

# Korrosjonsbeskyttelse av Maskinert Stål

**Asbjørn Hognestad**

Materialteknologi

Innlevert: juni 2016

Hovedveileder: Ole Øystein Knudsen, IPM

Medveileder: Catalina H. Musinoi Hagen, IPM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for produktutvikling og materialer



# Forord

Masteroppgaven *Korrosjonsbeskyttelse av Maskinert Stål* er gitt av Institutt for Produktutvikling og Materialer (IPM) ved Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet (NTNU). Masteroppgaven tilhører hovedprosjektet *Korrosjon og slitasjebeskyttelse av glatte metallflater* og bygger på et liknende fordypningsprosjekt fra høsten 2015. Hovedprosjektet delfinansiert av MAROFF- programmet til Norges Forskningsråd (NFR), hvor prosjektleder 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.

Hovedveileder for prosjektoppgaven er Seniorforsker / Professor II Ole Øystein Knudsen. Medveileder er doktorgradsstipendiat Catalina H. Musinoi Hagen.

Det rettes en spesielt stor takk til hovedveileder Ole Øystein Knudsen som har satt av tid hver uke til nyttig veiledning og innspill. En spesielt stor takk rettes også til Catalina H. Musinoi Hagen som har bistått i både veiledning og eksperimentelt arbeid. Begge har vært svært imøtekommende og hjelpsomme, også på kort varsel.

En stor takk rettes til Ann-Karin Kvernbråten og Nils-Inge Johan Nilsen. Begge har vært svært hjelpsomme både i opplæring på og assistanse på eksperimentelt arbeid. En stor takk rettes også til Øystein Dahl for prøvekarakterisering med XPS, samt hjelp med å tolke og behandle XPS-data. En stor takk rettes også til Brunvoll AS for tilsending av prøvestykker.



# Sammendrag

Det er vanlig praksis å blåserense stål som skal belegges med organisk belegg. Blåserensingen rengjør ståloverflaten og etterlater en overflateruhet som gir god belegglevetid. Maskinerte overflater blir ikke alltid blåserenset før påføring av belegg. Dette skyldes gjerne økonomiske eller funksjonelle årsaker. Belegg på maskinerte overflater har ofte lavere levetid enn belegg på blåserensede overflater. Dette gjelder spesielt ved skader i belegg som eksponerer det underliggende stålet. Nærliggende belegg rundt slike skader løsner hurtigere fra maskinerte overflater enn blåserensede overflater. Avflaking av belegg er problematisk både med tanke på materialdegradering og estetikk. Av denne grunn er det ønskelig å finne maskineringsmetoder som kan forbedre belegglevetiden til maskinerte overflater. Målet med oppgaven var å forstå hvorfor belegglevetiden er lavere på maskinerte overflater. Dette skulle gjøres ved å undersøke effekten av ruhet og skjærevæske, som begge ble antatt å påvirke belegglevetid.

Tre paralleller fra 14 forskjellige plandreide flatetyper av karbonstål ble syklisk testet i seks uker i henhold til ISO 20340. Prøvene var belagt med to strøk to-komponent epoxy-mastic. De 14 flatetyperne besto av syv forskjellige ruheter, maskinert med og uten skjærevæske. Overflateruhet ble målt og beregnet med profilometer, IFM og tverrsnittbilder. XPS ble anvendt for å fastslå hvorvidt skjærevæske påvirker overflatekjemien til maskinerte overflater. Flatetyperne ble sammenliknet opp mot hverandre etter syklisk testing. Dette for å fastslå effekten fra skjærevæske og overflateruhet på belegglevetid.

## Følgende hovedkonklusjoner kunne trekkes ut:

→ Maskinering med skjærevæske har liten påvirkning på belegglevetid. Dette forutsetter at rester av skjærevæske har blitt fjernet fra overflaten før belegging.

→ Ruhetstopper som er høye ( $R_z > 300\mu\text{m}$ ), overhengende og tårnliknende gir et markant positivt bidrag til belegglevetid. Slike topper er ikke typiske ved maskinering.

Belegglevetiden ved slike ruheter er tilsynelatende høyere enn tidligere testede, blåserensede overflater. God belegglevetid på slike flater ble antatt å hovedsakelig skyldes formen på ruhetstoppene. Ruhetstoppene ble antatt å påvirke belegglevetiden gjennom en kombinasjon av:

- Økt gangvei for kationtransport som reduserer raten av katodisk beleggavbinding

- Økt bindingsareal per nominelle overflate som gir økt beleggheft
- Høy grad av mekanisk forankring. Den mekaniske forankringen ble antatt å virke på to måter. Den mekaniske forankringen vil først motvirke belegget fra å bevege seg i retninger langs overflaten. Det ble også foreslått at den mekaniske forankringen kan skyldes at fuktig og utvidende belegg presser mot veggene til de tårnliknende ruhetstoppene. Det kan tenkes at press fra utvidende belegg vil motvirke heften på belegg med en svakere helning. Dette skyldes at presskreftene dekomponeres til skjærkrefter langs substratet. Presset mot de tårnliknende ruhetsveggene til denne overflaten vil trolig ikke dekomponeres til skjærkrefter. Slike topper vil istedet kunne gi opphav til friksjonskrefter som motvirker vertikal bevegelse av belegget.

→ Ruhet har stor innvirkning på overflater med topper ( $\sim 10\mu\text{m} < R_z < \sim 70\mu\text{m}$ ) som er typiske for maskinerte overflater. Belegglevetiden på slike flater synker merkbart med synkende ruhet. På disse flatene ble det antatt at belegglevetiden hovedsakelig kommer fra:

- Økt gangvei for kationtransport som reduserer raten av katodisk avbinding
- Økt bindingsareal per nominelle overflate som gir økt beleggheft

# Abstract

It is a common practice to grit blast steel surfaces prior to coating. The grit blasting process leaves a clean and rough surface. A grit blasted roughness is regarded as advantageous with respect to organic coating lifetime. Grit blasting might not be performed on machined surfaces prior to the coating process. This is usually due to either economic reasons or functional surface requirements. The organic coating lifetime is usually lower on painted machined steel than on painted grit blasted steel. The lower coating lifetime is especially pronounced in the presence of coating holidays that expose the underlying steel. Organic coating around such holidays will start to delaminate. The delamination rate is usually much higher on machined surfaces, compared to grit blasted surfaces. One therefore aims to find machining methods that can create surfaces with higher coating lifetime. The goal of this thesis was to understand why machined surfaces have a low coating lifetime. This was to be done by investigating the influence from surface roughness and cutting fluid. Both parameters were believed to affect the coating lifetime.

Mild steel surfaces were face turned into 14 different surface types. The 14 different surface types consisted of seven different surface roughnesses, machined with and without the use of cutting fluid. Three samples from each of the 14 surface types were cyclically tested for six weeks according to ISO 20340. The samples were coated with two layers of two-component epoxy mastic. Roughness was measured or estimated on each surface type with profilometer, IFM and light microscopy. XPS was used to determine if cutting fluid remains on samples after surface cleaning. The different surface types were compared with respect to roughness and cutting fluid at the end of the cyclic test.

The following main conclusions were found:

→ Machining with the use of cutting fluid does not have a notable effect on organic coating lifetime. This given that the residual cutting fluid has been removed from the surface prior to coating.

→ Asperities that are tall ( $R_z > 300\mu\text{m}$ ), overhanging and tower like in shape give a significantly positive contribution to organic coating lifetime. Coatings on such surfaces seems to have a higher lifetime than coatings previously tested on grit blasted surfaces. The high coating lifetime is mainly attributed to the shape of the roughness asperities.

It was believed that the asperities gave a higher coating lifetime through a combination of:

- Increased pathway cation transport which is believed to reduce the rate of cathodic disbonding
- Increased bonding area per nominal surface area, which is believed to increase coating adhesion
- A high degree of mechanical interlocking between substrate and coating. The mechanical interlocking was assumed to work through two mechanisms. Firstly, the mechanical interlocking was assumed to prevent coating movement along the substrate surface. This by physical blocking from the roughness asperities. It was also suggested that these asperities may be influenced by horizontal forces from an expanding wet coating. An expanding wet coating was assumed to create shear forces along surfaces with low surface peak slopes. It was suggested that these shear forces may work against the adhesion between coating and substrate. It was assumed that such shear forces does not arise on tower like asperities. On the tower like asperities, the expanding coating is assumed to create high friction between expanding coating and substrate. This friction could increase coating adhesion by working against vertical coating movement.

→ Surface roughness has a large influence on surfaces with asperities ( $\sim 10\mu\text{m} < R_z < \sim 70\mu\text{m}$ ) that are typical for machined surfaces. The coating lifetime on such surfaces drops with a reduction in surface roughness. On these surfaces, it was assumed that high roughness increased coating lifetime by:

- Increased pathway for cation transport which is believed to reduce the rate of cathodic disbonding
- Increased bonding area per nominal surface area, which is believed to increase coating adhesion



# Innholdsfortegnelse

Forord .....	i
Sammendrag .....	iii
Abstract .....	v
1. Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn og problemstilling.....	1
1.2 Målsetning .....	1
2. Teori .....	3
2.1 Beleggheft .....	3
2.2 Korrosjonskryp fra beleggdefekt.....	5
2.3 Dreining.....	9
2.4 Ruhet .....	11
2.5 Ruhet og belegglevetid.....	15
2.7 XPS.....	19
3. Eksperimentelt.....	21
3.1 Forbehandling av prøveflater .....	22
3.2 Preparering av prøver for syklisk beleggtesting.....	23
3.3 Syklisk beleggtesting.....	25
3.4 Overflatekarakterisering .....	26
4. Resultater.....	31
4.1 Billedtaking av tverrsnitt.....	31
4.2 Ruhetsmålinger.....	33
4.3 XPS-resultater .....	36
4.5 Syklisk beleggtesting.....	40
5. Diskusjon.....	43

5.1 Tverrsnittbilder fra lysmikroskopi .....	43
5.2 Målte og beregnede ruhetsparametre .....	44
5.3 XPS-resultater .....	46
5.4 Ruhet, skjærevæske og belegglevetid .....	48
6. Konklusjon .....	57
6.1 Forslag til videre arbeid.....	58
7. Referanser.....	61
8. Vedlegg .....	65
Vedlegg A: Risikovurdering .....	65
Vedlegg B: Målt tørrfilmtykkelse .....	72
Vedlegg C: Innstillinger ved IFM-måling.....	73

# 1. Innledning

## 1.1 Bakgrunn og problemstilling

Karbonstål er mye brukt i offshore- og maritime konstruksjoner. En stor ulempe med karbonstål i nærheten av sjøvann er materialets lave motstand mot korrosjon. Det er vanlig å bruke organisk belegg eller *maling* for å beskytte stålet mot korrosjon. I tillegg til å beskytte stålet mot korrosjon vil malingen også dekke estetiske behov. Det er vanlig praksis å blåserense stål som skal belegges. Blåserensingen rengjør overflaten til stålet og etterlater en overflateruhet som gir god belegglevetid. Maskinerte overflater blir ikke alltid blåserenset før påføring av belegg. Dette skyldes gjerne økonomiske eller funksjonelle årsaker. Belegg på maskinerte overflater har ofte lavere levetid enn belegg på blåserensede overflater. Dette gjelder spesielt ved skader i belegg som eksponerer det underliggende stålet. Nærliggende belegg rundt slike skader løsner hurtigere fra maskinerte overflater enn blåserensede overflater. Avflaking av belegg er problematisk med tanke på nedbryting av material og estetikk. Av denne grunn er det ønskelig å finne maskineringsmetoder som kan forbedre belegglevetiden til maskinerte overflater.

Avhandlingen bygger på et tidligere fordypningsprosjekt av samme forfatter. I fordypningsprosjektet ble effekt av ruhet og skjærevæske undersøkt på et sett av planfreste flater. De planfreste flatene var maskinert med og uten skjærevæske, ved forskjellige maskineringsinnstillinger. Det ble observert forskjeller mellom flater maskinert med og uten skjærevæske. Flatene som var maskinert uten skjærevæske viste generelt lavere belegglevetid med høyere ruhet. Den motsatte effekten ble observert på flater uten skjærevæske. Den direkte effekten av skjærevæske og ruhet på belegglevetid ble derimot ikke avklart.

## 1.2 Målsetning

Hovedmålet til avhandlingen var å forklare hvorfor belegglevetiden er lav på belagte, maskinerte overflater. Hovedmålet skulle oppnås ved å undersøke og avklare:

- Effekten av overflateruhet på belegglevetid
- Effekten av skjærevæske på belegglevetid



## 2. Teori

### 2.1 Beleggheft

Heft beskriver bindingsstyrken mellom to overflater. Organisk belegg, eller *maling*, anvendes hyppig til å beskytte ståloverflater mot korrosjon. God heft mellom belegg og ståloverflate regnes som en viktig forutsetning for god belegglevetid. Heft til ståloverflaten har blitt omtalt som beleggsystemets viktigste egenskap[1]. Stålet vil ikke lenger være beskyttet om belegget løsner fra ståloverflaten.

#### 2.1.1 Heftmekanismer

Heft regnes som et komplekst fenomen. Styrken på bindingen, eller *heften* mellom to overflater er antas å være avhengig av flere, ulike interaksjonsmekanismer. Flere teorier har forsøkt å beskrive heft. Teoriene beskriver ofte heft gjennom en kombinasjon av undermekanismene som er oppsummert i *Tabell 1*[2-5].

*Tabell 1: Utdyping av undermekanismer som står for heft mellom to overflater*

Undermekanisme	Utdypning
Molekylære bindinger	<p><i>Molekylære bindinger</i> omtaler en rekke krefter mellom atomer og molekyler som:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Dipol-dipol-interaksjoner</li><li>- Van der Waals-krefter</li><li>- Kjemiske interaksjoner</li></ul> <p>Molekylære bindinger er den mest anerkjente undermekanismen for heft. Mekanismen antas å gi et betydelig bidrag til heft mellom to flater. Betydelig heft fra molekylære bindinger forutsetter nær kontakt mellom substrat og belegg. Defekter som sprekker og luftbobler i belegget antas dermed å merkbart svekke effekten fra denne undermekanismen.</p>
Termodynamisk Adsorpsjon	<p>Adsorpsjon er en termodynamisk mekanisme. To overflater trekkes sammen for å minimere systemets frie overflateenergi. Adsorpsjonsmekanismen er ikke like avstandssensitiv som de</p>

	molekylære bindingskreftene. Av denne grunn blir adsorpsjon gjerne regnet som den viktigste heftundermekanismen.
Mekanisk forankring	Ved mekanisk forankring holdes belegget på plass av det belagte substratet sine overflateuregelmessigheter. Eksempler på uregelmessigheter kan være avbøyede topper i blåserensede profiler, eller periodiske maskineringsstopper. Uregelmessighetene hindrer beleggbewegelse relativt til substratoverflaten. Effekten fra denne mekanismen er noe omdiskutert. Det antas at mekanismens effekt er svært avhengig av formen på substratets overflate.
Elektrostatisk bindinger	De elektrostatisk bindingene kommer fra kolombiske tiltrekningskrefter mellom elektrostatisk ladd belegg og substrat. Elektrostatisk bindinger antas å være av mindre betydning for beleggets heft.

### 2.1.2 Våtheft

Organisk belegg er ikke ugjennomtrengelig for vann. Beleggsystemet vil gradvis absorbere vann ved fuktig eksponering. En skiller gjerne mellom tørr og våt belegghaft. Heften til et vått belegg er ofte lavere enn heften til et tørt belegg [6-8]. Beleggsystemer i fuktige omgivelser vil dermed kunne oppleve redusert belegglevetid [9]. Den våte heftreduksjonen har vist seg å være noenlunde reversibel [10]. Når tørr belegghaft vil kunne gjenopprettes når belegget tørker. Grad av gjenoppretting har vist seg å være avhengig av temperatur og hvor lenge belegget har stått fuktig [8, 11].

Mekanismen bak den våte belegghaften er usikker. Noen studier antyder at våt belegghaft skyldes at det absorberte vannet endrer beleggets egenskaper [12, 13]. Det har også blitt antatt at våt belegghaft skyldes vann, i eller nær grenseflaten mellom belegg og substrat. Vannet antas å påvirke de kjemiske interaksjonene som står for belegghaft [8].

### 2.1.3 Substratoverflate og belegghaft

Overflaten til substratet har stor innvirkning på beleggets heft. Det er vidt anerkjent at beleggets heft til substratet er avhengig av substratets ruhet og renhet. Effekten av forurensinger i overflaten er beskrevet under. Effekten av overflateruhet diskuteres senere, i delkapittel 2.5.

En ren overflate regnes å være en forutsetning for god beleggheft og belegglevetid [14]. Forurensinger på overflaten kan ha en negativ innvirkning på belegget på to måter. Oljer, støv, glødeskall eller andre forurensinger hindrer kontakt, og dermed heft mellom belegg og substrat [15]. Denne effekten kalles gjerne “*weak boundary layers*”. Den andre effekten av forurensinger kommer gjerne fra salter. Salter på et belagt substrat øker tendensen for dannelse av vannfilmer i grenseflaten mellom belegg og substrat. Vannet i kombinasjon med saltene kan dermed reagere elektrokjemisk med substratet. Dette kan resultere i dannelse av beleggblærer og, eller annen korrosjon under belegget [16, 17]. Selv en liten økning i mengde salt på overflaten kan betraktelig redusere belegglevetiden [18].

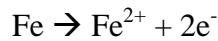
## **2.2 Korrosjonskryp fra beleggdefekt**

Levetiden til beleggsystemer kan betraktelig påvirkes av lokale defekter i belegget [19-21]. Belegg vil hurtig løsne rundt defekter som eksponerer underliggende stål. Korrosjon vil starte på den eksponerte ståloverflaten og vil gradvis bre seg under det nærliggende belegget. Belegget som korrosjonen brer seg inn under vil miste heften til substratet. Dette medfører at nytt stål eksponeres, slik at korrosjonsprosessen kan bre seg videre. Fenomenet blir ofte omtalt som korrosjonskryp (*Corrosion creep*), ettersom korrosjonen “kryper” innover langs belegget. Korrosjonskryp er også kjent som skårkorrosjon (*scribe corrosion*) eller underfilmkorrosjon (*underfilm corrosion*).

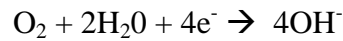
Defekter som initierer korrosjonskryp er ofte beleggskader fra mekanisk slitasje [21]. Korrosjonskryp kan også starte i områder med lav filmtykkelse. Lav filmtykkelse finnes gjerne ved skarpe substratkanter, hjørner eller ujevnheter i overflaten som sveiseperler [14]. Den eksakte mekanismen bak korrosjonskryp er noe omdiskutert. Korrosjonskryp antas allikevel å bero på tre undermekanismer: katodisk avbinding, anodisk undergraving og oppkiling fra korrosjonsprodukter. De tre undermekanismene er kort beskrevet under.

### **2.2.1 Katodisk avbinding**

Ved katodisk avbinding vil det eksponerte stålet i beleggdefekten oppføre seg anodisk. Det eksponerte stålet korroderer med følgende halvreaksjon:

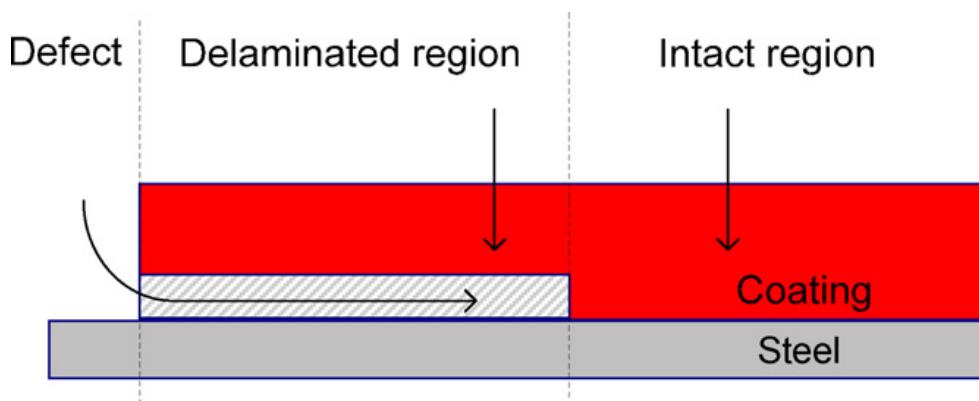


Stålet under det nærliggende, intakte belegget vil ved katodisk avbinding oppføre seg katodisk. Oksygen reduseres på den belagte ståloverflaten gjennom følgende halvreaksjon:



Heften til belegget ved det katodiske området vil reduseres eller brytes. Dette antas hovedsakelig å skyldes at OH<sup>-</sup> svekker interaksjonskreftene som virker mellom stål og belegg [22-24]. Det har også blitt antydnet at OH<sup>-</sup> reduserer heften ved å reagere med substratoksidet som belegget er heftet til [25]. Den katodiske avbindingen kan enten fremtre som en kontinuerlig front fra defekten i belegget, eller som avkoblede blærer [26].

I tillegg til å være avhengig av tilgang på oksygen, er reduksjonen av oksygen også avhengig av tilgang på kationer. Dette for å innfri kravet om ladningsnøytralitet i det katodiske området under belegget. Reaksjonens tilgang på kationer blir antatt å være mer begrenset enn reaksjonens tilgang på oksygen. Hastigheten av katodisk avbinding er dermed antatt å bestemmes av transportraten av kationer til avbindingsfronten [20, 27-29]. Transportveien for kationer til delamineringsfronten antas å hovedsakelig være langs grensesjiktet mellom belegg og substrat [26, 29, 30], som vist i *Figur 1*.



*Figur 1: Figuren illustrerer den antatte transportveien for kationer inn til den katodiske avbindingsfronten. Bildet er hentet fra Sørensen [23]*



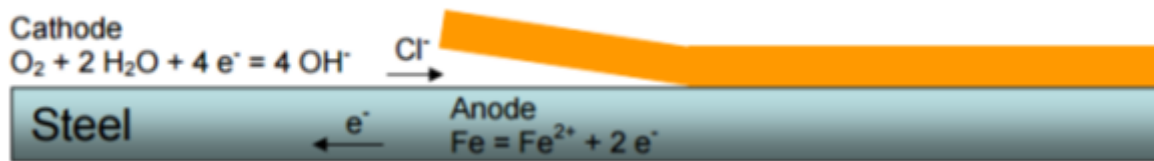
Det basiske miljøet fra oksygenreduksjonen vil beskytte det katodiske stålet mot korrosjon. Dette fordi stålet passiveres ved høye pH-verdier. Korrosjon fra defekt vil dermed ikke kripe innover i delamineringsfronten, så lenge denne forblir basisk [24]. Katodisk avbinding har blitt observert som den dominerende undermekanismen ved kontinuerlig eksponering i høy fuktighet [31, 32].

### **2.2.2 Anodisk undergraving**

Anodisk undergraving finner sted når belagt stål nær beleggdefekten er anodisk og korroderende. Belegget nær defekten vil i dette tilfellet gradvis løsne, etterhvert som stålet under belegget korroderer bort. Anodiske undergraving har vist seg å være mer fremtredende enn katodisk avbinding ved veksling mellom tørr og fuktig eksponering [32]. Den anodiske undergravingen har også vist seg å være mer fremtredende ved eksponering i fuktig luft [33].

Ved anodisk undergraving er det nærliggende stålet anodisk; ved katodisk avbinding er det nærliggende stålet katodisk. Ståloverflater rundt defekter har vist seg å veksle mellom katodisk og anodisk polarisasjon [34, 35]. Anodisk polarisasjon blir gjerne observert ved en større forekomst av korrosjonsprodukter i beleggdefekten. Skiftet i polarisasjon antas å styres av oksygenreduksjon på og, eller i korrosjonsproduktene. Både mengde og type korrosjonsprodukter har vist seg, eller antas å påvirke den anodiske undergravingen [22, 33-36].

Anodisk undergraving kan til en viss grad sammenliknes med spaltkorrosjon. Ved anodisk undergraving dannes jern-kationer under det nærliggende belegget. Anioner, ofte i form av klorioner strømmer til grenseflaten mellom belegget og substrat for å bevare lokal ladningsbalanse, som vist i *Figur 2*. Klorioner reagerer med jernioner og danner jernklorid, som hydrolyseres til hydrogenklorid. Det sure miljøet under belegget fra hydrogenklorid vil videre øke korrosjonsraten i det anodiske området rundt defekten [14].

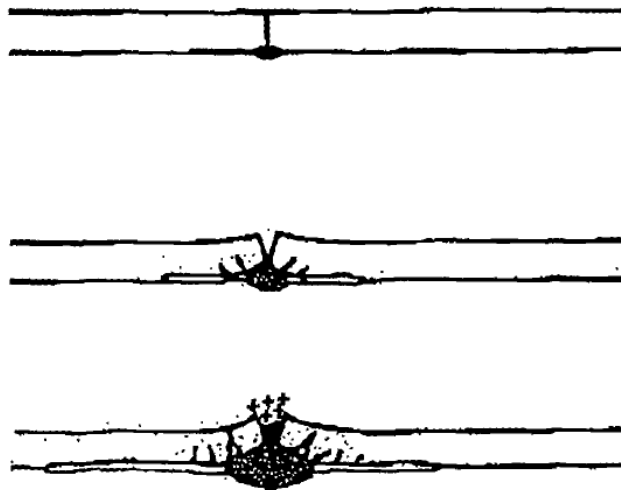


Figur 2: Figuren skisserer klorioner som strømmer inn under belegget for å opprettholde ladningsbalanse. Klorionene vil så reagere med jern, for så å hydrolyseres til hydrogenklorid.

Figuren er hentet fra Knudsen [14].

### 2.2.3 Oppkiling fra korrosjonsprodukter

Variasjonen mellom tørr og fuktig eksponering av beleggsystemet gir opphav til kompakte, faste korrosjonsprodukter. Slike korrosjonsprodukter, som dannes i og under beleggdefekten tar opp et stort nok volum til å kile opp belegget fra substratet, som skissert i Figur 3 [37, 38]. Mekanismen antas (som anodisk undergraving) å være mest fremtredende ved veksling mellom tørr og fuktig eksponering [31].



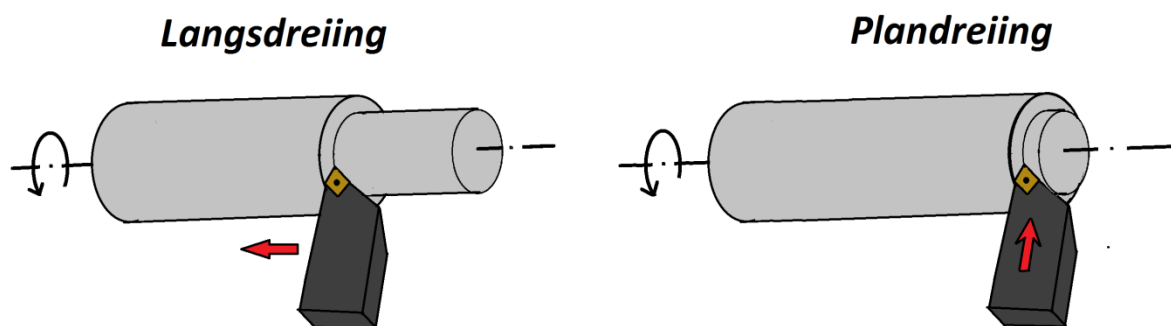
Figur 3: Figuren illustrerer dannelsen av korrosjonsprodukter som presser opp den nærliggende malingen rundt en defekt. Figuren er et utsnitt fra bilde hentet fra Kendig [38].

## 2.3 Dreining

Dreining er en maskineringsmetode hvor et roterende arbeidsstykke formes gjennom skjæring.

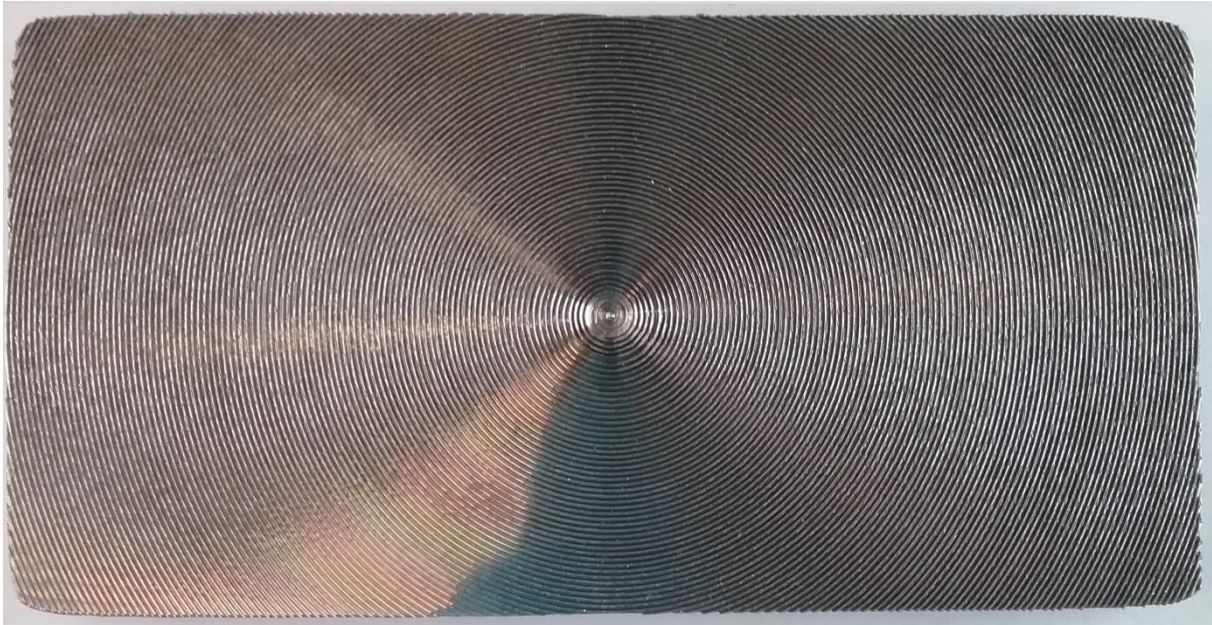
Ved dreining mates et skjæreverktøy innover eller langs arbeidsstykket. Skjæreverktøyet skjærer gradvis bort fragmenter av overflødig materiale, ofte omtalt som “spon”.

Dreieprosessen kan splittes opp i to underkategorier: *langsdreining* og *plandreining*. Ved langsdreining mates skjæreverktøyet langs det roterende arbeidsstykket. Ved plandreining mates skjæreverktøyet innover i det roterende arbeidsstykket [39]. Forskjellen mellom plandreining og langsdreining er illustrert i Figur 4.



Figur 4: Figuren illustrerer forskjellen mellom langsdreining og plandreining. Ved langsdreining mates skjæreverktøyet langs det roterende arbeidsstykket; ved plandreining mates skjæreverktøyet innover i det roterende arbeidsstykket.

Prøvene som ble testet i denne avhandlingen var plandreiede. Plandreiningen etterlater et karakteristisk, spiralformet mønster i prøven, som vist i Figur 5. Plandreiede flater er praktisk talt speilet om senter.



*Figur 5: Eksempel på plandret flat.*

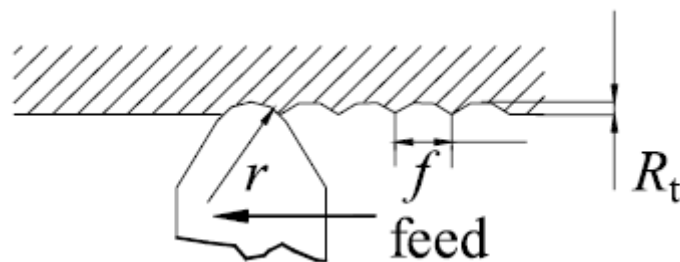
### **2.3.2 Skjærevæske**

Det er vanlig praksis å bruke skjærevæske under maskineringsprosessen. Skjærevæsken fungerer som kjølevæske og smøremiddel. Væsken brukes for å lette på skjæreforholdene under maskineringsprosessen. Dette ved å redusere skjæretemperaturen, samt kreftene som virker mellom verktøyet og arbeidsstykket. Bruk av skjærevæske gir hovedsakelig en finere, mer kontrollert overflate med mindre overflatedeformasjon. Skjærevæsken øker også levetiden på skjæreverktøyet [40-42].

Skjærevæsker deles gjerne inn i to hovedgrupper: oljebaserte og vannbaserte. Hvor vannbaserte skjærevæsker består av en blanding av vann, olje og additiver. Vannbaserte skjærevæsker anvendes ofte til maskinering [42]. Skjærevæsken som har blitt anvendt til maskinering av prøver til denne avhandlingen er også vannbasert. Rester av skjærevæske kan ligge igjen på arbeidsstykket etter maskinering. Slike rester, som oljer i overflaten kan påvirke heft mellom belegg og substrat [43]. Rester av skjærevæske i overflaten bør derfor fjernes før belegging.

### 2.3.1 Maskinert overflate






For en gitt vinkel mellom skjær og arbeidsstykke er den teoretiske, dreiede ruheten hovedsakelig gitt av matehastighet og radius på skjæreverktøyet[44]. *Figur 6* illustrerer hvordan matehastighet og radius påvirker den maskinerte overflaten. Liten skjærradius og høy matehastighet vil for eksempel gi høye ruhetstopper. Som ved andre maskinerte overflater vil en dreid overflate være periodisk. Dette betyr at ruhetstoppene er mer eller mindre like i høyde og avstand over hele flaten. Den teoretiske overflateruheten er analytisk beregnet. I realiteten vil ruheten også påvirkes av faktorer som: vibrasjoner i arbeidsstykket, slitasje i skjæreverktøy, spondannelse og ujevn mating [44]. Det er vanlig praksis å maskinere med en forholdsvis lav matehastighet og høy skjærradius. De fleste maskinerte overflater har dermed en lav overflateruhet [43]. Den lave overflateruheten gjør at maskinerte overflater gjerne blir omtalt som “glatte overflater”.



*Figur 6: Figuren illustrerer hvordan matehastigheten (“feed”) og skjærradiusen (“r”) påvirker arbeidsstykkets overflateruhet. Figuren er et utsnitt av bilde hentet fra Petropoulos [44].*

## 2.4 Ruhet

Topografi, eller overflatetekstur, definerer geometrien til et materials overflate. Overflateteksturen består av repeterende, eller tilfeldige avvik fra den nominelle overflaten. En overflate beskrives gjerne som summen av ordener av strukturelle avvik, som illustrert i *Figur 7* [44]. Innen maskinering deles avvikene gjerne inn i to hovedkategorier: makrogeometriske avvik (“errors”) og mikrogeometriske avvik (“ruhet”). Makrogeometriske avvik, som “waviness” kommer gjerne fra maskineringsfeil fra dårlig oppspente skjæreverktøy eller uønskede vibrasjoner. Mikrogeometriske avvik, eller *ruhet* er derimot et uunngåelig resultat av maskineringsprosessen [44], som tidligere fremstilt i *Figur 6*.

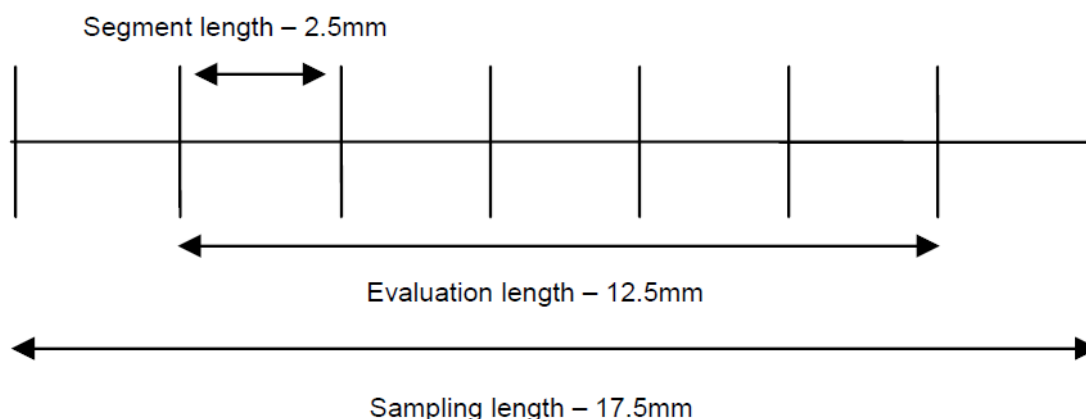
	1 <sup>st</sup> Order: form deviations
	2 <sup>nd</sup> Order: waviness
	3 <sup>rd</sup> Order: grooves (roughness)
	4 <sup>th</sup> Order: scores, scales (roughness)
Not easily representable	5 <sup>th</sup> Order: textural structure 6 <sup>th</sup> Order: lattice structures of the material
	Superposition of structural deviations 1 <sup>st</sup> up to 4 <sup>th</sup> Order

Figur 7: Figuren illustrerer hvordan en overflate kan beskrives gjennom summen av strukturelle avviksordener. Det nederste bilde representerer den faktiske overflaten. 5.- og 6.-ordens avvik er vanskelig å visuelt representere. Figuren er et utsnitt fra bilde hentet fra Klocke [43]

### 2.4.1 To-dimensjonal ruhetsmåling

Ruhet blir tradisjonelt målt 2-dimensjonalt med et slepenålbasert profilometer. Instrumentet blir senere omtalt som kun *profilometer*. Denne typen profilometer anvender en slepenål som er i fysisk kontakt med overflaten som skal måles. Nåla følger høydeforandringer etter hvert som den dras langs overflaten. Nålas bevegelse i vertikal retning noteres og brukes til å beregne flatas overflateruhet [43].

Profilometeret måler ruheten over en *evalueringslengde*. Evalueringenslengden består av 5 like store *segmentlengder*, som vist i *Figur 8*. I tillegg bruker profilometeret et segment foran og bak evalueringenslengden for kalibrering. Evalueringens- og segmentlengden bestemmes forøvrig av overflaten som skal måles; høyere overflateruhet krever høyere evalueringenslengde. En såkalt “cut-off”-lengde bestemmes også av overflateruheten. “Cut-off”-lengden brukes som et filter til å skille mellom “waviness” og ruhet [45].



Figur 8: Figuren skisserer segmentlengde, evalueringslengde og målelengde ved bruk av profilometer.

Figuren er et utsnitt fra bilde hentet fra Ward [46]

Det finnes en rekke ulike måter å beskrive to-dimensjonal ruhet på. To-dimensjonal ruhet beskrives ofte gjennom amplitude- eller avstandsparametre. Amplitudeparametre beskriver hvordan høyden varierer langs overflaten. Avstandsparametre beskriver hyppigheten av overflatens uregelmessigheter eller ruhetstopper. I denne avhandlingen blir det tatt utgangspunkt i amplitudeparameteren  $R_z$  og avstandsparameteren  $P_c$ . De to ruhetsparametrene er kort beskrevet sammen med den mest kjente ruhetsparameteren,  $R_a$  i Tabell 2 [44].

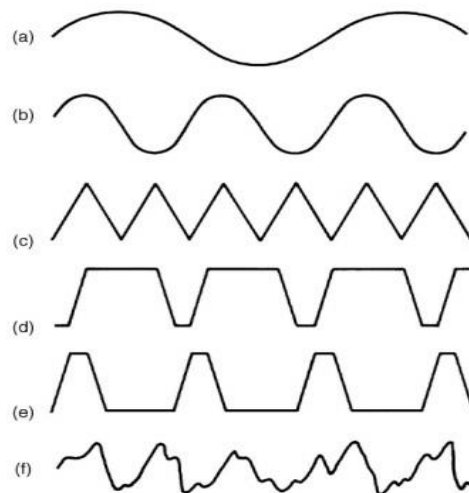
Tabell 2: Tabellen beskriver amplitude- og avstandsparameteren som ble målt med profilometer.

Ruhetsparameter	Beskrivelse	Benevning	Kategori
$R_z$	Gjennomsnittsverdi av maksimal bunn-til-topp-høyde fra hver segmentlengde.  $R_z$ kan antas å være tilnærmet lik høydeavstanden mellom ruhetsbunn og -topp i periodiske, maskinerte overflater.	[ $\mu\text{m}$ ]	Amplitudeparameter
$P_c$	Antall ruhetstopper per nominelle centimeter.	[topper/cm]	Avstandsparameter

$R_a$	Gjennomsnittlig høydeavvik fra referanselinje over evalueringsslengden.	$[\mu\text{m}]$	Amplitudeparameter
-------	---	-----------------	--------------------

### 2.4.2 Flertydighet ved to-dimensjonale ruhetsparametere

Ruhetsparametere gir nødvendigvis ikke et entydig bilde av overflaten. *Figur 9* illustrerer flertydighet for den hyppigst brukte ruhetsparameteren,  $R_a$ . Alle overflatene i figuren har samme  $R_a$ , men er vidt forskjellige. Kombinasjon av flere forskjellige ruhetsparametre vil naturlig nok redusere denne flertydigheten.

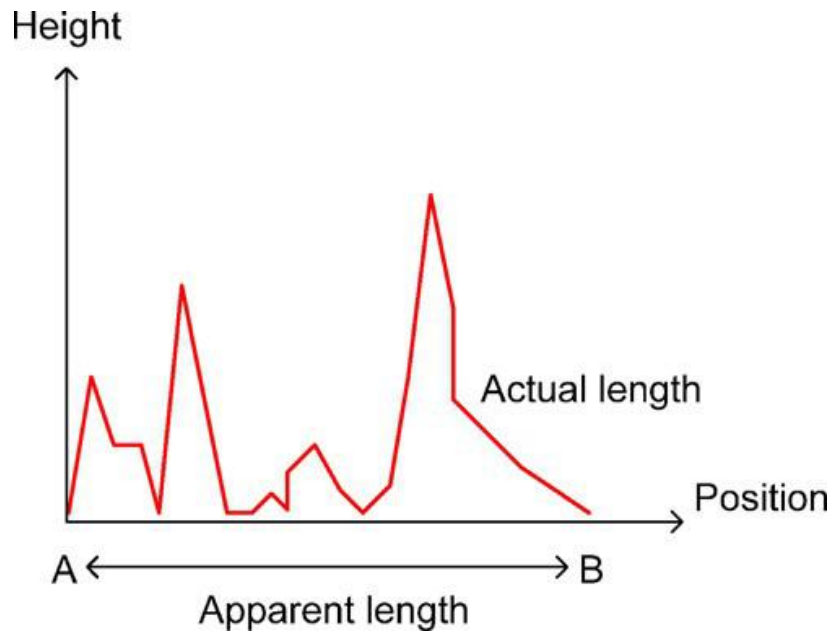


*Figur 9: Figuren illustrerer hvorfor ruhetsparametre ikke nødvendigvis gir et entydig bilde av overflaten. Alle de 6 overflatene har samme amplitudeparameter,  $R_a$ , men er vidt forskjellige. Bildet er hentet fra Bhushan [47]*

### 2.4.3 Tortuositet og Wenzels ruhetsfaktor

Overflateruhet kan også kvantifiseres som forholdet mellom en overflates reelle og nominelle utstrekning. Overflatens reelle utstrekning tar høyde for overflatens strukturelle avvik. Den nominelle utstrekningen tar derimot ikke høyde for avvik i overflaten. Den reelle utstrekningen til en overflate vil alltid være større enn den nominelle, så lenge overflaten besitter strukturelle avvik. Figur 10 illustrerer konseptet i to dimensjoner.





*Figur 10: Figuren illustrerer hvordan reel utstrekning ("actual length") skiller seg fra nominell lengde ("Apparent length"). Figuren er hentet fra Sørensen [23]*

Forholdet kan måles i enten to ("tortuositet") eller tre ("Wenzels ruhetsfaktor") dimensjoner. Tortuositeten, som ovenfor illustrert i *Figur 10* beskriver forholdet mellom en reel og en nominell linje. Wenzels ruhetsfaktor beskriver forholdet mellom reelt og nominelt areal. Den tredimensjonale ruhetsfaktoren kan ikke måles med et vanlig stylus profilometer. Ruhetsfaktoren måles derfor ofte med et optisk profilometer, som kan kartlegge overflatetopografi i 3 dimensjoner. Tortuositet har blitt betraktet som bedre enn tradisjonelle, 2-dimensjonale, ruhetsparametre. Dette fordi forholdet mellom nominell og reel utstrekning antas å være bedre egnet til å beskrive en overflates topografi [23].

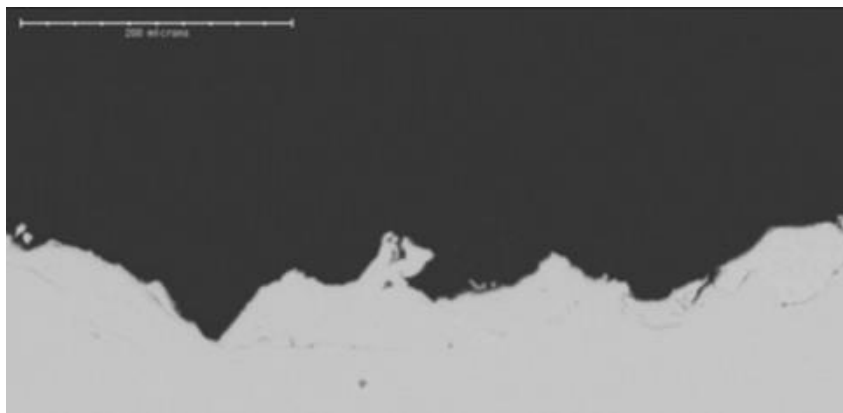
## ***2.5 Ruhet og belegglevetid***

Flere studier viser til en sammenheng mellom substratruhet og belegglevetid [46, 48-50]. Substratruhet har vist seg å påvirke både beleggheft [7, 51-55] og hastigheten til korrosjonskryp [23, 46, 56, 57]. Forøvrig har hastigheten til korrosjonskryp vist seg å henge

sammen med belegghøyden [29, 48, 58]. Hvordan ruheten påvirker levetiden til et belegg er omdiskutert. Hvilke ruhetsparametre som står for belegglevetiden er dermed noe usikkert.

### 2.5.1 Blåserensede mot maskinerte flater

Det er vanlig praksis å blåserense stålflater som skal belegges. Overflater som skal brukes offshore blir ofte blåserenset før belegging [59]. Den høye belegglevetiden tilskrives blant annet ruheten til den blåserensede flaten. Ved blåserensing skytes partikler (“grits”) mot substratet. Partiklene (for eksempel sand – *sandblåsing*) sliter ned substratet og etterlater en ru overflate. *Figur 11* viser et eksempel på en blåserenset overflate, sett fra siden. Blåserensede overflater har hovedsakelig en ikke-periodisk ruhet, i motsetning til maskinerte overflater.



*Figur 11: Eksempel på blåserenset overflate, sett fra siden. Figuren er et utsnitt av bilde hentet fra Ward [46]*

Belagte, blåserensede flater klarer seg stort sett betraktelig bedre enn belagte, maskinerte flater [56, 60]. Forløperprosjektet til denne avhandlingen sammenliknet belagte maskinerte flater opp mot belagte, blåserensede flater. *Figur 12* sammenlikner ruheten på den blåserensede flaten opp mot ruheten til en av de maskinerte flatene. De blåserensede flatene viste vesentlig bedre belegglevetid enn de fleste maskinerte flatene. Dette på tross av den blåserensede flatens vesentlig lavere ruhet. Observasjonen indikerer at maskinerte overflater ikke kan sammenliknes direkte opp mot blåserensede overflater [60]. Dette har også blitt observert av Kristoffersen [56]. Enkelte studier peker forøvrig på at den økte belegglevetiden fra blåserensing hovedsakelig ikke skyldes økt ruhet, men økt renhet i overflaten [61].



Figur 12: Figuren sammenlikner maskinert flate opp mot blåserenset flate. Den blåserensede flaten hadde betraktelig høyere belegglevetid, på tross av den lave ruheten. Legg merke til forskjellen i målestokk på de to figurene. Bildene er hentet fra Hognestad [60]

### 2.5.2 Wenzels ruhetsfaktor

Som tidligere nevnt vil ruheten påvirke forholdet mellom substratets reelle og nominelle overflate (*Wenzels ruhetsfaktor*). En økning i Wenzels ruhetsfaktor medfører en økning i beleggets kontaktflate til substratet. Dette resulterer i større beleggheft per nominelle overflateareal. Belegg vil i teorien dermed sitte sterkere til røe enn fine overflater [48].

### 2.5.3 Effekt av tortuositet

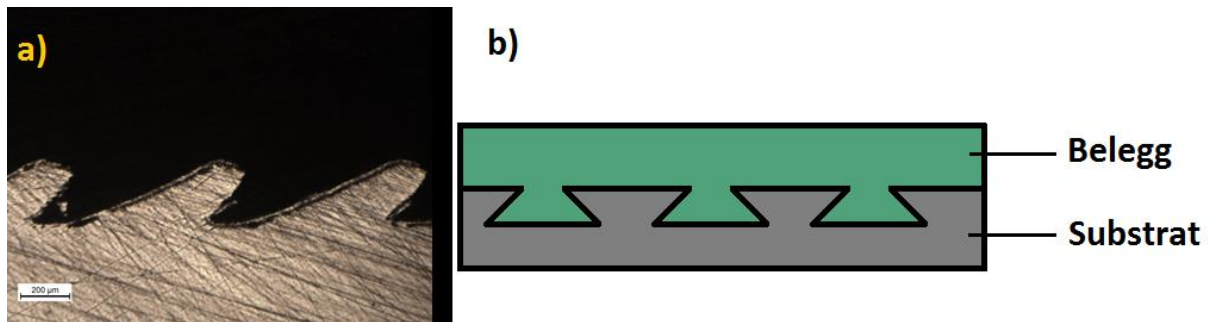
Katodisk avbinding har vist seg å gå saktere i retninger hvor substratet har høy tortuositet. Dette fordi en økning i tortuositet vil medføre en økning i kationenes reiselengde til den katodiske avbindingsfronten [23, 25]. Fenomenet har blant annet blitt observert på belagte, maskinerte, eller slipte flater. På slike flater går avbindingen tilsynelatende raskere langs ruhetsgroper, enn over ruhetstopper [60, 62, 63].

### 2.5.4 Effekt fra fasong på ruhetstopper og ruhetsgroper.

Fasongen til ruhetstopper antas å være viktige med tanke på belegglevetid og eller beleggheft. Toppfasong vil påvirke Wenzels ruhetsfaktor og tortuositet på substratet. I tillegg har det blitt antatt eller foreslått at toppfasong har innvirkning på mekanisk forankring av belegg [60].

Ruhetens innvirkning på mekanisk forankring er noe omstridt [64]. Studier har pekt på at ruhet øker beleggheft hovedsakelig gjennom mekanisk forankring [7, 65]. Andre studier peker på at mekanisk forankring kun gir en liten påvirkning på beleggheft. Disse studiene peker ofte på at heft fra ruhet hovedsakelig skyldes økning i Wenzels ruhetsfaktor [2]. Den mekaniske fastlåsing antas å bli forbedret av topper som er skarpe, irregulære eller overbøyende [52, 65]. Figur 13 a) viser et maskinert substrat med overbøyende topper. De overbøyende toppene kan antas å virke som kroker som holder fast belegget. Flaskehalsgroper i overflaten, som

skissert i Figur 13 b) antas også å gi et signifikant heftbidrag [5, 66]. Belegg som fyller flaskehalsen vil ikke kunne løsne fra flaskehalsen uten deformasjon eller brudd av belegg eller substrat. God mekanisk forankring har også blitt antatt å gi beleggssystemer med god våtheft[1].



Figur 13: **a)** Figuren viser et tverrsnittbilde fra et substrat med overhengende topper. Bildet er hentet fra Hognestad [60]. **b)** Figuren illustrerer eksempel på flaskehalsgrop i substratet. Slike flaskehalsgroper antas å gi et signifikant bidrag til beleggheft gjennom mekanisk fastlåsing.

### 2.5.5 Effekt på beleggfukting

En forutsetning for god heft er at belegget har god fukting til substratet ved maling [49]. Noen studier peker på at fullstendig fuktig fra belegg kan bli motvirket av enkelte røe flater [49, 65, 67]. Ufullstendig beleggfuktig av substratet gir opphav til tomrom mellom belegg og substrat. Ved tomrommene er ikke belegget i kontakt med substratet. Tomrommene kan med andre ord være uheldige med tanke på beleggheft og belegglevetid [23, 67].

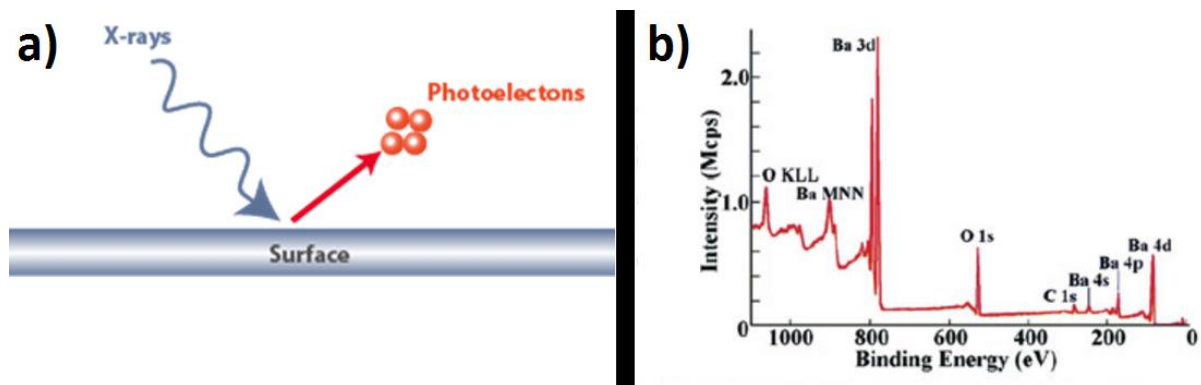
### 2.5.6 Topp høyde, topptetthet og belegglevetid

En rekke studier har undersøkt forholdet mellom ruhet og belegglevetid og, eller beleggheft. Belegglevetiden og, eller beleggheften blir ofte sett opp mot to-dimensjonale ruhetsparametre. Noen studier fant at en økning i topptettheten,  $P_c$  ga positiv innvirkning på belegglevetid eller beleggheft [65, 67]. Andre studier observerte den samme positive innvirkningen ved en økning i høyde på ruhetstopper [18, 48, 53, 63]. En studie fant derimot at beleggheften økte til et maks ved en viss topphøyde og falt ved en videre økning i topphøyde utover denne [55].

En kombinasjon av høy topptetthet og høye ruhetstopper har også vist seg å være gunstig for belegglevetiden [68]. Både topphøyde og topptetthet henger sammen med tortuositet og ruhetsfaktor. Disse parameterne henger antakeligvis også sammen med mekanisk forankring av belegg.

## 2.7 XPS

XPS (*X-ray photoelectron spectroscopy – Røntgen-fotoelektron-spektroskopi*) er en metode som brukes til å analysere overflatekjemi. Ved XPS bestråles en overflate med røntgenstråling. Fotoelektroner blir eksitert fra overflaten som respons på denne bestrålingen, som skissert i *Figur 14 a*). En detektor måler fotoelektronene som har blitt eksitert fra de øverste 10 nanometerne i overflaten. Detektoren måler fotoelektronene med hensyn på kinetisk energi og intensitet. Intensitet plottes mot kinetisk energi for å lage et oversiktspektrum [69]. Eksempel på oversiktspektrum er vist i *Figur 14 b*). De første en til to bokstavene over toppene betegner grunnstoff. Kombinasjon av bokstaver og tall etter grunnstoffet betegner orbital til det eksiterte elektronet. Topper som for eksempel er merket med “KLL” indikerer Auger-elektroner[70]. Topper fra Auger-elektroner kan sees bort ifra i resten av oppgaven.



*Figur 14: a) Figuren skisserer eksitasjon av fotoelektroner fra en overflate bestrålt med røntgen. Bildet er hentet fra XPSSimplified.com[69]. b) Figuren viser eksempel på et oversiktspektrum generert fra XPS-målinger. Bildet er hentet fra XPSSimplified.com[71].*

Den kinetiske energien til et fotoelektron er blant annet avhengig av[72]:

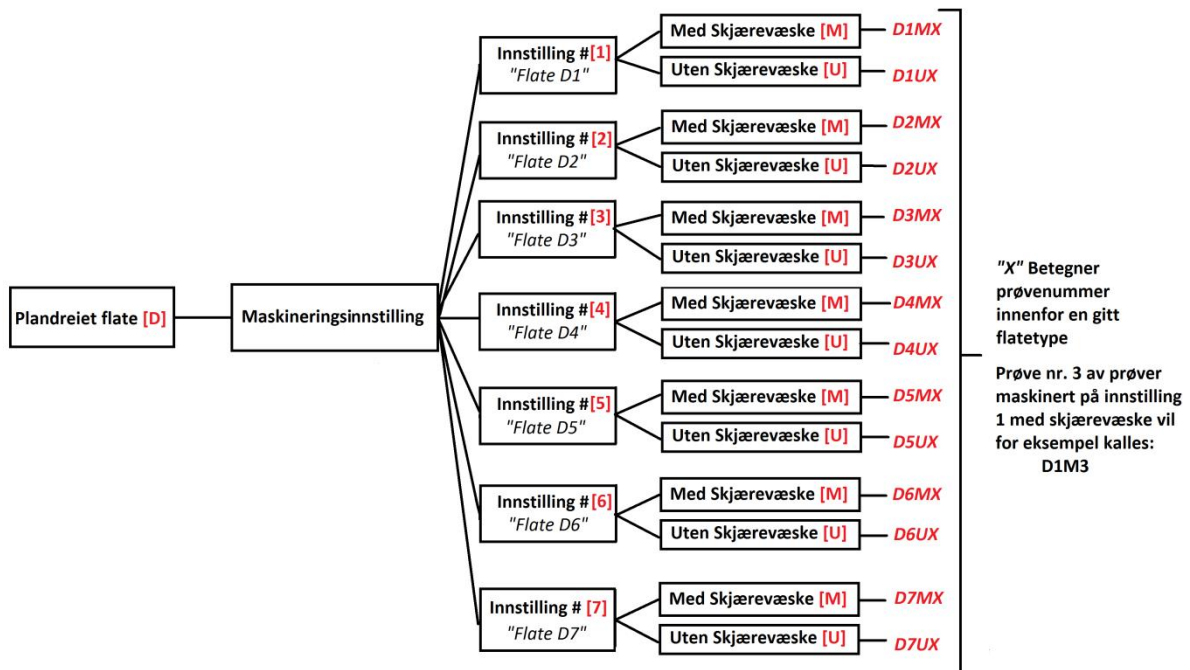
- Grunnstoff
- Orbitalen som fotoelektronet eksiteres fra
- De kjemiske omgivelsene til atomet som emitterer fotoelektroner

Toppene i oversiktspektrumet kan dermed anvendes for å fastslå grunnstoffer, kjemiske tilstander og bindingsenergier i overflaten[72]. Et grunnstoff kan eksitere fotoner med flere forskjellige energier. Dermed kan en grunnstoff ha flere intensitetstopper. Eksempel på flere topper vises for barium i *Figur 14*. Hvert grunnstoff har en hovedtopp eller hovedregion. Barium sin hovedtopp er den høyeste toppen som ligger rundt 780eV i figuren. Det er posisjonen til hovedtoppen eller hovedregionen som vanligvis brukes for å fastslå grunnstoffets tilstand.

Antall fotoelektroner som blir målt av et grunnstoff blir antatt å henge sammen med mengden av grunnstoffet i overflaten. Mengden av et grunnstoff er gitt av intensiteten til hovedtoppen ganger en sensitivitetsfaktor. Forskjellen i areal mellom grunnstoffenes hovedtopper kan dermed brukes til å beregne overflatens sammensetning [70].

### 3. Eksperimentelt

150x75mm ST52-stålplater ble levert av Brunvoll AS. Stålplatene hadde en tykkelse på ca. 5mm. Stålplatene ble plandreiet til 14 forskjellige flatetyper og merket deretter. *Figur 15* illustrerer merkesystemet som ble anvendt.



*Figur 15: Figuren illustrerer merkesystemet for de ulike prøveflatene. "X" betegner prøvenummer innen den gitte prøvekategori. Prøve nr. 3 innenfor DIM vil for eksempel kalles "DIM3".Maskineringsinnstillinger omtales senere i kapittelet.*

## 3.1 Forbehandling av prøveflater

### 3.1.1 Plandreining

Stålplatene ble plandreiet på en side ved NTNU av Finmekanisk Verksted, NT-fakultet. Prøvene ble maskinert med og uten skjærevæske på syv forskjellige maskineringsinnstillinger. Seks til syv prøver ble maskinert fra hver av de 14 flatetyper som vist i *Figur 15*. Flatene ble maskinert med fastlåst skjærhastighet. Skjæret var justert slik at senter av skjæret traff 90° på arbeidsstykket. Dette for å få maskinerte topper som var symmetriske opp toppenes senter. De syv forskjellige maskineringsinnstillingene ble gitt av en kombinasjon av matehastighet og skjærradius. Maskineringsinnstillingene er oppsummert i *Tabell 3*.

*Tabell 3: Maskineringsinnstillinger for de 7 forskjellige flatetyper.*

Flate ...	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
Skjærradius [mm]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4
Matchastighet [mm/r]	0,75	0,65	0,5	0,3	0,2	0,1	0,15
Kuttedybde [mm]	0,5	0,35	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

Som fremstilt i *Figur 15* fikk hver Flate maskinert prøver med og uten skjærevæske. Skjærevæsken som ble anvendt var av typen *Blasocut 25 MD*. Skjærevæsken var blandet ut i forholdet 7% skjærevæske (mineraloljebasert), 93% vann. Prøvene som ble maskinert uten skjærevæske ble istedenfor maskinert med 96% etanol som lubrikant. Flatene med skjærevæske og flatene uten skjærevæske ble maskinert på separate, CNC-styrte dreiebenker. Den maskinerte ruheten er som tidligere nevnt avhengig av matehastighet og skjærradius. Ruheten på prøvene sank dermed med flatenummer.

### 3.1.2 Blåserensing og merking

Etter endt plandreining ble prøvene blåserenset på den ikke-maskinerte baksiden. Dette for å oppnå god belegghet utenfor prøvenes testområde ved senere syklisk beleggtesting. Blåserensedyse ble holdt ca. 5cm fra prøvene, med en innfallsvinkel på 60°. Aluminagrit ble brukt som blåserenspartikler. Blåserensing ble gjennomført ved SINTEF Perleporten. Prøvene ble merket på baksiden med pneumatisk risspenn etter endt blåserensing.



### 3.1.3 Prøverengjøring og oppbevaring

Etter blåserensning og merking ble prøveoverflatene grundig vasket. Dette for å fjerne overflateforurensninger som rester av skjæreolje og støv etterlatt fra blåserensningen.

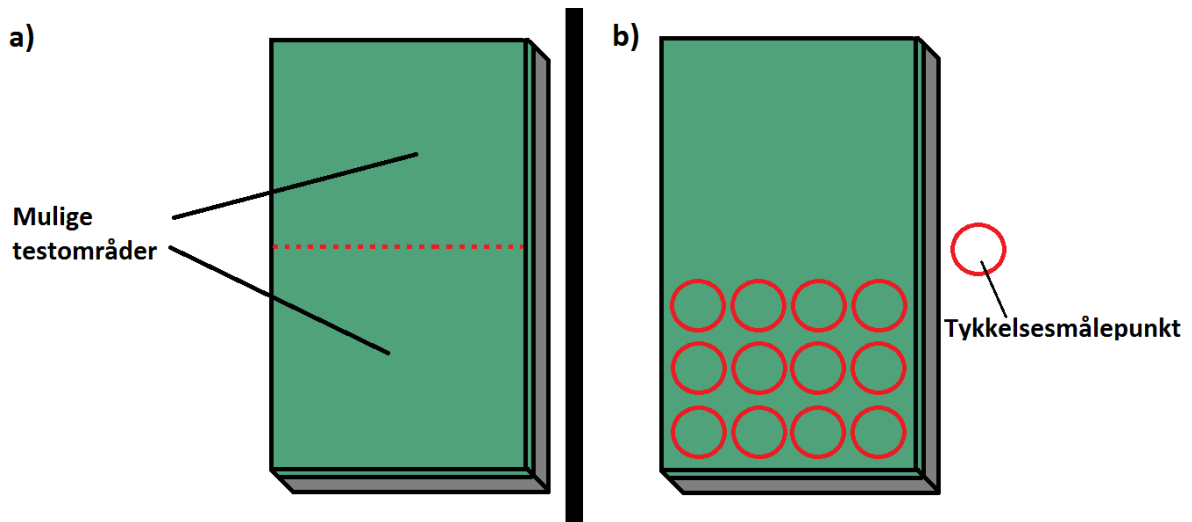
Vaskingen ble gjennomført i 3 steg. Prøvene ble først skrubbet i en blanding av springvann og basisk skuremiddel av typen *JIF Skurekrem*. Prøvene ble så skyllet i springvann, for så å bli dyppet i etanol, 96%. Etter vasking ble prøvene tørket i omtrent 15 minutter i varmluftskap, ved 50 °C. Prøvene ble til slutt satt til lagring i eksikator.

## 3.2 Preparering av prøver for syklisk beleggtesting

Tre prøver fra hver av de 14 flatetyperne (Figur 15) ble satt av til syklisk beleggtesting.

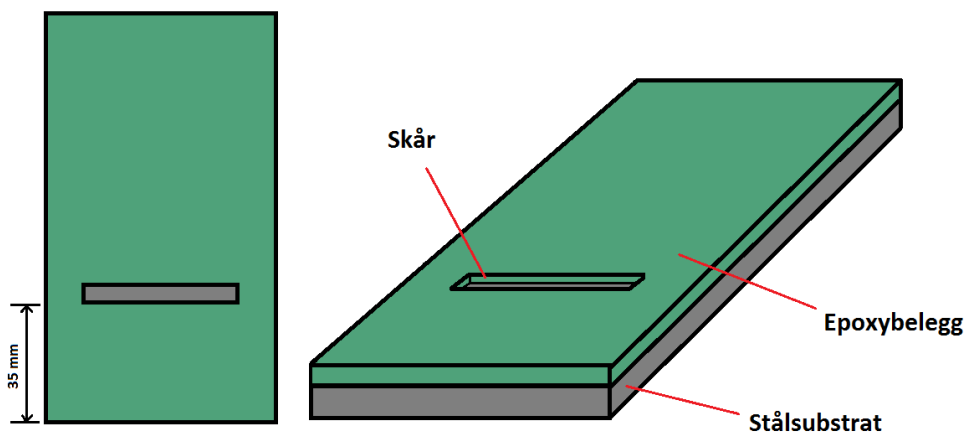
Prøvene ble først spraymalt på den maskinerte siden med to-komponent kommersiell epoxy-mastic. Beleggets våtfilmtykkelse ble kontrollert underveis med våtfilmkam. Totalt to spraystrøk ble påført. Etter spraymaling ble beleggets totale tørrfilmtykkelse kartlagt på hver prøve, med instrumentet Elcometer 256-FN. Elcometeret ble kalibrert i henhold til den belagte flatetyper som skulle måles. En ubelagt D1M-prøve ble for eksempel brukt til kalibrering ved måling på belagte D1M-flater. Dette for å unngå feilmålinger som følger av prøvenes overflateruhet.

Flere av prøvene viste stor variasjon i beleggtykkelse. Kun halvparten av prøvenes belagte stålflate skulle testes. Som tidligere nevnt er plandreiede flater speilet om senter. Prøvene hadde dermed to mulige, identiske testområder, speilet om prøvens kortsider i senter, som vist i *Figur 16 a*). Hver prøve fikk valgt det testområdet som hadde eller var nær en tørrfilmtykkelse på 250-350µm. Elcometeret ble så brukt til å kartlegge beleggtykkelsen over 12 punkter i det valgte testområdet, som vist i *Figur 16 b*). Den målte beleggtykkelsen for hver flatetype er plottet i vedlegg B.



Figur 16: a) Figuren viser de to mulige testområdene på de plandreiede flatene. b) Figuren viser hvor beleggtykkelsen ble målt i det valgte testområdet.

Et skår på 2x50mm ble maskinert gjennom belegget og ned til stålet. Dette for å simulere en beleggskada som eksponerte det underliggende substratet. Maskinering av skåret ble gjort med skivefres av SINTEF Materialer og Kjemi ved NTNU Perleporten. Skrivefresen brukte et sagblad med 2mm tykkelse og 60mm diameter. Skåret ble plassert 35mm fra prøvenes kant i det valgte testområdet, som skissert i Figur 17.



Figur 17: Skisse av skårplassering i epoxybelegg

Prøvenes bakside ble så malt med pensel. Kanter og hjørner på prøven ble så rundet av med båndsliper. Dette for å sikre tilstrekkelig tykk beleggfilm over hele prøven. Prøvenes kanter

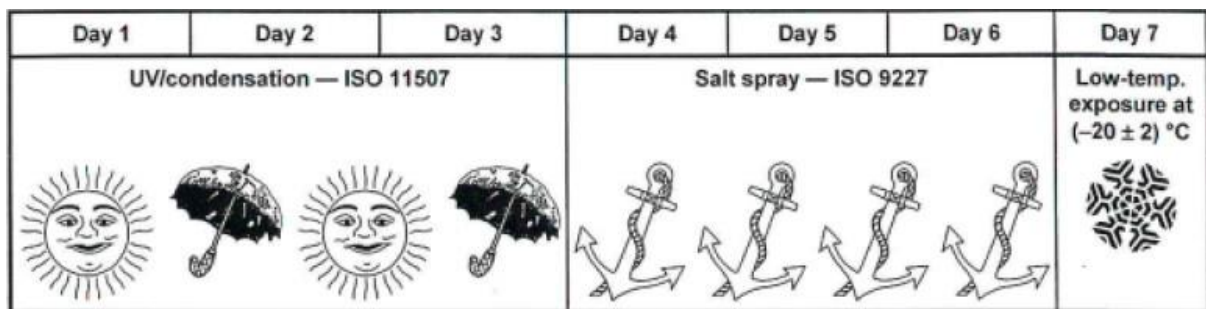
og hjørner ble så dyppet i maling. Pensel ble så brukt til å påføre et andre beleggstrøk på prøvens bakside. De ferdigmalte prøvene ble så satt til beleggherding. Belegget ble herdet ved 50°C i 3 døgn. Etter endt herding ble beleggdefekter som tynne dyppekanter og porer utbedret med blåsilikon av typen *Loctite SI 5926*.

### 3.3 Syklisk beleggtesting

Prøvene som var belagt med epoxy-mastic ble langvarig syklisk testet, i henhold til ISO 20340. Testsyklusen, som illustrert i *Figur 18* gikk over 1 uke og besto kronologisk av:

- 3 dager med vekslning mellom kondens (60°C, 4 timer) og UV-eksponering (50°C, 4 timer)
- 3 dager i 5% NaCl-salttåke (30°C)
- 1 dag i fryser (-20°C)

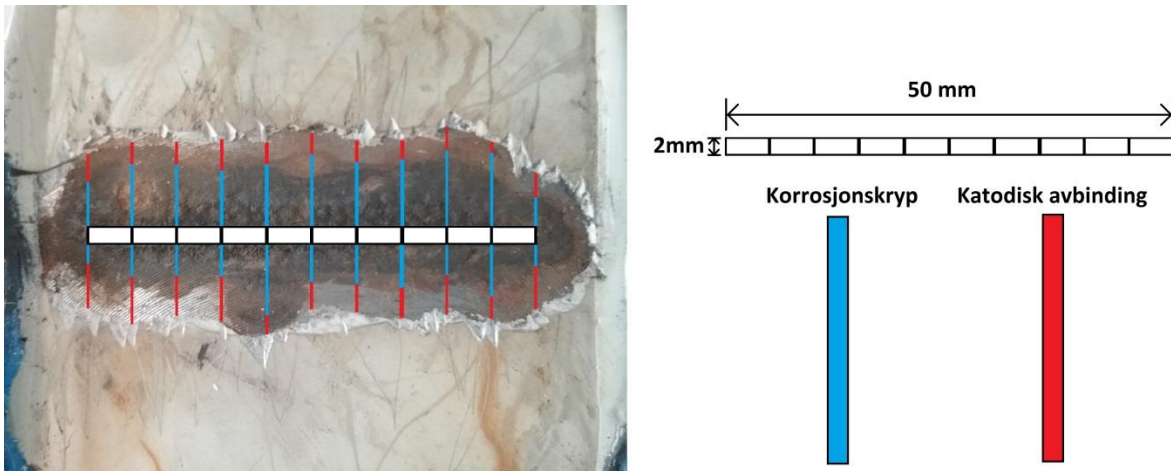
UV-kondenskammeret var av typen *QUV Weathering Tester Basic*. Salttåkekammeret var av typen *Ascott S1000ip*. Prøvene ble vasket i springvann, etterfulgt av destillert vann ved bytte fra salttåkekammer til fryser. Nedfallet i salttåkekammeret ble kontrollert underveis. Den sykliske testen ble kjørt i seks uker (seks sykluser). Prøvene ble underveis inspisert for skader i belegget utenfor testområdet. Eventuelle beleggskader ble utbedret med blåsilikon av type *Loctite SI 5926*.



*Figur 18: Illustrasjonen viser forløpet til den sykliske beleggtesten ISO 20340. Bildet er hentet fra Transocean Coatings [73].*

Etter endt testing ble løs maling rundt prøvenes skår fjernet med skalpell. Kun 1 prøve fra hver flatetypene til Flate D1,D2 og D3 ble testet for løst belegg. De resterende parallellene til disse flatetypene ble satt til videre syklisk testing. Dette som følger av lite beleggavbinding etter seks uker testing.

Beleggavbindingens utstrekning ble så målt i normalt på skåret, i begge retninger. Utstrekningsmålingene ble tatt fra 11 punkter langs det 50mm lange skåret (5mm mellom hvert målepunkt). Både korrosjon og katodisk avbinding ble målt, som skissert i *Figur 19*. Gjennomsnittlig utstrekning av korrosjonskryp og katodisk avbinding i en retning ble regnet ut for hver prøve. De utregnede verdiene ble så brukt til å regne ut gjennomsnittlig korrosjonskryp og katodisk avbinding for hver flatetype.

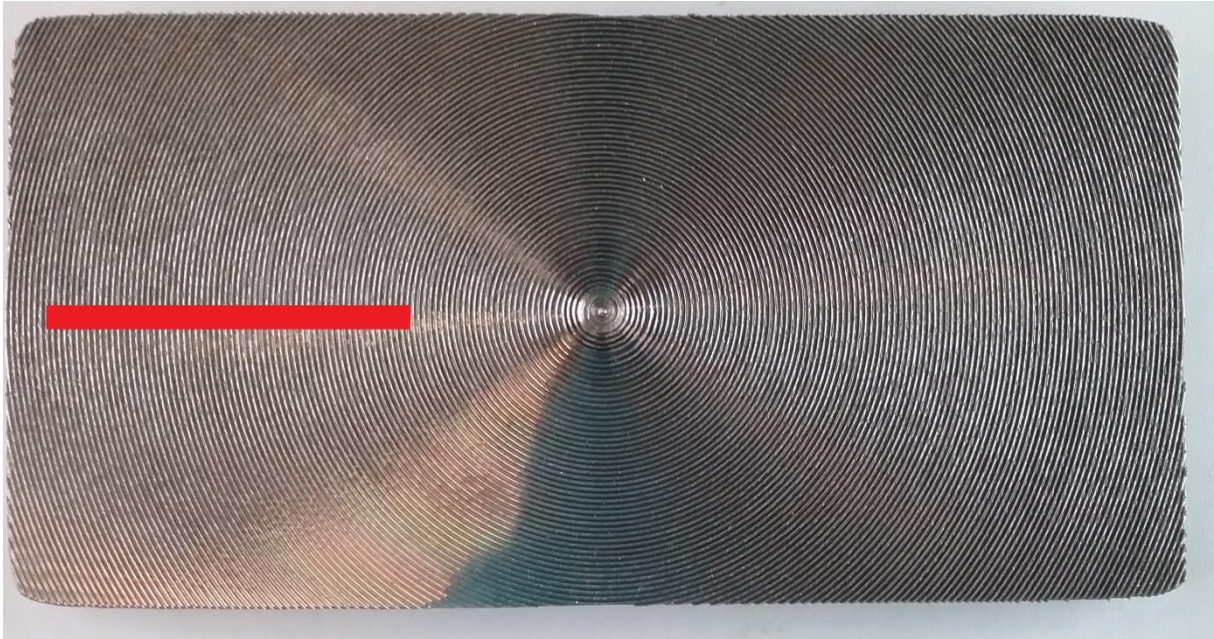


*Figur 19: Figuren skisserer hvordan korrosjonskryp og katodisk avbinding ble målt fra skår*

## ***3.4 Overflatekarakterisering***

### **3.4.1 Ruhetsmåling med profilometer**

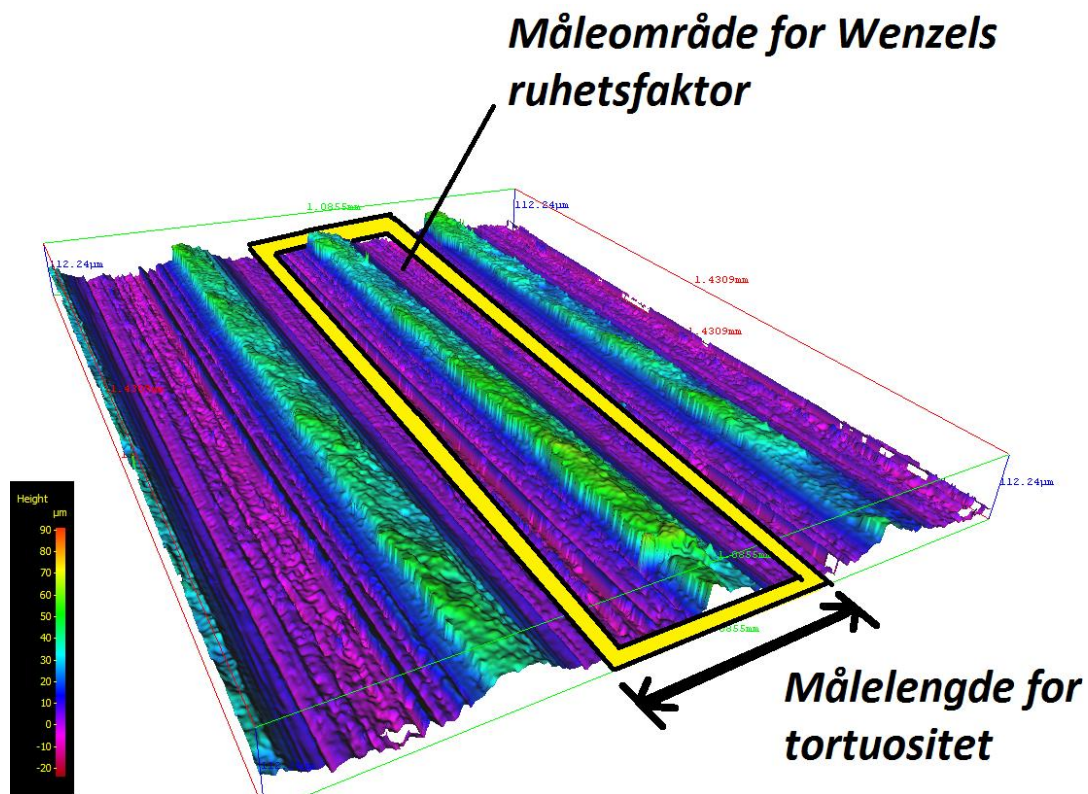
Et stylus-profilometer av typen *Mitutoyo SJ-301* ble brukt til måling av overflateruhet. Overflateruhet ble målt på hver prøve som skulle til syklisk beleggtesting, med unntak av prøvene fra Flate D1, D2 og D3. Prøvene fra Flate D1, D2 og D3 kunne ikke måles av profilometer fordi prøvene hadde for høy ruhet. Ruheten ble målt i henhold til *DIN EN ISO 4288*-standard. Målingen ble tatt normalt på prøvenes maskineringsspor, som skissert med rød linje i *Figur 20*. Den røde linja blir senere omtalt som *prøvens senterlinje*.



*Figur 20: Den røde linja skisserer hvor på prøvene profilometeret ble anvendt. Lengden på linja kan sees bort ifra.*

### **3.4.2 Overflatekarakterisering med Infinite Focus Microscope (IFM)**

Wenzels ruhetsfaktor og tortusitet ble målt på to prøver fra hver av de 14 flatetypene. Målingene ble gjort med et "Infinite Focus Microscope (IFM)", også omtalt som "3D-mikroskop". IFM-instrumentet var av typen *Alicona Infinite Focus*. Wenzels ruhetsfaktor og tortuositet ble målt over tre topper langs prøvens senterlinje på hver prøve. Tortuositeten ble målt over avstanden mellom to maskineringsgroper. Wenzels ruhetsfaktor ble målt over avstanden mellom to maskineringsgroper, langs en bredde på 1,43mm. Måleområde og måleavstand for henholdsvis Wenzels ruhetsfaktor or tortuositet er skissert på en 3D-fremstilling av en D4M-prøve i *Figur 21*. Innstillinger som ble anvendt ved beregning av tortuositet og Wenzels ruhetsfaktor finnes i Vedlegg C.



Figur 21: Figuren illustrerer hvordan Wenzels ruhetsfaktor og tortuositet ble målt på prøvene. Måleområdet for Wenzels ruhetsfaktor er innenfor det gule rektangelet. Fremstillingen er gjort på et 3D-bilde av en D4M-prøve, tatt med 3D-mikroskopet.

### 3.4.3 Overflatekarakterisering med lysmikroskop

En til to syklisk testede prøve fra hver av de 14 prøveflatene ble snittet opp og karakterisert med lysmikroskop. To prøver ble karakterisert fra D6U, mens en prøve ble karakterisert fra hver av de 13 andre flatetyper. D6U fikk skjært ut to prøver fordi flatetypen viste store variasjoner i avbinding etter den sykliske beleggtesten. En tverrsnittbit fra hver prøve ble skjært ut langs prøvens senterlinje med Discotom. Tverrsnittbitene ble skjært ut slik at senteret av prøvestykket var ca. 35mm fra prøvekannten som enda var dekket i belegg. Posisjon for utskjæring er vist i Figur 22.



Figur 22: Bildene viser hvor tversnittbitene ble skjært ut fra prøvene. Den røde firkanten illustrerer området som ble observert i lysmikroskop.

Tversnittbitene ble så bakt i epoxy, med senterlinjeflatene rettet nedover. De innstøpte senterlinjeflatene ble så pusset ned til en passende finhetsgrad (4000FEPA i grit-størrelse på slipeskive, eller finere). Flatene ble så fotografert med invertert lysmikroskop av typen *Olympus GX51*. Linjal ble så brukt til å beregne tortuositet,  $R_z$  og  $P_c$  fra tversnittbildene.

### 3.4.4 Overflatekarakterisering med XPS

XPS (*X-Ray Photoelectron Spectroscopy – Røntgen-fotoelektron-spektroskopi*) ble brukt til å undersøke hvorvidt skjærevæske hadde påvirket prøvenes overflatekemi. Tre forskjellige prøver ble karakterisert med XPS : en fin flate maskinert uten skjærevæske (*D6U*), en fin flate maskinert med skjærevæske (*D6M*) og en ru flate maskinert med skjærevæske (*D1M*). *D6U*-*D6M*-paret ble karakterisert for å undersøke forskjellen i overflatekemi mellom maskinering med og uten skjærevæske. Den ru *D1M*-prøven ble karakterisert for å undersøke effekten av prøverengjøring på ru overflater.

XPS-prøvestykker ble skjært ut fra kortsiden på hver av de tre overnevnte prøvene. Prøvestykkene hadde en dimensjon på ca. 10x75mm eller ca. 10x37,5mm, avhengig av

platetykkelsen til prøvene; tykkere prøvestykker måtte spennes opp i en kortere XPS-holder. Prøvestykkene ble skjært ut tørt av Finmekanisk Verksted, NT-Fakultet, NTNU. Prøvene ble skjært ut tørt for å unngå endringer i overflatekjemi fra skjæreplassen.

Prøvestykkene ble analysert med XPS-instrumentet *Kratos Axis Ultra* ved NTNU av SINTEF Materialer og Kjemi – Materialer og Nanoteknologi. Et område på ca. 1x2mm ble analysert fra prøveoverflaten og ned til en dybde på ca. 10nm. Prøvestykkene ble bestrålt med monokromatisk aluminiumstråling (Al K-alfa (1486,6 eV))(12kV, 15mA). De fotoeksiterte elektronene fra prøvestykkene ble fokusert mot elektronalytoren med elektrostatiske linser. Prøveoverflatene ble satt i fokusplanet ved å justere høyden slik at intensiteten fra karbon 1s ble maksimert. Bindingsenergiene fra XPS-målingene ble kalibrert opp mot bindingsenergien til overflatekarbon (“adventitious carbon”) på 285eV. Prøvenes oversiktsspekter (“Survey spectrum”) ble målt med et energipassfilter (“Pass energy”) på 160eV. Hovedtoppen for observerte grunnstoffer i oversiktsspektret ble så målt i høy oppløsning med et energipassfilter på 40eV.

Oversiktsspektret ble så anvendt til å beregne sammensetning av grunnstoffer i overflaten. Bakgrunnstråling på de markante toppene ble filtrert bort ved bruk av *shirley-bakgrunn*, med unntak av toppen til jern. Bakgrunnen til jern-toppen ble filtrert bort ved bruk av *lineær bakgrunn*. Sammensetningen ble beregnet med XPS-programmet *Casa XPS*.

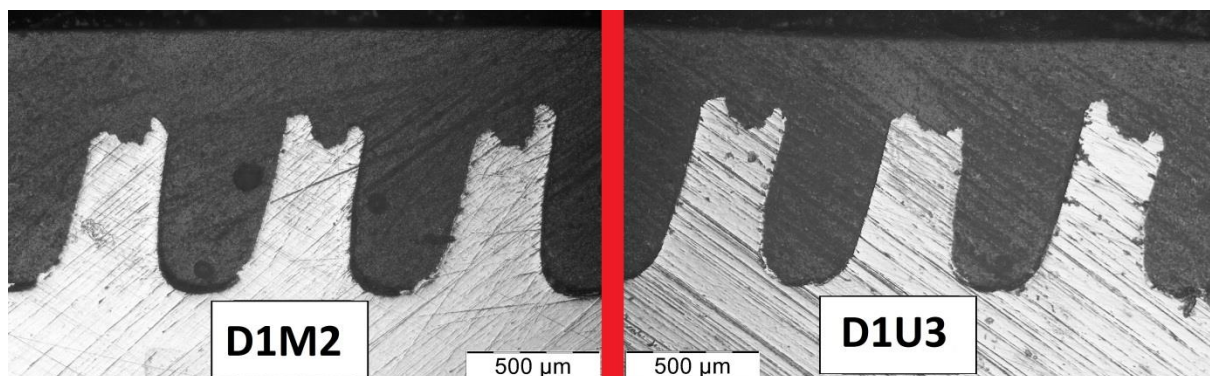


## 4. Resultater

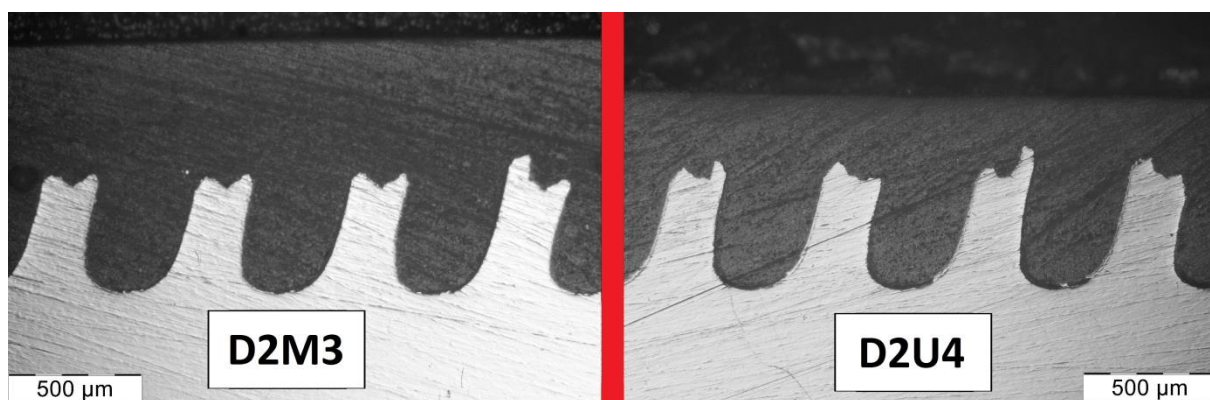
### 4.1 Billedtaking av tverrsnitt

Figur 23 til Figur 29 viser tverrsnittbilder av Flate D1 til Flate D7. Tverrsnittbilder fra prøver maskinert med og uten skjærevæske er stilt opp ved siden av hverandre. Bildene er vendt slik at materetningen til skjæreværktøyet har gått mot venstre. Senteret av prøvestykkene ligger med andre ord til venstre i tverrsnittene. Flate D1, D2 og D3 er fotografert med 5X objektiv. Flate D4 og D5 er fotografert med 10X objektiv, mens flate D6 og D7 er fotografert med 20X objektiv. Tverrsnittbilder har blitt tatt av en prøve med og uten skjærevæske for hver flate, med unntak av flate D6. Flate D6 har tverrsnittbilder av to D6U-prøver.

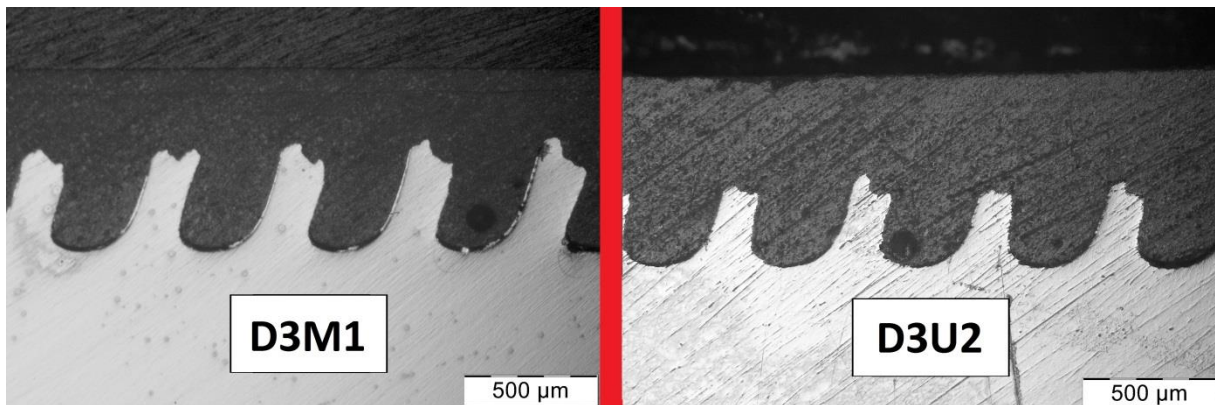
De beregnede ruhetsverdiene fra tverrsnittbildene presenteres i kapittel 4.2.



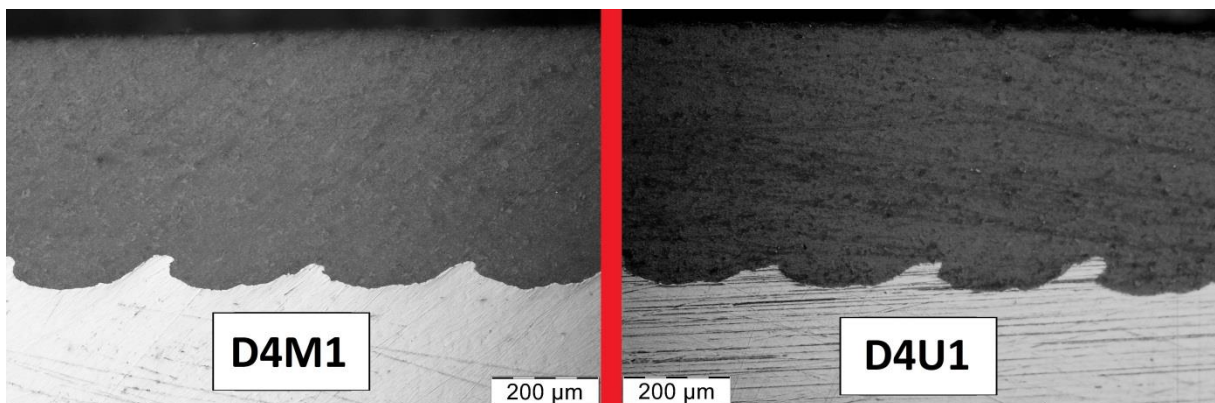
Figur 23: Tverrsnittbilder av flatetype D1M og flatetype D1U. De lyseste områdene er maskinert stål. Stålet er dekket med epoxy-mastic-belegg. Bildene er tatt med 5X objektiv.



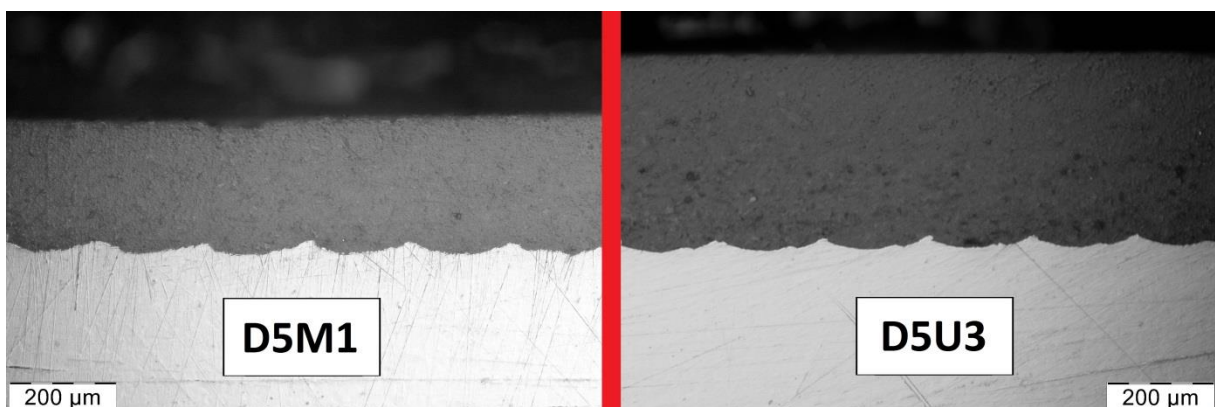
Figur 24: Tverrsnittbilder av flatetype D2M og flatetype D2U. De lyseste områdene er maskinert stål. Stålet er dekket med epoxy-mastic-belegg. Bildene er tatt med 5X objektiv.



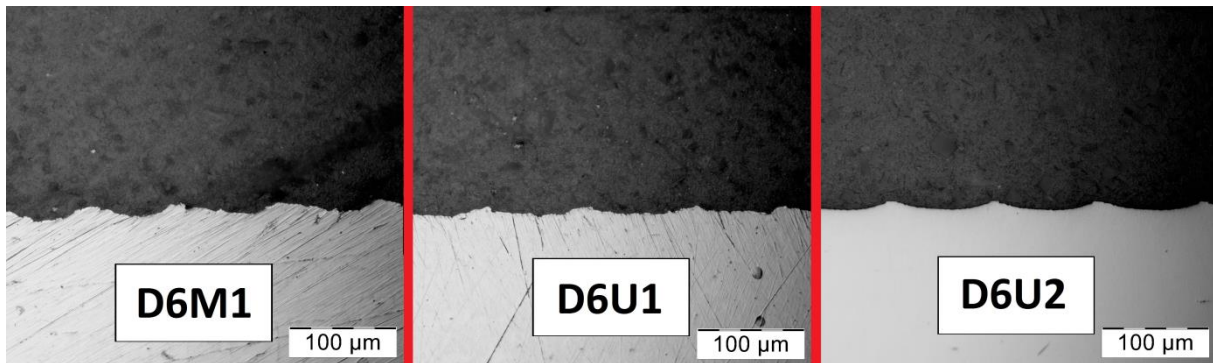
Figur 25: Tverrsnittbilder av flatetype D3M og flatetype D3U. De lyseste områdene er maskinert stål. Stålet er dekket med epoxy-mastic-belegg. Bildene er tatt med 5X objektiv.



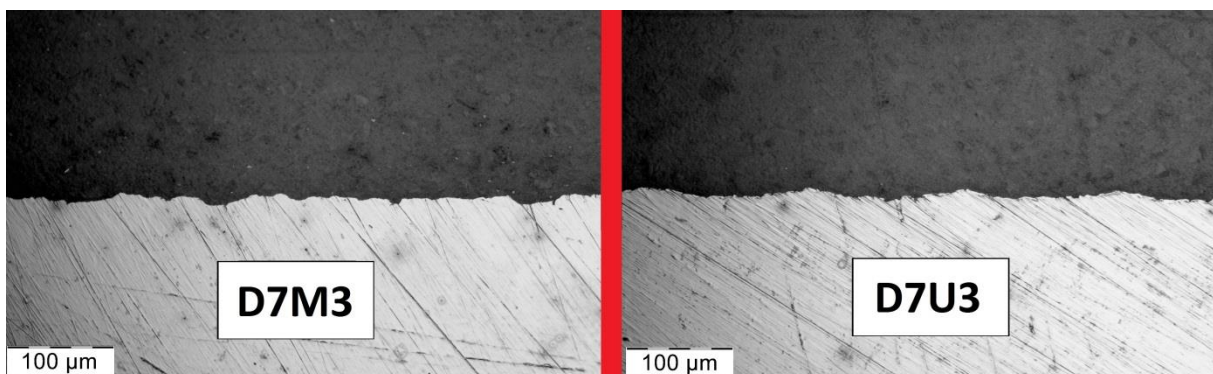
Figur 26: Tverrsnittbilder av flatetype D4M og flatetype D4U. De lyseste områdene er maskinert stål. Stålet er dekket med epoxy-mastic-belegg. Bildene er tatt med 10X objektiv.



Figur 27: Tverrsnittbilder av flatetype D5M og flatetype D5U. De lyseste områdene er maskinert stål. Stålet er dekket med epoxy-mastic-belegg. Bildene er tatt med 10X objektiv.



Figur 28: Tverrsnittbilder av flatetype D6M og flatetype D6U. De lyseste områdene er maskinert stål. Stålet er dekket med epoxy-mastic-belegg. Bildene er tatt med 20X objektiv.



Figur 29: Tverrsnittbilder av flatetype D7M og flatetype D7U. De lyseste områdene er maskinert stål. Stålet er dekket med epoxy-mastic-belegg. Bildene er tatt med 20X objektiv.

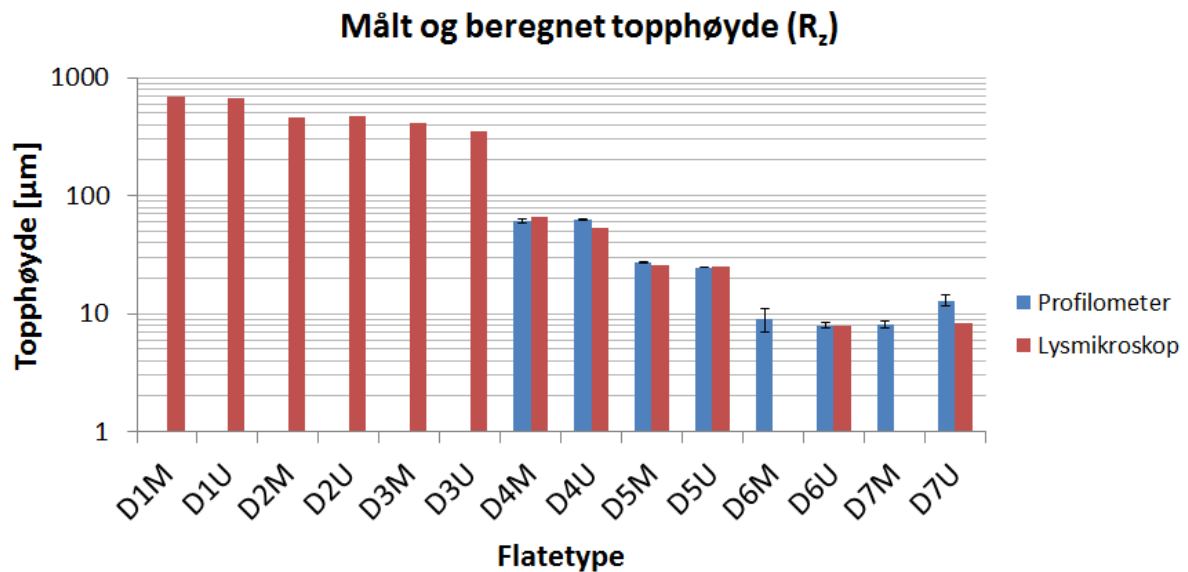
## 4.2 Ruhetsmålinger

Ruhetsparametrene  $R_z$ ,  $P_c$ , tortuositet og Wenzels ruhetsfaktor ble målt eller beregnet. Tre instrumenter ble brukt til å beregne eller måle ruhetsverdiene: Profilometer, IFM og lysmikroskop. Profilometeret ble brukt til å måle  $R_z$  og  $P_c$ . IFM ble brukt til å beregne tortuositet og Wenzels ruhetsfaktor. Lysmikroskopet ble brukt til å beregne  $R_z$ ,  $P_c$  og tortuositet fra tverrsnittbilder.

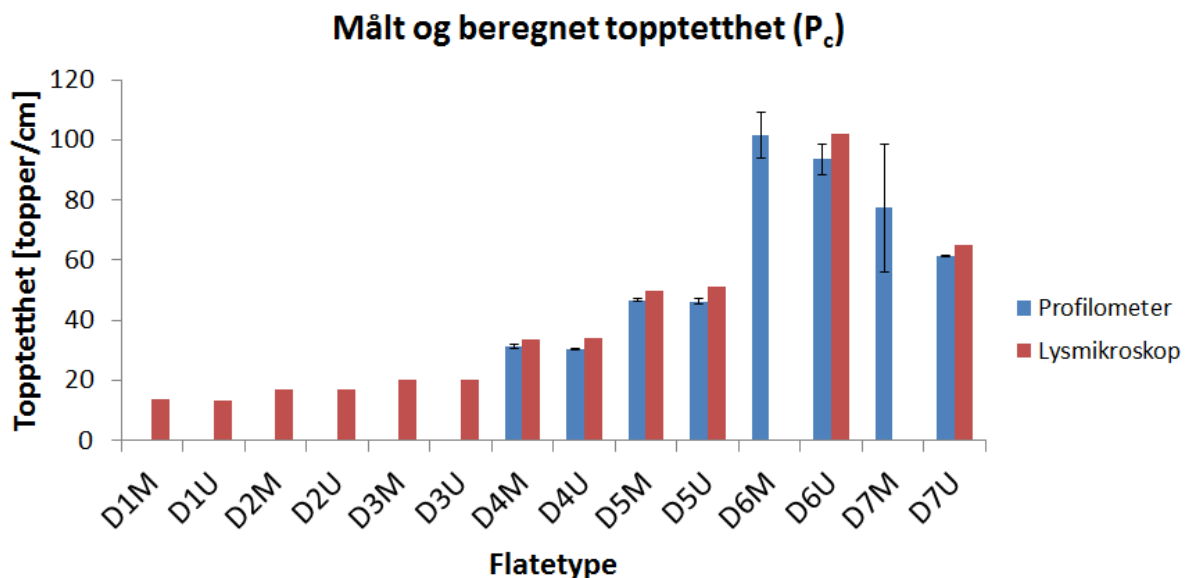
$R_z$ -verdier fra profilometer og tverrsnittbilder fra lysmikroskop er plottet sammen i *Figur 30*.  $P_c$ -verdiene fra lysmikroskop og profilometer er plottet sammen i *Figur 31*. Profilometeret klarte ikke å måle ruhet på Flate D1, D2 og D3.  $R_z$ - og  $P_c$ - verdiene til flatetype D6M og D7M ble ikke beregnet fra tverrsnittbildene. Dette som følger av liten grad av periodisitet.

Tortuositets-verdier fra 3D-mikroskop og tverrsnittbilder er plottet sammen i *Figur 32*.

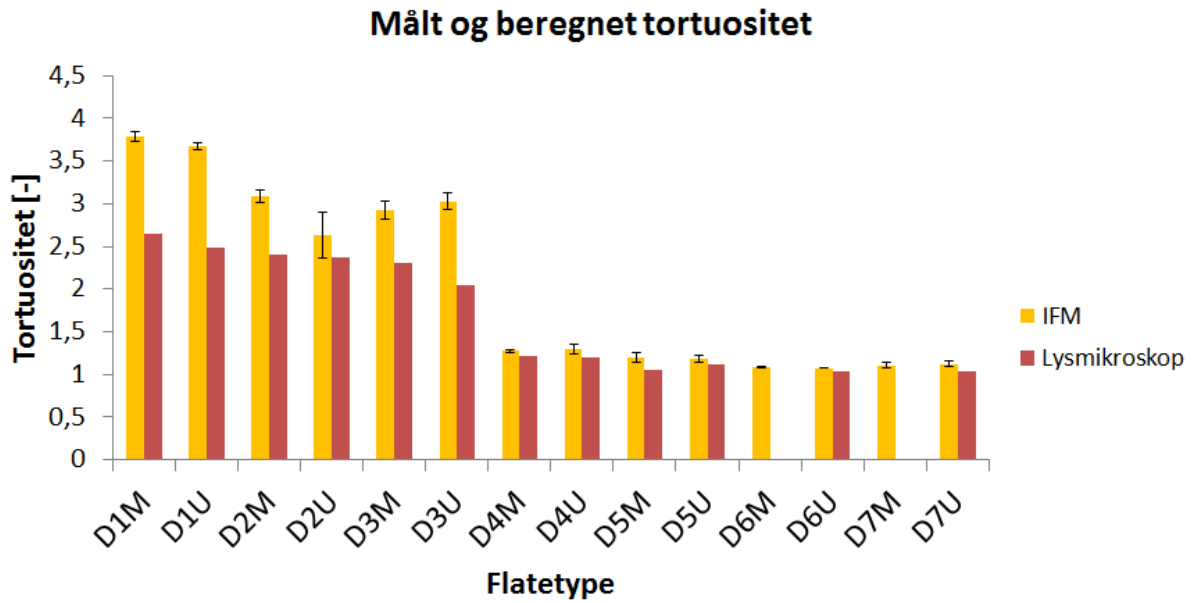
Tortuositet ble heller ikke beregnet fra tverrsnittbildene til flatetype D6M og D7M. Wenzels ruhetsfaktor-verdier målt med 3D-mikroskopet er plottet i *Figur 33*.



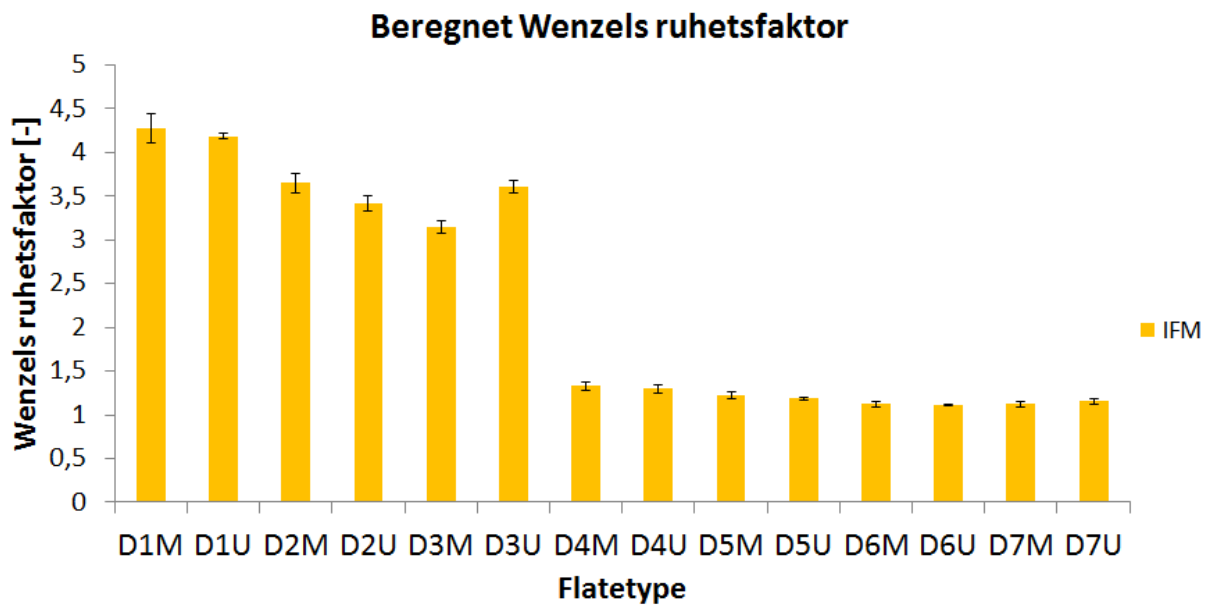
*Figur 30: Målt og beregnet topphøyde for alle flatetyperne fra henholdsvis profilometer og lysmikroskopibilder. Topphøydeverdiene er plottet med logaritmisk y-akse. Verdiene fra profilometeret er plottet med standardavvik. Topphøydeverdien til D6U er beregnet for D6U2.*



*Figur 31: Målt og beregnet topptetthet for alle flatetyperne fra henholdsvis profilometer og lysmikroskopibilder. Verdiene fra profilometeret er plottet med standardavvik. Topptetthetverdien til D6U er beregnet fra D6U2.*



Figur 32: Målt og beregnet tortuositet for alle flattypene fra henholdsvis IFM og lysmikroskopibilder. Verdiene fra 3D-mikroskopet er plottet med standardavvik.

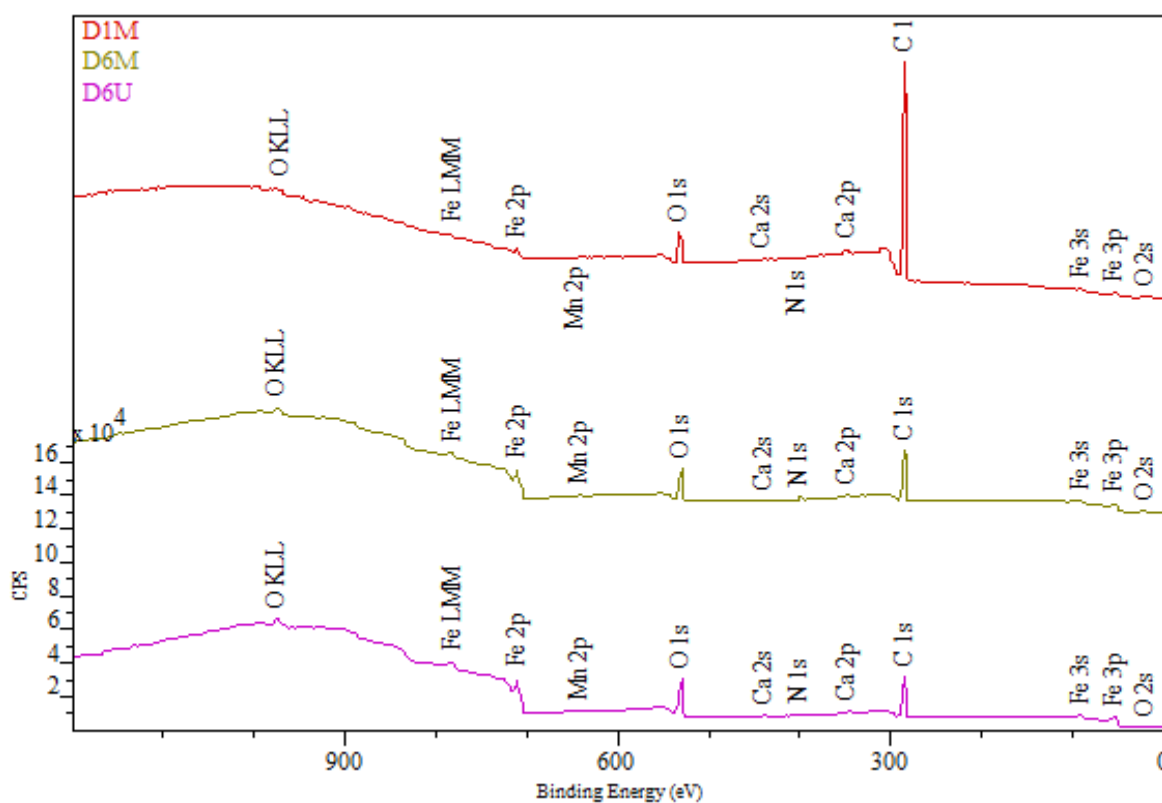


Figur 33: Målte Wenzels ruhetsfaktor-verdier for alle flattypene. Verdiene er målt med IFM og er plottet med standardavvik.

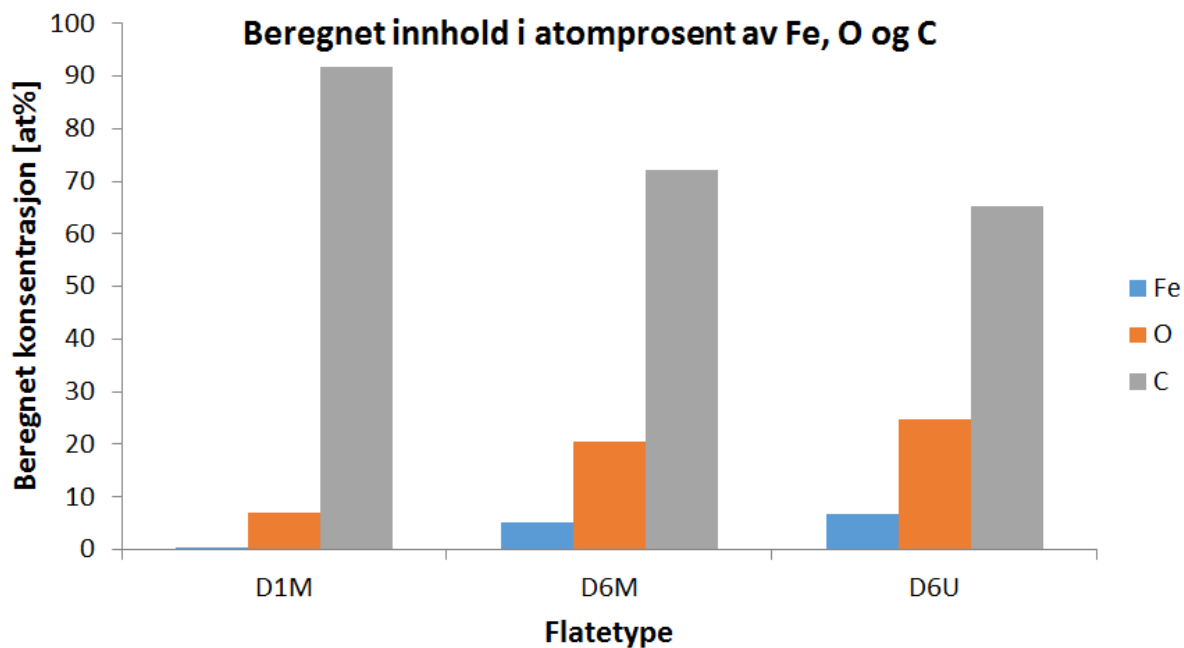
### 4.3 XPS-resultater

De målte oversiktspektrene for D1M, D6U og D6M er fremstilt i *Figur 34*. Beregnet konsentrasjon i atomprosent for de observerte grunnstoffene er plottet i *Figur 35* og *Figur 36*. *Figur 35* har plottet grunnstoffer med høy konsentrasjon. *Figur 36* har plottet grunnstoffer med lav konsentrasjon.

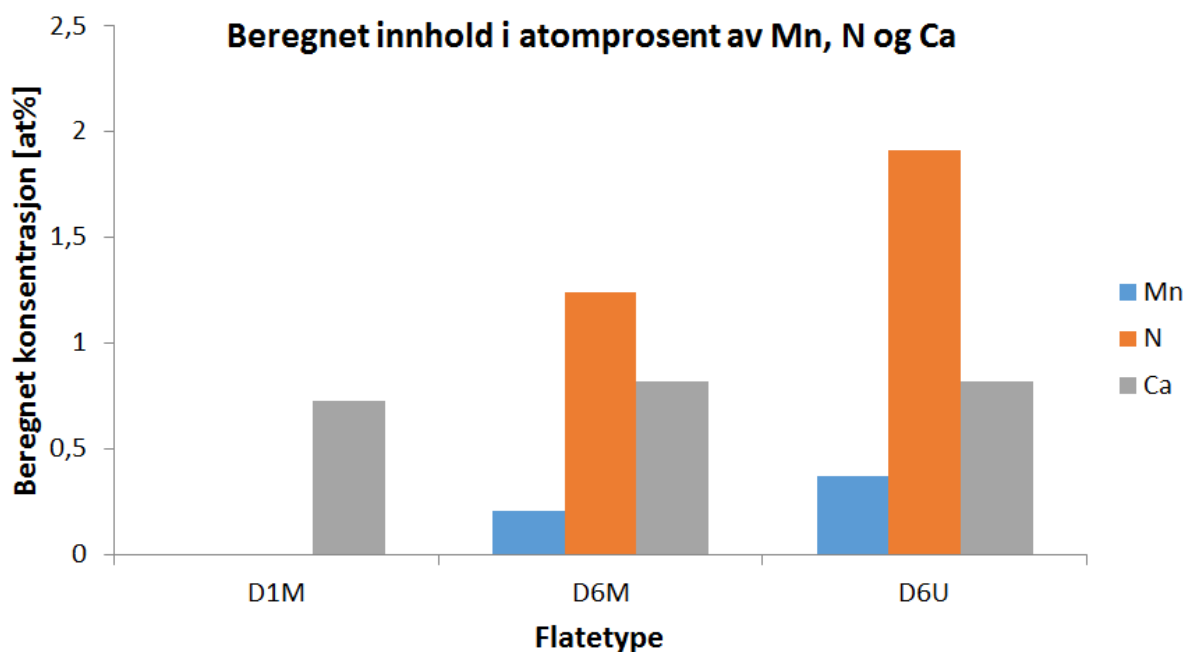
Høyoppløsningspektrum for hovedtoppene til jern(Fe2p), oksygen(O1s), karbon(C1s), kalsium (Ca2p) og nitrogen er (N1s) er fremstilt i *Figur 37* til *Figur 41*. Oversiktspektrene og høyoppløsningspektrene til de forskjellige prøvene har blitt normalisert mot hverandre med hensyn på intensitet. Høyoppløsningspektre ble ikke målt for mangan.



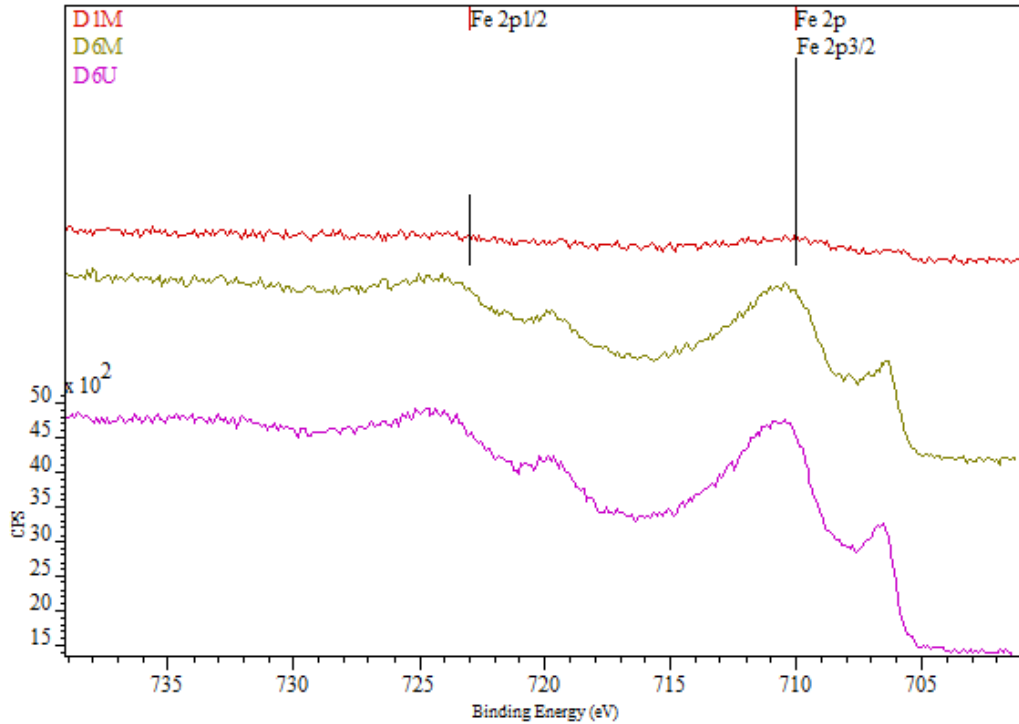
*Figur 34: Oversiktspektrum for D1M, D6M og D6U, målt med XPS. Y-aksen i plottet fremstiller intensitet som målinger per sekund (CPS). Målingene til de forskjellige prøvene har blitt normalisert mot hverandre med hensyn på målt intensitet.*



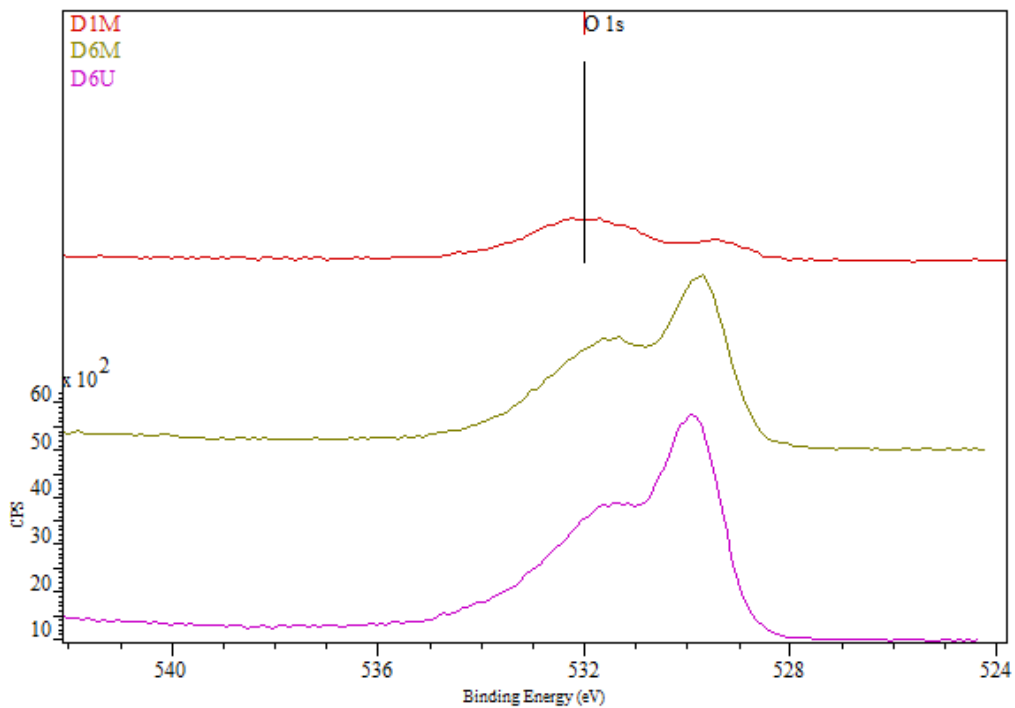
Figur 35: Beregnet innhold i atomprosent i prøvene av Fe, O og C fra oversiktspektrumet.



Figur 36: Beregnet innhold i atomprosent i prøvene av Mn, N og Ca fra oversiktspektrumet.

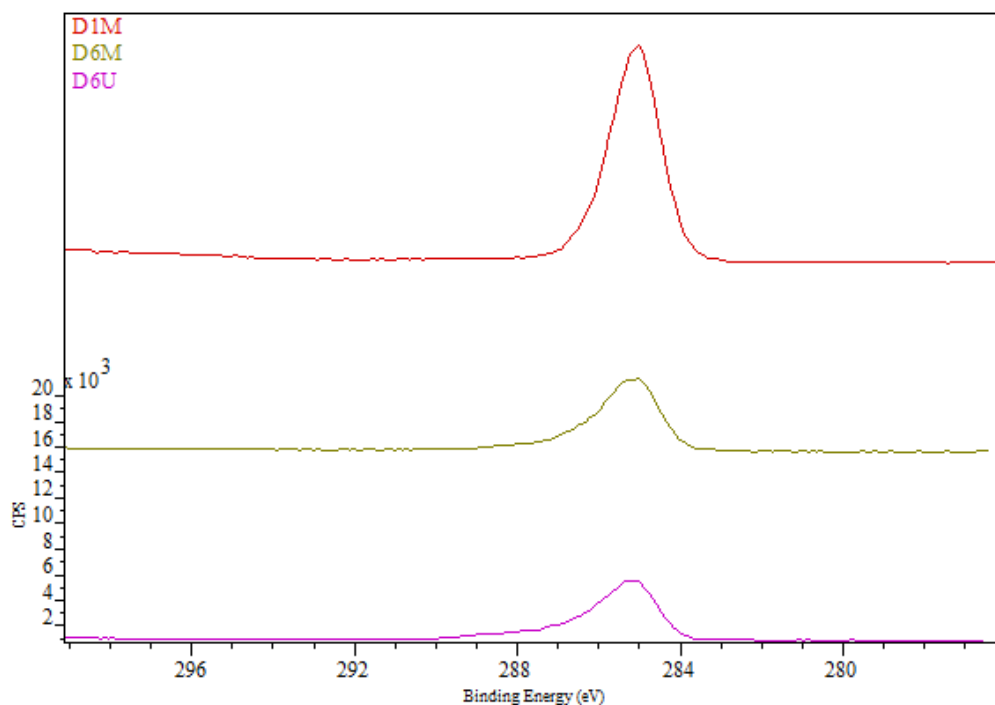


Figur 37: Høyoppløsningsspekter av Fe-2p for DIM, D6M og D6U, målt med XPS. Y-aksen i plottet fremstiller intensitet som målinger per sekund (CPS). Målingene til de forskjellige prøvene har blitt normalisert mot hverandre med hensyn på målt intensitet.

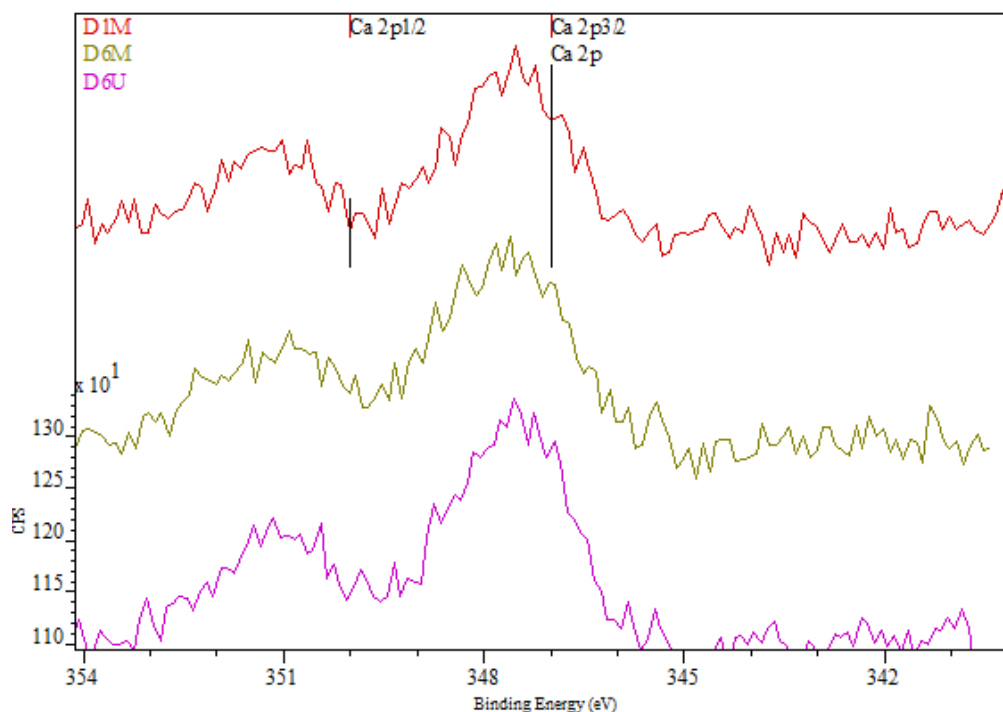


Figur 38: Høyoppløsningsspekter av O-1s for DIM, D6M og D6U, målt med XPS. Y-aksen i plottet fremstiller intensitet som målinger per sekund (CPS). Målingene til de forskjellige prøvene har blitt normalisert mot hverandre med hensyn på målt intensitet.

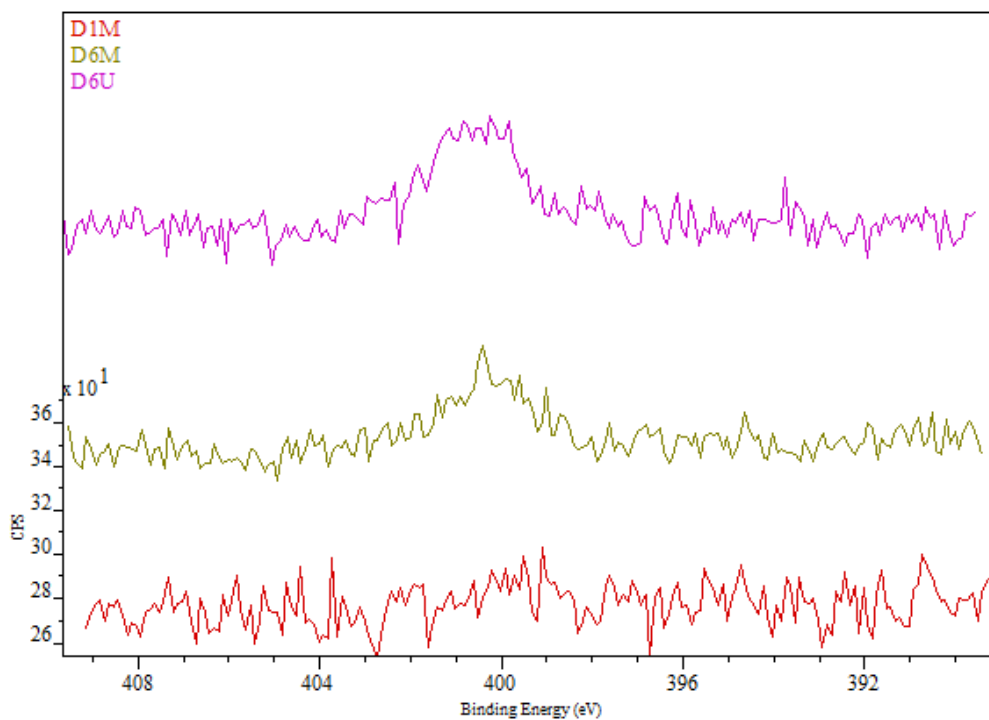




Figur 39: Høyoppløsningspekter av C-1s for DIM, D6M og D6U, målt med XPS. Y-aksen i plottet fremstiller intensitet som målinger per sekund (CPS). Målingene til de forskjellige prøvene har blitt normalisert mot hverandre med hensyn på målt intensitet.



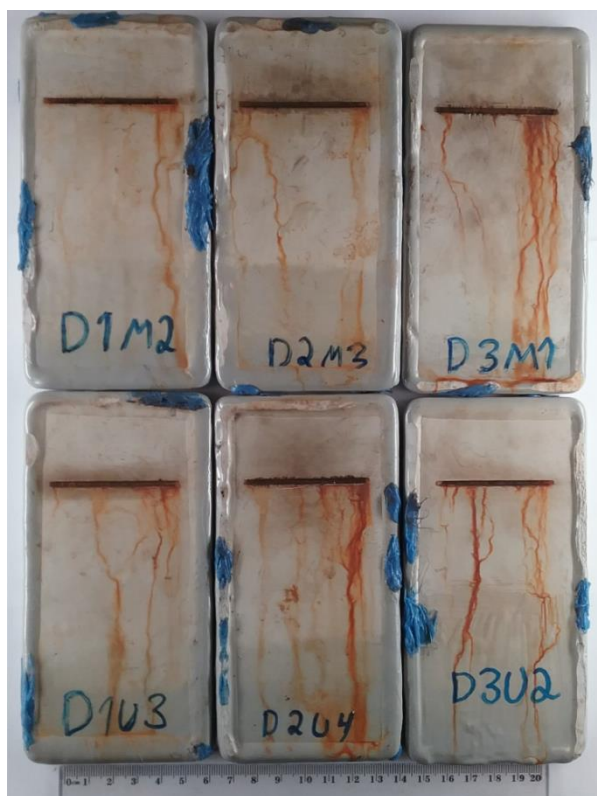
Figur 40: Høyoppløsningspekter av Ca-2p for DIM, D6M og D6U, målt med XPS. Y-aksen i plottet fremstiller intensitet som målinger per sekund (CPS). Målingene til de forskjellige prøvene har blitt normalisert mot hverandre med hensyn på målt intensitet.



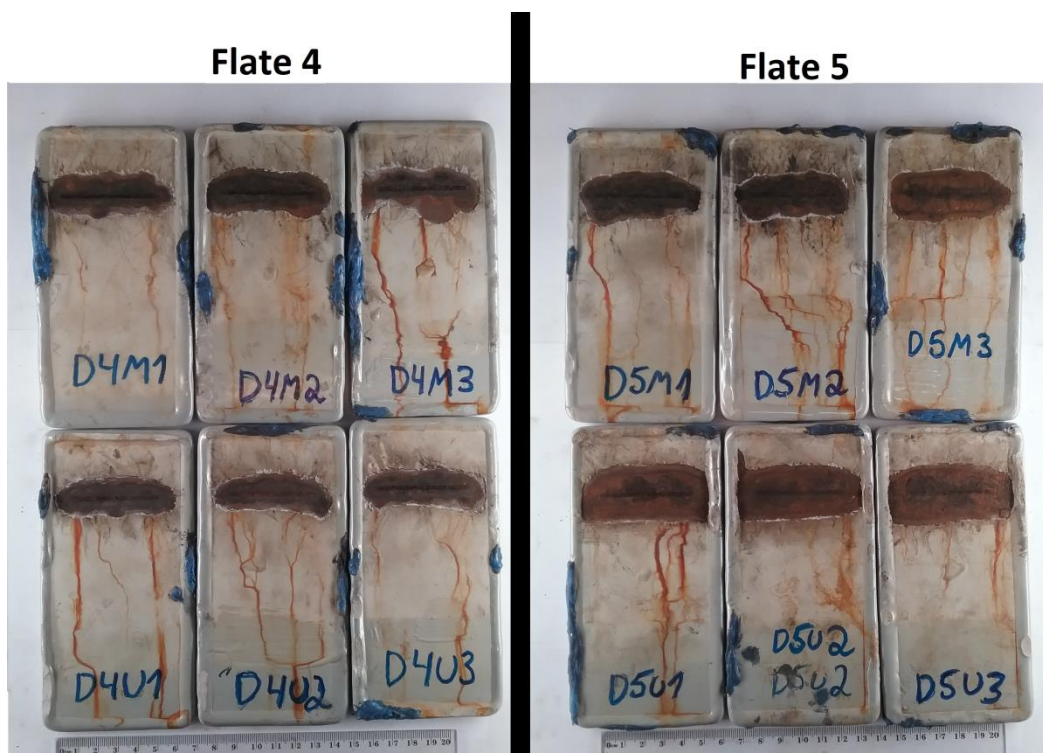
*Figur 41: Høyoppløsningspekter av N-1s for D1M, D6M og D6U, målt med XPS. Y-aksen i plottet fremstiller intensitet som målinger per sekund (CPS). Målingene til de forskjellige prøvene har blitt normalisert mot hverandre med hensyn på målt intensitet.*

## **4.5 Syklisk beleggtesting**

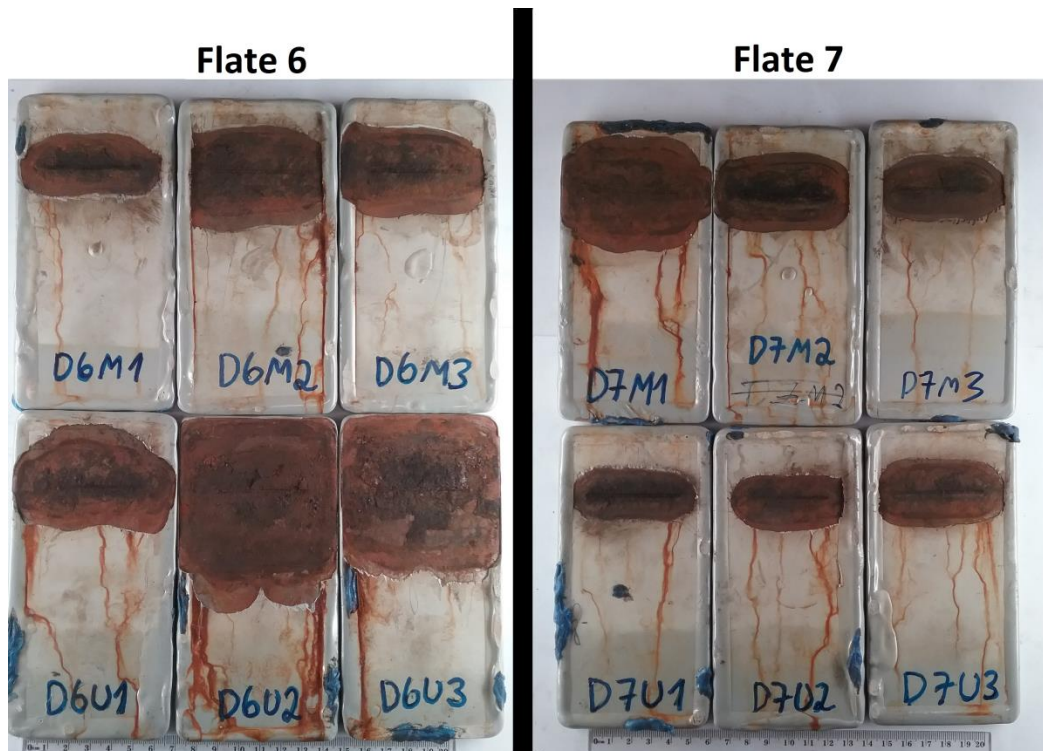
Oversiktsbilder av alle de syklisk testede prøvene etter fjerning av løst belegg er presentert i *Figur 42*, *Figur 43* og *Figur 44*. *Figur 42* presenterer prøvene som ble tatt ut fra Flate D1, D2 og D3. *Figur 43* presenterer prøvene fra Flate 4 og 5, mens *Figur 44* presenterer prøvene fra Flate 6 og 7. *Figur 45* viser plottet utregnet gjennomsnitt-korrosjonskryp, -katodisk avbinding og – total avbinding. Flate D1, D2 og D3 viste ingen korrosjonskryp eller katodisk avbinding og er dermed ikke plottet med de andre flatene. Gjennomsnittsverdiene er utregnet som avbinding i en retning fra skåret og er plottet med sine respektive standardavvik.



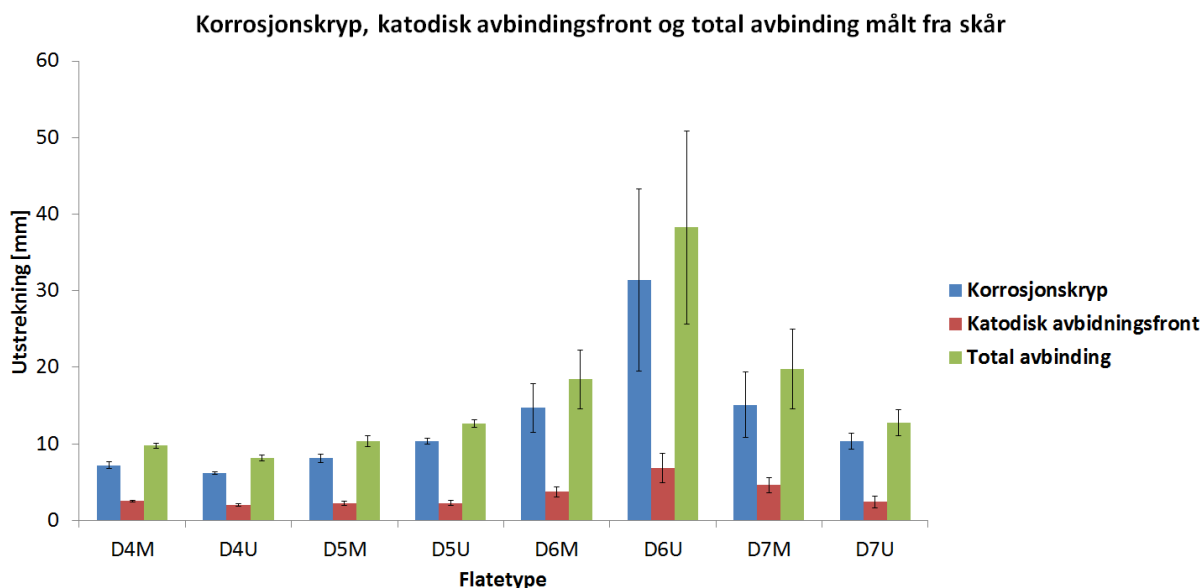
Figur 42: Bilde av prøvene fra Flate D1, D2 og D3 etter fjerning av løst belegg. Den øverste raden er prøver maskinert med skjærevæske. Den nederste raden er prøver maskinert uten skjærevæske.



Figur 43: Bilder av prøver fra Flate D4 og D5 etter fjerning av løst belegg. De øverste radene er prøver maskinert med skjærevæske. De nederste radene er prøver maskinert uten skjærevæske.



Figur 44: Bilder av prøver fra Flate D6 og D7 etter fjerning av løst belegg. De øverste radene er prøver maskinert med skjærevæske. De nederste radene er prøver maskinert uten skjærevæske.



Figur 45: Plottet gjennomsnittlig utstrekning av korrosjonskryp, katodisk avbindingsfront og total avbinding for Flate D4, D5, D6 og D7. Utstrekningene er plottet med sine respektive standardavvik. Total avbinding er summen av korrosjonskryp og katodisk avbindingsfront. Flate D1, D2 og D3 er ikke med i plottet ettersom disse flatene viste verken korrosjonskryp eller katodisk avbinding.

## 5. Diskusjon

### 5.1 Tverrsnittbilder fra lysmikroskopi

Tverrsnittbilder i *Figur 23* til *Figur 29* viser forventet rangering av topphøyde og topptetthet mellom flatetyperne; økt matehastighet gir høyere ruhetstopper. Topphøyden synker stegvis fra Flate D1 til Flate D6 og D7, mens topptettheten øker. Det er liten forskjell mellom ruheten til flatetyper maskinert med og uten skjærevæske, med unntak av flatetype D3U.

Tverrsnittbildene viser forøvrig et markant skille mellom Flate D1,D2,D3 og Flate D4,D5,D6,D7.

#### 5.1.1 Flate D1,D2 og D3

Ruheten til Flate D1,D2 og D3 skiller seg markant ut fra de andre flatene, både i høyde og form. Ruhetstoppene er høye, tårnliknende og noe overbøyende. Topptettheten er mer eller mindre konstant og stemmer kvalitativt med innstilt matehastighet. Formen og høyden på toppene samsvarer derimot ikke med hva som forventes ved dreining (*Figur 6*). Det øverste partiet av ruhetstoppene er ikke periodisk. Både form og høyde varierer mellom hver topp i dette partiet. Uregelmessigheten til toppenes øverste parti antyder at det er vanskelig å kontrollere formen på disse toppene ved maskinering. Det er dermed mulig at topphøyde varierer noe fra prøve til prøve. Dette kan forklare hvorfor flatetype D3U viser lavere topphøyde enn flatetype D3M.

#### 5.1.2 Flate D4 og D5

Flate D4 og D5 har en overflate som samsvarer bedre med den teoretiske overflaten fra dreining; flatene har bølgete og brede topper. Flate D4 viser høyere ruhetstopper, men lavere topptetthet enn Flate D5. Formen på toppene avviker derimot noe fra den teoretiske overflaten. Toppene er noe asymmetriske. Noen av toppene er også overbøyende. Grad av asymmetri og overbøyning varierer forøvrig noe fra topp til topp på hver flatetype. De overbøyende toppene er noe mer markante i flatetype D4U.

#### 5.1.3 Flate D6 og D7

Tverrsnittbildene viser at Flate D6 og D7 har en svært lav ruhet. Av disse prøvene er D6M1 den rueste. D7M3 viser ingen tegn til en periodisk ruhet. Ruhetstoppene til D6U1 viser en

liten grad av periodisk ruhet. Toppene til D6U2 er periodiske, dette ser også ut til å være tilfellet for D7U3. Det er vanskelig å visuelt rangere D6U1, D6U2, D7M3 og D7U3 etter grad av ruhet.

Liten grad av periodisitet kan komme fra makrogeometriske avvik. De makrogeometriske avvikene kan for eksempel komme fra vibrasjoner i dreiebenk, arbeidsstykke eller skjæreverktøy[44]. Ruheten til en fin flate vil naturlig nok være mer følsom ovenfor slike avvik. Dette skyldes at de makrogeometriske avvikene kan bli relativt store i forhold til den lave, maskinerte ruheten. De makrogeometriske avvikene kan medføre at ruheten til flate D6 og D7 varierer noe fra prøve til prøve.

## ***5.2 Målte og beregnede ruhetsparametre***

Figur 30 til Figur 33 viser ruhetsparametre som ble beregnet eller målt med lysmikroskop, IFM og profilometer. Merk at profilometeret har målt på alle prøvene som ble syklisk testes. Lysmikroskopet har derimot målt på 1 prøve til syklisk testing fra hver flatetype. De to prøvene fra hver flatetype som ble målt med IFM gikk derimot ikke til syklisk testet. Det kan også tenkes at IFM-verdiene er noe feilberegnet på flater med overhengende topper. Dette skyldes at IFM ikke klarer å hente informasjon av områder som er skjermet av ruhestopper. Det antas dermed at ruhetsverdiene som ble målt med profilometer er mest representative.

### **5.2.1 Flate D1,D2 og D3**

Flate D1,D2 og D3 har markant høyere  $R_z$ , tortuositet og Wenzels ruhetsfaktor-verdier enn Flate D4,D5,D6 og D7. For Flate D1,D2 og D3 varierer disse verdiene noe mellom flater maskinert med og uten skjærevæske. Flate D1,D2 og D3 viser også store forskjeller mellom tortuositetsverdier målt med og uten mikroskop. Dette kan skyldes de uvanlige D1-, D2- og D3-toppene som ble observert i lysmikroskop. Topptetthetsverdiene til disse rue flatene stemmer kvalitativt med innstilt matehastighet. Det er liten forskjell i prøver maskinert med og uten skjærevæske. Det er også en gradvis økning i topptetthet fra Flate D1 til Flate D3, som forventet.

### **5.2.2 Flate D4 og D5**

Flate D4 og D5 har lite variasjon i målte verdier på flatetyper med og uten skjærevæske.

Profilometermålingene til disse flatene viser lave standardavvik. Dette tyder på at prøveparalleller til Flate D4 og D5 varierer lite seg imellom. D4 viser noe høyere tortuositet og wenzel ruhetsfaktorverdier enn D5. Det er forøvrig liten variasjon i målinger og beregninger mellom instrumenter.

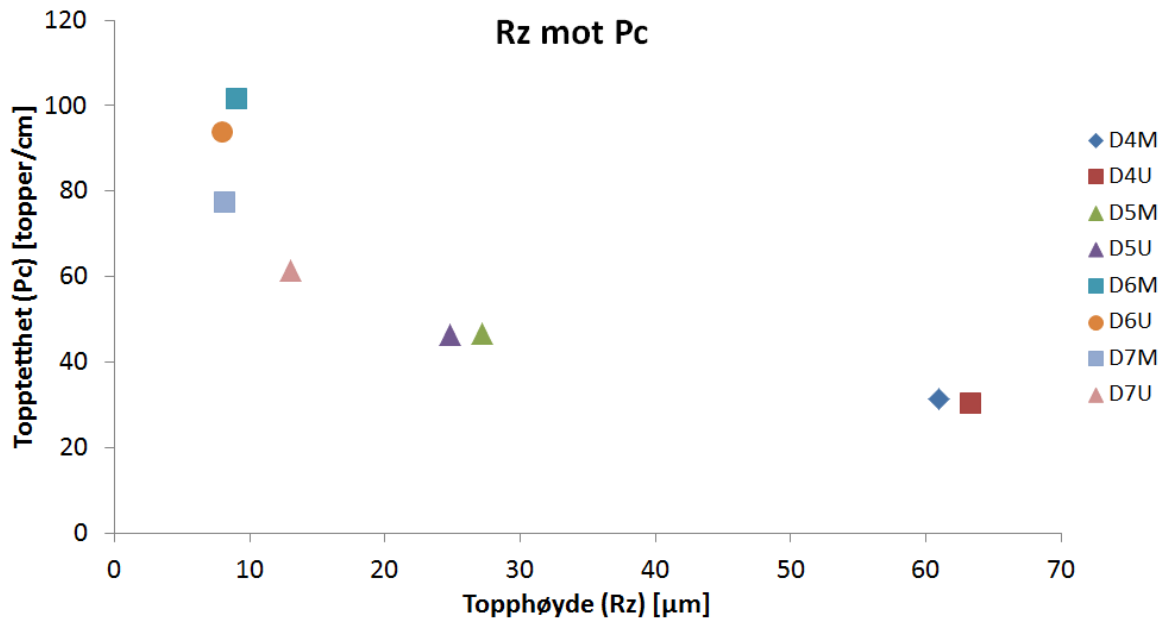
### 5.2.3 Flate D6 og D7

Profilometermålingene til D6 og D7 viser noe større standardavvik mellom prøveparalleller enn D4 og D5. Det høye standardavviket er spesielt tydelig for toppetthetsmålingene til D7M. Dette kan forklares av den ruglete tverrsnittet som kan sees fra D7M3 i FIGUR. Variasjonen kan skyldes stor variasjon i tetthet av groper, eller at profilometeret har slitt med å måle denne overflaten. Topptettheten varierer også noe på flatetype D6U og D6M. Disse flatetyper viser også prøver som ikke er helt periodiske. Topptettheten som ble målt av profilometeret på D6U stemmer godt overens med beregnet topptetthet fra D6U2. Topphøyden til Flate D6 og D7 viser noe mindre variasjon. D6U ser ut til å ha ca. Like høye topper som D7M. Ifølge profilometeret har D7U og D6M noe høyere topper. Tverrsnittbildet til D7U antyder at toppene på denne flaten er noe lavere enn hva profilometeret viser.

D7U viser høyere ruhet enn de andre flatetyper. Denne flatetypen har lavere topptetthet, men høyere topper. Flatetypen viser også mindre standardavvik i topptetthet. Det blir dermed antatt liten variasjon mellom prøveparalleller av flatetype D7U. Dette samsvarer godt med tverrsnittbildene som viser at ruheten til D7U er mer periodisk enn D7M.

### 5.2.3 Ruhetsverdier til senere sammenlikning

De målte ruhetsverdiene til Flate D1,D2 og D3 blir hovedsakelig sett bort ifra senere i oppgaven. Ingen av disse flatetyper viste avbinding fra skår, som sett i *Figur 42*. Ruhetsparameterene til Flate D1,D2 og D3 kan dermed ikke sammenliknes opp mot belegglevetid. Ruhetsverdiene til Flate D4,D5,D6 og D7 (som alle viste avbinding fra skår) blir senere sammenliknet mot målt totalavbinding.  $R_z$ - og  $P_c$ -verdiene til disse flatene hentes fra profilometermålingene. Tortuositet- og Wenzels ruhetsfaktors-verdier hentes fra IFM. Tortuositetsverdiene hentes fra IFM fordi dette instrumentet klarte å måle tortuositeten for alle flatetyper. Figur viser topptetthet ( $P_c$ ) plottet mot topphøyde ( $R_z$ ) for Flate D4,D5, D6 og D7. Figuren viser at flatenes topptetthet varierer med topphøyde.



Figur 46: Forhold mellom topphøyde ( $R_z$ ) og topptetthet ( $P_c$ ) for Flate 4-7.

## 5.3 XPS-resultater

Figur 34 viser oversiktspekteret for D6M-, D6U- og D1M-prøven. Figur 35 og Figur 36 viser konsentrasjon av grunnstoffer i overflaten på disse prøvene. Seks forskjellige grunnstoffer ble oppdaget: jern, karbon, oksygen, mangan, nitrogen og kalsium. Figur 35 indikerer at de 10 øverste nanometerne i overflaten hovedsakelig består av karbon, jern og oksygen.

### 5.3.1 Jern, oksygen og karbon

Figur 37 viser forekomst av både jernoksid ( $\sim 710,8$  eV) og metallisk jern ( $\sim 706,7$  eV) på D6U og D6M[74]. Observasjonen av metallisk jern antyder at XPS har målt gjennom metalloksidet i prøvenes overflate. Figur 38 viser at D6U- og D6M-prøven begge har en splittet oksygentopp. Den øverste delen av oksygentoppen antyder forekomst av jernoksid ( $\sim 530$  eV)[75]. Sadelpunktet til oksygentoppen kan antyde forekomster av metall-hydroksid, vann og organisk karbon-oksygen-baserte molekyler[75]. Figur 39 viser at karbontoppen til prøve D6U er veldig lik karbontoppen til prøve D6M. Karbontoppene til disse prøvene er noe asymmetriske, med hale mot høyre. Karbontoppene indikerer hovedsakelig overflatekarbon ( $\sim 248,8$  eV)[76]. Halen til karbontoppen kan indikere forekomster av karbon-oksygen-



karbon-baserte molekyler (~286 eV)[76]. D6U og D6M har relativt lik fordeling av grunnstoffer i overflaten. D6M viser noe større andel karbon i overflaten enn D6U, men lavere andel oksygen og jern. Dette kan indikere noe rester av skjærevæske i D6M. Den større forekomsten av karbon kan derimot også komme fra andre forurensinger.

D1M-prøven viser større forekomster av karbon i overflaten enn for D6U- og D6M-prøven. Prøven viser derimot betydelig mindre jern og oksygen. Oksygentoppen til D1M-prøven i *Figur 38* skiller seg ut fra oksygentoppene til de andre prøvene. Toppen er splittet i to, med et sadelpunkt mot høyre. Det høyeste punktet til oksygentoppen kan indikere karbon-oksygen-baserte molekyler i overflaten (~532 eV)[75]. Sadelpunktet til D1M-prøven sin oksygenkurve kommer trolig fra jernoksid (~530 eV)[75]. Karbontoppen til D1M-prøven i *Figur 39* er noe forskjellig fra karbontoppene til henholdsvis D6U- og D6M-prøven. Toppen av karbonkurva indikerer overflatekarbon (~248,8 eV)[76]. Det er mulig at kurva har en hale litt mot venstre i plottet. Halen kan indikere forekomst karbon-oksygen-karbon-baserte molekyler (~286 eV)[76]. Tverrsnittbilder og profilometermålinger antyder også at flate D6 varierer noe i ruhet fra prøve til prøve. Det er usikkert hvorvidt ruheten til disse prøvene har påvirket XPS-målingene.

D1M sin høye karbontopp kombinert med D1M sin oksygentopp kan indikere rester av skjærevæske i overflaten. Et sjikt med rester av skjærevæske kan forklare hvorfor prøven viser lavere forekomster av jern og oksygen. XPS innhenter overflateinformasjon ned fra overflatens øverste 10 nanometer. Det er mulig at rester av skjærevæske ligger som et sjikt på overflaten. Dette sjiktet kan ha hindret XPS-målingene å nå tilstrekkelig ned i prøvens overflate. Det er derimot vanskelig å stole på resultatene fra D1M. Det kan tenkes at målingene har blitt forstyrret av D1M sin høye overflateruhet (*Figur 23*). Den røe overflaten kan påvirke måleresultatene gjennom flere mekanismer. Ruhetstoppene kan ha skjermet fotoelektroner fra å nå detektoren. Det kan også tenkes at XPS-linsa ikke har vært fokusert over hele den røe overflaten. Kombinasjon av skjerming og lite fokus kan ha resultert i at kun deler av overflaten har blitt målt. Den høye vinkelen på ruhetsstoppene kan også ha påvirket hvor måledybden til XPS[77]. En redusert måledybde vil også forklare den høye forekomsten av karbon, i forhold til oksygen og jern.

### 5.3.1 Mangan, kalsium og nitrogen

Alle prøvene viser mindre mengder kalsium. D6U- og D6M-prøven viser i tillegg mindre mengder mangan og nitrogen. Høyoppløsningspekter ble ikke målt for mangantoppen. D6U og D6M ser derimot ut til å ha nesten tilsvarende mengder av mangan. Forekomsten av mangan skyldes trolig sammensetningen til stålet. Mangan er et vanlig legeringselement i stål og finnes i ståltypen som ble testet i denne avhandlingen (ST52) [78]. **Figur 40** viser at kurvene til kalsium i høy oppløsning for prøvene er svært like. Mengden kalsium er forøvrig ca like stor på alle prøvene. En like stor konsentrasjon av kalsium i D1M-prøven som i de andre prøvene kan tyde på at kalsium ligger i overflatens øverste sjikt. Det er mulig at kalsium har blitt tilført overflatene gjennom rengjøringen av prøvene. Prøve D6M viser noe høyere forekomst av nitrogen enn prøve D6U. Det er usikkert hva som skylder forekomsten av nitrogen. Det er mulig at nitrogen er tilført fra atmosfæren. Prøve D1M viser derimot ingen tegn til nitrogen på prøven. Dette kan tyde på at nitrogen ikke ligger i overflatens øverste sjikt. Konsentrasjonen av nitrogen er uansett lav. Det er dermed vanskelig å peke på en markant forskjell i mengde nitrogen mellom prøve D6U og D6M.

## ***5.4 Ruhet, skjærevæske og belegglevetid***

*Figur 42* til *Figur 44* viser bilder av de testede flatene etter fjerning av løst belegg. Flate D1, D2 og D3 viste som tidligere nevnt ingen avbinding. Målt og beregnet katodisk avbinding, korrosjonskryp og totalavbinding for de resterende flatene er plottet i *Figur 45*. Det er tydelig fra tverrsnittbildene og den plottede avbindingen at substratets ruhet har stor innvirkning på belegglevetid. Beleggavbindingen går fra 0 på flate D1, D2 og D3, til å gradvis øke med fallende ruhet.

### **5.4.1 Flate D1, D2 og D3**

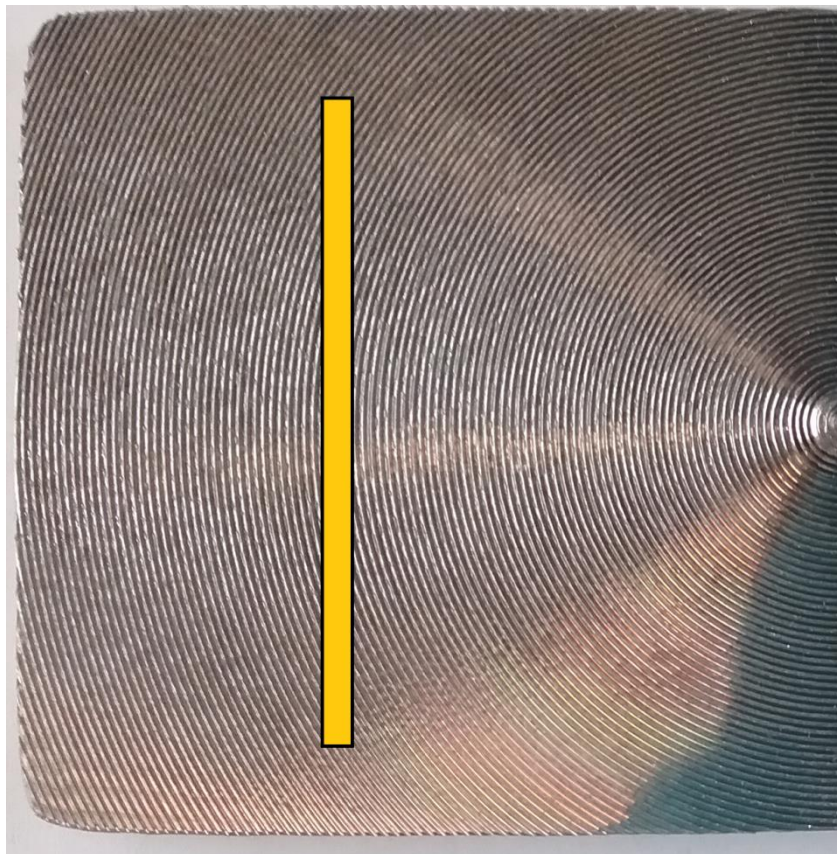
Ingen av de rueste flatene viste beleggavbinding. De seks uker testede flatene har dermed klart seg tilsynelatende bedre enn de blåserensede flatene fra forløperprosjektet. De blåserensede flatene fra dette prosjektet viste en total avbinding på rundt 4mm etter åtte uker syklisk testing [60].

### **Avbinding normalt på topper**

En svært høy tortuositet har blitt målt normalt på toppene. En høy tortuositet forbindes som tidligere nevnt med en lav katodisk avbindingsrate. Det blir antatt at dette skyldes økt transportvei for kationer til den katodiske avbindingsfronten. Raten av katodisk avbinding burde dermed være betraktelig redusert over Flate D1, D2 og D3 sine topper.

### **Avbinding langs maskineringssporene**

I forløperprosjektet ble det sett at beleggavbindingen gikk raskere langs maskineringsgroperne enn over maskineringsstoppene. Dette ble sett på flater med høye ruhet[60]. Ruheten er stort sett veldig lav langs groper fra dreining og fresing. Dette medfører en lav tortuositet, trolig nær 1. Katodisk avbinding antas dermed å gå forholdsvis raskt innover langs ruhetsgroper i maskinerte overflater. Skåret som ble maskinert gjennom belegget og ned til stålet skjærer gjennom en rekke maskineringsgroper, som skissert i *Figur 47*.



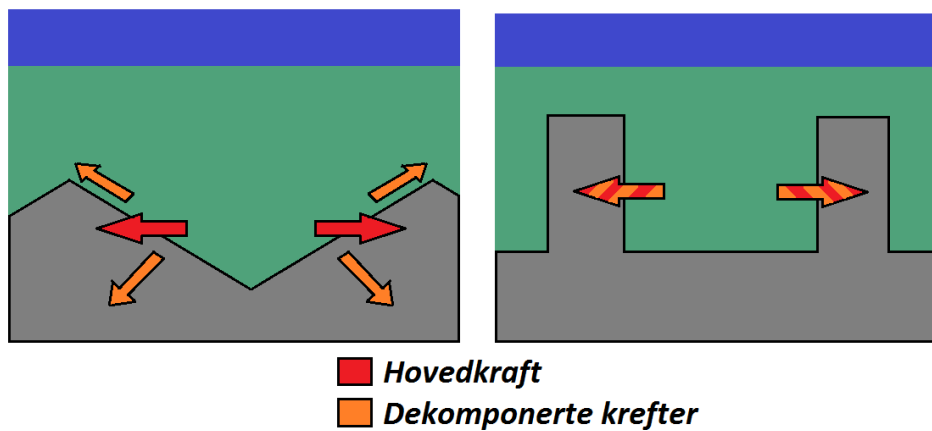
*Figur 47: Figuren skisserer hvordan skåret skjærer gjennom ruhetssgroper i de maskinerte overflatene*

Kationer fra elektrolytt i skåret ved syklisk testing kan dermed ha vandret innover grenseflaten mellom belegg og substrat langs ruhetsgropene. En skulle dermed anta noe katodisk avbinding langs gropene som er knyttet til skåret. Flate D1, D2 og D3 viste derimot ingen avbinding fra skåret langs disse ruhetsgropene. Det er mulig at noe oksygenreduksjon har forekommet innover langs ruhetsgropene som er koblet til skåret. Det antas derimot at heftreduksjon fra OH- ikke vil merkes om belegget sitter tilstrekkelig til overflaten. Mangel på synlig katodisk avbinding langs disse gropene kan dermed indikere høy heft mellom belegg og substrat.

Det antas at den høye heften kommer fra formen på ruhetstoppene. Den første effekten fra de tårnliknende og høye toppene er et stort bindingsareal mellom belegg og substrat. IFM beregnet en Wenzels ruhetsfaktor på over 3 for Flate D1, D2 og D3. Dette medfører at disse flatene i teorien har minst 3 ganger så høy heft som en overflate uten høydevariasjoner.

Denne andre heftfremmende effekten kan skyldes mekanisk forankring. De tårnliknende, høye og overbøyende toppene vil trolig begrense bevegelse langs overflaten mellom belegg og substrat. Denne begrensingen er trolig svært stor mot høyre og venstre retning i tverrsnittbildene. Her står toppene direkte i veien for bevegelse av belegget i ruhetsgropene. En stor andel av den mekaniske forankringen kan også skyldes beleggutvidelse i fuktige omgivelser. Belegg som trekker til seg vann vil utvide seg [13]. *Figur 48* skisserer tenkt utvidelse av belegg ved to forskjellige substrat. Substratet til venstre har ruhetstopper med liten helning. Substratet til høyre har ruhetstopper med stor helning ( $90^\circ$  mot resten av overflaten). Ved begge disse ruhetene kan det tenkes at belegget kan utvide seg vertikalt i figuren med liten motstand fra substratet. Det utvidende belegget vil derimot møte motstand i horisontal retning. Horisontalt trykk fra belegg mot substratet med svak helning (a) vil trolig skape skjærkrefter oppover langs ruhetstoppene. Det er mulig at våt beleggheft kan skyldes at slike skjærkrefter presser belegget fra substratet. Horisontalt trykk vil derimot ikke komponeres til skjærkrefter langs ruhetstoppene med  $90^\circ$  helning (b). Ruhetsgropene til Flate D1, D2 og D3 likner mer på toppene med  $90^\circ$  helning. Det antas dermed at horisontal beleggutvidelse vil gi lite skjærkrefter langs ruhetstoppene til Flate D1, D2 og D3. Fuktig belegg vil i trolig presse direkte mot ruhetstoppene. Det kan tenkes at dette vil gi opphav til

stor friksjon langs ruhetstoppene som har motvirket belegget fra å bevege seg i vertikal retning.

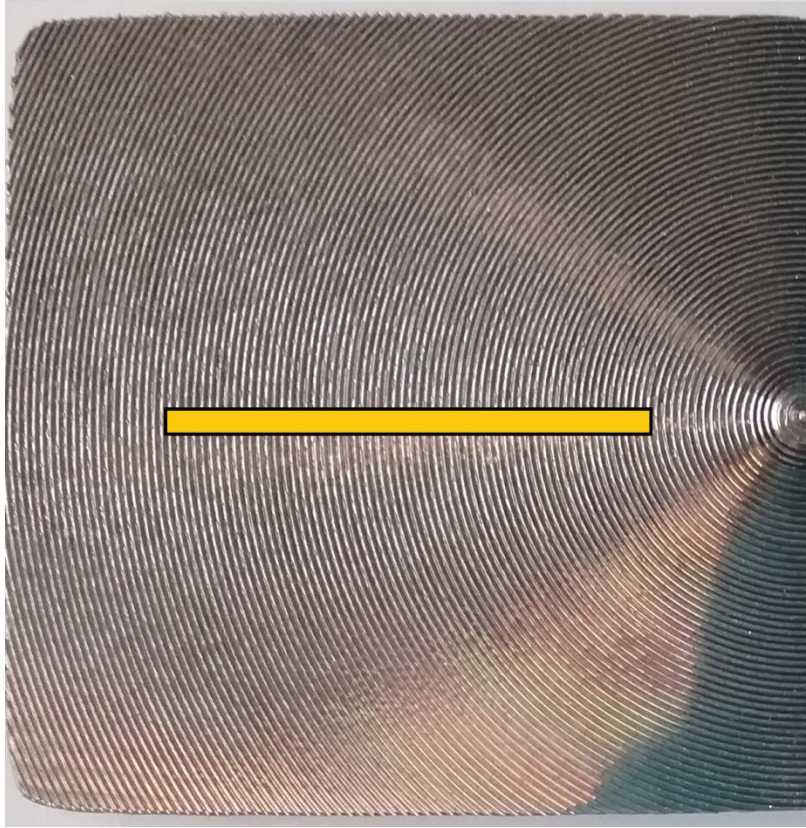


Figur 48: Figuren illustrerer antatte krefter som virker på substratet (grå farge) fra horisontal utvidelse av fuktig belegg (grønn farge). Det blå området over belegget skisserer vann.

Skissen til venstre viser et substrat med svak helning på ruhetstoppene, hvor deler av hovedkraften dekomponeres til skjærkrefter og normalkrefter. Skissen til høyre viser et substrat med stor ( $90^\circ$ ) helning på ruhetstoppene. Her dekomponeres hovedkraften antakeligvis ikke til skjærkrefter, men normalkrefter.

### Kombinert effekt fra tortuositet og beleggheft

Som tidligere nevnt vil maskinerte overflater gjerne ha høyere avbindingshastighet langs ruhetsgroper enn over ruhetstoppene [60]. Det kan dermed være vanskelig å maskinere overflater som har god belegglevetid i alle retninger. Dette ettersom at maskineringsgroper er et uunngåelig resultat av maskineringsstoppene. De høye ruhetstoppene til Flate D1, D2 og D3 vil trolig begrense hastigheten av beleggavbinding i retninger normalt på toppene (til høyre og venstre i tverrsnittbildene). Hastighetsbegrensningen normalt på toppene kommer antakeligvis fra økt gangvei for transport av kationer og anodisk undergraving. Formene på ruhetstoppene vil trolig begrense avbindingen langs gropene (innover i tverrsnittbildene) gjennom økt heft. Det er derimot usikkert hvordan belegglevetiden vil endre seg om skåret plasseres langs prøvens senterlinje, som skissert i Figur 49. Det kan tenkes at avbindingen går raskere fra et slikt skår om tortuositeten over ruhetstoppene står for mesteparten av belegglevetiden til Flate D1, D2 og D3. Dette fordi skåret åpner for flere gangveier med lav tortuositet, slik at tortuositetsbidraget fra de høye toppene effektivt synker.



*Figur 49: Figuren skisserer et skår som skjærer gjennom en plandreiet overflate langs senterlinja.*

### **Maskinering med skjærevæske**

XPS-resultatene for flatetype D1M viste mulige tegn på skjærevæske i overflaten. Det er som tidligere nevnt usikkert om skjærevæske faktisk ligger igjen på D1M-overflatene. Dette ettersom XPS-resultatene kan skyldes forstyrrelser fra den høye ruheten til D1M. Hvis skjærevæske faktisk ligger igjen på D1M så skyldes dette antakeligvis flatetypens høye ruhet. Det kan tenkes at disse prøvene ikke har blitt skrubbet godt nok mellom ruhetstoppene. I så fall er det mulig at rester av skjærevæske ligger i bunnen av ruhetsgropene. Det kan tenkes at hvis skjærevæske finnes på D1M, så kan også skjærevæske finnes på D2M og D3M.

Flatene viser ingen forskjell i avbinding mellom prøver med og uten skjærevæske. Maskinering med skjærevæske har ikke synlig påvirket belegglevetiden på disse flatene etter seks uker med syklisk testing. Dette kan enten skyldes at flatene er tilstrekkelig rene. Den andre forklaringen kan være at overflatenes ruhet motvirker effekten fra rester av skjærevæske. Det er mulig at ruheten gir en stor nok heft til å motvirke effekten på belegglevetid fra urenheter i overflaten. Bidraget fra ruheten kan komme fra mekanisk forankring mellom belegg og ruhetstopper. Den mekaniske forankringensmekanismen er trolig mindre sensitiv ovenfor rester av skjærevæske i overflaten. Videre forsøk må til for å konkludere hvorvidt rester av skjærevæske har innvirkning på disse flatene.

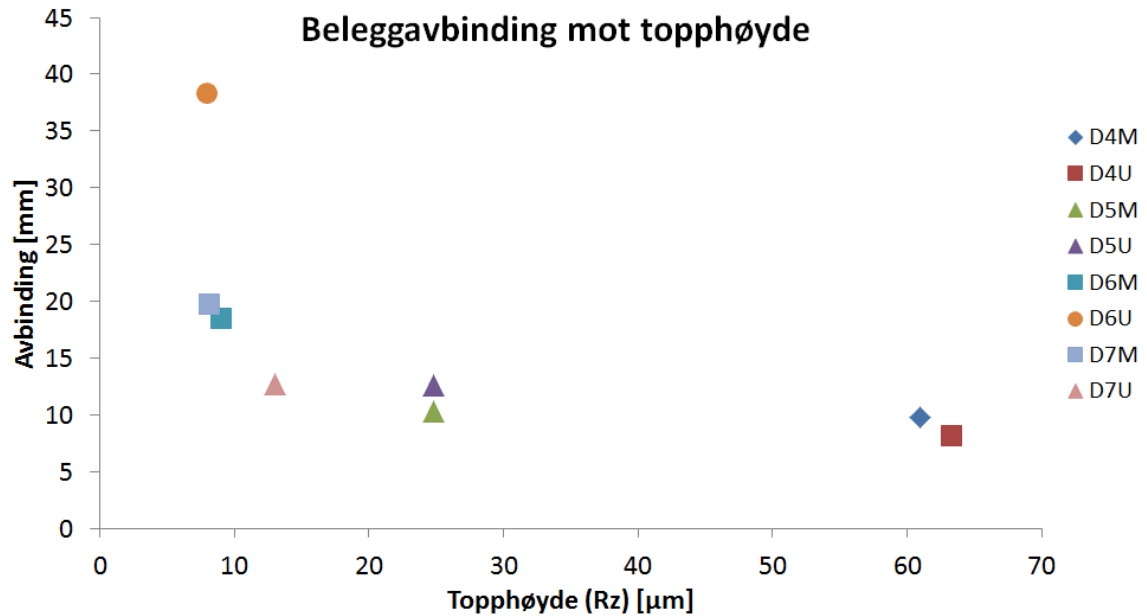
#### **5.4.2 Flate D4,D5, D6 og D7**

Flate D4,D5,D6 og D7 viste alle beleggavbinding fra skår. Av disse flatene viser D4 minst avbinding, etterfulgt av flate D5. Flatetype D6U viser størst avbinding, etterfulgt av D6M og D7M. Flatetype D7U har klart seg ca. like bra som flatetype D5U. Alle disse flatene viser ruhet som er mer typisk maskinert overflate og diskuteres derfor samlet.

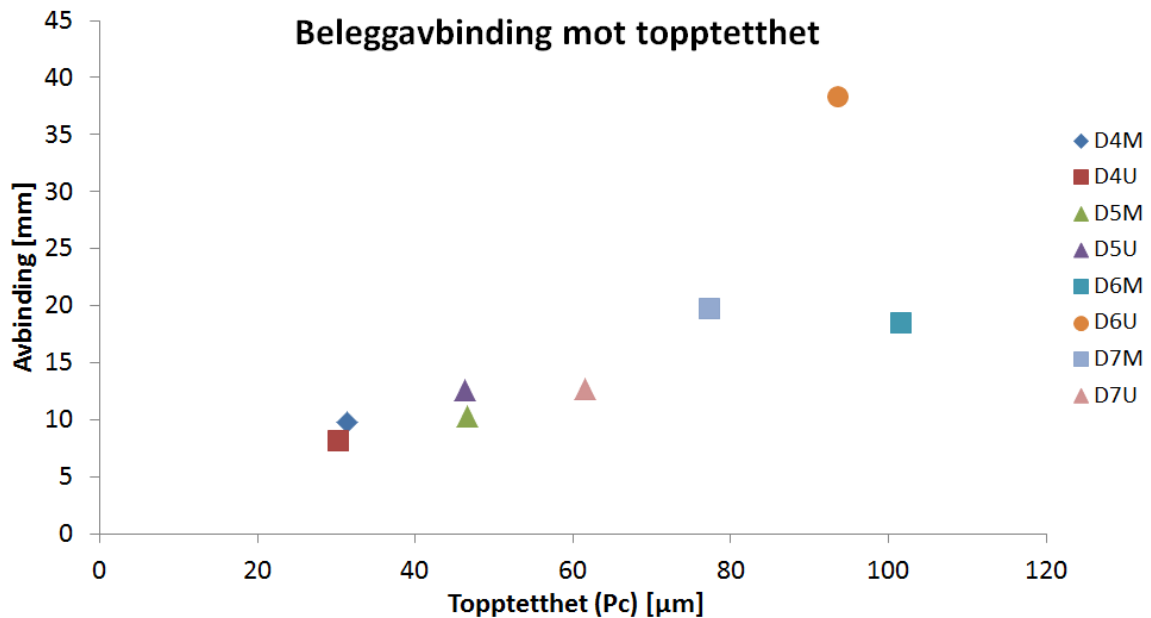
Flate D4 og D7 har mest avbinding på prøver med skjærevæske. D5 og D6 har mest avbinding på prøver uten skjærevæske. Figur 45 viser dermed ingen trend mellom skjærevæske og belegglevetid. XPS-resultatene viste liten indikasjon på skjærevæske på D6M-overflaten. Dette tyder på at den anvendte vaskeprosedyren er effektiv på flater med lav ruhet. Det antas skjærevæsken også har blitt vasket bort på Flate D4, D5, og D7. Ruheten på disse flatene er trolig ikke høy nok til å ha hindret tilstrekkelig rengjøring av prøvenes overflater. Dermed ser det ut til at variasjoner i belegglevetid skyldes variasjoner i ruhet på disse flatene.

*Figur 50* til *Figur 53* har plottet beleggavbinding mot de forskjellige målte og beregnede ruhetsparametrene på flate D4, D5, D6 og D7. Beleggavbindingen synker med  $R_z$ , tortuositet og Wenzels ruhetsfaktor, men øker med  $P_c$ . Det er vanskelig å se en sammenheng mellom  $P_c$ ,  $R_z$  og beleggavbinding. Dette fordi flatene ikke viser et lineært forhold mellom  $R_z$  og  $P_c$ , som vist i *Figur 46*.  $R_z$  og  $P_c$  vil derimot påvirke tortuositet og Wenzels ruhetsfaktor. Det ser ut til å være en sammenheng mellom høy tortuositet, høy Wenzels ruhetsfaktor og lav beleggavbinding. Den høyere ruhetsfaktoren vil gi høyere bindingsareal og dermed økt heft. Høyere tortuositeten antas å gi reduksjon i hastigheten til katodisk avbinding. De røe prøvene

har trolig økt levetid som følger av økning i ruhetsfaktor og tortuositet. Ytterligere har Flate D4 overhengende topper som trolig vil gi noe mekanisk forankring. Det er derimot usikkert hvor mye av belegglevetiden til D4 som skyldes disse overhengende toppene.

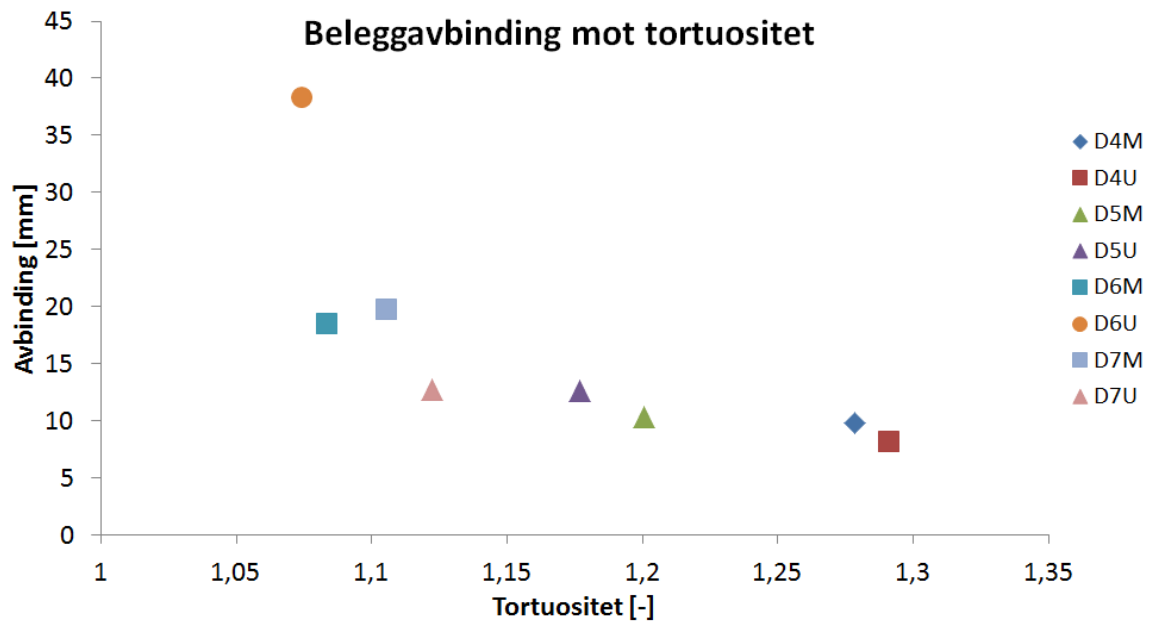


Figur 50: Beleggavbinding plottet mot topphøyde ( $R_z$ ) for flate D4, D5, D6 og D7.

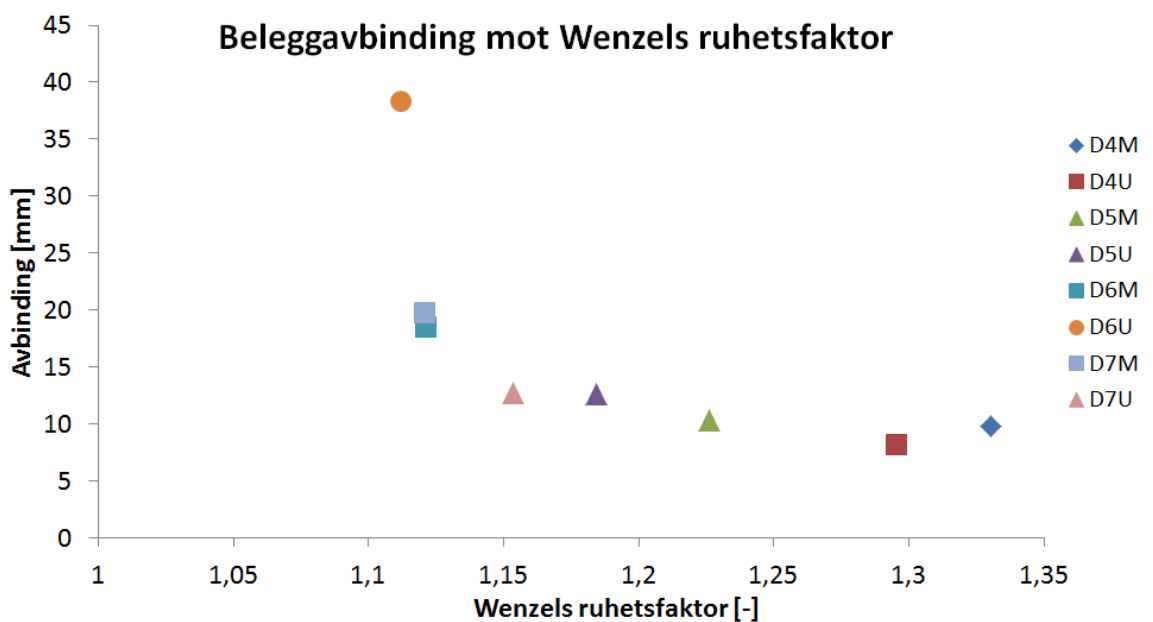


Figur 51: Beleggavbinding plottet mot topptetthet ( $P_c$ ) for flate D4, D5, D6 og D7.





Figur 52: Beleggavbinding plottet mot tortuositet for flate D4,D5,D6 og D7.



Figur 53: Beleggavbinding plottet mot Wenzels ruhetsfaktor for flate D4,D5,D6 og D7.

De fineste flatene, D6 og D7, viser store forskjeller i belegglevetid mellom prøveparalleller. Årsaken til disse variasjonene er noe usikre. Avvikene er spesielt markante på flatetype D6U.

Denne flaten skiller seg merkbart fra de andre flatene i *Figur 50* til *Figur 53*. Flate D4 og D5 viser lite variasjoner mellom prøveparalleller. Dette kan tyde på at variasjonene kommer fra Flate D6 og D7 sin lave overflateruhet.

En mulig forklaring på avvikene er at avvikene skyldes lite bidrag på belegglevetid fra lav overflateruhet. Det kan tenkes at belegglevetiden til flatene blir mer utsatt for andre faktorer som påvirker belegglevetid når bidraget fra ruhet er lavt. Eksempler på slike faktorer kan tenkes å være: variasjoner i belegg (tykkelse, restspenninger, porer), variasjoner i skårdimensjon og variasjoner ved syklisk testing. D4 og D5 viser trolig lite variasjon som følger av høyere overflateruhet. Effekten på belegglevetid fra eksterne faktorer er trolig relativt liten i forhold til effekten fra overflateruhet på D4 og D5.

En annen forklaring kan være at forskjeller i belegglevetid kommer fra variasjoner i ruhet mellom prøveparalleller. Tverrsnittbildene i *Figur 28* og *Figur 29* viser ruheten til D6M1, D6U1, D6U2, D7M3 og D7U3. Beleggavbinding på disse flatene vises i *Figur 44*. Det er stor forskjell i beleggavbinding mellom D6U1 og D6U2. D6U2 er sterkt periodisk, mens D6U1 er mindre periodisk. D6U2 har også en veldig glatt overflate på og mellom ruhetstoppene, mens D6U1 har en ruglete overflate. For enkelhetsskyld vil den ruglete mønsteret på og mellom toppene betegnes som underruhet videre i diskusjonen. D7M3 og D7U3 har ca. samme beleggavbinding seg imellom, som vist i *Figur 44*. D7U3 har en periodisk overflate som ser ut til å ha noe underruhet mellom og på ruhetstoppene, som vist i *Figur 29*. Flaten har allikevel vesentlig lavere avbinding enn D6U2. Dette kan tyde på at den lave belegglevetiden på D6U2 ikke skyldes periodisitet, men liten grad av underruhet. Det er mulig at en ikke periodisk overflate med tegn til noe underruhet gir bedre belegglevetid enn en glatt og periodisk overflate. Underruheten vil trolig gi noe større ruhetsfaktor i overflaten. Det kan også tenkes at underruheten vil kunne gi noe mekanisk forankring mellom substrat og belegg.

Begge de foreslåtte årsakene anses derimot som usikre. Flere tverrsnittbilder hadde trolig vært nødvendig for å fastslå hva som påvirket variasjonene. Videre testing anses derimot som nødvendig for å fastslå hvorfor beleggavbinding varierer mye på overflater med lav ruhet.

## 6. Konklusjon

Tre epoxy-mastic-belagte paralleller fra 14 forskjellige plandreide flatetyper ble syklisk testet i seks uker i henhold til ISO 20340. De 14 flatetypene ble maskinert til syv forskjellige ruheter, med og uten bruk av skjærevæske. Skjærevæsken var vann- og mineraloljebasert. Overflateruhet ble målt og beregnet med profilometer, IFM og tverrsnittbilder. XPS ble anvendt for å fastslå hvorvidt skjærevæske påvirker overflatekjemien til maskinerte overflater. Flatetypene ble sammenliknet opp mot hverandre etter syklisk testing. Dette for å fastslå effekten fra skjærevæske og overflateruhet på belegglevetid.

### Følgende kan konkluderes

→ Maskinering med skjærevæske har liten påvirkning på belegglevetid. Dette forutsetter at rester av skjærevæske har blitt fjernet fra overflaten før belegging.

→ Ruhetstopper som er høye ( $R_z > 300\mu\text{m}$ ), overhengende og tårnliknende gir et markant bidrag til belegglevetid. Slike toppler er ikke typiske ved maskinering. Belegglevetiden ved slike ruheter er tilsynelatende høyere enn tidligere testede, blåserensede overflater. Det er usikkert hvordan levetiden til belegget påvirkes av orientering av beleggs-kade / skår i forhold til maskineringsgroper.

- Høy belegglevetid i retninger normalt på ruhetstopper tilskrives hovedsakelig høy tortuositet. Den høye tortuositeten antas å redusere hastigheten av katodisk avbinding mellom substrat og belegg.
- Høy belegglevetid i retninger langs ruhetsgroper kommer trolig fra høy beleggheft. Det kan tenkes at beleggheften skyldes to mekanismer: økt bindingsareal fra ruhetstoppene og mekanisk forankring mellom ruhetstopper. Den mekaniske forankringen vil motvirke belegget fra å bevege seg i retninger langs overflaten. Det blir også foreslått at den mekaniske forankringen kan skyldes at fuktig og utvidende belegg presser mot veggene til de tårnliknende ruhetstoppene. Det kan tenkes at press fra utvidende belegg vil motvirke heften på belegg med en svakere helning. Dette skyldes at presskreftene dekomponeres til skjærkrefter langs substratet. Presset mot de tårnliknende ruhetsveggene vil trolig ikke dekomponeres til skjærkrefter. Slike toppler vil istedet kunne gi opphav til friksjonskrefter som motvirker vertikal bevegelse av belegget.

- Det er mulig at rester av skjærevæske ligger igjen langs gropene til slike overflater. Eventuelle rester av skjærevæske har ikke gitt utslag i flatenes belegglevetid etter seks uker. Det kan tenkes at effekten av rester av skjærevæske motvirkes av høy mekanisk forankring på disse flatene. Videre undersøkelse kreves for å fastslå om dette er tilfellet.

→ Ruhet har stor innvirkning på overflater med topper ( $\sim 10\mu\text{m} < R_z < \sim 70\mu\text{m}$ ) med fasonger som er typiske for maskinerte overflater. Belegglevetiden på slike flater synker merkbart med synkende ruhet. På disse flatene blir det antatt at belegglevetiden hovedsakelig kommer fra økt bindingsareal og tortuositet. Bindingsarealet øker belegghøyden. Tortuositeten senker hastigheten til katodisk avbinding i grenseflaten mellom substrat og belegg.

→ Belegglevetiden kan variere mye på overflater som har en særdeles lav ruhet ( $R_z < \sim 10\mu\text{m}$ ). Dette kan skyldes høy sensitivitet ovenfor små endringer i topografi. En annen årsak kan være at belegget blir sårbart ovenfor andre faktorer når bidraget fra ruheten er lavt. Disse forklaringene er derimot usikre. Videre testing kreves for å fastslå årsaken til variasjonene.

## ***6.1 Forslag til videre arbeid***

### **6.1.1 Skjærevæske og flater med høye, tårnliknende og overbøyende topper**

Effekten av skjærevæske på de rueste flatene D1, D2 og D3 ble ikke fastslått. Dette skyldes usikkerheter rundt XPS-målingen av DIM-prøven. Det kan være av interesse å undersøke hvordan flatene påvirkes av skjærevæske eller andre forurensinger. Dette kan blant annet gjøres ved å tilføre en oljefilm langs ruhetsgropene etter vasking, før belegging. Prøvene kan så syklisk testes for å undersøke effekten av denne oljefilmen. God motstand mot hefttap fra forurensinger i overflaten kan indikere stor effekt på heft fra mekanisk forankring.

### **6.1.2 Skårplassering og flater med høye, tårnliknende og overbøyende topper**

Det er noe usikkert hvordan Flate D1, D2 og D3 vil oppføre seg om skåret har en annen orientering i forhold til maskineringsgropene. Skåret kan for eksempel legges parallelt med materetningen. Dermed vil avbinding fra skåret treffe på flere ruhetsgroper enn ruhetstopper. Det kan tenkes at økt avbinding oppleves hvis toppenes tortuositet står for hovedbidraget på

disse flatene. Denne metoden kan trolig brukes til å videre undersøke effekten fra ruheten til D1, D2 og D3.



## 7. Referanser

1. Funke, W., *Organic Coatings in Corrosion Protection*, in *Surface Coatings—2*, A.D. Wilson, J.W. Nicholson, and H.J. Prosser, Editors. 1988, Springer Netherlands: Dordrecht. p. 107-135.
2. Awaja, F., et al., *Adhesion of polymers*. Progress in Polymer Science, 2009. **34**(9): p. 948-968.
3. Allen, K.W., “*At forty cometh understanding*”: *A review of some basics of adhesion over the past four decades*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2003. **23**(2): p. 87-93.
4. Marshall, S.J., et al., *A review of adhesion science*. Dental Materials, 2010. **26**(2): p. e11-e16.
5. Kinloch, A.J., *The science of adhesion*. Journal of Materials Science, 1980. **15**(9): p. 2141-2166.
6. Maile, F.J., T. Schauer, and C.D. Eisenbach, *Evaluation of the delamination of coatings with scanning reference electrode technique*. Progress in Organic Coatings, 2000. **38**(2): p. 117-120.
7. Jamali, S.S. 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**(12, Part B): p. 2091-2099.
8. Legghe, E., et al., *Correlation between water diffusion and adhesion loss: Study of an epoxy primer on steel*. Progress in Organic Coatings, 2009. **66**(3): p. 276-280.
9. Hansmann, H., *Application of acoustic emission analysis on adhesion and structural problems of organic and metallic coatings*. Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development, 1985. **24**(2): p. 252-257.
10. McKnight, M.E., et al., *Measuring Peel Adhesion of Coatings*. Journal of Protective Coatings and Linings, 1995. **12**: p. 82-89.
11. Rouw, A.C., *Model epoxy powder coatings and their adhesion to steel*. Progress in Organic Coatings, 1998. **34**(1-4): p. 181-192.
12. Shaw, G.S., C.E. Rogers, and J.H. Payer, *The Effect of Immersion on the Breaking Force and Failure Locus in an Epoxy/Mild Steel System*. The Journal of Adhesion, 1992. **38**(3-4): p. 255-268.
13. Negele, O. and W. Funke, *Internal stress and wet adhesion of organic coatings*. Progress in Organic Coatings, 1996. **28**(4): p. 285-289.
14. Knudsen, O.Ø., *Corrosion protection by organic coatings - Lecture notes TMM4205 - NTNU, 2015*. 2010.
15. Comyn, J., *Surface treatment and analysis for adhesive bonding*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1990. **10**(3): p. 161-165.
16. de la Fuente, D., J. Simancas, and M. Morcillo, *Effect of variable amounts of rust at the steel/paint interface on the behaviour of anticorrosive paint systems*. Progress in Organic Coatings, 2003. **46**(4): p. 241-249.
17. Lin, C., T. Nguyen, and M.E. McKnight, *Relation between AC impedance data and degradation of coated steel*. Progress in Organic Coatings, 1992. **20**(2): p. 169-186.
18. Momber, A.W. and W.D. Greverath, *Surface preparation standards for steel substrates - A critical review*. Journal of Protective Coatings and Linings, 2004. **21**(2): p. 48-52.
19. Oliveira, C.G. and M.G.S. Ferreira, *Ranking high-quality paint systems using EIS. Part II: defective coatings*. Corrosion Science, 2003. **45**(1): p. 139-147.
20. Stratmann, M., R. Feser, and A. Leng, *Corrosion protection by organic films*. Electrochimica Acta, 1994. **39**(8): p. 1207-1214.
21. Momber, A.W., P. Plagemann, and V. Stenzel, *Performance and integrity of protective coating systems for offshore wind power structures after three years under offshore site conditions*. Renewable Energy, 2015. **74**: p. 606-617.
22. Jorcin, J.-B., et al., *Delaminated areas beneath organic coating: A local electrochemical impedance approach*. Corrosion Science, 2006. **48**(7): p. 1779-1790.
23. 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.

24. Reed, C., *Underfilm Corrosion Creep and Cathodic Delamination: Under the Microscope*. Nace International 2014. **Paper No. 4271**.
25. Leidheiser, H., W. Wang, and L. Igetoft, *The mechanism for the cathodic delamination of organic coatings from a metal surface*. Progress in Organic Coatings, 1983. **11**(1): p. 19-40.
26. Bi, H. and J. Sykes, *Cathodic delamination of unpigmented and pigmented epoxy coatings from mild steel*. Progress in Organic Coatings, 2016. **90**: p. 114-125.
27. Leidheiser, H., *Solid-state chemistry as applied to cathodically driven or corrosion-induced delamination of organic coatings*. Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development, 1981. **20**(3): p. 547-551.
28. Stratmann, M., et al., *The scanning Kelvin probe; a new technique for the in situ analysis of the delamination of organic coatings*. Progress in Organic Coatings, 1996. **27**(1-4): p. 261-267.
29. Roy, D., et al., *Modification of thermoplastic coatings for improved cathodic disbondment performance on a steel substrate: a study on failure mechanisms*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2002. **22**(5): p. 395-403.
30. Leng, A., H. Streckel, and M. Stratmann, *The delamination of polymeric coatings from steel. Part 2: First stage of delamination, effect of type and concentration of cations on delamination, chemical analysis of the interface*. Corrosion Science, 1998. **41**(3): p. 579-597.
31. Kappes, M., G.S. Frankel, and N. Sridhar, *Adhesion and adhesion degradation of a pressure sensitive tape on carbon steel*. Progress in Organic Coatings, 2010. **69**(1): p. 57-62.
32. Nathalie LeBozec, C.H., Denis Melot *Comparison of accelerated ageing tests as per ISO 20340 Annex A and NACE SP0108 standards*. 2014.
33. Nazarov, A.P. and D. Thierry, *Mechanism of the corrosion exfoliation of a polymer coating from a carbon steel*. Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 2009. **45**(6): p. 735-745.
34. Reddy, B. and J.M. Sykes, *Degradation of organic coatings in a corrosive environment: a study by scanning Kelvin probe and scanning acoustic microscope*. Progress in Organic Coatings, 2005. **52**(4): p. 280-287.
35. Reddy, B., M.J. Doherty, and J.M. Sykes, *Breakdown of organic coatings in corrosive environments examined by scanning kelvin probe and scanning acoustic microscopy*. Electrochimica Acta, 2004. **49**(17-18): p. 2965-2972.
36. Zayed, A.M. and A.A. Sagues, *Corrosion at surface damage on an epoxy-coated reinforcing steel*. Corrosion Science, 1990. **30**(10): p. 1025-1044.
37. Standish, J.V., *Mechanisms associated with underfilm corrosion of painted cold rolled steel*. Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development, 1985. **24**(3): p. 357-361.
38. Kendig, M.W., S. Jeanjaquet, and J. Lumsden, *Electrochemical Impedance: Analysis and Interpretation*, ed. J. Scully, D. Silverman, and M. Kendig. 1993.
39. Hartvigsen, H., et al., *Verkstedhåndboka - Mekaniske fag*. 3 ed. 1994, Norway: Yrkesopplæring ans.
40. Astakhov, V.P., *Ecological Machining: Near-dry Machining*, in *Machining*. 2008, Springer London. p. 195-223.
41. Klocke, F., *Manufacturing Processes 1 - Cutting*. Chapter 6 - Cutting Fluids. 2011: Springer.
42. *Cutting Fluids*, in *Cutting Tool Technology: Industrial Handbook*. 2008, Springer London: London. p. 381-430.
43. Klocke, F., *Manufacturing Processes 1 - Cutting* Chapter 2 - Metrology and Workpiece Quality. 2011: Springer.
44. Petropoulos, G.P., C.N. Pandazaras, and J.P. Davim, *Surface Integrity in Machining*. Chapter 2: Surface Texture Characterization. 2010: Springer.
45. *Surface Roughness Measurement: Practical tips for laboratory and workshop*. 2009 [cited 2016 20. April]; Available from: [http://www.mitutoyo.com/wp-content/uploads/2012/11/1984\\_Surf\\_Roughness\\_PG.pdf](http://www.mitutoyo.com/wp-content/uploads/2012/11/1984_Surf_Roughness_PG.pdf).
46. Ward, D., *An Investigation Into The Effect Of Surface Profile On The Performance Of Coatings In Accelerated Corrosion Tests*. 2007, NACE International.





47. Bhushan, B., *Introduction to Tribology - Second Edition*. Chapter 2 - Solid Surface Characterization. 2013: John Wiley & Sons.
48. Seré, P.R., et al., *The surface condition effect on adhesion and corrosion resistance of carbon steel/chlorinated rubber/artificial sea water systems*. Corrosion Science, 1996. **38**(6): p. 853-866.
49. Marsh, J., J.D. Scantlebury, and S.B. Lyon, *The effect of surface/primer treatments on the performance of alkyd coated steel*. Corrosion Science, 2001. **43**(5): p. 829-852.
50. Geenen, F.M., *Characterisation of Organic Coatings with Impedance Measurements - A study of Coating Structure, Adhesion and Underfilm Corrosion - Chapter 8*, in *Mechanical Maritime and Materials Engineering*. 1991, Technische Universiteit Delft.
51. Dayss, E., G. Leps, and J. Meinhardt, *Surface modification for improved adhesion of a polymer-metal compound*. Surface and Coatings Technology, 1999. **116-119**: p. 986-990.
52. Guzanová, A., et al., *A study of the effect of surface pre-treatment on the adhesion of coatings*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2014. **28**(17): p. 1754-1771.
53. Jiang, H., et al., *Determination of epoxy coating wet-adhesive strength using a standardized ASTM/ISO scratch test*. Journal of Coatings Technology and Research, 2011. **8**(2): p. 255-263.
54. Nazir, M.H., Z.A. Khan, and K. Stokes, *Optimisation of interface roughness and coating thickness to maximise coating-substrate adhesion – a failure prediction and reliability assessment modelling*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2015. **29**(14): p. 1415-1445.
55. 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**: p. 32-41.
56. Kristoffersen, A., *Master's Thesis: Korrosjonsbeskyttelse av maskinerte ståloverflater*, in *Institutt for produktutvikling og materialer*. 2015, NTNU.
57. Votava, J., *Influence of roughness of machined surface on adhesion of anticorrosion system*. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis, 2013. **61**(6).
58. Spengler, E., I.C.P. Margarit, and O.R. Mattos, *On the relation between adherence of a paint film and corrosion protection*. Electrochimica Acta, 1993. **38**(14): p. 1999-2003.
59. Norway, S., *NORSOK M-501*, in *Surface preparation and protective coating - Edition 6*. 2012.
60. Hognestad, A., *Korrosjonsbeskyttelse av Maskinert Stål - TMM4511 Materialer, fordypningsprosjekt*. 2015: NTNU.
61. Funke, W., *Problems and progress in organic coatings science and technology*. Progress in Organic Coatings, 1997. **31**(1-2): p. 5-9.
62. Deflorian, F. and L. Fedrizzi, *Adhesion characterization of protective organic coatings by electrochemical impedance spectroscopy*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1999. **13**(5): p. 629-645.
63. 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**: p. 152-160.
64. Cognard, J., *Some recent progress in adhesion technology and science*. Comptes Rendus Chimie, 2006. **9**(1): p. 13-24.
65. O'Donoghue, M., V.J. Datta, and R. Spotten, *Angels and Demons in the Realm of Protective Coatings: The Underworld of VOCs*. Journal of Protective Coatings and Linings, 2011. **28**(4): p. 14-29.
66. van der Leeden, M.C. and G. Frens, *Surface Properties of Plastic Materials in Relation to Their Adhering Performance*. Advanced Engineering Materials, 2002. **4**(5): p. 280-289.
67. Roper, H.J., R.E. Weaver, and J.H. Brandon, *The Effect of Peak Count of Surface Roughness on Coating Performance*. Journal of Protective Coatings and Linings, 2005. **22**(6): p. 52-64.
68. McHattie, J.S., I.L. Perez, and J.A. Kehr, *Factors affecting cathodic disbondment of epoxy coatings for steel reinforcing bars*. Cement and Concrete Composites, 1996. **18**(2): p. 93-103.
69. *What is XPS?* [cited 2016 15. June]; Available from: <http://xpssimplified.com/whatisxps.php>.

70. *CasaXPS - XPS Spectra*. 2013 [cited 2016 20. June]; Available from: [http://www.casaxps.com/help\\_manual/manual\\_updates/xps\\_spectra.pdf](http://www.casaxps.com/help_manual/manual_updates/xps_spectra.pdf).
71. *What is XPS? - Spectroscopy*. [cited 2016 15. June]; Available from: <http://xpssimplified.com/whatisxps-spectroscopy.php>.
72. *What is XPS? The Photoemission Process*. [cited 2016 15. June]; Available from: <http://xpssimplified.com/whatisxps-photoemission.php>.
73. Coatings, T. *Transocean systems approved by Shell*. [cited 2016 23. June]; Available from: <http://www.transocean-coatings.com/en/newsitem/transocean-systems-approved-shell/>.
74. *XPS Simplified - Elements: Iron*. [cited 2016 15. June]; Available from: <http://xpssimplified.com/elements/iron.php>.
75. *XPS Simplified - Elements: Oxygen*. [cited 2016 15. June]; Available from: <http://xpssimplified.com/elements/oxygen.php>.
76. *XPS Simplified - Elements: Carbon*. [cited 2016 15. June]; Available from: <http://xpssimplified.com/elements/carbon.php>.
77. *XPS Simplified - Depth profiling*. [cited 2016 18. June]; Available from: [http://xpssimplified.com/depth\\_profiling.php](http://xpssimplified.com/depth_profiling.php).
78. Bebon-China. *DIN A ST 52 Steel Plate*. 2011 [cited 2016 22. June]; Available from: <http://www.bebonchina.com/steel/Steel-plate/DIN/A-St-52.html>.

# 8. Vedlegg

## Vedlegg A: Risikovurdering

NTNU	Kartlegging av risikofylt aktivitet			Utarbeidd av	Nummer	Dato
				HMS-ansv.	HMSHV2601	22.03.2011
HMS				Godkjent av		Erstatter
				Rektor		01.12.2006
						

Enhet: IPM

Linjeleder: Torgeir Welø

Deltakere ved kartleggingen : Ole Øystein Knudsen (hovedveileder), Catalina M. Hagen (medveileder), Asbjørn Hognestad (student)  
*(Ansv. veileder, student, evt. medveileder, evt. andre m. kompetanse)*

Kort beskrivelse av hovedaktivitet/hovedprosess: Masteroppgave Asbjørn Hognestad: Korrosjonsbeskyttelse av maskinert stål

Er oppgaven rent teoretisk? (J/ANNEI): NEI  
*«JA» betyr at veileder innestår for at oppgaven ikke inneholder noen aktiviteter som krever risikovurdering. Dersom «JA»: Beskriv kort aktiviteten i kartleggingskjemnet under. Risikovurdering trenger ikke å fylles ut.*

Signaturer: Ansvartlig veileder:  Student: 

ID nr.	Aktivitet/prosess	Ansvartlig	Ekisterende dokumentasjon	Ekisterende sikringstiltak	Lov, forskrift o.l.	Kommentar
1	Maling av prøver med to-komponents epoxy + rengjøring med tynner	Asbjørn Hognestad	Sikkerhetsdatablad for epoxybelegg og tynner	Haknmaske. Avtrekkskap. Arbeidstøy og hansker	Arbeidsmiljøloven	Av prøver til lysmikroskopi
2	Topografmaling med profilometer	Asbjørn Hognestad	Mitutoyo S-J-301 Manual		Arbeidsmiljøloven	
3	Sandblåsing av prøver	Asbjørn Hognestad		Hanskeboks	Arbeidsmiljøloven	
4	Kapping av prøver	Asbjørn Hognestad	Brukermanual for Discotom	Kappekammer. Kan ikke åpnes mens kutting foregår.	Arbeidsmiljøloven	Av prøver til lysmikroskopi
5	Baking av prøvestykker i resin	Asbjørn Hognestad	Sikkerhetsdatablad, Epoifix		Arbeidsmiljøloven	Av prøver til lysmikroskopi
6	Sliping og polering av prøver	Asbjørn Hognestad			Arbeidsmiljøloven	Av prøver til lysmikroskopi

Figur A.1: Risikovurdering, del 1

NTNU	Kartlegging av risikofylt aktivitet				Utlarbeidet av	Nummer	Dato	
					HMS-avd.	HMSRV2601	22.03.2011	
HMS					Godkjent av		Erstatter	
					Faktor		01.12.2006	

<b>7</b>	Lysmikroskopi	Asbjørn Hognestad	Brukermanual, lysmikroskop		Arbeidsmiljøloven	
<b>8</b>	Merking av prøver med pneumatisk rissepenn	Asbjørn Hognestad			Arbeidsmiljøloven	
<b>9</b>	Måling av malingsstykkelse	Asbjørn Hognestad	Brukermanual, Eicometer		Arbeidsmiljøloven	
<b>10</b>	Akselerert malingsforvritning, for testing av korrosjonskryp	Asbjørn Hognestad	ISO 9227 ISO 11507		Arbeidsmiljøloven	
<b>11</b>	Evaluering av korrosjonskryp	Asbjørn Hognestad			Arbeidsmiljøloven	Fjerning av løst belegg med skalpell
<b>12</b>	Slipping av prøver	Asbjørn Hognestad			Arbeidsmiljøloven	Avrunding av kanter og hjørner før maling
<b>13</b>	Vasking av prøver	Asbjørn Hognestad	Sikkerhetsdatablad for skurekrem og etanol 96%		Arbeidsmiljøloven	
<b>14</b>	3D overflatekarakterisering	Asbjørn Hognestad	Brukermanual, 3D mikroskop		Arbeidsmiljøloven	

Figur A.2: Risikovurdering, del 2

NTNU	Risikovurdering		Utarbeidet av	Nummer	Dato
			HMS-avd.	HMSFV2601	22.03.2011
HMS			Godkjent av		Erstatter
			Faktor		01.12.2006
					

Enhet: IPM

Dato: 20.06.2016

Linjeleder: Torgeir Welø

Deltakere ved kartleggingen : Ole Øystein Knudsen (hovedveileder), Catalina M. Hagen (medveileder), Asbjørn Hognestad (student)  
 (Ansv. veileder, student, evt. medveiledere, evt. andre n. kompetanse)

Kort beskrivelse av hovedaktivitet/hovedprosess: Masteroppgave Asbjørn Hognestad: Korrosjonsbeskyttelse av maskinert stål

Er oppgaven rent teoretisk? (JA/NEI): NEI  
 «JA» betyr at veileder innestår for at oppgaven ikke inneholder noen aktiviteter som krever risikovurdering. Dersom «JA»: Beskriv kort aktiviteten i kartleggingskjemaet under. Risikovurdering trenger ikke å fylles ut.

Signaturer: Ansv. ansvarlig veileder:



Student:



ID nr	Aktivitet fra kartleggings-skjemaet	Mulig uønsket hendelse/ belastning	Vurdering av sannsynlighet (1-5)	Vurdering av konsekvens:				Risiko-Verdi (menneske)	Kommentarer/status Forslag til tiltak
				Menneske (A-E)	Ytre miljø (A-E)	Øk/ materiell (A-E)	Om-dørme (A-E)		
1	Maling av prøver med to-komponents epoxy + regjoring med tynner	Eksposering på hud og øyne	1	B	A	A	-	B1	Grundig opplæring. Helsekennende klær brukes, med labfrakk over. Hansker og vernebriller brukes.
		Innhaling av gasser	1	B	A	A	-	B1	Halvmaske brukes. Maling og blanding forekommer i område med godt avtrekk.
		Brann	1	C	A	B	-	B1	Maling og blanding forekommer i område uten åpen ild. Søl tørkes opp grundig og kastes i brannfarlig avfall.
2	Topografimåling med profilometer	Skader på utstyr	1	A	A	B	-	A1	Grundig opplæring på utstyr.
3	Sandblåsing av prøver	Abrasiv skade på hud Øyenskade	1	B	A	A	-	B1	Grundig opplæring. Bruk vernebriller og labfrakk.


Figur A.3: Risikovurdering, del 3

NTNU	Utarbeidet av	Nummer	Dato	
	HMS-avdel	HMSRV/2601	22.03.2011	
HMS	Godkjent av	Erstatter	01.12.2006	

### Risikovurdering

4	Kapping av prøver	Kuttskader	1	B	A	A	-	B1	Sandblåsing foregår i hanskeromkammer. Kutting foregår i avlukket kammer. Maskinen starter ikke hvis kammeret er åpent. Grundig opplæring
		Skade på utstyr	1	A	A	B	-	A1	Grundlig opplæring. Sørg for å velge riktige maskinstillinger i henhold til prøvemateriale.
5	Baking av prøvestykker i resin	Innhalering av gasser. Eksponering på hud	2	A	A	A	-	A2	Verneruller, hansker og labfrakk brukes. Forekommer i avtrekkskap.
6	Sliping og polering av prøver	Slipeskader på hud	3	A	A	A	-	A3	Grundig opplæring. En godt innbakt prøve hindrer sjansen for slipeskader
7	Lysmikroskopi	Skade på utstyr	1	A	A	C	-	A1	Grundig opplæring på utstyr
		Klæmskade	1	A	A	C	-	A1	Grundig opplæring på utstyr
8	Merkning av prøver med pneumatisk rissepenn	Kuttskade	2	A	A	A	-	A2	Grundig opplæring på utstyr
9	Måling av malingsykkelse	Skade på utstyr	2	A	A	B	-	A2	Grundig opplæring på utstyr.
10	Akselerert malingsforvring, for testing av korrosjonskryp	Eksponering ovenfor UV	1	B	A	A	-	B1	Grundig opplæring på utstyr. Eksisterende sikringsstiltak
		Frigjort sattåke fra sattåkekammer	3	A	A	B	-	A3	Grundig opplæring på utstyr.
11	Evaluering av korrosjonskryp	Kuttskade ved evaluering	2	B	A	A	-	B2	Forsiktighet ved bruk av skalpell.
12	Sliping av prøver	Kuttskader	2	B	A	A	-	B3	Grundig opplæring på utstyr. Vernelemaske, støvmaske og arbeidshansker brukes
13	Vasking av prøver	Eksponering av JIF-blanding på øyne	2	A	A	A	-	A2	Verneruller brukes

Figur A.4: Risikovurdering, del 4

NTNU		Risikovurdering					Utarbeidet av		Nummer		Dato		
HMS							HMS-avd.		HMSHV2601		22.03.2011		
		Godkjent av				Erstatter				01.12.2006			
		Rektor											
<b>14</b>	3D	Skader på utstyr	2	A	A	B	-	A2	Grundlig opplæring på utstyr				
		Overflatekarakterisering											

Figur A.5: Risikovurdering, del 5

NTNU	Utarbeidet av	Nummer	Dato
	HMS-avd.	HMSRV2601	22.03.2011
HMS	Godkjent av		Erstatler
	Rektor		01.12.2006

## Risikovurdering



### Sannsynlighet vurderes etter følgende kriterier:

Svært liten 1	Liten 2	Middels 3	Stor 4	Svært stor 5
1 gang pr 50 år eller sjeldnere	1 gang pr 10 år eller sjeldnere	1 gang pr år eller sjeldnere	1 gang pr måned eller sjeldnere	Skjer ukentlig

### Konsekvens vurderes etter følgende kriterier:

Gradering	Menneske	Ytre miljø Vann, jord og luft	Øk/materiell	Omdømme
E Svært Alvorlig	Død	Svært langvarig og ikke reversibel skade	Drifts- eller aktivitetsstans > 1 år.	Troverdighet og respekt betydelig og varig svekket
D Alvorlig	Alvorlig personskade. Mulig uføret.	Langvarig skade. Lang restitusjonstid	Driftsstans > ½ år Aktivitetsstans i opp til 1 år	Troverdighet og respekt betydelig svekket
C Moderat	Alvorlig personskade.	Mindre skade og lang restitusjonstid	Drifts- eller aktivitetsstans < 1 mnd	Troverdighet og respekt svekket
B Liten	Skade som krever medisinsk behandling	Mindre skade og kort restitusjonstid	Drifts- eller aktivitetsstans < 1uke	Negativ påvirkning på troverdighet og respekt
A Svært liten	Skade som krever førstehjelp	Ubetydelig skade og kort restitusjonstid	Drifts- eller aktivitetsstans < 1dag	Liten påvirkning på troverdighet og respekt

### Risikoverdi = Sannsynlighet x Konsekvens

Beregn risikoverdi for Menneske. Enheten vurderer selv om de i tillegg vil beregne risikoverdi for Ytre miljø, Økonomi/materiell og Omdømme. I så fall beregnes disse hver for seg.

### Til kolonnen "Kommentarer/status, forslag til forebyggende og korrigerende tiltak":

Tiltak kan påvirke både sannsynlighet og konsekvens. Prioriter tiltak som kan forhindre at hendelsen inntreffer, dvs. sannsynlighetsreducerende tiltak foran skjerpet beredskap, dvs. konsekvensreducerende tiltak.

Figur A.6: Risikovurdering, del 6



NTNU		Risikomatrixe		utarbeidet av	Nummer	Dato	
				HMS-avd.	HMSRFV2604	08.03.2010	
HMS/KS				godkjent av		Erstatter	
				Rektor		09.02.2010	

### MATRISSE FOR RISIKOVURDERINGER ved NTNU

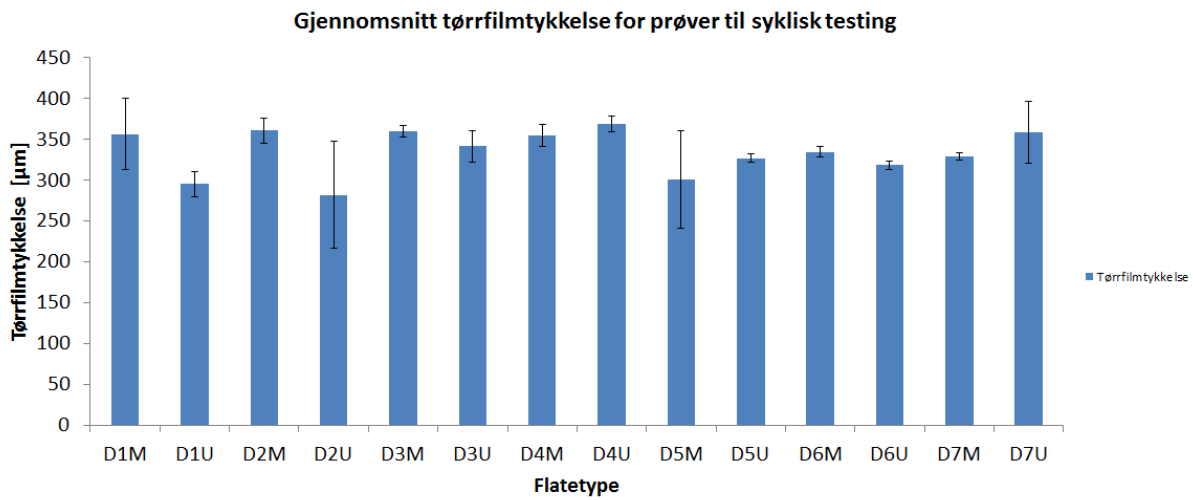
		<b>KONSEKVENNS</b>				
		Svært alvorlig	E1	E2	E3	E4
	Alvorlig	D1	D2	D3	D4	D5
	Moderat	C1	C2	C3	C4	C5
	Liten	B1	B2	B3	B4	B5
	Svært liten	A1	A2	A3	A4	A5
	Svært liten	Liten	Middels	Stor	Svært stor	
<b>SANNSYNLIGHET</b>						

Prinsipp over akseptkriterium. Forklaring av fargene som er brukt i risikomatrixen.

Farge	Beskrivelse
Rød	Uakseptabel risiko. Tiltak skal gjennomføres for å redusere risikoen.
Gul	Vurderingsområde. Tiltak skal vurderes.
Grønn	Akseptabel risiko. Tiltak kan vurderes ut fra andre hensyn.

Figur A.7: Risikovurdering, del 7

## Vedlegg B: Målt tørrfilmtykkelse



Figur B.1: Plottet tørrfilmtykkelse for hver flatetype av de syklisk testede prøvene. Hver flatetype har plottet gjennomsnittfilmtykkelse fra sine prøveparalleller. Gjennomsnittsverdiene er plottet med standardavvik.

## Vedlegg C: Innstillinger ved IFM-måling

Tabell C.1 inneholder innstillingene som ble anvendt ved måling av tortuositet og Wenzels ruhetsfaktor.

Parameter	Innstilling: Tortuositet	Innstilling: Wenzels ruhetsfaktor
Forstørrelse	10x	10x
Vertikal oppløsning [ $\mu\text{m}$ ]	Flate D1, D2, D3 $\rightarrow$ 2 Flate D4,D5,D6,D7 $\rightarrow$ $R_z/50$	Flate D1, D2, D3 $\rightarrow$ 2 Flate D4,D5,D6,D7 $\rightarrow$ $R_z/50$
Lateral oppløsning [ $\mu\text{m}$ ]	2,5	2,5
Linjebredde [ $\mu\text{m}$ ]	1,7626	-
Målebredde [mm]	-	1,4