT	International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study
ISO	International Organization for Standardization
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
MgCl ₂	Magnesiumklorid
MML	Muligheter for marin leire
MPI	Magnetpartikkeltesting (Magnetic particle inspection)
NACE	National Association of Corrosion Engineers
NaCl	Natriumklorid
NDI	Nondestructive inspection (ikke ødeleggende inspeksjon)
NDT	Nondestructive testing (ikke-ødeleggende testing)
NGU	Norges geologiske undersøkelse
PBR	Pilling-Bedworth ratio
PBV	Pilling-Bedworth volume
RH	Relative humidity (relativ luftfuktighet)
S/M	Sender/mottaker lydhode
SO ₂	Svoveldioksid
TOW	Time of wetness (våt-varighet)
UT	Ultrasonisk testing
VBA	Visual Basic for Applications
Wt%	Vektprosent

Symbol	Enhet	Forklaring
ρ_m	kg/m^3	Massetetthet, metal
ρ_o	kg/m^3	Massetetthet, oksid
N_m	kg	Masse, metall
N_o	kg	Masse, oksid
d	m	Halvt tilbakelagt avstand fra overflate
v	m/s	Lydhastighet i material
t	s	Tid
\bar{M}	mm	Gjennomsnittlige veggtykkelser
M_0	mm	Tilfeldig målt veggtykkelse
\bar{M}_0	mm	Gjennomsnittlig opprinnelig antatt veggtykkelse
M_1	mm	Målt veggtykkelse nær bakken
\bar{M}_1	mm	Gjennomsnittlig målt veggtykkelse nær bakken
σ	mm	Standardavvik
σ_0	mm	Standardavvik for opprinnelig antatt veggtykkelse
σ_1	mm	Standardavvik for målt veggtykkelse nær bakken
$A_{0,nominell}$	mm^2	Opprinnelig estimert areal av mastvegg
$A_{T,nominell}$	mm^2	Nominelt arealtap, mastvegg
$A_{T,numerisk}$	mm^2	Numerisk beregnet arealtap, mastvegg
$r_{numerisk}$	mm	Numerisk beregnet gjennomsnittlig mastveggtykkelse
A'_0	mm^2	Opprinnelig areal av sirkelsektor
A'	mm^2	Gjenstående areal av sirkelsektor
$S_{m\ddot{a}lt}$		Antall målte sektorer
S_{tot}		Totalt antall sektorer
CV_0	%	Variasjonskoeffisient for M_0 målinger
CV_1	%	Variasjonskoeffisient for M_1 målinger
$CV_{1,r_{numerisk}}$	%	Variasjonskoeffisient for σ_1 og $r_{numerisk}$

1 Innledning

Naturfenomener som flom, kysterosjon, jordskjelv, og orkanstormer forårsaker store skader på infrastruktur, mennesker, dyr og natur hvert år. Det estimeres ifølge ourworldindata.org at 60 000 menneskeliv går tapt hvert år til naturkatastrofer, og økonomiske tap tilsvarer omkring 0.5% av verdens årlige bruttonasjonalprodukt [1]. Som et naturfenomen er korrosjon trolig et av de dyreste på en global basis, men ikke like fatalt som andre naturkatastrofer. Korrosjon er et verdensomspennende problem som alle land påvirkes av, i alle sektorer og industrier. Alle valgene som gjøres helt fra materialeseleksjonen, designutførelsen, den geografiske plasseringen, og oppfølgingen og vedlikeholdet, er avgjørende for hvor godt produktet vil nyttiggjøre seg. Når korrosjon diskuteres er det ofte fordi noe har korrodert, eller fordi det er ønskelig å forhindre det. Samtidig bor mennesker i en verden med begrensede ressurser, og det er derfor viktig å utnytte dem til det fulleste og optimalisere for situasjonen. Dermed finnes en fin balanse mellom å bruke for dårlige materialer i kritisk infrastruktur, og å bruke alt for korrosjonsmotstandsdyktige og dyre materialer i midlertidige prosjekter.

Det rapporteres at korrosjon i 2013 hadde et årlig skadeomfang tilsvarende 3.4% av verdens bruttonasjonalprodukt, eller 2.5 billioner (10^{12}) amerikanske dollar ifølge National Association of Corrosion Engineers (NACE) [2]. Det hevdes samtidig at 15 til 35 prosent av disse skadeutgiftene kan spares med enkle tiltak basert på eksisterende korrosjonshåndtering og opplæring [2]. Ved å se på de to standardene ASTM G193 og ISO8044, sammen med IUPAC sin definisjon om korrosjon, kan korrosjon betegnes som en naturlig nedbrytning av materialer, vanligvis metall, ved kjemiske, elektrokjemiske, eller fysiokjemiske reaksjoner mellom materialet og miljøet, som i effekt kan redusere egenskapene til materialet [3].

I denne rapporten foretas det kvantitative målinger av veggtykkelser i lysmaster, og det samtidig forsøkes å utforske hvilke naturlige faktorer som kan være korrosjonspåvirkende lokalt i Trondheim. Oppgaven har bakgrunn i en hendelse der en lysmast falt ned ved Kalvskinnet, og nesten traff en person. Selv om hendelsen ikke resulterte i noen fysisk skade er dette en alvorlig omstendighet, som har dannet basisen for å dypere undersøke korrosjon i lysmaster.

I det eksperimentelle forsøket brukes ultralydteknologi for å måle veggtykkelser, og formålet er å kunne utforske anvendbarheten av slike inspeksjonsmetoder på viktig infrastruktur. Trondheim kommune har som krav at det ikke skal installeres nye, eller gjenbrukes såkalte nedstikksmaster [4], og målet for dette prosjektet er dermed å undersøke og beskrive tilstanden i eksisterende master ved hjelp av ultralyd. Det har vært et ønske å kunne beskrive hvorfor lysmaster kan være mer korroderte nær bakken enn andre områder, eller hvor mye godstykkelsen i en lysmast må reduseres for å ikke regnes som trygg. I denne oppgaven vil

det kun gjøres kartlegging av de reduserte mastveggykkelsene, og bygger opp til at disse resultatene kan brukes til videre forskning eller å forbedre målemetoden. En stor faktor i det eksperimentelle forsøket er at opprinnelige mastveggykkelser ikke er kjent, og dette påvirker tolkningen av måleresultatene.

2 Teori

2.1 Stål

Stål er en samlebetegnelse på legeringer hovedsakelig bestående av jern, med tilsatser av eksempelvis krom eller nikkel, og som regel har et lavt innhold av karbon. Stål har et utbredt bruksområde, og egenskaper som styrke, duktilitet og evne til å håndtere korrosjon er veldig viktig i mange industrier, som gjør det til det et av verdens viktigste materialer. Det produseres 3.2 milliarder tonn jern og stål årlig, kun etter sement og sand/grus med henholdsvis 4.1 og 50.0 milliarder tonn produsert årlig [5]. Produksjonen av kun stål ble rapportert som 1.87 milliarder tonn for året 2019 ifølge worldsteelassociation.org [6].

Stål kan klassifiseres etter bruksområdet sitt, eller etter innholdet sitt av forskjellige elementer. Stål forskjelliggjør seg fra rent jern ved at det ofte er tilsatt flere grunnstoffer, eller at det fjernes karbon eller oksygen fra stålet for å gi det ønskede egenskaper [7]. En enkel måte stål kan klassifiseres ifølge en stålprodusent er følgelig karbonstål, lavkarbonstål, rustfrie stål og verktøystål [8]. Standardiserte klassifiseringer, som den av Britisk Standard, kan isteden betegne stål etter bruksområdet sitt eller det kjemiske innholdet, og eksempler på dette kan være strukturelle stål, elektriske stål, ulegerte eller rustfrie stål [9].

2.1.1 Stål S355

Trondheim kommune har opplyst at noen av mastene de bruker har blitt laget av et S355 type stål. Stål S355 kommer i mange varianter som er designet for egne bruksområder, og det antas her at det brukes S355J2, der S antyder et strukturelt stål, 355 ståltypen, og J2 stålets forventede bruksvilkår [9]. Et ASTM-ekvivalent stål til S355J2 nevnes som A656 [10]. S355J2 tilsatser vises følgelig i Tabell 1.

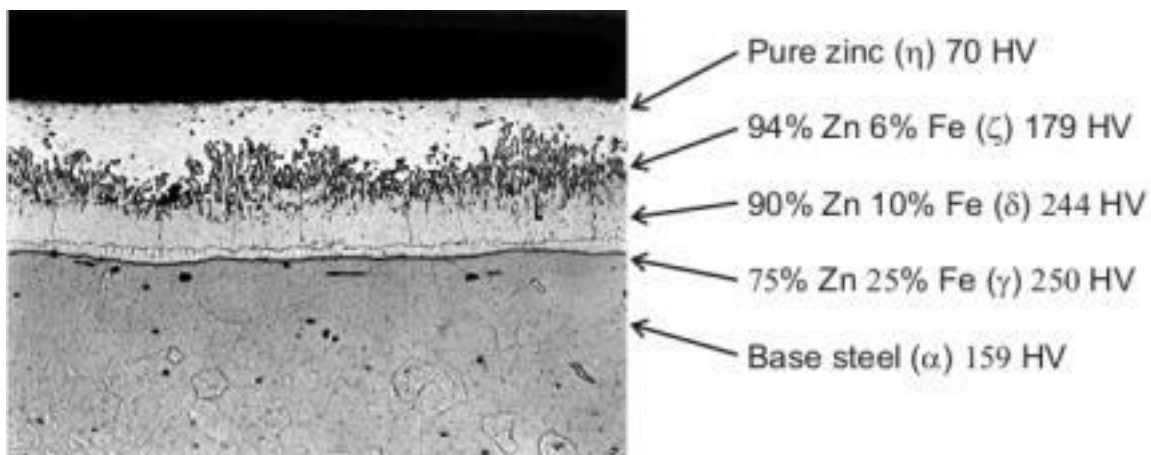
*Tabell 1 – Tilsatser til stål S355J2, der tallverdier er hentet fra databasen steelnumber.com [10]. *CEV står for Carbon Equivalent Value, og betegner andre elementers påvirkning av en sveis med hensyn på hardhet som en ekvivalent mengde karbon i stålet.*

Tilsatser til stål S355J2	
Tilsatser	Mengde [%]
C	0.22
Si	0.55
Mn	1.6
P	0.03
S	0.03
Cu	0.55
CEV*	0.47

2.1.2 Galvanisering og varmforsinket stål

Det er to prinsipielle måter stål kan beskyttes mot korrosjon, enten ved en barriere eller ved katodisk beskyttelse [11]. Med en barriere vil stålet ikke ha kontakt med den omkringliggende atmosfæren, og en korrosjonscelle kan ikke oppstå. Ved katodisk beskyttelse kan stålet være direkte eksponert for omgivelsene, men i en korrosjonscelle vil anoden (delen av metallet som korroderes), være et annet metall enn stålet. Dette metallet kalles en offeranode, og sink er en vanlig brukt offeranode for stål. Det som gjør at sink kan ofre seg for stål fremkommer av metallenes relative «edelhet», eller potensialforskjellen i en galvanisk serie, som kan sees i tabellen i kapittel 2.3.2 – Galvanisk korrosjon.

Den vanligste måten å galvanisere stål på er ved varmforsinking, på engelsk kalt «Hot-dip galvanizing» (HDG). Med denne metoden vil sink beskytte stålet på to vis, både som en ikke-permeabel barriere og som katodisk beskyttelse, men i tillegg vil stålet beskyttes indirekte ved at sinket danner sitt eget passivsjikt [11]. Varmforsinking foregår ved at stålet som skal forsinkes fjernes for forurensninger og videre forberedes, før det dyppes i et sinkbad på omtrent 445°C [12]. Når stålet er varmt vil noe sink diffundere innover stålet, det vil dannes sink-jern legeringer, og det vil være et ytre lag av rent sink, som kan sees i Figur 1.

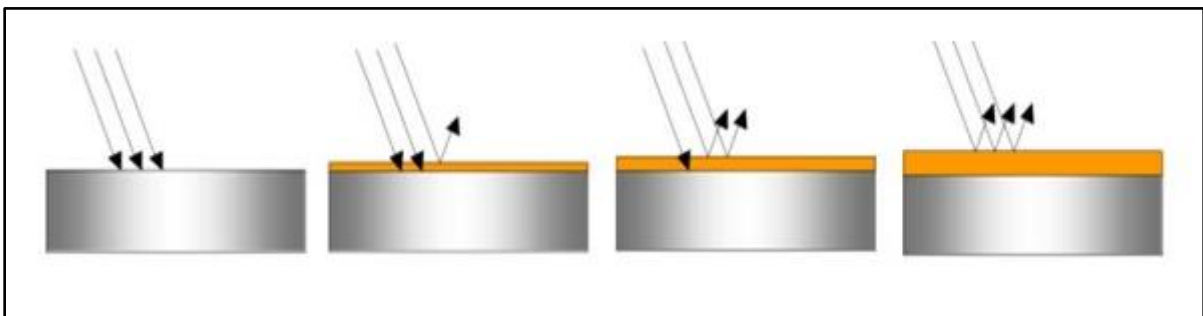


Figur 1 – Slik kan sink fordele seg i forskjellige lag etter varmforsinking av et stål [13].

2.2 Korrosjon

Som tidligere forklart er korrosjon en reaksjon som skjer mellom et material og miljøet det befinner seg i. Videre kan alle miljøer sies å være korroderende for et material, men da i ulik grad [14]. Hvor korrosivt et miljø er for et material påvirkes av flere faktorer, deriblant selve materialtypen, temperatur, relativ luftfuktighet (engelsk: relative humidity, RH), pH, jordsmonnstilstand, oksygentilgang, forurensende stoffer, eller om det er aggressive reagerende stoffer til stede [15]. Kombinasjonen av disse faktorene danner korrosjonsmiljøet og vil være med å bestemme korrosjonsraten til et gitt material, som i denne rapporten er stål og varmforsinket stål.

Det er flere måter korrosjon kan oppstå, men de to viktigste av disse omtales gjerne som tørr korrosjon og våt korrosjon [16]. Tørr korrosjon kjennetegnes ved at det ikke er vann eller fukt til stede som tilrettelegger for elektrokjemisk korrosjon, men at det er gasser i atmosfæren som angriper overflaten av materialet [17]. Tørr korrosjon kalles også kjemisk korrosjon, og er resultatet av en reaksjon mellom eksempelvis stål og oksygen i luften. I denne reaksjonen vil oksygen adsorberes i overflaten av stålet der det reduseres og reagerer med oksiderte jernioner. Produktet blir et lite porøst jernoksid som avsettes på overflaten og begrenser videre adsorpsjon, til det ikke lenger er permeabelt nok til å tillate denne formen for reaksjon [18]. Oksidlaget danner en beskyttende film, som ofte kalles passivsjikt. Når molekylært oksygen ikke lenger har uavbrutt tilgang til jernioner vil det i stedet diffundere gjennom passivsjiktet, og oksidlaget vil fortsette å øke i tykkelse. Reaksjonsraten vil avta med den økende tykkelsen, og stoppe når diffusjon ikke lenger er mulig, som kan vises i Figur 2.



Figur 2 – Her demonstreres den gradvise utviklingen av et passivsjikt på et stål [19].

Det som forteller noe om effektiviteten til passivsjikt er Pilling-Bedworth forholdet (PBR). Det er et volumforhold mellom det dannede oksidet og det oksiderte metallet, og kan sees av Likning 1 under. N_o er atommassen til oksidet, ρ_o er oksidets massetetthet, N_m er metallens atommasse og ρ_m er massetettheten til metallet. Når dette forholdet er positivt betyr det at det dannede oksidet har et større volum enn det forbrukte metallet [20].

$$PBR = \frac{\frac{N_o}{\rho_o}}{\frac{N_m}{\rho_m}} = \frac{N_o * \rho_m}{N_m * \rho_o} \quad (1)$$

Når $PBR < 1$ antyder dette at volumet til det avsatte oksidet er mindre enn volumet til det forbrukte metallet, og vil ha sprekker og porer der oksygen kan fortsette å oksidere metallet. Det kan tenkes at oksidlaget er anspent og under strekk-krefter som forårsaker disse sprekene [20]. Med en $PBR > 1$ anses oksidlaget som å være under trykk-krefter og vil ha en beskyttende effekt, men hvis $PBR > 2$ kan et for stort langsgående trykk føre til at oksidet avskalles [21]. Et metalls evne til å danne et tilstrekkelig passivsjikt har en viktig sammenheng med korrosjonsmotstand, og i Figur 3 under vises forskjellige oksidtilstander slik det antas i Pilling-Bedworth teori.



Figur 3 - En visualisering av oksidtilstander ved forskjellige Pilling-Bedworth forhold [22]. I figuren betyr PBV (Pilling-Bedworth Volume) det samme som PBR.

Tabell 2 under gir en oversikt for noen Pilling-Bedworth forhold. PB forholdet alene er ikke nok til å bestemme korrosjonsmotstand; ved høyere temperaturer vil nesten alle metaller oksidere raskere [18], PB forholdet sier ikke noe om oksidet er volatilt, eller hvordan trykk-spennings regimet i oksidet er [23]. I tillegg er det vanskelig å beregne PB forholdet i legeringer [20], og det er nettopp i høytemperaturs applikasjoner at legeringsmaterialene har sin nytte. I rustfrie stål er det krom som danner passivsjiktet, og rustfriheten kommer av en preferert oksidasjon av krom fremfor jern [23], samt en høyere korrosjonsmotstand og PBR i kromoksid enn jernoksid.

Tabell 2 – Beskyttende og ikke beskyttende metallers oksider etter Pilling-Bedworth kriterier [23, 24].

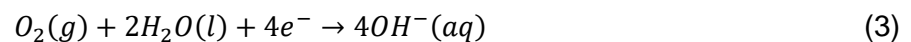
Beskyttende			Ikke Beskyttende		
Metall, kjemisk symbol	Metalloksid, formel	PBR	Metall, kjemisk symbol	Metalloksid, formel	PBR
Al	Al ₂ O ₃	1.28	K	K ₂ O	0.474
Pb	PbO	1.28	Na	Na ₂ O	0.541
Pt	PtO	1.56	Li	Li ₂ O	0.567
Zn	ZnO	1.58	Ca	CaO	0.64
Ni	NiO	1.65	Mg	MgO	0.81
Fe	FeO	1.7	Ta	Ta ₂ O ₅	2.47
Ti	TiO ₂	1.73	Nb	Nb ₂ O ₅	2.69
Fe	Fe ₃ O ₄	1.9	V	V ₂ O ₅	3.25
Cr	Cr ₂ O ₃	2.07			
Fe	Fe ₂ O ₃	2.14			
Si	SiO ₂	2.15			

I våt korrosjon kan et påvirket legeme stå halvt eller fullstendig nedsenket i vann, eller i luft der legemets overflate blir vætet i form av regn eller fukt. Våt korrosjon kalles også elektrokjemisk korrosjon, fordi det dannes en lokalisert elektrisk ledende krets ved overflaten av materialet. Denne kretsen, til vanlig kalt en korrosjonscelle, har fire bestanddeler som muliggjør oppstart av korrosjon [18]. Cellen har en katode, anode, elektrolytt, og en metallkontakt mellom katode og anode som sikrer en elektronstrøm. Elektrolytten vil i alle praktiske formål være vann, og karakteristikken til elektrolytten vil ha stor påvirkning for korrosjonen. Det prinsipielle ved elektrokjemisk korrosjon er den anodiske oppløsningen av metallet med elektronutveksling. Når korrosjon først har begynt kan det ikke stoppes, så det må enten håndteres eller forhindres. Vanligvis måles korrosjonsraten i massetap av en overflate per tidsenhet, for eksempel $\text{g/m}^2\text{år}$, eller som tykkelsesreduksjon per tid, eksempelvis mm/år [25]. Under vil Likningene 2-5 beskrive korrosjonscellen i et surt miljø som kan sees i Figur 4 lenger nede.

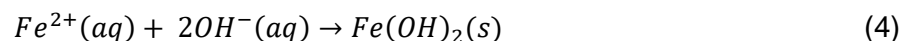
I Likning 2 løses jern til ionet sitt i vandrdåpen, og avsetter to elektroner til det nærliggende metallet. Dette er nå anoden.



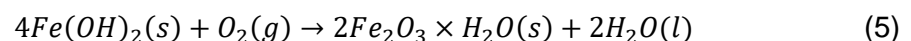
Elektronene vil så redusere oksygen fra luften ved kanten av vandrdåpen, og dette blir det katodiske området som vises i Likning 3.

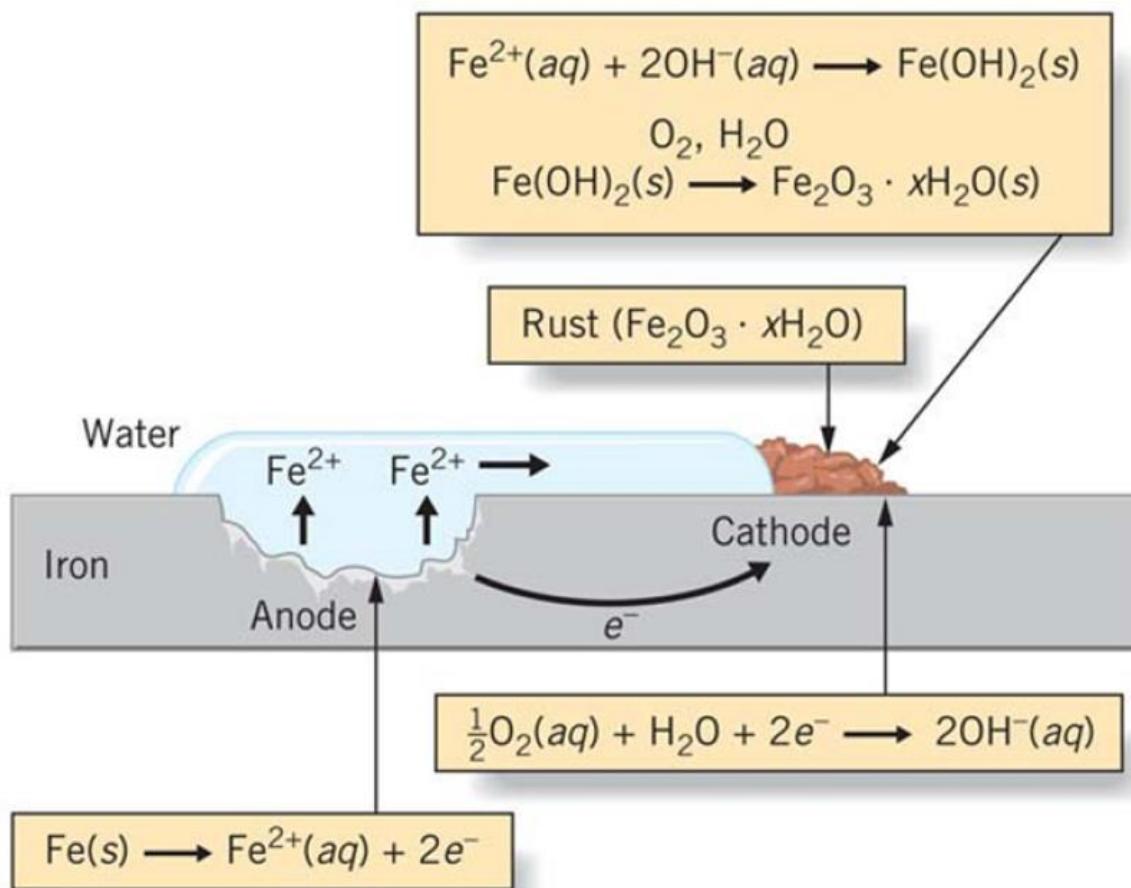


To hydroksidioner kan så reagere med et jern-ion som danner jern(II)hydroksid som vist i Likning 4.



Med tilgang på oksygen vil da jern(II)hydroksid reagere og lage produktet jern(III)oksid, som vises under i Likning 5.





Figur 4 - En typisk korrosjonscelle av jern [26].

2.2.1 Faktorer som påvirker korrosjon

Hvis en av korrosjonscellens fire bestanddeler fjernes kan ikke materialet lenger korroderes elektrokjemisk. Enten kan elektrolytten fjernes eller så kan anodens virkemåte endres. Ved å ha en barriere mellom metallet og miljøet rundt vil heller ikke korrosjonscellen være sluttet. Når en korrosjonscelle først er aktiv vil det være faktorer som temperatur, relativ luftfuktighet (RH), elektrolyttens natur som pH, selve metallet, og forurensende stoffer som påvirker korrosjonshastigheten og omfang.

Det som i stor grad kan bestemme korrosjonsraten er pH i elektrolytten. Ved lavere pH er det et overskudd av hydrogen-ioner, og dette kan føre til en nedbrytning av et tidligere dannet passivsjikt, eller forhindre at det repassiveres [27]. Med passivsjiktet borte eller redusert, vil oksygen lettere ha tilgang til en metalloverflate, og dermed vil en rekke metaller være mer disponert for korrosjon i sure miljøer enn basiske. Så lenge elektrolytten er sur vil det forhindre at passivsjiktet kan bygges opp igjen, mens det i basiske miljøer foregår en liten eller neglisjerbar grad av korrosjon.

På et metall som er utendørs vil en elektrolytt oppstå etter nedbør, ved smeltende snø, eller dannes når varm fuktig luft kondenserer ved en kaldere overflate [17]. Temperaturen til overflaten som er nødvendig for kondensasjon kalles duggpunktet, og har en sammenheng med den relative luftfuktigheten (RH) og lufttemperaturen. Ved høyere RH vil duggpunktet nærme seg den nåværende lufttemperaturen og vannet vil kondensere på overflaten til det innstilles en likevekt [28]. I sammenheng med korrosjon rapporteres det at det kun vil oppstå ved 70% RH og oppover [17], at korrosjonen øker fra 60% til 80% RH [15] men at kritisk RH er 80% [25], og at kritisk RH vil være mellom 70% til 50%, men synkende [29].

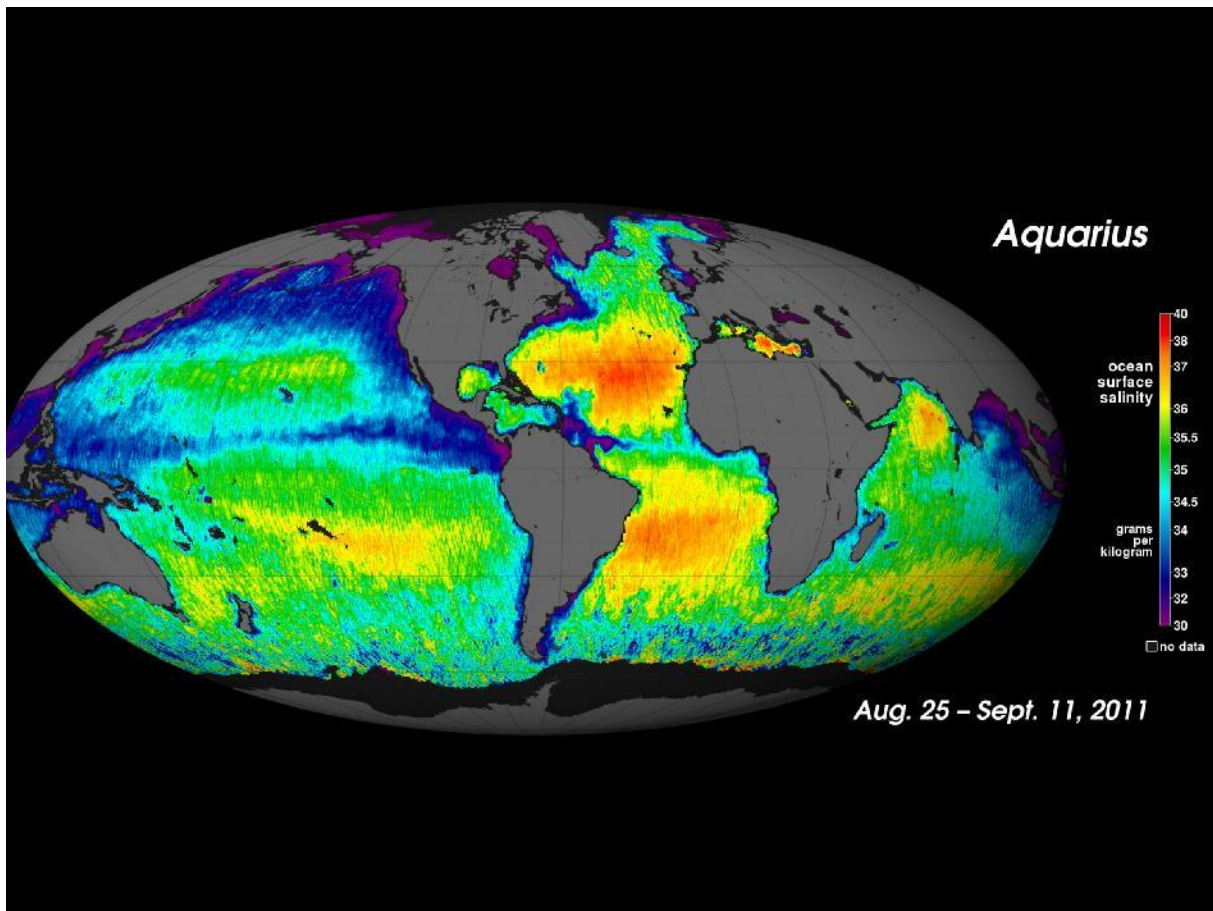
Helhetlig sett vil effektiv korrosjon foregå ved kritisk RH, som også kan betegnes som en viss tykkelse av elektrolytten. Denne tykkelsen er ifølge Cicek beskrevet som 0.01 g/m² vann på en flate, men som mest effektiv med en 150µm tykk vannfilm [25]. Ifølge Ahmad vil en vannfilm være 15 molekyler tykk ved 55% RH på stål, som øker til 90 molekyler tykk ved 100% RH, med en samtidig økende korrosjonsrate [17]. Hvis vannfilmen er for tykk vil korrosjonsmotstanden øke, fordi det blir vanskeligere for oksygen å løses i elektrolytten ved reduksjon. Ved for tykk vannfilm er det mer vann som oksygen må trenge gjennom for å oksidere metallet, og korrosjonsraten reduseres.

50% RH anses ofte som den nedre grense som muliggjør korrosjon [29], men kritisk RH vil senkes ved forurensende stoffer i luften. Hygroskopiske salter og luftbåren partikkelmaterie som støv og sot er slike stoffer, i tillegg til klorholdige molekyler og svoveldioksid (SO₂). For eksempel kan korrosjon oppstå på stål selv ved 35% RH i et marint miljø [17], og ellers i tørre miljøer med tilstedeværende svovelforbindelser som for eksempel H₂S [27]. Støv kan promotere korrosjon ved hydrofile egenskaper, enten ved at det binder seg til korrosive stoffer og absorberes i våte overflater, eller at det deponeres på overflater og adsorberer vann.

Luftbårne vanndråper som inneholder havsalter dannes ved åpen-havs brytning av bølger (whitecap) eller brytning av bølger mot strandlinjen, slik Cole, Paterson og Ganther opplyser [30] ifølge kildene deres Spillane, Monahan, Bowyer, Doyle, Stabenoy [31] og McKay, Garland, Livesley, Halliwell, Walker [32]. Følgende rapporterte Cole et al. at saltvannsaerosoler er den største atmosfæriske korrosjonsfaktoren i Australia [30], men at saltvannsaerosolproduksjon fra whitecaps er liten rundt ekvator og større utenfor de ekvatoriale regionene, ifølge kilden deres Monahan, Davidson og Spiel [33].

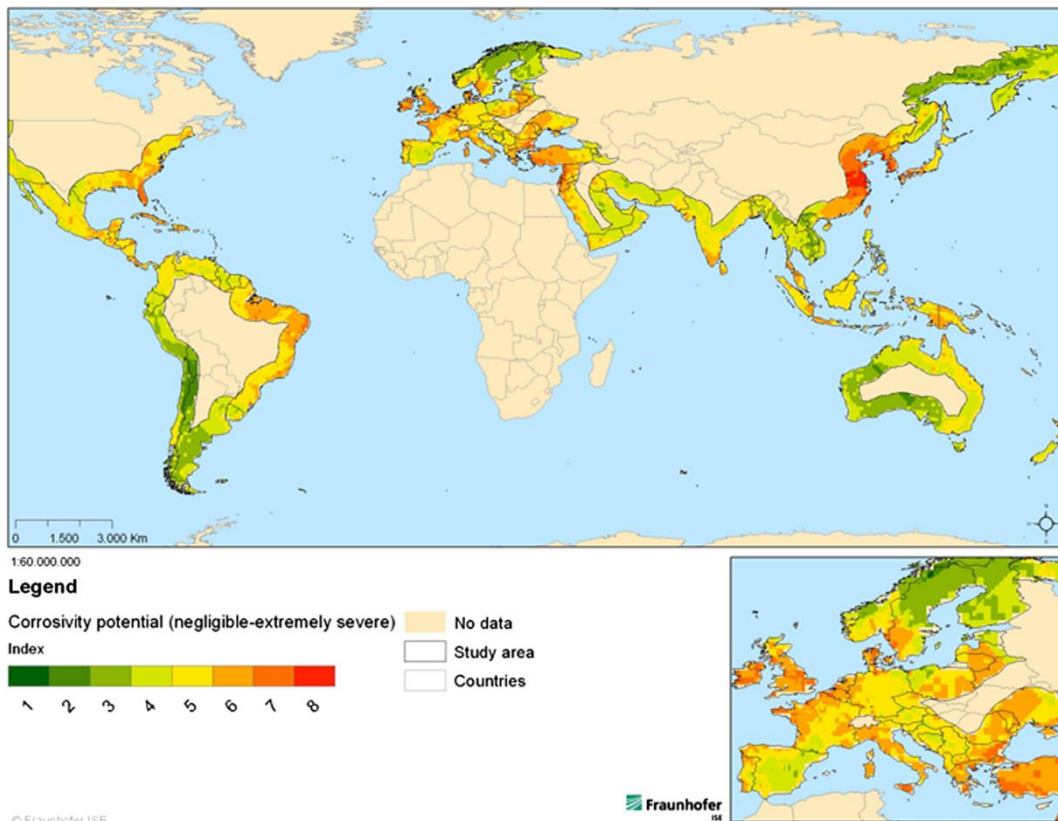
Utsagn fra Feistel et al. sier at det sammenliknet med global gjennomsnittssalinitet nær overflaten, er en høyere salinitet i de ekvatoriale regionene, og lavere i middelbreddegradsregionene [34] som er fra omtrent 30° til 60° på nordlig og sørlig halvkule [35]. I Figur 5 vises et kart av målt havoverflatesalinitet gjort av NASA's Aquarius instrument om bord SAC-D satellitten. Fra Figur 7 kan det kun antydes at Norges kystlinje er preget av en lavere

salinitet enn gjennomsnittet, som muligens kan være forårsaket av mye nedbør, mindre fordamping ved lavere temperatur, eller utløp fra elver [36].



Figur 5 - Havoverflatesalinitet målt av NASA's Aquarius instrument. Som vist i legenden er røde områder preget av høy overflatesalinitet og mørkere blå og lilla områder er mindre saline. Salinitet påvirkes av fordampning, tilførsel av ferskvann fra regn, smeltende is eller elver, og temperatur [36].

Når saltvannspartikler er gjort luftbårne, vil dråpestørrelsen, vindhastigheter, vindretning, RH og makrooverflateruhet (eksempel: bygninger eller løvverk) være noen av faktorene som påvirker havsaltdeponering, slik det rapporteres av Cole, Paterson og Ganther [30]. Funn fra Slamova et al. sin forskning kan tilsi at det er en hovedsakelig moderat atmosfærisk korrosivitet langs den norske kyst, etter resultatene deres å tyde som vises i Figur 6. Denne korrosiviteten baserer seg på de tre parameterne atmosfærisk salinitet, RH, og SO₂ nivåer i luften, med en henholdsvis vektning på 50%, 30% og 20% viktighet i korrosivitetsmodelleringen deres [37].



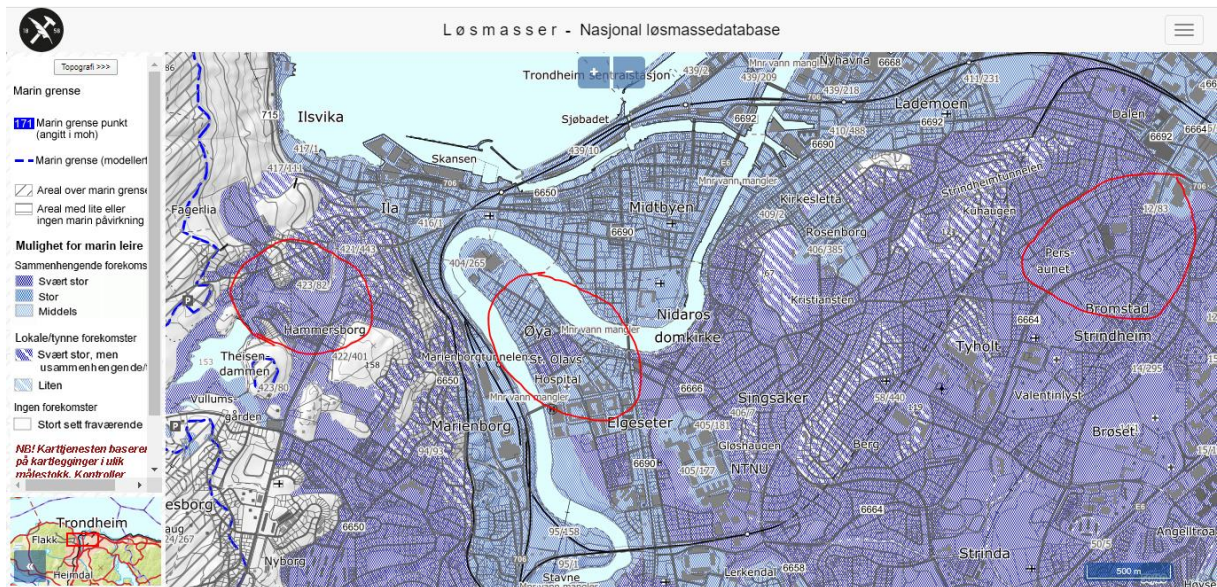
Figur 6 - "Distribusjon for atmosfærisk korrosivitet på verdenskartet - sluttresultater fra GIS-analysen" (Slamova et al., 2012, Fig. 5) [37].

En annen påvirkende faktor med hensyn på elektrolytten er regn og på beslektet vis våtvarigheten (time of wetness; TOW). Tiden som materialoverflaten er våt avgjør følgelig hvor lenge korrosjonscellen er aktiv. En måte TOW kan brukes til å vurdere det korrosive miljøet er å telle alle timer over 80% RH og over 32 grader celsius, ifølge Ahmad [17]. Det kan derimot være bedre å følge standardiserte metoder for å måle TOW. ISO 9223-standarden benevner tilstander med minst 80% RH og mer enn 0 grader celsius som våt-varige timer, slik dens definisjon viderefremmes av sekundærkildene Schindelholz og Kelly [38], og nettsiden corrosion-doctors.org [39]. Slik det tydeliggjøres i Schindelholz og Kelly sitt papir så gir ISO 9223-standarden et godt grunnlag for arbeid med TOW i sammenheng med korrosjon, men den har likevel sine ufullkommenheter, blant annet fordi korrosjon ikke er begrenset til temperaturer over null grader [38].

Det er overveiende enighet om at gasser som NO_x , SO_2 , luftbårne kloridioner, salter, støv og sot har en betydelig innvirkning på korrosjonsrater [15, 27, 29]. NO_x og SO_2 slippes ut fra blant annet industriområder og motortrafikk, som kan reagere med vanddamp i atmosfæren til HNO_3 og H_2SO_4 , som dermed kan falle som sur nedbør [15, 17]. Regn har og den virkningen at det kan skylle bort deponerte salter og støv, og slik kan det motvirke korrosjon [30]. Derimot ved feil design kan vann samles i groper eller sprekker og danne en stående elektrolytt, og bidra til en mye høyere TOW.

2.2.2 Lokale forhold i Trondheim

Dette underkapittelet opplyser om lokale forhold som finnes i Trondheim, i tillegg til historiske data og utviklinger. Jordsmonnet i Trondheim kjennetegnes typisk som leirete, og under den marine grensen på omtrent 170 moh består mer enn 60% av jorden av havavsetninger, og da spesielt leire [40]. I kartutsnittet under i Figur 7 vises det som kalles «mulighet for marin leire» (MML), som viser hvor stor sannsynlighet det er for å ha marin leire i et underlag [41], i tillegg til de tre områdene som skal undersøkes.



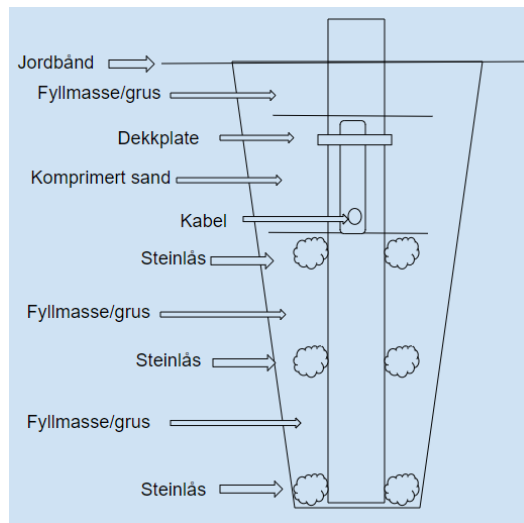
Figur 7 – Kartutsnittet er hentet fra NGU's Løsmassedatabase [42]. Det er mulig å se at det er store deler av Trondheim som preges av løsmasser kjent som «svært stor sannsynlighet for marin leire» (den mørkeste lillafargen). De sirklede områdene er der det skal undersøkes i den eksperimentelle delen.

Mastene som skal undersøkes i denne rapporten har blitt satt opp mellom 1986 til 1988, med noen så tidlig som 1979, opplyser Trondheim kommune [43]. Videre opplyses det fra kommunen at det har vært historiske variasjoner i mastenes materialvalg, utførelse og produsenter. Mastene kan lettest kategoriseres etter materialutførelsen, og beskrives under i Tabell 3. Det antas at det har vært en naturlig utvikling av mastene fra den eldste, variant 1, til nyere master som variant 5. Lysarmaturene på mastene er noe denne oppgaven ikke har kapasitet til å hverken utforske eller beskrive. I dag lager noen produsenter varmforsinkede og pulverlakkerte master for økt korrosjonsbeskyttelse.

Tabell 3 - De forskjellige lysmastvariantene som tidligere har blitt installert. Den nedre del defineres som den nederste seksjonen av lysmasten, som står nede i bakken og slutter ved første innsnevring i masten over bakken. Øvre del er mastseksjonene fra første innsnevring og oppover.

Variant	Nedre del	Øvre del
1	Ikke galvanisert	Ikke galvanisert
2	Galvanisert utvendig	Ikke galvanisert
3	Galvanisert utvendig	Galvanisert utvendig
4	Galvanisert utvendig og innvendig	Ikke galvanisert
5	Helgalvanisert	Helgalvanisert

Alle mastene som skal undersøkes kalles for *jordstikk* eller *nedstikk*, som betyr at masten er satt i bakken uten å stå på et oppbygget fundament. Beliggenheten til masten blir gravet til, og består av flere lag med stein, grus og sand som skal sikre stabilitet og dreneringsegenskaper. En skisse av en nedstikksmast er gitt under i Figur 8, der V-formen er det området som graves til. Det opplyses også at mastene ikke settes i leirete grunn, da den kan være ustabil [43].



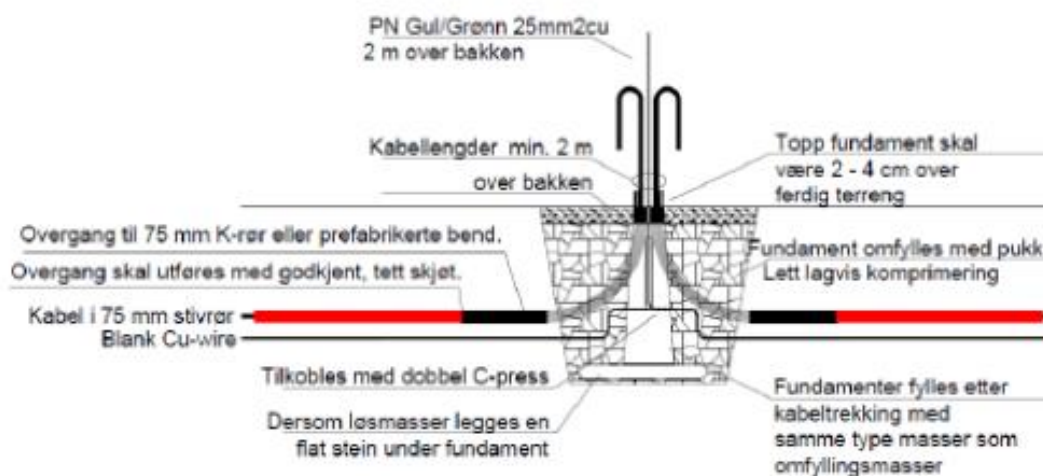
Figur 8 - Skjematisk skisse for en nedstikksmast [43].

Veggtykkelsen til masten, som skal måles og undersøkes i den eksperimentelle delen, opplyses å være 5-6 mm til vanlig. På grunn av mange forskjellige mastleverandører i tidligere år kan det finnes varianter som avviker fra dette. Noen kan være så tykke som 10 mm, ifølge en av kommunens kilder som har hatt kjennskap til Trondheim Energiverk [43]. Trondheim E-verk, som det også ble kalt, ble solgt til Statkraft ved årsskiftet 2001/2002 [44, 45]. For mastene

som skal undersøkes i denne oppgaven er ikke veggykkelsene kjent, og dette påvirker utførelsen av et eksperimentelt forsøk.

Selskapet Vik Ørsta, som blant annet produserer lysmaster, ble kontaktet og spurt om hjelp til identifisering av master og produktinformasjon om dem. De ga utfyllende informasjon, men kunne konkludere at det ikke er deres master som skal måles i denne oppgaven. Videre ble det opplyst at en med kjennskap til lysmastene i Trondheim kommune, forklarte at det har vært forskjellige lysmaster og forskjellige leverandører [46]. Dette er også overensstemmende med informasjonen kommunen har gitt; at det har vært forskjellige produsenter, og at mastene har blitt laget på maskinverksted med de materialer som har vært tilgjengelig [43].

Trondheim kommune sin Veglysnorm sier at alle nye master skal bygges på fundament, og at nedstikksmaster som tas ned ikke skal gjenbrukes [4]. Mastene er satt mellom 1.0 og 1.50m ned i bakken, avhengig av masthøyde og vindbelastning. Under i Figur 9 vises en slik fundament-mast.

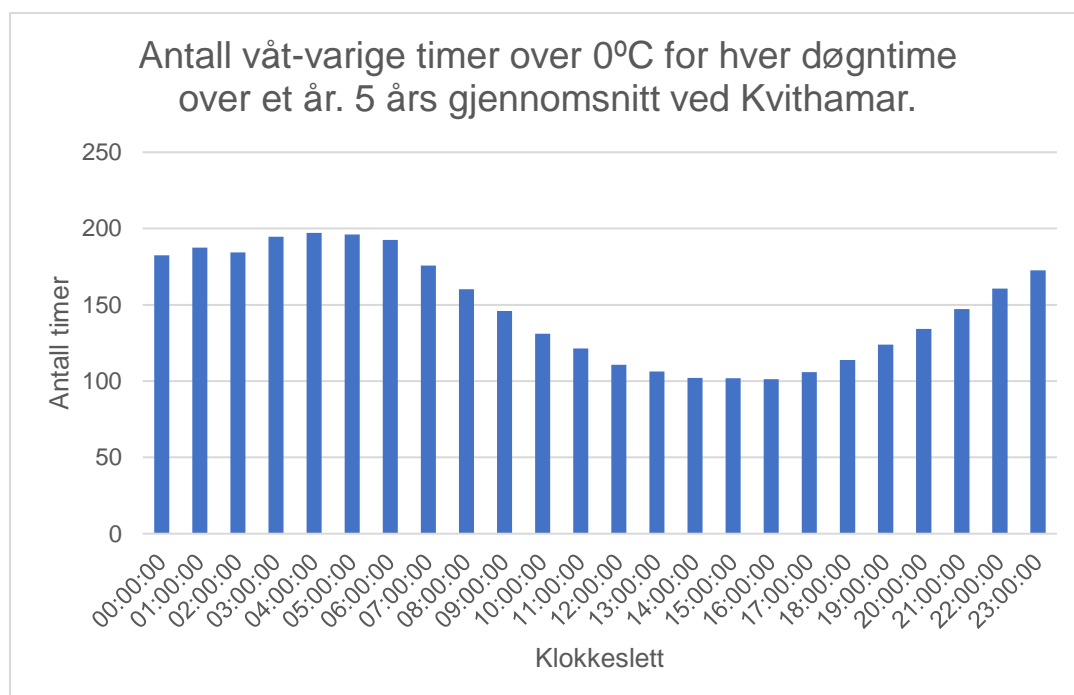


Figur 9 - Tverrsnitt av hvordan nye lysmaster på fundament skal føres opp etter Trondheim kommunes Veglysnorm [4].

Det har og blitt opplyst av kommunen at det vinterstid er to måter kommunens veger holdes isfrie. På større trafikkerte veier både brøytes og saltes det. Saltet som brukes kan være av typen NaCl eller MgCl₂, og er henholdsvis fordelt 70wt% og 30wt%, med en uforandret innkjøpsmengde de siste 20 årene, opplyses det av kommunen [43]. Det er kun større trafikkerte veier som saltes, men forbruksmengden salt, prisen på saltet, eller hvilken type som brukes hvor, kan ikke informeres om. På mindre veier, som finnes i nabolag eller der det ikke forventes gjennomgående trafikk, brøytes vegen og strøs med grus som også inneholder NaCl. Grusen er tynt dekket med NaCl for å sikre at det fester seg på mulig is på den brøytede vegen, og har et anslått vektinnhold på 2.5 til 3.5 % NaCl. Mengden grus og salt som brukes, eller prisen på dette, opplyses det ikke om.

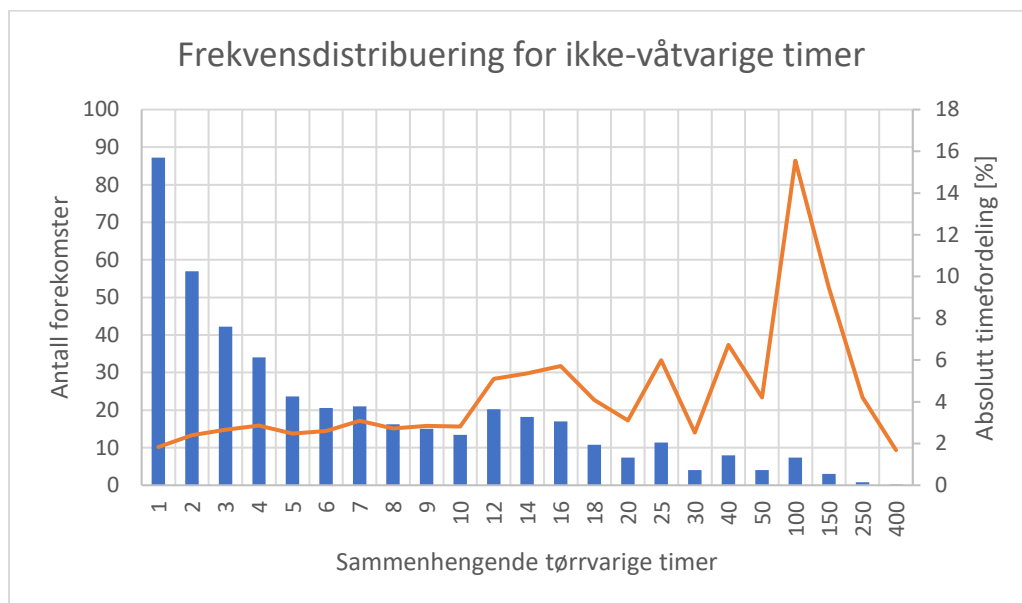
NaCl og MgCl₂ er blant noen stoffer som egner seg godt som is-fjernere. Ifølge Li et al. rapporteres det at NaCl og MgCl₂ korroderer forskjellig ved ulike RH. Det ble følgende beskrevet at NaCl er mer korrosivt ved tørrere miljøer enn MgCl₂, men MgCl₂ er mer korrosivt i fuktige miljøer enn NaCl, og dette kan skyldes de hygroscopiske egenskapene til stoffene [47]. I en undersøkelse av Nazari, Shi, Jackson, Zhang, og Li har det også blitt funnet at løsninger av MgCl₂ med tilsetninger som industrielle saltfjernere, eller med sukkerbete-biprodukter, kan øke korrosjonsmotstand i karbonstål og rustfritt stål [48].

Fra norsk klimaservicesenter.no sine data kan det finnes historikk for naturlige faktorer som kan være tilretteleggende for korrosjon. I Figur 10 under fremstilles total våt-varighet (TOW) basert på kriteriene RH ≥ 80% eller nedbørsmengde > 0 mm, og samtidig temperatur > 0°C. Data er hentet fra Norsk Klimaservicesenter sin målestasjon Kvithamar ved Stjørdal [49], omtrent 25 km fra Trondheim sentrum. Kriteriene for å bestemme TOW har bakgrunn i ISO 9223 standarden slik den ble gjengitt av Schindelholz og Kelly [38], og nettsiden corrosion-doctors.org [39]. I tillegg har nedbørstimer blitt inkludert i målet på våt-varige timer, uavhengig av nedbørsmengde. Basert på et femårs gjennomsnitt er årlig antall våt-varige timer gitt som 3549 timer med et standardavvik σ på 293 timer. Fra figuren kan det også sees at beregnede våt-varige timer har størst forekomst rundt klokken 04:00, og lavest rundt klokken 15:00. Dette kan også være overensstemmende med utsagn fra Cole, Muster, Azmat, Venkatraman og Cook, om at korrosjonstilretteleggende RH er størst om natten, og at korrodering vil foregå da [50].



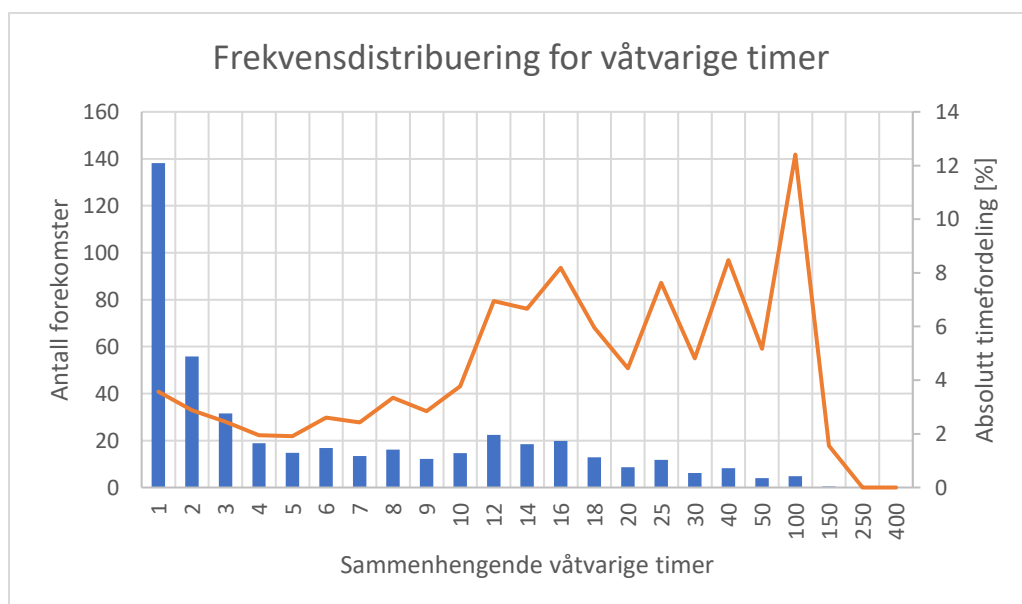
Figur 10 - Total TOW basert på data fra målestasjon ved Kvithamar. Fordeling av våt-varige timer gjennom døgnet, basert på et 5 års gjennomsnitt av værdata.

Under i Figur 11 og Figur 12 vises en frekvensdistribusjon for tørr-varigheten og våt-varigheten, og er et gjennomsnitt basert på samme 5 år med historiske værdata som Figur 10 over bruker. Tørr-varigheten er her funnet fra kriteriene $RH < 80\%$ og ingen nedbør, men ved vilkårlige temperaturer. Våtvarigheten benytter seg igjen av kriteriene $RH \geq 80\%$ eller en nedbørsmengde > 0 mm, og samtidig temperatur $> 0^{\circ}\text{C}$. Data er hentet fra norsk klimaservicesenter.no [49]. I gjennomsnitt er det 9.7 tørre timer på rad, med et standardavvik på 17.7 timer.



Figur 11 - Fordeling av varighet for ikke-våte timer.

For våtvarige timer som vises i Figur 12, er det i gjennomsnitt 7.9 timer på rad, med et standardavvik på 10.9 timer.



Figur 12 - Fordeling av sammenhengende våtvarige timer.

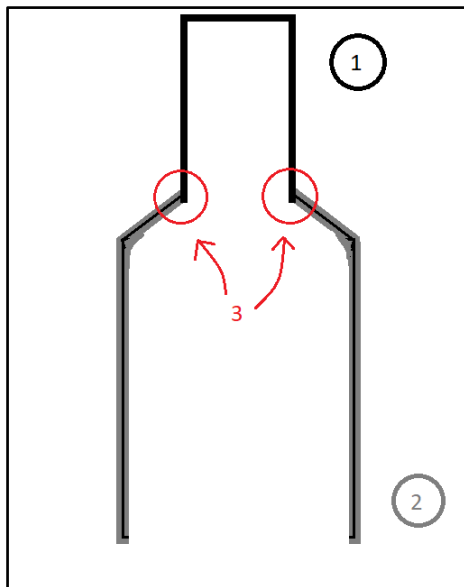
2.2.3 Galvanisk korrosjon

Galvanisk korrosjon kan oppstå mellom to ulike metaller med forskjellig cellepotensialer, når det er metallisk kontakt og en elektrisk ledende elektrolytt er til stede [51]. Metoden for korrosjon likner den av en vanlig korrosjonscelle, der det oppstår en anode og katode. I dette tilfellet blir det metallet som relativt sett er mer aktivt, anoden, og det mer edle metallet blir katoden. Slik Ahmad skriver vil forholdet mellom det anodiske og katodiske arealet ha en påvirkning, og det er optimalt at det anodiske arealet er mye større enn det katodiske, eller fullstendig fraskilt [27]. Under i Tabell 4 gjengis en tabell for galvanisk spenningsrekke, utgitt av Gyldendal Norsk Forlag, *Tabeller og formelsamling*, (2015).

Tabell 4 - Tabell for galvanisk spenningsrekke. Hentet fra "Tabeller og formelsamling" fra Gyldendal Norsk Forlag [52]. Metallene er rangert fra minst edle til mest edle nedover tabellen.

Galvanisk spenningsrekke for noen metaller og metall- legeringer i sjøvann ved 20 grader celsius		
Metall	Kjemisk tegn	Spenning (V)
Magnesium	Mg	-1.36V
Sink	Zn	-0.86V
Aluminium	Al	-0.51V
Kadmium	Cd	-0.49V
Stål		-0.46V
Bly	Pb	-0.31V
Rustfritt stål	18/8 (aktivt)	-0.29V
Tinn	Sn	-0.26V
Kobber	Cu	0.02V
Rustfritt stål	18/8 (passivt)	0.09V
Sølv	Ag	0.19V

Det har blitt informert av Trondheim kommune at noen av mastene vil være delvis galvaniserte, der nedre mastseksjon er galvanisert, men ikke den øvre. Under i Figur 13 vises et eksempel på en slik mast, og viser punkter på masten som kan være utsatte.



Figur 13. Tverrsnittsdiagram av lysmast. Punkt 1: stålseksjon. Punkt 2: varmforsinket stål som utgjør nedstikkseksjonen. Punkt 3: galvanisk kontakt mellom stål og sink.

2.3 Ikke-Destruktiv Testing og Ultralyd

Ikke-destruktiv testing, på engelsk kalt nondestructive testing og ofte forkortet som NDT, er en inspeksjonsmetode som unngår behovet for å gjøre fysiske eller permanente inngrep i et material for å inspisere legemet for feil eller defekter. De kanskje vanligste metodene for ikke-destruktiv inspeksjon (engelsk: nondestructive inspection, NDI) kan være ved lukt eller hørsel, men mest brukt, visuell inspeksjon. Ved lukt kan det oppdages en lekkasje, en ulyd i et instrument kan tilsi skade, og en deformasjon eller en sprekk viser problemet tydelig. Målet med NDT-metoder er å kunne oppdage feil i materialer før det utbrer seg til problemer der helse, miljø og sikkerhet står i fare.

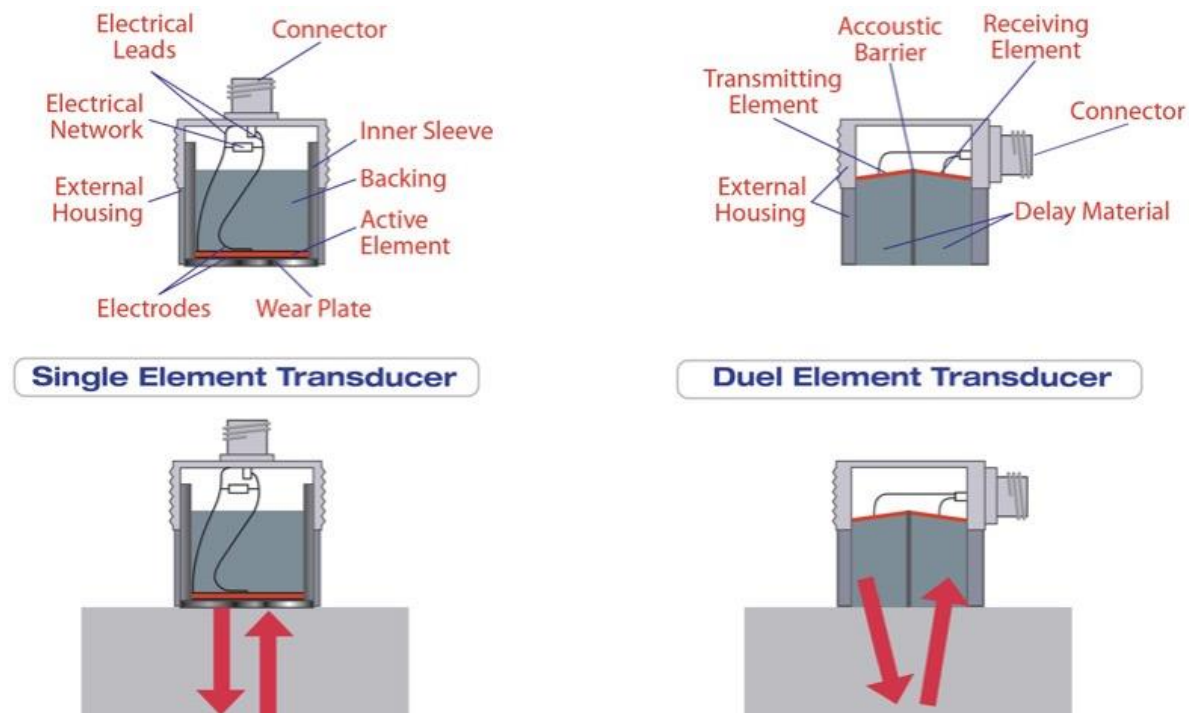
Ultralyd er en av flere tekniske NDT-metoder, og andre nevneverdige teknikker er radiografi eller magnetpartikkeltesting (MPI) [53]. Det grunnleggende prinsippet for ultralyd testing er å detektere defekter i et material, som ofte kalles diskontinuiteter. Som en betegnelse er en diskontinuitet et avbrudd i en fysisk struktur, slik ASTM E1316-20 standarden opplyser [54]. Denne fysiske strukturen vil være et legeme av en materialtype, for eksempel en stålsylinder, og avbruddet kan være der sylindere slutter, eller en intern sprekk som forhindrer at lydbølgene kan bre seg.

Ultralyd er lydbølger som har mer enn 20 000 svingninger per sekund, som noteres 20kHz [53]. Disse lydbølgene fremstilles ved bruk av et piezoelektrisk krystall, som sender ut elektrisk spenning når en mekanisk last påføres, eller som endrer form når elektrisk spenning tilføres [55]. Når det tilføres spenning kan krystallet deformeres, som forflytter luft og kan lage ultralydbølger. Krystallet sitter vanligvis inne i et lydhode, og det finnes mange forskjellige typer lydhoder.

Ved å sette lydhodet mot et material, uten avbrudd mellom lydhodet og materialet, kan lydbølgene forplante seg gjennom materialet. Slik Josef og Herbert Krautkrämer tydeliggjør, så er det veldig viktig å opprettholde god kontakt mellom lydhodet og materialet, og dette oppnås ved bruk av en kontaktvæske [56], som ofte kalles kontaktgel eller på engelsk, couplant. Videre forklarer de at overflater må forberedes før måling, ved å fjerne smuss, sand, støv eller korrosjonsprodukter. Dette kan gjøres med en klut, men det anbefales å bruke stålbørster, skraper eller å polere det bort med en vinkelsliper, da luftlag mellom korrosjonsprodukter eller maling kan forhindre gjennomtrengning av lydbølger [56].

I denne oppgaven brukes kun ett lydhode som kalles sender/mottaker (S/M) lydhode, et to-krystall lydhode, eller på engelsk, dual crystal transducer. S/M lydhodet er noe annerledes fra det som kalles et monokrystall-lydhode selv om de begge måler normalt på en overflate, men bruksområdene er overlappende og kan ofte brukes til tykkelsesmåling eller korrosjonsmåling [53]. Under i Figur 14 vises måten lydbølger sendes og mottas med de to forskjellige

lydhodene. Det finnes andre typer lydholder, som vinkellydholder som kan brukes til å måle avsidesliggende defekter som ikke er tilgjengelige med normalt lydholder, eller phased array (PA) som kan danne tredimensjonale bilder av overflaten.

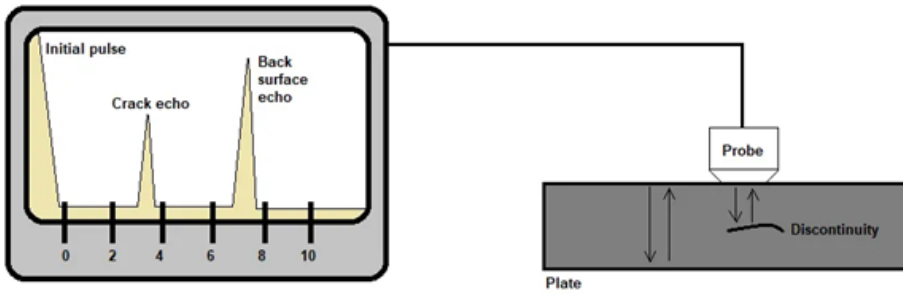


Figur 14 – Venstre: monokrystall lydhode. Høyre: sender/mottaker lydhode [57].

Måten ultralyd, eller ultrasonisk testing (UT), kan brukes til å måle veggtykkelser i materialer er ved tidtaking av det utsendte og mottatte signalet, som ofte kalles puls-ekko metoden [58]. Materialer har forskjellig lydshastighet, og når det sendes et lydsignal gjennom ett material vil det ha konstant hastighet. Ved å presist kunne måle tiden det tar fra signalet sendes ut, til det kommer tilbake, i tillegg til å kjenne materialets lydshastighet, kan den tilbakelagte avstanden finnes [53]. Dette vises under i Likning 6, der d er tilbakelagt avstand, v er lydshastigheten i materialet, og t er tiden. Avstanden tilbakelagt til og fra en diskontinuitet må deles med to for å vise den riktige veggtykkelsen. For stål er lydshastigheten 5900 m/s [53], og for andre materialer må dette justeres eller slås opp i tabeller, hvis det ikke er forhåndsinnstilt i ultralydapparatet.

$$d = \frac{vt}{2} \tag{6}$$

Når ultralydmålinger gjøres, vil resultatene kunne leses av skjermen på ultralydapparatet, og er vist frem i Figur 15 under. Det første ekkoet som sees kalles start-ekko, og det siste ekkoet som sees på Figur 15 kalles bakveggsekkoet. Ekkoer som oppstår imellom disse to vil være refleksjoner på grunn av diskontinuiteter i materialet. Veggtykkelser kan bestemmes ved å lese av avstandsdifferansen mellom start-ekko og mellom-ekkoet [53].



Figur 15 – Illustrasjon for bruk av et normaltlydhode [59].

3 Eksperimentelt Arbeid

Dette eksperimentelle arbeidet har som hensikt å gjøre kvantitative målinger av veggtykkelsen til lysmaster ved forskjellige lokasjoner i Trondheim kommune. Disse målingene vil så benyttes til å gjøre kvalitative beretninger om tilstanden i lysmastene, dette vil inngå i kapitlet diskusjon. Veggtykkelsen skal måles fordi det kan antyde hvor korrosivt miljøet kan være eller har vært for mastene. Det vil også gi mulighet for å gi et mål på hvor mye av veggen som har blitt korrodert vekk, hvis det er tilfellet.

Det er tre utvalgte lokasjoner der undersøkelsene skal gjøres, og dette har blitt gjort i samråd med kommunen basert på mastenes alder, tilstand, og en forventning om det korrosive miljøet rundt mastene. De tre lokasjonene A, B og C er i nærheten av henholdsvis Hammersborg, Øya, og Persaunet. I tabellen i Vedlegg 1 gis det ytterligere informasjon om mastene ved de tre lokasjonene, og det bør spesielt merkes at det er forskjeller mellom mastene inne på hvert område, og mellom områder. Alle de tre lokasjonene brøytes og strøs med en blanding av 97 wt% grus og 3 wt% NaCl som opplyst av Trondheim kommune.

3.1 Utstyr

Materialene som er brukt i det eksperimentelle arbeidet er ført opp under. Som det forklares under kapittel 3.2 så er det viktig å rengjøre området på stolpen som skal måles, og nødvendig utstyr bør medbringes.

- Ultralydapparat, Sonatest Prisma.
- Ultrasound couplant (Kontaktgel).
- MSEB 4 67429 normallydhode.
- Skyvelære.

3.2 Metode

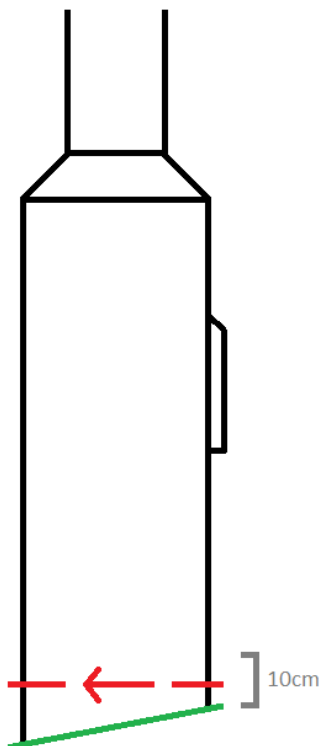
Det er naturlig å anta at det kan være noe tildekkende smuss på en lysmast som står utendørs, og som har gjort det de siste 30 til 40 årene. Selv om regn kan vaske bort noe støv og salt som deponeres kan det fortsatt være rester som ikke lar seg fjerne, som for eksempel korrosjonsprodukter som har rent nedover masten. I ultralydmålinger er det viktig å ha god kontakt med underlaget, så det bestemmes at masten skal rengjøres med vann på de delene av masten som skal måles. Det vil foretas to typer målinger på masten. Den første skal anta en opprinnelig veggtykkelse M_0 , den andre måletypen for å finne reduksjoner i mastens veggtykkelse nær bakken M_1 . All måling vil gjøres med normallydhodet MSEB 4.

Den første måletypen har som hensikt å etablere en antatt opprinnelig veggtykkelse M_0 av masten. Dette søkes oppnådd ved å gjøre 10 målinger tilfeldige steder på hver mast, og bruke gjennomsnittet som opprinnelig veggtykkelse. Bakgrunnen for dette er at opprinnelig

veggtykkelse ikke er kjent, og i tilfeller der M_0 er kjent kan denne første måletypen sees bort fra. Videre begrunnes hensikten med tilfeldiggjøringen av målingene med at det er en sveisesøm på mastene som kan gi utslag på målingene, og som ikke kan sees under maling eller på en rustet flate, i tillegg til at tilfeldige målinger bør unngå å lammes av samme feil.

M_0 skal måles på den nedre del av masten, altså under den første innsnevringen i masten. Målinger skal ikke gjøres på deksel, i umiddelbar nærhet av deksel, i selve innsnevringen, eller i unormalheter på masten som eksempelvis hull eller bulker. Så godt det lar seg gjøre bør målingene foretas på en homogen flate, altså ikke måle på grensen mellom en rustet og malt flate. Det bør også unngås å måle direkte på rust, både da veggtykkelsen allerede er noe redusert og fordi det kan gi dårlig kontakt eller mer spredning i lydsignalene.

Den andre måletypen vil gjøres for å undersøke mulig reduksjon av veggtykkelse nær bakken M_1 . For M_1 skal målingene gjøres så nær bakken som mulig, og ikke mer enn 10 cm unna bakken. Ved lokal ujevn bakke gjøres målingene i en omkrets om masten fra bakkens høyeste punkt på masten, som demonstreres under i Figur 16.

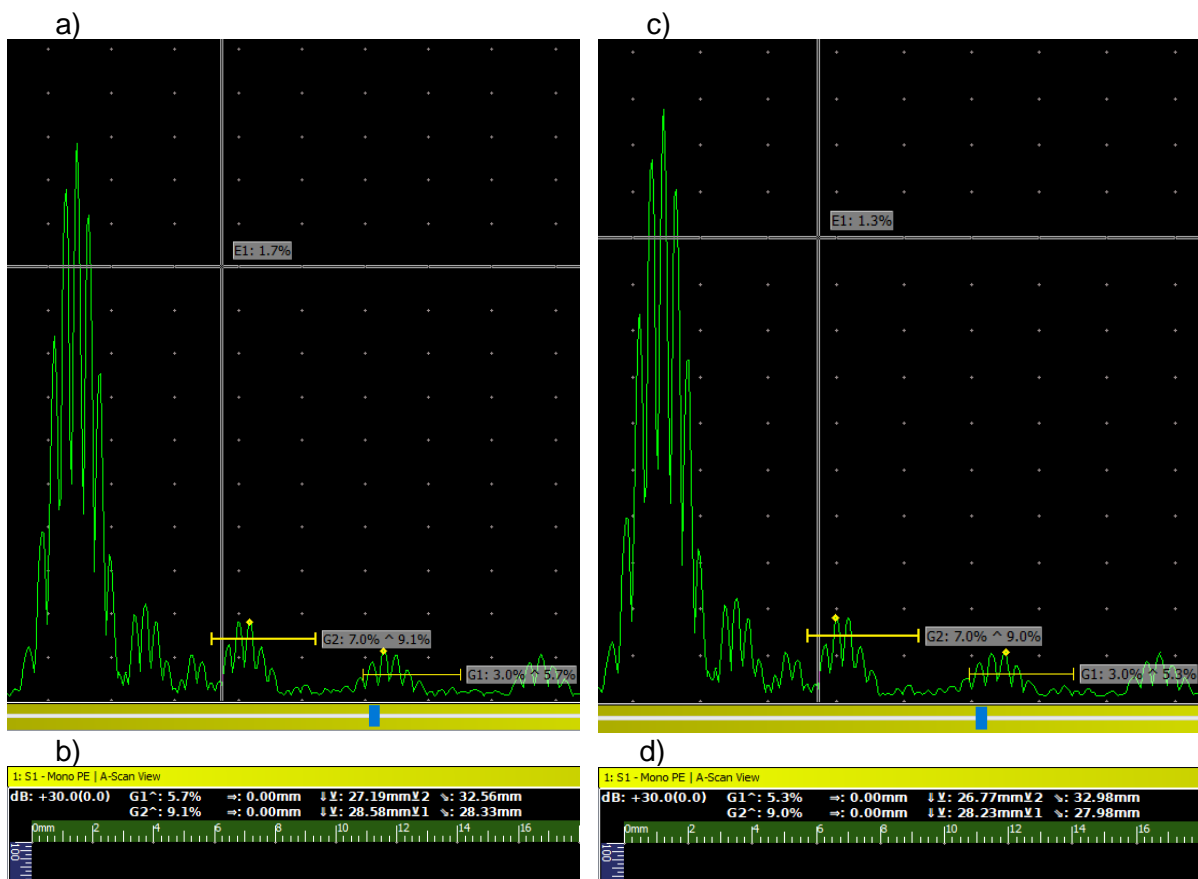


Figur 16 - Demonstrasjon for hvordan masten skal måles over bakken. Ikke til skala.

Det skal foretas punktvis målinger i en krets rundt masten. Hver punktvis måling skal gjøres med en avstand lik lydhodets diameter, og regnes fra lydhodets sentrum. Årsaken til at det skal gjøres punktvis målinger, og ikke en kontinuerlig måling rundt masten, er fordi det ville blitt svært krevende å forskjelliggjøre ekte målt veggtykkelse fra feilmålinger når dataen skal behandles etterpå. Feilmålinger kan her være forårsaket av bevegelse eller dårlig kontakt

mellom lydhode og mast, men også refleksjon fra ultralydgelen. Det er følgelig viktig å ha god kontakt med masten, og hver punktmåling skal gjøres til det fremkommer en tydelig veggtykkelse. Også med denne målemetoden skal det etter beste evne unngås å måle direkte på rustede flater, eller på unormalheter som hull eller bulker, skulle det være tilfellet.

M_1 målingene skal det gjøres opptak av sånn at disse kan sees og vurderes i ettertid. Av prinsipp skal den minste topp-verdien leses av som målt veggtykkelse, et eksempel vises under i Figur 17. Avlesningen kan utgjøre en større kilde til feil, men denne måten for avlesning begrunnes med at det finnes en minste målbar veggtykkelse. Derimot kan største målbar veggtykkelse påvirkes av hvor god kontakt det er mellom lydhodet og mast.



Figur 17 – To forskjellige måleresultater gjort innen få sekunder på akkurat samme sted på masten fra eksperimentell gjennomføring. Bilde a) og b) viser slik målinger vil avleses og tolkes, når det gjøres innen et så lite tidsrom der målinger fra bilde c) og d) også fremkommer.

4 Resultater

Dette kapittelet deles inn etter de forskjellige lokasjonene målingene er gjort ved, Lokasjon A, B og C. For hver lokasjon kan tilfeldige målte veggtykkelser M_0 sees i tabellene i Vedlegg 2. Under hver lokasjon vises først oppsummerende resultater av gjennomsnittlige veggtykkelser og standardavvik for M_0 og M_1 målingene, empiriske normalfordelinger av alle mastene, etterfulgt av grafiske fremstillinger av målte veggtykkelser M_1 , og avsluttes med funn av arealforskjeller mellom målingene M_0 og M_1 . De grafiske fremstillingene vil vise punktmålinger, radielle interpoleringer mellom punktmålinger, og estimerte opprinnelig gjennomsnittlig veggtykkelse $\overline{M_0}$.

I Vedlegg 3-7 fremvises et utvalg figurer som demonstrerer den visuelle tilstanden til mastene ved Lokasjonene A, B og C. Det har blitt funnet at mastene har en ytre diameter på 160 mm. Alle M_1 målingene har fulgt samme grunnleggende prosedyre, men det har ikke blitt gjort et likt antall M_1 målinger på alle mastene. De empiriske normalfordelingene er basert på data fra M_1 målinger. Det er ikke gjort en formell normalitetstest, men de fleste mastene følger en tilnærmet normalfordeling.

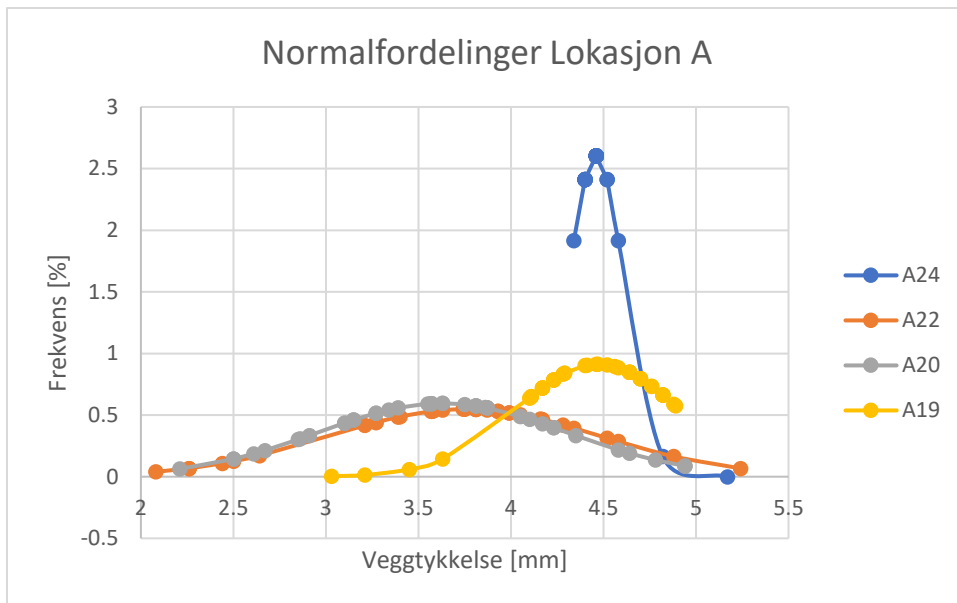
4.1 Lokasjon A

Under i Tabell 5 vises gjennomsnittlig veggtykkelser \overline{M} og standardavvik σ for M_0 og M_1 målinger fra Lokasjon A. Mast A24 ble observert å være i god stand, men mast A22, A20, og A19 hadde en noe mer slitt tilstand med hensyn på overflaten. Mast A24 er av en annen type enn A22, A20 og A19. I Vedlegg 3 kan de fysiske tilstandene for mastene nær bakken sees.

Tabell 5 – Gjennomsnittlig veggtykkelser og standardavvik for målinger ved Lokasjon A.

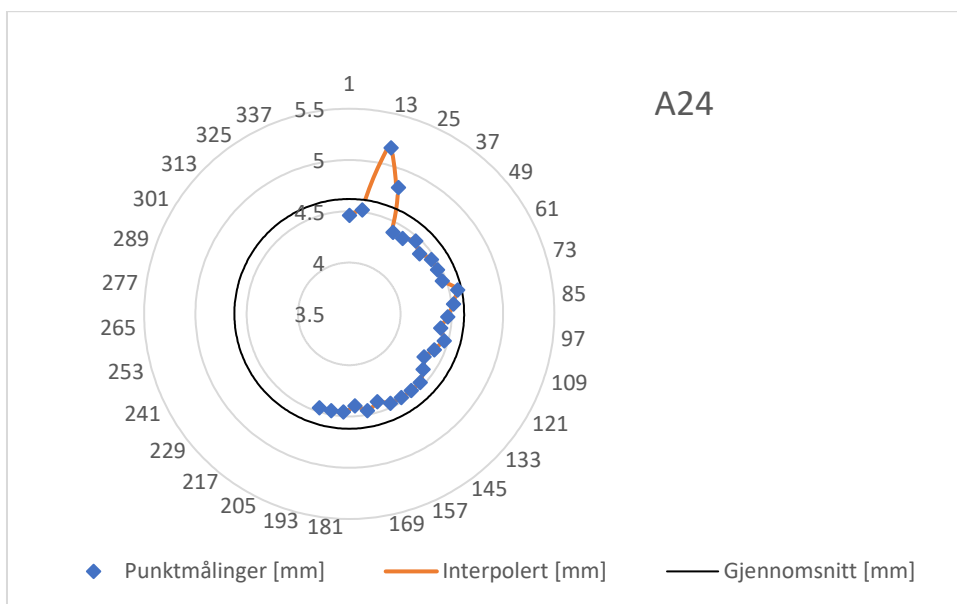
Måletype		[enhet]	A24	A22	A21	A19
M_0	$\overline{M_0}$	[mm]	4.62	4.04	4.40	4.74
	σ_0	[mm]	0.18	0.20	0.37	0.44
M_1	$\overline{M_1}$	[mm]	4.48	3.65	3.62	4.39
	σ_1	[mm]	0.15	0.73	0.67	0.44

Under i Figur 18 vises fordelingene av mastveggtykkelsene for hver mast ved denne lokasjonen. A24 har ikke en fordeling som kan normalfordelt.



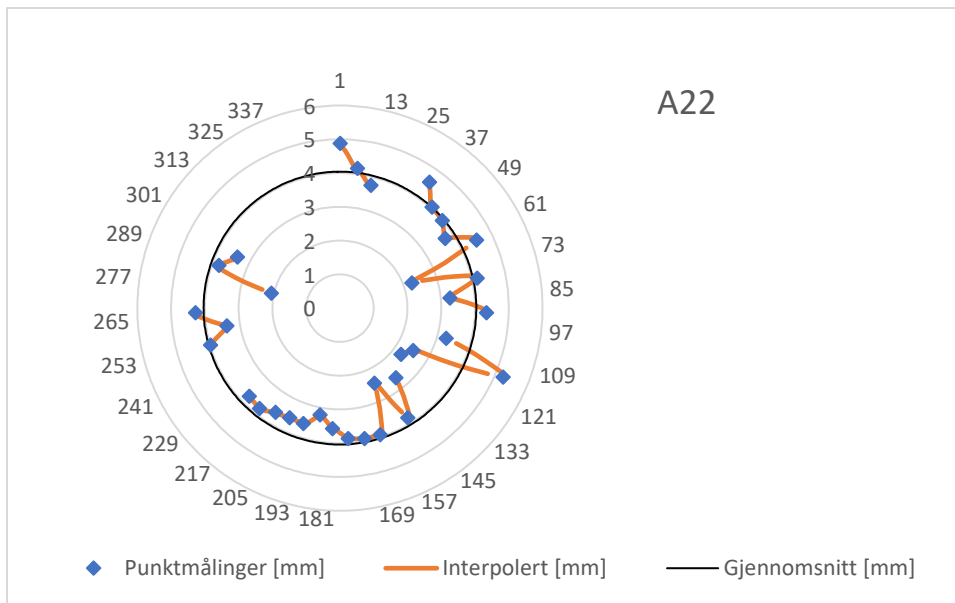
Figur 18 - Normalfordelinger av master ved Lokasjon A.

Mast A24 var lite preget av utvendig korrosjon slik det var mulig å observere. Hele masten er galvanisert, og med en tydelig sveisesøm. Sveisesømmen gjorde utslag på M_1 målingen, og kan sees som to utstikkende punktmålinger i Figur 19 under. Opptaket ble avbrutt og kun halve masten er målt.



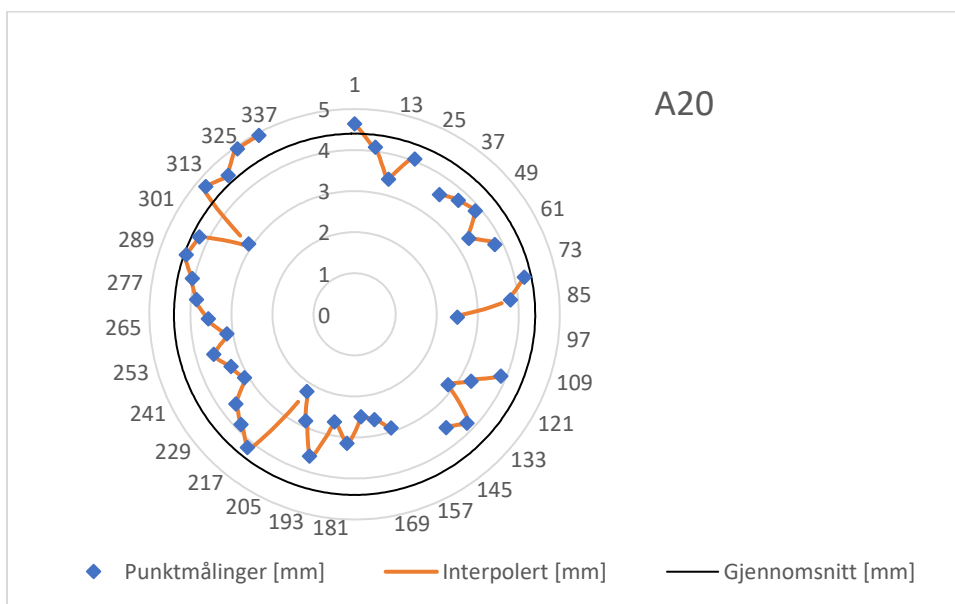
Figur 19 – Grafisk fremstilling av punktmålinger av mast A24.

Mast A22 hadde en liten bulk på nedre mastseksjon, hadde avflakende maling og var sterkt korrodert over hele masten, som kan sees i Vedlegg 4 a-c. Masten sto skjevt og ustødig i bakken, og i februar ble det observert at det var brøytet store snømengder som lå på masten. Overflaten av masten var korrodert og ujevn, både nedre og øvre del. I Figur 20 kan punktmålingene M_1 sees.



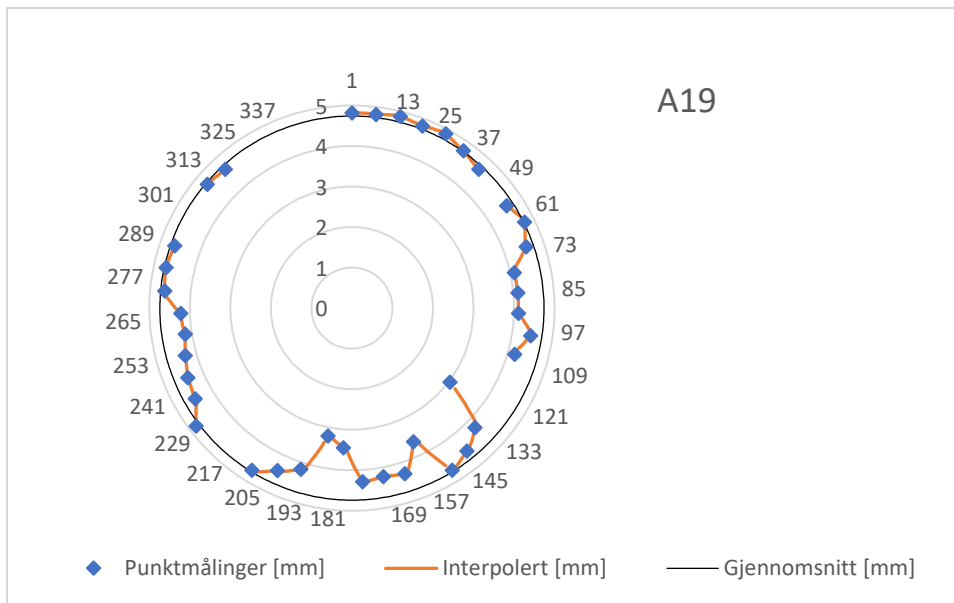
Figur 20 – Punktmålinger av mast A22.

Mast A20 hadde avflakende maling, var bulket/riftet på siden, og var preget av lokale korrosjonsgroper. Korrosjonsgroper på 1-5mm ble grovt målt med et skyvelære, og var spredt på nedre mastseksjon, se Vedlegg 4 bilder d-f. Dekselet var mye korrodert på hjørnene og kantene. Figur 21 viser målingene M_1 for mast A20.



Figur 21 – Fremstilling av målinger gjort på mast A20.

Mast A19 var mindre korrodert sammenliknet med mast A20 og A22, men dekslet var noe korrodert, i tillegg til enkelte steder i mastens innsnevninger. Det ble observert flakete maling, men også oppbygning av korrosjonsprodukter under malingen enkelte steder. Mast A19 sine punktmålinger vises følgende i Figur 22.



Figur 22 - Punktmålinger gjort på mast A19.

Under i Tabell 6 er en oversikt som viser estimert opprinnelig areal $A_{0,nominell}$, nominelt arealtap $A_{T,nominell}$, numerisk arealtap $A_{T,numerisk}$, numerisk beregnet veggtykkelse $r_{numerisk}$, og nominelle og numeriske beregnede arealendringer fra det opprinnelige estimerte arealet.

Tabell 6 - Oversikt for estimerte arealtap for hver mast ved Lokasjon A.

	[enhet]	A24	A22	A20	A19
$A_{0,nominell}$	[mm ²]	2389.32	2082.00	2272.50	2453.17
$A_{T,nominell}$	[mm ²]	66.37	186.61	372.42	165.89
$A_{T,numerisk}$	[mm ²]	61.85	161.51	353.11	163.24
$r_{numerisk}$	[mm]	4.49	3.70	3.66	4.40
$A_{T,nominell}$	%	2.8	9.0	16.4	6.8
$A_{T,numerisk}$	%	2.6	7.8	15.5	6.7

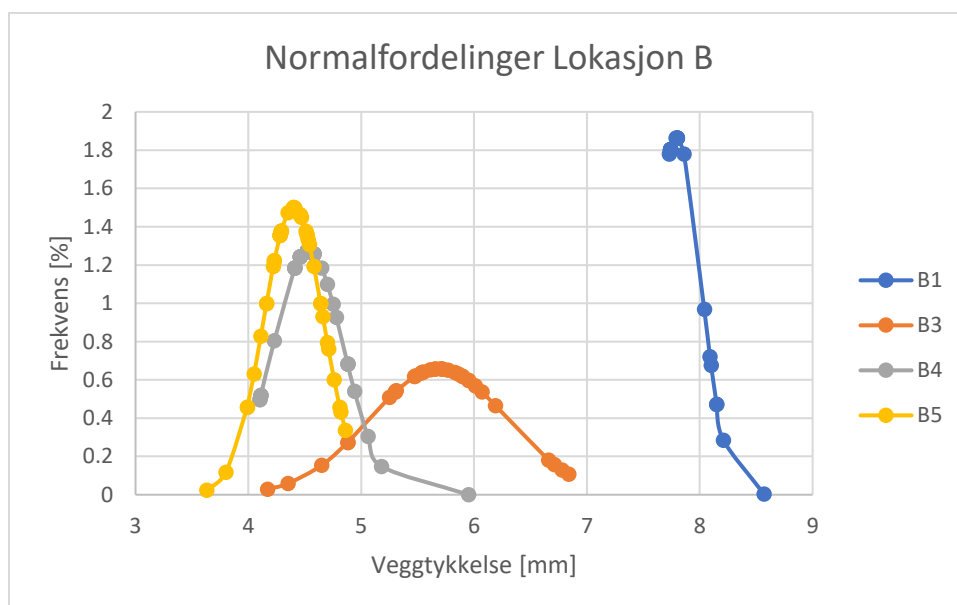
4.2 Lokasjon B

Ved Lokasjon B var mastene B1 og B3 av lik type, og mast M2 og M3 var like, men av en annen type. Mast B1 var galvanisert, selv om den ble oppgitt som ikke galvanisert. Alle mastene er nedstikksmaster, der kun mast B1 står i et asfaltert fortau. Under forsøket begynte det å regne, som skylte bort ultralydgelen. Mer ultralydgel ble påført etter behov. Under i Tabell 7 vises resultater for gjennomsnittlig veggtykkelse og standardavvik for de to måletypene M_0 og M_1 .

Tabell 7 - Måleresultater for gjennomsnitt og standardavvik ved Lokasjon B.

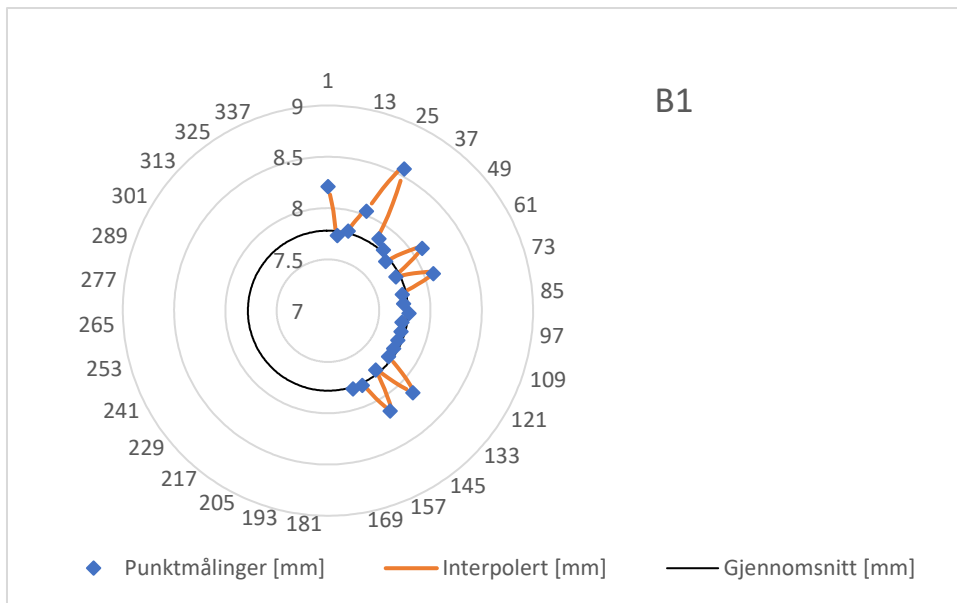
Måletype		[enhet]	B1	B3	M2	M3
M_0	$\overline{M_0}$	[mm]	7.78	7.04	4.49	4.51
	σ_0	[mm]	0.15	0.50	0.13	0.29
M_1	$\overline{M_1}$	[mm]	7.89	5.65	4.57	4.38
	σ_1	[mm]	0.21	0.61	0.31	0.27

Figur 23 under viser det som etterlikner normalfordelinger, med B1 som et enkelt unntak.



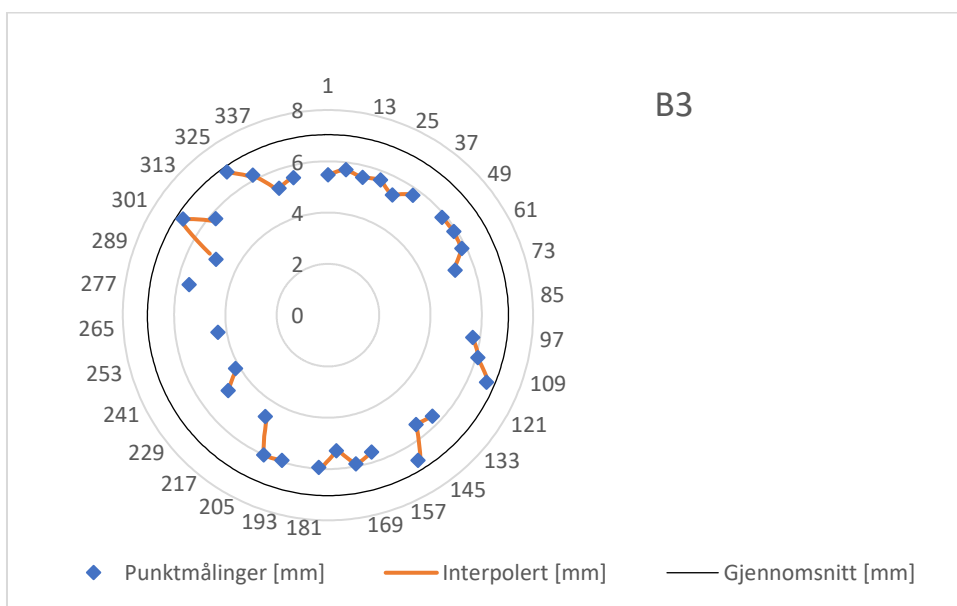
Figur 23 - Normalfordelinger av M1 målinger fra Lokasjon B.

Kun halvparten av masten ble målt, og punktmålingene kan sees under i Figur 24. Denne masten sto på et fortau og var asfaltert rundt. På nedre mastdel ble det ikke observert synlige tegn til korrosjon, selv om malingen var avflaket enkelte steder. På de øvre mastseksjonene ble det heller ikke tydelig observert korrosjon, se Vedlegg 5 bilde a-c for referanse.



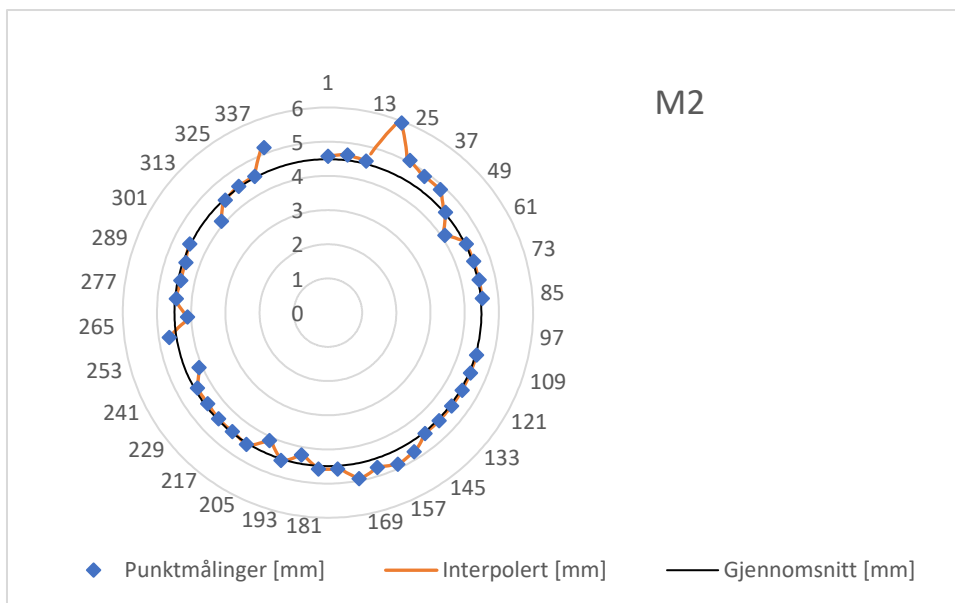
Figur 24 - Punktmålinger av mast B1. Kun halve masten ble målt.

Under i Figur 25 vises punktmålingene for mast B3. Mast B3 var preget av mye jevn overflatekorrosjon. Det ble ikke tatt bilder da det regnet, men en liknende tilstand av masten kan representeres av Vedlegg 3 bilde c, og Vedlegg 5 bilde d og e. Overflaten av masten nær bakken var ganske korrodert.



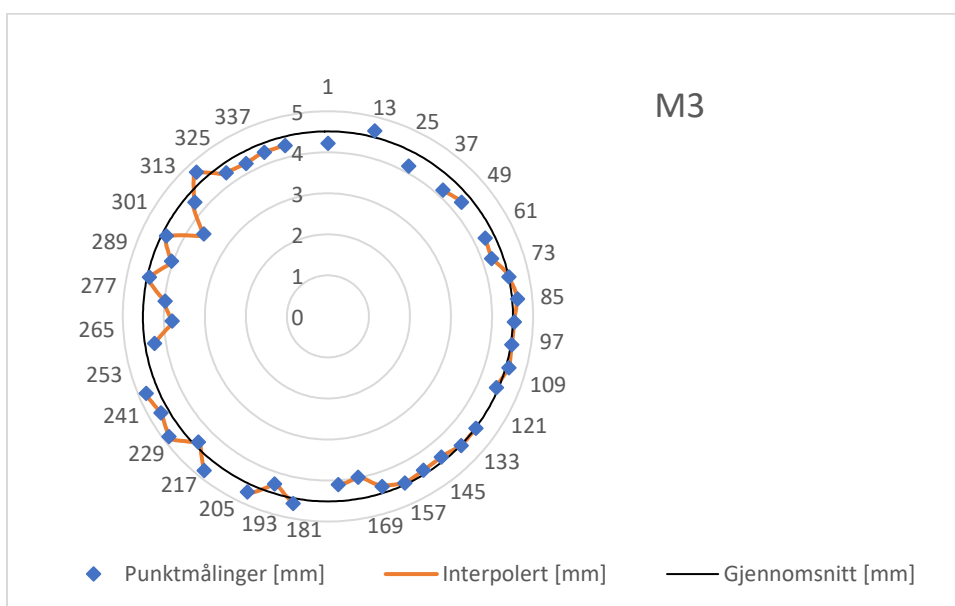
Figur 25 - Punktmålinger gjort av mast B3.

Mast M2 var galvanisert nederst og var lite påvirket av korrosjon. Dekselet var ikke spesielt påvirket. Det ble ikke tatt bilder da det regnet, men masten hadde en liknende tilstand av det som kan sees i Vedlegg 5, bilde a, b og c, som viser mast B1. Følgende viser Figur 26 punktmålinger for mast M2.



Figur 26 - Mast M2 sine punktmålinger.

Under i Figur 27 er måleresultatene fra mast M3 fremstilt. Masten var preget av både avflassende maling og korroderte overflater, særlig den nedre seksjonen nær bakken. I Vedlegg 5 kan masten sees i bildene d og e.



Figur 27 – Punktmålinger av mast M3.

I Tabell 8 nedenfor vises kvantiserte måleresultater for hver mast fra Lokasjon B.

Tabell 8 - Forskjellige estimater for arealtap og arealavvik ved Lokasjon B.

	[enhet]	B1	B3	M2	M3
$A_{0,nominell}$	[mm ²]	4100.81	3694.39	2320.25	2330.87
$A_{T,nominell}$	[mm ²]	-49.88	643.28	-37.94	61.71
$A_{T,numerisk}$	[mm ²]	-46.39	590.70	-42.64	61.20
$r_{numerisk}$	[mm]	7.88	5.76	4.58	4.38
$A_{T,nominell}$	%	-1.2	17.4	-1.6	2.6
$A_{T,numerisk}$	%	-1.1	16.0	-1.8	2.6

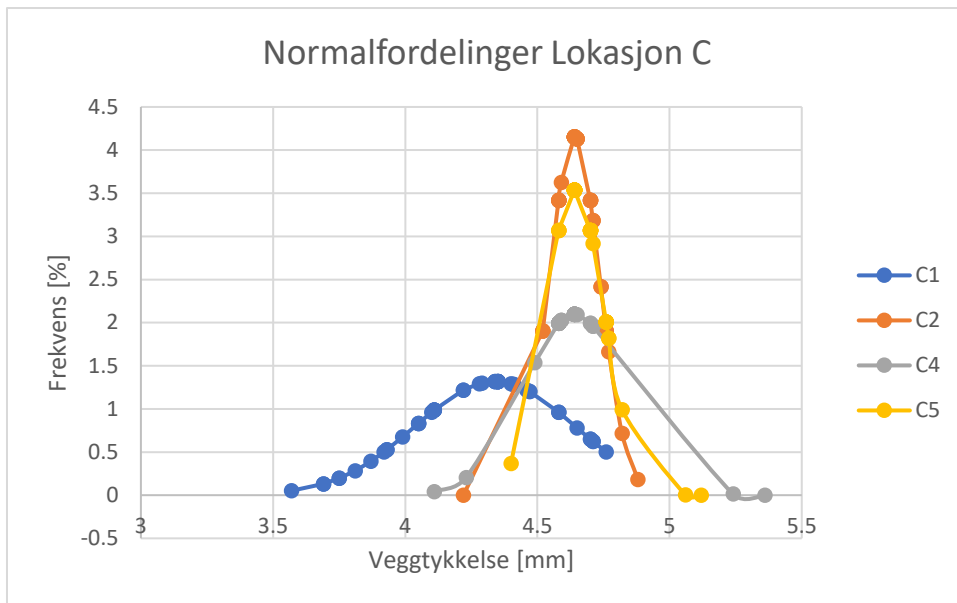
4.3 Lokasjon C

Ved Lokasjon C ble de fire mastene C1, C2, C4 og C5 målt. Mast C1 var ikke galvanisert, men de andre ble observert å ha liknende trekk; galvanisert nedre mastseksjon med avflaket maling og ikke korrodert, men med forekomster av korrosjon på øvre mastseksjon. Vedlegg 7 viser en liknende tilstand for mastene C2, C4 og C5. Under i Tabell 9 sees de gjennomsnittlige resultatene for opprinnelig estimert veggykkelse M_0 og målt veggykkelse nær bakken M_1 .

Tabell 9 - Måleresultater for opprinnelig estimert veggykkelse og estimert veggykkelse nær bakken.

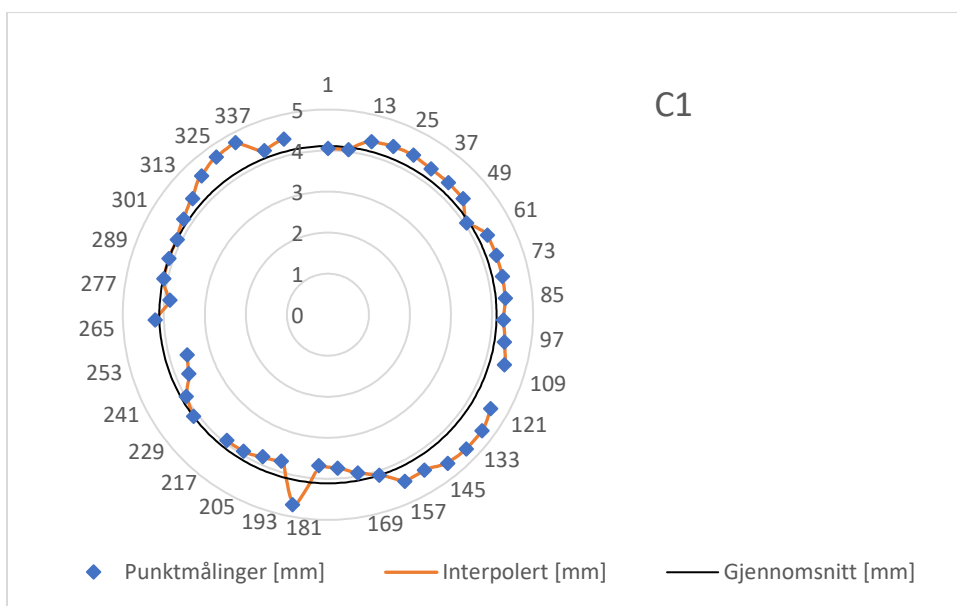
Måletype		[enhet]	C1	C2	C4	C5
M_0	$\overline{M_0}$	[mm]	4.11	4.61	4.63	4.64
	σ_0	[mm]	0.49	0.11	0.21	0.08
M_1	$\overline{M_1}$	[mm]	4.24	4.65	4.63	4.69
	σ_1	[mm]	0.30	0.10	0.19	0.11

Under i Figur 28 vises frem fordelinger som etterlikner en normalfordeling. Ved en grov sammenlikning til normalfordelingskurver anses måleresultatene som normalfordelte.



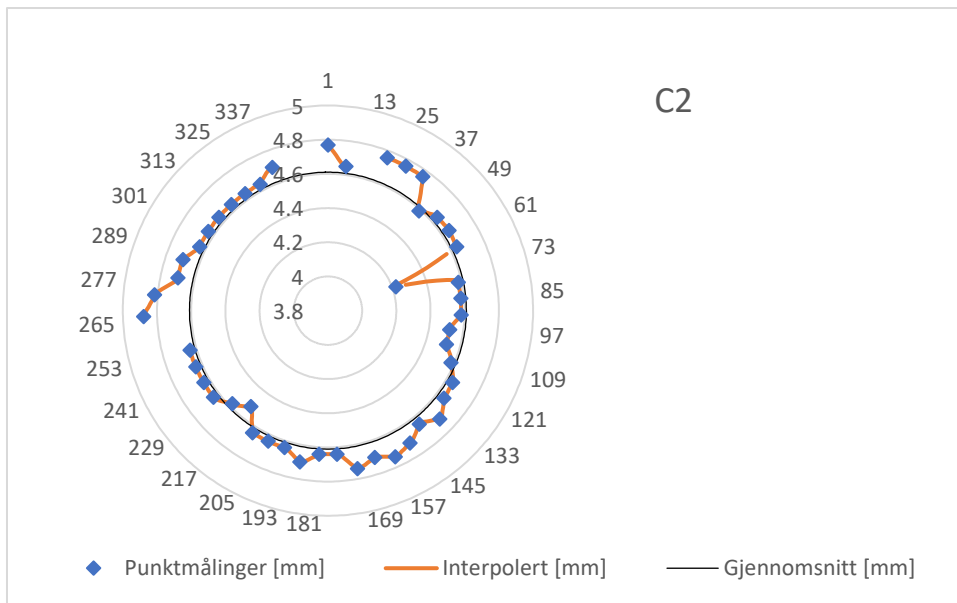
Figur 28 - Normalfordelte måleverdier for alle mastene ved Lokasjon C.

På Lokasjon C var mast C1 den eneste som ikke var galvanisert, og bilder av nedre mastseksjon kan sees i Vedlegg 6 a og b. Videre vises M_1 målingene i Figur 29 nedenfor.



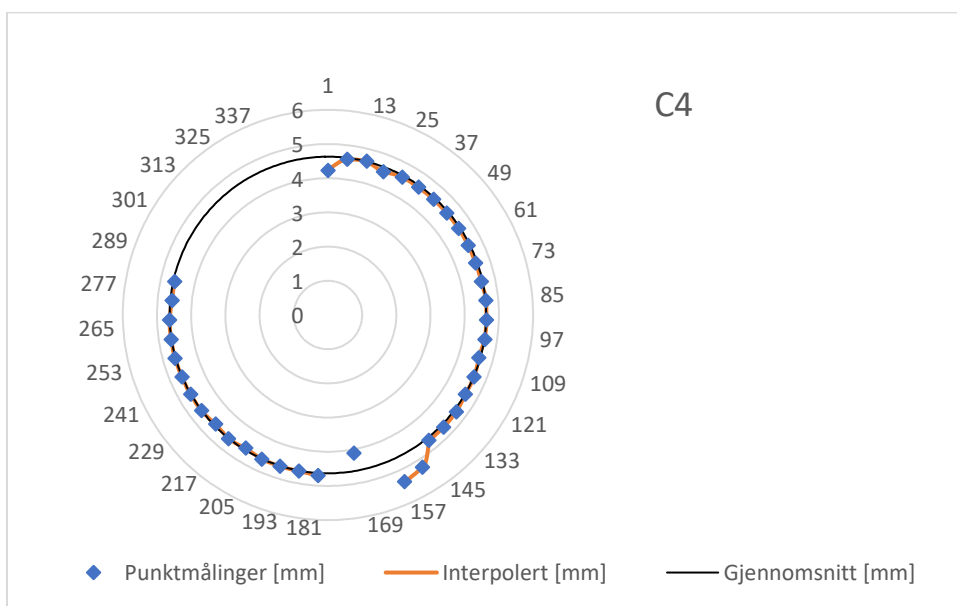
Figur 29 - Punktmålinger av mast C1.

I Figur 30 vises punktmålinger for mast C2. Den nedre del av masten var galvanisert, uten tydelige tegn til rust. Det var avlassende maling både på den nedre og øvre del, og på den øvre del var de bare flatene korrodert. Se Vedlegg 7 for et veiledende eksempel.



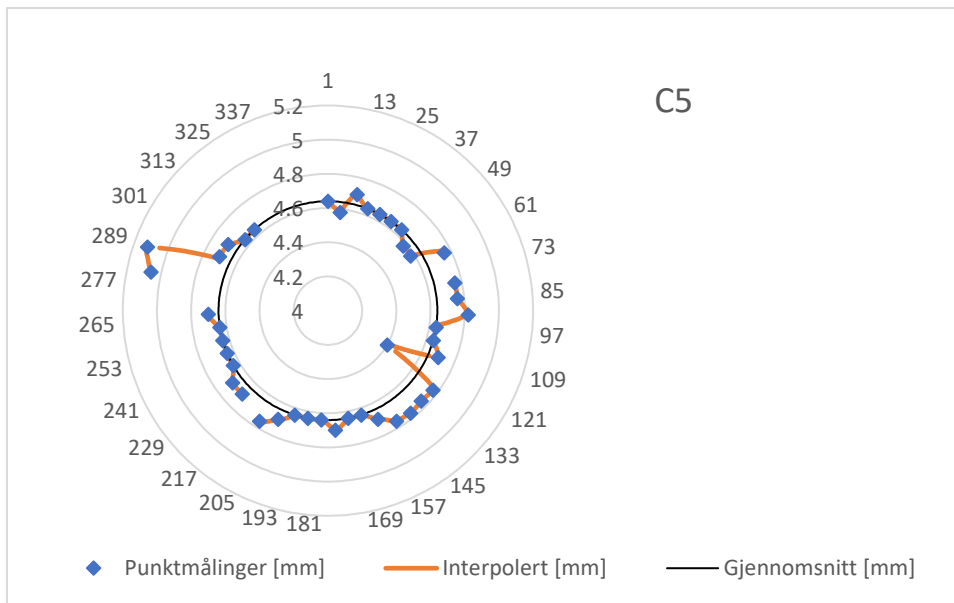
Figur 30 - Mast C2 sine punktmålinger.

Mast C4 var preget av avflassende maling på den nedre og de øvre mastseksjonene. Det var ingen tegn til korrosjon på den nedre del, men i innsnevringen ble det observert korrosjon. Den øvre delen var korrodert på enkelte steder, se Vedlegg 7 for den visuelle tilstanden til mast C4. Punktmålinger kan sees under i Figur 31.



Figur 31 - Punktmålinger gjort av mast C4.

Mast C5 hadde avflakende maling, og var rustet på de øvre delene av masten. Det var ingen visuelle tegn til korrosjon på den nedre mastseksjonen. Det var ikke observert korrosjon i mastinnsnevringen. Figur 32 under viser måleresultatene. Videre var det gress og støv på masten som satt fast, muligens som rester etter gressklipping eller kantklipping.



Figur 32 - Resultater for punktmålinger av mast C5.

I Tabell 10 nedenfor vises både de nominelle og numeriske estimerte arealtapene og arealavvikene, sammen med den numeriske beregnede mastveggykkelsen.

Tabell 10 - Samtlige kvantitative måleresultater for arealestimater fra Lokasjon C.

	[enhet]	C1	C2	C4	C5
$A_{0,nominell}$	[mm ²]	2118.98	2384.00	2394.64	2399.96
$A_{T,nominell}$	[mm ²]	-61.93	-18.94	0.00	-23.67
$A_{T,numerisk}$	[mm ²]	-66.27	-16.24	-6.45	-21.97
$r_{numerisk}$	[mm]	4.25	4.64	4.64	4.69
$A_{T,nominell}$	%	-2.9	-0.8	0.0	-1.0
$A_{T,numerisk}$	%	-3.1	-0.7	-0.3	-0.9

Til slutt vises en oppsummering i Tabell 11 for samsvar mellom målte standardavvik $S(\sigma_0: \sigma_1)$, og variasjonskoeffisientene CV_0 , CV_1 og $CV_{1,r_{numerisk}}$, for alle mastene ved de tre lokasjonene. Det kan merkes at CV_1 er nokså lik $CV_{1,r_{numerisk}}$ i alle tilfellene, og brukes heretter om hverandre.

Tabell 11 – Oversikt for grad av samsvar mellom forskjellige målesammenlikninger, og variasjonskoeffisienter, for alle tre lokasjonene.

Master	$S(\sigma_0:\sigma_1)$	CV_0 [%]	CV_1 [%]	$CV_{1,r_{numerisk}}$ [%]
A24	0.85	3.91	3.42	3.41
A22	0.27	4.95	19.94	19.65
A20	0.55	8.34	18.49	18.28
A19	0.99	9.35	9.94	9.93
B1	0.71	1.95	2.71	2.72
B3	0.82	7.10	10.74	10.53
M2	0.40	2.81	6.86	6.84
M3	0.92	6.44	6.07	6.07
C1	0.62	11.95	7.13	7.12
C2	0.89	2.33	2.07	2.07
C4	0.89	4.62	4.11	4.10
C5	0.68	1.66	2.41	2.41

5 Diskusjon

I dette kapittelet forklares og diskuteres resultatene fra det eksperimentelle forsøket. Innledende forklares og vises utarbeidelsen av de grafiske resultatene, samt de numeriske areal- og veggtykkelsesberegningene. For å enkelt holde oversikt over hver mast ved hver lokasjon sammenliknes resultatene i tabelloppsett. Påfølgende diskuteres og vurderes tilstanden til mastene.

5.1 Utarbeidelse og tolkning av resultatene

I den eksperimentelle delen har veggtykkelsen til mastene ved hver lokasjon blitt målt ved hjelp av ultralydtesting, og avvik mellom opprinnelig antatt veggtykkelse M_0 og målt veggtykkelse nær bakken M_1 rapporteres ved noen av områdene. Veggtykkelsen ble så brukt til å estimere arealtap over hele masten. Merk her at begrepet arealtap brukes gjennom rapporten, selv om begrepet avvik kan være mer korrekt. Eksempelvis kan ikke et arealtap være negativt, slik det presenteres blant mastene ved Lokasjon C, i Tabell 11. Dette kan heller være et tegn på at de opprinnelig estimerte veggtykkelsene M_0 , ikke var presise nok i de tilfellene, eller at det har foregått ulik grad av korrosjon på masten, så masten er tykkere nede enn ellers.

Det er vanskelig å skulle betrakte de negative arealavvikene. Det kan antydes at M_0 målingene ikke var gode nok, eller at masten fra 10 cm over bakken og oppover var mer korrodert enn masten 10 cm over bakken og ned, eller at kontaktmotstanden var større nede ved bakken enn andre steder på masten. Det er likevel viktige funn, og M_1 målingene anses som mer troverdige enn M_0 målingene. Dette kan begrunnes med grad av overensstemmelse til standardavvikene σ_0 og σ_1 , som kan gi et tegn på den relative spredningen mellom målingene på hver mast.

Måten grad av samsvar har blitt beregnet er ved å dele minimumsverdien på maksimumsverdien mellom to verdier, og kan vises i Likning 7 under. Det legges ikke vekt på i hvilken retning standardavvikene samsvarer, men kun i hvilken grad det er samsvar mellom målene. Denne målemetoden brukes for å gjøre de absolutte resultatene om til relative mål. Variasjonskoeffisientene CV_0 , CV_1 og $CV_{1,r_{numerisk}}$ beregnes henholdsvis $\frac{\sigma_0}{M_0}$, $\frac{\sigma_1}{M_1}$, og $\frac{\sigma_1}{r_{numerisk}}$, og gir et tegn på relativt standardavvik så det lettere kan sammenliknes mellom master. For de fleste mastene er det en stor likhet mellom CV_1 og $CV_{1,r_{numerisk}}$, så disse betegnelsene vil brukes om hverandre.

$$samsvar = \frac{\min(\sigma_0 : \sigma_1)}{\max(\sigma_0 : \sigma_1)} \quad (7)$$

Uten at standardavvik nødvendigvis gir positive eller negative antydninger til mastens tilstand, kan det tas i bruk noen enkle vurderingsmetoder for å bedømme måledataene. For eksempel

kan et samsvarende lavt standardavvik blant M_0 og M_1 målingene tilsi en liten spredning i målte veggykkelser. Det kan tolkes som at de tilfeldige målte veggykkelsene \overline{M}_0 og de målte veggykkelsene nær bakken \overline{M}_1 er konsistente, og reelt gjenspeiler de faktiske veggykkelsene i masten. Ved å vurdere samsvar mellom standardavvikene og sette det i sammenheng med forskjeller i gjennomsnittlige målte veggykkelser, kan det gi grunnlag for en

Dette har sine baksider, da det likevel kan finnes områder på masten som er sterkt preget av korrosjon som går uoppdaget. Ytterligere kan det med overensstemmende standardavvik, men ulik \overline{M}_0 og \overline{M}_1 , tolkes som konsistente målinger og et reelt avvik i veggykkelse mellom de to målingene.

En utfordring med en slik vurderingsmetode vil som nevnt oppstå når standardavvikene er overensstemmende og måleresultatene gir $\overline{M}_1 > \overline{M}_0$, og hvordan det skal tolkes. Det vil i utgangspunktet tolkes at den høyere \overline{M}_1 verdien er nærmere den opprinnelige veggykkelsen, men utover det kan det ikke gjøres noen beretninger om korrosjon på stedene M_0 målingene har blitt gjort.

Et annet tilfelle med hensyn på standardavvikene er dersom det er et stort avvik mellom dem. Som det ble observert hadde mast A22 veldig mye overflatekorrosjon, spesielt nærme bakken. Det høyere standardavviket σ_1 enn σ_0 som observeres har trolig sin årsak i den korroderte og ujevne flaten M_1 målingen foretas på. Legg også merke til hvordan masten preges av en bulkete og kraterliknende overflate, som kan sees i Vedlegg 3 bilde b.

Når det har blitt skrevet at M_0 målinger skal gjøres tilfeldig så er det begrunnet med at flere målinger som gjøres tett inntil hverandre kan lammes av samme feil i masten. En feil betegnes her som den langsgående sveisesømmen i mastene, eller om det kan være spesielt utsatte steder som ville vært betydelig påvirkende som kan gi skjevfordelte måleresultater. Hensikten med å kunne bestemme M_0 mest mulig representativt har sitt utspring i at informasjon om opprinnelig veggykkelse ikke er kjent.

Det er viktig å forstå at de grafisk fremstilte resultatene ikke representerer masten i sin helhet. Det er kun målte veggykkelser M_1 og gjennomsnittlig opprinnelig estimert veggykkelse \overline{M}_0 som vises i et sirkeldiagram. Årsaken til dette begrunnes følgelig at når det måles på en korrodert overflate, så er allerede opprinnelig veggykkelse redusert, og det kan ikke med sikkerhet sies om all tap av godstykkelse har skjedd kun utvendig eller delvis innvendig. Det er derfor enklere å se M_1 som absolutte avvik fra \overline{M}_0 . Det er heller ikke hensiktsmessig å grafisk fremstille en eksempelvis 5mm tykk mastvegg med godstykkelsesreduksjon tilsvarende 0.5 mm på en 160 mm diameter mastsylinder.

Det som har blitt gjort for å fremstille måleresultatene i de grafiske figurene, er å fordele de 51 punktmålingene M_1 ut over et større område, dette for å gi en ryddigere og tydeligere oversikt. Dette har blitt oppnådd ved å dele de 51 målingene jevnt utover 357 punkter som best mulig kan representere en sirkel. Begrunnelsen vises under i Likning 8, da 357 er det nærmeste hele multiplumet til 360 som 51 går opp i. Det gir da én punktmåling hver syvende grad, og algoritmen som har løst dette er laget med Excel Visual Basic for Applications (VBA), og kan sees i Vedlegg 8.

$$\left\lfloor \frac{360^\circ}{51n} \right\rfloor = \frac{7^\circ}{n} = \frac{357^\circ}{51n} \quad (8)$$

For å regne ut arealet må Likning 9 nedenfor viser utregningen av delta theta, som gir vinkelstørrelsen for hver arealsektor innesluttet av origo og to punktmålinger.

$$\Delta\theta = \frac{7^\circ}{n} * \frac{357^\circ}{360^\circ} * \frac{\pi}{180^\circ} = 0.1212 \frac{\text{radianer}}{\text{sektor}} \quad (9)$$

Arealet av en sirkelsektor med konstant radius kan enkelt finnes, og vises under i Likning 10. Slik beregnes også opprinnelig areal A'_0 for sirkelsektorene.

$$A'_0 = \frac{1}{2} * r^2 * \theta = \frac{1}{2} * \overline{M}_0^2 * \theta \quad (10)$$

Siden det her er sirkelsektorer av varierende radier må polarkoordinater benyttes for å kunne gjøre arealberegninger. I Likning 11 vises integralene for arealberegning av sirkelsektorer.

$$A = \int_0^\theta \frac{1}{2} (f(\theta))^2 d\theta = \int_0^\theta \frac{1}{2} r^2 d\theta \quad (11)$$

Da radiene er varierende, og det ikke finnes integrasjonsfunksjoner i Excel, skrives Likning 11 i stedet om til en Riemann sum. Sammenhengen vises under i Likning 12. Det kunne muligens blitt brukt andre verktøy, men i Excel kan mange oppgaver automatiseres.

$$A = \int_0^\theta \frac{1}{2} (f(\theta))^2 d\theta = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} [f(\theta_i)]^2 \Delta\theta \quad (12)$$

Det gjenstående arealet A' , innesluttet av origo og to punktmålinger, kan approksimeres ved å numerisk integrere ved hjelp av VBA. Den generelle formelen for den numeriske løsningen er gitt under i Likning 13, og den algoritmiske utførelsen kan sees i Vedlegg 9.

$$A' = \sum_{i=1}^{k=10000} \frac{1}{2} \left[\frac{r_{n+1} - r_n}{k} * i + r_n \right]^2 * \frac{\Delta\theta}{k} \quad (13)$$

For å finne numerisk beregnet arealtap $A_{T, numerisk}$ av mastveggen i sin helhet, finnes først den numerisk beregnede veggtykkelsen $r_{numerisk}$, som vist i Likning 14. $S_{m\grave{a}lt}$ er antall sirkelsektorer målt, og S_{tot} er totalt antall sirkelsektorer, som er 51.

$$r_{numerisk} = \sqrt{\frac{A'_0 - \frac{S_{m\grave{a}lt} \times A'}{S_{tot}}}{\pi}} \quad (14)$$

Deretter kan $A_{T, numerisk}$ finnes, og fremgangsmåten vises under i Likning 15. 80 er her den ytre radien til masten målt i millimeter, og er tilnærmet lik for alle mastene.

$$A_{T, numerisk} = \pi[(80 - r_{numerisk})^2 - (80 - \overline{M}_0)^2] \quad (15)$$

På liknende vis beregnes $A_{T, nominell}$, som vist i Likning 16 under.

$$A_{T, nominell} = \pi[(80 - \overline{M}_1)^2 - (80 - \overline{M}_0)^2] \quad (16)$$

Ytre mastradius ble funnet ved å måle omkretsen til mastene, og avvikene som ble observert mellom mastradiene skyldes sannsynligvis avlesningsfeil, som gjør det til en mulig feilkilde. En annen mer påvirkende feilkilde til arealberegningene er tvetydigheten i tolkingen av hvor masten er korrodert; er det er kun utvendig, kun innvendig, eller begge to. Det har faktisk betydning for arealtapsberegninger, men i denne oppgaven er ikke det mulig å ta hensyn til. Når arealtapene beregnes slik de gjøres i Likning 14 og 15, regnes tapet å oppstå fra innsiden og utover i radiell retning, selv om dette ikke vil være tilfellet i praksis.

Hensikten med å beregne arealtapet av masten numerisk er å få et mer nøyaktig svar enn det forskjellene mellom gjennomsnittene \overline{M}_0 og \overline{M}_1 gir. Det er likevel viktig å merke at presisjonsgraden av den numeriske løsningen avhenger av hvor mange punktmålinger som gjøres, da arealberegningen kun er en tilnærming. Utover det kan det sies at det er en stor grad av likhet mellom det numeriske og nominelle arealtapet, og dette antyder at den numeriske metoden er riktig, men og vekselvis at det nominelle arealtapet kan fungere godt nok til å estimere arealtap. En annen årsak til at arealtapet estimeres numerisk er at det kan bygge opp til andre og bedre måleteknikker for ultralydmåling, og dette vil tas opp i kapittel «5.6 Videre Arbeid».

5.2 Resultater fra Lokasjon A

Måledataene er kun så gode som informasjonen som er tilgjengelig for kommunen. Et nevneverdig funn er tilstanden til mast A24. Fra informasjonen som Trondheim kommune har gitt, så sies det at masten er av samme type, og satt opp samtidig, som mastene A22, A20, og A19. Dette kan ikke stemme, se Vedlegg 3 for bilde av mastene. Videre informerte en beboer

i området at mast A24, og en umålt mast med nummer A23, ble skiftet ut på 90 tallet. Det kommer her frem at det kan være avvik i riktigheten til informasjonen som kommunen har.

Mast A24 var helgalvanisert, hadde ingen forekomst av korrosjon, og hadde et annet design enn de andre mastene på området. Likevel ga målingene på mast A24 tegn på at det kan være avvik mellom \overline{M}_0 og både \overline{M}_1 og $r_{numerisk}$. Dette avviket sees i sammenheng med $S(\sigma_0:\sigma_1)$, som viser hvor overensstemmende spredningen i målingene er, og samtidig sammenlikne CV_0 og CV_1 . Fra CV_1 kan det sees en tettere spredning av målingene enn det som kan dømmes fra CV_0 .

Mast A22, A20 og A19 var alle av sammen type og årstall, men de ble observert å være i forskjellige tilstander. Det tydeligste å bedømme mastene på er den visuelle tilstanden. Både A22 og A20 var korrodert på store områder, i tillegg til å være preget av skader som bulker, mens mast A19 hadde betydelig mindre visuell skade. Det kan nevnes at på alle overflater der maling var flasket av, var masten korrodert, og dette gjaldt alle tre mastene. Det kan da tydes at mast A19 kun har en bedre tilstand, fordi malingen er mer intakt enn sine motparter. Nøyaktig hva det kommer av er usikkert. For eksempel kan malingen være mer intakt fordi den ikke står plassert så den treffes av brøytekanter, da snøen som brøytes kan inneholde grus som er ødeleggende for maling.

Mast A22 og A20 har en ganske lik visuell stand. Det første som kan legges merke til ved ultralydresultatene er likheten mellom $\overline{M}_1(A22)$ og $\overline{M}_1(A20)$, og samtidig $CV_1(A22)$ og $CV_1(A20)$. Mast A22 og A20 har de høyeste CV_1 variasjonskoeffisientene blant alle de målte mastene, men også de største forskjellene mellom CV_0 og CV_1 . De høye CV_1 verdiene er forårsaket av større standardavvik σ_1 og mindre \overline{M}_1 . Det gjør at resultatene tolkes som mer upresise, men den store likheten i σ_1 og \overline{M}_1 mellom A22 og A20 kan tilsi at det er grunnlag for å vurdere \overline{M}_1 for A22 og A20 som riktige, mens de større σ_1 enn σ_0 kan være forårsaket av en ru og korroderte flate.

For mast A19 er det en høy grad av samsvar mellom σ_0 og σ_1 , som betyr at spredningen i målingene er nokså lik, men dette må sees i sammenheng med gjennomsnittene \overline{M}_0 og \overline{M}_1 . Ved å sammenlikne CV_0 og CV_1 kan det sees at den relative spredningen i målingene er høyere nede ved masten, enn de tilfeldige målingene M_0 .

Siden mastene også er like, er forskjellen i \overline{M}_0 for A22, A20 og A19 noe overraskende. Av alle mastene har mast A22 den laveste \overline{M}_0 på 4.04 mm, med A20 og A19 på henholdsvis 4.40 mm og 4.74 mm. Når det også tas høyde for standardavvik, gir mast A22 det minste relative standardavviket CV_0 lik 4.95%, som gjør den mest presis blant de to andre mastene. Likevel

har mast A19 mer konsistente resultater over begge målingene, og dermed kan sees på som presis.

Det som kan gjøre målingene ved A19 mer konsistente, er det faktum at masten har mye mindre overflatekorrosjon enn både mast A22 og A20. Det er så klart noen korroderte flater på A19, men som det sees i Vedlegg 3 på bilde d så er det i nærheten av dekselet og er i metoden betegnet som et område som skal unngås å måle på. Det som sannsynligvis gjør målingene på A22 og A20 mer spredte er den varierende overflaten, som består av malte og korroderte flater, men også bulkede, selv om det ikke måles der.

Utenom de relative standardavvikene blant mastene A22, A20 og A19, kan mastene bedømmes ut fra arealtapene deres. Det er noe avvik i de nominelle og numeriske arealberegningene, men i absolutte termer er arealtapet for A22 og A19 ganske likt, på tross av større variasjoner i målepresisjon. Dette kan også være et underbyggende poeng for troverdigheten til målingene.

5.3 Resultater fra Lokasjon B

Ved Lokasjon B ble det også observert noe avvik mellom mastene på området. I utgangspunktet var det tre like master i gaten der det skulle måles, men den ene var utilgjengelig, derfor ble det valgt to tilsynelatende like master (M2 og M3) fra en nærliggende gate. For mast B1 var det også noe vanskelig tilkomst, og kun halve masten ble målt. Mast B1 og B3 er opplyst å være av samme type og satt opp samme år, men B1 ble observert å være helgalvanisert, som kan sees i Vedlegg 5 bilde a-c, mens B3 var korrodert mye over hele masten.

I måleresultatene kan det også tydelig sees forskjell på mastene B1 og B3. Mast B1 har kun et mindre arealavvik og en forholdsvis lav variasjonskoeffisient, sammenliknet med B3. Mast B3 har det største arealavviket blant alle de målte mastene i denne oppgaven, både i absolutte og relative termer. Dersom det antas at mast B1 og B3 er identiske master, så vil det kunne tilsi at $A_{0,nominell}(B3)$ ikke er riktig da den er 10% mindre enn $A_{0,nominell}(B1)$. I det tilfellet kan det bety at $A_{T,numerisk}(B3)$ er 24.3% basert på $A_{0,nominell}(B1)$. Uten disse antagelse er det numeriske arealtapet for B3 som opplyst 16%.

Den viktigste årsaken som forskjelliggjør B3 fra B1 er at B1 observeres å være en galvanisert mast, og som det også sees og måles på mastene ved Lokasjon C, så er det lite tegn til korrosjon på de galvaniserte seksjonene. Det fritar dem ikke for muligheten til å være korrodert på områder som ikke har blitt målt, eller på områder som ikke er tilgjengelig for å bli målt, som for eksempel under bakken. Likevel vil det med bakgrunn i de forholdsvis små variasjonskoeffisientene til B1, ikke regnes som at det er noen betydelig grad av korrosjon.

For mast B3 er det en høyere usikkerhet. En større kilde til spredning i måleresultatene er den korroderte overflaten, som gjelder generelt på masten, men spesielt påvirket er masten nær bakken. Fra måling nummer 30 til 50 sees det en stor punkt-til-punkt variasjon i veggtykkelser. Feilkilder her rettes i utgangspunktet mot den ujevne overflaten, men og mot tvilsom avlesing som kan ha grunn i den korroderte flaten. Når det måles på en ujevn flate er det ofte vanskelig å få stabile avlesninger, da dette er viktig når opptakene skal bearbeides i ettertid.

Mast M2 og M3 antas å være av samme type, men var noe forskjellig påvirket av korrosjon. Mast M2 hadde en liknende tilstand som mast B1, og figureksempel kan sees i Vedlegg 5 a-c. Det som overrasker med målingene gjort på M2 er det store avviket i spredningen av resultatene fra de to målemetodene M_0 og M_1 . Som det vil sees i resultatene for målingene gjort ved Lokasjon C så er det små variasjoner i både standardavvik og gjennomsnittsveggtykkelser, både mellom målemetoder på hver mast, og mellom master. Det som kan være en mulig feilkilde er de delvis dekte og udekte områdene med maling, da det ble merket at det var vanskeligere å få stabil kontakt og avlesning fra masten.

M3 antas i utgangspunktet å være lik M2, men dette er usikkert, grunnet forekomsten av korrosjon på masten. Relativt sett det frem fra målingene at målingene av M3 er mer presise enn mast M2, tross den korroderte flaten. Fra CV_0 og CV_1 kommer det også frem at det er konsistens mellom målingene på M3. Dette er noe ulikt det som tidligere har blitt observert på master preget av korroderte flater. Det kan antas at masten er korrodert under malingen, eller på innsiden av masten, men igjen burde dette ha ført til mer spredning i resultatene, hvis masten er korrodert både innvendig og utvendig.

5.4 Resultater fra Lokasjon C

For lokasjon C observeres det ingen eller veldig små avvik i mastveggtykkelse mellom tilfeldige målte steder på masten og området nær bakken. Mast C1 er den eneste som ikke er delvis galvanisert, men også i denne masten måles negative avvik. I tilfellene der CV_1 er mindre enn CV_0 kan det antyde at målingene M_1 har vært mer presise enn M_0 , eller at forskjellen mellom \overline{M}_0 og \overline{M}_1 er liten. I all hovedsak tolkes disse måleresultatene som konsistente, og derfor troverdige.

Det mindre samsvarende standardavviket $S(\sigma_0:\sigma_1)$ for mast C5 kommer av at standardavvikene allerede er små, og er derfor sensitive for variasjoner i måleresultatene. Begge de gjennomsnittlige veggtykkelsesmålingene \overline{M}_0 og \overline{M}_1 , men og $r_{numerisk}$, er veldig overensstemmende med hverandre, men og de samme målingene gjort på mast C2 og C4.

Ved å se på figuren for måleresultatene til mast C4, kan det sees veldig konsistente målinger rundt hele masten, men med noen enkeltpunkter som påvirker beregningene. Disse punktene

kan avvike fra det som oppfattes som en veldig jevn mast, på grunn av en sveisesøm eller målefeil hos operatøren. Ved enkelte master kan det være ubeleilige måleforhold, og dette kan påvirke hvor stabil en står eller hvor god tilgang det er til masten. Stort sett har ikke dette vært et problem ved denne lokasjonen.

Helhetlig sett er det relativt liten spredning mellom CV_0 og CV_1 for mastene C2, C4 og C5, men det er og liten spredning i variasjonskoeffisientene mellom mastene C2, C4 og C5, som ytterligere gir tegn på konsistente og derav troverdige målinger. Arealberegningene viser heller ikke noe som tolkes som store avvik, sammenliknet med master ved andre målte lokasjoner.

5.5 Vurdering av det eksperimentelle oppsettet

Det som har vært viktig med dette prosjektet er å vurdere tilstanden til eldre master, gjerne master som har overgått forventet levealder, eller som viser sterke tegn til korrosjon. En stor ulempe med dette prosjektet er at de opprinnelige mastveggykkelse ikke er kjent, og dette skaper en stor usikkerhet for alle målingene gjort i den eksperimentelle delen. Generelt sett kan det virke som at opprinnelig mastveggykkelse er omtrent 4.6 mm, med unntak av master som B1 og B3.

Fra et kritikalitetsperspektiv er det ikke nødvendigvis hensiktsmessig å foreta løpende korrosjonsmonitorering av nyere master før de faktisk viser tegn til korrosjon. Dette kan også underbygges med at nyere master bygges på betong- eller stålfundament, med omtrent 2 cm klaring over bakken i henhold til Veglysnormen [4], i tillegg til at de er helgalvaniserte. Essensen av denne oppgaven er å måle tap av mastveggykkelse nær bakken grunnet korrosjon, så det gir derfor ikke samme grunnlaget for å korrosjonskartlegge master på fundament.

De punktvis målingene gjøres praktisk talt på øyemål når det beskrives at hver punktmåling skal gjøres med ett lydhodets avstand, målt fra sentrum av lydhodet. Dette vil kunne påvirke hvor riktig måleresultatene visualiseres, selv om måleresultatene i seg selv vil følge den samme grad av presisjon som de ellers gjør. Det er i hovedsak arealberegninger denne feilkilden vil kunne påvirke, og en forbedret måte å gjennomføre liknende målinger på kan være å avmerke noen faste holdepunkter på masten med teip eller tusj.

Det nesten alle de korroderte mastene i denne oppgaven har til felles er den større graden av relativ spredning når det gjøres målinger nær bakken, der masten ofte er korrodert over hele omkretsen. Denne relative spredningen gjør det vanskelig å bedømme resultatet. Er CV_1 større enn CV_0 fordi mastveggykkelsen nær bakken er mindre enn ellers på masten, eller er det fordi det er en større spredning i måleresultatene? I de fleste tilfeller er det en kombinasjon av

begge, der korrosjon på en overflate både forårsaker reduserte mastveggykkelser, og en mer ujevn måleoverflate.

En slutning som kan trekkes fra dette er at når et område på masten nær bakken er så korrodert at det gir store avvik fra tilfeldig målte mastveggykkelser, bør tryggheten til denne masten vurderes. Spesielt stilles det spørsmål ved tilstanden til mast A22, A20 og A19 ved Lokasjon A, og mast B3 ved Lokasjon B. Det som ytterligere forårsaker bias i måleresultatene mellom M_0 og M_1 målinger, er at forsøket er utredet på en slik måte der det bør unngås å måle direkte på korroderte flater. Ved å unngå slike målinger, fås det mer presise målinger, selv om dette ikke alltid er mulig å gjøre. I M_0 målingene fanges det ikke nødvendigvis opp en representativ spredning i måleresultatene, mens M_1 målingene er mer eksponerte for større spredning i måledataene, da det ofte nært bakken er korroderte overflater.

På master med nedre del galvanisert, observeres det mindre spredning i begge måletypene, og anses som mer troverdig. Det kan ikke konkluderes at master som er helt eller delvis galvaniserte er fri for korrosjon, men heller at de har gitt mer presise målinger. Verdifulle eksperimenter som kan forsøkes, er å bruke vinkellydhoder til å kartlegge korrosjon i masten under bakken, slik det opprinnelig var tenkt. Videre må det poengteres at for de halvt galvaniserte mastene har de øvre mastseksjonene (ikke galvanisert) ikke blitt kartlagt for korrosjon.

5.6 Videre arbeid

Dette arbeidet har kun sett på arealavvik i lysmaster, men målet er at den kan bygge opp til videre arbeid med korrosjonskartlegging av lysmaster i Trondheim kommune, eller utdypende vurderinger av mastene som til nå er målt. Det mest hensiktsfulle bør være å bruke arealberegningene eller å gjøre liknende forsøk, for å kunne anslå strukturell stabilitet i lysmaster. Bakgrunnen for dette prosjektet var hendelsen der en lysmast falt ned ved Kalvskinnet, og det ønskes at dette arbeidet kan brukes til å forutsi, eller forhindre, at slike hendelser skjer igjen.

For å oppnå dette foreslås det, på bakgrunn av informative innspill fra Vik Ørsta, at det kan graves ned 10-20 cm rundt en lysmast og undersøke det området på masten. Dette kan vise seg å bli veldig utfordrende, da bacheloroppgaver gjennomføres på våren, og bakkefrost vil forhindre et slikt forsøk. Som et godt alternativ kan det forsøkes å innhente utrangerte lysmaster, og undersøke disse. For eksempel kan presisjonen av et ultralydapparat som gjør målinger på en korrodert flate undersøkes, og sjekkes opp mot resultatene i denne rapporten.

I forsøket ble det brukt vann og klut til å rengjøre området som ble målt, og selv med rengjøringen viste det seg noen ganger å være utfordrende å få stabil kontakt med metallet. Slik Josef og Herbert Krautkrämer skriver, kan det være nyttig å bruke en skraper, stålborste, eller vinkelsliper for å polere bort eller fjerne rusten fra flaten som skal måles [56]. Dette kan gi bedre, tydeligere og mer konsistente målinger, men det vil og være inngrep i metallet som kan eksponere det mot videre korrosjon. På bakgrunn av det anses det likevel som et verdifullt forbedringspunkt.

En årsak til at arealtapet beregnes numerisk er at det nå kan brukes andre måleteknikker for å kartlegge korrosjon i lysmaster. For eksempel behøver ikke en hel mastomkrets å måles, i stedet kan små sirkelsektorer med tettere plasserte punktmålinger gjøres på masten. Videre kan disse omkretsliggende punktmålingene gjøres i flere lag, for å dermed kunne gjøre beregninger av tapt mastvolum, eller å måle mastvegtykkelser opp langs hele den nedre mastseksjonen.

Hvorfor skal mastvegtykkelser på den nedre mastseksjon måles? Det kan antas at lysmaster av typen jordstikk, kan være varmeledende mellom bakken og luften. Det er stor enighet om at RH spiller inn på korrosjonsrater, og i Slamova et al. sin forskning vektlegges det med 30% påvirkningsfaktor [37]. Det som forårsaker overflatekondensering er at lufttemperaturen faller under duggpunktstemperaturen. Når bakken er varmere enn luften, som ofte kan være om morgenen, kan det oppstå kondensasjon som kan oppleves som duggvått gress. Er det mer korrosjon på lysmaster nær bakken, er da et spørsmål som kan utforskes ved hjelp av termodynamiske beskrivelser.

Den opprinnelige hensikten med det eksperimentelle arbeidet var å benytte et 70 graders lydhode til å måle korrosjon under bakken. Etter innledende forsøk ble det oppdaget å være veldig vanskelig, om ikke umulig, på korroderte flater. Likevel er det en oppgave som kan være veldig interessant å undersøke videre.

6 Konklusjon

Denne oppgaven legger opp til videre arbeid som kan basere seg på måleresultatene som er funnet her. Det kan derfor være bedre at det utvikles en enkel metode for å avgjøre om målt mastveggtykkelse er trygg, eller utrygg. Hvis en mast er så korrodert at den ikke presist kan måles ved hjelp av ultralydmålinger, så bør resultatene tolkes med omhu. I en situasjon der måleresultatene er utydelige eller veldig spredte, kan det være best å vurdere en utskifting av mastene, enn å basere seg på at masten er trygg og kan fortsette i bruk. Fra resultatene gjør det at mastene A22, A20, A19 og B3, bør vurderes for utskifting, eller for videre korrosjonskartlegging.

Mastene A24, B1, C2, C4, og C5 viser konsistente målinger, preges av liten variasjon over alle måletypene, og har lave arealavvik. Disse mastene er helt eller delvis galvaniserte, som trolig gjør målingene mer konsistente grunnet mindre korrosjon. På bakgrunn av dette anses disse målingene som troverdige, og det vurderes at det ikke er behov for utskifting.

Referanser

1. ourworldindata.org, *Natural Disasters*. 2019.
2. NACE-International, et al., *International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study*. 2016: p. iii.
3. Ianuzzi, M., *Corrosion Definition*. 2013.
4. Kommune, T., *Veglysnorm. Retningslinjer for utbygging og overtakelse av offentlig vegbelysning i Trondheim kommune*, Kommunalteknikk, Editor. 2017.
5. Usgs, S. United States Geological, and M. Usa bureau Of, *Mineral commodity summaries*. 1996.
6. Worldsteelassociation.org, *Global crude steel output increases by 3.4% in 2019*. 2020.
7. Bramley, A., et al., *The diffusion of non-metallic elements in iron and steel*. Royal Society of Chemistry (RSC) Publishing, 1934.
8. meadmetals.com. *What are the different grades of steel*. 2019; Available from: <https://www.meadmetals.com/blog/steel-grades>.
9. Standard, B., *Designation systems for steels*. 2016.
10. steelnnumber.com, *S355J2 (1.0577)*.
11. Association, A.G. *Corrosion Protection*. Available from: <https://galvanizeit.org/hot-dip-galvanized-steel-bridges-online-seminar/why-hdg-bridges/corrosion-protection>.
12. Association, A.G. *HDG process*. Available from: <https://galvanizeit.org/hot-dip-galvanizing/what-is-galvanizing/hdg-process>.
13. corrosion-doctors.org and P.R. Roberge. *Galvanizing*. [cited 2020; Available from: <https://www.corrosion-doctors.org/Definitions/Galvanizing.htm>].
14. Ahmad, Z., *Chapter 1 - Introduction to Corrosion*. 2006, Elsevier Ltd. p. 1-8.
15. Cicek, V., *Factors Influencing Corrosion*. 2014, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA. p. 25-33.
16. Bardal, E., *Korrosjon og korrosjonsvern*. 1994, Trondheim: Tapir.
17. Zaki, A., *Chapter 10 - Atmospheric Corrosion*. 2006: Elsevier Ltd. 550-575.
18. Cicek, V., *Corrosion Mechanisms*. 2014, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA. p. 35-42.
19. Wales, U.o.N.S. *Dry Corrosion*. 2020; Available from: <http://www.materials.unsw.edu.au/tutorials/online-tutorials/1-dry-corrosion>.
20. Xu, C.H. and W. Gao, *Pilling-Bedworth ratio for oxidation of alloys*. *Material Research Innovations*, 2000. **3**: p. 231-235.
21. Revie, R.W. and H.H. Uhlig, *Definition and Importance of Corrosion*. 2008, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA. p. 1-8.
22. Commons, W., *Pilling Bedworth ratio*. 2018.
23. Revie, R.W. and H.H. Uhlig, *Oxidation*. 2008, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA. p. 215-240.
24. Society, A.C., *Pilling-Bedworth ratios for metals and their oxides*.
25. Cicek, V., *Types of Corrosion*. 2014, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA. p. 43-81.
26. Tro, N.J., *Chemistry - A Molecular Approach, 4th edition*.
27. Zaki, A., *Chapter 4 - Types of Corrosion: Materials and Environments*. 2006: Elsevier Ltd. 120-270.
28. Association, M.B.M., *Condensation Fact Sheet*.
29. Revie, R.W. and H.H. Uhlig, *Atmospheric Corrosion*. 2008, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA. p. 191-204.

30. Cole, I.S., D.A. Paterson, and W.D. Ganther, *Holistic model for atmospheric corrosion Part 1 - Theoretical framework for production, transportation and deposition of marine salts*. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2003. **38**(2): p. 129-134.
31. Spillane, M.C., et al., *Oceanic whitecaps and their role in air - sea exchange processes*. 1986: p. 209-218.
32. McKay, W.A., et al., *Atmospheric Environment*. 1994: p. 3299-3309.
33. Monahan, E.C., K.L. Davidson, and D.E. Spiel, *Journal of Geophysical Research*, 1982. **87**: p. 8898-8904.
34. Feistel, R., et al., *Metrological challenges for measurements of key climatological observables: oceanic salinity and ph, and atmospheric humidity. part 1: overview*, in *Metrologia*. 2016. p. R1-R11.
35. climateprediction.net. *Mid-latitudes*. Available from: <https://www.climateprediction.net/climate-science/glossary/mid-latitudes/>.
36. NASA/GSFC/JPL-Caltech. *Salinity*. 2011; Available from: <https://science.nasa.gov/earth-science/oceanography/physical-ocean/salinity>.
37. Slamova, K., et al., *Mapping atmospheric corrosion in coastal regions: methods and results*. *Journal of photonics for energy*, 2012. **2**(1): p. 022003-022003.
38. Schindelholz, E. and R.G. Kelly, *Wetting phenomena and time of wetness in atmospheric corrosion: A review*. *Corrosion Reviews*, 2012. **30**(5-6): p. 135-170.
39. Corrosion-doctors.org and P.R. Roberge. *Time of Wetness (TOW)*. Available from: <https://corrosion-doctors.org/AtmCorros/TOW.htm#TOW%20categories>.
40. Stusdal, V., *Oppfølging av særlig verdifulle kulturlandskap i Trondheim kommune*. 2006, Fylkesmannen. p. 1-3.
41. NGU. *Mulighet for Marin Leire (MML)*. Available from: <https://www.ngu.no/emne/mulighet-marin-leire-mml>.
42. NGU. *Løsmasser. Nasjonal Løsmassedatabase*. Available from: <http://geo.ngu.no/kart/losmasse/>.
43. Andresen, B., *Informasjon om Lyktestolper*. 27.02.2020: E-post korrespondanse.
44. NRK, *Trondheim E-verk selges*. 2001.
45. strindahistorielag.no, *Trondheim Energi*. 2018.
46. Hovde, G., *Produktsjef Lysmast, Vik Ørsta, e-post samtale 02.03.2020*.
47. Li, Y., et al., *Corrosion by Chloride Deicers on Highway Maintenance Equipment Renewed Perspective and Laboratory Investigation*. *Transp. Res. Record*, 2013. **2**(2361): p. 106-113.
48. Nazari, M.H., et al., *Laboratory Investigation of Washing Practices and Bio-Based Additive for Mitigating Metallic Corrosion by Magnesium Chloride Deicer*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017. **29**(1).
49. Klimaservicesenter, N., *Seklima - Observasjoner og Værstatistikk*. 2015-2019.
50. Cole, I., et al., *Multiscale modelling of the corrosion of metals under atmospheric corrosion*. *Electrochim. Acta*, 2011. **56**(4): p. 1856-1865.
51. NACE and F. Greene, *Eight forms of corrosion*. 1967.
52. Cappelen, P.T., et al., *Tabeller og formelsamling for ingeniørhøgskolen*. 2015: Oslo.
53. Loland, A., P.-A. Lid, and T. Force, *NDT håndboken*. 2008, Sandvika: Force Technology.
54. International, A., *Standard Terminology for Nondestructive Examinations*. 2020.
55. Krautkrämer, J. and H. Krautkrämer, *Piezoelectric Methods of Generation and Reception of Ultrasonic Waves*, in *Ultrasonic Testing of Materials*, W. Grabendörfer, et al., Editors. 1977, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 119-149.
56. Krautkrämer, J. and H. Krautkrämer, *Coupling, Choice of Probe and Measuring Frequency*, in *Ultrasonic Testing of Materials*, W. Grabendörfer, et al., Editors. 1977, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 289-306.
57. Nelligan, T. and O. Corporation. *An introduction to ultrasonic transducers for nondestructive testing*. Available from: <https://www.olympus-ims.com/en/resources/white-papers/intro-ultrasonic-transducers-ndt-testing/>.

58. Krautkrämer, J. and H. Krautkrämer, *Pulse-Echo Method*, in *Ultrasonic Testing of Materials*, W. Grabendörfer, et al., Editors. 1977, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 193-264.
59. SZUtest, *NDT – Non Destructive Testing Methods, UT-ultrasonic testing and thickness measurement*. 2019.

Vedlegg

Vedlegg 1: Mer utfyllende informasjon om lokasjonene

Tabell 12 - Utfyllende informasjon om hvert område. Noe av informasjonen er gitt av Trondheim kommune, de fire nederste radene er egne beskrivelser.

	Hammersborg (A)	Øya (B)	Persaunet (C)
Armatyr	BGP352	Trolla	Trolla
Byggeår stolpe	1979	1986	1988
Byggeår armatur	2013	1986	1988
Byggeår fundament	ingen	Ingen	Ingen
Høyde [m]	5.000m	5.000m	5.000m
Fabrikant	R-5	R-5	R-5
Behandling	Ikke galvanisert	Noen delvis galvaniserte	Noen delvis galvaniserte
Status	I drift	I drift	I drift
Fundamentering	Jordstikk	Jordstikk	Jordstikk
Områdetype	Boliggate	Boliggate	Boliggate
Meter over havet	123 moh	12 moh	51 moh
Minste avstand til hav	0.76 km	1.00 km	1.20 km
Kommentar	Mast A24 er galvanisert. Ikke lik A22, A20, A19	Mast B3 ikke galvanisert. Mast B1 ser galv. ut	Kun mast C1 er ikke galvanisert
Beskrivelse av område	Ligger i en høyde/ås, vendt mot fjorden	Ligger nærme elv, 50m til Nidelva	Lunt, ligger ikke nærme sjø eller elv

Vedlegg 2: Tabeller for opprinnelig estimert veggykkelsesdata

Her vises M_0 målinger for lokasjonene A, B og C. Tallverdiene er sortert fra minst til størst.

Alle verdier i mm.

Tabell 13 - Lokasjon A sine målinger for estimering av opprinnelig veggykkelse.

Lokasjon A				
Måling nr	Mast A24	Mast A22	Mast A20	Mast A19
1	4.46	3.79	3.80	4.04
2	4.46	3.81	3.97	4.23
3	4.46	3.87	4.10	4.46
4	4.50	3.93	4.17	4.60
5	4.52	3.96	4.41	4.64
6	4.52	4.02	4.52	4.70
7	4.70	4.06	4.52	4.86
8	4.80	4.26	4.64	5.00
9	4.80	4.28	4.86	5.18
10	5.00	4.40	5.00	5.65

Tabell 14 - M_0 målinger for mastene ved Lokasjon B.

Lokasjon B				
Måling nr	Mast B1	Mast B3	Mast M2	Mast M3
1	7.62	7.02	4.42	4.35
2	7.66	6.95	4.42	4.46
3	7.67	7.80	4.41	4.70
4	7.68	7.49	4.47	4.44
5	7.68	7.33	4.77	4.54
6	7.72	7.49	4.47	4.23
7	7.82	7.03	4.42	4.04
8	7.92	6.79	4.47	4.46
9	7.97	6.49	4.37	5.17
10	8.09	6.01	4.70	4.70

Tabell 15 - Opprinnelige veggtykkelsesmålinger for mastene ved Lokasjon C.

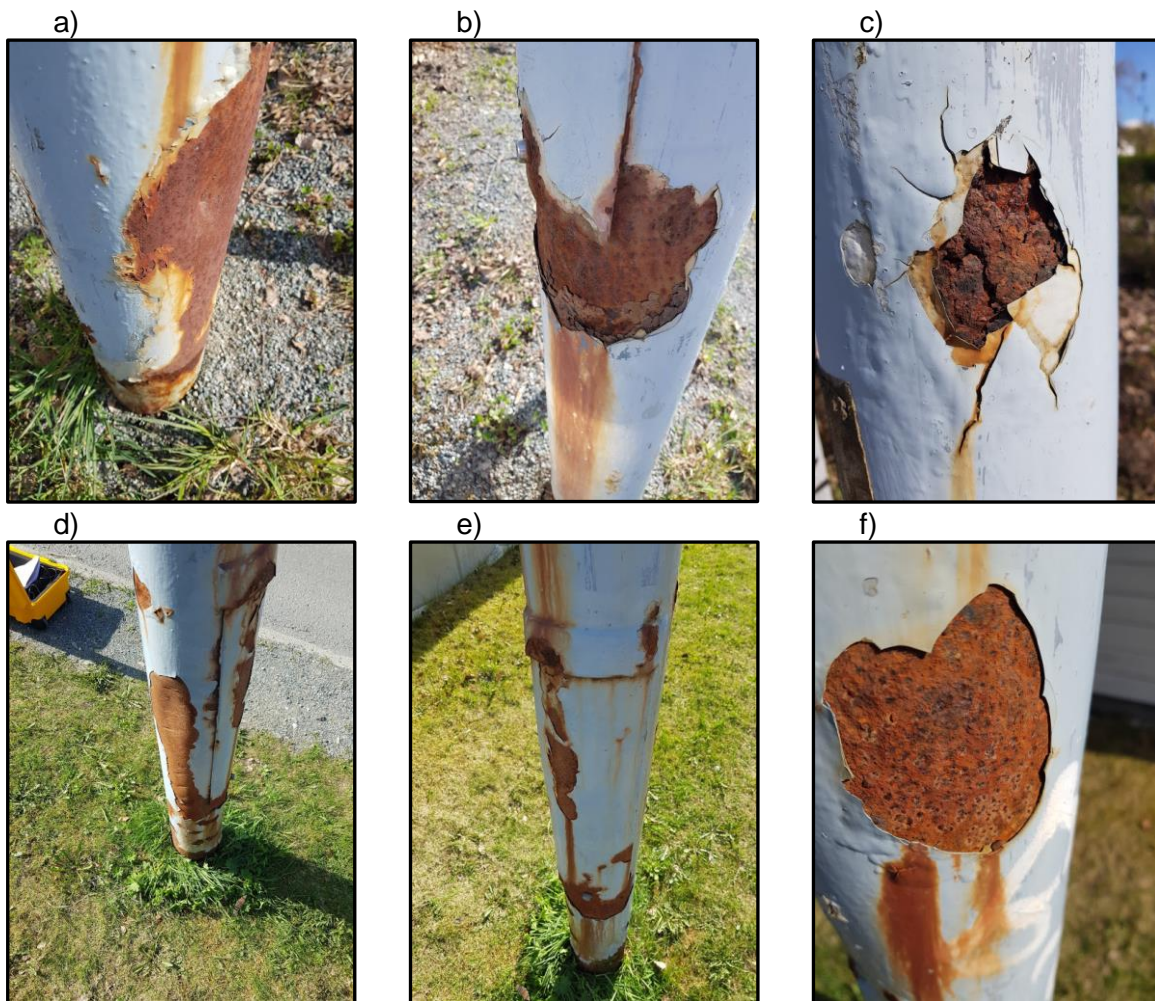
Lokasjon C				
Måling nr	Mast C1	Mast C2	Mast C4	Mast C5
1	3.29	4.41	4.46	4.52
2	3.37	4.52	4.47	4.54
3	3.69	4.53	4.52	4.56
4	3.99	4.58	4.52	4.64
5	4.05	4.59	4.52	4.64
6	4.40	4.61	4.58	4.65
7	4.46	4.64	4.58	4.65
8	4.47	4.64	4.64	4.68
9	4.60	4.71	4.82	4.75
10	4.76	4.83	5.20	4.76

Vedlegg 3: Bilder fra Lokasjon A



Figur 33 - Bilder av master ved bakkenivå fra Lokasjon A. Bilde a, b, c og d er henholdsvis mast A24, A22, A20, og A19. På bilde a og b er det gel som er påført rundt nedre del av mastene. Bilde c viser en jevn overflatekorrosjon, med forekomst av små groper. Bilde d viser en intakt måling i nedre område av masten, men er ellers påvirket av korrosjon.

Vedlegg 4: Bilder av mast A22 og A20 ved Lokasjon A



Figur 34 – Bilder a-c er av mast A22, og bilder d-f er av mast A20. Bilde a viser en liten bulk i masten. Bilde b og c viser såkalte «rustbyller» og rester av det, der rust hopper opp og presser ut malingen. Bilde d viser en litt større bulk og rifter i siden av masten. Bilde e viser det korroderte dekkelet, og bilde f viser små korrosjonsgroper.

Vedlegg 5: Bilder fra Lokasjon B



Figur 35 – Bilde a, b og c er av mast B1, og det kan tydes at det er en helgalvanisert mast under malingen, uten tydelige visuelle tegn til korrosjon. Bilde d og e er tatt av mast M3, som viser åpenbare tegn til korrosjon på den nedre del av masten. Det kan også sees i bilde e at det er to lag med maling.

Vedlegg 6: Bilder av mast C1 ved Lokasjon C



Figur 36 - Bilder av nedre mastseksjon til mast C1. Masten er ikke galvanisert.

Vedlegg 7: Bilder fra Lokasjon C



Figur 37 – Bildene a-e er alle av mast C2, men viser en representerende tilstand blant de andre mastene C4 og C5 på området. Bilde a og b viser et oversiktsbilde for nedre del av masten, og bilde c viser et detaljbilde av dekkelet og området rundt. Bilde d viser innsnevringen i masten, og hvordan det er tegn til korrosjon. Bilde e viser tydelige forekomster av korrosjon, og er tatt av mastens øvre del.

Vedlegg 8: Forbehandling av UT-data

```
Sub easyspacer()  
  
'innlegger mellomrom mellom punktmålinger => ryddigere  
'begynn alle målte veggtykkelser på R[3]:C[3] (Celle C3).  
  
Dim i As Double  
Dim totcount As Double  
totcount = 51 'antall målinger per mastomkrets  
  
Range(Cells(4, 3), Cells(9, 3)).Select  
For i = 1 To totcount  
    Selection.Insert Shift:=xlDown, CopyOrigin:=xlFormatFromLeftOrAbove  
    Selection.Offset(7, 0).Select  
Next i  
Cells(3, 3).Select  
  
End Sub  
  
Sub radialinterpolation()  
  
'Lineær radiell interpolasjon mellom to punktmålinger for bedre visualise-  
ring  
Dim a As Double, b As Double, c As Double  
Dim n As Double, n0 As Double  
Dim i As Double, x As Double  
Dim totcount As Double, degcount As Double  
totcount = 51  
degcount = 7 * totcount  
  
n = 6 'counts inbetween  
a = 3 'start row  
b = a + 7 'range distance  
  
For i = 1 To degcount  
  
If IsEmpty(Cells(a, 3).Value) Or IsEmpty(Cells(b, 3).Value) Then GoTo done:  
'hvis en måling ikke er gjort, hopp over  
  
    c = Cells(b, 3).Value - Cells(a, 3).Value  
    n0 = c / n  
  
    For x = 1 To n  
        Cells(a + x, 4).Value = Cells(a, 3).Value + n0 * x  
  
    Next x  
  
done:  
  
a = a + 7  
b = b + 7  
  
Next i  
  
End Sub
```


Vedlegg 9: Numerisk løsning for arealberegning

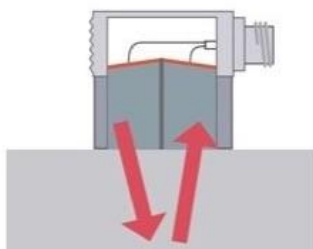
```
Sub numericsolution()  
  
'numerisk løsning for fremstilling av arealet  
  
Dim a As Double, b As Double, c As Double  
Dim a0 As Double, b0 As Double  
Dim n As Double, area As Double, area0 As Double  
Dim i As Double, x As Double, pi As Double  
Dim totcount As Double, degcount As Double  
Dim theta As Double, ktheta As Double, dtheta As Double  
pi = 3.14159265358979  
  
n = 10000 'numerical limit  
a = 3 'start row  
b = a + 7 'range distance  
  
theta = 7 * (357 / 360) * (pi / 180) 'radial sector  
ktheta = (357 / 360) * (pi / 180) 'degrees/point measure  
dtheta = theta / n 'Delta theta  
  
totcount = 51  
degcount = 7 * totcount  
area0 = 0.5 * ((Cells(4, 5).Value) ^ 2) * theta  
  
For i = 1 To degcount  
a0 = Cells(a, 3).Value 'r_(n)  
b0 = Cells(b, 3).Value 'r_(n+1)  
area = 0  
  
If IsEmpty(Cells(a, 3).Value) Or IsEmpty(Cells(b, 3).Value) Then GoTo done:  
If b0 = a0 Then  
area = 0.5 * a0 ^ 2 * theta  
  
Else  
c = (b0 - a0) / n  
For x = 1 To n  
area = area + (0.5 * ((a0 + x * c) ^ 2) * dtheta)  
  
Next x  
End If  
Cells(i + 2, 8).Value = area0 - area  
  
done:  
  
a = a + 7  
b = b + 7  
  
Next i  
  
End Sub
```

Er lyktestolpen syk?



Kan man ved hjelp av ultralydtesting bestemme tilstanden til lyktestolper, og om de er skadet av korrosjon (rust)? Det korte svaret er ja, for med et ultralydapparat kan man måle veggtykkelsen i en lyktestolpe, og en redusert veggtykkelse vil nemlig antyde korrosjonsskader. Men hvorfor ønsker man å finne ut veggtykkelsen, og hvorfor man skal bruke nettopp ultralyd til det? Først må vi beskrive hva ultralyd er og hvorfor det brukes. I Bilde 1 under vises et såkalt *lydhode*, som er i kontakt med et metall.

Duel Element Transducer



Bilde 1 - Måten ultralyd sendes mot et metall for å måle veggtykkelse [1].

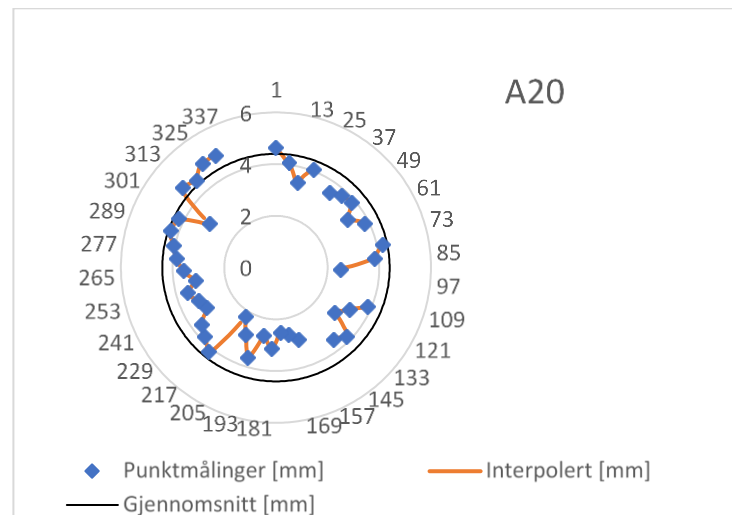
Ultralyd, som er lydølger med høy energi, vil sendes mot et metall. Fordi lyden reiser med forskjellig hastigheter i forskjellig materialer, vil lyden «sprette» tilbake når den treffer grensen mellom to materialer. Så vil lyden bli fanget opp av lydhodet akkurat der den ble sendt ut, og med en veldig avansert stoppeklokke kan faktisk avstanden som lyden har reist bestemmes [2].

Hvilken sammenheng har dette med korrosjon? Korrosjon defineres som en reaksjon mellom et material og miljøet, som fører til en nedbrytning [3]. Når et metall korroderer, som det gjør når det er vått eller fuktig, vil metallet «spises opp». Metaller tåler dette til en viss grad, men hvis for mye av metallet forsvinner kan lysmasten falle, og skape farlige situasjoner.

Lysmastene som har blitt målt i denne oppgaven har vært litt forskjellig preget av korrosjon. Et stort pluss med en slik oppgave er at man kan være ute å gjøre målinger, istedenfor å sitte inne på et laboratorium. I tillegg møter man mange nysgjerrige mennesker.

«Er lyktestolpen syk?» - Spurte en mann på tur med familien sin.

Så når man har gjort alle målinger kan man sette sammen dataene til grafiske figurer, og enklere vurdere hvor korroderte lysmastene er. Under i Bilde 2 ser man hvor mye av mastveggen som har korrodert bort, sammenliknet med gjennomsnittlig tykkelse.



Bilde 2 – En forenklet fremstilling av tykkelsen til mast A20.

Det har vært vanskelig å måle på veldig korroderte lysmaster. Faktisk så bør overflater skrapes, koster med stålbørste, eller poleres med en vinkelsliper for å få gode målinger [4]. Man kommer da fram til

i dette prosjektet at det er en rekke lysmaster som har utydelige målinger, og store arealavvik, som sannsynligvis bør byttes ut før de kan falle og skade noen.

Håvard Fimreite, 18.06.20

Kilder

1. Nelligan, T. and O. Corporation. *An introduction to ultrasonic transducers for nondestructive testing*. Available from: <https://www.olympus-ims.com/en/resources/white-papers/intro-ultrasonic-transducers-ndt-testing/>.
2. Loland, A., P.-A. Lid, and T. Force, *NDT håndboken*. 2008, Sandvika: Force Technology.
3. IUPAC, *Corrosion Definition*. IUPAC Goldbook, 2014.
4. Krautkrämer, J. and H. Krautkrämer, *Coupling, Choice of Probe and Measuring Frequency*, in *Ultrasonic Testing of Materials*, W. Grabendörfer, et al., Editors. 1977, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 289-306.

