



Korrosjonsbeskyttelse i tunneler

Etatsprogrammet Varige konstruksjoner 2012-2015

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 410



Tittel

Korrosjonsbeskyttelse i tunneler

Undertittel**Forfatter**

Ole Øystein Knudsen

Avdeling

Trafikksikkerhet, miljø- og
teknologiavdelingen

Seksjon

Tunnel og betong

Prosjektnummer

603242

Rapportnummer

Nr. 410

Prosjektleder

Synnøve A. Myren / Alf Kveen

Godkjent av

Alf Kveen

Emneord

Varige konstruksjoner, tilstandsutvikling
tunneler, korrosjon, korrosjonsbeskyttelse,
materialteknologi, belegg

Sammendrag

Denne rapporten inngår i en serie rapporter fra Statens vegvesens etatsprogram Varige konstruksjoner, 2012-2015. Hensikten med programmet er å legge til rette for at riktige materialer og produkter brukes på riktig måte i Statens vegvesen sine bruer og tunneler.

Rapporten inneholder en kort gjennomgang av relevante korrosjonsmekanismer i tunneler, erfaringer vedrørende korrosjon i norske tunneler samt noen anbefalinger vedrørende materialvalg og korrosjonsbeskyttelse for ulike komponenter. Rapporten skal bidra til å heve kompetansen på korrosjon i Statens Vegvesen og være utgangspunkt for valg av materialer og korrosjonsbeskyttelse i tunneler.

Title

Corrosion protection in tunnels

Subtitle**Author**

Ole Øystein Knudsen

Department

Traffic Safety, Environment and Technology
Department

Section

Tunnel and concrete

Project number

603242

Report number

No. 410

Project manager

Synnøve A. Myren / Alf Kveen

Approved by

Alf Kveen

Key words

Durable structures, existing tunnels,
corrosion, corrosion protection, materials
technology, coating

Summary

This report belongs to a series of reports from the R&D-programme Durable structures 2012-2015, carried out by the Norwegian Public Roads Administration. The purpose of the programme is to ensure that the right materials and products are used correctly in NPRAs bridges and tunnels.

The report gives a short summary of relevant corrosion mechanisms in tunnels, experiences regarding corrosion in Norwegian tunnels, and recommendations regarding choice of materials and corrosion protection for different components. The report will contribute to increase the NPRAs competence on corrosion, and form the basis for choice of materials and corrosion protection in tunnels.

Forord

Denne rapporten inngår i en serie rapporter fra **etatsprogrammet Varige konstruksjoner**. Programmet hører til under Trafikksikkerhet-, miljø- og teknologiavdelingen i Statens vegvesen, Vegdirektoratet, og foregår i perioden 2012-2015. Hensikten med programmet er å legge til rette for at riktige materialer og produkter brukes på riktig måte i Statens vegvesen sine konstruksjoner, med hovedvekt på bruer og tunneler.

Formålet med programmet er å bidra til mer forutsigbarhet i drift- og vedlikeholdsfasen for konstruksjonene. Dette vil igjen føre til lavere kostnader. Programmet vil også bidra til å øke bevisstheten og kunnskapen om materialer og løsninger, både i Statens vegvesen og i bransjen for øvrig.

For å realisere dette formålet skal programmet bidra til at aktuelle håndbøker i Statens vegvesen oppdateres med tanke på riktig bruk av materialer, sørge for økt kunnskap om miljøpåkjenninger og nedbrytningsmekanismer for bruer og tunneler, og gi konkrete forslag til valg av materialer og løsninger for bruer og tunneler.

Varige konstruksjoner består, i tillegg til et overordnet implementeringsprosjekt, av fire prosjekter:

- Prosjekt 1: Tilstandsutvikling bruer
- Prosjekt 2: Tilstandsutvikling tunneler
- Prosjekt 3: Fremtidens bruer
- Prosjekt 4: Fremtidens tunneler

Varige konstruksjoner ledes av Synnøve A. Myren. Mer informasjon om prosjektet finnes på vegvesen.no/varigekonstruksjoner

Denne rapporten tilhører **Prosjekt 2: Tilstandsutvikling tunneler** som ledes av Alf Kveen. Prosjektet vil skaffe kunnskap om den tekniske tilstanden på tunnelers konstruksjon og utrustning og øke kunnskapen om nedbrytningsmekanismer. Formålet med prosjektet er å utvikle bedre verktøy for tilstandsutvikling, noe som er viktig både for planlegging av drift og vedlikehold av eksisterende tunneler. Prosjektet vil også etablere kunnskap som kan bidra til at fremtidige tunneler bygges og innredes slik at ønsket kvalitet og levetid oppnås.

Rapporten er utarbeidet av *Ole Øystein Knudsen, SINTEF* på oppdrag fra Varige konstruksjoner.

Rapport

Korrosjonsbeskyttelse i tunneler

Forfatter(e)

Ole Øystein Knudsen



Korroderert bergsikringsbolt, Rv15 Grasdaltunnelen, Stryn, åpnet 1977
(Foto: Karen Klemetsrud, Statens Vegvesen)

Rapport

Korrosjonsbeskyttelse i tunneler

EMNEORD:
zinc; Duplex Coatings;
belegg; Korrosjon;
Materialteknologi

VERSJON
2.0

DATO
2015-08-19

FORFATTER(E)
Ole Øystein Knudsen

OPPDRAKSGIVER(E)
Statens Vegvesen

OPPDRAKSGIVERS REF.
Alf Trygve Kveen

ANTALL SIDER OG VEDLEGG:
37

GRADERING
Unrestricted

GRADERING DENNE SIDE
Unrestricted

ISBN
978-82-14-05842-0

SAMMENDRAG

Denne rapporten inneholder en kort gjennomgang av relevante korrosjonsmekanismer i tunneler, erfaringer vedrørende korrosjon i norske tunneler samt noen anbefalinger vedrørende materialvalg og korrosjonsbeskyttelse for ulike komponenter. Rapporten skal bidra til å heve kompetansen på korrosjon i Statens Vegvesen og være utgangspunkt for valg av materialer og korrosjonsbeskyttelse i tunneler.

UTARBEIDET AV
Ole Øystein Knudsen

KONTROLLERT AV
Astrid Bjørgum

GODKJENT AV
Daniel Blucher

PROSJEKTNR
102008483

RAPPORTNR
SINTEF A27022

VERSJON
2.0

1 av 37

Historikk

VERSJON	DATO	VERSJONSBEKRIVELSE
1.0	2015-08-04	Første versjon

2.0	2015-08-19	Korrektur og små endringer i henhold til kommentarer fra SVV
-----	------------	--

Innholdsfortegnelse

1	Innledning	5
1.1	Bakgrunn	5
1.2	Målsetning	5
2	Relevante korrosjonsformer i tunneler	6
2.1	Innledende om korrosjon.....	6
2.2	Uniform/generell korrosjon	10
2.3	Galvanisk korrosjon.....	11
2.4	Spaltkorrosjon	14
2.5	Gropkorrosjon.....	15
2.6	Spenningskorrosjon	15
2.7	Filiformkorrosjon.....	16
2.8	Mikrobiell korrosjon.....	17
2.9	Korrosjon i betong.....	17
3	Korrosjonsbeskyttelse	18
3.1	Belegg.....	18
3.1.1	Organiske belegg (maling og lakk).....	18
3.1.2	Metallbelegg	20
3.1.3	Dupleksbelegg.....	21
3.2	Katodisk beskyttelse	21
3.3	Materialvalg	21
3.4	Endre eksponeringsmiljøet	22
4	Eksponeringsmiljø i tunneler	22
4.1	Tørt trafikkrom.....	24
4.2	Fuktig trafikkrom.....	24
4.2.1	Landtunneler.....	24
4.2.2	Undersjøiske tunneler	24
4.2.3	Tunneler i alunskifer og kisholdige bergarter	24
4.3	Innkjøringssonen.....	24
4.4	Bak vann- og frostsikring.....	25
4.4.1	Landtunneler.....	25
4.4.2	Undersjøiske tunneler	25
4.4.3	Tunneler i alunskifer og kisholdige bergarter.....	25
4.4.4	Konstant vått miljø eller neddykket	25
4.5	Gysemørtel og sprøytebetong	25

5	Korrosjonserfaringer med materialer som er aktuelle for bruk i tunneler	26
5.1	Korrosjon på varmforsinket og pulverlakkert stål	26
5.2	Korrosjon på rusfrie stållegeringer	26
5.3	Korrosjon på aluminium.....	28
6	Bergsikringsbolter og beslag/bolter for vann- og frostsikring	29
6.1	Ønsket levetid	29
6.2	Materialer	29
6.3	Erfaringer og testresultater	29
6.4	Forslag til korrosjonsbeskyttelse	30
6.4.1	Landtunneler og ferskvannsoner i undersjøiske tunneler	30
6.4.2	Saltvannsoner i undersjøiske tunneler	30
6.4.3	Alunskifer og andre kisholdige bergarter	31
6.4.4	Konstant vått miljø eller neddykket	31
6.4.5	Reparasjon av pulverlakk på varmforsinket og pulverlakkert gods.....	31
6.4.6	Mulige fremtidige løsninger	32
7	Lysarmatur og kabelbruer	32
7.1	Ønsket levetid	32
7.2	Erfaringer	32
7.3	Forslag til løsninger	32
7.3.1	Materialvalg	32
7.3.2	Kobling til eksisterende bolter	33
8	Vifter	33
8.1	Ønsket levetid	33
8.2	Erfaringer	33
8.3	Forslag til løsninger	33
9	Nød-kiosker, skiltbokser, skiltrammer	34
9.1	Ønsket levetid	34
9.2	Erfaringer	34
9.3	Forslag til løsninger	34
10	Pumpehus	35
10.1	Ønsket levetid	35
10.2	Erfaringer	35
10.3	Forslag til løsninger	35
11	Anbefalte materialer/belegg.....	36
12	Referanser.....	37

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Metalliske materialer benyttes i ulike komponenter i tunneler, for eksempel bergsikringsbolter, festeutstyr for vann- og frostsikring, lysarmaturer og kabelbruer, vifter, skiltkasser og nødkiosker, for å nevne de viktigste. Korrosjon vil nedsette levetiden til disse komponentene, slik at det er nødvendig med korrosjonsbeskyttelse. Samtidig varierer korrosiviteten mellom ulike tunneler (landtunneler og undersjøiske tunneler), og mellom de ulike områdene i en tunnel (trafikkrom og bak vann- og frostsikring). Kravene til korrosjonsbeskyttelse og materialvalg vil derfor variere.

Det er rapportert om korrosjonsskader i tunneler. Spesielt bak vann- og frostsikring i enkelte undersjøiske tunneler er det funnet korrosjonsskader, men det er også mange eksempler på at korrosjonsbeskyttelsen har fungert, selv i disse områdene. For å unngå korrosjonsskader og oppnå ønsket levetid på metalliske komponenter bør Statens Vegvesens regelverk inneholde riktige spesifikasjoner for materialvalg og korrosjonsbeskyttelse.

Denne rapporten inneholder en kort gjennomgang av relevante korrosjonsmekanismer i tunneler, erfaringer vedrørende korrosjon i norske tunneler samt noen anbefalinger vedrørende materialvalg og korrosjonsbeskyttelse for ulike komponenter. Rapporten skal bidra til å heve kompetansen på korrosjon i Statens Vegvesen (SVV) og være utgangspunkt for valg av materialer og korrosjonsbeskyttelse i tunneler.

1.2 Målsetning

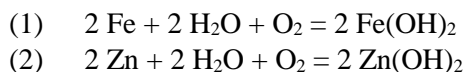
Målsetninger med rapporten har vært:

- Generell gjennomgang av relevante korrosjonsmekanismer for veitunneler i Norge
- Sammendrag av rapporterte korrosjonsskader på ulike komponenter i norske veitunneler
- Gi anbefalinger vedrørende korrosjonsbeskyttelse og materialvalg for ulike komponenter i norske veitunneler
- Gi forståelse for korrosjon slik at SVV kan gjøre gode valg med hensyn på materialer og levetid

2 Relevante korrosjonsformer i tunneler

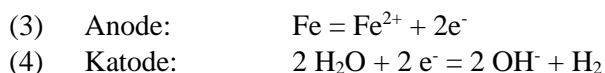
2.1 Innledende om korrosjon

Korrosjon er en elektrokjemisk reaksjon mellom et metall og omgivelsene der metallet oksideres og går i oppløsning. For de betingelsene vi snakker om her så er det en forutsetning at vi har vann til stede. I tunneler er det aktuelt å se på korrosjonsreaksjonene for jern og sink:

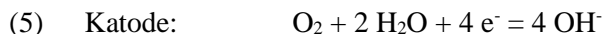


Vi fortsetter å se på korrosjon av jern for enkelthets skyld. De samme betraktningene gjelder for sink.

Korrosjonsreaksjonen kan deles opp i to halvreaksjoner, eller to halvceller som er den terminologien som brukes. En anodereaksjon (oksydering) og en katodereaksjon (reduksjon):



I dette eksemplet er katodereaksjonen hydrogenutvikling, den såkalte hydrogenreaksjonen. Den er som regel dominerende ved sure betingelser. Vi har imidlertid en annen reaktant som er enda mer potent og det er oksygen. Hvis vi har nøytrale eller basiske betingelser med oksygen til stede, så er det denne som er dominerende katodereaksjon:



Oksygenreaksjonen er som sagt mer potent. I en nøytral løsning uten oksygen til stede vil jern nesten ikke korrodere, mens med oksygen til stede vil vi ha korrosjon.

Vi har to viktige prinsipper i korrosjonsteori:

1. Anodereaksjonen og katodereaksjonen må gå med samme hastighet, det vil si, alle elektronene som frigjøres i anodereaksjonen må forbrukes i katodereaksjonen. Elektroner kan ikke eksistere alene.
2. Anodereaksjon og katodereaksjon behøver ikke skje på samme sted. Elektroner og ioner må imidlertid kunne transporteres mellom anode og katode. På samme måte som at elektroner ikke kan eksistere alene, kan vi heller ikke ha et overskudd av positive eller negative ioner noe sted. De må møtes. Anode og katode må derfor være koblet sammen både elektrisk og gjennom elektrolytt (vann). Det kan være at de er neddykket i samme løsning eller at det er en ledende væskefilm på overflata (saltholdig) som dekker både anode og katode.

En prinsippskisse for korrosjon blir da som vist i Figur 1.

Et viktig fenomen i korrosjon er passivitet. Metallet "ønsker" å reagere, men det skjer ikke fordi en oksidfilm eller andre utfellinger på overflata opptrer som et beskyttende belegg. Noen viktige eksempler på dette er:

- Aluminium som beskyttes av en overflatefilm av aluminiumsoksid, Al_2O_3
- Rustfritt stål inneholder krom som danner en overflatefilm av kromoksid, Cr_2O_3
- På sink dannes det en overflatefilm av sinkkarbonat ved eksponering i atmosfære: ZnCO_3
- Titan er beskyttet av en overflatefilm av titanoksid, TiO_2

Passivitet er delvis avhengig av miljøet metallet er eksponert i. Hvis overflatefilmen ikke er stabil vil ikke lenger metallet være beskyttet og korrosjon kan starte igjen. Et eksempel på dette er sink i sure løsninger. Sinkkarbonatet på overflata vil da løse seg opp og sinken korroderer raskt.

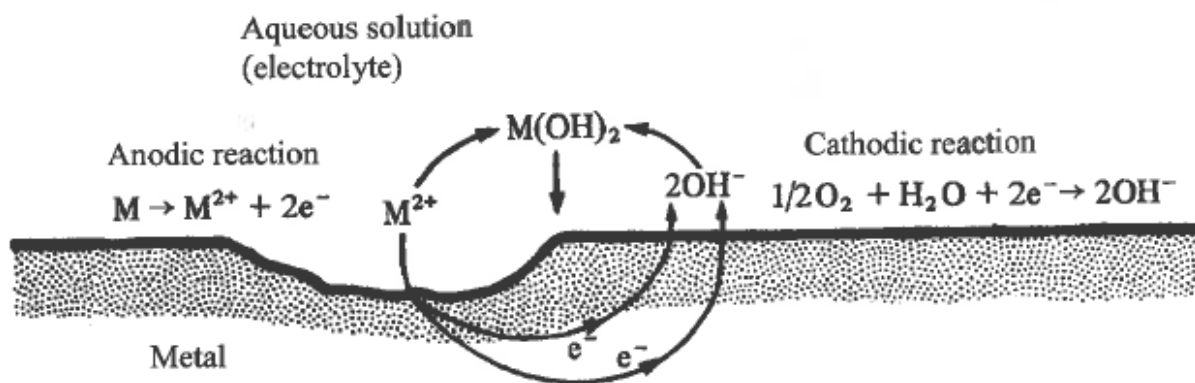
- Korrosjonsreaksjoner er avhengig av noe vi kaller elektrokjemisk potensial. Potensialet er en relativ størrelse og måles i forhold til en referanse-elektrode. Begrepet potensial er vanskelig å forstå, men det har noe med termodynamikk å gjøre. De fleste av oss nøyer seg med å godta det, uten helt å forstå det.
- Anodereaksjonene går fortere når potensialet stiger, mens katodereaksjonene går fortere når potensialet synker. Følgelig vil en anodereaksjon gå langsommere når potensialet senkes. Til slutt vil vi nå et likevektspotensial der reaksjonen snur, hvilket betyr at vi vil danne metall fra ioner i stedet for oppløsning av metallet ved korrosjon (forutsatt at det ikke er andre reaksjoner som slår inn først). Det er dette man utnytter i elektrokjemisk produksjon av metaller og plettering. En enkel skisse er vist i Figur 2.
- Hastigheten i elektrokjemiske reaksjoner oppgis ofte som en strøm (Amper), siden den er proporsjonal med antall elektroner. Linja som går skrått oppover viser hastigheten for anodisk oppløsning av jern, det vil si den linja vi er opptatt av i korrosjon. Linja som går skrått nedover er produksjon av jern og den linja man ville være opptatt av ved utfelling av jern (uinteressant for oss).
- Ved katodisk beskyttelse trykker vi potensialet så lavt at reaksjonen ønsker å gå den andre veien og metallet dermed ikke kan korrodere. Det er termodynamisk stabilt. På fagspråket sier vi at metallet er immunt mot korrosjon.

Vi har da tre mulige tilstander med hensyn på korrosjon for et metall:

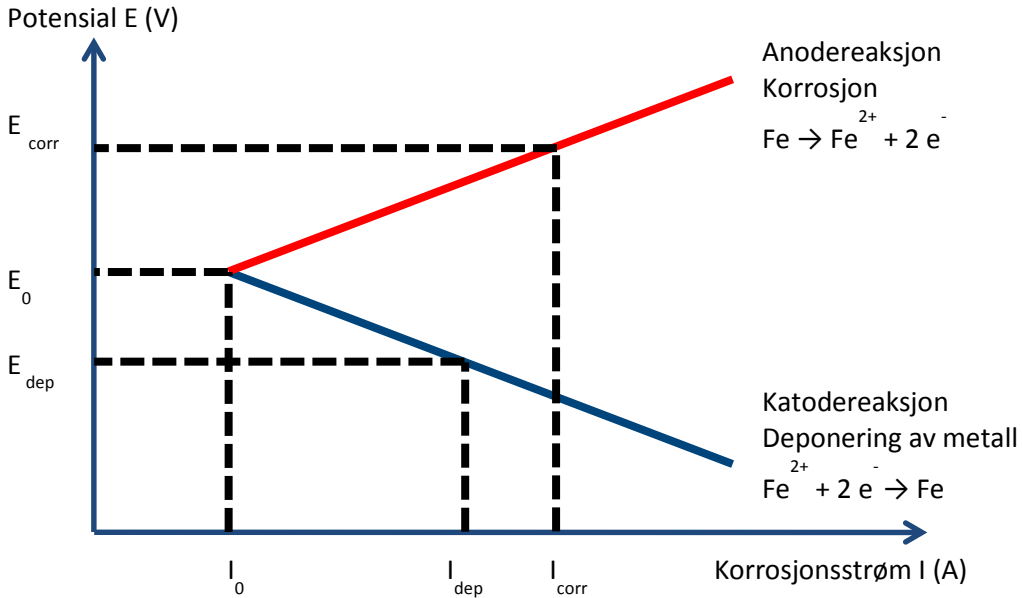
- Aktiv: korrosjon
- Passiv: metallet skulle ha korrodert men er beskyttet av en beskyttende film på overflata
- Immun: metallet kan ikke reagere, det er termodynamisk stabilt (reaksjonen ville gått andre veien)

Et såkalt Pourbaix-diagram viser disse tre tilstandene for ulike metaller som funksjon av potensial og pH. Pourbaix-diagram er nyttige fordi de kan fortelle oss om et metall vil korrodere eller ikke under et sett med gitte betingelser. Det sier ingenting om korrosjonshastighet, kun om korrosjon er mulig eller ikke. Pourbaix-diagrammene for jern og sink er gitt i Figur 3 og Figur 4. Aktiv korrosjon, passivitet og immunitet er angitt i diagrammene.

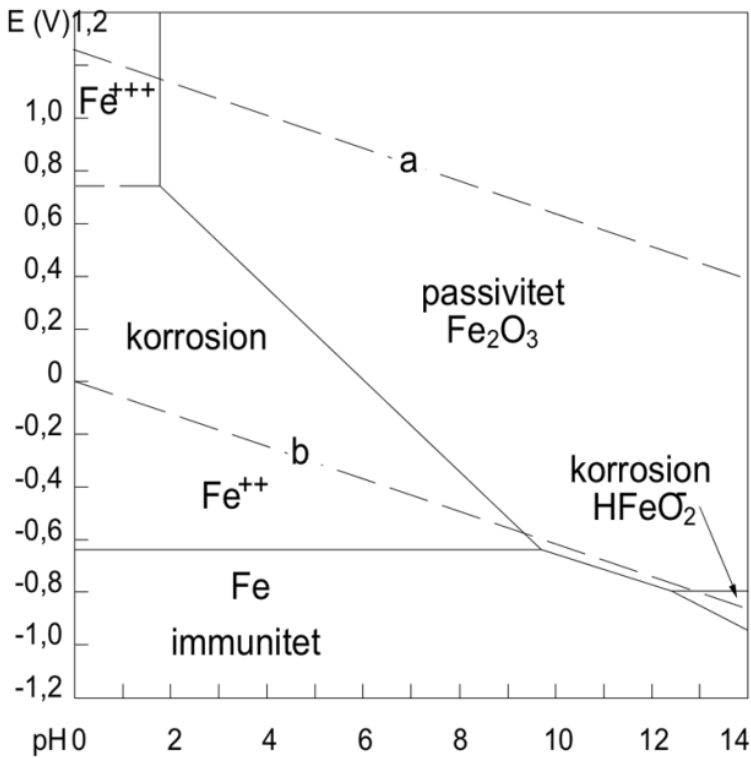
Som Pourbaix-diagrammene viser har pH betydning for korrosjonsprosessen. pH i ferskvann ligger vanligvis omkring 6, og i sjøvann 8,2. I betong har vi derimot svært høy pH, vanligvis over 12. I alunskifer og kisholdige bergarter kan vi ha en pH ned mot 2. Nesten hele pH skalaen er derfor relevant for tunneler.



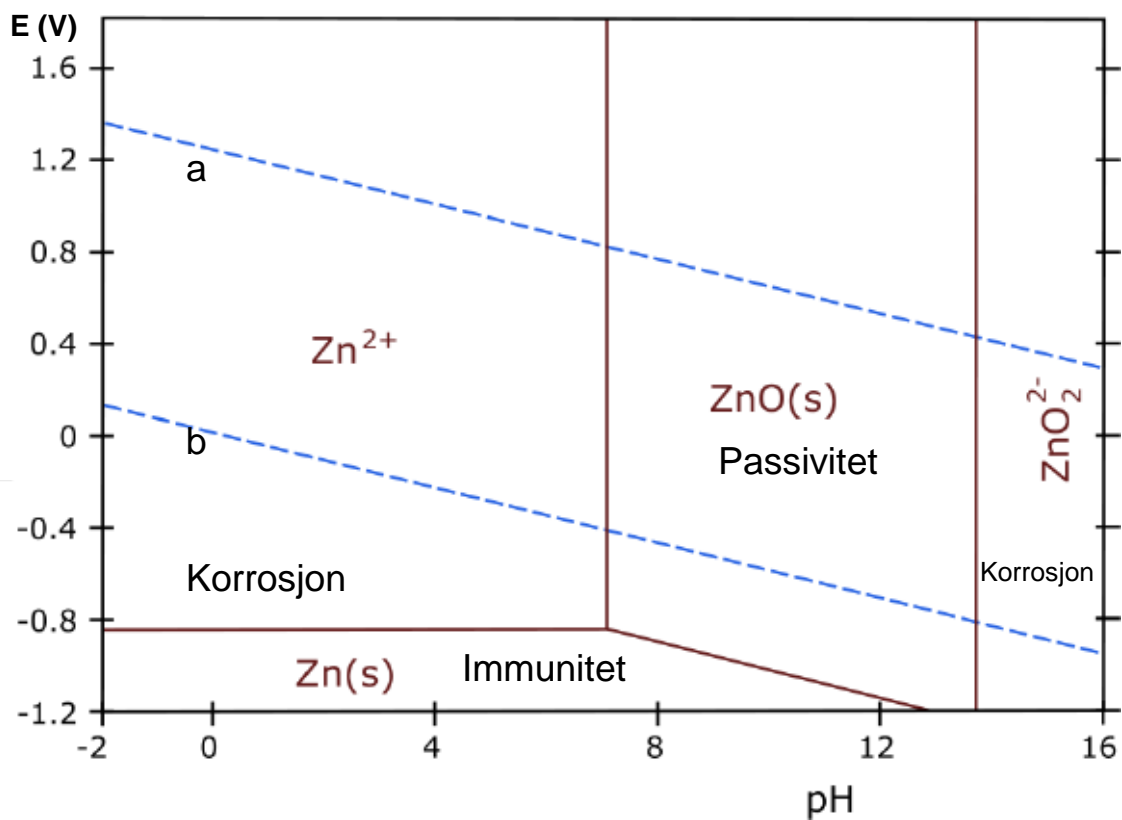
Figur 1. Prinsippkisse for korrosjon. Tatt fra E. Bardal: "Corrosion and corrosion protection" [1]



Figur 2. Hastigheten til jernreaksjonen (målt som strøm) som funksjon av potensial. E_0 er likevektspotensialet (reaksjonen går like for begge veier), E_{corr} og I_{corr} er henholdsvis korrosjonspotensial og korrosjonsstrøm, E_{dep} og I_{dep} er henholdsvis pletteringspotensial og pletteringsstrøm



Figur 3. Pourbaix-diagram for jern. De stiplede linjene er for (a) oksygenreaksjonen og (b) hydrogenreaksjonen. Y-aksen viser potensial målt mot hydrogenelektroden



Figur 4. Pourbaix-diagram for sink. De stiplede linjene er for (a) oksygenreaksjonen og (b) hydrogenreaksjonen. Y-aksen viser potensial målt mot hydrogenelektroden

2.2 Uniform/generell korrosjon

Dette er den vanligste formen for korrosjon og den korrosjonsformen som angriper alle uedle metaller som ikke er beskyttet. Det blir vanligvis betraktet som en lite farlig form for korrosjon siden den er enkel å forutsi og normalt utvikler seg ganske langsomt. Kumlokk av støpejern er et eksempel på en komponent som ikke er beskyttet mot korrosjon fordi korrosjonshastigheten er lav. I stedet legges det på et lite korrosjonsmonn, slik at det er tatt høyde for en viss korrosjon. Tabell 2 lenger bak i rapporten angir korrosjonshastigheter på stål og sink i ulike typer atmosfærisk miljø.

Pourbaix-diagram som vist i Figur 3 og Figur 4 er ofte nyttige for å vurdere generell korrosjon. De to stiplede linjene i diagrammene, merket a og b, er linjene for oksygenreaksjonen (a) og hydrogenreaksjonen (b), som er de to aktuelle katodereaksjonene (reaksjon 4 og 5 i seksjon 2.1). Avstanden mellom linja for katodereaksjon og anodereaksjon (de nederste horisontale og skrå heltrukne linjene) sier noe om termodynamikken i korrosjonsreaksjonen. Jo høyere katodelinja ligger over anodelinja, jo mer kraft er det i korrosjonsreaksjonen. Hvis vi ser på oksygenlinja så ligger den høyt over anodelinja for både jern og sink. Det betyr at både jern og sink kan korrodere i oksygenrikt miljø. Sink korroderer ofte likevel ikke siden et sjikt av sinkkarbonat på overflata beskytter. Sinken er følgelig passiv. Hvis vi ser på hydrogenlinja (b) så ligger den tett på jernlinja mellom pH 9,5 og 12,5. Det vil si at i dette pH området vil hydrogenreaksjonen i liten grad føre til korrosjon på jern. Med andre ord, hvis miljøet er oksygenfritt og alkalisk så vil jern ikke korrodere. Ved lavere pH ser vi at avstanden øker igjen, slik at jern vil korrodere. Lav pH kan vi ha i tunneler med alunskifer. Vann i slike tunneler vil følgelig være mer aggressivt. Oksygenfritt miljø med høy pH er faktisk et viktig miljø i tunnelsammenheng, siden gyste bergsikringsbolter er eksponert slik. Frisk betong og mørtel har en pH på omkring 12,5-13,5, som gjør at bergsikringsbolter ikke korroderer her.

Hvis vi ser på sinkdiagrammet, så ser vi at det er en viss avstand mellom hydrogenlinja og sinklinja. Dette betyr at sink kan korrodere i oksygenfritt alkalisk miljø. Ved svært høy pH, som man kan ha i frisk betong og mørtel, er ikke sinken passiv heller, slik at vi kan forvente korrosjon på sink i betong og mørtel. Dette stemmer også overens med det som er observert. Dette er imidlertid ikke en trussel mot boltens funksjon, siden stålet under sinkbelegget ikke korroderer, som diskutert over. Gysemørtel er tilsatt korrosjonsinhibitorer for å begrense korrosjon og hydrogenutvikling mens mørtelen er fersk, fordi hydrogenet kan hindre heft mellom bolt og mørtel.



Figur 5. Generell korrosjon på spuntvegg (Foto: SINTEF)

2.3 Galvanisk korrosjon

Galvanisk korrosjon kan oppstå når to ulike materialer kobles sammen når det følgende er oppfylt:

- Materialene er i elektrisk kontakt slik at elektroner kan gå fra det ene materialet til det andre
- De befinner seg i den samme elektrolytten eller under den samme væskefilmen på overflata, for eksempel i en fuktig tunnel
- Det ene materialet er edlere enn det andre (en spenningsforskjell på mer enn 50 mV, se spenningsrekka i Figur 8)

Hvis dette er oppfylt vil følgende skje:

- Katodereaksjonen kan skje på begge materialene (vanligvis oksygenreaksjonen)
- Anodereaksjonen skjer bare på det minst edle materialet

Hvis da arealforholdet mellom de to materialene er slik at det edle materialet har stort areal og det uedle materialet har lite areal, så vil vi kunne få svært høy korrosjonshastighet. Alle elektronene som katodereaksjonen trenger må den få fra anodereaksjonen, som forklart over. Hvis vi har en stor katode vil det være mye oksygen der som reagerer. Hvis det bare er en liten anode som reagerer vil korrosjonsreaksjonen her måtte gå svært fort. Et eksempel på en slik situasjon er når man har montert bolter med sinkbelegg på en komponent i rustfritt stål. Her vil det rustfrie stålet være katode og sinkbelegget på bolten anode. Siden bolten er liten i forhold til den rustfrie komponenten vil korrosjonshastigheten bli svært høy og sinken forsvinner raskt. Når den er borte vil selve stålbolten korrodere. Bildet i Figur 6 viser et lignende tilfelle. Her er det brukt skiver av lavlegert stål, mens bolter, muttere og skinna er av et rustfritt stål. Skivene korroderer. Rustfrie bolter montert i lavlegert stål vil som regel ikke skape problemer. Siden den rustfrie bolten er liten vil den få lite å si for korrosjonshastigheten for det lavlegerte stålet. En god regel er at festemateriell skal være edlere enn delene som sammenbindes.

En annen form for galvanisk korrosjon er når man har ulikt miljø langs et materiale. I slike tilfeller er det altså ikke to materialer som kobles sammen, men det samme materialet som står i to ulike miljøer. Det er vanligvis ulik pH eller ulik oksygentilgang som forårsaker slike angrep. Et typisk tilfelle av dette i tunnel er gyste bolter med ender som stikker ut. Her vil den delen av bolten som står i fjellet være passivert av høy pH, mens utenfor fjellet er dette ikke tilfellet. I undersjøiske tunneler vil det være god tilgang på klorid, som gjør stålet mer korrosjonsutsatt. Akkurat i overgangen inn i fjellet vil stålet korrodere mest fordi her har vi lavere pH, mye klorider og det er omtrent konstant fuktig. I tillegg vil bolten noen ganger bøyes for å justere plassering for påmontering av annet utstyr, e.g. vann og frostsikring, som kan få belegget til å sprekke. Dette gjelder både sink- og epoksybelegg. Et lite stykke innover langs bolten i fjellet kan det være tilgang på oksygen, slik at dette området fungerer som katode. Dermed får vi et konsentrert angrep i et lite område i overgangen, mens et større område omkring kan fungere som katode og akselerere angrepet, se eksempel i Figur 7.

For å avgjøre om det er fare for galvanisk korrosjon ved sammenkobling av to materialer kan man se på en såkalt galvanisk spenningsrekke. Et eksempel er gitt i Figur 8. For at det skal være risiko for galvanisk korrosjon sies det vanligvis at det må være en potensialforskjell på 50 mV mellom de to materialene. Hastigheten på korrosjonsangrepet vil være avhengig av potensialforskjellen, saltinnhold i elektrolytten og hvor effektiv katode det edleste materialet er. For sammenkobling av ulike materialer fins det i mange tilfeller veldokumenterte løsninger for hvordan dette skal gjøres.

Tabell 1 viser vurdering av noen materialkombinasjoner som funksjon av arealforhold. Korrosiviteten på stedet og konstruksjonens utforming vil også spille inn, slik at tabellen kun er veiledende.

Hvis man skal beskytte seg mot galvanisk korrosjon ved å male så skal man male det edle materialet. Dette virker paradoksalt, men årsaken er enkel. Hvis man maler det uedle materialet og man får skader i belegget

(det får man svært ofte) så vil den store katoden fortsatt fungere, mens angrepet nå er dirigert mot et lite areal i beleggs-kaden på det uedle materialet. Følgelig kan vi få enda høyere korrosjonshastighet i skaden i belegget enn om vi ikke hadde malt. Ved å male det edle materialet i stedet stopper vi katodereaksjonen og tar kraften ut av det galvaniske angrepet. Hvis det oppstår skader i belegget vil det ha lite å si fordi katodearealet fortsatt vil være lite og ha liten galvanisk effekt.

Tabell 1. Fare for galvanisk korrosjon for ulike materialkoblinger (+: lite korrosjon. -: galvanisk korrosjon)

		Stort areal				
		Karbonstål	Rustfritt/Ti	Varmforsinket	Aluminium	Cu-legeringer
Lite areal	Karbonstål	+	-	+	-	-
	Rustfritt/Ti	+	+	+	+/- ^a	+
	Varmforsinket	+	-	+	+ ^b	-
	Aluminium	-	-	+	+	-
	Cu-legeringer	-	+	-	-	+

a) Rustfrie bolter på aluminium går fint når korrosiviteten er lav. I korrosivt miljø (C4-C5) har dette skapt problemer.

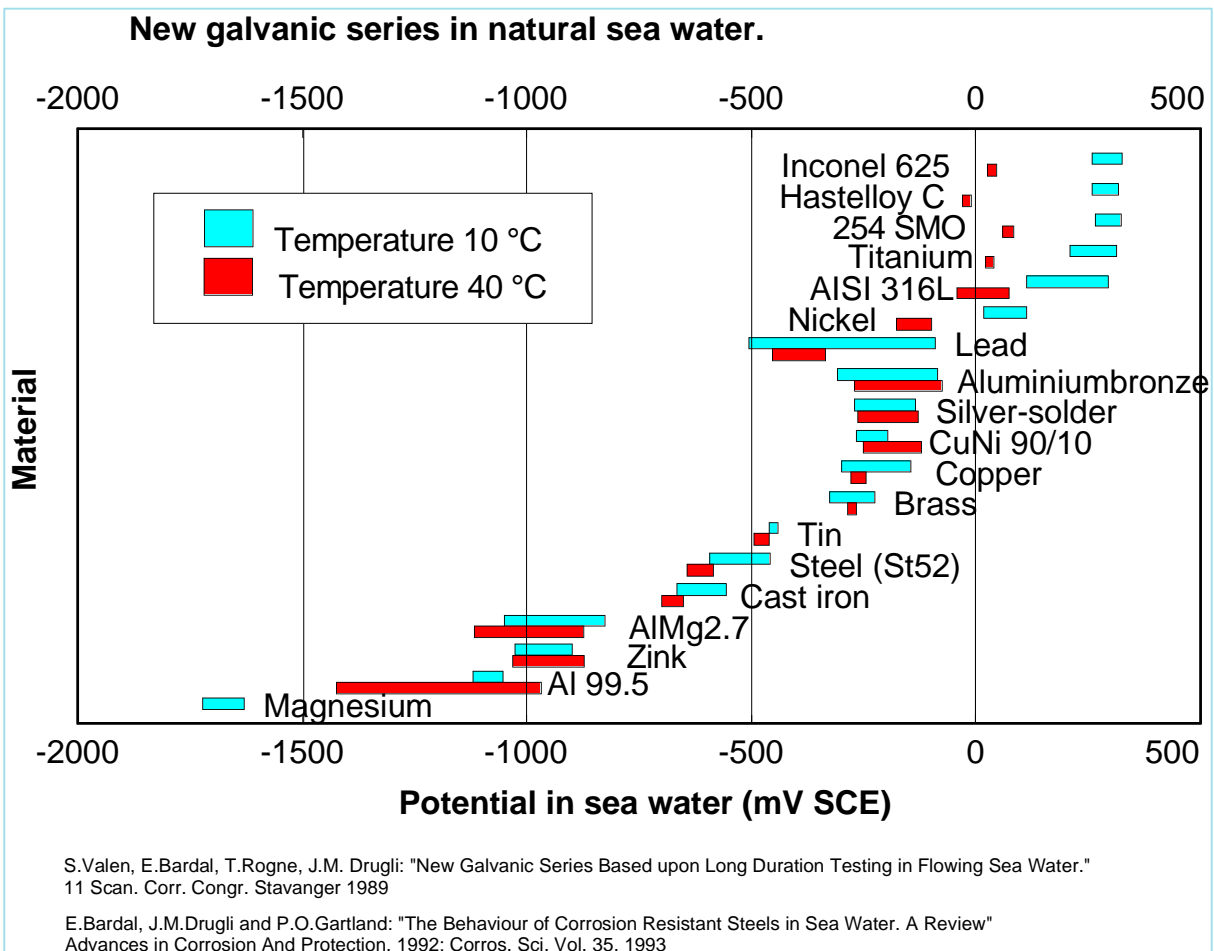
b) Hvis sinkbelegget forsvinner vil det oppstå galvanisk korrosjon



Figur 6. Galvanisk korrosjon på skivene mellom rustfrie muttere og skinne (Foto: Wikipedia)



Figur 7. Galvanisk korrosjon på stål der kamstålet går inn i fjellet. Ulik pH i mørtel og utenfor, samt god tilgang på fuktighet, dirigerer angrepet til akkurat i overgangen (Foto: Aas-Jacobsen).



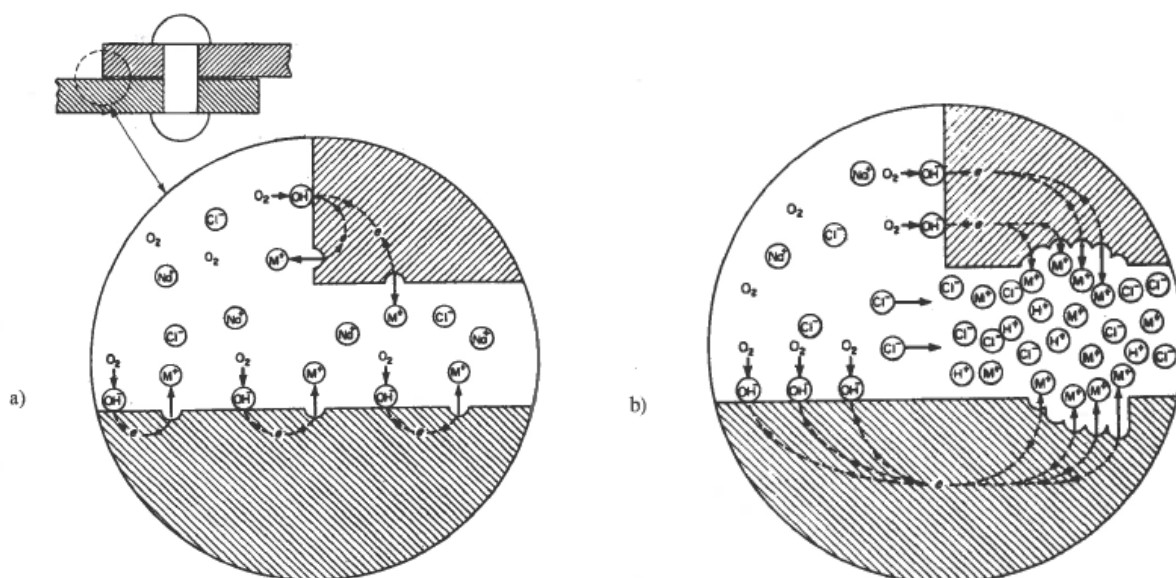
Figur 8. Spenningsrekke i sjøvann. Potensialene ved 10 °C er relevante for undersjøiske tunneler.

2.4 Spaltkorrosjon

Dette er en korrosjonsform som angriper passive materialer, spesielt rustfritt stål og aluminium [1]. Spaltkorrosjon er som ordet sier korrosjon i spalter, for eksempel overlappende skjøter, under bolthoder og muttere eller i gjengene mellom mutter og bolt. Spalten må slippe inn vann, men ikke være så åpen at elektrolytten skiftes ut. Klorid spiller en vesentlig rolle. Det som skjer er enkelt forklart som følger:

- Vann trenger inn i spalten. Rustfrie materialer har en ørliten korrosjon som kalles passiv korrosjon. Den er så liten at den ikke forårsaker noe materialtap, men den er nok til at oksygenet som følger med vannet inn i spalten etter hvert brukes opp. Se Figur 9a
- Så lenge det er oksygen i spalten dannes det jernoksid og andre oksider i spalten. Oksygenet brukes imidlertid opp etter hvert, slik at katodereaksjonen i spalten stanser. Anodereaksjonen fortsetter så det dannes jernioner i spalten, men siden det ikke kan være et overskudd av positive ioner må det transporteres inn negative ioner fra utsiden av spalten.
- I et saltholdig miljø, for eksempel ved sjøen eller langs en saltet vei, vil det være et stort overskudd av Cl^- ioner, klorid. Det er derfor klorid som transporteres inn i spalten for å nøytralisere jernionene. Det dannes jernklorid i stedet for jernoksid. Se Figur 9b
- Jernklorid er et surt stoff. Det reagerer med vann og danner saltsyre. pH blir etter hvert så lav at det rustfrie stålet ikke lenger er passivt i spalten, men starter å korrodere aktivt.
- Utenfor spalten har vi fortsatt rik tilgang på oksygen. Den lille spalten forsyner oksygenreaksjonen som skjer på metalloverflaten utenfor med elektroner. Spalten er liten mens arealet utenfor er stort. Vi får derfor en situasjon som minner om galvanisk korrosjon. Angrepet er lokalisert i et lite areal i spalten og drives av oksygentilgangen på utsiden. Korrosjonshastigheten i spalten kan derfor bli svært høy.

Man kan forsøke å hindre spaltkorrosjon ved å unngå overlappende skjøter, ved å åpne spalter så oksygen kommer til, eller forsegle spalten med for eksempel maling eller voks.



Figur 9. Spaltkorrosjon som forklart av Fontana and Greene [2]

2.5 Gropkorrosjon

Gropkorrosjon har en tilsvarende utvikling som spaltkorrosjon [1]. Forskjellen er hvordan det starter. Gropkorrosjon starter ikke i en spalt, men midt på en flate. Det som skjer er at inneslutninger i stålet, spesielt mangansulfid, MnS, skaper en svakhet i det beskyttende oksidet. Nøyaktig hva som skjer er ikke godt forklart enda, men vi kan si at det oppstår en situasjon omkring inneslutningen som minner om en spalt. Etter hvert vokser denne til en grop, og deretter utvikler angrepet seg som for spaltkorrosjon. Gropkorrosjon starter først i sveiser fordi sveiseprosessen gir materialet en mikrostruktur som er mer utsatt for korrosjon. Vanligvis vil en sveis gjøre materialet like utsatt for gropkorrosjon som en spalt vil gjøre det utsatt for spaltkorrosjon. Grunnmaterialet er generelt mer bestandig mot gropkorrosjon enn sveisemetallet eller den varmepåvirkede sonen.

Gropkorrosjon på rustfrie stål i sjøvann har vist seg å være svært avhengig av dannelse av en biofilm på overflata av metallet [3, 4]. Biofilmen består av bakterier som øker hastigheten på oksygenreaksjonen dramatisk. Dette gjør at potensialet til materialet stiger, som vist i Figur 8. Materialene øverst i diagrammet har et høyt potensial ved 10 °C, typisk 200-300 mV (SCE). Når vannet varmes opp til 40 °C dør bakteriene og potensialet faller til omkring 0 mV. Gropkorrosjon starter ved et kritisk potensial som for de fleste rustfrie stål ligger et sted mellom 0 og 300 mV. Biofilmen er derfor ofte årsaken til at vi får gropkorrosjon på disse materialene. EN 1.4404 er et typisk eksempel på dette. EN 1.4404 er derfor ikke bestandig i sjøvann.

2.6 Spenningskorrosjon

Galvanisk korrosjon og spaltkorrosjon kan forklares på en relativt forståelig måte. Det er ikke helt tilfellet med spenningskorrosjon. Spenningskorrosjon er brudd/sprekke i et materiale som følge av samtidig påvirkning av mekanisk spenning og korrosjon [1]. Materialet sprekker eller knekker ved en lavere mekanisk spenning enn det ville gjort uten korrosjon. Dette er en farlig korrosjonsform siden bruddet kommer plutselig og uten forvarsel. **Det er imidlertid lite sannsynlig med spenningskorrosjon på de materialene og i de miljøene som er i norske tunneler.**

For å få spenningskorrosjon må vi ha oppfylt tre betingelser:

- Vi må ha et materiale som er utsatt for spenningskorrosjon. Ikke alle materialer er det.
- Vi må ha et korrosivt miljø eller betingelser som trigger spenningskorrosjon
- Vi må ha spenninger - mekanisk belastning på materialet. Dette kan være indre spenninger fra sveising eller kaldforming, eller ytre spenninger fra mekanisk belastning.

Siden mekanismen ikke er godt forstått og heller ikke så enkel å forklare går vi ikke nærmere inn på den her, men fokuserer heller på noen karakteristiske material-miljø kombinasjoner. Visse kombinasjoner av material og miljø har vist seg å være mer utsatt for spenningskorrosjon enn andre.

- Høyfaste stål ved betingelser som produserer hydrogen - hydrogensprøhet: Hydrogen kan dannes under korrosjon i surt miljø eller ved katodisk beskyttelse. Høyfaste bolter blir derfor som regel ikke belagt med sink. Å bruke høyfaste bolter (høyere enn klasse 8.8 iht. ISO 898) på varmforsinkede komponenter vil kunne føre til brudd i bolten ved hydrogensprøhet. (NORSOK M-001 tillater ikke bolter over klasse 8.8 på komponenter med katodisk beskyttelse).
- Rustfrie stål i kloridholdig miljø (spesielt EN 1.4306 og EN 1.4404): Dette er også først og fremst et problem ved temperaturer over 50 °C, men sprekking av EN 1.4306 har blitt rapportert helt ned til 30 °C. Normalt skal dette heller ikke være et problem i tunneler siden temperaturen er lavere. Lavlegert stål i alkaliske løsninger, også kalt lut-skjørhet: Dette opptrer ved temperaturer over 50 °C, slik at dette heller ikke er så aktuelt i tunneler.
- Kobberholdige legeringer i miljø med ammoniakk: Dette er ikke aktuelt for tunneler, men er den første kombinasjonen av material-miljø som ble rapportert. Britene erfarte at messinghylser sprakk i monsunsesongen i India rundt 1. verdenskrig. Ammoniakken kom fra hesturin.

Hydrogensprøhet skyldes at hydrogen som dannes ved korrosjon eller katodisk beskyttelse trenger inn i materialet. Det meste av hydrogenatomene som dannes vil gå sammen to og to og danne hydrogengass og deretter diffundere ut i miljøet omkring. Noen hydrogenatomer vil imidlertid gå inn i metallet i stedet. Hydrogenatomene er små så de får plass mellom metallatomene i gitteret. Der vil de hindre plastisk deformasjon av metallet, slik at det blir sprøtt. Dermed vil metallet heller sprekke enn å deformeres under belastning. Dette kan oppstå på sinkbelagt gods hvis fastheten i materialet er høy. Med den fastheten som er spesifisert for bergsikringsutstyr er ikke dette et problem.

2.7 Filiformkorrosjon

Filiformkorrosjon er en form for korrosjon som er vanlig på lakkert aluminium. Det kan forekomme på lakkert stål og rustfritt stål også. **Angrepene er som regel grunne og påvirker kun det estetiske utseendet til lakken og har lite å si for metallens styrke eller levetid.** Figur 10 viser bilder av filiformkorrosjon på lakkert aluminium fra virkeligheten og på en labprøve.

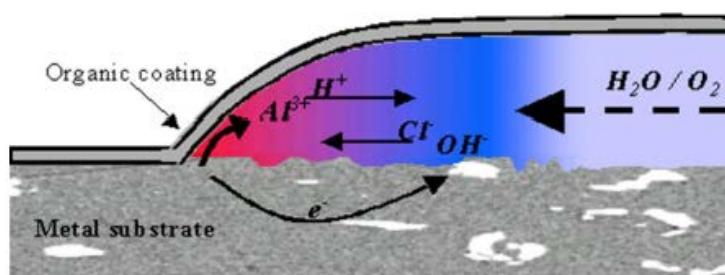
Filiformkorrosjon er trådformede korrosjonsangrep. Filament betyr tråd, derav navnet. Angrepene sprer seg fra kanter eller skader i lakken og er avhengig av at det er salt/klorider til stede i miljøet. Den aktive korrosjonen skjer i fronten på hvert filament. Det oppstår en forsuring på grunn av hydratisering av aluminiumionene fra korrosjonsreaksjonen. Aluminiumoksid er ikke stabilt ved lav pH, slik at aluminium kan korrodere. Katodereaksjonen skjer lenger bak i filamentet. Katodereaksjonene produserer OH^- ioner som gjør at pH stiger igjen og aluminium passiverer. Vi har altså aktiv korrosjon bare i fronten på filamentet. Figur 11 viser en prinsippskisse for filiformkorrosjon på aluminium.

Filiformkorrosjon fører til at lakksjiktet løsner fra overflata i de trådformede angrepene. Med tiden kan det bli så tett med angrep at lakken løsner i et større område.

Filiformkorrosjon kan reduseres ved god forbehandling før lakkering. Spesielt det å etse bort opp mot $1\ \mu\text{m}$ materiale i overflata har vist seg å gi god effekt. Dernest vil et godt konversjonsbelegg også øke motstanden mot denne formen for korrosjon. Ved å anodisere i stedet for å lakkere vil man eliminere muligheten for filiformkorrosjon. Anodiseringen bør være $20\ \mu\text{m}$ tykk. Aluminium kan også godt stå ubeskyttet i mange tilfeller med svært godt resultat.



Figur 10. Filiformkorrosjon på lakkert aluminium. Fra virkeligheten til venstre og på en labprøve til høyre (Foto: SINTEF).



Figur 11. Prinsippskisse for filiformkorrosjon på aluminium

2.8 Mikrobiell korrosjon

Mikrobiell korrosjon er korrosjon som er påvirket av mikroorganismer (på engelsk Microbially Influenced Corrosion - MIC) [5, 6]. Det er viktig å presisere at mikroorganismene ikke spiser metall, men at de skaper et miljø der metallet korroderer lettere eller raskere. Korrosjonsangrepet kan akselereres galvanisk ved at stålet omkring fungerer som katode. Hastigheten på angrepet er avhengig av en rekke faktorer og er vanskelig å forutsi. Den kan bli høy.

Det er flere typer bakterier som forårsaker denne typen korrosjon, men angrep forårsaket av sulfatreduserende bakterier (SRB) er hyppigst. Sulfatreduserende bakterier reduserer sulfat til sulfid. De danner en såkalt tuberkel for å beskytte seg mot oksygen, der de lever under et skall som består av blant annet korrosjonsprodukter. De kan overleve i oksygenholdig miljø, men ikke formere seg. Korrosjonen er et resultat av at bakteriene skaper et svakt surt sulfidholdig miljø i tuberkelen som angriper stål, samtidig som bakteriene katalyserer hydrogenreaksjonen. Problemet oppstår oftest på stål eksponert i sulfatholdig grunn, sjøbunn eller det som har vært sjøbunn.

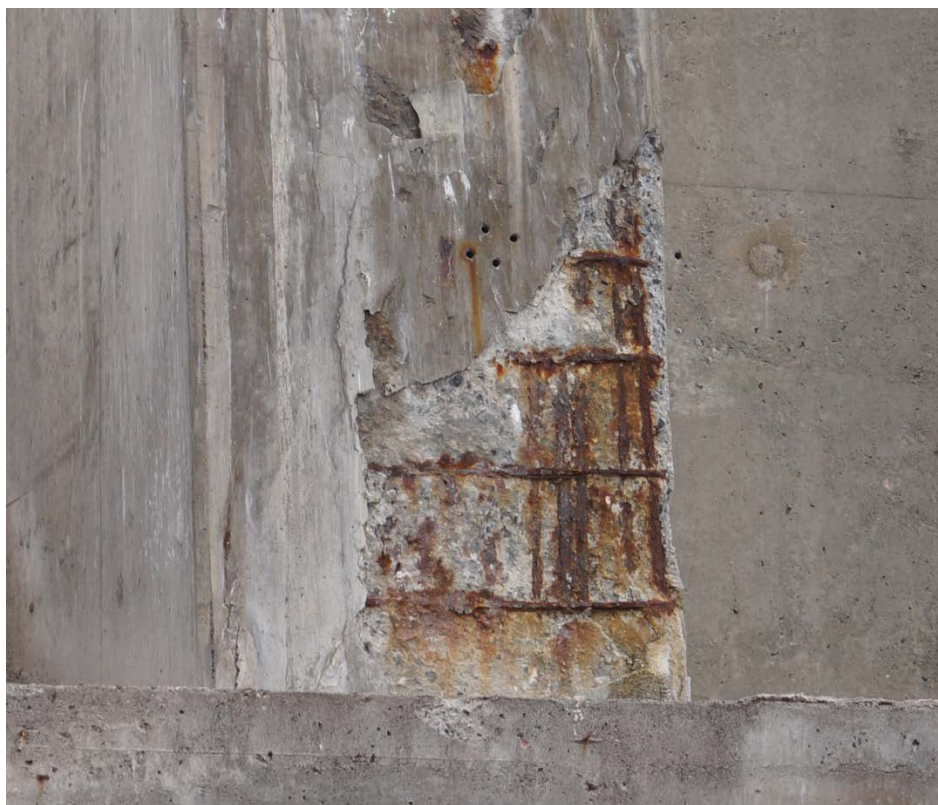
En annen type bakterier som ofte forårsaker korrosjon er jernoksiderende bakterier, for eksempel gallionella. Disse bakteriene får energi ved å oksidere toverdig jern til treverdig. De danner også tuberkler for å beskytte seg mot oksygen, på samme måte som SRB. Både karbonstål og rustfrie stål kan angripes. Disse bakteriene skaper oftest problemer i ferskvannsystemer, som for eksempel drikkevannsrør og turbinrør i kraftverk.

2.9 Korrosjon i betong

Korrosjon i betong kan foregå som uniform korrosjon, lokal korrosjon eller galvanisk korrosjon, avhengig av forholdene i betongen. Det er følgelig ikke en egen korrosjonsmekanisme, men et spesielt korrosjonsmiljø, og skiller seg derfor fra de andre seksjonene i dette kapittelet. Det tas likevel med her fordi betong er mye brukt i tunneler og derfor et viktig miljø med hensyn på korrosjon. For videre fordypning i temaet korrosjon i betong henvises det til Gjerp et al, 2004 [7] og Bertolini et al, 2013 [8].

Betong har i utgangspunktet høy pH, typisk 11-13. Stål er passivt ved så høy pH. Som forklart i seksjon 2.4 er passive materialer utsatt for lokal korrosjon, for eksempel punktkorrosjon, i miljøer som inneholder klorider. Korrosjon på stål i betong har derfor i stor grad handlet om inntrengning av klorid i betongen. I marint miljø eller ved saltet vei vil klorid trenge inn i betongen over tid. Sammen med inntrengning av oksygen kan dette føre til korrosjon på armeringsjernet. Korrosjonsproduktene til stål har større volum enn stålet, slik at disse vil sprengte betongen. Hvor tidlig dette skjer er avhengig av tilgangen på klorid og tykkelsen på betongen over armeringsjernet.

En annen mekanisme som har ført til korrosjon i betong er karbonatisering. Karbonatisering er en kjemisk prosess der betongen reagerer med CO₂ fra lufta slik at pH synker. Reaksjonen starter i overflata og trenger innover i betongen, vanligvis med en hastighet på noen mm per tiår. Der hvor pH faller under 9,5 defineres som karbonatiseringsfronten. Når pH faller under 9,5 er stål ikke passivt lenger, slik at korrosjon starter.



Figur 12. Korrosjon på armering i betong. Brukar like over sjø med for lite overdekning over armeringsjernet. Brua ble åpnet i 1967 og bildet er tatt i 2015 (Foto: SINTEF).

3 Korrosjonsbeskyttelse

3.1 Belegg

Å påføre et belegg er den mest brukte formen for korrosjonsbeskyttelse. Vi har to hovedtyper belegg, organiske (maling og lakk) og metalliske, som presenteres kort her.

3.1.1 Organiske belegg (maling og lakk)

Organiske belegg beskytter overflata ved å hindre at det dannes en vannfilm der. Ved å fortrenge vannet blir korrosjon umulig. De fleste belegg tar imidlertid opp både vann og oksygen. Konsentrasjonen av vann i belegget er typisk 1-3 % når det eksponeres i et fuktig miljø, mens konsentrasjonen av oksygen i belegget er ca 10% av konsentrasjonen i luft. Dette er egentlig mer enn nok til at metallet under kan korrodere, men det skjer ikke fordi vi ikke har en vannfase der. Overflata er dekket av en polymer i stedet. Korrosjon starter

igjen når belegget på en eller annen måte skades slik at metallet eksponeres for vann. I følge denne forklaringen skulle ikke filmtykkelsen på belegget ha noe å si, siden også en tynn film forhindrer dannelse av vannfase på metalloverflata. Filmtykkelsen er imidlertid svært viktig, siden det er viktig at ioner ikke kommer gjennom belegget. Hvis ioner slipper gjennom vil det raskt dannes en vannfase ved osmose, slik at korrosjon kan starte. Osmose er diffusjon av vann gjennom en membran som følge av ulik konsentrasjon av salt. Vann må slippe gjennom membranen, men ikke salt. Organiske belegg har denne egenskapen.

Belegget kan feile på mange ulike måter, med påfølgende korrosjon. Her er noen vanlige feilmekanismer:

- Mekaniske skader som fjerner belegget i et lite område (slag, transportskader osv)
- Påføringsfeil som svekker beleggets egenskaper:
 - Nålestikk, det vil si små hull i belegget der metallet er eksponert og korrosjon kan starte
 - Dårlig dekning over kanter eller sveiser. Overflatespenning i våt maling gjør at filmen blir tynnere over skarpe kanter. Det er derfor viktig å runde av kanter og slipe sveiser.
 - Generelt for lav filmtykkelse (dårlig kvalitetskontroll eller feil spesifikasjon)
 - Dårlig rengjøring eller forurensning av flata etter rengjøring. Påføring av belegg på en forurenset overflate kan gi redusert vedheft eller osmose (salt).
- Indre spenninger i malinga som gjør at den sprekker
- Generell aldring av belegget.

For pulverlakkert og varmforsinket gods er nålestikk en vanlig feil. Nålestikk kan skyldes flere ting, men vi ser det ofte over hvitrust på sinken. Dannelse av hvitrust er beskrevet i "Håndbok i varmforsinking" [9]. Hvis godset ikke pulverlakkres umiddelbart etter varmforsinking, og det mellomlagres under fuktige betingelser vil det raskt dannes hvitrust. Forbehandlingen av sinkbelegget (fosfatering) er ikke i stand til å fjerne all hvitrusten. Når pulverlakken så påføres over hvitrusten dannes det ofte nålestikk. Nålestikk kan også skyldes andre ting, for eksempel at sinkbelegget har en veldig ru struktur, hvilket kan oppstå hvis stålet som varmforsinkes har et innhold av silisium på mellom 0,03 og 0,14 %. Slitk stål er ikke egnet for varmforsinking. I nålestikkene vil sinken ikke være beskyttet av pulverlakken, slik at sinken raskere starter å korrodere her. Hvis det er komponenter av bart stål i nærheten, for eksempel rustfrie bolter og muttere, kan vi få galvanisk korrosjon. Arealet av eksponert sink i nålesticket er svært lite i forhold til arealet på bolt og mutter, som gjør at korrosjonshastigheten på sinken øker.

En annen feil på sinkbelegget som kan svekke pulverlakken er slag i overflata (også kalt kviser). Dette er harde jern-sink faser i overflata som kan dannes under varmforsinkinga, eller partikler av jern-sink som flyter på toppen av sinksmelta og fester seg på godset når det trekkes opp. Slagget danner skarpe små punktformede forhøyninger i overflata. Når godset senere pulverlakkres blir lakken tynn og svekket over disse forhøyningene, som dermed fungerer som initieringspunkter for korrosjon. På samme måten som for nålestikk kan komponenter av bart stål i nærheten akselerere korrosjonen ved en galvanisk effekt. Figur 13 viser et eksempel på dette på en varmforsinket og pulverlakkert gjerdestolpe. Angrep forårsaket av nålestikk vil ha et tilsvarende utseende.



Figur 13. Korrosjon på sink under pulverlakk forårsaket av slag (sink-jern partikler) i overflata på sinken. Galvanisk effekt fra den rustfrie bolten akselererer korrosjonen. Angrep forårsaket av nålestikk vil ha et tilsvarende utseende. (Foto: SINTEF)

3.1.2 Metallbelegg

Vi har flere måter å påføre metallbelegg på stål. De vanligste er:

- Varmforsinking
- Termisk sprøyting
- Elektrokjemisk (plettering)

Metallbelegg kan deles inn i anodiske og katodiske belegg. Anodiske belegg er mindre edle enn underlaget, for eksempel sink eller aluminiumsbelegg på stål. Katodiske belegg er mer edle enn underlaget, for eksempel krom eller nikkelbelegg. **Katodiske belegg skal ikke benyttes i tunneler.**

For stålkomponenter i tunneler er varmforsinking det mest aktuelle. Ved varmforsinking er det viktig å velge et stål som er egnet, det vil si unngå stål med silisiuminnhold mellom 0,03 og 0,14 %, se Håndbok i varmforsinking [9].

Varmforsinking beskytter stålet mot korrosjon på flere måter:

- Når belegget er heldekkende vil det være sinkbeleggets korrosjonsegenskaper som avgjør korrosjonshastigheten. Sink har lav korrosjonshastighet i atmosfærisk miljø og gir følgelig lang levetid her.
- Ved skader i belegget der stålet eksponeres vil sinken beskytte stålet katodisk. Potensialet på stålet trekkes ned i det immune området (Figur 4). I atmosfæriske forhold vil det være begrenset hvor store skader som kan beskyttes. Det er snakk om noen mm, maksimalt noen få cm.

- Når sinken belegges med pulverlakk vil lakken også få lengre levetid enn hvis den legges rett på stålet. Dette fordi korrosjon brer seg langsommere på sink enn stål omkring lakkskader.

3.1.3 Dupleksbelegg

Et dupleksbelegg er et belegg som består av både et metallbelegg og et organisk belegg. Statens Vegvesen bruker slike belegg i stor utstrekning:

- Varmforsinket og pulverlakkert gods, typisk brukt på bergsikringsbolter og festemateriell for vann- og frostsikring
- Termisk sprøyta sink med et malingsystem over, typisk brukt på bruer

Med dupleksbelegg får vi en synergieffekt som gjør at levetiden er lengre enn summen av levetiden for metallbelegget og det organiske belegget.

Det er imidlertid viktig å velge riktig metallbelegg. I offshoreindustrien har de i noen tilfeller malt over termisk sprøyta aluminium (TSA), det vil si et dupleksbelegg der det korrosjonsbeskyttende metallbelegget er av aluminium. Det har ikke vært heldig, og de har erfart massiv nedbrytning av belegget etter kort tid. Her har man dermed fått en negativ synergi. Levetiden til TSA dupleksbelegg er kortere enn summen av levetiden til metallbelegget og det organiske belegget. TSA uten overmaling gir lang levetid i både marint miljø og innlandsmiljø, så lenge pH er mellom 4 og 9.

3.2 Katodisk beskyttelse

Ved katodisk beskyttelse trekkes potensialet til stålet ned i det immune området i Pourbaix diagrammet (Figur 3). Dette skjer ved at vi kobler et mindre edelt materiale til stålet, typisk sink eller aluminium, en såkalt offeranode. En forutsetning for at dette skal fungere er at det er både elektrisk kontakt og elektrolytisk kontakt mellom stål og offeranode. For stål som står eksponert i sjøvann kan man da montere på anoder rundt omkring på konstruksjonen og oppnå full beskyttelse mot korrosjon. Det er utviklet flere standarder for hvordan man skal designe katodisk beskyttelse, for eksempel DNV RP-B-401 [10]. Katodisk beskyttelse kan også benyttes i jord, ferskvann og betong. Disse miljøene vil imidlertid gi høyere motstand og spenningsfall mellom anode og stål, slik at katodisk beskyttelse kan være mer problematisk enn i sjøvann.

For stål som står eksponert i luft vil en påmontert offeranode ikke fungere, siden det ikke er elektrolytisk kontakt mellom stål og anode. Den eneste muligheten vi da har for å få katodisk beskyttelse er å legge på offeranoden som et metallbelegg. Varmforsinking, termisk sprøyta sink eller aluminium, elektrolytisk plettet sink og sinkrik maling er ulike måter å påføre en offeranode som belegg.

3.3 Materialvalg

Ulike materialer har ulik bestandighet. Ved å velge et tilstrekkelig bestandig materiale kan man unngå korrosjon eller oppnå tilstrekkelig lav korrosjonshastighet til at funksjonen til komponenten opprettholdes:

- Rustfrie stållegeringer og aluminium velges for å unngå korrosjon
- Ubeskyttet stål eller støpejern benyttes i noen komponenter, men med et korrosjonsmonn slik at ønsket levetid likevel oppnås (for eksempel kumlokk)
- Varmforsinket stål korroderer også, men korrosjonshastigheten til sinkbelegget er så lav at levetiden likevel blir lang

Vi kommer nærmere inn på dette i kapittel 5 og 6.

3.4 Endre eksponeringsmiljøet

Å endre eksponeringsmiljøet kan innebære forskjellige ting, men er som regel begrenset til et avgrenset rom eller volum, som for eksempel:

- Tørke lufta. Dette gjøres i tekniske rom i tunneler.
- Vaske bort aggressive forbindelser, for eksempel veistøv eller veisalt som trekkes inn i tunneler
- Ventilere ut aggressive gasser (eksos)
- Heve pH til det passive området for stål (for eksempel ved å kapsle inn i betong)
- Fjerne oksygen

De tre første punktene brukes utstrakt i tunneler og er et vesentlig bidrag til å holde korrosiviteten nede.

4 Eksponeringsmiljø i tunneler

Korrosiviteten i en tunnel vil variere mellom de forskjellige sonene i tunnelen som følge av ulike miljøbetingelser. Her er følgende soner benyttet med karakteristiske betingelser som påvirker korrosjon:

- Tørt trafikkrom: Lite vann eller skjermet med vann- og frostsikring. Som regel tørt og lite salt. Forurensning fra eksos og vegstøv.
- Fuktig trafikkrom: Vann fra fjellet trenger inn. Forurensning fra eksos og veistøv. Korrosivitet avhengig av beliggenhet, bergart og grunnvannskjemi.
- Innkjøringssonen: Veisalt og vann fra nedbør utenfor tunnelen trekkes inn i tunnelen. Forurensning fra eksos og veistøv.
- Bak vann- og frostsikring: Konstant og høy fuktighet. Må forvente at noe eksos og veistøv også trenger inn her. Korrosivitet avhengig av beliggenhet og bergart.
- I gysemørtel og under sprøytebetong: Alkalisk og oksygenfritt

Korrosjonsmiljø i de ulike sonene er forsøkt klassifisert i henhold til NS-EN ISO 12944-2, som er gjengitt i Tabell 2 [11]. Klassifiseringa er estimert basert på beskrivelse av miljøet. Tabellen klassifiserer et miljø etter korrosjonshastigheten på stål og sink, og angir grenser for årlig materialtap for fem kategorier, C1 til C5. De to siste kolonnene beskriver typiske miljøer som faller innunder de ulike kategoriene. C1 er mildeste korrosjonsklasse og omfatter typisk innendørs miljøer i oppvarmede bygninger. C5 er den mest aggressive kategorien med 80-200 μm korrosjon per år på stål og 4,2-8,4 μm på sink. Kategori C5 finner man typisk i marint miljø eller sterkt forurenset og fuktig miljø. I marin plaskesone er aggressiviteten svært høy på grunn av konstant fuktighet og mye salt. Her er det målt korrosjonshastigheter på omkring 400 $\mu\text{m}/\text{år}$, hvilket overstiger skalaen i NS-EN ISO 12944. Korrosiviteten kan måles ved å sette ut stålprøver eller varmforsinkede prøver (NS-EN ISO 9226), men det er ikke gjort i norske tunneler.

Tabell 2. Korrosivitet i henhold til NS-EN ISO 12944-2 "Maling og lakk. Korrosjonsbeskyttelse av stålkonstruksjoner med beskyttende malingsystemer" [11]

Corrosivity category	Mass loss per unit surface/thickness loss (after first year of exposure)				Examples of typical environments in a temperate climate (informative only)	
	Low-carbon steel*		Zinc		Exterior	Interior
	Mass loss g/m ²	Thickness loss µm	Mass loss g/m ²	Thickness loss µm		
C1 very low	≤ 10	≤ 1,3	≤ 0,7	≤ 0,1	—	Heated buildings with clean atmospheres, e.g. offices, shops, schools, hotels.
C2 low	> 10 to 200	> 1,3 to 25	> 0,7 to 5	> 0,1 to 0,7	Atmospheres with low level of pollution. Mostly rural areas.	Unheated buildings where condensation may occur, e.g. depots, sports halls.
C3 medium	> 200 to 400	> 25 to 50	> 5 to 15	> 0,7 to 2,1	Urban and industrial atmospheres, moderate sulfur dioxide pollution. Coastal areas with low salinity.	Production rooms with high humidity and some air pollution, e.g. food-processing plants, laundries, breweries, dairies.
C4 high	> 400 to 650	> 50 to 80	> 15 to 30	> 2,1 to 4,2	Industrial areas and coastal areas with moderate salinity.	Chemical plants, swimming pools, coastal ship- and boatyards.
C5-1 very high (industrial)	> 650 to 1 500	> 80 to 200	> 30 to 60	> 4,2 to 8,4	Industrial areas with high humidity and aggressive atmosphere.	Buildings or areas with almost permanent condensation and with high pollution.
C5-M very high (marine)	> 650 to 1 500	> 80 to 200	> 30 to 60	> 4,2 to 8,4	Coastal and offshore areas with high salinity	Buildings or areas with almost permanent condensation and with high pollution.

NOTE 1 The loss values used for the corrosivity categories are identical to those given in ISO 9223.
 NOTE 2 In coastal areas in hot, humid zones, the mass or thickness losses can exceed the limits of category C5-M. Special precautions must therefore be taken when selecting protective paint systems for structures in such areas.

* Low-carbon steel er en generell betegnelse på stål som ikke er legert med tanke på korrosjonsbestandighet, på norsk ofte kalt karbonstål, svartstål eller konstruksjonsstål

4.1 Tørt trafikkrom

Dette gjelder tunneler med lav inntrengning av vann eller der vann- og frostsikring er en effektiv membran mot vann. Tunneler saltes normalt ikke, slik at det normalt vil være lite salt. Tørt miljø og lite salt begrenser korrosiviteten betraktelig. Svoveloksider og nitrogenoksider fra eksos vil reagere med fuktighet og danne syrer (svovelsyre og salpetersyre). Veistøv vil trekke til seg litt fuktighet slik at de aggressive forbindelsene kan ha en høy konsentrasjon av korrosive forbindelser som øker aggressiviteten, spesielt mot sink og lavlegert stål. Aggressiviteten vil øke med trafikkbelastningen.

I trafikkrommet i tunneler med høy trafikk kan korrosiviteten trolig bli moderat (C3) på grunn av forurensningen fra eksos. I mindre trafikkbelastede tunneler vil korrosiviteten trolig være lav (C2).

Regelmessig vasking av trafikkrommet for å fjerne salt og veistøv vil redusere korrosiviteten. Det er derfor viktig at dette gjøres, spesielt i tunneler med høy trafikk.

4.2 Fuktig trafikkrom

4.2.1 Landtunneler

Vannet som trenger inn i tunnelen vil være relativt nøytralt og ha lav salinitet. Det er rimelig å anta at korrosiviteten vil øke noe i forhold til tørre trafikkrom ved at forurensning fra eksos blir mer aggressiv, slik at tunneler med høy trafikkbelastning kan komme opp i korrosjonsklasse C4, mens mindre trafikkerte tunneler kan komme opp i C3.

4.2.2 Undersjøiske tunneler

I undersjøiske tunneler vil sjøvann trenge gjennom fjellet og inn i tunnelen. Vannet vil typisk ha en sammensetning som minner om sjøvann med omkring 35 g/l NaCl (tilsvarer omkring 20 g/l klorid).

På grunn av saltinnholdet i vannet vil korrosiviteten her normalt være høyere enn i landtunneler. I tillegg vil vannet i trafikkrommet kunne fordampe slik at saliniteten øker (hypersalinitet). Avsetninger og andre forurensninger vil også oppkonsentreres når vannet fordampes. Korrosiviteten kan derfor godt komme opp i klasse C5, men C4 er trolig mer typisk.

4.2.3 Tunneler i alunskifer og kisholdige bergarter

Dette er bergarter som er kjennetegnet av et høyt innhold av sulfider/sulfater, hvilket kan medføre at grunnvannet holder en pH på under 3 noen steder. pH kan imidlertid variere en del fra sted til sted.

Korrosiviteten vil være svært avhengig av pH. Lav pH gir høy korrosivitet, spesielt på sink og karbonstål, og en korrosivitet på C4-C5 kan forventes. Varmforsinket og pulverlakkert gods kan derfor få redusert levetid. Høyere pH vil redusere korrosiviteten. Man kan derfor trolig finne korrosivitet i hele spekteret fra C2 til C5 i slike bergarter.

4.3 Innkjøringssonen

I innkjøringssonen vil det være fuktig når det er nedbør, og ved salting av veien vil trafikken trekke inn salt. Hvor langt saltet trekkes inn er avhengig av mange faktorer og vil variere. Innkjøringssonen kan også saltes. Uten salt vil korrosiviteten være tilsvarende som bak vann- og frostsikring, mens med salt vil den kunne bli høyere. Kategori C2 til C4 kan forventes, avhengig av trafikkbelastning og salting. Normalt vil saltkonsentrasjonen avta med høyden over kjørebanelen, slik at for eksempel lysarmatur i taket på tunnelen har lavere saltbelastning.

4.4 Bak vann- og frostsikring

4.4.1 Landtunneler

Bak vann- og frostsikringshvelv vil det være fuktig, men likevel lite korrosivt på grunn av det lave saltnivået. Svovel og nitrogenoksider fra eksos vil trolig trenge inn bak vann- og frostsikring, hvilket vil forsure miljøet noe og øke korrosiviteten. Trolig vil korrosiviteten være sammenlignbar med fuktige trafikkrom, det vil si kategori C3-C4 avhengig av trafikkbelastning.

4.4.2 Undersjøiske tunneler

Bak vann- og frostsikringshvelv vil den konstante fuktigheten og det høye saltinnholdet gjøre miljøet svært korrosivt, trolig C5, det vil si høyeste korrosivitetsklasse. Det kan faktisk tenkes at korrosiviteten her er sammenlignbar med marin plaskesone, det vil si høyere enn C5. Spesielt der bolt kommer ut av fjellet/gysingen vil det kunne oppstå høye korrosjonshastigheter. Konstant tilgang på salt vann fra fjellet, god tilgang på oksygen og en viss galvanisk effekt fra boltene under mørtelen gjør dette punktet spesielt utsatt.

4.4.3 Tunneler i alunskifer og kisholdige bergarter

Forholdene vil trolig være sammenlignbare med fuktige trafikkrom i slike bergarter, som ble diskutert over. De samme betraktningene vil derfor også gjelde her. Fuktigheten vil sikkert være enda høyere, som kan øke korrosiviteten noe. Trolig vil man finne korrosivitet i et spekter fra C3 til C5.

4.4.4 Konstant vått miljø eller neddykket

Varmforsinking gir svært lang levetid i atmosfærisk miljø. Sink korroderer imidlertid raskt når det står neddykket i vann eller eksponeres for rennende vann. I slike miljøer er det rapportert korrosjonshastigheter fra 15 til over 100 $\mu\text{m}/\text{år}$ på sink [12]. Bløtt vann med lavt innhold av kalsium og magnesium er mest aggressivt, siden utfelling av kalsium og magnesium karbonat på sinkoverflata reduserer korrosjonshastigheten. I sprinkleranlegg har vi sett at varmforsinking innvendig i rørene har delvis forsvunnet i løpet av tre år. Hvis det benyttes endeforankret bolt i fjell der det konstant renner inn vann vil dette kunne gi korrosjonsproblemer.

4.5 Gysemørtel og sprøytebetong

Som diskutert i seksjon 2.2 vil stål som er eksponert i gysemørtel og sprøytebetong ha svært lav korrosjonshastighet, siden miljøet er alkalisk og oksygenfritt. I undersjøiske tunneler vil salt kunne trenge inn i mørtelen over tid, men så lenge tilgangen på oksygen er lav vil korrosjonshastigheten på stål forbli lav. Hvis oksygen trenger inn vil korrosjonshastigheten på stål trolig komme opp i maksimalt 0,1 mm/år, som er korrosjonshastigheten til stål neddykket i sjøvann [1]. Sjøvann er svakt alkalisk og inneholder magnesium og kalsiumioner som felles ut på metalloverflata og begrenser korrosjonshastigheten. Det er således sammenlignbart med kloridholdig mørtel.

Ufullstendig gysing vil resultere i hulrom rundt boltene som normalt vil fylles med vann over tid. I landtunneler vil dette være ferskvann. Siden vannet står i kontakt med mørtel omkring vil vannet være alkalisk. Sammen med begrenset/ingen tilgang på oksygen vil dette gjøre at korrosjonshastigheten vil være svært lav, og trolig sammenlignbar med fullstendig gyst bolt. I undersjøiske tunneler vil hulrommet fylles med saltvann. Dette vil også være oksygenfritt og alkalisk, slik at korrosjonshastigheten blir ubetydelig også her. Hvis det renner oksygenholdig vann gjennom vil korrosjonshastigheten være omkring 0,25 mm/år for ferskvann og 0,1 mm/år for sjøvann [1]. Hastigheten er lavere i sjøvann på grunn av utfelling av beskyttende magnesium og kalsiumsalter på overflata.

Erfaring og testing har vist at sinkbelegg kan ha betydelig korrosjonshastighet i mørtel og betong [13], som diskutert i seksjon 2.2, men siden stålet ikke korroderer vil bolten fortsatt ha ønsket levetid.

Muskötunneln utenfor Stockholm er en undersjøisk tunnel som ble åpnet i 1964. I 1995, etter over 30 år, ble ni bolter av ubehandlet kamstål boret ut og undersøkt for korrosjon. Ingen av boltene hadde tegn til korrosjon [14]. Dette bekrefter at stålet i gyste bolter ikke korroderer, uavhengig av overflatebehandling. Heller ikke bolter som var ufullstendig gyst viste tegn til korrosjon.

5 Korrosjonserfaringer med materialer som er aktuelle for bruk i tunneler

5.1 Korrosjon på varmforsinket og pulverlakkert stål

Varmforsinket og pulverlakkert stål blir i utgangspunktet betraktet som svært korrosjonsbestandig og er anbefalt helt opp til korrosjonsklasse C5. Varmforsinking i seg selv har svært god holdbarhet i korrosjonsklasse C3 og lavere, der det gir levetid på 50 år eller mer, se Tabell 2. I korrosjonsklasse C4 gir det omkring 20 år, mens i korrosjonsklasse C5 gir det omkring 10 år. Med pulverlakkering vil levetiden mer enn fordobles, hvis lakken er av god kvalitet, er påført i henhold til spesifisering og er fri for nålestikk. Særlig det siste vil kunne redusere levetiden ned til omtrent samme nivå som for varmforsinking alene.

Erfaringer fra norske tunneler har vist at varmforsinkede og pulverlakkert stål i landtunneler er lite utsatt for korrosjon og gir lang levetid. I undersjøiske tunneler er det kun rapportert enkelte korrosjonsangrep etter omkring 20 år, for eksempel i Frøyatunnelen (åpnet 1992) og Bjorøytunnelen (åpnet 1996) [15].

Varmforsinkede og pulverlakkerte komponenter som er eksponert bak vann- og frostsikringshvelv har her enkelte steder fått korrosjonsskader. Sinken under pulverlakken korroderer og pulverlakken blærer. Korrosjonsskadene er imidlertid bare observert unntaksvis, hvilket indikerer at dette skyldes feil i pulverlakken, for eksempel nålestikk. **Det generelle bildet viser at varmforsinket og pulverlakkert gods også har stått bra bak vann- og frostsikring i undersjøiske tunneler.**

Tilstanden til bolter under gysemørtel er undersøkt i Bømlafjordtunnelen (åpnet 2000), der et antall bolter ble tatt ut i 2015 i forbindelse med oppgradering. Bolter ble tatt ut både i ferskvannsonen og sjøvannsonen. Ingen av boltene som ble tatt ut viste tegn til korrosjon i den delen som var gyst. I 2012 ble det også tatt ut bergbolter fra Kvalsundtunnelen og Øksfjordtunnelen (begge åpnet 1988) i forbindelse med oppgradering [16]. Heller ikke her ble det funnet korrosjon på den gyste delen av boltene.

BeFo i Sverige har undersøkt korrosjon på ulike bolter i undersjøisk tunnel, inkludert varmforsinket og pulverlakkert bolt [13]. De fant ikke korrosjon på denne typen bolt, hverken i atmosfærisk eksponert eller gyst del av boltene. Testperioden var imidlertid bare 2 år, hvilket kan være kort tid for slik testing. Testen viste imidlertid høy korrosjonshastighet for sinkbelagt bolt, både eksponert for gysemørtel og vann i borehullet. Karbonstål hadde ingen korrosjon på de delene som var eksponert inne i fjellet, trolig fordi det ikke var oksygen der.

5.2 Korrosjon på rustfrie stållegeringer

Rustfritt stål er definert som stållegeringer med over 12% krom, men de legeringene som benyttes mest i tunneler inneholder 16-18% krom (for eksempel EN 1.4404, såkalt syrefast stål eller AISI 316). Som forklart i seksjon 2 er også rustfrie stål utsatt for korrosjon, spesielt i kloridholdige miljøer. For veitunneler vil det typisk være tilfellet i undersjøiske tunneler bak vann- og frostsikring og i innkjøringssonen i trafikkrommet der trafikken trekker veisalt inn i tunnelen. I tillegg vil svovel og nitrogenoksider fra eksos reagere med vann og danne syrer. Det antas at forsuring først og fremst er et problem i trafikkrommet.

Det er rapportert korrosjon på EN 1.4404 i pumpesystemer for utpumping av sjøvann i Vardøtunnelen [17]. Kontinuerlig neddykking i sjøvann er svært aggressivt for rustfrie stål, og selv de mest høylegerte stål tåler ikke sjøvann over 25 °C. **EN 1.4404 er ikke bestandig i sjøvann, hvilket er dokumentert gjennom en lang rekke med korrosjonsskader.** At dette feilet i pumpesystemet i Vardøtunnelen også er derfor ikke overraskende.

Det er samlet en mengde erfaringer med ulike korrosjonsformer på rustfrie materialer fra for eksempel industri, offshore olje og gassproduksjon og laboratorietesting. Basert på dette er det etablert temperaturgrenser for ulike materialer i ulike miljøer. I Tabell 3 er det foreslått temperaturgrenser for fire ulike rustfrie materialer for ulike tunnelmiljøer, basert på disse erfaringene.

De ulike miljøene vil ha ulik aggressivitet:

- Undersjøisk tunnel bak vann- og frostsikring: Sjøvann vil trenge inn og fukte metallet. Eventuelle mikroorganismer i sjøvannet vil kunne øke aggressiviteten ytterligere slik at miljøet vil være svært aggressivt mot rustfrie materialer. Miljøet vil være aggressivt selv uten at mikroorganismer er til stede.
- Landtunnel bak vann- og frostsikring: Miljøet vil være fuktig, men ha lavt innhold av salt. Dette miljøet er lite aggressivt mot rustfrie materialer.
- Trafikkrom med salt: Her har vi både forurensning fra eksos og klorid fra salting som vil bidra til økt korrosivitet. Dette miljøet kan derfor være aggressivt mot rustfrie materialer.
- Trafikkrom uten salting: Forurensning fra eksos vil kunne føre til forsurening, men så lenge det ikke er klorider til stede vil mange rustfrie materialer stå godt.
- Alunskifer: Så lenge saltinnholdet er lavt har mange rustfrie legeringer god bestandighet mot svak svovelsyre. Alunskifer vil derfor ikke nødvendigvis være aggressiv mot rustfrie materialer.
- Spenningskorrosjon: Dette er et potensielt problem i kloridholdige miljøer med en viss temperatur. Belysning og varme fra elektromotorer kan tenkes å bringe temperaturen opp på et nivå hvor spenningskorrosjon kan skje på EN 1.4306 og kanskje EN 1.4404, men trolig vil mengden klorid være for lav. Spenningskorrosjon er derfor lite sannsynlig.

Tabellen viser at i undersjøiske tunneler bak vann- og frostsikring vil et materiale som EN 1.4404 trolig ikke være bestandig. Dette kan derfor ikke anbefales for bruk i dette miljøet.

Tabell 3. Anbefalinger for bruk av rustfrie materialer i ulike tunnelmiljøer. EN 1.4462 og EN 1.4462 vil trolig være for kostbare til å brukes i tunneler.

Materiale	Trafikkrom	Landtunnel bak vann- og frostsikring	Alunskifer (u/salt)	Undersjøisk tunnel bak vann- og frostsikring
EN 1.4306 AISI 304L (Rustfritt)	Ja	Ja	Ja	Nei
EN 1.4404 AISI 316L (Syrefast)	Ja	Ja	Ja	Nei
EN 1.4462 SAF 2205 (Duplex)	Ja	Ja	Ja	Ja
EN 1.4547 254 SMO	Ja	Ja	Ja	Ja

5.3 Korrosjon på aluminium

Aluminium er termodynamisk sett et svært uedelt metall, men siden aluminiumoksid er så tett og beskyttende er aluminium passivt og har svært gode korrosjonsegenskaper. Dette forutsetter imidlertid at pH ligger i et område hvor oksidet er stabilt. Ved pH under 4 og over 9 kan aluminium korrodere raskt, se Pourbaix-diagrammet i Figur 13. Korrosjonsegenskapene til aluminiumslegeringer er avhengig av innhold av jern og kobber.

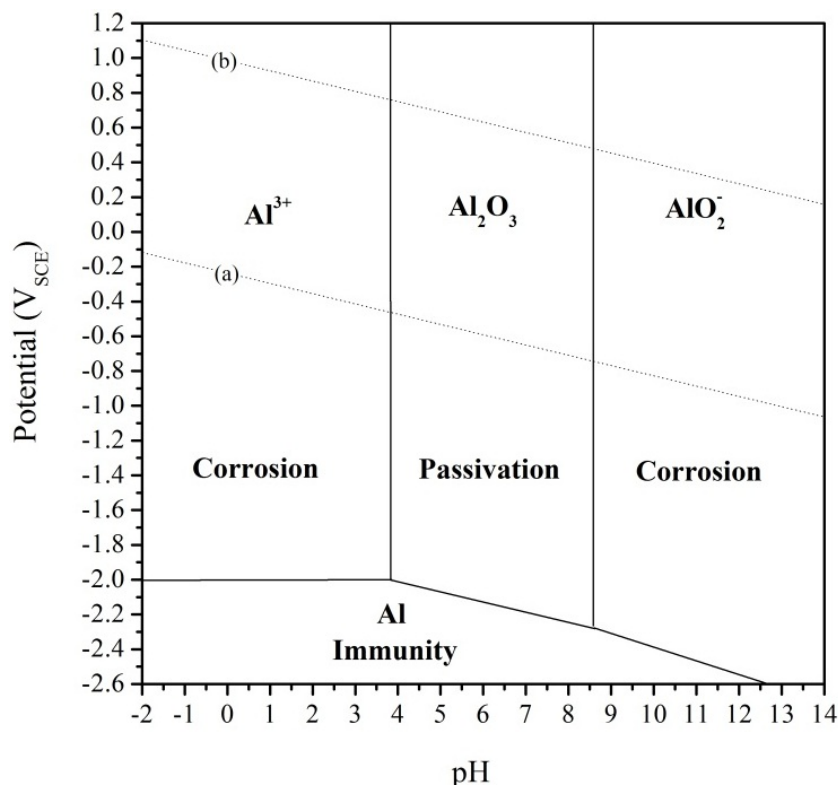
Betong og mørtel har pH i området 12-13, hvilket er langt over det som aluminium tåler. Aluminium kan stå i kontakt med tørr betong (ikke vannfilm på overflata), men hvis betongen er fuktig vil aluminium korrodere. Det er rapportert hurtig korrosjon på aluminium i betong, og spesielt når betongen har inneholdt klorider. Aluminium innstøpt i betong har ført til sprengning av betongen som følge av korrosjonsprodukter med høyt volum.

Atmosfærisk korrosjon av aluminium varierer med legering, men alle de legeringene som er aktuelle å bruke i tunneler er lite utsatt for atmosfærisk korrosjon. Dette gjelder ren-aluminium (1000-legeringer), AlMn (3000-legeringer), AlMg (5000-legeringer) og AlMgSi (6000-legeringer). Støpelegeringer med lavt innhold av kobber og jern har også lav korrosjonshastighet. Galvanisk korrosjon oppstår når aluminium er koblet til mer edle materialer, spesielt kobber og lavlegert karbonstål. Rustfrie legeringer er bedre, men kan også gi galvanisk korrosjon spesielt hvis korrosiviteten er høy.

Høye konsentrasjoner av veisalt og forsurende på grunn av eksos vil kunne føre til angrep på legeringer som i utgangspunktet er lite utsatt for korrosjon. Tidligere er det installert vann- og frostsikringshvelv av aluminium i et antall norske undersjøiske tunneler. Det har blitt rapportert om en del korrosjon på disse [18-21]. Følgende punkter går igjen i rapportene:

- Filiformkorrosjon på trafikksiden av platene. Dette er grunne korrosjonsangrep under lakk på aluminium. De utgjør ingen fare for platenes funksjon eller integritet, men forringer det estetiske utseendet.
- Dypere angrep av punktkorrosjon fra baksiden av platene som til dels penetrerer platene. Vann trenger gjennom hullene og platene fungerer ikke helt etter hensikten lenger. Problemene har til dels blitt forårsaket av for tynne belegg på baksiden av platene. Det har ikke blitt tatt tilstrekkelig hensyn til aggressiviteten til miljøet på fjellsiden av hvelvet.
- Galvanisk korrosjon rundt monteringsbolter av rustfritt stål. Ofte går dette bra, spesielt hvis korrosiviteten er lav. Dette er et problem det også er mulig å designe seg bort fra ved å isolere boltene fra aluminiumsplatene.
- Korrosjon på aluminiumsplater i kontakt med betong. Dette problemet er det også mulig å designe seg bort fra.

Disse erfaringene viser at aluminium er utsatt for korrosjon i undersjøiske tunneler, delvis som følge av uheldig design, men også som følge av et svært aggressivt miljø. Kombinasjonen av saltvann, eksos og veistøv ser ut til å angripe aluminiumslegeringer som normalt anses å være svært bestandige.



Figur 14. Pourbaix-diagram for aluminium

6 Bergsikringsbolter og beslag/bolter for vann- og frostsikring

6.1 Ønsket levetid

Bergsikringsbolter skal vare tunnelens levetid som normalt er 100 år.

Vann- og frostsikring har spesifisert levetid på 50 år. Tilhørende beslag og sikringer skal ha samme levetid.

6.2 Materialer

Bergsikringsbolter og beslag for vann- og frostsikring er typisk produsert i lavlegert stål som er varmforsinket og pulverlakkert. Inntil omkring 1990 ble det benyttet enten ubelagte bolter eller varmforsinkede bolter. Alternativt materialer kan være rustfri legering EN 1.4404.

6.3 Erfaringer og testresultater

Erfaringene med varmforsinkede og pulverlakkerte materialer gode, spesielt i landtunneler, men også i sjøtunneler. Bolter med denne typen belegg er benyttet siden 1990-tallet og det er rapportert få eller ingen problemer. I undersjøiske tunneler er det rapportert om korrosjon på varmforsinkede og pulverlakkerte bolter i rommet bak vann- og frostsikringa, som oppsummert i seksjon 5.1, men stort sett er erfaringene med slike bolter gode også her.

Det er ingen eller få erfaringer med EN 1.4404 bolter eller andre rustfrie legeringer i Norge.

6.4 Forslag til korrosjonsbeskyttelse

6.4.1 Landtunneler og ferskvannsoner i undersjøiske tunneler

Varmforsinka og pulverlakkerte bolter har gitt lang levetid, både i gysemørtel og i rommet bak vann- og frostsikringa. Dette stemmer overens med erfaringer fra andre bransjer der denne typen overflatebehandling benyttes. Nålestikk i lakken vil trolig også ha liten betydning for levetiden. Varmforsinket og pulverlakkert gods bør derfor benyttes.

6.4.2 Saltvannsoner i undersjøiske tunneler

Varmforsinka og pulverlakkerte fjellsikringsbolter som er gyst har stått godt i saltvannsonen. Testresultater indikerer at også deler som ikke er dekket av gysemørtel inne i fjellet har lite korrosjon, trolig som følge av høy pH og oksygenfritt miljø. Delene av bolten som stikker ut av berget, det vil si de delene som ikke er gyst, har i noen tilfeller korrodert. Hvis de er dekket av sprøytebetong vil de uansett ha lang levetid, siden eksponeringsmiljøet vil være alkalisk og oksygenfritt, på samme måte som i den gyste sonen.

Endeforankrede limbolter vil ikke få den korrosjonsbeskyttelsen som gysemørtelen gir. Disse vil derfor være mer utsatt for korrosjon i undersjøiske tunneler. Dette problemet elimineres ved kun å bruke gyste bolter her. Bergtrykksproblemer i undersjøiske tunneler er et minimalt problem, (det er rapportert sprakefjell i Ålesundtunnelene over en kort strekning) og alle bolter i saltvannsonen bør gyses. Korrosjonsangrep på endeforankrede bolter kan stanses ved å gyste boltene i ettertid.

For deler som står eksponert i rommet mellom vann- og frostsikring og berget, for eksempel festebolter og monteringskomponenter, er det som nevnt over rapportert korrosjon og nedbrytning av belegg etter omkring 20 års eksponering (for eksempel Frøyatunnelen og Bjørøytunnelen [15]). Konstant tilførsel av saltvann, forsuring på grunn av eksos og god tilgang på oksygen gjør at korrosiviteten her er svært høy og kan trolig overstige kategori C5 (ISO 12944-2). **Det generelle bildet viser imidlertid at varmforsinket- og pulverlakkert gods har stått godt selv i dette miljøet.**

Alternative belegg og materialer for bruk i rommet bak vann- og frostsikring:

1. Varmforsinking og pulverlakkering som i dag

Siden erfaringene viser at varmforsinking og pulverlakkering stort sett har stått bra er det god grunn for å fortsette med dette. Det er imidlertid rapportert om korrosjonsskader på enkelte komponenter, slik at korrosjon ikke kan utelukkes. Varmforsinket og pulverlakkert gods må derfor inspiseres med jevne mellomrom, for eksempel etter 30 år og deretter hvert tiende år. Ut fra de korrosjonsskadene som er rapportert i Frøyatunnelen og Bjørøytunnelen er det rimelig å anta at belegget vil ha en levetid på minst 30 år. Hvis det er ønskelig å unngå inspeksjon kan dimensjonene på lastbærende bolter økes så man har et korrosjonsmonn på stålet i tillegg. Hvis vi antar at belegget er korrodert bort slik at stålet i bolten starter å korrodere etter tretti år, trenger vi 20 års korrosjonsmonn. Med en antatt korrosjonshastighet på 400 $\mu\text{m}/\text{år}$ vil korrosjonsmonnet være 8 mm. Det er rimelig å anta at bolten vil korrodere rundt hele omkretsen, slik at diameteren i så fall bør økes med 16 mm. En korrosjonshastighet på 400 $\mu\text{m}/\text{år}$, det vil si det samme som man har i marin plaskesone, kan være konservativt. Reell korrosjonshastighet kan måles ved å sette ut stålplater og måle vekt tap etter ett år (NS-EN ISO 9226).

Siden varmforsinkede og pulverlakkerte komponenter hovedsakelig har stått bra er det rimelig å anta at de som har korrodert har gjort det på grunn av feil i belegget. Det kan derfor tenkes at problemet også kan løses ved bedre inntakskontroll, slik at komponenter med feil i belegget blir avvist eller reparert.

2. Forsterket pulverlakk

Ved å forsterke pulverlakken kan beleggets levetid øke. Dette kan gjøres ved å påføre to strøk med pulverlakk. For at dette skal ha noen hensikt må pulverlakken være helt fri for nålestikk. Dette kan kontrolleres med en gnistdetektor (NS-EN ISO 29601). Pulverlakken vil få en tykkelse på omkring 150 - 200 µm, hvilket er vesentlig høyere enn i dag. I gjengепartier vil det være vanskelig å få uniform filmtykkelse, slik at gjengene trolig fortsatt vil være utsatt for korrosjonsangrep. Muttere vil trolig også ødelegge pulverlakken i gjengепartiet, slik at det må forventes korrosjon her. Generelt anbefales det å forsegle gjengeforbindelser med en voks eller lignende.

3. Rustfrie materialer

EN 1.4404 er trolig ikke bestandig i dette miljøet og vil spesielt være utsatt for spaltkorrosjon i gjenger og andre overlappende detaljer. Siden korrosjonsangrepene vil være lokale vil korrosjonshastigheten kunne bli høy, og høyere enn på lavlegert stål. Stål med over 22% krom vil trolig stå, som for eksempel duplex stål (EN 1.4462). Superduplex (EN1.4410) og høylegert austenittstål (EN 1.4547) vil ganske sikkert stå tunnelens levetid uten korrosjon, men dette er svært kostbare materialer. Kamstål og gjengestenger av disse materialene er trolig ikke hyllevarer, hvilket vil øke kostnadene ytterligere. Kostnadene vil derfor trolig ekskludere disse materialene fra bruk i bolter og beslag.

6.4.3 Alunskifer og andre kisholdige bergarter

Bak vann- og frostsikring kan miljøet være svært korrosivt som følge av lav pH og høy fuktighet. Betingelsene kan imidlertid også være vesentlig mildere. Det kan derfor være en fordel å undersøke korrosiviteten, det vil si måle pH, før man tar beslutninger om materialvalg og korrosjonsbeskyttelse.

Korrosjon på gyste bergsikringsboltene vil være bestemt av gysemørtelen (se seksjon 2.2) og derfor lite påvirket av bergarten. Så lenge den delen av boltene som stikker ut av fjellet ikke er kritisk for boltens funksjon vil varmforsinkede og pulverlakkerte bolter trolig gi ønsket levetid, uavhengig av korrosiviteten.

Levetiden til endeforankrede limbolter og komponenter som eksponeres i rommet bak vann- og frostsikring vil imidlertid være svært avhengig av korrosiviteten her. Ved lav pH og høy fuktighet vil sink og lavlegert stål korrodere raskt. Levetiden til varmforsinket og pulverlakkert gods vil derfor trolig være svært avhengig av kvaliteten på pulverlakken. Dette har aldri vært testet, slik at dette er en antagelse. En alternativ løsning som trolig er sikrere er å bruke EN 1.4404 som har god motstand i slikt miljø.

6.4.4 Konstant vått miljø eller neddykket

Som nevnt vil sink ha høy korrosjonshastighet i slike miljøer. Varmforsinket og pulverlakkert gods kan derfor være utsatt ved at sinken korroderer raskt i skader i lakken. For bergsikringsbolter elimineres problemet ved å gyse boltene. Hvis endeforankret bolt skal benyttes er rustfrie materialer, som for eksempel EN 1.4404, et godt alternativ, bortsett fra i sjøvann.

6.4.5 Reparasjon av pulverlakk på varmforsinket og pulverlakkert gods

Skader i pulverlakken, nålestikk og opphengspunkter som ikke blir dekket av pulverlakk kan repareres med to-komponent epoksy maling. Skaden rengjøres ved for eksempel pussing med sandpapir. Det er viktig at sinkbelegget er helt rent før maling påføres. Lakken omkring skaden må også rubbes opp med sandpapir for at reparasjonsbelegget skal få god heft. Malingsbelegget bør ha en filmtykkelse på 200 µm, helst påført i to strøk.

Skader i pulverlakken på bergsikringsbolter som skal gyses behøver ikke repareres siden bolten vil gi ønsket levetid selv med skader i lakken. Endeforankrede bolter bør/skal repareres. Også for festebolter bør det stilles krav om at opphengsmerker og skader repareres.

6.4.6 Mulige fremtidige løsninger

Glassfiberarmerte polymerbolter kan være basert på enten epoksy, vinylester eller polyester. Slike bolter er foreløpig ikke brukt i norske veitunneler. Det er en viss skepsis til om de har tilstrekkelig evne til å ta opp skjærkrefter. De er imidlertid benyttet i gruveindustrien. Strekkfastheten oppgis av en leverandør til å være over 750 - 880 MPa, mens skjærfastheten er oppgitt til å være 160-220 MPa. Ved en brann vil de trolig også svekkes raskt.

Fordelen med glassfiberbolter er at de ikke korroderer, har lav vekt og høy strekkfasthet. Ulempen er den lave skjærfastheten. Bæreevne i forbindelse med brann er også et usikkerhetsmoment. Enkelte polymere kan også svekkes av alkalisk miljø, slik at for komponenter som skal stå i kontakt med betong må dette tas hensyn til [22]. Det vil derfor være viktig å velge riktig type polymer. Den lave motstanden mot skjærkrefter må tas hensyn til i design og plassering av komponentene.

7 Lysarmatur og kabelbruer

7.1 Ønsket levetid

Ønsket levetid for installert utstyr i tunnel er 25 år. Når det gjelder lysarmaturer så skiftes disse som regel tidligere på grunn av levetiden til de elektriske komponentene. For festemateriell som monteres på baksiden av vann- og frostsikringshvelvet vil det være ønskelig med samme levetid som hvelvet, det vil si 50 år.

7.2 Erfaringer

Kabelbruer og lysarmatur står som regel i taket på tunnelen hvor det er lite salter og ganske tørt miljø. Forurensning fra eksos kan gi forsuring, spesielt i tunneler med mye trafikk, hvilket vil være aggressivt mot sink og lavlegert stål. Varmforsinket gods vil derfor være utsatt for korrosjon. I den dokumentasjon som er mottatt er det rapportert om korrosjonsskader på både lysarmatur og kabelbruer i trafikkrommet i sterkt trafikkerte tunneler i Oslo [23]. Lysarmaturene var belagt med et utilstrekkelig malingsbelegg eller pulverlakk, trolig direkte på stål. Kabelbruene var kun varmforsinket. På baksiden av vann- og frostsikringshvelvet er det rapportert om korrosjon på festemateriell. EN 1.4404 og varmforsinket og pulverlakkert stål kan trolig benyttes med godt resultat.

7.3 Forslag til løsninger

7.3.1 Materialvalg

De samme betraktningene som i kapittel 6 gjelder også her. I landtunneler og i trafikkrommet i undersjøiske tunneler vil både rustfritt stål av type EN 1.4404 og varmforsinket og pulverlakkert stål gi den ønskede levetiden. Bak vann- og frostsikringsmembran i undersjøiske tunneler vil trolig ikke EN 1.4404 gi ønsket levetid. Som diskutert tidligere har derimot varmforsinket og pulverlakkert gods som regel stått bra, slik at dette vil være en foretrukket løsning. Siden levetiden er satt til bare 25 år skal det ikke være nødvendig å innsisere, siden forventet levetid på belegget overstiger dette.

7.3.2 Kobling til eksisterende bolter

Kabelbruer, lysarmatur og annet utstyr ønskes ofte montert fast i eksisterende bolter. Der hvor eksisterende bolt og innmontert utstyr er av samme materiale vil dette være uproblematisk. Det typiske vil imidlertid være utstyr av rustfritt materiale som monteres til varmforsinkede og pulverlakkerte bolter. Skader i lakken vil eksponere sink, hvilket kan føre til galvanisk korrosjon. Så lenge miljøet er tørt vil korrosjon ikke være et problem. Fuktig miljø kan skape problemer, spesielt hvis det er salt og forurensninger til stede. Dette vil typisk være tilfelle hvis koblingen er bak vann- og frostsikring i undersjøiske tunneler. Siden det kun er snakk om en fuktig film på overflata vil ikke galvanisk strøm kunne gå så langt. Galvanisk korrosjon vil derfor først og fremst kunne oppstå på boltene tett ved det rustfrie materialet. Forslag til løsninger:

- Male det rustfrie materialet i avstand 30 cm til boltene. Dette vil eliminere galvanisk korrosjon så lenge belegget er intakt. To strøk epoksymaling på tilsammen 300 µm bør gi 25 år levetid.
- Galvanisk skille mellom rustfritt materiale og bolt. Hvordan dette skal løses i praksis blir ikke beskrevet her. Det kan ofte være vanskelig å oppnå fullt galvanisk skille, men det kan enkelt måles ved å sjekke elektrisk motstand mellom rustfritt materiale og bolt med et multimeter.

8 Vifter

8.1 Ønsket levetid

Ønsket levetid for installert utstyr i tunnel er 25 år. Som for lysarmatur kan de elektriske komponentene ha kortere levetid. For festemateriell som monteres på baksiden av vann- og frostsikringshvelvet vil det være ønskelig med samme levetid som hvelvet, det vil si 50 år.

8.2 Erfaringer

Viftehus produsert i karbonstål og Cortenstål har hatt lang levetid i Fretheim-, Byfjord-, Bømlafjord- og Korgfjell-tunnelene [24]. Cortenstål skal stå uten overflatebehandling og er beskyttet av relativt tette korrosjonsprodukter. Karbonstålet har vært behandlet med varmforsinking og maling eller rene malingsystemer. Alle disse løsningene har gitt god korrosjonsbeskyttelse i de undersøkte tunnelene, men trolig er varmforsinking og maling/pulverlakkering det mest robuste belegget.

I tunneler i Oslo har motorhus med malingsbelegg hatt store korrosjonsskader etter kun 8 års eksponering [23]. Det er ukjent hva slags belegg som er benyttet, men bildene som ble tatt indikerer at det ikke hadde tilstrekkelig tykkelse.

8.3 Forslag til løsninger

Varmforsinking med overmaling/pulverlakkering vil gi den mest robuste korrosjonsbeskyttelsen på viftehus og opphengsbraketter. Bruk av EN 1.4404 vil også gi lang levetid i alle miljøer med lite salt.

For motorhus er det krav om kjøling, som kan begrense utvalget av belegg og hva man kan spesifisere for korrosjonsbeskyttelse.

9 Nød-kiosker, skiltbokser, skiltrammer

9.1 Ønsket levetid

Ønsket levetid er 25 år.

9.2 Erfaringer

Dette er komponenter som står eksponert i trafikkrommet og som ofte er fremstilt i aluminium. Erfaringene er noe blandede. I Bømlafjordtunnelen er det rapportert korrosjonsskader på aluminium skiltkasser, mens aluminium i skiltrammer og dørrammer i nødkiosk har stått bra [24]. Skiltrammene var noe angrepet av filiformkorrosjon under lakk, men dette er kun et estetisk problem og ikke noe som påvirker styrken til skiltramma. Korrosjonsangrepene som ble vist på skiltkassa (aluminium) var åpenbart galvanisk korrosjon forårsaket av direkte montering av skiltkassa på stålbolter.

Alvorlige angrep på aluminium i tunnel som er rapportert har hatt følgende årsaker:

- galvanisk kobling til stål
- høy korrosivitet bak vann- og frostsikringshvelv i undersjøiske tunneler (kombinert med for tynn baksidelakk)

Filiformkorrosjon på lakkert aluminium er også rapportert, men dette er ikke kritisk for komponentens funksjon eller levetid og bør ikke være et argument mot bruk av aluminium.

9.3 Forslag til løsninger

Aluminium er et egnet materiale for alle komponenters som står i trafikkrommet. Ved å unngå direkte kobling mellom aluminium og stål vil problemet med galvanisk korrosjon elimineres. Filiformkorrosjon kan også unngås ved tilstrekkelig avvirkning i forbehandlingsprosessen eller ved å anodisere aluminiumet i stedet for å lakkere, som tidligere foreslått [24]. Anodisert aluminium vil ha høy motstand mot korrosjon og ikke være utsatt for filiformkorrosjon. Anodiseringen bør være 20 µm tykk. Lakk på aluminiumen øker ikke korrosjonsbestandigheten, siden små skader i lakken kan føre til groppkorrosjon

10 Pumpehus

10.1 Ønsket levetid

Ønsket levetid er ikke angitt.

10.2 Erfaringer

Det er rapportert korrosjon på EN 1.4404 i pumpesystemer for utpumping av sjøvann i Vardøtunnelen i 1993 [17]. I 2001 ble det rapportert at pumpene i Vardøtunnelen feiler regelmessig etter noen få års bruk og at de skiftes etter hvert som de feiler [25]. Det ble ikke angitt hva slags materiale som benyttes i pumpene, men det er rimelig å anta at det fortsatt var EN 1.4404 da rapporten ble skrevet. Det ble også rapportert om korrosjon på rør og ventiler av EN 1.4404 i pumperommet.

Kontinuerlig neddykking i sjøvann er svært aggressivt for rustfrie stål, og selv de mest høylegerte stål tåler ikke sjøvann over 25 °C. EN 1.4404 er følgelig ikke bestandig i sjøvann, hvilket er dokumentert gjennom en lang rekke med korrosjonsskader. At EN 1.4404 feilet i pumpesystemet i Vardøtunnelen er derfor ikke overraskende.

10.3 Forslag til løsninger

Et mer høylegert stål må benyttes hvis pumpehuset skal være korrosjonsbestandig. Svært edle stållegeringer (EN 1.4547 eller EN 1.4410) eller titan anbefales for sjøvannssystemer i NORSOK M-001. Dette er kostbare materialer, slik at pumper av disse materialene også er kostbare. Hvis utskiftingsintervallet på pumper av EN 1.4404 er akseptabelt kan dette ha en lavere levetidskostnad.

11 Anbefalte materialer/belegg

Tabellen under inneholder en oppsummering av anbefalinger for materialvalg og korrosjonsbeskyttelse for ulike komponenter i ulike miljø.

Tabell 4. Anbefalte material

Komponent	Miljø	Anbefalt materiale/belegg
Bergsikringsbolt, gyst	Alle	Varmforsinket og pulverlakkert. Skader i pulverlakken behøver ikke repareres.
Bergsikringsbolt, limt	Alle	Varmforsinket og pulverlakkert. Skader i pulverlakken bør repareres. I undersjøiske tunneler og landtunneler der det kommer mye vann ut av fjellet bør alle sikringsbolter gyses.
Beslag/bolter for vann- og frostsikring	Alle, bortsett fra rennende vann eller neddykket	Varmforsinket og pulverlakkert. I undersjøiske tunneler må de inspiseres eller ha ekstra korrosjonsmonn. Skader i pulverlakken bør repareres.
	Rennende vann eller neddykket	Varmforsinket og pulverlakkert kan gi korrosjonsproblemer. I landtunneler er EN 1.4404 et godt alternativ. Varmforsinket og pulverlakkert gods kan benyttes i sjøtunneler, men pulverlakken bør ha høy kvalitet. Inspeksjon anbefales
Lysarmatur og kabelbruer	Landtunneler og trafikkrom i undersjøiske tunneler	Varmforsinket og pulverlakkert stål eller EN 1.4404. Vær oppmerksom på at koblinger mellom EN 1.4404 varmforsinket og pulverlakkert gods må utføres slik at galvanisk korrosjon unngås
	Bak vann- og frostsikring i undersjøiske tunneler	Varmforsinket og pulverlakkert
Viftehus og tilhørende opphengsbraketter	Alle	Varmforsinket og pulverlakkert stål eller EN 1.4404. Vær oppmerksom på at koblinger mellom EN 1.4404 varmforsinket og pulverlakkert gods må utføres slik at galvanisk korrosjon unngås
Nødkiosker, skiltbokser og skiltrammer	Alle	Aluminium, helst anodisert (20 µm), men ubehandlet eller lakkert kan også fungere. Vær oppmerksom på at koblinger mot stål må utføres slik at galvanisk korrosjon unngås.
Pumpehus for sjøvannspumper		EN 1.4547, EN 1.4410 Titan EN 1.4404 vil korrodere og må skiftes regelmessig.

12 Referanser

1. Bardal, E., *Corrosion and Protection*. 2003, London: Springer.
2. Fontana, M.G. and N.D. Greene, *Corrosion Engineering*. 1986, New York: McGraw-Hill.
3. Johnsen, R. and E. Bardal, *Cathodic Properties of Different Stainless Steels in Natural Seawater*. CORROSION, 1986. **41**(5): p. 13-18.
4. Holte, R., *The cathodic and anodic properties of stainless steels in sea water*. 1988, NTH: Trondheim.
5. Thierry, D., ed. *Aspects of Microbially Induced Corrosion*. Vol. EFC 22. 1996, Maney Publishing: Leeds.
6. Steinsmo, S., *Mikrobiell korrosjon*, 1984, SINTEF rapport A84041, Trondheim
7. Gjerp, P., M. Opsahl, and S. Smeplass, *Grunnleggende betongteknologi: Betongkompetanse*. 2. ed. 2004, Oslo: Byggenæringens Forlag.
8. Bertolini, L., et al., *Corrosion of Steel in Concrete. Prevention, Diagnosis, Repair*, 2013, Weinheim: Wiley-VCH.
9. Thomas, R., *Håndbok i varmforsinking*, 2010, Nordic Galvanizers: Stockholm.
10. DNV-RP-B401 Cathodic Protection Design, Høvik, 2010
11. ISO, *12944, Paints and varnishes - Corrosion protection of steel structures by protective paint systems*. 1998, The International Organization for Standardization: Geneva.
12. Zhang, X.G., *Corrosion and Electrochemistry of Zinc*. 1996, New York: Plenum Press.
13. Sederholm, B. and P. Reuterswärd, *Korrosjonsprøving av ulike typer av bergbultar*, ISSN 1104-1773, 2013, Swerea KIMAB, Stockholm
14. Bergab, *Beständighet hos ingjutna bergbultar*, 1998, Vägverket, Avdelingen för Bro och Tunnel, Göteborg
15. Rønneberg, C., *Tilstand og tilstandsutvikling av ulike typer vann- og frostsikringshvelv*, 11378-1, 2015, Aas-Jacobsen, Oslo
16. Ongstad, A., *Etatsprogrammet Moderne vegtunneler 2008 - 2011. Levetid på bergbolter*, NPRA rapport nr. 164, 2012, Norconsult AS, Sandvika
17. Drugli, J., *Vurdering av korrosjonsskader i Vardøtunnelen*, SINTEF rapport F93047, 1993, SINTEF, Trondheim
18. Bjørgum, A., *Vurdering av korrosjon på aluminium platehvelv i Byfasttunnelen i Rennfast-sambandet ved Stavanger*, SINTEF rapport F01342, 2001, SINTEF, Trondheim
19. Bjørgum, A., *Tilstandsanalyse for aluminium tunnelplatehvelv i Nappstraumtunnelen*, SINTEF rapport F99272, 1999, SITNEF, Trondheim
20. Bjørgum, A., *Tilstandsanalyse for aluminium tunnelplatehvelv i Freifjordtunnelen*, SINTEF rapport F99245, 1999, SINTEF, Trondheim
21. Bjørgum, A., *Vurdering av levetid for aluminiumshvelvene i Ellingsøy- og Valderøytunnelen*, SINTEF rapport F7472, 2008, SINTEF, Trondheim
22. Montaigu, M., et al., *Laboratory Characterization and Evaluation of Durability Performance of New Polyester and Vinylester E-glass GFRP Dowels for Jointed Concrete Pavement*. Journal of Composites for Construction, 2013. **17**(2): p. 176-187.
23. SWI, *Rehabilitering av tunneler i Oslo*, 2014, Aas-Jacobsen, Oslo
24. Lewin, C., *Materialteknisk sluttrapport – Karmøytunnelen Fv 47, T-forbindelsen.*, 2014, CaCon, Haugesund
25. Valen, S. and H. Torvik, *Tilstandskontroll av Vardøtunnelen*, 2001, Maintech, Trondheim



Teknologi for et bedre samfunn

www.sintef.no



Statens vegvesen
Vegdirektoratet
Publikasjonsekspedisjonen
Postboks 8142 Dep 0033 OSLO
Tlf: (+47 915) 02030
publvd@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

Trygt fram sammen