

Levetid til kontaktledningsmaster

Mirza Porobic

Master i veg og jernbane

Innlevert: mai 2015

Hovedveileder: Anders Rönquist, KT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for konstruksjonsteknikk

Mirza Porobic

Levetid til kontaktledningsstålmaster

Masteroppgave

Oslo, mai 2015

Veileder: Anders Rönquist

Norges Tekniske og Naturvitenskapelige Universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi
Institutt for bygg, anlegg og transport



Forord

I forbindelse med gjennomføring av masteroppgaven ønsker jeg å takke min arbeidsgiver for muligheten til å starte på masterutdanningen og oppgaven. Vil også takke til min veileder Anders Rönquist for innspill, kommentarer og ikke minst for at han var villig til å påta seg oppgave som veileder. Oppgaven ville ikke vært mulig å gjennomføre uten en rekke viktige målinger og en stor takk til går ut til Ingebjørg S. Bjørgum får lån av måleinstrument. Takk til Sverre Ole Steinbakken for tilsendte måleresultater fra Brødrene Berntsen, tips og muligheten til å gjennomføre mine målinger på nye master. Jeg må også takke mine arbeidskollegaer, som har vist storforståelse under studier og oppgaveskriving. En stor takk går også til Bjørn Ivar Olsen som har korrekturlest oppgaven, og har vært min samtale partner gjennom hele studiet. Sist men ikke minst, vil jeg takke Jasmina og Mirna for korrekturlesing og innspill til oppgaveskriving.

Sammendrag

I forbindelse med denne oppgaven har det blitt gjennomført litteraturstudie og en del praktiske målinger av sinktykkelsen på kontaktledningsmaster. Målingene har blitt gjennomført på eksisterende anlegg, som alle har ulik alder og ulik geografisk plassering.

Resultater fra målinger har blitt benyttet for å estimere levetiden til sinkbelegg. Målingene viser at sinktykkelse varierer en god del fra mast til mast, og at dette gjelder både nye og eldre master. For samtlige målinger har det blitt beregnet en gjennomsnittstykkelse per kontaktledningsmast, og det var denne som ble benyttet til å gjennomføre beregningene i oppgaven.

Siden beregninger av både sinktykkelse og dens levetid er basert på en del antagelser, kan en ikke med hundre prosent sikkerhet si at alle master oppfyller krav om ønsket levetid til sinkbelegget. Resultatene fra målingene og utførte beregninger viser at alle master i utgangspunktet oppfyller krav om minimumstykkelse på 115 μm . Det er oppdaget en kontaktledningsmast som på bakgrunn av gjennomførte beregninger ikke kommer helt opp til ønsket sinklevetid.

For å komme med mer nøyaktige estimer er det anbefalt å fortsette overvåkingen av sinktykkelse på utvalgte jernbanestrekninger. Dette kan gi oss en datagrunnlag som viser trenden og utvikling av sinkkorrosjon. Disse dataene kan gi oss et grunnlag for å estimere sinkens levetid og vedlikeholdsintervall.

Abstract

In connection with this assignment, a literature study has been carried out. In addition, a series of measurements concerning the thickness of zinc on overhead contact line masts have been made. These measurements have been made on existing facilities, which all vary in age and geographical placement.

The results from the measurements have been used to calculate the expected longevity of the zinc layer on overhead contact line masts. The measurements show that the thickness of the zinc layer varies greatly between masts, and that this is the case for both old and new masts. For all measurements, an average thickness has been calculated. This average thickness has been used in the remainder of the assignment for all calculations.

Since the calculations estimating the longevity of the zinc are based upon a number of assumptions, we cannot say with a hundred percent certainty that all the masts reach the minimum requirement for zinc longevity.

The results from the measurements show that all masts initially seem to pass the requirement of a minimum zinc layer thickness of 115 μm . After doing calculations to determine zinc layer longevity, one mast did not quite pass the minimum requirements for zinc layer longevity.

To make more accurate estimates of zinc layer longevity it is recommended that the masts on selected railroad stretches be monitored regularly. The measurements made on the masts can be used to create a catalogue of data, which further can be used to show trends and developments in zinc corrosion. The data can also be used to estimate the longevity and necessary maintenance intervals of the zinc layer.

Innholdsfortegnelse

Forord	iii
Sammendrag	v
Abstract	vii
Figurer	xi
Tabeller.....	xiii
1 Innledning.....	1
2 Teori	2
2.1 Jernbaneløstets teknisk regelverk.....	2
2.2 Kontaktledningsmaster	3
2.3 Korrosjon	6
2.4 Korrosjonsvern	8
2.4.1 Korrosjonshastighet.....	9
2.4.2 Levetiden til sinkbelegg i luft.....	10
2.4.3 Luftforurensing.....	13
2.4.4 Korrosjonsprodukter.....	15
2.4.5 Korrosjonsberegning	17
2.4.6 Sensitivitet.....	19
3 Metoder	20
3.1 Måling av sinktykkelse	20
3.2 Måleinstrument.....	23
4 Resultater og diskusjon	25
4.1 Observasjoner	25
4.2 Banestrekninger	29
4.2.1 Nyland og Grorud stasjon	29
4.2.2 Sørlandsbanen Hokksund stasjon.....	34
4.2.3 Sørlandsbanen Bø stasjon.....	37

4.2.4	Rygge	40
4.2.5	Oslo S	42
4.3	Måling på nye master	46
4.4	Levetid til 50 μm	48
4.5	Usikkerhet og spredning	49
4.6	Vedlikehold	51
4.7	Diskusjon av resultater	53
5	Konklusjon	56
6	Vedlegg	60
6.1	Vedlegg 1	60
6.2	Vedlegg 2	61
6.3	Vedlegg 3	62
6.4	Vedlegg 4	63
6.5	Vedlegg 5	64
6.6	Vedlegg 6	65
6.7	Vedlegg 7	69
6.8	Vedlegg 8	70
6.9	Vedlegg 9	71
6.10	Vedlegg 10	72
6.11	Vedlegg 11	73

Figurer

Figur 2-1 Kontaktledningsanlegg [5]	3
Figur 2-2H mast vist i Vedlegg 1 (utklipp fra tegning EK.800094-000).....	5
Figur 2-3 Dannelse av rust [12].....	8
Figur 2-4 Avhengighet av den gjennomsnittlige korrosjonshastigheten av sink av temperaturen på fuktig (RH> 80%) luft [21].	12
Figur 2-5 Utslipp av svoveldioksid 1990-2013 [31].	14
Figur 3-1 H, B og bjelkemast	21
Figur 3-2 Målepunkter på H-master	22
Figur 3-3 Måleinstrument.....	23
Figur 4-1	25
Figur 4-2.....	25
Figur 4-3 Fargevariasjon av sinkoverflate	26
Figur 4-4 Måleresultat	26
Figur 4-5 Måleresultat	26
Figur 4-6 Rust 1.....	27
Figur 4-7 Rust 2.....	27
Figur 4-8 Sinktykkelse 1	27
Figur 4-9 Sinktykkelse 2	27
Figur 4-10 Sinktykkelse 3	27
Figur 4-11 Sinktykkelse 4	27
Figur 4-12 Måling 1	28
Figur 4-13 Måling 2	28
Figur 4-14 Måling 3	28
Figur 4-15 Produksjonsdato (JF-90)	30
Figur 4-16 Værvarsel for Nyland, Rælingen (Akershus).....	30
Figur 4-17 Grafisk presentasjon av måleresultater fra Nyland stasjon	31

Figur 4-18 Grafisk presentasjon av måleresultater fra Nyland stasjon	32
Figur 4-19 Grafisk presentasjon av måleresultater fra Grorud stasjon	33
Figur 4-20 Produksjonsdato for master på Hokksund stasjon (AMV 85).....	34
Figur 4-21 Værvarsel for Hokksund, Øvre Eiker (Buskerud).....	35
Figur 4-22 Grafisk presentasjon av måleresultater fra Hokksund stasjon	36
Figur 4-23 Produksjonsdato for master på Bø stasjon (JF-89).....	37
Figur 4-24 Grafisk presentasjon av måleresultater fra Bø stasjon	39
Figur 4-25 Værvarsel for Rygge (Østfold).....	40
Figur 4-26 Grafisk presentasjon av måleresultater for Rygge stasjon	41
Figur 4-27 Grafisk presentasjon av måleresultater for Rygge stasjon	41
Figur 4-28 Produksjonsdato 1 for master på Oslo S (BB 11 10)	43
Figur 4-29 Produksjonsdato 2 for master på Oslo S (BB 02 11)	43
Figur 4-30 Grafisk presentasjon av måleresultater for Oslo S	45
Figur 4-31 Værvarsel for Hønefoss, Ringerike (Buskerud).....	46
Figur 4-32 Grafisk presentasjon av måleresultater fra nye master.....	46
Figur 4-33 Grafisk presentasjon av kontrollmålinger foretatt av Brødrene Berntsen.....	47
Figur 4-34 Histogram	50
Figur 4-35 Månedlige verdier til SO ₂ . Grafen generert med data fra databasen [43]......	53

Tabeller

Tabell 2-1 Kravhierarki [4]	3
Tabell 2-2 Korrosjonshastighet i $\mu\text{m}/\text{år}$ for ulike metaller etter 2, 5 og 10 års eksponering i marin atmosfære [13].	7
Tabell 2-3 Klassifisering av korrosivitet på prøvesteder i Skandinavia. Basert på forurensingsnivå og korrosjonshastighet på stål og sink etter 1 og 4 års eksponering [15]. Noter: *Steder med mye nedfall, **Bohus Malmön	9
Tabell 2-4 Atmosfærens korrosivitets kategori [22]	11
Tabell 2-5 Korrosjonshastighet av sinkprøver i to-ukers eksponeringer ved ulike eksponeringstemperaturer. SO_2 konsentrasjonen var 107 ppb, og den relative fuktighet var 95% [26].	12
Tabell 2-6 Kilder til luftforurensing [29].	13
Tabell 2-7 Utslipp av NO_x , SO_2 , NH_3 , NMVOC og CO [30].	14
Tabell 2-8 Minerals containing zinc and other crystalline substance with possible relevance to the corrosion of zinc [21].	16
Tabell 2-9 Varighet i år for galvaniserte belegg brukt for korrosjonsklasser C1-C5. Levetiden er basert på minimum lokal bellegg tykkelse i henhold til EN ISO 1461: 2009 [34].	18
Tabell 2-10 Beregning av teoretisk korrosjon og levertid til minimumstillat sinktykkelse ved bruk av Ligning 2-2Ligning 2-2.	19
Tabell 3-1 Toleranser	24
Tabell 4-1 Måleresultater fra nylandstasjon	31
Tabell 4-2 Måleresultater fra Grorud stasjon	32
Tabell 4-3 Måleresultater for Hokksundstasjon	35
Tabell 4-4 Måleresultater for Bø stasjon	38
Tabell 4-5 Måleresultater for Rygge stasjon	40
Tabell 4-6 Måleresultater for Oslo S	44
Tabell 4-7 Måleresultater fra nye master	50
Tabell 4-8 Optimale og intervallverdier for silisium når høyere beleggtykkelse er påkrevd [34].	55

1 Innledning

Kontaktledningsmaster monteres langs jernbanelinjer og er utsatt for både krefter fra kontaktledningsanlegg, miljølaster, krefter fra passerende tog og miljøpåvirkning. Det stilles strenge krav til kontaktledningsmaster i form av mekaniske og dynamiske egenskaper. Det er derfor spesielt viktig at kontaktledningsmaster er i teknisk bra stand for å kunne oppfylle tiltenkt oppgave.

Kontaktledningsmaster beskyttes mot korrosjon med et sinkbelegg. Denne oppgaven skal fokusere på korrosjonsbeskyttelse av kontaktledningsmaster, og deres levetid. Da kontaktledningsmaster kan ha både ulik kapasitet, ulik utnyttelsesgrad og ulik geometri blir det ikke mulig å estimere en nøyaktig felles levetid som tar hånd om alle ulikheter samtidig. Eventuell korrosjonsangrep påvirker ikke alle master likt siden denne kan opptre på ulike steder på master. Derfor velges det å fokusere på korrosjonsbeskyttelse og sette likhetstegn mellom mastenes og korrosjonsbeskyttelsens levetid.

For å kunne få et svar på om ønsket levetid for korrosjonsbeskyttelsen av kontaktledningsmaster er oppfylt, foretas en estimering av levetiden til korrosjonsbeskyttelsen. Ulike faktorer påvirker sinkbeleggets varighet og effekt som korrosjonsbeskyttelse. I oppgaven skal tykkelsen til sinkbelegget måles på både nye og eldre master for å sjekke om sinkbelegget tæres fortere enn antatt.

På nåværende tidspunkt har ikke Jernbaneverket dokumentasjon som forteller hva som er den forventede levetiden til sinkbelegget og kontaktledningsmaster. Det finnes kun anvisning i Jernbaneverkets tekniske regelverk, der det regnes med at konstruksjoner er beskyttet i 50 år med en sinktykkelse på 115 μm [1]. Undersøkelser og målinger utført i forbindelse med denne oppgaven forventes å gi en estimert levetid på sinkbeskyttelsen, samt estimere vedlikeholdssyklusen som kan forlenge den totale levetiden til kontaktledningsmastene.

2 Teori

2.1 Jernbaneverkets teknisk regelverk

Siden det i oppgaven blir referert til Jernbaneverkets tekniske regelverk er det viktig å prøve å belyse hva er det og hvilken funksjon regelverket har.

Jernbaneverkets tekniske regelverk er Jernbaneverkets interne styringsverktøy for utforming, bygging og dimensjonering av jernbaneanlegg [2]. Det tekniske regelverket skal være harmonisert med gjeldende standarder og er en samlebetegnelse innenfor de ulike jernbanetekniske fagområder. Jernbaneverkets teknisk regelverk skal [3]:

- *Være Jernbaneverkets samling av tilstrekkelige og nødvendige tekniske regler for bygging, prosjektering og vedlikehold av jernbaneinfrastrukturen på det nasjonale jernbanenettet slik at den tilfredsstiller Jernbaneverkets mål med hensyn på tilgjengelighet, sikkerhet, kostnadseffektivitet og kapasitet.*
- *Sikre harmoniserte tekniske løsninger ved prosjektering og bygging og et forsvarlig vedlikehold av det nasjonale jernbanenettet.*
- *Forenkle prosjektering, bygging og vedlikehold av jernbaneinfrastrukturen på det nasjonale jernbanenettet ved å tilby ensartede løsninger på problemstillinger som gjentatt oppstår, blant annet for å redusere diversifisering og suboptimalisering av anleggene og i stedet fremheve optimalisering på et overordnet nivå.*

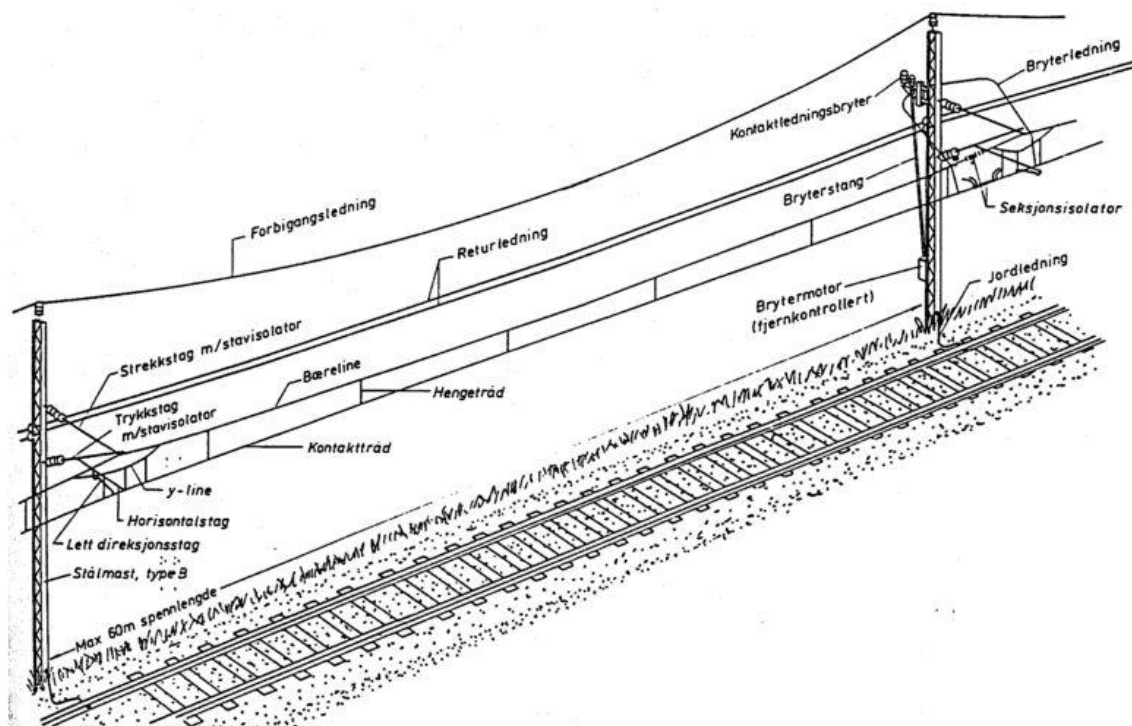
Det er både internasjonale myndigheter med tekniske spesifikasjoner for samtrafikkeve (TSI), og nasjonale myndigheter med nasjonale krav gjennom Jernbaneinfrastrukturforskriften som ligger høyere i hierarkiet enn Jernbaneverkets tekniske regelverk [4]. Det tekniske regelverk kan plasseres i kravhierarkiet som vist i Tabell 2-1.

Type krav	Fastsettes av	Eksempel
Internasjonale krav	Internasjonale myndigheter, f.eks. EU-kommisjonen	Interoperabilitetsdirektivet og Tekniske spesifikasjoner for interoperabilitet
Nasjonale krav	Nasjonale myndigheter, f.eks. Statens jernbanetilsyn og Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap	Jernbaneinfrastrukturforskriften og Forskrift for elektriske forsyningsanlegg
Firmakrav	Hvert enkelt firma f.eks. Jernbaneverket	Teknisk regelverk og tekniske spesifikasjoner

Tabell 2-1 Kravhierarki [4]

2.2 Kontaktledningsmaster

Kontaktledningsanlegg Figur 2-1 består av flere komponenter, blant annet kontaktledningsmaster [5, 6].



Figur 2-1 Kontaktledningsanlegg [5]

Hovedoppgaven til kontaktledningsmaster er å sikre at kontakttråd befinner seg i strømtakers arbeidsområde. Med dette sikres stabil og jevn strømtilførsel til toget. Jernbaneverket har for tiden flere ulike mastetyper i bruk i eksisterende anlegg:

- Stålmaster
- Betongmaster
- Tremaster.

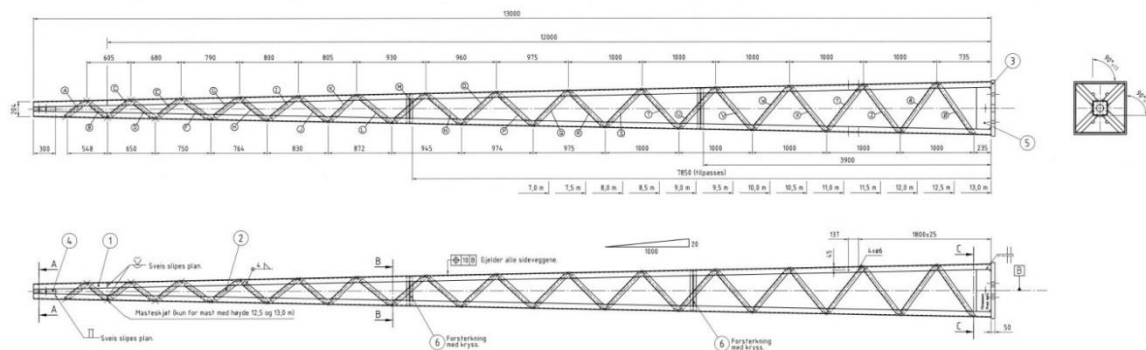
Tremaster er fortsatt i bruk i eldre anlegg og i forbindelse med system S35 [7, 8]. Det bygges ikke nye anlegg med tremaster. I dag brukes tremaster til stikkbytte på eksisterende anlegg eller til oppføring av midlertidige løsninger. Tremaster er, sammenlignet med betongmaster og stålmaster, den svakeste type av kontaktledningsmaster. Siden kontaktledningsanlegg har strenge krav til kontaktledningsføring, må tremaster sikres mot deformasjon og svikt i mye større grad enn tilsvarende betong eller stålmaster. For å forebygge råtedannelse i tremastene blir disse bestilt impregnert med kreosot.

Betongmaster er en eldre type kontaktledningsmaster som fortsatt er å finne i eldre anlegg. Det bygges ikke nye anlegg i Norge med betongmaster. Disse ble tatt i bruk på 40-50 tallet og ble brukt på steder hvor en trengte mer stabilitet og styrke enn det var mulig å oppnå med tremaster. Som andre betongprodukter kan også betongmaster bli utsatt for armeringskorrosjon pga. karbonatisering eller kloridinntrengning [9]. Karbonatisering og kloridinntrengning fører til armeringskorrosjon og reduserer mastens kapasitet og levetid. Vanligvis er armeringskorrosjon vanskeligere å oppdage siden prosessen foregår i betongen og er ikke synlig. Armeringskorrosjon er både vanskeligere å stoppe og reparere på en tilfredsstillende måte sammenlignet med korrosjon på stålmaster. Jernbaneverket har siden 70 tallet benyttet stålmaster som primær mastetype. Stålmaster har veldig gode mekaniske egenskaper og egner seg godt til bruk i kontaktledningsanlegg. I tillegg krever stålmaster lite vedlikehold. Siden alle stålmaster varmfosinkes blir ikke rustskader stort problem. Rustskader på stålmaster er lette å oppdage og rimelig enkle å reparere.

Stålmaster produseres i form av gittermaster og eller bjelkemaster [10]. Hovedforskjellen mellom disse mastetyperne er måten de er laget på.

Gittermaster Figur 2-2 er sveiset sammen av stålprofiler som bærende elementer, og flatstål i form av forgitring. Gittermaster forekommer i to utforminger, H-master vist i Vedlegg 1 og B-master vist i Vedlegg 2. Både B og H-master kan fås i flere forskjellige lengder.

Bjelkemaster vist i Vedlegg 3 er basert på en HEB eller HEM stålprofil. Denne mastetypen kan fås i flere størrelser og begynner med HE200B, med et sprang på 20 til neste størrelse, og slutter med HE280B. HEM bjelkemast er en spesialtype av kontaktledningsmaster som kun kan fås i størrelsen HE260M.



Figur 2-2H mast vist i Vedlegg 1 (utklipp fra tegning EK.800094-000)

I tillegg til forskjeller i byggemåte har H, B og bjelkemaster forskjellig styrke. H-master har samme styrke både i retning vinkelrett mot, og parallelt med spor, mens B-master og bjelkemaster har en svakakse. Svakaksen er vanligvis parallelt med sporet, men kan avhengig av situasjonen være vinkelrett mot sporet.

For å sikre sporbarhet til kontaktledningens materiell skal alle kontaktledningsmaster merkes i henhold til Jernbaneverkets tekniske regelverk [11]. Det er to metoder for merking av kontaktledningsmaster:

- Nummereringsmetode 1, der mastenummer skrives som XXX-YY. Her er XXX aktuell hel strekningskilometer og YY et løpenummer for den aktuelle strekningskilometeren. Løpenummeret begynner på 01 og fortsetter fortløpende til neste hele strekningskilometer.
- Nummereringsmetode 2, der mastenummer skrives som XXXX. Her er XXXX aktuell nummerserie i henhold til tegning EK.703490-000 vist i Vedlegg 4.

Ved bygging av nye jernbanestrekninger skal nummereringsmetode 1 benyttes. I tillegg til dette og i henhold til tegninger til kontaktledningsmaster f. eks. EK.800089-000 Merknader Vedlegg 3, skal master merkes med produsentens firmanavn, produksjonsuke og år. Dette preges inn på angitt sted på masten.

2.3 Korrosjon

Det er kun noen få metaller som forekommer fritt i naturen er i ren metallisk form. Slike edle metaller står langt nede i spenningsrekka (gul, sølv, platina). Dette betyr at disse er i en stabil form og ikke utsatt for korrosjon. De fleste metaller er uedle og finnes i naturen i form av oksider, sulfider, hydroksider, karbonater. Disse fremstilles fra malmen ved tilførsel av til dels store mengder energi [12]. Sluttprodukt i form av rent uedelt metall streber etter å gå tilbake til sin opprinnelige naturlige tilstand, som er den kjemisk mest stabile. Denne nedbrytningsprosessen kalles korrosjon. Når et metall, i vårt tilfelle stål, korroderer dannes det rust som er et korrosjonsprodukt. Kjemisk har stålrust tilnærmet samme sammensetning som stålmalm. «Korrosjon er derfor tæring eller ødeleggelse av materialer på grunn av reaksjon med omgivelse» [13].

Korrosjonsprosessen er ikke alltid like ødeleggende for metallene. I enkelte tilfeller er denne prosessen ønskelig, for eksempel når kopper eller bronsegenstander blir patinert og på denne måten beskyttet mot videre korrosjon:



I andre tilfeller er viss korrosjon nødvendig for at metallet skal kunne brukes i praksis, for eksempel når det uedle aluminiummetallet får et beskyttende oksidlag på overflaten i et oksygenmiljø [12]:



Korrosjon av metaller kan deles i to grupper:

- Våtkorrosjon som forutsetter at vi har en elektriskledende væske (elektrolytt) til stede. Denne korrosjonstypen kalles også elektrolytisk korrosjon.
- Tørr korrosjon hvor korrosjonsmediet er en aggressivgass.

Det er kun våtkorrosjon som kan være årsak til nedbrytning av materialer i stålmaster. Metaller korroderer når en ledende væske og oksygen tilstede. Vann med forurensing fra luft er elektrisk ledende. Når metaller er dekket eller i kontakt med elektrisk ledende væske sender metaller ut ioner. Forskjellige metaller sender ut ulike mengder ioner. Metaller som sender ut færrest eller ingen ioner kaller vi for edle metaller. Setter vi to forskjellige metaller i en ledende væske og kobler dem sammen korroderer den som er minst edel. Korrosjonshastigheten avhenger av flere faktorer, blant annet hvilke metaller som er forbundet sammen (galvanisk korrosjon), hvor lenge de er utsatt for korrosive omgivelser, forurensing og flere andre faktorer.

Tabell 2-2 viser korrosjonshastighet for utvalgte metaller i $\mu\text{m}/\text{år}$ etter en periode på to, fem og ti års perioder. Fra tabellen ser vi at til og med korrosjonsproduktet rust gir noe redusert korrosjonshastighet over tid.

	2 år	5 år	10 år
Stål	51,1	32,8	20,7
Aluminium	0,48	0,76	0,35
Kopper	1,8	1,1	0,71
Sink	3,6	2,6	1,7

Tabell 2-2 Korrosjonshastighet i $\mu\text{m}/\text{år}$ for ulike metaller etter 2, 5 og 10 års eksponering i marin atmosfære [13].

For at korrosjon skal oppstå er det ikke nødvendig at metaller er fysisk koblet sammen. Stål korroderer hvis det står ute i fuktig vær. Stålets overflate inneholder mikroskopiske partikler med forskjellig grad av edelhet. Glødeskall og grafitt er katoder (tar opp elektroner) mens metallet er en anode (avgir ioner) [13]. Disse områdene danner små celler som korroderer. Det er potensialdifferansen mellom katode og anode som er drivende kraft i korrosjonsprosessen. Korrosjonsprosessen i stål kan beskrives på følgende måte:

jern + oksygen + vann \rightarrow jernioner + hydroksylioner + jernhydroksyl (rust)

Korrosjonsprosessen er en redoksprosess hvor oksidasjon (korrosjon) foregår på anodisk område mens reduksjon (elektronforbruk) foregår på katodisk område.

Ved rustdannelse kan jernets anodereaksjon skrives på følgende måte [12]:

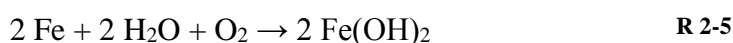


Der luft kommer til, får man oksidasjonsreaksjon. I en tilnærmet nøytral løsning får vi følgende reaksjon:

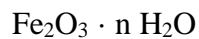


Fe^{2+} ioner på anoden og 4OH^{-} ioner på katoden vandrer mot hverandre og danner $\text{Fe}(\text{OH})_2$ som blir utfelt på grenseflata mellom anoden og katoden. Etter hvert blir Fe^{2+} oksidert til Fe^{3+} av oksygen i luften.

Reaksjon helt frem til rust blir dermed:

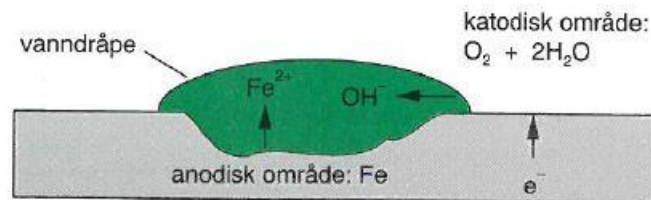


Det endelige resultatet som vi kjenner som rust skrives på følgende måte:



R 2-7

Her betyr $n \text{H}_2\text{O}$ at jernoksid er bundet til et variabelt antall vannmolekyler.



Figur 2-3 Dannelse av rust [12]

Som nevnt ovenfor får vi korrosjonsproblemer hvis elektrolytt og oksygen er i kontakt med metallet samtidig. Klarer vi å forhindre at metalloverflaten kommer i kontakt med elektrolytten og oksygen samtidig, kan vi forhindre korrosjonen.

2.4 Korrosjonsvern

Omtrent 20 % av alt jern som produseres årlig, går til å erstatte konstruksjonselementer som er ødelagt av korrosjon. Det brukes enorme mengder energi og mineralressurser for å erstatte de tapte konstruksjonene [12].

Det finnes flere måter man kan beskytte stål mot korrosjon på. F.eks. kan man behandle stålets overflate med maling eller andre tette belegg, eller behandle stålets overflate med andre metaller. Den mest utbredte metode for metallisk behandling er varmforsinking. Metoden er over 200 år gammel. Teknologisk sett har ikke metoden endret seg siden den gang. Varmforsinking beskytter stål mot korrosjon på to måter [14]:

- Metoden danner et tett belegg som isolerer stål fra fuktighet og luft og hindrer korrosjon.
- Sinkbelegg oppfører seg også som offeranode. Da sink ligger høyere i spenningsrekka enn stål hindrer belegget at stål korroderer.

Selv om noe av stålet ikke er dekket med sink blir det galvanisk beskyttet mot korrosjon [14]. Varmforsinking er etablert behandlingspraksis hos Jernbaneverket. Varmforsinkingsprosessen går ut på å dyppe stål i et sinkbad som har en temperatur mellom 450 - 460 °C. For at sinken skal feste seg er det viktig at stålet er helt rent. Stålet vaskes, avfettes og holdes fritt for glødeskall og andre overflateurenheter. Når stålet er tilstrekkelig rent dyppes det i flussmiddel. Flussmiddel, gjerne sinkammoniumklorid, holder en temperatur mellom 40 og 60 °C. Ett tynt

lag med flussmiddel blir liggende på ståloverflaten etter tørking. Flussmiddelet bidrar til å fjerne siste rester av urenheter fra stålets overflate når stålet dyppes i et varmt sinkbad. Sink reagerer med en metallisk ren ståloverflate. For silisiumtettete stål varierer sinktykkelsen fra 100 – 400 µm [13].

I henhold til Jernbaneverkets tegninger skal kontaktledningsmaster varmforsinkes i henhold til norsk standard NS-EN ISO 1461. Sinktykkelsen skal være minimum 115 µm [1].

2.4.1 Korrosjonshastighet

Korrosjonshastighet kan uttrykkes som metallens tverrsnittsreduksjon per tidsenhet. Korrosjonshastighet kan brukes for å gi konstruksjonen korrosjonstillegg for å oppnå ønsket levetid. Det er vanlig å ha et korrosjonstillegg på 3 mm på rør og tanker i karbonstål. Korrosjonshastigheten kan også brukes til å estimere en utvikling dersom det går hull i korrosjonsbeskyttendelag, selv om den lokale korrosjonshastigheten kan være mange ganger det som oppgis i tabeller som jevn korrosjonshastighet [15].

Atmosfære- type	Forurensnings- nivå		Korrosjonshastighet µm/år				Sted
			stål		sink		
	Cl- mg/m ² d	SO ₂ µg/m ³	1 år	4 år	1 år	4 år	
Landlig R	<3	<10	17-24	11-13	0,6-0,8 (1,7-2,0)	0,5-0,7 (0,9-1,2)	Ryda, Koski, Porsgrunn, Birkenes, Tuentangen, Tyholt (Hyllestad, Voss, Stend)*
By U1	≤3	10-75	30-39	22-25	0,9-1,9	1,0-1,5	Stockholm, Salmisaari, Otaniemi, Harjavalta Göteborg, Minde, Berg- ens Tidende, Veritas, Fredriksberg, Søborg, Amager, Alvim Borregaard
	7-47	10-75	35-63	19-38	1,3-2,4	1,4-2,0	
U2		75-200	81	57	3,5-3,8	3,8	
Marin M1	3-20	<10	25-35	14-20	07-1,4	07-1,1	BM1**, Stord I, Stord II, Mongstad
M2	20-100	<10	36-68	20-35	1,3-2,0	1,1-1,6	BM3**, Harmaja, Fole- Havnen 250
M3	>100	<10	86	40	2,1	1,9	Follehavnen 10
Arktisk A	<3	<10	6	4	0,8	0,4	Gällivare

Tabell 2-3 Klassifisering av korrosivitet på prøvesteder i Skandinavia. Basert på forurensningsnivå og korrosjonshastighet på stål og sink etter 1 og 4 års eksponering [15].

Noter: *Steder med mye nedfall, **Bohus Malmön

Kostnadene forbundet med bygging og vedlikehold av kontaktledningsanlegg er formidable. Det er derfor viktig at kontaktledningsmaster har lang levetid og krever minimalt med

vedlikehold. Holdbarheten til sinkbelegg har en sentral rolle når vi snakker om kontaktledningsmasters levetid. Sinkbelegg slites av vær og vind og som resultat av offeranodeprosessen. En gjennomsnittlig årlig sinkslitasje i landlige omgivelser antas å være 2 μm , i urbane områder 3 μm og opp til 20 μm i industriområder og kystnære strøk [16]. Levetiden for et sinkbelegg ved vanlig utendørs bruk er proporsjonal med tykkelsen til sinkbelegget. En del av stålet kan ruste bort før konstruksjonen mister sine bruksegenskaper. Derfor er levetiden til stålkonstruksjon lengre enn den er for det påførte sinkbelegget. Hvis det er nødvendig å forlenge levetiden til sinkoverdekning må en starte vedlikeholdstiltak før noe av stålet begynner å ruste og mens det er fortsatt 20 til 30 μm igjen av sinkbelegg [17]. I henhold til «Contact Lines for Electric Railways» skal en ha minimum 40 μm sinktykkelse før vedlikeholdstiltak må iverksettes [16]. På sin side krever Jernbaneverkets teknisk regelverk [18] at viktige bærende stålkonstruksjoner ikke bør ha tynnere sinkbelegg en 50 μm .

2.4.2 Levetiden til sinkbelegg i luft

I det første trinnet til atmosfærisk korrosjon av sink dannes det et tynt lag av sinkhydroksider. Etter flere måneder med eksponering i forurenset atmosfære dannes sinkkarbonat, sinkhydroksid, hydrozinkitt ($\text{Zn}_5(\text{OH})_6(\text{CO}_3)_2$) og sinkoksid. På grunn av den beskyttende virkningen til korrosjonslaget bremses korrosjonshastighet noe ned [19]. Reduksjon av korrosjonshastigheten med tid kan sannsynligvis tilskrives dannelse av tettere lag av korrosjonsprodukter på sinkens overflate som gir bedre korrosjonsmotstand [20]. Korrosjonshastighet for sinkbelegg avhenger i stor grad av følgende faktorer:

- Tiden belegget er utsatt for fuktighet
- Hyppigheten av fukting og tørking av overflaten
- Luftforurensing
- Tilstedeværelse av klorider
- Overflateforurensing
- Temperatur

Korrosjonshastighet for sink er mye lavere enn for stål og korrosjonshastigheten faller ofte med tiden [17, 19]. Det finnes studier som sier at korrosjonshastighet til sink er konstant og at det ikke finnes noen reduksjon i korrosjonshastighet [20]. Det er også påvist ved forsøk og testing at selve orienteringen av prøver har betydning for korrosjonshastigheten til sink. Prøver som er rettet mot himmel korroderer raskere en prøver som vender mot bakken. Korrosjonshastigheten til prøver som er vendt mot himmelen er lineær, mens prøver som er vendt mot bakken har

parabelformet korrosjonshastighet [20, 21]. Korrosjonshastighet er en avgjørende faktor for å kunne estimere levetid til sinkbelegg. Det er påvist ved målinger, at vi har større korrosjonshastighet i industriområder. I henhold til Norsk Standard er atmosfærens korrosivitet delt i 6 kategorier som vist i Tabell 2-4 [22]:

Kategori	Korrosivitet
C1	Veldig lav
C2	Lav
C3	Middels
C4	Høy
C5	Veldig høy
CX	Ekstremt

Tabell 2-4 Atmosfærens korrosivitets kategori [22]

Detaljert beskrivelse av kategorier fra Tabell 2-4 er vist i Vedlegg 5. Det beste utgangspunktet for estimering av korrosjonshastighet er å kjenne første års korrosjonshastighet. Uten denne er det fortsatt mulig å estimere korrosjonshastigheten, men det innebærer noe større usikkerhet. Følgende uttrykk kan benyttes til å estimere metallkorrosjon.

$$D = r_{corr} \cdot t^b \quad \text{Ligning 2-1}$$

Hvor D er enten vekttap per flate eller inntrengningsdybde, r_{corr} er første års korrosjonsrate, t er eksponeringstid og b er et metall-miljø-spesifikt tidsekspONENT [23] [24]. Ligning 2-1 har vist seg å være gyldig for estimering av korrosjon i en eksponerings periode på opptil 20 år. For estimering av korrosjonshastighet for eksponerings perioder over 20 år må en benytte følgende uttrykk [23].

$$D(t > 20) = r_{corr} \cdot [20^b + b(20^{b-1}) \cdot (t - 20)] \quad \text{Ligning 2-2}$$

Mye av informasjonen som er tilgjengelig for atmosfærisk korrosjon av sink i korte og mellomlange perioder baserer seg på tester som ikke overstiger 10 år. Selv om det er ganske godt kjent hva som skjer med sinkkorrosjon for korte og mellomlange perioder er det lite kjent hvordan er korrosjonsutvikling er for tidsperioder over 10 år [20].

I henhold til [20] har det vært gjennomført flere tester på flere testlokasjoner som var dekkende for både landlige, urbane, industri og sjø nære områder. Sink korroderer saktere i områder med liten forurensing enn i områder med høy forurensing og høyt innhold av nitrater. Korrosjonshastighet avhenger i stor grad også av hvor ofte metalloverflaten fuktes eller tørkes

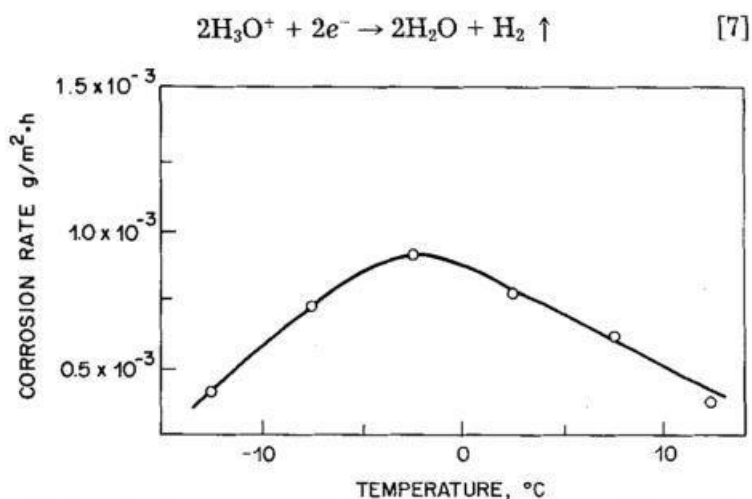
og hyppigheten av slike intervaller. Den mest uønskede situasjonen er jevnlig fukting av sinkoverflate på grunn av tåke og dugg i forurenset luft. Ved forsøk har det blitt påvist at temperatur, fuktighet og innhold av SO₂ har betydning for sinkens korrosjonshastighet [19, 25-27]. Temperatur på 4 grader, tilstrekkelig luftfuktighet og tilstedeværelse av SO₂ gir høyest korrosjonshastighet sammenlignet med høyere temperaturer, 22 og 30 grader [26].

Eksponeerings temperatur	Korrosjonsrate (µg/cm2d)
4°C	11,0
22°C	7,1
30°C	6,8

Tabell 2-5 Korrosjonshastighet av sinkprøver i to-ukers eksponeringer ved ulike eksponeringstemperaturer. SO₂ konsentrasjonen var 107 ppb, og den relative fuktighet var 95% [26].

Effekten av sporadisk regnfall er liten men gunstig siden regnet vasker vekk kjemisk forurensing og støv fra metalloverflaten [28].

Atmosfærisk korrosjon av sink er påvirket av tilstedeværelse eller mangel på fuktighet. Mengden av absorbert fuktighet på sinkoverflaten varierer med luftfuktighet og temperatur. Raten av kjemisk korrosjonsreaksjon øker normalt med økende temperatur. Det antas at korrosjonshastighet når sitt maksimum i fuktig atmosfære ved -2 °C [21].



Figur 2-4 Avhengighet av den gjennomsnittlige korrosjonshastigheten av sink av temperaturen på fuktig (RH > 80%) luft [21].

Korrosjonsprosess fortsetter under vannets frysepunkt fordi vannets absorpsjonssjikt forblir flytende under vannets frysepunkt 0 °C, grunnet vannets frysepunktdepresjon.

2.4.3 Luftforurensing

Det er påvist at luftforurensing har stor innvirkning på sinkkorrosjon og korrosjonshastighet [19]. Påvirkningene kan være i form av støv eller utslipp fra industrien eller bilparken. For å kunne velge riktig korrosjonskategori og beregne sinkkorrosjon i Norge nøyaktig, må vi stadfeste luftforurensing i Norge. Påvirket av værforhold, årstid tid på dagen kan luftforurensing i ett og samme område variere over tid [29]. I Norge er det høyest luftforurensing om vinteren. Dette skyldes flere forurensingskilder, slik som bruk av piggdekk, start av kald bil og fyring. De mest aktuelle forurensingsstoffene i Norge er:

- Svevestøv: Omtales gjerne som PM (particulate matter), etterfulgt av tall som forteller om partikkelstørrelse i mikrometer.
- NO₂, nitrogendioksid: Dannes ved forbrenningsprosesser ved høy temperatur.
- SO₂, svoveldioksid: Dannes ved forbrenning av stoffer som inneholder svovel. Luftforurensing av SO₂ er et problem i noen få norske byer hvor det er høy industriutslipp som forårsaker høye lokale konsentrasjoner av SO₂.
- CO, karbonmonoksid: Dannes ved ufullstendig forbrennings av organisk materiale som ved, bensin og diesel.
- O₃, ozon: Er en reaktiv gass som finnes både i stratosfæren og nært bakken.
- C₆H₆, benzen: Er organisk forbindelse av oljeprodukter.

Tabell 2-6 under viser ulike kilder til forurensing i norske byer. Tabellen er veiledende, da kildesammensetningen varierer fra sted til sted.

Kilde /bidrag	NO2	PM10	PM2,5	SO2	CO	Ozon	Benzen
Eksosutslipp	Svært mye	Noe	Mye	-	Lite	-	Noe
Slitasje fra vei, dekk og brems	-	Svært mye	Noe	-	-	-	-
Strøsand1	-	Svært mye 1	Noe 1	-	-	-	-
Vedfyring	-	Mye	Mye	-	-	-	-
Industri2	Noe2	Noe2	Noe2	Noe2	-	-	-
Skipstrafikk2	Noe2	Lite2	Lite2	Noe2	-	-	-
Avdamping	-	-	-	-	-	-	Noe
Langtransportert forurensing	Lite3	Noe	Mye	Lite	-	Svært mye	-

Tabell 2-6 Kilder til luftforurensing [29].

- 1) Flere kommuner bruker ikke strøsand, og dette er da ikke en relevant kilde i disse kommunene.

- 2) Gjelder bare i byer og tettsteder hvor det er aktuell industri eller havneaktivitet.
- 3) Det er lite langtransportert NO₂ og NO, men det er svært mye langtransportert ozon som reagerer med lokalt utslipp av NO og danner NO₂.

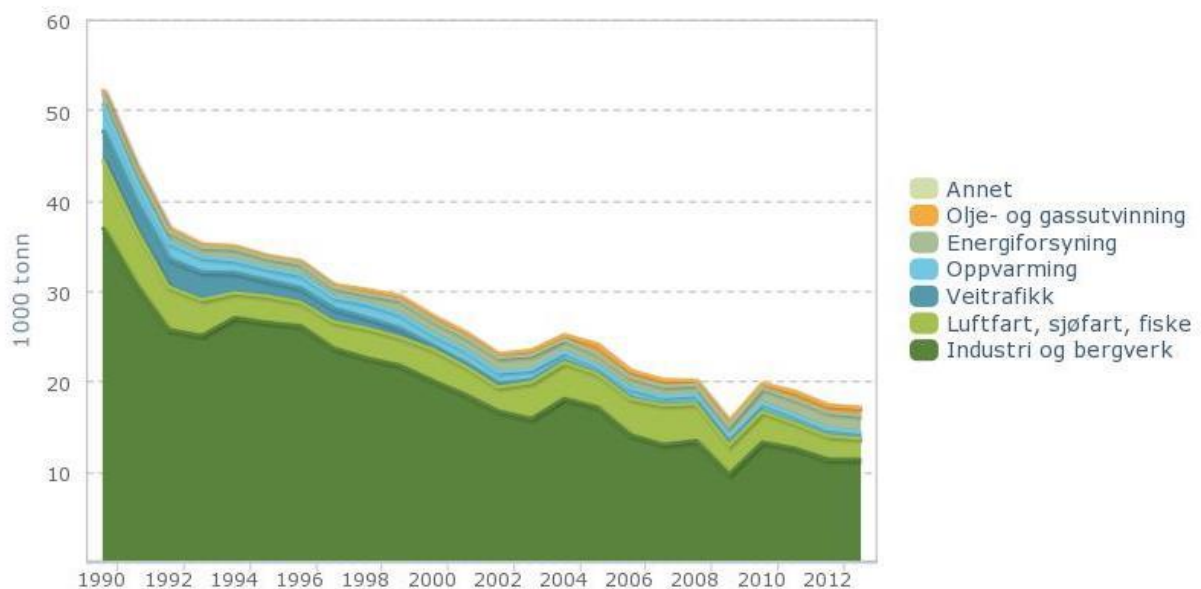
På bakgrunn av data fra Statistisk sentralbyrå kan vi se at vi i senere år har hatt en nedgang i utslipp av de fleste forsurende gasser ut til atmosfæren Tabell 2-7 [30].

	2013	Endring i prosent	
		Siden 1990	2013-2013
Nitrogendioksid (NOX)	156	-18,6	-5,4
Svoveldioksid (SO ₂)	17	-67,4	-1,6
Ammoniakk (NH ₃)	27	11,9	0,3
Flyktige organiske forbindelser (NMVOC)	135	-53,7	-0,8
Karbonmonoksid (CO)	262	-65,0	-11,8

1 Omfatter ikke utenriks sjø og luftfart.

Tabell 2-7 Utslipp av NOX, SO₂, NH₃, NMVOC og CO [30].

Svoveldioksid har stor innvirkning på sinkkorrosjon. Utslipp av denne gassen har hatt markant nedgang siden 1990 [31]. Siden svoveldioksid bidrar til økning i korrosjonshastigheten betyr nedgangen i svoveldioksidmengde at også korrosjonshastigheten får en nedgang. Dette gir totalt sett økt levetid til sinkbelegg.



Kilde: Statistisk sentralbyrå (SSB)

Lisens: NLOD

Figur 2-5 Utslipp av svoveldioksid 1990-2013 [31].

2.4.4 Korrosjonsprodukter

Når sink er utsatt for atmosfæriske forhold begynner den i likhet med andre metaller å korrodere. Sinkkorrosjon kan ikke direkte sammenlignes med korrosjon av stål. Korrosjonsprodukter fra sinkkorrosjon kan direkte knyttes til omgivelsen metallet var utsatt for [20]. Korrosjonsprodukter til sink avhenger av flere faktorer, blant annet temperatur, fuktighet, forurensede gasser og partikler. Stoffer som påvirker korrosjonsproduktet til sink kan for eksempel være SO₂, NO_x, O₃, NaCl eller (NH₄)₂SO₄ [19, 32]. Den kombinerte effekten av NaCl og SO₂ på sinkkorrosjon er større enn forårsaket av noen andre enkeltstående komponent. I fravær av SO₂ er simonkolleite (zinc chloride hydroxide monohydrate), Zn₅(OH)₈Cl₂ · H₂O og zincite ZnO de dominerende korrosjonsproduktene. Zinc hydroxysulfate (Zn₄SO₄(OH)₆·3H₂O), zinc chloride sulfate hydroxide hydrate (Zn₁₂(SO₄)₃Cl₃ · (OH)₁₅ · 5H₂O) og simonkolleite er dominerende i nærvær av SO₂ [33]. Nedenfor er det vist en oversiktstabell med mineraler som inneholder sink med mulig relevans til sinkkorrosjon. Tabell 2-8 inneholder 47 oppføringer, hvorav noen ikke har navn og derfor er ikke kjent for å være produsert naturlig i geokjemiske prosesser [21].

Substance ^a	Hey index no. ^b	Crystal system	Formula	Detection in corrosion layers ^c
Metal, oxides and Hydroxides				
Zinc	1,8	Hex.	Zn	
Zincite	7-5-1	Hex.	ZnO	(15, 19)
Zinc oxide	^d	Cub.	ZnO	
Sweetite	^d	Tet.	Zn(OH) ₂	(15, 19)
Zinc hydroxide	^d	Hex.	β-Zn(OH) ₂	
Zinc hydroxide	^d	Orth.	γ-Zn(OH) ₂	
Wulfingite	^d	Orth.	ε-Zn(OH) ₂	
Zinc hydroxide (h)	^d	Orth.	δ-Zn(OH) ₂	
Sulfides (including polytype structures)				
Spalerite (zinc blende)	3-4-2	Cub.	α-ZnS	
Wurtzite	3-4-3	Hex.	β-ZnS	(20)
Wurtzite	3-4-3	Trig.	β-ZnS	
Matraite	3-4-3a	Trig.	γ-ZnS	
Sulfites				
Zinc sulfite	^d	--	ZnSO ₃	
Zinc sulfite (h)	^d	--	ZnSO ₃ · 1/2H ₂ O	
Zinc sulfite (h)	^d	--	ZnSO ₃ · H ₂ O	
Zinc sulfite (h)	^d	Mon	ZnSO ₃ · 2H ₂ O	(21)
Zinc sulfite (h)	^d	--	α-ZnSO ₃ · 2 1/2H ₂ O	
Zinc sulfite (h)	^d	Tet.	β-ZnSO ₃ · 2 1/2H ₂ O	
Zinc sulfite (h)	^d	Tricl.	ZnSO ₃ · 2 1/2H ₂ O	
Sulfates				
Zinkosite	25-5-1	Orth.	ZnSO ₄	(16)

Substance ^a	Hey index no. ^b	Crystal system	Formula	Detection in corrosion layers ^c
Zinc sulfate	d	Cub.	ZnSO ₄	
Gunningite	25-5-1a	Mon.	ZnSO ₄ · H ₂ O	(20, 21)
Bianchite	25-5-14	Mon.	ZnSO ₄ · 6H ₂ O	(20, 21)
Goslarite	25-5-2	Orth.	ZnSO ₄ · 7H ₂ O	(20)
Zinc sulfate (h)	d	--	ZnSO ₄ xH ₂ O	
Zinc sulfate (b)	d	--	Zn ₄ SO ₄ (OH) ₆	(19, 20)
Zinc sulfate (b, h)	d	--	Zn ₇ SO ₄ (OH) ₁₂ · 4H ₂ O	(19, 20)
Zinc oxysulfate	d	Orth.	Zn ₃ (SO ₄) ₂ O	
Zinc oxysulfate	d	Mon.	Zn ₃ (SO ₄) ₂ O	
Zinc oxysulfate	d	--	Zn ₅ (SO ₄) ₃ O ₂	
Chloride				
Zinc chloride	d	Tet.	α-ZnCl ₂	
Zinc chloride	d	Mon.	β-ZnCl ₂	
Zinc chloride (h)	d	Orth.	ZnCl ₂ · 1 1/3H ₂ O	
Zinc chloride (b)	d	Orth.	β-ZnClOH	
Simonkolleite	d	Hex.	Zn ₅ Cl ₂ (OH) ₈ · H ₂ O	(16, 19)
Zinc oxychloride	d		Zn ₅ Cl ₂ O ₄ · H ₂ O	(19)
Carbonates				
Smithsonite	11-6-1	Trig.	ZnCO ₃	(15, 19)
Zinc carbonate			ZnCO ₃ · 4H ₂ O	(19)
Zinc carbonate			Zn ₄ CO ₃ (OH) ₆	(19, 22)
Hydrozincite	11-6-3	Mon.	Zn ₅ (CO ₃) ₂ (OH) ₆	(16, 19, 23)
Zinc carbonate (b, h)	11-6-3a	--	Zn ₅ (CO ₃) ₂ (OH) ₆ · H ₂ O	
Zinc carbonate oxichloride	d		Zn _a (CO ₃) _b (OH) _c OCl	(23)
Zinc carbonate (b, h)	d	--	Zn ₄ CO ₃ (OH) ₆ · H ₂ O	
Nitrates				
Zinc nitrate			Zn(NO ₃) ₂	(9)
Organics				
Zinc acetate	d	Tet.	β-Zn(CH ₃ COO) ₂	
Zinc acetate (h)	d	Mon.	Zn(CH ₃ COO) ₂ · 2H ₂ O	
Zinc formate (h)	d	Mon.	Zn(HCOO) ₂ · 2H ₂ O	

^a Included in each group are acid (a), basic (hydroxyl) (b), and hydrated (h) compounds as well as oxysalts.

^b Ref. (24).

^c The numbers refer to the reference list.

^d Indicates that compound has not been reported as a mineral or that Hey index number has not been published.

Tabell 2-8 Minerals containing zinc and other crystalline substance with possible relevance to the corrosion of zinc [21].

2.4.5 Korrosjonsberegning

Levetiden til kontaktledningsmastenes korrosjonsbeskyttelse i henhold til Jernbaneverkets tekniske regelverk er antatt å være 50 år [1]. Sinkbelegget er det eneste hinderet for korrosjon av kontaktledningsmaster. Levetiden til sinkbelegget kan estimeres ved hjelp av uttrykk for lang eksponeringstid Ligning 2-2. I henhold til [22] Tabell 2-4 må det velges en passende korrosjonskategori. Beskrivelse og forklaring til korrosjonskategorier er definert i [22] i Annex C, vist i Vedlegg 5. Korrosjonskategori C4 dekker områder med høy luftforurensing samt kystnære områder. Det er antatt at denne korrosjonskategorien er dekkende for de mest aggressive korrosjonsmiljøer vi har i Norge samt at denne er vel konservativ for de fleste landsdeler. I henhold til tabell 2, Vedlegg 8 blir korrosjonsintervall for sink og C4 korrosjonskategori:

$$2.1 < r_{corr} \leq 4.2 \mu m/\text{år}$$

Verdi for b er definert i standarden ISO 9224:2012 tabell 2 [23]:

$$b = 0,813$$

Som nevnt over blir eksponeringstid lik til ønsket levetid. Ved hjelp av Ligning 2-2 beregner 50-års korrosjon til sinkbelegg med begge korrosjonsrater:

$$t = 50 \text{ år}$$

$$D(t > 20) = r_{corr} \cdot [20^b + b(20^{b-1}) \cdot (t - 20)]$$

$$D_1 = 2.1 \cdot [20^b + b(20^{b-1}) \cdot (50 - 20)] = 53.2 \mu m$$

$$D_2 = 4.2 \cdot [20^b + b(20^{b-1}) \cdot (50 - 20)] = 106.5 \mu m$$

Levetid til sinkbelegg med korrosjonsrate $r_{corr}=2.1 \mu m/\text{år}$ og sinktykkelse $d=115 \mu m$.

Siden vi kjenner den maksimale korrosjon $D = 115 \mu m$ kan vi ved å snu Ligning 2-2 med hensyn på t beregne nøyaktig levetid for den valgte korrosjonsraten:

$$t_{2.1} = 20 + \left(\frac{D}{r_{corr} \cdot b \cdot (20^{b-1})} - \frac{20^b}{b \cdot (20^{b-1})} \right) = \underline{113.35 \text{ [år]}}$$

Levetid til sinkbelegg med korrosjonsrate $r_{corr}=4.2 \mu m/\text{år}$:

$$t_{4.2} = 20 + \left(\frac{D}{r_{corr} \cdot b \cdot (20^{b-1})} - \frac{20^b}{b \cdot (20^{b-1})} \right) = \underline{54.37 \text{ [år]}}$$

Beregningen over viser at vi ved å velge høyeste verdi for sinkkorrosjon får en sinkkorrosjonsverdi på $106 \mu m$ i løpet av 50 år. Dette er en verdi beregnet med den høyeste

korrosjonsraten for korrosjonsklasse C4. Ut i fra beregningen, er levetid til sinkbelegg på 54 år. Levetiden vi får her er ikke beregnet i henhold til kravet fra Jernbaneverkets teknisk regelverk om at bærende konstruksjoner ikke skal ha mindre en 50 µm tykkelse på sinkbelegg [18]. Beregninger over samsvarer ikke med levetid for sinkbelegget beregnet fra Nordic Galvanizers [34]. Nordic Galvanizers beregninger tar ikke hensyn til standarden NS-EN ISO 9224:2012 og regner med en jevn korrosjonshastighet gjennom hele levetiden. Resultater vist i Tabell 2-9.

Beleggtykkelse i henhold til EN ISO 14611		Levetid til sinkbelegg i forskjellige korrosjons kategorier				
Ståltykkelse i mm	Lokal beleggtykkelse ³ (Gjennomsnitt tykkelse ⁴) µm	C1	C2	C3	C4	C5
	Stål ≥ 6 mm					
Stål > 3 - ≤ 6 mm	55 (70)	100+	79-100+	26-79+	13-26	7-13
Stål ≥ 1,5 - ≤ 3 mm	45 (55)	100+	64-100+	21-64	11-21	5-11
Stål < 1,5 mm	35 (45)	100+	50-100+	17-50	8-17	4-8
Støpt ≥ 6 mm	70 (80)	100+	100-100+	33-100	17-33	8-17
Støpt < 6 mm	60 (70)	100+	86-100+	29-86	14-29	7-14
Stål > 6 mm spesial ²	100 (115)	100+	100+	48-100+	24-48	12-24
Stål > 6 mm spesial ²	145 (165)	100+	100+	70-100+	37-70	17-34
Stål > 6 mm spesial ²	190 (215)	100+	100+	90-100+	45-90	23-45

Tabell 2-9 Varighet i år for galvaniserte belegg brukt for korrosjonsklasser C1-C5. Levetiden er bassert på minimum lokal belegg tykkelse i henhold til EN ISO 1461: 2009 [34].

Noter:

1. Minimum beleggtykkelse på prøver som ikke er sentrifugert.
2. Større beleggtykkelse kan oppnås når stålet har spesifisert silisiuminnhold.
3. Minimum lokale beleggtykkelse er i henhold til EN ISO 1461:2009.
4. Gjennomsnittlig beleggtykkelse er i henhold til EN ISO 1461:2009.
5. I kategori C5 kan det være nødvendig å anvende duplex (forsinking + maling) for å oppnå lengre levetid.

2.4.6 Sensitivitet

Korrosjonshastighet er gradert i seks korrosjonsgrupper (Tabell 2-4). Hver gruppe er bestemt av et korrosjonshastighetsintervall vist i Vedlegg 8. Valg av riktig korrosjonsklasse er avgjørende faktor ved beregning av korrosjonshastighet. Da vi har intervaller som dekker større spenn får vi stor variasjon i den totale årlige korrosjonen. Nedenfor vises beregning av sinkkorrosjon med hensyn til ønsket levetid for sinkbelegget på kontaktledningsmaster. Beregningen er basert på minimumstykkelsen for sinkbelegget på 115 μm og ønsket levetid på 50 år. I og med at Jernbaneverkets teknisk regelverk krever at minimumstykkelsen til sink ikke skal være mindre enn 50 μm på viktige bærende stålkonstruksjoner [1] setter vi dette som parameter i beregninger.

Korrosjons-kategori	Sink tykkelse	50-års korrosjon [μm]		Levetid [år]	
		Max	Min	Max	Min
C1	115 μm	2,54	--	--	1395
C2	115 μm	17,75	2,54	1395	195
C3	115 μm	53,24	17,75	195	62
C4	115 μm	106,47	53,24	62	29
C5	115 μm	212,95	106,47	29	12
CX	115 μm	633,77	212,95	12	3

Tabell 2-10 Beregning av teoretisk korrosjon og levetid til minimumstillat sinktykkelse ved bruk av Ligning 2-2/Ligning 2-2.

Utførte beregninger av teoretisk levetid og korrosjon viser at vi får et stort spekter fra den laveste til den høyeste korrosjonsklasse. Det er også stor variasjon innad i de forskjellige korrosjonsklasser. Eksempel for gjennomførte beregninger er vist i Vedlegg 9.

Siden det handler om relativt store tidsintervaller (over 20 år) åpner standarden for mulighet til å velge en mer konservativ beregningsmetode [23]. Der hvor det er nødvendig å estimere sinkkorrosjon mer konservativt bør verdien b (Ligning 2-1 og Ligning 2-2) økes til å ta høyde for usikkerhet i data. En kan gjøre dette ved å legge til to standardavvik til en gjennomsnittverdi av b til å oppnå en verdi på 95 % av sikkerhet. For sink er en standardavvik for b på 0,030 0. Den nye verdien for b er vist i tabell 2 i standarden [23].

3 Metoder

I tillegg til litteraturstudiet skal det i forbindelse med oppgaven gjennomføres ulike målinger og beregninger. Tilstanden på kontaktledningsmastene skal registreres ved å måle sinktykkelsen. Målingene skal utføres på forskjellige jernbanestasjoner. Det er lagt vekt på å velge jernbanestasjoner med ulik alder og ulik geografisk plassering. For å vise sammenheng mellom alder og utvikling i sinkkorrosjon er det valgt ut stasjoner som dekker store deler av tidsintervallet på 50 år.

Planlagte målinger skal gjennomføres med en tykkelsesmåler. Av praktiske årsaker er det ikke mulig å gjennomføre målinger slik det står beskrevet i Jernbaneverkets teknisk regelverk [1]. Siden gittermaster er utstyrt med klatrevern blir målinger foretatt mellom mastas fotplate og klatrevernet ref. Figur 3-2. Innledningsvis var det vist at det kan være forskjell mellom korrosjonshastighet avhengig av orienteringen til prøvestykker. Siden det er vist at vi har høyere korrosjonshastighet på den siden som er vendt mot himmelen blir alle målinger gjennomført på utsiden av mastene. Målingene gjennomføres på den måten at det blir tatt 12 til 16 målinger per mast, noe som gir grunnlag til videre arbeid. Videre skal alle måledata sorteres per strekning og per kontaktledningsmast. Disse blir presentert i rapporten både i tabeller og grafisk. På bakgrunn av måledata skal beregninger av teoretisk sinktykkelse og levetid foretas.

3.1 Måling av sinktykkelse

Jernbaneverket har generelt tre forskjellige hovedtyper stålmaster, H-master, B-master og bjelkemaster Figur 3-1. Hovedforskjell mellom disse unntatt kapasitet er geometri, måten de er laget på og stålprofiler de er laget av. H-master består av 4 vinkelprofiler med forgittring mellom vinkelprofiler. B-master består av to UNP profiler og forgittring mellom profiler. Bjelkemaster er generelt en HEB stålprofil som kappes i en bestemt lengde. På alle master sveises det en fotplate som brukes til å feste kontaktledningsmasten til fundamentet. Da mastene er fysisk forskjellige må de planlagte målingene gjennomføres på forskjellig måte. For å få mest mulig lik antall målinger per mast og begrense mengden måledata, skal målingene gjennomføres på vinkelprofiler, UNP profiler og HEB profiler. På den måten blir det ikke veldig stor variasjon mellom mastene. Det skal ikke legges vekt på sinktykkelse på forgittring og fotplater.



Figur 3-1 H, B og bjelkemast

Det antas at målinger gjennomført på denne måten er representative og dekkende for hele masta. Som nevnt det er antatt at størst korrosjon oppstår på utsiden av profiler og derfor skal alle målinger gjennomføres på utsiden. På H-master skal måling av sinktykkelse gjennomføres i 16

forskjellige punkter. Åtte målepunkter rett over fotplata en på hver side av vinkelprofil og åtte målepunkter under klatreverket, en på hver side av vinkelprofilet ref. Figur 3-2.



Figur 3-2 Målepunkter på H-master

Målinger på B-master blir gjennomført i samme område som på H-master. Siden mastene er forskjellige og er laget av forskjellige stålprofiler blir målinger tilpasset disse. Måling på UNP profiler blir gjennomført en på hver vange og en på steget på begge profiler. Her også skal det foretas måling i to forskjellige høyder, en over fotplata og en under klatreverket. Dette gir oss totalt 12 målinger per B-mast.

Når det gjelder bjelkemaster har ikke disse påmontert klatrevern. Dette betyr at man da kanskje kan nå litt høyere på masta. Målinger på bjelkemaster kan gjennomføres på en tilsvarende måte,

ved at man måler i tre punkter på hver flens av HEB profilen og i to forskjellige høyder. Da kommer vi opp i maksimalt 12 målinger per bjelkemast. Dette bør gi en grei oversikt over sinktykkelse på mastene.

3.2 Måleinstrument

For måling av sinktykkelse skal det benyttes et DeFelsko produsert PosiTector 6000 måleinstrument. Dette er et håndholdt elektronisk måleinstrument som måler tykkelsen til belegget på alle metaller på en ikke destruktiv måte [35]. Denne består av en standard kropp og en separat probe vist på Figur 3-3.



Figur 3-3 Måleinstrument

PosiTector 6000 kan måle beleggtykkelsen på tre forskjellige måter. Dette avhenger av metalltype og beleggtypen samtidig. Metoden målingen gjennomføres på vises på skjermen til måleinstrumentet.

De tre mulige metoder instrumentet kan gjennomføre målinger på er:

- **F** prober bruker magnetiske prinsipper til å måle tykkelse til ikke magnetisk belegg på jernholdige metaller.
- **N** probe bruker virvelstrømprinsipper for å måle tykkelse av en ikke ledende belegg på et ikke jernholdig metall.
- **FN** prober kombinerer de fulle egenskapene av både **F** og de **N** prober.

Måleinstrumentet som ble benyttet til å måle sinktykkelse var utstyrt med en F-probe. PosiTector 6000 er utstyrt med innebygd minne. Dette er på 250 individuelle målinger på enklere modeller. Siden dette er en enklere modell er det heller ikke mulig å lagre målingene per mast, eller på noen måte systematisere måledataene. Derfor var det nødvendig å ha kontroll på gjennomførte målinger slik at disse knyttes til riktig kontaktledningsmast. Data fra måleinstrumentet kan overføres til PC for videre behandling. Ved bruk av dataprogrammet PosiSoft kan en automatisk generere tabeller med måledata, samt histogram slik som vist i Vedlegg 6. Målområde til PosiTector 6000 ligger fra 0 til 1500 μm , slik som vist i Vedlegg 7.

Nøyaktigheten til måleinstrumentet skal ligge i følgende område.

- $\pm (1\mu\text{m} + 1\%) 0 - 50 \mu\text{m}$
- $\pm (2 \mu\text{m} + 1\%) > 50 \mu\text{m}$

Instrumentet har vært kalibrert og sertifisert hos autorisert verksted i Norge. Vedlagt sertifikat vist i Vedlegg 7 bekrefter at nøyaktigheten er innenfor fabrikk-oppgitte toleranser Tabell 3-1.

Referance Standard Serial no.	Min	Referance Thickness	Max	Instrument reading
031671	75,22	78,00	80,78	78
031673	252,43	257,00	261,57	256
031674	529,63	537,00	544,37	536

Tabell 3-1 Toleranser

4 Resultater og diskusjon

I dette kapittelet presenteres og diskuteres måleresultatene.

4.1 Observasjoner

Under gjennomføringen av målinger ble det oppdaget at enkelte målinger ga avvikende resultater i forhold til allerede gjennomførte målinger på samme kontaktledningsmast. Det viser seg at ujevnheter i form av sveisesprut eller andre typer ujevnheter i sinkbelegget kan gi veldig høye og avvikende resultater (ref. Figur 4-1 og Figur 4-2). I tilfeller hvor dette var oppdaget mens selve måling pågikk ble disse resultatene erstattet med nye målinger. For å sikre realistiske måleresultater har slike avvikende målinger blitt forkastet ved gjennomgang av resultater og er ikke inkludert i datagrunnlaget.



Figur 4-1



Figur 4-2

Ru overflate som kan forårsake feilmåling på master.

Under målingene ble det observert fargevariasjon på sinkbelegget på enkelte master. En kan oppfatte dette som at sinkbelegget er nærmest brukt opp og at masta har begynt eller skal begynne å ruste. Dette ble sjekket og resultater viser at dette ikke er tilfellet, Figur 4-3 til Figur 4-5.



Figur 4-3 Fargevariasjon av sinkoverflate



Figur 4-4 Måleresultat



Figur 4-5 Måleresultat

Alle målinger ble gjennomført på stasjonsområder. Det ble observert en del skader på mastenes sinkbelegg, samt at sinkbelegget var fysisk fjernet på noen master. Da både passasjerer og diverse servicekjøretøy kan befinne seg på plattformer, er det sannsynlig at disse kan ha forårsaket skader på master. Et eksempel er snørydding om vinteren. Siden master er beskyttet med sinkbelegg utvikles disse skadene ikke til rust. Imidlertid ble det observert rustdannelse i noen få tilfeller Figur 4-6 og Figur 4-7.



Figur 4-6 Rust 1



Figur 4-7 Rust 2

Måling av sinktykkelse på denne masta ble foretatt i umiddelbar nærhet til skaden. Fra vedlagte bilder med måleresultater over og under rustskader, Figur 4-8 til Figur 4-11, ser vi at sinktykkelsen er innenfor kravet og at det er andre faktorer som er årsak for rustdannelse.



Figur 4-8 Sinktykkelse 1



Figur 4-9 Sinktykkelse 2



Figur 4-10 Sinktykkelse 3



Figur 4-11 Sinktykkelse 4

Den aktuelle masta befinner seg i umiddelbar nærhet til adkomstvei og parkeringsplassen ved stasjonen. Det kan antas at det i vinterhalvåret blir foretatt salting av veien og parkeringsplassen og at dette kan være årsaken til rust på denne masta.

Selve måling var gjennomført vha. et DeFelsko produsert måleinstrument ref. kapittel 3.2. Praktisk foregikk målinger slikt at urenheter fra mastas overflate var fjernet og målestedet var rent for større urenheter og sprut fra underlaget etter regn. Ved plassering av måleinstrumentet på mast var det viktig at vinklingen på instrumentet var slik at proben var 90° i forhold til underlaget. Når instrumentet holdes mot underlaget begynner det en repeterende avlesing av sinktykkelsen. For å få mest korrekt avlesing bør det ventes til instrumentet begynner å få repeterende resultater på dette målestedet. Idet målingen blir avsluttet og en løfter måleinstrumentet fra underlaget, registreres kun den siste avlesing og det er denne som blir registrert. For å få repeterende resultater var det nødvendig med 3 til 5 avlesninger per målepunkt. Fra måleresultatene skal det beregnes en gjennomsnittlig sinktykkelse per mast og det er denne som skal benyttes videre i vurderinger og beregninger. Dette fordi det er stor variasjon i sinktykkelsen på et lite område på mastene. Siden det er tilfeldig hvor en måler er det også tilfeldig hvilken sinktykkelse en måler ref. Figur 4-12 til Figur 4-14.



Figur 4-12 Måling 1



Figur 4-13 Måling 2



Figur 4-14 Måling 3

4.2 Banestrekninger

4.2.1 Nyland og Grorud stasjon

Nyland og Grorud stasjon ligger på Hovedbanen henholdsvis 9.3 og 10.5 km. fra Oslo [36, 37]. I henhold til Jernbaneverkets BaneData vist i Vedlegg 10 er strekningen bygget i 1978, og har kontaktledningssystem S35. Nyland stasjon har tre åk med to master per åk. I henhold til BaneData skulle alle master og åk være fra 1980. Det viser seg at to master og åk er av nyere dato. Som nevnt tidligere skal Jernbaneverkets kontaktledningsmaster merkes med produsentens navn, ukenummer og årstall for produksjon. Denne merkingen skal preges inn. Dessverre er merkingen ikke alltid like lett å finne, spesielt på eldre master. Det er også usikkert hvorvidt rutiner for merking av master er fulgt fra produsentenes side og om det var foretatt en mottakskontroll hvor dette var sjekket. I og med at merkingen på eldre master ikke var synlig må vi anta at disse er fra 1980 slik det er oppført i BaneData. Produksjonsdatoen for nyere master er preget inn i henhold til kravet fra Jernbaneverkets tekniske regelverk og disse er fra år 1990 slik som vist på Figur 4-15.



Figur 4-15 Produksjonsdato (JF-90)

På bakgrunn av måleresultater kan vi også se at disse er av nyere dato da de har betydelig tykkere sinkbelegg sammenlignet med master fra 1978.

Målinger på Nyland var gjennomført den 28.2.2015. Det var 3 grader i lufta og småregn ref. Figur 4-16.

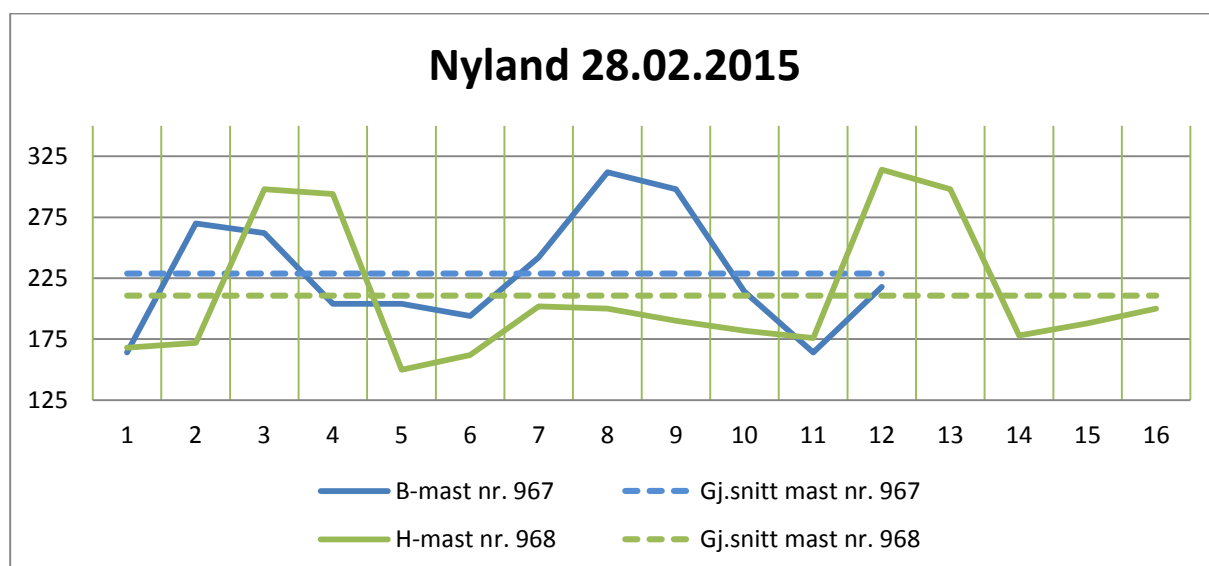


Figur 4-16 Værvarsel for Nyland, Rælingen (Akershus)

Måledata for samtlige master fra Nyland stasjon er vist i Tabell 4-1.

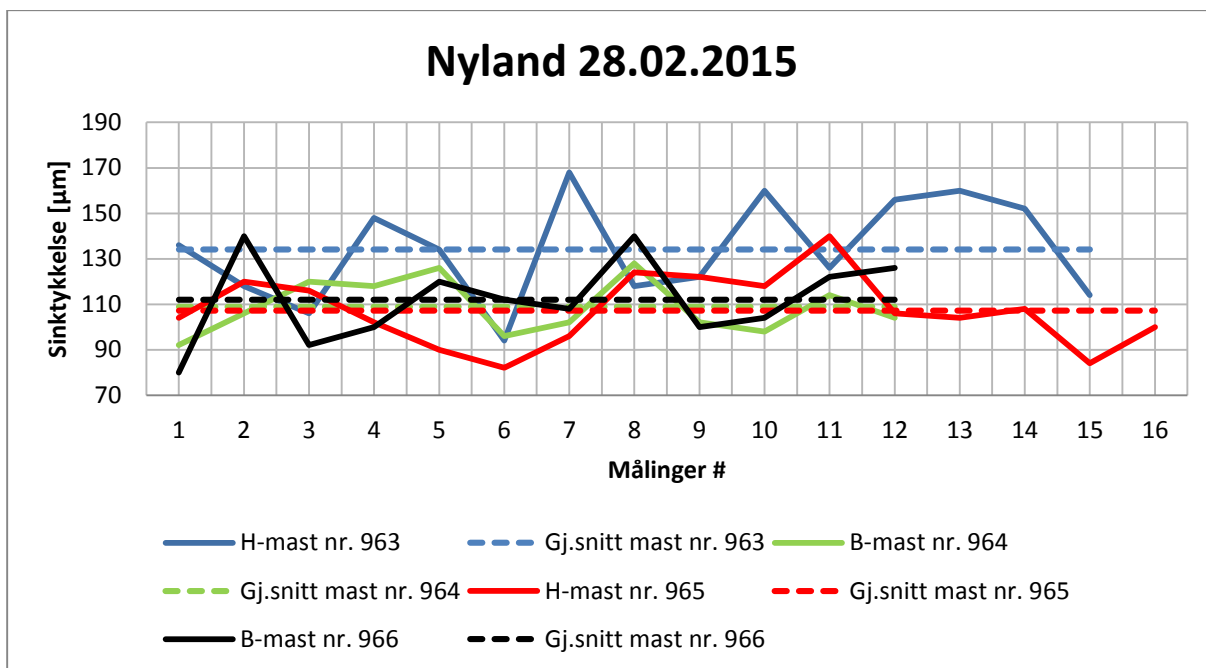
Nyland 28.2.2015					
Mast nr. 963	Mast nr. 964	Mast nr. 965	Mast nr. 966	Mast nr. 967	Mast nr. 968
136	92	104	80	164	168
118	106	120	140	270	172
106	120	116	92	262	298
148	118	102	100	204	294
134	126	90	120	204	150
94	96	82	112	194	162
168	102	96	108	242	202
118	128	124	140	312	200
122	102	122	100	298	190
160	98	118	104	214	182
126	114	140	122	164	176
156	104	106	126	218	314
160		104			298
152		108			178
114		84			188
		100			200
Gjennomsnitt	Gjennomsnitt	Gjennomsnitt	Gjennomsnitt	Gjennomsnitt	Gjennomsnitt
137,4	108,8	107,3	112	228,8	210,8

Tabell 4-1 Måleresultater fra nylandstasjon



Figur 4-17 Grafisk presentasjon av måleresultater fra Nyland stasjon

Målinger på Grorud stasjon ble utførte en time etter målinger på Nyland stasjon. Avstanden mellom disse stasjoner er på 1,2 km. Vi kan derfor si at værforholdene var like på begge stasjoner.

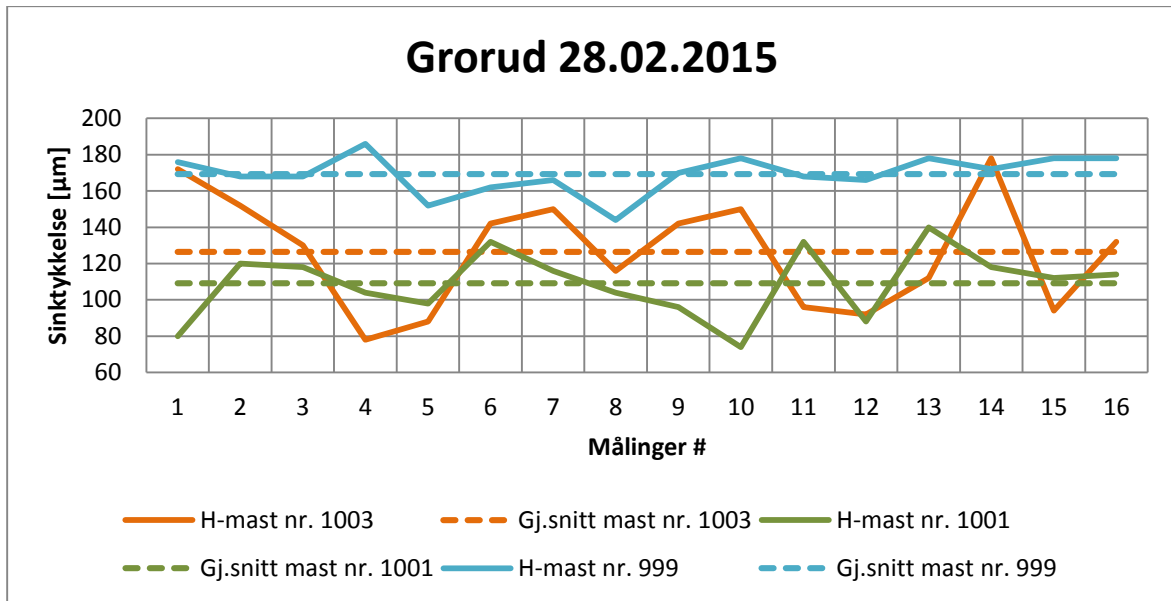


Figur 4-18 Grafisk presentasjon av måleresultater fra Nyland stasjon

Målinger fra Grorud stasjon vist i Tabell 4-2.

Grorud 28.2.2015		
H-mast nr. 1003	H-mast nr. 1001	H-mast nr. 999
172	80	176
152	120	168
130	118	168
78	104	186
88	98	152
142	132	162
150	116	166
116	104	144
142	96	170
150	74	178
96	132	168
92	88	166
112	140	178
178	118	172
94	112	178
132	114	178
Gjennomsnitt 126.5	Gjennomsnitt 109.1	Gjennomsnitt 169.4

Tabell 4-2 Måleresultater fra Grorud stasjon



Figur 4-19 Grafisk presentasjon av måleresultater fra Grorud stasjon

Beregning av sinkkorrosjon for utvalgt strekning med korrosjonsrate 4.2 [$\mu\text{m}/\text{år}$]:

$$2.1 < r_{corr} \leq 4.2 \left[\frac{\mu\text{m}}{\text{år}} \right] \text{ (korrosjonsrate ref. [22])}$$

$$b = 0,813 \text{ (ref. tabell 2 [23]); } t = 35 \text{ [år] (beregnet alder for kontaktledningsmaster)}$$

$$D(t > 20) = r_{corr} \cdot [20^b + b(20^{b-1}) \cdot (t - 20)]$$

$$D_{4.2} = 4.2 \cdot [20^b + b(20^{b-1}) \cdot (35 - 20)] = 77.22 \text{ [}\mu\text{m]}$$

Hvis vi legger sammen snitt-tykkelse for sink målt på master og beregnet verdi for sinkkorrosjon kan vi få estimert snitt for sinktykkelse ved oppstart. Dette er forutsatt at vi har valgt riktig korrosjonskategori for sink.

Sinkbelegget til mast nr. 965 hadde den laveste gjennomsnittstykkelsen, og dens tykkelse skal brukes til å estimere sinktykkelsen ved oppstart.

$$T_{4.2} = 107.3 + 77.2 = 184.5 \text{ [}\mu\text{m]}$$

Beregning av sinkkorrosjon for utvalgt strekning med korrosjonsrate 2.1 [$\mu\text{m}/\text{år}$]:

$$D_{2.1} = 2.1 \cdot [20^b + b(20^{b-1}) \cdot (35 - 20)] = 38.61 \text{ [}\mu\text{m]}$$

$$T_{2.1} = 107.3 + 40.6 = 147.9 \text{ [}\mu\text{m]}$$

4.2.2 Sørlandsbanen Hokksund stasjon

Hokksund stasjon ligger på Sørlandsbanen 60,22 km. fra Oslo [38]. I henhold til Jernbaneverkets BaneData vist i Vedlegg 10 er strekningen satt i drift i 1987 og har kontaktledningssystem S35 og Tabell 54. Alle kontrollerte master på Hokksund stasjon er satt i drift i 1987 mens bilder tatt på stasjonen Figur 4-20 viser at disse er produsert i 1985.



Figur 4-20 Produksjonsdato for master på Hokksund stasjon (AMV 85)

Målinger på Hokksund var gjennomført den 11.3.2015. Det var sol og fint vær med lufttemperatur på 7 °C vist i Figur 4-21.

I morgen, onsdag 11.03.2015

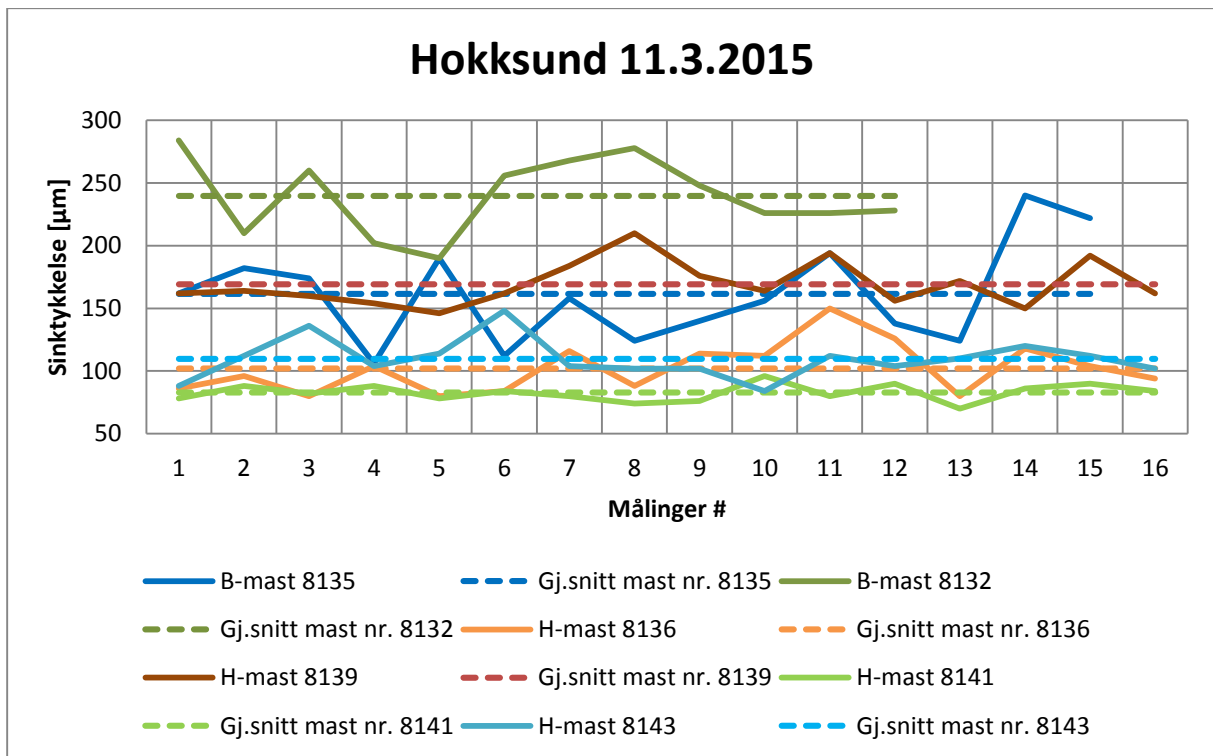
Tid	Varsel	Temp.	Nedbør	Vind
kl 0-6		4°	0 mm	Flau vind, 1 m/s fra vest-nordvest
kl 6-12		0°	0 mm	Flau vind, 2 m/s fra vest
kl 12-18		7°	0 mm	Flau vind, 1 m/s fra vest
kl 18-24		5°	0 mm	Flau vind, 1 m/s fra sørøst

Figur 4-21 Værvarsel for Hokksund, Øvre Eiker (Buskerud)

Måleresultater fra Hokksund stasjon vist i Tabell 4-3.

Hokksund stasjon 11.3.2015					
Mast nr. 8135	Mast nr. 8132	Mast nr. 8136	Mast nr. 8139	Mast nr. 8141	Mast nr. 8143
162	284	86	162	78	88
182	210	96	164	88	112
174	260	80	160	82	136
106	202	104	154	88	104
190	190	80	146	78	114
112	256	84	162	84	148
158	268	116	184	80	104
124	278	88	210	74	102
140	248	114	176	76	102
156	226	112	164	96	84
194	226	150	194	80	112
138	228	126	156	90	104
124		80	172	70	110
240		118	150	86	120
222		104	192	90	112
		94	162	84	102
Gjennomsnitt	Gjennomsnitt	Gjennomsnitt	Gjennomsnitt	Gjennomsnitt	Gjennomsnitt
161.5	239.7	102	169.3	82.8	109.6

Tabell 4-3 Måleresultater for Hokksundstasjon



Figur 4-22 Grafisk presentasjon av måleresultater fra Hokksund stasjon

$b = 0,813$ (ref. tabell 2 [23]); $t = 30$ [år] (beregnet alder for kontaktledningsmaster)

$$D(t > 20) = r_{corr} \cdot [20^b + b(20^{b-1}) \cdot (t - 20)]$$

$$D_{4,2} = 4.2 \cdot [20^b + b(20^{b-1}) \cdot (30 - 20)] = 67.5 [\mu m]$$

Ved å legge sammen den lavest målte gjennomsnittstykkelse fra Hokksund stasjon med estimert korrosjon kan vi finne sinktykkelse ved oppstart:

$$T_{4,2} = 82.8 + 67.5 = 150.3 [\mu m]$$

Beregning av sinkkorrosjon for utvalgt strekning med korrosjonsrate 2.1 [$\mu m/\text{år}$]:

$$D_{2,1} = 2.1 \cdot [20^b + b(20^{b-1}) \cdot (30 - 20)] = 33.7 [\mu m]$$

$$T_{2,1} = 82.8 + 33.7 = 116.5 [\mu m]$$

4.2.3 Sørlandsbanen Bø stasjon

Bø stasjon ligger på Sørlandsbanen 16,44 km fra Oslo [39]. I henhold til Jernbaneverkets BaneData vist i Vedlegg 10 er strekningen satt i drift i 1993 og har kontaktledningsanlegg system S20B. Det finnes ikke en dato i BaneData for når de aktuelle master ble satt i drift. På bakgrunn av merkingen på mastene er det meget sannsynlig at disse er fra 1989 ref. Figur 4-23.



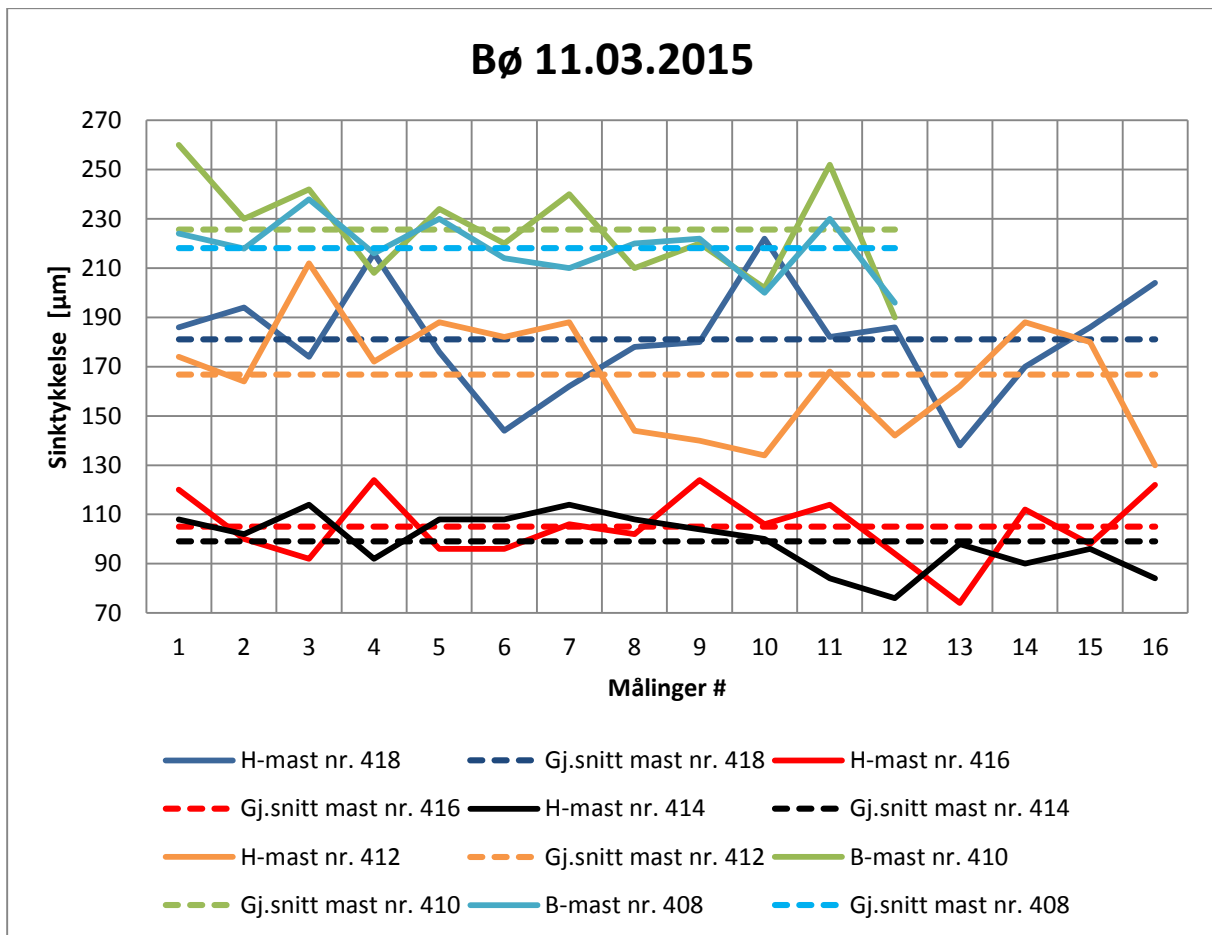
Figur 4-23 Produksjonsdato for master på Bø stasjon (JF-89)

Målinger på Bø var gjennomført den 11.3.2015. Værforhold på Bø var identiske med værforholdene på Hokksund.

Måleresultater fra Bø stasjon vist i Tabell 4-4.

Bø stasjon 11.3.2015					
Mast nr. 408	Mast nr. 410	Mast nr. 412	Mast nr. 414	Mast nr. 416	Mast nr. 418
224	260	174	108	120	186
218	230	164	102	100	194
238	242	212	114	92	174
216	208	172	92	124	216
230	234	188	108	96	176
214	220	182	108	96	144
210	240	188	114	106	162
220	210	144	108	102	178
222	220	140	104	124	180
200	202	134	100	106	222
230	252	168	84	114	182
196	190	142	76	94	186
		162	98	74	138
		188	90	112	170
		180	96	98	186
		130	84	122	204
Gjennomsnitt	Gjennomsnitt	Gjennomsnitt	Gjennomsnitt	Gjennomsnitt	Gjennomsnitt
218.2	225.7	166.8	99.1	105.0	181.1

Tabell 4-4 Måleresultater for Bø stasjon



Figur 4-24 Grafisk presentasjon av måleresultater fra Bø stasjon

$b = 0,813$ (ref. tabell 2 [23]); $t = 26$ [år] (beregnet alder for kontaktledningsmaster)

$$D(t > 20) = r_{corr} \cdot [20^b + b(20^{b-1}) \cdot (t - 20)]$$

$$D_{4,2} = 4.2 \cdot [20^b + b(20^{b-1}) \cdot (26 - 20)] = 59.7 [\mu m]$$

Ved å legge sammen den lavest målte gjennomsnittstykkelse fra Bø stasjon med estimert korrosjon kan vi finne sinktykkelse ved oppstart:

$$T_{4,2} = 99.1 + 59.7 = 158.8 [\mu m]$$

Beregning av sinkkorrosjon for utvalgt strekning med korrosjonsrate 2.1 [$\mu m/\text{år}$]:

$$D_{2,1} = 2.1 \cdot [20^b + b(20^{b-1}) \cdot (30 - 20)] = 29.8 [\mu m]$$

$$T_{2,1} = 99.1 + 29.8 = 128.9 [\mu m]$$

4.2.4 Rygge

Rygge stasjon ligger på Østfoldbanen (vestre linje) og er 69,28 km. fra Oslo S [40]. I henhold til BaneData vist i Vedlegg 10 ble kontaktledningsanlegg satt i drift i år 2000. Dessverre var dette ikke mulig å bekrefte ved å finne merkingen på master. Målinger på Rygge stasjon ble gjennomført den 25.3.2015. Været var kaldt og grått med rester fra snøfall fra natten før.



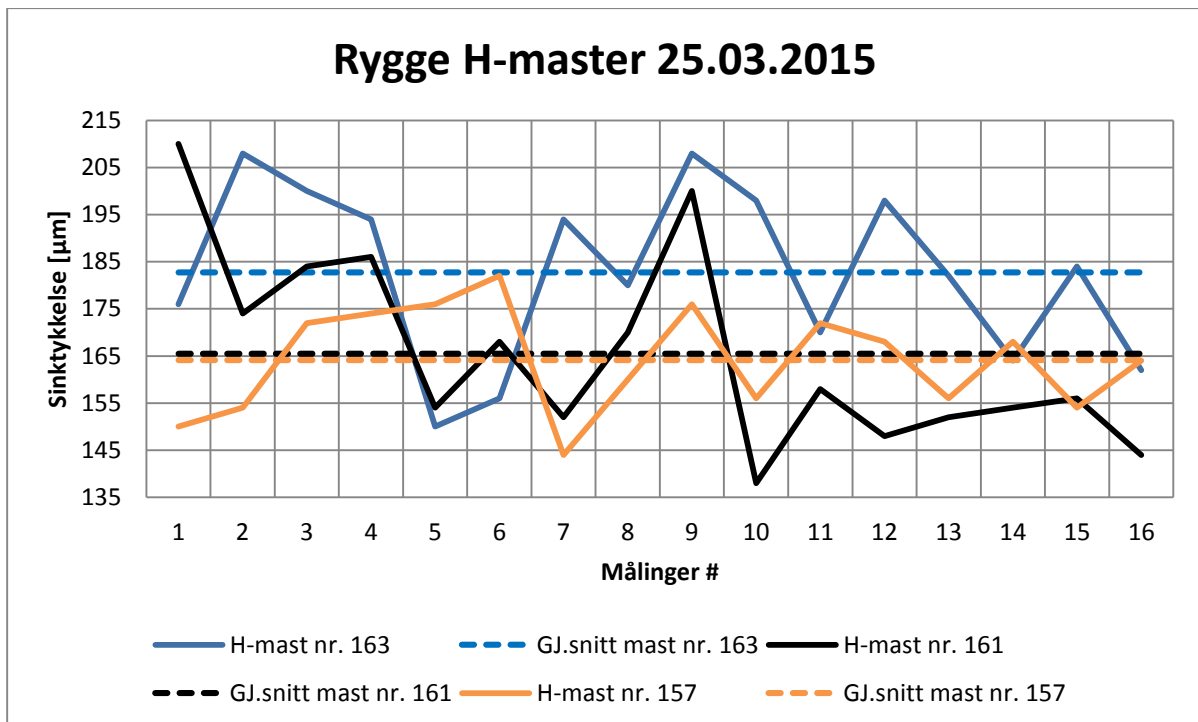
Figur 4-25 Værvarsel for Rygge (Østfold)

Måleresultater fra Rygge stasjon er vist Tabell 4-5.

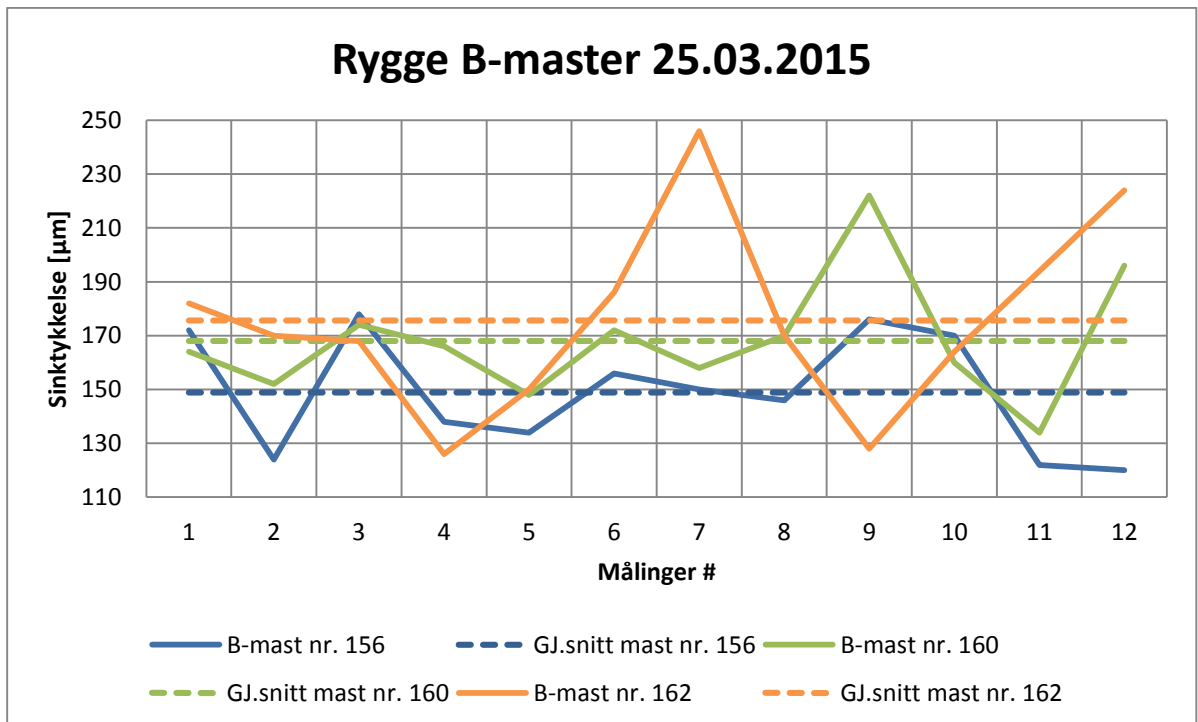
Rygge 25.3.2015					
Mast nr. 163	Mast nr. 161	Mast nr. 157	Mast nr. 156	Mast nr. 160	Mast nr. 162
176	210	150	172	164	182
208	174	154	124	152	170
200	184	172	178	174	168
194	186	174	138	166	126
150	154	176	134	148	150
156	168	182	156	172	186
194	152	144	150	158	246
180	170	160	146	170	170
208	200	176	176	222	128
198	138	156	170	160	164
170	158	172	122	134	194
198	148	168	120	196	224
182	152	156			
164	154	168			
184	156	154			
162	144	164			
Gjennomsnitt	Gjennomsnitt	Gjennomsnitt	Gjennomsnitt	Gjennomsnitt	Gjennomsnitt
182.8	165.5	164.1	148.8	168.0	175.7

Tabell 4-5 Måleresultater for Rygge stasjon

Da det er utført målinger på seks kontaktledningsmaster, og resultatene ligger i samme område blir en graf uoversiktlig å lese. Måleresultatene er derfor splittet og vist i to separate grafer fordelt på H og B-master.



Figur 4-26 Grafisk presentasjon av måleresultater for Rygge stasjon



Figur 4-27 Grafisk presentasjon av måleresultater for Rygge stasjon

$b = 0,813$ (ref. tabell 2 [23]); $t = 15$ [år] (beregnet alder for kontaktledningsmaster)

$$D_{4.2} = r_{corr} \cdot t^b = 4.2 \cdot 15^{0.813} = 37.96 [\mu m]$$

Ved å legge sammen den lavest målte gjennomsnittstykkelsen fra Rygge stasjon med estimert korrosjon kan vi finne sinktykkelse ved oppstart:

$$T_{4.2} = 148.8 + 38 = 186.8 [\mu m]$$

Beregning av sinkkorrosjon for utvalgt strekning med korrosjonsrate 2.1 [μm /år]:

$$D_{2.1} = r_{corr} \cdot t^b = 2.1 \cdot 15^{0.813} = 18.98 [\mu m]$$

$$T_{2.1} = 148.8 + 19 = 167.8 [\mu m]$$

4.2.5 Oslo S

I henhold til Jernbaneverkets BaneData er forskjellige deler av kontaktledningsanlegget på Oslo S satt i drift i flere omganger 1982, 1986, 1998 og 2009. Oslo S er en del av Hovedbanen. Måling av sinktykkelse ble gjennomført på fire kontaktledningsmaster. Alle mastene det er gjennomført målinger på er H-master. Dessverre vises det igjen at informasjon i BaneData ikke alltid er korrekt. I henhold til BaneData vist i Vedlegg 10 er alle fire master registrert som B-master. Dato for når mastene er satt i drift mangler i BaneData. Det viser seg at mastene er av nyere dato og alle er godt merket. På bakgrunn av merkingen på mastene er det rimelig å anta at mastene er produsert i 2010 og 2011 ref. Figur 4-28 og Figur 4-29.



Figur 4-28 Produksjonsdato 1 for master på Oslo S (BB 11 10)



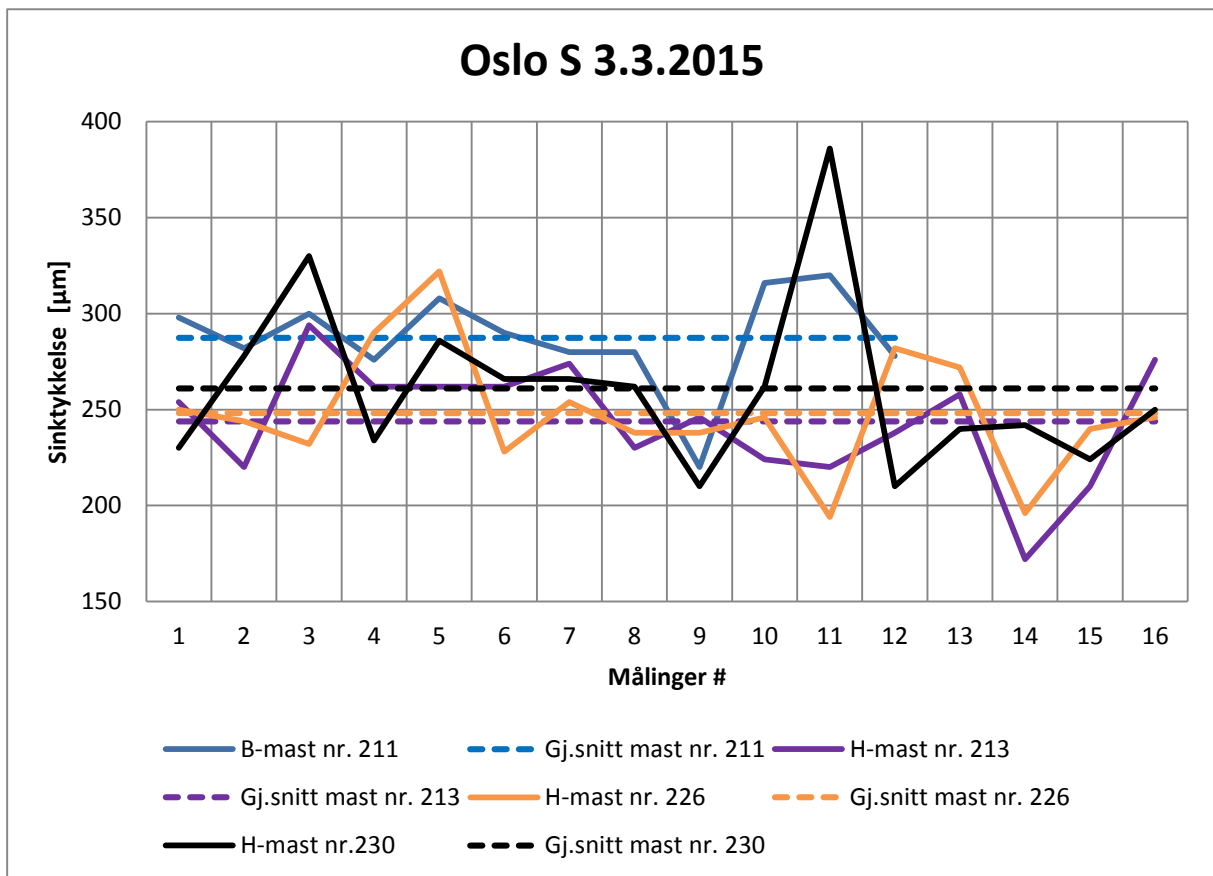
Figur 4-29 Produksjonsdato 2 for master på Oslo S (BB 02 11)

Målingene på Oslo S ble gjennomført den 3.3.2015. Det var fint vær med sol og 4 °C lufttemperatur. Kontaktledningsmast nr. 211 hadde påmontert deksel over strømkabler på den ene siden av masta. Derfor er det kun 12 måleresultater fra denne masta og ikke 16 som på andre H-master.

Måleresultater fra Oslo S er vist i Tabell 4-6.

Oslo S 3.3.2015			
Mast nr. 211	Mast nr. 213	Mast nr. 226	Mast nr. 230
298	254	250	230
282	220	244	278
300	294	232	330
276	262	290	234
308	262	322	286
290	262	228	266
280	274	254	266
280	230	238	262
220	246	238	210
316	224	246	262
320	220	194	386
278	238	282	210
	258	272	240
	172	196	242
	210	240	224
	276	246	250
Gjennomsnitt	Gjennomsnitt	Gjennomsnitt	Gjennomsnitt
287.3	243.9	248.3	261.0

Tabell 4-6 Måleresultater for Oslo S



Figur 4-30 Grafisk presentasjon av måleresultater for Oslo S

Beregning av sinkkorrosjon for utvalgt strekning med korrosjonsrate 4.2 [$\mu\text{m}/\text{år}$]:

$$2.1 < r_{corr} \leq 4.2 \left[\frac{\mu\text{m}}{\text{år}} \right] \text{ (korrosjonsrate ref. [22])}$$

$b = 0,813$ (ref. tabell 2 [23]); $t = 4$ [år] (beregnet alder for kontaktledningsmaster)

$$D_{4.2} = r_{corr} \cdot t^b = 4.2 \cdot 4^{0.813} = 12.96 \text{ } [\mu\text{m}]$$

Ved å legge sammen den lavest målte gjennomsnittstykkelsen fra Oslo S med estimert korrosjon kan vi finne sinktykkelse ved oppstart:

$$T_{4.2} = 243.9 + 13 = 256.9 \text{ } [\mu\text{m}]$$

Beregning av sinkkorrosjon for utvalgt strekning med korrosjonsrate 2.1 [$\mu\text{m}/\text{år}$]:

$$D_{2.1} = r_{corr} \cdot t^b = 2.1 \cdot 4^{0.813} = 6.48 \text{ } [\mu\text{m}]$$

$$T_{2.1} = 243.9 + 6.5 = 250.4 \text{ } [\mu\text{m}]$$

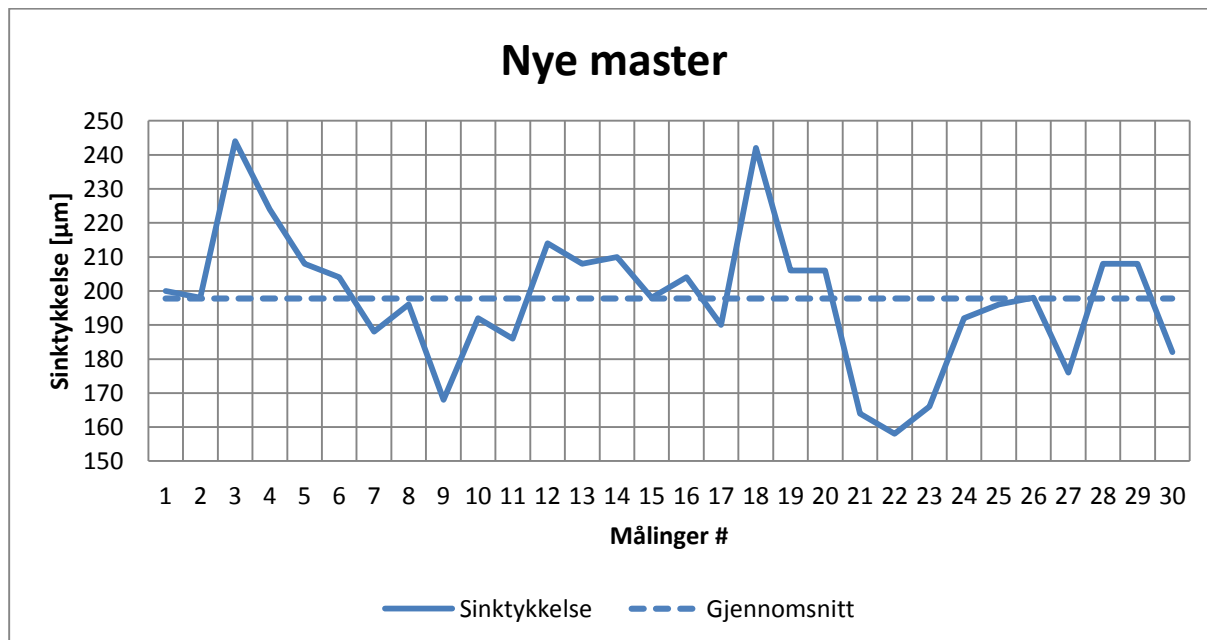
4.3 Måling på nye master

Det er foretatt måling av sinktykkelse på nye master. Dette er gjennomført på master som befant seg på lager hos Brødrene Berntsen, som for tiden leverer disse til Jernbaneverket. Alle målinger er gjennomført på bjelkemaster da det var disse som var tilgjengelig på lager når målingen var gjennomført. Dette bør ikke ha noen innvirkning på konklusjonen siden vi er ute etter sinktykkelse og denne bør være lik uavhengig av mastetype. Væreforhold under målinger var sol og lufttemperatur på pluss 5 °C.



Figur 4-31 Værvarsel for Hønefoss, Ringerike (Buskerud)

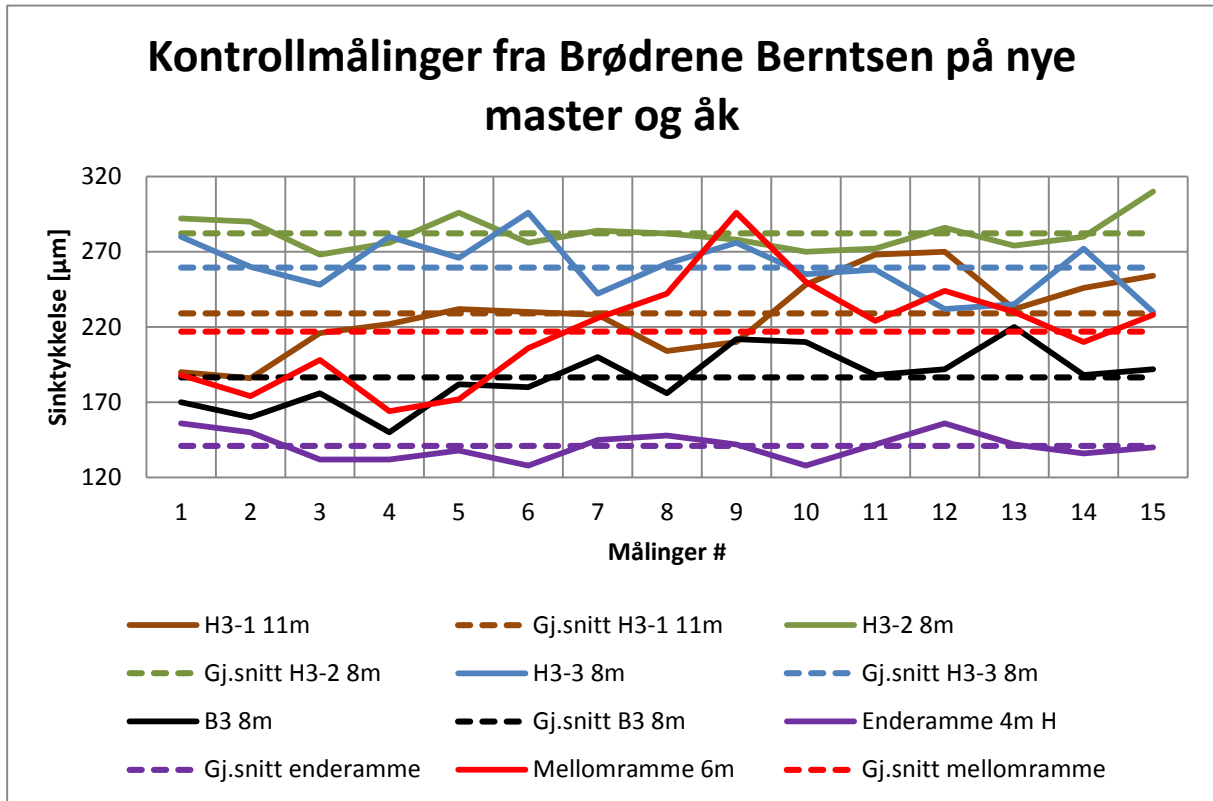
Det var gjennomført 30 målinger på tilfeldige master og tilfeldige punkter på master for å sikre best mulig spredning av data.



Figur 4-32 Grafisk presentasjon av måleresultater fra nye master

Brødrene Berntsen tar kontrollmålinger av sinktykkelse fra hver leveranse til Jernbaneverket. Noen av disse målingene er vist i grafen under Figur 4-33. Kontrollmålinger er utført per mast eller komponent, mens måling av nye master er en tilfeldig samling av målinger fra flere master.

Samlet gjennomsnitt for alle kontrollmålinger ligger på 219.7 μm , ikke langt unna gjennomsnittet fra målingene på nye master. Disse resultatene viser at gjennomsnittlig sinktykkelse på nye master, og sannsynligvis andre galvaniserte produkter, ligger høyt over kravet på minimum 115 μm .



Figur 4-33 Grafisk presentasjon av kontrollmålinger foretatt av Brødrene Berntsen

4.4 Levetid til 50 μm

I henhold til Jernbaneverkets tekniske regelverk skal minimum sinktykkelse på bærende stålkonstruksjoner ikke være mindre enn 50 μm [18]. Ved beregning av levetiden til sinkbelegg inntil 50 μm på master som vi har måleresultater fra, tar en utgangspunkt i den beregnede startverdien til sinktykkelsen. Masta med den laveste beregnede sinktykkelsen er mast nr. 8141 fra Hokksund stasjon. Beregnede totale sinktykkelsen ved start er $T=150.3$ [μm]. Da vi kjenner den teoretiske sinktykkelsen ved start kan vi ta utgangspunkt i Ligning 2-2. Denne snur vi med hensyn på t som gir oss nytt uttrykk som skal brukes å beregne levetiden til sinkbelegget til det er 50 μm igjen.

$$t_{maks} = 20 + \left(\frac{D_{maks}}{r_{corr} \cdot b(20^{b-1})} - \frac{20^b}{b(20^{b-1})} \right) \quad \text{Ligning 4-1}$$

Her er t_{maks} den maksimale levetiden til sinktykkelse og D_{maks} er den maksimale sinktykkelse som kan korrodere.

Alle beregninger så langt er gjennomført med korrosjonskategori C4 og korrosjonshastighet $r_{corr}=2.1$ eller 4.2 $\mu\text{m}/\text{år}$. Disse antagelsene og verdiene brukes videre i neste beregning.

$$T_{4.2} = 82.8 + 67.5 = 150.3 \text{ } [\mu\text{m}] \quad \text{ref. kapp. 4.2.2}$$

$$D_{4.2} = T_{4.2} - 50 \text{ } [\mu\text{m}] = 100.3 \text{ } [\mu\text{m}]$$

$$t_{4.2} = 20 + \left(\frac{D_{4.2}}{r_{corr} \cdot b(20^{b-1})} - \frac{20^b}{b(20^{b-1})} \right) = 46.8 \text{ } [\text{år}]$$

Fra beregningen over ser vi at levetiden til sink inntil det er 50 μm igjen er under 50 år. Dette er beregnet med den relativt høye korrosjonsraten fra korrosjonsklasse C4.

$$T_{2.1} = 82.8 + 33.7 = 116.5 \text{ } [\mu\text{m}] \quad \text{ref. kapp. 4.2.2}$$

$$D_{2.1} = T_{2.1} - 50 \text{ } [\mu\text{m}] = 66.5 \text{ } [\mu\text{m}]$$

$$t_{2.1} = 20 + \left(\frac{D_{2.1}}{r_{corr} \cdot b(20^{b-1})} - \frac{20^b}{b(20^{b-1})} \right) = 63.6 \text{ } [\text{år}]$$

Selv om vi i utgangspunktet har lavere sinktykkelse ved start vil en korrosjonsrate på 2,1 μm øke levetiden med 16.8 år.

Vi betrakter videre samme masten, men denne gangen benytter korrosjonsklasse C3 som har lavere korrosjonsrate $0.7 < r_{corr} \leq 2.1 \left[\frac{\mu m}{\text{år}} \right]$ (korrosjonsrate ref. [22]) og beregner korrosjonen med korrosjonsrate på $2.0 \mu m/\text{år}$.

$$D_{2.0} = 2.0 \cdot [20^b + b(20^{b-1}) \cdot (30 - 20)] = 32.13 [\mu m]$$

$$T_{2.0} = 82.8 + 32.1 = 114.9 [\mu m]$$

Vi ser fra beregningen at sinktykkelsen ved start er $115 \mu m$, som er den laveste tillate verdien. Derfor er det ikke mulig å gå lenger ned i korrosjonsraten for master fra Hokksund stasjon. En tilsvarende situasjon ser vi for master fra Bø stasjon, som totalt kommer litt bedre ut. Resultatet kan bety at den valgte korrosjonsklassen C4 er den riktige, i og med at man ved bruk av denne får en beregnet sinktykkelse som tilfredsstillende minimumskravet fra Jernbaneverkets tekniske regelverk [1].

4.5 Usikkerhet og spredning

Estimering og valg av korrosjonsklasser er alltid forbundet med usikkerhet. For å estimere riktig korrosjonsklasse må data knyttet til lokalforurensing og værforhold, nedbørsmengde og gjennomsnittsluftfuktighet samles. Disse er avgjørende faktorer som påvirker sinkkorrosjon og dens hastighet over tid.

Det er også mulig å se på intervaller innad i korrosjonsklassene. For korrosjonsklasse C4 betyr dette at alle korrosjonsrater mellom 2.1 til $4.2 \mu m/\text{år}$ er mulige. Dette gir oss til slutt stor variasjon i sinktykkelser. I eksempelet for kontaktledningsmasten fra Hokksund stasjon ser vi at vi innad i samme korrosjonsklasse får en variasjon i sinktykkelsen fra $116 \mu m$ til $150 \mu m$ ved å velge minimal og eller maksimal korrosjonsrate. Dette gir oss også en differanse på 16.8 år i økt levetid innad samme korrosjonsklasse. Tilsvarende situasjon er i tilfellet for andre korrosjonsklasser, hvor stor differanse i beregnede resultater betyr at valg av riktig korrosjonsklasse og korrosjonshastighet er meget viktig.

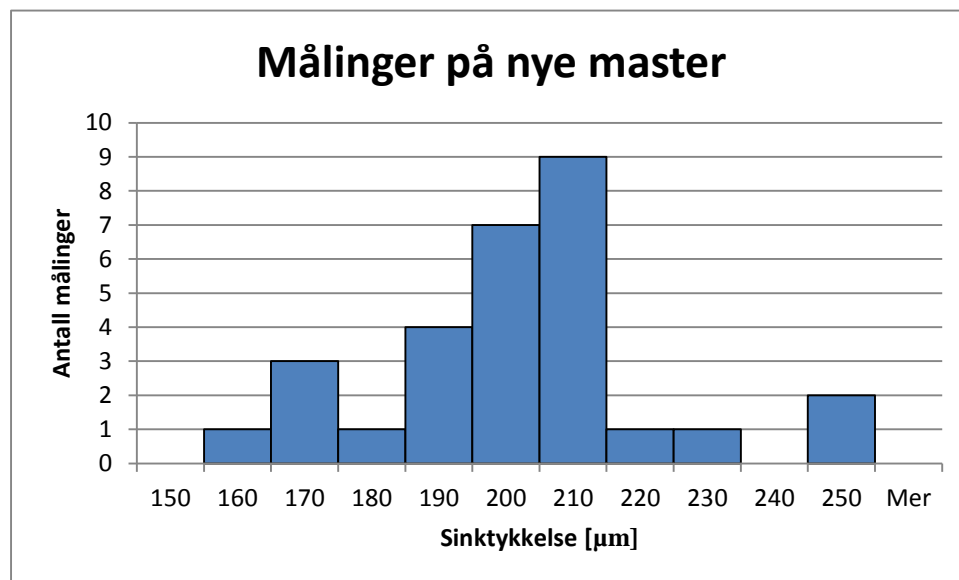
Standardavvik er et mål som forteller hvor langt enkelte verdier i gjennomsnitt ligger fra dataens gjennomsnittsverdi. Med andre ord viser standardavvik spredning av data. For gjennomførte målinger har det blitt beregnet standardavvik til både enkeltmaster og for hele stasjon. En typisk standardavvik for enkel mast kan variere fra $6,8$ for en H-mast nr. 8141 fra Hokksund stasjon til $56,5$ for en B-mast nr. 4065 fra Sarpsborg stasjon. Det var mindre variasjon av standardavvik per stasjon. Denne varierer fra $23,66$ for Rygge stasjon til $54,62$ på Sarpsborg stasjon. Gjennomførte målinger på nye master har en beregnet standardavvik på $19,95$. Nedenfor vises

måleresultater for nye master i Tabell 4-7. Beregninger av standardavvik og gjennomsnitt for øvrige stasjoner fra oppgaven vist i Vedlegg 11.

Måleresultater nye master					
200	204	186	204	164	198
198	188	214	190	158	176
244	196	208	242	166	208
224	168	210	206	192	208
208	192	198	206	196	182
Standardavvik 19,95					
Gjennomsnitt 197,8					

Tabell 4-7 Måleresultater fra nye master

Histogram til måleresultatene for nye master er vist på Figur 4-34:



Figur 4-34 Histogram

4.6 Vedlikehold

Galvaniserte stålkonstruksjoner har en høy motstand mot korrosjon og trenger ikke konstant vedlikehold. En galvanisert stålkonstruksjon kan stå i mange år uten vedlikehold forutsatt at sinktykkelsen er tilstrekkelig og korrosjonshastigheten er lav, slik at ytelsen av stålkonstruksjonen ikke påvirkes [17]. Hvis det er påkrevd med lengre levetid bør det foretas vedlikehold av sinkbelegget. Dette kan gjøres enten ved å fjerne gammelt sinkbelegg og re-galvanisere hele konstruksjonen, eller ved å male hele konstruksjonen mens den fortsatt er beskyttet av eksisterende sinkbelegget.

I henhold til Jernbaneverkets teknisk regelverk [18] deles og klassifiseres rustangrep i fire grupper.

- A. *Ståloverflate helt dekket av fastsettende valshud og er i det store og hele uten rust.*
- B. *Ståloverflate som har begynt å ruste og hvor valshuden har begynt å løsne.*
- C. *Ståloverflate der valshuden er rustet bort eller kan skrapes bort. Synlige rustgroper ikke dannet.*
- D. *Ståloverflate der valshuden er rustet bort. Synlige rustgroper er dannet i stor utstrekning.*

Disse definisjoner er basert på en svensk standard SIS 055900 som ikke er mulig å oppdrive gjennom avtaler med Standard Norge. På nåværende tidspunkt er det også ukjent hvorvidt denne er gjeldende lenger. Det er også ukjent om kravene fremdeles er de samme, eller om det har vært endringer i disse.

Siden det kreves at viktige stålkonstruksjoner ikke skal ha tynnere sinkbelegg enn 50 μm [18] bør vedlikeholdsmaling av stålkonstruksjoner skje før sinktykkelsen faller under 50 μm .

Den totale levetiden til sinkbelegg og organisk belegg (maling) sammen er vanligvis større enn summen av de individuelle levetidene til sinkbelegget og malingen (duplexsystem). Hollandsk forskning viser at levetiden til et tilsvarende system kan beregnes etter følgende formell [41]:

$$L_T = K \cdot (L_{Zn} + L_M) \qquad \text{Ligning 4-2}$$

Hvor:

- L_T – duplexsystemets levetid i år
- L_{Zn} – sinkbeleggets levetid i år i det konkrete miljøet, og med varmforsinking alene
- L_M – malingbeleggets beregnede levetid hvis det er påført direkte på stål
- K – miljøavhengig synergifaktor hvis verdi kan settes til:

Y 1,5 når systemet eksponeres i miljøklasse C4 eller er permanent nedsenket i sjøvann

Y 1,6-2,0 for eksponering i miljøklasse C3 eller når systemet er fuktig 60% av tiden

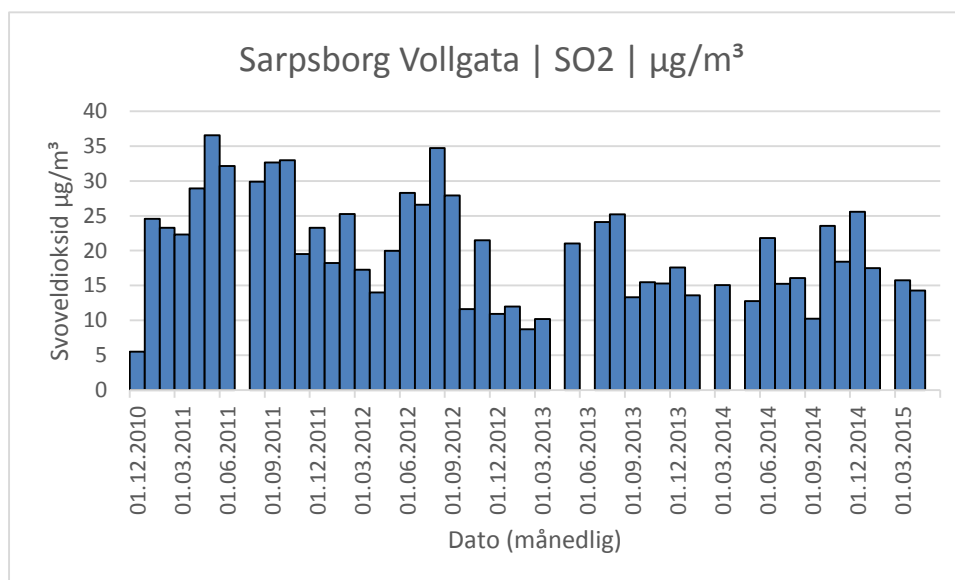
Y 2,1-2,3 ved eksponering i miljøklasse C2

Flater som skal males må rengjøres før maling. Det er flere metoder som kan anvendes og disse er beskrevet i blant annet NS-EN ISO 12944-4 [42]. Beste resultatet oppnås med lett sandblåsing. På steder hvor det ikke er mulig å benytte sandblåsing kan en benytte seg av en av øvrige rensemetoder som egner seg for rengjøring av galvaniserte overflater.

På nåværende tidspunkt har ikke Jernbaneverket klart definert kontrollintervall til korrosjonskontroll. I gjennomgått litteratur var det ikke mulig å finne retningslinjer eller anbefalinger om inspeksjonsintervaller. Siden det er vist med både målinger og beregninger at sinkbelegg har lang levetid kan en vurdere lengre tidsintervaller mellom hver kontroll. I utgangspunktet handler det om en visuell kontroll, hvor det i første omgang sjekkes om det er noen rustdannelser eller ytre skader på mastene. Etter at det har gått 10 til 20 år kan det foretas en visuell kontroll og kontrollmåling av sinktykkelse. På bakgrunn av måleresultatene kan en bestemme neste kontroll eller en vedlikeholdsdato.

4.7 Diskusjon av resultater

I denne oppgaven har det vært vist resultater fra gjennomførte målinger og beregninger av sinktykkelse på kontaktledningsmaster. Siden vi mangler en starttykkelse for sinkbelegget er det umulig å si med hundre prosent sikkerhet hvor mye av sinkbelegget har rustet bort og hva var sinktykkelse ved start. Det er foretatt en estimering av startpunkt som også er benyttet videre i oppgaven. Estimeringen av starttykkelser er beregnet med relativt konservative verdier fra korrosjonskategori C4. Denne korrosjonskategorien baserer seg på blant annet på relativt høye svoveldioksid verdier, 30 til 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, vist i Vedlegg 5. Som forurensing opptrer SO_2 i industriområder og i Norge er det Sarpsborg som historisk sett har hatt de høyeste verdiene av SO_2 . På bakgrunn av data hentet fra databasen til Luftkvalitet.info [43] kan vi se at svoveldioksidverdiene er avtagende. Disse har over en måleperiode på 5 år, kun 5 ganger vært over grensen på 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ og ligger i de andre månedene under 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ vist i Figur 4-35.



Figur 4-35 Månedlige verdier til SO_2 . Grafen generert med data fra databasen [43].

Da dette er svoveldioksidmengder for industriområder er det rimelig å anta at svoveldioksidmengder for resten av landet er betydelig lavere. Siden sinkkorrosjon avhenger av flere faktorer enn svoveldioksidmengde anses valget av korrosjonsklasse som passende, og de beregnede resultater som høyst relevante. Dette er spesielt tilfellet hvis vi ser dette i sammenheng med beregningen gjennomført i kapittel 4.4 Levetid til 50 μm . Denne viser at ved bruk av korrosjonsraten på 2,0 $\mu\text{m}/\text{år}$ faller sinktykkelsens startverdi under 115 μm og er dermed under minimumskravet til Jernbaneverkets tekniske regelverk.

De gjennomførte beregningene viser også at alle master tilfredsstillt krav om minimumstykkelse på 115 μm med valgt korrosjonsklasse. Til videre vurdering ble masten med

minst sinktykkelse valgt. Sinktykkelsen og dens levetid er vurdert med hensyn på krav fra Jernbaneverkets tekniske regelverk om minimumssinktykkelse på 50 μm og antatt levetid på 50 år. Beregningene viser at den ønskede levetiden ikke oppnås med valgt korrosjonsklasse og en grense på minimum 50 μm tykkelsen. Med en korrosjonsrate på 4,2 $\mu\text{m}/\text{år}$ blir den oppnådde levetiden på 46,8 år. Denne er selvfølgelig vurdert med den høyeste korrosjonsraten fra korrosjonsklasse C4. Vi har ingen bevis på at korrosjonsraten i gjeldende område har en tilsvarende verdi. Det er heller ikke kjent hvor høy korrosjonsraten er. Det må også presiseres at det her har blitt valgt den masten som hadde den laveste gjennomsnitt sinktykkelse av samtlige master. Alle de andre mastene fra målingene tilfredsstiller kravet. Målinger av sinktykkelse på nye master viser at sinktykkelse ligger godt over det som er minimumskravet ref. kapittel 4.3 Måling på nye master.

Det er bevist gjennom laboratorieforsøk og langtidsforsøk i ulike miljøer at tilstedeværelse av havsalt (klorider) har betydelig innvirkning på sinkens korrosjonshastighet. Da store deler av jernbaneinfrastruktur ligger i umiddelbar nærhet til havet er det meget interessant å undersøke påvirkning og effekt av slike miljøer på korrosjonsutvikling. Gjennomførte målinger i oppgaven har ikke fokusert nok på disse områdene og derfor kan vi ikke si noe om korrosjonsutvikling i disse områdene. Med innhenting av flere data fra eksisterende anlegg, og måling over lengre tidsintervall kan det sikres nok data for å kunne se trender og korrosjonsutvikling. På grunnlag av innsamlede data kan vi estimere korrosjonshastighet for slike områder.

Jernbaneverket har gjennom tidene hatt forskjellige leverandører av tjenester. Det har vært flere forskjellige leverandører av kontaktledningsmater. Det er ukjent for oss om disse har hatt ulik galvaniseringsprosess. Mulige forskjeller kan være tilsetningsstoffer i sinksmeltebadet eller ulik mengde av tilsetningsstoffer. Alt dette kan gi utslag i forskjellig sinktykkelse på nye master og ikke minst forskjellig levetid til sinkbelegget. På nåværende tidspunkt har Jernbaneverket rammeavtale med Brødrene Berntsen om levering av kontaktledningsmaster. Som underleverandør til galvanisering har Brødrene Berntsen avtale med DuoZinc AS. Sammensetning av sinkbad og dens renhet er oppgitt på deres hjemmeside [44].

En viktig faktor som har stor betydning for oppnådd sinktykkelse på stålet, er silisium [45]. For galvanisering er det anbefalt å bruke silisiumtettete ståltyper. Jernbaneverket krever at silisiuminnhold i stålet skal være mellom 0,15 og 0,25 % som vist på vedlagte tegninger Vedlegg 1, Vedlegg 2 og Vedlegg 3. Silisiuminnholdet i stålet sikrer at oppnådd sinktykkelse blir godt innenfor Jernbaneverkets krav Tabell 4-8.

Belegtykkelse	Optimal silisium nivå	Silisium intervall
Fe/Zn 115	0,18	0,15-0,21
Fe/Zn 165	0,25	0,22-0,28
Fe/Zn 215	0,32	0,29-0,35

Tabell 4-8 Optimale og intervallverdier for silisium når høyere belegtykkelser er påkrevd [34].

Alle beregninger gjennomført i oppgaven baserer seg på gjennomsnitt sinktykkelse. Når vi ser på resultater fra gjennomførte målinger kan vi se at det er store variasjoner i sinktykkelse på hver kontaktledningsmast. Fra målinger på Rygge stasjon har vi en differanse mellom høyeste og laveste sinktykkelse på H-mast nr. 161 og B-mast 162. Sinktykkelsen for H-masten ligger på 72 μm mens sinktykkelsen for B-masten er på 120 μm . Hva betyr dette for fremtidig vedlikehold? Hvordan blir den videre utviklingen av sinkkorrosjon på kontaktledningsmastene? Blir det jevnkorrosjon over hele mastas overflate, eller kommer den til å korrodere ujevnt? Dette er spørsmål som vi ikke har svar på på nåværende tidspunkt.

5 Konklusjon

I denne oppgaven har det blitt vist resultater fra gjennomførte målinger av sinkbeleggykkelse på Jernbanelinjen kontaktledeledningsmaster. Resultatene viser at kontaktledeledningsmastene er beskyttet i henhold til kravet fra Jernbanelinjen tekniske regelverk, og at tykkelsen til sinkbelegg er over minimumskravet på 115 μm på alle målte master. Resultater viser, med ett unntak, at alle master oppfyller kravet om ønsket levetid til sinkbelegg på 50 år. Det er viktig å trekke frem at vi operer med en estimert levetid, og at estimerer baserer seg på antatt konservative verdier av sinkkorrosjonshastighet. Levetidsberegninger gjennomført i oppgaven er utført slik at minimumsgrensa for sinktykkelsen på 50 μm ikke skal overskrides.

Det må presiseres at alle beregninger baserer seg på målinger og på antatt korrosjonshastighet fra korrosjonsklasse C4. Det som ikke er vurdert i oppgaven er hvorvidt det er mulig å tilfredsstillende antatt levetid på 50 år, kravet om minimumtillattsinktykkelse på 50 μm med en starttykkelse til sinkbelegg på 115 μm . Fra beregninger vist i Tabell 2-10, kapittel 4.4 Levetid til 50 μm og Vedlegg 9 kan vi se at dette kan være utfordrende med valgt korrosjonsklasse C4.

Da vi ved målinger av sinktykkelse på eksisterende master mangler en starttykkelse til sinkbelegg blir det vanskelig å estimere nøyaktig starttykkelse til sinkbelegg. For å få bedre oversikt over sinkens korrosjonshastighet, samt for å kunne estimere en mer nøyaktig levetid til kontaktledeledningsmaster anbefales følgende:

- Etablere et overvåkingsprogram som strekker seg over et lengre tidsintervall (10 -20 år).
- Årlig måling av sinktykkelse på utvalgte master og utvalgte banestrekninger.
- Opparbeide en database med måleresultater.
- På grunnlag av innsamlede data gjennomføre en estimering av levetid til kontaktledeledningsmastene.

Bibliografi

- [1] 29.3.2015. (2015). *Kontaktledning/Vedlikehold/Generelle tekniske krav/Vedlegg/Vurdering av rust*. Available: https://trv.opm.jbv.no/wiki/Kontaktledning/Vedlikehold/Generelle_tekniske_krav/Vedlegg/Vurdering_av_rust
- [2] 4.4.2015. *Teknisk regelverk startside*. Available: <https://trv.opm.jbv.no/wiki/Forside>
- [3] 3.5.2015. (2015). *Teknisk regelverk:Om*. Available: https://trv.opm.jbv.no/wiki/Teknisk_regelverk:Om
- [4] 06.5.2015. (2015). *Teknisk regelverk: Håndbok*. Available: https://trv.jbv.no/wiki/Teknisk_regelverk:H%C3%A5ndbok#Hva_skal_Teknisk_regelverk_v.C3.A6re.3F
- [5] 26.4.2015. (2015). *Generell beskrivelse av kontaktledningsanlegg*. Available: http://www.jernbanekompetanse.no/wiki/Generell_beskrivelse_av_kontaktledningsanlegg
- [6] 28.4.2015. (2015). *Definisjon: Kontaktledningsanlegg*. Available: <https://trv.jbv.no/wiki/Definisjon:Kontaktledningsanlegg>
- [7] 02.5.2015. (2015). *Kontaktledning/Prosjektering/Kontaktledningssystemer/System 35*. Available: https://trv.jbv.no/wiki/Kontaktledning/Prosjektering/Kontaktledningssystemer/System_35
- [8] 2.5.2015. (2015). *Kontaktledning/Prosjektering/Konstruksjoner#Tremaster*. Available: <https://trv.jbv.no/wiki/Kontaktledning/Prosjektering/Konstruksjoner#Tremaster>
- [9] S. Jacobsen, *TKT 4215 Concrete Technology 1*, 2014.
- [10] 2.5.2015. (2015). *Kontaktledning/Prosjektering/Konstruksjoner/Stålmaster*. Available: <https://trv.jbv.no/wiki/Kontaktledning/Prosjektering/Konstruksjoner#St.C3.A5lmaster>
- [11] 28.4.2015. (2015). *Nummerering av master*. Available: https://trv.jbv.no/wiki/Kontaktledning/Prosjektering/Konstruksjoner#Nummerering_av_master
- [12] B. Rystad and O. Lauritzen, "Kjemi og Miljøkunnskap," ed: Kap, 2002.
- [13] D. Kjernsmo, K. Kleven, and J. Scheie, *Overflatebehandling mot korrosjon*. Oslo: Universitetsforlaget, 1997.
- [14] A. R. Marder, "The metallurgy of zinc-coated steel," *Progress in Materials Science*, vol. 45, pp. 191-271, 6// 2000.
- [15] R. Andreassen, "Korrosjon," 2001.
- [16] F. K. F. Kiessling, *Contact lines for electric railways : planning, design, implementation, maintenance*. Erlangen: Publicis, 2009.
- [17] C. E. C. f. Standardization, "NS-EN 14713-1:2009," ed, 2009.
- [18] 3.5.2015. (2015). *Lavspenning og 22 kV/Vedlikehold/Generelle tekniske krav*. Available: https://trv.opm.jbv.no/wiki/Lavspenning_og_22_kV/Vedlikehold/Generelle_tekniske_krav#Rust
- [19] S. Oesch and M. Faller, "Environmental effects on materials: The effect of the air pollutants SO₂, NO₂, NO and O₃ on the corrosion of copper, zinc and aluminium. A

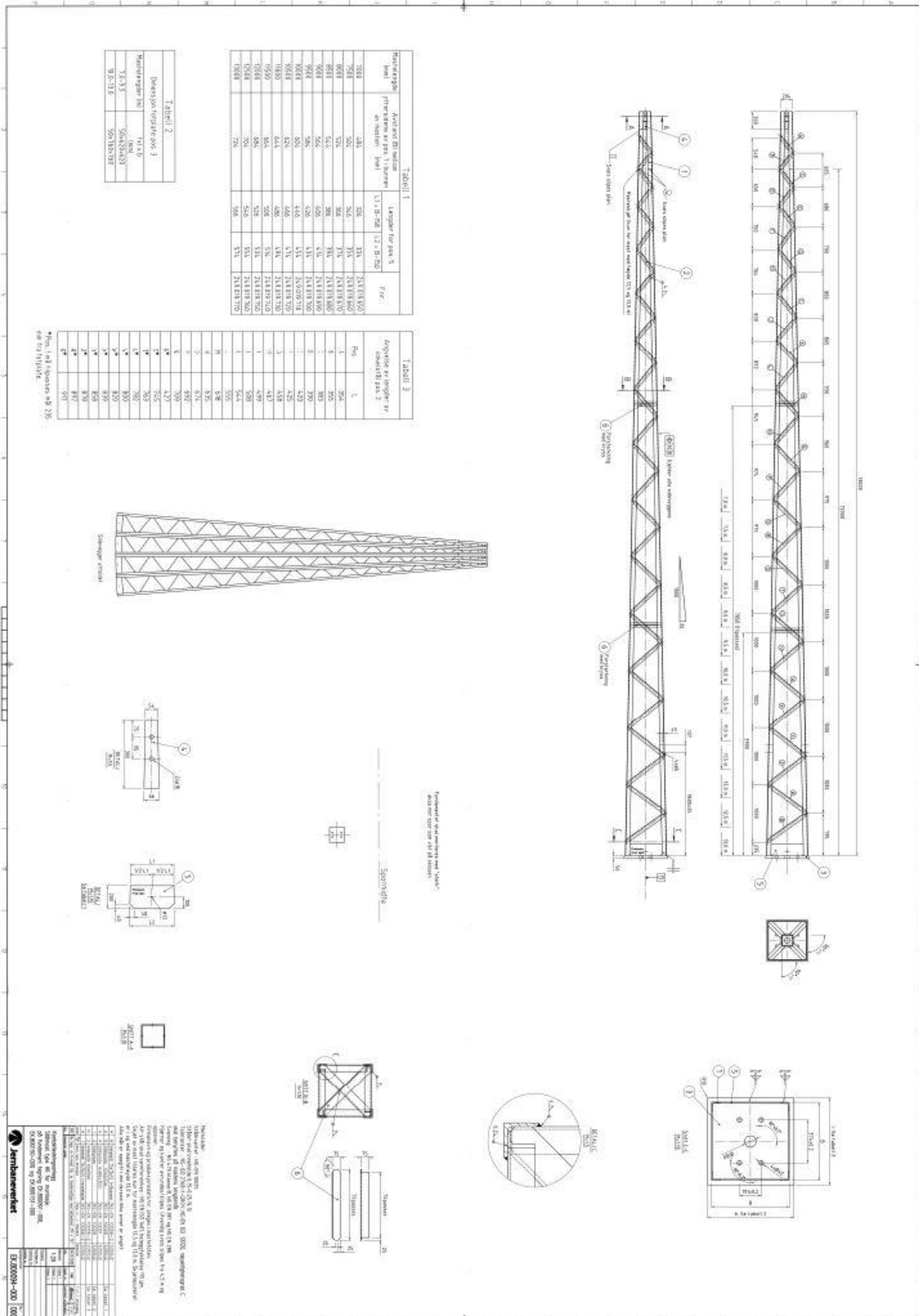
- short literature survey and results of laboratory exposures," *Corrosion Science*, vol. 39, pp. 1505-1530, 9// 1997.
- [20] D. de la Fuente, J. G. Castaño, and M. Morcillo, "Long-term atmospheric corrosion of zinc," *Corrosion Science*, vol. 49, pp. 1420-1436, 3// 2007.
- [21] T. E. Graedel, "Corrosion Mechanisms for Zinc Exposed to the Atmosphere," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 136, pp. 193C-203C, April 1, 1989 1989.
- [22] C. E. C. f. Standardization, "NS-EN ISO 9223:2012," ed, 2012.
- [23] C. E. C. f. Standardization, "NS-EN ISO 9224:2012," ed, 2012.
- [24] S. Feliu, M. Morcillo, and S. Feliu Jr, "The prediction of atmospheric corrosion from meteorological and pollution parameters—II. Long-term forecasts," *Corrosion Science*, vol. 34, pp. 415-422, 3// 1993.
- [25] J. E. Svensson and L. G. Johansson, "A laboratory study of the initial stages of the atmospheric corrosion of zinc in the presence of NaCl; Influence of SO₂ and NO₂," *Corrosion Science*, vol. 34, pp. 721-740, 5// 1993.
- [26] J. E. Svensson and L. G. Johansson, "The temperature-dependence of the SO₂-induced atmospheric corrosion of zinc; a laboratory study," *Corrosion Science*, vol. 38, pp. 2225-2233, 12// 1996.
- [27] J. E. Svensson and L. G. Johansson, "A Laboratory Study of the Effect of Ozone, Nitrogen Dioxide, and Sulfur Dioxide on the Atmospheric Corrosion of Zinc," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 140, pp. 2210-2216, August 1, 1993 1993.
- [28] E. Almeida, M. Morcillo, and B. Rosales, "Atmospheric corrosion of zinc Part 1: Rural and urban atmospheres," *British Corrosion Journal*, vol. 35, pp. 284-288, 2000/04/01 2000.
- [29] (7.3.2015). *Luftforurensing*. Available: <http://www.luftkvalitet.info/Theme.aspx?ThemeID=6fc2e3cd-424f-4c03-ad0c-2b9c15369cd9>
- [30] 29.3.2015. *SSB*. Available: <http://www.ssb.no/natur-og-miljo/statistikker/agassn>
- [31] P. a. Miljødirektoratet. (20.01.2015). *Svoveldioksid*. Available: <http://www.miljostatus.no/Tema/Luftforurensning/Sur-nedbor/Svoveldioksid-SO2/>
- [32] W. He, I. Odnevall Wallinder, and C. Leygraf, "A laboratory study of copper and zinc runoff during first flush and steady-state conditions," *Corrosion Science*, vol. 43, pp. 127-146, 1// 2001.
- [33] Q. Qu, C. Yan, Y. Wan, and C. Cao, "Effects of NaCl and SO₂ on the initial atmospheric corrosion of zinc," *Corrosion Science*, vol. 44, pp. 2789-2803, 12// 2002.
- [34] 2.4.2015. (2015). *Nordic Galvanizers*. Available: <http://www.zincinfo.se/Frontpage%20links/documents/Corrcat.pdf>
- [35] (7.3.2015). *PosiTector 6000 Coating Thickness Gages Full Guide v. 7.4 (2012)*. Available: http://www.defelsko.com/p6000/p6000_manuals.htm
- [36] 26.3.2015. *Nyland stasjon*. Available: <http://www.jernbaneverket.no/no/Jernbanen/Stasjonsok/-N-/Nyland/>
- [37] 26.03.2015. *Grorud stasjon*. Available: <http://www.jernbaneverket.no/no/Jernbanen/Stasjonsok/-G-/Grorud/>

- [38] 26.3.2015. *Hokksund stasjon*. Available: <http://www.jernbaneverket.no/no/Jernbanen/Stasjonssoek/-H-/Hokksund/>
- [39] 26.3.2015. *Bø stasjon*. Available: <http://www.jernbaneverket.no/no/Jernbanen/Stasjonssoek/-B-/Bo/>
- [40] 27.3.2015. *Rygge stasjon*. Available: <http://www.jernbaneverket.no/no/Jernbanen/Stasjonssoek/-R-/Rygge/>
- [41] 7.5.2015. *Sink pluss maling*. Available: <http://www.zincinfo.se/ZinkmalingN.htm>
- [42] C. E. C. f. Standardization, "NS-EN ISO 12944-4:1999," ed, 1999.
- [43] 2.5.2015. (2015). *Last ned data*. Available: <http://www.luftkvalitet.info/omnettstedet.aspx>
- [44] 2.5.2015. (2015). *Prosessbeskrivelse for DuoZink AS Borgeskogen*. Available: <http://web.duozink.no/wp-content/uploads/PR-O-01-Prosessbeskrivelse-for-DuoZink.pdf>
- [45] C. E. C. f. Standardization, "NS-EN ISO 14713-2:2009," in *6.1.1 Material composition*, ed, 2009.

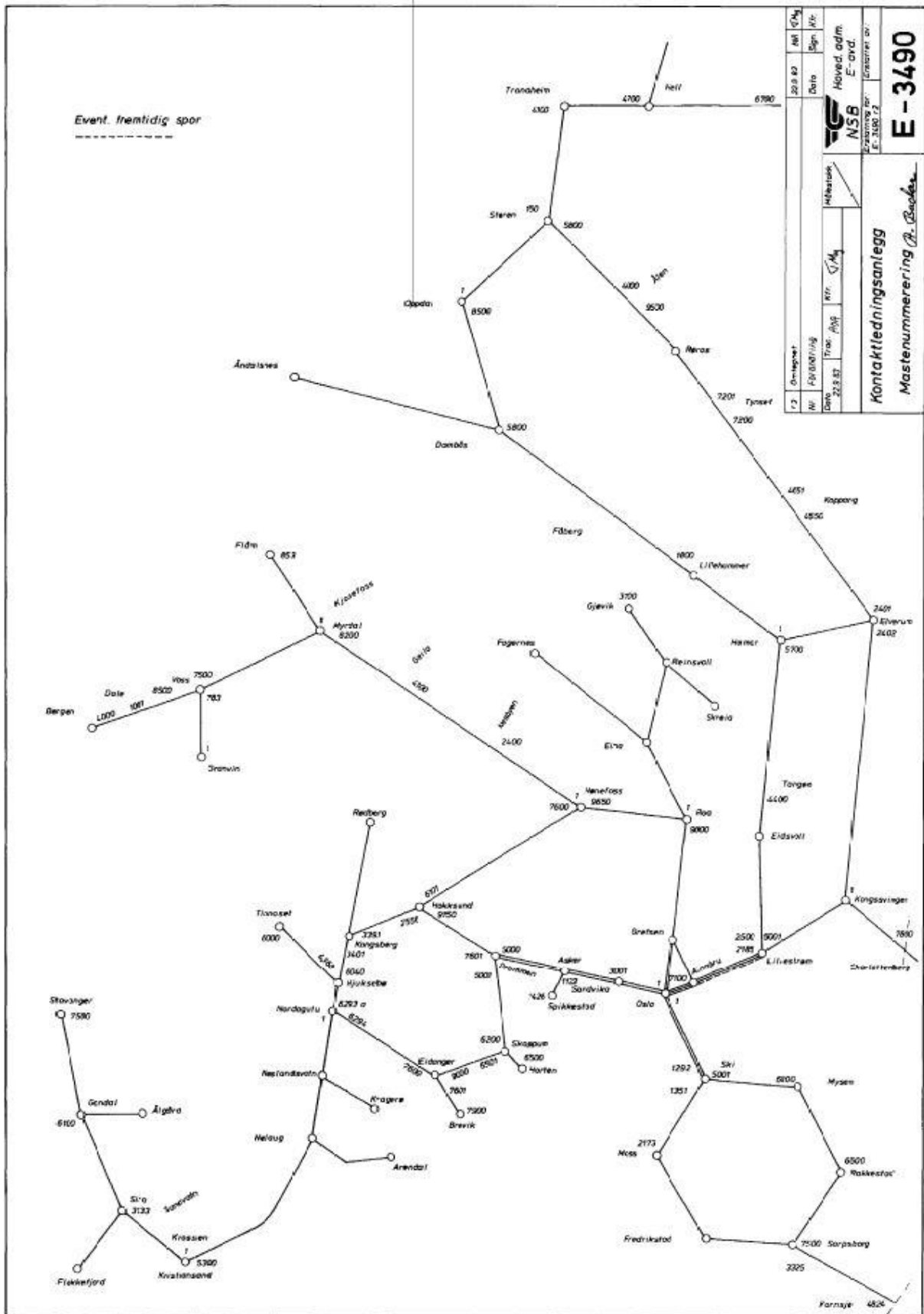
6 Vedlegg

6.1 Vedlegg 1

Tegning EK.800094-000



6.4 Vedlegg 4



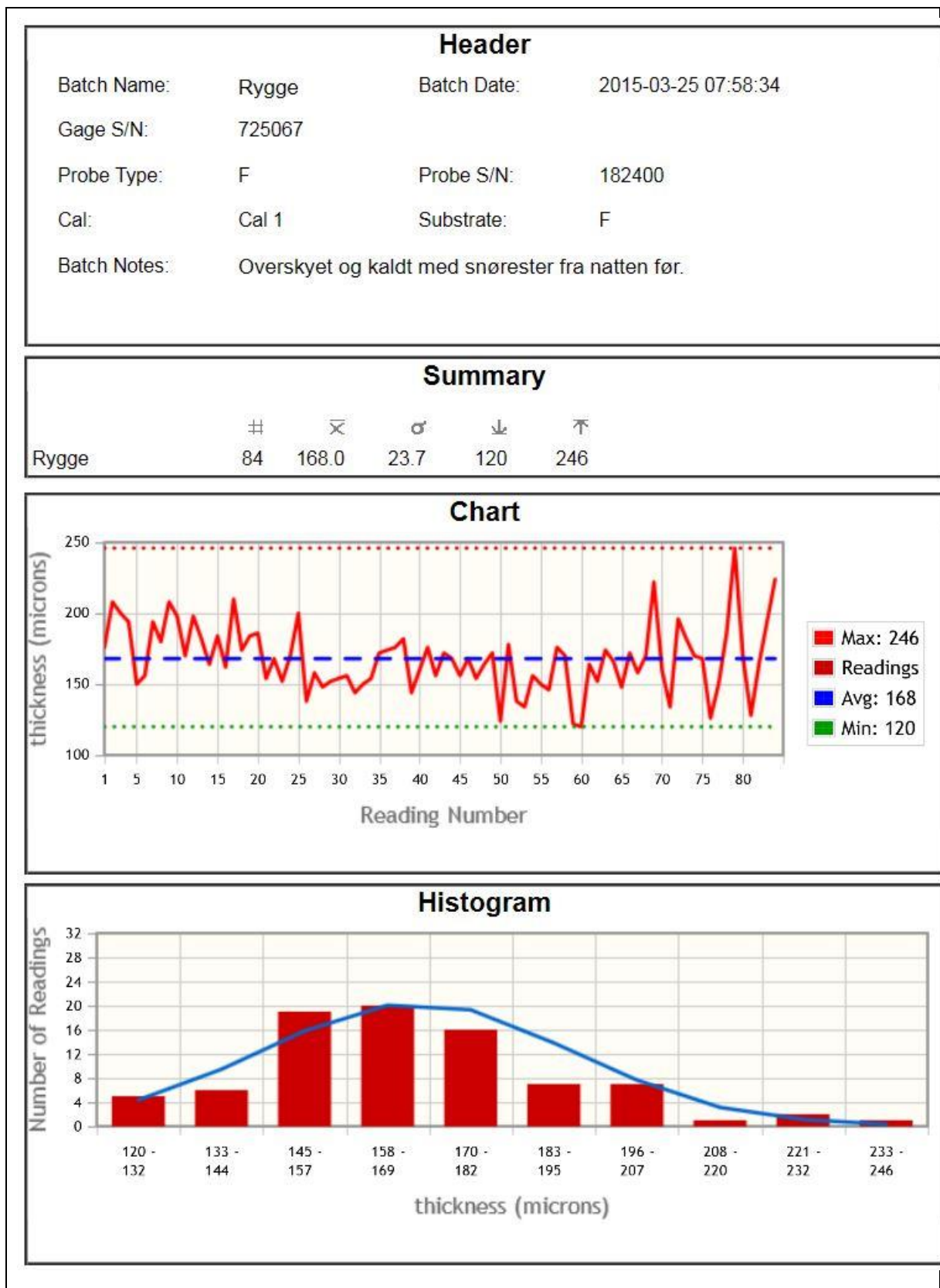
6.5 Vedlegg 5

Table C.1 — Description of typical atmospheric environments related to the estimation of corrosivity categories

Corrosivity category ^a	Corrosivity	Typical environments — Examples ^b	
		Indoor	Outdoor
C1	Very low	Heated spaces with low relative humidity and insignificant pollution, e.g. offices, schools, museums	Dry or cold zone, atmospheric environment with very low pollution and time of wetness, e.g. certain deserts, Central Arctic/Antarctica
C2	Low	Unheated spaces with varying temperature and relative humidity. Low frequency of condensation and low pollution, e.g. storage, sport halls	Temperate zone, atmospheric environment with low pollution ($\text{SO}_2 < 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), e.g. rural areas, small towns Dry or cold zone, atmospheric environment with short time of wetness, e.g. deserts, subarctic areas
C3	Medium	Spaces with moderate frequency of condensation and moderate pollution from production process, e.g. food-processing plants, laundries, breweries, dairies	Temperate zone, atmospheric environment with medium pollution (SO_2 : $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ to $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$) or some effect of chlorides, e.g. urban areas, coastal areas with low deposition of chlorides Subtropical and tropical zone, atmosphere with low pollution
C4	High	Spaces with high frequency of condensation and high pollution from production process, e.g. industrial processing plants, swimming pools	Temperate zone, atmospheric environment with high pollution (SO_2 : $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ to $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$) or substantial effect of chlorides, e.g. polluted urban areas, industrial areas, coastal areas without spray of salt water or, exposure to strong effect of de-icing salts Subtropical and tropical zone, atmosphere with medium pollution
C5	Very high	Spaces with very high frequency of condensation and/or with high pollution from production process, e.g. mines, caverns for industrial purposes, unventilated sheds in subtropical and tropical zones	Temperate and subtropical zone, atmospheric environment with very high pollution (SO_2 : $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ to $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$) and/or significant effect of chlorides, e.g. industrial areas, coastal areas, sheltered positions on coastline

6.6 Vedlegg 6

Eksempel på utskrift fra måleinstrument



Readings

	Reading # microns	Date/Time	Ignore	Notes
1	176	2015-03-25 09:56:57	<input type="checkbox"/>	
2	208	2015-03-25 09:57:21	<input type="checkbox"/>	
3	200	2015-03-25 09:57:32	<input type="checkbox"/>	
4	194	2015-03-25 09:57:45	<input type="checkbox"/>	
5	150	2015-03-25 09:57:58	<input type="checkbox"/>	
6	156	2015-03-25 09:58:11	<input type="checkbox"/>	
7	194	2015-03-25 09:58:27	<input type="checkbox"/>	
8	180	2015-03-25 09:58:39	<input type="checkbox"/>	
9	208	2015-03-25 09:58:58	<input type="checkbox"/>	
10	198	2015-03-25 09:59:10	<input type="checkbox"/>	
11	170	2015-03-25 09:59:24	<input type="checkbox"/>	
12	198	2015-03-25 09:59:39	<input type="checkbox"/>	
13	182	2015-03-25 09:59:56	<input type="checkbox"/>	
14	164	2015-03-25 10:00:08	<input type="checkbox"/>	
15	184	2015-03-25 10:00:21	<input type="checkbox"/>	
16	162	2015-03-25 10:00:50	<input type="checkbox"/>	
17	210	2015-03-25 10:04:36	<input type="checkbox"/>	
18	174	2015-03-25 10:04:48	<input type="checkbox"/>	
19	184	2015-03-25 10:05:00	<input type="checkbox"/>	
20	186	2015-03-25 10:05:12	<input type="checkbox"/>	
21	154	2015-03-25 10:05:30	<input type="checkbox"/>	
22	168	2015-03-25 10:05:41	<input type="checkbox"/>	
23	152	2015-03-25 10:06:13	<input type="checkbox"/>	
24	170	2015-03-25 10:06:21	<input type="checkbox"/>	
25	200	2015-03-25 10:06:36	<input type="checkbox"/>	
26	138	2015-03-25 10:06:57	<input type="checkbox"/>	
27	158	2015-03-25 10:07:09	<input type="checkbox"/>	
28	148	2015-03-25 10:07:27	<input type="checkbox"/>	
29	152	2015-03-25 10:07:41	<input type="checkbox"/>	
30	154	2015-03-25 10:07:55	<input type="checkbox"/>	
31	156	2015-03-25 10:08:05	<input type="checkbox"/>	

	Reading # microns	Date/Time	Ignore	Notes
32	144	2015-03-25 10:08:19	<input type="checkbox"/>	
33	150	2015-03-25 10:13:04	<input type="checkbox"/>	
34	154	2015-03-25 10:13:15	<input type="checkbox"/>	
35	172	2015-03-25 10:13:44	<input type="checkbox"/>	
36	174	2015-03-25 10:13:54	<input type="checkbox"/>	
37	176	2015-03-25 10:14:04	<input type="checkbox"/>	
38	182	2015-03-25 10:14:18	<input type="checkbox"/>	
39	144	2015-03-25 10:14:42	<input type="checkbox"/>	
40	160	2015-03-25 10:14:55	<input type="checkbox"/>	
41	176	2015-03-25 10:15:26	<input type="checkbox"/>	
42	156	2015-03-25 10:15:42	<input type="checkbox"/>	
43	172	2015-03-25 10:15:56	<input type="checkbox"/>	
44	168	2015-03-25 10:16:09	<input type="checkbox"/>	
45	156	2015-03-25 10:16:25	<input type="checkbox"/>	
46	168	2015-03-25 10:16:37	<input type="checkbox"/>	
47	154	2015-03-25 10:17:08	<input type="checkbox"/>	
48	164	2015-03-25 10:17:18	<input type="checkbox"/>	
49	172	2015-03-25 10:21:43	<input type="checkbox"/>	
50	124	2015-03-25 10:21:52	<input type="checkbox"/>	
51	178	2015-03-25 10:22:08	<input type="checkbox"/>	
52	138	2015-03-25 10:22:28	<input type="checkbox"/>	
53	134	2015-03-25 10:22:40	<input type="checkbox"/>	
54	156	2015-03-25 10:22:51	<input type="checkbox"/>	
55	150	2015-03-25 10:23:19	<input type="checkbox"/>	
56	146	2015-03-25 10:23:29	<input type="checkbox"/>	
57	176	2015-03-25 10:23:44	<input type="checkbox"/>	
58	170	2015-03-25 10:23:59	<input type="checkbox"/>	
59	122	2015-03-25 10:24:24	<input type="checkbox"/>	
60	120	2015-03-25 10:24:39	<input type="checkbox"/>	
61	164	2015-03-25 10:27:56	<input type="checkbox"/>	
62	152	2015-03-25 10:28:05	<input type="checkbox"/>	
63	174	2015-03-25 10:28:21	<input type="checkbox"/>	
64	166	2015-03-25 10:28:47	<input type="checkbox"/>	
65	148	2015-03-25 10:29:09	<input type="checkbox"/>	

Reading		Date/Time	Ignore	Notes
#	microns			
66	172	2015-03-25 10:29:33	<input type="checkbox"/>	
67	158	2015-03-25 10:29:48	<input type="checkbox"/>	
68	170	2015-03-25 10:29:57	<input type="checkbox"/>	
69	222	2015-03-25 10:30:18	<input type="checkbox"/>	
70	160	2015-03-25 10:30:27	<input type="checkbox"/>	
71	134	2015-03-25 10:30:44	<input type="checkbox"/>	
72	196	2015-03-25 10:31:10	<input type="checkbox"/>	
73	182	2015-03-25 10:38:37	<input type="checkbox"/>	
74	170	2015-03-25 10:39:11	<input type="checkbox"/>	
75	168	2015-03-25 10:39:35	<input type="checkbox"/>	
76	126	2015-03-25 10:39:49	<input type="checkbox"/>	
77	150	2015-03-25 10:40:04	<input type="checkbox"/>	
78	186	2015-03-25 10:40:18	<input type="checkbox"/>	
79	246	2015-03-25 10:40:47	<input type="checkbox"/>	
80	170	2015-03-25 10:41:03	<input type="checkbox"/>	
81	128	2015-03-25 10:41:15	<input type="checkbox"/>	
82	164	2015-03-25 10:41:48	<input type="checkbox"/>	
83	194	2015-03-25 10:41:58	<input type="checkbox"/>	
84	224	2015-03-25 10:42:11	<input type="checkbox"/>	
85	150	2015-03-25 10:43:05	<input checked="" type="checkbox"/>	Maaling av sinktykkelse rundt rustskade paa masta
86	176	2015-03-25 10:43:14	<input checked="" type="checkbox"/>	Maaling av sinktykkelse rundt rustskade paa masta
87	168	2015-03-25 10:43:29	<input checked="" type="checkbox"/>	Maaling av sinktykkelse rundt rustskade paa masta
88	142	2015-03-25 10:43:49	<input checked="" type="checkbox"/>	Maaling av sinktykkelse rundt rustskade paa masta
89	146	2015-03-25 10:44:03	<input checked="" type="checkbox"/>	Maaling av sinktykkelse rundt rustskade paa masta

6.7 Vedlegg 7

Kalibrerings sertifikat



Certificate no.: 142524
Issued to : Jernbaneverket

Instrument information (instrument informasjon):

Manufacturer and description: Coating Thickness Gauge Defelsko.
Model: PosiTector 6000 Std.
Serial no: 725067 Probe: 182400
Range: 0 – 1500 μm
Accuracy: +/- (1 μm + 1%) 0 - 50 μm
+/- (2 μm + 1%) > 50 μm

Traceable information:

This coating thickness instrument was calibrated to manufacturer's specifications according to procedure MP2538 (Rev. E) using Thickness Reference Standards Certified shims (cert no: 13-321234) with serial no: CS12014.. Maximum uncertainty of Certified Shims: +/- 2 μm .

Conclusion:

The test results enable us to certify that the instrument was found to operate correctly and meet with the manufacturers specification:

Reference Standard Serial no.	Min	Reference Thickness	Max	Instrument reading
031671	75,22	78,00	80,78	78
031673	252,43	257,00	261,57	256
031674	529,63	537,00	544,37	536

Environmental conditions:

Ambient temperature: 22 C +/- 5 C
Relative humidity: Up to 60 %

Calibration date: 20.11.2014
Valid until: 20.11.2015

Calibration performed by:

Øystein Bunes

6.8 Vedlegg 8

Table 2 — Corrosion rates, r_{corr} for the first year of exposure for the different corrosivity categories

Corrosivity category	Corrosion rates of metals				
	Unit	Carbon steel	Zinc	Copper	Aluminium
C1	$\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$	$r_{\text{corr}} \leq 10$	$r_{\text{corr}} \leq 0,7$	$r_{\text{corr}} \leq 0,9$	negligible
	$\mu\text{m}/\text{a}$	$r_{\text{corr}} \leq 1,3$	$r_{\text{corr}} \leq 0,1$	$r_{\text{corr}} \leq 0,1$	—
C2	$\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$	$10 < r_{\text{corr}} \leq 200$	$0,7 < r_{\text{corr}} \leq 5$	$0,9 < r_{\text{corr}} \leq 5$	$r_{\text{corr}} \leq 0,6$
	$\mu\text{m}/\text{a}$	$1,3 < r_{\text{corr}} \leq 25$	$0,1 < r_{\text{corr}} \leq 0,7$	$0,1 < r_{\text{corr}} \leq 0,6$	—
C3	$\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$	$200 < r_{\text{corr}} \leq 400$	$5 < r_{\text{corr}} \leq 15$	$5 < r_{\text{corr}} \leq 12$	$0,6 < r_{\text{corr}} \leq 2$
	$\mu\text{m}/\text{a}$	$25 < r_{\text{corr}} \leq 50$	$0,7 < r_{\text{corr}} \leq 2,1$	$0,6 < r_{\text{corr}} \leq 1,3$	—
C4	$\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$	$400 < r_{\text{corr}} \leq 650$	$15 < r_{\text{corr}} \leq 30$	$12 < r_{\text{corr}} \leq 25$	$2 < r_{\text{corr}} \leq 5$
	$\mu\text{m}/\text{a}$	$50 < r_{\text{corr}} \leq 80$	$2,1 < r_{\text{corr}} \leq 4,2$	$1,3 < r_{\text{corr}} \leq 2,8$	—
C5	$\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$	$650 < r_{\text{corr}} \leq 1\ 500$	$30 < r_{\text{corr}} \leq 60$	$25 < r_{\text{corr}} \leq 50$	$5 < r_{\text{corr}} \leq 10$
	$\mu\text{m}/\text{a}$	$80 < r_{\text{corr}} \leq 200$	$4,2 < r_{\text{corr}} \leq 8,4$	$2,8 < r_{\text{corr}} \leq 5,6$	—
CX	$\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$	$1\ 500 < r_{\text{corr}} \leq 5\ 500$	$60 < r_{\text{corr}} \leq 180$	$50 < r_{\text{corr}} \leq 90$	$r_{\text{corr}} > 10$
	$\mu\text{m}/\text{a}$	$200 < r_{\text{corr}} \leq 700$	$8,4 < r_{\text{corr}} \leq 25$	$5,6 < r_{\text{corr}} \leq 10$	—

NOTE 1 The classification criterion is based on the methods of determination of corrosion rates of standard specimens for the evaluation of corrosivity (see ISO 9226).

NOTE 2 The corrosion rates, expressed in grams per square metre per year [$\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$], are recalculated in micrometres per year ($\mu\text{m}/\text{a}$) and rounded.

NOTE 3 The standard metallic materials are characterized in ISO 9226.

NOTE 4 Aluminium experiences uniform and localized corrosion. The corrosion rates shown in this table are calculated as uniform corrosion. Maximum pit depth or number of pits can be a better indicator of potential damage. It depends on the final application. Uniform corrosion and localized corrosion cannot be evaluated after the first year of exposure due to passivation effects and decreasing corrosion rates.

NOTE 5 Corrosion rates exceeding the upper limits in category C5 are considered extreme. Corrosivity category CX refers to specific marine and marine/industrial environments (see Annex C).

6.9 Vedlegg 9

Forklaring av beregninger til Tabell 2-10:

$$D(t > 20) = r_{corr}[20^b + b \cdot (20^{b-1}) \cdot (t - 20)] \quad \text{Ligning 2-2}$$

D = inntrengningsdybde i [μm]

$r_{corr} = 2,1$ til $4,2$ [μm]

t = 50 [år] (ønsket levetid til sinkbelegg)

b = 0,813

Her beregnes det med den maksimale korrosjon en kan ha til det er 50 μm igjen av sinkbelegg og når første vedlikehold bør skje. I dette tilfellet blir:

$D = 115 - 50 = 65$ [μm] maks tillatt korrosjon til første vedlikehold.

$$t_{2.1} = 20 + \left(\frac{D}{r_{corr} \cdot b \cdot (20^{b-1})} - \frac{20^b}{b \cdot (20^{b-1})} \right) = \underline{62 \text{ [år]}}$$

Levetid til sinkbelegg med korrosjonsrate $r_{corr}=4.2$ $\mu\text{m}/\text{år}$:

$$t_{4.2} = 20 + \left(\frac{D}{r_{corr} \cdot b \cdot (20^{b-1})} - \frac{20^b}{b \cdot (20^{b-1})} \right) = \underline{29 \text{ [år]}}$$

For høyere korrosjonsrate hvor levetid til sinkbelegg faller under 20 år tar utgangspunkt i Ligning 2-1. På samme måte som Ligning 2-2 blir denne snudd med hensyn på levetiden.

$$t_{8.4} = \sqrt[b]{\frac{D}{r_{corr}}} = 12 \text{ [år]} \quad (\text{med } r_{corr} = 8,4 \mu\text{m})$$

$$t_{25} = \sqrt[b]{\frac{D}{r_{corr}}} = 3 \text{ [år]} \quad (\text{med } r_{corr} = 25 \mu\text{m})$$

6.10 Vedlegg 10

Utdrag fra BaneData. Data for master fra gjennomførte sinkmålinger.

Nyland stasjon					
Objekt	Beskrivelse	Status	Idriftssatt dato	Mastetype	Bane
EH-MAS-000641	Mast, 964, Aker - Grorud	I DRIFT	01.07.1980	B2	Hovedbanen
EH-MAS-000640	Mast, 963, Aker - Grorud	I DRIFT	01.07.1980	H3	Hovedbanen
EH-MAS-000643	Mast, 966, Aker - Grorud	I DRIFT	01.07.1980	B2	Hovedbanen
EH-MAS-000642	Mast, 965, Aker - Grorud	I DRIFT	01.07.1980	H3	Hovedbanen
Grorud stasjon					
Objekt	Beskrivelse	Status	Idriftssatt dato	Mastetype	Bane
EH-MAS-000676	Mast, 999, Grorud stasjon	I DRIFT	01.07.1980	H3	Hovedbanen
EH-MAS-000678	Mast, 1001, Grorud stasjon	I DRIFT	01.07.1980	H3	Hovedbanen
EH-MAS-000680	Mast, 1003, Grorud stasjon	I DRIFT	01.07.1980	H3	Hovedbanen
Hokksund stasjon					
Objekt	Beskrivelse	Status	Idriftssatt dato	Mastetype	Bane
EH-MAS-029906	Mast, 8132, Hokksund stasjon	I DRIFT	01.07.1987	B3	Sørlandsbanen
EH-MAS-029909	Mast, 8135, Hokksund stasjon	I DRIFT	01.07.1987	B14	Sørlandsbanen
EH-MAS-029910	Mast, 8136, Hokksund stasjon	I DRIFT	01.07.1987	H1	Sørlandsbanen
EH-MAS-029912	Mast, 8139, Hokksund stasjon	I DRIFT	01.07.1987	H1	Sørlandsbanen
EH-MAS-029914	Mast, 8141, Hokksund stasjon	I DRIFT	01.07.1987	H2	Sørlandsbanen
EH-MAS-029916	Mast, 8143, Hokksund stasjon	I DRIFT	01.07.1987	H2	Sørlandsbanen
Bø stasjon					
Objekt	Beskrivelse	Status	Idriftssatt dato	Mastetype	Bane
EH-MAS-037612	Mast, 408, Bø stasjon	I DRIFT			Sørlandsbanen
EH-MAS-037615	Mast, 410, Bø stasjon	I DRIFT		B3	Sørlandsbanen
EH-MAS-037619	Mast, 412, Bø stasjon	I DRIFT		H3	Sørlandsbanen
EH-MAS-068565	Mast, 414, Bø stasjon	I DRIFT		H3	Sørlandsbanen
EH-MAS-068566	Mast, 416, Bø stasjon	I DRIFT		H3	Sørlandsbanen
EH-MAS-037624	Mast, 418, Bø stasjon	I DRIFT		H3	Sørlandsbanen
Rygge stasjon					
Objekt	Beskrivelse	Status	Idriftssatt dato	Mastetype	Bane
EH-MAS-007054	Mast, 156, Rygge stasjon	I DRIFT	01.01.2000	B3	Østfoldbanen \
EH-MAS-006249	Mast, 157, Rygge stasjon	I DRIFT	01.01.2000	H3	Østfoldbanen \
EH-MAS-007056	Mast, 160, Rygge stasjon	I DRIFT	01.01.2000	B3	Østfoldbanen \
EH-MAS-006251	Mast, 161, Rygge stasjon	I DRIFT	01.01.2000	H3	Østfoldbanen \
EH-MAS-006252	Mast, 163, Rygge stasjon	I DRIFT	01.01.2000	H3	Østfoldbanen \
EH-MAS-007057	Mast, 162, Rygge stasjon	I DRIFT	01.01.2000	B3	Østfoldbanen \
Oslo S					
Objekt	Beskrivelse	Status	Idriftssatt dato	Mastetype	Bane
EH-MAS-067140	Mast, 211, Oslo S (delstr.) stasjon	I DRIFT		B1	Hovedbanen
EH-MAS-067142	Mast, 213, Oslo S (delstr.) stasjon	I DRIFT		B3	Hovedbanen
EH-MAS-067158	Mast, 226, Oslo S (delstr.) stasjon	I DRIFT		B3	Hovedbanen
EH-MAS-067162	Mast, 230, Oslo S (delstr.) stasjon	I DRIFT		B3	Hovedbanen

6.11 Vedlegg 11

Nyland 28.2.2015			
H-mast nr. 963	B-mast nr. 964	H-mast nr. 965	B-mast nr. 966
136	92	104	80
118	106	120	140
106	120	116	92
148	118	102	100
134	126	90	120
94	96	82	112
168	102	96	108
118	128	124	140
122	102	122	100
160	98	118	104
126	114	140	122
156	104	106	126
160		104	
152		108	
114		84	
		100	
Standardavvik per mast			
22,39	12,01	15,56	18,39
Gjennomsnitt per mast			
134,13	108,83	107,25	112,00
Standardavvik total		28,73	
Gjennomsnitt total		124,83	

Grorud 28.2.2015

H-mast nr. 1003	H-mast nr. 1001	H-mast nr. 999
172	80	176
152	120	168
130	118	168
78	104	186
88	98	152
142	132	162
150	116	166
116	104	144
142	96	170
150	74	178
96	132	168
92	88	166
112	140	178
178	118	172
94	112	178
132	114	178
30,91	18,68	10,50
126,50	109,13	169,38
Standardavvik total		33,26
Gjennomsnitt total		135,00

Oslo S 3.3.2015				
B-mast nr. 211	H-mast nr. 213	H-mast nr. 226	H-mast nr.230	
298	254	250	230	
282	220	244	278	
300	294	232	330	
276	262	290	234	
308	262	322	286	
290	262	228	266	
280	274	254	266	
280	230	238	262	
220	246	238	210	
316	224	246	262	
320	220	194	386	
278	238	282	210	
	258	272	240	
	172	196	242	
	210	240	224	
	276	246	250	
Standardavvik				
26,08	30,35	32,22	45,12	
Gjennomsnitt				
287,33	243,88	248,25	261,00	
Standardavvik total			37,41	
Gjennomsnitt total			258,30	

Bø stasjon 11.03.2015

H-mast nr. 418	H-mast nr. 416	H-mast nr. 414	H-mast nr. 412	B-mast nr. 410	B-mast nr. 408
186	120	108	174	260	224
194	100	102	164	230	218
174	92	114	212	242	238
216	124	92	172	208	216
176	96	108	188	234	230
144	96	108	182	220	214
162	106	114	188	240	210
178	102	108	144	210	220
180	124	104	140	220	222
222	106	100	134	202	200
182	114	84	168	252	230
186	94	76	142	190	196
138	74	98	162		
170	112	90	188		
186	98	96	180		
204	122	84	130		
Standardavvik					
22,31	13,82	11,34	23,37	21,08	12,19
Gjennomsnitt					
181,13	105,00	99,13	166,75	225,67	218,17
Standardavvik total		51,95			
Gjennomsnitt total		160,89			

Hokksund stasjon 11.03.2015

B-mast 8135	B-mast 8132	H-mast 8136	H-mast 8139	H-mast 8141	H-mast 8143
162	284	86	162	78	88
182	210	96	164	88	112
174	260	80	160	82	136
106	202	104	154	88	104
190	190	80	146	78	114
112	256	84	162	84	148
158	268	116	184	80	104
124	278	88	210	74	102
140	248	114	176	76	102
156	226	112	164	96	84
194	226	150	194	80	112
138	228	126	156	90	104
124		80	172	70	110
240		118	150	86	120
222		104	192	90	112
		94	162	84	102
Standardavvik					
39,34	30,54	19,85	17,66	6,81	15,72
Gjennomsnitt					
161,47	239,67	102,00	169,25	82,75	109,63
Standardavvik total		55,48			
Gjennomsnitt total		139,74			

Sarpsborg stasjon 14.03.2015

B-mast nr. 4065	H-mast nr. 4069	H-mast nr. 4070
182	214	178
194	212	140
250	216	132
286	228	122
310	156	138
300	188	132
222	182	150
170	210	166
184	224	130
242	242	116
340	222	160
272	234	134
	176	154
	170	138
	194	136
	246	146
Standardavvik		
56,53	26,68	16,28
Gjennomsnitt		
246,00	207,13	142,00
Standardavvik total		54,62
Gjennomsnitt total		194,05

Rygge stasjon 25.03.2015					
H-mast nr. 163	H-mast nr. 161	H-mast nr. 157	B-mast nr. 156	B-mast nr. 160	B-mast nr. 162
176	210	150	172	164	182
208	174	154	124	152	170
200	184	172	178	174	168
194	186	174	138	166	126
150	154	176	134	148	150
156	168	182	156	172	186
194	152	144	150	158	246
180	170	160	146	170	170
208	200	176	176	222	128
198	138	156	170	160	164
170	158	172	122	134	194
198	148	168	120	196	224
182	152	156			
164	154	168			
184	156	154			
162	144	164			
Stanfardavvik					
18,40	20,55	10,99	21,62	22,87	34,93
Gjennomsnitt					
182,75	165,50	164,13	148,83	168,00	175,67
Standardavvik total		23,66			
Gjennomsnitt total		167,95			

Hønefoss; Brødrene Berntsen 31.03.2015				
Nye master				
200	188	208	206	196
198	196	210	206	198
244	168	198	164	176
224	192	204	158	208
208	186	190	166	208
204	214	242	192	182
Standardavvik				
17,79	14,95	17,87	21,95	13,25
Gjennomsnitt				
213,00	190,67	208,67	182,00	194,67
Standardavvik total		19,95		
Gjennomsnitt total		197,8		