

Korrosjonsbeksyttelse av maskinerte ståloverflater

Alexander Kristoffersen

Materialteknologi

Innlevert: juni 2015

Hovedveileder: Ole Øystein Knudsen, IPM

Medveileder: Catalina H. Musinoi Hagen, IMTE

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for produktutvikling og materialer

Trondheim, juni 2015

Abstract

The industry has experienced that machined surfaces are difficult to protect against corrosion, because the protective coating fails early. Previously it was believed that this was due to reduced adhesion to the protective coating, but in a related specialization project autumn 2014 this was to some extent refuted. It was found that the problem primarily was due to poor resistance against corrosion creep. It is desired to find alternative coatings and machining processes that will improve the resistance to degradation of coatings, due to corrosion creep. Cathodic disbonding and wet adhesion will also be taken under consideration.

During this period, there will primarily be testing of corrosion creep, but also parallels for cathodic disbonding. It will be used aluminum-pigments (2-3%) in the primer, which typically gives good resistance to cathodic disbonding. In addition to parallels of different coatings, surfaces with different roughness will be taken under consideration, and analyzed against corrosion creep and cathodic disbonding. Tortuosity of all the surfaces will be studied, and compared to the surface roughness and other test results. Wet adhesion will also be interesting to investigate, and see how important this mechanism is compared to the dry adhesion, which was tested in the related specialization project.

It was observed severe corrosion creep on all the samples, where the machined samples with grease showed the most severe attacks. Besides blast cleaned samples, it was also observed severe attacks of cathodic disbonding. However, it was little correlation between cathodic disbonding and corrosion creep, except that aluminum in the primer showed an opposite effect on the two mechanisms. Samples with grease showed the lowest adhesion, but because of contradictory results with the corrosion creep, it was difficult to suggest a trend between adhesion and corrosion creep. Surface characterization showed good correlation between tortuosity (τ) and peak count (P_c), and also between these parameters and the measured corrosion creep. The R_a -parameter showed little correlation to tortuosity, peak count and corrosion creep.

The results show that both adhesion and cathodic disbonding has less effect on corrosion creep than initially expected, and that other mechanisms have greater significance to the poor resistance of corrosion creep on machined surfaces. The coating has great influence, where aluminum pigments in the primer increase the corrosion creep on machined surfaces. The results also show that surface roughness will influence the corrosion creep, in particular the tortuosity (τ) and peak count (P_c). Increasing the peak count (P_c) on machined surfaces will decrease the corrosion creep, while increasing the tortuosity (τ) will increase the corrosion creep. This indicates that surface characterization should be the main focus, since it can lead to better understanding of protection of machined surfaces against corrosion creep.

Further work should examine the machining process, and see how different parameters can be optimized, in order to obtain a machined surface with better resistance to corrosion creep. Extensive testing of machined surfaces, with respect to corrosion creep is recommended.

Sammendrag

Industrien har erfart at maskinerte ståloverflater er vanskelige å beskytte mot korrosjon, da det korrosjonsbeskyttende belegget feiler tidlig. Tidligere ble det antatt at dette skyldes dårlig adhesjon mellom maskinert overflate og korrosjonsbeskyttende belegg, men i et tilhørende fordypningsprosjekt høsten 2014 ble dette til en viss grad tilbakevist. Det ble funnet at problemet i hovedsak omhandler dårlig motstand mot korrosjonskryp. Det vil derfor være ønskelig å finne alternative belegg og maskineringsmetoder som vil kunne være med på å bedre motstanden mot nedbrytning av belegg som følge av korrosjonskryp. I tillegg vil det bli tatt hensyn til katodisk avbinding og våt adhesjon.

I løpet av denne perioden skal det primært gjennomføres ny runde med test av korrosjonskryp, samt teste paralleller for katodisk avbinding. Det skal benyttes aluminiums-pigmenter (2-3%) i grunningen, som typisk skal gi god motstand mot katodisk avbinding. I tillegg til paralleller med ulike belegg, skal det bli sett på overflater med ulike ruheter, og se hvordan dette virker inn på korrosjonskryp og katodisk avbinding. Tortuositet av de ulike overflatene skal også undersøkes, og sammenlignes opp mot overflateruhet og de øvrige testresultatene. Det vil også være interessant å se på våt adhesjon, og finne ut hvor sentral denne feilmekanismen er kontra tørr adhesjon som ble testet i det tilhørende fordypningsprosjektet.

Det ble observert alvorlig korrosjonskryp på samtlige prøver, hvor de maskinerte prøvene med hanefett var mest angrepet. Foruten prøvene som var blåserenset, viste også prøvene stor grad av katodisk avbinding. Det var derimot liten sammenheng mellom målt avbinding og kryp, sett bort fra at aluminium i grunningen hadde en motsatt effekt på de to feilmekanismene. Prøvene med hanefett viste lavest adhesjon, men på grunn av motsigende resultater med korrosjonskryp var det vanskelig å se en sammenheng mellom adhesjon og korrosjonskryp. Overflatekarakteriseringen viste at det var stor sammenheng mellom tortuositet (τ) og peak count (P_c), og at det også var mulig å se trender mellom disse parametrene opp mot målt korrosjonskryp. R_a -parameteren viste derimot få sammenhenger med tortuositet, peak count og målt korrosjonskryp.

Resultatene viser at både adhesjon og katodisk avbinding har mindre innvirkning på korrosjonskryp enn først antatt, og at det er andre mekanismer som har større betydning for hvorfor maskinerte overflater har dårlig motstand mot korrosjonskryp. Det virker som at valg av belegg har svært stor innvirkning, hvor aluminiumspigmenter i grunningen gir en negativ effekt og øker graden av korrosjonskryp på maskinerte overflater. Resultatene viser også at overflateruhet har en innvirkning på korrosjonskryp, og da spesielt tortuositet (τ) og peak count (P_c). For maskinerte overflater virker det til at økt peak count (P_c) gir mindre korrosjonskryp, mens økt tortuositet (τ) gir mer korrosjonskryp. Dette viser at overflatekarakterisering bør rettes stort fokus mot, da det kan gi bedre forståelse for hvordan maskinerte overflater kan beskyttes mot korrosjon.

Videre arbeid bør gå nærmere inn på prosessen bak maskinering, og se hvordan ulike parametere kan endres for å oppnå den mest gunstige maskinerte overflaten med hensyn til motstand mot korrosjonskryp. Omfattende testing av ulike overflater og beleggssystemer, med hensyn til korrosjonskryp er anbefalt.

Forord

Gjennom prosjektet "Korrosjon og slitasjebeskyttelse av glatte metallflater" er det satt opp tre underprosjekter. "Adhesjon mellom korrosjonsbeskyttende belegg og maskinert stål" er et av disse, og som et fordypningsprosjekt høsten 2014 tok for seg. På bakgrunn av dette fordypningsprosjektet ble masteroppgaven "**Korrosjonsbeskyttelse av maskinerte ståloverflater**" satt opp. Hovedprosjektet er en del av MAROFF- programmet til Norges Forskningsråd (NFR), hvor arbeidsgiver er Brunvoll AS. Samarbeidspartnere til Brunvoll AS er SINTEF Materialer og kjemi, Institutt for Produktutvikling og Materialer (IPM) ved NTNU, Triplex AS, Scana Offshore Vestby AS og Omya Hustadmarmor AS.

Opgaven er gitt av Institutt for produktutvikling og materialer (IPM), ved Norges teknisk-naturvitenskapelig universitet (NTNU). Oppgaven er en videreføring av fordypningsprosjektet utført høsten 2014. Hovedveileder på prosjektet er Ole Øystein Knudsen, og med-veileder er Catalina H. Musinoi Hagen.

Det rettes en spesiell takk til veileder Ole Øystein Knudsen for god veiledning under hele prosessen, og til Catalina H. Musinoi Hagen som har bistått med både veiledning og hjelp ved det eksperimentelle arbeidet. En stor takk rettes også til Ann Karin Kvernbråten og Nils-Inge Johan Nilsen for meget god bistand ved eksperimentelt arbeid. En takk går også til Arne Gellein for maskinering og kutting av prøver, samt til Jorge Rituerto Sin og Sergio Armada Nieto for bistand ved Infinite Focus Microscope (IFM).

Innholdsfortegnelse

ABSTRACT	I
SAMMENDRAG	II
FORORD	III
LISTE OVER UTTRYKK OG FORKLARINGER	1
1 INNLEDNING	2
PROBLEMSTILLING	2
MÅLSETNING	2
2 TEORI	3
2.1 ADHESJON OG ADHESJONSKREFTER	3
2.2 TOPOGRAFI OG OVERFLATERUHET	5
2.3 TORTUOSITET	7
2.4 MASKINERT OVERFLATE	9
2.5 FORBEHANDLING AV METALLOVERFLATER	10
2.6 NEDBRYTNING AV BESKYTTENDE BELEGG	11
2.6.1 Korrosjonskryp	11
2.6.2 Katodisk avbinding	12
3 EKSPERIMENTELT	14
3.1 PRØVESPEKIFIKASJONER	14
3.2 OVERFLATEKARAKTERISERING AV ULIKE OVERFLATER	14
3.3 OVERFLATEBEHANDLING AV AKTUELLE PRØVER	17
3.3.1 Blåserensing	17
3.3.2 Applikator	17
3.3.3 Aktuelle belegg	19
3.4 ADHESJON	20
3.4.1 Pull-off, ISO 4624	20
3.4.2 Cross-cut, ISO 2409	21
3.5 KORROSJONSKRYP	22
3.6 KATODISK AVBINDING	24
4 RESULTATER	25
4.1 OVERFLATEKARAKTERISERING	25
4.1.1 Ruhet	25
4.1.2 Tortuositet	26
4.2 ADHESJON	29
4.3 KORROSJONSKRYP	32
4.4 KATODISK AVBINDING	36
5 DISKUSJON	41
5.1 EFFEKT AV RUHET PÅ KORROSJONSKRYP	41
5.2 EFFEKT AV KATODISK AVBINDING PÅ KORROSJONSKRYP	44
5.3 EFFEKT AV ADHESJON PÅ KORROSJONSKRYP	47
6 KONKLUSJON	49

7 REFERANSER	50
8 APPENDIKS.....	1
APPENDIKS A KRAV OG BEGRENINGER TIL BELEGG	1
APPENDIKS B INNSTILLING PROFILOMETER OG IFM	2
APPENDIKS C PLOTT AV ULIKE RUHETSPARAMETERE	3
APPENDIKS D 3D-BILDER AV ULIKE OVERFLATER	5
APPENDIKS E ADHESJONSTESTING AV EKSTERNE PRØVER HØSTEN 2014	9
APPENDIKS F STRØMPLOTT FRA KATODISK AVBINDING	10
APPENDIKS G KATODISK AVBINDING MOT TORTUOSITET OG PEAK COUNT	11
APPENDIKS H OPPGAVETEKST	12
APPENDIKS I RISIKOVURDERING	14

Liste over uttrykk og forklaringer

A = Faktisk overflateareal

A₀= Nominelt overflateareal

L= Faktisk lengde

L₀= Nominell lengde

R_a= Aritmetisk gjennomsnittsrøhet

R_z= Forskjellen i høyde mellom R_p og R_v

R_{max}= Avstanden mellom høyeste topp og laveste dal (innenfor samme segment)

R_t= Avstanden mellom høyeste topp og laveste dal (innenfor hele evalueringsslengden)

P_c= Peak count

S_m= "Mean Spacing" mellom "peaks" ved midtlinjen

R_p= Fem høyeste toppene langs evalueringsslengden

R_v= Fem laveste dalene langs evalueringsslengden

Z_t= Valgt prosent av R_z for måling av S_m og P_c. Kan bli sett opp mot "dead band"

Red Mud= Avfallsstoff som blokkerer klorider

Tortuositet (τ)= Sammenhengen mellom L og L₀

Waviness= Overflatejevnhet

Wenzel ruhetsfaktor= Sammenhengen mellom A og A₀

Mean linje= Midtlinjen

Dead band= Dødsone, aktuell for peak count

Segment length= Cut-off length, lengden av et segment

Evaluation length= Evalueringsslengden, N segmenter

Sampling length= Lengden av N+2 segmenter

N= Antall segmenter

γ_c= Fukting av underlaget, overflatespenning

Grunning= Primer, første laget med maling

PGTC= Penguard Tie Coat

JM90Al= Jotamastic 90 Aluminium

JM87Al= Jotamastic 87 Aluminium

JM87= Jotamastic 87

Al₂O₃= Aluminiumoksid

G24= Jerngritt

ISO= International Organization for Standardization

TSZ= Thermally Sprayed Zink

IFM= Infinite Focus Microscope

1 Innledning

Problemstilling

Stål på skip og offshore installasjoner blir som oftest beskyttet med en form for belegg. Dette er i hovedsak for å beskytte materialet mot korrosjon, men også for å dekke estetiske behov. For at ståloverflaten skal kunne bli beskyttet i en tilstrekkelig grad, er det viktig at belegget har ønsket levetid og ikke svikter for tidlig som følge av for eksempel korrosjonskryp eller katodisk avbinding.

I utgangspunktet er det ønskelig å blåserense overflater for å gi best mulig beskyttelse, men på grunn av funksjonelle krav til tetning og montering, kan ikke maskinerte overflater blåserenses. Maskinerte overflater kan for eksempel være monteringsoverflater, tetningsoverflater, eller flater som beveger seg mot hverandre. Som ved andre overflater blir disse beskyttet ved hjelp av organiske belegg, metalliske belegg, eller en kombinasjon av disse. Det har vist seg at korrosjonsbeskyttende belegg på maskinerte overflater ikke gir tilstrekkelig korrosjonsbeskyttelse, hvilket medfører at robustheten og levetiden til belegget reduseres betraktelig. Tidligere trodde man at maskinerte ståloverflater hadde dårlig adhesjon til det korrosjonsbeskyttende belegget, og at dette var en av hovedårsakene til svikt av belegget. I et fordypningsprosjekt høsten 2014 ble det bevist at maskinerte overflater hadde god tørr adhesjon til korrosjonsbeskyttende belegg. Problemet var derimot at overflatene hadde dårlig motstand mot korrosjonskryp, og at det var tegn til katodisk avbinding.

Målsetning

Ut fra oppgaveteksten er det satt opp to hypoteser som kan forklare hvorfor maskinerte overflater har dårlig motstand mot korrosjonskryp. Det er senere utviklet en hypotese til, og det er dermed tre hypoteser som skal undersøkes i denne oppgaven. Den første hypotesen er at maskinerte overflater gjør at katodisk avbinding lettere kan oppstå. Katodereaksjon i et gitt skadested fører til at belegget rundt dette skadestedet mister heften på grunn av forhøyet pH, noe som fører til at korrosjonskryp følger etter og belegget degraderes. Hypotese to går ut på at maskinerte overflater har dårlig våt adhesjon, noe som fører til at korrosjonskryp lettere sprer seg under belegget. I dette tilfellet er korrosjonskryp årsaken til at belegget feiler, og katodisk avbinding har liten innvirkning. Den siste hypotesen sier at på grunn av maskineringen så aktiveres overflaten og korrosjonskryp kan lettere forekomme og ødelegge bindinger mellom belegget og overflaten. Det er da antatt at korrosjonshastigheten er høyere på maskinerte overflater enn blåserensede overflater. Det var i tillegg ønskelig å karakterisere overflaten, blant annet se på tortuositet, for å få en bedre forståelse av sammenhengen mellom overflatetopografi og ulike feilmekanismer.

Triplex AS og Brunvoll AS leverte maskinerte prøver til prosjektet, men i motsetning til det tilhørende fordypningsprosjektet høsten 2014 ble samtlige prøver først malt etter ankomst. Dette var fordi at beleggssystemet ble lagt større vekt på i denne oppgaven, og det var ønsket å ha mest mulig kontroll over denne parameteren, så tidlig som mulig i prosessen. Ulike blåserensede overflater ble brukt som referanser. Nærmere beskrivelse av test- og prøveparametere er gitt senere i oppgaven.

2 Teori

2.1 Adhesjon og adhesjonskrefter

Adhesjon, eller heft, er et vanskelig begrep å forklare, og det finnes flere definisjoner med små forskjeller. Den enkleste forklaringen er at adhesjon er tiltrekningskrefter mellom et metall og et belegg [1, 2], mens Rincon Troconis og Frankel skiller mellom teoretisk og praktisk adhesjon [3]. Fundamental adhesjon er energien som er nødvendig for skille kreftene som holder to overflater sammen, mens praktisk adhesjon er en kombinasjon av fundamental adhesjon og adhesjonen som blir målt gjennom adhesjonstester [3, 4]. For å holde kontroll, blir den første forklaringen benyttet videre i oppgaven. Uten tilstrekkelig adhesjon mellom et beskyttende belegg og en metalloverflate, er det antatt at det vil føre til tap av belegg og videre degradering av substratet på grunn av slitasje og korrosjon [1, 2, 5, 6]. En grov inndeling av de vanligste adhesjonskreftene er listet opp under [1].

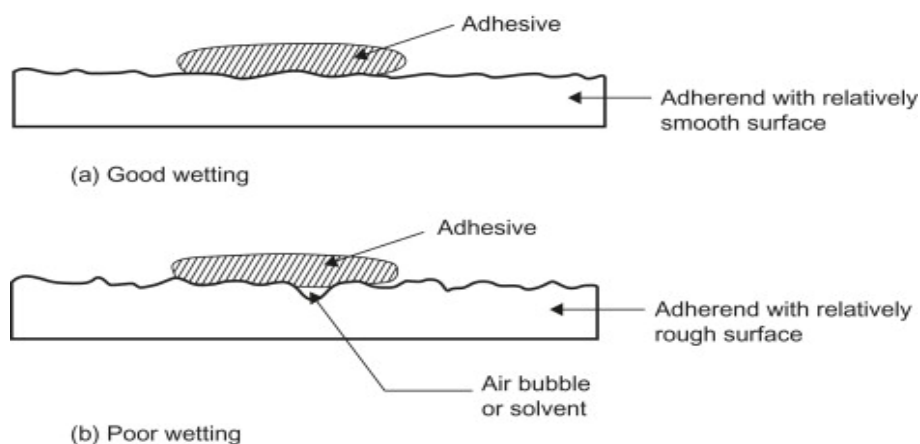
- **Kjemiske bindinger** er ansett til å være de sterkeste adhesive bindingene, og har en energi mellom $200-800 \frac{kJ}{mol}$. Disse bindingene er enten ioniske eller kovalente. Kovalente bindinger blir lett hydrolysert av vann, og gir dermed liten effekt på adhesjonen i praksis.
- **Absorpsjonskrefter** er fysiokjemiske krefter som kan deles opp i dispersjonskrefter, dipol-dipol krefter og induksjonskrefter. Forskjellen på disse er hvordan kreftene oppstår mellom ulike dipoler, og kjennetegnet på absorpsjonskrefter er at de arbeider over en viss avstand.
- **Molekylære interaksjoner** er krefter som ligger mellom kjemiske bindinger og fysiske absorpsjonskrefter. Disse adhesjonskreftene kan også bli forklart ved hjelp av syre-base interaksjoner, hvor elektroner forflytter seg mellom orbitalene og danner sterke bindinger.
- **Elektrostatisk adhesjon** dannes gjennom "coloumbic" tiltrekninger mellom reaktive overflater. Disse kreftene har trolig mindre innvirkning på adhesjon, da kreftene er for lave.

Adhesjon mellom et belegg og en metalloverflate når vann er tilstede, kalles for våt adhesjon. Vannmolekyler vil kunne penetrere belegget og redusere adhesjonskreftene som virker mellom belegget og metalloverflaten [7]. Dette vil kunne medføre at våt adhesjon i utgangspunktet er lavere enn tørr adhesjon, noe som er støttet opp av tidligere forskning [8]. For å kunne få reelle målinger av prøver som er i et vannholdig miljø, må dermed prøvene bli testet for våt adhesjon ved å eksponere dem i vann over en viss tidsperiode. Det er antatt at adhesjonen som opprinnelig var mellom belegget og overflaten, helt eller delvis vil kunne bli gjenopprettet når prøvene blir tørket. På bakgrunn av dette er det antatt at prøvene må testes innen 24 timer, ellers vil ikke resultatene til fulle representere våt adhesjon [7-10].

God adhesjon avhenger i stor grad av type belegg og substrat, men også hvordan metalloverflaten er blitt behandlet. Det er antydning at en økning av ruhet på en overflate vil være med på å gi en økning av adhesjon [3, 11-13], noe som også stemmer overens med kartlagt teori innenfor området [2, 14]. Dette skyldes mekanismer som økt overflateareal, overflaten kan absorbere sideveiskrefter og økt båndinteraksjoner. Det er derimot litteratur som antyder at adhesjon enten minker med økende ruhet eller ikke virker inn på adhesjon [5, 15, 16]. Som nevnt innledningsvis ble dette til en viss grad også bevist i det tilhørende fordypningsprosjektet høsten 2014 [17]. Det er viktig å påpeke at manglende forståelse av ruhet vil kunne spille inn på denne motstridene litteraturen [18].

Det finnes en rekke metoder for å teste adhesjon. En studie har sett på parametere som virker inn på test for pull-off. Den viste at jo lengre herdetid malingssystemene gjennomgår før testing, jo bedre adhesjonsresultater var det mulig å oppnå. En annen parameter studien så på var filmtykkelsen, og at økt filmtykkelse vil kunne gi økt adhesjon [9]. Malingssystemene må også følge anbefalinger gitt av malingsleverandør, og ikke minst opprettholde kravene for de aktuelle systemene. Påliteligheten til dagens adhesjonsmetoder er et stort problemområde, og industrien har erfart at dagens adhesjonsmetoder ikke er tilstrekkelige for å definere adhesjon, noe en studie gjennomført av SINTEF viste. Denne studien så blant annet på pull-off og cross cut, og viste at en av de største problemene med disse metodene er at de er svært avhengig av operatøren. I begge metodene skal det bli lagt på en manuell kraft, og dette vil medføre en betydelig variasjon fra operatør til operatør, noe som vil kunne gi svekket troverdighet av resultatene. Studien viste videre at utvikling av nye og bedre adhesjonsmetoder vil være et viktig tema i fremtiden [8].

Et konsept som er sentralt når det gjelder adhesjonen mellom en overflate og et belegg er wettability, som er fukting av underlaget i forhold til overflatetopografien. Fukting (γ_c) av et underlag er bestemt av temperatur, og valg av bindemiddel og løsemiddel. Det er viktig med fullstendig fukting for å oppnå tilstrekkelig adhesjon mellom belegg og overflate slik at belegget kan beskytte optimalt. Figur 1 viser hvordan dårlig og god fukting kan se ut [5, 13, 19].



Figur 1: Forskjellen på god og dårlig fukting, henholdsvis på maskinert og ru overflate [20].

Kontaktvinkelen er det viktigste målet for fukting, hvor det er ønskelig med lav kontaktvinkel for å oppnå god fukting. Det er også antatt at høy overflateruhet og dårlig fukting vil medføre at malingen ikke klarer å fylle opp alle gropene, som vist i den nederste delen i figur 1. Dette medfører mindre kontakt mellom belegg og substrat, som fører til dårlig adhesjon. I tillegg vil det dannes luftporer på overflaten som fylles med vann, og faren for korrosjonskryp og katodisk avbinding øker betraktelig og dermed gi svikt av belegget [5, 13, 19].

2.2 Topografi og overflateruhet

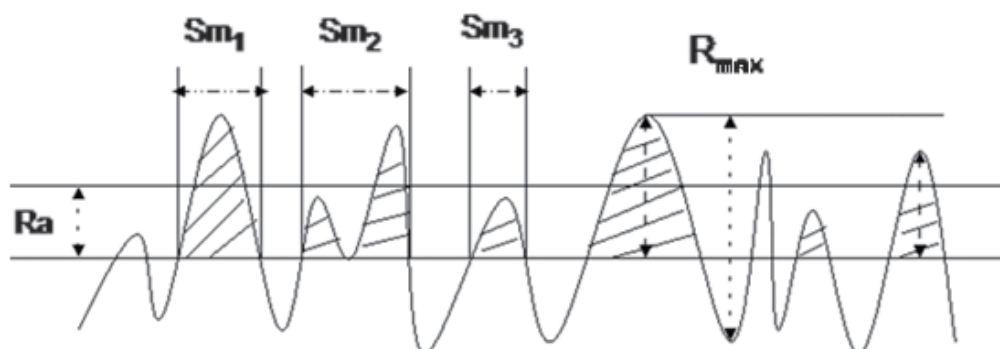
Topografi er en betegnelse på hvordan en metaloverflate ser ut i form av topper og daler [21]. Ruhet er en sentral parameter for forståelsen av topografi, og topografien til en overflate kan også bli sett på som produktet av ruhet og overflatejevnhet, også kalt waviness [22]. Overflateruhet er blitt definert som en funksjon av høydeforskjell, avstand mellom topper i metalloverflaten og toppenes geometriske form. For maskinerte overflater vil alle tre parameterne være med på å påvirke graden av ruhet.

For å beskrive ruheten av en overflate benyttes tradisjonelle 2D-parametere. Det finnes et mangfold av parametere, hvor blant annet Gadelmawla definerte opp til 59 stykker [23]. ISO 4287 tar også for seg uttrykk og definisjoner for overflateruhet [24]. For denne oppgaven er det valgt ut en håndfull parametrene som er antatt å være mest relevante. Tabell 1 viser de aktuelle parametrene, samt en enkel forklaring av hver enkelt [1, 23, 25-28]. Begreper som evalueringsslengde, "mean line" og segment er forklart i tabell 2 lengre ned.

Tabell 1: Oversikt over parameterne som er antatt å ha høyest relevans til oppgavens problemstilling.

Parameter	Formel	Forklaring
R_a	$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l Z(x) dx \text{ } (\mu\text{m})$	Aritmetisk gjennomsnittsruhet, og er den verdien som er mest benyttet. Måler avvik av ruhet over "mean line" langs en prøvelengde
R_z	$R_z = R_p + R_v \text{ } (\mu\text{m})$	Forskjellen i høyde mellom gjennomsnittet av de fem høyeste toppene(R_p) og de fem laveste dalene(R_v) langs evalueringsslengden
R_t og R_{\max}	$R_t = R_p + R_v \text{ } (\mu\text{m})$	Avstanden mellom høyeste topp og laveste dal. Kan bli sett opp mot R_z . I motsetning til R_{\max} , må ikke høyeste topp og laveste dal ligge innenfor samme segment ved bruk av R_t
P_c	$P_c = \frac{\text{Unit length (1 cm)}}{S_m} \left(\frac{\text{peaks}}{\text{cm}} \right)$	"Peak count" er antall topper som er innenfor et valgt "dead band" som er plassert over og under midtlinjen. Måler langs hele evalueringsslengden.
S_m	$S_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n S_i$	"Mean Spacing" mellom "peaks" ved midtlinjen, hvor "peak" er høyeste punktet av profilen som krysser både over og under midtlinjen

Figur 2 viser en enkel skisse over parametrene S_m , R_a og R_{\max} . Den nederste horisontale linjen representerer midtlinjen. I motsetning til figur 3 og 4 er det ikke tatt hensyn til ulike segmenter langs evalueringsslengden [29].



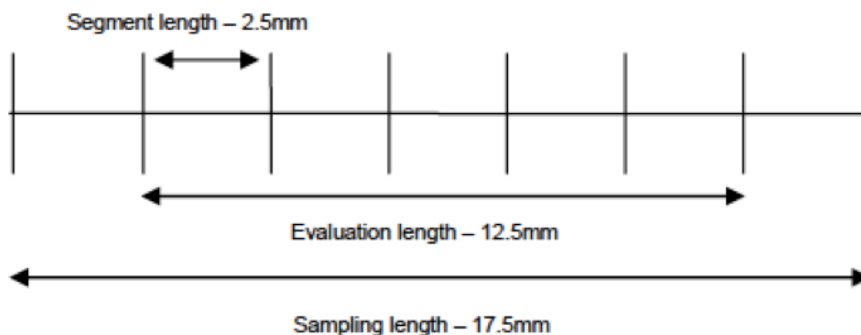
Figur 2: En enkel skisse over parametrene S_m , R_a og R_{\max} . Den nederste horisontale linje representerer midtlinjen. Figuren er hentet fra Marghalani [29].

For å få en forståelse av overflatetopografien og hvordan de ulike ruhetsparameterene fungerer, er det viktig å vite hvordan de ulike parameterne blir målt. Tabell 2 gir en kort forklaring av begrepene som er vist i figur 3 og 4, og som er benyttet til å forklare de mest relevante ruhetsparameterene i tabell 1 over [28, 30]. Disse begrepene blir også benyttet når profilometeret skal stilles inn for å måle overflateruheten.

Tabell 2: Oversikt over sentrale begreper for måling av overflateruhet. Disse er også vist i figur 3 og 4.

Begrep	Forklaring
Mean line	En linje plassert midt mellom høyeste topp og laveste dal langs evalueringsslengden. Kallt midtlinjen.
Dead band	Linjene over og under midtlinjen, som en overflatelinje må krysse (i begge retninger) for å kunne beregnes som en "peak". Kallt dødsone.
Segment length/ cut off length	Lengden av et segment. Blir også kalt cut-off length. For profilometeret blir denne valgt ut på bakgrunn av antatt ruhet av en overflate.
Sampling segment (N)	Er områder som deler opp evalueringsslengden, og som mange ruhetsparameterer måles innenfor. Er ofte ønskelig med 5 stykker.
Evaluation length	Består av N segmenter, og er området som benyttes for å måle/definere ruheten. Cut-off lengde multiplisert med N resulterer i evalueringsslengde.
Sampling length	Lengden av N+2 segmenter som representerer overflaten som skal måles ruhet av. Som regel 7.

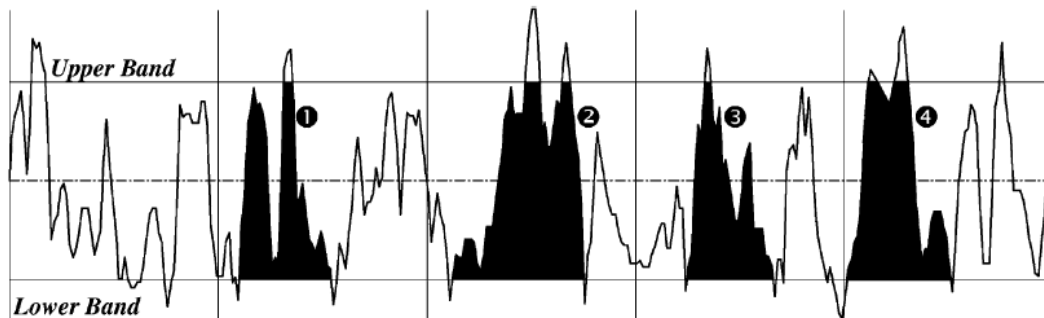
Figur 3 viser noen av de sentrale begrepene som inngår når ruheten måles over et område. Evalueringsslengden i figuren representerer 5 segmenter (N), og hvert segment er lik cut-off lengden. Sampling length representerer 7 segmenter (N), hvor første og siste segment er det som skiller sampling length fra evalueringsslengden [27].



Figur 3: Viser hvordan ruheten blir målt langs en overflate i forhold til segmenter og evalueringsslengde. Tallverdiene representerer ikke et standard oppsett for de ulike parameterne. Figuren er hentet fra Ward [27].

Roper [28, 30] og Ward [27] har sett nærmere på hvordan P_c og R_{max} virker inn på en gitt overflate. Roper fant blant annet ut at en økning av R_{max} og P_c vil kunne medføre økt adhesjon og en økt ytelse av belegget. En økning av P_c kan bli gjort ved å benytte minst mulig partikler under overflatebehandlingen, men at andre parametere må tas hensyn til for å oppnå ønsket R_{max} . Hardheten av partiklene har også en innvirkning, og det er antydning at harde partikler gir høyere P_c . Videre antydning Roper at fuktingen til malingen spiller en svært viktig rolle i en kombinasjon med overflatetopografien [28, 30]. Sørensen har også vist at det ønskelig med høy P_c gjennom små og harde partikler, men at det ikke er gunstig med for høy P_c på grunn av fukting [5].

Figur 4 viser hvordan peak count blir beregnet i forhold til øvre og nedre dødssone. For at en topp skal kunne betegnes som en peak, må den krysse både øvre og nedre dødssone, innenfor samme segment [28, 30].



Figur 4: Viser hvordan peak count blir beregnet innenfor nedre og øvre dødssone. Figuren viser også midtlinjen som en stiplet linje midt mellom øvre og nedre dødssone, og hvordan de fem ulike segmentene blir delt opp langs evalueringsslengden. Figuren er hentet fra Gadelmawla [23].

Litteraturen tar også for seg egne ruhetsparametere for 3D-overflater, såkalte S_a -parametere, som antyder at R_a ikke gir tilstrekkelig informasjon. Chen viste derimot en lik trend mellom S_a - og R_a -verdier ved like målinger [26]. S_a -parametrene går også igjen i ISO 8501, som tar for seg krav til ruhet under blåserensing [31].

2.3 Tortuositet

Problemet med å benytte tradisjonelle R_a -verdier er at de ikke tar hensyn til den faktiske topografien av en gitt overflate. R_a tar bare hensyn til toppene og ikke avstanden til toppene. Quinsata, Sabourinb, og Lartiguec tar for seg spesielt to ulemper med å benytte tradisjonelle ruhetsparametere [25]:

- Overflater som i utgangspunktet er ulike kan få like R- verdier
- R-parameterne gir bare informasjon om ruheten over en retning og ikke hele overflaten

Dette er spesielt relevant for enkle målemetoder, slik som stylus profilometer benyttet i denne oppgaven. 3D-mikroskop kan måle ruheten over et større areal enn profilometeret, og gir i tillegg et 3D-bilde av topografien som kan være til hjelp ved analyse av ulike overflater.

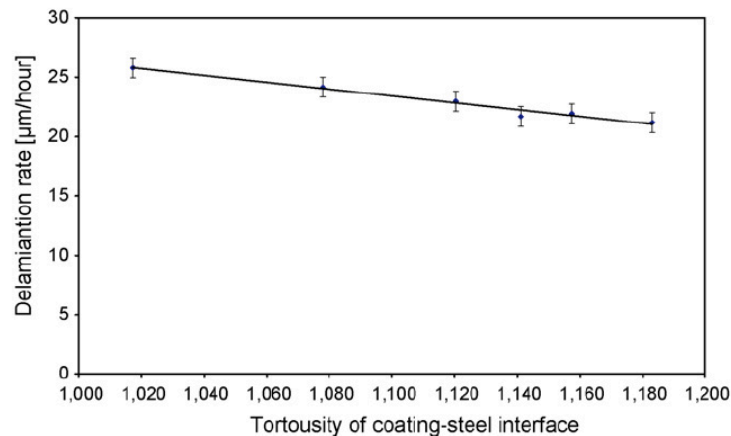
For å kunne benytte tradisjonelle ruhetsparametere på en best mulig måte er det nødvendig å strekke ut topper og daler, og se på den faktiske overflaten. Mye litteratur trekker frem begreper som tar for seg dette konseptet, slik som Wenzel ruhetsfaktor [4, 19, 32] og tortuositet [5]. Mens tortuositet (4) tar for seg sammenhengen mellom faktisk lengde (L) og nominell lengde (L_0), tar Wenzel (5) for seg sammenhengen mellom faktisk overflateareal (A) og nominelt overflateareal (A_0)

$$\text{Tortuositet } (\tau) = \frac{L}{L_0} \quad (1)$$

$$\text{Wenzel ruhetsfaktor } (r) = \frac{A}{A_0} \quad (2)$$

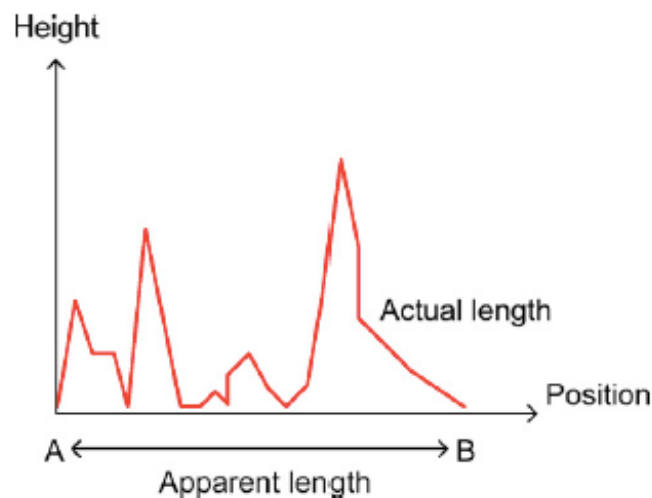
I denne oppgaven er det lagt størst vekt på tortuositet (τ), og valgt å benytte dette begrepet for både målinger gjort langs en linje og målinger gjort over et areal. Dette er ikke et nytt begrep innenfor overflateteknologi. Blant annet Sørensen har tatt for seg dette begrepet. Sørensen så på hvordan tortuositet virker i forhold til tradisjonelle ruhetsparametere, samt hvordan tortuositet påvirker ulike nedbrytningsmekanismer. Sørensen kom frem til en sammenheng mellom grad av katodisk avbinding

og tortuositet som viste at økt tortuositet ga lavere katodisk avbinding, noe som er vist i figur 5 under [5].



Figur 5: Viser at økt tortuositet kan være med på å gi redusert hastighet av katodisk avbinding. Plottet er hentet fra Sørensen [5].

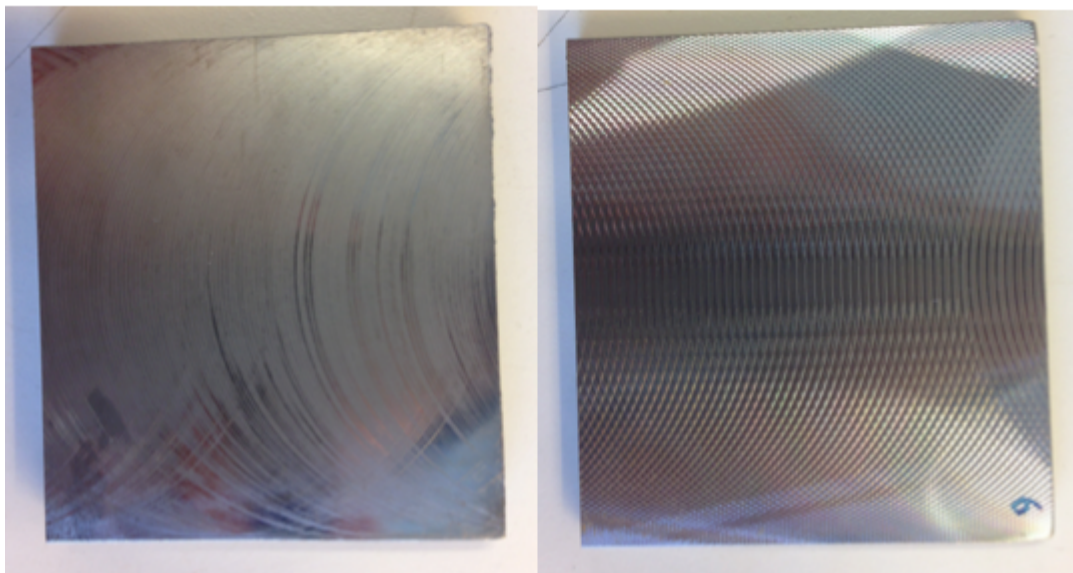
Det er videre antatt at tortuositeten av en overflate er bestemt av kornstørrelsen og hastigheten av partiklene benyttet til å blåserense overflaten, hvor finere partikler kan være med på å gi høyere tortuositet [5]. Jamali og Mills har sett på den faktiske overflaten opp mot nominell overflate, ved ulike overflatebehandlinger. Denne studien viste at for en blåserenset overflate var det faktiske overflatearealet over dobbelt så stort som det nominelle overflatearealet [33]. Figur 6 er hentet fra Sørensen og viser en enkel skisse av konseptet for tortuositet, altså sammenhengen mellom faktisk lengde og nominell lengde [5].



Figur 6: Enkel skisse av tortuositet, som viser nominell lengde opp mot faktisk lengde. Figuren er hentet fra Sørensen [5].

2.4 Maskinert overflate

Formålet med oppgaven var å se på korrosjonsbeskyttelse av maskinerte overflater. En maskinert overflate blir ofte referert til som en glatt overflate, men videre i oppgaven blir begrepet maskinert overflate benyttet. Som nevnt innledningsvis er grunnen til at det benyttes en maskinert overflate, at det er ønskelig med en overflate som lett kan bevege seg i forhold til andre overflater eller som kan opprettholde funksjonelle krav til tetning og montering. Maskinering er en prosess hvor uønsket materiale blir fjernet fra et arbeidsstykke, og resultatet er en glatt og fin overflate. Som ved andre overflater eksponert på skip og offshore installasjoner, må maskinerte overflater beskyttes mot korrosjon og slitasje, for eksempel ved maling. Sammenlignet med en blåserenset overflate vil den maskinerte overflaten være mer utsatt for svikt av belegget og korrosjon. Det finnes et stort mangfold av maskineringsprosesser, hvor fresing, dreining, sliping og drilling er de mest vanlige metodene [34-36]. I denne oppgaven er det blitt benyttet endeplanfresing, plandreining og valsefresing. Figur 7 viser to prøver som er blitt endeplanfrest, men hvor selve maskineringen er gjort ved ulike parametere. Figuren viser at det er mulig å få relativt ulik overflate, selv om det er blitt benyttet samme metode. Det er også blitt vist at det er mulig å oppnå ulike R_a -verdier ved bruk av samme maskineringsprosess, og at maskineringsprosesser som gir ulike overflatestruktur likevel kan gi like R_a -verdier [18].



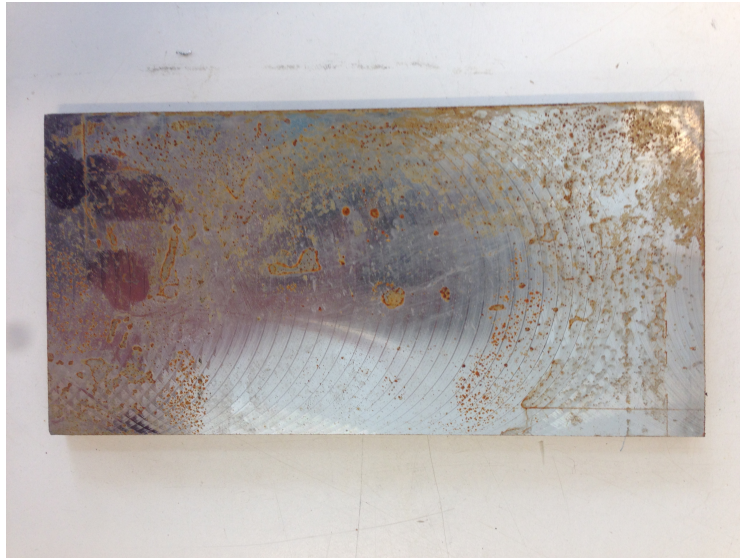
Figur 7: Viser to prøver som er endeplanfrest, men som likevel har en relativt ulik overflatetopografi.

To artikler har sett nærmere på maskineringsprosesser og sett på to metoder for sliping; tilfeldig sliping og tilpasset sliping [3, 6]. De kom frem til at tilpasset, eller retningsbestemt, sliping ga høyere R_a enn tilfeldig sliping, og at ruheten økte ved bruk av grove partikler i slipeprosessen. Det ble derimot funnet at tilfeldig sliping ga en høyere adhesjonsstyrke ved samme ruhetsverdier som tilpasset sliping [3]. Dette er relevant i forhold til nedbrytning av det korrosjonsbeskyttende belegget, hvor katodisk avbinding er en sentral mekanisme.

En studie gjennomført av Melchers og Jeffrey så på effekten av overflateruhet på korrosjonshastigheten av umalte overflater ved ulike temperaturer. De tok for seg sju ulike overflater med forskjellige overflateruheter, både ved 4 °C og 27 °C. Studien viste at i starten var det størst forskjell i korrosjonshastighet mellom de ulike overflatene, mens etter ca tre måneder jevnet det seg ut og korrosjonshastigheten holdt seg relativt parallell. Det var også større forskjell i korrosjonshastighet mellom de ulike overflatene ved lav temperatur, enn ved høy temperatur [37]. Det vil være interessant å se om den maskinerte overflaten er mer utsatt for korrosjon enn for eksempel en blåserenset overflate.

2.5 Forbehandling av metalloverflater

Forbehandling kan grovt deles opp i avfetting og fjerning av rust. Avfetting må til på alle overflater som skal bli påført et belegg, slik at smuss, forurensinger og fett blir fjernet. Avfetting kan for eksempel bli gjennomført med organiske løsningsmidler, alkaliske rensedmidler eller ved bruk av damp. Denne prosessen er ofte benyttet rett før belegget påføres en metalloverflate, og er en essensiell del for maskinerte overflater der blåserensing ikke er mulig. Ved maskinering av overflater, er det svært viktig med gode prosedyrer for hvordan overflaten vaskes og tørkes. Om det er dårlige prosedyrer vil overflaten kunne korrodere. Figur 8 viser en prøve som har startet å korrodere like etter at den er blitt maskinert, som følge av utilstrekkelige prosedyrer for vasking og tørking [1, 2, 14, 38].

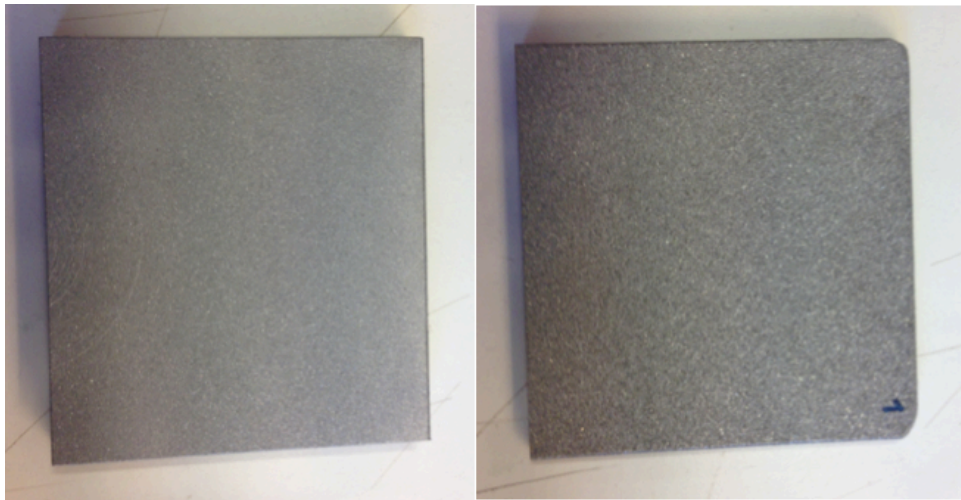


Figur 8: Viser hvordan en overflate har startet å korrodere som følge av dårlige prosedyrer for vasking og tørking etter maskinering.

Rust kan fjernes ved blåserensing eller ved beising. Blåserensing er en prosess hvor rust blir fjernet, samt at overflaten får en høyere overflateruhet. Harde partikler sendes ved hjelp av trykkluft mot en overflate, ved bestemte hastigheter og avstander. Denne metoden er anbefalt å benytte før maling og termisk sprøyting av en overflate. Overflaten får økt overflateareal og økt mulighet for at adhesjonskrefter kan bindes sammen. I tillegg vil økt ruhet medføre større absorpsjon av sideveiskrefter i malingen. Beising er en kjemisk prosess som blir gjennomført i et bad av beisesyre, og skal alltid benyttes før varmforsinking av overflater. Denne metoden er bedre for fjerning av salter, hvor blåserensing ikke alltid strekker til. I tillegg kan en shopprimer påføres, som beskytter overflaten mot korrosjon før malingsbelegget blir påført [1, 2, 14, 38]. Både ISO 12944-5 og NORSOK M-501 angir retningslinjer for ståloverflater som skal beskyttes med et belegg, og aktuelle forbehandlinger [39, 40]. I tillegg vil malingsprodusenter komme med retningslinjer for hvordan hvert enkelt beleggssystem skal forbehandles, ofte opp mot relevante standarder slik som ISO 8501 og dens S_a -verdier [31].

Som nevnt innledningsvis er ikke blåserensing aktuelt for systemene i denne oppgaven på grunn av funksjonelle krav til tetning og montering. Det vil likevel være nyttig å gjennomføre parallelle tester på blåserensede prøver, for å ha disse som referanser til de maskinerte overflatene. Når en prøve blir blåserenset vil vinkel og avstand mellom prøve og dyse, hastighet av trykkluft, valg av partikkelstørrelse og type partikler være noen av parameterne som virker inn på sluttresultatet. Variasjon av disse parametrene vil kunne gi ulike overflatetopografier. I denne oppgaven er det benyttet partikler av aluminiumsoksid (Al_2O_3) og jerngritt (G24). Figur 9 på neste side viser to overflater som er blåserenset med henholdsvis aluminiumsoksid og jerngritt. De er begge av tilnærmet lik partikkelstørrelse, men gir både ulik overflateruhet og overflatetopografi. Egenskapene

til de ulike partiklene, samt prosessen for blåserensingen kan være en forklaring på dette. For eksempel så er jerngritt hardere enn aluminiumoksid [41]. Det er blitt hevdet at jo finere partikler som blir benyttet, jo glattere overflate er det mulig oppnå [42].

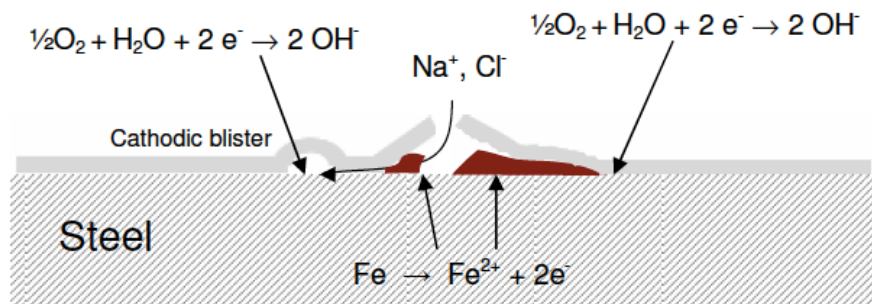


Figur 9: Prøven til venstre er blåserenset med aluminiumoksid (Al_2O_3), og prøven til høyre er blåserenset med jerngritt (G24). Det er blitt benyttet partikkelstørrelser på henholdsvis 0,5-1 mm og 0,6-1 mm.

2.6 Nedbrytning av beskyttende belegg

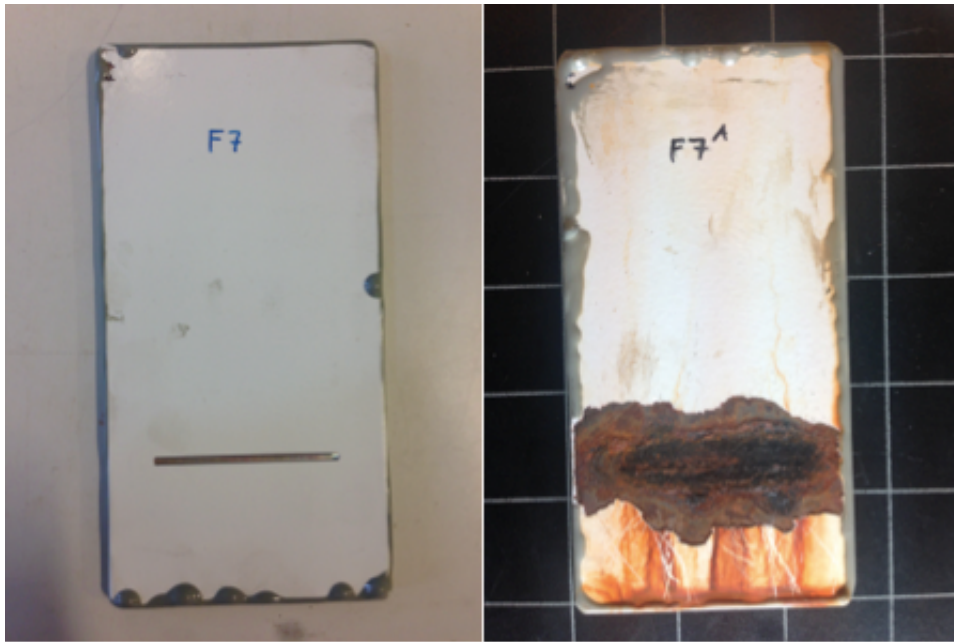
2.6.1 Korrosjonskryp

Tap av adhesjon til ståloverflaten er blitt sett på som den viktigste feilmekanismen for det beskyttende belegget [43], men gjennom et fordypningsprosjekt høsten 2014 ble det kommet frem til at korrosjonskryp er vel så viktig, om ikke en viktigere feilmekanisme for det beskyttende belegget på maskinerte overflater. Korrosjonskryp er en utbredt feilmekanisme av malte overflater, der stål er det mest utsatte materialet. Korrosjonskryp oppstår i skader i belegget i form av for eksempel sprekker, enten fra slitasje eller mekanisk påkjenning, og stålet under belegget kommer i direkte kontakt med de korrosive omgivelsene. Korrosjon vil da starte på det eksponerte stålområdet, og korrosjonen vil gradvis krype inn under belegget hvor skaden har oppstått. Dette kan observeres ved at rust siver ut fra skadeområdet, og belegget rundt skaden har fått nedsatt adhesjon [1, 2, 14, 38]. Figur 10 viser en oversikt over prosessen og mekanismene bak korrosjonskryp. Det alkaliske miljøet dannet som følge av katodisk reduksjon av oksygen og vann, beskytter stålet mot korrosjon. På grunn av at belegget mister adhesjon omgjøres katodiske områder til anodiske områder, og korrosjon av stålet er et faktum. Det er antatt at variasjon av tørt og våt miljø, samt klorid-ioner kan være med på å fremheve effekten av katodisk til anodisk område [44]. I det tilhørende fordypningsprosjektet høsten 2014 ble det også observert blærer rundt skåret under test av korrosjonskryp. Slike blærer er også vist skjematisk i figur 10 under [17, 44].



Figur 10: Viser skjematisk oversikt av prosessen for korrosjonskryp under et belegg. Viser også hvordan blærer kan forekomme under belegget [44].

Figur 11 viser hvor alvorlig korrosjonskryp kan være i form av en maskinert stålprøve før og etter eksponering i 8 uker, i en akselerert korrosjonstest. Belegget på denne prøven opprettholder verken krav til robusthet eller levetid [17].

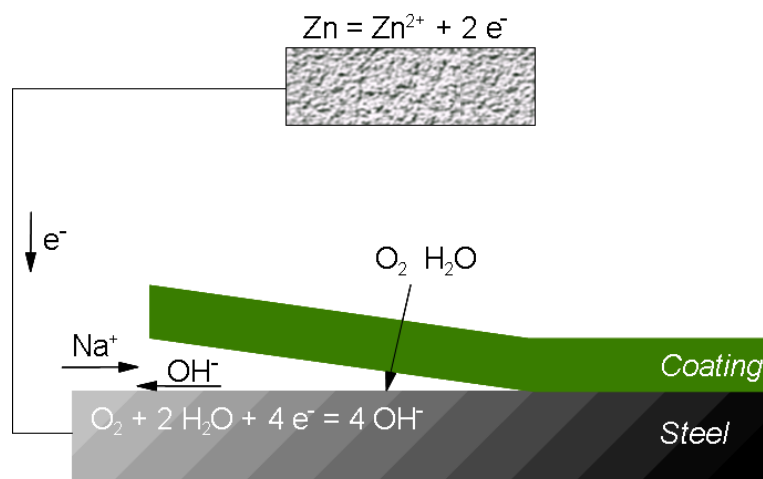


Figur 11: Viser en maskinert stålprøve før og etter at den har vært eksponert i korrosjonstest i 8 uker [17].

Omfanget av korrosjonskryptet avhenger av materialvalg, belegg og miljø. Det er antatt at god adhesjon mellom ståloverflaten og belegget er essensielt for å unngå korrosjonskryp. Det er også viktig at belegget har høy slagfasthet, slik at faren for skader i belegget blir redusert. Det er grunnen i beleggssystemet som vil være viktigst i forhold til korrosjonskryp [1, 2, 14, 38]. I tillegg til å måle omfanget og hastigheten til korrosjonsprosessen, vil det også kunne være interessant å se på hvilke korrosjonsprodukter som oppstår på ulike prøver. For det tilhørende fordypningsprosjekt høsten 2014 ble det observert to ulike farger på korrosjonsproduktene fra test av korrosjonskryp. Fargene var henholdsvis svart og rød-brun, og oppstod på prøver av ulikt grunnmateriale og ulike maskineringsprosesser. Rød-brune produkter er hematitt (Fe_2O_3), mens svarte produkter er magnetitt (Fe_3O_4) [17, 45, 46].

2.6.2 Katodisk avbinding

Katodisk avbinding er en av hovedmekanismene for nedbrytning av organiske belegg på ståloverflater hvor katodisk beskyttelse er benyttet. Katodisk avbinding, eller delaminering, er kort sagt tap av adhesjon mellom et belegg og et substrat, noe som medfører redusert levetid av belegget. Elektrokjemiske reaksjoner skjer på overflaten som følge av en skade i belegget. Katodisk reduksjon av oksygen til hydroksid ioner på katodiske områder under belegget sammen med vann, gjør at det blir dannet et alkalisk miljø. Dette fører til at belegget mister adhesjon til overflaten [1, 2, 5, 14, 38]. Siden at belegget mister adhesjon til belegget vil det kunne medføre en økt mulighet for at det oppstår eksponert ståloverflate, noe som gjør det mulig å anta at katodisk avbinding også øker mulighetene for korrosjonskryp, og dermed vil være en kritisk feilmekanisme. Det er blitt antydnet at når graden av katodisk avbinding øker, så minker graden av korrosjonskryp [47]. Dette er svært interessant med tanke på denne oppgaven. Som nevnt i kapitlet over var også prosessen bak korrosjonskryp oppstått på grunn av dannelsen av et alkalisk miljø og at belegget mistet adhesjon til overflaten. Det er viktig å påpeke at dette bare gjelder i atmosfære, da det ikke vil oppstå korrosjonskryp som følge av katodisk avbinding subsea, siden systemet er under katodisk beskyttelse [38, 47]. Figur 12 på neste side viser en skjematisk oversikt av prosessen og mekanismene bak katodisk avbinding.



Figur 12: Viser katodisk avbinding mellom en ståloverflate og det beskyttende belegget [38].

Det ble funnet mye litteratur som tok for seg katodisk avbinding av beskyttende belegg [5, 6, 43, 48-50]. Litteraturen antyder at en økning i overflateruhet vil øke adhesjon mellom et belegg og en overflate, og dermed redusere katodisk avbinding [5, 6]. Som nevnt tidligere så også Sørensen på effekten av tortuositet på katodisk avbinding, og han fant ut at en økning i tortuositet ville kunne være med på å redusere graden av katodisk avbinding [5]. Det ble også antydnet at overflatestrukturen, for eksempel hvordan overflaten er blitt maskinert, spiller en viktig rolle, og at det er et punkt hvor videre økning av ruhet vil få negativ innvirkning med hensyn til katodisk avbinding [6]. Det finnes flere tiltak for å unngå at katodisk avbinding oppstår. Johnsen tar for seg tre tiltak for hindre dette; høy filmtykkelse, aluminiums-pigmenter i grunningen, samt unngå lave potensialer ved offeranodene [38].

Litteratur har også sett på hvordan oksygeninnholdet i elektrolytten, type elektrolytt og overflateruhet virket inn på katodisk avbinding [51]. Dette er bare en av flere studier som har tatt for seg parametere for katodisk avbinding [10]. Som nevnt lengre opp er det en viss usikkerhet rundt innvirkning av filmtykkelsen på katodisk avbinding [51, 52], men det ble valgt å holde en jevn filmtykkelse over alle prøvene slik at dette ikke ble en avgjørende parameter. Det er i tillegg antatt at innvirkningen av filmtykkelse i hovedsak avhenger av egenskapene til valgt maling, og at dette er noe av grunnen til ulike resultater på tvers av forskningen [51]. Et fenomen som dukket opp for å unngå eller redusere katodisk avbinding på malte ståloverflater var Red Mud. Dette er et avfallsstoff som fungerer som en blokkering når klorider er tilstede i alkaliske miljøer, og på denne måten hindrer katodisk avbinding [49]. Dette er ikke et fenomen som blir tatt hensyn til videre i denne oppgaven, da det er usikkerhet om relevansen opp mot problemstillingen.

3 Eksperimentelt

3.1 Prøvespesifikasjoner

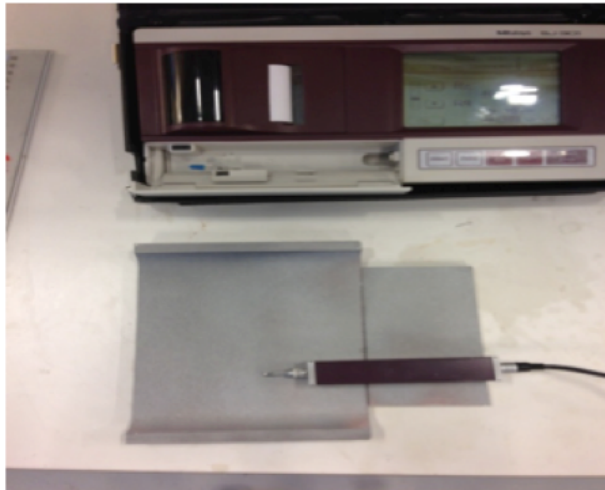
Tabell 3 viser en kort oversikt over de fremstilte prøvene, samt beleggsystem og filmtykkelser. Det ble benyttet fire ulike maskineringsmetoder, og fire ulike blåserensede overflater. Videre ble det brukt fire ulike beleggssystemer, to med aluminium i grunningen og to uten aluminium i grunningen. I tillegg til prøvene oppgitt i tabell 3 ble et sett med prøver fra fordypningsprosjektet høsten 2014 testet for våt adhesjon. Prøvene er delt inn etter substratmateriale, hvor D1 er brukt til test av adhesjon, mens de resterende prøvene ble benyttet for test av katodisk avbinding, korrosjonskryp, overflateruhet og tortuositet. B1, C1, og D1 er av lik maskinering, endeplanfrest fra SINTEF.

Tabell 3: Oversikt over de aktuelle prøvene, hvor informasjon om bulkmateriale, overflatebehandling, beleggssystem og tørr filmtykkelse er oppgitt. Tallene i parentes for prøvene B2-B5 representerer partikkelstørrelse i mm.

Prøve	Materiale	Maskinering	Beleggssystem	
			Type	Total filmtykkelse (μm)
A1	St 52	Valsefrest	Jotamastic 90 Al Jotamastic 90 Al	288,5
A2		Plandreid	Penguard Tiecoat Jotamastic 90 Al	
A3		Endeplanfrest	Jotamastic 90 Al	
B1	St 55	Endeplanfrest (SINTEF)	Jotamastic 87 Al Jotamastic 87	260,5
B2		Blåserenset (0,2-0,3) Al_2O_3		
B3		Blåserenset (0,3-0,425) Al_2O_3		
B4		Blåserenset (0,5-1) Al_2O_3	265,3	
B5		Blåserenset (0,6-1) G24		
C1	St 50	Endeplanfrest (Hanefett)	Jotamastic 87 Jotamastic 87	
D1	St 37	Endeplanfrest (Adhesjon)		

3.2 Overflatekarakterisering av ulike overflater

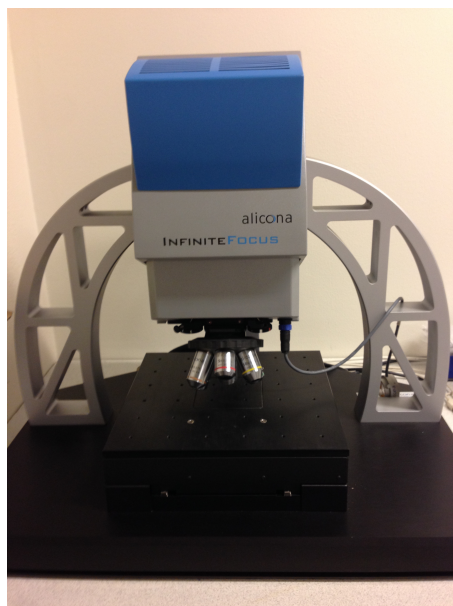
Overflatene ble karakterisert på to måter; måling av overflateruhet og måling av tortuositet. For måling av overflateruhet kunne det skilles mellom ikke-kontakt og kontaktmålemetoder. Stylus profilometer er en kontaktmålemetode hvor en nål fysisk blir dratt over prøven med bestemte innstillinger og gir ut verdier i form av R_a , R_z , R_t , RP_c og RS_m . Det var viktig at stylus ble plassert slik at den dro over prøven i forhold til overflatestrukturen, som for eksempel rillene laget fra maskineringsprosessen. Nålen måtte dermed ikke gå langs en bølgedal, men på tvers av riller. Det ble gjort tre målinger på hver prøve, og gjennomsnittet av disse er rapportert. Figur 13 på neste side viser hvordan det aktuelle profilometeret er satt opp for måling. ISO 4287 ble benyttet som en retningslinje for måling av overflateruhet [24].



Figur 13: Viser en oversikt over hvordan profilometeret blir satt opp for måling av overflateruhet.

For denne oppgaven ble det målt ruhet i to omganger. I første omgang ble det benyttet innstillinger ut fra et standard oppsett gitt av profilometeret. Det ble da valgt en cut-off lengde basert på forventet ruhet av de ulike overflatene. I den andre testomgangen ble det bare tatt hensyn til evalueringsslengden og de resterende innstillingene var mer tilfeldige. Dette var for å se om ruheten av de ulike overflatene endret seg når evalueringsslengden ble redusert. Det ble da valgt evalueringsslengder på 4,0 mm, 0,8 mm og 0,3 mm. Tabell 11 i appendiks B, viser hvordan innstillinger som ble valgt for de to testomgangene.

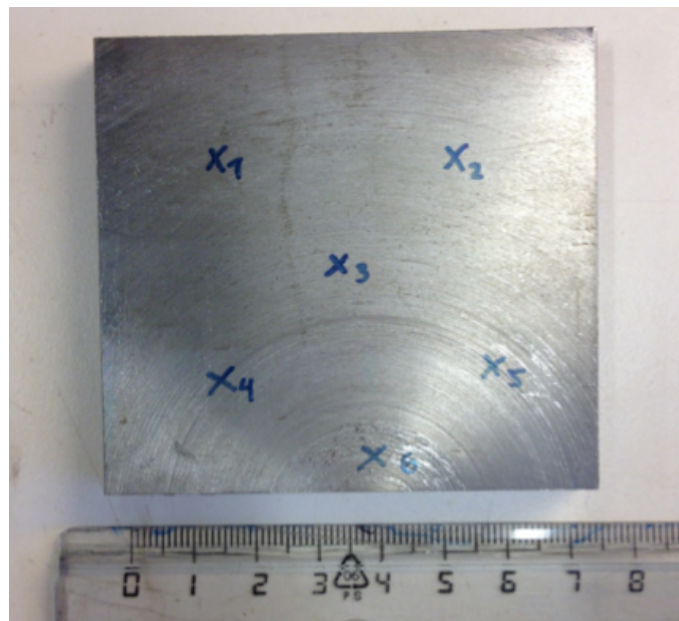
IFM (Infinite Focus Microscope) er en ikke-kontakt målemetode for å finne overflateruheten. Det er et 3D-mikroskop og er vist i figur 14. På grunn av at IFM ikke er tilstrekkelig kalibrert for ruhetsparametere, samt at profilometeret er den mest brukte metoden for å måle ruheten over en linje ble ikke IFM benyttet til å måle overflateruheten, og alle verdiene gitt videre i oppgaven er funnet ved bruk av profilometeret. I det tilhørende fordypningsprosjektet viste også målinger av ruhet fra IFM sprik fra målinger gjort ved profilometeret [17].



Figur 14: Viser Infinite Focus Microscope (IFM), som ble benyttet til å se på tortuositet og 3D-bilder av de ulike overflatene.

IFM ble derimot benyttet til å måle tortuositet (τ) og ta 3D-bilder av overflatene. Det ble også benyttet to metoder for å måle tortuositeten. Den første metoden gikk ut på å måle over et større areal, og den andre metoden var å trekke fire relativt like linjer over det samme området. Det ble tatt målinger ved de samme tre punktene som ved måling av overflateruhet, som vist i figur 15, og gjennomsnittet av disse tre blir rapportert. Tabell 12 i appendiks B, viser innstillingene for de to valgte metodene. For måling over et areal ble det prøvd å holde et nominelt areal på $1,4 \text{ mm}^2$ på alle prøvene, mens det for måling over en linje ble prøvd å holde en bredde på $1,7626 \text{ }\mu\text{m}$ og en lengde på ca $1,0 \text{ mm}$. For hver overflate ble det tatt et 3D-bilde med fargeindekser.

Figur 15 viser hvor på prøven det ble målt henholdsvis overflateruhet og tortuositet. På grunn av at skåret til test av korrosjonskryp og katodisk avbinding lå mellom punkt x_1 og x_2 , var det gjennomsnittet av punkt x_1 , x_2 og x_3 som ble benyttet til å karakterisere overflaten. Punktene x_4 , x_5 og x_6 lå på en del av prøven som ikke var like utsatt korrosjonskryp og katodisk avbinding, og disse punktene ble derfor kun benyttet til å se hvor varierende ruheten var langs overflaten.



Figur 15: Viser en typisk prøve benyttet til de ulike testene, hvor punktene til måling av overflateruhet og tortuositet er merket med x_1 , x_2 og x_3 .

3.3 Overflatebehandling av aktuelle prøver

3.3.1 Blåserensing

Det ble i denne oppgaven sett på et utvalg av blåserenset prøver som skulle sammenlignes opp mot de maskinerte overflatene. Det ble benyttet to typer partikler for blåserensing; aluminiumsoksid (Al_2O_3) og jerngritt (G24). Prøvene som var blåserenset med jerngritt (G24) ble mottatt ferdigbehandlet av Triplex AS, mens prøvene med aluminiumsoksid ble blåserenset selv. Figur 16 viser apparatet benyttet for å blåserense prøvene med aluminiumsoksid. Prøvene ble lagt inn i kammeret og ønsket type sand ble lagt i beholderen under. Blåserensepistolen ble holdt i en 45° vinkel, ca 5-10 cm fra prøven. Det var viktig å bruke en jevn og rolig bevegelse, og sørge for at hele overflaten ble blåserenset. Da det ble skiftet mellom ulike sandpartikler var det viktig å fjerne gammel sand inne i kammeret, slik at denne ikke blandet seg med den nye sanden. Dette ble gjort ved hjelp av en trykkløst pistol.



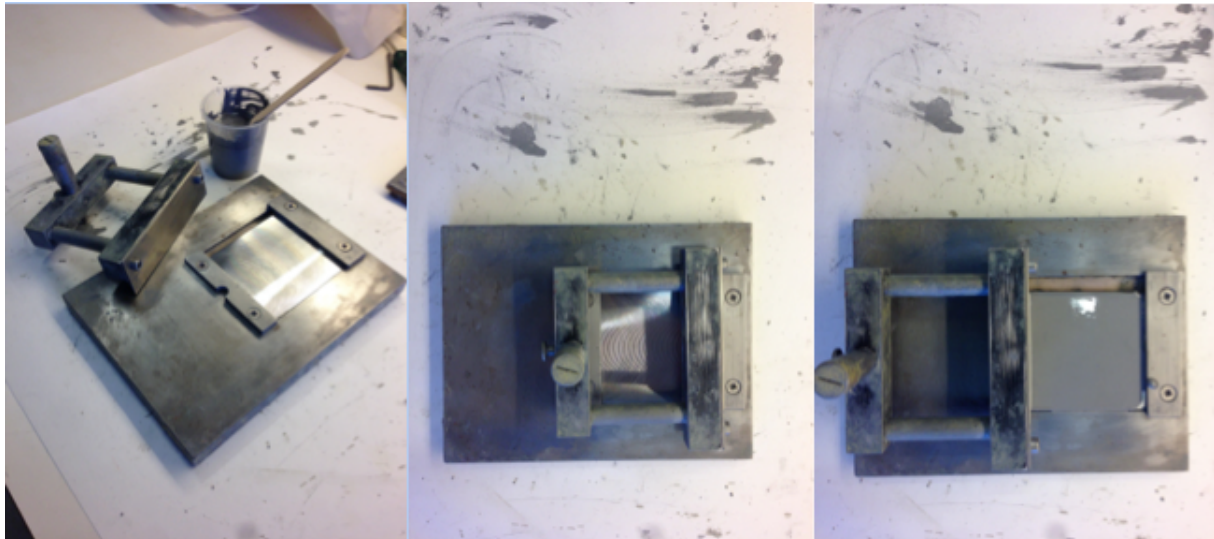
Figur 16: Apparatet benyttet for å blåserense prøvene B2, B3 og B4 med Al_2O_3 . Apparatet tilhører SINTEF, og blåserensing ble gjort selv.

3.3.2 Applikator

I motsetning til det tilhørende fordypningsprosjektet høsten 2014, hvor samtlige prøver ble mottatt ferdig malt, ble alle prøvene for denne oppgaven malt i laboratoriet hos SINTEF. Dette var for å kunne studere effekten av belegget, og for å ha et bedre grunnlag til å sammenligne prøver. Før prøvene ble malt var det viktig å rense prøvene for smuss og forurensinger. Dette ble gjort ved å skrubbe med en kost, i vann blandet med JIF [53]. Prøvene ble så dyppet godt i etanol [54], og deretter plassert i et stativ til tørking.

For å male prøvene ble det benyttet en applikator, konstruert av SINTEF, som er vist i figur 17. Denne består av to hoveddeler; fundament og applikator. Prøven ble lagt i fundamentet, og tyngden av fundamentet samt en svamp gjorde at prøven ble liggende slik den skulle. Prøvene måtte være 80

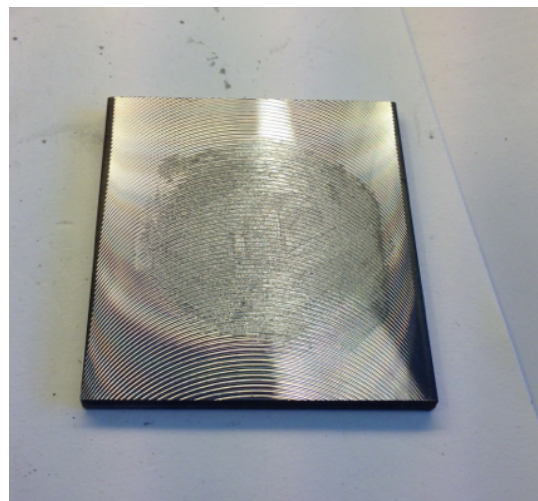
mm lang og 70 mm bred for å passe i formen. Applikatoren hadde en mikrometerskrue som bestemte filmtykkelsen, og en skrape som sørget for at det ble distribuert en jevn filmtykkelse på prøven. Figur 17 viser en prøve, før og etter at malingen er dratt utover. Mellom hvert lag herdet malingen i et døgn før neste strøk ble lagt på. Da siste strøket var påført, herdet prøvene en dag på benken og deretter to dager i et varmeskap på 40 °C. Tørr filmtykkelse ble målt for hvert lag ved hjelp av Elcometer 256 FN, og ISO 2808 ble brukt som retningslinje [55].



Figur 17: Til venstre er applikatoren og fundamentet. Bildet i midten og til høyre viser en prøve før og etter at malingen er dratt utover.

Det var svært viktig å rengjøre de ulike delene underveis. Om maling ble liggende i kanter og overflater hvor prøven skulle ligge eller hvor applikatoren skulle bevege seg, ville det kunne medføre at filmtykkelsen ble ujevn. For å rengjøre utstyret ble det brukt et løsningsmiddel av typen Jotun Tynner nr. 17 [56]. Etter hver dag med maling, ble alle delene skrudd fra hverandre og rengjort ekstra godt. Dette betydde at applikatoren måtte kalibreres for hver dag den skulle bli benyttet.

Et sett med prøver ble også påført et tynt lag med hanefett før de ble malt. Hanefett, eller glisseal, er fett som benyttes til smøring og tetning av roterende og bevegelige deler, slik som lokket på en eksikator. Hanefettet er svært egnet til vakuum, er inert, inneholder ingen silikoner og tåler temperaturer mellom -40 grader og + 300 grader [57]. Hensikten med hanefettet var å få prøver med ekstra dårlig adhesjon, for å se hva adhesjonen betydde for korrosjonskryp og katodisk avbinding. Figur 18 viser en prøve som er påført et tynt lag med hanefett. Laget ble holdt så tynt som mulig og det ble bare smurt inn på midten av prøven, slik at malingen kunne hefte tilstrekkelig i kantene. Disse prøvene ble testet for tørr adhesjon før de ble satt inn i test av korrosjonskryp og katodisk avbinding.



Figur 18: Viser en prøve påført et tynt lag med hanefett. Disse prøvene ble senere malt med de aktuelle beleggsystemene.

3.3.3 Aktuelle belegg

Malingene som er aktuelle for denne oppgaven er Jotamastic 90 Aluminium, Jotamastic 87 Aluminium, Penguard Tiecoat 100 og Jotamastic 87. Tabell 4 viser en oversikt over malingene, samt bruksområder, egenskaper og typisk tørr filmtykkelse [58-62]. ISO 2808 ble benyttet som retningslinje for tørr og våt filmtykkelse [55]. I tillegg til malingene gitt i tabellen under, ble et sett med prøver fra fordypningsprosjektet høsten 2014 testet for våt adhesjon.

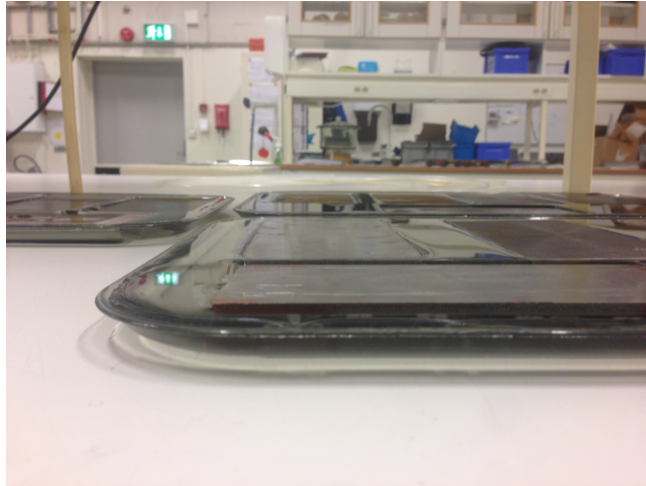
Tabell 4: Oversikt over de aktuelle malingene for denne oppgaven, samt bruksområder, egenskaper og tørr filmtykkelse.

Maling	Bruksområder	Egenskaper	Typisk tørr filmtykkelse (μm)
Penguard Tiecoat 100 (PGTC 100)	På stål som sealer over uorganiske sinksilikater, TSZ og galvanisert stål. Grunning i systemer i atmosfærisk miljø.	God fleksibilitet. Veldig god vannmotstand og slitestyrke. Glimrende kjemisk motstand.	35
Jotamastic 87 (JM87)	Områder ved høy korrosivitet (offshore) og krav til lang levetid. Fungerer som grunning, midtstrøk, toppstrøk og alene.	God fleksibilitet. Veldig god slitestyrke og kjemisk motstand. Glimrende vannmotstand. Lang levetid.	200
Jotamastic 87 Aluminium (JM87Al)	Områder ved høy korrosivitet (offshore) og krav til lang levetid. Fungerer som grunning, midtstrøk, toppstrøk og alene. Spesielt egnet for subsea.	Aluminium gir ekstra korrosjonsmotstand, vannmotstand, motstand til katodisk avbinding og fleksibilitet.	200
Jotamastic 90 Aluminium (JM90Al)	Områder ved høy korrosivitet (offshore) og krav til ekstra lang levetid. Fungerer som grunning, midtstrøk, toppstrøk og alene. Spesielt egnet for subsea.	Aluminium gir ekstra korrosjonsmotstand, vannmotstand, motstand til katodisk avbinding og fleksibilitet. God adhesjon til toppstrøk. Gir økt farge fleksibilitet.	125

3.4 Adhesjon

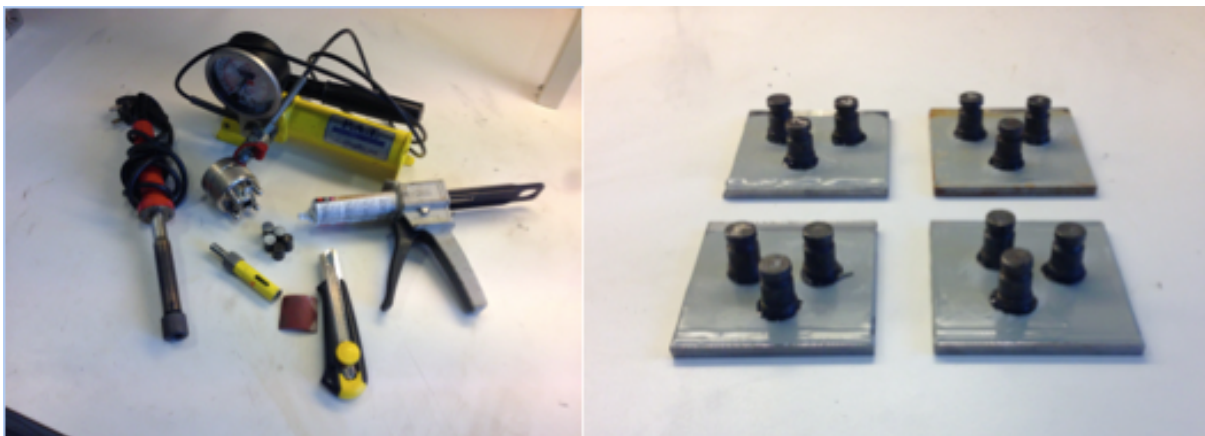
3.4.1 Pull-off, ISO 4624

ISO 4624 gir retningslinjer for bruk av pull-off [63]. Pull-off er en metode som bare måler adhesjonskreftene vinkelrett på prøven, og vil ikke si noe om motstand mot krefter som virker sideveis. Ulike belegg på maskinerte prøver ble testet for både tørr og våt adhesjon. For våt adhesjon ble prøvene lagt på et brett fylt med springvann i 7 dager, slik figur 19 viser. Prøvene for tørr adhesjon ble testet parallelt med prøvene for våt adhesjon.



Figur 19: Viser prøver liggende i springvann, for å simulere våt adhesjon.


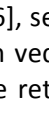
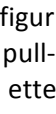
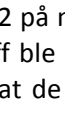
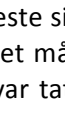
Selve metoden for pull-off ble gjennomført ved at tre dollier ble limt til beleggoverflaten, og etter at disse hadde herdet i et døgn, ble de trukket av ved hjelp av en hydraulisk pumpe. Det ble observert hvor mye trykk som var nødvendig for å trekke belegget av metalloverflaten og hvilke typer brudd som oppstod. Momenter som ble tatt hensyn til var at dollier og overflate måtte være ren for gammelt lim og forurensinger. Dette ble gjort ved hjelp av en varmetang, og ved å pusse dollier og overflate med sandpapir og rense dem i sprit. I tillegg var det viktig at limet herdet tilstrekkelig, og at område rundt dollier ble definert ved hjelp et risseverktøy før avtrekking. Det ble benyttet et epoksy konstruksjons lim, kalt DP 490 [64]. Resultatet ble lest av med MPa verdier, og bruddet ble karakterisert i forhold til aktuell standard [63]. ISO 20340 setter krav til at belegget ikke skal ha adhesivt brudd mellom substratet og grunningen, med mindre pull-off viser en verdi på under 5 MPa [65]. Figur 20 viser utstyret som ble benyttet for test av pull-off, samt dollier som er limt på et utvalg av malte overflater.



Figur 20: Bilde til venstre viser utstyret som ble benyttet for test av pull-off. Det er en varmetang, en hydraulisk pumpe, et risseverktøy, lim, en kniv, sandpapir og dollier. Bilde til høyre viser dollier limt på malte overflater.

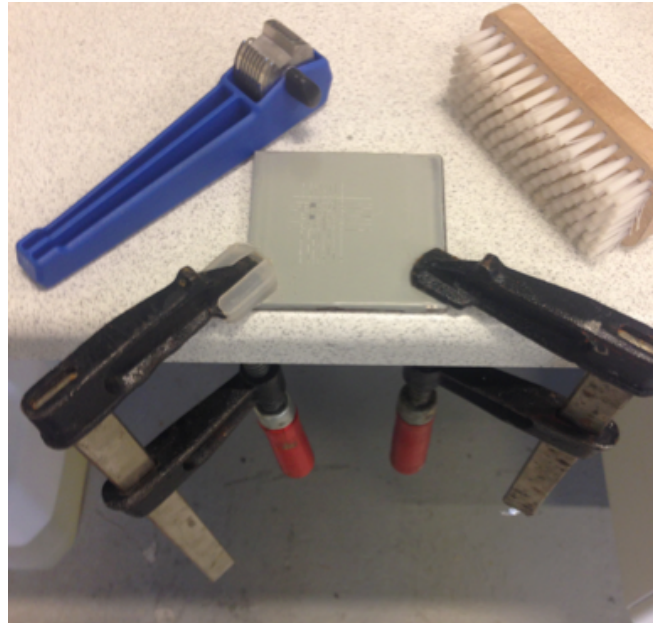
3.4.2 Cross-cut, ISO 2409

ISO 2409 gir retningslinjer for bruk av cross-cut [66]. Cross-cut måler adhesjonskreftene som virker sideveis, og vil sammen med pull-off kunne gi et mer sammensatt svar av adhesjon. I motsetning til pull-off som er en kvantitativ metode, så er cross-cut en kvalitativ metode. Prinsippet bak denne metoden er å ripe opp belegget slik at det er mulig å se hvor mye av belegget som flapper av, eller som lett kunne skrapes av. Rutenettet en ble sittende igjen med ble deretter sammenlignet opp mot den aktuelle standarden som kunne gi et svar på hvor god heften var. Standarden gir en score på 0-5, hvor 0 er perfekt adhesjon og liten avflaking, mens 5 er total avflaking av belegget i det bestemte området og var et mål på veldig dårlig adhesjon. Figur 21 viser et utklipp fra denne standarden og dens score-tabell.

Classification	Description	Appearance of surface of cross-cut area from which flaking has occurred (Example for six parallel cuts)
0	The edges of the cuts are completely smooth; none of the squares of the lattice is detached.	
1	Detachment of small flakes of the coating at the intersections of the cuts. A cross-cut area not significantly greater than 5 % is affected.	
2	The coating has flaked along the edges and/or at the intersections of the cuts. A cross-cut area significantly greater than 5 %, but not significantly greater than 15 %, is affected.	
3	The coating has flaked along the edges of the cuts partly or wholly in large ribbons, and/or it has flaked partly or wholly on different parts of the squares. A cross-cut area significantly greater than 15 %, but not significantly greater than 35 %, is affected.	
4	The coating has flaked along the edges of the cuts in large ribbons and/or some squares have detached partly or wholly. A cross-cut area significantly greater than 35 %, but not significantly greater than 65 %, is affected.	
5	Any degree of flaking that cannot even be classified by classification 4.	

Figur 21: Viser oversikt av score for testing av cross-cut. Til venstre er scoren angitt fra 0-5, mens til høyre er det mulig å se hva hver score representerer i forhold til avflaking [66].

Mellomrom og antall kniver på skjæreverktøyet kunne variere, og ble valgt ut fra tykkelsen av belegget i henhold til standarden. På grunn av filmtykkelse på 300 µm skulle det i utgangspunktet lages et kryss ved hjelp av en blyant med en enkel rissetupp, men på grunn av at dette ikke ga noen resultater ble det laget et gittersnitt med hjelp av et risseverktøy som vist i figur 22 på neste side. Det var viktig at prøven ble festet godt mot en flate ved hjelp av to skrutrekkere, da det ble benyttet stor kraft for å lage rissene [66], se figur 22 på neste side. Det ble målt cross-cut på paralleller til prøvene testet for pull-off, og som ved pull-off ble det målt både tørr og våt adhesjon. For våt adhesjon var det viktig å teste prøvene rett etter at de var tatt ut av vannet, slik at adhesjonskreftene ikke fikk hentet seg inn igjen.

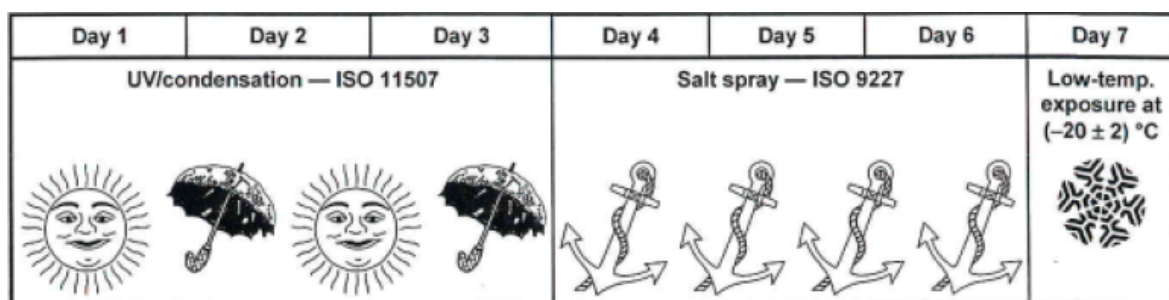


Figur 22: Viser hvordan en prøve blir festet for testing av cross-cut. Ser også gittersnitteren, samt kosten som blir benyttet for å fjerne løst belegg.

3.5 Korrosjonskryp

Denne testen har som hensikt å se på effekten av korrosjonskryp under et belegg, når en simulert skade i form av et skår blir laget på prøven. Dette er en akselerert testmetode og vil representere eksponering i ulike aggressive miljøer over en tidsperiode på flere år. ISO 9227 og ISO 11507 spesifiserer denne metoden [67, 68].

Prøvene hadde en dimensjon på 80x70 mm, og ble malt med applikatoren som forklart over. Det ble benyttet tre paralleller fra hvert prøvesett, slik at prøvene kunne bli sammenlignet opp mot hverandre. Baksiden og kantene ble beskyttet med Jotamastic 87 Aluminium. Det ble maskinert et skår i belegget på 2x50 mm helt ned til metallet. Prøvene ble eksponert i tre forskjellige kammer, over en tidsperiode som i utgangspunktet kunne strekke seg til 25 uker. Først ble prøvene lagt i et kombinert UV-lys og kondenskammer i tre dager, vekselvis i UV-lys i 4 timer ved 60 °C og kondensasjon i 4 timer ved 50 °C. Deretter ble prøvene flyttet over til et kammer med salttåke i tre dager, før de til slutt lå en dag nedfryst ved -20 °C. Testsyklusen er vist i figur 23. Prøvene ble vasket etter salttåke og nedfallet i salttåkekammeret ble kontrollert underveis.



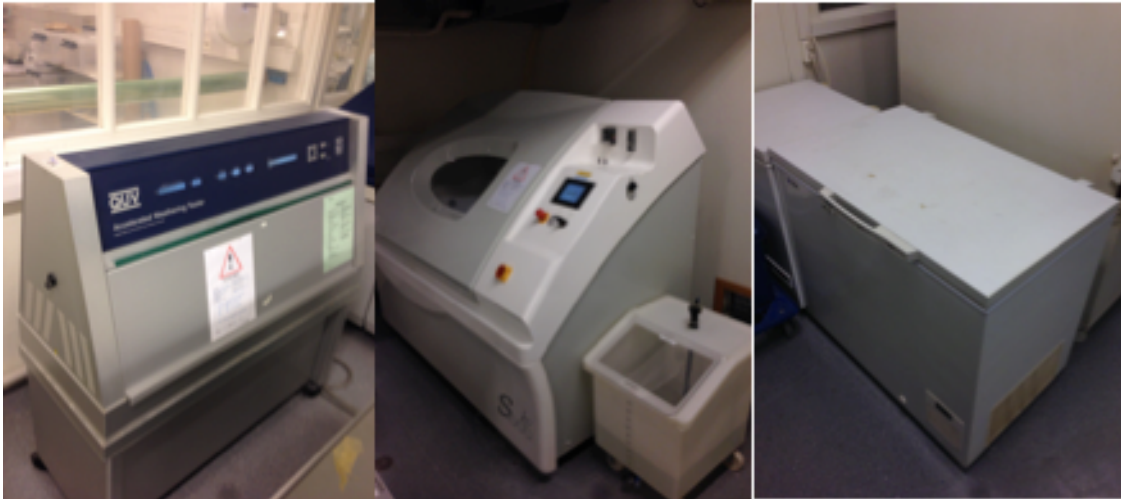
Figur 23: Prinsippskisse over prosessen for å teste malte prøver for korrosjonskryp [69].

Etter at prøvene hadde vært eksponert i ønsket tidsperiode ble graden av korrosjonskryp målt, korrosjonsutformingen evaluert og bilder tatt for dokumentasjon. Løst belegg rundt skåret ble fjernet med en skalpell, og lengden av korrosjonskrypet ble målt på tvers av skåret ved hjelp av et digitalt skyvelær i henhold til ISO 12944-6 og ligning 3 under [70]. ISO 20340 setter krav til maks 8 mm korrosjonskryp på prøver med grunning som ikke er Zn-basert, etter 25 uker med eksponering [65].

Det kunne i tillegg være katodisk avbinding i front av korrosjonskrypet, og noe som målt for seg selv og ikke tatt med i målingen av korrosjonskrypet.

$$\text{Korrosjonskryp over punkt } x = \frac{(\text{Målt lengde } x-2)}{2} \quad (3)$$

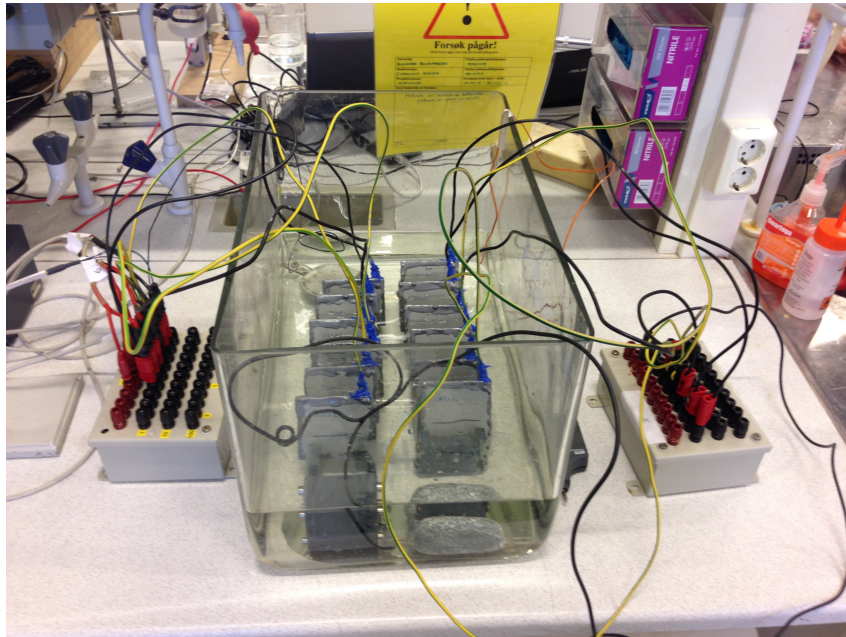
Som nevnt skulle prøvene i utgangspunktet stå i 25 uker, men på grunn av begrenset tid stod prøvene langt kortere. A-prøvene og B-prøvene i 8 uker, mens C-prøvene stod i 6 uker. Den valgte tidsperioden på 8 uker ble valgt på bakgrunn av det som ble gjort i det tilhørende fordypningsprosjektet høsten 2014. Figur 24 viser de ulike kamrene prøvene var eksponert i.



Figur 24: Viser de tre ulike kamrene benyttet for test av korrosjonskryp. Fra venstre: UV og kondens, salttåke og frys.

3.6 Katodisk avbinding

Det finnes en rekke standarder som tar for seg testing av katodisk avbinding [71, 72], men i denne oppgaven ble det valgt å ta for seg en generell fremgangsmåte benyttet ved SINTEF. Prøvene hadde en dimensjon på 80x70 mm, ble malt med applikator og hadde et skår ned til metallet med en dimensjon på 2x50 mm. Baksiden og kantene av prøvene ble malt med Jotamastic 87 Aluminium, slik som tilfellet var for prøvene i test av korrosjonskryp. Prøvene ble så koblet opp mot en offeranode, og satt i et kar som ble fylt opp med syntetisk sjøvann. Det ble målt strøm over en motstand på 10 ohm. Det ble benyttet både sink –og aluminiums-anoder, og underveis i testen ble temperatur og pH i sjøvannet kontrollert. Oppsettet for test av katodisk avbinding er vist i figur 25.



Figur 25: Viser oppsettet for test av katodisk avbinding. Prøvene og motstandsboxen til venstre er blitt koblet opp til strømledninger, for å logge strømmen gjennom prøvene. Ledningene ble maskert med blå silikon [73].

Da prøvene hadde stått den planlagte tidsperioden, ble løst belegg fjernet ved hjelp av en skalpell, og graden av katodisk avbinding ble målt ved hjelp av samme fremgangsmåte som ved korrosjonskrypet i kapittel 3.5. I motsetning til test av korrosjonskryp, hvor tre paralleller ble testet, ble det på grunn av begrenset antall prøver bare testet to paralleller for katodisk avbinding. De fleste prøvene ble eksponert i 12 dager, foruten et sett som var eksponert i henholdsvis 5, 8 og 12 dager for å undersøke tidsavhengigheten til avbindingen. For å bekrefte at det faktisk var katodisk avbinding som ble målt på prøvene, ble det prøvd å måle pH under belegget ved hjelp av pH-papir. Dette ble gjort mens løst belegg ble fjernet. På grunn av alkalisk miljø, var det forventet høy pH.

4 Resultater

4.1 Overflatekarakterisering

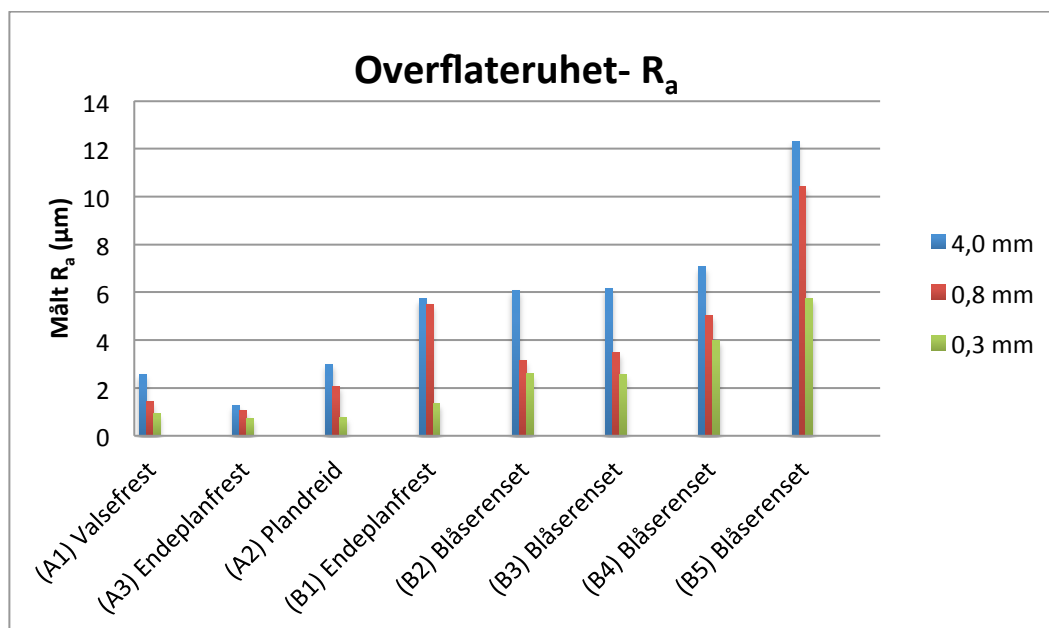
4.1.1 Ruhet

For overflatekarakterisering ble det tatt utgangspunkt i at det var 8 ulike overflater, da C1 og D1 fra tabell 3 innledningsvis ble maskinert likt som prøve B1. Tabell 5 viser en oversikt over overflateruheten målt med standard innstillinger og tortuositeten (τ) målt over et areal. Det er resultatene fra denne tabellen som blir benyttet som referanse videre i oppgaven når det er snakk om overflateruhet og tortuositet (τ).

Tabell 5: Oversikt av karakterisering for de 8 ulike overflatene. Tabellen tar for seg fire utvalgte ruhetsparametere målt ved standard innstillinger og tortuositet målt over et bestemt areal.

Prøve	Materiale	Maskinering	Overflateruhet				Tortuositet (τ)
			Ra (μm)	Rz (μm)	Rt (μm)	Pc ($\frac{x}{\text{cm}}$)	
A1	St 52	Valsefrest	1,54	9,01	12,1	89,7	1,0398
A2		Plandreid	2,07	11,28	14,89	82,53	1,0430
A3		Endeplanfrest	1,32	7,18	8,77	74,7	1,0569
B1	St 55	Endeplanfrest (SINTEF)	5,58	25,05	26,64	23,5	1,1060
B2		Blåserenset(0,2-0,3) Al ₂ O ₃	3,49	26,66	34,75	92,4	1,1998
B3		Blåserenset(0,3-0,425) Al ₂ O ₃	4,38	32,64	44,37	76,8	1,2186
B4		Blåserenset (0,5-1) Al ₂ O ₃	6,95	44,29	56,42	54,77	1,3049
B4		Blåserenset (0,6-1) G24	16,68	113,37	113,37	28,67	1,4599

Ruhetsparameterene fra tabell 5 er som nevnt målt ut fra standard innstillinger som er vist i tabell 11 i appendiks B. Det ble i tillegg målt overflateruhet over tre ulike evalueringsslengder, med lengdebaserte innstillinger. Disse innstillingene er også vist i tabell 11 i appendiks B. Figur 26 viser en graf med målt R_a ved 4,0 mm, 0,8 mm og 0,3 mm.



Figur 26: Viser en oversikt over målt R_a for de 8 overflatene, ved evalueringsslengder på 4,0 mm, 0,8 mm og 0,3 mm.

Resultatene viser at R_a for hver enkelt overflate økte når evalueringsslengden økte. Dette ble også sett ut fra stigningstallet hentet fra trendlinjene ved de ulike evalueringsslengdene, se punkter under.

- 4,0 mm: $y=0,4243x + 0,6432$
- 0,8 mm: $y=0,3358x + 0,1574$
- 0,3 mm: $y=0,2247x - 0,2534$

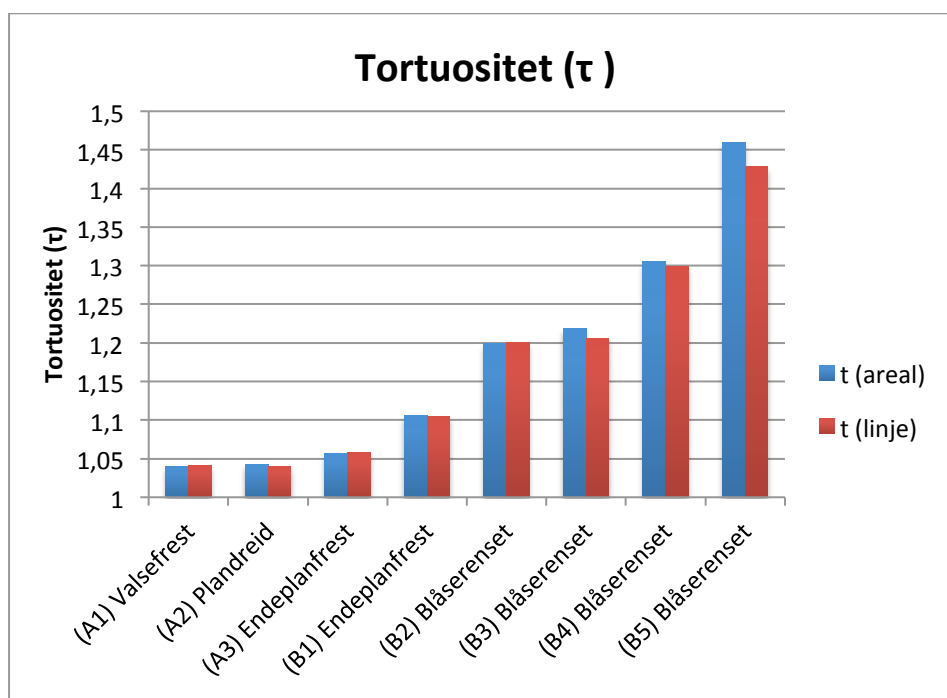
4.1.2 Tortuositet

Tortuositet ble både målt over et areal og langs en linje, og resultatene er vist i tabell 6. Tabellen viser også hvor stort nominelt område som det ble målt over for hver enkelt overflate. Tabell 12 i appendiks B viser innstillingene som ble benyttet for måling av tortuositet.

Tabell 6: Oversikt over målt tortuositet, både over et areal og over en linje. Tabellen viser også nominelt område for hver målt prøve.

Prøve	Maskinering	τ (areal)	Nominelt areal (mm^2)	τ (linje)	Nominelt areal (μm^2)
A1	Valsefrest	1,0398	1,3964	1,0414	1755,4
A2	Plandreid	1,043	1,3969	1,0402	1754
A3	Endeplanfrest	1,0569	1,3965	1,0581	1756,1
B1	Endeplanfrest (SINTEF)	1,106	1,3961	1,1052	1760,8
B2	Blåserenset (0,2-0,3) Al_2O_3	1,1998	1,3968	1,2003	1752,9
B3	Blåserenset (0,3-0,425) Al_2O_3	1,2186	1,3965	1,2052	1759,02
B4	Blåserenset (0,5-1) Al_2O_3	1,3049	1,3972	1,299	1762,1
B5	Blåserenset (0,6-1) G24	1,4599	1,3978	1,4281	1762,5

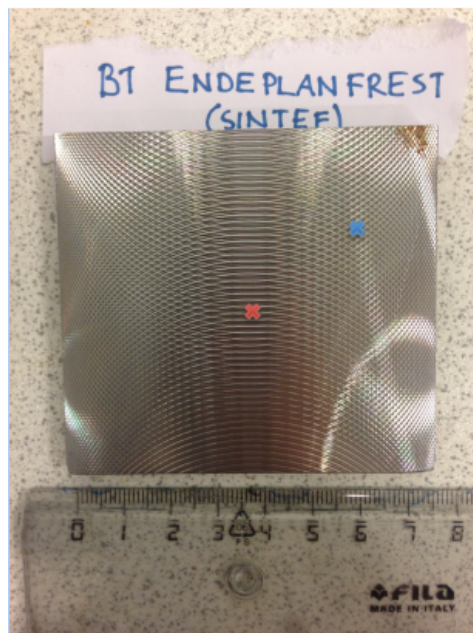
Tabell 6 viser at nominelt areal var tilnærmet likt mellom de ulike overflatene, både for måling over et areal og for måling over en linje. Måling av tortuositet ved disse to metodene viste tilnærmet like resultater, noe figur 27 viser.



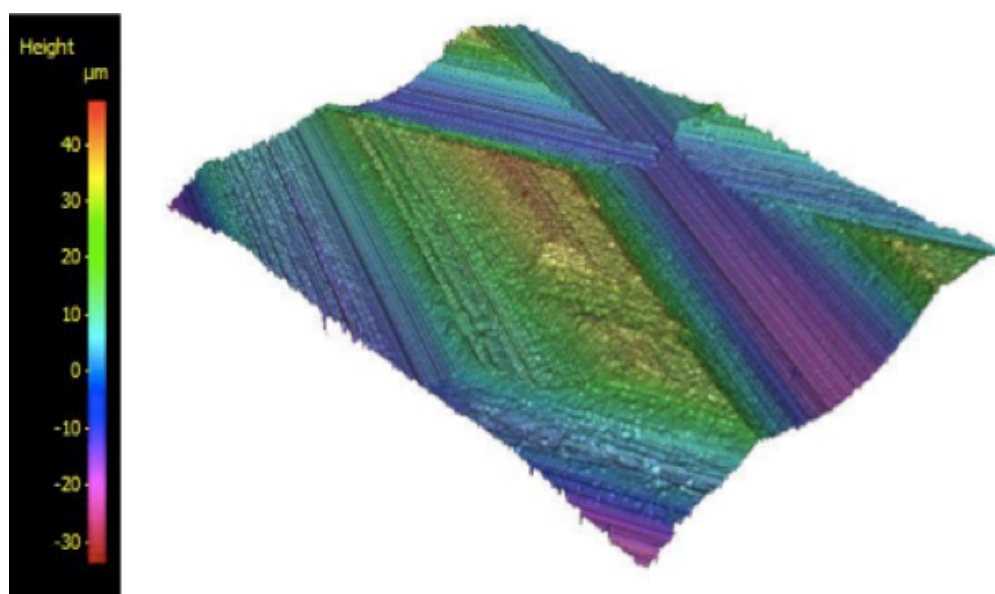
Figur 27: Sammenligning av målt tortuositet over et areal og over en linje.

Figur 52, 53, og 54 i appendiks C viser hvordan et utvalg av ruhetsparameterene hadde god overensstemmelse, i form av plott av R_a mot R_z , R_z mot R_t og S_m mot P_c . Appendiks C viser også tortuositet plottet mot peak count (Pc). Trendlinjer med tilhørende R^2 , ble benyttet for å se hvor mye punktene i de ulike grafene dro i samme retning. Jo nærmere $R^2 = 1$, jo bedre.

I forhold til overflatetopografi hadde endeplanfrest prøve fra SINTEF (B1) en veldig ulik overflate sammenlignet med de andre maskinerte prøvene. Figur 29 og figur 30 viser 3D-bilder av henholdsvis punkt x_2 (blått kryss) og x_3 (rødt kryss) på B1. Bildene viser at overflatestrukturen er veldig ulik i de to punktene, hvor punkt x_3 i tillegg viste høyere overflateruhet og tortuositet enn punkt x_2 . Figur 28 viser hvordan overflaten faktisk ser ut. Appendiks D viser de resterende 7 overflatene med tilsvarende 3D-bilder. En merknad er at fargeindeksen på 3D-bildene har ulik skala for de forskjellige overflatene, noe som må tas hensyn til når en skal se på topper og daler i overflaten.



Figur 28: Viser hvordan overflaten til den endeplanfreste prøven fra SINTEF (B1) faktisk ser ut. Blått kryss indikerer punkt x_2 , og rødt kryss indikerer punkt x_3 .

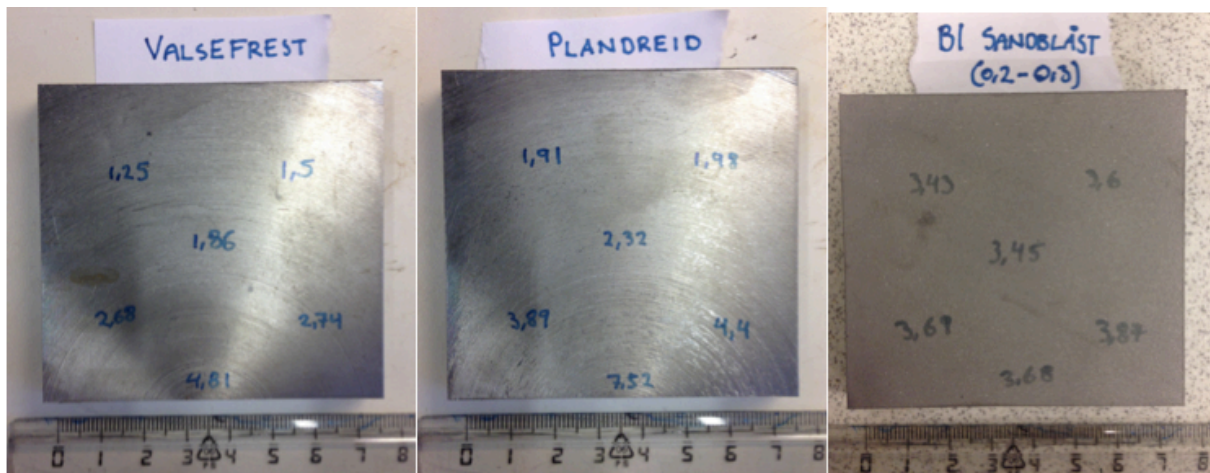


Figur 29: Viser 3D-bildet av punkt x_2 (blått kryss) på den endeplanfreste prøven fra SINTEF (B1). Til venstre er fargeindeksen.



Figur 30: Viser 3D-bildet av punkt X_3 (rødt kryss) på den endeplanfrest prøven fra SINTEF (B1). Til venstre er fargeindeksen.

Figur 31 viser hvor ujevn ruheten var langs overflaten for valsefrest (A1) og plandreid (A2) prøve, noe som det til en viss grad også kunne observeres på de andre maskinerte prøvene. Som referanse er det tatt med en blåserenset prøve (B2), som viser en mer jevn ruhet langs overflaten. Som nevnt er de tre nederste punktene (x_4 , x_5 og x_6) ikke tatt med i klassifiseringen av overflateruhet og tortuositet, da disse stort sett ligger utenfor testområdet for de aktuelle feilmekanismene.



Figur 31: Viser hvordan ruheten varierer langs overflaten til valsefrest (A1) og plandreid (A2) prøve. Blåserenset prøve (B2) er tatt med som referanse, hvor ruheten er mer jevn langs overflaten.

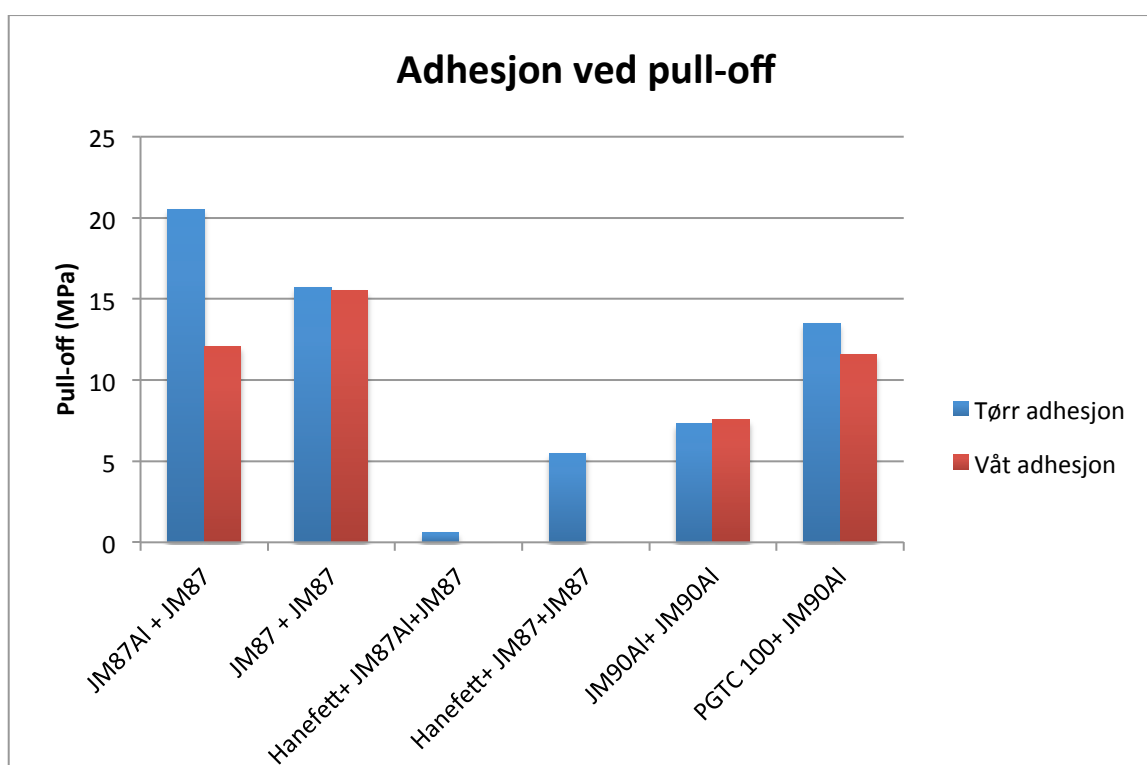
4.2 Adhesjon

Tabell 7 viser resultatene fra pull-off, både ved tørr og våt adhesjon. Tabellen viser at det ble testet pull-off for tre ulike beleggsystemer, både med og uten aluminium i grunningen. Resultatene merket med grå ruter indikerer aluminium i grunningen, mens de resterende resultatene er uten aluminium i grunningen.

Tabell 7: Viser resultatene fra test for pull-off, både for tørr og våt adhesjon. Grå ruter indikerer aluminium i grunningen, og svarte ruter indikerer at prøvene ikke ble testet. Tabellen viser også at det var relativt lik herdetid mellom de ulike beleggsystemene.

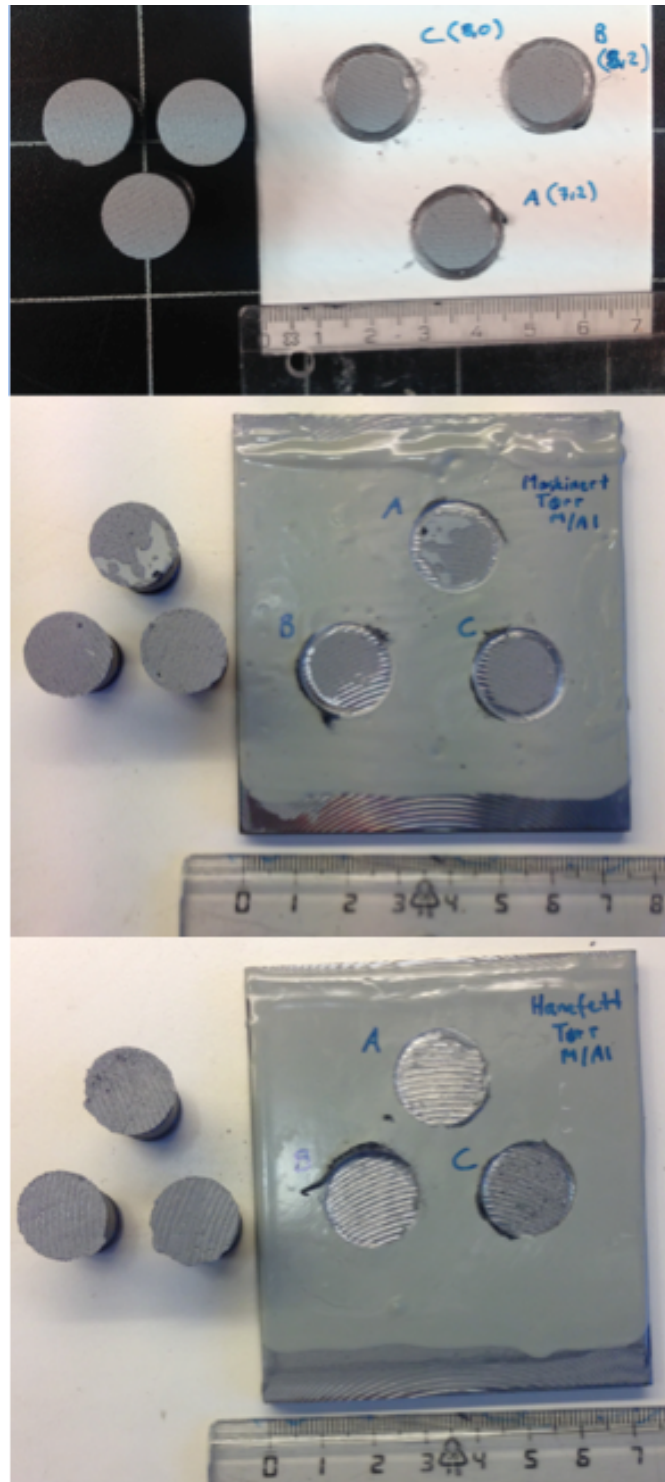
Prøve	Materiale	Maskinering	Beleggsystem	Herdetid		Pull-off (MPa)	
				Romtemp (20 °C)	Varmeskap (40 °C)	Tørr	Våt
D1	St 37	Endeplanfrest (SINTEF)	JM87Al + JM87	3 uker	5 dager	20,5	12,1
			JM87 + JM87			15,7	15,5
			Hanefett + JM87Al + JM87	4 uker	2 dager	0,6	
			Hanefett + JM87 + JM87			5,5	
			JM90Al + JM90Al	4 uker	2 dager	7,3	7,54
			PGTC 100 + JM90Al			13,5	11,6

Figur 32 viser resultatene fra tabell 7 presentert i et stolpediagram. Beleggsystemet med Jotamastic 87 viste høyere adhesjon enn beleggsystemet med Jotamastic 90, mens prøvene med hanefett viste lavest adhesjon. De fleste prøvene viste bedre adhesjon uten aluminium i grunningen, foruten om tørr adhesjon med Jotamastic 87.



Figur 32: Viser en oversikt av pull-off for de ulike beleggsystemene, både ved tørr og våt adhesjon.

Figur 33 viser bruddoverflaten for en prøve fra hvert beleggssystem. Beleggssystemet med Jotamastic 90 viste kohesive brudd i og mellom malingsstrøkene, og ingen tegn til adhesivt brudd mellom substratet og grunningen. Beleggssystemet med Jotamastic 87 viste kohesive brudd i og mellom malingsstrøkene, men i tillegg adhesivt brudd mellom substratet og grunningen. Prøvene med hanefett viste neste bare adhesivt brudd mellom substrat og grunning. Det var ikke mulig å se noen forskjell mellom prøver med og uten aluminium i grunningen.



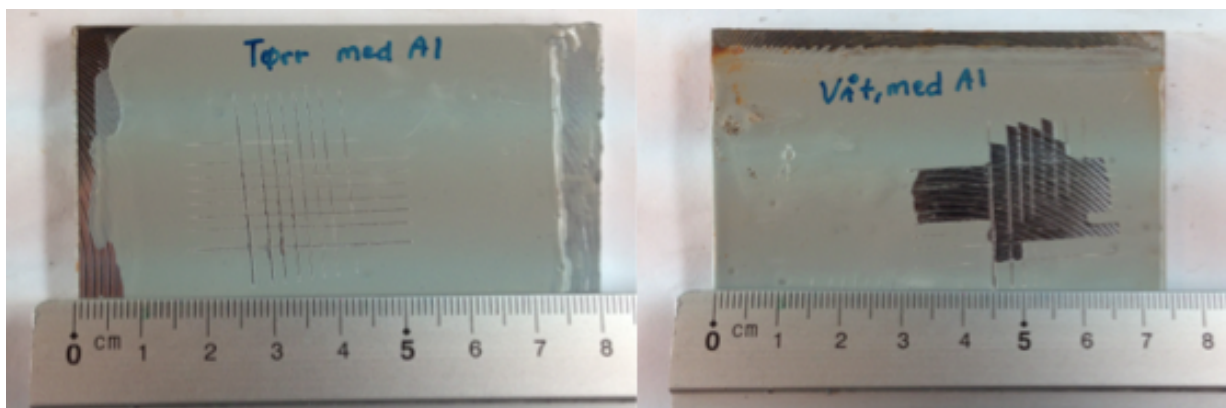
Figur 33: Viser bruddoverflaten fra test for pull-off. Øverst er beleggssystem med Jotamastic 90 Al, i midten er med Jotamastic 87 Al og nederst er med hanefett.

Tabell 8 viser resultatene fra test av cross-cut, både for tørr og våt adhesjon. Beleggsystemet med Jotamastic 90 viste høyere våt adhesjon enn beleggsystemet med Jotamastic 87, men lik tørr adhesjon. Det var vanskelig å se noen forskjell på prøver med og uten aluminium i grunningen. En merknad er at prøvene med Jotamastic 90 ikke ble testet for våt adhesjon før dagen etter at de var tatt ut av vannet. Disse er merket med rødt i tabell 8. Prøvene med hanefett ga lavest resultater, hvor aluminium i grunningen ga dårligst adhesjon.

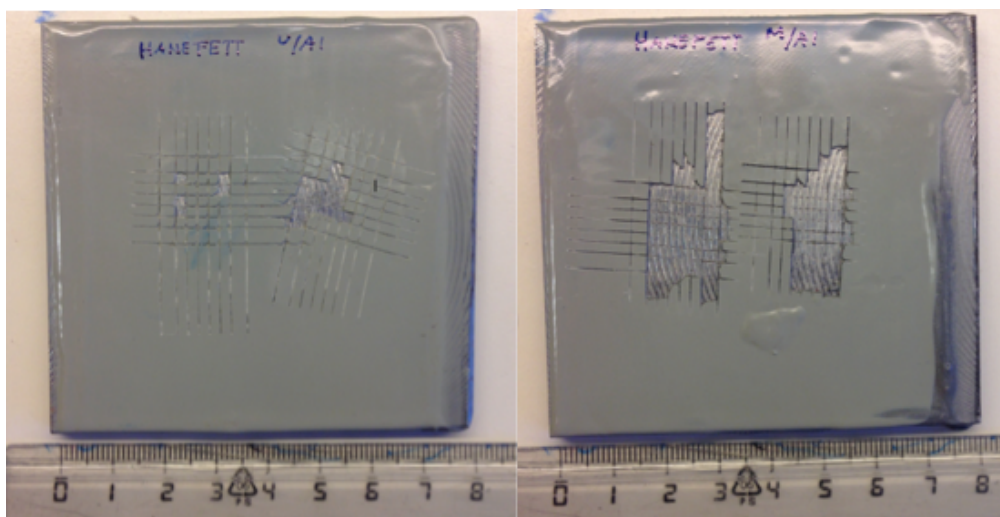
Tabell 8: Resultatene fra test for cross-cut, både for tørr og våt adhesjon. Grå ruter indikerer aluminium i grunningen, og svarte ruter indikerer at prøvene ikke ble testet. Røde tall er for prøver som ble testet noe feil i forhold til standard fremgangsmåte.

Prøve	Materiale	Maskinering	Beleggsystem	Herdetid		Cross-cut	
				Romtemp.	Varmeskap	Tørr	Våt
D1	St 37	Endeplanfrest	JM87Al + JM87	3 uker	5 dager	0/1	5
			JM87 + JM87			0/1	4 til 5
			Hanefett + JM87Al + JM87	4 uker	2 dager	5	[Svart rute]
			Hanefett + JM87 + JM87			3	
			JM90Al + JM90Al	4 uker	2 dager	0/1	1
			PGTC 100 + JM90Al			0/1	0/1

Figur 34 viser hvor mye avflaking som ble oppnådd på prøver med Jotamastic 87, ved tørr og våt adhesjon. Våt adhesjon viste større grad av avflaking. Figur 35 på neste side viser prøver med hanefett, testet for tørr adhesjon. Prøver med aluminium viste mer avflaking enn prøver uten aluminium.



Figur 34: Viser prøver med beleggsystemet Jotamastic 87. Tørr adhesjon er til venstre og våt adhesjon er til høyre. Våt adhesjon ga langt større avflaking enn tørr adhesjon.



Figur 35: Prøver med hanefett, testet for tørr adhesjon. Til venstre er uten aluminium i grunningen, og til høyre er med aluminium i grunningen. Prøver uten aluminium ga best adhesjon.

Det ble i tillegg testet våt adhesjon for et sett med prøver fra det tilhørende fordypningsprosjektet høsten 2014, disse er vist i tabell 13 i appendiks E. Herdetiden for test av våt adhesjon for disse prøvene var over 25 uker.

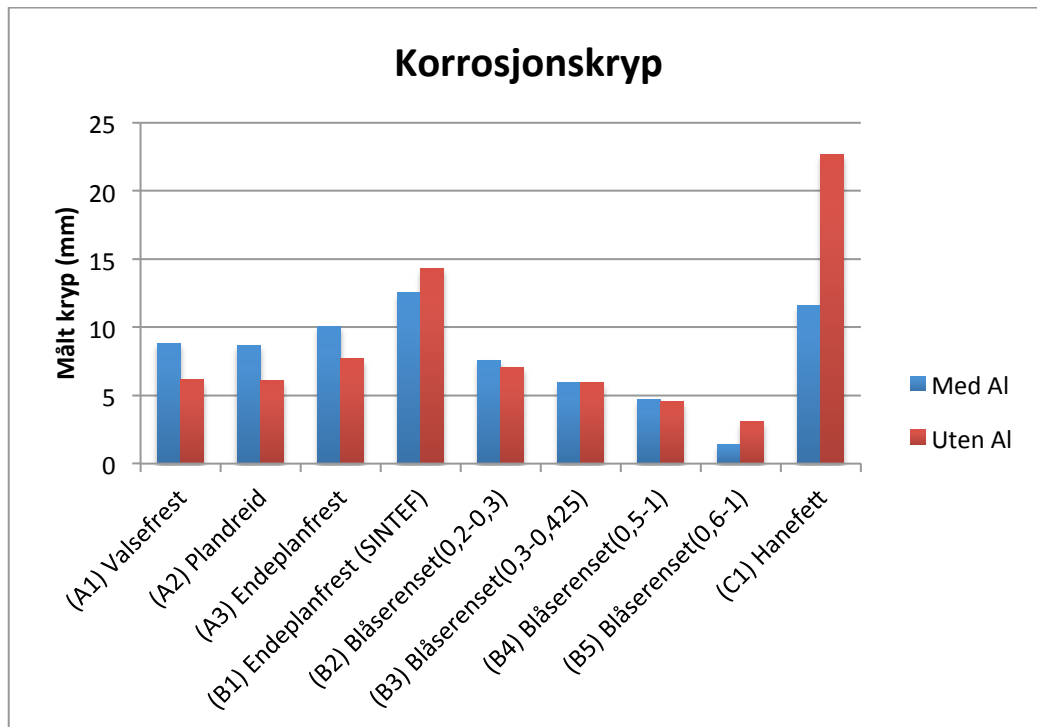
4.3 Korrosjonskryp

Tabell 9 viser en oversikt over alle resultatene fra test av korrosjonskryp. Prøvene viste noe katodisk avbinding i front av korrosjonskrypet, og dette er også tatt med i tabellen. Resultatene merket med grå ruter indikerer aluminium i grunningen.

Tabell 9: Resultatene fra test av korrosjonskryp. Grå felt indikerer aluminium i grunningen. Målt katodisk avbinding og totalt tap av belegg er også tatt med.

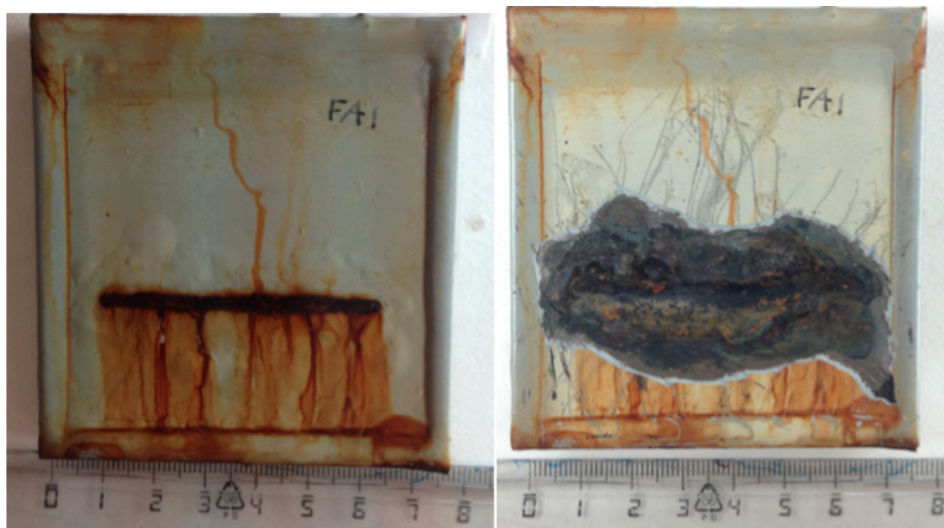
Prøve	Materiale	Maskinering	Beleggsystem	Ekspontert	Korr.kryp (mm)	Kat.avb (mm)	Totalt tap (mm)	
A1	St 52	Valsefrest	Jotamastic 90 Al Jotamastic 90 Al	8 uker	8,83	0,45	9,28	
					6,15	2,09	8,23	
A2		Plandreid	Penguard Tiecoat Jotamastic 90 Al Jotamastic 90 Al		8,69	1,05	9,74	
					6,13	3,07	9,20	
A3		Endeplanfrest	Jotamastic 90 Al Jotamastic 90 Al		10,08	1,41	11,49	
					7,68	1,59	9,27	
B1	St 55	Endeplanfrest	Jotamastic 87 Al Jotamastic 87	8 uker	12,53	3,87	16,4	
B2		Blåserenset (0,2-0,3)			14,32	3,83	18,15	
					7,54	0,67	8,22	
B3		Blåserenset (0,3-0,425)			7,02	0,33	7,35	
					5,92	0,4	6,32	
B4		Blåserenset (0,5-1)			Jotamastic 87 Jotamastic 87	5,93	0	5,93
					4,72	0	4,72	
B5		Blåserenset (0,6-1)			4,59	0	4,59	
	1,43		0	1,43				
C1	St 50	Endeplanfrest (Hanefett)	Jotamastic 87 Jotamastic 87	6 uker	3,08	0	3,08	
					11,58	2,71	14,3	
					22,65	0,27	22,92	

For A-prøvene ga prøver med aluminium i grunningen mer korrosjonskryp prøver enn uten aluminium i grunningen, mens prøvene viste motsatt effekt for katodisk avbinding. Figur 36 viser et stolpediagram av resultatene fra tabell 9 over. Figuren viser at endeplanfreste prøver fra SINTEF (B1) skilte seg ut fra de andre maskinerte overflatene (A-prøvene), og hadde klart mer angrep av korrosjonskryp. De blåserensede prøvene (B2, B3, B4 og B5) hadde noe lavere korrosjonskryp enn A-prøvene. Prøvene med hanefett (C1) hadde mye korrosjonskryp, hvor det mest alvorlige angrepet var for prøvene uten aluminium i grunningen.



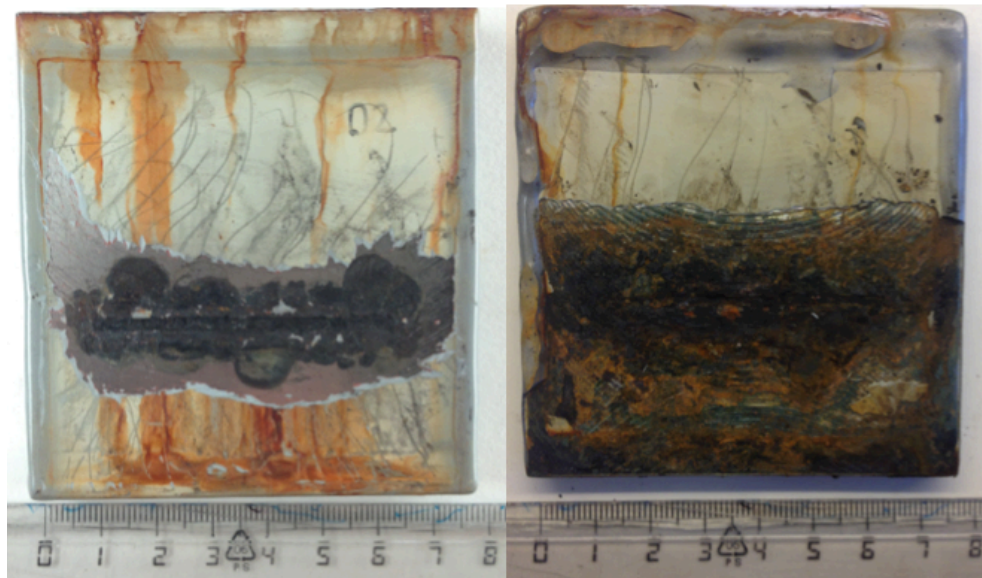
Figur 36: Oversikt over målt korrosjonskryp for de ulike overflatene, med og uten aluminium i grunningen.

Før løst belegg ble fjernet var det ikke mulig å se noen forskjell mellom de ulike maskineringsprosessene og beleggssystemene, foruten et utvalg en de maskinerte prøvene fra SINTEF (B1) og prøvene med hanefett (C1). Figur 37 viser en endeplanfrest prøve (A3), før og etter at løst belegg er fjernet. Denne prøven er med aluminium i grunningen. Merking på prøvene kan sees bort fra.



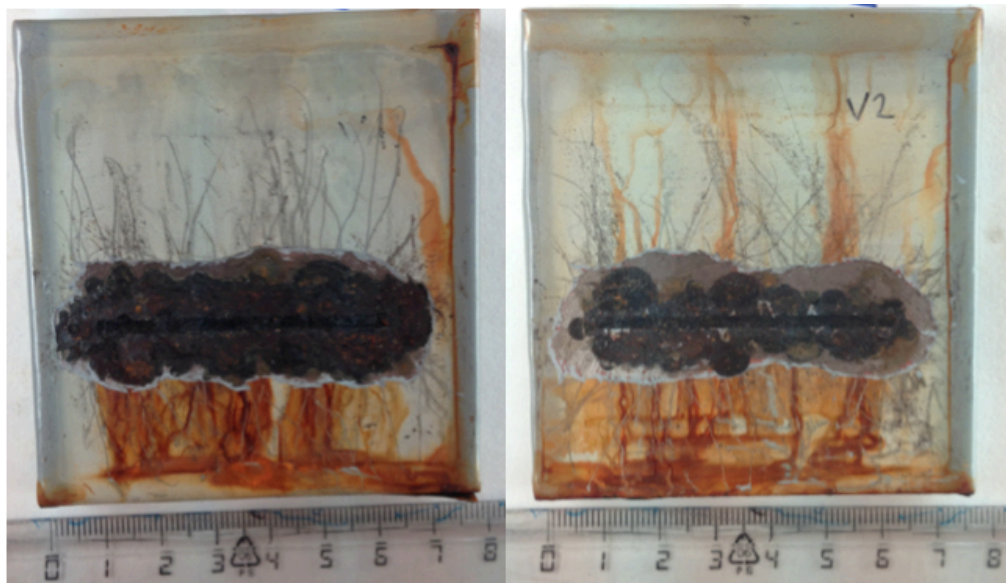
Figur 37: Viser en endeplanfrest prøve (A3) eksponert i 8 uker, før og etter at løst belegg er fjernet. Denne prøven er med aluminium i grunningen. Merking på prøvene kan sees bort fra.

Etter at løst belegg var fjernet var det liten forskjell mellom A-prøvene, hvor eneste antydning var at endeplanfrest prøve (A3) hadde noe mer korrosjonskryp enn valsefrest (A1) og plandreid (A2) prøve. Det var derimot mulig å se en forskjell når de maskinerte A-prøvene ble sammenlignet med den endeplanfreste prøven fra SINTEF (B1), hvor B1 hadde mer korrosjonskryp. Det var i tillegg klare tegn på at malingen rundt kantene hadde feilet, og at korrosjon hadde utviklet seg fra disse områdene. Figur 38 viser endeplanfrest prøve fra SINTEF (B1) og en plandreid prøve (A2).



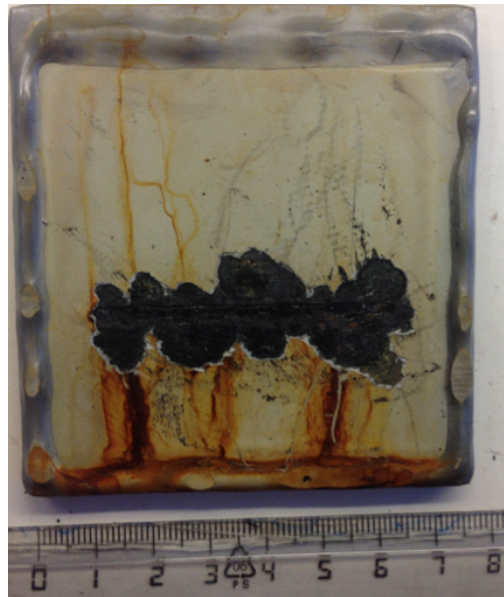
Figur 38: Viser forskjellen mellom plandreid prøve (A2) til venstre og endeplanfrest prøve fra SINTEF (B1) til høyre. Ser et mer alvorlig angrep korrosjonskryp på B1, og det er i tillegg tydelig at malingen på kantene har feilet. Begge prøvene er uten aluminium i grunningen. Merking på prøven til venstre kan sees bort fra.

Som tabell 9 viste, ga de maskinerte A-prøvene med aluminium i grunningen mer korrosjonskryp enn prøver uten aluminium, men mindre katodisk avbinding. Denne effekten er vist på valsefreste prøver (A1) i figur 39, hvor det er mulig å se katodisk avbinding i form av eksponert stål i front av korrosjonskrypet på prøven til høyre.



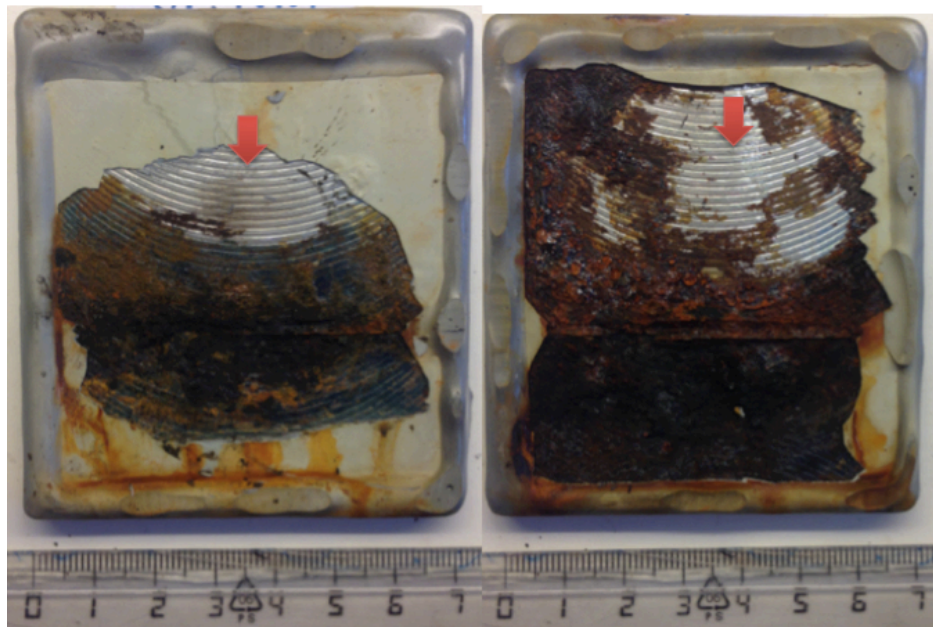
Figur 39: Viser valsefrest prøve (A1) med aluminium i grunningen til venstre, og uten aluminium til høyre. Ser mer katodisk avbinding i front av korrosjonskrypet på prøven til høyre. Merking på prøven til høyre kan sees bort fra.

Prøvene som var blåserenset (B2, B3, B4 og B5) viste også en del korrosjonskryp etter bare 8 uker, men de viste derimot relativt like resultater mellom prøver med aluminium i grunningen og prøver uten. Prøvene viste også lite tegn på katodisk avbinding i front av korrosjonskryptet. Figur 40 viser en blåserenset prøve (B3).



Figur 40: Viser en blåserenset prøve (B3) etter 8 uker. Prøven er uten aluminium i grunningen.

Prøver som hadde et lag med hanefett mellom materialoverflaten og belegget, viste svært dårlig motstand mot korrosjonskryp. Prøver uten aluminium i grunningen var mest angrepet, noe som også var tydelig før løst belegg ble fjernet. I tillegg til noe katodisk avbinding i front av korrosjonskryptet, var det også mulig å se bart stål med hanefett i front av katodisk avbindingen. Dette er vist i figur 41, hvor røde piler indikerer bart stål som ikke er katodisk avbinding.



Figur 41: Viser to prøver med hanefett (C1). Prøven til venstre er med aluminium i grunningen, og prøven til høyre er uten. Røde piler indikerer bart stål med hanefett, som ikke er katodisk avbinding.

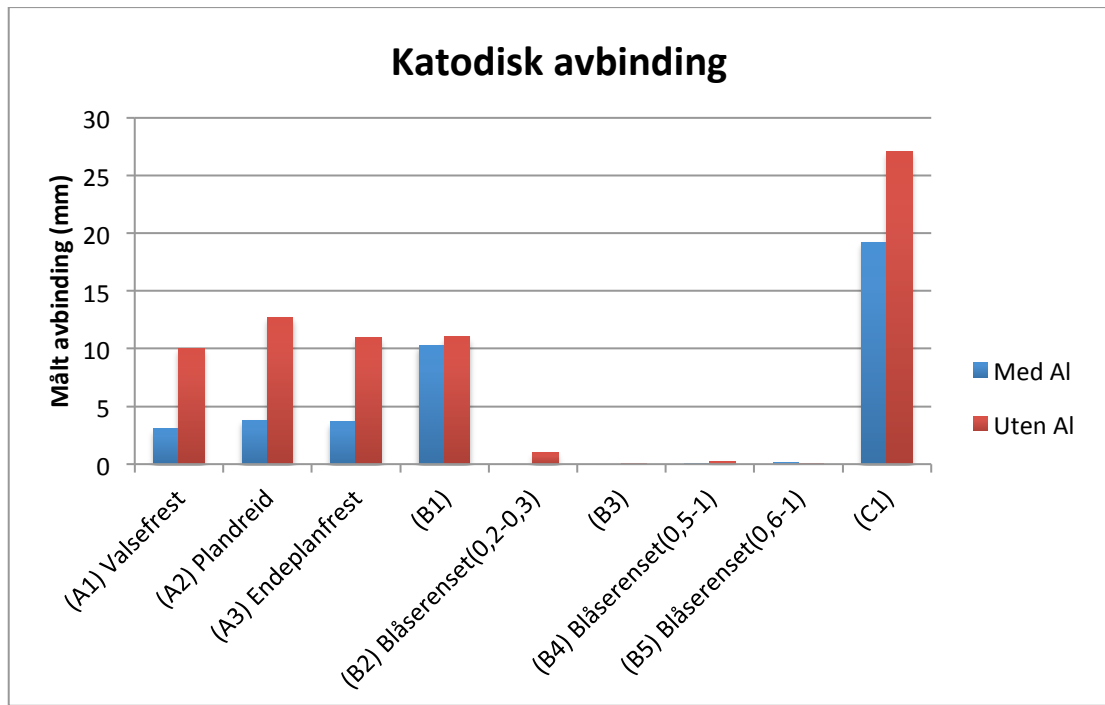
4.4 Katodisk avbinding

Paralleller til prøvene testet for korrosjonskryp, ble også testet for katodisk avbinding. Tabell 10 viser en oversikt over prøvene som var eksponert i 12 dager i syntetisk sjøvann, og hvor mye katodisk avbinding som ble målt. Grå ruter indikerer aluminium i grunningen.

Tabell 10: Viser en oversikt over målt katodisk avbinding. Grå ruter indikerer aluminium i grunningen.

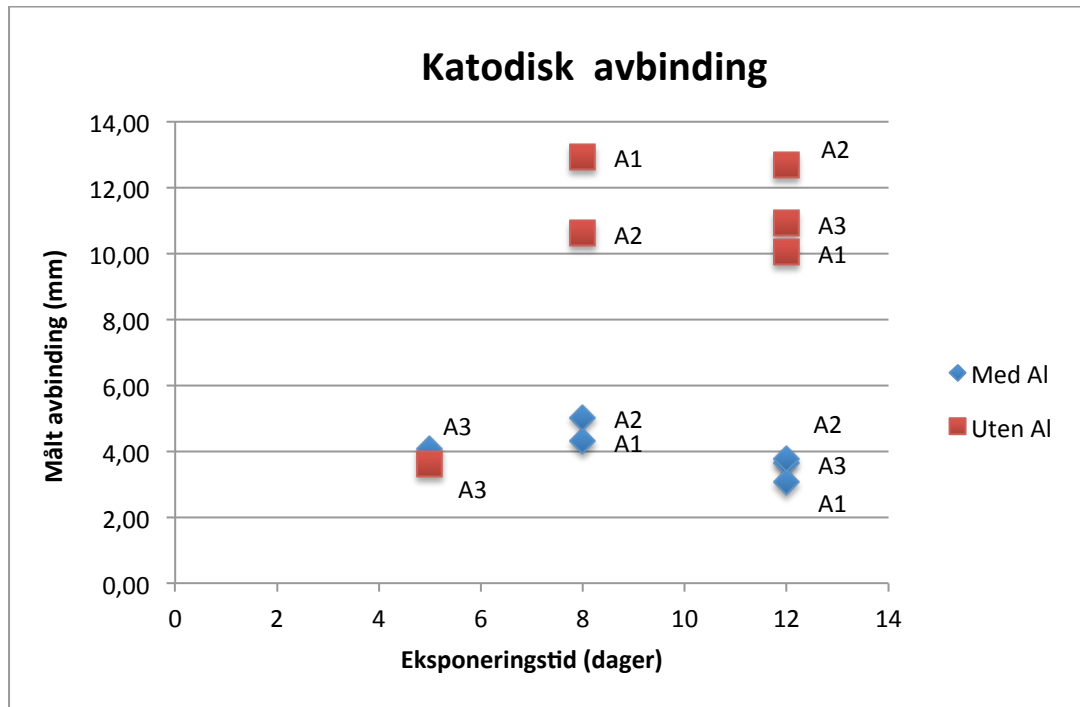
Prøve	Materiale	Maskinering	Beleggsystem	Eksponert	Kat.avb (mm)
A1	St 52	Valsefrest	Jotamastic 90 Al Jotamastic 90 Al	12 dager	3,06
					10,03
A2		Plandreid	Penguard Tiecoat Jotamastic 90 Al Jotamastic 90 Al		3,78
					12,67
A3		Endeplanfrest	Jotamastic 90 Al Jotamastic 90 Al		3,65
					10,93
B1		Endeplanfrest	Jotamastic 87 Al Jotamastic 87		10,23
					11,01
B2		Blåserenset (0,2-0,3)			0
					0,97
B3	Blåserenset (0,3-0,425)	0			
		0,04			
B4	Blåserenset (0,5-1)	Jotamastic 87 Jotamastic 87		0,04	
		0,22			
B5	Blåserenset (0,6-1)	0,11			
		0,03			
C1	St 50	Endeplanfrest (Hanefett)	19,19		
			27,04		

Figur 42 på neste side viser resultatene fra tabell 10, presentert i et stolpediagram. Resultatene viser at aluminium i grunningen ga bedre motstand mot katodisk avbinding, og at denne effekten var mest synlig for de maskinerte A-prøvene og C-prøvene med hanefett. Blåserensede prøver ga liten til ingenting tap av belegg.



Figur 42: Viser oversikt over målt avbinding etter 12 dager med eksponering, med og uten aluminium i grunningen.

Som nevnt ble A-prøvene eksponert i 5, 8 og 12 dager. Dette var for å se hvordan katodisk avbinding endret seg over tid. Etter 5 dager var det like mye katodisk avbinding på prøver med og uten aluminium i grunningen, men fra og med 8 dager ble det observert langt mer katodisk avbinding på prøver uten aluminium i grunningen. Det ble i tillegg målt strøm over prøvene som stod i 12 dager, og plottet er vist i figur 63 i appendiks F. Plottet viste at alle prøvene dro relativt samme strømmengde, og at strømbehovet gikk ned med tiden. Figur 43 viser resultatene fra test av tidsavhengighet, henholdsvis på prøver med og uten aluminium i grunningen.



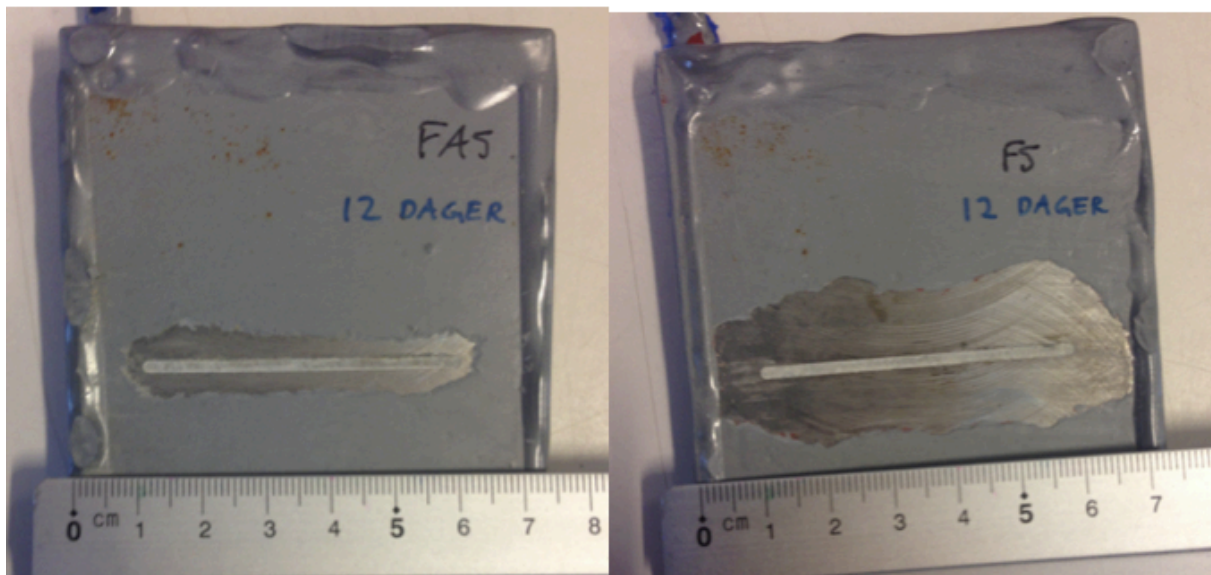
Figur 43: Viser katodisk avbinding som funksjon av dager eksponert. A1 er valsefrest, A2 er plandreid og A3 er endeplanfrest.

Figur 44 viser, med røde piler, kalkutfellinger (CaCO_3 og $\text{Mg}(\text{OH})_2$) ut fra det eksponerte stålområdet. Dette ble observert langs skårene på samtlige prøver som ble testet for katodisk avbinding.



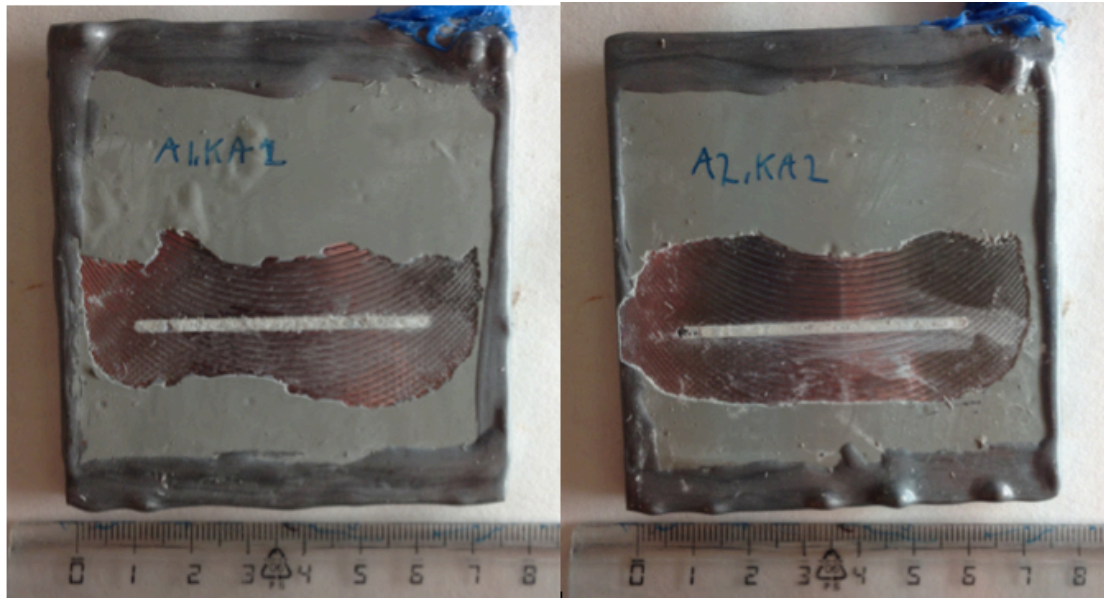
Figur 44: Viser en endeplanfrest prøve fra SINTEF (B1), før løst belegg ble fjernet. Røde piler viser kalkutfellinger ut fra det eksponerte stålområdet. Merking på prøven kan sees bort fra.

For A-prøvene var det mulig å se en markant forskjell mellom prøver med og uten aluminium i grunningen. Figur 45 viser endeplanfreste prøver (A3) eksponert i 12 dager, hvor prøven til venstre er med aluminium i grunningen og prøven til høyre er uten aluminium.



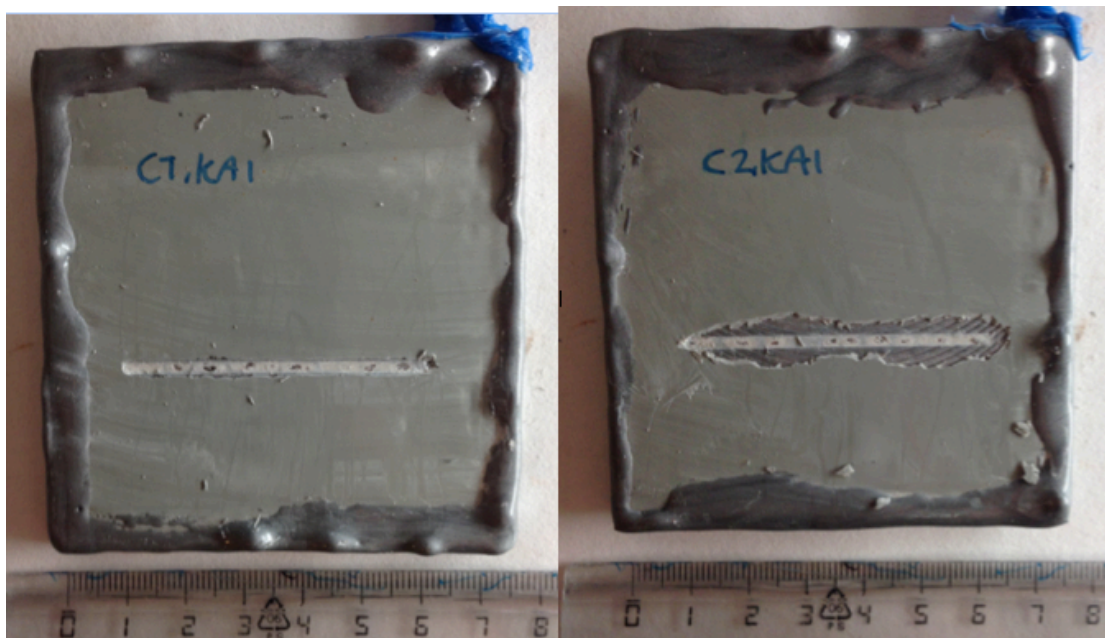
Figur 45: Endeplanfreste prøver (A3) etter avskrapning av løst belegg. Prøven til venstre er med aluminium i grunningen, og prøven til høyre er uten aluminium. Merking på prøvene kan sees bort fra.

I motsetning til de maskinerte A-prøvene, viste den endeplanfreste prøven av SINTEF (B1) liten forskjell mellom prøver med og uten aluminium i grunningen. Figur 46 viser en prøve med aluminium i grunningen til venstre, og en prøve uten aluminium til høyre. Det er vanskelig å se en visuell forskjell mellom prøvene, men den målte katodiske avbindingen var noe høyere for prøvene uten aluminium i grunningen.



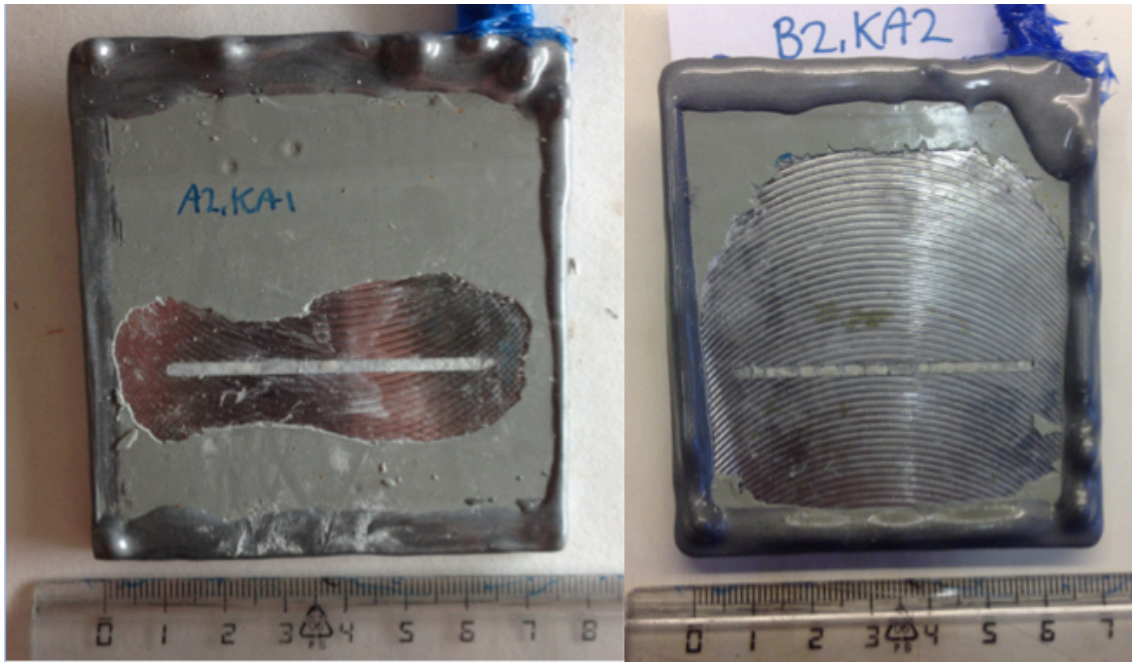
Figur 46: Viser endeplanfreste prøver fra SINTEF (B1). Prøven til venstre er med aluminium i grunningen, og prøven til høyre er uten aluminium i grunningen. Merking på prøvene kan sees bort fra.

Etter at dette løst belegg var fjernet var det mulig å se en klar forskjell i katodisk avbinding mellom maskinerte og blåserensede overflater. Det ble observert lite katodisk avbinding på blåserensede prøver, hvor figur 47 viser et av de mest alvorlige angrepene.



Figur 47: Viser blåserensede prøver (B2). Prøven til venstre er med aluminium i grunningen og prøven til høyre er uten aluminium i grunningen. Merking på prøvene kan sees bort fra.

Effekt av hanefett mellom materialoverflaten og belegge er vist i figur 48. Prøven til høyre har et lag med hanefett, mens prøven til venstre ikke har det. De er ellers like. Effekten av hanefett var størst på prøvene uten aluminiumspigmenter.



Figur 48: To maskinerte prøver uten aluminium i grunningen, hvor prøven til høyre har et tynt lag med hanefett mellom materialoverflaten og belegget. Merking på prøvene kan sees bort fra.

5 Diskusjon

I forkant av denne masteroppgaven var det blitt gjennomført et fordypningsprosjekt høsten 2014. Resultatene fra dette prosjektet viste at maskinerte overflater hadde svært dårlig motstand mot korrosjonskryp, og at det var tydelig katodisk avbinding i front av korrosjonsangrepene på flere av prøvene. Hovedformålet med denne masteroppgaven var å undersøke hvorfor maskinerte overflater er så utsatt for korrosjonskryp. Følgende hypoteser for at maskinerte flater gir så dårlig motstand mot korrosjonskryp ble foreslått:

1. Dårlig våt adhesjon
2. Dårlig motstand mot katodisk avbinding
3. Aktivisering av overflaten i maskineringen som gjør at stålet korroderer raskere

På grunn av at tiden ikke strakk til ble ikke det siste punktet undersøkt.

Det ble sett på 8 ulike overflater, hvor fire blåserensede overflater ble brukt som referanser opp mot de maskinerte overflatene. Sammenligning av disse overflatene, samt sammenligning av ulike belegg har vært en sentral del av oppgaven. Som nevnt innledningsvis var det ønskelig å ta ekstra hensyn til beleggsystemet. Siden katodisk avbinding var en sentral mekanisme i oppgaven, ble det valgt beleggssystemer med og uten aluminium i grunningen, da det er vist at aluminium i grunningen gir økt motstand mot katodisk avbinding.

5.1 Effekt av ruhet på korrosjonskryp

For å kunne få en økt forståelse av maskinerte overflater må disse karakteriseres. Det er antatt at overflateruhet påvirker både katodisk avbinding og adhesjon, men det er usikkert i hvor stor grad. Siden oppgaven tok utgangspunkt i at katodisk avbinding og våt adhesjon kunne være årsaker til at maskinerte overflater har dårlig motstand mot korrosjonskryp, vil det også være interessant å se om ruhet har en effekt på korrosjonskryp. Det vil være ønskelig å se om endring i ruhet på maskinerte overflater kan redusere korrosjonskryp, og om det er spesifikke parametere som har mer å si enn andre.

Det viste seg å karakterisere ulike overflater i forhold til overflateruhet og tortuositet var en relativt vanskelig oppgave å gjennomføre. Det finnes et stort mangfold av parametere som er med på å si noe om overflateruheten, og de parametrene som ble valgt er vist i tabell 3. Selv om R_a er blitt antydnet til å være en usikker parameter som gir begrenset informasjon, er det antatt at den gir en pekepinn på hvordan ruheten til en overflate er. Sammenligning med R_z og R_t viste at R_a hadde god overensstemmelse med disse parametrene, se appendiks C, og det ble derfor valgt å bruke denne som referanse for overflateruheten ved gitte tilfeller i denne oppgaven. Alle verdiene av ruhet gitt i tabell 3 er målt ut fra en standard fremgangsmåte for det aktuelle profilometeret. I tillegg til den standard fremgangsmåten ble det målt ruhet over tre ulike evalueringsslengder, for å se om ruheten endret seg på noen av overflatene som følge av at evalueringsslengden ble endret. Ut fra figur 26 og de tilhørende trendlinjene, så økte overflateruheten etter hvert som evalueringsslengden økte, og forskjellen mellom de ulike overflatene ble større. Dette kan skyldes at flere topper og daler blir tatt med i målingene, og overflater med større eller mer karakteristiske topper og daler vil dermed få en økt ruhet. Disse resultatene medfører noe usikkerhet da de resterende parametrene, se tabell 11 i appendiks B, ikke ble tatt hensyn til. Sammenligning av R_a målt fra standard innstillinger, opp mot de tre andre målte R_a -verdiene viste varierende likhetstrekk og bekrefter hvor viktig det er å benytte de samme innstillingene når ulike prøver skal sammenlignes.

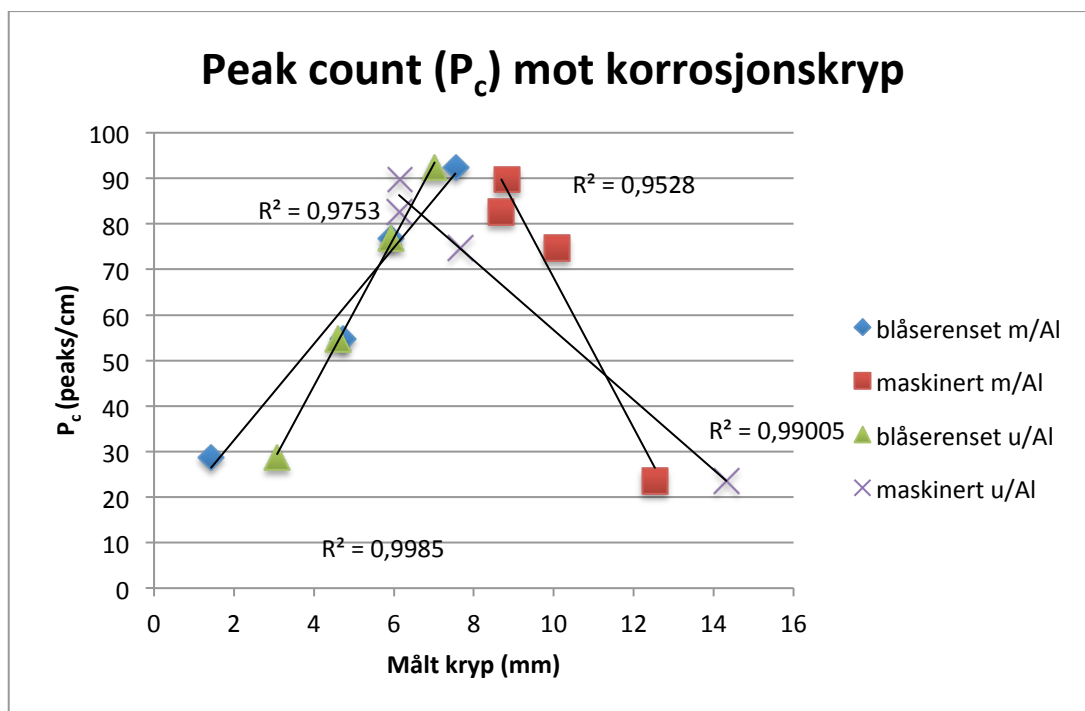
For tortuositet ble det målt over en linje, som beskrevet av Sørensen, og målt over et større området ved hjelp av Infinite Focus Microscope (IFM). Tabell 6 og figur 27 viste at metodene ga tilnærmet like verdier for alle overflatene, noe som antyder at begge metodene kan benyttes. Tabell 6 viste også at det nominelle arealet og de nominelle linjene ble holdt relativt like, noe som gir resultatene mer

troverdighet og et bedre grunnlag for å sammenligne de ulike overflatene. Siden det ble trukket fire linjer for hvert område, er måling over et areal mer tidsbesparende. Måling over et areal gjør i tillegg at mer av overflaten blir tatt med i målingen, og for en overflate med ujevn topografi vil flere uregelmessigheter bli tatt med.

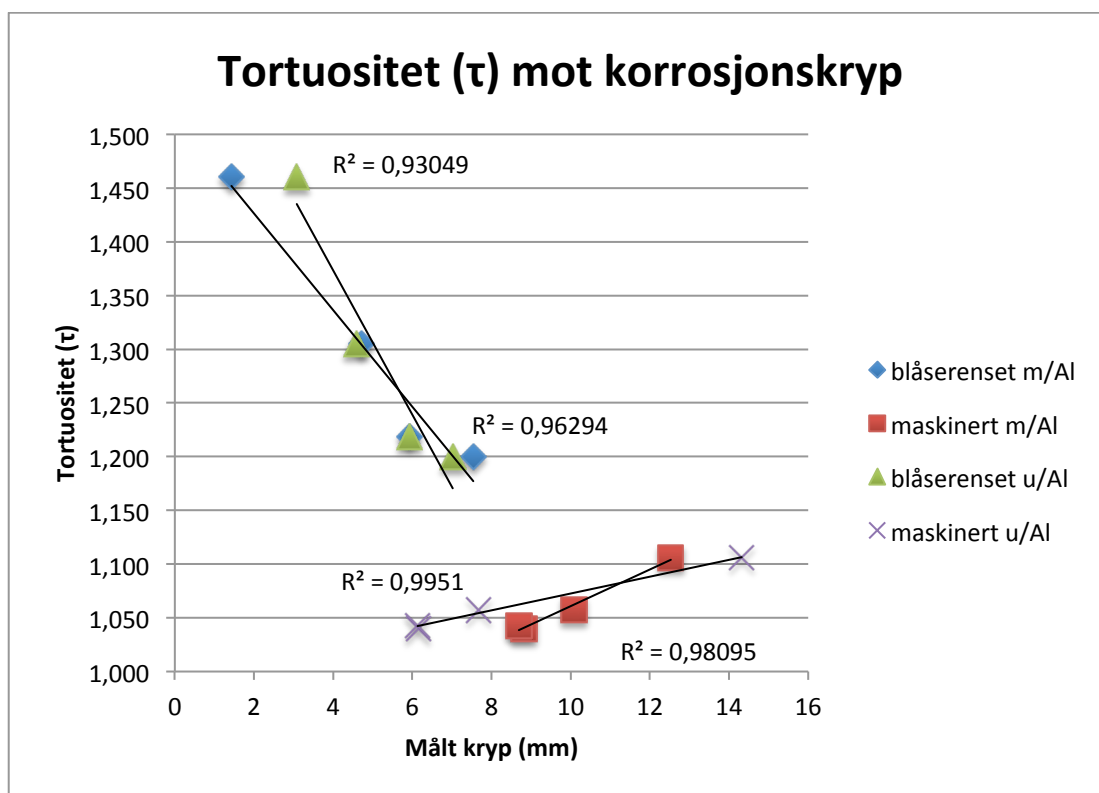
For de maskinerte overflatene var det vanskelig å se en trend mellom tortuositet og ruhetsparameterene; R_a , R_z og R_t . Peak count (P_c) var derimot avhengig av tortuositeten til de maskinerte overflatene. Peak count (P_c) ble valgt da litteratur viste at denne kan ha en stor innvirkning på adhesjon og ytelsen av belegget [28, 30]. Som nevnt i teorien må en peak krysse både en nedre og øvre grense i en dødzone for å kunne betegnes som en peak. Dette er en interessant parameter fordi en da har mulighet å se på avstanden mellom topper, ved å oppnå den beste kombinasjonen av R_t/R_{max} og P_c . Det vil for eksempel kunne være ønskelig med flere topper over et bestemt område. S_m ser på bredden av peaks og viste en trend med P_c . Dette var også forventet ut fra formelen i tabell 1, og er en interessant parameter med tanke på effekten av peak count (P_c).

Sammenligning av peak count opp mot tortuositet viste en trend dersom en så på de maskinerte overflatene for seg, og de blåserensede overflatene for seg. Det viste seg at jo høyere tortuositet som ble målt, jo færre peaks var det. Dette var gjennomgående for begge overflatene, se figur 55 i appendiks C. Det som kan forklare dette er at selv om tortuositeten er høyere for en overflate ved et visst område, kan det være færre topper som kan betegnes som peaks enn for en overflate med lavere tortuositet. Overflaten med lavere tortuositet kan ha flere små topper som gjør at en til sammen får et større målt område. Dette kan for eksempel vises om man ser på tvers av overflatene, hvor blåserenset prøve av Triplex (B5) hadde klart høyest tortuositet men hadde bare en tredjedel av antallet peaks som valsefrest prøve (A1), som hadde lavest tortuositet. Det er verdt å merke seg at grensen for hvor P_c ble målt (dødsonen) ble valgt ut fra en prosent av målt R_z (Z_t) for den aktuelle overflaten. For eksempel vil grensen for hva som beregnes som en peak for endeplanfrest prøve fra SINTEF (B1) og valsefrest prøve (A1) være henholdsvis 2,505 og 0,901, da Z_t er satt til 10 % for alle målingene. Dette betyr i grove trekk at det kreves mer av den endeplanfreste prøven fra SINTEF (B1) for at en topp skal kunne betegnes som en peak.

R_a viste ingen sammenheng med målt korrosjonskryp. P_c og tortuositet, som også viste en trend med hverandre, viste derimot en trend opp mot målt korrosjonskryp når en så på maskinerte og blåserensede overflater hver for seg. Figur 49 viser at dersom antallet peaks øker for maskinerte flater, så minker graden av korrosjonskryp. For blåserensede prøver var effekten motsatt. Figur 50 viser derimot at om tortuositeten øker for maskinerte flater, så øker også graden av korrosjonskryp. Også her var effekten av blåserensede flater motsatt. Denne motsatte effekten var noe overraskende da blåserensede og maskinerte overflater viste like trender med hensyn til peak count og tortuositet.



Figur 49: Peak count (P_c) plottet mot målt korrosjonskryp for maskinerte og blåserensede prøver, med og uten aluminium i grunningen.



Figur 50: Tortuositet plottet mot målt korrosjonskryp for maskinerte og blåserensede prøver, med og uten aluminium i grunningen.

En årsak som kan forklare den motsatte effekten av maskinert og blåserenset overflate er at flere peaks vil kunne gi flere daler hvor overflaten ikke fukter fullstendig til belegget, og dermed øker faren for at belegget løsner og korrosjon oppstår. Dette er spesielt med hensyn til blåserensede overflater som har en ru overflate og fukting er essensielt. Det er gunstig med topper og daler så lenge

overflaten fukter til belegget. For de maskinerte overflatene vil det kunne være en motsatt effekt fordi det i utgangspunktet er en glatt overflate, og flere peaks fører til at overflaten får økt mulighet til adhesjon og fukting av overflaten. I forhold til tortuositet ser man at de blåserensede overflatene har klart større verdier enn de maskinerte og at en økning i tortuositet ville kunne gi bedre grunnlag for at overflaten og belegget hefter, og dermed reduserer korrosjonskryp. De maskinerte overflatene har ikke så stor differanse i tortuositet mellom de ulike overflatene, og siden de maskinerte overflatene hadde en relativt ujevn ruhet langs overflaten kan dette være en mulig forklaring på en slik motsatt effekt. Figur 31 viste hvordan ruheten endret seg over ulike punkter av de maskinerte prøvene, men at det ikke var like tydelig for de blåserensede prøvene. 3D-bildene av den endeplanfreste prøven fra SINTEF (B1), bekreftet også dette. Se figur 28, 29 og 30. Dette viser viktigheten av å både å lage en mer homogen maskinert overflate, men også at en ikke bør sammenligne resultater fra blåserensede og maskinerte overflater direkte opp mot hverandre da overflatetopografien til disse er veldig forskjellige.

Figur 49 og 50 viser at effekten av tortuositet og peak count for de ulike overflatene ikke ble påvirket av om det var aluminium eller ikke i grunningen. Det var også katodisk avbinding i front av korrosjonskrypet. Dette fikk heller ikke noen innvirkning på trendene som er vist i figurene.

Resultatene viser at ruheten har en innvirkning på grad av korrosjonskryp. R_a ser ikke ut til å kunne forklare den observerte nedbrytningen, og bør derfor ikke benyttes til å karakterisere maskinerte overflater i forbindelse med beleggene. Tortuositet og Peak count (P_c) er derimot interessante å benytte, da disse viser trender med målt korrosjonskryp. Det kan virke som at det for maskinerte overflater er ønskelig med en lavest mulig tortuositet, men samtidig å ha et visst antall peaks. Tar en utgangspunkt i at maskinerte overflater har lavere tortuositet enn blåserensede flater, er dette positive resultater. Litteraturen sier også at det er viktig å ta hensyn til fukting av overflaten, på grunn av at et ugunstig forhold mellom P_c og fukting av overflaten kan gi alvorlige konsekvenser for belegget [28, 30]. Det er ikke sett på fuktingen av overflatene for denne oppgaven, men vil sammen med P_c og tortuositet være interessant å se på videre.

For videre arbeid vil det være naturlig å teste nye maskinerte overflater hvor maskineringen er mer kontrollert for å få ønsket overflate. I forhold til litteratur som for eksempel har sett på hvordan tilfeldig og retningsbestemt sliping virker inn på ruhet og adhesjon [3], er det interessant å videreføre dette for å se om det er mulig å få en maskinert overflate som hefter godt mot det tilhørende belegget, reduserer mulighetene for korrosjonskryp og samtidig opprettholder funksjonelle krav til tetning og montering.

Det er verdt å merke seg at prøvene har overgått kravet satt av ISO 20340 for korrosjonskryp etter bare 8 uker [65]. Dette betyr at selv om ruheten har en innvirkning på korrosjonskryp, viser de aktuelle prøvene som er testet i denne oppgaven svært dårlige resultater.

5.2 Effekt av katodisk avbinding på korrosjonskryp

Som nevnt ble det sett på paralleller for alle prøvene testet for korrosjonskryp. Dette var for å se om katodisk avbinding kunne være et forstadium til korrosjonskryp. Det var også på bakgrunn av katodisk avbinding at det ble valgt å se på beleggssystemer med og uten aluminium i grunningen.

De maskinerte A-prøvene viste en betydelig forskjell i målt avbinding mellom prøver uten aluminium i grunningen og prøver med. Prøver med aluminium i grunningen viste klart lavere katodisk avbinding etter å vært eksponert i 12 dager, kontra prøvene uten aluminium. Dette var også som forventet, da det tidligere er vist at aluminium reduserer katodisk avbinding [58-62]. Den endeplanfreste prøven fra SINTEF (B1) viste avvik fra de andre maskinerte prøvene (A-prøvene), men på grunn av at det ble benytte ulike malingsmerker vil dette kunne påvirke resultatene. Det ble derfor valgt å fokusere på resultatene fra de maskinerte A-prøvene når effekten av katodisk avbinding på korrosjonskryp ble evaluert. For de maskinerte A-prøvene ble det også sett at avbindingen mellom prøver uten og med

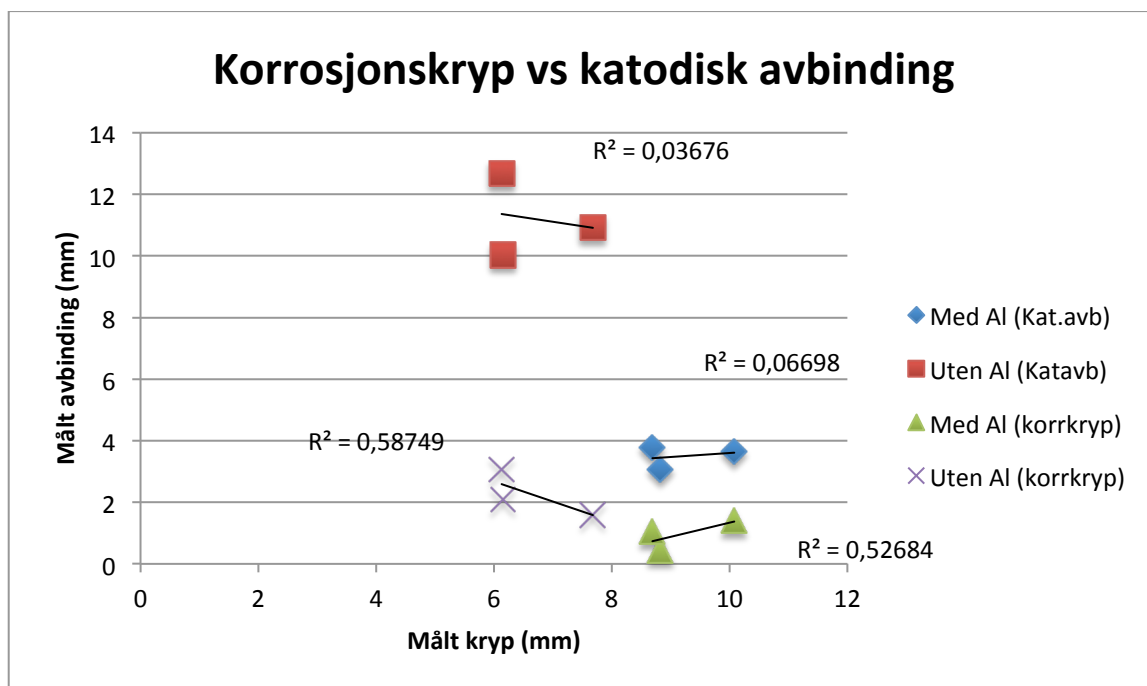
aluminium var delvis tidsavhengig, ved at avbindingen etter 5 dager var lik, men at forskjellen mellom disse ble mer markant med tiden. Avbindingen sluttet også å øke mellom 8 og 12 dager, og holdt seg tilnærmet jevnt. Dette er en interessant observasjon, men det sier ikke noe om innvirkningen på korrosjonskryp og ble dermed ikke sett på videre. Korrosjonskryp ble i tillegg ikke testet for tidsavhengighet. Strømmålingene av de maskinerte A-prøvene viste at prøvene dro nesten lik strømmengde, og at strømbehovet gikk ned med tiden. Dette er antatt å være på grunn av dannelsen av uløselige kalkutfellinger (CaCO_3 og Mg(OH)_2) i det eksponerte stålområde. Kalkutfellingene og målt pH bekrefter at det var høy pH under belegget, og dermed katodisk avbinding.

Det er verd å nevne at det ble observert svarte korrosjonsprodukter under test av korrosjonskryp, altså magnetitt (Fe_3O_4). Det ble også observert noe rød-brune korrosjonsprodukter i form av hematitt (Fe_2O_3). Det var likevel liten trend å se mellom de ulike overflatene, og det ble derfor valgt å ikke se nærmere på denne mekanismen.

De blåserensede prøvene (B2, B3, B4 og B5) viste svært god motstand mot katodisk avbinding, både med og uten aluminium i grunningen. Dette var også forventet. For korrosjonskryp var ikke dette tilfelle, hvor de blåserensede prøvene viste overraskende dårlig motstand mot korrosjonskryp. Dette var spesielt aktuelt for B2, B3, og B4, som var blitt blåserenset. På grunn av at det var minimalt med avbinding for de blåserensede prøvene under test av katodisk avbinding var det vanskelig å bruke resultatene til å trekke sammenhenger. Prøver som er blåserenset bør stå over en lengre tidsperiode, slik at eventuelle forskjeller kan bli mer tydelige. Prøvene med hanefett (C1) viste at prøver uten aluminium i grunningen ga langt dårligere resultater enn prøver med aluminium, og var dermed lik de maskinerte A-prøvene.

I kapittel 5.1 var det mulig å se en trend mellom peak count (P_c) og korrosjonskryp, og mellom tortuositet og korrosjonskryp. For eksempel ga økt tortuositet for de maskinerte overflatene mer korrosjonskryp. Denne effekten var også mulig å se for katodisk avbinding, både mot P_c og mot tortuositet. Figur 64 og 65 i appendiks G viser disse trendene. I motsetning til korrosjonskryp som hadde lik trend for både prøver med og uten aluminium i grunningen, viste prøvene for katodisk avbinding den samme trenden kun for prøvene med aluminium i grunningen.

Som nevnt ble det valgt å se bort fra den endeplanfreste prøven fra SINTEF (B1). Dette var fordi prøvene viste relativt store avvik fra de resterende A-prøvene, noe som er antatt å skyldes forskjellig malingsmerke og annen overflatetopografi. På grunn av at dette ga flere usikkerhetsmomenter, ble det valgt å fokusere på A-prøvene. Figur 51 på neste side viser korrosjonskryp plottet mot avbinding både fra test av katodisk avbinding (blå og rød) og fra avbinding i front av korrosjonskrypet (grønn og lilla).



Figur 51: Viser korrosjonskryp plottet mot katodisk avbinding, med og uten aluminium. Blå og rød er målt avbinding under test for katodisk avbinding, mens grønn og lilla er målt avbinding i front av korrosjonskryptet.

Figuren over viser at det er liten sammenheng mellom katodisk avbinding og korrosjonskryp, og at det dermed er mulig å anta at katodisk avbinding ikke har så stor innvirkning på korrosjonskryp som det var antatt.

Figur 51 viser derimot at det er mulig å observere en trend mellom prøver med og uten aluminium i grunningen. Trenden viser at prøver med aluminium i grunningen er mer utsatt for korrosjonskryp enn prøver uten aluminium, mens effekten er motsatt for katodisk avbinding ved at aluminium i grunningen reduserer grad av avbinding. Dette kan bli sett om en sammenligner blå og grønn, med rød og lilla i figur 51. Det er mulig å anta at aluminiums-pigmentene har en negativ innvirkning på korrosjonen på maskinerte overflater. På grunn av at aluminiums-pigmentene har motsatt innvirkning, gir det antydninger til motsatt effekt av korrosjonskryp og katodisk avbinding ved at en økning i katodisk avbinding gir redusert korrosjonskryp. Det er derimot mer sannsynlig å anta at denne effekten skyldes hvordan belegget virker inn på feilmekanismene, enn at det er katodisk avbinding som har innvirkning på korrosjonskryp.

Ser man på resultatene fra målt avbinding i front av korrosjonskryptet (grønn og lilla), er det mulig å se antydninger til noen trender. Aluminium i grunningen viser at økt katodisk avbinding gir økt korrosjonskryp, mens uten aluminium viser motsatt effekt ved at økt avbinding gir redusert korrosjonskryp. Tar en utgangspunkt i at aluminiums-pigmenter ikke er aktuelt på grunn av at det gir en negativ innvirkning på korrosjonskryp, er det mulig å konsentrere seg om de lilla plottene som er uten aluminium i grunningen. Disse antyder som sagt at økt katodisk avbinding gir redusert korrosjonskryp. Dette stemmer overens med hva Reed påstod [47], men går i mot det som var antatt for oppgaven, nettopp at katodisk avbinding kunne være en av grunnene til at maskinerte overflater har dårlig motstand mot korrosjonskryp. Forklaringen på dette kan være at omgjøringen av katodisk miljø til anodisk miljø, som følge av variasjon av vått og tørt miljø og klorid ioner, blir i større grad bremset opp enn først antatt. På denne måten er overflaten beskyttet.

Selv om trenden i figur 51 er svært interessant er det viktig å understreke at den bare viste $R^2=0,59$. Dette viser at punktene ikke drar nok i samme retning for at det er mulig å konkludere med noe. Det måtte ha vært en verdi nærmere 1 for å kunne gjort dette, men resultatene viser antydninger til en interessant trend. Testing over en lengre tidsperiode vil kunne gitt større endring mellom de ulike maskinerte overflatene, og dermed gitt bedre grunnlag for å se sammenhenger.

5.3 Effekt av adhesjon på korrosjonskryp

Et av formålene med oppgaven var å se om de maskinerte overflatene hadde dårlig adhesjon, da spesielt våt adhesjon, og om dette kunne være en av grunnene til dårlig motstand mot korrosjonskryp.

Som forklart i teorikapittelet er det antatt at dagens adhesjonsmetoder ikke er tilstrekkelige når adhesjonen mellom en overflate og det tilhørende belegget skal bestemmes. På bakgrunn av det eksperimentelle arbeidet gjennomført og resultatene som er oppnådd er det mulig å se at dette til en viss grad stemmer, spesielt når både våt og tørr adhesjon og ulike beleggsystemer tas med i betraktningene. Innledningsvis var det klart at belegget gjennom testing av pull-off ikke ville ha adhesivt brudd mellom metalloverflaten og grunningen, med mindre pull-off viste mindre enn 5 MPa. Dette ble benyttet som en pekepinn for å se om de ulike beleggene hadde tilstrekkelig adhesjon. Det er verd å merke seg at det bare ble testet adhesjon på prøver som var blitt endeplanfrest fra SINTEF (B1), noe som gjør testmatrisen lite omfattende.

Resultatene fra pull-off viste at prøver uten aluminium i grunningen stort sett viste bedre adhesjon enn prøver med aluminium i grunningen, både ved tørr og våt adhesjon. Unntaket var ved tørr pull-off med beleggsystemet av Jotamastic 87 Al. Tas det hensyn til at prøvene malt med beleggsystemet av Jotamastic 90 Al ble testet feil i forhold til våt cross-cut, viste prøvene fra test for cross-cut langt bedre tørr adhesjon enn våt adhesjon. Prøvene av Jotamastic 90 Al ble testet dagen etter at de var tatt ut av vannet og det kan da antas at adhesjon er hentet seg noe inn og gir bedre målinger for adhesjon. Resultatene fra korrosjonskryp var noe motsigende, ved at prøver uten aluminium hadde noe mer korrosjonskryp og samtidig bedre adhesjon enn prøver med aluminium.

Det var ønskelig å teste prøver med tilnærmet null adhesjon, altså å se på effekten av adhesjon på korrosjonskryp under ekstreme forhold, og det ble derfor smurt et tynt lag med hanefett utenpå endeplanfreste prøver fra SINTEF (B1) før de ble malt. Disse ble bare testet for tørr adhesjon og viste lavere resultater enn de resterende prøvene testet for adhesjon. Som ved de maskinerte prøvene viste prøvene med hanefett (C1) dårligst adhesjon av prøvene med aluminium i grunningen. Det var overraskende at det var forskjell mellom de ulike beleggene, da hanefettet ble påført rett på overflaten og nesten alle bruddene var adhesivt med overflaten. En skulle i utgangspunktet tro at det ble like resultater, men det kan virke som at aluminium-pigmentene gir en redusert effekt av adhesjon. Det var også overraskende at prøver uten aluminium i grunningen viste pull-off verdi på 5,5 MPa, og dermed lå innenfor kravet gitt av ISO 20340. Siden prøvene likevel viste nesten fullstendig adhesivt brudd mellom metalloverflate og grunning, var adhesjon derfor bra sammenlignet med for eksempel prøvene av Jotamastic 90 som hadde pull-off på 13,5 MPa, men med kohesive brudd i malingene. Kohesivt brudd gir ikke et direkte mål for adhesjon, og det er mulig å anta at adhesjonen er høyere enn den målte kohesjonen.

Prøvene med hanefett viste langt mer alvorlige angrep av korrosjonskryp for prøvene uten aluminium, sammenlignet med de maskinerte prøvene uten hanefett som hadde langt bedre adhesjon. Dette viser at adhesjon har en viss effekt på korrosjonskryp. Resultatene var derimot motsigende ved at prøver med aluminium viste et tilnærmet likt korrosjonskryp for både prøver med og uten hanefett, til tross for forskjell i målt adhesjon. Resultatene for hanefett var også noe motsigende ved at prøvene uten aluminium hadde langt bedre adhesjon, men også langt dårligere motstand mot korrosjonskryp enn prøvene med aluminium. Det er derfor mulig å anta at adhesjon

har en innvirkning på korrosjonskryp, men at resultatene er motsigende og at det er andre parametere som spiller en vesentlig rolle.

Det var også mulig å se antydninger til at hanefettet, til en viss grad, hadde bremset korrosjonsprosessen på den maskinerte overflaten. Dette er vist i figur 41. Dette var svært overraskende, da det var forventet at hanefettet bare ville gi en effekt av dårlig adhesjon. Det kan være mulig å antyde at hanefettet til en viss grad beskytter overflaten og miljøet under belegget mot korrosjon. På grunn av at prøvene med hanefett viste både dårlig adhesjon og elendig motstand mot korrosjonskryp, er det ikke en mulig løsning på problemstillingen. Det er likevel interessant å se på hva som gjør at hanefettet viser antydninger til å beskytte overflaten mot korrosjon, og om det er mulig å benytte noe av mekanismene bak dette videre for å beskytte maskinerte overflater mot korrosjon.

Som nevnt er det tydelig at dagens målemetoder for adhesjon kan gi varierende resultater, og det er nødvendig med bedre metoder som kan gi mer entydige og sikre svar. Et problem som dukket opp var ved test av våt adhesjon ved pull-off. Disse prøvene står en dag etter at de er tatt opp av vannet før de blir testet, for at limet skal herde. Dette gjør at adhesjonen kan hente seg noe inn og vil ikke gi en direkte måling av våt adhesjon. Dette er et område som har forbedringspotensial, slik at det er mulig å få en direkte måling av våt adhesjon slik som ved cross-cut. Resultatene av tørr og våt adhesjon for prøvene fra tilhørende fordypningsprosjektet høsten 2014 viste også at det var lettere å skille våt og tørr adhesjon med cross-cut. Dette er vist i tabell 13, i appendiks E.

6 Konklusjon

I denne oppgaven har det blitt sett på korrosjonsbeskyttelse av maskinerte overflater, og formålet har vært å se på hvorfor maskinerte flater har dårlig motstand mot korrosjonskryp. Det har blitt sett på hvordan ruhet, adhesjon og katodisk avbinding virker inn på korrosjonskryp. Det har blitt lagt vekt på beleggsystemer med og uten aluminium i grunningen, og overflater med ulike ruheter. Gjennom omfattende testing og litteratursøk har det følgende blitt funnet ut:

- Maskinerte overflater har svært dårlig motstand mot korrosjonskryp, og bekrefter dermed antagelsene fra det tilhørende fordypningsprosjektet.
- Overflateruhet har en innvirkning på korrosjonskryp. Økt peak count (P_c) gir mindre korrosjonskryp, og økt tortuositet (τ) gir mer korrosjonskryp.
- R_a er ikke tilstrekkelig til å karakterisere maskinerte overflater, og det er ikke reelt å sammenligne maskinerte flater opp mot blåserensede flater.
- Basert på resultatene har ikke katodisk avbinding stor innvirkning på korrosjonskryp, men det er antydninger til at økt katodisk avbinding gir lavere korrosjonskryp, når beleggsystem uten aluminium i grunningen er benyttet.
- Aluminiums-pigmenter er svært avgjørende for motstand mot katodisk avbinding, men disse pigmentene kan gjøre belegget mer utsatt for korrosjonskryp.
- Adhesjon har en innvirkning på korrosjonskryp, men resultatene er motsigende og det er antatt at det er andre mekanismer som har større betydning for korrosjonskryp på maskinerte overflater.

7 Referanser

1. TMM 4205, *Tribologi og overflateteknikk*. 2014: Norwegian University of Science and Technology.
2. Videm, M., *Offshore korrosjon*. 2012, FORCE technology Norway AS: Høgskolen I Sør- Trøndelag.
3. Rincon Troconis, B.C. and G.S. Frankel, *Effect of Roughness and Surface Topography on Adhesion of PVB to AA2024-T3 using the Blister Test*. Surface and Coatings Technology, 2013. **236**(0): p. 531-539.
4. Packham, D.E., *Surface energy, surface topography and adhesion*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2003. **23**(6): p. 437-448.
5. Sørensen, P.A., et al., *Influence of substrate topography on cathodic delamination of anticorrosive coatings*. Progress in Organic Coatings, 2009. **64**(2-3): p. 142-149.
6. Khun, N.W. and G.S. Frankel, *Effects of surface roughness, texture and polymer degradation on cathodic delamination of epoxy coated steel samples*. Corrosion Science, 2013. **67**(0): p. 152-160.
7. P. A. Sørensen, S.K., K. Dam-Johansen, C. E. Weinell, *Anticorrosive coatings: a review*. Journal of Coatings Technology and Research 2009. **Volume 6**(Issue 2): p. pp 135-176
8. Knudsen, O.Ø., *Methods for quantitative measurement of adhesion-Literature study*. 1999, SINTEF Materials Technology: Trondheim. p. 24.
9. Yun Ho Baek, M.K.C., Seong Mo Son, Eun Ha Song, Chil Seok Shin and Kwang Ki Baek, *Reliability on Coating Pull-Off Adhesion, Strength Test*. NACE International, Corrosion 2009 Conferens & EXPO, 2009. **Paper No. 09007**.
10. P.A. Sørensen, K.D.-J., C.E. Weinell, S. Kiil, *Cathodic delamination of seawater-immersed anticorrosive coatings: Mapping of parameters affecting the rate*. Progress in Organic Coatings, 2010. **68**.
11. Subramanian, C., et al., *Influence of substrate roughness on the scratch adhesion of titanium nitride coatings*. Surface and Coatings Technology, 1993. **62**(1-3): p. 529-535.
12. Staia, M.H., et al., *Effect of substrate roughness induced by grit blasting upon adhesion of WC-17% Co thermal sprayed coatings*. Thin Solid Films, 2000. **377-378**(0): p. 657-664.
13. Packham, D.E., *Chapter 7 Surface roughness and adhesion*, in *The mechanics of adhesion*, A.V.Pocius, Editor. 2002. p. 317-430.
14. Bardal, E., *Korrosjon og korrosjonsvern*. Vol. 2.utgave. 1994, Trondheim: tapir akademisk forlag.

15. Liu, C., et al., *An a.c. impedance study on PVD CrN-coated mild steel with different surface roughnesses*. Surface and Coatings Technology, 1995. **76–77, Part 2(0)**: p. 623-631.
16. Takadom, J. and H.H. Bennani, *Influence of substrate roughness and coating thickness on adhesion, friction and wear of TiN films*. Surface and Coatings Technology, 1997. **96(2–3)**: p. 272-282.
17. Kristoffersen, A., *Adhesjon mellom korrosjonsbeskyttende belegg og maskinert stål*, in *Fordypningsprosjekt*. 2014, Institutt for produktutvikling og material. p. 49.
18. Dandong fuding engineering machinery CO. *Machining surface finish chart, comparator, degree, Ra, Rz, RMS*. Available from: <http://www.iron-foundry.com/machining-surface-finish-chart-comparator-method-degree-ra-rz-rms.html>.
19. Baldan, A., *Adhesion phenomena in bonded joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **38(0)**: p. 95-116.
20. Ebnesajjad, S.E.a.C., *Theories of Adhesion*, in *Surface Treatment of Materials for Adhesive Bonding*, Elsevier, Editor. 2014.
21. Leach, R., *Chapter 6 - Surface Topography Measurement Instrumentation*, in *Fundamental Principles of Engineering Nanometrology (Second Edition)*, R. Leach, Editor. 2014, William Andrew Publishing: Oxford. p. 133-204.
22. TMM 4260, *Offshore materialer- Introduction to Tribology*. 2014: Norwegian University of Science and Technology.
23. Gadelmawla, E.S., et al., *Roughness parameters*. Journal of Materials Processing Technology, 2002. **123(1)**: p. 133-145.
24. ISO 4287, *Geometrical Product Specifications (GPS), Surface texture: Profile method: Terms, definitions and surface texture parameters*. 1997, ISO. p. 25.
25. Quinsat, Y., L. Sabourin, and C. Lartigue, *Surface topography in ball end milling process: Description of a 3D surface roughness parameter*. Journal of Materials Processing Technology, 2008. **195(1–3)**: p. 135-143.
26. Tao Chen, et al., *Study on cutting force and surface micro-topography of hard turning of GCr15 steel*. Journal of advanced manufacturing technology, 2014.
27. Ward. D., *An investigation into the effect of surface profile on the performance of coatings in accelerated corrosion tests*. NACE International Corrosion 2007 Conferens & EXPO, 2007. **Paper No. 07001**.
28. Roper, H.J., *The effect of Peak Count of Surface Roughness on Coating Performance*. Paint square, 2005.
29. Marghalani H.Y, *Effect of filler particles on surface roughness of experimental composite series*. Journal of Applied Oral Science, 2010. **18**.
30. Roper, H.J., *Peak performance from abrasives*. Paint square, 2006.

31. ISO 8501, *Corrosion Protection of Steel Structures by Painting*. 2011, DIN.
32. Islam, M.S., L. Tong, and P.J. Falzon, *Influence of metal surface preparation on its surface profile, contact angle, surface energy and adhesion with glass fibre prepreg*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014. **51**(0): p. 32-41.
33. Sina S. Jamali and D.J. Mills, *Steel surface preparation prior to painting and its impact on protective performance of organic coating*. Progress in Organic Coatings, 2014. **77**.
34. Trent, E.M. and P.K. Wright, *Metal Cutting*. 2000, Burlington, MA, USA Butterworth-Heinemann 465
35. Tschätsch, H., *Applied Machining Technology*. 2009, Berlin/Heidelberg, DEU Springer. 395.
36. Youssef, H.A., *Machining Technology : Machine Tools and Operations*. 2008, Boca Raton, FL, USA CRC Press 672
37. R.E. Melchers and R. Jeffrey, *Surface "Roughness" Effect on Marine Immersion Corrosion of Mild Steel*. Corrosion engineering section, 2003. **60**: p. 7.
38. Johnsen, R., *Protection against corrosion and wear- through the use of coating*. 2013, SINTEF Institutt for Produktutvikling og Materialer.
39. ISO 12944-5, *Corrosion protection of steel structure by protective paint systems, part 5: Protective paint systems*, in *Paints and varnishes 2007*, DIN.
40. NORSOKM-501, *Surface preparation and protective coating*. 2004, DIN.
41. The Surface Finishing Equipment Group Ltd, *Technical & material, safety data sheet*, in *Chilled iron*. 1992. p. 7.
42. A.F. Harris and A. Beevers, *The effects of grit-blasting on surface properties for adhesion*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 1999. **19**.
43. Liu, B.-s., et al., *Blistering failure analysis of organic coatings on AZ91D Mg-alloy components*. Engineering Failure Analysis, 2014. **42**(0): p. 231-239.
44. Claus E. Weinell and S.N. Rasmussen, *Non-destructive determination of rust creep*. NACE International Corrosion 2008 Conferens & EXPO, 2008. **Paper No. 08004**.
45. Corrosion doctors. *Iron corrosion products*. 2015; Available from: <http://www.corrosion-doctors.org/Experiments/iron-products.htm>.
46. Forsmo, S.P.E., *Oxidation of magnetite concentrate powders during storage and drying*. International Journal of Mineral Processing, 2005. **75**: p. 10.
47. Reed, C., *Underfilm Corrosion Creep and Cathodic Delamination: Under the Microscope*. NACE International 2014. **Paper No. 4271**: p. 14.

48. Diao, D. and A. Kandori, *Finite element analysis of the effect of interfacial roughness and adhesion strength on the local delamination of hard coating under sliding contact*. Tribology International, 2006. **39**(9): p. 849-855.
49. Collazo, A., et al., *Surface treatment of carbon steel substrates to prevent cathodic delamination*. Electrochimica Acta, 2007. **52**(27): p. 7513-7518.
50. Montoya, R., et al., *A cathodic delamination study of coatings with and without mechanical defects*. Corrosion Science, 2014. **82**(0): p. 432-436.
51. Ole Øystein Knudsen and J.I. Skar, *Cathodic disbonding of epoxy coatings- effect of test parameters*. NACE International, Corrosion 2009 Conferens & EXPO, 2008. **Paper No. 08005**: p. 15.
52. Huichao Bi and J. Sykes, *Cathodic disbonding of an unpigmented epoxy coating on mild steel under semi- and full-immersion conditions*. Corrosion Science, 2011. **53**.
53. Lilleborg, *Jif Skurekrem*, in *Sikkerhetsdatablad*. 2008, Lilleborg.
54. VWR International, *HMS Datablad*, in *Etanol*. 2006, VWR International.
55. ISO 2808, *Determination of film thickness*, in *Paints and varnishes 2007*, DIN.
56. Jotun, *Jotun Tynner nr. 17*. 2004, Jotun.
57. Borer Chemie AG. *Glisseal N / HV, Silicone-free lubricating grease for ground joints, stopcocks and apparatuses*. Borer, advanced cleaning solutions 2014.
58. Jotun, *Technical Data Sheet*, in *Jotamastic 90*. 2015, Jotun.
59. Jotun, *Technical Data Sheet*, in *Jotamastic 87 Aluminium*. 2014, Jotun.
60. Jotun, *Technical Data Sheet*, in *Jotamastic 87*. 2014, Jotun.
61. Jotun, *Technical Data Sheet*, in *Penguard Tie Coat 100*. 2014, Jotun.
62. Jotun. *Protective coatings*. Available from: http://cdn.jotun.com/images/Jotamastic-protective-brochure-2011_tcm84-1592.pdf.
63. ISO 4624, *Pull-off test for adhesion*, in *Paints, varnishes and plastics 2002*, DIN.
64. Scotch- Weld 3M, *Product Data Sheet*, in *EPX Adhesive DP490*. 1996.
65. ISO 20340, *Performance requirements for protective paint systems for offshore and related structures*, in *Paints and varnishes 2009*.
66. ISO 2409, *Cross cut test*, in *Paints and Varnishes*. 1992, DIN.
67. ISO 9227, *Corrosion tests in artificial atmospheres — Salt spray tests*. 2006.
68. ISO 11507, *Exposure of coatings to artificial weathering- Exposure to fluorescent UV lamps and water*, in *Paints and Varishes 2007*.

69. Transocean Coatings. *Transocean systems approved by Shell*. 2014 [cited 2014 19.11]; Available from: <http://www.transocean-coatings.com/en/newsitem/transocean-systems-approved-shell/>.
70. ISO 12944-6, *ISO 12944-6 Corrosion protection of steel structures by protective paint systems*, in *Part 6: Laboratory performance test methods*. 1998.
71. International standard, *ISO 15711*, in *Paints and varnishes — Determination of resistance to cathodic disbonding of coatings exposed to sea water*. 2003, International standard.
72. ASTM International, *ASTM G95*, in *Standard Test Method for Cathodic Disbondment Test of Pipeline Coatings* 2013, ASTM International.
73. Loctite. *Loctiti SI 5926*. 2015; Available from: <http://www.loctite.no/loctite-3915.htm?nodeid=8802627452929>.

8 Appendiks

Appendiks A Krav og begrensinger til belegg

Hovedkrav:

- Beleggsystemet: 10 års levetid.
 - o Korrosjonsklasse C5, med korrekte maskinerings- og vaskeprosedyrer.
- Overflater under vann: 5 års levetid.
- Ikke høyere kostnader enn dagens løsning.

Metode:

- Samme utstyr som per dags dato for maskinering, vasking og maling.
- Forbruksmateriell (verktøy, primer, vaskekjemikalier) kan byttes ut.
- Opprettholde kravene for HMS.

Belegg:

- Tåle slag under transport og når det er i virke, uten oppsprekking.
- Samme toppstrøk.
 - o Opprettholde krav til estetikk.
- Tåle temperaturer fra -40 til +80.
- Skal kunne vedlikeholdes.
- Skal kunne benyttes på varmforsinket stål, maskinert stål og komponenter produsert av andre.
- Opprettholde krav for HMS.

Appendiks B Innstilling profilometer og IFM

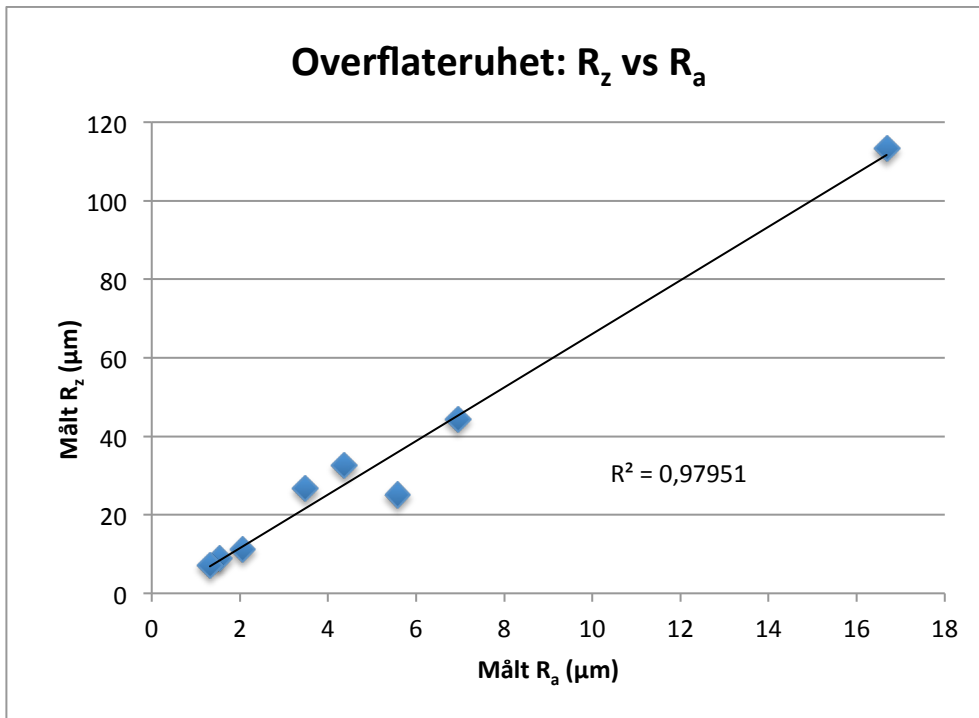
Tabell 11: Innstillinger for måling av overflateruhet ved profilometer. Tabellen viser to innstillinger som er benyttet; standard og lengde-basert. JIS 01 omfatter både Japanese Industrial Standards (JIS) og International Organization for Standardization (ISO). Z_t er aktuell for måling av RP_c og RS_m , og er en verdi basert på en selvvalgt prosent av R_z for de aktuelle overflatene.

Parameter	Standard innstilling (Første testomgang)			Lengde-basert innstilling (Andre testomgang)		
	A1-B1	B2-B4	B5	A1-B5	A1-B5	A1-B5
Standard	JIS 01	JIS 01	JIS 01	JIS 01	JIS 01	JIS 01
Filter	GAUSS	GAUSS	GAUSS	GAUSS	GAUSS	GAUSS
Profile	R	R	R	R	R	R
Forventet R_a (μm)	0,1-2	2-10	10-80	Ikke valgt	Ikke valgt	Ikke valgt
Cut-off length (mm)	0,8	2,5	8	0,8	0,8	0,25
N	5	5	1	5	L=0,8mm	L=0,3mm
Evaluation length (mm)	4	12,5	8	4	0,8	0,3
Z_t (%)	10	10	10	Ikke valgt	Ikke valgt	Ikke valgt

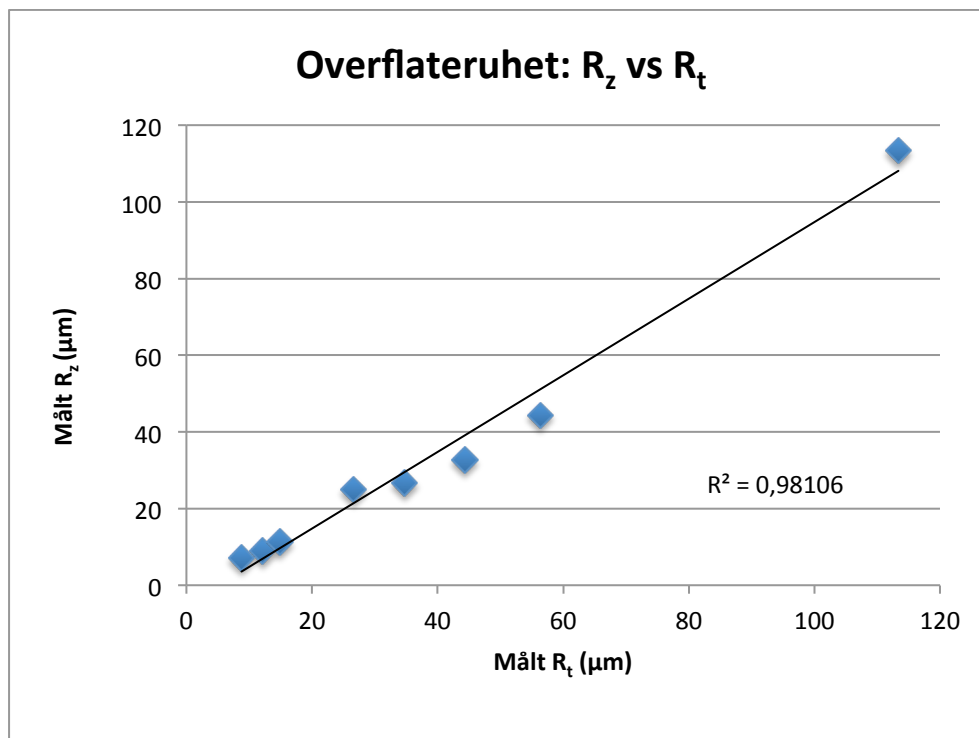
Tabell 12: Innstillinger for måling av tortuositet ved Infinite Focus Microscope (IFM). Dette er gjort på to måter; måling over et areal og måling over en linje. Vertikal oppløsning ble beregnet basert på aktuell R_z -verdi.

Parameter	Innstilling (Areal)	Innstilling (Linje)
Forstørrelse	10x	10x
Vertikal oppløsning (nm)	$\frac{R_z}{75}$	$\frac{R_z}{75}$
Lateral oppløsning (μm)	2,5	2,5
Z-scaling	2,0371	2,0371
Planlagt areal	1,4 mm ²	Ikke valgt
Bredde	Ikke valgt	1,7626 μm
Lengde	Ikke valgt	1,0 mm

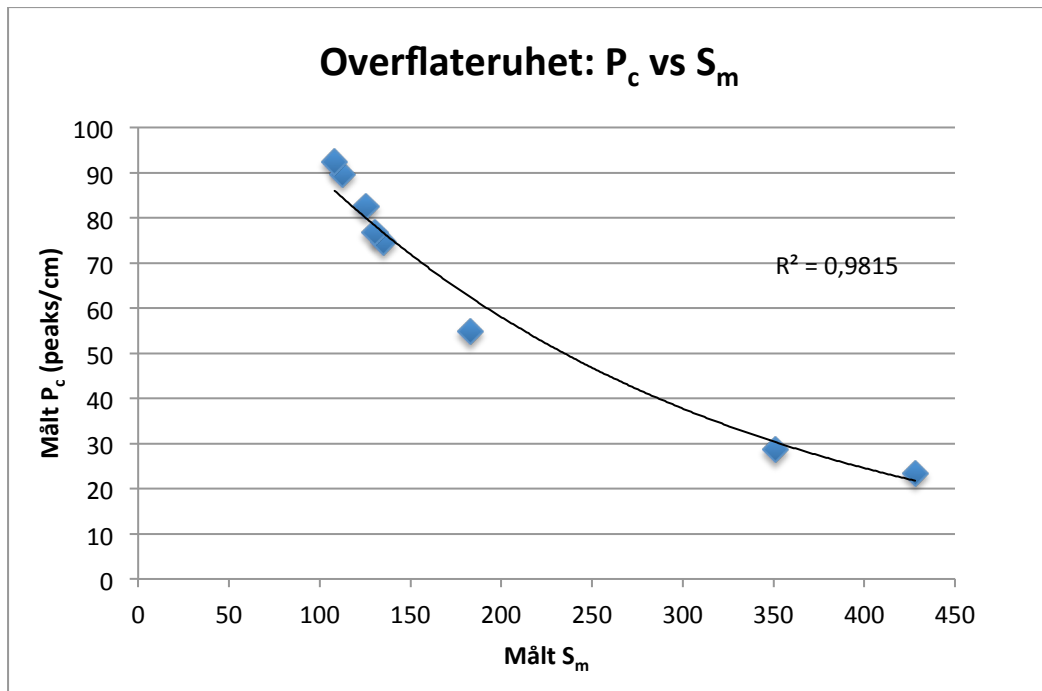
Appendiks C Plott av ulike ruhetsparametere



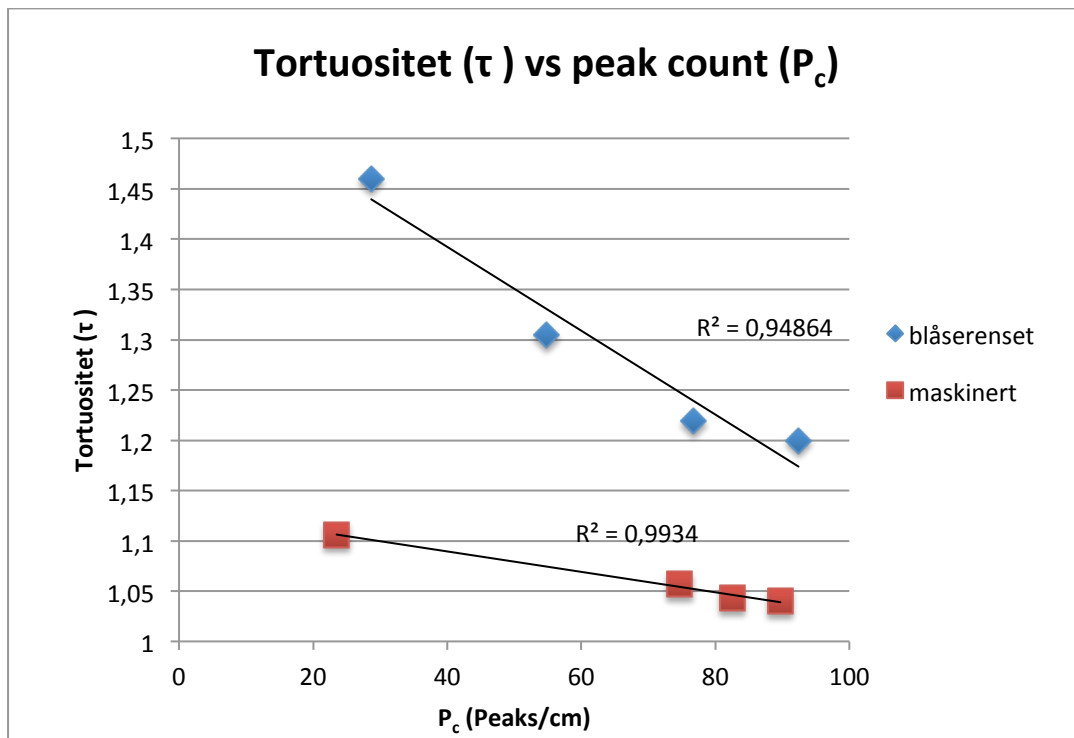
Figur 52: Viser plott av R_z mot R_a , samt tilhørende lineære trendlinje og R^2 -verdi.



Figur 53: Viser R_z plottet mot R_t , samt tilhørende lineære trendlinje og R^2 -verdi.

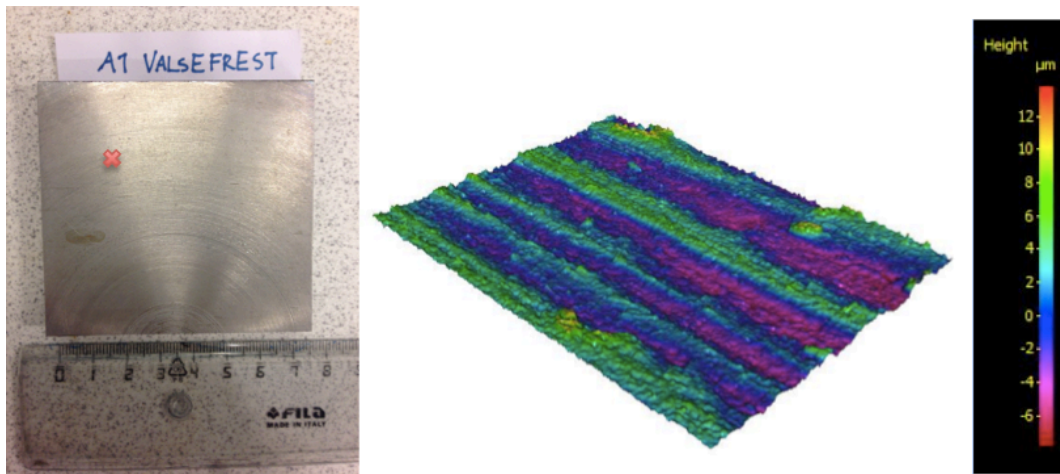


Figur 54: Viser P_c plottet mot S_m , samt eksponential trendlinje og R^2 -verdi.

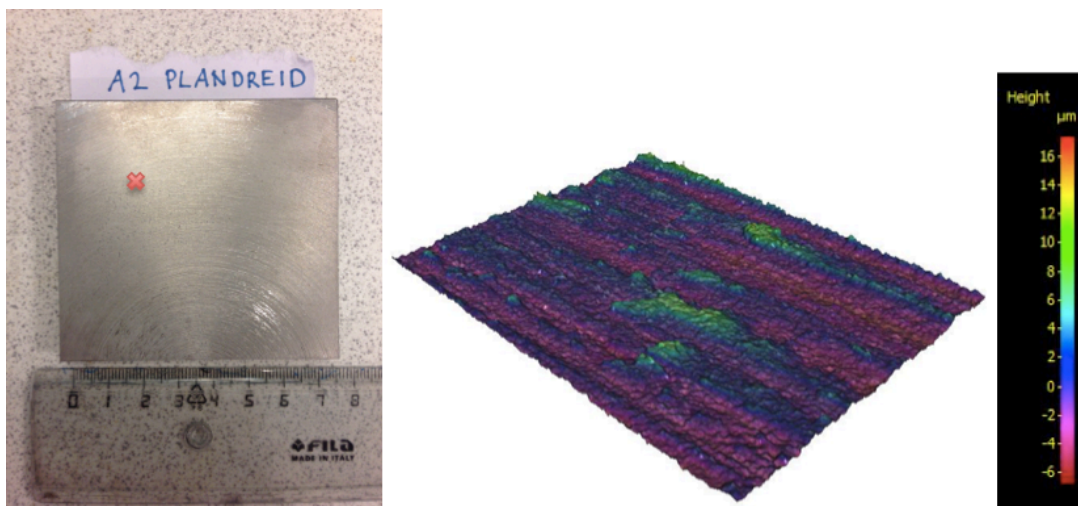


Figur 55: Tortuositet plottet mot peak count for maskinerte og blåserenset overflater, samt tilhørende lineære trendlinjer og R^2 -verdier. Om maskinerte og blåserenset prøver blir sett hver for seg, viser de omvendt proporsjonalitet.

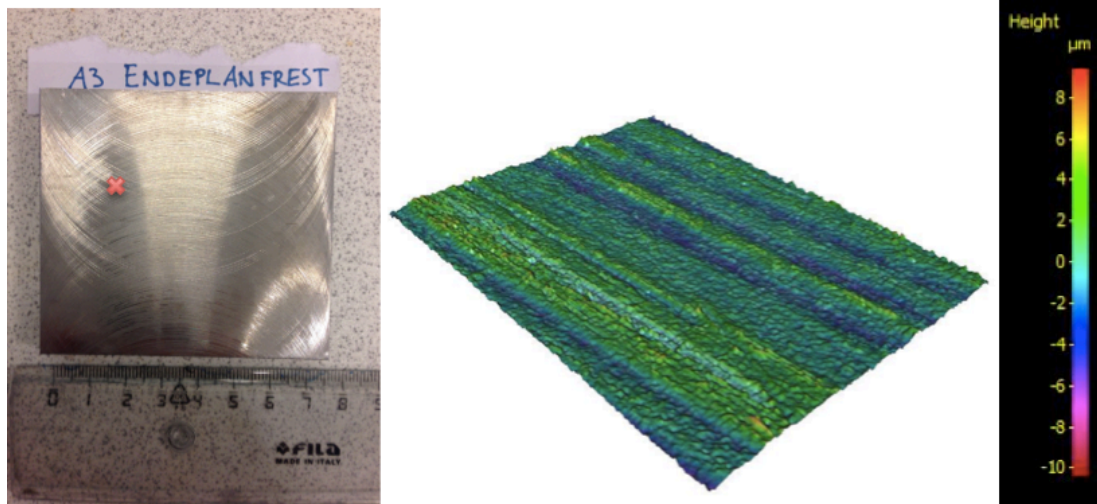
Appendiks D 3D-bilder av ulike overflater



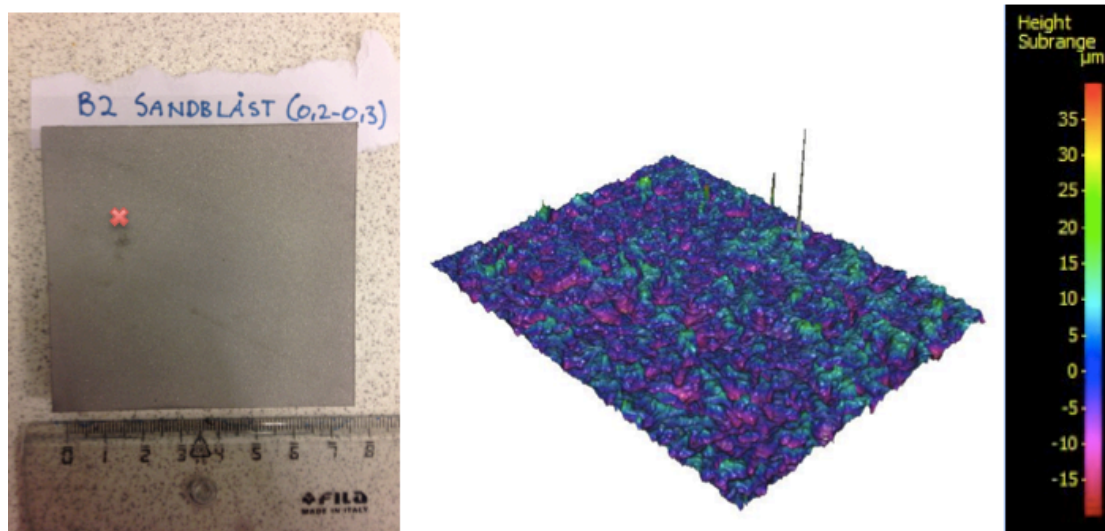
Figur 56: Viser valsefrest prøve (A1), samt tilhørende 3D-bilde av punktet merket med rødt kryss. Merk skalaen på fargeindeksen.



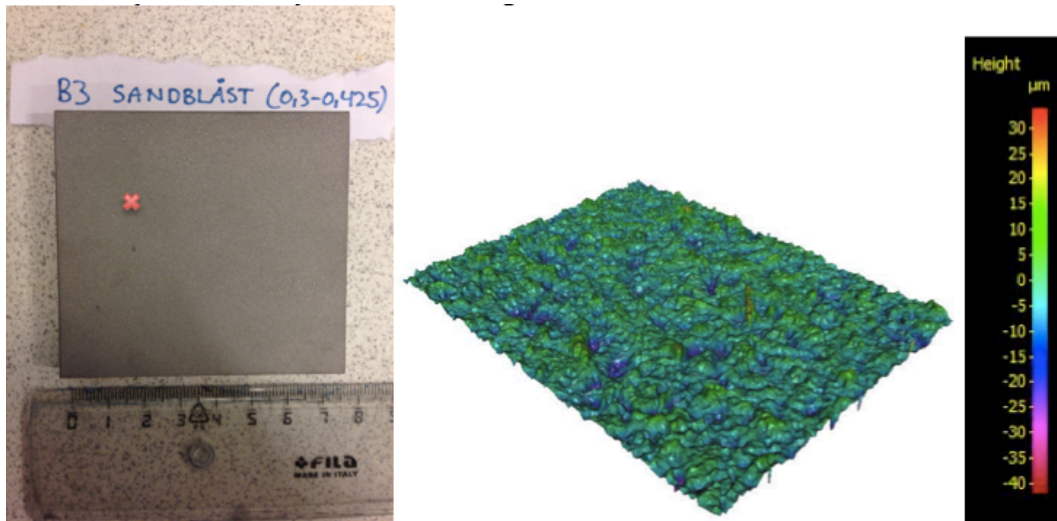
Figur 57: Viser plandreid prøve (A2), samt tilhørende 3D-bilde av punktet merket med rødt kryss. Merk skalaen på fargeindeksen.



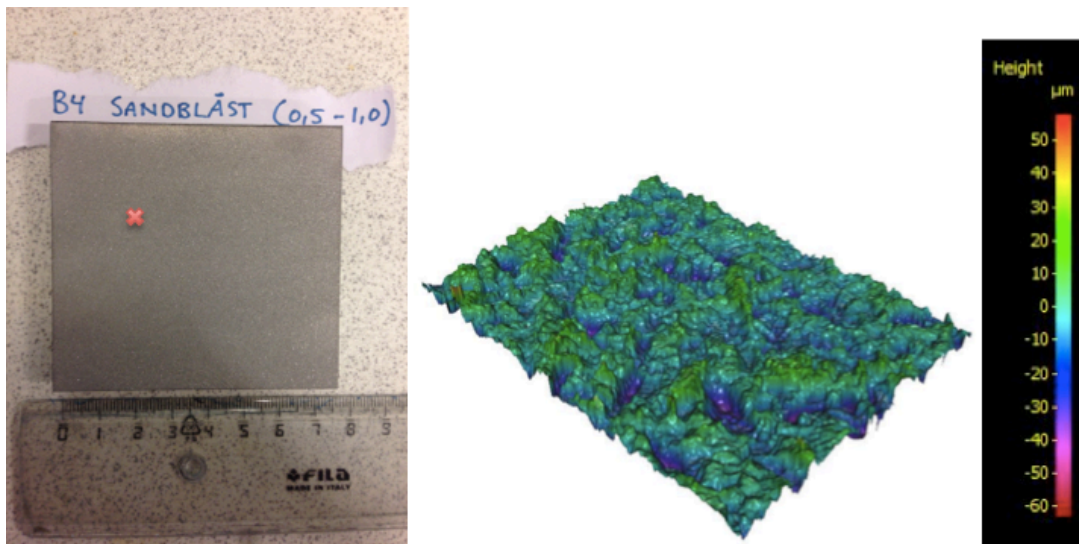
Figur 58: Viser endeplanfrest prøve (A3), samt tilhørende 3D-bilde av punktet merket med rødt kryss. Merk skalaen på fargeindeksen.



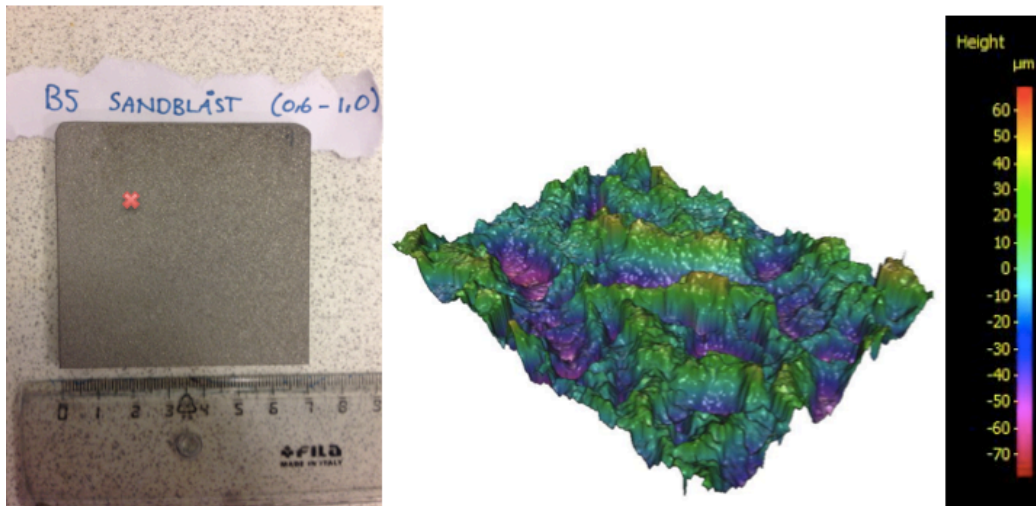
Figur 59: Viser blåserenset prøve (B2), samt tilhørende 3D-bilde av punktet merket med rødt kryss. Merk skalaen på fargeindeksen.



Figur 60: Viser blåserenset prøve (B3), samt tilhørende 3D-bilde av punktet merket med rødt kryss. Merk skalaen på fargeindeksen.



Figur 61: Viser blåserenset prøve (B4), samt tilhørende 3D-bilde av punktet merket med rødt kryss. Merk skalaen på fargeindeksen.



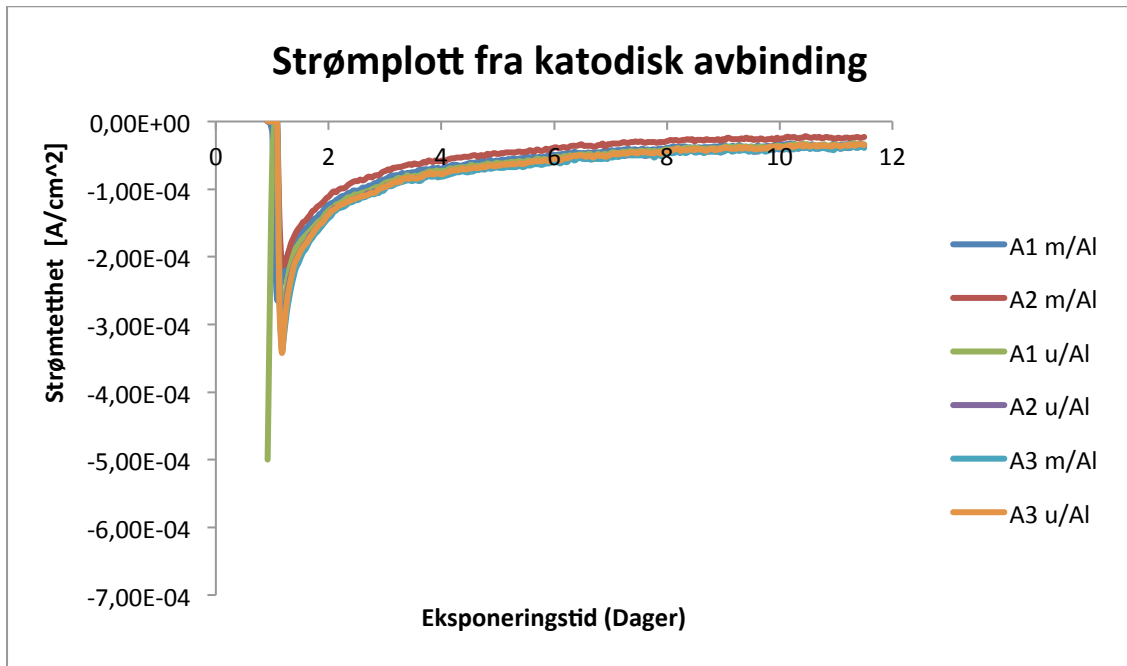
Figur 62: Viser blåserenset prøve (B5), samt tilhørende 3D-bilde av punktet merket med rødt kryss. Merk skalaen på fargeindeksen.

Appendiks E Adhesjonstesting av eksterne prøver høsten 2014

Tabell 13: Viser en oversikt over test av adhesjon for prøver fra det tilhørende fordypningsprosjektet, både for tørr og våt adhesjon. Det er bare sammenligning av adhesjonsmetodene som er benyttet for denne oppgaven.

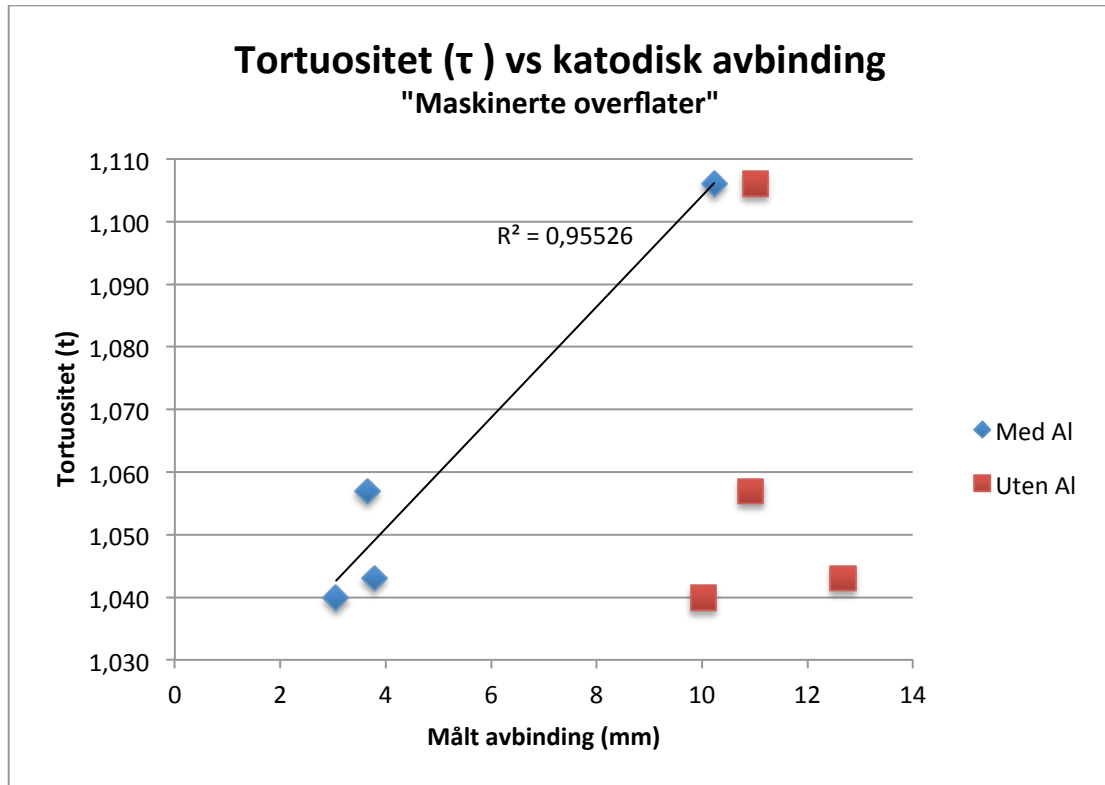
Prøve	Material	Maskinering	Belegg	Pull-off		Cross-cut	
				Tørr	Våt	Tørr	Våt
W	Mild steel S355 EN10025	Endeplanfrest	Epoksy primer	18	17,5	2	0/1
		Plandreid	Epoksy	16,9	18,2	2	0/1
X	Cast iron SG400-12	Endeplanfrest	Epoksy vinyl tiecoat	18,5	17,7	2	0/1
		Plandreid	Antifouling coat	16,7	17,4	2	0/1
		Valsefrest	(Beregnet for subsea)	17,6	17,7	2	0/1
Y	S355 J2G3	Frest Ra=1.6 µm	Epoksy primer	19,9	20,5	1/2	3
		Frest Ra=12µm	Polysiloxane	20,9	18,7	1/2	4/5
		Vinkelslipt	Polysiloxane	19,7	20,7	1/2	5
Z	S690QL	Frest Ra=1.6 µm	(Beregnet for topside)	22,3	21,3	1/2	4
		Frest Ra=12µm		22,1	17,1	1/2	5
		Vinkelslipt		20,5	16,9	1/2	4

Appendiks F Strømplott fra katodisk avbinding

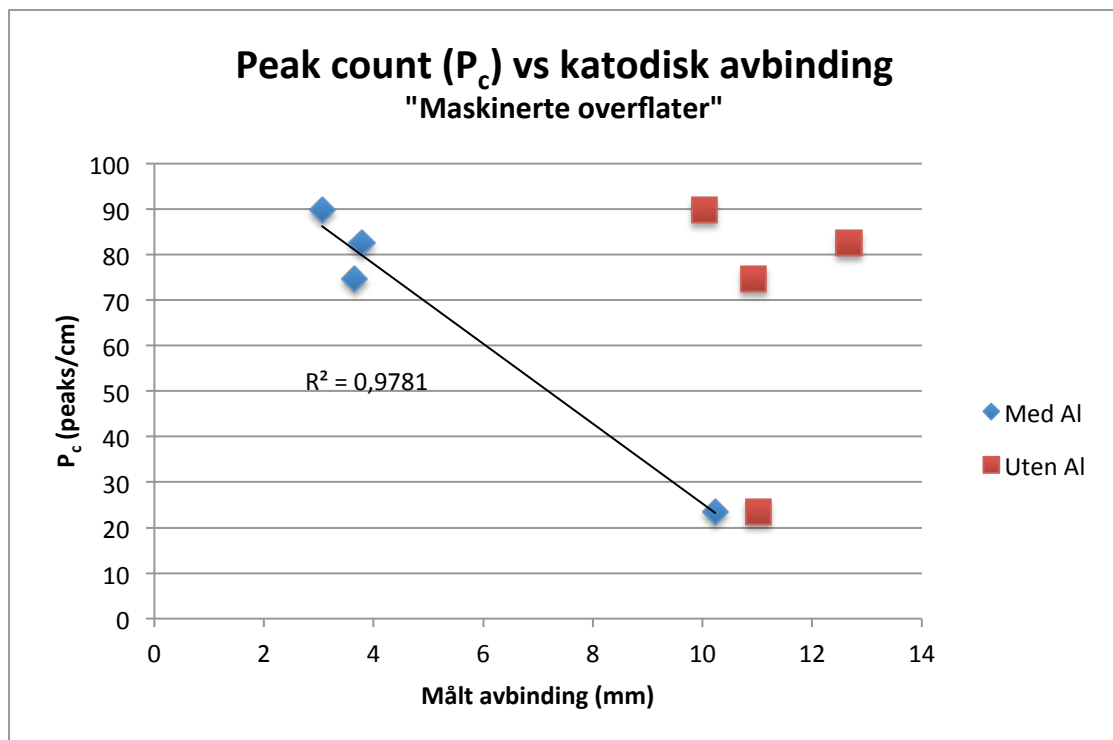


Figur 63: Viser strømplott fra test av katodisk avbinding for valsefrest (A1), plandreid (A2) og endeplanfrest (A3) prøve. Både med og uten aluminium i grunningen. Ser at prøvene drar relativt like mye strøm, og at strømbehovet går ned. Eksponert i 12 dager.

Appendiks G Katodisk avbinding mot tortuositet og peak count



Figur 64: Tortuositet (τ) plottet mot målt katodisk avbinding for maskinerte overflater, med og uten aluminium i grunningen. Prøver uten aluminium viste liten sammenheng, og trendlinje er ikke tatt med.



Figur 65: Peak count (P_c) plottet mot målt katodisk avbinding for maskinerte prøver, med og uten aluminium i grunningen. Prøver uten aluminium viste liten sammenheng, og trendlinje er ikke tatt med.

Appendiks H Oppgavetekst

NORGES TEKNISK-
NATURVITENSKAPELIGE UNIVERSITET
INSTITUTT FOR PRODUKTUTVIKLING
OG MATERIALER

MASTEROPPGAVE VÅR 2015 FOR STUD.TECHN. Alexander Kristoffersen

Korrosjonsbeskyttelse av maskinerte ståloverflater

Corrosion protection of machined steel surfaces

Oppgaven er en fortsettelse av Fordypningsprosjekt høsten 2014. Industribedrifter har erfart at maskinerte overflater er vanskelige å beskytte mot korrosjon. Beleggene som påføres feiler tidlig. I et fordypningsprosjekt høsten 2014 ble det funnet at problemet først og fremst er svært dårlig motstand mot korrosjonskryp. Tidligere har man trodd at problemet skyldes dårlig heft, men det er hovedsakelig tilbakevist nå.

Oppgaven går ut på å forklare hvorfor belegg på maskinerte overflater er så utsatt for korrosjonskryp. Vi har to hypoteser som skal undersøkes:

- Beleggene har dårlig motstand mot katodisk avbinding. Katodisk avbinding gjør først at belegget mister heften. Korrosjonskryp følger deretter på der belegget har løsnet.
- Maskineringen gjør at stålet er mer utsatt for korrosjon.

Basert på resultatene skal det foreslås alternative belegg eller maskineringsmetoder som kan gi bedre motstand mot nedbrytning.

Formelle krav:

Senest 3 uker etter oppgavestart skal et A3 ark som illustrerer arbeidet leveres inn. En mal for dette arket finnes på instituttets hjemmeside under menyen masteroppgave (<http://www.ntnu.no/ipm/masteroppgave>). Arket skal også oppdateres en uke før innlevering av masteroppgaven.

Risikovurdering av forsøksvirksomhet skal alltid gjennomføres. Eksperimentelt arbeid definert i problemstilling skal planlegges og risikovurderes innen 3 uker etter utlevering av oppgavetekst. Konkrete forsøksvirksomhet som ikke omfattes av generell risikovurdering skal spesielt vurderes før eksperimentelt arbeid utføres. Risikovurderinger skal signeres av veileder og kopier skal inngå som vedlegg til oppgaven.

Besvarelsen skal ha med signert oppgavetekst, og redigeres mest mulig som en forskningsrapport med et sammendrag på norsk og engelsk, konklusjon, litteraturliste,

innholdsfortegnelse, etc. Ved utarbeidelse av teksten skal kandidaten legge vekt på å gjøre teksten oversiktlig og velskrevet. Med henblikk på lesning av besvarelsen er det viktig at de nødvendige henvisninger for korresponderende steder i tekst, tabeller og figurer anføres på begge steder. Ved bedømmelse legges det stor vekt på at resultater er grundig bearbeidet, at de oppstilles tabellarisk og/eller grafisk på en oversiktlig måte og diskuteres utførlig.

Besvarelsen skal leveres i elektronisk format via DAIM, NTNUs system for Digital arkivering og innlevering av masteroppgaver.

Kontaktperson: Ole Øystein Knudsen

Torgeir Welo
Instituttleder



Ole Øystein Knudsen
Faglærer



NTNU
Norges teknisk-
naturvitenskapelige universitet
Institutt for produktutvikling
og materialer

Appendiks I Risikovurdering

 NTNU HSE	<h2 style="margin: 0;">Hazardous activity identification process</h2>	
Prepared by HSE section Approved by The Rector	Number HSM/RV/2601 Page 	Date 22.03.11 Replaces 01.12.06

Unit: (Department) IPM **Date:** 15.01.15
Line manager: Torgeir Welo
Participants in the identification process (incl. function):
 (supervisor, student, co-supervisor, others) Ole Øystein Knudsen (veileder), Alexander Kristoffersen (student)
Short description of the main activity/main process:
Master project for student Alexander Kristoffersen. Corrosion protection of machined steel surfaces.
Is the project work purely theoretical? (YES/NO) NO *Answer "YES" implies that supervisor is assured that no activities requiring risk assessment are involved in the work. If YES, briefly describe the activities below. The risk assessment form need not be filled out.*
Signatures: Responsible supervisor:  Student: 

ID nr.	Activity/process	Responsible person	Existing documentation	Existing safety measures	Laws, regulations etc.	Comment
1	Maling ved bruk av lo-komponent epoksy	Alexander Kristoffersen		Risikoanalyse ved Sintef, Perleporten	Arbeidsmiljøloven	Benytt avtrekkskap, hanser og vernebriller
2	3D- mikroskopi	Alexander Kristoffersen	Alcona Manual Help	Risikoanalyse ved Sintef, Perleporten	Arbeidsmiljøloven	Grundig opplæring. Behandle utstyret med forsiktighet
3	Slagfasthet av malte prøver	Alexander Kristoffersen	ISO 6272	Risikoanalyse ved Sintef, Perleporten	Arbeidsmiljøloven	Vær oppmerksom ved innsettning av prøver og start av test. Grundig opplæring
4	Korrosjonskryp	Alexander Kristoffersen	ISO 9227 og ISO 11507	Risikoanalyse ved Sintef, Perleporten	Arbeidsmiljøloven	Grundig opplæring. Benytt hansker og vernebriller. Ikke åpne kammerne før de er skrudd av, vent 1-2 min ved saltlake slik at denne får lagt seg.
5	Ruhetsmålinger vha stylus	Alexander Kristoffersen		Risikoanalyse ved Sintef, Perleporten	Arbeidsmiljøloven	Grundig opplæring. Behandle utstyret med forsiktighet

6	Etikettering av stålprofiler	Alexander Kristoffersen		Risikoanalyse ved Sintef, Perleporten	Arbeidsmiljøloven	Berørt hanske, vernebriller, frakk
7	Pull-off test av malte prøver	Alexander Kristoffersen	ISO 4624	Risikoanalyse ved Sintef, Perleporten	Arbeidsmiljøloven	Grundig opplæring. Berørt hanske og vernebriller. Ikke åpne kammerne før de er skudd av, vente 1-2 min ved selvtåke slik at deime får lagt seg.
8	Gitternett av malte prøver	Alexander Kristoffersen	ISO 2409	Risikoanalyse ved Sintef, Perleporten	Arbeidsmiljøloven	Grundig opplæring. Behandle utstyret med forsiktighet
9	Katodisk avønding	Alexander Kristoffersen		Risikoanalyse ved Sintef, Perleporten	Arbeidsmiljøloven	Grundig opplæring, sjekk utstyt, merke ledninger, dekke til ledninger med malingtblå silikon, forsiktig med skalpell og boremaskin

 NTNU HMS / KS	Risk assessment			Prepared by HSE section Approved by The Rector	Number HMSRV2803 Page Replaces	Date 04.02.11 Replaces 08.02.10
---	------------------------	--	--	---	---	--

Unit: *(Institute)* IPM Date: 15.01.15

Line manager: Torgeir Welo

Participants in the identification process (incl. function):
(supervisor, student, co-supervisor, others) Ole Øystein Knudsen (veileder), Alexander Kristoffersen (student)

Risk assessment of: Master project for student Alexander Kristoffersen. Corrosion protection of machined steel surfaces.

Signatures: Responsible supervisor: *(Signature)* Student: *(Signature)*

ID nr.	Activity from the identification process form	Potential undesirable incident/train	Likelihood: (1-5)	Consequence:			Risk value (human)	Comments/status Suggested measures
				Human (A-E)	Environment (A-E)	Economy/material (A-E)		
1	Maling ved bruk av to-komponent epoksy	Innhaling av giftige gasser	2	C	A	A	C2	Benytt avtrekkskap, hansker og vernebriller
2	3D- mikroskop	Skade på utstyr	2	A	A	D	A2	Grundig opplæring. Behandle utstyret med forsiktighet
3	Slagfasthet av malte prøver	Klemfare for fingre, fetter etc	1	B	A	A	B1	vsar oppmerksomhet ved innsettling av prøver og skart av test. Grundig opplæring
4	Korrosjonskryp	Frostskaider, eksponering av UV-lys, saltbåte kan forårsake korrosjon på elektrisk utstyr.	1	A	C	B	A1	Grundig opplæring. Benytt hansker og vernebriller. Ikke åpne kammerne før de er skrudd av, vent 1-2 min ved saltbåte slik at denne
5	Ruhetsmålinger vha styhus	Skade på utstyr	2	A	A	B	A2	Grundig opplæring. Behandle utstyret med forsiktighet

6	Bilserensering av stålfprofiler	Sand i øynene, slitasje på klær/ hender	2	A	A	A	A	A	A2	Benytt hansker, vernebriller, frakk Grundlig opplæring.
7	Pull- off test av malte prøver	Kontakt med epoksy lim, klemsåne, brannfare, brannskader	2	A	A	A	A	A	A2	Benytt hansker og vernebriller. Ikke åpne kammerne før de er skrudd av, vent 1-2 min ved saltåke slik at denne får lagt seg.
8	Gjærensitt av malte prøver	Skade på utstyr. Kuttskader.	1	A	A	A	A	A	A1	Grundlig opplæring. Behandle utstyret med forsiktighet
9	Katodisk avbinding	Skade seg på eksipell eller boremaskin, klemme seg, kontakt med blå silikon	2	B	A	A	A	B	B2	Grundlig opplæring, sjekke utstyr, merke ledninger, dekke til ledninger med malingbå silikon, forsiktig med eksipell og boremaskin