



Rustrege stål. Korrosjons- hastighet i ulike miljøer

FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017-2021

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 711



Tittel

Rusttrege stål. Korrosjonshastighet i ulike miljøer

Undertittel

FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017-2021

Forfatter

Ole Øystein Knudsen

Avdeling

Konstruksjoner

Seksjon

Konstruksjonsteknikk

Prosjektnummer

L10114

Rapportnummer

Nr. 711

Prosjektleder

Bård M. Pedersen

Godkjent av

Bård M. Pedersen

Emneord

Rusttrege stål, korrosjonshastighet, miljø, klorider, levetid

Sammendrag

Rusttrege stål er konstruksjonsstål som er tilsatt små mengder kobber og krom for å utvikle et stabilt, tett og beskyttende sjikt av rust. Fordelen med slike stål er at de kan gi en levetid på 100 år uten overflatebehandling. Følgelig vil det heller ikke være kostnader for vedlikehold av belegget. Denne typen stål kan imidlertid ikke benyttes i alle typer miljø, og spesielt eksponering for klorider vil bryte ned det beskyttende sjiktet av rust slik at korrosjonshastigheten øker. Denne rapporten oppsummerer erfaringer og testresultater med rusttrege stål i Norge og andre land, samt retningslinjer fra andre land for bruk i bruer. Rapporten gir også forslag til retningslinjer for bruk av rusttrege stål i Norge.

Title

Weathering steels. Corrosion rate in different environments

Subtitle

The R&D program Better bridge maintenance 2017-2021

Author

Ole Øystein Knudsen

Department

Structures

Section

Structural Engineering

Project number

L10114

Report number

No. 711

Project manager

Bård M. Pedersen

Approved by

Bård M. Pedersen

Key words

Weathering steels, corrosion rate, environment, chlorides, durability

Summary

Weathering steels are structural steels that have been added small amounts of copper and chromium to develop a stable, dense and protective layer of rust. The advantage of such steels is that they can provide a service life of 100 years without surface treatment. Consequently, there will also be no costs for maintenance of coatings. However, such steels cannot be used in all types of environments, and especially exposure to chlorides will break down the protective layer of rust so that the corrosion rate increases. This report summarizes experiences and test results with weathering steels in Norway and other countries, as well as guidelines from other countries for use in bridges. The report also proposes guidelines for use of weathering steels in Norway.

Forord

Denne rapporten er utarbeidet av FoU-programmet Bedre bruvedlikehold (2017–2021). Bedre bruvedlikehold skal gjennom ny kunnskap bidra til at Statens vegvesen kan optimalisere ressursbruken knyttet til inspeksjon, vedlikehold og forvaltning av bruer.

Bedre bruvedlikehold består av fire prosjekter:

- Prosjekt 1: Forvaltningsverktøy for bruer
- Prosjekt 2: Armeringskorrosjon i betong
- Prosjekt 3: Alkalireaksjoner i betong
- Prosjekt 4: Vedlikehold av stålbruer

Bedre bruvedlikehold ledes av Bård M. Pedersen, Vegdirektoratet.

Denne rapporten tilhører Prosjekt 1 som ledes av Knut Ove Dahle. Prosjektet er overordnet rettet mot utvikling av verktøy for innsamling av tilstandsdata, estimering av skadeomfang og videre skadeutvikling, teknisk og økonomisk vurdering av tiltak, samt forvaltningsverktøy som prosedyrer, datasystemer og dokumentasjon.

Rapporten er skrevet av Ole Øystein Knudsen, SINTEF Industri. Denne rapporten oppsummerer erfaringer og testresultater med rusttrege stål i Norge og andre land, samt retningslinjer fra andre land for bruk i bruer. Rusttrege stål er konstruksjonsstål som er tilsatt små mengder kobber og krom for å utvikle et stabilt, tett og beskyttende sjikt av rust. Fordelen med slike stål er at de kan gi en levetid på 100 år uten overflatebehandling. Følgelig vil det heller ikke være kostnader for vedlikehold av belegget. Denne typen stål kan imidlertid ikke benyttes i alle typer miljø, og spesielt eksponering for klorider vil bryte ned det beskyttende sjiktet av rust slik at korrosjonshastigheten øker.

2020:01434 - Åpen

Rapport

Rusttrege stål

Korrosjonshastighet i ulike miljøer

Forfatter(e)

Ole Øystein Knudsen



Rapport

Rusttrege stål

Korrosjonshastighet i ulike miljøer

EMNEORD:
Materialteknologi;
Korrosjon; Rusttrege
stål; Bru;VERSJON
2.0DATO
2021-03-03FORFATTER(E)
Ole Øystein KnudsenOPPDRAGSGIVER(E)
Statens vegvesenOPPDRAGSGIVERS REF.
Cato DørumPROSJEKTNR
102023819ANTALL SIDER OG VEDLEGG:
36 inkl. vedlegg

SAMMENDRAG

Overordnet mål med prosjektet er å utarbeide retningslinjer og anbefalinger for bruk av rusttrege stål i konstruksjoner og utrustning. Delmål har vært:

- Å undersøke sammenhengen mellom eksponeringsmiljø og korrosjonshastighet
- Samle anbefalinger, erfaringer og testresultater med rusttrege stål, fra Norge og internasjonalt

Erfaringer fra Norge og internasjonalt, samt omfattende felttesting, har vist at rusttrege stål får uakseptabelt høy korrosjonshastighet ved eksponering mot klorid i kystmiljø eller langs vintersaltede veier.

Rusttrege stål i lastbærende konstruksjoner bør ikke brukes i kystmiljø. Korrosiviteten bør ikke overstige kategori C2, målt i henhold til ISO 9226. Deponering av klorid bør ikke være høyere enn 5 mg/m²/døgn, målt i henhold til ISO 9225. Langs vintersaltede veier bør det ikke brukes rusttrege stål i lastbærende konstruksjon hvis veisalt deponeres på konstruksjonen.

UTARBEIDET AV
Ole Øystein Knudsen

SIGNATUR

KONTROLLERT AV
Catalina H. Musinoi Hagen

SIGNATUR

GODKJENT AV
Ragnar Fagerberg

SIGNATUR


Ragnar Fagerberg (Mår 4, 2021 12:06 GMT+1)RAPPORTNR
2020:01434ISBN
978-82-14-06419-3GRADERING
ÅpenGRADERING DENNE SIDE
Åpen

Historikk

VERSJON	DATO	VERSJONSBEKRIVELSE
1.0	2021-01-12	Sluttrapport

2.0	2021-03-03	Tilført en setning om retningslinjer i sammendraget på forsiden til Statens vegvesen. Flyttet seksjon 6.4 til kapittel 7.
-----	------------	---

Innholdsfortegnelse

1	Innledning	5
1.1	Bakgrunn	5
1.2	Målsetning	5
2	Om rusttrege stål	6
2.1	Sammensetning av rusttrege stål	6
2.2	Jernoksider som dannes ved korrosjon	7
2.3	Dannelse og sammensetning av beskyttende oksider på rusttrege stål	7
2.4	Korrosjonshastighet som funksjon av tid.....	9
2.5	Avskallende korrosjonsprodukter.....	11
3	Internasjonale retningslinjer og anbefalinger for bruk av rusttrege stål	13
3.1	Storbritannia	13
3.2	USA.....	13
3.3	Australia	14
3.4	Japan	14
3.5	Norden	14
4	Felterfaringer med bruk av rusttrege stål	15
4.1	Vegvesenets egne erfaringer	15
4.2	Publiserte erfaringer fra andre land	16
4.2.1	USA	16
4.2.2	Japan.....	17
4.2.3	Canada	17
4.2.4	Tsjekia	17
5	Testing av rusttrege stål	18
5.1	Vegvesenets tester av rusttrege stål	18
5.1.1	Kiwa felttest ved Espaa 2014-2020	18
5.1.2	SINTEF felttester 2016-2020.....	19
5.2	Publiserte korrosjonstester av rusttrege stål.....	20
5.2.1	Effekt av klorid på korrosjonshastigheten.....	20
5.2.2	Effekt av SO ₂ på korrosjonshastigheten	22
5.2.3	Effekt av høy fuktetid	23
5.2.4	Effekt av legeringselementer.....	23
6	Diskusjon.....	26
6.1	Relevante begrensninger for bruk i bruer og veitrustning i Norge.....	26
6.2	Grenseverdier	27

6.2.1	Korrosivitet	27
6.2.2	Klorid.....	29
6.2.3	Svoveloksider	29
6.3	Valg av legering.....	29
7	Forslag til retningslinjer for bruk av rusttrege stål.....	30
7.1	Miljøparametere	30
7.2	Valg av legering.....	30
7.3	Bruksområde for rusttrege stål.....	30
7.4	Konstruktiv utførelse	30
8	Referanser.....	34
A	Korrosivitetsklasser	36

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Rusttrege stål er stål som er levert med kobber, krom og eventuelt nikkel eller små mengder fosfor for å utvikle tette og beskyttende jernoksider, som reduserer korrosjonshastigheten til et nivå der ytterligere korrosjonsbeskyttelse ikke er nødvendig. Innholdet av kobber og krom er typisk til sammen omkring 1 %. Rusttrege stål kalles også værbestandige stål, "weathering steel" på engelsk og er kjent under produktnavnet COR-TEN® utviklet av United States Steel Corporation. De er definert i standardene ASTM A-606, A242, A588 og A709, og EN 10025. I løpet av 1980-tallet ble det i Japan utviklet rusttrege stål med omkring 3 % nikkel for bedre motstand mot klorid. Disse er foreløpig ikke beskrevet i noen standard.

Det er etter hvert opparbeidet en god del erfaring med bruk av rusttrege stål internasjonalt, og også i Norge, som viser at eksponeringsforholdene har stor innvirkning på korrosjonshastigheten til materialene. Generelt er det rapportert om høy korrosjon på ubehandlede rusttrege stål i marine miljøer, langs vintersaltede veier, miljøer med konstant høy fuktighet, og i industriområder med kjemiske forurensninger. Derimot er rusttrege stål et godt valg med tanke på både kostnader og miljø når forholdene ligger til rette for det, både med tanke på design og type miljø.

1.2 Målsetning

Overordnet mål med prosjektet er å utarbeide retningslinjer og anbefalinger for bruk av rusttrege stål i konstruksjoner og utrustning. Delmål har vært:

- Å undersøke sammenhengen mellom eksponeringsmiljø og korrosjonshastighet
- Samle anbefalinger, erfaringer og testresultater med rusttrege stål, fra Norge og internasjonalt

2 Om rusttrege stål

Det er skrevet flere review-artikler som sammenfatter egenskaper og testresultater for rusttrege stål, for eksempel [1-4], og Teknologisk Institutt har tidligere skrevet en rapport på oppdrag for Statens vegvesen i 2011 [5]. Dette kapitlet er en oppsummering av sammensetning, funksjon og egenskaper til rusttrege stål basert på publisert litteratur.

Korrosjon på rusttrege stål er avhengig av den generelle korrosiviteten til eksponeringsmiljøet. Bilag A viser kategoriene for korrosivitet (C1 – CX) definert i ISO 9223 [6].

2.1 Sammensetning av rusttrege stål

Flere standarder angir sammensetning for rusttrege stål, med en ufullstendig oversikt i Tabell 1. Tabellen angir maksimal konsentrasjon for de ulike elementene (">" angir minimum konsentrasjon). I tillegg tilsettes ofte mikrolegeringselementer som Al, V, Nb, Ti og N.

Tabell 1. Ulike standarder for rusttrege stål. Maks innhold av element (> angir minimum innhold)

Standard	Grade	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr						
ASTM A242	Cor-Ten A	0,11	0,31	0,092	0,020	0,42	0,30	0,31	0,82						
ASTM A588	Cor-Ten B	0,13	1,03	0,006	0,019	0,25	0,33	0,015	0,56						
ASTM A606	Type IV	0,22	1,25	0,04	0,04	-	>0,2	-	-						
	Type V	0,09	0,95	0,025	0,010	0,40	0,98	0,76	0,30						
ASTM A709	36	0,27	1,35	0,040	0,050	0,40	>0,2	-	-						
	50	0,23	1,35	0,030	0,030	0,40	-	-	-						
	50W Type A	0,19	1,25	0,030	0,030	0,65	0,40	0,40	0,65						
	HPS 50W	0,11	1,50	0,020	0,006	0,50	0,40	0,40	0,70						
EN 10025-5	S355J0WP	0,12	1,0	0,150	0,035	0,75	0,55	-	1,25						
	S355J2WP				0,030										
	S355J0W	0,16	1,5	0,035	0,035	0,50	0,55	-	0,8						
	S355J2W				0,030										
	S355K2W														
	S355J4W				0,025										
	S355J5W														
	S420J0W				0,20					1,35	0,035	0,035	0,65	-	-
	S420J2W	0,030													
	S420K2W														
	S420J4W	0,025													
	S420J5W														
	S460J0W	1,40	0,035	0,035		-	-	-	-						
	S460J2W			0,030											
S460K2W															
S460J4W	0,025														
S460J5W															
JIS G 3114 NAW-TEN	12-400	0,18	1,25	0,035	0,035	0,65	1,0	1,70	0,08						
	12-490		1,40												
	12-570		1,40												
	15-400		1,25												
	15-490/570		1,40												

2.2 Jernoksider som dannes ved korrosjon

Metallisk jern kan oksideres til to oksidasjonstilstander, toverdig jern Fe^{2+} og treverdig jern Fe^{3+} . I korrosjonsreaksjonen for metallisk jern antar vi at det først dannes Fe^{2+} , og at dette siden delvis oksideres videre til Fe^{3+} i en reaksjon med oksygen. Disse to ionene kan danne oksider og hydroksider, og disse igjen kan ha ulike krystallstrukturer. Det vi forenklet kaller rust er derfor en kompleks blanding av jernioner i ulike oksidasjonstilstander, felt ut som oksider og hydroksider med ulike krystallstrukturer. Tabell 2 viser en oversikt over de fleste jernoksidene som kan dannes under korrosjon av stål. Andre ioner som er tilgjengelig, f.eks. karbonat og klorid, vil gå inn i oksidet og bidra til dannelse av enda flere forbindelser. I tillegg vil legeringselementer fra stålet substituere jernionene i oksidet, hvilket er det som skjer ved korrosjon av rusttrege stål.

Ulike analysemetoder blir brukt for å analysere korrosjonsproduktene, som Ramanspektroskopi, røntgendiffraksjon (XRD) og Mösbauerspektroskopi. De ulike metodene har ulik sensitivitet og evne til å undersøke de ulike fasene som er listet opp i Tabell 2. For eksempel er ikke XRD i stand til å karakterisere amorf eller nano-krystallinsk rust. Dette bidrar trolig til en viss forvirring om betydningen av de ulike fasene for korrosjonsbeskyttelsen. Størrelsen på krystallene i rustsjiktet har trolig også betydning for beskyttelsen. De fleste er enige om at $\alpha\text{-FeOOH}$ bidrar til korrosjonsbeskyttelsen, men det ser ut til at små krystaller i størrelsesorden <15 nm gir bedre beskyttelse enn større krystaller [7].

Noen av oksidene danner tette filmer som hefter godt til underlaget, mens andre er svake og løstsittende. De første bidrar til korrosjonsbeskyttelse, mens de siste ikke gjør det. Ved overmaling vil dessuten løstsittende oksider hindre eller redusere heft og føre til at belegget brytes ned etter kort tid.

Tabell 2. Jernoksider som kan dannes ved korrosjon av stål

Navn	Formel	Beskrivelse	Farge
Wüstitt	FeO	Ustabil, oksiderer videre til Fe^{3+}	Svart
Jern(II)hydroksid	$\text{Fe}(\text{OH})_2$	Ustabil, oksiderer videre til Fe^{3+}	Grønn-svart
Magnetitt	Fe_3O_4	God halvleder og kan bidra til økt korrosjon	Svart
Hematitt	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$		Rød-brun
Maghemitt	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Trolig lite beskyttende	Brun-blå
Goethitt	$\alpha\text{-FeOOH}$	Tett og beskyttende.	Rød til svart
Akaganeitt	$\beta\text{-FeOOH}$	Lite beskyttende	
Lepidokrocitt	$\gamma\text{-FeOOH}$	Lite beskyttende	Rød-oransje
Feroxihyte	$\delta\text{-FeOOH}$	Lite beskyttende	Brun
Amorf rust	Sammensatt	Trolig beskyttende	

2.3 Dannelse og sammensetning av beskyttende oksider på rusttrege stål

Undersøkelse av oksidet på rusttrege stål eksponert i mange år har vist at det etter hvert dannes en struktur bestående av to lag. I starten dannes det hovedsakelig $\gamma\text{-FeOOH}$, men over tid konverteres dette delvis til et indre lag som hovedsakelig består av $\alpha\text{-FeOOH}$ som er tett og korrosjonsbeskyttende. Det ytterste laget består i stor grad av $\gamma\text{-FeOOH}$ og bidrar lite til korrosjonsbeskyttelsen. I tillegg substitueres Fe^{3+} i $\alpha\text{-FeOOH}$ med Cr^{3+} , hvilket bidrar til å stabilisere oksidet og gjøre det tettere og mer beskyttende. Figur 1 viser et tverrsnitt av overflateoksid på rustregt stål etter 5 år eksponering, der vi tydelig kan se at oksidet består av ulike faser. Overgangen fra $\gamma\text{-FeOOH}$ til kromsubstituert $\alpha\text{-FeOOH}$ tar noen få år slik at

korrosjonshastigheten er omtrent like høy som for vanlig konstruksjonsstål det første året, før den gradvis avtar.

Korrosjonshastigheten har vist seg å korrelere med det relative forholdet mellom α -FeOOH og γ -FeOOH (α/γ), som vist i Figur 2 (b) [3, 8]. Figur 2 (a) viser hvordan forholdet øker som funksjon av tid. Det er også avhengig av eksponeringsforholdene og legeringssammensetning, hvilket ikke kommer frem av figuren.

Det er vist at det i kloridholdig miljø til en viss grad vil dannes β -FeOOH i stedet for γ -FeOOH, og at mengden øker med konsentrasjonen av klorid [9-11]. β -FeOOH konverteres ikke til α -FeOOH, men heller til Fe_3O_4 og $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, hvilket antas å være den viktigste årsaken til at korrosjonshastigheten stabiliseres på et høyt nivå i kloridholdig miljø. Siden oksidet nå inneholder mye av andre faser, er ikke α/γ forholdet beskrivende for korrosjonshastigheten lenger. I stedet benyttes forholdet α/γ^* , der γ^* inkluderer samtlige faser i oksidet som ikke er beskyttende:

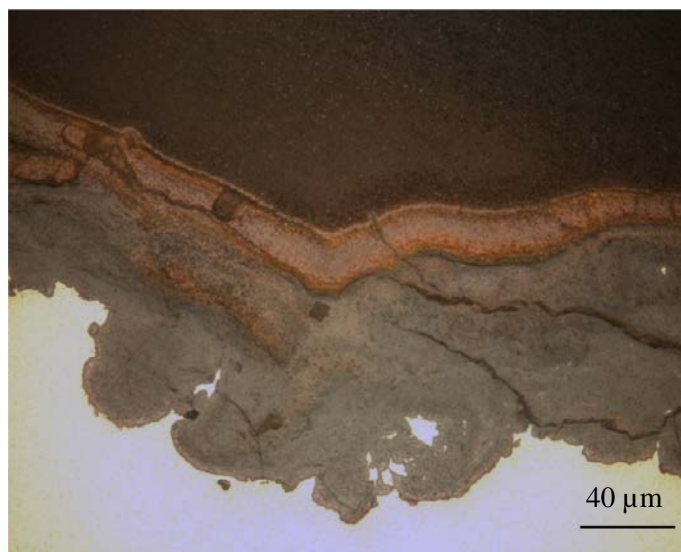
$$\alpha/\gamma^* = \alpha/(\gamma+\beta+S)$$

der S (spineller) er mengden Fe_3O_4 og $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Det er også hevdet at Fe_3O_4 er beskyttende og heller burde stå over brøkstreken sammen med α -FeOOH [12]:

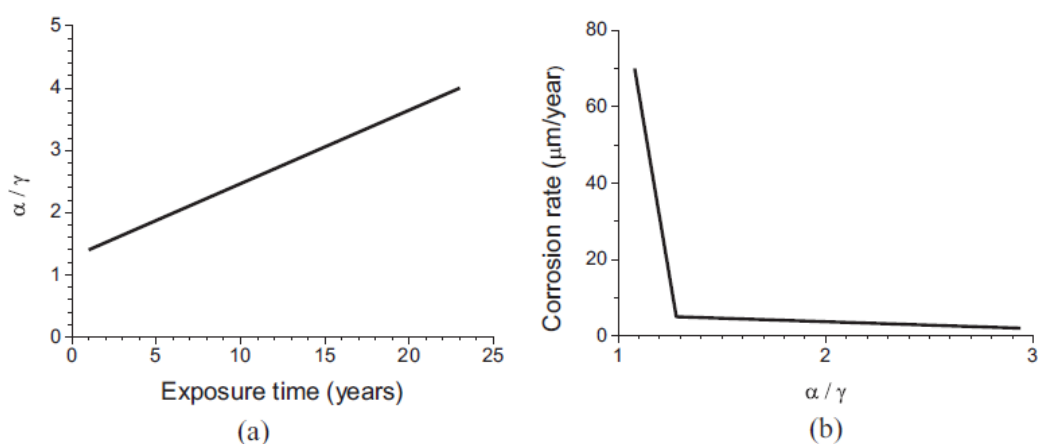
$$\alpha^*/\gamma^* = (\alpha+S)/(\gamma+\beta)$$

Tykkelsen på rustlaget varierer langs overflata, og det er da rimelig å anta at områder med tynt oksidsjikt inneholder mer av de oksider som er beskyttende. Asami et al. eksponerte tre ulike ståltypen (normalt C-stål, S355W rusttregt stål, og et kobberholdig stål) under ei bru lokalisert 1,6 km fra kysten i 17 år og analyserte oksidene. De fant at tynne oksider gjerne hadde høyere konsentrasjon av Fe_3O_4 og lavere konsentrasjon av β -FeOOH [13]. De antok at Fe_3O_4 i liten grad bidrar til korrosjonsbeskyttelsen, slik at det heller var fravær av β -FeOOH som var gunstig. Uten tilstedeværelse av klorid antok de at maksimal tykkelse på oksidet var omkring 50 μm . Med klorid til stede ble det funnet vesentlig tykkere oksider, i stor grad bestående av β -FeOOH. Dannelsen av β -FeOOH ser ut til å skje kun der det er tilstedeværelse av klorid.

For at det beskyttende oksidet skal dannes, må ståloverflata tørke ut med jevne mellomrom. Luling Bridge i USA har to tårn av rusttregt stål type ASTM A588, der det ble funnet løstsittende korrosjonsprodukter og for høy korrosjonshastighet på innsiden av tårnene bare 7 år etter at brua ble åpnet. Analyse av korrosjonsprodukter tatt på ulike steder i på brua viste en korrelasjon mellom høy konsentrasjon av $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (maghemitt) og høy korrosjonshastighet [14]. Det ble konkludert med at omtrent konstant kondensering av vann på innsiden av tårnet hindret oksidet å tørke inn og begrenset transformasjonen av $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ til α -FeOOH.



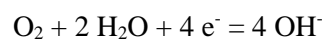
Figur 1. Tverrsnitt av overflateoksid på rusttregt stål etter 5 år eksponering i industriatmosfære [2, 15]



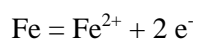
Figur 2. Utvikling av forholdet mellom α -FeOOH og γ -FeOOH over tid og effekten på korrosjon [3, 8]

2.4 Korrosjonshastighet som funksjon av tid

Korrosjonshastigheten til stål avtar som funksjon av tid fordi korrosjonsproduktene til en viss grad virker beskyttende. Ved at de ligger på overflata som en film vil de være en barriere mot oksygen. Oksygenet når ikke inn til stålet, men kan reagerer på overflata av rustsjiktet:

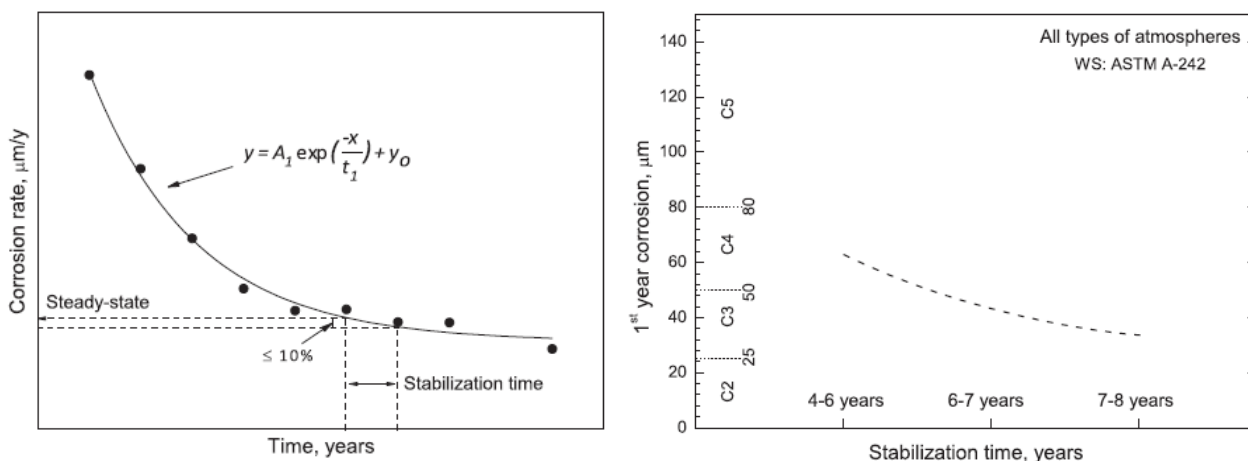


Jern oksiderer på undersiden av oksidet, der vi har metallisk jern:



Disse to halvreaksjonene er koblet til hverandre ved at elektronene som oksygenreaksjonen krever, frigis av jernreaksjonen. Dette er mulig fordi jernoksid er halvledere, spesielt Fe_3O_4 , som har et båndgap på bare 0,1 eV. FeO , $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ og $\alpha\text{-FeOOH}$ har alle båndgap i overkant av 2 eV, og er følgelig dårligere halvledere. Ionene som dannes må også nøytraliseres av ioner med motsatt ladning. Etter hvert som oksidet blir tykkere og transformeres til forbindelser med dårligere halvlederegenskaper, øker motstanden mot transport av både elektroner og ioner og korrosjonshastigheten går ned.

Endringen i korrosjonshastighet er størst i starten, siden det da ikke er noen beskyttende oksider på overflata. Etter hvert som oksidet blir mer beskyttende vil utviklingen avta. Når korrosjonshastigheten avtar med mindre enn 10% i løpet av ett år sies det at den har stabilisert seg, se venstre diagram i Figur 3. Høyre diagram i Figur 3 viser tiden det tar før korrosjonshastigheten til rusttrege stål stabiliserer seg som funksjon av korrosjonshastigheten det første året, det vil si korrosivitet. Korrosjonshastigheten stabiliseres raskere i korrosivt miljø, men den stabiliseres på et høyere nivå. I lite korrosivt miljø tar det lengre tid før den stabiliseres, og den stabiliseres på et lavere nivå. Etter at korrosjonshastigheten har stabilisert seg antas det at den er tilnærmet konstant.

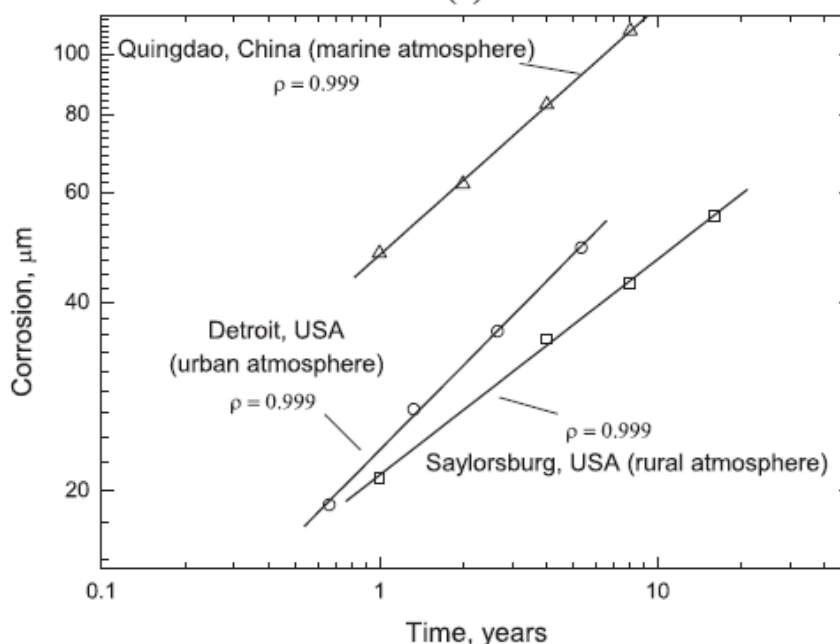


Figur 3. Tid til korrosjonshastigheten stabiliserer seg på rusttrege stål. Til venstre: Korrosjonshastigheten avtar med tiden, og når reduksjonen er mindre enn 10% i løpe av ett år sies den å ha stabilisert seg. Til høyre: Tiden det tar før ASTM A242 stål oppnår stabil korrosjonshastighet som funksjon av korrosjon det første året (korrosjonsklasse) [1].

Figur 4 viser akkumulert korrosjon i løpet av omkring 10 år i tre ulike miljø, ett landlig, ett urbant og ett marint [1]. Korrosjonshastigheten det første året viser at det marine miljøet trolig var C3, mens de to andre var C2. Prøver ble tatt ut og analysert fire ganger i løpet av testperioden for hvert teststed. Figuren viser at når korrosjonsdybde plottes mot tid i et diagram der hver akse er logaritmisk, faller målepunktene på en rett linje. Dette er et velkjent fenomen i korrosjon og brukt i ISO 9224 for å estimere korrosjon på stål i ulike miljø langt frem i tid [16].

Det logaritmiske forholdet mellom korrosjon og tid i Figur 4 er i konflikt med den konstante korrosjonshastigheten beskrevet over. Forklaringen er at det er en logaritmisk utvikling i starten, som går over i en lineær utvikling etter en viss tid. Dette skyldes at det er et visst tap av korrosjonsprodukter over tid. De kan løse seg opp i surt miljø, som for eksempel ved eksponering mot SO_2 , eller de kan løsne og falle av som følge av indre spenninger eller ytre mekanisk påvirkning. Oppløsningshastigheten av korrosjonsprodukter er tilnærmet konstant, mens korrosjonshastigheten avtar med tiden. Når korrosjonshastigheten er redusert tilstrekkelig oppstår en likevekt mellom dannelse av nytt oksid og oppløsning av gammelt oksid, og korrosjonshastigheten blir dermed konstant. Når denne overgangen fra

logaritmisk til lineær utvikling finner sted avhenger av eksponeringsbetingelsene [16]. I et korrosivt miljø vil det gå raskere enn i et lite aggressivt miljø, som beskrevet i Figur 3.



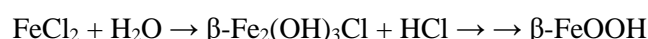
Figur 4. Korrosjonsdybde som funksjon av tid for tre ulike typer eksponeringsmiljø [1]

2.5 Avskallende korrosjonsprodukter

Uønsket høy korrosjonshastighet på rusttrege stål er gjerne kjennetegnet ved avskallende lag av kompakt rust, se Figur 5. Det har blitt foreslått en mekanisme for hvordan dette skjer [17]. Det er godt dokumentert at det tidlig i korrosjonsforløpet generelt dannes γ -FeOOH, både med og uten klorid til stede. Gjennom tørke/fukte-sykler over tid vil denne gradvis omdannes til α -FeOOH. I kloridholdig miljø vil det i tillegg til γ -FeOOH dannes mye β -FeOOH, som ikke omdannes til α -FeOOH, men heller Fe_3O_4 og γ - Fe_2O_3 .

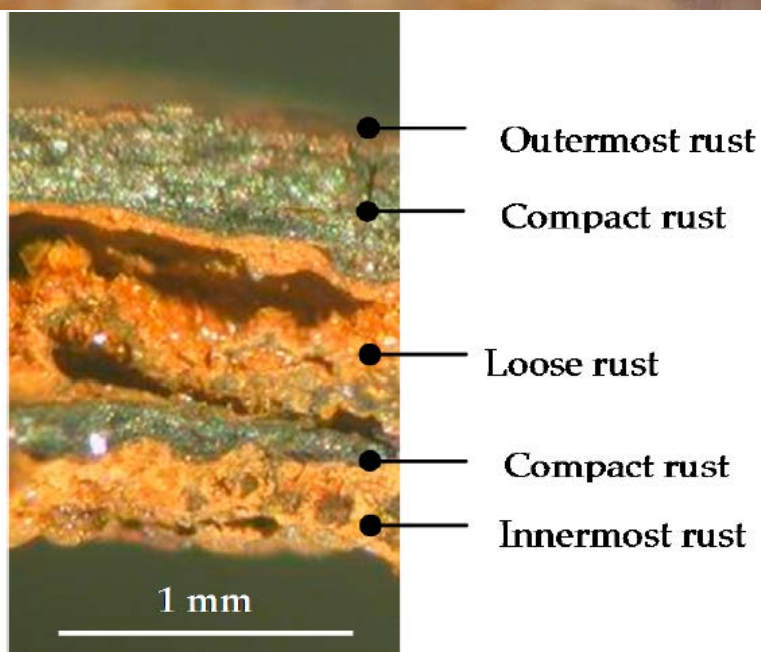
Over tid vil denne blandingen av ulike oksider skille seg i ulike lag som vist i Figur 5. De oransje lagene består av løs rust, mens de grå lagene består av kompakt rust. Sammensetningen av lagene varierer også som funksjon av tilgangen på oksygen fra utsiden.

I et marint miljø (eller ved vintersalting) vil det være en overvekt av klorid, slik at det i stor grad er denne som går inn i oksidet for å balansere jernionene som dannes under oksidet. Det dannes dermed jernklorid, som reagerer med vann og danner syre og ulike jern-hydroksoy-klorider, som videre omdannes til β -FeOOH:



Den løse rusten i de innerste lagene består derfor i stor grad av β -FeOOH, mens den ytterste løse rusten i stor grad består av γ -FeOOH. Ved tørke-fukte sykler vil derfor den innerste løse rusten omdannes til Fe_3O_4 og γ - Fe_2O_3 , mens den ytterste løse rusten vil omdannes til α -FeOOH. Når β -FeOOH omdannes til Fe_3O_4 og γ - Fe_2O_3 vil volumet krympe, mens når γ -FeOOH omdannes til α -FeOOH øker volumet. Det dannes derfor

indre spenninger i rustfilmen, som til slutt vil rive rustsjiktet av underlaget. Dermed er beskyttelsen av stålet sterkt redusert og korrosjonshastigheten vil øke igjen.



Figur 5. Over: Flak av kompakt rust i rekkverk på Espa. Under: Tverrsnitt av rust dannet i aggressiv marin atmosfære [10]

3 Internasjonale retningslinjer og anbefalinger for bruk av rusttrege stål

Dette kapitlet sammenfatter retningslinjer og anbefalinger for bruk av rusttrege stål i ulike land. Det er ikke alle land som har utarbeidet dette, og for flere land er de trolig ikke skrevet på engelsk så de er utilgjengelige for oss. Det er derfor bare funnet retningslinjer for noen få land, hovedsakelig engelskspråklige land. Mange europeiske land designer trolig også bruer i henhold til EN 1993-2 Eurocode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner, Del 2: Stålbruer [18]. Denne sier foreløpig ikke noe om bruk av rusttrege stål.

3.1 Storbritannia

BD 7/01 "Weathering steel for highway structures" spesifiserer bruk av rusttrege stål på veikonstruksjoner i Storbritannia. The Steel Construction Institute har i tillegg utgitt en veileder for bruk av rusttrege stål, som imidlertid gir de samme anbefalingene som BD 7/01.

De har som målsetning at stålet skal kunne stå i 120 år uten vedlikehold, og angir følgende restriksjoner for bruk av rusttrege stål:

- Marint miljø der stålet eksponeres mot klorid med deponering av mer enn 300 mg/m²/døgn årsgjennomsnitt (S₃ i henhold til ISO 9223)
- Konstruksjoner eller deler av konstruksjoner som eksponeres for salt fra veisaltning
- Stål som vil være kontinuerlig fuktet
- Ekstremt forurenset atmosfære eller atmosfære med korrosive forurensninger
- Kryssinger av vann der avstanden ned til vannet er under 2,5 m
- Atmosfære med forurensning over nivå P₃. I henhold til ISO 9223 er P₃ definert som deponering av mellom 80 og 200 mg/m²/døgn SO₂ årsgjennomsnitt.

Dersom en av disse restriksjonene bare angår deler av konstruksjonen kan disse delene beskyttes spesielt. I tillegg anbefales det ekstra beskyttelse av enden på dragere i ekspansjonsskjøter, samt i kontakt med jord. Det advares mot løv og annet som legger seg på overflata kan hindre tørking og dannelse av beskyttende oksider. Designet av konstruksjonen skal generelt medføre at alle overflater kan tørke. Drenert av vann fra brudekket skal ikke treffe det rusttrege stålet.

For å oppnå ønsket levetid dimensjoneres det med korrosjonstillegg. I korrosivitetskategori C1, C2 og C3 legges det til 1 mm per overflate. I kategori C4 og C5 legges det til 1,5 mm per flate. For indre overflater i kassebruer brukes det ikke korrosjonstillegg hvis den er tettet for tilførsel av fuktighet. For åpne kasser brukes 0,5 mm korrosjonstillegg. Det kreves tilsvarende korrosjonstillegg for kilsveiser og sveiser som ikke har full innbrenning. Buttsveiser med full innbrenning krever ikke korrosjonstillegg, siden korrosjonstillegget for platene vil medføre at sveisen blir tilsvarende tykkere.

3.2 USA

U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, har utarbeidet retningslinjer for bruk av rusttrege stål [19]. De ble sist oppdatert i 2017 og refererer på flere punkter til de britiske retningslinjene. De avviker imidlertid på noen punkter, spesielt på akseptert grense for deponering av klorid. Spesifikt anbefales følgende restriksjoner på bruk av rusttrege stål:

- Marint miljø med deponering av mer enn 50 mg/m²/døgn klorid
- Hvis overflater er fuktige mer enn 60% av tiden gjennom et år
- Industriadmofære med deponering av mer enn 210 mg/m²/døgn SO₃ (merk, SO₃ i stedet for SO₂)

- Ved tunnel-lignende konstruksjoner, som ved senket vei mellom vertikale vegger eller under bruer der veisalt akkumuleres og overflater tørker langsomt
- Kryssinger av vann med lav klaring, under 3 m over stillestående vann og 2,5 m over rennende vann

I tillegg anbefales det å:

- Unngå ekspansjonsskjøter/bruskjøter så lang det er mulig
- Drenerer vann bort fra det rusttrege stålet. For eksempel anbefales det å lage et trau som fører bort vann ved ekspansjonsskjøter

Flere av de ulike statene har egne anbefalinger for bruk av rusttrege stål som til dels avviker fra de føderale anbefalingene. I Florida for eksempel tillates ikke rusttrege stål ved mer enn 5 mg/m²/døgn klorid og 60 g/m²/døgn SO₂.

3.3 Australia

BlueScope Steel har utgitt retningslinjer for bruk av rusttrege stål i Australia og New Zealand.

Retningslinjene er hovedsakelig de samme som i Storbritannia og USA, med et par unntak.

- De anbefaler ikke å bruke rusttrege stål i miljø med korrosjonsklasse C4 og C5, det vil si en korrosjonshastighet på mer enn 50 µm/år det første eksponeringsåret. Generelt anbefaler de å måle korrosiviteten på stedet, men sier at for høy korrosivitet kan forventes opp til 2 km fra kysten. I områder med ugunstig vindretning kan dette strekke seg opp til 40 km fra kysten.
- I korrosjonsklasse C1 og C2 brukes et korrosjonstillegg på 1 mm, mens det i korrosjonsklasse C3 brukes 1,5 mm korrosjonstillegg.

Ellers brukes det naturlig nok lite avisingssalt i Australia på grunn av varmt klima, slik at dette sjelden/aldri fører til problemer på rusttrege stål.

3.4 Japan

Japan Road Association har utgitt en spesifisering for stålbruer [20]. Vi har ikke fått denne spesifiseringen, men ifølge Morcillo tillates rusttrege stål i miljøer med kun 5 µm/år gjennomsnittlig korrosjon i løpet av 100 år [1].

Japan Society for Civil Engineers (JSCE) har utarbeidet generelle retningslinjer for stålkonstruksjoner, med hovedvekt på bruer [21]. Dokumentet inneholder få spesifikke krav omkring bruk av rusttrege stål, men anbefaler ikke bruk av slike materialer i områder med høyere deponering av salt (NaCl) enn 50 mg/m²/døgn, tilsvarende 30 mg/m²/døgn klorid. For bruer som skal stå i nærheten av kysten anbefales det å måle mengden klorid. Avhengig av dominerende vindretning og styrke er det satt ulike grenser for hvor nær kysten dette bør undersøkes. For eksempel er grensa 2 km langs Stillehavskysten, mens det på østkysten langs Japanhavet er enten 5 km eller 20 km.

3.5 Norden

Det er ikke funnet spesifikasjoner eller retningslinjer for bruk av rusttrege stål for noen av de Nordiske landene. I Sverige er rusttrege stål i liten grad brukt i bruer [22], og det samme gjelder trolig for Danmark og Finland også. Den viktigste grunnen til dette er trolig at det ikke har vært varianter av rusttrege stål egnet for lav temperatur på markedet. Dette har imidlertid endret seg nå. EN 10025-5 grad S355, S420 og S460 har varianter kvalifisert for bruk ned til -40 °C (-J4W) og -50 °C (-J5W), se Tabell 1, og disse er kommersielt tilgjengelige.

4 Feltefaringer med bruk av rusttrege stål

4.1 Vegvesenets egne erfaringer

Rekkverk av rusttregt stål langs E6 ble undersøkt tre steder i 2014 [23], se Tabell 2.

Tabell 3. Inspeksjon av rekkverk ved E6 i 2014 etter 6 års eksponering

Sted	Beskrivelse	Kommentar
Kolomoen Bru	På og ved brua	Montert høst 2008. Eksponering mot veisalt fra Rv3 og E6
Skogsrud Bru	Bru over E6, Fv224	Montert høst 2008. Eksponering mot veisalt fra E6, Fv224 saltet ikke
Eidsvolltunellen (Hp14 m4000)	E6 langs nordgående løp på sørsiden av tunnelen	Montert høst 2008. Eksponering mot veisalt fra E6

Oppsummert var dette tilstanden etter 6 års eksponering:

- Rekkverket ved Kolomoen hadde løstsittende korrosjonsprodukter som falt av ved berøring, spesielt på fremsiden mot veibanen og undersiden. Innvendig i C-profilene, som vender bort fra veibanen, var det også mulig å skrape av korrosjonsprodukter, men de satt bedre fast enn på fremsiden.
- Rekkverket på SkogsrudBru var i bedre tilstand og hadde ingen løse korrosjonsprodukter. Midt på brua hadde oksidsjiktet noe grovere og ujevn struktur sammenlignet med 20 m fra brua, trolig fordi det var mindre tilførsel av salt fra E6.
- Ved Eidsvolltunellen var det også mye løse korrosjonsprodukter på fremsiden og undersiden av profilene, som på Kolomoen bru. Innvendig i C-profilene hadde det samlet seg støv, sand og korrosjonsprodukter, men det var mindre korrosjon enn på fremsiden av profilene.
- Skjøtene i rekkverkene var i god stand.

Betydelige mengder av korrosjonsprodukter kunne skrapes av rekkverket på Kolomoen bru og ved Eidsvolltunellen. Prøvene ble tatt fra øverste profil i rekkverket. Analyse av korrosjonsproduktene fra Kolomoen og Eidsvoll er gjengitt i tabellen under. Det ble ikke funnet klorid i noen av prøvene, trolig fordi de ble tatt på høsten, flere måneder etter at det sist ble saltet på veiene. Alle prøvene inneholder betydelige mengder av samtlige typer jernoksid det ble analysert for. Korrosjonsdybden ble imidlertid ikke målt, så det er ikke mulig å korrelere noen av fasene eller forholdstallene mellom de ulike fasene til korrosjon. Prøven tatt innvendig i C-profilen ved Eidsvoll med minst korrosjon hadde imidlertid også mest α -FeOOH. Rust fra rekkverket på Skogsrud bru ble ikke analysert siden det var vanskelig å ta prøver av det tette og harde rustsjiktet.

Det er rimelig å anta at korrosjonshastigheten på rekkverk på Kolomoen bru og sør for Eidsvolltunellen er vesentlig høyere enn 10 $\mu\text{m}/\text{år}$ og at rekkverket ikke vil oppnå levetid på 100 år.

Tabell 4. Sammensetning (%) til prøver av rust tatt fra øverste profil i rekkverket på Kolomoen bru og sør for Eidsvolltunnelen

Fase		Kolomoen Innvendig C-profil	Eidsvoll Underside C-profil	Eidsvoll Innvendig C-profil
Magnetitt	Fe ₃ O ₄	13,8	10,4	18,2
Lepidocrecite	γ-FeOOH	29,3	37,6	22,4
Goehtite	α-FeOOH	38,4	31,4	48,5
Akagnite	β-FeOOH	18,5	20,6	10,9
Forholdstall				
$\alpha/\gamma^* = \alpha/(\gamma+\beta+S)$		0,62	0,46	0,94
$(\beta+M)/(\gamma+\beta+M)$		0,48	0,45	0,41
$\alpha^*/\gamma^* = (\alpha+M)/(\gamma+\beta)$		1,09	0,72	2,00

4.2 Publiserte erfaringer fra andre land

4.2.1 USA

En gjennomgang av erfaringer med rusttrege stål i USA ble rapportert av McDad i 2000 [24]. Den første broen med rusttregt stål ble bygget over New Jersey Turnpike i 1964. Omfattende bruk av rusttrege stål i broer startet i Michigan i 1970. De fant imidlertid at materialet ikke fungerer etter forventningene, spesielt i storbyområdet i Detroit. Dårlige resultater i Detroit førte til at staten stoppet bruken av rusttrege stål i motorveibroer av alle slag i 1979. Rusttrege stål var da tatt i bruk i flere stater. American Iron and Steel Institute (AISI) nedsatte en arbeidsgruppe i 1982 for å se på erfaringene med bruk av rusttrege stål [25]. Denne arbeidsgruppen inspiserte 49 rusttrege stålbroer i Illinois, Maryland, Michigan, New York, North Carolina, Wisconsin og New Jersey. De fant at 30 prosent av fagbroene viste god ytelse på alle områder; 58 prosent utviste moderat korrosjon i noen områder; mens 12 prosent viste sterk korrosjon i noen områder. En egen undersøkelse i 1982 av National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) om ytelsen til rusttrege stål i broer konkluderte også med at problemene ikke var begrenset til Michigan [26]. Bruken av rusttrege stål i broer gikk ned, fra 12% av det totale stålmarkedet i 1980 til ca. 10 prosent i 1987, men fra 1989 økte bruken av rusttrege stål igjen. Det er i dag omkring 11 000 bruer i USA med rusttrege stål, av totalt ca. 600 000 bruer (alle materialer).

Suksesskriterier for bruk av rusttrege stål ble rapportert å være [24]:

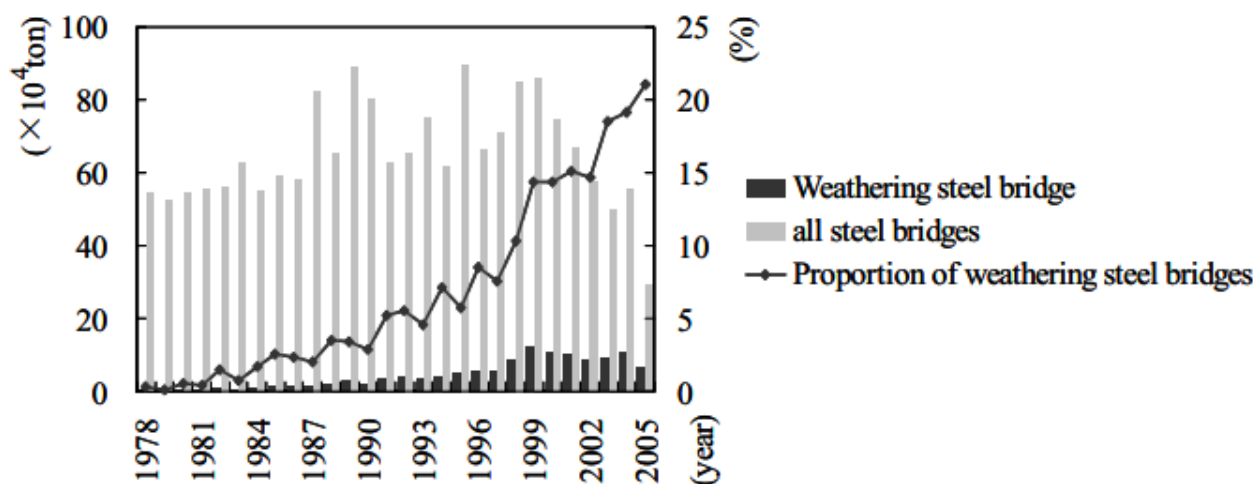
- Ikke bruke rusttrege stål i områder med tilførsel av salt eller luftforurensning.
- Detaljert design for å lede bort vann og, for eksempel traue under bruskjøter, dreneringshull, forlengte dreneringsrør så vannet ikke fukter omkringliggende stål. Unngå bruskjøter, eller ha elastomer i bruskjøten så den er tett, for eksempel neopren.
- Designe for å hindre permanent fuktete flater ved å hindre ansamling av rusk og skitt. Unngå at trevirke ligger inntil rusttregt stål.
- Avrenning av rust som gir misfarging av betong blir også sett på som et problem som de forsøker å unngå ved å lede vann bort fra betongen.

4.2.2 Japan

Bruken av rusttrege stål i bruer i Japan har økt kraftig. Veksten fram til 2005 er vist i Figur 6. Veksten har fortsatt senere, og det hevdes at 75 % av markedet for rusttrege stål i Japan er bruer [27]. I 2006 utgjorde rusttrege stål med 3 % nikkel omkring 25% av det totale volumet rusttrege stål i bruer [27].

Til tross for den utstrakte bruken av rusttrege stål i bruer ser det ikke ut til at det er publisert mye om erfaringene med denne typen stål, i hvert fall ikke på engelsk. Horii et al. fra Japan Bridge Association har beskrevet det følgende om bruken av rusttrege stål [28]:

- Det anbefales ikke å bruke rusttrege stål i områder med høy eksponering mot salt
- God drenering av vann bort fra konstruksjonen
- Ved maling av rusttrege stål vil belegget ha bedre motstand mot degradering enn når det er påført vanlig konstruksjonsstål. Å bruke rusttrege stål på bruer som skal males av estetiske årsaker, kan derfor gi reduserte levetidskostnader



Figur 6. Bruk av rusttrege stål i Japanske bruer mellom 1978 og 2005 [29]

4.2.3 Canada

I Canada har rusttrege stål blitt brukt i bruer siden slutten av 1960-tallet, hovedsakelig i Ontario [30]. Det er rapportert få problemer, med unntak av korrosjon på bærende konstruksjon under bruer som går over vintersaltede veier. Det er antatt at tungtrafikk under bruene fører til sprut av veisalt på bærebjelkene. Dette fører til dannelse av avskallende av korrosjonsprodukter som faller ned på trafikken og kan føre til skader. Det har derfor blitt utført blåserensing av bjelkene for å fjerne korrosjonsflakene kontrollert.

4.2.4 Tsjekkia

I Tsjekkoslovakia ble det bygget bruer av rusttregt stål tilsvarende type S355J2W fra 1970-tallet [31]. Høyt nivå av SO₂ luftforurensning forårsaket høye korrosjonshastigheter, men nivået av SO₂ i atmosfæren ble gradvis redusert fra slutten av 1970-tallet og nådde ubetydelig nivå for korrosjon omkring 2000. Siden da har dårlig drenering av vann og veisalt vært hovedårsak til korrosjon på rusttrege stål [32]. Siden Tsjekkia ikke grenser til sjø, er veisalt den eneste kilden til salt. Problemene med dårlig drenering har blitt løst med ettermontering og forlengelse av rør [32].

5 Testing av rusttrege stål

5.1 Vegvesenets tester av rusttrege stål

5.1.1 Kiwa felttest ved Espa 2014-2020

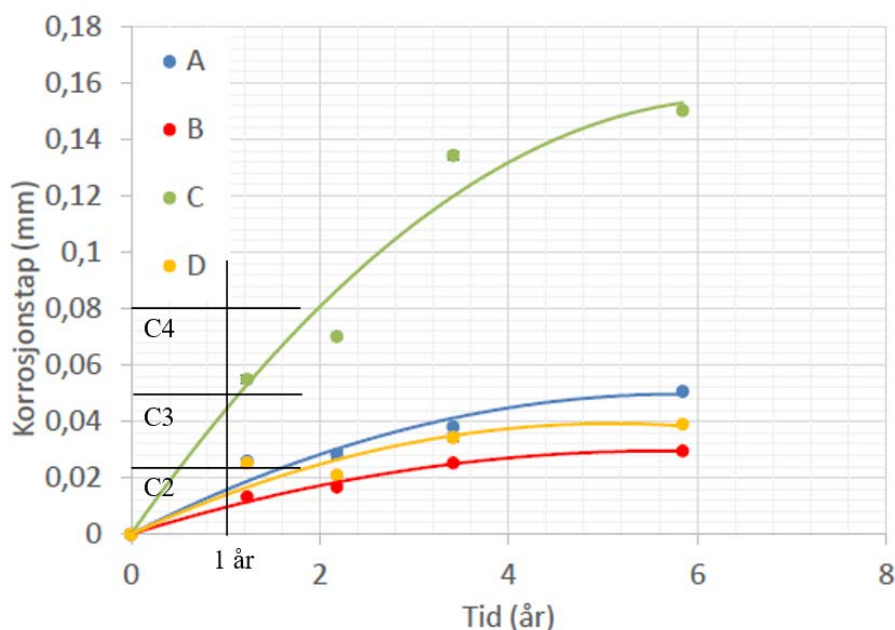
Her følger et kort sammendrag av rapporten fra Kiwa etter 6 års eksponering [33]. Prøveplatene er i materiale S355W rusttregt stål levert av SSAB. Alle prøveplater ble blåserenset til Sa3 før de ble plassert ut. Plassering av prøvene er markert i Figur 7:

- Posisjon A er på veiskråning ved E6, ca. 10 meter fra kjørebane.
- Posisjon B er på veiskulder etter avkjøring i rundkjøring, ca. 100 meter fra E6.
- Posisjon C er i midtdele mellom nordgående og sørgående kjørefelt på E6, ca. 10 meter på nordsiden av gangbru.
- Posisjon D er på gangbru, mellom nord- og sørgående kjørefelt på E6 og ca. 6 meter over kjørebane.

Resultater etter 6 år er vist i Figur 8. Plassering B er så langt unna veien at prøvene skal være upåvirket av veisalt. Figur 8 viser at prøvene i posisjon A og D har omtrent like lite korrosjon som i posisjon B, hvilket betyr at disse prøvene også er lite påvirket av veisalt. Prøvene i posisjon C har derimot vesentlig mer korrosjon enn de andre prøvene. Korrosjonstapet det første året kan estimeres fra kurvene. Prøvene i A, B og D hadde under 20 μm korrosjon det første året, hvilket tilsvarer korrosjonsklasse C2. Prøvene i C hadde omkring 45 μm korrosjon det første året, hvilket tilsvarer øvre område for korrosjonsklasse C3. Det er vanskelig å estimere korrosjonen det siste året ut fra figuren, men i Figur 16 er resultatene plottet i et logaritmisk diagram, og det er estimert trendlinjer. Ifølge trendlinjene har prøvene i posisjon A, B og D 2-4 $\mu\text{m}/\text{år}$ korrosjon nå, mens prøvene i posisjon C har 19 $\mu\text{m}/\text{år}$. Siden prøvene har stått ute i 6 år er det rimelig å anta at korrosjonshastigheten vil være omtrent konstant heretter, gitt tid til stabilisering vist i Figur 3.



Figur 7. Plassering av prøver av rusttregt stål ved Espa



Figur 8. Korrosjonstap på S355W rusttregt stål langs E6 ved Espa [33]

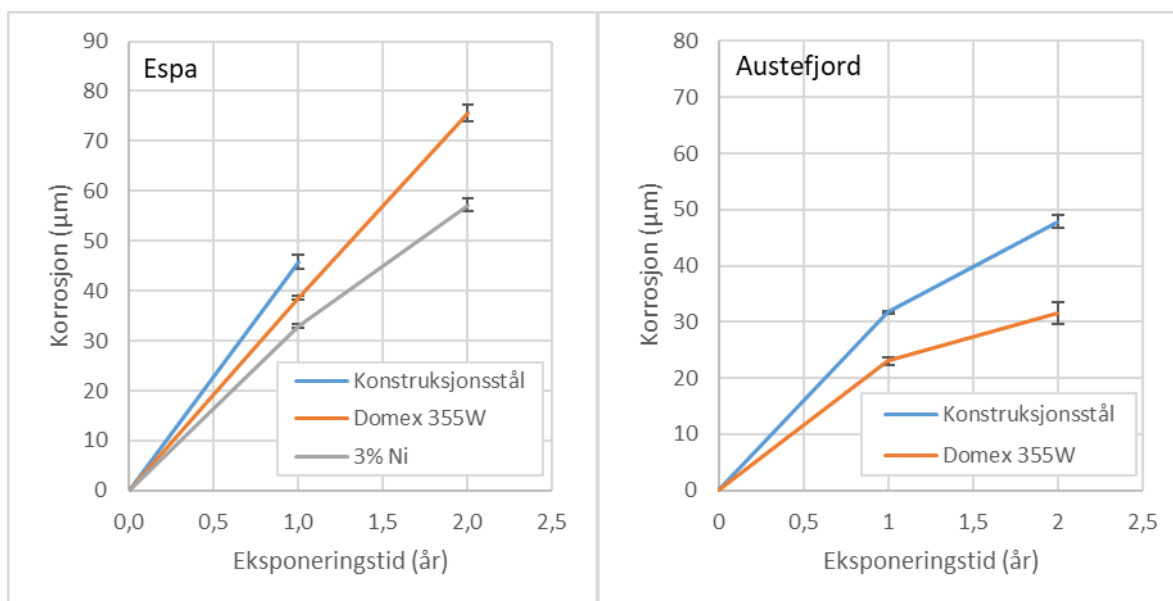
5.1.2 SINTEF felttester 2016-2020

Vegvesenet og SINTEF startet en felttest i 2016, der prøver av C-stål, rusttregt stål av type S355W og rusttregt stål med 3% Ni blir eksponert ved E6 på Espa, i fagverket under Nessundet bru og på Austefjord fergekai. Kun prøver etter 2 års eksponering er analysert foreløpig. Tabell 5 viser en oversikt over testene.

Prøvene på Nessundet bru har alle mindre enn 25 µm korrosjon etter 2 år, slik at korrosiviteten tilsvarende C2. De rusttrege stålene av begge typer vil følgelig ha lang levetid. Figur 8 viser resultatene fra Espa og Austefjord fergekai etter 2 års eksponering. Ved Espa er korrosjonen på S355W omtrent den samme som i Kiwa sin test i posisjon C. Korrosiviteten ca. 4 m øst for veien er dermed sammenlignbar med korrosiviteten på midtrabatten, det vil si i øvre område av C3. Det ser foreløpig ut til at 3% Ni stålet har en del mindre korrosjon enn S355W, men 2 års eksponering er for kort til å si noe om hvor stor forskjellen er. På Austefjord fergekai er korrosiviteten noe lavere, i nedre område av C3. Som figuren viser er standardavviket i testen lavt.

Tabell 5. Eksponering av C-stål, S355W og 3% Ni ved Espa, Nessundet bru og på Austevoll fergekai

Teststed	Materialer	Eksponeringstid
Espa, ca. 4 m øst for E6	C-stål Domex 355W rusttregt stål 3% Ni rusttregt stål	Prøver tatt inn etter 1 og 2 år foreløpig.
I fagverket under Nessundet bru, mot øst, vest og midt under	C-stål Domex 355W rusttregt stål 3% Ni rusttregt stål	Opprinnelig ble det planlagt å ta inn de siste parallellene etter 4 års eksponering, men testen er forlenget og prøvene blir trolig først tatt inn i 2022.
Austefjord fergekai, omkring 10 m fra sjøen	C-stål Domex 355W rusttregt stål	



Figur 9. Korrosjon på prøver av C-stål, S355W og 3% Ni ved Espa og på Austefjord fergekai

5.2 Publiserte korrosjonstester av rusttrege stål

Det er publisert mange tester av rusttrege stål, så det vil her bare fokuseres på de parameterne som er avgjørende for legeringens korrosjonshastighet og levetid langs veier i Norge:

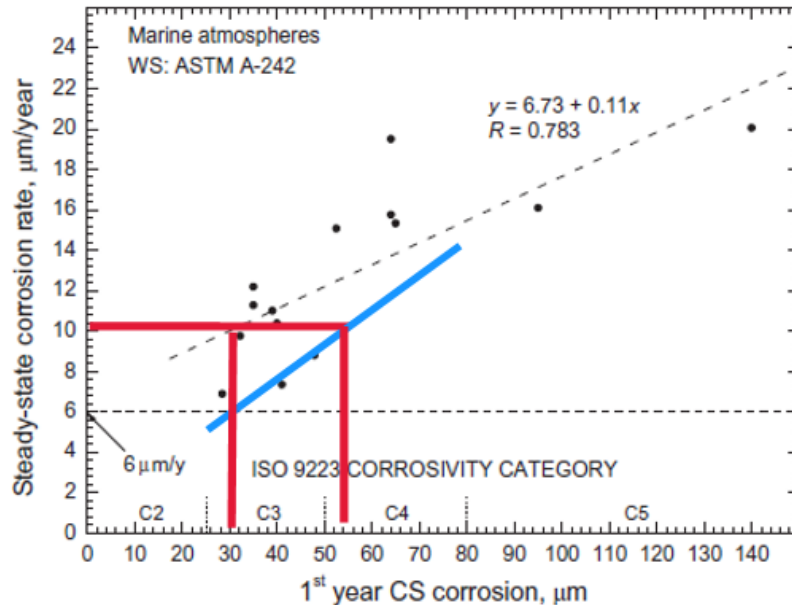
- Effekt av klorid fra vintersalting og kystmiljø
- Effekt av sulfat fra SO₂ i atmosfæren
- Effekt av fuktetid
- Effekt av legeringssammensetning

5.2.1 Effekt av klorid på korrosjonshastigheten

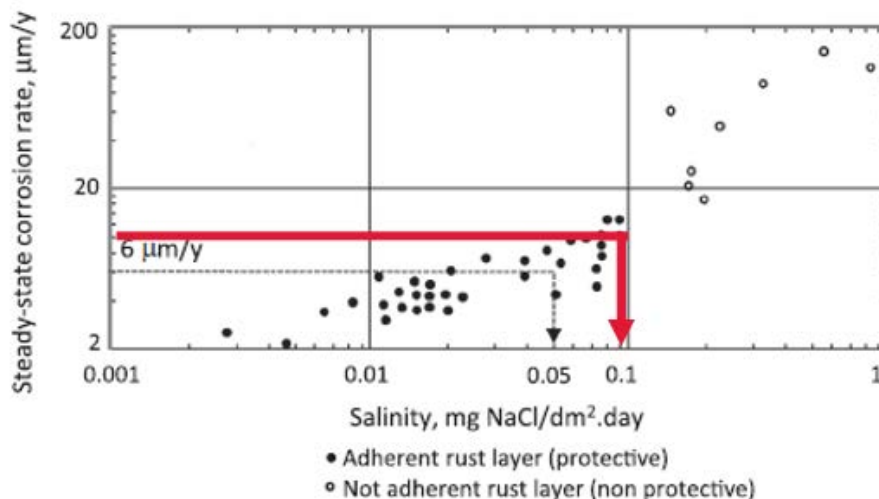
Effekt av marin atmosfære på den stabile korrosjonshastigheten, det vil si korrosjonshastigheten etter noen år når overflateoksidet er ferdig utviklet, for ASTM A-242 stål er vist i Figur 10 [1]. I figuren er 6 µm/år markert med en stiplet linje fordi dette har vært oppgitt som akseptabel korrosjonshastighet for rusttrege stål i Japan, se diskusjon i neste avsnitt. Den stiplede trendlinja i diagrammet viser det at dette materialet ikke kan benyttes i marint miljø med et kriterium på 6 µm/år i stabil korrosjonshastighet, siden en så lav korrosjonshastighet ikke vil oppnås. Morcillo publiserte tilsvarende diagram for rurale og urbane miljøer i 2019, som er tegnet inn i Figur 10 med den blå linja. Hvis en stabil korrosjonshastighet på 10 µm/år kan aksepteres må korrosjonshastigheten det første året være under ca. 30 µm/år i marint miljø og ca 55 µm/år i ruralt/urbant miljø, som markert med røde linjer i diagrammet.

I en felttest i Japan ble prøver av rusttregt stål montert på 41 bruer med ulik eksponering mot klorid i perioden mellom 1981 og 1983. Resultatene er rapportert på Japansk, men gjengitt av Morcillo [1]. Detaljer omkring testen er ikke beskrevet, men sammenhengen mellom stabil korrosjonshastighet og gjennomsnittlig deponering av klorid på overflata er vist i Figur 11. Figuren viser at en korrosjonshastighet på 6 µm/år forutsetter at deponering av NaCl på overflata må være lavere enn 5 mg/m²/døgn, hvilket tilsvarer omkring 3 mg/m²/døgn klorid. For at korrosjonshastigheten skal være lavere enn 10 µm/m²/døgn må deponering av NaCl være lavere enn ca. 9 mg/m²/døgn, tilsvarende ca. 6 mg/m²/døgn klorid. Figuren viser også at opp til

deponering av ca. 10 mg/m²/døgn NaCl ble det dannet korrosjonsprodukter som heftet til stålet, mens ved deponering av mer salt ble det dannet avskallende korrosjonsprodukter.



Figur 10. Stabil korrosjonshastighet på ASTM A-242 stål i marin atmosfære som funksjon av korrosjonshastighet det første året [1]. Samme forfatter publiserte tilsvarende diagrammet for rurale og urbane miljø i 2019, som er tegnet inn i diagrammet med den blå linja [2]. De røde strekene viser akseptabel korrosjon første år i marint og ruralt/urbant miljø ved en akseptabel stabil korrosjonshastighet på 10 µm/år.



Figur 11. Stabil korrosjonshastighet på rusttregt stål (ukjent type) som funksjon av gjennomsnittlig deponering av klorid på overflata [1]. De røde strekene viser deponering av klorid på overflata ved 10 µm/år stabil korrosjonshastighet.

To bruer med ca 200 m avstand langs den samme veien i Ostrava i Tsjekkia blir undersøkt med hensyn på effekt av veisaltning på korrosjon. Bruene består av en betong brubane som bæres av seks I-bjelker. Den ene brua går over en jernbane (åpnet 1983) og den andre over en vintersaltet motorvei (åpnet 2001). Korrosiviteten på stedet vurderes som C2 eller C3. Brua over motorveien hviler dessuten på betongvegger på

hver side som gjør at den gir en tunneleffekt, som det generelt advares mot ved bruk av rusttrege stål. Prøveplater av type S355J2WP ble plassert på 12 ulike steder på bærebjelkene under begge bruene i 2014. Platene ble plassert både horisontalt over og under flensene, samt vertikalt på stegene. Alle prøvene var maskert på baksiden og montert tett inntil bjelkene. Det ble tatt inn prøver etter 1 og 3 år, mens et siste sett med plater vil bli tatt inn etter 10 år. Resultater etter 1 og 3 år er rapportert [32, 34].

Deponering av klorid på bærebjelkene under bruene ble målt på flere plasser i 2016 og 2017 med tre ulike metoder. Målingene viser en gjennomsnittlig årlig avsetning av klorid på omkring 10 mg/m²/døgn over motorveien og omkring 2 mg/m²/døgn over jernbanen. Deponering av klorid over motorveien i desember til mars, da det ble saltet på veiene, varierte veldig med målinger mellom 20 og 90 mg/m²/døgn.

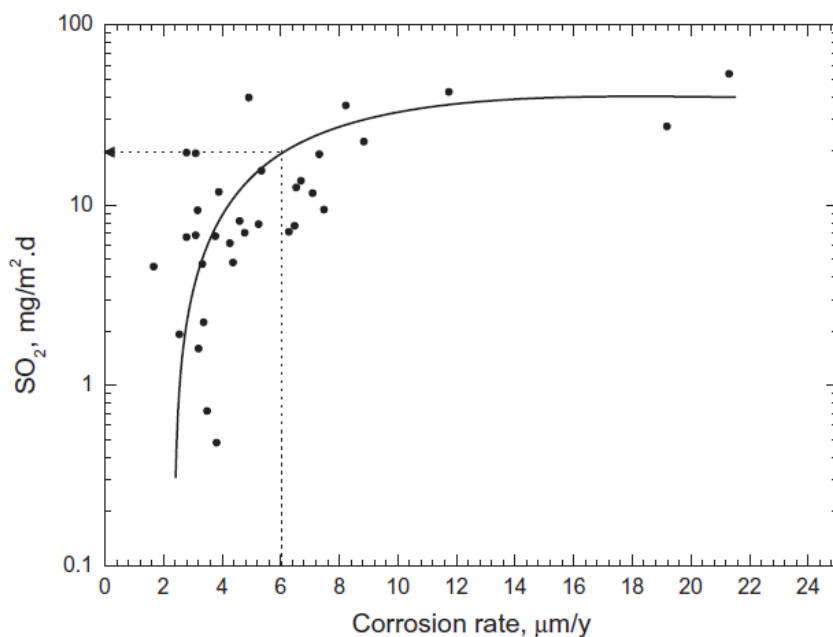
Målt korrosjon etter 1 og 3 år er vist i Tabell 6. Enkeltmålingene for jernbanebrua er ikke publisert, men gjennomsnittsmålingene var omkring 50% lavere enn for brua over vintersaltet vei. Høyest målte korrosjon etter 3 år var 43 µm totalt materialtap (gjennomsnitt av 3 paralleller). Prøver på horisontale flater som pekte oppover, det vil si plassert på oversiden av flensen på bjelkene, hadde omkring dobbelt så mye korrosjon som vertikalt monterte prøver og horisontale prøver på undersiden av flensen. Resultatene korrelerte godt med observasjonene på selve bjelkene fra 2001. Oversiden av flensene hadde løse korrosjonsprodukter som løsnet i flak. De ytterste bjelkene som ble eksponert mot regn var mindre angrepet. Undersiden av flensene og vertikale flater på steget hadde tette korrosjonsprodukter som hovedsakelig heftet til stålet.

Tabell 6. Målt korrosjon på plater av rusttregt stål eksponert under to bruer, en med eksponering for veisalt (over motorvei) og en uten (over jernbane)

	Korrosjon etter 1 år (µm)		Korrosjon etter 3 år (µm)	
	Gjennomsnitt	Høyeste måling	Gjennomsnitt	Høyeste måling
Over motorvei	12	35	20	43
Over jernbane	5		9	

5.2.2 Effekt av SO₂ på korrosjonshastigheten

Effekten av SO₂ på korrosjon av stål er grundig studert, trolig fordi de høye utslippene av SO₂ på 1970- og 1980-tallet skapte betydelige korrosjonsproblemer. Figur 12 viser hvordan økende eksponering for SO₂ øker den stabile korrosjonshastigheten til rusttrege stål [1]. Opp til en deponering på ca. 20 mg/m²/døgn er effekten liten, men over denne grensen øker korrosjonshastigheten raskt. Effekten forklares med at når SO₂ absorberes på en våt ståloverflate dannes det sulfat SO₄²⁻ i en reaksjon med oksygen og jern, som reduserer pH ned i et område hvor jernoksider løses opp. Dermed reduseres den korrosjonsbeskyttende effekten av rustsjiktet og korrosjonshastigheten øker.



Figur 12. Korrosjon på rusttregt stål i atmosfærer med ulike konsentrasjoner av SO₂ [1]

5.2.3 Effekt av høy fuktetid

I korrosjon benyttes begrepet fuktetid (time of wetness, TOW) for å diskutere effekten av vann på atmosfærisk korrosivitet. Begrepet er definert i ISO 9223 til å bety den tiden overflata eksponeres mot mer enn 80 % relativ fuktighet og temperaturen er over 0 °C. Definisjonen er imidlertid til en viss grad feil, hvis den skal beskrive tiden overflata er våt av kondensvann eller regn. For det første vil vann kondensere ved vesentlig lavere fuktighet enn 80 % på en overflate som er forurenset med støv, sand eller andre partikler. Definisjonen tar heller ikke hensyn til dugg, det vil si kondensering på overflater ved lav relativ fuktighet på grunn av temperaturendringer, når stålet er kaldere enn atmosfæren. Overflater forurenset av hygroskopiske salter tar opp og holder på vann selv ved svært lav relativ fuktighet. Fuktetid er åpenbart viktig for korrosjon, siden vi ikke kan ha korrosjon uten vann. Det er utviklet ligninger for å beregne korrosivitet som funksjon av miljøparametere, inkludert TOW (for eksempel [35]), men disse er lite brukt slik at feil i fuktetid i praksis har lite å si.

Når det gjelder effekten av fuktetid på korrosjon på rusttregt stål ser det ikke ut til at noen har gjort noen systematisk undersøkelse av dette. Vi har ikke funnet publisert noen sammenheng mellom fuktetid og korrosjon, annet enn at flere spesifikasjoner påpeker at vann må dreneres bort fra stålet, og at mangel på sådan fører til uønsket høy korrosjon.

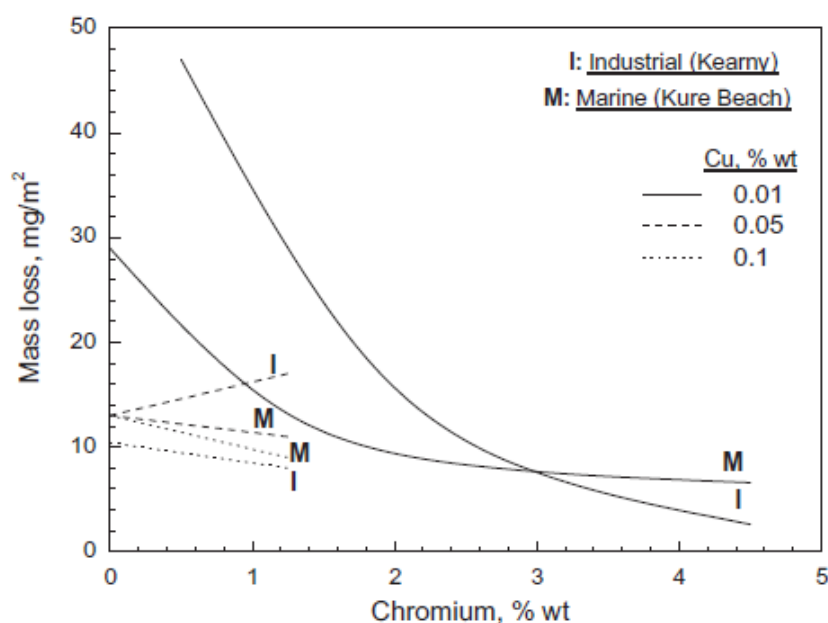
5.2.4 Effekt av legeringselementer

Krom

Rusttregt stål inneholder typisk 0,5-0,8 vekt-% krom, se Tabell 1. Analyse av rustsjiktet viser at krom typisk akkumuleres innerst i sjiktet i form av nano-krystallinsk α -CrOOH (goethitt) [36]. I tillegg til å utgjøre et tett sjikt som opptrer som en barriere, er det kation-selektivt, hvilket betyr at aggressive negative ioner som klorid og sulfat ikke kan trenge inn i sjiktet. For at krom skal ha en beskyttende effekt ved lav konsentrasjon må stålet også inneholde kobber, som vist i Figur 13. Med 0,1 % Cu i legeringa vil tilsats av små mengder

krom øke korrosjonsmotstanden [4]. Uten kobber i legeringa må det tilsettes vesentlig mer krom for å oppnå samme effekt.

Det blir hevdet at krom har en negativ effekt på korrosjonsmotstanden til rusttrege stål i kloridholdig miljø [4]. Effekten blir forklart med at kromionene i oksidet kan hydrolysere og bidra til forsuring under oksidet [2]. De nikkelrike rusttrege stålene utviklet i Japan for marint miljø, se Tabell 1, inneholder lite krom, hvilket kan tas til inntekt for denne påstanden. Vi har imidlertid ikke funnet eksperimentell dokumentasjon. Figur 13 viser tvert imot at krom har en gunstig effekt også i marint miljø.



Figur 13. Effekt av krom i rusttrege stål på korrosjonshastighet [4]

Kobber

Det er godt dokumentert at å legerer med små mengder kobber reduserer korrosjonshastigheten til stål, og samtlige av legeringene i Tabell 1 er tilsatt kobber. Det er foreslått tre teorier for hvordan kobber reduserer korrosjonshastigheten i rusttrege stål [37]:

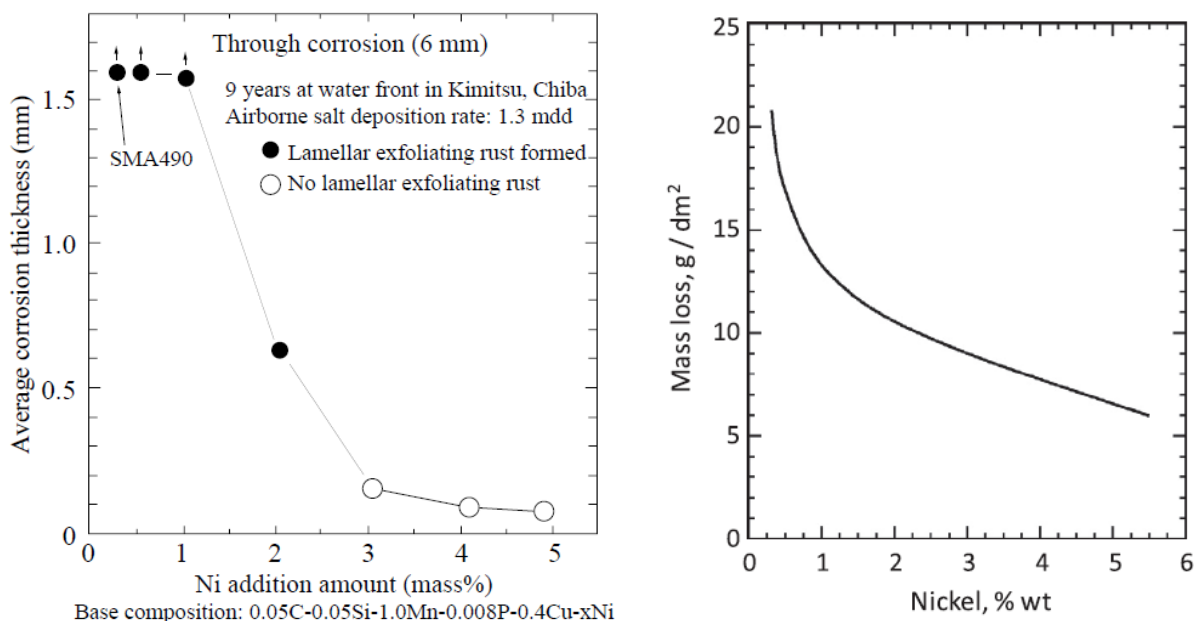
- Kobber kan bremse den anodiske oppløsningsprosessen av jern ved å redusere den elektroniske ledningsevnen til rustlaget. Elektroner som frigjøres i anodereaksjonen under oksidet må ledes gjennom oksidet til overflata av oksidet der den katodiske reaksjonen skjer. Ved å øke motstanden til oksidet reduseres oksygenets reaksjonshastighet og dermed også den anodiske oppløsningen av stålet.
- I et fuktig oksid kan Cu (II) -ioner oksidere Fe (II) til Fe (III), og derved bidra til dannelsen av mer beskyttende korrosjonsprodukter.
- I tillegg kan kobber hjelpe til med å eliminere effekten av SO₂ på korrosjonen. Kobber kan danne tungt løselige kobber-hydrokysulfater slik som Cu₄SO₄(OH)₆ eller Cu₃SO₄(OH)₄ som kan felles ut i porer i rustlaget, og derved forbedre barriereegenskapene.

Det er ikke konkludert med hensyn på mekanismen for effekten av kobber.

Nikkel

Figur 14 viser effekten av nikkel på korrosjon av rusttrege stål i to ulike felttester. Til venstre vises korrosjon etter 9 års eksponering i marint miljø med 130 mg/m²/døgn klorid [38]. Et stål med 3% nikkel ga ca. 160 µm korrosjon, tilsvarende 18 µm/år. Lavere konsentrasjon av nikkel ga vesentlig høyere korrosjonshastighet og avskallende korrosjonsprodukter. Til høyre vises massetap i en annen felttest der stål med ulikt innhold av nikkel ble eksponert i 15,5 år i marint miljø [4]. Et massetap på 10 g/dm² tilsvarer en korrosjonshastighet på 8 µm/år. Her ble det oppnådd god effekt ved lavere konsentrasjon av nikkel. Det ble ikke oppgitt noen deponeringshastighet for klorid, men siden korrosjonshastigheten var lavere var miljøet trolig mindre aggressivt enn i den andre testen.

Analyse av rustsjiktet på prøvene fra diagrammet til venstre i Figur 14 viste at nikkel ble oppkonsentrert i det innerste, tette rustsjiktet [39]. Inkorporering av nikkel i oksidet, spesielt dannelse av Fe₂NiO₄ i stedet for Fe₃O₄, førte til at oksidet ble kation-selektivt – det vil si at kun positivt ladde ioner får passere. Det innerste sjiktet var derfor anriktet på natriumioner (Na²⁺), mens det ytterste sjiktet var anriktet på klorid (Cl⁻). Ekskludering av klorid fra det innerste rustsjiktet ble antatt å være den primære korrosjonsbeskyttende effekten av nikkel. Resultater fra en annen undersøkelse ser ut til å bekrefte denne mekanismen [40].



Figur 14. Effekt av nikkel i rusttrege stål på korrosjonshastigheten. Venstre: Korrosjonsdybde (mm) etter 9 år eksponering i et miljø med 130 mg/m²/døgn klorid [38]. Høyre: Massetap etter 15,5 år eksponering i marint miljø ved Kure Beach i USA [4].

Fosfor

Fosfor øker korrosjonsmotstanden til kobberholdige rusttrege stål. Det er imidlertid ikke essensielt, og siden det kan ha en negativ effekt på sveisbarhet og mekaniske egenskaper, er det mange rusttrege stål som har lavt innhold av fosfor, se Tabell 1. Vi har ikke funnet noen publikasjon som forklarer mekanismen bak effekten av fosfor, men fosfater (PO₄³⁻) er generelt kjent for å være korrosjonsbeskyttende og brukes i kjemisk forbehandling av metaller før lakkering.

6 Diskusjon

6.1 Relevante begrensninger for bruk i bruer og veiutrustning i Norge

Overflater som holdes konstant fuktige vil ha høy korrosjonshastighet. Erfaringene med høy korrosjonshastighet som følge av konstant kondensering av vann i tårnene på Luling Bridge, viser at kondensasjon kan føre til uakseptabel korrosjon [14]. Vi har imidlertid ingen informasjon som indikerer at områder med mye nedbør ikke er egnet for rusttrege stål. Så lenge overflata tørker med mer eller mindre jevne mellomrom, vil sjiktet av beskyttende jernoksider utvikles. Vi har derfor ikke grunnlag for å si at rusttrege stål er uegnet i visse områder på grunn av klimatiske forhold. Derimot vil kontinuerlig fukting av stålet på grunn av rennende vann, forurensning av overflata, ansamling av materie osv. gi høy korrosjonshastighet, men dette kan unngås ved god design.

Deponering av SO₂ på rusttrege stål vil også øke korrosjonshastigheten, men utslippene av SO₂ er kraftig redusert siden 1990, se Figur 15. Til sammenligning var utslippene i 1980 på 136 000 tonn. Utslipp av SO₂ i Norge er først og fremst knyttet til industri og bergverk, som figuren viser. Den store reduksjonen av utslippene har gjort at SO₂ ikke lenger bidrar generelt til korrosivitet, jamfør resultater fra Tsjekia [32]. Det kan imidlertid ikke utelukkes at det fortsatt kan være forhøyet korrosivitet i nærheten av utslippspunkter, og at dette kan medføre økt korrosjon på rusttrege stål som eventuelt eksponeres der.

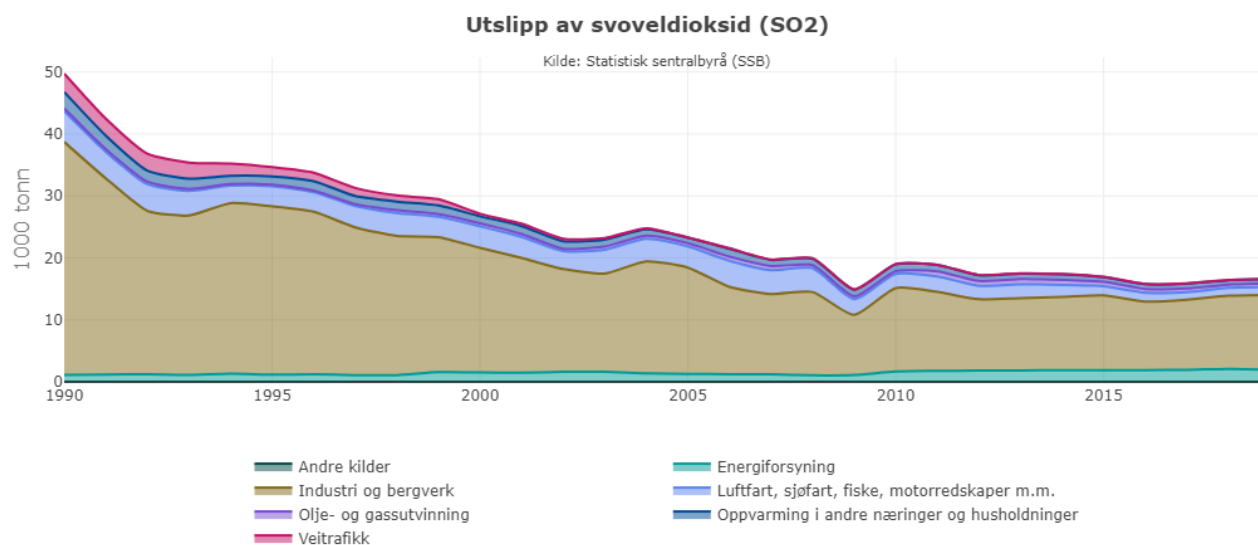
De publiserte erfaringene og testene viser at det er eksponering for klorid som først og fremst forårsaker for høy korrosjonshastighet på rusttrege stål. Vi kommer derfor hovedsakelig til å se på grenser for bruk av rusttrege stål med tanke på eksponering for klorid.

De tre parameterne klorid, SO₂ og fuktetid påvirker korrosiviteten, og flere av de refererte publikasjonene foran relaterer korrosjon på rusttrege stål til korrosivitet. Siden korrosivitet lar seg måle, kan det også være en god parameter med hensyn på begrensninger for rusttrege stål.

Hensikten med å bruke korrosjonstrege stål er å spare kostnader ved å unngå overflatebehandling i starten og reparasjon av belegget gjennom konstruksjonens levetid. I tillegg oppnås gevinster med hensyn på helse, miljø og sikkerhet av samme grunn. Vi må imidlertid legge på et korrosjonstillegg for å kompensere for materialtapet i løpet av designlevetiden. Hvis vi antar at kostnadene for overflatebehandling er ca. 12 % av investeringskostnaden [1], må tilleggskostnaden for å velge rusttrege stål og korrosjonstillegg være vesentlig lavere enn dette. Jo høyere korrosiviteten er, jo mer korrosjonstillegg vil være nødvendig, og jo høyere blir investeringen. Det er følgelig en øvre grense for korrosivitet, hvor det å velge rusttrege stål ikke vil være økonomisk lønnsomt lenger. Det er her ikke forsøkt å gjøre noen beregning av denne grensen, men de tilgjengelige spesifikasjonene for bruk av rusttrege stål i bruer fra andre land, indikerer at korrosjonstillegget ikke bør være mer enn omkring 1,5 mm.

En annen relevant begrensning for bruk av rusttrege stål kan være problemer forårsaket av selve korrosjonsproduktene. Selv om konstruksjonen tåler korrosjonstapet, kan rust skape andre problemer. For eksempel drysser det rust fra en landgang av rusttrege stål i Esbjerg på vestkysten av Danmark, hvilket har ført til lakkskader på biler som er parkert i nærheten.¹ Opplevd sikkerhet blant publikum kan også reduseres hvis det skaller av korrosjonsprodukter fra konstruksjonen.

¹ <https://ugeavisen.dk/esbjerg/artikel/udfordring-biler-rammes-af-flyverust-fra-landgangen>



Figur 15. Årlig utslipp av SO₂ i Norge fra 1990 til 2019

6.2 Grenseverdier

6.2.1 Korrosivitet

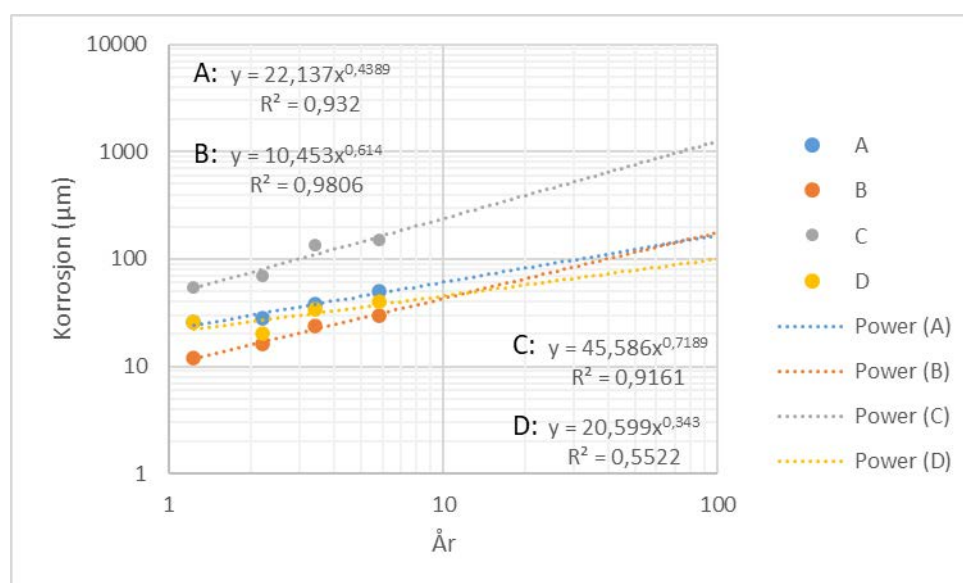
Figur 10 viser den langsiktige, stabile korrosjonshastigheten for stål av type ASTM A242 som funksjon av korrosjonshastighet det første året. Figuren viser at korrosjonshastigheten vil stabiliseres på et høyere nivå i marint miljø enn i ruralt/urbant miljø. Dette skyldes tilstedeværelsen av klorid, som fører til dannelse av avskallende korrosjonsprodukter. Vi må anta at veisalt har tilsvarende effekt, og at vi kan bruke målingene fra marint miljø for å estimere korrosjonshastigheten lang vintersaltede veier. For norske forhold vil det trolig ikke være aktuelt å bruke ASTM A242 type stål, men heller stål av type EN 10025-5 for lav temperatur. Tabell 1 viser at ASTM A242 og EN 10025-5 har relativt lik sammensetning med hensyn på kobber og krom, slik at Figur 10 trolig vil være relevant for denne typen stål også.

Det strengeste kravet for bruk av rusttrege stål med hensyn på korrosivitet ser ut til å være i Japan, med maksimal stabil korrosjonshastighet på kun 6 µm/år tilsvarende 0,6 mm materialtap i løpet av 100 år [1]. Figur 10 viser at med dette kriteriet kan ikke rusttrege stål benyttes i marint miljø, men at det kan benyttes i ruralt/urbant miljø så lenge korrosiviteten ligger innenfor kategori C2. Hvis maksimal stabil korrosjonshastighet økes til 10 µm/år, viser figuren at rusttrege stål kan benyttes i mild marin atmosfære med 30 µm korrosjon det første året (så vidt C3). I ruralt/urbant miljø kan de benyttes hvis korrosjonen første år er lavere enn ca. 55 µm (så vidt C4).

De britiske retningslinjene tillater bruk av rusttrege stål i C4 og C5 miljø med bare 1,5 mm korrosjonstillegg, og er dermed de minst restriktive retningslinjene som er gjengitt i denne rapporten. For å oppnå en levetid på 100 år må den gjennomsnittlige korrosjonshastigheten være under 15 µm/år. Hvis vi igjen bruker sammenhengen mellom korrosjon det første året og stabil korrosjonshastighet over tid vist i Figur 10, ser det ut til at korrosjonshastigheten kan stabiliseres på under 15 µm/år i miljøer med korrosivitet C4. Dette er imidlertid ikke sikkert siden det er en del spredning i dataene, og vesentlig høyere stabil korrosjonshastighet er også målt for marint miljø med korrosivitet C4. For marint miljø med korrosivitet C5 vil korrosjonshastigheten på rusttrege stål være høyere enn 15 µm/år, slik at 100 års levetid ikke vil oppnås. Det er derfor ikke samsvar mellom ønsket levetid og korrosjonsmonn i de britiske retningslinjene.

I Figur 16 er korrosjonsmålingene til Kiwa langs E6 ved Espa (Figur 8) plottet i et logaritmisk diagram, og fremtidig korrosjon er estimert ved å ekstrapolere de tilpassede trendlinjene til 100 år. Ligningen for hver av trendlinjene er gitt i diagrammet. Tabell 7 viser beregnet korrosjon det første året, korrosivitetsklasse og estimert korrosjon etter 100 år for de ekstrapolerte trendlinjene. Prøvene på lokasjon A, B og D får da under 0,2 mm korrosjon på 100 år, mens prøvene på lokasjon C får 1,25 mm. Å ekstrapolere den logaritmiske utviklingen til 100 år forutsetter imidlertid at korrosjonsproduktene er stabile og ikke faller av stålet med tiden. Som diskutert i kapittel 2.4 er dette trolig ikke tilfellet, slik at korrosjonshastigheten vil stabilisere seg på et tidspunkt og vi får et lineært korrosjonstap. Tabellen viser dernest korrosjonshastigheten - estimert etter 6 år, det vil si så langt testen har vart til nå - beregnet ved å derivere ligningene for trendlinjene. Siste kolonne viser total korrosjon etter 100 år ved å anta lineær korrosjon fra 6 til 100 år. Med lineær korrosjonsdybde får vi naturlig nok mer korrosjon etter 100 år. Lokasjon A, B og D har alle under 0,5 mm korrosjon, mens lokasjon C nå får 2,0 mm korrosjon. Rusttregt stål i lokasjon C, det vil si i midtdeleren mellom nordgående og sørgående kjørefelt, ser derfor ikke ut til å få 100 års levetid, på grunn av vintersalting. Levetiden ser heller ut til å være i størrelsesorden 50 år, gitt et korrosjonsmonn på 1 mm.

Oppsummert ser det ut til at rusttregt stål fungerer godt i C2 miljø. C3 miljø kan aksepteres så lenge den økte korrosiviteten ikke skyldes klorider.



Figur 16. Korrosjonsmålingene til Kiwa langs E6 ved Espa plottet i logaritmisk diagram og ekstrapolert til 100 år

Tabell 7. Korrosjonsmålinger og estimert fremtidig korrosjon på prøvene til Kiwa ved Espa

Lokasjon	Korrosjon første år	Korrosivitet	Korrosjon etter 100 år estimert med trendlinje	Korrosjons-hastighet etter 6 år (derivert)	Korrosjon etter 100 år med konstant korrosjons-hastighet etter 6 år
A: 10 m fra E6	21 µm	C2	0,17 mm	4,0 µm/år	0,45 mm
B: 100 m fra E6	10 µm	C2	0,18 mm	3,0 µm/år	0,33 mm
C: Midtdeler	44 µm	C3	1,25 mm	19,0 µm/år	2,0 mm
D: Gangbru	21 µm	C2	0,10 mm	2,0 µm/år	0,25 mm

6.2.2 Klorid

Figur 11 viser at en stabil korrosjonshastighet på rusttrege stål på $6 \mu\text{m}/\text{år}$ oppnås ved omkring $5 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{døgn}$ deponert NaCl, og $10 \mu\text{m}/\text{år}$ ved omkring $9 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{døgn}$ deponert NaCl. Dette tilsvarer 3 og 6 mg klorid pr døgn, respektive. Figuren viser også at avskallende korrosjonsprodukter først ble dannet ved en stabil korrosjonshastighet på omkring $15 \mu\text{m}/\text{år}$ og deponering av over $12 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{døgn}$ NaCl (tilsvarende 8 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{døgn}$ klorid). Dette er mer enn én størrelsesorden lavere enn kravet i Storbritannia, som tillater opptil $200 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{døgn}$.

Undersøkelsen av de to bruene i Tsjekia referert i kapittel 5.2.1, støtter til en viss grad opp under resultatene i Figur 11. Vintersalting førte til deponering av klorid på $20\text{-}90 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{døgn}$ i vinterhalvåret på brua som krysset motorvei, og gjennomsnittlig $10 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{døgn}$ i året. Avskallende korrosjonsprodukter ble funnet på flater som vendte oppover, spesielt de som ikke ble vasket av nedbør.

Spredning av klorid omkring vintersaltede veier er i liten grad undersøkt. Vegvesenets felttester langs E6 ved Espa gir imidlertid en viss indikasjon. Prøvene plassert i midtdeleeren og 4 m til side for veien hadde omkring $45 \mu\text{m}$ korrosjon det første eksponeringsåret, som må skyldes vintersalting. Prøver 10 m til side for veien og på gangbrua ca. 6 m over veien ser ikke ut til å ha kun ubetydelig høyere korrosjonshastighet enn referanseprøvene som står 100 m fra veien. Disse ser derfor ikke ut til å være vesentlig berørt av vintersalting. Sammenligning med brua i Tsjekia, der prøver i tilsvarende høyde over veien som ved Espa hadde forhøyet korrosjonshastighet, indikerer at tunnel-lignende forhold øker korrosiviteten. Dette er også overens med flere av spesifikasjonene fra andre land som er funnet.

Oppsummert ser det ut til at rusttrege stål av typene som er beskrevet i EN 10025-5 tåler lite klorid. Siden det bare i få tilfeller er utført målinger av deponert klorid ved felttesting av rusttrege stål er det vanskelig å si nøyaktig hva som er akseptabelt nivå. Det vil dessuten trolig variere en god del, som funksjon av andre parametere, for eksempel hvor åpent stålet er eksponert for regnvann som kan skylle av kloridene. Resultatene viser at rusttrege stål vil ha forhøyet korrosjonshastighet langs vintersaltede veier. Langs bakken ser det ut til at effekten av vintersalting er ubetydelig 10 m fra veien. Vertikalt over veien er effekten ikke merkbar ved tillatt overbygningshøyde (4,9 m) så lenge det ikke oppstår tunnel-lignende forhold (vertikale vegger på sidene av veien). Langs kysten må det undersøkes om klorider fraktes fra sjøen til eksponeringsstedet, enten ved korrosivitetmålinger eller måling av deponert klorid.

6.2.3 Svoveloksider

Som vist i Figur 12 øker korrosjonshastigheten på rusttrege stål raskt når deponeringshastigheten av svoveloksider på overflata overstiger $20 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{døgn}$. Det ser derfor ut til at bruken av rusttrege stål bør begrenses der deponeringsraten overskrider denne verdien.

6.3 Valg av legering

Bruk av rusttrege stål i Norge krever at det er tilgjengelige varianter for lav temperatur. Dette er tilfellet for EN 10025-5 legeringer type J4W og J5W, som er for bruk ned til -40 og -50 °C respektive. Dette er legeringer med 0,55 % Cu og 0,8 % krom, som er lite egnet for bruk i kloridholdig miljø, som diskutert over. Legeringer med 3% nikkel er utviklet for å tåle eksponering for klorid bedre. De ser imidlertid ikke ut til å være brukt i særlig grad utenfor Japan, og tålegrense for klorid er ikke godt dokumentert gjennom publiserte feltefaringer eller felttester. Nikkel er også et dyrt legeringselement, så det er rimelig å anta at disse legeringene er vesentlig dyrere enn EN 10025-5 variantene.

7 Forslag til retningslinjer for bruk av rusttrege stål

7.1 Miljøparametere

Rusttrege stål i lastbærende konstruksjoner bør ikke brukes i kystmiljø. Korrosiviteten bør ikke overstige kategori C2, målt i henhold til ISO 9226. Deponering av klorid bør ikke være høyere enn 5 mg/m²/døgn, målt i henhold til ISO 9225. Langs vintersaltede veier bør det ikke brukes rusttrege stål i lastbærende konstruksjoner hvis veisalt deponeres på konstruksjonen. Hvis det ikke er mulig eller hensiktsmessig å måle deponering av klorid i henhold til ISO 9225, kan det antas at området innenfor 10 m til side for veien og 5 m over veien er eksponert for veisalt.

Rusttrege stål bør ikke benyttes i lastbærende konstruksjoner i nærheten av store punktutslipp av svoveloksider, som bergverk og prosessindustri. Deponering av svoveloksider bør ikke overstige 20 mg/m²/døgn, målt i henhold til ISO 9225. Korrosiviteten bør ikke overstige kategori C2, målt i henhold til ISO 9226.

For veiutrustning kan høyere korrosjonshastighet tillates så lenge kombinasjon av korrosjonshastighet og korrosjonsmonn fortsatt gir ønsket levetid. Det bør imidlertid vurderes om avskallende korrosjonsprodukter kan skape problemer for publikum eller kjøretøy, som sannsynligvis vil dannes hvis grenseverdiene over for klorid og korrosivitet overskrides.

7.2 Valg av legering

Rusttrege stål velges i henhold til NS-EN 10025-5.

7.3 Bruksområde for rusttrege stål

Vegvesenet har brukt rusttrege stål både i bærende konstruksjoner og i veiutrustning, som rekkverk, skiltportaler, master og stolper. Hensikten med å bruke rusttrege stål er å unngå overflatebehandling. Materialet må derfor gi den ønskede levetiden uten korrosjonsbeskyttelse. For bærende konstruksjoner er designlevetiden normalt 100 år, mens den for veiutrustning kan være fra 25 til 50 år. For å oppnå 100 års levetid med 1 mm korrosjonsmonn må den gjennomsnittlige korrosjonshastigheten være lavere enn 10 µm/år. Med kortere levetid kan en høyere korrosjonshastighet tillates, forutsatt at korrosjonsmonnet ikke også er redusert.

I miljø med korrosivitetskategori C2 vil korrosjonshastigheten på det rusttrege stålet være så lav at korrosjonstillegget kan reduseres til 0,5 mm, selv med et design for 100 års levetid.

7.4 Konstruktiv utførelse

For at ønsket levetid skal oppnås må rusttrege stål tørke når været tillater det. Konstruktiv utførelse som hindrer overflata å tørke må derfor unngås. Vann fra kjørebanelen må dreneres bort fra det rusttrege stålet. Spesielt er dette viktig å være oppmerksom på ved bruskjøter eller andre overflater som samler vann. Hvis dette ikke er mulig å unngå, for eksempel i overlappende skjøter, kan innlegg av varmforsinket stål eller sinkplater brukes.

Brunt rustvann fra det rusttrege stålet kan misfarge andre komponenter og overflater i konstruksjonen og redusere det visuelle utseendet. Vann fra som renner fra rusttrege stål bør derfor også dreneres bort.

Bildene under viser eksempler på konstruktiv utførelse.



God løsning for overlappende skjõt.

Varmforsinket stål er benyttet i innlegget siden spalten vil fange vann og tørke langsomt



God løsning for stolpe som går ned i bakken.

Rusttrege stål bør ikke eksponeres i jord. Enten bør stolpen være montert på betong, eller i et annet materiale som her (varmforsinket stål).



Dårlig løsning for rekkverksprofil.

Profilen fanger vann og hindrer tørking. Økt korrosjonshastighet kan forventes innvendig i profilen.



God løsning for overgang mellom veibane og fotlist i rusttregt stål.

Veibanen vil ofte være fuktig i lengre tid enn resten av konstruksjonen. Å løfte det rusttregte stålet noe over veibanen vil derfor redusere faren for korrosjon.



God løsning med dreneringshull.

Dreneringshullene hindrer at det fanges vann i den påsveisede boksen.



God løsning for å hindre rustvann å renne inn på betongkonstruksjon.

En dryppeplate er montert på flensen av bjelken for å lede vannet av flensen før det når betongkonstruksjonen. Hindrer misfarging av betongen [24].

8 Referanser

1. Morcillo, M., et al., Atmospheric corrosion data of weathering steels. A review. *Corrosion Science*, 2013. 77: p. 6-24.
2. Morcillo, M., et al., Atmospheric corrosion of weathering steels. Overview for engineers. Part I: Basic concepts. *Construction and Building Materials*, 2019. 213: p. 723-737.
3. Morcillo, M., et al., Atmospheric corrosion of weathering steels. Overview for engineers. Part II: Testing, inspection, maintenance. *Construction and Building Materials*, 2019. 222: p. 750-765.
4. Morcillo, M., et al., Weathering steels: From empirical development to scientific design. A review. *Corrosion Science*, 2014. 83: p. 6-31.
5. Jonhansen, A., Værbestandige karbonstål - bruk, erfaringer og korrosjonsmekanismer i ulike miljøer, Report no. 3030-11-0435, 2011, Teknologisk Institutt, Oslo.
6. ISO, 9223, Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Classification. 2012, The International Organization for Standardization: Geneve.
7. Cook, D.C., Spectroscopic identification of protective and non-protective corrosion coatings on steel structures in marine environments. *Corrosion Science*, 2005. 47(10): p. 2550–2570.
8. Yamashita, M. and T. Misawa. Recent Progress in the Study of Protective Rust-Layer Formation on Weathering Steel, *CORROSION 98*, NACE International, NACE, 1998
9. Nishimura, T., et al., Electrochemical Behavior of Rust Formed on Carbon Steel in a Wet/Dry Environment Containing Chloride Ions. *CORROSION*, 2000. 56(9): p. 935-941.
10. Alcántara, J., et al., Marine Atmospheric Corrosion of Carbon Steel: A Review. *Materials (Basel)*, 2017. 10(4).
11. Nishimura, T., K.-i. Tanaka, and Y. Shimizu, Effect of NaCl on Rusting of Steel in Wet and Dry Corrosion Cycle. *Tetsu-to-Hagane*, 1995. 81(11): p. 1079-1084.
12. Dillmann, P., F. Mazaudier, and S. Hœrlé, Advances in understanding atmospheric corrosion of iron. I. Rust characterisation of ancient ferrous artefacts exposed to indoor atmospheric corrosion. *Corrosion Science*, 2004. 46(6): p. 1401-1429.
13. Asami, K. and M. Kikuchi, In-depth distribution of rusts on a plain carbon steel and weathering steels exposed to coastal–industrial atmosphere for 17 years. *Corrosion Science*, 2003. 45(11): p. 2671-2688.
14. Cook, D.C. and A.C.V. Orden, The Luling bridge: An inside story, *CORROSION/2000*, NACE, Houston, TX, 2000
15. Díaz, I., et al., Atmospheric corrosion of ASTM A-242 and ASTM A-588 weathering steels in different types of atmosphere. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 2018. 53(6): p. 449-459.
16. ISO, 9224, Corrosion of metals and alloys. Corrosivity of atmospheres. Guiding values for the corrosivity categories. 2012, International Organization for Standardization: Geneve.
17. Morcillo, M., et al., On the Mechanism of Rust Exfoliation in Marine Environments. *Journal of The Electrochemical Society*, 2016. 164(2): p. C8-C16.
18. EN, 1993-2. Eurocode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner. Del 2: Bruer. 2009, Standard Norge: Oslo.
19. FHWA, Uncoated Weathering Steel in Structures. 1989, Federal Highway Administration: Washington DC.
20. Japan Road Association, Specifications for highwaybridges. Part2 steel bridges. 2012, Japan Road Association: Tokyo.
21. JSCE, Standard Specifications for Steel and Composite Structures, in I General Provision, II Structural Planning, III Design. 2007, Japan Society of Civil Engineers: Tokyo.
22. Siklander, O. and A. Åqvist, MSc Thesis: Livscykelanalyser för en öppningsbar vägbro, KTH, Stockholm, 2016
23. Johansen, A., Inspeksjon av Rekkverk på E6, Report no. 3000-14-014381, 2014, Teknologisk Institutt, Oslo.

24. McDad, B., et al., Performance of Weathering Steel in TxDOT Bridges, Report no. 80620, 2000, Texas Department of Transportation, Austin, TX.
25. Nickerson, R.L., Performance of weathering steel in road bridges - A third phase report, Report no. 1995, American Iron and Steel Institute, Washington DC.
26. Albrecht, P. and A.H. Naeemi, Performance of weathering steel in bridges, Report no. 272, 1984, Transportation Research Board, Washington, DC.
27. Fuji, Y., et al., Corrosion risk management methods to realize long-term durability of weathering steel bridges, Report no. 97, 2008, Nippon Steel, Tokyo.
28. Horii, S., Y. Mishima, and M. Hashimoto, Steel bridge quality management and weathering steel application technologies in Japan, IABSE-JSCE Joint Conference on Advances in Bridge Engineering-III, IABSE, 2015
29. Goto, S., T. As, and A. Miyamoto, Development of an Advanced Inspection System for Weathering Steel Bridges based on Digital Image Recognition, in Bridge Maintenance, Safety Management, Health Monitoring and Informatics - IABMAS '08, H.M. Koh and D. Frangopol, Editors. 2008, CRC Press: London.
30. Coomarasamy, A., et al., Analysis Of Corrosion Products Formed On Some Of Ontario'S Weathering Steel Bridges, CORROSION 2008, NACE International, NACE, 2008
31. Urban, V., V. Krivy, and K. Kreislova, The Development of Corrosion Processes on Weathering Steel Bridges. Procedia Engineering, 2015. 114: p. 546-554.
32. Křivý, V., et al., Corrosion Processes on Weathering Steel Bridges Influenced by Deposition of De-Icing Salts. Materials & Design, 2019. 12: p. 1089.
33. Blegstad, J.F., Felttest av rustregt stål (År 6), Report no. 2020, Kiwa, Oslo.
34. Kubzova, M., V. Krivy, and K. Kreislova, Influence of microclimate on the sustainability and reliability of weathering steel bridge. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018. 143: p. 012008.
35. Chico, B., et al., Annual Atmospheric Corrosion of Carbon Steel Worldwide. An Integration of ISOCORRAG, ICP/UNECE and MICAT Databases. Materials (Basel, Switzerland), 2017. 10(6): p. 601.
36. Yamashita, M., et al., Structure and protective performance of atmospheric corrosion product of Fe–Cr alloy film analyzed by Mössbauer spectroscopy and with synchrotron radiation X-rays. Corrosion Science, 2003. 45(2): p. 381-394.
37. Leygraf, C., et al., Atmospheric corrosion. 2 ed. 2016: Wiley.
38. Usami, A., H. Kihira, and T. Kusunoki, 3%-Ni Weathering Steel Plate for Uncoated Bridges at High Airborne Salt Environment, Report no. 2003, Nippon Steel, Tokyo.
39. Kimura, M., et al., Control of Fe(O,OH)₆ nano-network structures of rust for high atmospheric-corrosion resistance. Corrosion Science, 2005. 47(10): p. 2499-2509.
40. Chen, X., et al., Effect of Ni on the ion-selectivity of rust layer on low alloy steel. Materials Letters, 2007. 61(19): p. 4050-4053.
41. ISO, 12944-2, Paints and varnishes - Corrosion protection of steel structures by protective paint systems. Part 2: Classification of environments. 2017, The International Organization for Standardization: Geneva.

A Korrosivitetsklasser

Korrosivitetsklasser er definert i ISO 9223 [6]. ISO 12944-2 gjengir de samme korrosivitetsklassene [41]. Tabellen under viser grenseverdier for korrosjonshastighet det første året på stål og sink for de ulike korrosjonsklassene, samt typiske miljøer.

Kategori	Tykkelsesreduksjon det første året		Eksempler på typisk miljø	
	Stål	Sink	Utendørs	Innendørs
C1 – svært lav	< 1,3 µm	< 0,1 µm	-	Oppvarmede rom
C2 – lav	1,3 – 25 µm	0,1 – 0,7 µm	Landlig miljø med lite forurensning	Bygninger u/oppvarming
C3 – medium	25 – 50 µm	0,7 – 2,1 µm	By, industri, skjermet kyst med lav salinitet	Produksjonslokaler med høy RH
C4 – høy	50 – 80 µm	2,1 – 4,2 µm	Industri, kystområder med moderat salinitet	Kjemisk industri, svømmehaller og verft
C5 – svært høy	80 – 200 µm	4,2 – 8,4 µm	Ekspontert kyst med høy salinitet	Nesten permanent kondensering og forurensning
CX – ekstrem	200 – 400 µm	8,4 – 25 µm	Offshore	Industri med ekstrem fuktighet og aggressiv atmosfære



Teknologi for et bedre samfunn

www.sintef.no



Statens vegvesen
Pb. 1010 Nordre Ål
2605 Lillehammer

Tlf:
firmapost@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

Trygt fram sammen