

Korrosivitet på bruer langs kysten i Norge

Korrosivitetsmålinger

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 995



Tittel

Korrosivitet på bruer langs kysten i Norge

Undertittel

Korrosivitetsmålinger

Forfatter

Ole Øystein Knudsen

Avdeling

Teknologi Drift og vedlikehold

Seksjon

Vedlikehold og utbedring

Prosjektnummer

C15677

Rapportnummer

995

Prosjektleder

Tarjei Karlsen Bruaas

Godkjent av

Tore Lysberg

Emneord

Materialteknologi; Korrosjon; Bru; Belegg; Vedlikehold

Sammendrag

Denne rapporten er en del av prosjektet "Optimalt bruvedlikehold for reduserte levetidskostnader"

Målsetningen med denne rapporten er å sammenfatte resultater fra korrosivitetsmålinger og beskrive hvordan korrosivitet på bruer er avhengig av beliggenhet, høyde og klimaforhold. En tabell er utformet for å estimere korrosivitet som funksjon av geografi (ytre kyst, sund og fjord) og høyde på brua.

Title

Corrosivity on bridges along the coast of Norway

Subtitle

Corrosivity measurements

Author

Ole Øystein Knudsen

Department

O&M Technology

Section

Maintenance and upgrading

Project number

C15677

Report number

995

Project manager

Tarjei Karlsen Bruaas

Approved by

Tore Lysberg

Key words

Materials technology; Corrosion; Bridge; Coatings; Maintenance

Summary

This report is a part of the project "optimized bridge maintenance to reduce life cycle costs"

The objective of this report is to summarize the results of corrosivity measurements and describe how the corrosivness on bridges depend on placement, height and climate. A table has been made to estimate the corrosivity as a function of geography (outer coast, strait and fjord) and height of the bridge.





SINTEF

Rapport

Korrosivitet på bruer langs kysten i Norge

Forfatter(e):

Ole Øystein Knudsen

Rapportnummer:

2023:01590 - Åpen

Oppdragsgiver(e) (evt samarbeidspartner):

Statens vegvesen

Rapport

Korrosivitet på bruer langs kysten i Norge

EMNEORD

Materialteknologi;
Korrosjon; Korrosivitet;
Kystmiljø; Stål; Bru

VERSJON

1.0

DATO

2024-02-09

FORFATTER(E)

Ole Øystein Knudsen

OPPDRAGSGIVER(E)

Statens vegvesen

OPPDRAGSGIVERS REFERANSE

Tarjei Karlsen Bruaas

PROSJEKTNUMMER

102024718

ANTALL SIDER

23

SAMMENDRAG

I prosjektet "Optimalt bruvedlikehold for reduserte levetidskostnader" er ett av målene å finne ut hva som er optimalt tidspunkt for igangsetting av vedlikehold av korrosjonsbeskyttende belegg. Korrosivitet er den viktigste parameteren i denne sammenheng, ved at den både påvirker beleggets levetid og korrosjonshastigheten på stålet etter at belegget er nedbrutt. Det vil derfor være nyttig for bruforvaltere og andre som tar beslutninger om vedlikehold av belegg på bruer å kunne estimere korrosiviteten på brua.

Målsetning med denne rapporten er å sammenfatte resultater fra korrosivitetsmålinger og beskrive hvordan korrosivitet på bruer er avhengig av beliggenhet, høyde og klimaforhold. En tabell er utarbeidet for å estimere korrosivitet som funksjon av geografi (ytre kyst, sund, fjord) og høyde på brua.

UTARBEIDET AV

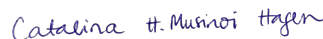
Ole Øystein Knudsen

SIGNATUR

**KONTROLLERT AV**

Catalina H.M. Hagen

SIGNATUR

**GODKJENT AV**

Dirk Nolte

SIGNATUR



Historikk

VERSJON	DATO	VERSJONSBEKRIVELSE
1.0	2024-02-09	Første versjon

Innholdsfortegnelse

1	Sammendrag	4
2	Innledning	5
2.1	Bakgrunn	5
2.2	Målsetning	5
3	Metode	5
3.1	Måle korrosivitet	5
3.2	Klimadata	6
4	Parametere som bestemmer korrosivitet	6
4.1	ISO 9223	6
5	Effekt av klorid på korrosivitet	7
5.1	Dannelse av saltpartikler i sjøluft	7
5.2	Avsetning av salt som funksjon av avstand til kystlinja	9
5.3	Satellittmålinger av avsatt salt	11
5.4	Mengde salt i lufta som funksjon av høyde	13
5.5	Beregnet effekt av klorid på korrosivitet iht ISO 9223	14
6	Betydning av svovelforbindelser på korrosivitet	14
7	Effekt av luftfuktighet og temperatur på korrosivitet	16
8	Korrosivitetsmålinger	18
9	Korrosivitet på bruer langs kysten	18
10	Referanser	21

BILAG/VEDLEGG

Vedlegg A	Korrosivitetsmålinger i Norge utført mellom 2018 og 2023
-----------	--

1 Sammendrag

Denne rapporten er utarbeidet i prosjektet "Optimalt bruvedlikehold for reduserte levetidskostnader", som er et samarbeidsprosjekt mellom Statens vegvesen og SINTEF.

Levetiden til korrosjonsbeskyttende belegg er en funksjon av korrosivitet. Korrosiviteten avgjør også hvor raskt stålet korroderer i en beleggskaide, og vil derfor også avgjøre hvor raskt vedlikehold av belegget må starte. Korrosivitet er derfor en viktig parameter å ta hensyn til ved estimering av fremtidig behov for overflatevedlikehold og ved beslutninger om når vedlikeholdet bør starte.

Målsetning med denne rapporten er å sammenfatte resultater fra korrosivitetsmålinger og beskrive hvordan korrosivitet på bruer er avhengig av beliggenhet, høyde og klimaforhold.

I regi av ISO ble prosjektet ISOCORRAG startet i 1986 der korrosivitet og miljøparametere ble målt på 52 ulike steder rundt omkring i verden. Basert på resultatene ble ISO 9223, ISO 9224, ISO 9225 og ISO 9226 utviklet. Ved hjelp av regresjonsanalyse mellom miljøparametere og korrosivitet (128 datapunkter) ble en ligning utviklet for sammenhengen mellom korrosivitet og miljø. De parameterne (årlige gjennomsnitt) som inngår i ligningen er:

- Avsatt klorid ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{døgn}$)
- Avsatt svoveldioksid ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{døgn}$)
- Relativ luftfuktighet
- Temperatur

I Norge er avsatt svoveldioksid svært lavt og varierer lite. Årlig gjennomsnitt av den relative fuktigheten omkring 80 % langs kysten. Disse to parameterne forklarer derfor ikke variasjon i korrosivitet langs kysten i Norge.

Det er først og fremst klorid som bestemmer korrosivitet på bruer i Norge. Temperatur har også en viss effekt, men ikke like mye som klorid.

Klorid i lufta kommer fra saltpartikler som dannes av brytende bølger. Dette skjer hovedsakelig på åpent hav. Dråper av sjøvann i ulik størrelse slynges opp i lufta, avhengig av diameter tørker de inn og blir til saltpartikler. Store partikler inneholder mye salt, men er tunge og faller raskt ned. Små partikler er lette og kan transportere langt, men inneholder lite salt. Fra kysten og innover land faller derfor innholdet av salt i lufta raskt. Innholdet av salt i lufta faller også raskt med høyde over sjøen. På overflater som treffes av nedbør blir salt regelmessig vasket av, mens på overflater som er skjermet for nedbør vil saltet akkumuleres over tid. Korrosiviteten på bruer vil derfor være størst på le-sider og områder skjermet for regn, som underkant av brubane.

Basert på resultatene fra prosjektet er det utarbeidet en tabell for å estimere korrosivitet som funksjon av geografi (ytre kyst, sund, fjord) og høyde på brua.

2 Innledning

2.1 Bakgrunn

Statens vegvesen (SVV) og fylkeskommunene forvalter over 17 000 bruer og 1100 tunneler langs norske veier som skal holdes i forskriftsmessig stand. Både bruer og tunneler designes i nyere tid for 100 års levetid. SVV har en målsetning om at levetiden aldri skal begrenses av teknisk tilstand, det er trafikkbehovet som skal være avgjørende. Beslutning om å rive ei bru tas på en tidshorisont over noen få år, slik at den bærende strukturen i praksis vedlikeholdes som om brua skal ha uendelig levetid. Bruene krever derfor et betydelig inspeksjons- og vedlikeholdsbudsjett.

Av de 17 000 bruene vi har i Norge er omkring 2600 stålbruer med korrosjonsbeskyttende belegg. Samlet overflateareal med belagt stål er nesten 3 millioner m². Hvis vi antar at kostnaden for vedlikehold av belegg er omkring 3000 kr/m², og at hver bru trenger overflatevedlikehold ca. hvert 35 år, tilsier det et årlig behov på omkring 200 millioner kroner til vedlikehold av belegg. Bevilgningene til overflatevedlikehold er lavere i dag, trolig fordi mange bruer ikke er kommet i den alderen hvor vedlikeholdet starter. Behovet for bevilgninger vil imidlertid øke i fremtiden, også fordi det nå planlegges flere store stålbruer, som for eksempel Bjørnafjordbrua. Den brua alene vil øke arealet med belagt stål på norske bruer med 10%. Med så store vedlikeholdskostnader er det viktig å prioritere riktig og gjøre best mulige valg for å få mest ut av bevilgningene og velge en strategi som gir lavest mulige vedlikeholdskostnader for hver enkelt bru.

Med så mange bruer spredt over hele landet er det mange som er involvert i arbeidet og mange som skal fatte beslutninger om vedlikehold. Det er derfor vanskelig å få til en enhetlig forvaltning, og det er vanskelig å sikre kompetanse i alle ledd. Det at forvaltning av bruer på fylkesveiene er overført til fylkene i forbindelse med regionreformen forsterker denne utfordringen.

Det overordnede FoU målet med prosjektet har vært å forstå sammenhengen mellom beleggets levetid og vedlikeholdskostnader på den ene siden, og miljø-, konstruksjon- og driftsparametere på den andre siden, for å kunne etablere kriterier for når og hvordan overflatevedlikehold skal iverksettes.

2.2 Målsetning

Målsetning med denne rapporten er å sammenfatte resultater fra korrosivitetsmålinger og beskrive hvordan korrosivitet på bruer er avhengig av beliggenhet, høyde og klimaforhold.

3 Metode

3.1 Måle korrosivitet

Korrosivitet er målt som materialtap på stål i løpet av ett år, i henhold til ISO 9226 [1]. Prøvene ble merket og veid med 0,01 g nøyaktighet, før de ble montert på braketter (som vist i seksjon **Feil! Fant ikke referanseilden.**) og distribuert for montering. Eksponeringsstedene ble valgt for å vise korrosivitet langs kysten fra Finnmark til Rogaland. Etter ett år ble prøvene tatt inn, demontert fra brakettene, rengjort og veid på nytt. Korrosjon ble beregnet etter følgende formel:

Ligning 1

$$r_{corr} = \frac{\Delta m}{A \cdot \rho \cdot t} \cdot 10^6$$

Der r_{corr} er korrosjonsraten [$\mu\text{m}/\text{år}$], Δm er massetapet [g], A er prøvens areal på forside og bakside [m^2], ρ er stålets tetthet [g/m^3] og t er tid [år].

Stålprøvene ble rensset for korrosjonsprodukter ved å dyppe de i en løsning av 500 ml 37% saltsyre (HCl) og 3,5 g heksametylen-tetramin, fortynnet til 1 liter ved romtemperatur. Dyppetiden for hver enkelt prøve var avhengig av mengde rust, men for de fleste prøvene ca. 10 minutter.

3.2 Klimadata

Copernicus databasen er opprettet for å gjøre målinger av klimadata for hele kloden tilgjengelig for alle.¹ Databasen inkluderer avsetning av både klorid og svoveldioksid, som er de to parameterne som har størst innvirkning på korrosiviteten. I databasen ligger satellittmålinger for hver time i et grid med oppløsning på 0,4 lengdegrader og 0,4 breddegrader.

Årlig gjennomsnitt for avsetning av salt, relativ luftfuktighet og temperatur ble beregnet for data målt i perioden 01.01.2020 til 31.12.2020.

4 Parametere som bestemmer korrosivitet

4.1 ISO 9223

I regi av ISO ble prosjektet ISOCORRAG startet i 1986 der korrosivitet og miljøparametere ble målt på 52 ulike steder rundt omkring i verden. Resultatene er publisert [2,3]. Basert på resultatene ble ISO 9223, ISO 9224, ISO 9225 og ISO 9226 utviklet [1,4–6]. Ved hjelp av regresjonsanalyse mellom miljøparametere og korrosivitet (128 datapunkter) ble følgende ligning utviklet for sammenhengen mellom korrosivitet og miljø:

Ligning 2
$$r_{\text{corr}} = 1,77 \cdot P_d^{0,52} \cdot e^{(0,020 \cdot RH + f_{\text{St}})} + 0,102 \cdot S_d^{0,62} \cdot e^{(0,033 \cdot RH + 0,040 \cdot T)}$$

Tabell 1. Parameterne i Ligning 2

Symbol	Parameter	Enhet	Gyldig intervall
r_{corr}	Korrosjon i løpet av første år	$\mu\text{m}/\text{år}$	
RH	Årlig relativ luftfuktighet - gjennomsnitt	%	34 til 93
T	Årlig temperatur - gjennomsnitt	°C	-17,1 til 28,7
P_d	SO ₂ avsetning – årlig gjennomsnitt	mg/m ² /døgn	0,7 til 150
S_d	Cl ⁻ avsetning – årlig gjennomsnitt	mg/m ² /døgn	0,4 til 760
f_{St}	$0,150 \cdot (T - 10)$ ved $T \leq 10^\circ\text{C}$		
	$-0,054 \cdot (T - 10)$ ved $T > 10^\circ\text{C}$		

Ligningen viser at korrosiviteten øker med temperatur, luftfuktighet, avsetning av SO₂ og avsetning av Cl⁻. Regresjonsanalysen viste en korrelasjonsfaktor på 0,85, det vil si at ligningen forklarer 85 % av variasjonen i dataene. Tabell 1 forklarer de ulike parameterne i Ligning 2, og viser intervallene som de ulike parameterne lå innenfor på de ulike teststedene, og dermed også gyldighetsområde for Ligning 2. Avsetning av klorid kan ligge svært langt over maksimalverdien på 760 mg/m²/døgn, for eksempel i marin plaskesone. Ligningen tar ikke hensyn til mekanismer som fjerner salt fra overflata, som regn og direkte sjøsprøyt.

¹ <https://cds.climate.copernicus.eu/#!/home>

5 Effekt av klorid på korrosivitet

Avsetning av klorid på metalloverflata har en stor effekt på korrosivitet, men er vanskelig å måle direkte. To metoder for måling av klorid er beskrevet i ISO 9225. Begge involverer et stykke gasbind som skiftes ut typisk hver måned gjennom ett år og analyseres med hensyn på avsatt klorid. Metodene er kostbare og trolig lite nøyaktige. Måling av korrosivitet direkte er både enklere og mer nøyaktig. Dette krever imidlertid også eksponering av prøver i ett år.

5.1 Dannelse av saltpartikler i sjøluft

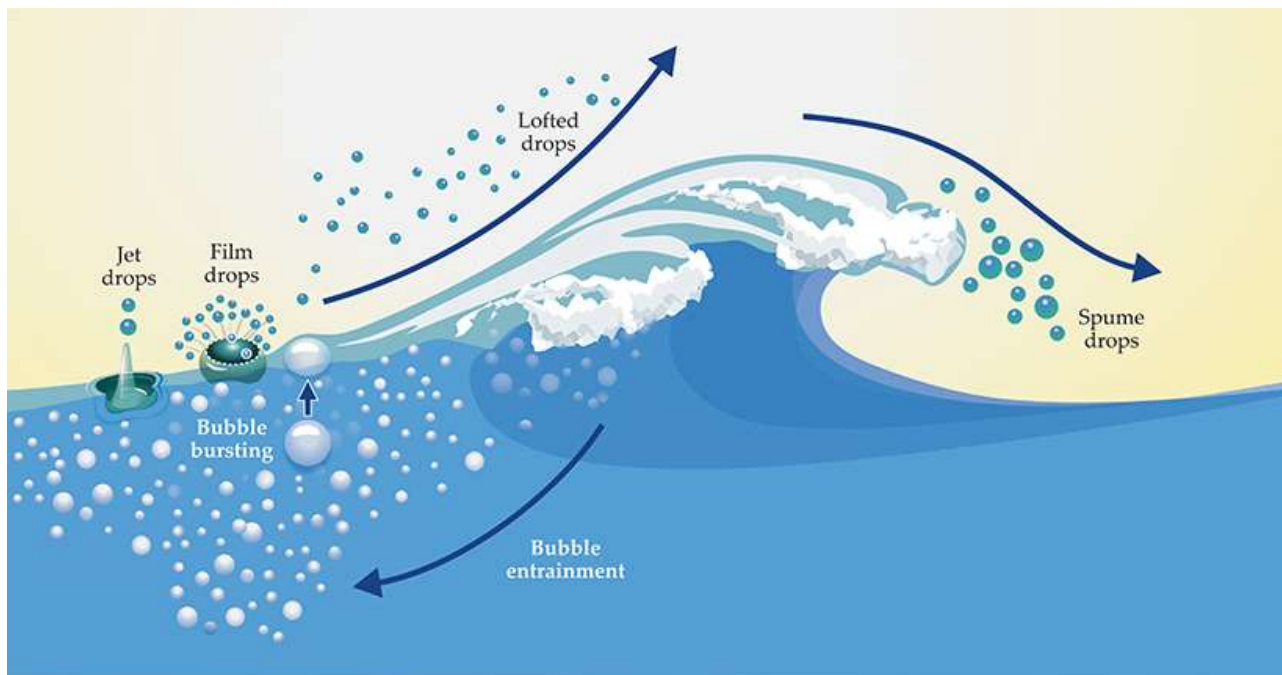
Saltpartikler i lufta langs kysten, dannes av brytende bølger. Dette er ulike mekanismer som danner saltpartikler, og de gir partikler med ulik størrelse.

Mengden saltpartikler er hovedsakelig avhengig av vindstyrke og saliniteten i vannet. Det er to mekanismer som danner saltpartikler over brytende bølger [7,8]:

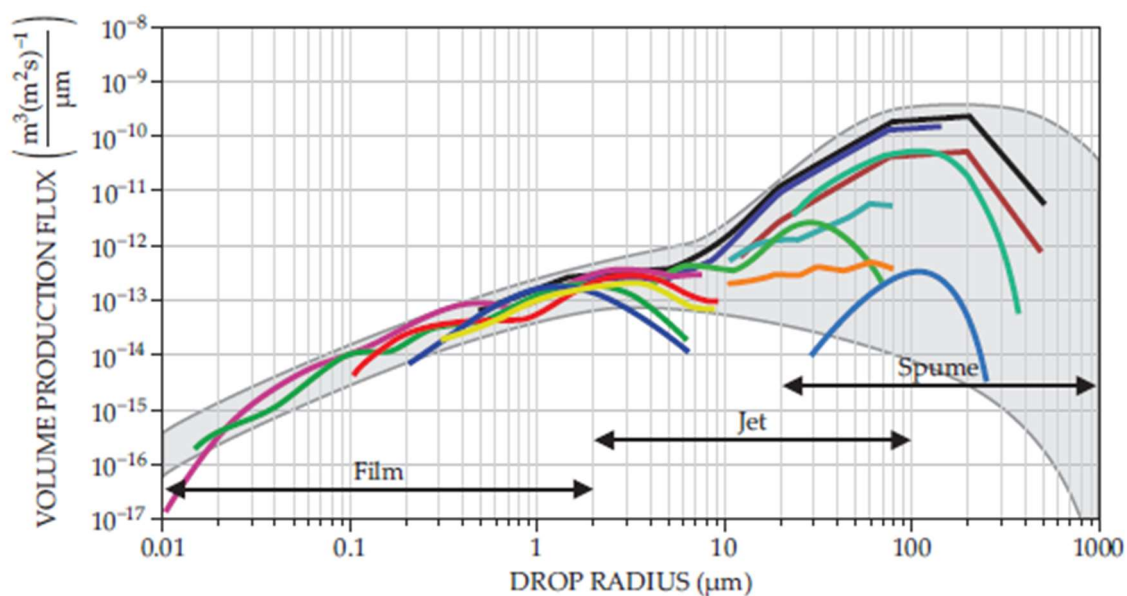
- Vind og bølger driver luft inn i vannet som danner bobler på overflata. Idet boblene sprekker dannes det ørsmå dråper av sjøvann i lufta umiddelbart over vannet, som vist i Figur 1, som vinden kan blåse opp i luftmassene. Vannet i dråpene fordampes, slik at dråpen transformeres til en liten saltpartikkel. Film-dråper er typisk $0,01 - 2 \mu\text{m}$ i radius, mens jet-dråper er typisk $2 - 100 \mu\text{m}$.
- Skum-dråper (spume drops) dannes ved at skum på bølgetoppene rives løs av vinden og danner dråper, typisk fra $20 \mu\text{m}$ til flere mm i diameter i radius. Slike dråper dannes også effektivt i brenningene når bølger slår inn mot land.

Brytende bølger oppstår ved vindhastigheter på mer enn 5 m/s , og jo høyere vindhastigheten er, jo større areal av havoverflata er dekket av skumtopper. Brenninger på grunt vann er avhengig av bølgehøyden, og bare indirekte av vinden. Figur 2 viser volumstrøm av dråper ut av sjøoverflata dannet ved de ulike mekanismene, som funksjon av dråperadius. De små dråpene utgjør en liten andel av det totale volumet dråper. Siden figuren er logaritmisk er effekten av størrelse vesentlig større enn man umiddelbart får inntrykk av.

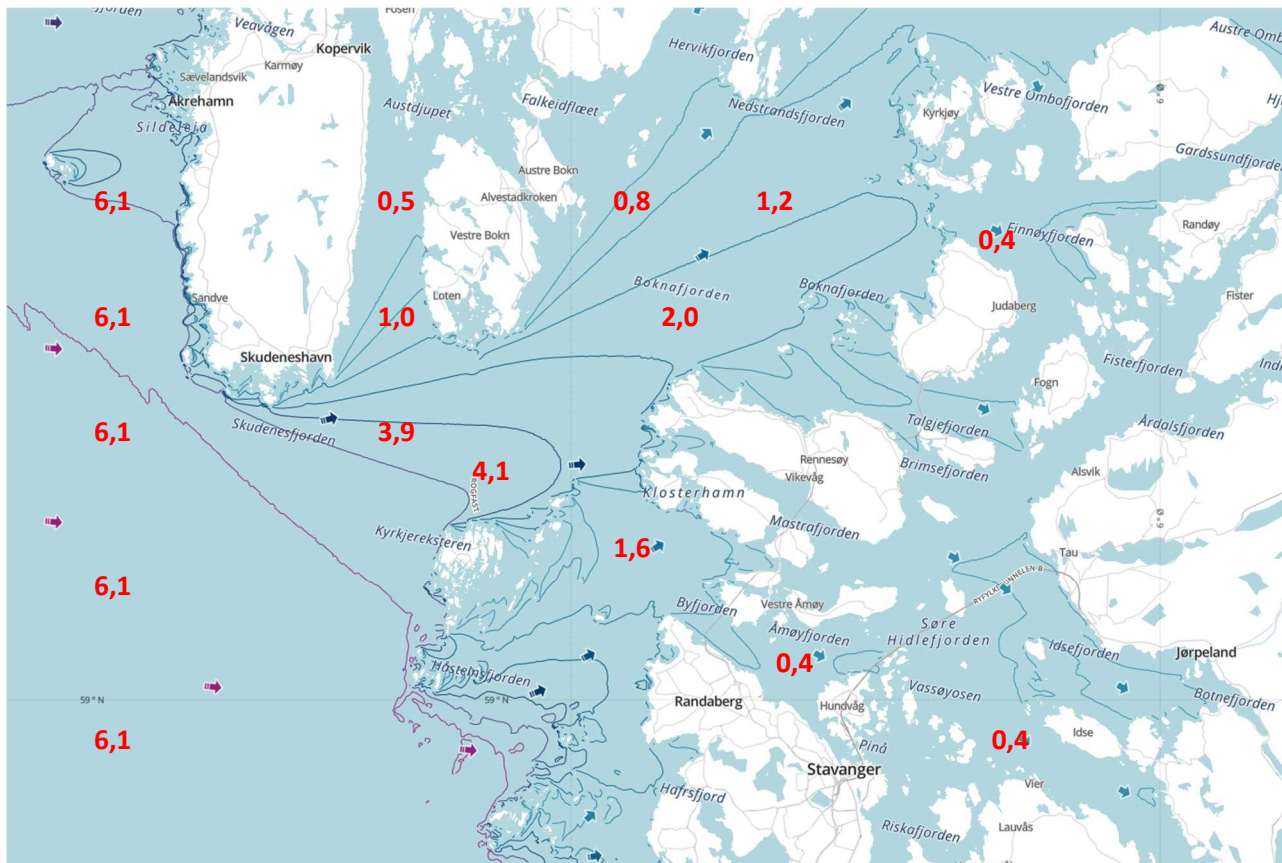
Figur 3 viser bølgevarsel med signifikant bølgehøyde (m) for 21. desember 2023 kl. 10 i Boknafjorden. Vindstyrken på Utsira Sør var 18 m/s , signifikant bølgehøyde $6,1 \text{ m}$ og maks bølgehøyde $11,6 \text{ m}$. Siden Boknafjorden er så åpen, går bølgene et godt stykke innover i fjorden, men bak øyene faller bølgehøyden under 1 m . Lenger nord i Hardangerfjorden var bølgehøyden bare $0,1 \text{ m}$, selv om bølgehøyden på havet utenfor var $5,8 \text{ m}$. Selv om dette bare er varsel for ett tidspunkt i ett område, viser det at betingelsene for dannelse av saltpartikler i lufta ikke var til stede i sund og fjorder, til tross for sterk vind og høye bølger på havet utenfor.



Figur 1. Dannelse av dråper over sjøen [8]



Figur 2. Volumstrøm av dråper ut av sjøoverflata, dannet ved tre ulike mekanismer som funksjon av dråperadius. Figuren er laget av data fra flere undersøkelser [8]



Figur 3. Bølgevarsel for Boknafjorden 21. desember 2023. De røde tallene viser signifikant bølgehøyde (meter)

5.2 Avsetning av salt som funksjon av avstand til kystlinja

Størrelsen på dråpene vil bestemme hvor lang levetid de får og hvor langt de kan transporteres av vinden. Dråpene påvirkes av gravitasjon og hydrodynamiske krefter fra vinden, hvilket bestemmer kraftmomentet de får i friksjonen mot lufta.

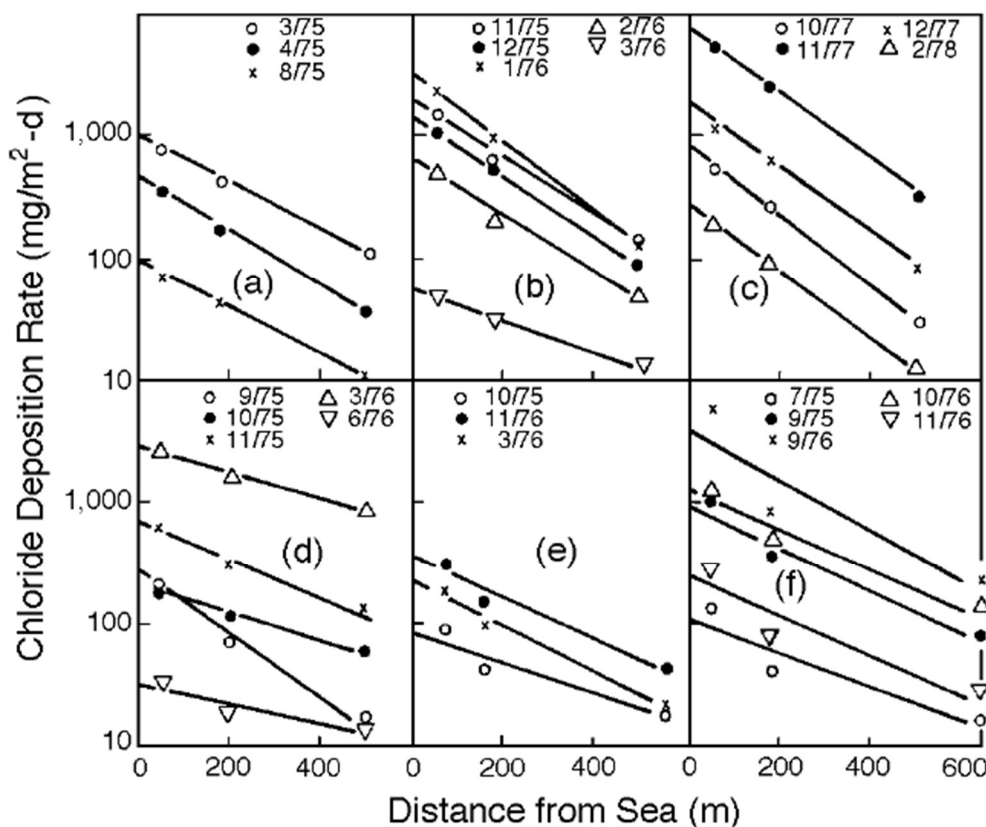
- Vannet i de små dråpene fordampner raskt slik at de tørker helt inn til små saltpartikler. Små dråper/partikler vil raskt få samme hastighet og retning som vinden på grunn av liten massefart. De vil ha lang levetid i lufta og kunne transporteres langt av sted.
- Store dråper vil ha en mer ballistisk bevegelse, hovedsakelig bestemt av farten i dannelsen og gravitasjonen. På grunn av størrelsen vil fordampingen være mindre effektiv og de beholder mer av massen. Store dråper vil derfor være kortlivede, typisk i størrelsesorden fra noen sekunder til et minutt.

Når sjølufta kommer inn over land vil derfor de store dråpene ganske raskt falle ned på bakken. På grunn av størrelsen inneholder de mer salt enn de små dråpene og utgjør en vesentlig fraksjon av den totale mengden salt som transporteres inn over land. Det betyr imidlertid også at det meste av saltet avsettes i kort avstand til kystlinja. De små saltpartiklene kan transporteres lengre inn fra kysten, men siden de er små, utgjør de en liten akkumulert masse salt. Arealet de avsettes på er dessuten stort, hvilket ytterligere reduserer effekten på korrosiviteten. Mengden avsatt salt per areal avtar derfor raskt med avstand til kystlinja, og etter noen

hundre meter er effekten på korrosiviteten liten eller neglisjerbar. Det er først og fremst tre mekanismer som fjerner saltet fra lufta:

- Gravitasjon, det vil si dråpenes vertikale hastighet
- Skrubbing, det vil si at vinden blåser partiklene mot terrenget, vegetasjon osv.
- Regndråper som løser opp saltpartiklene og "vasker" lufta

Figur 4 viser målt avsetningsrate av klorid som funksjon av avstand til kystlinja på forskjellige steder i Europa noen måneder i årene 1975, 1976 og 1977. Måned og årstall er angitt i hvert diagram. Figuren viser en eksponentiell nedgang i avsatt klorid.



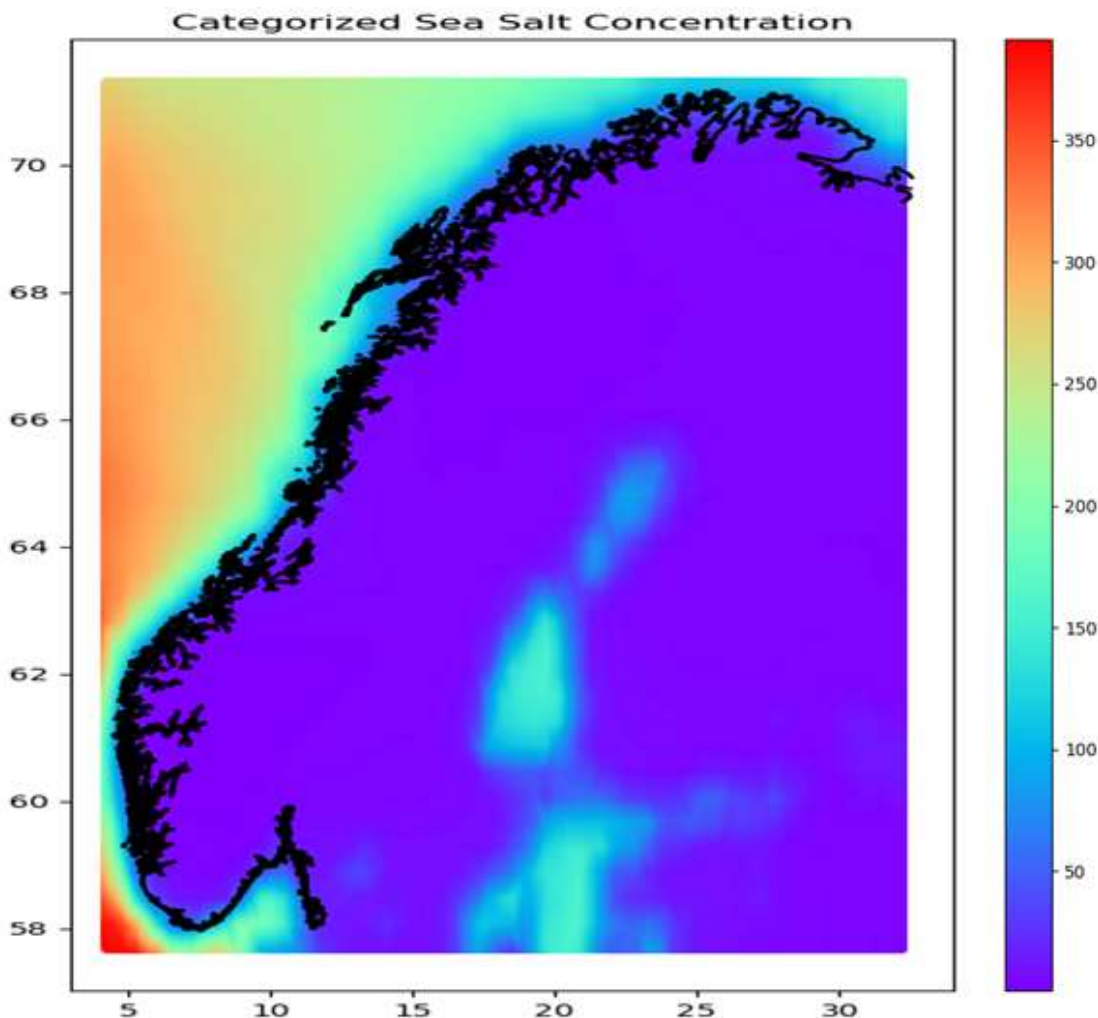
Figur 4. Avsetning av klorid som funksjon av avstand til kystlinja på ulike steder: (a, b, c) Le Zoute; (d) Aberdeen; (e) Great Yara; og (f) Aberaeron [9,10]

Å beregne avsetningsrate av klorid som funksjon av avstand til kystlinja vil kreve for mye data til at det praktisk lar seg gjennomføre. Vi er derfor nødt til å gjøre noen forenklinger når det gjelder avsetning av klorid. Vi kan trolig trygt gjøre følgende antagelser:

- Langs hele kysten vil den ytterste kystlinja ha så høy belastning av klorid at korrosiviteten er minst C5 nede ved sjøen.
- Korrosiviteten avtar raskt over land, og 1 km fra kysten vil korrosiviteten være lite påvirket av avsatt klorid.
- Korrosiviteten avtar også raskt med høyde, se kapittel 5.4.

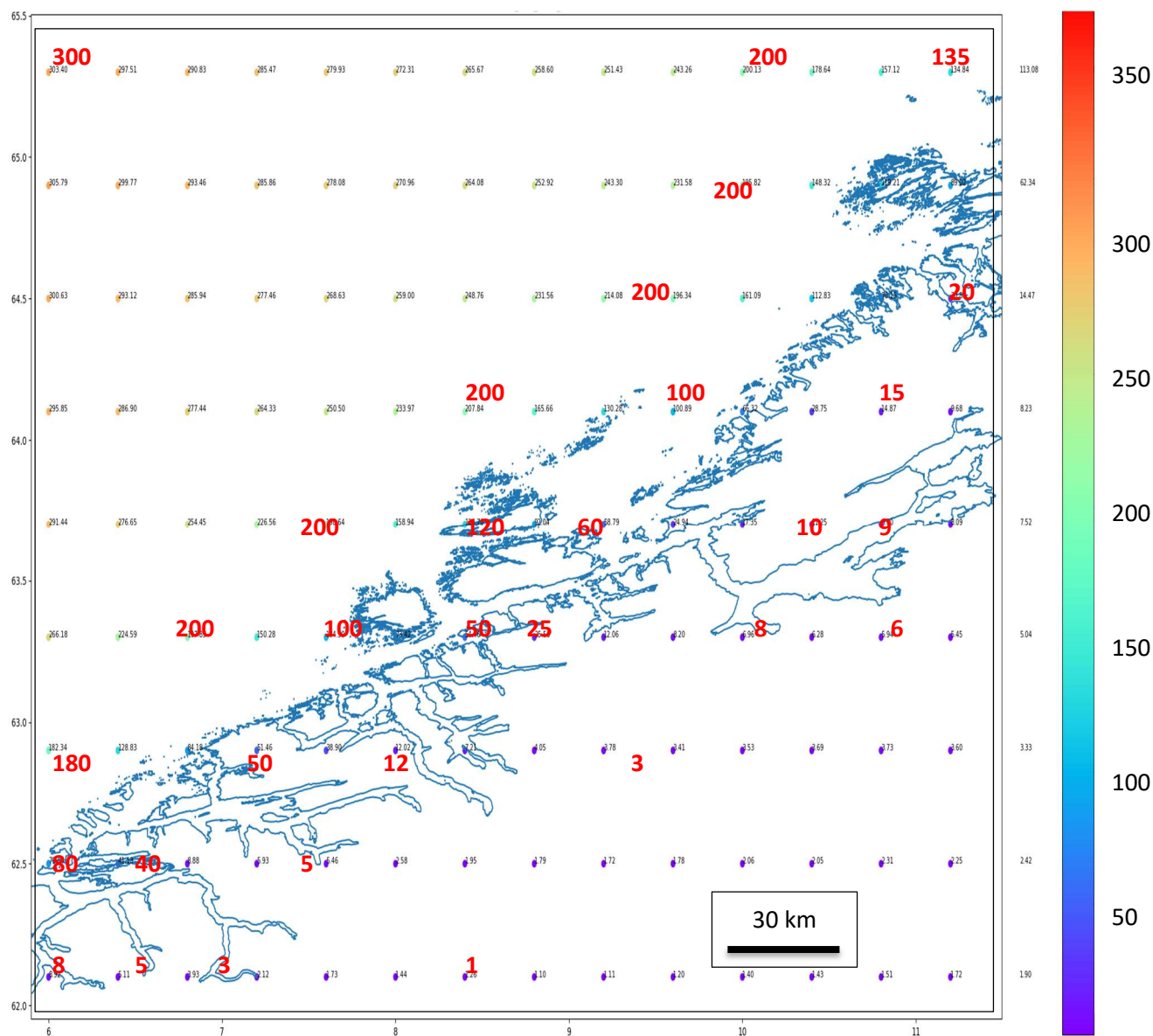
5.3 Satellittmålinger av avsatt salt

Gjennomsnittlig avsetning av salt ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{døgn}$) i Norge i 2020 fra Copernicus database for klimaforskning er vist i Figur 5. Tallverdiene viser avsetning av salt på bakken eller sjøen. Som forklart foran avtar mengden salt i lufta med høyde, og mengde avsatt salt vil derfor også avta med høyde. Figuren viser at mengden salt i lufta er høy offshore, og at verdiene allerede faller når vi nærmer oss kysten. Over land er verdiene svært lave, som stemmer godt overens med kapittel 5.2.



Figur 5. Satellittmålinger av avsatt salt i 2020 ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{døgn}$) fra Copernicus database

Figur 6 viser de detaljerte målingene for avsatt salt i Midt-Norge (gjennomsnittsverdier for 2020) i $\text{mg}/\text{m}^2/\text{døgn}$. Verdiene viser hvordan mengden avsatt salt avtar når vi nærmer oss kysten, og hvor raskt de faller når vi kommer over land. Selv målinger over fjorder med saltvann viser lave verdier, trolig fordi vinden er svakere og det sjelden oppstår brytende bølger, sammenlignet med forholdene offshore og på kystlinja mot havet. Det virker derfor rimelig å anta at salt i lufta først og fremst genereres på åpent hav, og i mindre grad i fjorder og sund. Som beskrevet i 5.1 dannes saltpartiklene i lufta av brytende bølger. Der det sjelden er brytende bølger vil det følgelig ikke dannes nye saltpartikler i lufta.

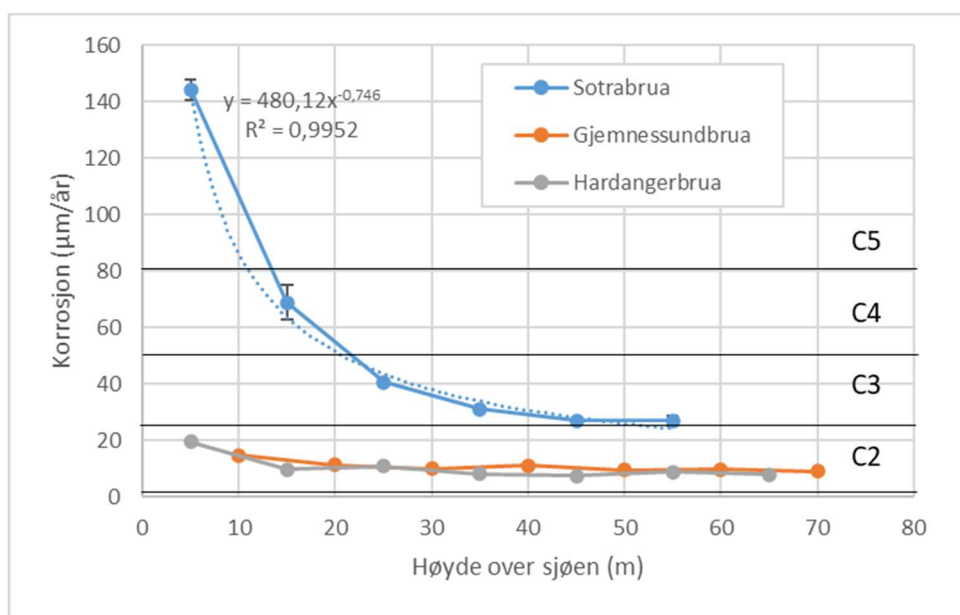


Figur 6. Satellittmålinger av avsatt salt i 2020 (mg/m²/døgn) fra Copernicus database, detaljerte målinger for Midt-Norge

5.4 Mengde salt i lufta som funksjon av høyde

Korrosivitet som funksjon av høyde over sjøen er undersøkt for tre bruer i Norge: Sotrabrua, Gjemnessundbrua og Hardangerbrua, se Figur 7. Alle verdiene er gjennomsnitt av tre parallelle prøver [11]. Målingene på Sotrabrua viser svært høy korrosivitet 5 m over sjøen, og avtagende korrosivitet eksponentielt med høyden ($r_{corr} = 480 \cdot h^{-0,745}$, forklarer 98,6% av variansen). På de to andre bruene ble det målt vesentlig lavere korrosivitet. På Gjemnessundbrua ble det målt overaskende lave verdier på tårnet. Prøver som var plassert på rekkverket på brubanen hadde en korrosivitet på $27 \mu\text{m}/\text{år}$, mens prøver plassert på vindskovler under brubanen hadde $48 \mu\text{m}/\text{år}$ (ikke vist i Figur 7). Brubanen ligger ca 40-45 m over sjøen.

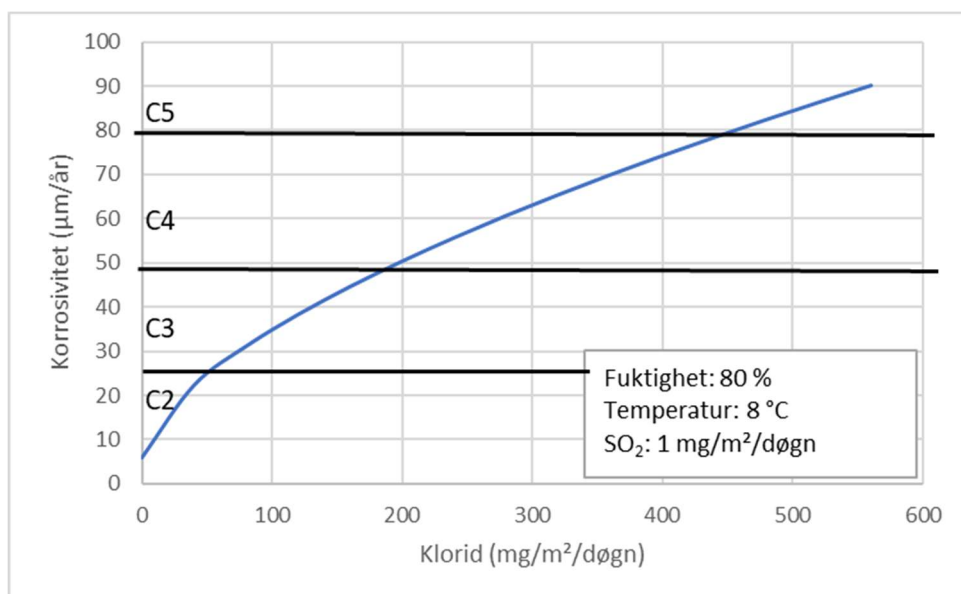
Som diskutert i 5.2 vil mengden salt i lufta avta raskt med høyde over sjøen på grunn av gravitasjonen. Dette bekreftes også av målingene, spesielt for Sotrabrua. På Gjemnessundbrua er det rimelig å anta at prøvenes plassering på tårnet reduserte den målte korrosiviteten. Prøvene sto plassert på vestsiden av det sørvestre tårnbeinet. Det kan også ha vært tilfellet på Hardangerbrua, hvor prøvene også ble plassert på vestsiden av tårnet. At det ble målt vesentlig høyere korrosivitet på en ledeskovle under brubanen viser at det er store lokale variasjoner i korrosivitet på en konstruksjon (mikroklima). Det er rimelig å anta at skjerming for regn har mye å si, ved at avsatt salt i liten grad blir vasket bort av regn.



Figur 7. Korrosivitet som funksjon av høyde over sjøen på Sotrabrua, Gjemnessundbrua og Hardangerbrua

5.5 Beregnet effekt av klorid på korrosivitet iht ISO 9223

Figur 8 viser korrosivitet beregnet ved Ligning 2 som funksjon av avsatt klorid, når vi har antatt årlig gjennomsnitt for temperatur på 8 °C, relativ fuktighet på 80 % og avsatt SO₂ på 1 mg/m²/døgn. Ved 100 mg/m²/døgn avsatt klorid får vi en korrosivitet på omkring 35 µm/år, hvilket er midt i korrosjonsklasse C3.



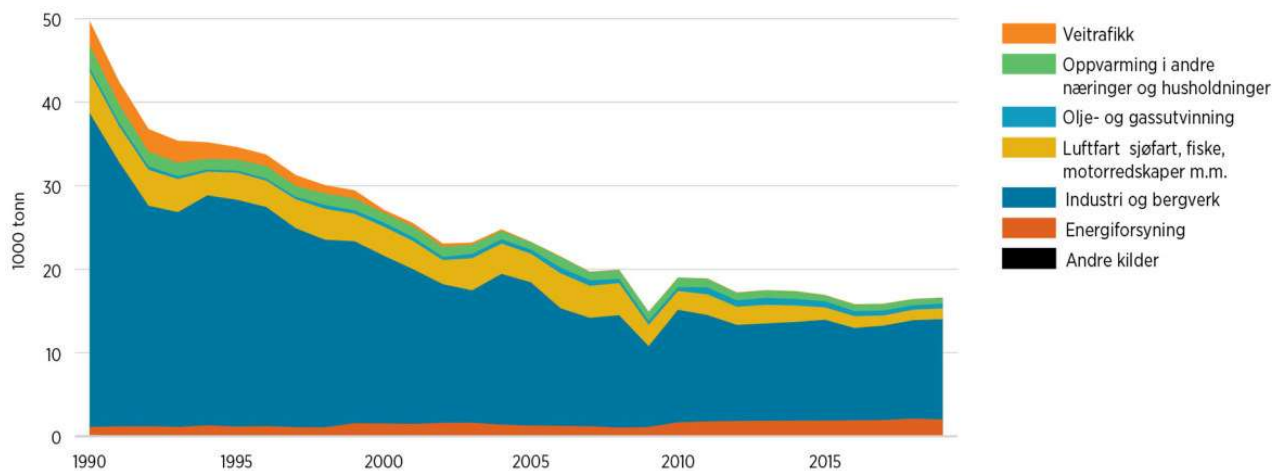
Figur 8. Effekt av klorid på korrosivitet beregnet ved Ligning 2.

6 Betydning av svovelforbindelser på korrosivitet

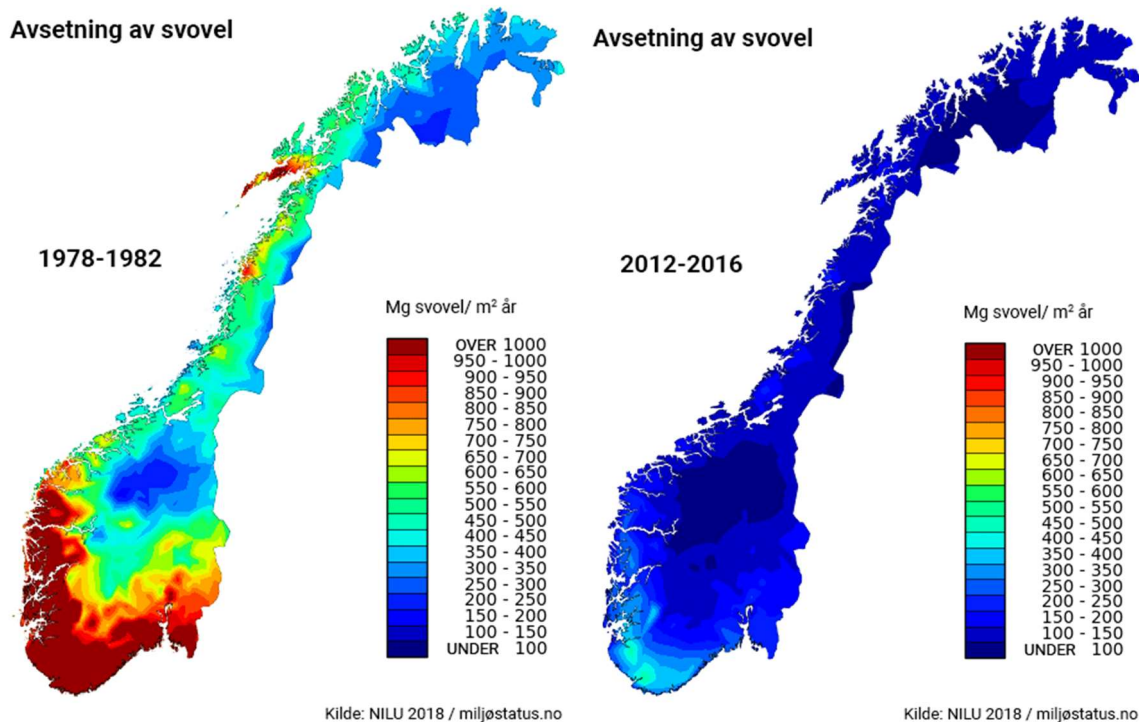
Hovedårsaken til svoveldioksidforurensinger i atmosfæren er forbrenning av fossilt brensel. SO₂ oksideres til SO₃ i atmosfæren, som igjen reagerer med vann og danner svovelsyre, som fører til sur nedbør og korrosjon. Utslippen av SO₂ i Norge har avtatt siden toppen på slutten av 1980-tallet, se Figur 9. Avsetning av svovel i Norge er også avhengig av utslipp i andre land, spesielt i Storbritannia. Konsentrasjonen av SO₂ i atmosfæren i Europa er vesentlig redusert siden 1990 [12], som også påvirker sur nedbør i Norge. Figur 10 viser en modell for avsatt svovel (mg/m²/år) i Norge for perioden 1978-1982 sammenlignet med 2012-2016. Ligningen i ISO 9223 gjelder for 0,7-150 mg/m²/døgn, slik at tallene i Figur 10 må deles på 365 for å kunne brukes i Ligning 2. Figuren for 2012-2016 viser at kun Rogaland og Agder har omkring 1 mg/m²/døgn avsatt svovel, mens resten av landet har vesentlig lavere verdier. Dette er så lavt at det vil ha svært liten påvirkning på korrosiviteten, se Figur 11 som viser korrosivitet som funksjon av avsatt svovel. For at avsatt svovel skal medføre korrosivitet C3 må verdien være omkring 10 mg/m²/døgn. Vi kan derfor trolig se bort fra avsatt svovel når vi skal diskutere variasjon i korrosivitet i Norge. Lokalt ved utslippspunkter kan det ha betydning. De viktigste utslippspunktene er kjemisk prosessindustri, metallproduksjon og raffinerier. Utslipp av SO₂ fra dieselferger kan være stort nok til å ha betydning, men det er ikke undersøkt her. I tunneler kan SO₂ fra eksos oppkonsentreres og eventuelt påvirke miljøet på ei bru direkte utenfor. Utslipet av SO₂ fra veitrafikk har imidlertid gått vesentlig ned siden 1990, se Figur 9, og er i dag på omkring 45 tonn/år. Ytterligere reduksjon er å forvente etter hvert som kjøretøyene elektrifiseres.

Figur 11 viser effekt av SO₂ på korrosivitet. Avsetning av klorid er satt til null for å se på effekten av SO₂ alene. Figuren viser at 1 mg/m²/døgn gir 10 µm/år korrosjon, og følgelig har en effekt på korrosivitet. Ligning 2 er ikke gyldig ved avsetningsrater under 0,7 mg/m²/døgn, hvilket er tilfellet for store deler av Norge, i henhold

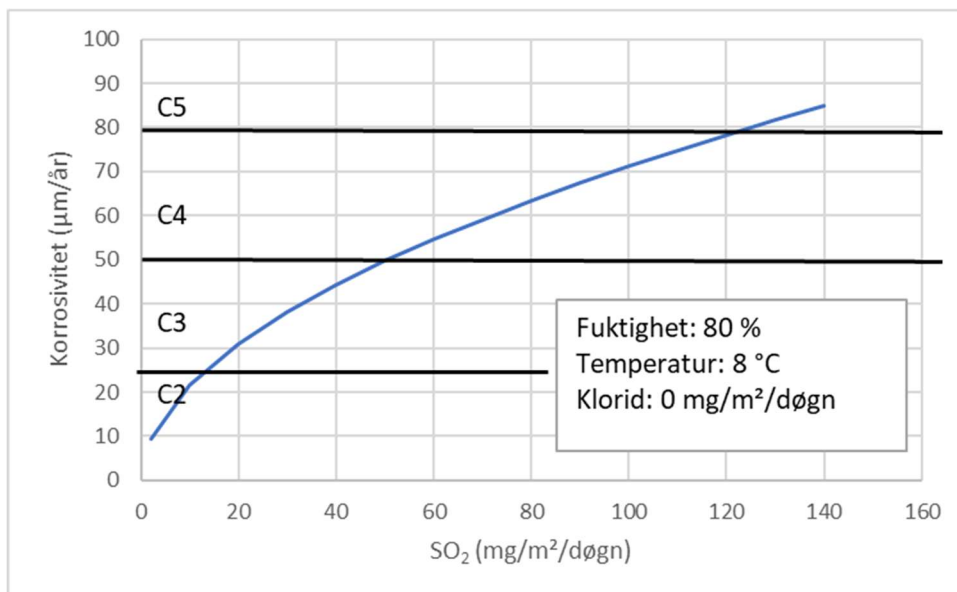
til Figur 10. Effekten av SO₂ på korrosjon i Norge er derfor noe usikker. Områder langt fra sjøen har gitt en korrosjonshastighet på i underkant av 10 µm/år, hvilket i henhold til Figur 11 kan stemme med de avsetningsratene av svovel som er vist i Figur 10.



Figur 9. Utvikling i SO₂-utslipp i Norge. Kilde: Miljøstatus Norge



Figur 10. Avsetning av svovel i Norge i 1978-1982 og 2012-2016. Kilde: Miljøstatus Norge

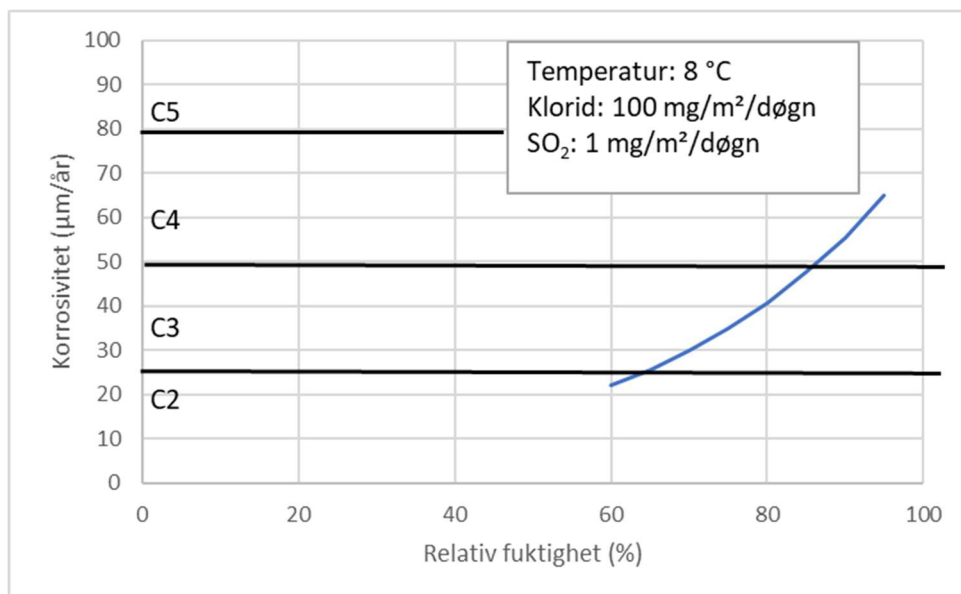


Figur 11. Effekt av avsatt SO₂ på korrosivitet beregnet ved Ligning 2.

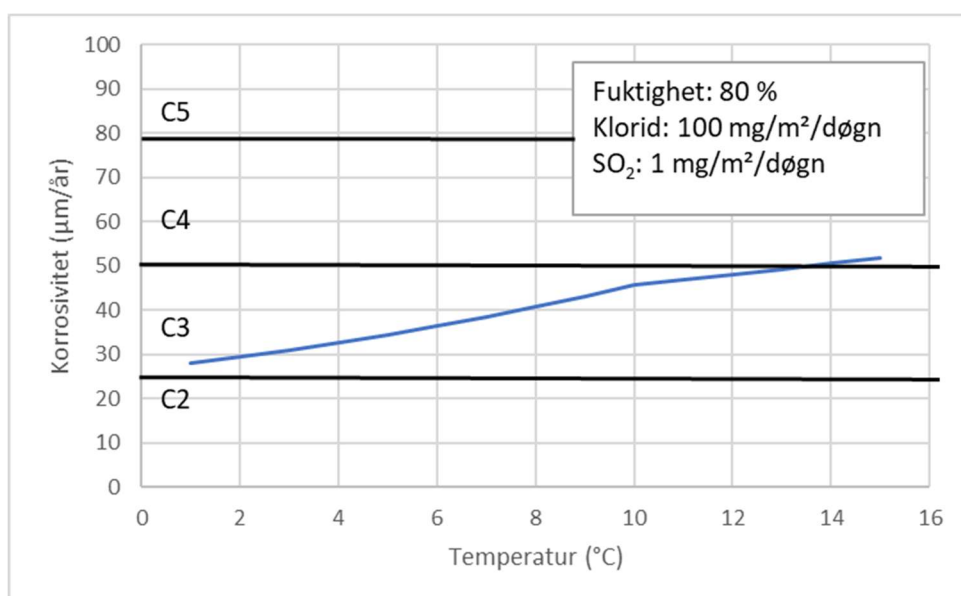
7 Effekt av luftfuktighet og temperatur på korrosivitet

Effekt av gjennomsnittlig relativ luftfuktighet gjennom året er beregnet ved Ligning 2 og vist i Figur 12. Vann er en forutsetning for korrosjon, så det er naturlig at denne parameteren har stor effekt. Måling av korrosjon med sensorer har vist at korrosjonshastigheten er lav når luftfuktigheten er under 80 %. Effekten av gjennomsnittsverdien reflekterer derfor trolig mest hvor stor andel av tiden at luftfuktigheten er over 80 %. Målinger av relativ fuktighet viser at årlig gjennomsnitt ligger på omkring 80 % langs hele den Norske kysten. Denne parameteren forklarer derfor ikke variasjon i korrosivitet på bruene langs kysten.

Effekt av årlig gjennomsnittstemperatur på korrosivitet beregnet ved Ligning 2 er vist i Figur 13. Temperatur er en parameter som kan ha en komplisert effekt på korrosjon. De fleste kjemiske reaksjoner går raskere når temperaturen øker, inkludert korrosjon. Temperaturen vil imidlertid også påvirke den relative luftfuktigheten, enten ved at overflata blir varmere enn lufta (solvarm) eller ved at den relative luftfuktigheten går ned når temperaturen øker ved en gitt mengde vann i lufta. Målinger av korrosjon ved Kjerringvik i Oslofjorden viste at korrosjonen stort sett stoppet opp i sommerhalvåret fordi pent og varmt vær sørget for at prøvene var tørre da [13]. Prøvene sto plassert rett ved sjøen og viste korrosjonsklasse C5 når korrosjonen i løpet av hele året ble målt. Ligning 2 viser at korrosiviteten avtar med temperaturen. Årlig gjennomsnittstemperatur langs kysten varierer fra omkring 0 °C i Nord-Norge til i underkant av 8 °C på Sør- og Østlandet. Figur 13 viser dermed at temperaturen spiller derfor en viss rolle for korrosiviteten langs kysten.



Figur 12. Effekt av luftfuktighet på korrosivitet beregnet ved Ligning 2.



Figur 13. Effekt av årlig gjennomsnittstemperatur på korrosivitet beregnet ved Ligning 2.

8 Korrosivitetsmålinger

Resultater fra korrosivitetsmålinger i prosjektet, samt andre målinger utført mellom 2018 og 2022 er vist i Vedlegg A. Som målingene viser, er korrosiviteten i kategori C2 eller C3 de aller fleste stedene som er undersøkt. Kun prøver som har stått svært nær sjøen ved Sotrabrua og Kjerringvik har høyere korrosjonsklasse. Prøver som har stått nær sjøen, men i le i landskapet som ved Julsundet og Jektevik, eller langt inne i en fjord som på Hardangerbrua, Olavsværn og Hans-Larsaneset, har også lav korrosivitet.

Korrosivitetsmålingene var overraskende lave, men stemmer godt i forhold til mengde avsatt klorid over land langs kysten (Figur 6) og Ligning 2. Figur 6 viser at avsatt klorid raskt faller godt under $100 \text{ mg/m}^2/\text{døgn}$ når vi kommer inn over land eller i fjordene. Ifølge Figur 8 vil $100 \text{ mg/m}^2/\text{døgn}$ avsatt klorid gi korrosjon på omkring $35 \text{ }\mu\text{m}/\text{år}$, det vil si korrosjonsklasse C3. Selv de fleste kystbruer vil følgelig stå i korrosjonsklasse C2 eller C3. De fleste målingene er imidlertid gjort med prøver som har stått fritt eksponert for nedbør, slik at avsatt salt regelmessig har blitt vasket av.

Det er også målt korrosivitet på noen prøver som har stått skjermet for regn. Dette gjelder prøvene under Gjemnessundbrua, under Tjeldsundbrua, under Nessundbrua, og trolig prøvene på tårnet på Sotrabrua.

- Nessundbrua ligger ved Mjøsa, og korrosiviteten under brua var bare $6 \text{ }\mu\text{m}/\text{år}$. Satelittmålingene viser at avsatt klorid ligger på omkring $2 \text{ mg/m}^2/\text{døgn}$ i dette området, slik at atmosfærisk avsatt salt i liten grad er drivende for korrosjon. Vi antar at korrosiviteten på innlandsbruer generelt er C2. Salting av vei kan øke korrosiviteten hvis saltet på en eller annen måte treffer stålet, som på bruer med overliggende fagverk, eller der vann fra brua ikke ledes bort fra underliggende stålkonstruksjon. Dette blir imidlertid ikke diskutert videre her.
- På tårnet på Gjemnessundbrua viste målingene av korrosivitet $14 \text{ }\mu\text{m}/\text{år}$ ved 10 m og $9 \text{ }\mu\text{m}/\text{år}$ ved 70 m høyde. Under brubanen ble det imidlertid målt $47 \text{ }\mu\text{m}/\text{år}$.
- På Tjeldsundbrua ble det målt lav korrosivitet ($11 - 18 \text{ }\mu\text{m}/\text{år}$) i fagverket under brubanen. Det var liten forskjell på prøver på nordsiden, midt under og på sørsiden av fagverket. Målingene viser at det avsettes lite salt under brubanen.
- Korrosivitetsmålingene på tårnet til Sotrabrua var høyere enn tilsvarende på Gjemnessundbrua. Forholdene ellers skulle ikke være så ulike, slik at det er rimelig å anta at det skyldes at prøvene sto skjermet for regn.

9 Korrosivitet på bruer langs kysten

Korrosivitet i Norge bestemmes hovedsakelig av:

- mengde avsatt klorid på stålet
- om overflata regelmessig blir vasket av nedbør
- temperatur (i mindre grad enn de to foregående)

For bruer vil høyde over sjøen ha stor innvirkning fordi det påvirker mengde avsatt klorid. Mengde avsatt SO_2 og relativ luftfuktighet varierer så lite langs kysten at effekten på korrosivitet er tilnærmet konstant.

Klorid kan komme fra saltpartikler i lufta og direkte sjøsprøyt. For stålbruer vil det siste være begrenset til der bølger treffer landkar eller andre deler av konstruksjonen, for eksempel pongtonger på flytebruer.

Når vi observerer at belegget degraderes mye mer på flater under brubanen enn på sidene som vaskes av regn indikerer dette at korrosiviteten varierer fra sted til sted på ei bru. Korrosiviteten er størst på overflater

som er skjermet for regn. Det betyr også at vi ikke kan trekke konklusjoner om degradering av belegg basert på korrosivitetsmålinger på fritt eksponerte prøver alene.

Gitt at de fleste stålbruene har fagverk, avstivningsbærere eller bærebjelker på undersiden av brubanen, betyr det at store arealer malt stål står skjermet for regn. Levetiden til belegget (tid til første større vedlikehold) vil derfor avgjøres av disse overflatene. For å estimere korrosivitet på overflater som er skjermet for regn må vi ta hensyn til følgende parametere:

- Mengde klorid avsatt på bakkenivå der brua står
- Høyde over sjøen

Figur 6 viser mengde avsatt klorid på havnivå/bakkenivå for Midt-Norge. Tallene viser at:

- Saltpartikler i lufta dannes hovedsakelig på åpent hav. Fjorder og sund bidrar lite. For eksempel er mengden avsatt salt i Trondheimsfjorden bare omkring 10 mg/m²/døgn.
- På den ytterste kystlinja ligger verdiene på omkring 100 mg/m²/døgn.
- Mengden avsatt salt avtar med avstand til den ytterste kystlinja. Hvor raskt det avtar er en komplisert funksjon av landskap og vindretninger.

For å kunne anslå korrosivitet må vi gjøre noen forenklerende antagelser om mengde avsatt klorid som funksjon av avstand til den ytre kystlinja. Dette kan vi gjøre siden saltpartiklene hovedsakelig dannes over åpent hav. Tabell 2 viser forslag til forenklinger, der vi inkluderer klimasonene som er benyttet i Brutus. Bruer over elv som ligger mer enn 1 km fra sjøvann ligger ikke i kystmiljø.

Tabell 2. Forenklet anslag av mengde avsatt salt ved ytre kystlinje, sund mellom øyer eller øyer og fastland, og fjorder.

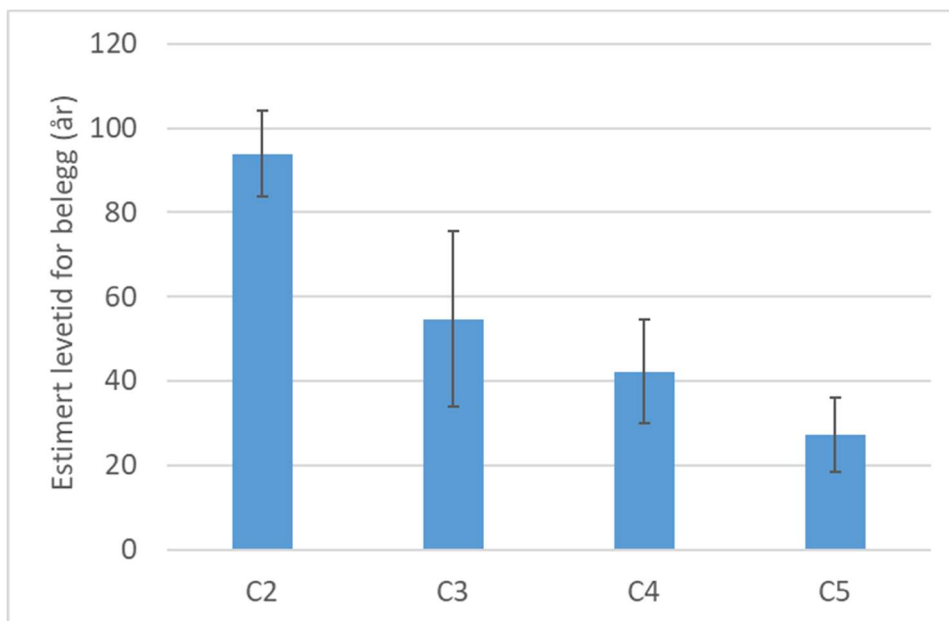
	Klimasone i Brutus	Avstand fra ytre kyst	Mengde avsatt salt
Ytre kyst	Ekspontert kyst	0 – 5 km	100 mg/m ² /døgn
Sund	Kyst	5 – 30 km	50 mg/m ² /døgn
Fjord	Indre kyst	> 30 km	10 mg/m ² /døgn

Basert på disse forenklingene, målingene av korrosivitet og erfaringer med levetid til dupleksbelegg på bruer foreslår vi inndeling i korrosivitetsklasser basert på klimasoner og høyde over sjø, som vist i Tabell 3.

Levetiden til dupleksbelegg bestående av TSZ og vegvesenets malingsbelegg spesifisering 115-118 viser en klar sammenheng med korrosivitetsklasse, som vist i Figur 14. For moderne malingsbelegg basert på epoksy og polyuretan har vi ikke nok erfaringsdata til å lage en tilsvarende figur. Korrosivitetsklasse vil også avgjøre hvor raskt stålet vil korrodere i en beleggskaide, og dermed hvor raskt vedlikehold av belegget må igangsettes.

Tabell 3. Korrosivitetsklasse for kystbruer som funksjon av klimasone og høyde

Klimasone	Høyde	Korrosjonsklasse
Ytre kyst / eksponert kyst	< 25	C5
	25 – 40	C4
	> 40	C3
Sund / kyst	< 15	C5
	15 – 25	C4
	25 – 50	C3
	> 50	C2
Fjord / indre kyst	< 5	C4
	5 – 10	C3
	> 10	C2
Innland	Alle	C2



Figur 14. Sammenheng mellom korrosivitetsklasse og beleggets estimerte eller erfarte levetid [14]

10 Referanser

- [1] ISO 9223, Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Classification, The International Organization for Standardization, Geneva, 2012.
- [2] B. Chico, D. de la Fuente, I. Díaz, J. Simancas, M. Morcillo, Annual Atmospheric Corrosion of Carbon Steel Worldwide. An Integration of ISOCORRAG, ICP/UNECE and MICAT Databases, Materials (Basel) 10 (2017) 601. <https://doi.org/10.3390/ma10060601>.
- [3] D. Knotkova, K. Kreislova, S. Dean, ISOCORRAG International Atmospheric Exposure Program: Summary of Results, ASTM (2010).
- [4] ISO 9224, Corrosion of metals and alloys. Corrosivity of atmospheres. Guiding values for the corrosivity categories, International Organization for Standardization, Geneva, 2012.
- [5] ISO 9225, Corrosion of metals and alloys. Corrosivity of atmospheres. Measurement of environmental parameters affecting corrosivity of atmospheres, International Organization for Standardization, Geneva, 2012.
- [6] ISO 9226, Corrosion of metals and alloys — Corrosivity of atmospheres — Determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity, Geneva, 2012.
- [7] J.W. Fitzgerald, Marine aerosols: A review, Atmospheric Environment. Part A. General Topics 25 (1991) 533–545. [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(91\)90050-H](https://doi.org/10.1016/0960-1686(91)90050-H).
- [8] David H. Richter, Fabrice Veron, Ocean spray: An outsized influence on weather and climate, 69 (2016) 34–39. <https://doi.org/10.1063/pt.3.3363>.
- [9] S. Feliu, M. Morcillo, B. Chico, Effect of Distance from Sea on Atmospheric Corrosion Rate, CORROSION 55 (1999) 883–891. <https://doi.org/10.5006/1.3284045> %J Corrosion.
- [10] K.E. Johnson, J.F. Stanners, Characterization of Corrosion Test Sites in the Community,” , 1981)., Commission of the European Communities, Directorate-General Information Market and Innovation, Luxembourg, 1981.
- [11] O.Ø. Knudsen, Korrosivitet på bruer, SINTEF Rapport nr. 2018:01188, Trondheim, 2022.
- [12] M. Esmaily, D.B. Blücher, R.W. Lindström, J.-E. Svensson, L.G. Johansson, The Influence of SO₂ on the Corrosion of Mg and Mg-Al Alloys, Journal of The Electrochemical Society 162 (2015) C260. <https://doi.org/10.1149/2.0801506jes>.
- [13] B. Daneshian, D. Höche, O.Ø. Knudsen, A.W.B. Skilbred, Effect of climatic parameters on marine atmospheric corrosion: correlation analysis of on-site sensors data, Npj Materials Degradation 7 (2023) 10. <https://doi.org/10.1038/s41529-023-00329-6>.
- [14] O.Ø. Knudsen, H. Matre, C. Dørum, M. Gagné, Experiences with Thermal Spray Zinc Duplex Coatings on Road Bridges, Coatings 9 (2019) 371. <https://doi.org/10.3390/coatings9060371>.

A Korrosivitetsmålinger i Norge utført mellom 2018 og 2023

Sted	Breddegrad	Lengdegrad	Avstand til Sjø (m)	Høyde over Sjø (m)	Korrosivitet (µm/år)	Korrosjons-klasse
E69 Nordkapp	71.1575	25.7742	500	275	45	C3
E69 Vedbotn	70.7765	25.6297	30	10	24	C2
Fv 7940 Arnøya	70.0351	20.5397	100	20	30	C3
E6 Gandvikbakken	70.0278	29.1303	500	84	10	C2
Fv 866 Skattørsund	70.0054	20.8981	200	20	16	C2
Fv 863 Gamnes	69.9059	19.4767	50	20	34	C3
E6 Kvæangsfjellet	69.8978	21.6073	1000	390	13	C2
E6 Djupvik	69.7537	20.506	500	55	14	C2
E6 Nordnes	69.585	20.3988	50	18	20	C2
Hans-Larsanaset	69.5532	19.1597	5	5	11	C2
Olavsvern	69.5303	19.0142	10	5	8	C2
Fv 862 Senjahopen	69.4992	17.5132	50	5	26	C3
Tjeldsundbrua, sørside	68.6269	16.5921	0	40	11	C2
Tjeldsundbrua, midt under	68.6269	16.5921	0	40	13	C2
Tjeldsundbrua, nordside	68.6269	16.5921	0	40	18	C2
E6 Øyjord	68.4682	17.4818	300	60	22	C2
E6 Skjomenbrua	68.3713	17.2506	100	30	11	C2
Fv 835 Engeløybrua	67.9048	15.1813	20	10	23	C2
Fv 17 Saltstraumbua	67.2233	14.6111	0	47	20	C2
E6 Tussvika	67.2230	15.4125	300	90	13	C2
Fv 17 Åselibua 2	67.1992	14.6308	0	15	21	C2
Fv 7438 Sandhornøya	67.0831	14.2065	500	50	16	C2
Fv 17 Torsvika	66.8816	13.6636	20	10	19	C2
Fv 17 Sjonfjellet	66.2866	13.2883	300	300	23	C2
E6 Yttervika	66.2298	13.8728	100	20	25	C3
Fv 17 Våg	65.2623	12.1443	1000	25	23	C2
E39 Valsøyfjorden	63.1442	8.56021	50	20	18	C2
Rv 70 Kristiansund v/Rensvik	63.0848	7.7978	200	20	25	C3
Gjemnessundbrua tårn	62.9713	7.7794	0	10 - 70	14 – 9	C2
Gjemnessundbrua ledeskovl	62.9713	7.7794	0	40	48	C3
Gjemnessundbrua rekkverk	62.9713	7.7794	0	40	27	C3
Fv 62 Eidsøra	62.7997	8.1661	500	10	9	C2
Julsundet, 2 m	62.7317	6.9381	0	2	27	C3
Julsundet, > 10 m	62.7317	6.9381	0	>10	19	C2
E136 Tresfjordbrua	62.6112	7.1135	0	32	24	C2
Fv 659 Lepsøybrua	62.5948	6.2537	0	40	21	C2
Fv 64 Isfjorden	62.5710	7.783	20	5	13	C2
Fv 5957 Giskebrua	62.5082	6.0762	0	20	25	C3
E39 Dragsundet	62.4913	6.72544	20	5	17	C2
E136 Ålesund	62.4703	6.2038	50	20	17	C2

E39 Solavågen fergekai	62.4135	6.3280	0	5	27	C3
Fv 5876 Rundebrua	62.3792	5.6333	0	20	27	C3
Fv 654 Herøybrua	62.3195	5.7209	0	32	28	C3
Rv 15 Måløybrua	61.9292	5.1213	0	10	20	C2
Fv 57 Mongstad sør	60.7928	5.0218	500	40	29	C3
Nessundet bru, vestsida	60.7572	10.9445	Mjøsa		25	C3
Nessundet bru, under	60.7572	10.9445	Mjøsa		6	C2
Nessundet bru, østside	60.7572	10.9445	Mjøsa		12	C2
Nordhordlandsbrua	60.5225	5.2671	0	10	38	C3
Hardangerbrua	60.4792	6.8300	0	5	19	C2
Hardangerbrua	60.4792	6.8300	0	15	9	C2
E39 Vågsbotn (Åsane)	60.4768	5.3481	90	50	25	C3
Sotrabra	60.3727	5.1662	0	5	144	C5
Sotrabra	60.5225	5.2671	0	15	68	C4
Sotrabra	60.5225	5.2671	0	25	40	C3
Sotrabra	60.5225	5.2671	0	35	31	C3
Sotrabra	60.5225	5.2671	0	45	27	C3
Sotrabra	60.5225	5.2671	0	45	26	C3
Austefjorden Fergekai	60.1783	5.0939	0	3	31	C3
E39 Mehammar	59.9127	5.488	200	60	Ikke ferdig	
Langenuen, Jektevik	59.8864	5.5213	0	7 - 60	15	C2
Stordabra	59.7465	5.4025	0	18	Ikke ferdig	
Bømlabra	59.7415	5.3795	0	36	Ikke ferdig	
Fv 520 Svandalsfossen	59.6412	6.2893	50	10	Ikke ferdig	
E39 Aksdal Sør	59.418	5.4485	3000	18	Ikke ferdig	
Fv 547 Ferkingstad	59.1895	5.1837	500	35	Ikke ferdig	
E39 Rennesøy	59.1222	5.68	50	10	30	C3
Kjerringvik nedre, 2020	59.0325	10.2219	5	2	137	C5
Kjerringvik nedre, 2022	59.0325	10.2219	5	2	195	C5
Kjerringvik nedre, 2023	59.0325	10.2219	5	2	99	C5
Kjerringvik øvre, 2020	59.0325	10.2219	15	5	121	C5
Kjerringvik øvre, 2022	59.0325	10.2219	15	5	146	C5
Kjerringvik øvre, 2023	59.0325	10.2219	15	5	74	C4
Rv13 Jørpeland	59.0147	6.0491	200	20	28	C3
Rv 509 Sundekrossen	58.9622	5.6147	200	30	28	C3
Fv 44 Kvasheim	58.5505	5.6815	300	20	39	C3



Statens vegvesen
Pb. 1010 Nordre Ål
2605 Lillehammer

Tlf: (+47) 22 07 30 00

firmapost@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

Tryggere, enklere og grønnere reisehverdag