

Mekaniske egenskaper til beleggsystemer for offshore vindturbin

Arya Priambodo Bastiko

Materialteknologi

Innlevert: Juni 2012

Hovedveileder: Ole Øystein Knudsen, IPM

Medveileder: Astrid Bjørgum, IPM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for produktutvikling og materialer

THE NORWEGIAN UNIVERSITY
OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF ENGINEERING DESIGN
AND MATERIALS

**MASTER THESIS SPRING 2012
FOR
STUD.TECHN. Arya Bastiko**

**Protective coatings for boat landings on offshore wind turbine towers
Beskyttende belegg for båtlanding på offshore vindturbintårn**

Problem

Due to the harsh environmental conditions offshore wind turbines need to be protected against corrosion and wear. The corrosion protection systems for substructures and towers include protective coating systems, and also cathodic protection in the submerged areas. Due to the limited accessibility and high costs for offshore coating maintenance, the coating systems should aim to be maintenance free for the designed lifetime of 20 years. In addition to long lifetime, low coat is a demand for the offshore wind industry.

When selecting corrosion protection for offshore wind parks experience from the offshore oil & gas industry can be used. The constant wetting by seawater and limited effect of cathodic protection makes the splash zone particularly challenging with respect to corrosion protection. Lifetimes above 20 years are expected both for 2-coat epoxy coating system (minimum 350 μm in dry film thickness) and very thick (> 1000 μm dry film thickness) coating system, e.g. glass flake reinforced epoxy or polyester in the splash zone. Experience shows that the lifetime of the three-layer coating systems recommended for corrosion protection of steel structures in the atmospheric zone, however, is typically less than 10 years, i.e. coating maintenance have to start after 8 - 10 years exposure. Offshore wind towers are often protected by duplex coatings consisting of metallized zinc and a 3-coat paint system. Experience from the Norwegian Road Authorities show that such coating systems on bridges in harsh coastal environments may have lifetime far above the demanded 20 years.

Objectives

Experience from offshore wind has shown that protective coating systems on boat landings are damaged after a few years in service. In addition to corrosion protection the boat landings needs scour protection. Primary objective is to investigate corrosion and wear properties of different protective coating systems. Coating systems known to have long lifetime in the splash zone will be included. Additionally, duplex coating systems will be included. For the latter, the effect of a reduced number of paint coats and/or reduced coating thickness on wear properties will be investigated. Samples will be produced in cooperation with the coating suppliers.


Reporting

The thesis should include the signed problem text, and be written as a research report with summary both in English and Norwegian, conclusion, literature references, table of contents, etc. During preparation of the text, the candidate should make efforts to create a well arranged and well written report. To ease the evaluation of the thesis, it is important to cross-reference text, tables and figures. For evaluation of the work a thorough discussion of results is appreciated.

Three weeks after start of the thesis work, an A3 sheet illustrating the work is to be handed in. A template for this presentation is available on the IPM's web site under the menu "Undervisning". This sheet should be updated when the Master's thesis is submitted.

The thesis shall be submitted electronically via DAIM, NTNU's system for Digital Archiving and Submission of Master's thesis.

The contact person is Ole Øystein Knudsen



Torgeir Welo
Head of Division



NTNU
Norges teknisk-
naturvitenskapelige universitet

Institutt for produktutvikling
og materialer



Ole Øystein Knudsen
Professor/Supervisor

SAMMENDRAG

De seneste årene er det oppdaget slitasjeskade på offshorvindturbinenes fortøyningsplass, hvor båter kommer inn til for på og avlastning av drift og vedlikeholdspersonell. Hensikten med denne oppgaven er å se på beleggenes egenskaper i forhold til slitasje og å få en forståelse av hvorfor slitasjeskade oppstår ved fortøyning mellom båt og vindturbin. Beleggene som er valgt ut til testing, er beleggsystemer som i dag brukes på offshorerelaterte strukturer, som oljeplattformer og vindturbiner

De mekaniske egenskapene til beleggene ble undersøkt ved hjelp av vickers mikrohardhetsmåler, ruhetsmåler, slitasjeapparat og strekkapparat.

- Polyester inneholder glasspartikler og fikk påvist høyest massetap, glasspartiklene kan ha falt av under slitasje og bidratt til skade på beleggoverflaten.
- I slitasjetesten ble det funnet at gummi heftet på beleggenes overflate. Den avsatte gummien kan derfor ha virket som et beskyttende lag.
- Det ble funnet at lang herdetid øker slitasjeegenskapene til belegget.
- For epoksybeleggene og varmforsinket stål var slagfastheten bedre enn for de andre beleggene, dette skyldes god heft mellom lagene.

Testene i denne oppgaven viser at det er ulike årsaker til at skade oppstår i belegg på grunn av fender. Det er funnet at glasspartikler, høy ruhet, dårlig heft mellom strøkene og kort herdetid kan ha vært årsaken til skade på belegg på grunn av fender.

Et Epoksy belegg er funnet til å være det som vil være best egnet til å brukes på fender- rør.

ABSTRACT

Experience from offshore wind has shown that protective coating systems on boat landings are damaged after a few years in service. Primary objective of this thesis was to investigate wear and mechanical properties of different protective coating systems that are used on offshore structures.

The mechanical properties have been tested by Vickers micro hardness indenter, surface roughness tester, wear test machine and tensile testing machine.

- For the epoxy coatings and hot dipped galvanized steel, the impact resistance was better than for the other coatings, this was due to good adhesion between the coating layers.
- Polyester contained glass particles and showed the highest mass loss. During the wear test, glass particles may have been a contribution to damaging the coating surface.
- It was discovered that the rubber was adhering to the surface of the coatings and thereby acting as a protective layer.
- It was discovered that a long curing time improved the wear properties of the coating.

Based on the different tests carried out in this assignment it is shown that there are several reasons for damage on the coating due to boat landings. It is discovered that glass particles, high roughness, bad adhesion between the coating layers and short curing time, can be the reason for damage on the coating due to boat landings.

An Epoxy coating is shown to be the most suitable for use on the fender tubes.

INNHALDSFORTEGNELSE

1	INTRODUKSJON	1
1.1	BAKGRUNN	1
1.2	MÅLSETTING	1
2	TEORI.....	2
2.1	SLITASJE	2
2.1.1	Tidligere arbeid.....	2
2.1.2	Effekt av harde partikler og bindemiddel på slitasje- egenskaper	3
2.1.3	Kommentarer	6
2.2	TESTMETODENE	8
2.2.1	VICKERS MICKROHARDHETSMÅLER	8
2.2.2	SKJÆRSPENNINGSTEST	9
2.2.3	SLAGFASTHETSTEST	10
2.2.4	TOPOGRAFI / RUHET.....	11
2.2.5	SLITASJETEST	14
3	EKSPERIMENTELT.....	17
3.1	BELEGGSYSTEM	17
3.2	VICKERS MIKROHARDHETSMÅLING	19
3.3	SLAGFASTHET	20
3.4	SKJÆRSPENNINGSTEST FOR HEFT.....	21
3.5	SLITASJETEST.....	23
3.6	TOPOGRAFI / RUHET	25
4	RESULTAT	26
4.1	VICKERSHARDHET.....	26
4.2	SLAGFASTHET	27

4.3	SKJÆRSPENNING	28
4.4	SLITASJE	31
4.5	TOPOGRAFI / RUHET	35
5	DISKUSJON.....	45
5.1	Bruddevaluering etter skjærspenningstest.....	45
5.2	Slagfasthet	46
5.3	Elastisitetsmodul	47
5.4	Slitasje	48
5.5	Overflateanalyse.....	50
5.6	Årsaken til skade i belegg på grunn av fendere	51
5.7	Valg av belegg for fendere	52
6	KONKLUSJON	53
7	VIDERE ARBEID	54
8	TAKK TIL	55
9	REFERANSE.....	56
A	APPENDIKS.....	i
A.1	Symbolliste	i
A.2	Hardhetsverdier	iii
A.3	Spenning og tøyningresultater	iv
A.4	Vekt av belegg	vi
A.5	Ruhetsverdier.....	viii
B	APPENDIKS.....	x
B.1	Plott av spenning mot tøyning	x
B.2	Plott av friksjonskoeffisient mot tid	xv
B.3	Fender- rør på vindturbin.....	xx

1 INTRODUKSJON

1.1 BAKGRUNN

De seneste årene er det oppdaget slitasjeskader på offshorevindturbiners fortøyningsplass, hvor båter kommer inntil for på og avlastning av drift og vedlikeholdspersonell, se Figur 1.1. Støt av fender mot belegg kan gi sprekke dannelse eller slitasjeskade på overflatebelegget. Fortøyningsplassen befinner seg også i plaskesonen noe som gjør området utsatt for korrosjon, hvis sprekker eller slitasje oppstår. Økt korrosjon vil kunne redusere levetiden til fender- rørene og øke driftskostnadene.



Figur 1.1: Bildet av båt ved vindturbinens fortøyningsplass.

1.2 MÅLSETTING

Målsettingen med denne oppgaven har vært å karakterisere beleggenes mekaniske egenskaper og få en forståelse av hvorfor slitasjeskade oppstår ved fortøyning mellom båt og fender- rør. Det har også vært et mål å finne det belegget, av de som er testet i denne oppgaven, som vil være best egnet til å bruke på fender – rørene.

Beleggene som er valgt ut til testing, er beleggsystemer som i dag brukes på offshorerelaterte strukturer, som oljeplattformer og vindturbiner [1, 2]. Det er foreløpig gjort lite forskning på dette området, og slikt arbeid er viktig for at vindmølleindustrien skal kunne få redusert driftskostnadene på sine vindturbiner.

2 TEORI

2.1 SLITASJE

Det er få slitasjerelaterte publikasjoner med de beleggsystemene som er testet i denne oppgaven. Hver beleggtypen har sin sammensetning, som er selve grunnlaget for de mekaniske egenskapene. Type bindemiddel, pigmentering og additiver bestemmer beleggets egenskaper. Det er derfor ikke sikkert beleggene som er undersøkt i denne oppgaven er lik de beleggene som er testet i de publikasjonene som er funnet, selv om mange av beleggene er av samme generiske type. Likevel har vi grunn til å anta at resultatene til en viss grad kan sammenlignes. Selv om det ikke er de samme produktene, er de utviklet med hensyn på de samme egenskapene.

2.1.1 Tidligere arbeid

Bjørgum m. fl. [3] har tidligere slitasjetestet beleggene som er brukt i denne oppgaven. Både pin- on- disc og Slagfasthetstest er utført, hvor slagkrefter og gjennomsnittlig friksjonskoeffisient i luft og i vann er funnet.

Tabell 2.1 viser beleggenes gjennomsnittlige friksjonskoeffisient, som er funnet i henholdsvis luft og vann ved romtemperatur og i vann ved 0 °C. Friksjonskoeffisienten viser en høyere verdi i luft enn i vann for de ulike beleggene. I vann ved romtemperatur og ved 0 °C, er friksjonskoeffisientene for beleggene tilnærmet like, men PU (polyuretan) skiller seg ut ved å ha en høyere gjennomsnittlig friksjonskoeffisient i vann ved 0 °C. PSO2 (polysiloksan) dannet sprekker på utsiden av slitasjebanen, i vann ved 0 °C. Dette kan skyldes økt indre spenning ved synkende temperatur [4].

Tabell 2.2 viser gjennomsnittlig slitasjedybde og bredde for beleggene i vann ved 0 °C etter bruk av pin- on- disk. PSO2 viste den minste slitasjedybden, mens Reinforced (glassflak polyester) fikk påvist størst slitasjedybde og bredde. Det store beleggtapet fra Reinforced skyldtes glasspartiklene belegget inneholdt.

Slagfasthet ble målt på beleggene, for å undersøke om de sprakk ned til substratmaterialet. Ingen av beleggene fikk påvist sprekker ned til substratmaterialet, men Epoxy1a og PSO2 viste noe tegn til sprekking ved slagkreftene 5 og 10 J.

Tabell 2.1: Gjennomsnittlig friksjonskoeffisient for beleggene i luft og i vann ved romtemperatur og i vann ved 0 °C, ved bruk av pin- on- disc [3].

Coating	Average friction coefficient		
	Air at RT	Water at RT	Water at 0°C
PU	0.50 ± 0.02	0.12 ± 0.01	0.22 ± 0.02
PSO 2	0.58 ± 0.02	0.16 ± 0.02	0.15 ± 0.01
Reinforced	0.48 ± 0.03	0.14 ± 0.02	0.16 ± 0.02
Epoxy 1a	0.41 ± 0.08	0.19 ± 0.01	0.18 ± 0.01

Tabell 2.2: Gjennomsnittlig slitasje dybde og bredde for beleggene i vann ved 0 °C, ved bruk av pin- on- disc [3].

Coating system	Wear track characterisation	
	Average depth (µm)	Average width (µm)
PU	17	450
PSO 2	5	475
Reinforced	35	1,050
Epoxy 1a	10	572

Knudsen m. fl. [5] utførte en strekktest på ulike beleggsystem for å finne strekkfastheten og fleksibiliteten til beleggene. Blant beleggene som er testet er belegget PSO2 (polysiloksan) som også blir brukt i denne oppgaven. PSO2 viste en strekkfasthet på 21 MPa og rundt 2,0 % i forlengelse.

2.1.2 Effekt av harde partikler og bindemiddel på slitasje- egenskaper

Tidligere er Epoksy, polyuretan og varmforsinket stål testet med ulike metoder. Beleggene blir ofte tilsatt ulike mengder partikler eller bindemidler, for å undersøke slitasjemotstanden. Hardhetstest, ruhetstest, Slagfasthetstest og friksjonstest ble utført i de samtlige publikasjonene.

Epoksy er en type organisk belegg som har god resistans mot korrosjon og kjemikalier. Belegget har en lav volum reduksjon ved herding og gir god adhesjon til ulike substrater. Epoksy har en høy styrke og gode egenskaper for overflatebeskyttelse i forhold til mange andre beleggtypene [6, 7].

Tilsats av nanopartikler i epoksy ble undersøkt for å se om beleggene fikk forbedrede slitasegenskaper [8-15]. Veena m. fl. [13] utførte slitasetesting med SiO₂ partikler i epoksy, hvor slitasjemotstanden økte med økende SiO₂- konsentrasjon. Bruddforlengelsen minket ved å tilføre mer enn 10 % av SiO₂ partikler i epoksy, som skyldtes endring i elastisitet og plastisitet, selv om slitasjemotstanden økte.

Xing og Li [15] undersøkte om partikkelstørrelsen hadde en betydning på slitasegenskapene i epoksy og fant ut at de minste partiklene gav best slitasjemotstand.

McCook m. fl. [16] slitasetestet epoksy blandet med PTFE(teflon) og oppdaget en reduksjon i både friksjonskoeffisient og slitasjerate ved økende PTFE- konsentrasjon. Friksjonskoeffisienten minket fordi PTFE dannet en tynn film på overflaten av belegget.

Ramezanzadeh m fl. [17] slitasetestet epoksy blandet med polysiloksan og oppdaget en økning i Vickershardhet og duktilitet ved økende polysiloksankonsentrasjon.

Polyuretan(PU) blir ofte brukt i toppstrøk, har gode korrosjonsbeskyttende egenskaper og er motstandsdyktig mot UV- stråling. PU har gode tribologiske egenskaper med høy ripe og slitasjemotstand, men har også liten resistans mot høye temperaturer, hvor det er observert store slitaseskader på belegget i luft [18, 19]. Beleggtykkelsen, aldring og hva slags type substrat PU blir påført på er andre faktorer, som kan endre beleggets slitasjemotstand.

Mosleh m.fl. [20] undersøkte to ulike PU- belegg ved slitasje, hvor begge hadde ulike beleggtykkelser. Det ble oppdaget at friksjonskoeffisienten først minket for så å øke igjen med økende beleggtykkelse. Den laveste friksjonskoeffisienten på 0,04 ble funnet med en beleggtykkelse på 0,2 µm.

Krupicka m. fl. [21] slitasetestet PU blandet med polyester og oppdaget at beleggene ble mer motstandsdyktig mot slitasje ved økende aldring. Både macro og micro- ripetest ble utført på beleggene hvor minkende friksjonskoeffisient og inntrykksdybde ble funnet ved økende aldring. Strekkfastheten og bruddgrensen sank ved aldring og det ble også observert at belegget ble hardere ved aldring. Young' s elastisitetsmodul endret seg derimot ikke med økende aldring.

På samme måte som for epoksy ble det blandet ulike polymere eller partikler i PU for å se om dette hadde en påvirkning på slitasje egenskapene [18, 19, 22-24]. Zhao m. fl. [18] slitasjetestet PU blandet med karbonfibre og fant ut at friksjonskoeffisienten minket på grunn av karbonfiberenes høye styrke og elastiske egenskaper. Selv med en høy kraft, ved slitasje ble det ikke observert avflaking. Sammenlignet med ren PU viste blandingen med karbonfibre en lavere verdi i friksjon og slitasjerate.

Zhao m. fl. [23] slitasjetestet også PU blandet med talkum, som er et mineral av typen hydrat magnesiumsilikat. Slitasjemotstanden økte med økende innhold av talkum, men kun til en viss grad. Et innhold av talkum over 9 % gav en ikke homogen blanding mellom talkum og PU, som ved slitasje dannet sprekker i belegget. Strekkfastheten sank også i verdi på grunn av dårlig kontakt og interaksjoner mellom talkum og PU.

Tian og Huang [24] slitasjetestet PU blandet med PTFE, hvor de fant ut at det fantes en maksimumsgrense på hvor mye PTFE innhold blandingen kunne ta opp og en maksimumsgrense på tykkelse før slitasjelevetiden minket. Slitasjelevetiden startet å minke med en beleggtykkelse på rundt 60 μm med 40 % i volumkonsentrasjon av PTFE. Belegget sviktet da konsentrasjonen av PTFE oversteg 60 %. Beleggene ble undersøkt i SEM (Scanning Electron Microscope), hvor det ble oppdaget at bindemiddelet PU ikke hadde muligheten til å feste seg til hver enkelt PTFE partikkel når konsentrasjonen oversteg 60 % PTFE. Dette resulterte i et lett deformerbart og lite slitasjebestandig belegg. Det ble også observert at tykkelsen hadde en betydning på slitasje motstanden, hvor en økning i tykkelse opp til 60 μm gav økt slitasjelevetid.

Zhou m. fl. [22] slitasjetestet PU blandet med SiO_2 og oppdaget en lik trend som Venna m. fl. [13] oppdaget med tilføring av SiO_2 partikler i epoksy. Ved begge tilfellene ble slitasjeegenskapene bedret ved økende partikkelkonsentrasjonen. Zhou m. fl. [22] oppdaget at en økende partikkelkonsentrasjon i PU, gav økt plastisitet som igjen gav økt slitasjemotstand. Det ble også oppdaget en økende hardhet lengre inn i belegget, som skyldes en økende partikkelkonsentrasjon desto lengre ned i belegget inntrykkslegemet trykkes ned.

Varmforsinket stål har gode korrosjonsegenskaper. Den blir ofte utsatt for store deformasjoner ved produksjon, noe som gjør at sinken må være formbar og ha høy duktilitet. Sinkbelegget danner også en intermetallisk fase mot substratmaterialen som dermed gir god metallurgisk binding og heft til stålet [25].

Carlsson m. fl. [26] slitasjetestet varmforsinket stål, PU og polyester. Det ble funnet en større friksjonskoeffisient på varmforsinket stål i forhold til de andre beleggene. Varmforsinket stål hadde en friksjonskoeffisient på 0,39 ved slitasjetesting, som videre økte opp til 0,50 etter en viss slitasjetid. De andre beleggene hadde en friksjonskoeffisient på 0,34. Varmforsinket stål hadde også den største endringen i overflateruhet. Beleggene ble undersøkt i SEM, hvor det ble oppdaget deformasjoner på overflaten av det varmforsinkede stålet. Det ble konkludert med at organisk belegg ble anbefalt å bruke fremfor varmforsinket stål, hvis slitasje var tilstede. Det organiske belegg senket friksjonskoeffisienten, hadde stor slitasjemotstand og viste god adhesjon mellom substratmaterial og belegg.

2.1.3 Kommentarer

Mange av de beleggtypene som er introdusert i dette kapitlet inneholdt partikler eller andre typer stoffer som det er usikkert om også befinner seg i de beleggene som er testet i denne oppgaven. Grunnen til at man ikke vet sikkert, er at produsenten hemmeligholder beleggens innhold. Produsenten har kun oppgitt beleggets bindemiddel og eventuelle store partikler som er tilsatt, som for eksempel glasspartikler. Generelt blir et belegg tilsatt ulike partikler eller stoffer for å øke opasitet og for å styrke beleggets korrosjonsmotstand, eller andre egenskaper. Et eksempel er TiO_2 som ofte blir tilsatt i belegget for å øke opasiteten og slitasjemotstanden. Beleggene som er testet i denne oppgaven kan dermed inneholde noen av de samme partiklene og stoffene som er omtalt i de ulike publikasjonene, men det er vanskelig å avgjøre hvilke. Beleggtypene som er introdusert i dette kapitlet er tatt med for å kunne se hva forskermiljøet har oppdaget med de samme bindemidlene jeg opererer med og med dette komme med relevante sammenligninger.

Knudsen m. fl. [5] strekktestet ulike beleggtypene og fant beleggets fleksibilitet. Det samme gjorde Krupicka m. fl. [21] med to ulike PU belegg, hvor det i tillegg ble sett på beleggets oppførsel ved aldring. Det ble påvist at beleggene fikk en synkende strekkfasthet og bruddforlengelse ved aldring, men at Young's elastisitets modul forble upåvirket. Man kan anta at verdiene for PSO₂, som Knudsen m. fl. [5] testet vil endre seg med tiden, noe som gjør at strekkfastheten på 21 MPa og forlengelsen på 1.3-2.0 % ikke vil være konstant. Elastisitetsmodulen vil derimot forbli konstant.

Mosleh m. fl. [20] undersøkte om filmtykkelsen på PU hadde en betydning på slitasje og fant ut at friksjonskoeffisienten økte med økende beleggtykkelse. Beleggene var testet hadde en tykkelse på 0 til 1 µm, mens de beleggene som er testet i denne oppgaven er mellom 250 til 1000 µm tykke, for å kunne beskytte substratmaterialer for korrosjon i over 30 år. Det er ikke blitt sett på effekten av slitasje i dette tykkelsesområdet, slik at det ikke kan antas at disse beleggene vil få økt friksjonskoeffisient på grunn av tykkelsen. Det kan antas at friksjonskoeffisienten flater ut etter en viss tykkelse og vil forbli konstant på grunn av lite bidrag fra substratmaterialet.

Disse undersøkelsene sett under ett viser følgende trender:

- Tilsats av partikler i belegget øker slitasjemotstanden.
- Tilsats av bindemidler gir en økende slitasjemotstand og synkende friksjonskoeffisient.
- PTFE dannet en tynn film på overflaten av belegget, dette senker friksjonskoeffisienten og slitasjeraten.

2.2 TESTMETODENE

2.2.1 VICKERS MICKROHARDHETSMÅLER

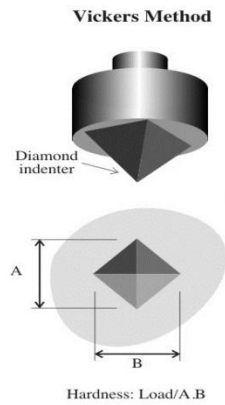
Ved mikrohardhetsmåling vil et inntrykkslegeme med en gitt vekt bli trykke ned mot materialet som undersøkes. Inntrykkslegemet består av diamant, er formet som en pyramide og har en vinkel på 136 ° i diagonalen, se Figur 2.1. Inntrykket som dannes blir observert i et mikroskop som er festet på apparatet hvor diagonalene blir målt. Testing er utført i henhold til standardisert test ISO 14705: 2008, ”*Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) -- Test method for hardness of monolithic ceramics at room temperature*” [27].

Vickers hardhet kan regnes ut ved hjelp av ligning 2.1.

$$HV = \frac{F}{A} \approx 2F \frac{\sin\left(\frac{136}{2}\right)}{gd^2} = 0.184 \frac{F}{d^2} \quad (2.1)$$

Hvor HV er vickers hardhet gitt i N/mm², F er kraft i N, A er kontaktarealet i mm², g er tyngdeakselerasjonen i m/s² og d er gjennomsnittsverdien til de to diagonalene i mm.

Mikrohardhetsmåleren har et smalere inntrykkslegeme enn en vanlig Vickers hardhetsmåler slik at måleren kan måle hardhet på små områder. Dette er nyttig i materialer som har flere faser, slik som metaller. Mikrohardhetsmåleren har en vektskala som går helt ned til 0,01 N, noe som gjør den godt egnet til å utføre hardhetsmålinger på materialer med lav hardhet.



Figur 2.1: Inntrykkslegemet på mikrohardhetsmåleren. Hvor A og B er diagonalene.

2.2.2 SKJÆRSPENNINGSTEST

Ved en skjærspenningstest blir to prøver som er limt sammen dratt fra hverandre ved en gitt hastighet. Testene er utført i henhold til standardisert test ASTM D1002-10 (2010) ”Standard test method for apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading (Metal-to-metal)” [28].

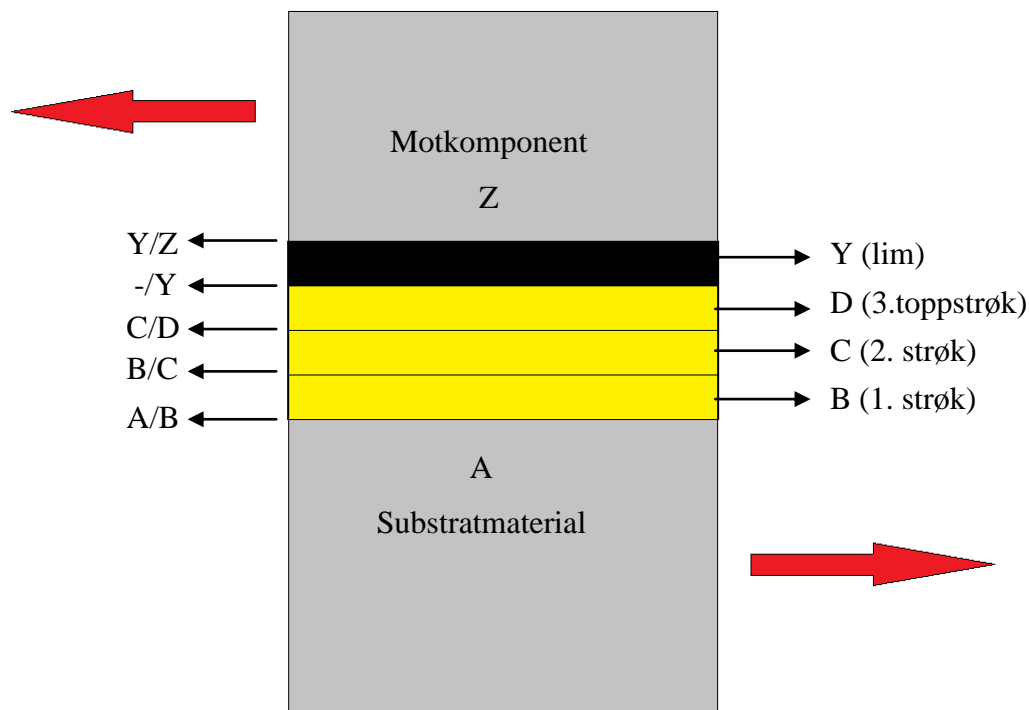
Kraft og tøyingsverdier blir lagret underveis og ved hjelp av verdiene kan skjærmodulen regnes ut ved bruk av ligning 2.2.

$$G = \frac{\sigma_G}{\varepsilon} = \frac{F / A}{\Delta L / L_0} \quad (2.2)$$

Hvor G er skjærmodulen gitt i MPa, σ_G er skjærspenning i MPa, ε er tøyning, F er kraft i N, A er arealet av det sammenlimte området i mm², ΔL er forlengelsen i mm og L_0 er den opprinnelige lengden i mm.

Etter skjærspenningstesten blir prøvene evaluert i henhold til standard ISO 4624 (2002), ”Paints and varnishes -- Pull-off test for adhesion” [27]. Bruddet blir evaluert i forhold til områdets størrelse og bruddtype.

A er prosentandel av kohesivt brudd i substratmaterialet, A/B er prosentandel av brudd mellom substratmaterialet og belegg, B er prosentandel kohesivt brudd i første malingslag, B/C er prosentandel brudd mellom første malingslag og andre malingslag. Slik fortsetter det i forhold til antall malingslag belegget har. -/Y er prosentandel brudd mellom limet og det øverste overflatebelegget, og Y/Z er prosentandel brudd mellom lim og mot komponent, se Figur 2.2.



Figur 2.2: Illustrasjon over prøvens tverrsnitt ved en skjærspenningstest, hvor prøven blir evaluert i forhold til bruddtype vist med ulike bokstaver. Bruddene oppstår enten ved kohesivt brudd eller mellom lagene.

2.2.3 SLAGFASTHETSTEST

En Slagfasthetstest blir utført ved å slippe en vekt ned på en prøve. Det benyttes et apparat som har en vekt som kan justeres i ulike høyder. Vekten blir sluppet ned på prøven og det blir observert om sprekk dannes. En likestrøms detektor brukes for å undersøke om sprekkdannelse har oppstått ned til substratmaterialet. Likestrøms detektor utsetter prøven for likestrøm via en probe som føres over slagområdet. Prøven er festet til jording som igjen er i kontakt med likestrøms detektor. Ved en eventuell sprekkdannelse vil strøm føres ned til substratmaterialet og et signal vil bli avgitt fra detektoren.

Testene er utført i henhold til standardisert test ISO 6272-1(2011) ”*Paints and varnishes. Rapid deformation(impact resistance) tests Part 1: Falling weight test, large area indenter*” [29].

Den kinetiske energien vekten har når den treffer prøven tilsvarer den potensielle energien vekten har før den slippes, og kan finnes ved hjelp av ligning 2.3.

$$E_p = mgh \quad (2.3)$$

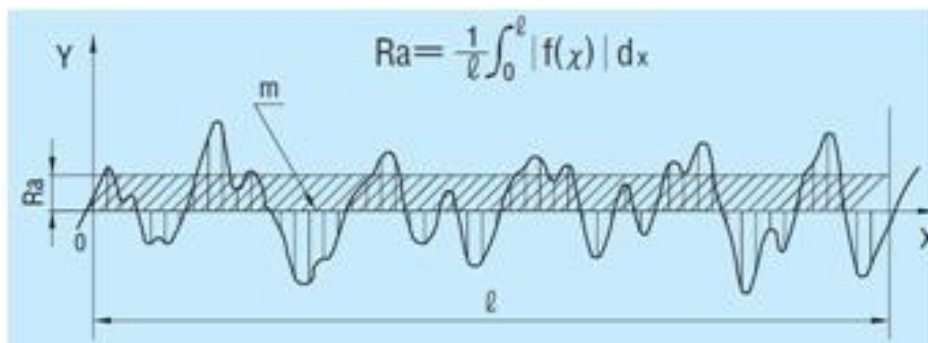
Hvor E_p er potensiell energi gitt i J, m er massen i kg, g er tyngdeakselerasjonen i m/s^2 og h er høyden i m.

2.2.4 TOPOGRAFI / RUHET

Overflateruhet beskrives ved parameterne R_a og R_z og kan finnes ved bruk av en ruhetsmåler. R_a beskriver den gjennomsnittlige ruheten over et gitt plan, og R_z beskriver den gjennomsnittlige sammenhengen i ruhet mellom de fem høyeste toppene og de fem laveste bunnene over et gitt plan. Ruhetsmåleren har en nål som føres over et gitt plan og lagrer topografiske verdier. Ved bruk av verdiene blir ligningene 2.4 og 2.5 nedenfor brukt til å finne parameterne R_a og R_z .

Testen er utført i henhold til standardisert test ISO 8503-4 (2012), ”*Preparation of steel substrates before application of paints and related products -- Surface roughness characteristics of blast-cleaned steel substrates -- Part 2: Method for the grading of surface profile of abrasive blast-cleaned steel -- Comparator pro*” [30].

Gjennomsnittlig ruhet over beleggets plan kan regnes ut ved hjelp av ligning 2.4, hvor Figur 2.3 illustrerer Ra verdien.

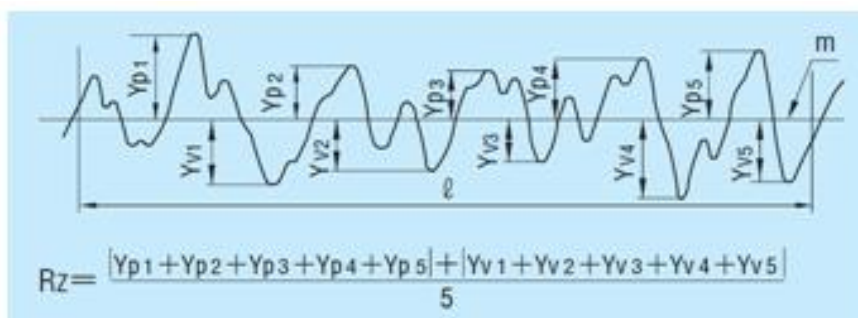


Figur 2.3: Topografiske verdier over ett gitt plan, hvor det skraverte området illustrerer Ra verdien.

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |Z| dx \quad (2.4)$$

Hvor Ra gjennomsnittlig ruhet over et gitt plan, L er prøvens lengde i mm, $|Z|$ er avstanden mellom middellinjen og er den absolutte høyden i mm,

En gjennomsnittlig sammenheng i ruhet mellom de fem høyeste toppene og de fem laveste bunnene i prøvens lengde, finnes ved hjelp av ligning 2.5 og illustrert i Figur 2.4.



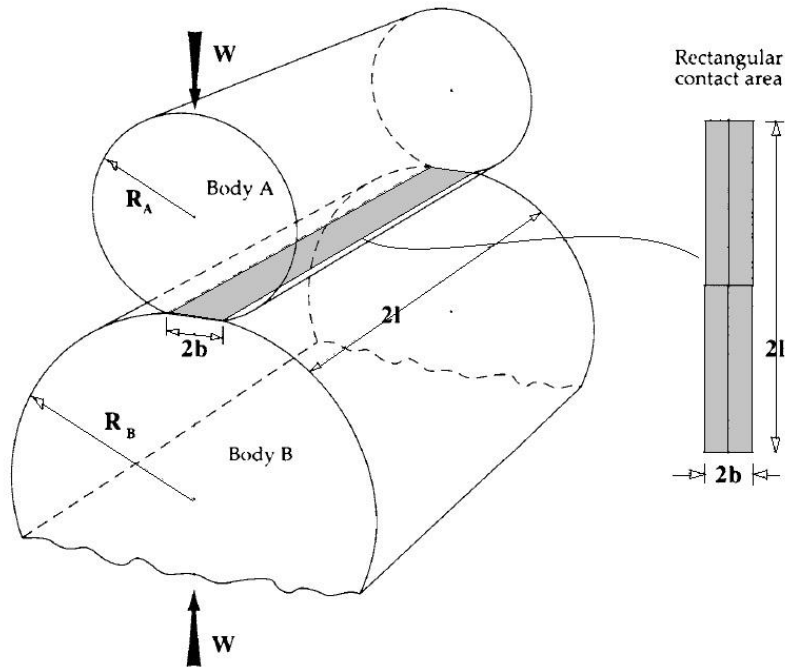
Figur 2.4: Topografiske verdier over ett gitt plan, hvor Yp viser avstand til toppunkt og Yv viser avstanden til bunnpunkt og ved hjelp av disse verdiene finne Rz.

$$R_z = \frac{Y_{p_1} + \dots + Y_{p_5} + Y_{v_1} + \dots + Y_{v_5}}{5} \quad (2.5)$$

Hvor R_z er gjennomsnittlig sammenheng i ruhet mellom de fem høyeste toppene og de fem laveste bunnene over et gitt plan, Y_p er avstanden mellom det høyeste toppunkt og midtlinjen i mm og Y_v er avstanden mellom det lavest punktet og midtlinjen i mm,

2.2.5 SLITASJETEST

En slitasjetest utføres ved at to komponenter påtrykkes en gitt kraft mens ene komponenten dras vekselvis mot den andre komponenten. Sylinder mot sylinder er geometrien som er valgt i denne sammenheng, se Figur 2.5 [31].



Figur 2.5: Geometrisk kontakt mellom to parallelle sylindre [31].

Hertz ligninger brukes for å finne det gjennomsnittlige kontaktrykket og den høyeste skjærspenningen som oppstår mellom komponentene, vist i ligning 2.6-2.10 [31].

Den reduserte Young's modul mellom de to komponentene kan finnes ved hjelp av ligning 2.6.

$$\frac{1}{E'} = \frac{1}{2} \left(\frac{1-\nu_A^2}{E_A} + \frac{1-\nu_B^2}{E_B} \right) \quad (2.6)$$

Hvor E' er den reduserte Young's modul for komponent A og B gitt i MPa, E_A og E_B er Young's modul for komponent A og B i MPa og ν_A og ν_B er Poissons tall for komponent A og B.

Den reduserte krumningsradiusen mellom de to komponentene finnes ved hjelp av ligning 2.7.

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} \quad (2.7)$$

Hvor R' er den reduserte krumningsradiusen gitt i mm, R_A og R_B er krumningsradiusen for komponent A og B i mm.

Halvparten av kontaktflatens bredde finnes ved hjelp av ligning 2.8.

$$b = \left(\frac{4WR'}{\pi IE'} \right)^{1/2} \quad (2.8)$$

Hvor b er halvparten av kontaktflatens bredde gitt i mm, W er kraften i N, R' er radiusen av sylindere i mm og I er den halve lengden av kontaktflaten i mm, se Figur 2.5.

Det maksimale kontakttrykket mellom komponent A og B finnes ved hjelp av likning 9.

$$P_{\max} = \frac{W}{\pi b I} \quad (2.9)$$

P_{\max} er maksimalt kontakttrykket mellom komponentene gitt i MPa, W kraften i N, I er halvparten av kontaktflatens lengde i mm og b er halvparten av kontaktflatens bredde i mm.

Gjennomsnittlig kontaktrykk mellom komponentene kan finnes ved hjelp av ligning 2.10.

$$P_{\text{gjennomsnitt}} = \frac{W}{4bl} \quad (2.10)$$

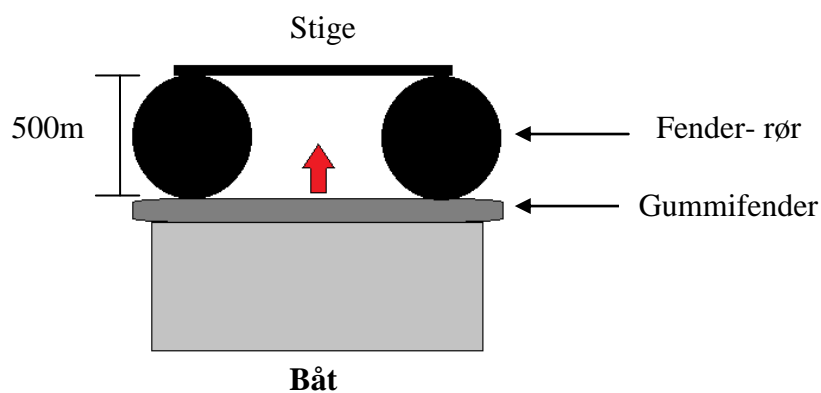
Hvor $P_{\text{gjennomsnitt}}$ er gjennomsnittlig kontaktrykk mellom komponentene gitt i MPa, W er kraften i N, l er halvparten av kontaktflatens lengde i mm og b er halvparten av kontaktflatens bredde i mm.

En relasjon mellom Youngs elastisitets modul og skjærmodul kan finnes ved hjelp av likning 11 [32].

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.11)$$

Hvor G er skjærmodulen gitt i MPa, E er Youngs elastisitets modul i MPa og ν er Poissons tall.

Figur 2.6 viser en illustrasjon over fortøyning mellom båt og fender- rør på vindturbin sett ovenfra. Fender- rør har en typisk diameter på 500 mm og båtens propulsjonskraft er typisk 100000 N, refererer til UMOE Mandal A/S.



Figur 2.6: Fortøyning mellom båt og vindturbin sett ovenfra. Fender- rørets diameter og en rød pil som viser båtens kraftretning er vist på figuren.

3 EKSPERIMENTELT

3.1 BELEGGSYSTEM

Alle beleggene er spraymalt på sandblåste stålplater med dimensjon 100x150x3 mm, se Tabell 3.1 og Tabell 3.2. Beleggene i gruppe A har hatt en herdningstid på 3 år, mens beleggene i gruppe B har hatt en herdningstid på 3 måneder. Gjennomsnittstykkelsen (DFT) på beleggene er funnet ved hjelp av en tykkelsesmåler. DFT står for Dry Film Thickness, og er tykkelsen på belegget ved tørr tilstand. Epoksy1a og Epoksy1b har likt overflatebelegg men ulik herdningstid. Tabell 3.3 viser en oversikt over gruppe C, med gummitype og tykkelse, brukt som motkomponent i slitasetest og tilsvarer gummifenderen båten har ved kontakt med belegg.

Tabell 3.1: Oversikt over gruppe A, med beleggssystemer og beleggtykkelser(DFT).

Gruppe A	Belegg-systemer	Belegg 1		Belegg 2		Belegg 3		Total DFT [µm]	
		Belegg nr.	Type	DFT [µm]	Type	DFT [µm]	Type		DFT [µm]
	PU	1	Epoksy sinkrik primer	60	Epoksy mellomstrøk	200	Polyuretan toppstrøk	50	310
	PSO1	2	Epoksy sinkrik primer	100	Polysiloksan toppstrøk	250			350
	PSO2	3	Epoksy sinkrik primer	75	Modifisert epoksy	130	Polysiloksan toppstrøk	75	280
	Epoxy1a	4	Epoksy Alu primer	100	Overflate tolerant epoksi mastic	350			450
	HDG	5	Varmforsinket	200					200
	HDG_pulver	6	Varmforsinket	200	Pulverlakk	100			300
	Reinforced	7	Glassflak polyester	752	Glassflak polyester	750			1500

Tabell 3.2: Oversikt over gruppe B, med beleggsystemer og beleggtykkelser(DFT).

Gruppe B		Belegg 1		Belegg 2		Belegg 3		Total DFT [μm]
Belegg-systemer	Belegg nr.	Type	DFT [μm]	Type	DFT [μm]	Type	DFT [μm]	
Epoxy1b	8	Overflate tolerant epoksy mastic	250	Overflate tolerant epoksy mastic	250			500
Epoxy2	9	Epoksy glassflak rød	250	Epoksy glassflak	250			500

Tabell 3.3: Oversikt over gruppe C, med gummitype og tykkelse (DFT), brukt som motkomponent i slitasjetest og tilsvarer gummifenderen båten har ved kontakt med belegg.

Gruppe C		Belegg 1		Belegg 2		Belegg 3		Total DFT [μm]
Beleggsystemer	Belegg nr.	Type	DFT [μm]	Type	DFT [μm]	Type	DFT [μm]	
Gummi	10	Vulkanisert neoprene gummi						4500

3.2 VICKERS MIKROHARDHETSMÅLING

Vickers mikrohardhetstest ble utført i henhold til standard ISO 14705: 2008, ”*Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) -- Test method for hardness of monolithic ceramics at room temperature*” [33]. Hardhetsmåling med ulike tyngder ble først utført på beleggene, for å undersøke hvilken kraft som kunne brukes uten at substratmaterialet eller underliggende malingslag hadde en innvirkning på hardhetsverdiene. Den valgte tyngden ble deretter brukt videre i forsøket. Diagonallengden av inntrykket ble målt ved bruk av et mikroskop som var festet på apparatet. Hardhetsverdier ble regnet ut ved hjelp av ligning 2.1.

Figur 3.1 viser mikrohardhetsmåleren som ble brukt under hardhetstesting.



Figur 3.1: Mikrohardhetsmåler og prøve, med et mikroskop festet på apparatet for å kunne måle inntrykkets diagonaler.

3.3 SLAGFASTHET

Slagfasthet ble målt i henhold til standard ISO 6272-1(2011) ”*Paints and varnishes. Rapid deformation(impact resistance) tests Part 1: Falling weight test, large area indenter*” [33].

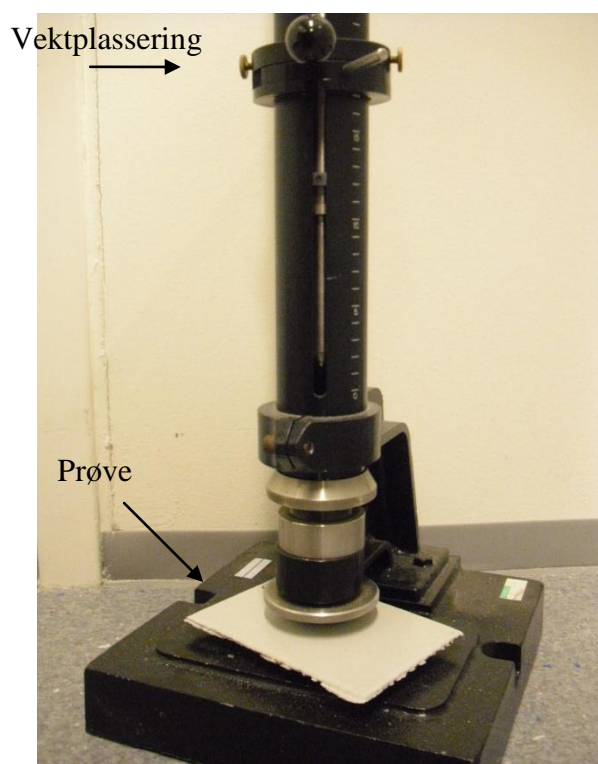
Fallhøyden på vekten ble justert på testapparatet i forhold til ønsket energi, regnet ut ved hjelp av ligning 2.3. Prøvene ble deretter utsatt for slag og undersøkt for sprekkdannelse ned til stålplaten ved hjelp av en likestrøms detektor, Elcometer 266. Fire slag ble utført på hver prøve, hvor hvert inntrykk hadde en avstand på minst 40 mm fra hverandre og minst 20 mm fra kanten av prøven.

Høyden på vekten ble økt etter hvert slag, til sprekkdannelse ble observert ned til stålet.

Slagapparatet kunne oppnå en maksimal potensiell energi på 19 J.

HDG er elektrisk ledene slik at sprekkundersøkelse med Elecometer 266 ikke var mulig å utføre.

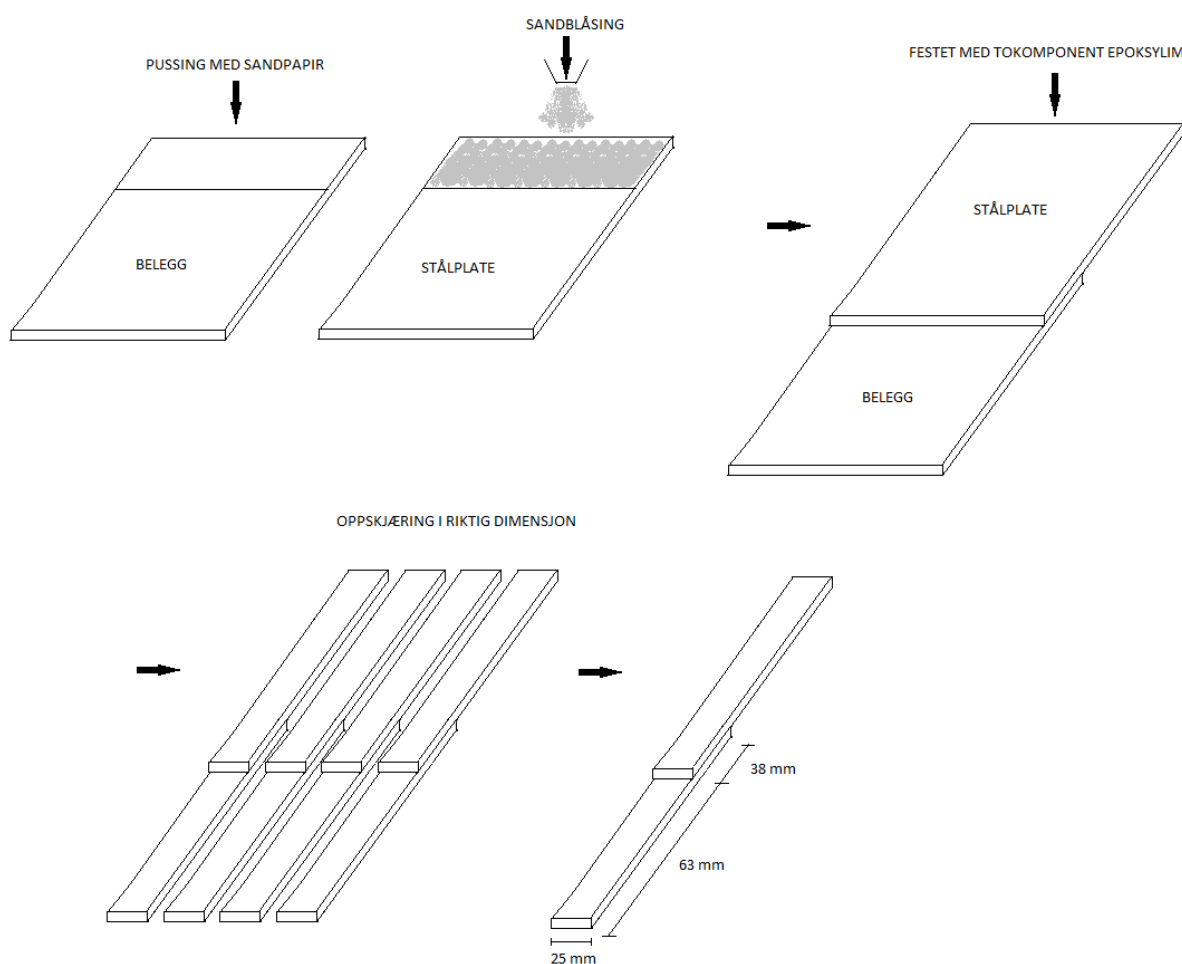
Figur 3.2 viser slagapparatet, hvor en prøve er festet nederst på apparatet.



Figur 3.2: Viser slagapparatet med en vekt plassert over prøven.

3.4 SKJÆRSPENNINGSTEST FOR HEFT

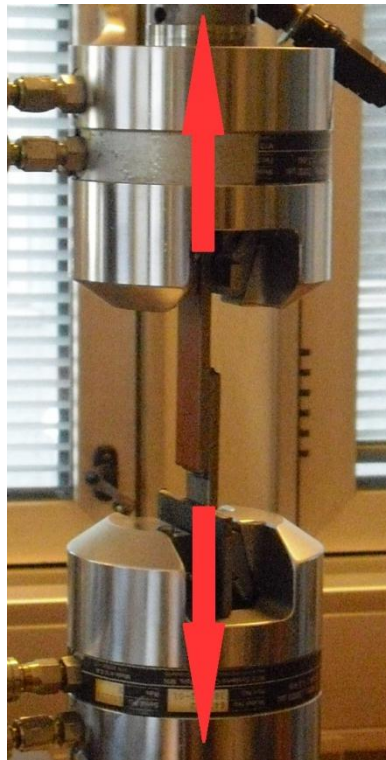
Prøvene i skjærspenningstesten ble preparert og testet i henhold til standard ASTM D1002-10 (2010) ”Standard test method for apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading (Metal-to-metal)” [28]. Beleggene gjennomgikk en prepareringsprosess som vist i Figur 3.3. Beleggene ble pusset med slipepapir SIC (Silisiumkarbid) P320 på overflaten og deretter rensset med aceton. Dette for å få en plan overflate og god heft med epoksyylimet. En stålplate av samme dimensjon ble sandblåst på den ene siden og deretter limt på beleggoverflaten med tokomponent epoksyylim. Skrutvinger ble brukt for å holde begge komponentene på plass under herding og for å kunne fylle gropene på det sandblåste området. Prøvene ble deretter lagt til herding i et varmeskap som hadde en temperatur på 50 °C. Etter en herdetid på 2 dager ble prøvene kuttet opp i ønsket størrelse, se målene i Figur 3.3. Kantprøven ble forkastet på grunn av ujevnheter.



Figur 3.3: Viser prepareringsprosessen før prøvene skal strekkes i strekkmaskinen.

Prøvene ble deretter strekktestet ved bruk av MTS(Mechanical test system) maskin, hvor hver ende av belegget ble festet med hydrauliske klyper. Tøyningshastigheten var konstant på 1,25 mm/min for hver prøv, hvor kraft økte i samsvar med tøyningshastigheten. Kraft og forlengelsesverdier ble logget underveis. Ekstensiometer ble ikke brukt i testen, slik at tøyningsverdier ikke ble logget underveis. Oppsettet av strekkmaskin og prøve er vist i Figur 3.4. Spennings- tøyningskurver ble deretter plottet ut fra resultatene ved hjelp av ligning 2.2.

Bruddflatene ble deretter evaluert i henhold til standard ISO 4624 (2002), ” *Paints and varnishes -- Pull-off test for adhesion*” [27].

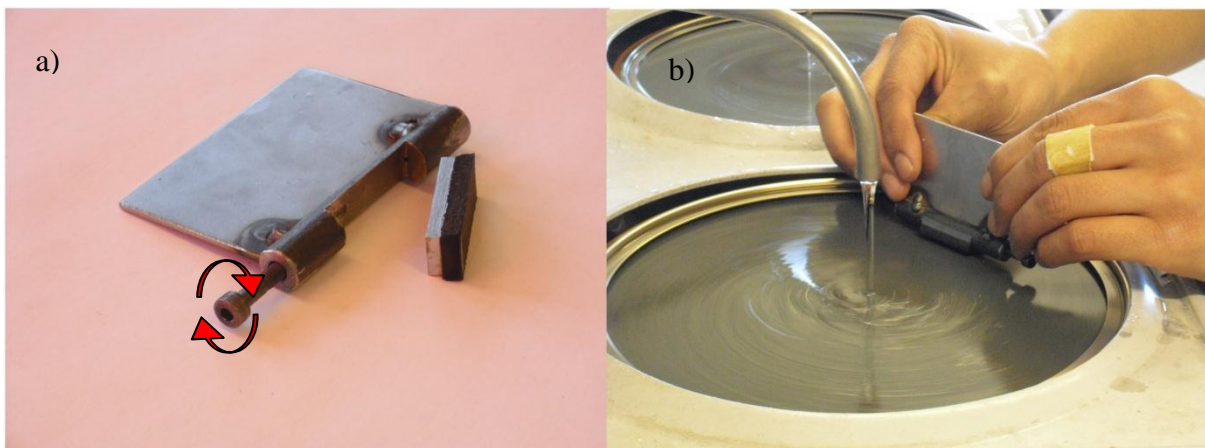


Figur 3.4: Strekkmaskin og fastspent prøve hvor de røde pilene viser strekk retning.

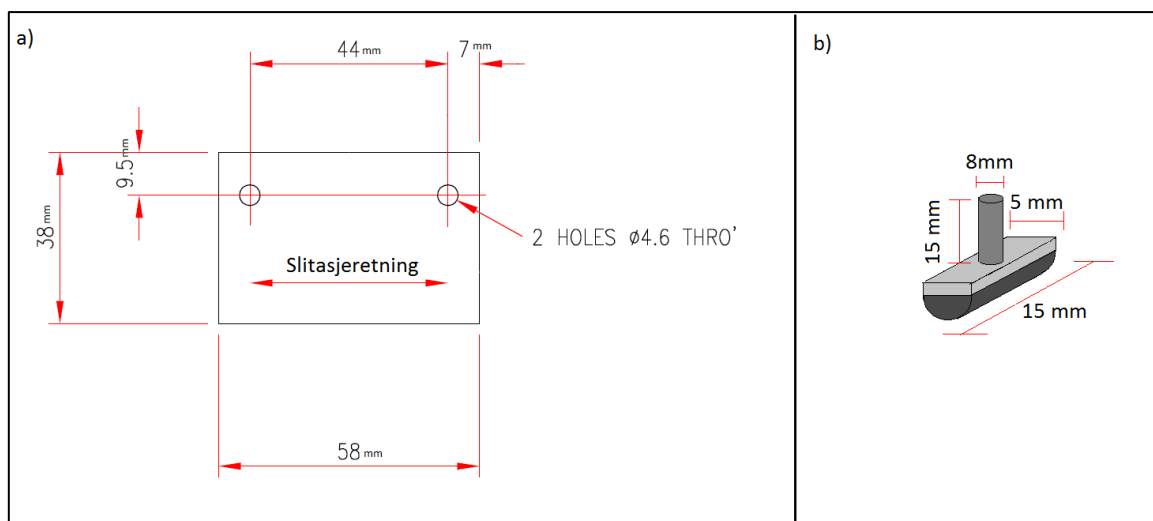
3.5 SLITASJETEST

Utrekning av kontaktrykk, ved bruk av Hertz sine ligninger ble utført før en slitasjetesten kunne bli satt i gang. se ligning 2.6-2.10. Dette for å kunne forhånds bestemme den påtrykte kraften og gummikomponentens geometri,.

To komponenter ble forhåndspreparert hvor den ene ble kuttet opp i 38x58 mm og maskinert med to hull, mens den andre komponenten ble slipt om til halv sylindrisk form på slipepapir SIC (Silisiumkarbid) P320 og videre opp til P1500, se de geometriske målene i Figur 3.6a og b. Slipemetoden vises i Figur 3.5b. Sliping ble utført ved hjelp av utstyret, vist i Figur 3.5a. Utstyret har sylindrisk form med 10 mm i diameter og mulighet for feste av komponent.



Figur 3.5: a) Utstyret som ble brukt til å forme komponenten hvor pilene viser roteringsretning av skrue ved feste. b) Viser sliping av prøven.

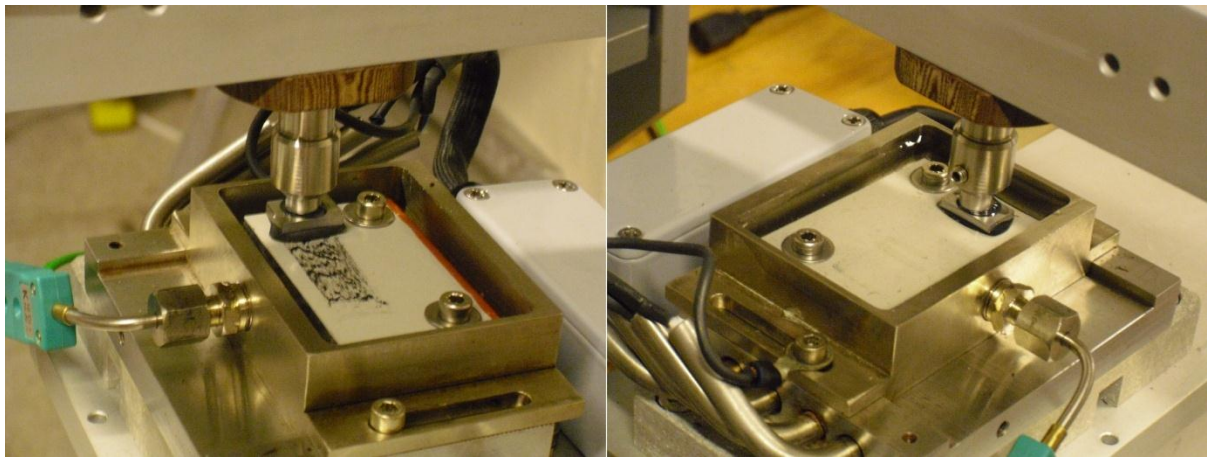


Figur 3.6: a) Geometriske mål på beleggplaten, b) geometriske mål på gummikomponent.

Etter sliping, ble den halvsylindriske komponenten kuttet i to, og en sylindrerformet plugg ble limt på metalloverflaten med tokomponent epoksyrim. Overflatene ble planslipt og renset med acetone før limingen ble gjennomført, se komponentens geometri Figur 3.6b.

Slitasjetesten ble deretter utført med en kraft på 200 N og en frekvens på 0,1 Hz i 700 s i luft og i 1800 s i saltvann. Friksjonskoeffisient og tid ble logget underveis. Prøvene ble veid med analysevekt, før og etter slitasjetesten for å kunne finne massetapet til beleggene.

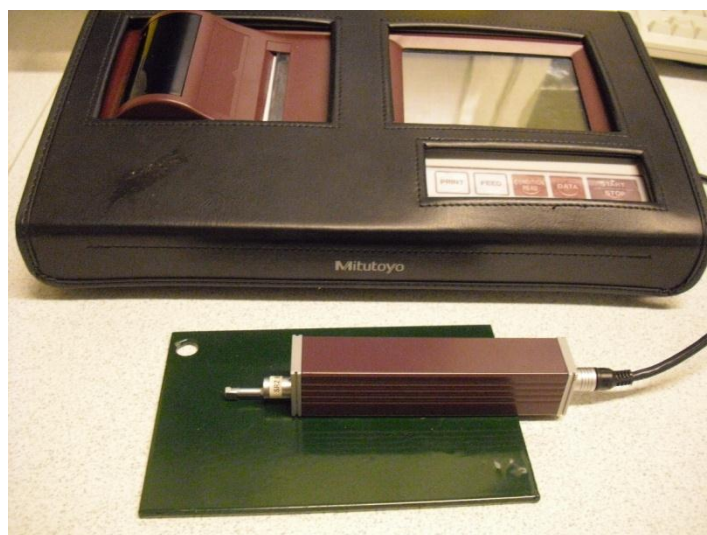
Slitasjeapparat, hvor gummikomponent og beleggplate sliter mot hverandre i henholdsvis luft og saltvann, er vist i Figur 3.7.



Figur 3.7: Slitasjeapparat hvor gummikomponent og beleggplate sliter mot hverandre a) i luft og b) i saltvann.

3.6 TOPOGRAFI / RUHET

Ruhetstesten ble utført i henhold til standard ISO 8503-4 (2012), ” *Preparation of steel substrates before application of paints and related products -- Surface roughness characteristics of blast-cleaned steel substrates -- Part 2: Method for the grading of surface profile of abrasive blast-cleaned steel -- Comparator pro* ” [30]. Ruhetsverdier på belegget ble funnet ved hjelp av ruhetsmaskinen, Mitutoyo SJ-301. Ti målinger ble utført på hvert belegg, hvor ruhetsmåling ble utført før slitasjetest, etter slitasjetest før og etter rensing i henholdsvis luft og saltvann, se Figur 3.8. Ruhetsverdiene R_a og R_z ble notert og kan regnes ut ved hjelp av ligningene 2.4 og 2.5. Beleggene ble også undersøkt i infinite focus mikroskop, før slitasje og etter slitasje, før og etter rensing i henholdsvis luft og saltvann.



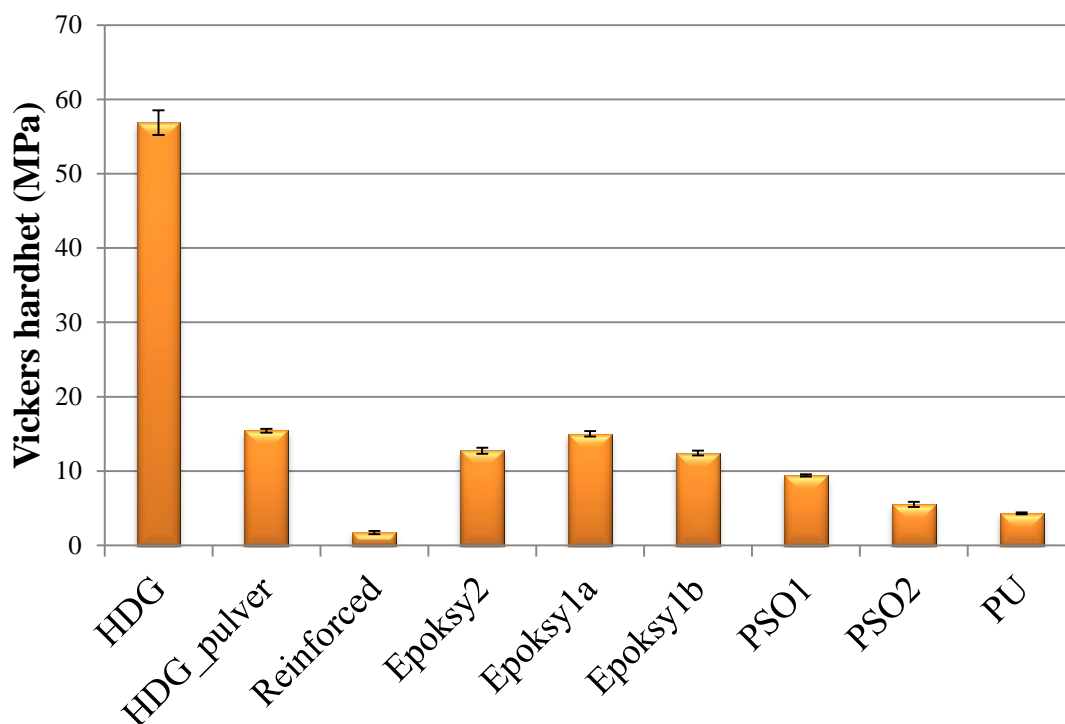
Figur 3.8: En ruhetsnål føres over belegget hvor ruhetsmaskinen oppgir de ulike parameterne.

4 RESULTAT

4.1 VICKERSHARDHET

Hardhetsverdiene for beleggene, finnes i A.2, i Appendiks A.

Figur 4.1 viser et søylediagram over gjennomsnittlige hardhetsverdier for de ulike beleggsystemene i gruppe A og B. HDG skiller seg ut i forhold til de andre beleggsystemene med en høyere gjennomsnittlig hardhetsverdi. Reinforced har den lavest gjennomsnittlige hardhetsverdien blant beleggene, mens de ulike epoksybeleggene viser liten spredning i sine hardhetsverdier. De resterende beleggtypene viser varierende verdier mellom 4 og 15 MPa.



Figur 4.1: Grafisk fremstilling av gjennomsnittlige hardhetsverdier for beleggene i gruppe A og B, ved romtemperatur. I: konfidensintervall.

4.2 SLAGFASTHET

Tabell 4.1 viser slagfastheten til de ulike beleggene i gruppe A og B. Slagfastheten er vist ut fra hvilke energimengde slaget må ha før belegget får sprekkdannelse ned til substratmaterialet, med betegnelsen **IKKE GODKJENT**. **GODKJENT** gis når det ikke er tegn til sprekkdannelse og **GODKJENT** gis når det er tegn til avflaking på overflaten av belegget.

I Tabell 4.1 viser HDG, Epoksy1a, Epoksy1b, Epoksy2 og Reinforced ikke tegn til sprekkdannelse ved noen av tilfellene. PSO beleggene og HDG_pulver viser tegn til sprekkdannelse ned til substratmaterialet allerede ved 10 J, mens PU viser tegn til avflaking ved 14 J og sprekkdannelse ved 18 J. HDG er elektrisk ledene slik at sprekkundersøkelse med Elecometer 266 ikke var mulig å utføre, men ut fra observasjon var det ikke tegn til sprekkdannelse ved høye energiverdier.

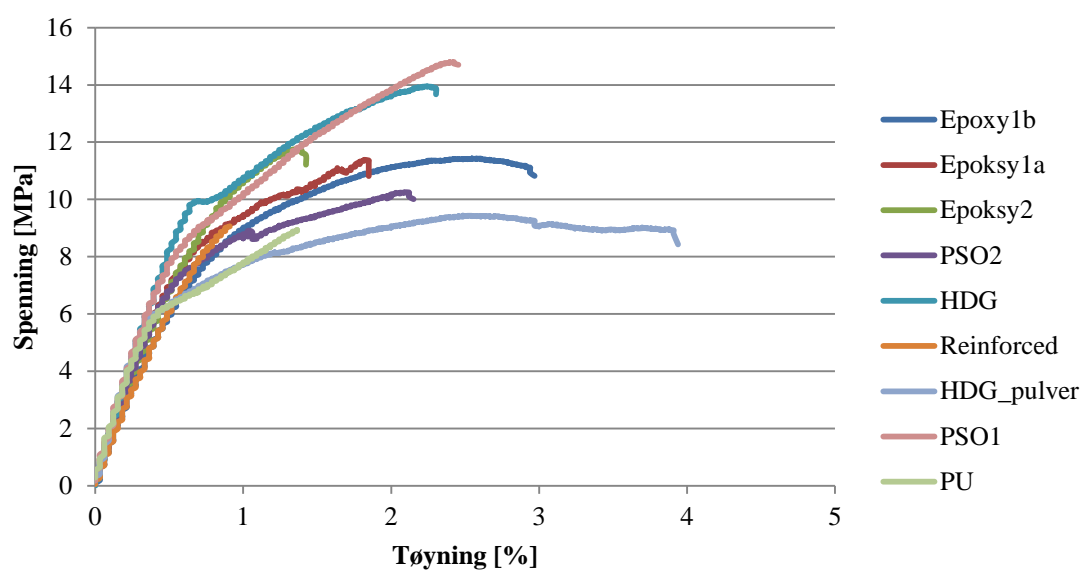
*Tabell 4.1: Slagfastheten til de ulike beleggene, som viser ved hvilken energimengde slaget må ha før beleggene sprekker ned til substratmaterialet, med betegnelsen **IKKE GODKJENT**. Betegnelsen **GODKJENT** gis når det ikke er tegn til sprekkdannelse og **GODKJENT** gis når det er tegn til avflaking på overflaten av belegget.*

BELEGG	POTENSIELL ENERGI							Kommentar
	8 J	10 J	12 J	14	16 J	18 J	19 J	
ROMTEMPERATUR								
PU	GOD-KJENT	GOD-KJENT	GODKJENT	GOD-KJENT	GOD-KJENT	IKKE GOD-KJENT	IKKE GOD-KJENT	Sprekk- dannelse
HDG	GOD-KJENT	GOD-KJENT	GODKJENT	GOD-KJENT	GOD-KJENT	GOD-KJENT	GOD-KJENT	Ikke tegn til sprekk- dannelse
PSO1	GOD-KJENT	GOD-KJENT	IKKE GOD-KJENT	IKKE GOD-KJENT	IKKE GOD-KJENT	IKKE GOD-KJENT	IKKE GOD-KJENT	Sprekk- dannelse
PSO2	GOD-KJENT	GOD-KJENT	IKKE GOD-KJENT	IKKE GOD-KJENT	IKKE GOD-KJENT	IKKE GOD-KJENT	IKKE GOD-KJENT	Sprekk- dannelse
Reinforced	GOD-KJENT	GOD-KJENT	GODKJENT	GOD-KJENT	GOD-KJENT	GOD-KJENT	GOD-KJENT	Avflaking på overflaten av belegget
Epoksy1a	GOD-KJENT	GOD-KJENT	GODKJENT	GOD-KJENT	GOD-KJENT	GOD-KJENT	GOD-KJENT	Ikke tegn til sprekk- dannelse
Epoksy1b	GOD-KJENT	GOD-KJENT	GODKJENT	GOD-KJENT	GOD-KJENT	GOD-KJENT	GOD-KJENT	Ikke tegn til sprekk- dannelse
Epoksy2	GOD-KJENT	GOD-KJENT	GODKJENT	GOD-KJENT	GOD-KJENT	GOD-KJENT	GOD-KJENT	Ikke tegn til sprekk- dannelse
HDG_pulver	GOD-KJENT	IKKE GOD-KJENT	IKKE GOD-KJENT	IKKE GOD-KJENT	IKKE GOD-KJENT	IKKE GOD-KJENT	IKKE GOD-KJENT	Sprekk- dannelse ned til sinkbelegget

4.3 SKJÆRSPENNING

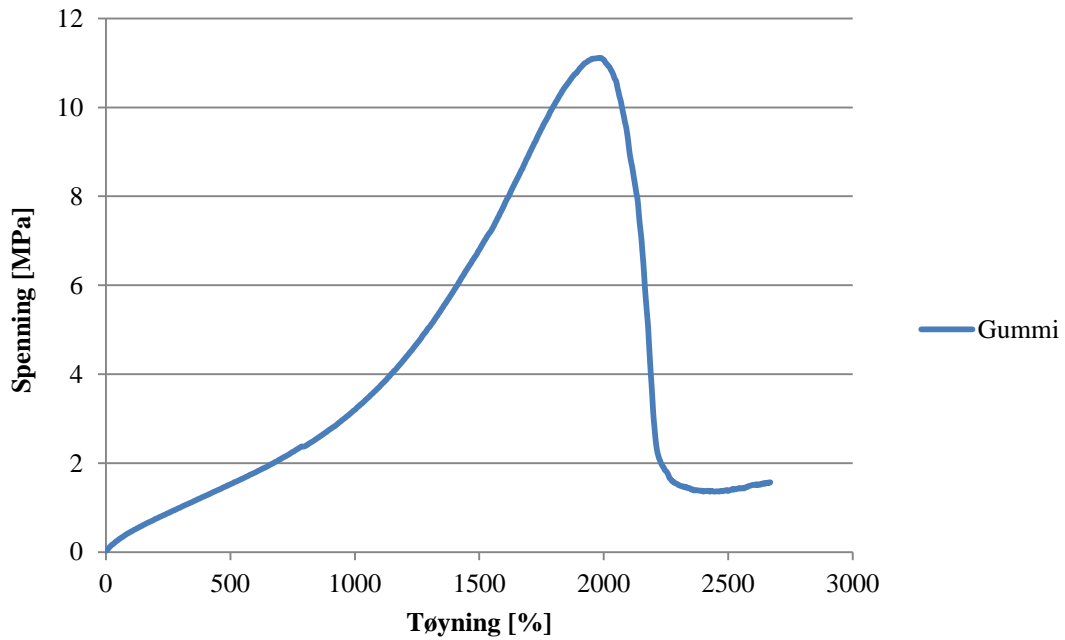
Dataene og plottene for beleggene, finnes i A.3 og B.1, i Appendiks A og B.

Figur 4.2 viser spenningstøyningskurver for beleggene i gruppe A og B. Beleggene viser et likt elastisitetstørrelseforløp, hvor HDG_pulver viser både lavest flytespenning og strekkfasthet. HDG og PSO1 viser høyest strekkfasthet. Spenningstøyningskurven er funnet ved hjelp av ligning 2.2.



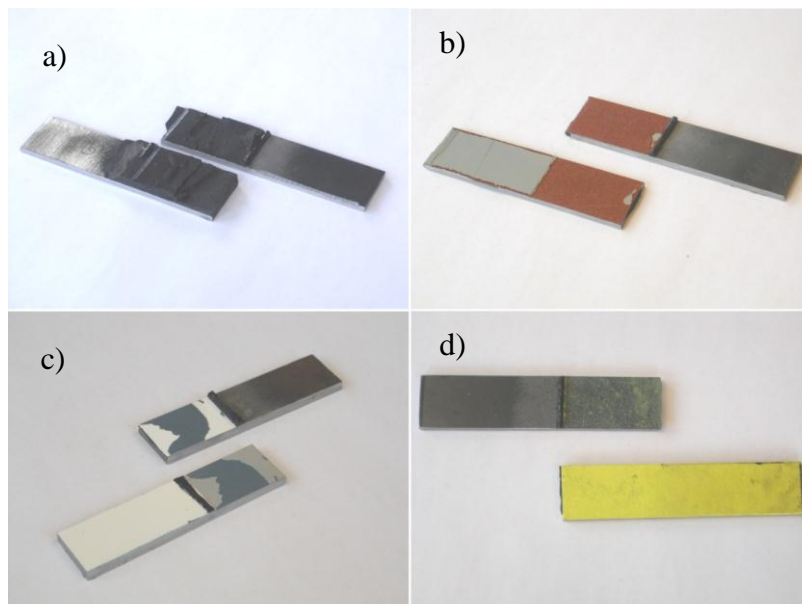
Figur 4.2: Spenningstøyningskurve over beleggssystemene i gruppe A og B.

Figur 4.3 viser spenningstøyningskurve for Gummi med opptil 2500 % tøyning ved brudd og en strekkfasthet på 11 MPa. Spenningen og tøyningen er funnet ved hjelp av ligning 2.2.



Figur 4.3: Spenningstøyningskurve for Gummi i gruppe C.

Figur 4.4 viser bruddflaten til Gummi, Epoksy2, PSO2 og Reinforced etter en skjærspenningstest. Bruddflatene viser ulike bruddtyper, som kohesivt brudd, brudd mellom malingslag, brudd mellom lim og belegg og en kombinasjon av tilfellene, se bruddtypene i avsnitt 2.2.2.



Figur 4.4: a) Gummi fikk kohesivt brudd, b) Epoksy2 fikk kohesivt brudd, c) PSO2 fikk kohesivt brudd og brudd mellom to lag og d) Reinforced fikk brudd mellom limet og overflaten.

Tabell 0.4 og Tabell 0.5 i A.3, i Appendiks A, viser evalueringsresultatene av bruddflaten, hvor beleggene oppfører seg ulikt. For PU oppstår bruddet mellom D (øverste toppstrøk) og C (strøket under), mens for PSO2 oppstår bruddet mellom D og C i tillegg til kohesivt brudd i strøk B. For Epoksybeleggene og Gummi er trenden ganske lik, med kohesivt brudd i B, mens Reinforced og HDG- beleggene viser et brudd mellom – (toppstrøk) og Y (lim), se avsnitt 2.2.2.

PU har en strekkfasthet som varierer fra 3,8 til 8,9 MPa. Reinforced, HDG_pulver og Gummi har også varierende verdier i strekkfasthet. De resterende beleggtypene har liten variasjon i strekkfasthet, se A.3, i Appendiks A.

4.4 SLITASJE

Dataene og plottene for beleggene, finnes i B.2 og B.4, i Appendiks B.

Tabell 4.2 viser en oversikt over konstanter brukt i utregningene for Hertz ligninger, se ligning 2.6-2.10. Tabell 4.3 viser beregnede verdier fra Hertz ligninger som brukes til å finne gjennomsnittlig kontaktrykk mellom båt og fender- rør. Det gjennomsnittlige kontaktrykket er regnet ut for kontakt mellom båt og det ene fender- røret. Fender- røret har en typisk diameter på 500 mm. Båtens fender har en typisk propulsjonskraft på 100000 N når den presser mot fender- rørene, se Figur 2.6 i avsnitt 2.2.5.

Elastisitetsmodulen for Gummi er utgitt internt i SINTEF og Poissons tall for gummi er typisk 0,5 og 0,3 for belegg, se Tabell 4.2 og Tabell 4.3.

Tabell 4.2: Oversikt over ulike konstanter, som er brukt for å finne kontaktrykket mellom båt og fender- rør.

$E_{\text{gummi } 10\%}$ [MPa]	$R_{\text{fender-rør}}$ [mm]	R_{gummi} [mm]	Propulsjonskraft [N]	2L(Bredden av fender)	ν_{belegg}	ν_{gummi}
0.02	250	∞	100000	150	0.3	0.5

Tabell 4.3: Gjennomsnittlig kontaktrykk mellom båt og fender- rør, som er funnet ved hjelp av Hertz sine ligninger, se avsnitt 2.2.5.

Slitasje	R' [mm]	E' [MPa]	b [mm]	p_{max} [MPa]	p_{average} [MPa]	E_{belegg} [MPa]
Mellom båt og fender- rør	250	0.06	2678.68	0.16	0.12	40

Tabell 4.4 viser en oversikt over konstanter brukt i utregningene for Hertz ligninger, se avsnitt 2.2.5.

Tabell 4.5 viser beregnede verdier fra Hertz ligninger som brukes til å finne gjennomsnittlig kontaktrykk mellom gummikomponent og beleggplate. Gummikomponenten er halv sylindrisk med en radius på 5 mm og en lengde på 15 mm. Kraften som ble brukt var 200 N slik at kontaktrykket mellom gummikomponent og beleggplate ble likt som kontaktrykket mellom båt og fender, se illustrasjon av gummikomponenten i Figur 3.6 b.

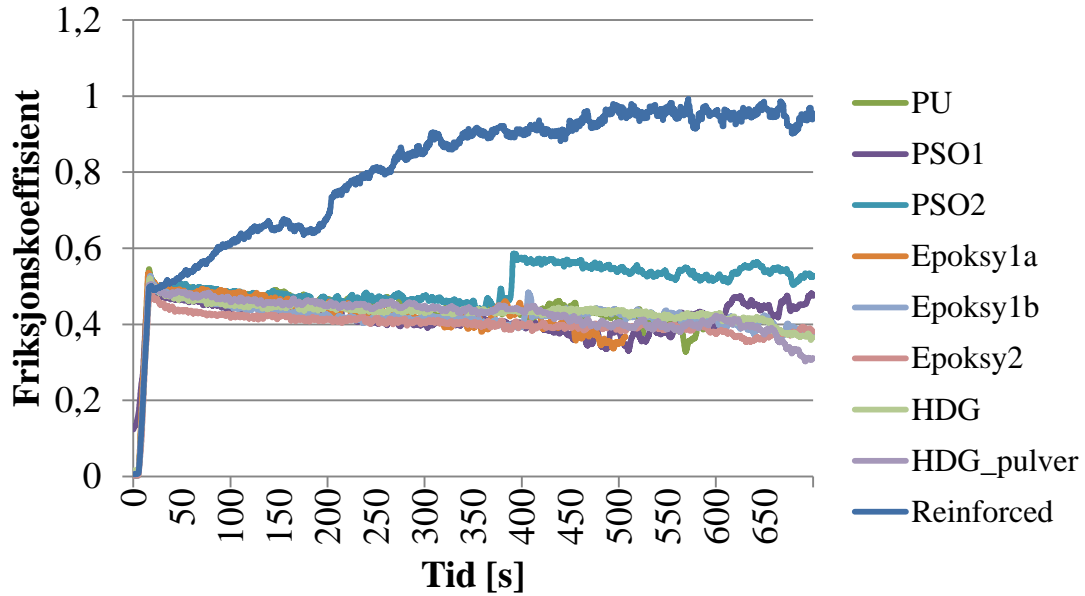
Tabell 4.4: Oversikt over konstanter, som er brukt for å finne kontaktrykket mellom gummikomponent og belegplate.

$E_{\text{gummi 10\%}}$ [MPa]	R_{gummi} [mm]	R_{belegg} [mm]	W [N]	$2L$ [mm]	V_{belegg}	V_{gummi}
0.02	5	∞	200	15	0.3	0.5

Tabell 4.5: Gjennomsnittlig kontaktrykk mellom gummikomponent og belegplate vist i Figur 3.6, som er funnet ved hjelp av Hertz sine ligninger, se avsnitt 2.2.5.

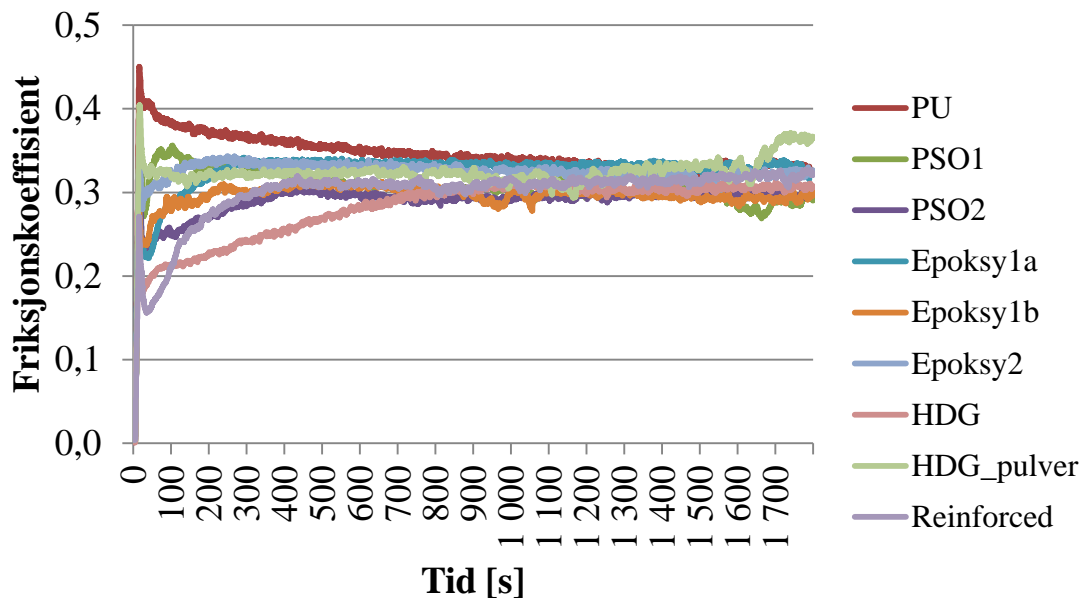
Belegg	R' [mm]	E' [MPa]	b [mm]	p_{max} [MPa]	p_{average} [MPa]	E_{belegg} [MPa]
PU	5	0.06	53.57	0.16	0.12	42
PSO2	5	0.06	53.57	0.16	0.12	41
Epoksy2	5	0.06	53.58	0.16	0.12	36
PSO1	5	0.06	53.57	0.16	0.12	41
Reinforced	5	0.06	53.58	0.16	0.12	35
Epoksy1a	5	0.06	53.58	0.16	0.12	38
Epoksy1b	5	0.06	53.57	0.16	0.12	44
HDG	5	0.06	53.57	0.16	0.12	43
HDG_spraylakk	5	0.06	53.57	0.16	0.12	44

Figur 4.5 viser gjennomsnittlig friksjonskoeffisient, plottet mot tid, for de ulike beleggene, etter slitasjetest i luft i 700 s. Reinforced skiller seg ut i forhold til de andre beleggene ved at friksjonskoeffisient øker over tid. De resterende beleggene viser en synkende friksjonskoeffisient over tid, bortsett fra PSO2 som får etter en viss tid en økning i friksjonskoeffisient ved 400 s. PU, Epoksy1a og Epoksy1b kunne ikke testes i alle 700 sekundene, på grunn av rask slitasje av gummikomponenten, som førte til fare for kontakt mellom stålet under gummien og belegg, se slitasjeforløpene i B.2, i Appendiks B, og nedgraderte gummikomponenter i Figur 4.8 a og b.



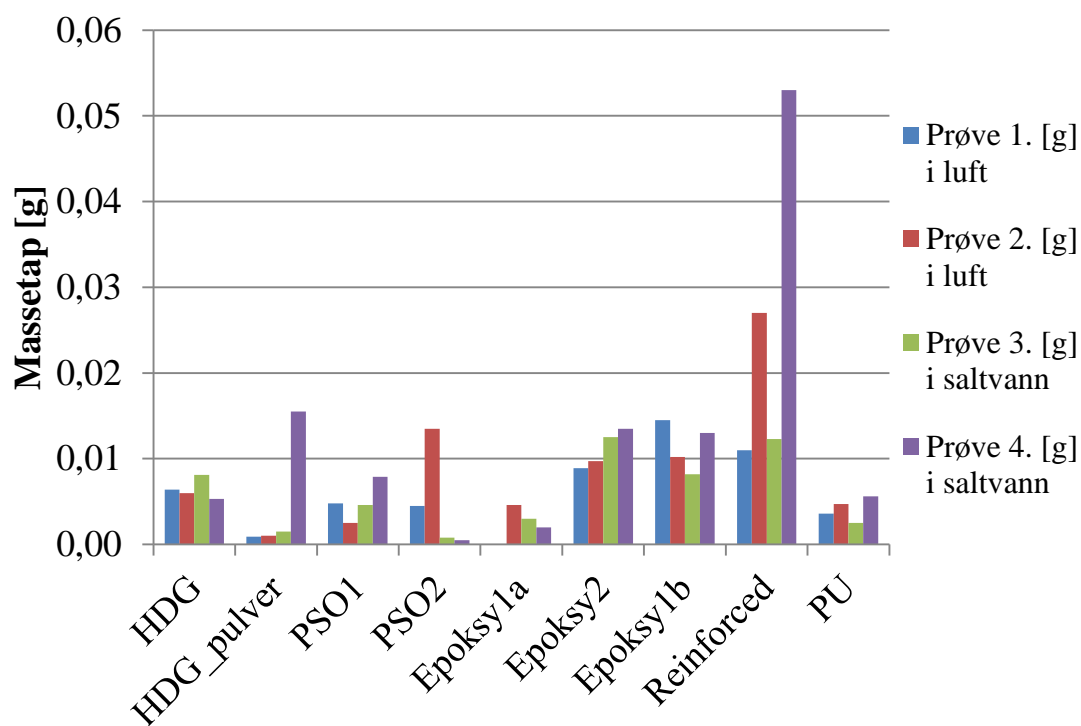
Figur 4.5: Gjennomsnittlig friksjonskoeffisient plottet mot tid for de ulike beleggene etter slitasje i luft i 700 s.

Figur 4.6 viser gjennomsnittlig friksjonskoeffisient plottet mot tid for de ulike beleggene, etter slitasje i saltvann i 1800 s. Beleggene viser en lik trend i friksjonskoeffisient over tid, hvor friksjonskoeffisienten ligger mellom 0,28 og 0,35.

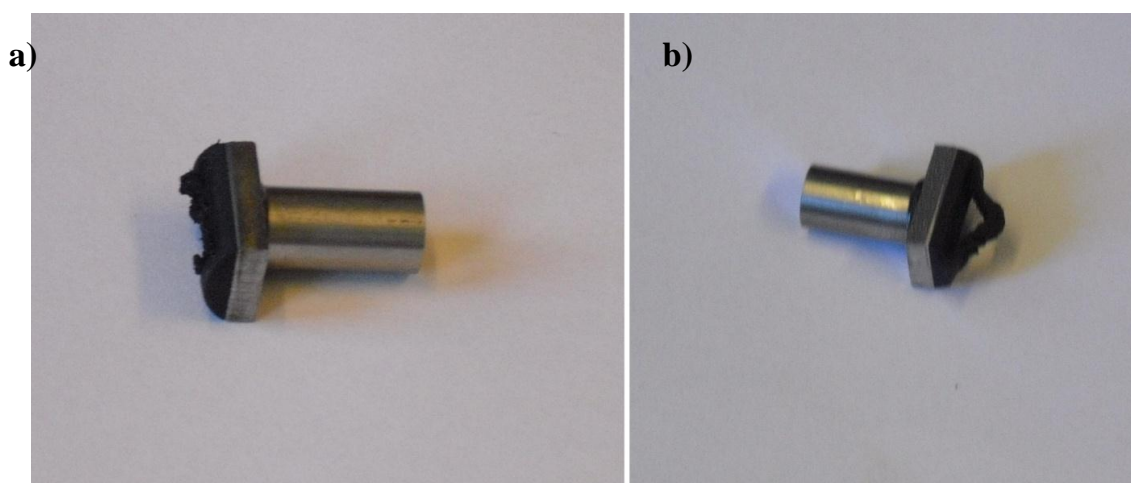


Figur 4.6: Gjennomsnittlig friksjonskoeffisient plottet mot tid for de ulike beleggene etter slitasje i saltvann i 1800 s.

Figur 4.7 viser et søylediagram hvor massetap for de ulike beleggene er vist etter slitasje ved rensed belegg i luft og saltvann. Reinforced skiller seg ut med høyest massetap blant beleggene ved slitasje i både luft og saltvann. HDG_pulver viser lavest massetap blant beleggene i luft, mens PSO2 viser lavest massetap blant beleggene i saltvann. Resultatene fra prøve 1 for Epoksy1a er forkastet på grunn av feilkalibrert kraft ved testing. Forsøket for Epoksy1a, prøve 1, ble ikke gjort om igjen fordi det ikke var flere prøver igjen. Epoksy1a viser lavere massetap både i luft og saltvann i forhold til Epoksy1b. Det som skiller disse beleggene er herdetid.



Figur 4.7: Massetap på beleggene etter slitasje ved rensed belegg i henholdsvis i luft i 700 s og saltvann i 1800 s



Figur 4.8: a) Gummikomponent etter slitasje i saltvann i 1800 s og b) ved slitasje i luft i 700 s.

4.5 TOPOGRAFI / RUHET

Ruhetsdataene for beleggene, finnes i A.5, i Appendiks A.

Tabell 4.6 viser de gjennomsnittlige ruhetsverdiene, Ra og Rz for beleggene før en slitasjetest ble gjennomført. Reinforced viser de høyeste ruhetsverdiene blant beleggene, mens PU og HDG_pulver viser de laveste verdiene.

Tabell 4.6: De gjennomsnittlige ruhetsverdiene, Ra og Rz for hvert belegg, som ble funnet før slitasje.

Ruhet før slitasje		
BELEGG	Ra	Rz
PSO1	0.87	1.07
PSO2	0.71	0.87
Epoksy1a	0.87	1.09
Epoksy1b	0.88	1.08
Epoksy2	1.16	1.45
Reinforced	2.45	3.06
HDG	1.46	1.80
HDG_pulver	0.30	0.38
PU	0.34	0.42

Tabell 4.7 viser gjennomsnittlige ruhetsverdier for de ulike beleggene etter slitasje i luft og saltvann, før beleggene ble rensset med etanol. Beleggene HDG, PSO2, PU og Epoksy1a viser lite forskjell i ruhetsverdier ved slitasje i luft i forhold til i saltvann.

Tabell 4.7: De gjennomsnittlige ruhetsverdiene, Ra og Rz for hvert belegg som ble funnet etter slitasje i luft og saltvann før rensing med etanol.

Ikke rensset med etanol				
BELEGG	Ruhetsverdier etter slitasje i luft		Ruhetsverdier etter slitasje i saltvann	
	Ra _(i luft urensset)	Rz _(i luft urensset)	Ra _(i saltvann urensset)	Rz _(i saltvann urensset)
PSO1	0.65	0.78	0.72	0.87
PSO2	0.71	0.86	0.58	0.71
Epoksy1a	1.15	1.38	0.94	1.15
Epoksy1b	1.14	1.37	1.16	1.42
Epoksy2	0.83	1.02	0.86	1.03
Reinforced	2.20	2.74	2.34	2.97
HDG	1.42	1.73	1.05	1.30
HDG_pulver	0.17	0.22	0.18	0.30
PU	0.30	0.36	0.27	0.33

Figur 4.9 viser et søylediagram over endring mellom gjennomsnittlig ruhetsverdier før slitasje og etter slitasje ved urensset belegg i henholdsvis luft og saltvann. Ligningene 4.1-4.4 viser endring i ruhetsverdi for de ulike tilfellene:

$$Ra - Ra_{(i_luft_urensset)} = \Delta Ra_{lu} \quad (4.1)$$

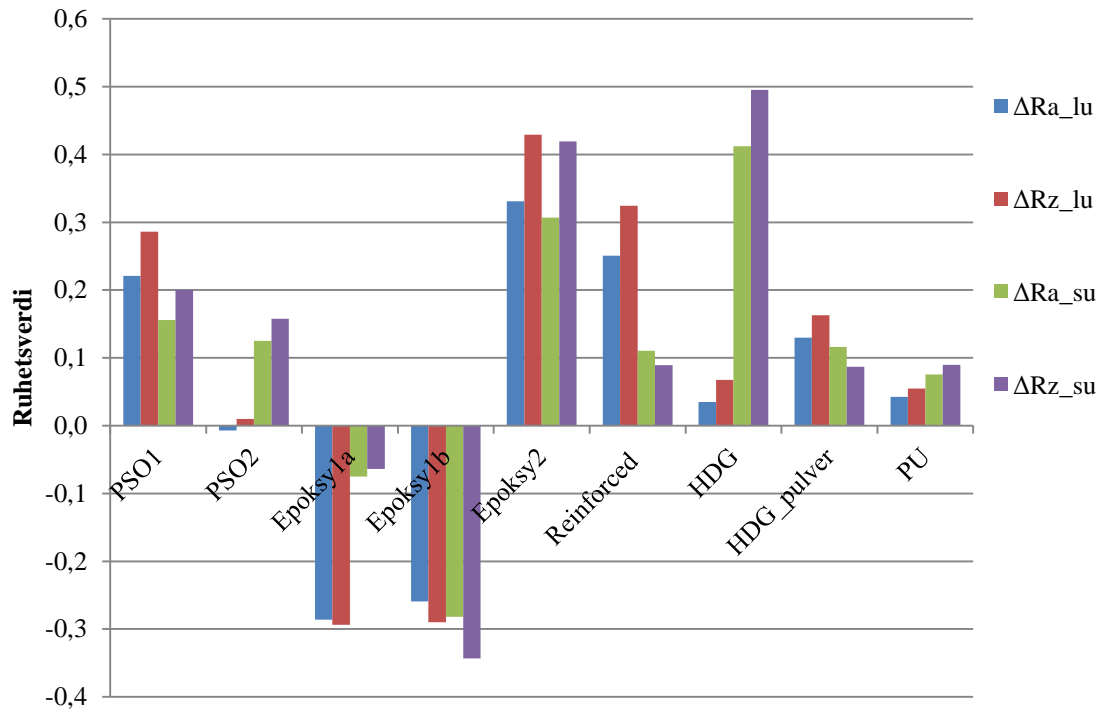
$$Rq - Rq_{(i_luft_urensset)} = \Delta Rq_{lu} \quad (4.2)$$

$$Ra - Ra_{(i_saltvann_urensset)} = \Delta Ra_{su} \quad (4.3)$$

$$Rq - Rq_{(i_saltvann_urensset)} = \Delta Rq_{su} \quad (4.4)$$

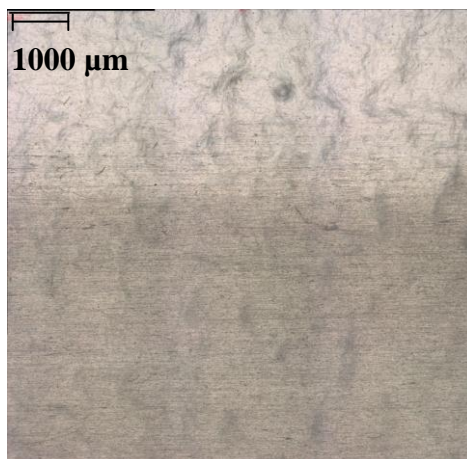
Hvor Ra er gjennomsnittlig ruhetsverdier før slitasje, $Ra_{(i_luft_urensset)}$ er gjennomsnittlig ruhetsverdier etter slitasje ved urensset belegg i luft, $Ra_{(i_saltvann_urensset)}$ er gjennomsnittlig ruhetsverdier etter slitasje ved urensset belegg i saltvann, ΔRa_{lu} endring mellom gjennomsnittlig ruhetsverdier før slitasje og etter slitasje ved urensset belegg i luft og ΔRa_{su} er endring mellom gjennomsnittlig ruhetsverdier før slitasje og etter slitasje ved urensset belegg i saltvann. Rz verdiene finnes på samme måte som Ra verdiene.

I Figur 4.9 viser de fleste beleggene en positiv endring i ruhetsverdi, bortsett fra Epoksy1a og Epoksy1b.



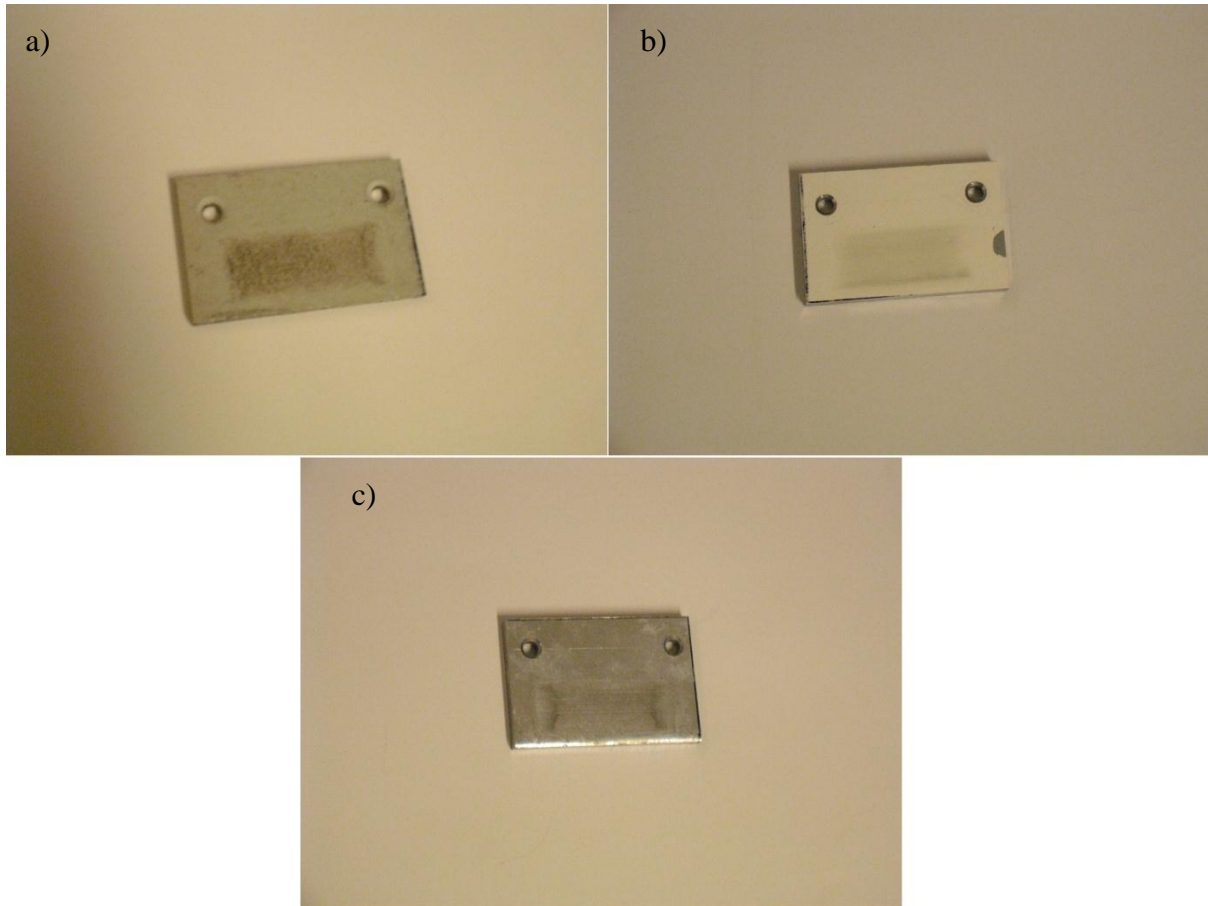
Figur 4.9: Endringen mellom gjennomsnittlig ruhetsverdier før slitasje og etter slitasje ved urensset belegg i henholdsvis luft og saltvann.

Figur 4.10 viser bildet av overflaten til PSO1 tatt i infinit focus mikroskop, hvor overgangen mellom belegg og slitasjespor fra gummikomponent vises, før overflaten ble renset med etanol.



Figur 4.10: Overflaten av PSO1 ved slitasje i saltvann tatt i infinit focus mikroskop, hvor overgang mellom beleggoverflate og slitasjespor fra gummikomponent vises, før rensing med etanol.

Figur 4.11 viser slitasjespor fra gummikomponent på Reinforced, PSO1 og HDG, før beleggene ble rensset med etanol.



Figur 4.11: a) Slitasjespor fra gummikomponent vises på Reinforced hvor det samme vises for b) PSO1 og c) HDG, før rensing med etanol.

Tabell 4.8 viser gjennomsnittlige ruhetsverdier for beleggene etter slitasje i luft og saltvann, etter at beleggene ble rensset med etanol. PSO2 og Reinforced skiller seg mest ut ved at de viser noe lavere ruhetsverdier etter slitasje i luft i forhold til i saltvann, mens HDG viser noe høyere ruhetsverdier etter slitasje i luft i forhold til i saltvann.

Tabell 4.8: De gjennomsnittlige ruhetsverdiene, Ra og Rz for hvert belegg, ble funnet etter slitasje i luft og saltvann etter rensing med etanol.

Renset med etanol				
BELEGG	Ruhetsverdier etter slitasje i luft		Ruhetsverdier etter slitasje i saltvann	
	Ra(renset i luft)	Rz(renset i luft)	Ra(renset i saltvann)	Rz(renset i saltvann)
PSO1	0.66	0.81	0.69	0.84
PSO2	0.73	0.88	0.60	0.72
Epoksy1a	1.07	1.30	1.03	1.22
Epoksy1b	1.07	1.29	1.08	1.35
Epoksy2	0.87	1.06	0.87	1.05
Reinforced	2.07	2.64	2.50	3.12
HDG	1.29	1.60	1.06	1.28
HDG_pulver	0.18	0.23	0.17	0.23
PU	0.31	0.39	0.30	0.37

Figur 4.12 viser et søylediagram over endring mellom gjennomsnittlig ruhetsverdier før slitasje og etter slitasje ved rensset belegg i henholdsvis luft og saltvann. Ligningene 4.5-4.8 viser endring i ruhetsverdi for de ulike tilfellene:

$$Ra - Ra_{(i_luft_renset)} = \Delta Ra_{lr} \quad (4.5)$$

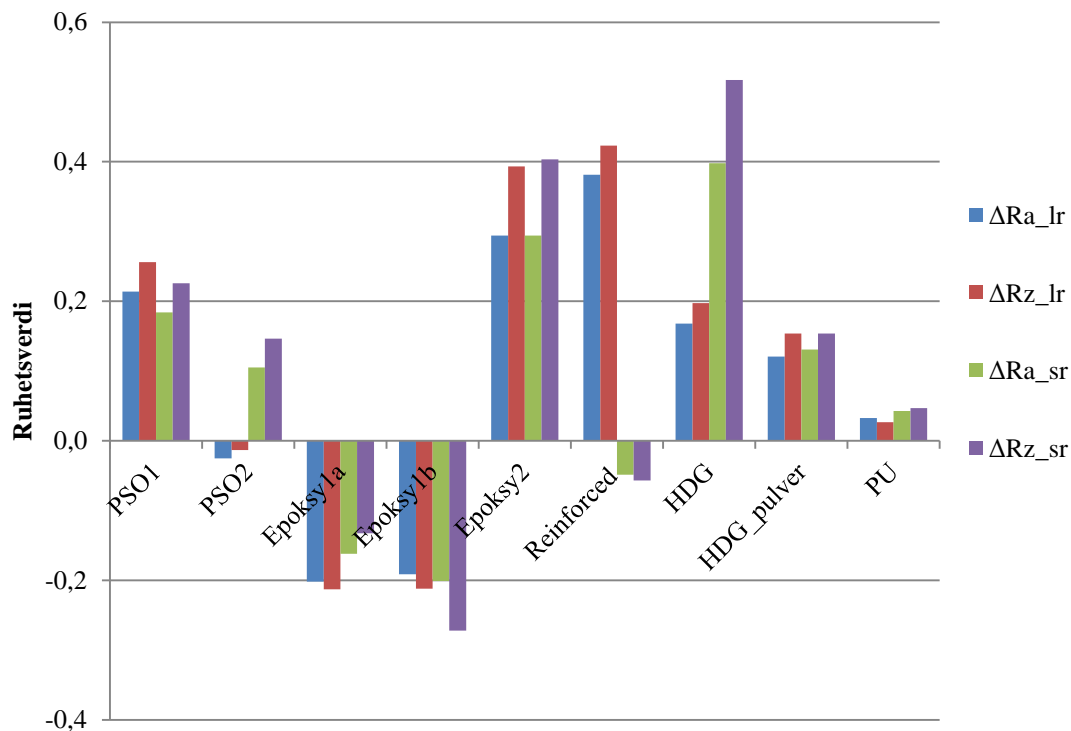
$$Rq - Rq_{(i_luft_renset)} = \Delta Rq_{lr} \quad (4.6)$$

$$Ra - Ra_{(i_saltvann_renset)} = \Delta Ra_{sr} \quad (4.7)$$

$$Rq - Rq_{(i_saltvann_renset)} = \Delta Rq_{sr} \quad (4.8)$$

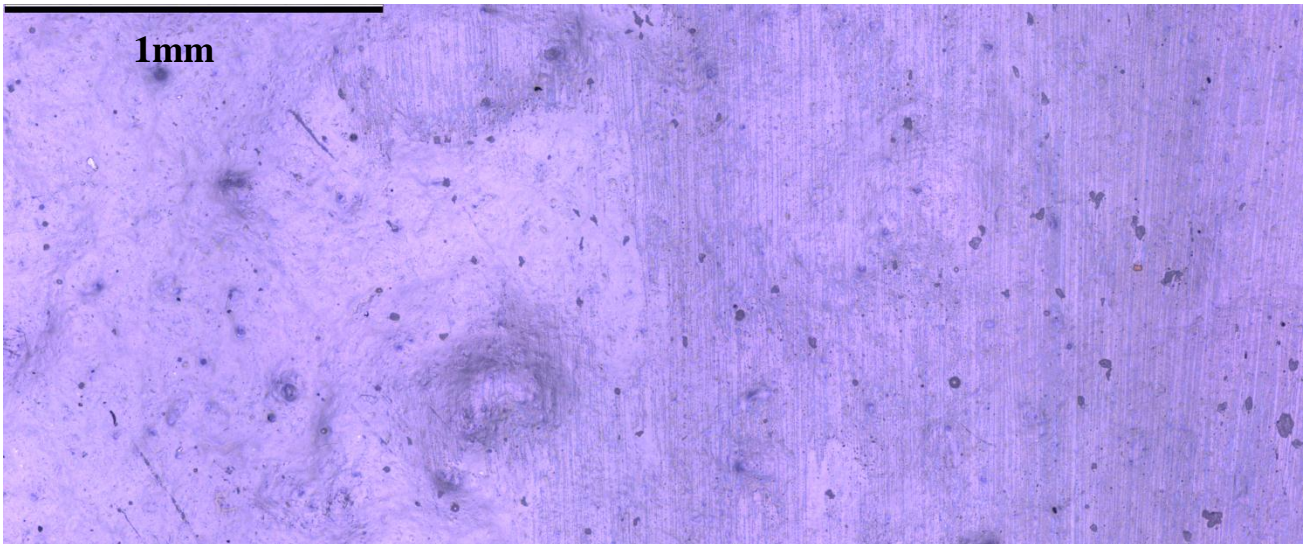
Hvor Ra er gjennomsnittlig ruhetsverdier før slitasje, $Ra_{(i_luft_renset)}$ er gjennomsnittlig ruhetsverdier etter slitasje ved rensset belegg i luft, $Ra_{(i_saltvann_renset)}$ er gjennomsnittlig ruhetsverdier etter slitasje ved rensset belegg i saltvann, ΔRa_{lr} endring mellom gjennomsnittlig ruhetsverdier før slitasje og etter slitasje ved rensset belegg i luft og ΔRa_{sr} er endring mellom gjennomsnittlig ruhetsverdier før slitasje og etter slitasje ved rensset belegg i saltvann. Rz verdiene finnes på samme måte som Ra verdiene.

I Figur 4.12 viser de fleste beleggene positive endringer i ruhetsverdier, bortsett fra Epoksy1a og Epoksy1b. PSO2 viser lave negative ΔRa_{lr} og ΔRz_{lr} verdier mens Reinforced viser lave negative ΔRa_{sr} og ΔRz_{sr} verdier.

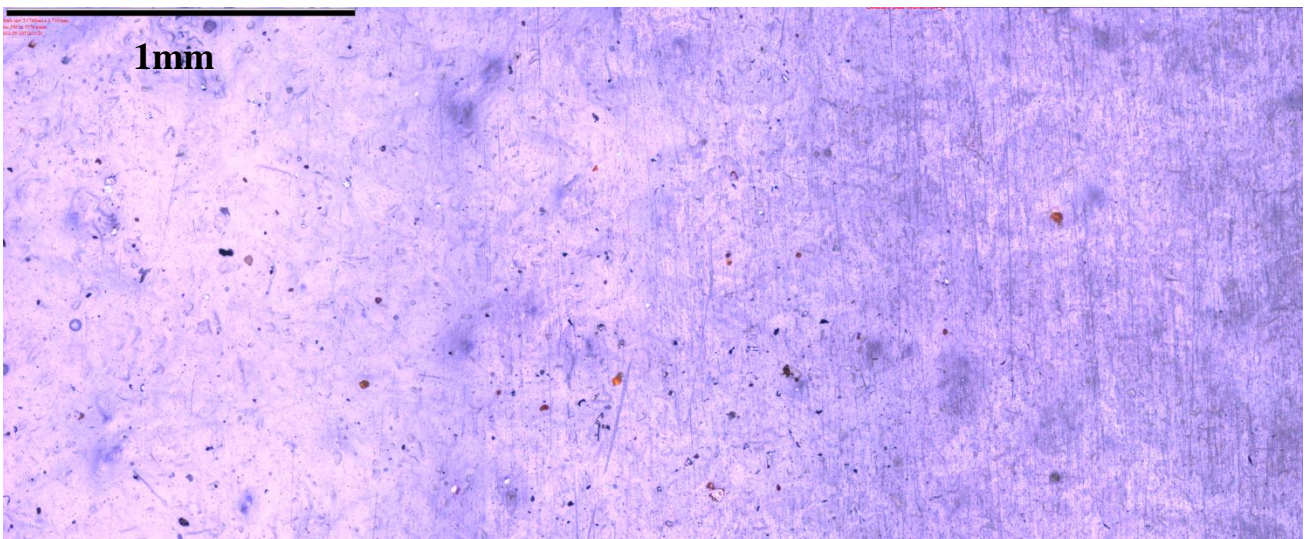


Figur 4.12: Endring i gjennomsnittlige ruhetsverdier mellom før slitasje og etter slitasje renset, i luft og saltvann.

Figur 4.13 og Figur 4.14 viser bildet av overflaten til Epoksy1a og Epoksy2 tatt i infinit focus mikroskop, hvor overgangen mellom belegg og slitasjespor vises, etter at beleggene ble renset med etanol.



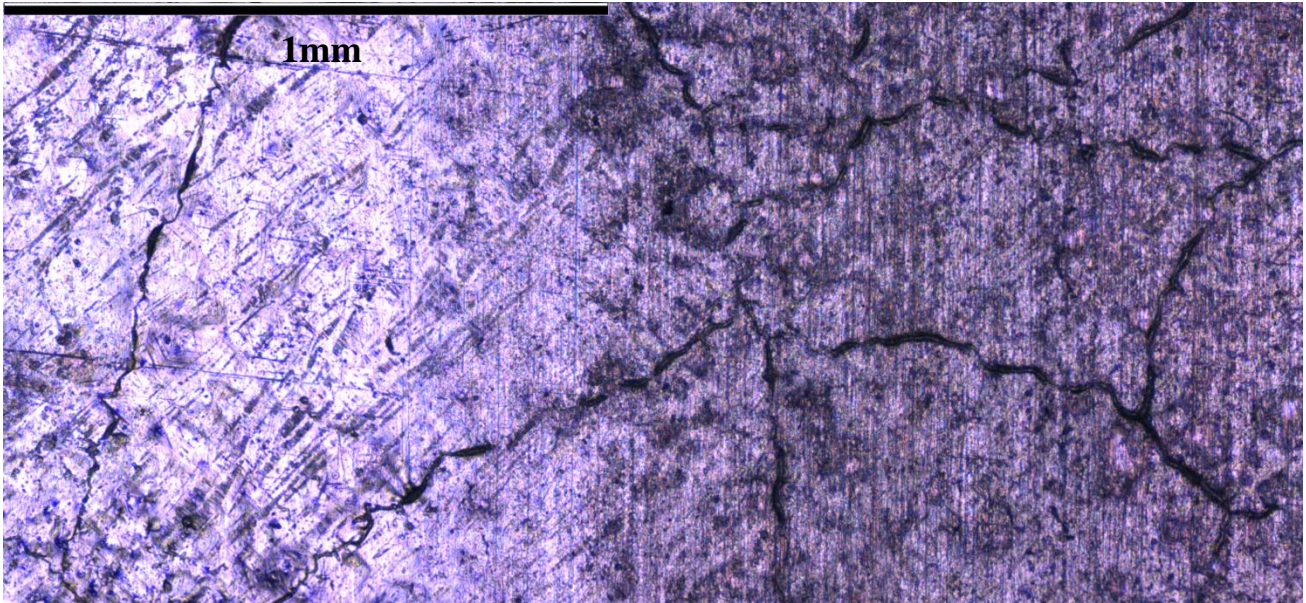
Figur 4.13: Overflaten av Epoksy1a ved slitasje i luft tatt i infinit focus mikroskop, hvor overgang mellom ikke slitasje venstre på bildet og slitasje høyre på bildet, etter rensing med etanol, vises.



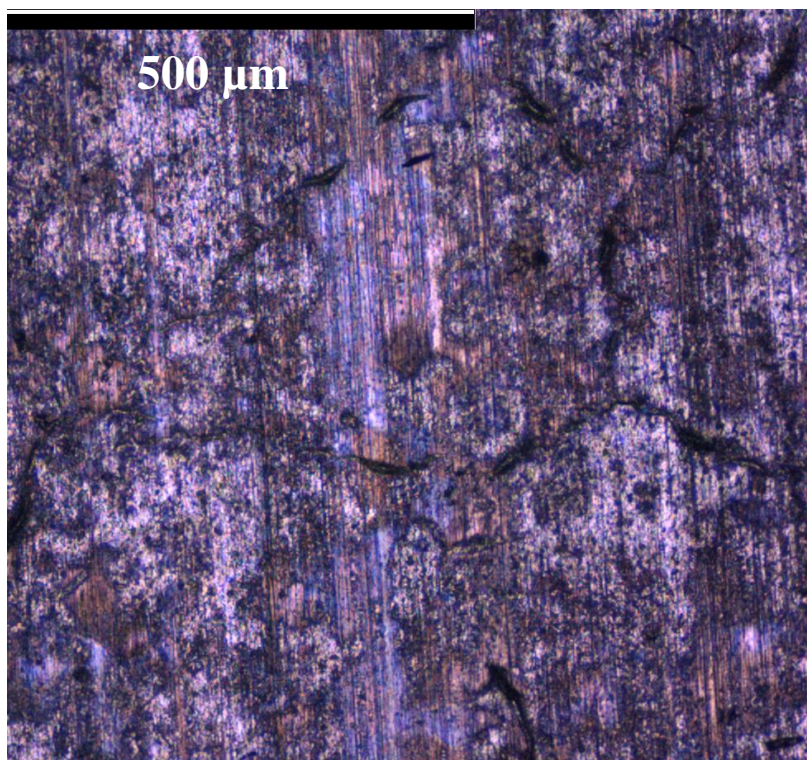
Figur 4.14: Overflaten av Epoksy2 ved slitasje i luft tatt i infinit focus mikroskop, hvor overgang mellom ikke slitasje venstre på bildet og slitasje høyre på bildet, etter rensing med etanol, vises.

Figur 4.15 viser bildet av overflaten til HDG tatt i infinit focus mikroskop, hvor overgangen mellom belegg og slitasjespor vises, etter at overflaten ble rensert med etanol.

Figur 4.16 viser et nærbilde av et slitasjeområde på HDG, etter at overflaten ble rensert med etanol.



Figur 4.15: Overflaten av HDG ved slitasje i luft er tatt i infinit focus mikroskop, hvor overgang mellom ikke slitasje venstre på bildet og slitasje høyre på bildet, etter rensing med etanol, vises.



Figur 4.16: HDG tatt i infinit focus mikroskop etter slitasje i luft, hvor slitasjespor vises etter rensing med etanol.

Figur 4.17 viser et søylediagram over endring mellom gjennomsnittlig ruhetsverdier etter slitasje ved urensset belegg og rensset belegg i henholdsvis luft og saltvann. Ligningene 4.9-4.12 viser endring i ruhetsverdi for de ulike tilfellene

$$Ra_{(i_luft_urensset)} - Ra_{(i_luft_renset)} = \Delta Ra_{lur} \quad (4.9)$$

$$Rq_{(i_luft_urensset)} - Rq_{(i_luft_renset)} = \Delta Rq_{lur} \quad (4.10)$$

$$Ra_{(i_saltvann_urensset)} - Ra_{(i_saltvann_renset)} = \Delta Ra_{sur} \quad (4.11)$$

$$Rq_{(i_saltvann_urensset)} - Rq_{(i_saltvann_renset)} = \Delta Rq_{sur} \quad (4.12)$$

Hvor $Ra_{(i_luft_urensset)}$ er gjennomsnittlig ruhetsverdier etter slitasje ved urensset belegg i luft,

$Ra_{(i_luft_renset)}$ er gjennomsnittlig ruhetsverdier etter slitasje ved rensset belegg i luft, $Ra_{(i_saltvann_urensset)}$

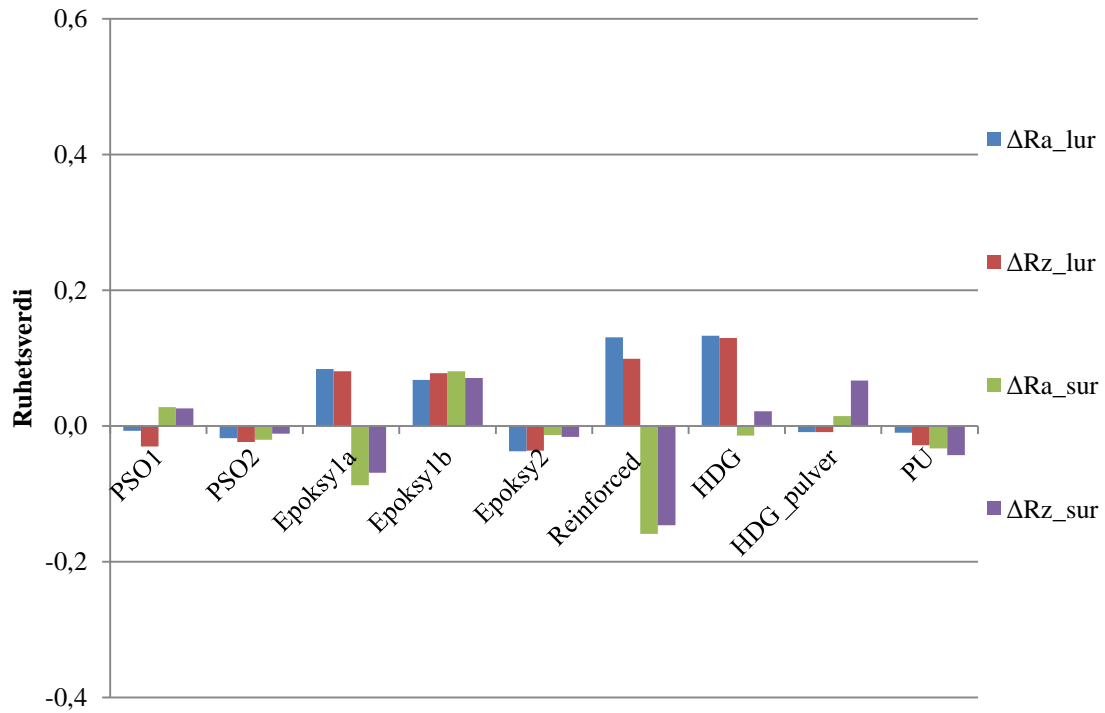
er gjennomsnittlig ruhetsverdier etter slitasje ved urensset belegg i saltvann, $Ra_{(i_saltvann_renset)}$ er

gjennomsnittlig ruhetsverdier etter slitasje ved rensset belegg i saltvann, ΔRa_{lur} er endring mellom

gjennomsnittlig ruhetsverdier etter slitasje ved urensset og rensset belegg i luft og ΔRa_{sur} er endring

mellom gjennomsnittlig ruhetsverdier etter slitasje ved urensset og rensset belegg i saltvann. Rz verdiene finnes på samme måte som Ra verdiene.

Beleggene i Figur 4.17 viser lave positive og negative endringer i ruhetsverdier.



Figur 4.17: Endring i gjennomsnittlige ruhetsverdier mellom etter slitasje urenset og renset i henholdsvis luft og saltvann.

5 DISKUSJON

5.1 Bruddevaluering etter skjærspenningstest

Etter en skjærspenningstest, fikk beleggene påvist ulike bruddtyper i form av kohesivt brudd eller brudd mellom to lag, se Figur 2.2 avsnitt 2.2.2. I PU oppstod det brudd mellom lag C og B, som tilsvarer toppstrøket og strøket under, se Tabell 0.4, i A.3, i Appendiks A. Bruddet oppstår mellom to lag, noe som indikerer at heften svikter mellom strøkene. De ulike PU-prøvene har en strekkfasthet som varierer mellom 3,8 til 8,9 MPa, dette tyder på at heften er varierende mellom lagene og dermed lite pålitelig når den blir utsatt for skjærkrefter.

For PSO2 viser de fleste prøvene både brudd i B (første strøk) og brudd mellom lagene C og D, se bildet Figur 4.4c. Dette vil si at PSO2 svikter i heften mellom to lag og et kohesivt brudd oppstår i B. B er et strøk av Epoksy sinkrik primer og brudd i dette området kan skyldes at epoksyen har et høyt sinkinnhold. PSO2-prøvene har en strekkfasthet som varierer lite i forhold til hverandre, se Tabell 0.4 i A.3, i Appendiks A. Den lille variasjonen i strekkfasthet for PSO2-prøvene, kan skyldes det kohesive bruddet. Dette kan tyde på at kohesivt brudd er å foretrekke fremfor brudd mellom to lag. PSO2 vil i dette tilfellet være mer pålitelig enn PU når den blir utsatt for skjærkrefter, fordi for PU varierer heften mye mer mellom strøkene.

Reinforced, HDG og HDG_pulver får alle brudd mellom – (toppstrøk) og Y (lim). Dette betyr at heften mellom toppstrøket og limet har sviktet først. HDG har høy hardhet og danner en intermetallisk fase mellom substratet, se Figur 4.1 [25]. Kombinasjonen av høy hardhet og god heft mellom toppstrøk og substratet, kan være grunnen til brudd mot limet. Limets adhesjon til toppstrøket er svakere enn selve belegget og kan dermed svikte først. HDG-prøvene har ikke stor variasjon i strekkfasthet, dette tyder på at heften mellom lim og toppstrøk har vært sterkt, men ikke sterkt nok til at belegget sviktet først.

HDG _pulver har ikke like høy hardhet som HDG og den har de laveste ruhetsverdiene blant beleggene, med en gjennomsnittlig ruhet på 0,3, se Tabell 4.6. HDG_pulver- prøvene har en strekkfasthet som varierer mellom 9,6 og 4,7 MPa, noe som kan tyde på at beleggets ruhet bidrar til varierende heft, slik at brudd oppstår mellom – (toppstrøk) og Y (lim).

Reinforced fikk brudd mellom – (toppstrøk) og Y (lim) og er blant de beleggene med høyeste ruhetsverdi, samtidig som Reinforced har den laveste hardheten, se Figur 4.1. Reinforced -prøvene har en strekkfasthet som varierer mellom 3,7 til 9,1 MPa, hvor en kombinasjon av glasspartikler på overflaten og lav hardhet kan være grunnen til varierende heft. Figur 4.4d viser bruddflaten til belegget hvor motkomponenten har et tynt lag med belegg på overflaten hvor kombinasjon av glasspartikler og lav hardhet kan ha bidratt til brudd.

Epoksybeleggene har lik oppførsel i brudd, hvor tilnærmet 100 % kohesivt brudd oppstår i B, se Tabell 0.4 og Tabell 0.5, i A.3, i Appendiks A. Epoksy1b og Epoksy2- prøvene har ganske like strekkfastheter. Epoksy1a-prøvene skiller seg ut ved at de har strekkfastheter som går helt ned mot 7,7 MPa. Forskjellen mellom Epoksy1a og Epoksy1b er at de har ulik herdetid, noe som kan være grunnen til dette avviket. Krupicka m. fl. [21] støtter denne antagelsen, se avsnitt 2.1.2.

PSO1-prøvene er de beleggene med størst strekkfasthet og opptil 100 % kohesivt brudd i C, se Tabell 0.4, i A.3, i Appendiks A. PSO1-prøvene har strekkfastheter som varierer lite i forhold til hverandre og vil være det belegget som er mest pålitelig når det blir utsatt for skjærspenning. PSO1 er ikke så ulik PSO2 bortsett fra et mindre strøk med modifisert epoksy, se forskjellene mellom beleggene Tabell 3.1. PSO2 får brudd i B som vil si brudd i epoksy sinkrik primer. Hvorfor ikke bruddet oppstår i det samme området for PSO1 er uvisst og det må dermed utføres videre testing av disse beleggene for å kunne finne ut av dette.

5.2 Slagfasthet

I Tabell 4.1 får HDG og epoksy- beleggene godkjent ved alle energiverdier. Årsaken til god slagfasthet kan skyldes at beleggene har god heft mellom strøkene. På HDG danner sinkbelegget en intermetallisk fase mot substratmaterialet som dermed gir god metallurgisk binding og heft til stålet [25]. Epoksy- beleggene har også god heft mellom strøkene, se i A.3, Appendiks A, hvor strekkfasthetene for epoksy- beleggene viser høye verdier.

HDG_pulver og PSO- beleggene fikk påvist sprekkdannelser ned til substratmaterialet ved relativt lave energiverdier, fra 10 J og oppover, se Figur 4.1. PSO- beleggene er blant de beleggene med lavest hardhet og sprekkdannelsen på PSO2 og PSO1, kan derfor skyldes den lave hardheten beleggene har. HDG_pulver er ikke sandblåst før toppstrøket er lagt på. Ruheten er derfor lav mellom belegg og metall. Ved slag vil spenninger oppstå sideveis når belegget deformeres. Lav ruhet mellom belegg og metall kan dermed gi dårligere heft og være grunnen til at sprekker ble dannet ved de lave energiverdiene.

Reinforced har lavest hardhetsverdier blant beleggene, med en hardhetsverdi på rundt 1,5 MPa. Reinforced viste ikke tegn til sprekkdannelse ned til substratet ved noen av energiverdiene, men det er observert avflaking ved 18 og 19 J, se Tabell 4.1. Grunnen til at det ikke er observert sprekkdannelse ned til substratet er trolig tykkelsen på belegget, se Tabell 3.1.

PU har en lav hardhetsverdi, men samtidig god slagfasthet, hvor sprekkdannelse ned til substratet oppstår ved 18 J. Polyuretanbelegg er kjent for å ha lang tøyning, noe som også kan være tilfellet for PU [5]. Høy elastisitet bidrar med å ta opp energien i slaget og dermed være årsaken til den gode slagfastheten [34].

5.3 Elastisitetsmodul

Figur 4.2 viser spenningstøyningskurver hvor beleggene viser tilnærmet like elastisitetsforløp. Grunnen til at elastisitetsforløpene er like er fordi samme L_0 verdi er brukt for alle beleggene, se ligning 2.2. PS1 er strekktestet i Knudsen m. fl [5] sin artikkel og er det samme belegg som PSO2 i denne oppgaven. Elastisitetsmodul fra PS1 er gjort om til skjærmodul ved hjelp av ligning 2.11 og ved hjelp av iterering med ligning 2.2, er L_0 funnet. Elastisitetsmodulen er dermed ikke pålitelig for de andre beleggene utenom for PSO2 og Gummi. Elastisitetsmodulen for gummi er funnet på samme måte som for PSO2, men hvor elastisitetsmodulen for Gummi er oppgitt internt i SINTEF. Elastisitetsmodulen finnes ikke for de resterende beleggene, slik at samme L_0 -verdi er brukt i alle spenningstøyningskurvene, for å kunne komme seg videre i oppgaven. Til tross for at elastisitetsmodulen for de beleggene som er omtalt ikke er pålitelige, vil fremdeles strekkfastheten være pålitelig.

Grunnen til at L_0 -verdien ikke er et problem ved strekking av rene materialer, er fordi et ekstensiometer blir brukt for å måle tøyningen. Ved skjærspenningstesten, er ekstensiometer ikke mulig å bruke, fordi belegget er skjult mellom to metallflater, se Figur 3.4.

Knudsen m. fl. [5] utførte strekktest på andre epoksybelegg, hvor elastisitetsmodulen for epoksy ble vist å ha en tilnærmet lik elastisitetsmodul, som PSO2. Epoksybeleggene i denne oppgaven kan dermed oppføre seg på samme måte. Dette er usikkert og det må dermed utføres videre testing av disse beleggene for å kunne finne ut de virkelige elastisitetsmodulene.

5.4 Slitasje

Figur 4.5 viser gjennomsnittlig friksjonskoeffisient plottet mot tid, hvor slitasje er utført i luft i 700 s. Alle beleggene bortsett fra Reinforced har en synkende friksjonskoeffisient over tid. Den økende friksjonskoeffisienten for Reinforced kan skyldes avrivning av glasspartikler. Reinforced har også de største ruhetsverdiene blant beleggene, dette kan i kombinasjon med glasspartikler bidra med å øke friksjonskoeffisienten, se Tabell 4.6. Hardheten til Reinforced er på rundt 1,5 HV, noe som er lavere enn for de andre beleggene, se Figur 4.1. Den lave hardheten støtter opp om at avrivning av glasspartikler kan oppstå. I Figur 4.7 viser Reinforced også størst massetap blant beleggene ved slitasje i både luft og saltvann. Kombinasjonen av høy friksjonskoeffisient, høy ruhet, lav hardhet og bidraget fra glasspartikler, kan være grunnen til massetapet. Bjørgum m. fl. [3] støtter også opp om dette ved at det ble observert en mye større slitasjedybde og bredde for Reinforced enn for de andre beleggene, se Tabell 2.2 avsnitt 2.1.1.

Ved slitasje i luft viser PSO2 først en synkende friksjonskoeffisient med tid og deretter øker friksjonskoeffisienten brått ved 400 s, se Figur 4.5. PSO2 har en lav hardhet på rundt 5 HV, dette kan føre til at partikler flusser av ved slitasje og øker friksjonskoeffisienten. PSO2 viser et mye høyere massetap ved slitasje i luft enn i saltvann, se Figur 4.7. Bjørgum m. fl. [3] oppdaget også et lavere massetap for PSO2 ved slitasje i vann i forhold til de andre beleggene som var testet, se Tabell 2.2. Grunnen til at massetapet er så mye lavere ved slitasje i saltvann, kan være at gummi bidrar til å senke massetapet ved å danne et beskyttende lag utenpå PSO2. Figur 0.20, i B.3, i Appendiks B, viser også at gummi også blir avsatt på fender- rørene i virkeligheten. Figur 4.9 viser at PSO2 har positive ΔRa_{su} og ΔRz_{su} verdier, dette kan indikere på at belegget har et gummisjikt på beleggoverflaten, som beskytter mot slitasje.

Det høye massetapet ved slitasje i luft kan komme av at ΔRa_{lu} og ΔRz_{lu} verdiene for PSO2 er tilnærmet lik null, noe som tyder på at det ikke er noe gummisjikt på beleggoverflaten som beskytter mot slitasje, se Figur 4.7.

Figur 4.5 og Figur 4.6 viser gjennomsnittlig friksjonskoeffisient plottet mot tid, i luft og vann, hvor Epoksy1a og Epoksy1b viser et tilnærmet likt slitasjeforløp. Epoksy1b viser et høyere massetap enn Epoksy 1a ved både slitasje i luft og i vann, se Figur 4.7. Det som skiller beleggtypene er at de har ulikt herdetid. Epoksy1a har en herdetid på 3 år, mens Epoksy1b har en herdetid på 3 måneder. Herdetid har en effekt på hardheten på belegget, se hardhetsforskjellene i Figur 4.1. Effekten av økt hardhet ved økt herdetid oppdaget også Krupicka m. fl. [21], se avsnitt 2.1.2. Ved økt hardhet vil

belegget kunne motstå større slitasje, noe som kan være en av faktorene til hvorfor massetapet er ulikt for de to beleggene.

Hardhet og herdetiden til Epoksy2 er tilnærmet lik som for Epoksy1b, se Figur 4.7. Epoksy2 viser på sammen måte som Epoksy 1 b et større massetap ved slitasje, enn Epoksy1a. Dette støtter antagelsen om at lang herdetid og høy hardhet fører til mindre massetap.

HDG viser tilnærmede like verdier for massetap ved slitasje i luft og saltvann og har massetap som er høyere enn noen av de andre beleggene, se Figur 4.7. HDG har de høyeste hardhetsverdiene blant beleggene og massetapet står ikke i samsvar med den høye hardhetsverdien. Dette fant også Carlsson m. fl. [26] ut, som blant annet slitasjetestet HDG, hvor det ble oppdaget større slitasje på HDG fremfor de andre beleggene. Selve grunnen til hvorfor HDG får massetap ved slitasje er usikkert. HDG er et metallisk sinkbelegg og kan oppføre seg annerledes enn de andre polymerbelegg.

I Figur 4.7 viser HDG_pulver lave verdier i massetap ved slitasje i luft og saltvann(prøve 3). Grunnen til det lave massetapet kan være fordi HDG_pulver har lave ruhetsverdier og høye hardhetsverdier, se Figur 4.1 og Tabell 4.6. Massetapet som prøve 4 fra HDG_pulver viser, skiller seg ut fra resten, ved at det har et høyere massetap. Grunnen til dette kan være fordi at partikler har løsnet og bidratt med økt massetap.

Under slitasjetestene ble gummikomponenten rask nedgradert i både luft og saltvann, se Figur 4.8. Beleggoverflatene fikk også store mengder med slitasjespor fra gummikomponent, se Figur 4.10 og Figur 4.11. I virkeligheten oppstår også dette, hvor det er observert store mengder med slitasjespor på fender- rørene fra gummifender, se Figur 0.20, i B.3, i Appendiks B.

De fleste beleggene som er slitasjetestet viser en synkende friksjonskoeffisient over tid. Ved fortøyning mellom båt og fender- rør, er det ønskelig med høyest mulig friksjon, slik at drift og vedlikeholdspersonell kommer seg trygt over på vindturbinen. Blant beleggene er det kun Reinforced som skiller seg ut, med en økende friksjonskoeffisient over tid, ved slitasje i luft, men det er også det belegget som får høyest massetap, se Figur 4.5.

5.5 Overflateanalyse

Figur 4.9 viser et søylediagram over endringen mellom gjennomsnittlige ruhetsverdier før slitasje og etter slitasje ved urensset belegg i henholdsvis luft og saltvann. De fleste beleggene viser positive endringer i ruhetsverdier, bortsett fra Epoksy1a og Epoksy1b. De positive endringene i ruhetsverdiene kan skyldes at gummien dekker overflaten, og bidrar med å senke ruheten ved slitasje. Epoksy1a og Epoksy1b viser negative endringer i ruhetsverdier, dette kan skyldes at overflaten blir ujevnt dekket av gummien.

Figur 4.12 viser et søylediagram over endringen mellom gjennomsnittlige ruhetsverdier før slitasje og etter slitasje ved rensset belegg i henholdsvis luft og saltvann. Søylediagrammet viser en ganske lik trend som søylediagrammet i Figur 4.9, noe som kan tyde på beleggene fortsatt er dekket med gummi på overflaten etter rensing. De beleggene som skiller seg ut, er Reinforced og HDG. Reinforced får tilnærmet lik null i ΔRa_{su} og ΔRz_{su} verdiene. Årsaken til dette kan være at gummisjiktet vil forsvinne etter rensing av Reinforced og overflaten vil dermed få en tilnærmet lik topografi som før slitasje. For HDG øker ΔRa_{lu} og ΔRz_{lu} verdiene noe i forhold til ΔRa_{lr} og ΔRz_{lr} , dette kan skyldes at rensingen fjerner partikler og jevner ut topografien slik at ruheten blir lavere i forhold til før slitasje.

Til tross for at beleggene muligens blir beskyttet av gummisjiktet er det funnet massetap for de ulike beleggene, se Figur 4.7. De beleggene med høyest ruhetsverdier før slitasje er blant de beleggene som får mest massetap, se Figur 4.7 og Tabell 4.7. Årsaken til massetapet kan være at gummien fyller gropene, samtidig som overflatebeleggets topper blir slitt bort, se slitasjespor på beleggene etter de er rensset med etanol i Figur 4.13, Figur 4.14 og Figur 4.15. Beleggtapet er fortsatt såpass lavt at videre testing må bli gjort på beleggene for å kunne få bekreftet dette.

Figur 4.17 viser et søylediagram over endringen mellom gjennomsnittlige ruhetsverdier etter slitasje ved rensset og urensset belegg i henholdsvis luft og saltvann. De fleste beleggene viser små endringer i ruhetsverdier, noe som bekrefter at gummisjiktet fortsatt er til stede etter rensing med etanol. De positive endringene i ruhetsverdier kan skyldes at gummisjiktet fortsatt er tilstede og kan også tyde på at beleggene gir en bedre heft til gummien fordi den ikke forsvinner etter rensing av etanol. De negative endringene i ruhetsverdier kan skyldes at rensingen med etanol har ført til ujevn overflate.

I slitasjetesten ble friksjonskoeffisient plottet mot tid. Det ble oppdaget at de fleste beleggene fikk synkende friksjonskoeffisient med tid. Ut fra overflateanalysen kan man bekrefte at gummisjiktet som dannet seg på beleggoverflaten bidro til at friksjonskoeffisienten sank.

5.6 Årsaken til skade i belegg på grunn av fender

Blant belegget som er testet i denne oppgaven er det oppdaget ulike faktorer som kan ha vært årsaken til skade i belegg på grunn av fender.

- Det belegget som fikk påvist høyest massetap inneholdt glasspartikler, som kan ha falt av under slitasje og bidratt til skade på beleggoverflaten. Glasspartikler kan dermed være årsaken til skade i belegg på grunn av fender.
- De beleggene med høyest ruhet fikk påvist størst massetap ved slitasje. Beleggoverflatens topper kan ha blitt slitt av og dermed avgitt partikler som kan ha bidratt til større massetap. Den høye ruheten kan være årsaken til skade i belegg på grunn av fender.
- De beleggene med dårligst heft mellom strøkene fikk lettere brudd når spenninger ble påført belegget. Dårlig heft kan dermed være årsaken til skade i belegg på grunn av fender.
- De beleggene med kort herdetid har et høyere massetap ved slitasje, enn de med lang herdetid. Kort herdetid kan dermed være årsaken til skade på belegg ved slitasje mot fender.

5.7 Valg av belegg for fendere

Egenskaper belegg som skal brukes på fender- rør bør ha er god heft mellom strøkene, høy slagfasthet, lav ruhet. Basert på testene utført i denne oppgaven viser det seg at lang herdetid vil øke slitasjemotstandigheten til belegget. Det ble også funnet at det belegget som inneholdt glasspartikler fikk høyest massetap, derfor kan det være en fordel å velge et belegg som ikke inneholder glasspartikler.

Det belegget som oppførte seg best i forhold til de egenskapene man ønsker for et belegg som skal være på fender- rør er Epoksy1a. Epoksy1a har god slagfasthet og viser gode hefteegenskaper i skjærspenningstesten. Den har en herdetid på 3 år og viser et lavt massetap ved slitasjetest. Epoksy1a viser god slitasjemotstandighet og er det belegget av de som er testet i denne oppgaven, som anbefales for fender- rør.

6 KONKLUSJON

Synkende friksjonskoeffisient over tid er observert for de fleste beleggene, ved slitasje i både luft og saltvann. Ruhetsmålinger før og etter slitasje og bilder i mikroskop, indikerer på at de fleste beleggene vil få avsatt et gummisjikt på overflaten.

På polysiloksan ble det oppdaget at ved slitasje i vann ble det avsatt et gummisjikt på belegget, som muligens kan virke beskyttende og hindre massetap. Det gummisjiktet oppstod ikke ved slitasje i luft, og belegget fikk massetap.

For epoksybeleggene og varmforsinket stål var slagfastheten bedre enn for de andre beleggene, dette skyldes god heft mellom lagene.

Ved slitasjetesting av to like epoksybelegg, ble det observert et høyere massetap for det ene epoksybelegget fremfor det andre. Det som skiller de ulike beleggtypene er herdetid. Det belegget med lengst herdetid fikk påvist lavere massetap ved slitasje, noe som tilsier at lang herdetid styrker slitasjeegenskapene til belegget.

Ved skjærspenningstesten ble det oppdaget ulike bruddtyper for beleggene. Det oppstod kohesivt brudd og brudd i grenseflaten mellom to strøk. Årsaken til de ulike bruddtypene skyltes heft egenskapene mellom strøkene og adhesjons egenskaper mellom lim og overflate. Det ble oppdaget en høyere og mer stabil strekkfasthet på de beleggene som fikk brudd kohesivt.

Polysiloksan fikk påvist brudd i strøket epoksy sinkrik primer, i skjærspenningstesten. Årsaken til brudd kan skyldes at strøket har et høyt sinkinnhold.

Ved fortøyning av båt er høyest mulig friksjon ønskelig, slik at drift og vedlikeholdspersonell kommer seg trygt over på vindturbinen. Blant beleggene er det kun polyester som får en økende friksjonskoeffisient over tid, ved slitasje i luft, men det er også det belegget som får påvist høyest massetap.

Testene i denne oppgaven viser at det er ulike årsaker til at skade oppstår i belegg på grunn av fender. Det er funnet at glasspartikler, høy ruhet, dårlig heft mellom strøkene og kort herdetid kan ha vært årsaken til skade på belegg på grunn av fender.

Et Epoksy belegg er funnet til å være det som vil være best egnet til å brukes på fender- rør.

7 VIDERE ARBEID

Videre arbeid blir å kunne utføre slitasjetest i stor skala, slik at slitasjetesten kan utføres utover lengre tid samtidig som et høyere massetap kan kunne fremkomme i testen. Det vil i tillegg være en mulighet til å støtte de antagelsene som er gjort i denne oppgaven.

Ved fortøyning mellom båt og vindturbin vil det forekomme slitasje i luft og saltvann om hverandre. Det vil derfor være gunstig å utføre slik slitasjetesting for å kunne se om kombinasjonen av slitasje i luft og saltvann kan påvirke beleggoverflaten på en annen måte enn det som er oppdaget i denne oppgaven.

Elastisitetsmodulen er kun funnet for det ene polysiloksan belegget og gummi. Elastisitetsmodulen for de resterende beleggene er ønskelig å finne ved videre arbeid for å kunne se om det er en relasjon mellom beleggernes elastisitetsmodul og slitasjeegenskaper.

Ved slitasje er to prøver utført i luft og to prøver utført i vann fra hvert belegg. Flere tilsvarende tester fra hvert belegg er ønskelig, for å kunne støtte opp om beleggernes massetap funnet i denne oppgaven.

8 TAKK TIL

Denne prosjektoppgaven er skrevet på instituttet for materialteknologi ved NTNU gjennom vår 2012.

Jeg ønsker å takke min veileder Ole Øystein Knudsen som har støttet og veiledet meg gjennom denne prosjektoppgaven. Jeg ønsker å takke ass. veileder på SINTEF Astrid Bjørgum som har hjulpet meg og gitt meg verdifulle kommentarer gjennom prosjektarbeidet.

Ønsker å takke Sebastien Equey og Sergio Armada som har gitt meg gode råd om hvordan utføre de tribologiske testene.

Tilslutt ønsker jeg å takke de ansatte på SINTEF Corrosion and Surface Technology laboratoriet, Ann-Karin Kverbråten og Nils Inge Nilsen, som har hjulpet meg med å sette opp utstyr og vist hvordan testene skal utføres.

9 REFERANSE

1. Mühlberg, K., *CORROSION PROTECTION FOR WINDMILLS ONSHORE AND OFFSHORE*. 2004.
2. Thick, J. and S. Lane, *Offshore Corrosion Protection of Wind Farms*. International Protective Coatings, 2004.
3. Astrid Bjørgum, O.Ø.K., Ann-Karin Kvernbråten, Nils-Inge Nilsen, SINTEF Materials and Chemistry, , *Corrosion protecting coating systems in Arctic areas*. 2011.
4. Bastiko, A., *Mekaniske egenskaper til beleggsystemer ved lav temperatur, Prosjektoppgave*. 2011.
5. Knudsen, O., et al., *Internal Stress and Mechanical Properties of Paint Films*. CORROSION 2007, 2007.
6. Monetta, T., et al., *Protective properties of epoxy-based organic coatings on mild steel*. Progress in Organic Coatings, 1993. **21**(4): p. 353-369.
7. Aggarwal, L., P. Thapliyal, and S. Karade, *Anticorrosive properties of the epoxy-cardanol resin based paints*. Progress in Organic Coatings, 2007. **59**(1): p. 76-80.
8. Bautista, Y., et al., *Correlation between the wear resistance, and the scratch resistance, for nanocomposite coatings*. Progress in Organic Coatings, 2010.
9. Sanes, J., F. Carrión, and M. Bermúdez, *Effect of the addition of room temperature ionic liquid and ZnO nanoparticles on the wear and scratch resistance of epoxy resin*. Wear, 2010. **268**(11-12): p. 1295-1302.
10. Jia, Q., et al., *The mechanical properties and tribological behavior of epoxy resin composites modified by different shape nanofillers*. Polymers for advanced technologies, 2006. **17**(3): p. 168-173.
11. Zhang, M.Q., et al., *Effect of particle surface treatment on the tribological performance of epoxy based nanocomposites*. Wear, 2002. **253**(9-10): p. 1086-1093.
12. Chang, L., et al., *Tribological properties of epoxy nanocomposites.: I. Enhancement of the wear resistance by nano-TiO₂ particles*. Wear, 2005. **258**(1-4): p. 141-148.
13. Veena, M.G., et al., *Tribological and electrical properties of silica-filled epoxy nanocomposites*. Polym. Compos., 2011. **32**(12): p. 2038-2050.
14. Patnaik, A. and A.D. Bhatt, *Mechanical and dry sliding wear characterization of epoxy-TiO₂ particulate filled functionally graded composites materials using Taguchi design of experiment*. Materials & Design, 2011. **32**(2): p. 615-627.
15. Xing, X. and R. Li, *Wear behavior of epoxy matrix composites filled with uniform sized sub-micron spherical silica particles*. Wear, 2004. **256**(1-2): p. 21-26.
16. McCook, N., et al., *Wear resistant solid lubricant coating made from PTFE and epoxy*. Tribology Letters, 2005. **18**(1): p. 119-124.
17. Ramezanzadeh, B., et al., *Effect of polysiloxane additives on the scratch resistance of an acrylic melamine automotive clearcoat*. J. Coat. Technol. Res., 2010: p. 1-12.
18. Zhao, G., T. Wang, and Q. Wang, *Surface modification of carbon fiber and its effects on the mechanical and tribological properties of the polyurethane composites*. Polym. Compos., 2011. **32**(11): p. 1726-1733.
19. Yusoh, K., J. Jin, and M. Song, *Subsurface mechanical properties of polyurethane/organoclay nanocomposite thin films studied by nanoindentation*. Progress in Organic Coatings, 2010. **67**(2): p. 220-224.
20. Moseh, M. and N. Suh, *Investigation of dry friction of submicrometer thick polyurethane films on a hard, smooth substrate*. Surface and Coatings Technology, 1996. **85**(3): p. 138-145.

21. Krupička, A., et al., *The effect of long-term recovery and storage on the mechanical response of ductile poly (urethane) coatings*. Progress in Organic Coatings, 2003. **48**(1): p. 14-27.
22. Zhou, S., et al., *Study on the morphology and tribological properties of acrylic based polyurethane/fumed silica composite coatings*. Journal of materials science, 2004. **39**(5): p. 1593-1600.
23. Zhao, G., T. Wang, and Q. Wang, *Studies on wettability, mechanical and tribological properties of the polyurethane composites filled with talc*. Applied surface science, 2011.
24. Tian, J. and Y. Huang, *Antiwear and lubrication properties of polyurethane/polytetrafluoroethylene-bonded coating*. J. Appl. Polym. Sci., 2002. **86**(13): p. 3454-3459.
25. Safaeirad, M., M. Toroghinejad, and F. Ashrafizadeh, *Effect of microstructure and texture on formability and mechanical properties of hot-dip galvanized steel sheets*. Journal of Materials Processing Technology, 2008. **196**(1-3): p. 205-212.
26. Carlsson, P., U. Bexell, and M. Olsson, *Friction and wear mechanisms of thin organic permanent coatings deposited on hot-dip coated steel*. Wear, 2001. **247**(1): p. 88-99.
27. ISO-4624, *Paints and varnishes -- Pull-off test for adhesion*, 2002.
28. D1002-10, A., *Standard test method for apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading (Metal-to-metal)*. 2010.
29. ISO-6272-1, *Paints and varnishes. Rapid deformation(impact resistance) tests Part 1: Falling weight test, large area indenter*. 2011.
30. ISO-8503-4, *Preparation of steel substrates before application of paints and related products -- Surface roughness characteristics of blast-cleaned steel substrates -- Part 2: Method for the grading of surface profile of abrasive blast-cleaned steel -- Comparator pro*. 2012.
31. Stachowiak, G.W. and A.W. Batchelor, *Engineering tribology*2005: Butterworth-Heinemann.
32. Ashton, J., J.C. Halpin, and P.H. Petit, *Primer on composite materials: analysis*1969: Technomic Stamford, Connecticut.
33. ISO-14705, *Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) -- Test method for hardness of monolithic ceramics at room temperature*. 2008.
34. Perkins, W.G., *Polymer toughness and impact resistance*. Polymer Engineering & Science, 1999. **39**(12): p. 2445-2460.

A APPENDIKS

A.1 Symbolliste

Tabell 0.1: Symboliste hvor symboler som er brukt i denne oppgaven blir beskrevet.

Symbol	Beskrivelse og benevning
A	Arealet av et område [mm^2].
b	halvparten av kontaktflatens bredde [mm].
E	Youngs elastisitetmodul [MPa].
E_A	Youngs elastisitetmodul til komponent A [MPa].
E_B	Youngs elastisitetmodul til komponent B [MPa].
E'	Den reduserte Young's modul for komponent A og B [MPa].
E_p	Potensiell energi [J].
F	Kraft i skjærspenningstest [N].
G	Skjærmodul [MPa].
g	gravitasjonskraft [m/s^2].
HV	Vickershardhet [N/mm^2].
h	Høyden [m].
I	Den halve lengden av kontaktflaten [mm].
L_0	Den opprinnelige lengden [mm].
L	Prøvens lengde [mm].
P_{\max}	Maksimal kontaktrykk[MPa].
$P_{\text{gjennomsnitt}}$	Gjennomsnittlig kontaktrykk[MPa].
R_A	Krumningsradius for komponent A [mm].
R_B	Krumningsradius for komponent B [mm].
R'	Reduserte krumningsradiusen [mm].
Ra	Gjennomsnittlig ruhet over et gitt plan.
Rz	Ruhet i kvadratisk middelvei.
Rz	Gjennomsnittlig sammenheng i ruhet mellom de fem høyeste toppene og de.
W	Kraft i slitasjetest [N].
Y_p	Høyeste toppunkt [mm].
Y_v	Laveste toppunkt [mm].
Z	Avstanden mellom middellinjen og høyden [mm].

Tabell 0.2: Symbolliste hvor symboler som er brukt i denne oppgaven blir beskrevet.

Symbol	Beskrivelse og benevning
σ	Skjærspenning [MPa].
ε	Tøyning.
Δm	Beleggtap [g].
ΔL	Forlengelse [mm].
$ Z $	Avstanden mellom middellinjen og er den absolutte høyden [mm].
ν	Poissons tall.
ν_A	Poissons tall for komponent A.
ν_B	Poissons tall for komponent B.
τ_{\max}	Maksimal skjærspenning [MPa].

A.2 Hardhetsverdier

Tabell 0.3: Hardhetsverdier til beleggsystemene ved romtemperatur.

VICKERS MIKROHARDHETSMÅLINGER								
ROMTEMPERATUR								T= 25 °C
HDG	HDG_pulver	Reinforced	Epoksy1b	Epoksy1a	Epoksy2	PSO1	PSO2	PU
58.4	15.5	1.71	12.6	15	12.3	9.5	4.36	3.68
58.7	15.2	1.46	12.6	15.7	11.7	9.35	4.36	4.31
59.8	14.2	1.83	13.5	17	11.1	9.15	4.32	4.2
58.4	15	1.62	12.7	15.5	12.2	9.21	4.72	4.31
54.8	15.6	1.71	11.8	14	13.6	9.34	6.22	3.85
53.4	15	1.94	11.2	14.9	12.9	9.09	5.64	4.44
53.7	14.8	2.24	14.7	15.2	13.6	9.22	6.66	4.45
52.7	15.2	1.9	13.5	15.5	12.8	9.43	6.41	4.14
59.4	16.5	2.85	12.4	14.5	12.1	9.85	6.18	4.19
51.4	15	1.76	12.7	16.5	12.7	9.95	5.44	4.53
55.9	16.3	1.26	12.7	14.4	12.7	9.79	5.89	4.4
60.2	15.6	0.9	12.6	14	12.8	9.12	5.32	4.82
61	16.4	0.87	11.4	15.6	12.2	9.42	6.62	4.21
57.5	15.7	1.08	12.1	15	11.8	9.14	5.25	4.42
51.8	15.7	1.49	12.5	13.6	11.4	9.59	6.16	4.39
59.6	15.5	1.52	12.5	14.8	13.5		4.51	4.39
60.1	15.5	1.49	13.8	14.7	12.3		6.16	4.23
	15.5	1.47	12.7	15.1	11.9		7.1	4.69
	14.9	1.29	11.2	14.9	13.2		6.01	
	14.7	1.98	13.8	17.1	11.6		5.92	
	16.1	1.77	13.5	14.8			5.76	
	15.2	2.58	13.5	14.4			6.17	
		2.81		15			5.15	
		2.03		13.5			4.67	
				14.5			4.62	
							4.45	
							4.76	

A.3 Spenning og tøyningsresultater

Tabell 0.4: Evaluering av bruddflaten i henhold til standard ISO 4624 (2002), ” Paints and varnishes -- Pull-off test for adhesion ” [27].

LAP SHEARTEST VED ROMTEMPERATUR											
Belegg	Nr.	A [%]	A/B [%]	B [%]	B/C [%]	C [%]	C/D [%]	D [%]	-/Y	Y/Z	Strekfasthet [MPa]
PU	1	-	-	-	-	-	100	-	-	-	7,9
PU	2	-	-	-	-	-	100	-	-	-	4,3
PU	3	-	-	-	-	-	100	-	-	-	3,8
PU	4	-	-	-	-	-	100	-	-	-	4,4
PU	5	-	-	-	-	-	100	-	-	-	4,4
PU	6	-	-	-	-	-	100	-	-	-	7,9
PU	7	-	-	-	-	-	100	-	-	-	8,9
PSO2	1	-	-	-	5	-	95	-	-	-	10,3
PSO2	2	-	-	-	45	-	55	-	-	-	10,0
PSO2	3	-	-	50	-	-	50	-	-	-	9,6
PSO2	4	-	-	20	-	-	80	-	-	-	9,9
PSO2	5	-	-	60	-	-	40	-	-	-	10,5
PSO2	6	-	-	70	-	-	30	-	-	-	9,3
Epoksy1a	1	-	-	100	-	-	-	-	-	-	9,6
Epoksy1a	2	-	-	100	-	-	-	-	-	-	11,3
Epoksy1a	3	-	-	100	-	-	-	-	-	-	11,4
Epoksy1a	4	-	-	100	-	-	-	-	-	-	7,7
Epoksy1a	5	-	-	100	-	-	-	-	-	-	9,8
Epoksy1a	6	-	-	100	-	-	-	-	-	-	10,1
Epoksy1a	7	-	-	100	-	-	-	-	-	-	9,8
Reinforced	1	-	-	-	-	-	-	-	100	-	5,2
Reinforced	2	-	-	-	-	-	-	-	100	-	6,6
Reinforced	3	-	-	-	-	-	-	-	100	-	3,7
Reinforced	4	-	-	-	-	-	-	-	100	-	5,6
Reinforced	5	-	-	-	-	-	-	-	100	-	9,1
Reinforced	6	-	-	-	-	-	-	-	100	-	7,7
PSO1	1	-	-	-	-	100	-	-	-	-	13,3
PSO1	2	-	-	50	-	50	-	-	-	-	13,9
PSO1	3	-	-	-	-	100	-	-	-	-	12,5
PSO1	4	-	-	-	-	80	-	-	20	-	14,8
PSO1	5	-	-	-	-	100	-	-	-	-	15,1
PSO1	6	-	-	-	-	70	-	-	30	-	13,7

Tabell 0.5: Evaluering av bruddflaten i henhold til standard ISO 4624 (2002), ” Paints and varnishes -- Pull-off test for adhesion ”.

LAP SHEARTEST VED ROMTEMPERATUR											
Belegg	Nr.	A [%]	A/B [%]	B [%]	B/C [%]	C [%]	C/D [%]	D [%]	-/Y	Y/Z	Strekfasthet [MPa]
HDG_pulver	1	-	-	-	20	-	-	-	80	-	6,9
HDG_pulver	2	-	-	-	-	-	-	-	100	-	5,1
HDG_pulver	3	-	-	-	-	-	-	-	100	-	4,6
HDG_pulver	4	-	-	-	-	-	-	-	100	-	9,4
HDG_pulver	5	-	-	-	-	-	-	-	100	-	9,7
HDG_pulver	6	-	-	-	-	-	-	-	100	-	9,4
HDG	1	-	-	-	-	-	-	-	100	-	8,8
HDG	2	-	10	-	-	-	-	-	90	-	11,0
HDG	3	-	-	-	-	-	-	-	100	-	8,5
HDG	4	-	-	-	-	-	-	-	100	-	10,7
HDG	5	-	-	-	-	-	-	-	100	-	11,6
Epoksy2	1	-	-	100	-	-	-	-	-	-	10,9
Epoksy2	2	-	-	10	-	5	-	-	-	85	10,5
Epoksy2	3	-	-	100	-	-	-	-	-	-	11,8
Epoksy2	4	-	-	90	-	-	-	-	-	10	11,4
Epoksy2	5	-	-	100	-	-	-	-	-	-	10,8
Epoksy2	6	-	-	20	-	-	-	-	-	80	11,1
Epoksy2	7	-	-	85	-	5	-	-	-	10	10,9
Epoksy1b	1	-	-	90	-	-	-	-	-	10	11,5
Epoksy1b	2	-	-	80	-	-	-	-	-	20	11,4
Epoksy1b	3	-	-	60	-	-	-	-	-	40	11,3
Epoksy1b	4	-	-	100	-	-	-	-	-	-	12,0
Epoksy1b	5	-	-	50	-	-	-	-	-	50	11,7
Epoksy1b	6	-	-	95	-	-	-	-	-	5	11,1
Gummi	1	-	-	100	-	-	-	-	-	-	11,1
Gummi	2	-	-	100	-	-	-	-	-	-	6,3
Gummi	3	-	-	100	-	-	-	-	-	-	6,3
Gummi	4	-	-	100	-	-	-	-	-	-	11,3
Gummi	5	-	-	100	-	-	-	-	-	-	8,7
Gummi	6	-	-	100	-	-	-	-	-	-	9,0
Gummi	7	-	-	100	-	-	-	-	-	-	11,0

A.4 Vekt av belegg

Tabell 0.6: Vekt av beleggene før slitasjetest.

VEKT AV BELEGGEN FØR SLITASJE				
Belegg	Vekt 1. [g]	Vekt 2. [g]	Vekt 3. [g]	Vekt 4. [g]
HDG	77.6647	84.8797	77.1681	87.075
HDG_pulver	86.4936	80.6089	78.9342	84.4097
PSO1	84.4261	87.8775	81.8609	80.6273
PSO2	78.0762	77.1049	82.6022	80.1116
Epoksy1a	80.3261	83.753	80.4604	80.0648
Epoksy2	48.4783	47.5479	50.6483	50.781
Epoksy1b	50.3669	49.5371	50.28	46.5219
Reinforced	63.1119	53.6152	53.637	51.2782
PU	80.6627	84.4505	83.0288	80.861

Tabell 0.7: Vekt av belegg etter slitasjetest ved renset belegg i henholdsvis luft og saltvann.

VEKT AV BELEGGEN ETTER SLITASJETEST VED RENSET BELEGG				
Belegg	Vekt 1. [g] i luft	Vekt 2. [g] i luft	Vekt 3. [g] i saltvann	Vekt 4. [g] i saltvann
HDG	77.6583	84.8737	77.1600	87.0697
HDG_pulver	86.4927	80.6079	78.9327	84.3942
PSO1	84.4213	87.8750	81.8563	80.6194
PSO2	78.0717	77.0914	82.6014	80.1111
Epoksy1a	80.3202	83.7484	80.4574	80.0628
Epoksy2	48.4694	47.5382	50.6358	50.7675
Epoksy1b	50.3524	49.5269	50.2718	46.5089
Reinforced	63.0849	53.6042	53.6247	51.2252
PU	80.6591	84.4458	83.0263	80.8554

Tabell 0.8: Endringen mellom vekt av belegg før og etter slitasje i henholdsvis luft og saltvann.

Beleggtap				
Belegg	Slitasje i luft i 700 sek		Slitasje i saltvann i 1800 sek	
	Prøve 1. [g] i luft	Prøve 2. [g] i luft	Prøve 3. [g] i saltvann	Prøve 4. [g] i saltvann
HDG	0.00640	0.00600	0.00810	0.00530
HDG_pulver	0.00090	0.00100	0.00150	0.01550
PSO1	0.00480	0.00250	0.00460	0.00790
PSO2	0.00450	0.01350	0.00080	0.00050
Epoksy1a	-	0.00460	0.00300	0.00200
Epoksy2	0.00890	0.00970	0.01250	0.01350
Epoksy1b	0.01450	0.01020	0.00820	0.01300
Reinforced	0.01100	0.02700	0.01230	0.05300
PU	0.00360	0.00470	0.00250	0.00560

A.5 Ruhetsverdier

Tabell 0.9: Endringen mellom gjennomsnittlig ruhetsverdier før slitasje og etter slitasje ved urensset belegg i henholdsvis luft og saltvann

BELEGG	Endring i ruhetsverdier mellom før slitasje og etter i luft, urensset		Endring i ruhetsverdier mellom før slitasje og etter i saltvann, urensset	
	ΔRa_{lu}	ΔRz_{lu}	ΔRa_{su}	ΔRz_{su}
PSO1	0.22	0.29	0.16	0.20
PSO2	-0.01	0.01	0.13	0.16
Epoksy1a	-0.29	-0.29	-0.07	-0.06
Epoksy1b	-0.26	-0.29	-0.28	-0.34
Epoksy2	0.33	0.43	0.31	0.42
Reinforced	0.25	0.32	0.11	0.09
HDG	0.03	0.07	0.41	0.50
HDG_pulver	0.13	0.16	0.12	0.09
PU	0.04	0.05	0.08	0.09

Tabell 0.10: Endringen mellom gjennomsnittlig ruhetsverdier før slitasje og etter slitasje ved rensset belegg i henholdsvis luft og saltvann

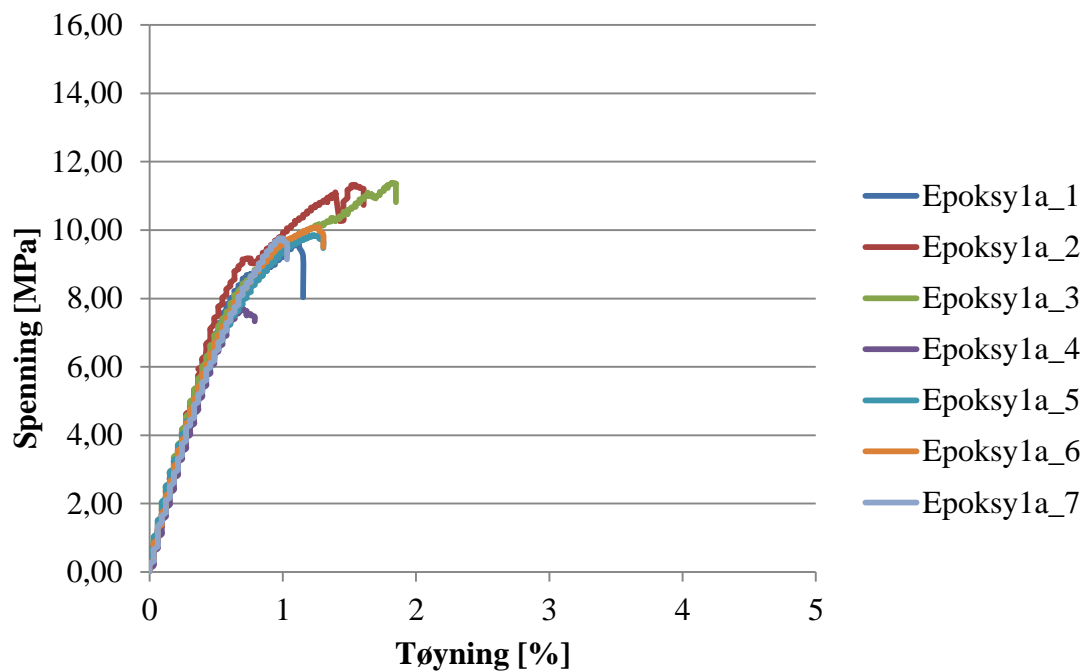
BELEGG	Endring i ruhetsverdier mellom før slitasje og etter i luft, rensset		Endring i ruhetsverdier mellom før slitasje og etter i saltvann, rensset	
	ΔRa_{lr}	ΔRz_{lr}	ΔRa_{sr}	ΔRz_{sr}
PSO1	0.21	0.26	0.18	0.23
PSO2	-0.02	-0.01	0.11	0.15
Epoksy1a	-0.20	-0.21	-0.16	-0.13
Epoksy1b	-0.19	-0.21	-0.20	-0.27
Epoksy2	0.29	0.39	0.29	0.40
Reinforced	0.38	0.42	-0.05	-0.06
HDG	0.17	0.20	0.40	0.52
HDG_pulver	0.12	0.15	0.13	0.15
PU	0.03	0.03	0.04	0.05

Tabell 0.11: Endring i gjennomsnittlige ruhetsverdier mellom etter slitasje urensset og rensset i henholdsvis luft og saltvann.

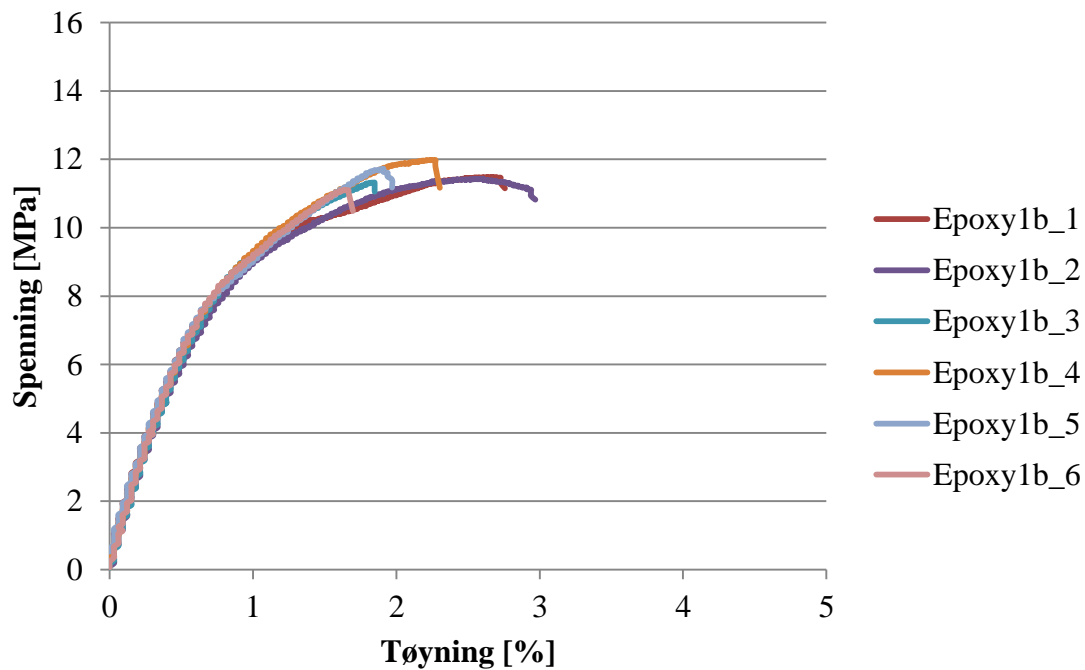
BELEGG	Endring i ruhetsverdier mellom etter slitasje, urensset og rensset i luft		Endring i ruhetsverdier mellom etter slitasje, urensset og rensset i luft	
	ΔRa_{lur}	ΔRz_{lur}	ΔRa_{sur}	ΔRz_{sur}
PSO1	-0.01	-0.03	0.03	0.03
PSO2	-0.02	-0.02	-0.02	-0.01
Epoksy1a	0.08	0.08	-0.09	-0.07
Epoksy1b	0.07	0.08	0.08	0.07
Epoksy2	-0.04	-0.04	-0.01	-0.02
Reinforced	0.13	0.10	-0.16	-0.15
HDG	0.13	0.13	-0.01	0.02
HDG_pulver	-0.01	-0.01	0.01	0.07
PU	-0.01	-0.03	-0.03	-0.04

B APPENDIKS

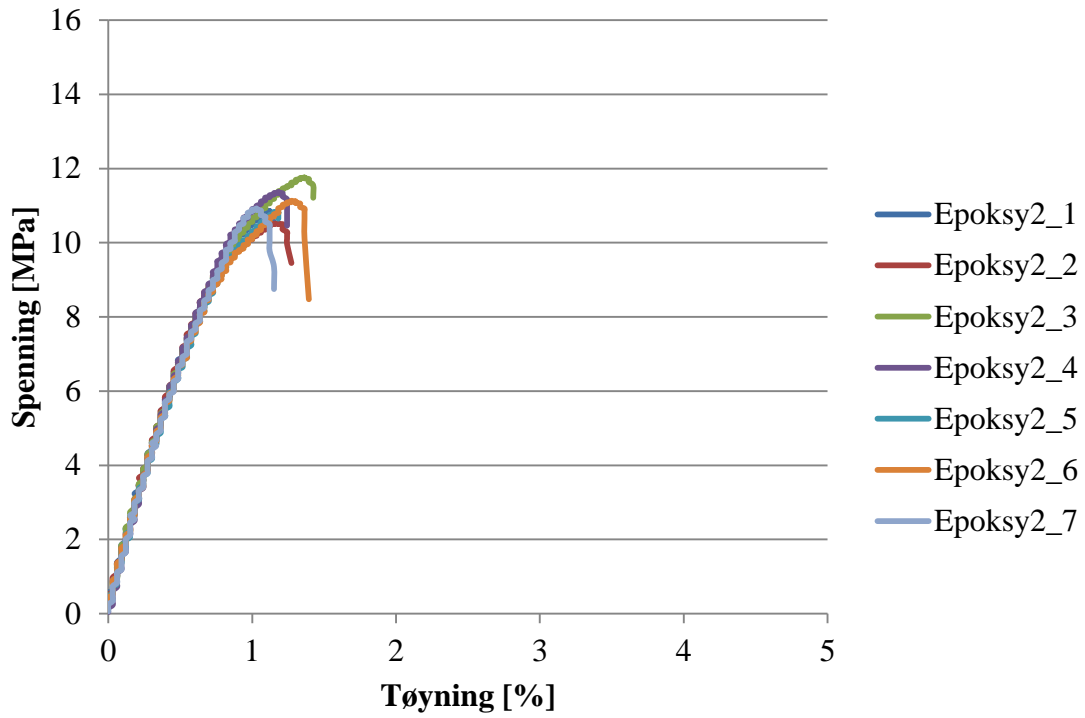
B.1 Plott av spenning mot tøyning



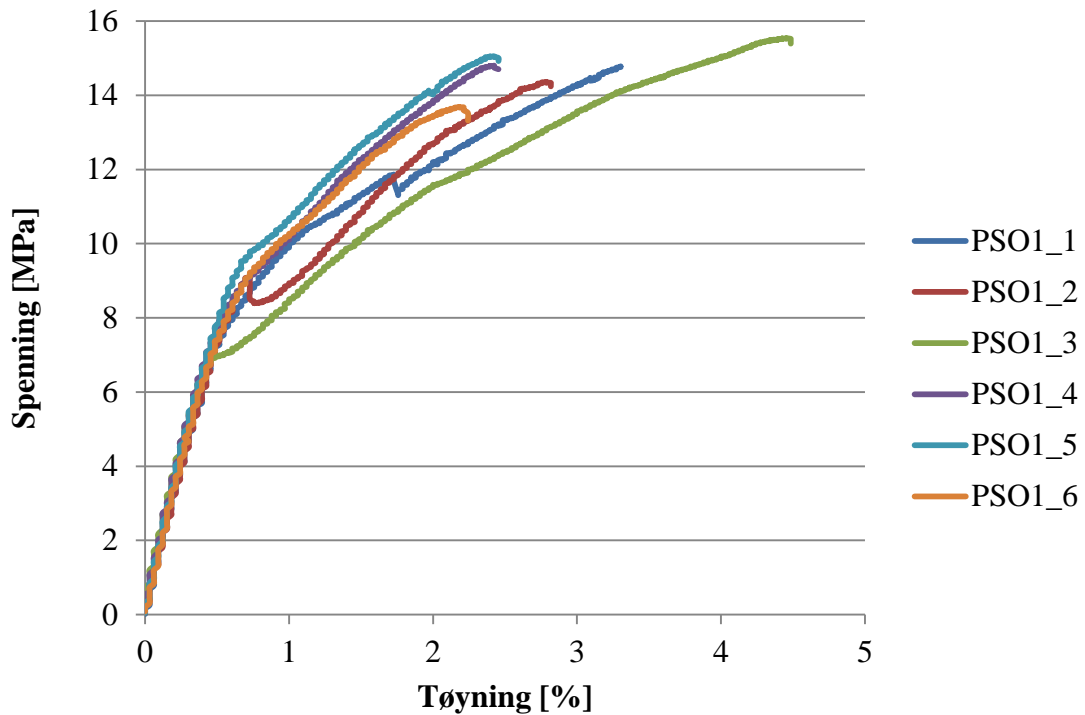
Figur 0.1: Spenningstøyningskurve for Epoksy1a i gruppe A.



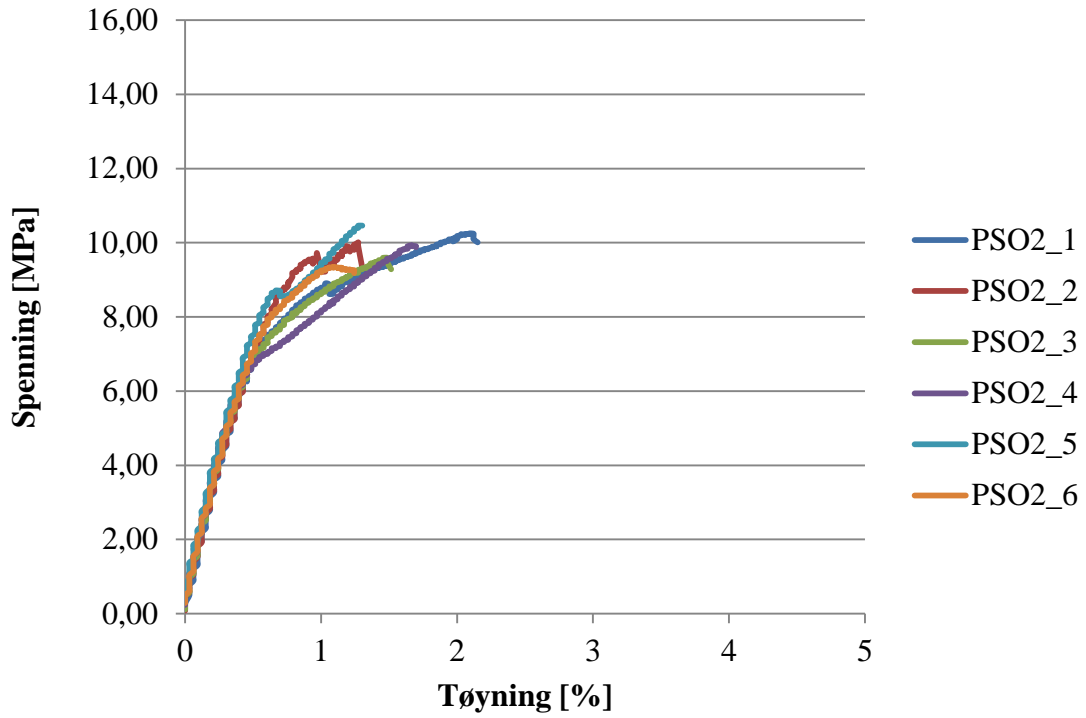
Figur 0.2: Spenningstøyningskurve for Epoxy1b i gruppe B.



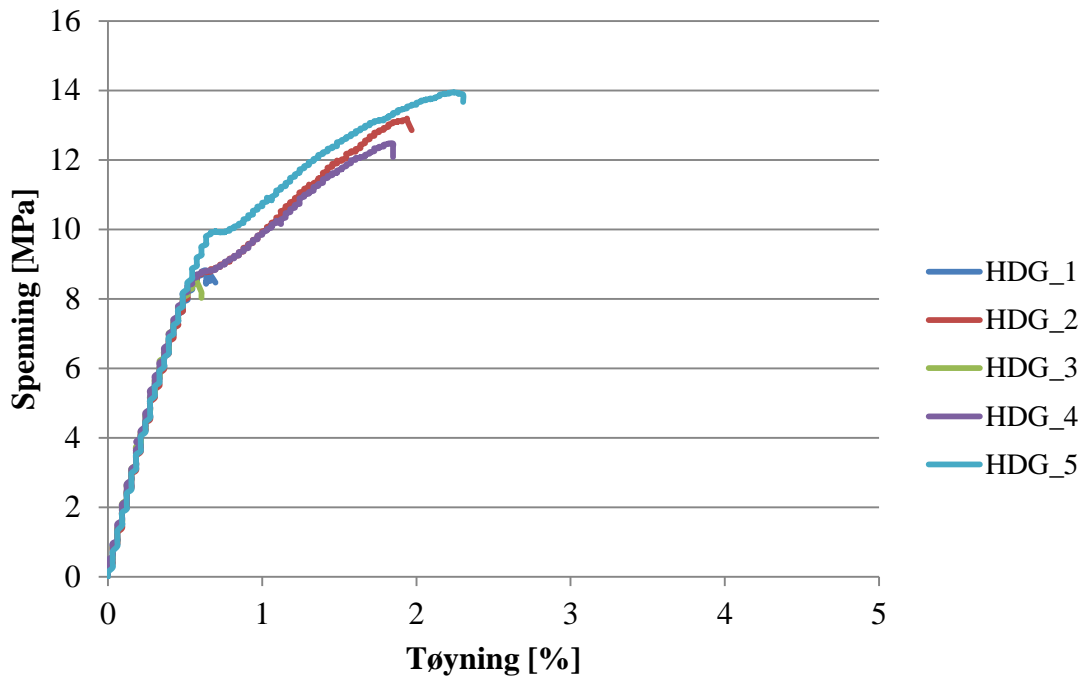
Figur 0.3: Spenningstøyningskurve for Epoksy2 i gruppe B.



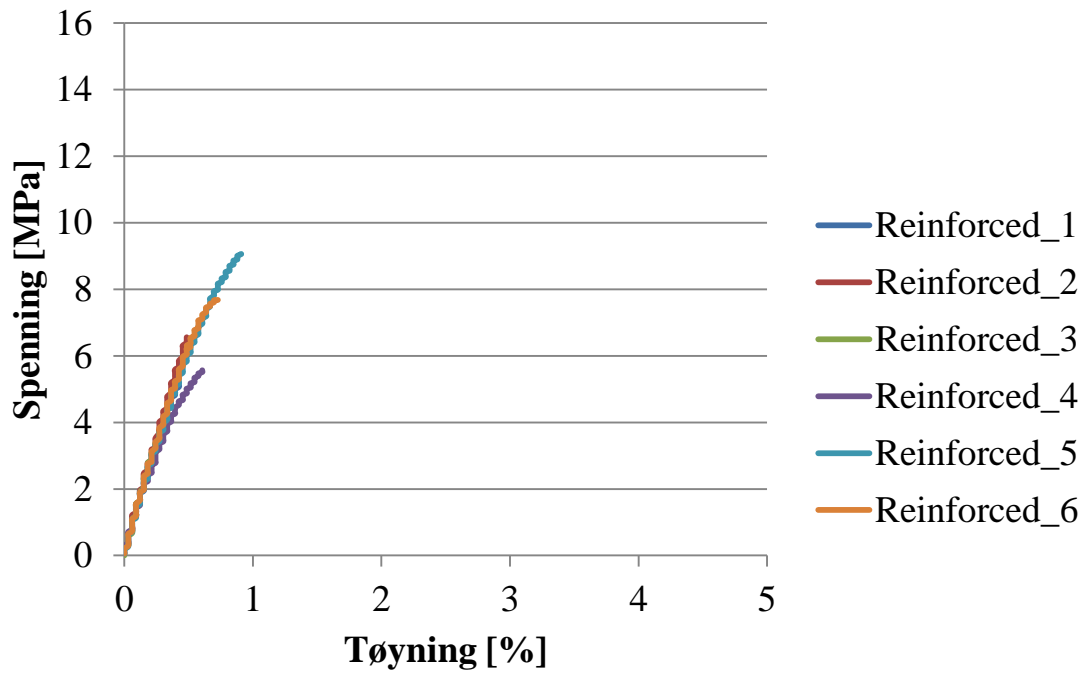
Figur 0.4: Spenningstøyningskurve for PSO1 i gruppe A.



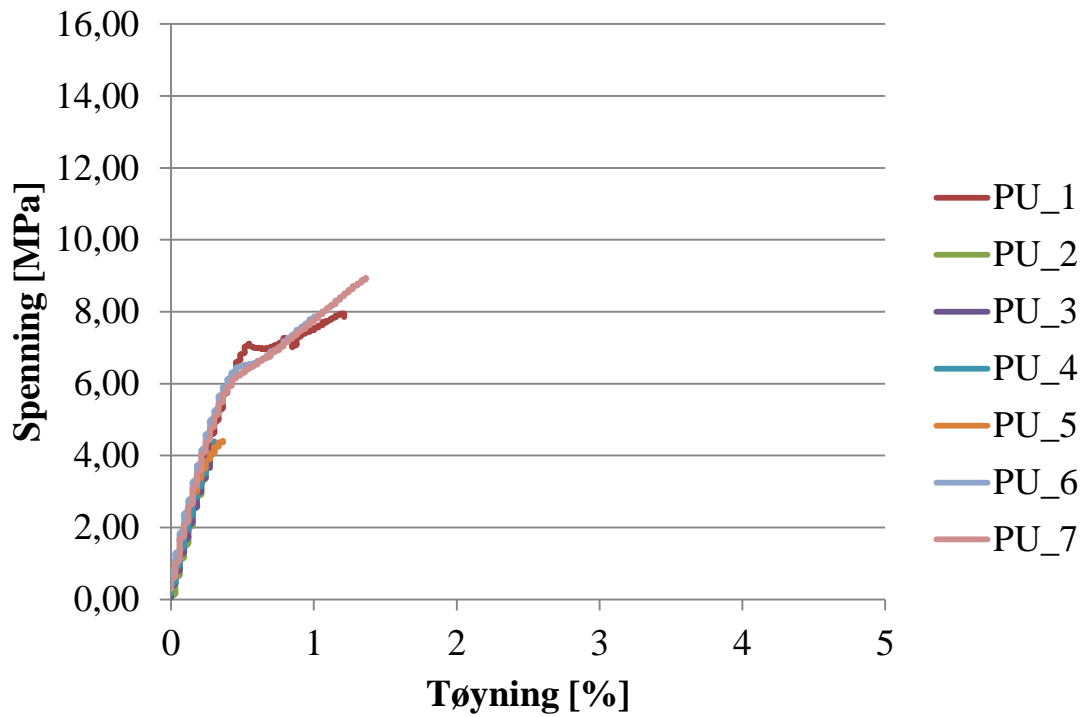
Figur 0.5: Spenningstøyningskurve for PSO2 i gruppe A.



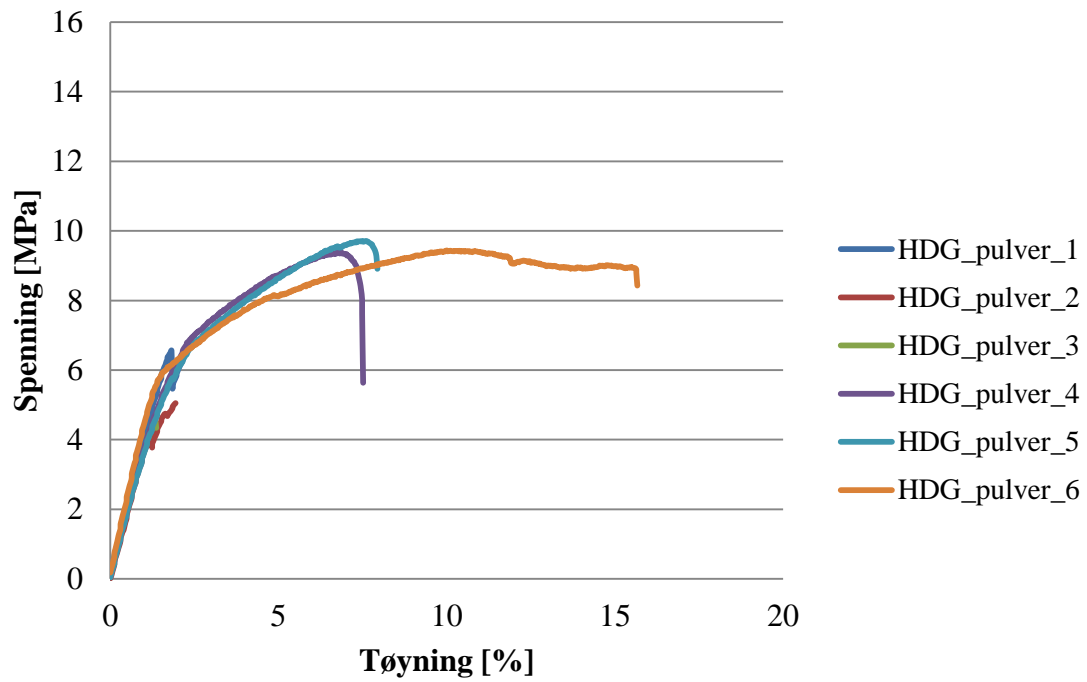
Figur 0.6: Spenningstøyningskurve for HDG i gruppe A.



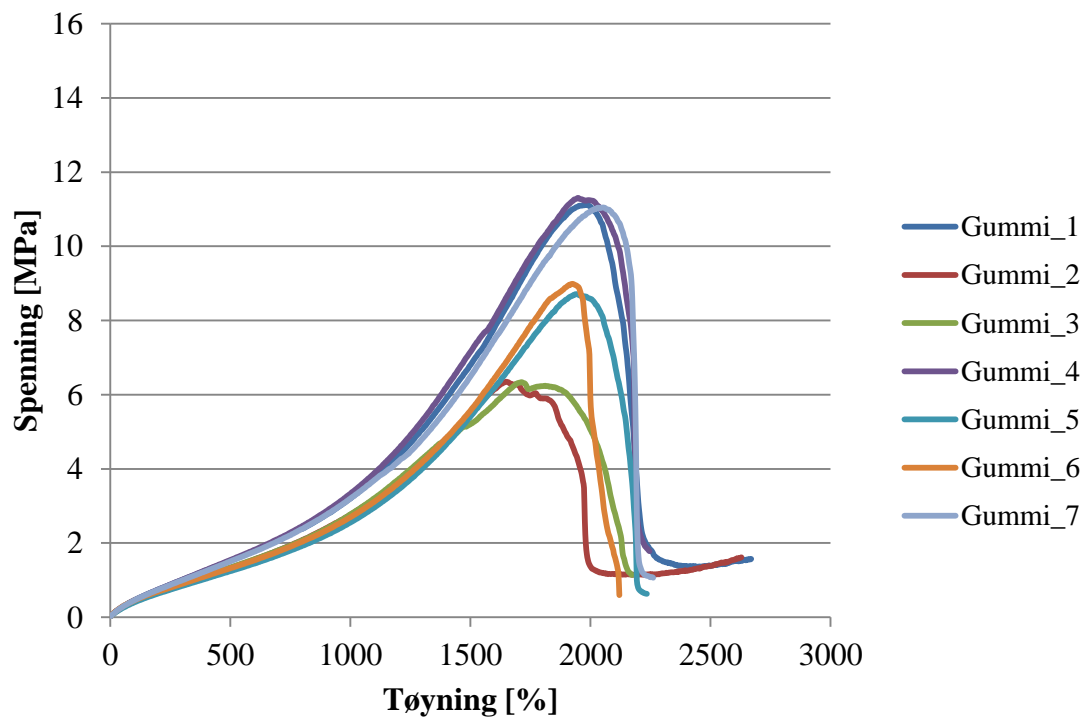
Figur 0.7: Spennings-tøyningsskurve for Reinforced i gruppe A.



Figur 0.8: Spennings-tøyningsskurve for PU i gruppe A.

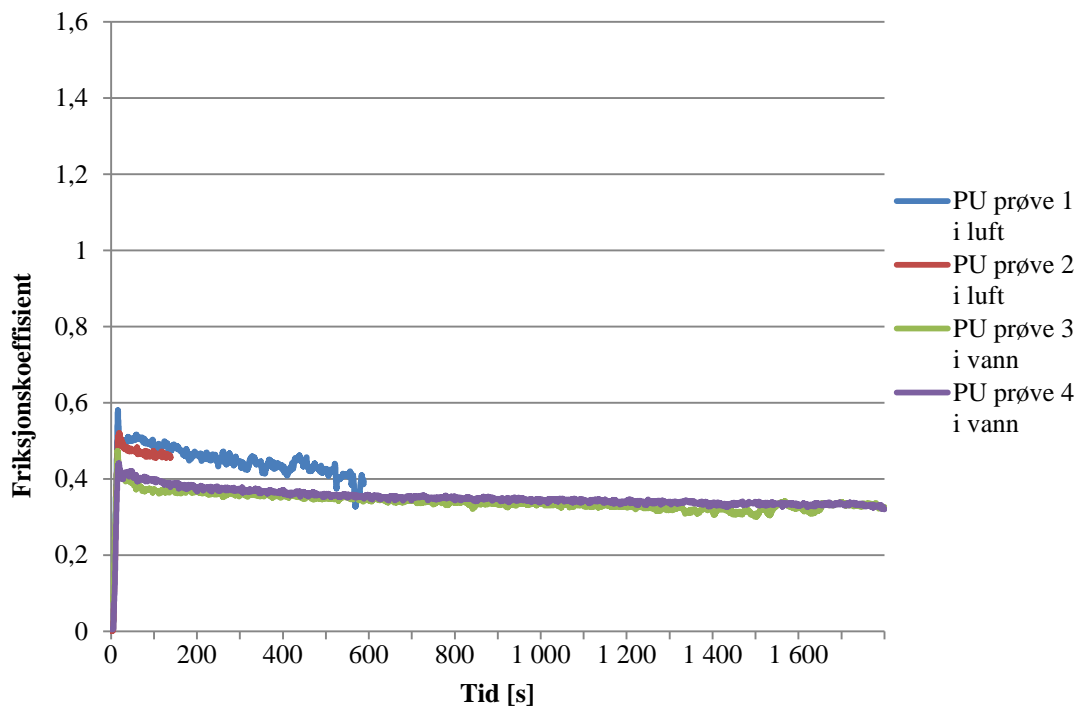


Figur 0.9: Spenningstøyningskurve for HDG_pulver i gruppe A.

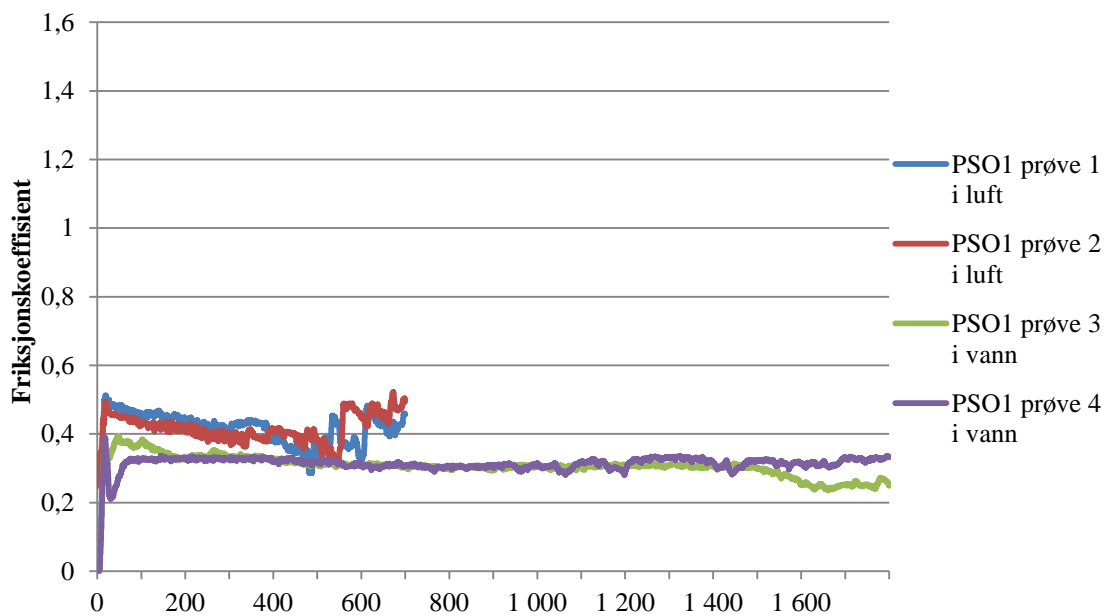


Figur 0.10: Spenningstøyningskurve for Gummi i gruppe C.

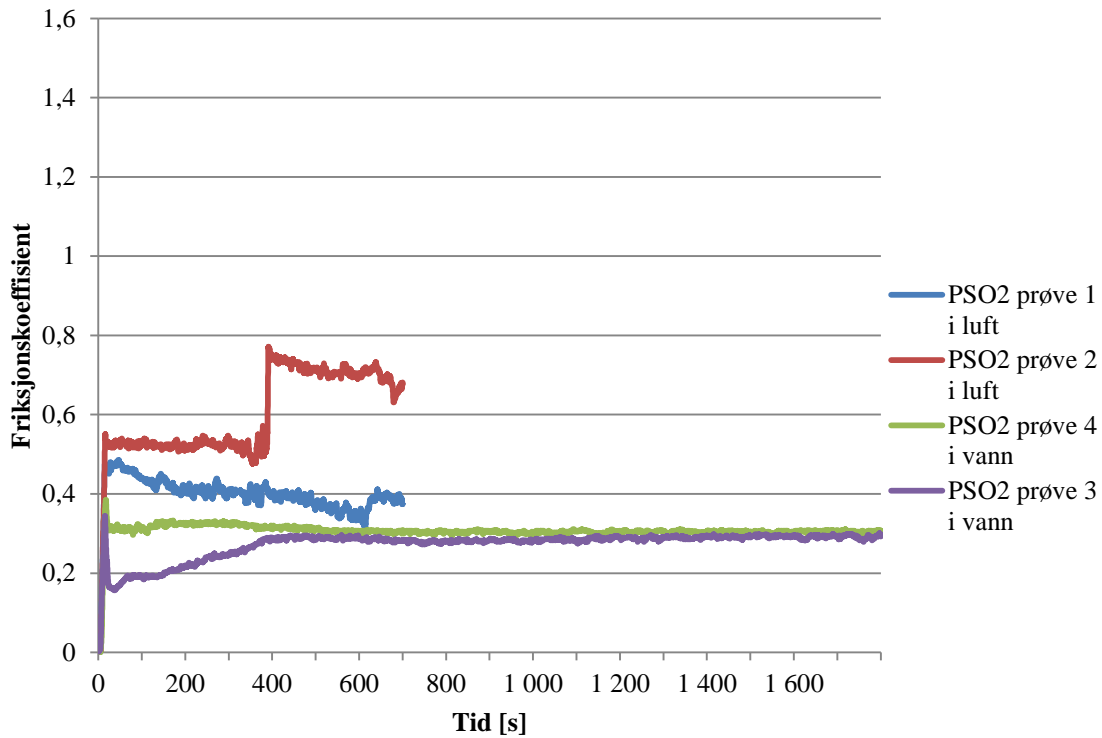
B.2 Plott av friksjonskoeffisient mot tid



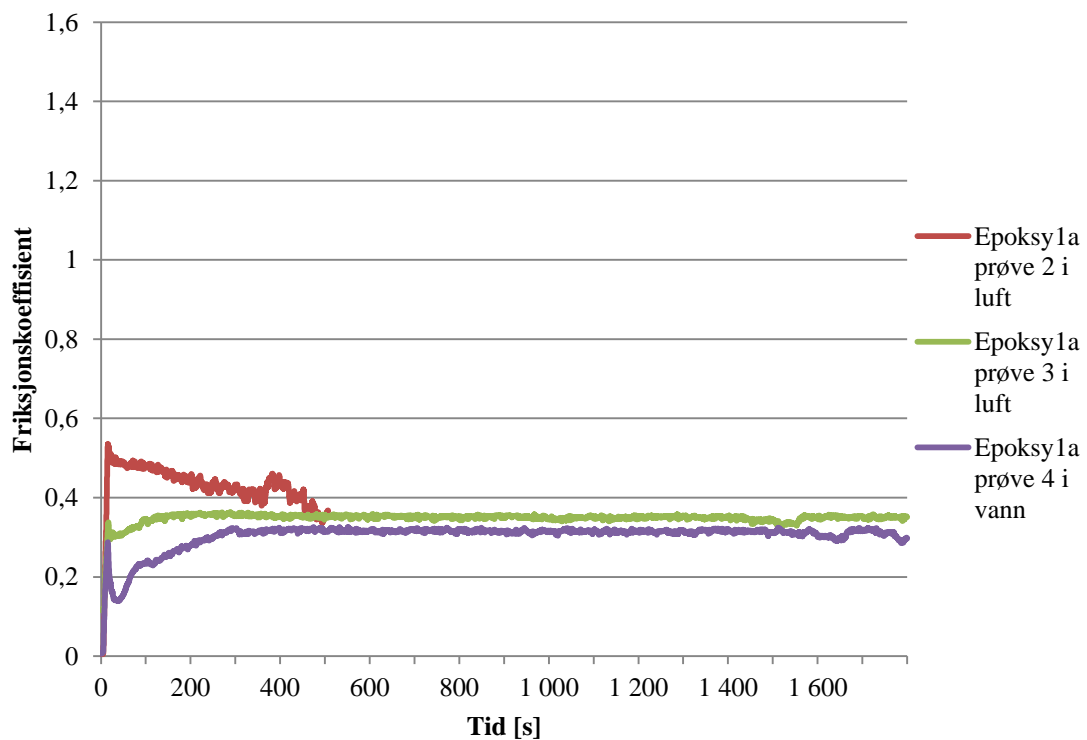
Figur 0.11: Gjennomsnittlig friksjonskoeffisient plottet mot tid for PU ved slitasje i luft i 700 s og vann i 1800 s.



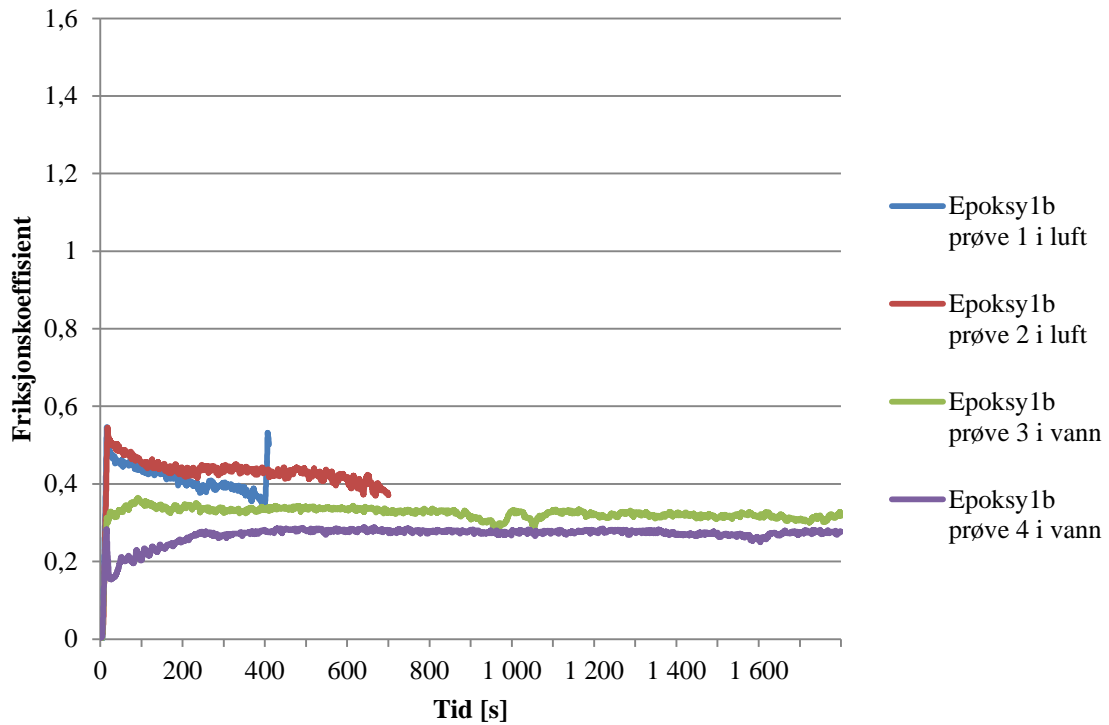
Figur 0.12: Gjennomsnittlig friksjonskoeffisient plottet mot tid for PSO1 ved slitasje i luft i 700 s og vann i 1800 s.



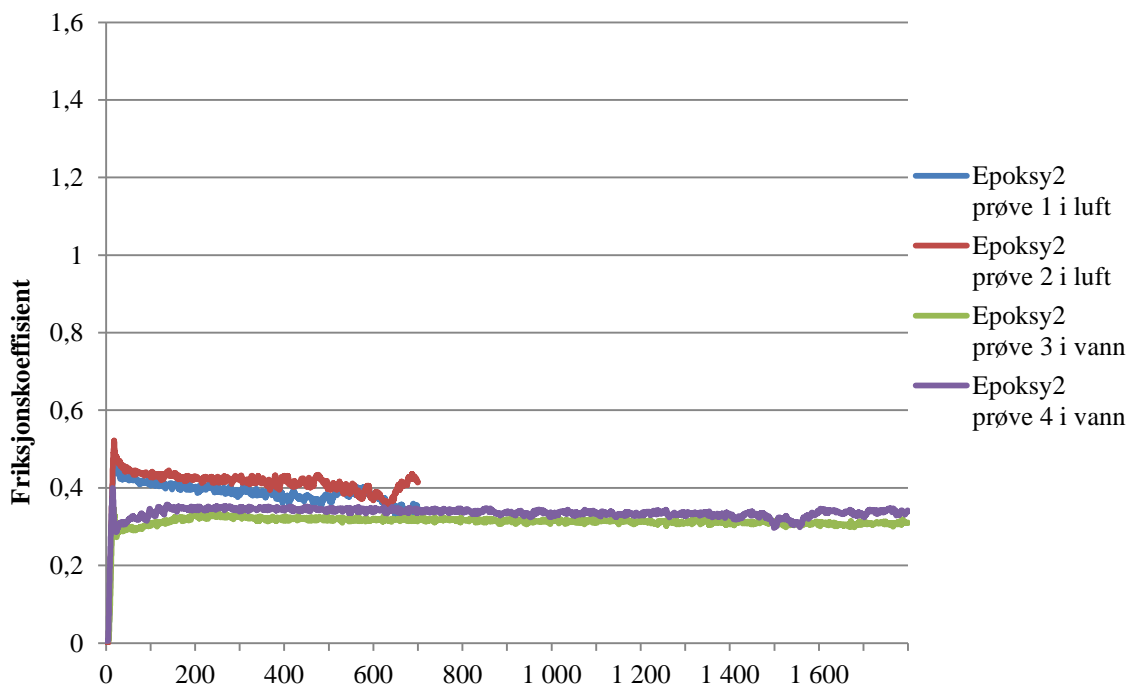
Figur 0.13: Gjennomsnittlig friksjonskoeffisient plottet mot tid for PSO2 ved slitasje i luft i 700 s og vann i 1800 s.



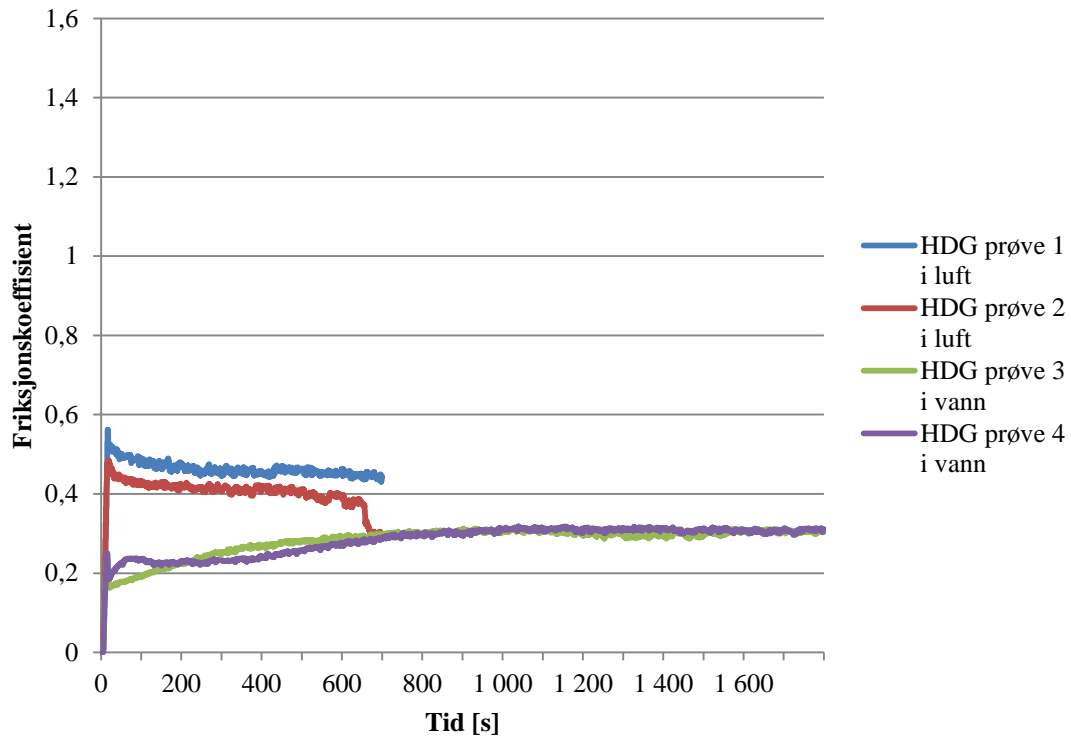
Figur 0.14: Gjennomsnittlig friksjonskoeffisient plottet mot tid for Epoksy1a ved slitasje i luft i 700 s og vann i 1800 s.



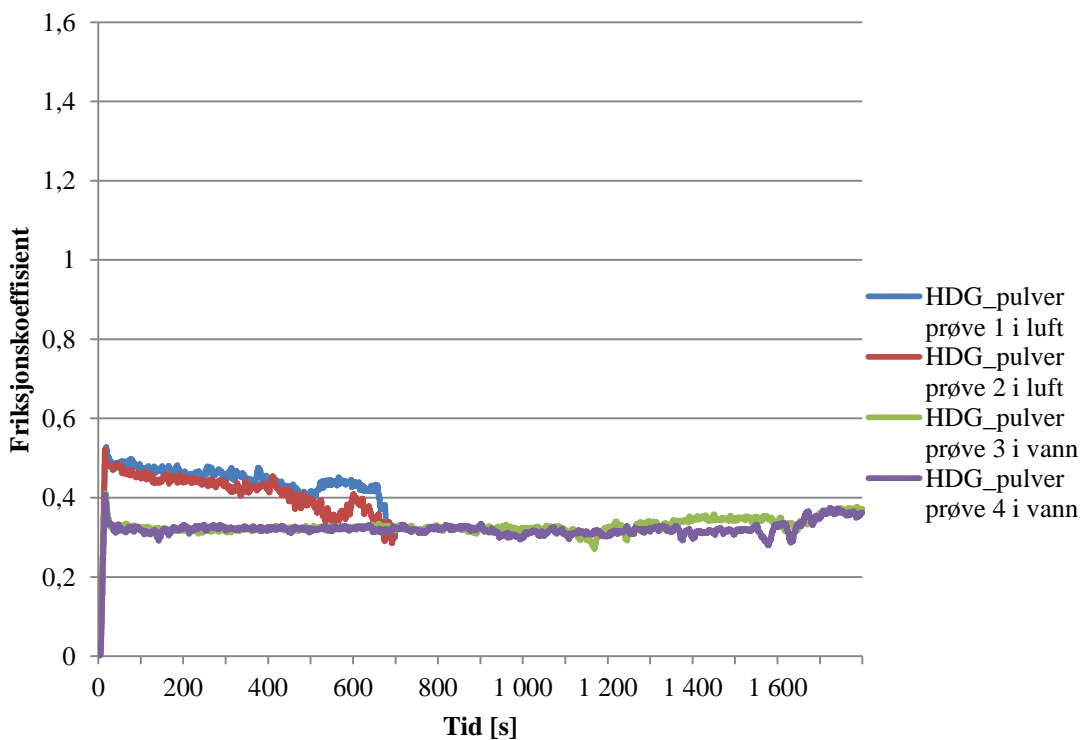
Figur 0.15: Gjennomsnittlig friksjonskoeffisient plottet mot tid for Epoksy1b ved slitasje i luft i 700 s og vann i 1800 s.



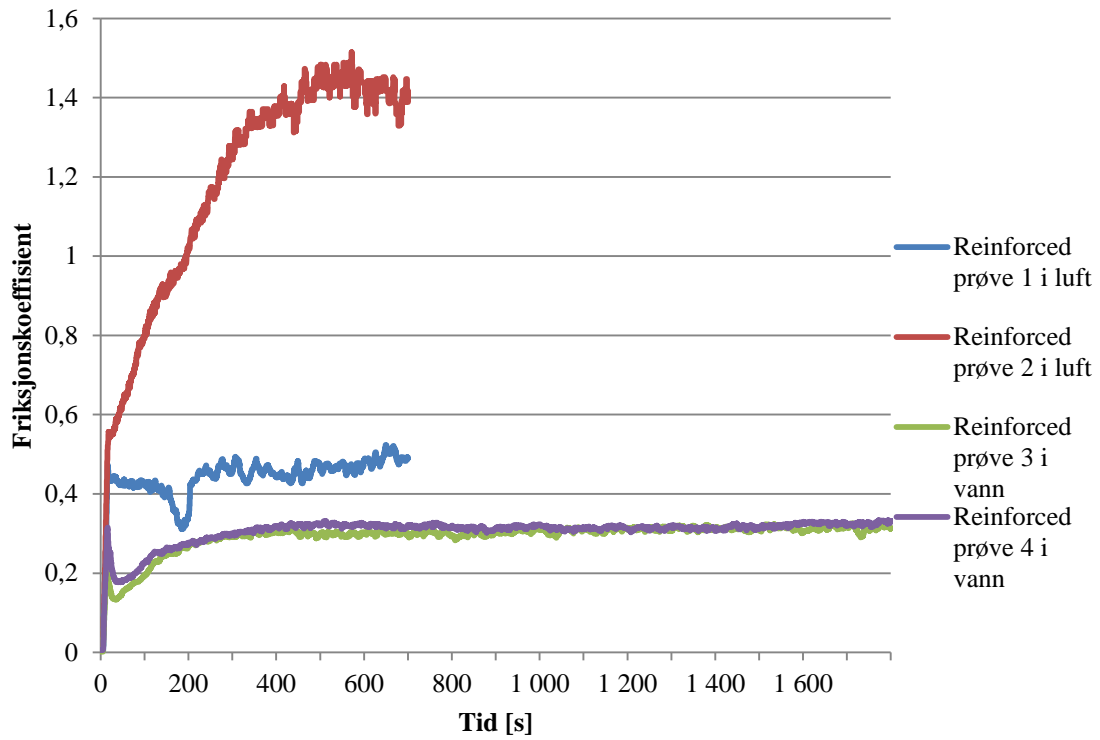
Figur 0.16: Gjennomsnittlig friksjonskoeffisient plottet mot tid for Epoksy2 ved slitasje i luft i 700 s og vann i 1800 s.



Figur 0.17: Gjennomsnittlig friksjonskoeffisient plottet mot tid for HDG ved slitasje i luft i 700 s og vann i 1800 s.



Figur 0.18: Gjennomsnittlig friksjonskoeffisient plottet mot tid for HDG_pulver ved slitasje i luft i 700 s og vann i 1800 s.



Figur 0.19: Gjennomsnittlig friksjonskoeffisient plottet mot tid for Reinforced ved slitasje i luft i 700 s og vann i 1800 s.

B.3 Fender- rør på vindturbin



Figur 0.20: Viser fender- rørene på vindturbin hvor slitasjespor fra gummifender oppstår.