



Statens vegvesen

Bergsikringsbolter - laboratorieforsøk på korrosjonsbeskyttelse

Utført av Sintef Materialer og kjemi for Statens vegvesen

Statens vegvesens rapporter

Nr. 97



Vegdirektoratet
Trafikksikkerhet, miljø- og teknologiavdelingen
Sintef Materialer og kjemi for Tunnel og betong
Mars 2012

Tittel

Bergsikringsbolter - laboratorieforsøk på korrosjonsbeskyttelse

Undertittel

Forfatter

Torstein Lange

Avdeling

Trafikksikkerhet, miljø- og teknologiavdelingen

Seksjon

Sintef Materialer og kjemi for Tunnel og betong

Prosjektnummer

Sintef: 80190900 SVV:602843

Rapportnummer

Nr. 97

Prosjektleder

Bernd Schmid (Sintef), Are H. Høien (SVV)

Godkjent av

Bård Wathne Tveiten

Emneord

bergsikring, bolter, korrosjon, pulverlakking, varmforsinking

Sammendrag

Målsetningen med prosjektet var å avdekke hvordan beleggs-kader i kombinasjon med spalter vil påvirke korrosjonsbestandigheten til bergbolter av typen kamstålbolt med ulike typer belegg/ korrosjonsbeskyttelse i et simulert sjøvann med pH=8.2 ved romtemperatur.

Title

Bolts for rock support - laboratory tests of corrosion protection

Subtitle

Author

Torstein Lange

Department

Trafikksikkerhet, miljø- og teknologiavdelingen

Section

Tunnel og betong

Project number

Sintef: 80190900 SVV:602843

Report number

No. 97

Project manager

Bernd Schmid (Sintef), Are H. Høien (SVV)

Approved by

Bård Wathne Tveiten

Key words

rock support, bolts, corrosion, powder coating, hot-dip galvanizing

Summary

Rapport

Avrop 3 – Korrosjon på bolt

EMNEORD:
EmneordVERSJON
03DATO
2011-12-19FORFATTER(E)
Torstein LangeOPPDRAKSGIVER(E)
Statens vegvesen Vegdirektoratet
Postboks 8142 Dep, 0033 OSLOOPPDRAKSGIVERS REF.
Are Håvard HøienPROSJEKTNR
80190900ANTALL SIDER / VEDLEGG:
52 / 5

SAMMENDRAG

Korrosjon på bergbolt

Målsetningen med prosjektet var å avdekke hvordan beleggskaader i kombinasjon med spalter vil påvirke korrosjonsbestandigheten til bergbolter av typen kamstålbolt med ulike typer belegg/ korrosjonsbeskyttelse i et simulert sjøvann med pH=8.2 ved romtemperatur. Det er testet bolter og komponenter i bært stål, med varmforsinking (VF) og varmforsinking med et toppstrøk pulverlakk (VF+PL). Påførte skader simulerte skader som kan inntreffe ifm. håndtering, montering osv. Det elektrokjemiske potensialet varierte en del for de forskjellige skadescenarier og i enkelte tilfeller var dette relativt nært det åpne korrosjonspotensialet for bært stål. Det er ikke funnet en åpenbar årsak til de store variasjonene, men forklaringen på de relativt høye potensialene ligger mest sannsynlig i sinkingsbeleggets natur da dette er en legering av jern og sink, noe som dermed løfter potensialet opp mot stålets potensial uten at dette er ensbetydende med at belegget eller den underliggende ståloverflaten korroderer. Veiing av komponenter før og etter test for estimering av vekttap og tæringshastigheter viste seg å være lite hensiktsmessig siden fjerning av tungtløselige avsetninger medførte at også sinkbelegget ble fjernet. Dette medførte uakseptabelt store usikkerheter i målingene.. Den visuelle bedømmelsen av eksponerte komponenter er derfor ansett som tilstrekkelig for å konkludere om beleggskaader i kombinasjon med spalter vil påvirke korrosjonsbestandigheten for slike boltesystemer. Basert på etterundersøkelsene er det funnet at ingen komponenter som inngår i slike boltesystemer vil påvirkes nevneverdig av skader, heller ikke i kombinasjon med spalter, enten det er snakk om skader inn til varmforsinkingen eller skader helt inn til stålets overflate. Det er ikke funnet tegn til korrosjon i noen tilfeller og tæringen av sinkbelegget er omtrent som forventet for et simulert sjøvann med rikelig tilgang på luft (oksygen). Videre er det funnet at heller ikke bruk av rustfrie muttere i kombinasjon med VF- og /VF+PL belagte komponenter vil ha noen betydning for systemets korrosjonsbestandighet.

UTARBEIDET AV
Torstein Lange

SIGNATUR

KONTROLLERT AV
Bernd Schmid

SIGNATUR

GODKJENT AV
Bård Wathne Tveiten

SIGNATUR

RAPPORTNR
SINTEF F21184ISBN
ISBN-nummerGRADERING
FortroligGRADERING DENNE SIDE
Åpen

Historikk

VERSJON	DATO	VERSJONSBEKRIVELSE
00	2011-11-21	Foreløpig rapport – Resultater etter 7 ukers eksponering
01	2011-12-13	Førstegangs oversendelse av sluttrapport
02	2011-12-15	Ny versjon av sluttrapport med endringer i hht. e-post av 2011-12-13 fra oppdragsgiver
03	2011-12-19	Ny versjon av sluttrapport med endringer i hht. e-post av 2011-12-15 fra oppdragsgiver

INNHALDSFORTEGNELSE

1	INNLEDNING	4
2	BAKGRUNN	4
3	MÅLSETNING	5
4	REFERANSER	5
5	MATERIALER OG BELEGG	6
6	KOMPONENTBESKRIVELSER	6
6.1	Bolter	6
6.2	Hølvkuler.....	6
6.3	Skiver	7
6.4	Muttere	7
7	EKSPERIMENTELT OPPSETT	8
7.1	Spalter	8
7.2	Påføring av simulerte skader	8
7.3	Boltmatrise og skadescenarier	10
7.4	Antall komponenter	10
7.5	Testmiljø	11
7.6	Testoppsett	12
7.7	Testens varighet.....	12
8	RESULTATER	13
8.1	Introduksjon	13
8.2	Beleggtykkelser	13
8.3	Elektrokjemiske potensialer.....	15
8.4	pH-målinger	18
8.5	Prøveuttak og rengjøring.....	19
8.6	Visuelle observasjoner	20
8.6.1	Observasjoner etter 7 uker	20
8.6.2	Observasjoner etter 13 uker	25
9	KONKLUSJON	32

BILAG/VEDLEGG

VEDLEGG 1: Dokumentasjon av beleggtykkelser

VEDLEGG 2: Systemoppsett

VEDLEGG 3: Elektrokjemiske potensialer

VEDLEGG 4: pH målinger

VEDLEGG 5: Bilder av komponentsystemer og forsøksoppsett

1 INNLEDNING

SINTEF Materialer og Kjemi i Trondheim ble 14. juli 2011 tildelt oppdraget "Avrop 3 – Korrosjon på bolt" av Statens vegvesen Vegdirektoratet v/ Are Håvard Høien.

Statens vegvesen Vegdirektoratet, Trafikksikkerhet Miljø- og Teknologiavdelingen, heretter benevnt oppdragsgiver, har definert oppdragets innhold i saksnummer dokument nr. 2010174185. Kort oppsummert innebærer dette akselerert korrosjonstesting av vanlige boltetyper brukt i norske vegtunneler med ulik grad av korrosjonsbeskyttelse (type belegg) og skade på disse.

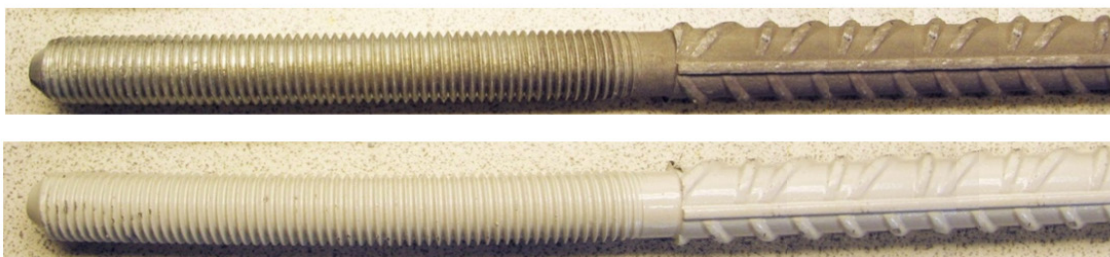
Det er for det aktuelle oppdraget valgt å undersøke komponenter med varmforsinket (VF) overflate i tillegg til komponenter med samme type belegg i tillegg til et toppstrøk med pulverlakk (PL). Det i fellesskap med oppdragsgiver definert spesifikke scenarier hvor omfang og plassering av simulerte skader skal legges inn på de aktuelle komponentene. Videre ble det avholdt et avklaringsmøte med oppdragsgiver 24. august hvor man ble enige om den laboratorietekniske framgangsmåten (prosedyre) og diverse testparametere for gjennomføringen av oppdraget. Det vises forøvrig til liste av relevante dokumenter i kapittel 4.

2 BAKGRUNN

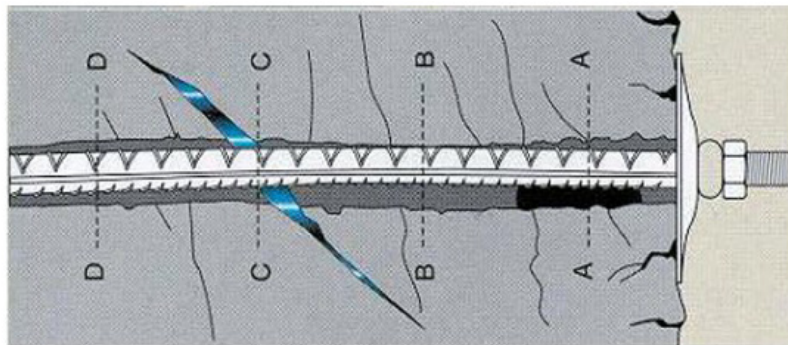
Kamstål er den vanligste utformingen på bergsikringsbolter brukt i dag. Disse leveres med ulike typer korrosjonsbeskyttelse der de vanligste er varmforsinking og varmforsinking + pulverlakkering, ref. Figur 1. Ved transport og installering utsettes boltene for mekanisk påvirkning som kan gjøre skade på korrosjonsbeskyttelsen.

Boltene blir i hovedsak montert enten ved at de er gyst fullstendig inn i mørtel eller med en endeforankring av polyester. Utenpå berget er boltene festet med plate, halvkule og mutter, ref. Figur 2. Halvkulen gjør at platen kan ha et vinkelavvik i forhold til boltene.

Ved endeforankring med polyesterforankring er store deler av boltene eksponert og er derfor utsatt for korrosjon.



Figur 1. Bergsikringsbolter av typen kamstål.
Øverst: Med varmforsinking (VF)
Nederst: Med varmforsinking og pulverlakk (VF+PL)



Figur 2. Eksempel på bergbolt som er gyst fast i fjellet med halvkule og skive med konisk hull.

3 MÅLSETNING

Målsetningen med prosjektet har vært å avdekke hvordan beleggskader vil påvirke korrosjonsbestandigheten til bergbolter av typen kamstålbolt med ulike typer korrosjonsbeskyttelse:

- Uten korrosjonsbeskyttelse (bart stål)
- Varmforsinket – VF (galvanisert)
- Varmforsinket og pulverlakkert – VF/PL

Skadene som ble påført skulle i størst mulig grad simulere faktiske skader som kan påføres boltene overflate i forbindelse med håndtering, montering, gysing og drift, samtidig som det skal være mulig å sammenlikne skadene fra et vitenskapelig ståsted. Rangering av de individuelle belegg- og skade-kombinasjoner skulle baseres på vekttap og visuell bedømming. I tillegg skulle det utføres ukentlige potensialmålinger for å kunne si noe om hvordan korrosjonsprosessen påvirker de aktuelle komponenter.

Det må anmerkes at det ikke har vært en målsetning å framskaffe et underlag (korrosjonshastighet) for å estimere boltene levetid for de forskjellige beleggkombinasjoner og skadetyper.

4 REFERANSER

Forsøket er utført i henhold til:

1. SVVs Avrop 3, nr. 2010174185 "Laboratorietjenester innen betong, betongkonstruksjoner, tunnel og bruvedlikehold med FOU" av 2011-06-16.
2. Gjeldende SINTEF-tilbud av 2011-07-06.
3. SINTEFs oversendte test prosedyre KS-8032-WP025, rev. 01.
4. Relevant e-mail korrespondanse.
5. Relevante krav nedfelt i laboratoriets overordnede laboratorieprosedyre KS-802829 for eksperimentelt arbeid i SINTEFs laboratorium CorLab.

5 MATERIALER OG BELEGG

Alle komponenter er levert i karbonstål unntatt muttere hvor det er valgt å inkludere noen rustfrie muttere (type AISI A4 316) i tillegg. Alle komponentene tilfredsstiller krav til bergbolter som gitt i håndbok 25 Prosesskode 1. Følgende beleggekombinasjoner er inkludert i testen:

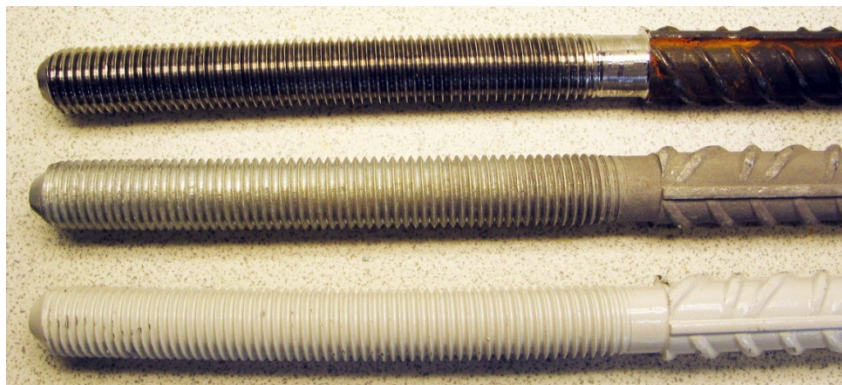
- Bolter: Bart stål, varmforsinket (VF) og varmforsinket + pulverlakk (VF+PL)
- Skiver: VF og VF+PL
- Halvkuler: VF og VF + PL
- Muttere: Bart stål (C-stål og rustfritt), VF og VF + PL

Dokumentasjon av beleggtykkelse ble utført ved bruk av et Kalibrert elcometer og mikroskopmålinger av polerte tverrsnitt. Resultatene er vedlagt i Vedlegg 1. Tykkelsen på VF- og PL-belegget var begge på ca. 100 µm basert på gjennomsnitt for målinger på skiver, muttere og halvkuler. Alle norske leverandører leverer bolter som tilfredsstiller Vegvesenets krav. I forsøkene er Vik Ørsta valgt som leverandør.

6 KOMPONENTBESKRIVELSER

6.1 Bolter

Det er valgt å undersøke bolter av typen kamstålbolt med et ca. 150 mm langt M20 gjengeparti i den ene enden. Av praktiske årsaker ble lengden på boltene redusert fra 1500 til ca. 800 mm. Gjengepartiet og en del av rettstammen ble imidlertid eksponert i det aktuelle miljøet og representerer dermed hele boltens overflate. Både beleggfrie (bart stål), VF og VF+PL belagte bolter ble testet. Figur 3 viser typiske kamstålbolter.



Figur 3. Kamstålbolter M20. Øverst: Bart stål, Midten: VF, Nederst: VF+ PL

6.2 Halvkuler

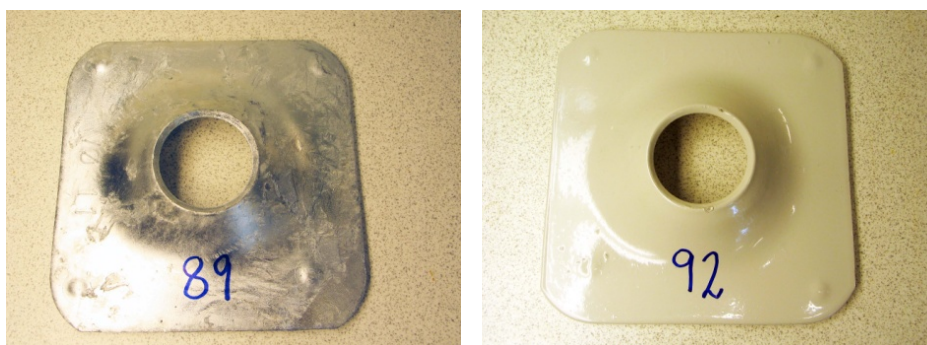
Da det var ønskelig fra oppdragsgivers side at et bredest mulig utvalg av boltekomponenter ble inkludert i testen, ble det også valgt å inkludere halvkuler. Både VF og VF+PL belagte halvkuler ble testet. Figur 4 viser typiske halvkuler.



Figur 4. Halvkuler, Ø50, hull Ø22. Venstre: VF. Høyre: VF+PL.

6.3 Skiver

Det ble valgt å undersøke avrundede kvadratiske skiver på 150x150 mm og en tykkelse på 5 mm. Både VF og VF+PL belagte skiver ble testet. Aktuelle skiver for testen er vist i Figur 5.



Figur 5. Kvadratiske skiver, 150 x 150 x 5. Venstre: VF. Høyre: VF+PL.

6.4 Muttere

Det ble valgt å benytte varmforsinkede (VF), pulverlakkbelagte + varmforsinkede (VF+PL) og syrefaste M20 muttere i testen. De tre alternativene ble eksponert individuelt og sammenkoblet i system, ref. Figur 6.

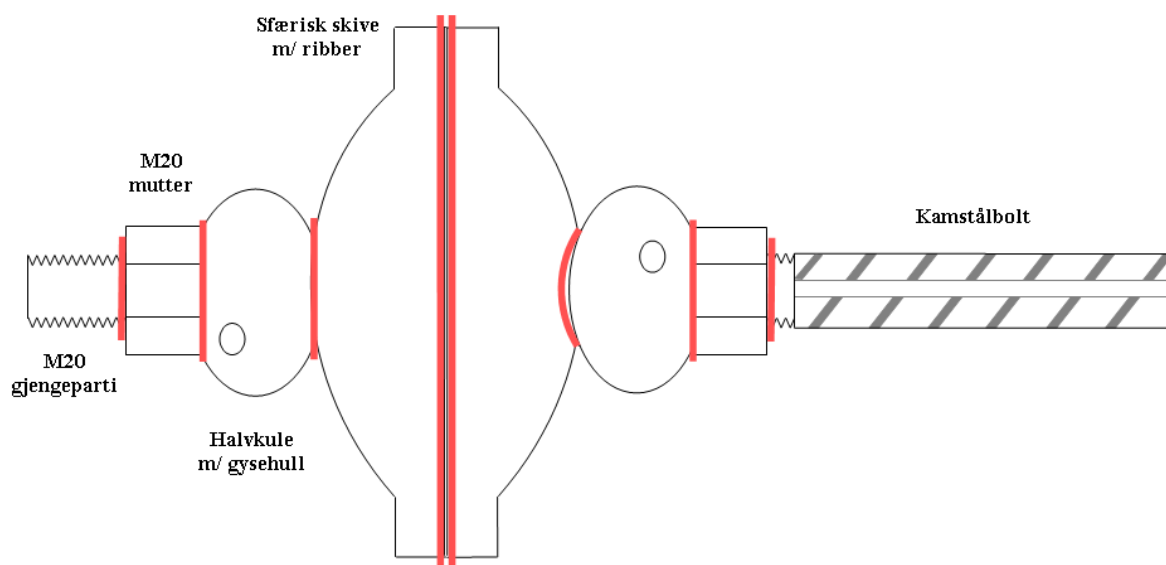


**Figur 6. Standard metriske M20 muttere (grovgjenget).
Venstre: Karbonstål med VF, Midten: Karbonstål med VF + PL, Høyre: Syrefast**

7 EKSPERIMENTELT OPPSETT

7.1 Spalter

Som det ses av Figur 7 vil det dannes spalter mellom de enkelte komponenter, dvs. skive, halvkule, bolt og mutter hvor det kan oppstå spaltkorrosjon. Generelt anses spaltkorrosjon som et fryktet fenomen først og fremst for rustfrie materialer, men det er i dette prosjektet ønskelig å se hvordan **beleggskader** i kombinasjon med **spalter** vil påvirke korrosjonsbestandigheten til boltesystemet. Dette ble i praksis simulert ved å sammenstille de respektive komponenter på en mest mulig realistisk måte og deretter trekke dette til ved et gitt moment. Mothold i fjellet er simulert ved bruk av et ekstra sett halvkuler, skiver og muttere. Sammenstillingen er vist i Figur 7. Det ble for alle 9 systemer benyttet et tiltrekkingsmoment på 125 kN.



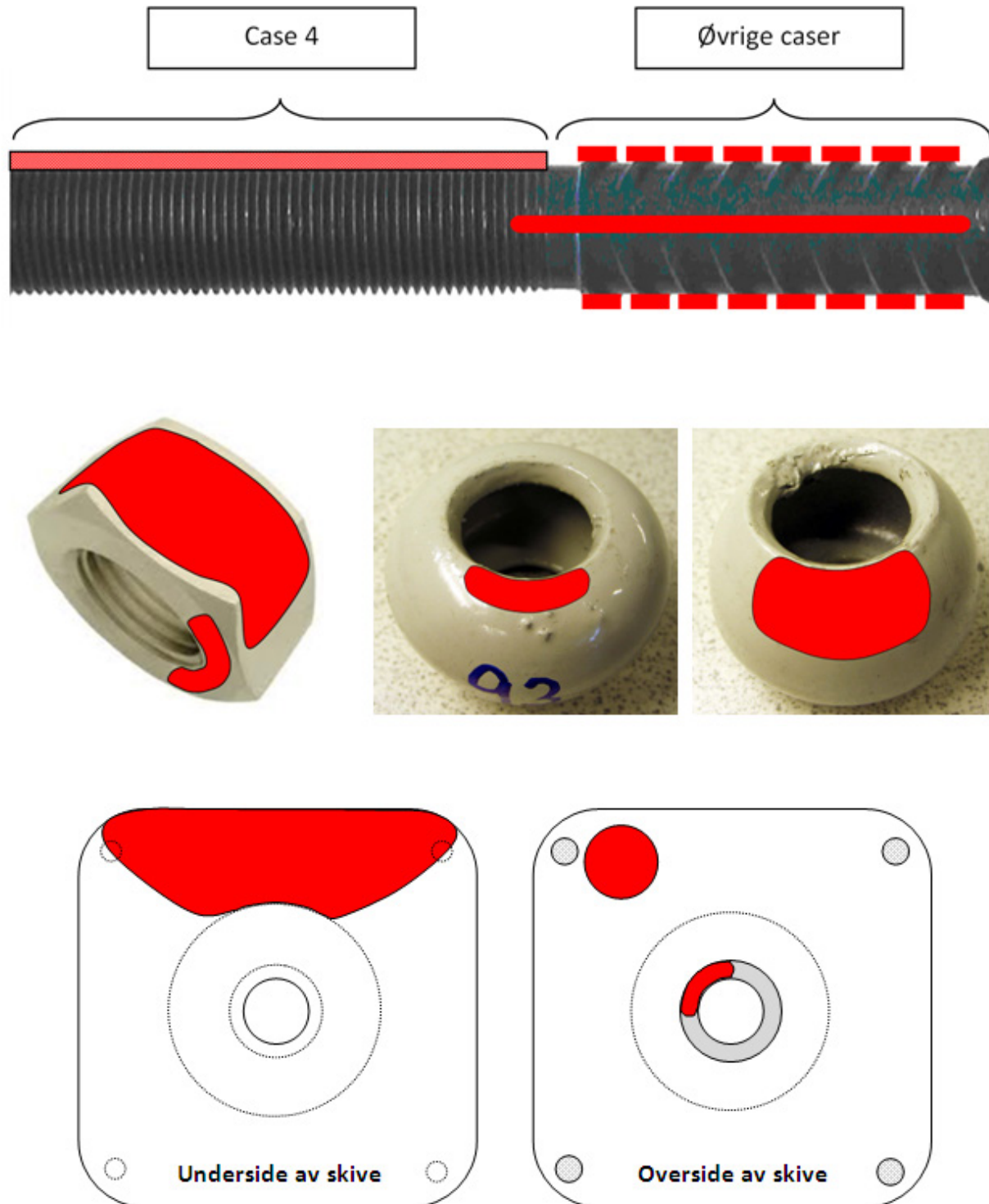
Figur 7. Sammenstilling av kamstålbolt med tilhørende komponenter som utført i forsøket. Røde felter angir typiske områder hvor spalter vil oppstå og hvor skader er lagt inn for å se effekten av det. Se også Figur V5-1 og V5-2 i Vedlegg 5.

7.2 Påføring av simulerte skader

Skader som påføres utstyr og komponenter i virkeligheten lar seg sjelden gjenskape identisk i et laboratorium. Siden hensikten med oppdraget var å avdekke hvordan korrosjonsbestandigheten til komponentene berøres når det beskyttende belegget skades i kombinasjon med spalter, ble det ansett som mest realistisk å påføre skadene ved bruk av en roterende smergelrondell for å fjerne belegg og en liten roterende kuttskive for å legge inn skader i stålgodset som f.eks. langsgående skade på gjengene.

Smergelrondell ble først og fremst valgt for å sikre at all sink og pulverlakk ble fjernet helt på de gitte områder og ikke gnidd/smurt utover da sinkrester vil virke korrosjonsbeskyttende for en kortere periode, men ikke på lengre sikt slik som i virkeligheten.

Generelt ble det lagt inn et skadeomfang i spalteområder på ca. 25 % av arealet, dvs. en kvart omkrets i hull og tilsluttende overflater for et montert oppsett. I tillegg ble det lagt inn "tilfeldige" skader på eksponerte flater, noe som er realistisk ifm. transport, montering osv. Simulerte skader er illustrert i Figur 8.



Figur 8. Illustrasjon av simulerte skader (røde felter). For sinkbelagte komponenter er skadene lagt inn til stålgodset. For sink + pulverlakkbelagte komponenter er skadene enten lagt inn til stålgodset eller ned til det underliggende sinkbelegget. Se også Figur V5-3, V5-4 og V5-5 i Vedlegg 5.

7.3 Boltmatrise og skadescenarier

Det refereres til Avrop 3, relevant e-post korrespondanse, gjeldende tilbud og oversendt testprosedyre KS-8032-WP025 (rev.01) for definisjon av skadetype-/omfang (CASE) og antall boltparalleller. Dette er oppsummert i Tabell 1.

Tabell 1. Boltmatrise

CASE	Komponent og skadebeskrivelse	U	VF	VF/PL
1	Bolt uten skade	3	3	3
2	Skade ned til grunnmateriale		3	3
3	Skade ned til underliggende belegg			3
4	Langsgående skade på gjengene ned til grunnmateriale			3
5	Skade i spalt ned til grunnmateriale		3	3
6	Skade i spalt ned til underliggende belegg			3
Antall paralleller		3	9	18
Totalt antall bolter		30		

U = ubehandlet (bart stål), VF = varmforsinket, VF/PL = varmforsinket og pulverlakkert.

7.4 Antall komponenter

Med utgangspunkt i Tabell 1 og Figur 7 ble det estimert et gitt antall komponentkombinasjoner med tilhørende antall komponenter som skulle inngå i testen i tillegg til 1 stk ekstra av hver komponent for sammenlikning med eksponerte komponenter. Komponenttype og antall er oppsummert i Tabell 2.

Tabell 2. Komponentbeskrivelse

Pkt.	Komponentbeskrivelse	Overflate-tilstand	Antall til testing	Antall referanser
1	Bolt, B500C, M20 x 1500mm	U (Bart stål)	3	1
2	Bolt, B500C, M20 x 1500mm	VF	9	1
3	Halvkuler til bolt over, Ø50, hull Ø22	VF	6 + 1	1
4	Skiver, 150 x 150 x 5 mm	VF	6 + 1	1
5	Bolt, B500C, M20 x 1500mm	VF/PL	18	1
6	Halvkuler til bolt over, Ø50, hull Ø22	VF/PL	12 + 1	1
7	Skiver, 150 x 150 x 5 mm	VF/PL	12 + 1	1
8	Mutter, M20	VF	9 + 1	1
9	Mutter, M20	VF/PL	4 + 1	1
10	Mutter, M20	Syrefast	9 + 1	1

Før testen ble igangsatt ble alle komponenter inspisert for feil, skader o.l. Deretter ble samtlige komponenter i Tabell 2 nummerert og veid etter at definerte skader var påført.

Videre er det sammenstilt 9 systemer som representerer case 4, 5 og 6. Hvilke komponenter som inngikk i hvert system er gjengitt i Vedlegg 2.

7.5 Testmiljø

Det kan diskuteres hva som er et representativt miljø, eller elektrolytt som det her vil være snakk om, slike boltesystemer vil bli utsatt for gjennom sin levetid. I noen tilfeller vil de omtrent ikke utsettes for korrosive forhold i det hele tatt (f.eks. tørre tunneller), andre ganger mer fuktige miljøer og i verste fall gjennomslag av sjøvann som omslutter komponentene gjennom hele levetiden. Når bolttestammen er omhyllt av gysemasse vil det være de ytre delene av systemet som er utsatt for korrosjon. Naturlig sjøvann anses som svært korrosivt og uten tvil det mest aggressive og riktige valget for en akselerert korrosjonstest. På oppstartmøtet med oppdragsgiver 24. august 2011 ble det enighet om testbetingelser som gitt i Tabell 3.

Tabell 3. Testparametere.

Pkt.	Parameterbeskrivelse	Verdier
1	Elektrolytt	Syntetisk sjøvann ^{*)}
2	pH	≈ 8.2 ± 0.5
3	Andre salter/ioner	Nei
4	Kunstig metning med luft (f.eks. akvariepumpe)	Ja
5	Sjekk og eventuelt justering av pH underveis (ukentlig)	Ja
6	Temperatur	Romtemperatur

^{*)} Definert i ASTM D1141:



D 1141 – 98 (2003)

TABLE X1.1 Chemical Composition of Substitute Ocean Water ^{A,B}

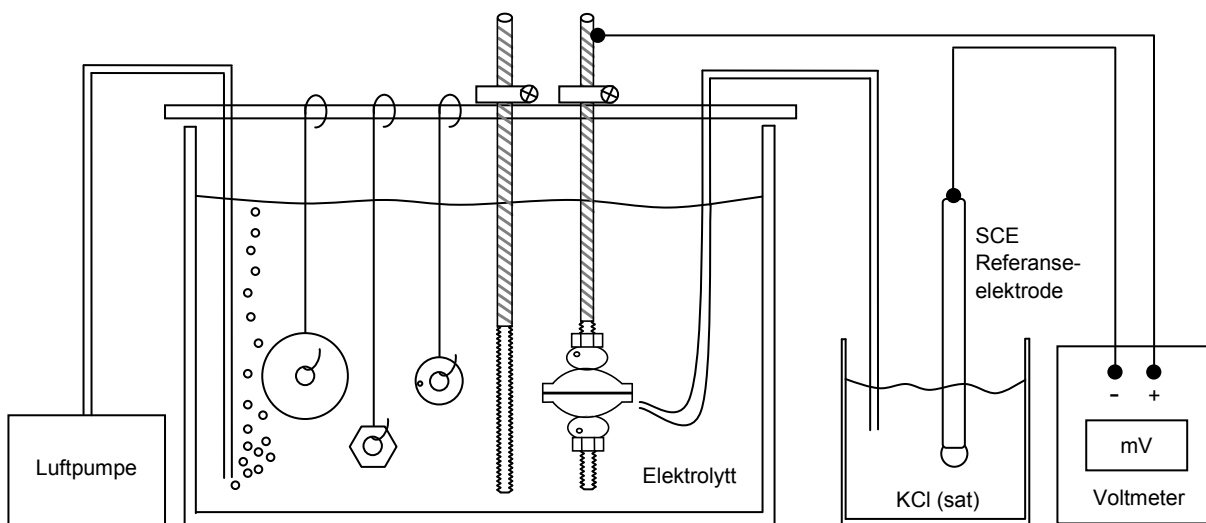
Compound	Concentration, g/L
NaCl	24.53
MgCl ₂	5.20
Na ₂ SO ₄	4.09
CaCl ₂	1.16
KCl	0.695
NaHCO ₃	0.201
KBr	0.101
H ₃ BO ₃	0.027
SrCl ₂	0.025
NaF	0.003
Ba(NO ₃) ₂	0.0000994
Mn(NO ₂) ₂	0.0000340
Cu(NO ₃) ₂	0.0000308
Zn(NO ₃) ₂	0.0000096
Pb(NO ₃) ₂	0.0000066
AgNO ₃	0.0000049

^AChlorinity of this substitute ocean water is 19.38.

^BThe pH (after adjustment with 0.1 N NaOH solution) is 8.2.

7.6 Testoppsett

Testapparatet besto av 2 stk. 200 liters plastkar som fyltes med syntetisk sjøvann som definert i Tabell 3. For å mette løsningen med luft ble det benyttet akvariepumper med gassforstøvere i enden. Løse komponenter som skiver, halvkuler og muttere ble hengende fritt i ikke-metalliske tråder, mens boltstenger og sammenkoblede boltsystemer ble tredd gjennom Ø20 mm hull i treplater og låst i riktig posisjon vha. slangeklemmer. Ukentlige potensialmålinger av komponentene ble utført med et standard elektrokjemisk oppsett basert på bruk av en mettet kalomelektrode (SCE) og et multimeter. Referanseelektroden ble sjekket opp mot ren sink før bruk. Videre ble pH målt regelmessig (hver/annenhver uke) vha. et pH-meter.



Figur 9. Testoppsett med måling av elektrokjemisk potensial på neddykkede prøvekomponenter. Se også Figur V5-6 og V5-7 i Vedlegg 5.

7.7 Testens varighet

I utgangspunktet ble det enighet om at testen skulle gå over en periode på 1000 timer, dvs. ca. 6 uker.

I forbindelse med et besøk av oppdragsgiver 14. oktober 2011, ble det imidlertid ytret ønske om at testen skulle forlenges noen uker til da det tilsynelatende så ut til at minimalt med korrosjon hadde funnet sted så langt. Det ble imidlertid i samme periode enighet om at den av de tre parallellene for hvert case med det mest positive potensialet, dvs. som korroderer mest, skulle tas ut for etterundersøkelser (ref. Tabell 1). Som det framgår av Tabell 1, innebar dette at **7 enkeltbolter** og **3 boltsystemer** ble tatt ut etter **7 ukers eksponering** (ikke 6 uker da det gikk ca. 1 uke etter 6 ukers eksponering i påvente av aksept for at prosjektet skulle forlenges eller ikke).

Resultatene for parallellene som ble tatt ut etter 7 uker, er rapportert i et eget kapittel i resultatdelen av rapporten, mens resultatene for de øvrige bolter og systemer som ble stående i ytterligere 6 uker (altså 13 uker totalt) er rapportert i et separat kapittel under resultatdelen av rapporten.

8 RESULTATER

8.1 Introduksjon

Før testen ble igangsatt ble alle komponenter inspisert for feil, skader o.l.. Deretter ble det påført definerte skader som definert over, etterfulgt av veiing av hver enkelt komponent. Alle data ble fortløpende notert under hele forsøksperioden.

Følgende er utført:

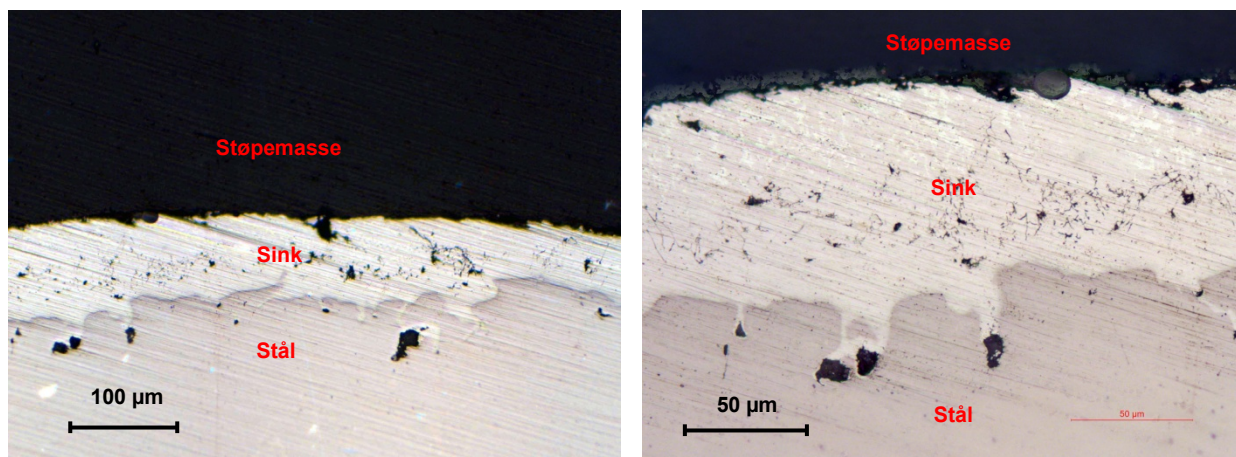
1. Visuell forundersøkelse, digital fotografering og veiing av hver enkelt komponent
2. Måling av tykkelse på sink og pulverlakk
3. Måling av elektrokjemisk potensial på et representativt utvalg av komponenter 1 gang pr. uke.
4. Måling av pH hver/annenhver uke (og eventuell justering dersom avvik mer enn ± 0.5 pH enheter)
5. Visuell etterundersøkelse og digital fotografering rett etter uttak fra elektrolyttkaret.
6. Veiing av enkeltkomponenter og eventuelt estimering av tæring - **ikke relevant, ref. kapittel 8.5**
7. Digital fotografering og beskrivelse av relevante funn (korrosjonsangrepenes lokalisering, omfang, utfellinger osv.).

8.2 Beleggtykkelser

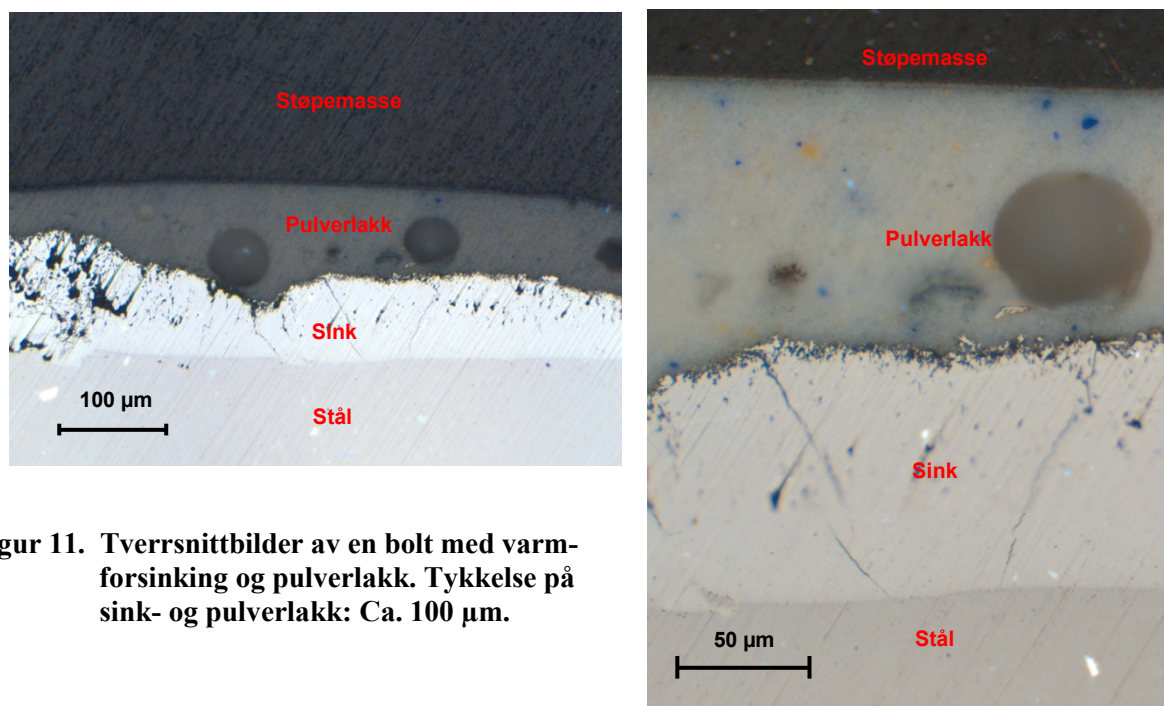
Dokumentasjon av beleggtykkelser ble hovedsakelig utført ved bruk av et kalibrert elcometer hvor de ble foretatt målinger på flere plasser på forskjellig type komponenter. Målte verdier er gitt i Vedlegg 1. Basert på gjennomsnittverdien for alle målinger på skiver, muttere og halvkuler er følgende verdier estimert:

- Gjennomsnittlig tykkelse for VF-belegg: **118 μm**
 - Lavest målte verdi VF-belegg: 64 μm
 - Høyest målte verdi VF-belegg: 167 μm
- Gjennomsnittlig tykkelse for PL-belegg: **106 μm**
 - Laveste målte verdi PL-belegg: 75 μm
 - Høyeste målte verdi PL-belegg: 119 μm

For å kunne få et bilde av vedheft, struktur, fordeling og naturligvis korrekt tykkelse av beleggene, da først og fremst på boltene som vil være den mest kritiske delen av et system, ble det laget ett epoxyinnstøp av en prøve fra en varmforsinket bolt og ett innstøp fra en varmforsinket + pulverlakkbelagt bolt. Prøvene ble slipt og polert og undersøkt i et optisk mikroskop. Bildene er vist i Figur 10 og Figur 11.



Figur 10. Tverrsnittsbilder av en bolt med varmforsinking. Tykkelse på sinkbelegg ca. 100 µm.



Figur 11. Tverrsnittsbilder av en bolt med varm-forsinking og pulverlakk. Tykkelse på sink- og pulverlakk: Ca. 100 µm.

Som det ses av bildene griper både sink- og pulverlakk beleggene godt inn i underlaget og besørger god vedheft i alle overganger. Dette er en viktig forutsetning for levetiden til et beleggssystem. Videre ser man tydelig at pulverlakkbelegget er relativt jevnt i tykkelse mens tykkelsen på sinkbelegget varierer en del, ref. Figur 11. Dette er imidlertid ikke kritisk da tilstøtende områder med sink vil besørge katodisk beskyttelse av stålets overflate på eventuelt blottede områder. Dette gjelder derimot ikke for organiske belegg hvor det er en forutsetning at belegget er uniform, tett og hefter godt til underlaget. Den store forskjellen fra ståloverflater som kun males eller påføres organiske belegg som f.eks. pulverlakk i forhold til komponentene i dette prosjektet med sink under, er at sinkbelegget vil fungere som en offeranode dersom det organiske toppstrøket skulle skades og stålet blottes. En slik prosess vil imidlertid forbruke sink, og det er derfor optimalt å redusere tæringen på sinkbelegget til et minimum ved å påføre et toppstrøk med pulverlakkbelegg samtidig som at det ikke vil være kritisk dersom dette strøket skulle skades.

8.3 Elektrokjemiske potensialer

Det elektrokjemiske potensialet til et metall som er neddykket i en ionisk ledende elektrolytt kan si oss noe om det korroderer eller ikke basert på det man ofte benevner som metallenes elektrokjemiske (galvaniske) spenningsrekke. Videre er det slik at dersom to forskjellige metaller kobles sammen, vil det innstille seg en likevekt og et blandpotensial som ofte forskyves kraftig i retning av det metallet som er minst edelt og dermed korroderer. Siden korrosjon vil generere en strøm mellom disse metallene er det vha elektrokjemiske likninger mulig å beregne hvor mye denne strømmen tilsvarer i form av vekttap. For et gitt areal og et gitt vekttap kan deretter korrosjonshastigheten for den aktuelle overflate estimeres i form av antall mm/år e.l.

I dette prosjektet er flere av komponentene belagt med sink ved at stålgodset senkes ned i en smelte av flytende sink som dermed binder seg metallurgisk til stålets overflate. Sink er typisk et metall som er lite edelt og som dermed vil korrodere (ofre seg) og dernest beskytte stålet når det utsettes for et korrosivt miljø. Det er imidlertid en betingelse at overflaten til et slikt system er godt omsluttet av en ionisk ledende elektrolytt (f.eks. vann med noe salt i) for at sinken kan tæres og dermed beskytte stålet. Det må med andre ord kunne gå en ionisk strøm i elektrolytten mellom sinken og stålet som igjen slutter kretsen ved at de er elektrisk koblet sammen.

Videre er flere av komponentene i dette prosjektet belagt med et ytre organisk belegg, pulverlakk, som en ekstra barriere mot korrosjon. Fordelen med en kombinasjon er naturligvis at pulverlakkbelegget vil forlenge levetiden til systemet siden sinkbelegget vil ligge under dette belegget og ikke forbrukes så lenge pulverlagbelegget er intakt. Når det skades eller brytes ned over tid, vil sinkbelegget gradvis ta over som korrosjonsbeskyttende barriere.

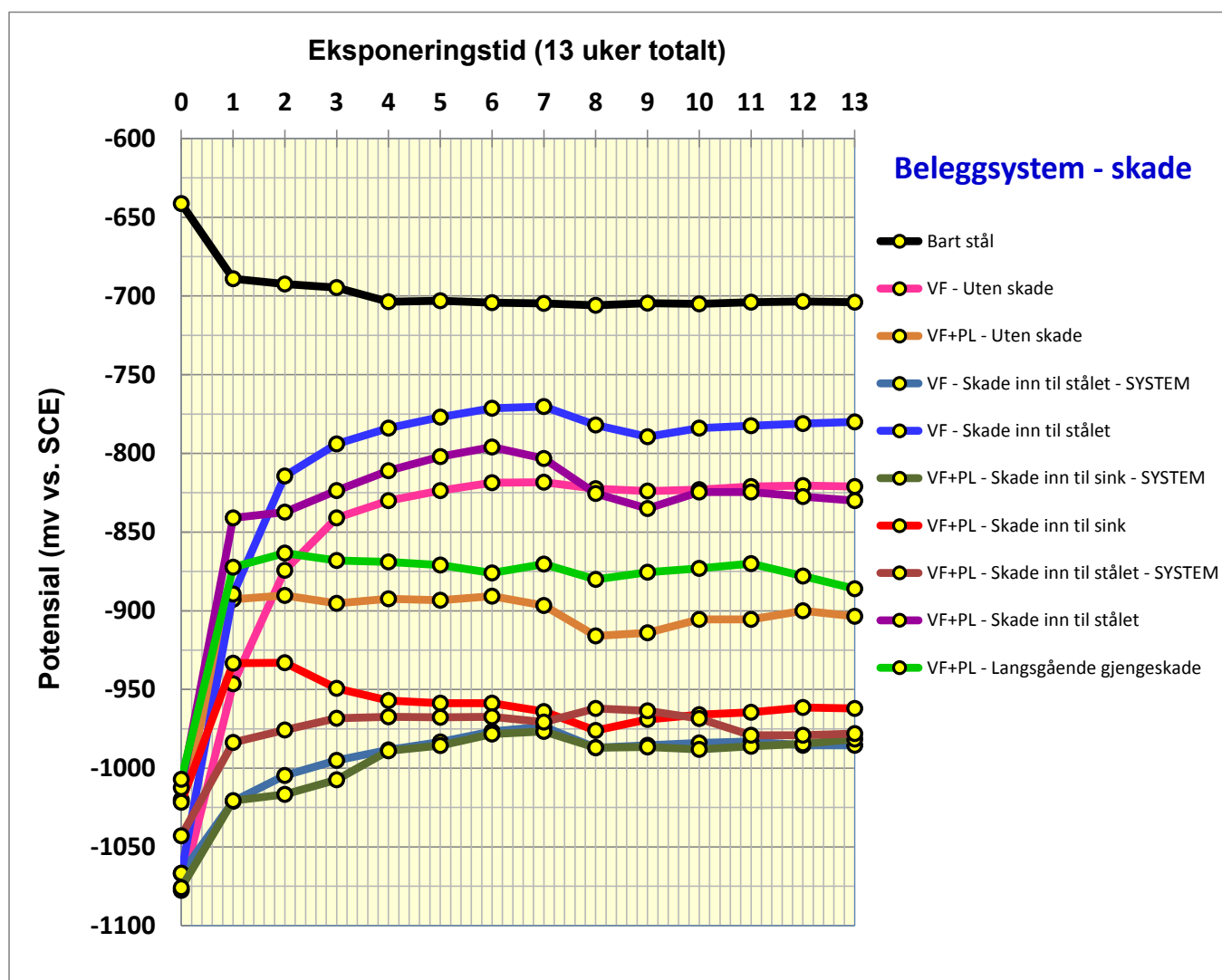
Det har lenge vært diskutert og forsket på hvor gunstig det er å "stenge inn" et aktivt belegg som f.eks. sink ved å legge på organiske toppstrøk. Bakgrunnen for denne diskusjonen er hovedsakelig basert på at det i slike tilfeller vil kunne oppstå **spalter** mellom det organiske belegget og den underliggende overflaten dersom det øverste belegget løsner (flasser) og den korrosive elektrolytten trenger inn under belegget. Det må imidlertid understrekes at spalter først og fremst er kritisk for rustfrie stål kvaliteter med tilstedeværelse av kloridioner i elektrolytten. Inne i spalter på rustfrie systemer vil det raskt etableres et svært aggressivt miljø (bl.a. lav pH), kloridioner vil bryte ned det beskyttende oksidbelegget på metallens overflate og det vil innstilles en masse transport ut og inn av spalten som forverrer situasjonen mer og mer til overflaten "punkterer" og man får det som omtales som groptæring (pitting corrosion).

For spalter på karbonstål er mekanismene noe annerledes enn for rustfrie kvaliteter. Den største forskjellen er at korrosjonsformen er generell (allmenn korrosjon). Strømmen, og dermed mengden metall (ioner) som forsvinner, fordeles på en mye større overflate og korrosjonshastigheten vil dermed sjelden være mye større enn for et område som er fritt eksponert uten spalter. Videre er det slik at overflaten på aktive metaller som karbonstål gradvis vil dekkes med et "rustbelegg" som reduserer korrosjonshastigheten. Dette kan i enkelte tilfeller være så utslagsgivende at en spalt hvor "rustbelegget" ikke vil skylles bort, skraper vekk e.l. faktisk vil ha en lavere korrosjonshastighet totalt sett enn en fritt eksponert overflate som stadig vil vaskes ren og dermed ikke klarer å beskytte seg selv i samme grad som en overflate i en spalt. Mye av hensikten med dette prosjektet er nettopp å klarlegge hva som skjer og hvor kritisk det er at de aktuelle boltene med tilhørende komponenter blir påført skader i **kombinasjon med** spalter i et korrosivt miljø.

For å få en indikasjon på hvor godt eller dårlig en overflate er beskyttet, benyttes en referanseelektrode. Det finnes mange typer, men for dette oppdraget er det benyttet en av de mest vanlige; en såkalt mettet kalomelektrode (SCE). Denne elektroden står plassert i et eget beger med mettet kaliumklorid og er ionisk forbundet med selve testelektrolytten via en plastslange fylt med elektrolytt. Ut av referanseelektroden kommer det en ledning som plasseres i et voltmeter. Deretter kobles det en ledning til den prøven man ønsker å måle potensialet på til den andre inngangen på voltmeteret. Prøveledningen skal alltid stå i

voltmeterets positive terminalhull. Spenningen man nå leser av viser hvor mange mV forskjell det er mellom referanseelektroden og prøven. Denne verdien kan deretter si oss mye om hvor godt eller dårlig prøven er beskyttet mot korrosjon.

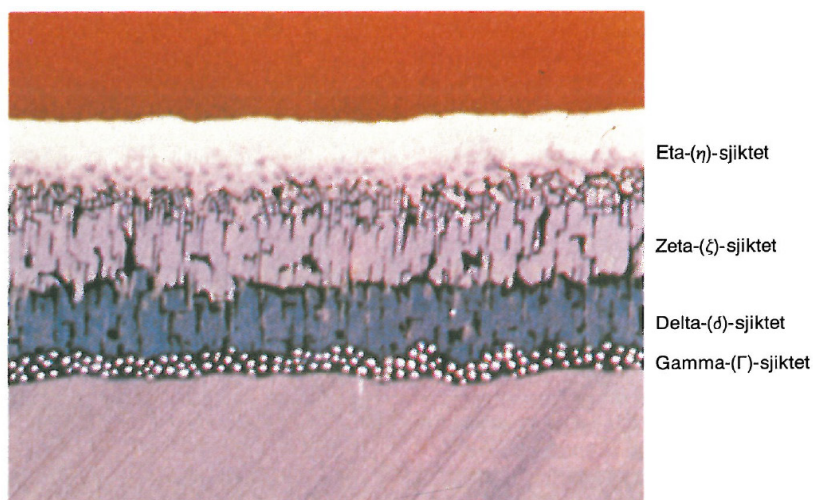
I dette oppdraget ble det elektrokjemiske potensialet for 9 sammenstilte systemer, 21 enkeltbolter og noen løse halvkuler, skiver og muttere med forskjellige belegg og skader målt ukentlig. Alle potensialer og endringer over tid framgår av tabellene i Vedlegg 3. og er grafisk illustrert i Figur 12. Kurvene er basert på gjennomsnittsverdien av 3 parallelle prøver for de første 7 ukene og deretter to paralleller for de neste 6 ukene. Dette fordi det ifm et kundebesøk ved SINTEF 2011-10-14 besluttet at den parallellen med høyest elektrokjemisk potensial skulle tas ut for etterundersøkelser etter 7 uker.



Figur 12. Elektrokjemiske potensialer gjennom 13 uker.

Som det framgår av kurvene stiger potensialet på de fleste komponenter og systemer som er påført sink og evt. et utenpåliggende pulverlakkbelegg. Dette er ikke uvanlig, men man ser ikke en helt klar årsak til at potensialet varierer betydelig fra case til case (1 case = 3 paralleller, ref. Tabell 1).

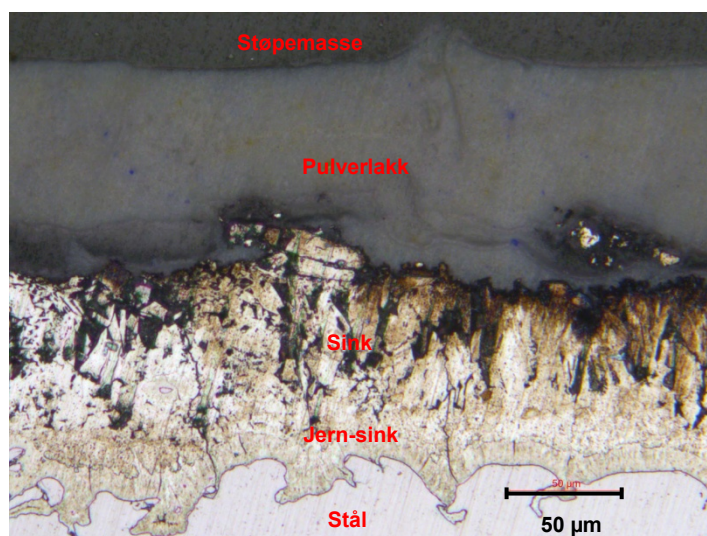
Det viktigste i denne sammenhengen er imidlertid at man ikke ser det som bekymringsfullt at potensialet for flere caser ligger rundt -800 mV SCE, altså ikke mer enn ca. 100 mV mer negativt enn for bart stål som korroderer fritt. Årsaken til dette ligger høyst sannsynlig i at potensialet for et varmforsinket system ikke kan sammenliknes med et system hvor man har montert en ren sink offeranode på en ståloverflate. For sistnevnte gjelder enkle prinsipper om at sinken er mindre edel enn stål (jern), korroderer med en mye høyere strøm enn stålet og følgelig trekker potensialet til stålet ned mot sinkens naturlige potensial på ca. -1030 mV SCE. For en varmforsinket jernoverflate derimot vil det ifm påføringen av sinken dannes en jern-sink legering på overflaten (metallurgisk binding). Oppbyggingen av denne er vist i Figur 13 under. Som det ses av figuren vil det altså finnes jern levert med sink gjennom hele det varmforsinkede belegget. Man ser også at konsentrasjonen av jern stiger dess dypere ned i belegget man kommer. Det følger derfor at potensialet vil stige og nærme seg potensialet for jern med tiden. Det er imidlertid viktig å poengtere at dette ikke er ensbetydende med at stålgodset vil korrodere mer og mer. Det skjer nemlig ikke før all sinken er korrodert bort, noe som dessuten lett vil kunne observeres visuelt (rustfarge) i tillegg til at potensialet på det tidspunktet vil bli identisk med potensialet for boltene uten noen form for overflatebehandling (komp. 1-3).



Bilde 14: Skjematisk tverrsnitt av zinkbeleggets oppbygning ved varmforsinking. Etasjiktet med 0,03% Fe, Zetasjiktet med 5,8—6,7% Fe, Deltasjiktet med 7—11,5% Fe og gammasjiktet med 21—28% Fe.

**Figur 13. Oppbygging av et jern-sink belegg på overflaten av en varmforsinket ståloverflate.
(hentet fra "Varmforszinking", Rune Thomas, 1989)**

Etter måling av beleggetykkelse på polerte prøvesnitt fra bolter med sink og pulverlakk, ble snittet med både sink og pulverlakk etses i ca. 10 sekunder i en organisk syre (eddiksyre). Denne syren angriper sinken, men ikke jernet i stålet. Man får da tydelig fram at en varmforsinket jernoverflate ikke består av ren sink, men en jern-sink legering med økende innhold av jern inn mot stålets overflate, ref. Figur 14. Som det ses av bildet avtar tæringen, dvs. sink som etses bort, dess lenger inn i VF-belegget man kommer. Helt inn mot stålets overflate er tæringen minimal. Med utgangspunkt i disse observasjonene og forklaringen over anses det derfor som ufarlig at man måler relativt høye elektrokjemiske potensialer for VF-belagte komponenter i dette prosjektet.



Figur 14. Etset prøvesnitt fra en bolt med sink og pulverlakk.

8.4 pH-målinger

Utgangspunktet for hele testen var en $\text{pH} = 8.2 \pm 0.5$. pH ble målt med jevne mellomrom gjennom hele forsøksperioden, typisk ukentlig eller annenhver uke. Det var ikke nødvendig med pH-justering av elektrolytten i løpet av testperioden på 13 uker. Målte pH-verdier er gitt i Tabell 4.

Tabell 4. Målte pH-verdier gjennom forsøksperioden.

Dato	Testens varighet	pH	Justering av pH
5/9-11	Start	8.20	Nei
26/9-11	3 uker	8.33	Nei
10/10-11	5 uker	8.47	Nei
17/10-11	6 uker	8.39	Nei
31/10-11	8 uker	8.32	Nei
14/11-11	10 uker	8.31	Nei
21/11-11	11 uker	8.07	Nei
28/11-11	12 uker	8.28	Nei
5/12-11	13 uker	8.29	Nei

8.5 Prøveuttak og rengjøring

Etter endt eksponeringstid på hhv. 7 og 13 uker, ble prøver og sammenstilte systemer demontert for nærmere observasjon. Relevante funn og observasjoner digitalt avbildet. Planen var deretter å rengjøre og tørke komponentene for veiing slik at det kunne estimeres hvor mye som hadde korrodert vekk. Det viste seg imidlertid at dette ikke var en rett fram sak av årsaker som diskutert under.

Som kjent felles det ut kalk på jernholdige overflater som er katodisk beskyttet, dvs. polariseres negativt ned til ca. -1000 mV SCE f.eks. ved kobling med sink, i sjøvann med kalsium tilstede. Da varmforsinking fungerer som en offeranode og bidrar til akkurat dette, ble det følgelig felt ut en del kalk på blottede ståloverflater hvor det var påført skader i belegget helt inn til godsets ståloverflate. Denne kalken lar seg enkelt vaske vekk med syre (f.eks. saltsyre med inhibitor, eddiksyre e.l.). Men, det som imidlertid er svært vanskelig er å fjerne sinkoksider som avsettes på sinkoverflater, dvs. varmforsinkede (VF) komponenter og VF + pulverlakkbelagte komponenter med skader inn til sinkbelegget. Dersom det benyttes syrevasking i disse tilfellene, vil også sinken tæres bort; noe som bidrar til stor usikkerhet mht. beregning av reel tæringshastighet av sinken basert på vekttalesmålinger. Det er også gjort forsøk på å rengjøre sinkens overflate ved dypping i 10 % ammoniumklorid ved 70 °C i 2-5 min i hht. ASTM G1. Dette var heller ingen måte å gjøre dette på da selve sinkbelegget også ble angrepet i denne løsningen.

Basert på dette faktum at man har lite eller ingen kontroll på hva som er reell korrosjon og hva som er etset bort ifm. fjerning av sinkoksid på galvaniserte overflater, ble det konkludert med at estimering av tæringshastighet og dernest levetid basert på veiing av komponenter ikke var riktig. Man fant det derfor mest riktig å beskrive visuelt hva som har funnet sted for de forskjellige caser ved bruk av digitale bilder med tilhørende forklaringer. Og, som definert over, var hovedfokus for dette prosjektet å avdekke om skader i kombinasjon med spalter vil føre til lokale korrosjonsangrep e.l. som på sikt vil kunne redusere levetiden eller påvirke et systems integritet.

Resultatene fra disse observasjonene er presentert i det følgende.

8.6 Visuelle observasjoner

8.6.1 Observasjoner etter 7 uker

Som beskrevet over ble det i samråd med oppdragsgiver besluttet å avslutte testen for de komponentparalleller med det høyeste elektrokjemiske potensialet over tid etter 7 uker. Dette gjaldt 10 av 30 prøver (10 sett à 3 paralleller). Hensikten med å avslutte testen for disse parallellene var å se hvor langt eventuelle korrosjonsangrep var kommet.

Nedenfor er det presentert en del bilder av komponenter og systemer før og etter 7 ukers eksponering. Som det ses av bildene er det ingen tegn til korrosjon av komponentene, med unntak av referansen av ubehandlet stål, enten det er snakk om skader inn til sinkbelegget eller skader helt inn til stålgodset. Dette viser at sinkbelegget fungerer utmerket som "offerbelegg" og at spalter i kombinasjon med skader heller ikke medfører problemer. Den beskyttende strømmen som genereres når sinkbelegget korroderer, polariserer og beskytter stålet uansett, både i spalter og på åpnet flater, siden belegget er jevnt fordelt over hele overflaten og følgelig lokalisert i umiddelbar nærhet til en skade. Dette i motsetning til systemer som beskyttes katodisk ved hjelp av offeranoder som ofte er lokalisert et stykke unna den overflaten som skal beskyttes. Dette kan gi opphav til korrosjon, da spesielt i spalter, for områder som havner i det som benevnes som "strømskygger". Den kjemiske sammensetning av miljøet inne i spalter som ikke "ser" anoden vil endres og dermed løfte potensialet så høyt at korrosjon oppstår. Med utgangspunkt i bildene under og de observasjoner som er gjort gjennom hele forsøksperioden kan det konkluderes med at de testede komponenter og sammenstilte systemer med skader og spalter ikke har ført til korrosjon av stålgodset.

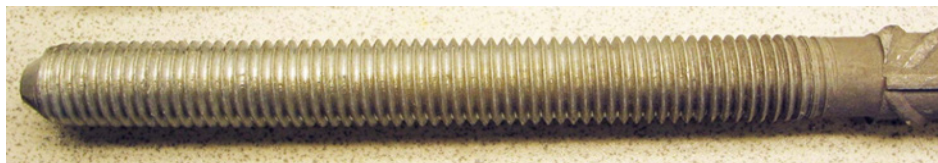


Før test

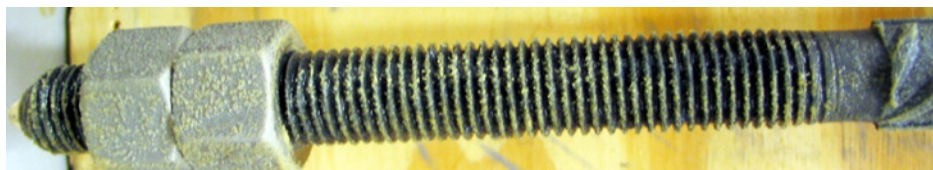


Etter 7 uker

Figur 15. Foto av bart stål bolt før og etter 7 ukers eksponering.

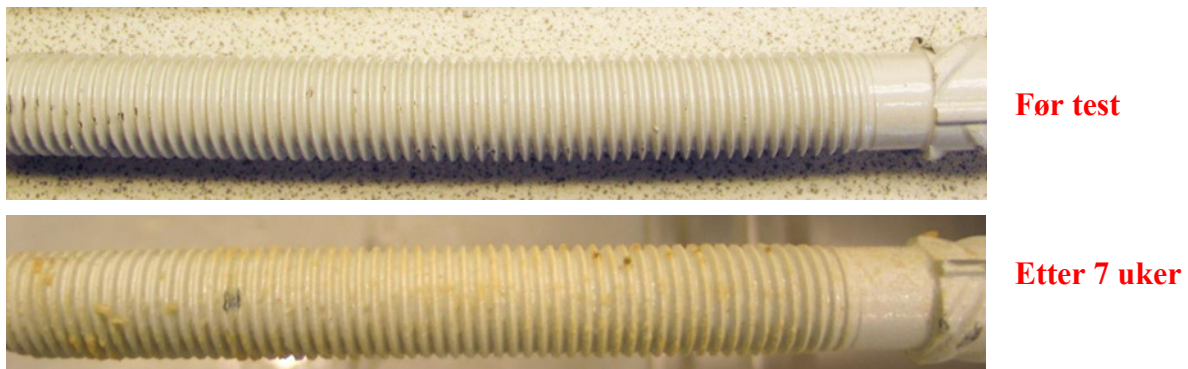


Før test



Etter 7 uker

Figur 16. Foto av varmforsinket bolt uten skade før og etter 7 ukers eksponering.



Figur 17. Foto av bolt med varmforsinking + pulverlakk uten skade før og etter 7 ukers eksponering.

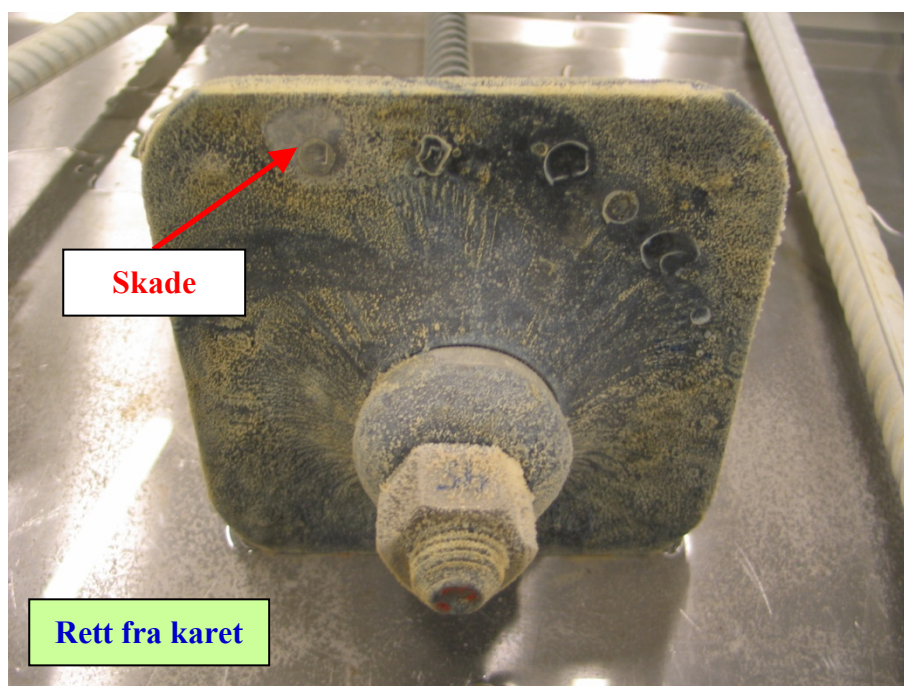


Figur 18. Foto av bolter som representerer alle skadescenarier etter 7 ukers eksponering.

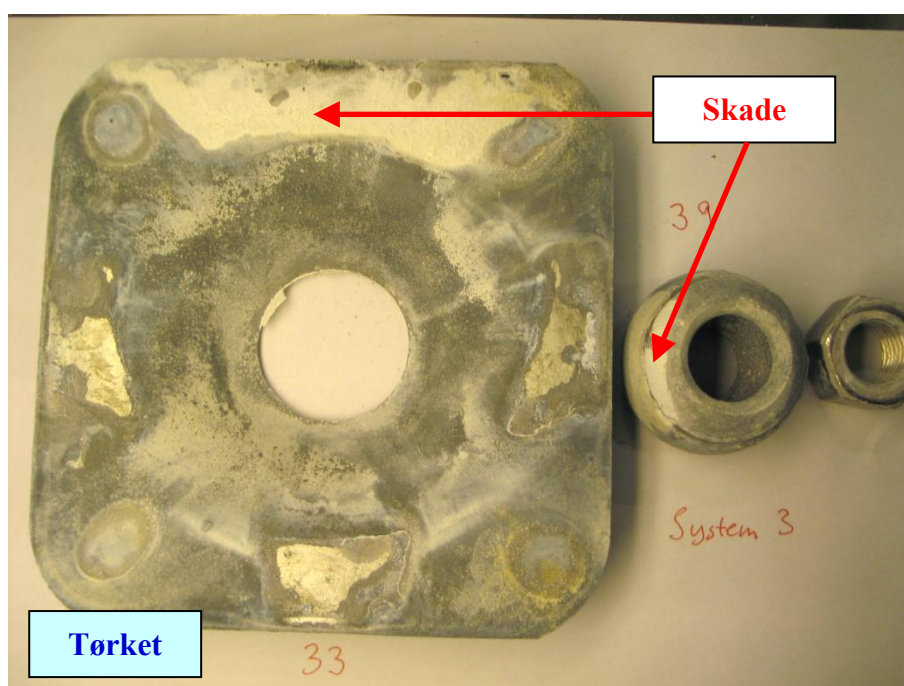
Ingen tegn til korrosjon i skadene for noen av boltene.

- Øverst: VF med skade inn til stålet (Boltcase 2)
- Nest øverst: VF+PL med skade inn til stålet (Boltcase 2)
- Nest nederst: VF+PL med skade inn til sinkbelegget (Boltcase 3)
- Nederst: VF+PL med langsgående skade på gjengene inn til stålet (Boltcase 4)

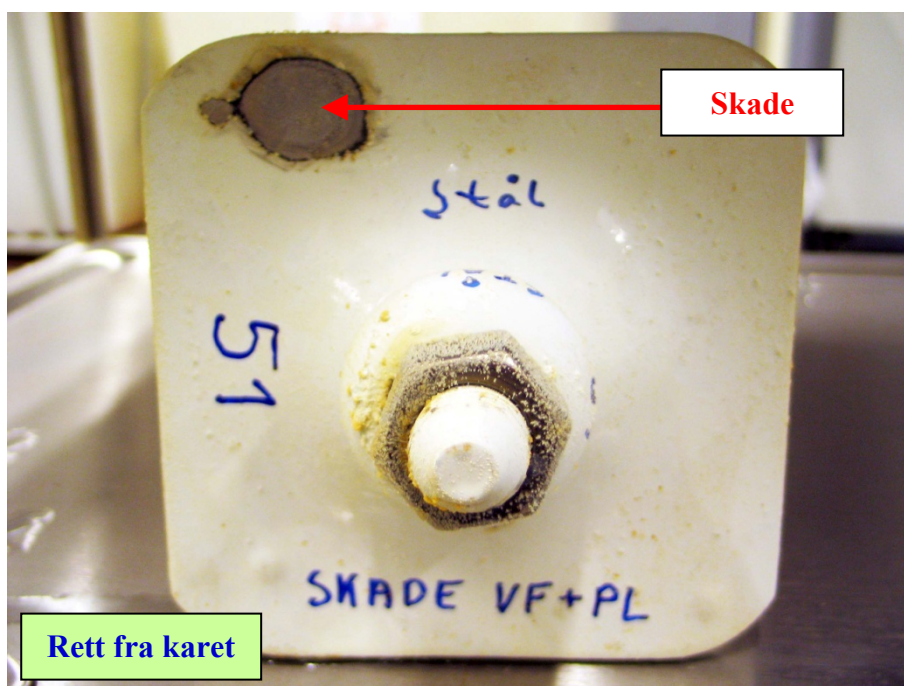
MERK: Brunfarge skyldes ikke rusting, men kalk og oksider i tillegg til at rustprodukter fra bart stål boltene (som naturligvis ruster) har blitt avsatt på de øvrige komponenter i karet.



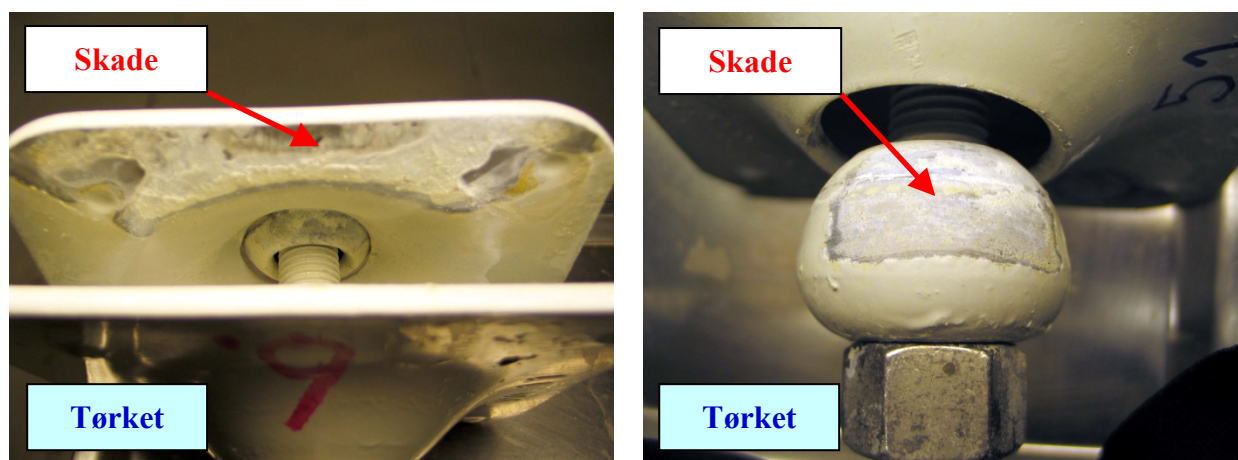
Figur 19. Foto av system nr. 3 med **VF og skader inn til stålet** (Case 5) etter 7 ukers eksponering. Påført skade er lokalisert oppe til venstre (ca. Ø20 mm). Mutter er syrefast.



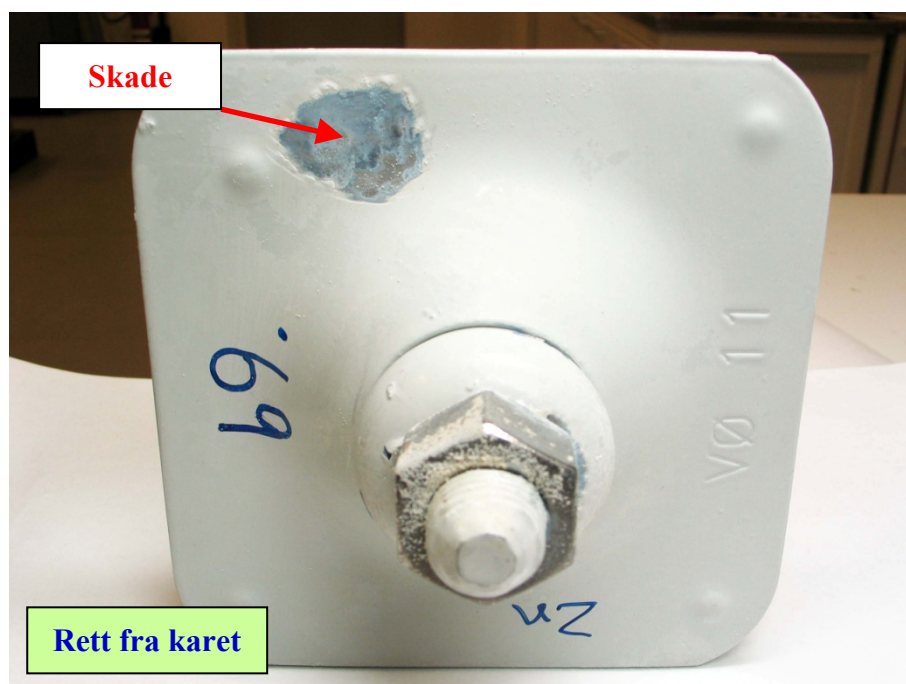
Figur 20. Foto av komponentene i system nr. 3 med **VF og skader inn til stålet** (Case 5) etter 7 ukers eksponering. Påførte skader er dekket med et hvitt oksid, men ingen tegn til korrosjon. Mutter er syrefast.



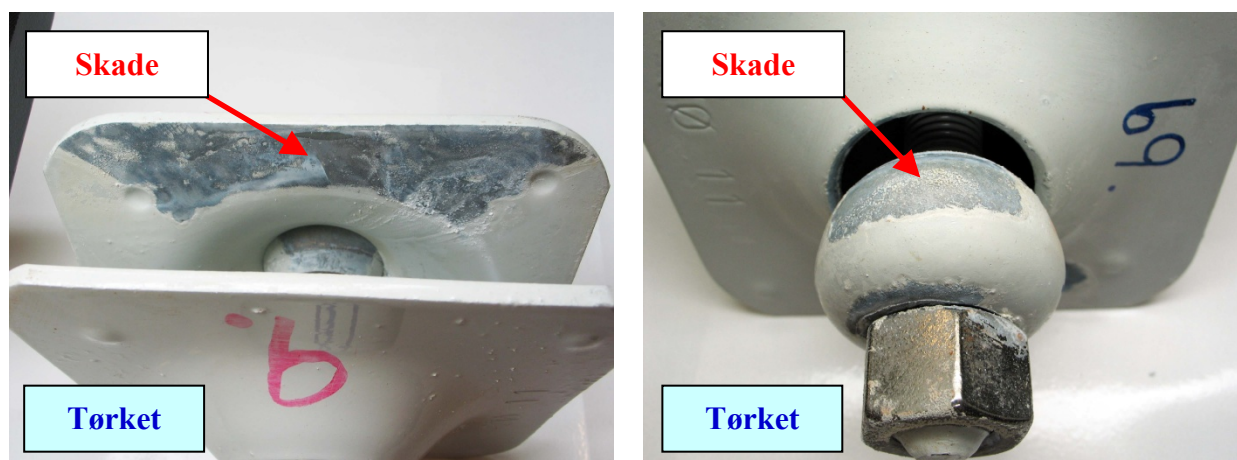
Figur 21. Foto av system nr. 6 med **VF+PL og skader inn til stålet** (Case 5) etter 7 ukers eksponering. Ingen korrosjon på skadet område. Mutter er syrefast.



Figur 22. Foto av komponentene i system nr. 6 med **VF+PL og skader inn til stålet** (Case 5) etter 7 ukers eksponering. Ingen korrosjon på skadede områder. Mutter er syrefast.



Figur 23. Foto av system nr. 9 med **VF+PL og skader inn til sinkbelegget** (Case 6) etter 7 ukers eksponering. Ingen korrosjon på skadede områder. Mutter er syrefast.



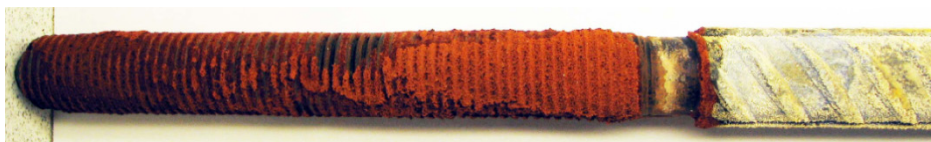
Figur 24. Foto av komponentene i system nr. 9 med **VF+PL og skader inn til sinkbelegget** (Case 6) etter 7 ukers eksponering. Ingen korrosjon på skadede områder. Mutter er syrefast.

8.6.2 Observasjoner etter 13 uker

Nedenfor er det presentert bilder av resterende komponenter og systemer som har vært eksponert i ca. 13 uker, dvs. ca. 2200 timer. Som det framgår av bildene er det marginale forskjeller på disse og komponenter/systemer som har vært eksponert i 7 uker (ca. 1200 timer), ref. kapittel 8.6.1. Som det ble enighet med oppdragsgiver om pr. telefon 2011-12-06 så man ingen hensikt med å videreføre denne testen med gjeldende betingelser. Det vil imidlertid vurderes om slike komponenter og systemkombinasjoner med simulerte skader heller skal eksponeres under virkelige forhold m/ bl.a. kondensvann i f.eks. en tunnel e.l., ref. kapittel 9.



Før test

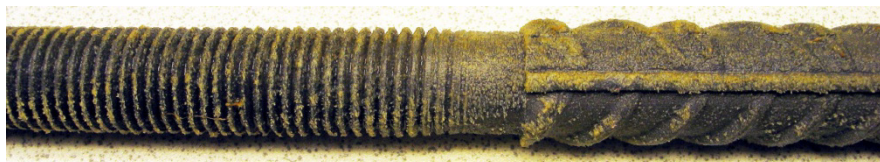


Etter 13 uker

Figur 25. Foto av fritthengende bart stål bolt før og etter 13 ukers eksponering.



Før test

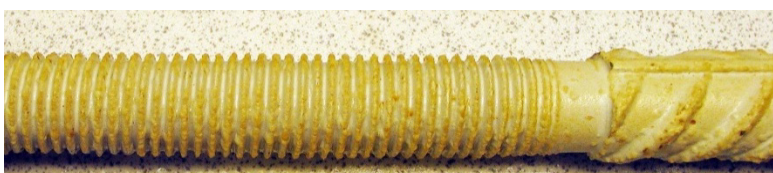


Etter 13 uker

Figur 26. Foto av fritthengende bolt med varmforsinking (VF) uten skade før og etter 13 ukers eksponering.



Før test



Etter 13 uker

Figur 27. Foto av fritthengende bolt med VF + pulverlakk (PL) uten skade før og etter 13 ukers eksponering.

Før test



Etter
13 uker



Figur 28. Foto av fritthengende skive med varmforsinking uten skade før og etter 13 ukers eksponering. Eksponert komponent er rengjort med en bløt klut for å fjerne misfarging og løse avsetninger.



Figur 29. Foto av fritthengende halvkule med varmforsinking uten skade før og etter 13 ukers eksponering. Eksponert komponent er rengjort med en bløt klut for å fjerne misfarging og løse avsetninger.



Figur 30. Foto av fritthengende mutter med varmforsinking uten skade før og etter 13 ukers eksponering. Eksponert komponent er rengjort med en bløt klut for å fjerne misfarging og løse avsetninger

Før test



Etter
13 uker



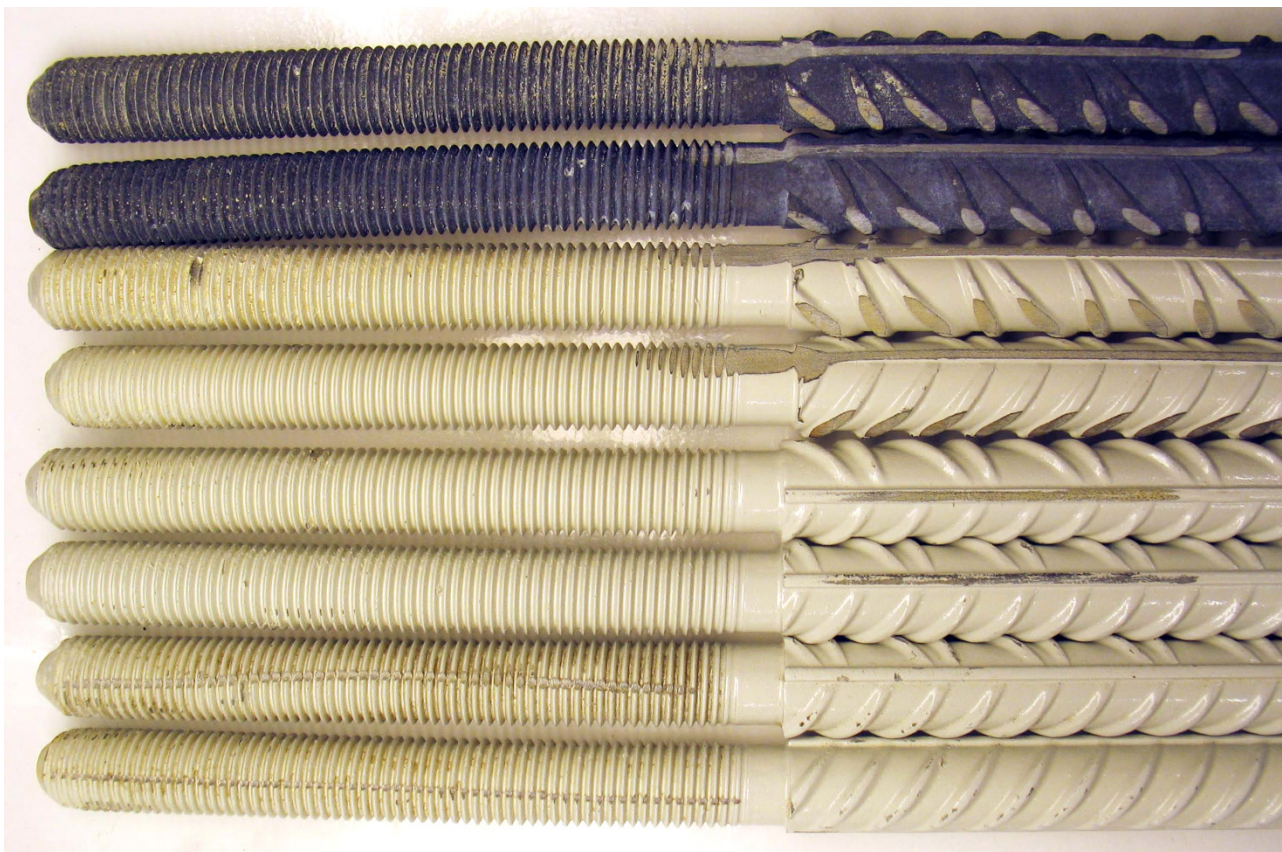
Figur 31. Foto av fritthengende skive med VF+PL uten skade før og etter 13 ukers eksponering. Eksponert komponent er rengjort med en bløt klut for å fjerne misfarging og løse avsetninger



Figur 32. Foto av fritthengende halvkule med VF+PL uten skade før og etter 13 ukers eksponering. Eksponert komponent er rengjort med en bløt klut for å fjerne misfarging og løse avsetninger.



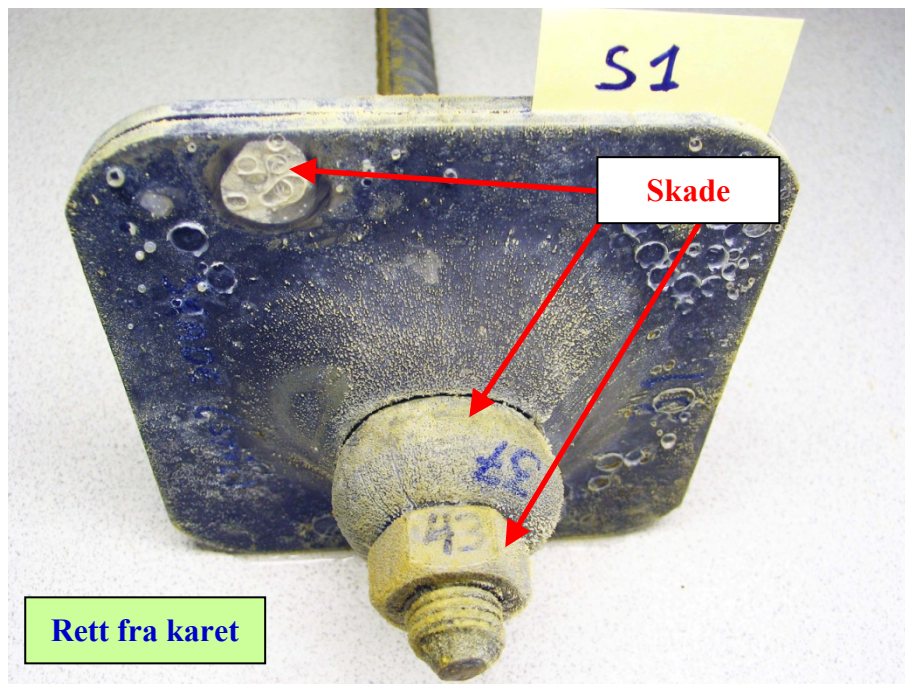
Figur 33. Foto av fritthengende mutter med VF+PL uten skade før og etter 13 ukers eksponering. Eksponert komponent er rengjort med en bløt klut for å fjerne misfarging og løse avsetninger



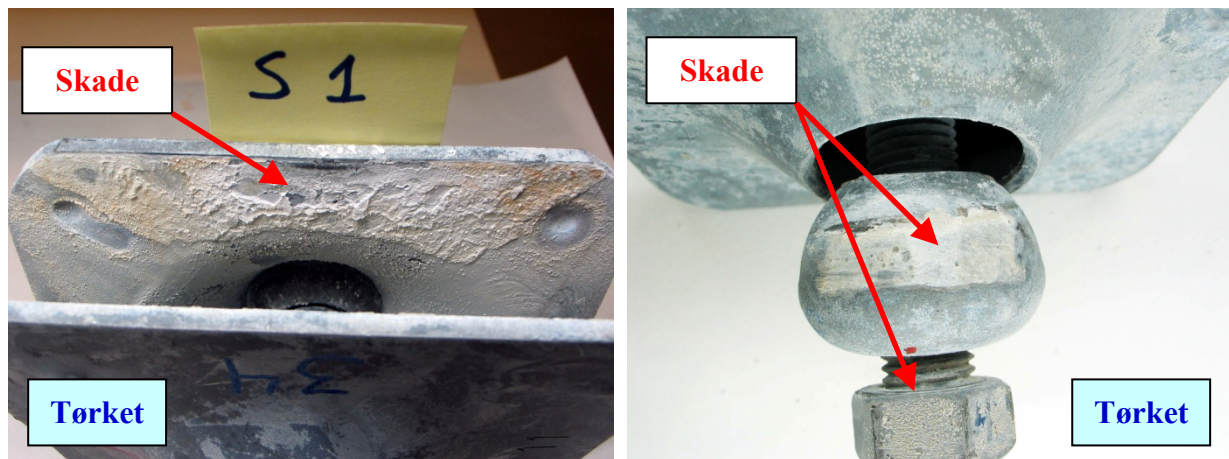
Figur 34. Foto av bolter som representerer alle skadescenarier etter 13 ukers eksponering. Boltene er forsiktig rengjort med en bløt klut for å vaske bort misfarging og løse avsetninger. Ingen tegn til korrosjon i skadene for noen av boltene.

Øverst:	VF med skade inn til stålet (Boltcase 2)
Nest øverst:	VF+PL med skade inn til stålet (Boltcase 2)
Nest nederst:	VF+PL med skade inn til sinkbelegget (Boltcase 3)
Nederst:	VF+PL med langsgående skade på gjengene inn til stålet (Boltcase 4)

MERK: Brunfarge skyldes ikke rusting, men kalk og oksider i tillegg til at rustprodukter fra bart stål boltene (som naturligvis ruster) har avsatt seg på de øvrige komponenter i karet.

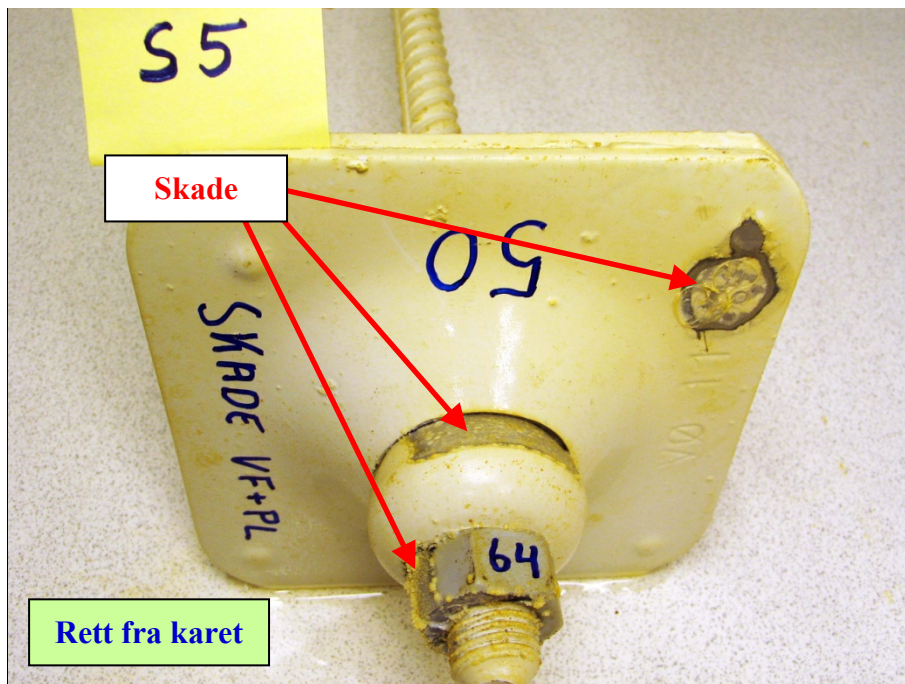


Figur 35. Foto av system nr. 1 med **VF og skader inn til stålet** (Case 5) etter 13 ukers eksponering. Påført skade er anvist med røde piler. Mutter er også varmforsinket med skade.

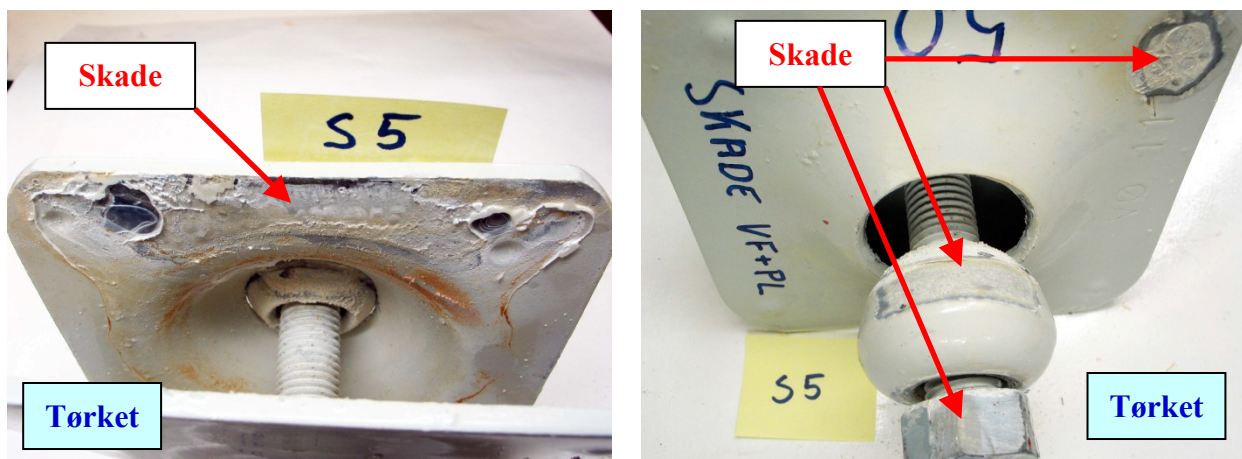


Figur 36. Foto av komponentene i system nr. 1 med **VF og skader inn til stålet** (Case 5) etter 13 ukers eksponering. Påførte skader er dekket med et hvitt oksid, men ingen tegn til korrosjon. Mutter er også varmforsinket med skade.

MERK: Brunfarge på venstre bilde er ikke rust, men akkumulert misfarging pga. korrosjon på bart stål bolt som var plassert i samme elektrolyttkar.

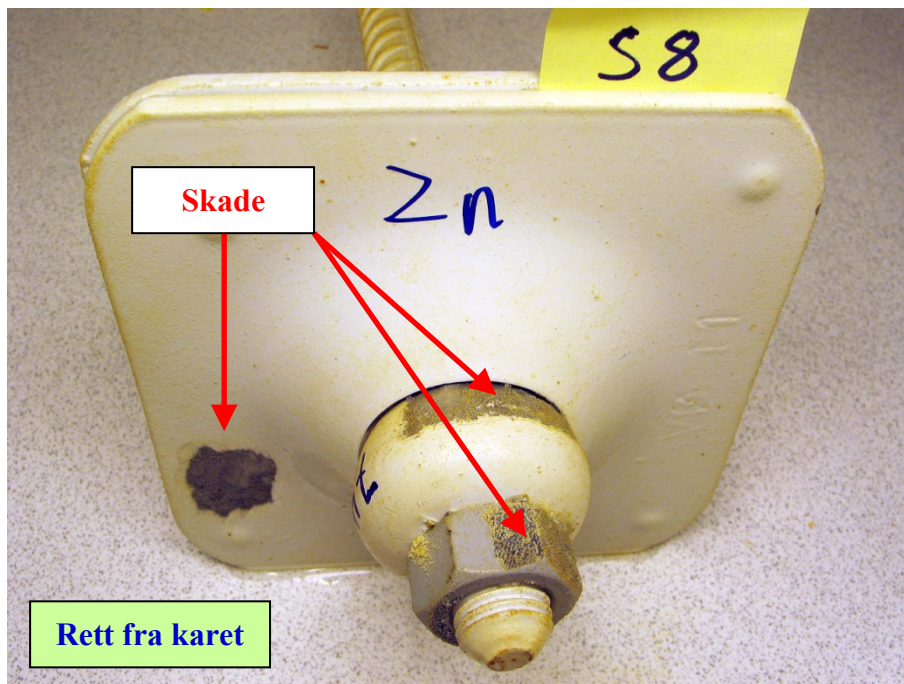


Figur 37. Foto av system nr. 5 med **VF+PL** og **skader inn til stålet** (Case 5) etter 13 ukers eksponering. Ingen korrosjon på skadet område. Mutter er også VF+PL med skade inn til stålet.

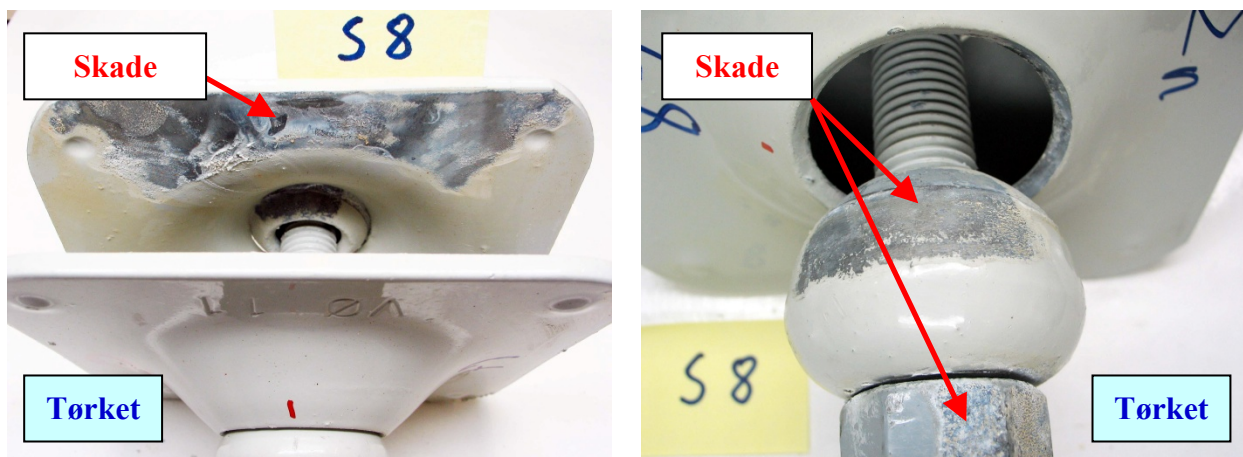


Figur 38. Foto av komponentene i system nr. 5 med **VF+PL** og **skader inn til stålet** (Case 5) etter 13 ukers eksponering. Ingen korrosjon på skadede områder. Mutter er også VF+PL med skade inn til stålet.

NB! Brunfarge på venstre bilde er ikke rust, men akkumulert misfarging pga. korrosjon på bart stål bolt som var plassert i samme elektrolyttkar. Videre er hvite folder i skadet område ikke flassing av pulverlakk, men karbonat/oksidutfellinger.



Figur 39. Foto av system nr. 8 med **VF+PL og skader inn til sinken** (Case 6) etter 13 ukers eksponering. Ingen korrosjon på skadede områder. Mutter er også VF+PL med skade inn til sinkbelegget.



Figur 40. Foto av komponentene i system nr. 8 med **VF+PL og skader inn til sinkbelegget** (Case 6) etter 13 ukers eksponering. Ingen korrosjon på skadede områder. Mutter er også VF+PL med skade inn til sinkbelegget.

9 KONKLUSJON

Det er etter en 13 uker lang test med eksponering av bergbolter med tilhørende komponenter med både varmforsinking og varmforsinking + pulverlakk med forskjellige typer skader i kombinasjon med spalter i simulert sjøvann ved romtemperatur ikke funnet tegn til korrosjonsangrep. Sinken i varmforsinkingen er uten tvil et særdeles godt valg for å hindre at slike systemer korroderer under fuktige og saltholdige forhold. Det er dessuten helt klart at sinken fungerer utmerket som en offeranode dersom et nærliggende område skulle skades helt inn til stålet/grunnmaterialet og eventuelt befinne seg i en spalt. Spalter kan enten oppstå mellom fjellet som skiven ligger an mot etter montering eller mellom de enkelte komponenter i et slikt boltesystem (mutter/halvkule/skive/bolt).

Denne korrosjonstesten er utført i et luftet simulert sjøvann ved $\text{pH} \approx 8.5$. For offshore-anvendelser regner man typisk med en tærings hastighet på ca. $10 \mu\text{m}/\text{år}$ for varmforsinkede overflater som eksponeres i kaldt naturlig sjøvann med et oksygeninnhold på typisk 8 ppm. For det aktuelle sinkbelegget på disse komponentene med en tykkelse på ca. $100 \mu\text{m}$ vil dette tilsvare ca. 10 års levetid ved konstant neddykking i oksygenmettet sjøvann. Med et pulverlakk toppstrøk i tillegg vil imidlertid levetiden forlenges ytterligere.

Forslag til videre arbeid:

SINTEF har i en email til oppdragsgiver (v/ Are Håvard Høien) av 2011-11-25 presentert noen tanker om en eventuell videreføring av dette prosjektet:

Testing av nye boltesystemer i kondensvann med samme type skader anses som det mest aktuelle alternativet da kondensvann under visse betingelser (friskt og oksygenmettet) kan medføre større korrosjonshastigheter på varmforsinkede overflater enn sjøvann. Om en slik test vil resultere i betydelig større korrosjonshastigheter og angrep på grunnmaterialet enn det som er funnet i denne testen, er imidlertid vanskelig å si noe sikkert om. Videre vil det være helt avgjørende at kjemisk sammensetning, pH, temperatur osv. simuleres identisk med virkelige forhold dersom en ny test skal utføres på et laboratorium.

Det andre alternativet er at det monteres bolter og komponenter med skader som påført i denne testen som plasseres i en tunell e.l. hvor man erfaringsvis har observert korrosjonsproblemer fra tidligere installasjoner. SINTEF kan i så fall være behjelpelige både med personell og utstyr dersom oppdragsgiver skulle velge å gjennomføre en slik felttest.

VEDLEGG 1

Dokumentasjon av beleggtykkelser.

Beleggtykkelser ± 3 µm

Måleutstyr: Kalibrert elcometer

Komponent	Punkt	Tykkelse av VF+PL-belegg (µm)	Anm.
Bolt m/VF+PL	1	283	-
"	2	259	-
"	3	300	-
"	4	317	-
"	5	264	-
Mutter m/ VF+PL	11	196	-
"	12	158	-
"	13	181	-
Halvkule m/ VF+PL	14	253	-
"	15	207	-
Skive m/ VF+PL	1	205	¹⁾
"	2	216	¹⁾
"	3	180	¹⁾
"	4	186	¹⁾
"	5	180	¹⁾
"	6	236	²⁾
"	7	211	²⁾
"	8	206	²⁾
"	9	208	²⁾
"	10	192	²⁾

¹⁾ Overside

²⁾ Underside

Gjennomsnitt

VF+PL

Komponent	Gjennomsnittlig tykkelse av VF+PL-belegg (µm)
Bolt m/ VF+PL	285
Mutter m/ VF+PL	178
Halvkule m/ VF+PL	230
Skive m/ VF+PL	202
Totalsnitt VF+PL-belegg	224 µm

Komponent	Punkt	Tykkelse av VF-belegg (µm)	Anm.
Bolt m/VF	1	145	-
"	2	197	-
"	3	162	-
"	4	178	-
"	5	154	-
Mutter m/ VF	11	66,1	-
"	12	66	-
"	13	61,1	-
Halvkule m/ VF	14	143	-
"	15	167	-
Skive m/ VF	1	80,4	¹⁾
"	2	73,8	¹⁾
"	3	81,1	¹⁾
"	4	77,3	¹⁾
"	5	73	¹⁾
"	6	91,5	²⁾
"	7	88,5	²⁾
"	8	88,4	²⁾
"	9	89,5	²⁾
"	10	91,3	²⁾

¹⁾ Overside

²⁾ Underside

Gjennomsnitt

VF

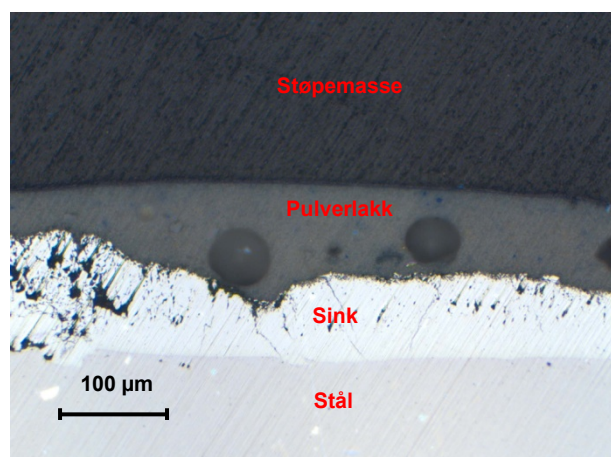
Komponent	Gjennomsnittlig tykkelse av VF-belegg (µm)
Bolt m/ VF	167
Mutter m/ VF	64
Halvkule m/ VF	155
Skive m/ VF	83
Totalsnitt VF-belegg	118 µm

Estimert tykkelse av pulverlakkbelegg

(snitt VF+PL) - (snitt VF)

(PL)

Komponent	Estimert tykkelse av PL-belegg (µm)
Bolt m/ VF+PL	117
Mutter m/ VF+PL	114
Halvkule m/ VF+PL	75
Skive m/ VF+PL	119
Totalsnitt PL-belegg	106 µm



VEDLEGG 2

Systemoppsett

SYSTEMOPPSETT med tag-nummer på alle komponenter. Tiltrekkingsmoment = 125 Nm:

SYSTEM	Case	Tag nr.	Komponent	Tilstand	Skade
1	5	22	BOLT	VF	Ingen
		46	MUTTER	VF	Ingen
		40	HALVKULE	VF	Ingen
		34	SKIVE	VF	Ingen
		31	SKIVE	VF	Skade inn til stålet
		37	HALVKULE	VF	Skade inn til stålet
		43	MUTTER	VF	Skade inn til stålet
2	5	23	BOLT	VF	Ingen
		47	MUTTER	VF	Ingen
		41	HALVKULE	VF	Ingen
		35	SKIVE	VF	Ingen
		32	SKIVE	VF	Skade inn til stålet
		38	HALVKULE	VF	Skade inn til stålet
		44	MUTTER	VF	Skade inn til stålet
3	5	24	BOLT	VF	Ingen
		48	MUTTER	VF	Ingen
		42	HALVKULE	VF	Ingen
		36	SKIVE	VF	Ingen
		33	SKIVE	VF	Skade inn til stålet
		39	HALVKULE	VF	Skade inn til stålet
		45	MUTTER	Syrefast	Ingen

SYSTEM	Case	Tag nr.	Komponent	Tilstand	Skade
4	5	25	BOLT	VF/PL	Ingen
		61	MUTTER	VF	Ingen
		55	HALVKULE	VF/PL	Ingen
		52	SKIVE	VF/PL	Ingen
		49	SKIVE	VF/PL	Skade inn til stålet
		56	HALVKULE	VF/PL	Skade inn til stålet
		62	MUTTER	VF	Skade inn til stålet
5	5	26	BOLT	VF/PL	Ingen
		63	MUTTER	VF/PL	Ingen
		57	HALVKULE	VF/PL	Ingen
		53	SKIVE	VF/PL	Ingen
		50	SKIVE	VF/PL	Skade inn til stålet
		58	HALVKULE	VF/PL	Skade inn til stålet
		64	MUTTER	VF/PL	Skade inn til stålet
6	5	27	BOLT	VF/PL	Ingen
		65	MUTTER	Syrefast	Ingen
		59	HALVKULE	VF/PL	Ingen
		54	SKIVE	VF/PL	Ingen
		51	SKIVE	VF/PL	Skade inn til stålet
		60	HALVKULE	VF/PL	Skade inn til stålet
		66	MUTTER	Syrefast	Ingen

SYSTEM	Case	Tag nr.	Komponent	Tilstand	Skade
7	6	28	BOLT	VF/PL	Ingen
		79	MUTTER	VF	Ingen
		76	HALVKULE	VF/PL	Ingen
		70	SKIVE	VF/PL	Ingen
		67	SKIVE	VF/PL	Skade inn til Zn-belegg
		73	HALVKULE	VF/PL	Skade inn til Zn-belegg
		80	MUTTER	VF	Ingen
8	6	29	BOLT	VF/PL	Ingen
		82	MUTTER	VF/PL	Ingen
		77	HALVKULE	VF/PL	Ingen
		71	SKIVE	VF/PL	Ingen
		68	SKIVE	VF/PL	Skade inn til Zn-belegg
		74	HALVKULE	VF/PL	Skade inn til Zn-belegg
		81	MUTTER	VF/PL	Skade inn til Zn-belegg
9	6	30	BOLT	VF/PL	Ingen
		83	MUTTER	Syrefast	Ingen
		78	HALVKULE	VF/PL	Ingen
		72	SKIVE	VF/PL	Ingen
		69	SKIVE	VF/PL	Skade inn til Zn-belegg
		75	HALVKULE	VF/PL	Skade inn til Zn-belegg
		84	MUTTER	Syrefast	Ingen

VEDLEGG 3

Elektrokjemiske potensialer

Elektrokjemiske potensialer, 0-6 uker

System oppsett	Case	Start-dato	Potensial mV (SCE)	1 uke dato	Potensial mV (SCE)	2 uker dato	Potensial mV (SCE)	3 uker dato	Potensial mV (SCE)	4 uker dato	Potensial mV (SCE)	5 uker dato	Potensial mV (SCE)	6 uker dato	Potensial mV (SCE)
1	5	5/9-11	-1071	12/9-11	-1017	19/9-11	-1004	26/9-11	-996	3/10-11	-992	10/10-11	-990	17/10-11	-988
2	5	”	-1065	”	-1023	”	-1009	”	-1000	”	-995	”	-990	”	-986
3	5	”	-1065	”	-1023	”	-1001	”	-989	”	-978	”	-970	”	-956
4	5	”	-1044	”	-982	”	-969	”	-959	”	-964	”	-973	”	-970
5	5	”	-1047	”	-1000	”	-985	”	-973	”	-971	”	-975	”	-974
6	5	”	-1038	”	-969	”	-973	”	-973	”	-967	”	-955	”	-958
7	6	”	-1063	”	-1018	”	-1007	”	-996	”	-979	”	-975	”	-967
8	6	”	-1090	”	-1036	”	-1037	”	-1030	”	-1028	”	-1026	”	-1021
9	6	”	-1075	”	-1008	”	-1006	”	-996	”	-960	”	-956	”	-947

Komp. Tag nr.	Case	Start-dato	Potensial mV (SCE)	1 uke dato	Potensial mV (SCE)	2 uker dato	Potensial mV (SCE)	3 uker dato	Potensial mV (SCE)	4 uker dato	Potensial mV (SCE)	5 uker dato	Potensial mV (SCE)	6 uker dato	Potensial mV (SCE)
1	1	5/9-11	-645	12/9-11	-687	19/9-11	-692	26/9-11	-699	3/10-11	-701	10/10-11	-705	17/10-11	-708
2	1	”	-642	”	-688	”	-691	”	-687	”	-700	”	-704	”	-705
3	1	”	-637	”	-692	”	-694	”	-698	”	-710	”	-700	”	-700
4	1	”	-1073	”	-938	”	-847	”	-818	”	-812	”	-806	”	-801
5	1	”	-1082	”	-970	”	-902	”	-854	”	-838	”	-831	”	-826
6	1	”	-1078	”	-931	”	-874	”	-851	”	-840	”	-834	”	-829
7	1	”	-1018	”	-859	”	-861	”	-861	”	-871	”	-880	”	-888
8	1	”	-1019	”	-877	”	-874	”	-857	”	-857	”	-853	”	-846
9	1	”	-1023	”	-942	”	-936	”	-968	”	-949	”	-947	”	-938
10	2	”	-1060	”	-820	”	-779	”	-760	”	-751	”	-745	”	-740
11	2	”	-1068	”	-912	”	-831	”	-811	”	-801	”	-794	”	-787
12	2	”	-1072	”	-936	”	-833	”	-811	”	-800	”	-792	”	-787
13	2	”	-1000	”	-897	”	-914	”	-906	”	-891	”	-889	”	-878
14	2	”	-970	”	-816	”	-801	”	-783	”	-768	”	-761	”	-758
15	2	”	-1067	”	-810	”	-797	”	-782	”	-774	”	-756	”	-752

Komp. Tag nr.	Case	Start-dato	Potensial mV (SCE)	1 uke dato	Potensial mV (SCE)	2 uker dato	Potensial mV (SCE)	3 uker dato	Potensial mV (SCE)	4 uker dato	Potensial mV (SCE)	5 uker dato	Potensial mV (SCE)	6 uker dato	Potensial mV (SCE)
16	3	5/9-11	-1010	12/9-11	-946	19/9-11	-944	26/9-11	-963	3/10-11	-964	10/10-11	-967	17/10-11	-957
17	3	”	-1022	”	-905	”	-921	”	-931	”	-942	”	-940	”	-950
18	3	”	-1033	”	-949	”	-934	”	-954	”	-965	”	-969	”	-969
19	4	”	-1005	”	-864	”	-844	”	-839	”	-842	”	-835	”	-836
20	4	”	-1003	”	-860	”	-850	”	-854	”	-848	”	-848	”	-852
21	4	”	-1013	”	-893	”	-896	”	-911	”	-917	”	-930	”	-940

Spotmåling av komponenter UTEN SKADER	Komp. Nr.	6 uker	Potensial (SCE)
		Dato	mV
VF skive	89	20/10-11	-1003
VF halvkule	90	”	-1001
VF mutter	91	”	-850
VF+PL skive	92	”	Ikke rel.
VF+PL halvkule	93	”	Ikke rel.
VF+PL mutter	94	”	Ikke rel.
Mutter syrefast	95	”	-282

Elektrokjemiske potensialer, 7-13 uker

System oppsett	Case	7 uker dato	Potensial mV (SCE)	8 uker dato	Potensial mV (SCE)	9 uker dato	Potensial mV (SCE)	10 uker dato	Potensial mV (SCE)	11 uker dato	Potensial mV (SCE)	12 uker dato	Potensial mV (SCE)	13 uker dato	Potensial mV (SCE)
1	5	24/10-11	-989	31/10-11	-989	7/11-11	-990	14/11-11	-988	21/11-11	-987	28/11-11	-991	'5/12-11	-990
2	5	”	-984	”	-985	”	-981	”	-980	”	-979	”	-980	”	-981
3	5	”	-948	”	-	”	-	”	-	”	-	”	-	”	-
4	5	”	-975	”	-977	”	-981	”	-976	”	-974	”	-974	”	-974
5	5	”	-980	”	-927	”	-946	”	-961	”	-984	”	-984	”	-982
6	5	”	-957	”	-	”	-	”	-	”	-	”	-	”	-
7	6	”	-969	”	-957	”	-960	”	-966	”	-965	”	-967	”	-965
8	6	”	-1018	”	-1017	”	-1013	”	-1010	”	-1007	”	-1002	”	-998
9	6	”	-943	”	-	”	-	”	-	”	-	”	-	”	-

Komp. Tag nr.	Case	7 uker dato	Potensial mV (SCE)	8 uker dato	Potensial mV (SCE)	9 uker dato	Potensial mV (SCE)	10 uker dato	Potensial mV (SCE)	11 uker dato	Potensial mV (SCE)	12 uker dato	Potensial mV (SCE)	13 uker dato	Potensial mV (SCE)
1	1	24/10-11	-708	31/10-11	-707	7/11-11	-705	14/11-11	-706	21/11-11	-705	28/11-11	-704	28/11-11	-704
2	1	”	-705	”	-705	”	-704	”	-704	”	-703	”	-703	”	-704
3	1	”	-701	”	-	”	-	”	-	”	-	”	-	”	-
4	1	”	-801	”	-	”	-	”	-	”	-	”	-	”	-
5	1	”	-824	”	-819	”	-821	”	-819	”	-817	”	-816	”	-817
6	1	”	-830	”	-826	”	-827	”	-827	”	-825	”	-825	”	-825
7	1	”	-903	”	-899	”	-902	”	-893	”	-893	”	-888	”	-887
8	1	”	-865	”	-	”	-	”	-	”	-	”	-	”	-
9	1	”	-922	”	-933	”	-926	”	-918	”	-918	”	-912	”	-920
10	2	”	-740	”	-	”	-	”	-	”	-	”	-	”	-
11	2	”	-785	”	-786	”	-791	”	-784	”	-780	”	-779	”	-778
12	2	”	-786	”	-778	”	-788	”	-784	”	-785	”	-783	”	-782
13	2	”	-894	”	-887	”	-904	”	-892	”	-892	”	-895	”	-894
14	2	”	-759	”	-764	”	-766	”	-757	”	-757	”	-760	”	-766
15	2	”	-757	”	-	”	-	”	-	”	-	”	-	”	-

Komp. Tag nr.	Case	7 uker dato	Potensial mV (SCE)	8 uker dato	Potensial mV (SCE)	9 uker dato	Potensial mV (SCE)	10 uker dato	Potensial mV (SCE)	11 uker dato	Potensial mV (SCE)	12 uker dato	Potensial mV (SCE)	13 uker dato	Potensial mV (SCE)
16	3	24/10-11	-957	31/10-11	-965	7/11-11	-957	14/11-11	-960	21/11-11	-961	28/11-11	-957	28/11-11	-960
17	3	”	-961	”	-	”	-	”	-	”	-	”	-	”	-
18	3	”	-974	”	-987	”	-981	”	-972	”	-968	”	-966	”	-964
19	4	”	-828	”	-	”	-	”	-	”	-	”	-	”	-
20	4	”	-848	”	-821	”	-835	”	-832	”	-832	”	-847	”	-862
21	4	”	-935	”	-939	”	-916	”	-914	”	-908	”	-909	”	-910

Spotmåling av komponenter UTEN SKADER	Komp. Nr.	12 uker	Potensial (SCE)
		Dato	mV
VF skive	89	5/12-11	-996
VF halvkule	90	”	-970
VF mutter	91	”	-825
VF+PL skive	92		
VF+PL halvkule	93		
VF+PL mutter	94		
Mutter syrefast	95		

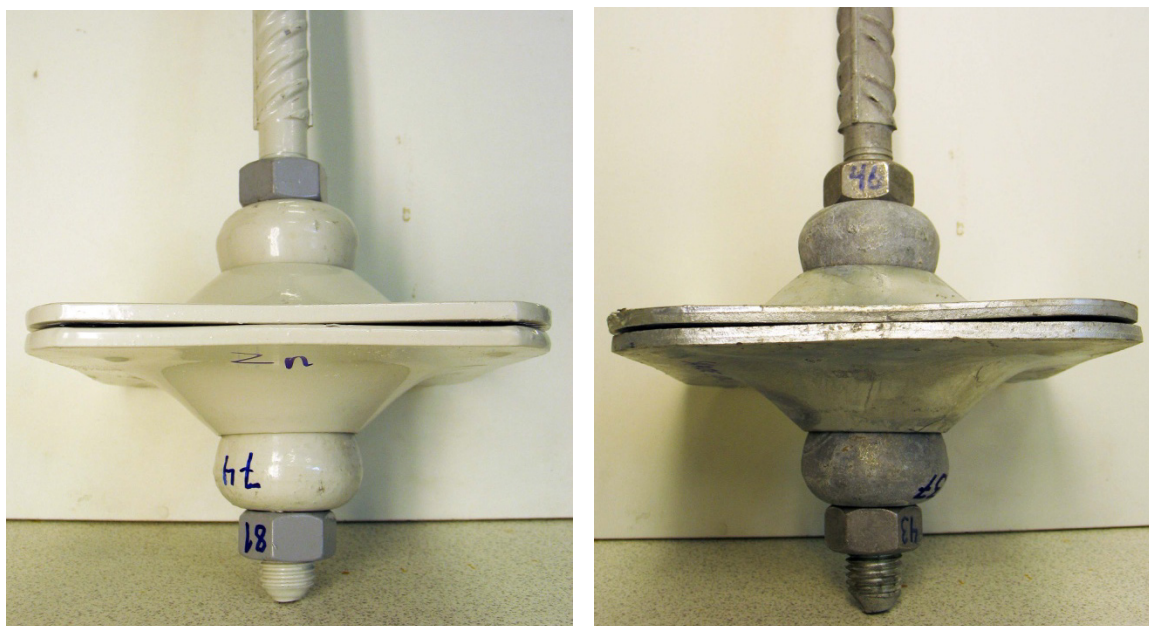
VEDLEGG 4

pH målinger

Dato	Eksponeeringstid (uker)	pH i kar nr. 1	pH i kar nr. 2	Gjennomsnitt	Krav	Kommentar
2011.09.05	0			8.21	8.2 ± 0.5	Ok
2011.09.26	3			8.33	"	"
2011.10.10	5	8.41	8.53	8.47	"	"
2011.10.17	6	8.38	8.39	8.39	"	"
2011.10.31	8	8.27	8.36	8.32	"	"
2011.11.14	10	8.33	8.28	8.31	"	"
2011.11.21	11	8.08	8.06	8.07	"	"
2011.11.28	12	8.32	8.24	8.28	"	"
2011.12.05	13	8.33	8.25	8.29	"	"

VEDLEGG 5

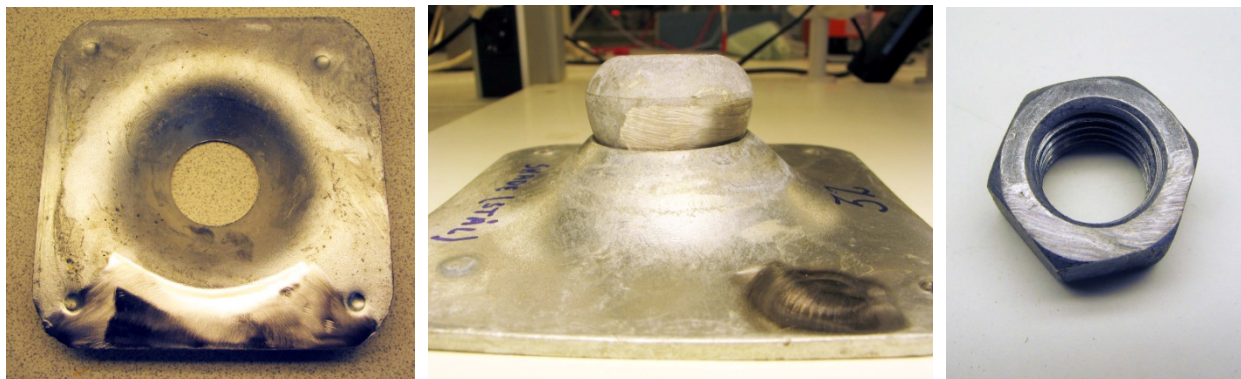
Bilder av komponentsystemer og forsøksoppsett



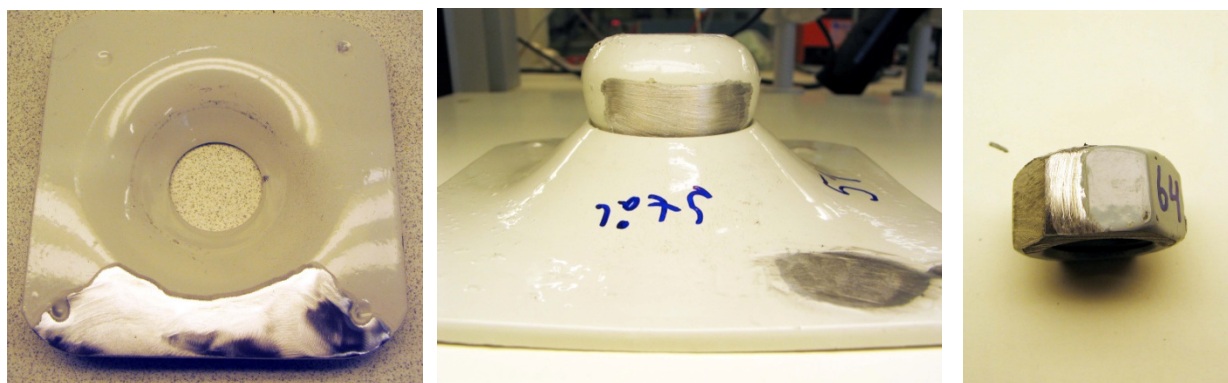
Figur V5-1. Komplettsystem med hhv. VF og VF+PL. Tiltrekkingsmoment = 125 kN.



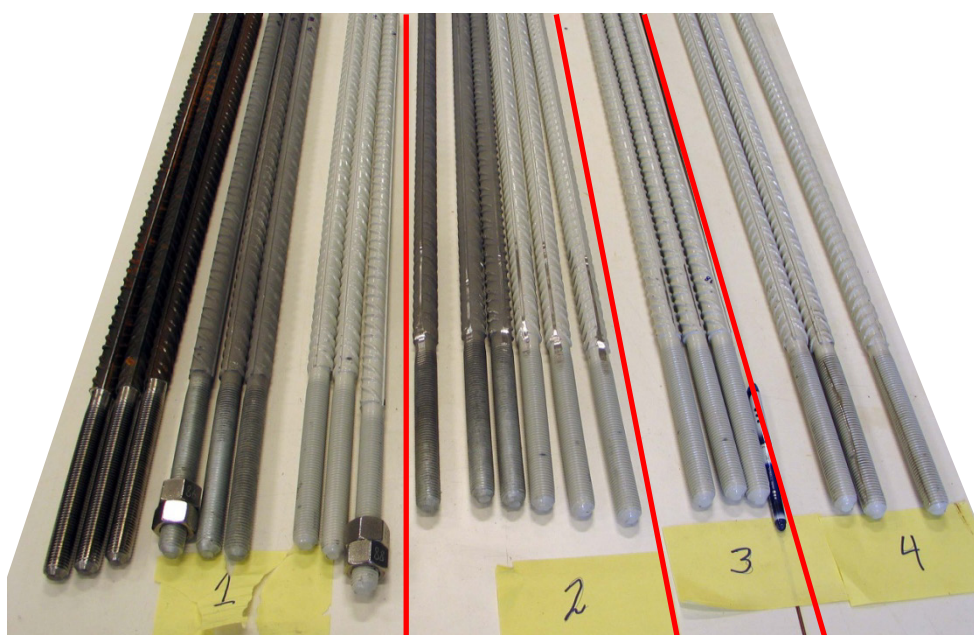
Figur V5-2. Komplette komponentsystemer med skader klare til test. Tiltrekkingsmoment = 125 kN.



Figur V5-3. VF belagte komponenter med påførte skader i til stålet, ref. Figur 8 i rapporten.



Figur V5-4. VF+PL belagte komponenter med påførte skader inn til stålet, ref. Figur 8 i rapporten.



Figur V5-5. Samtlige bolter med skader klare til test (skade-case 1, 2, 3 og 4, ref. Tabell 1).



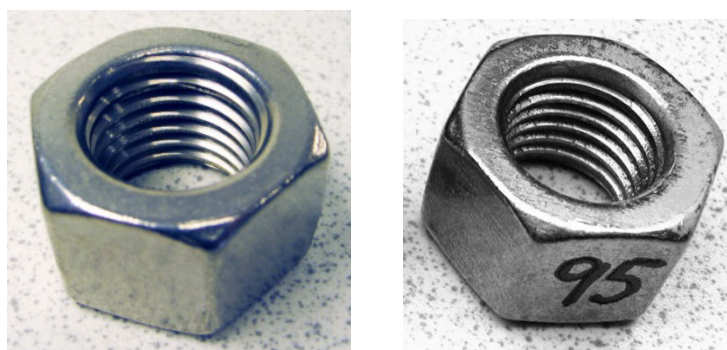
Figur V5-6. Forsøksoppsett med luftbobling (akvariepumper) og utstyr for potensialmåling.



Figur V5-7. Neddykkede bolter og komponentsystemer rett etter oppstart (ca. 50 cm dybde).



Figur V5-8. Bilde av neddykkede bolter og komponentsystemer etter 13 ukers eksponering. Brunfargen skyldes spredning av rustprodukter fra bart stål bolt (øverst til venstre på bildet) på grunn av luftbobling i karet. Ingen øvrige systemer er korrodert.



Figur V5-9. Foto av syrefast mutter før og etter 13 ukers eksponering. Ingen korrosjon.



Statens vegvesen

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

ISSN: 1893-1162