

Elbesparelser ved kalk-, fouling og friktionsnedsættende materialer

Fase 2

Teknologisk Institut

Marts 2007

Teknologisk Institut
Industri og Energi

Co-finansiering: ELFOR
ELFOR J.nr.: 464-04
Projektnr.: 337-092

Projektgruppe for fase 1

Electrolux A/S
Vestas aircoil A/S
Teknologisk Institut
Teknologisk Institut
Teknologisk Institut

Hugo Friis og Jan Andersen
Claus Ibsen
Thomas Zweig og Arve Krøis, Materialeprøvning
Mads Kogsgaard Hansen, Tribologisentret
Jens Brusgaard Vestergaard (projektleder), Installation
og Kalibrering

Projektgruppe for fase 2

APV Heat Transfer
Arla Foods v. Brabrand Mejeri
Electrolux A/S
Grundfos Management
Vestas aircoil A/S
Teknologisk Institut
Teknologisk Institut
Teknologisk Institut

Finn Søholm, Klaus Sabroe og Peter Bosse
Helge Arendtsen og Lars Hermann m.fl.
Morten Heide
Cecilie Laursen og Carsten Bloch
Claus Ibsen
Mads Kogsgaard Hansen Tribologisentret
Thomas Zweig og Arve Krøis, Materialeprøvning
Andy Drysdale (projektleder), Installation og Kalibrering

Projektansvarlig

Teknologisk Institut
Industri og Energi
Kongsvang Allé 29
8000 Århus C

CVR-nr.: 56976116

Indholdsfortegnelse

1 SAMMENFATNING OG KONKLUSION.....	4
1.1 BAGGRUND	4
1.1.1 Tribologiske teknologier og processer.....	5
1.1.2 Sol-gel (og andre lak-baserede) teknologier og belægninger	6
1.2 LABORATORIETEST	7
1.2.1 Undersøgelse af sol-gels betydning for varmeovergangstal.....	7
1.2.2 Opbygning af kalkbelægninger på metal test-rør og keramiske aksler.....	7
1.2.3 Eksperimenter med alternative overflader til varmelegemer	9
1.2.4 Afprøvning af små plader med forskellige overflader.....	10
1.3 FELTTEST	11
1.3.1 En plade varmeveksler med sol-gel belægning.....	11
1.3.2 En svejsesål med tribologisk behandling	12
1.3.3 Blæserhjul med sol-gel belægning.....	12
1.3.4 Varmelegemer med sol-gel og tribologiske behandlinger.....	13
1.3.5 Små flow- og tryksensorer med sol-gel belægninger	13
1.3.6 Aksler og rotorhylster til cirkulationspumper med sol-gel og tribologiske behandlinger.....	14
1.3.7 Ladeluftskøler med sol-gel belægning	15
1.4 KONKLUSION.....	15
1.5 DET VIDERE ARBEJDE.....	16
2 BESKRIVELSE AF MATERIALER TIL OVERFLADEBEHANDLING OG BELÆGNINGER	17
3 TEST I LABORATORIET	18
3.1 VARMEOVERGANGSTAL	18
3.2 OPBYGNING AF KALKBELÆGNINGER PÅ METALTESTRØR, KERAMISKE AKSLER MV.	19
3.2.1 Opbygning af kalkbelægninger på metaltestrør	19
3.2.2 Aksler.....	21
3.2.3 Andre emner.....	22
4 FELTTEST.....	26
4.1.1 En plade varmeveksler med sol-gel belægning.....	26
4.1.2 En svejsesål med tribologisk behandling	29
4.1.3 Blæserhjul med sol-gel belægning.....	30
4.1.4 Varmelegemer med sol-gel og tribologiske behandlinger.....	31
4.1.5 Små flow- og tryksensorer med sol-gel belægninger	32
4.1.6 Aksler og rotorhylster til cirkulationspumper med sol-gel og tribologiske behandlinger.....	33
4.1.7 Ladeluftkøler med sol-gel belægning.....	37
5 PERSPEKTIVER FOR ELBESPARELSER	40
5.1 VEKSLERPLADER	40
5.2 SVEJSESÅL	40
5.3 BLÆSERHJUL	40
5.4 SENSORER OG PUMPER	41
5.5 LADELUFTKØLERE	41
6 BILAG: BESKRIVELSE AF MATERIALER.....	42
6.1 BELÆGNINGSPRINCIPPER.....	42
6.1.1 PVD-belægning	42
6.1.2 Belægningskarakteristik.....	43
6.1.3 Belægningssystemer.....	43
6.1.4 Sol-gel belægninger.....	46
6.2 INDUSTRIEL IMPLEMENTERING AF SOL-GEL BELÆGNINGERNE	48
6.3 MATERIALEEGENSKABER.....	48
6.3.1 Overfladeenergier.....	48

1 Sammenfatning og konklusion

1.1 Baggrund

Nærværende rapport beskriver resultater af Fase 2 af ELFOR-projektet 224-8. Projektets fase 1 blev afsluttet med rapporten "Elbesparelser ved kalk- og fouling og friktionsnedsættende materiale: Fase 1" i september 2004.

I fase 1 deltog virksomhederne Electrolux og Vestas aircoil sammen med flere forskellige faglige centre fra Teknologisk Institut. I fase 2 deltog yderligere Arla Foods v. Brabrand Mejeri, Grundfos og APV Heat Transfer.

I fase 1 blev der gennemført en række laborietests og felttests med produkter, der havde fået deres overflader behandlet eller belagt med forskellige materialer. Produkternes overflader var enten behandlet tribologisk, en proces der skal foregå i en speciel ovn, eller belagt med varianter af sol-gel, som er et lak-baseret materiale, der kan sprøjtes, dyppes eller pensles på. I et laboratorium blev nogle varme rør, der var blevet behandlet med de forskellige materialer, overbruset med koldt drikkevand. Opbygningen af kalkbelægninger på rørenes overflader blev efterfølgende undersøgt for kalkafvisende egenskaber. Til feltafprøvning blev et antal produkter fra de deltagende virksomheder ligeledes behandlet med de forskellige materialer og udsat for virkelighedsnære felttests. De afprøvede produkter omfattede et blæserhjul (en roterende varmeveksler anvendt i industrielle tørretumblere) behandlet med sol-gel, forskellige varmelegemer (til industri-vaskemaskiner) behandlet med sol-gel og en tribologisk overflade, samt en ladeluftskøler (til en motor med turbolader) behandlet med sol-gel.

Kort fortalt viste resultaterne fra fase 1, at der kan fremstilles gode kalkafvisende overflader både på det tribologiske område og på sol-gel området. Hertil viste nogle overflader behandlet med sol-gel gode korrosionshæmmende egenskaber.

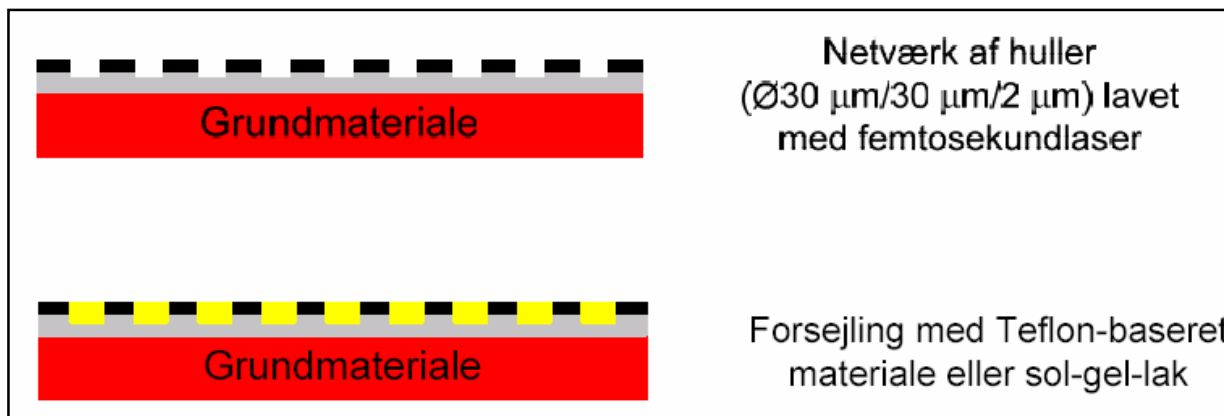
Fase 1 afsluttede med at konkludere, at på baggrund af de gode og positive resultater vil det være absolut relevant at fortsætte med det allerede påbegyndte arbejde i fase 2, hvor det undersøges om teknikkerne kan anvendes på andre produkter som dele til pumper, varmevekslerplader mv.

I rapporten fra fase 1 er der en grundig gennemgang og beskrivelse af materialer, inkl. belægningsprincipper, materialeegenskaber m.m. Et resumé af denne beskrivelse fremgår af kapitel 2, og hele beskrivelsen fremgår som et bilag, jf. kapitel 6.

Området omkring overflader og overfladebehandling er i konstant fremgang. Siden afslutning af fase 1 kan derfor suppleres med følgende ny viden og erfaringer vedr. de forskellige tribologiske og sol-gel teknologier og processerne anvendt i projektet.

1.1.1 Tribologiske teknologier og processer

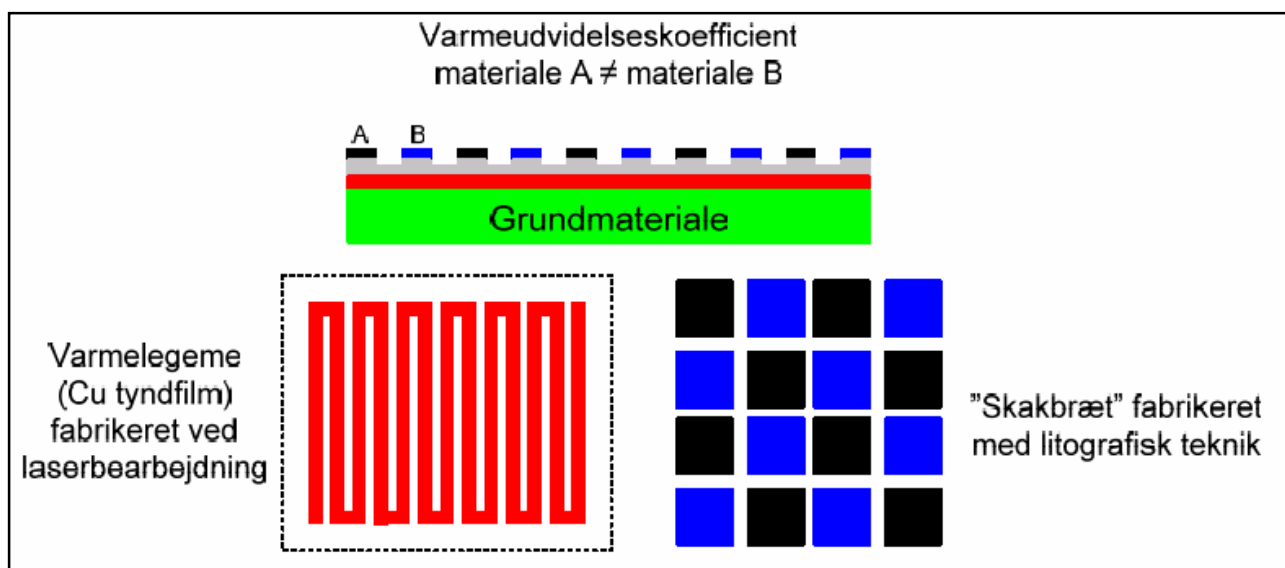
Det er i dag muligt at anvende forskellige overfladebehandlings multi-lags teknikker baseret på nanoteknologi til deponering af nanostrukturerede multilagsbelægninger med f.eks. skræddersyede slidegenskaber. Et eksempel herpå kunne være overfladebelægning af et grundmateriale med en hård og slidstærk tyndfilm (ca. 3 μm i totaltykkelse) efterfulgt af laserbearbejdning til fabrikation af et struktureret netværk af huller lavet med en femtosekundlaser, jf. figur 1-1.



Figur 1-1 Kombination af slidbelægning og Teflonbaseret materiale eller sol-gel

Den frembragte struktur kunne eventuelt efterfølgende funktionaliseres i form af en ændring af de overfladekemiske egenskaber ved at forsegle overfladen med et andet materiale, såsom Teflon eller en sol-gel-baseret lak. Formålet med kombinationen af hårde tribologiske belægninger og blødere, men - overfladekemisk set - interessante materialer er at opnå en unik synergi mellem slidstyrke og kemisk funktionalitet.

Et andet eksempel er behandling af et emnes overflade med forskellige materialer med varierende varmeudvidelseskoefficienter, f.eks. i et skakbrætmønster fabrikeret med f.eks. en litografisk teknik. Under overfladen ligger et varmelegeme, f.eks. en deponeret kobber tyndfilm fabrikeret med laser bearbejdning. Da de to materialer udsættes for varme fra varmelegemet udvider de sig anderledes og påvirker mekanisk et evt. lag af kalk eller andet smuds. Principperne vises i figur 1-2.



Figur 1-2 Kalk- og smudsafvisende virkning via forskel i varmeudvidelseskoefficient

De ovenfor nævnte muligheder er blot enkeltstående eksempler på, hvordan overflader kan gøres funktionelle ved at kombinere overfladeteknologi med struktureringsteknikker. Netop dette område er der et stadigt stigende fokus på inden for materiale- og overfladeteknologien, fordi dette kan frembringe nye egenskaber og funktionaliteter, som ikke har været set før.

1.1.2 Sol-gel (og andre lak-baserede) teknologier og belægninger

INC 23 er den sol-gel blanding, som vurderes at have den bedste korrosionsbeskyttende virkning og lidt mindre god kalk- og smudsafvisende virkning. INC 23 anvendes f.eks. til korrosionsbeskyttelse af Vestas aircoil veksler. INC 23 har dog absolut en positiv virkning over for kalk- og andre belægninger, og belægningen kan med fordel anvendes i f.eks. varmevekslere.

INC 33 er den sol-gel blanding, som vurderes at have den bedste kalk- og smudsafvisende virkning. Undersøgelser gennemført i fase 2 viser, at INC 33 ikke er velegnet til anvendelse med fødevarer. Der blev fundet et uønsket stof, som ikke var så fastbundet i belægningen som håbet og i mængder, som ikke er acceptable. Da der yderligere er kommet nye forskningsresultater, der viser effekter af stoffet i selv meget lave koncentrationer, kan det forventes, at der enten skal findes et alternativt stof – eller en udfasning af netop denne blandings anvendelse.

SG 21 og INC 26 er opbygget med samme bindertype som INC 33, der har vist sig ikke egnet i fødevarer sammenhænge. Det blev derfor besluttet ikke at teste videre med disse produkters systemer.

1.2 Laboratorietest

1.2.1 Undersøgelse af sol-gels betydning for varmeovergangstal

Der har i længere tid været diskussioner om sol-gel - eller andre friktionsnedsættende belægninger - påvirker eller ændrer varmeovergangsegenskaber. I fase 1 blev en ladeluftskøler afprøvet på et motoranlæg ved et gartneri. Køleren ydede ikke den ønskede (eller beregnede) effekt, og man havde mistanke til, at sol-gel overfladen medførte, at varmeovergangen mellem luft og køler blev forringet. Dengang mente man, at sol-gel overfladen har ændret strømningsprofilen omkring kølefinerne, så der er mindre turbulens, hvilket reducerer varmeovergangen.

Senere hen mente man, at belægningsprocessen ikke har været optimal, og at belægningen mange steder inde i veksleren havde "klumpet sig sammen" omkring finnerne og dermed lukket af for en stor del af det effektive areal. Teknologisk Institut har videreudviklet belægningsprocesserne og for yderligere at undersøge virkning af sol-gel blev en mindre varmeveksler belagt med sol-gel og afprøvet. Først uden belægning og efterfølgende med belægning under kontrollerede og repeterbare forhold i klimakammer. Resultaterne viste ingen målbar ændring i ydelse, og konklusionen var, at de tidligere problemer skyldes dårlig belægningsproces. Denne konklusion underbygges af felt-tests, jf. også dette.

1.2.2 Opbygning af kalkbelægninger på metal test-rør og keramiske aksler

I fase 1 blev laboratorieafprøvning anvendt til at opbygge en kalkbelægning ved overbrusning af drikkevand på et 80 °C varmt rør behandlet med de forskellige typer overflader. I fase 2 er der gennemført flere simple laboratorieafprøvninger, som har haft til formål at undersøge nærmere, hvor holdbare overfladerne er ved en gentagen cyklus af kalkbelægning, rengøring, kalkbelægning, rengøring osv. Afprøvning er gennemført på metalrør og keramiske aksler. Afprøvning er gennemført hos Teknologisk Institut i Århus.

Følgende overflader er blevet afprøvet:

- Forskellige DLC-belægninger, inkl. nogle gamle overflader, som også var afprøvet i fase 1.
- Nye overflader bestående af vådkemiske teknikker såsom Keronite® (anodiseret aluminium) forsejlet med Teflon® og kemisk nikkel med medindfældet Teflon® (dispersionsudfældning) er blevet testet.
- Sol-gel INC 33.
- Referencerør (ubehandlet rustfrit stål).

Efter at rørene er belagt med kalk, benyttes en simpel "faldtest" til at vurdere kalkens vedhæftning til overfladen. Faldtesten blev også anvendt i fase 1, og gennemføres ved at lade røret falde 2,8 meter ned på et jernlod langs en lodret udspændt line. Rørene vejes før og efter forsøget, og den mængde kalk af det totale i %, der rives af ved sammenstødet med loddet, er et udtryk for vedhæftningsevnen ved netop denne impulsstørrelse.

Processen gentages indtil der ikke er mere kalk på røret. For de fleste rør var det kun nødvendigt med to gentagelser.

Faldtesten kunne ikke anvendes på de keramiske aksler, da de vil gå i stykker ved sammenstødet med jernloddet. I stedet blev akslerne vurderet visuelt og efterfølgende rengjort i ultralydsbad. Det var dog ikke muligt at foretage entydige klassificeringer af kalkaflejringens vedhæftning på forskellige overflader ved brug af ultralydstesten. Figur 1-3 viser fotos af de keramiske aksler.



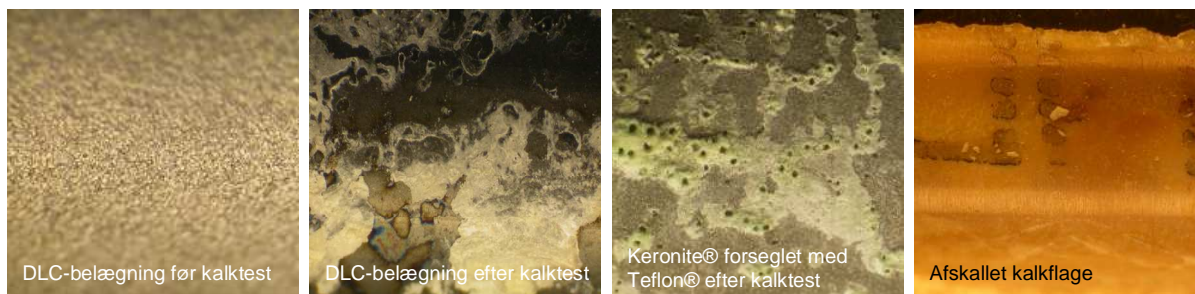
Figur 1-3 Keramiske aksler

Indledningsvis kan nævnes, at under indkøring og indregulering af testopstillingen kunne konstateres, at hvis overbrusningsvandstrålen var for kraftig dannedes kalken kun på bunden af rørene (og akslerne), dvs. den øverste halvdel af røret var helt fri for kalkbelægning. Vandets mekaniske virkning var tilstrækkelig til at modvirke udfældning af kalk. Efter prøvestanden blev indstillet korrekt, blev et tykt lag kalk hurtigt opbygget under afprøvning på alle testemner. Kalken var ikke "bare faldet af" under test. Men kalken var nem at fjerne, enten ved let mekanisk påvirkning eller i ultralydsbad.

Laboratorieudstyret fungerede fint til at udfælde kalk på testemnerne, men det kan være vanskeligt at drage konklusionerne fra faldtest. For langt de fleste testrør blev kalkbelægningen slået løs allerede efter første fald, men da belægningen har formet en "kappe" hele vejen rundt om røret, kunne den løse "kappe" glide frem og tilbage nogen gange, inden den faldt helt af.

Derfor er vurderingen af kalkens vedhæftning til de forskellige rør ret kvalitativ og baseret på visuelle vurderinger. Der kan dog konkluderes, at kalken var nem at fjerne fra rørene, men der var ikke væsentlig forskel mellem referencerør og de behandlede rør. Det kan også konkluderes, at der ingen mærkbar forskel var efter gentagne tilkalkningsforløb, dvs. overfladerne blev ikke målbart dårligere af, at rørene blev rengjort og tilkalkningsprocessen gentaget.

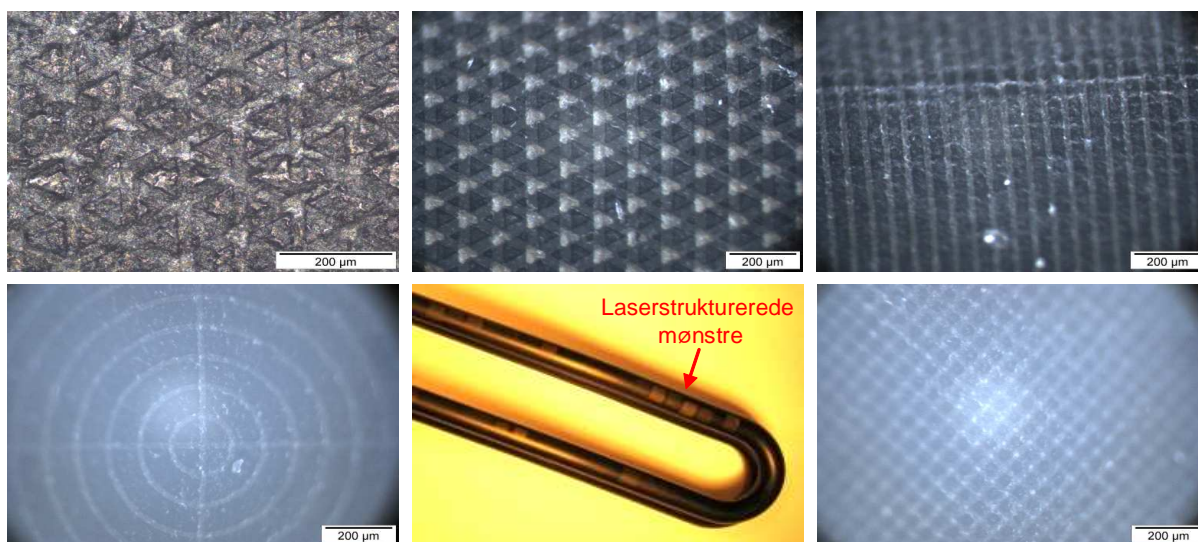
Undersøgelse af de testede DLC-, sol-gel- og vådkemiske overflader under mikroskop efter faldtest viste, at der var meget få kalkrester, som stadig hæftede på overfladen, dog kun marginalt bedre sammenlignet med de ubehandlede referenceemner i rustfrit stål. Figur 1-4 viser fotos taget gennem mikroskop.



Figur 1-4 Undersøgelser af kalkrester på forskellige overflader

1.2.3 Eksperimenter med alternative overflader til varmelegemer

I fase 1 blev fremført idéen om, at kalkbelægninger opbygges til en vis lagtykkelse, hvorefter den springer af pga. interne spændinger mellem kalkbelægningen og varmelegemet. I fortsættelse heraf er der eksperimenteret med forskellige nye former af overflader bestående af tribologiske tyndfilm, som efterfølgende er laserstruktureret i forskellige mønstre, med henblik på at introducere spændinger i grænselaget mellem kalkbelægningen om substratoverflader. Se figur 1-5. Der blev lavet kvalitative screening-forsøg med DLC-belagte og laserstrukturerede varmelegemer med forskellige mønstre.



Figur 1-5 Nye former for overflader: En kombination af tribologiske tyndfilm og laserstrukturering i forskellige mønstre

Konklusionen var, at der kræves et større areal af det strukturerede mønster for at kunne foretage klassificering af de respektive mønstres indvirkning på den kalkafvisende effekt.

1.2.4 Afprøvning af små plader med forskellige overflader

Der er også blevet gennemført en række laboratorieafprøvninger på små plader af plast og metal med formål at teste egenskaber for bl.a. slitage og korrosionsmodstand.

Modstand over for korrosion har især interesse for bl.a. Vestas aircoil, der fremstiller produkter, som installeres i saltholdige og/eller andre aggressive miljøer. Gode korrosionshæmmende egenskaber giver mulighed for at benytte mere traditionelle korrosionsfølsomme materialer, f.eks. aluminium frem for rustfrit stål på skibe og off-shore konstruktioner. Aluminium er billigere, lettere og nemmere at bearbejde end rustfrit stål.

Flere af de deltagende firmaer havde egne prøvestande, hvor man forholdsvis hurtigt og billigt kunne afprøve mindre test-emner. Bl.a. er følgende blevet afprøvet:

- Hos APV's testopstilling: Rustfrit stålplader med 4 forskellige sol-gel belægninger er blevet afprøvet mekanisk for at undersøge overfladernes virkning, især ved kontaktpunkterne. Den mest egnede belægning blev efterfølgende valgt til feltafprøvning.
- Hos Grundfos: Forskellige rustfrie stål- og plast-plader er blevet afprøvet i testopstillinger til at undersøge modstand mod slid og slitage. Sol-gel belagte plastemnerne blev eksponeret i 60 °C varmt vand i ca. 7,5 måneder, og belægningerne klarede sig fint. Stålemnerne med sol-gel belægninger blev eksponeret i 80 °C i ca. 13 måneder. Belægningerne blev delvist nedbrudt. Der er anvendt FTIR (en infrarød analysemetode) og SEM (elektron mikroskopi) til at karakterisere overfladerne før og efter eksponering til slidtest. Testemnerne i plast klarede sig fint. Testemnerne i rustfrit stål har været vanskelige at karakterisere og det har ikke været muligt at se en tydelig udvikling over tid.

1.3 Felttest

Forskellige tribologiske overflader og sol-gel blandinger er i denne fase blevet afprøvet på følgende produkter fra de deltagende virksomheder.

APV Heat Transfer (i tæt samarbejde med Arla Foods v. Brabrand Mejeri):

- En rustfri stålplade varmeveksler med sol-gel belægninger på pladerne.

Arla Foods v. Brabrand Mejeri:

- En svejsesål med tribologisk belægning på overfladerne.

Electrolux A/S (fortsat afprøvning af produkter fra fase 1):

- Blæserhjul belagt med sol-gel.
- Varmelegemer behandlet med tribologiske overflader.

Grundfos:

- Små flow- og tryksensorer belagt med sol-gel.
- Aksler og rotorhylster i cirkulationspumper belagt med sol-gel og behandlet tribologisk.

Vestas aircoil A/S:

- En mindre varmeveksler belagt med sol-gel afprøvet under kontrollerede forhold.
- En større varmeveksler/ladeluftskøler belagt med sol-gel og afprøvet hos et gartneri.

Teknologisk Institut:

- Et antal rør overfladebehandlet med tribologiske belægninger og belagt med sol-gel afprøvet i laboratorium.
- En række testemner af forskellig art, inkl. små testplader behandlet tribologisk og belagt med sol-gel afprøvet bl.a. hos Grundfos (slid-tests på plastplader) og APV (korrosionstest på stålplader).

1.3.1 En plade varmeveksler med sol-gel belægning

Varmeveksleren anvendes til at opvarme koldt, kalkholdigt grundvand til rengøringsformål på mejeriet. Med baggrund i de indledende laboratorietests har APV fremstillet og leveret et rustfrit stål plade varmeveksler til Brabrand Mejeri. Veksleren har 31 tynde stålplader i størrelse 495 mm x 925 mm. Teknologisk Institut har opnået en FDA godkendelse for at anvende sol-gel INC 23 blandingen på vekslerpladerne i mejeriet, og begge sider af pladerne er blevet behandlet. Som reference er der af flere omgange undersøgt en eksisterende veksler. Under normal drift lukkede denne veksler til med kalk og andet snavs efter 4, maks. 6 uger, hvorefter den skulle CIP-renses med kemikalier, som koster tid og ressourcer samt belaster miljøet.

En identisk veksler med de behandlede plader har nu været i drift siden ultimo november 2006, dvs. i skrivende stund har veksleren været i drift i ca. 4 måneder, uden at der har været problemer. Veksleren er blevet lukket op og inspiceret to gange i løbet af de 4 måneder, og inspektionen viser pæne overflader. Sidste gang veksleren blev inspiceret var det nødvendigt at spule kanterne af pladerne rene med vand inden veksleren blev samlet igen for at undgå utætheder i pakninger.

Besparelserne skønnes p.t. til 10.000 kr./år i reduceret behov for at rense for kalk og færre driftsproblemer. Felttest fortsætter for parternes egen regning, selv om projektet er afsluttet. Og det er naturligvis spændende at se, hvor lang tid der skal gå, inden veksleren skal renses.

1.3.2 En svejsesål med tribologisk behandling

En svejsesål er en særlig maskindel på tappelinier, og findes typisk hos mejerier, men også hos en lang række andre virksomheder. Svejsesålen funktion er at påsvejsede plast eller lakeret metalfolie som låg på plastbægre. Tolerancerne er små, og der er behov for stor nøjagtighed for at sikre at lågerne svejses tæt. På grund af folieaflejring, utætheder, overfyldte bægre eller andre produktionsmæssige årsager bliver svejsesåle ofte snavsede og kræver regelmæssig rengøring. Rengøring foretages manuelt typisk med stålborste, og dette resulterer ofte i ødelagte overflader, da der er anvendt forholdsvis bløde materialer med en meget god varmeledningsevne (kobber- eller aluminiumlegeringer) - i visse tilfælde kombineret med bløde Teflon®-belægninger. Figur 1-6 viser en svejsesål.



Figur 1-6 Den overfladebelagte svejsesål fra Brabrand Mejeri

Typisk holder en svejsesål i ca. 14 dage uden rengøring. En svejsesål med en tribologisk behandling er blevet afprøvet på en tappelinie hos Brabrand Mejeri, og efter ca. 5 måneders drift har maskindelen opført sig ubeklageligt, og den er nem at rengøre uden efterfølgende problemer med pasninger og utætheder.

1.3.3 Blæserhjul med sol-gel belægning

Tidligere afprøvninger af blæserhjul hos Electrolux i Tommerup samt udvidet feltafprøvning af blæserhjul installeret i en tørretumbler i USA viste lovende resultater i løbet af fase 1. Overfladerne fremstår helt blanke, mens referencen i rustfrit stål fremtræder loddent med fnuller.

I fase 2 er afprøvningen af blæserhjul installeret i tørretumbleren i USA fortsat - og suppleret med erfaringer fra afprøvning af blæserhjul i Tyskland. Resultaterne har igen været meget positive. Blæserhjulene er meget rene, selvom de er installeret i et meget belastet miljø. Med baggrund i de gode resultater konkluderes, at den rigtige sol-gel blanding til netop denne anvendelse er fundet, og fremover vil belægning af blæserhjul betragtes som en kommercielt fornuftig aktivitet. Konkurrencen er hård og prisen en afgørende faktor. Derfor er Electrolux i gang med at undersøge muligheder for en industrialiseret belægningsproces af blæserhjul i store stykantal.

1.3.4 Varmelegemer med sol-gel og tribologiske behandlinger

Tidligere afprøvning af varmelegemer i fase 1 har vist lovende resultater og afprøvning fortsatte i fase 2. Efter ca. et halvt år inde i fase 2 blev varmelegemerne desværre ved en fejl afkalket under et planmæssigt servicebesøg. Efter afkalkningen blev varmelegemerne alligevel inspiceret, men det var ikke muligt at aflede nogle resultater. Da varmelegemerne kort tid efter stod til at blive udskiftet og erstattet af nye varmelegemer, var det ikke muligt at fortsætte testen, og der kan ikke drages konklusioner omkring virkningen af overfladebehandlingerne. Det kan dog konstateres, at der ikke har været særlig store kalkbelægninger på varmelegeme, som underbygger tidligere erfaringer, der peger på, at kalken bygges op til en vis tykkelse, hvorefter den springer af i flager på grund af interne spændinger mellem kalkbelægningen og varmelegemet. Evt. hjulpet af den gentagne opvarmnings- og afkølingscyklus, som varmelegemerne typisk har – og som muligvis påvirker vedhæftningen af kalk.

Der er dog blevet suppleret med en række laboratorieeksperimenter, som er gennemført med varmelegemer behandlet med tribologiske overflader i form af DLC-belægninger med efterfølgende laserstrukturering af forskellige mønstre (se afsnit 1.2.3).

1.3.5 Små flow- og tryksensorer med sol-gel belægninger

Grundfos producerer nogle små sensorer, hvor sensordelene kan være følsomme over for belægninger af fast materiale som f.eks. kalk. De små sensorer er monteret i et hus af plast, og udsættes for temperaturer på maksimalt 120 °C.

Der er blevet belagt 5 stk. af hver sensortype med 2 forskellige sol-gel belægninger, dvs. 20 testemner i alt. Sensorerne er blevet afprøvet i Grundfos' langtidsprøvestand i Brabrand ved Århus, hvor der er adgang til meget kalkholdigt vand.

Der er opsamlet en del data, men det statistiske grundlag er ikke så stort, så resultaterne er en blanding af kvalitativ vurderinger og identificering af nogle trends.

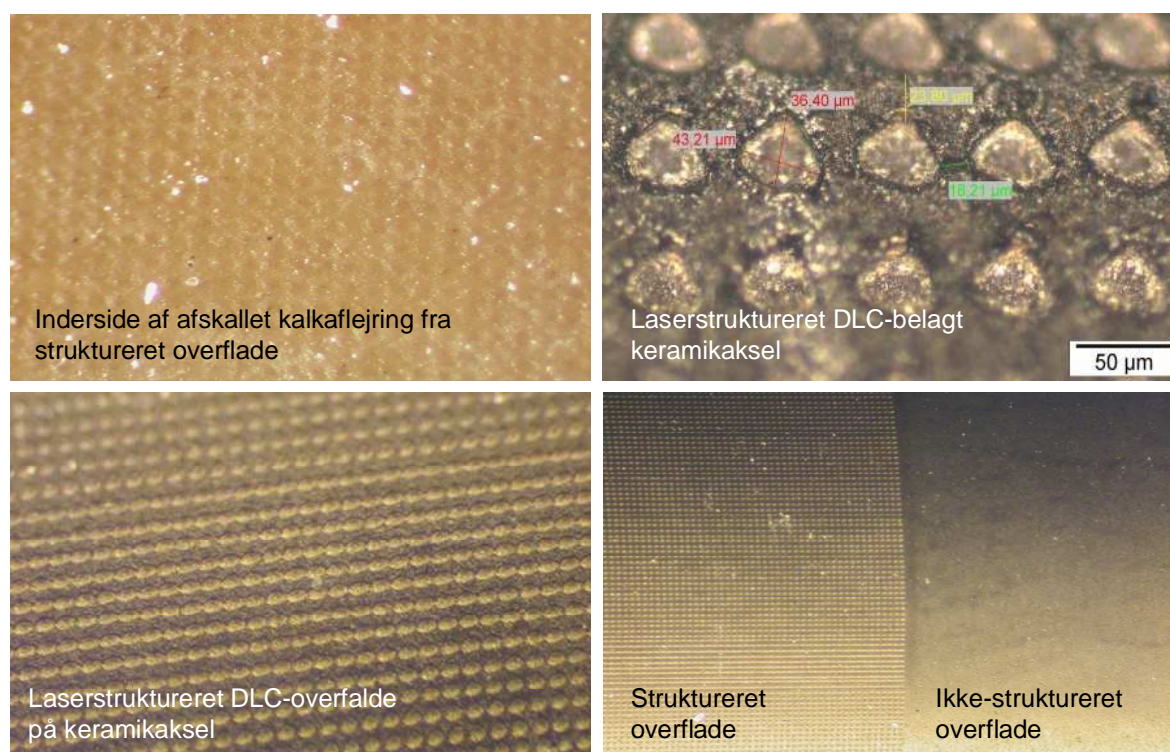
Umiddelbart viste sol-gel belægningerne ingen markant positiv effekt. Dertil skal det siges, at testemnerne, der blev belagt, var som færdige komponenter, hvor man ønskede en belægning af en lille sensorflade på den færdige komponent. Det havde været mere ideelt med en belægning af sensorfladen inden samling af komponenten, således at afrensning og belægningsarbejde havde været mere optimalt.

1.3.6 Aksler og rotorhylster til cirkulationspumper med sol-gel og tribologiske behandlinger

Under almindelige driftsforhold sker der tilkalkning omkring cirkulationspumpernes aksel, når der opereres i kalkholdigt vand. Kalken kan blokere for akslernes rotation og pumperne går i stå. Akslerne er fremstillet af et keramisk materiale og opererer primært i et temperaturområde omkring 60 - 85 °C, men kan kortvarigt blive udsat for temperaturer omkring 100 °C.

Akslerne blev overfladebehandlet med DLC-belægninger samt sol-gel, og afprøvet hhv. i laboratorium og i Grundfos' langtidsprøvestand (svarende til virkelige driftsforhold) i Brabrand ved Århus. Figur 1-7 viser fotos af de forskellige overflader.

Der er blevet forsøgt med en sol-gel belægning på både aksel og rotorhylster i 15 pumper, men pasning var for stram. Efterfølgende blev kun akslen belagt i 15 pumper, som blev afprøvet i Grundfos' langtidsprøvestand (svarende til virkelige driftsforhold) i Brabrand ved Århus. 4 aksler blev behandlet med tribologiske overfladebelægninger med og uden laserstrukturerede mønstre, og langtidsvirkningen blev afprøvet i testopstilling hos Teknologisk Institut.



Figur 1-7 Fotos, som viser detaljerne ved de forskellige overflader

Flere af pumperne faldt ud af testen pga. diverse fejl og defekter. De resterende aksler og rotorhylstre gav ikke et tilstrækkeligt statistisk grundlag for at vurdere resultaterne, som ikke umiddelbart var entydige: I nogle pumper så overflader ud til at virke fint - i andre pumper var der meget kalkudfældning.

1.3.7 Ladeluftskøler med sol-gel belægning

Interessen for at belægge en ladeluftskøler med sol-gel er primært for at beskytte overfladerne mod korrosion, da kølerne oftest er installeret i aggressive miljøer.

For at kunne svare på det ubesvarede spørgsmål fra fase 1, om sol-gel belægningen påvirker varmeledningstal, er der blevet gennemført en laboratorietest, hvor ydelsen fra en ca. 7 kW varmeveksler er blevet målt under kontrollerede forhold. Målingerne blev gennemført uden belægning af sol-gel på kølefladerne, derefter med sol-gel belægning af kølefladerne. Målingerne viste ingen målbar forskel i ydelsen, og det konkluderes at de tidligere problemer skyldes problemer med påføring af sol-gel materialet.

Efter gennemførelsen af laboratorietesten blev der iværksat en felttest af en større ladeluftskøler belagt med sol-gel - installeret hos et gartneri. Der er udviklet nye belægningsmetoder og resultaterne har været meget positive: Veksleren har fuldt ud ydet den ønskede (og beregnede) effekt, og overfladerne viser ingen synlig tegn på korrosion. I forbindelse med almindelig serviceeftersyn, som blev foretaget efter 6 måneders drift kunne konstateres en lettere tilsmudsning af kølerens kolde side. Smudset kunne let børstes af med en almindelig blød husholdningskost. Baseret på de oprindelige kølere vides det, at det er den kolde side der er værst ramt af tæring, derfor blev en prøve af smudset sendt til analyse hos Teknologisk institut. Analysen viste, at prøven bestod primært af kobbersulfid, som kan dannes når kobber påvirkes af svovlbrinte. Det peger på, at overfladebelægningen ikke har været fuldstændigt, da der ellers ikke vil være blotlagte kobberoverflader. Konklusionen er, at sol-gel påføringsmetoden er blevet markant bedre, men der er behov for en yderligere optimering.

På basis af projektets resultater har Vestas aircoil nu valgt at behandle en række kølere, som skal leveres til en motorbygger. Disse kølere bliver sat i drift i 2007.

1.4 Konklusion

I projektets fase 2 er der blevet gennemført tests på produkter med både tribologiske og sol-gel overflader. Der er gennemført flere tests med overflader, som viste de bedste kalkafvisende egenskaber i fase 1 og der er suppleret med en række nye overflader. Afprøvningsne er blevet udvidet ved såvel flere laboratorietests som afprøvninger af supplerende produkter i felten.

Det er demonstreret ved feltafprøvning, at en velegnet sol-gel belægning kan reducere rengøringsintervaller og driftsforstyrrelser kraftigt på en vand/vand varmeveksler hos et mejeri. Den nye belægning har fået en FDA godkendelse, og resulterer i betydelige drifts-, energi- og miljøbesparelser. Hele gevindsten er ikke beregnet endnu, da veksleren stadig kører i skrivende stund (4 gange så lang tid som normalt) uden tegn på et behov for rengøring, men et konservativt bud fra mejeriet er besparelser i størrelsesorden 10.000 kr. alene baseret på besparelser på driftsomkostninger.

Det er desuden demonstreret ved feltafprøvning af en svejsesål behandlet med en tribologisk overfladebelægning, at dette giver helt nye muligheder for langt driftstid og rengøringsvenlighed. Der findes et enormt antal svejsesåle i produktionsvirksomhedernes

tappelinier og derved et betydeligt besparelspotentiale. Efter ca. et halvt år med problemfri drift vurderer mejeriet at det årlige besparelspotentiale er ca. 60.000 kr. /år

Det vurderes, at sol-gel belægning af blæserhjul til tørretumblere er nu en kommerciel aktivitet.

Laboratorieforsøg med en luft/vand varmeveksler belagt med sol-gel dokumenterer ingen målbar forskel i varmeovergangsegenskaber for en varmeveksler behandlet med sol-gel. Dette underbygges af feltafprøvning. Feltafprøvning af sol-gel belægninger af en ladelufts-køler har vist en imponerende modstand mod korrosion. Dette betyder væsentlig længere driftstid med besparelser i materialer, energi til produktion m.m.

Sol-gel behandling af små plast flow- og tryksensorer har ikke resulteret i entydige resultater.

Sol-gel behandlinger af keramiske aksler til pumper var ikke en succes. Tolerancerne er så stramme, at belægningen blev hurtigt slidt og blokerede for bevægelserne. Tribologiske behandlinger har vist bedre egenskaber og producenten vurderer at det er nødvendigt, at der i fremstillingsprocessen tages højde for belægningens lagtykkelse for at opnå optimale testbetingelser.

Gentagne laboratorieprøvninger af testrør med forskellige overflader har vist gode slidegenskaber for både tribologiske og sol-gel behandlinger. Kalkbelægninger kan dog se voldsomme ud, selvom de har en dårlig vedhæftning til overfladen, dvs. kalken danner en ring eller krave rundt om røret, som kan sidde mere eller mindre løs. Der er behov for at finde metoder til at få kalken til at springe af eller krakelere, inden laget bliver for tykt.

1.5 Det videre arbejde

Der er fortsat behov for en dybere indsigt bag processerne, hvordan kalk og andet smuds udfælder og vedhæfter til forskellige materialer, samt et behov for en kortlægning af de væsentlige parametre. En bedre forståelse af dette område vil kunne kombineres med viden om overfladebelægningerne og bidrag til at kunne matche belægninger og behandlinger til produkterne.

På den ene hånd vurderes teknologien i nogle tilfælde at være moden nok til kommercielle anvendelser, f.eks. belægning af sol-gel på blæserhjul og varmevekslerplader, men der er også behov for en videreoptimering af sprøjte og dyppeprocesser for emner med komplicerede geometrier. På den anden hånd er der en enorm vifte af andre produkter, som bliver udsat for smuds- og kalkbelægninger, som p.t. er uafprøvede, men hvor en overfladebehandling kunne være gavnlig.

Nye materialer og overflader kommer på banen hele tiden. Der er behov for at arbejde systematisk med forskellige – måske også utraditionelle - blandinger af materialer og overflader, som kan være med til at skabe indre spændinger mellem kalk og produktets overflade med henblik på at få kalklaget til at springe af "af sig selv". Det vurderes, at der er et stort potentiale for anvendelse af ny viden fra nanoteknologien.

2 Beskrivelse af materialer til overfladebehandling og belægninger

Der henvises til bilaget, jf. kapitel 6 for en dybdegående beskrivelse. I dette afsnit præsenteres et resumé af bilaget, som omfatter de forskellige overfladebehandlinger anvendt i rapporten, inkl. de seneste nye tiltag inden for området.

I projektet er der anvendt følgende sol-gel belægninger og tribologiske behandlinger.

Tribologiske behandlinger:

- Funktionelt graduerede DLC-belægninger (Diamond Like Carbon) deponeret ved PVD (Physical Vapour Deposition).
- Overstående belægningssystem kombineret med laserstrukturering.

Sol-gel belægninger:

- I fase 2 er der primært arbejdet med belægningstyperne INC 33 og INC 23. Egenskaberne beskrives kort i følgende tabel:

Belægning	Komp.	Hærde temp. [°C]	Effekt
INC 23	1	170	Korrosionsbeskyttende, samt gode smudsafvisende/easy-to-clean egenskaber (bl.a. kalk), FDA godkendt
INC 33	2	140	Primært kalkafvisende samt smudsafvisende egenskaber, kan ikke FDA godkendes

Tabel 2-1 Overordnede egenskaber for sol-gel blandinger INC 23 og 33

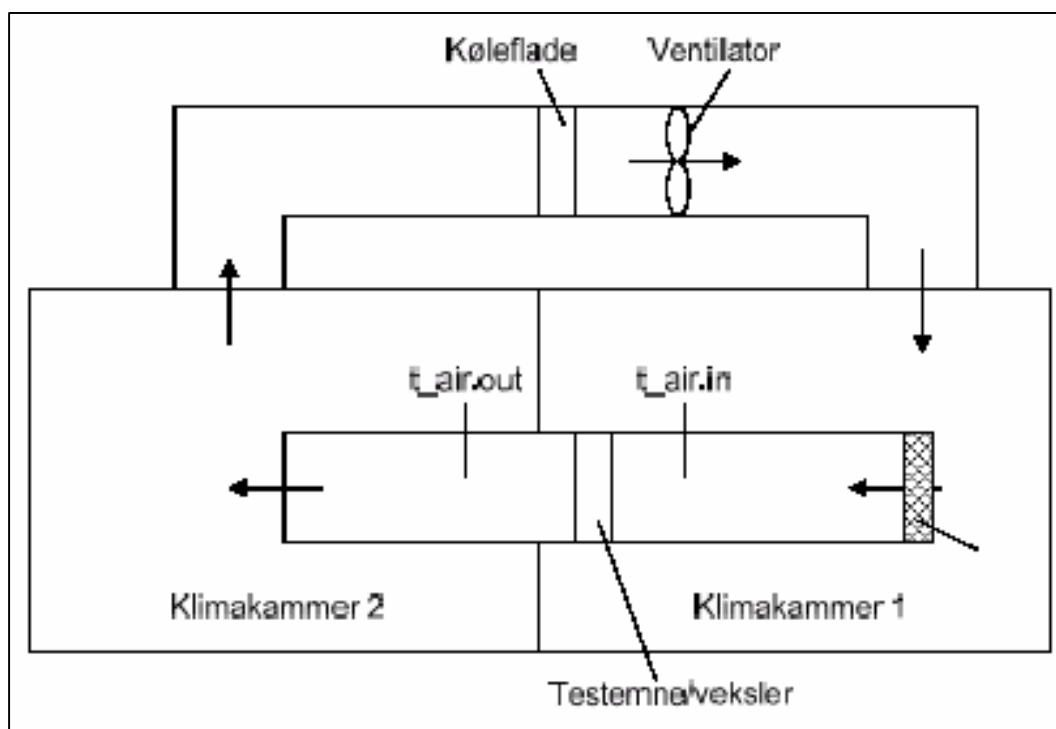
Behandling af mindre overflader og vekslerne til anvendelse hos gartneriet blev udført af Teknologisk Institut. For større overflader eller større stykantal anvendes virksomheder med ekspertise inden for industrilakeringsområdet. Behandling af varmeveksler plader til afprøvning hos Brabrand Mejeri blev udført af Accoat A/S.

3 Test i laboratoriet

3.1 Varmeovergangstal

Resultaterne fra fase 1 viste et stort fald i varmevekslerens ydelse efter behandling af overfladerne. Der var ikke umiddelbare gode forklaringer på dette, med sol-gels virkning på varmeovergangstal blev foreslået som mulige fejl. Ved opstart af fase 2 blev andre forskellige forklaringer også fremført, inkl. dannelsen af en vandfilm på overfladerne i stedet for vanddråber, som muligvis kunne påvirke ydelserne. For mere systematisk at undersøge sol-gels evt. påvirkning på varmeledningstal blev det besluttet at udføre en simpel ydelsestest på en mindre varmeveksler installeret under kontrollerede (laboratorium) forhold. Først skulle den ubehandlede veksler afprøves for ydelser. Derefter skulle veksleren belægges med sol-gel og afprøves på ny.

Veksleren var en luft/vand veksler fra Flex Coil A/S, med ca. 5 kW ydelse. Afprøvning af veksleren blev udført hos Teknologisk Institut i Køle- og Varmepumpetekniks laboratorium. Figur 3-1 viser opstillingen.



Figur 3-1 Laboratorietest af varmeveksler: Skitse af testopstilling

På luftsiden blev veksleren monteret mellem to standard 300x300 ventilationskanaler, hver med en længde på 2 meter. Veksleren blev tilsluttet en vandkreds med mulighed for regulering af fremløbstemperaturen. Vandkredsen monteredes med udstyr for måling og registrering af vandmængde samt til- og afgangstemperatur til fastlæggelse af overført varmeeffekt.

Kanalerne, hvori veksleren var monteret, blev placeret mellem to klimakamre som illustreret i nedenstående skitse. Luften suges via en ventilator fra det ene klimakammer op i et kanalsystem og forbi en køleflade, hvor den nedkøles til den ønskede temperatur før varmeveksleren. Luften varmes op i veksleren, og den suges igen op i kanalsystemet. Luftmængden reguleres vha. frekvensstyret ventilator.

Lufthastigheden gennem varmeveksleren blev målt vha. håndholdt hotwire anemometer. Målingerne blev foretaget både før og efter varmeveksleren ved en traversering på tværs af kanalen i 4 punkter i henhold til standard SIS 827204. Luft- og vandtemperaturen i veksleren blev målt med 4 stk. Pt100 følere monteret dels i kanalen og dels i vandkredsen umiddelbart før veksleren. For at undgå skæv luftfordeling i kanalen før veksleren, blev der skabt et tryktab i form af et filtervæv placeret ved indløbet til tilgangskanalen.

Målingen af vekslerens ydelse på luftsiden er behæftet med en væsentlig større usikkerhed end på vandsiden, og derfor sammenlignes ydelserne på vandsiden før og efter overfladebehandlingen. Resultaterne viser en forskel på ca. 2 %, som stort set er det samme som testopstillingens måleusikkerhed. Konklusionen er, at belægning af sol-gel ikke påvirker varmeovergangstal og vekslerens ydelse. Denne konklusion underbygges af feltafprøvning af en større varmeveksler, jf. også resultaterne præsenteret i kapitel 4.

3.2 Opbygning af kalkbelægnings på metaltestrør, keramiske aksler mv.

For at kunne vurdere vedhæftningsevnen af kalk på de forskellige varianter af overflader belægges et 20 cm langt rør med diameteren 8 mm, se figur 3-2. Seks rør, hvoraf nogle er referencerør af f.eks. rustfrit stål, monteres i en ramme. Rørene opvarmes indvendigt med vand ved ca. 80 °C, og rørene oversprøjtes med koldt drikkevand med hårdhed 17 –20 dH.

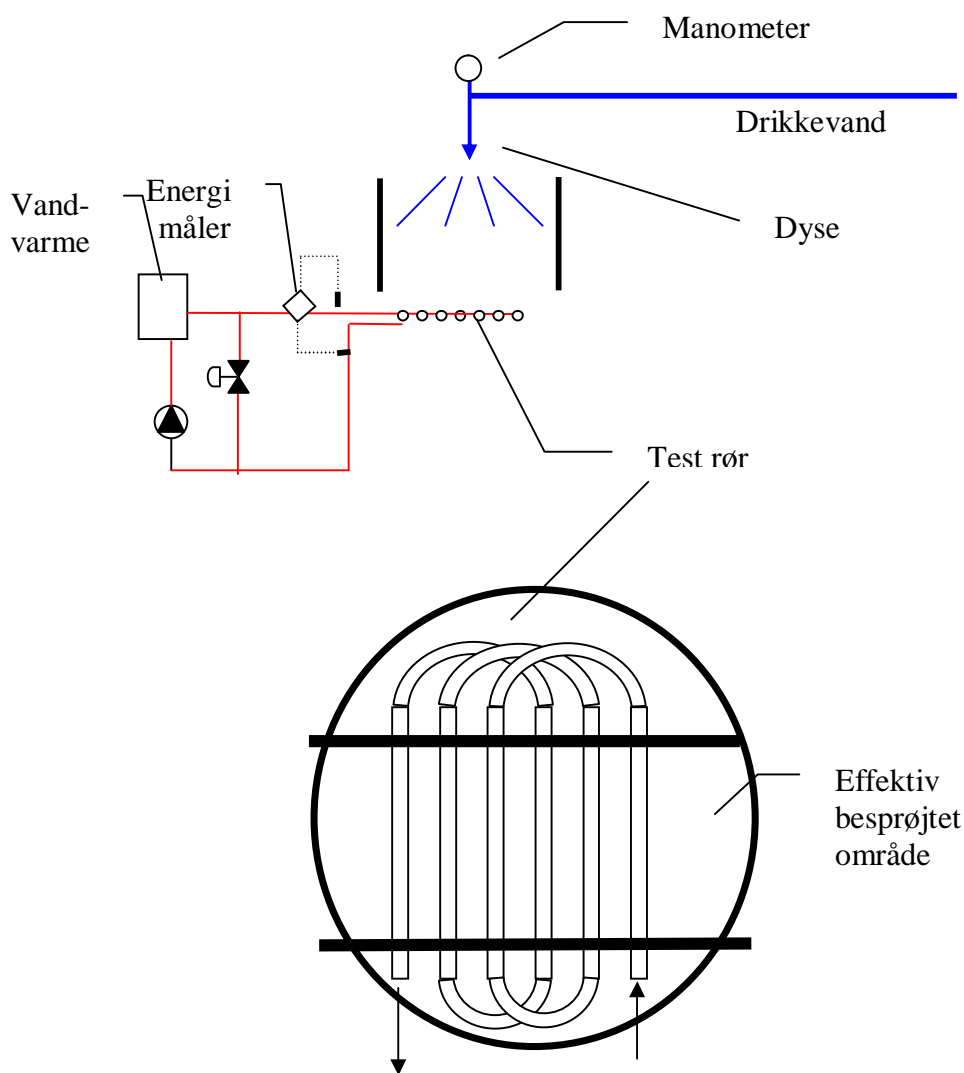
Dels på grund af opvarmning af vandet og især på grund af fordampningen vil vandet blive overmættet, og der vil udfælde sig kalk på rørene. Uanset overfladens beskaffenhed vil der udfælde sig kalk på rørene netop på grund af fordampningen, og vandstrålerne/tågen fra dysen er for blød til at kunne rive kalkbelægningen af. Keramiske aksler fra Grundfos' pumper er også afprøvet i prøvestanden.

3.2.1 Opbygning af kalkbelægnings på metaltestrør

Der er blevet gennemført en række gentagne tests af aksler og rustfrie rør med forskellige overflader til undersøgelse af langtidsvirkning og virkning af gentagne tilkalkning/afkalkning/tilkalkning/afkalkning osv. Følgende materiale er blevet afprøvet:

- Sol-gel type INC 23
- Sol-gel type INC 33
- Keramisk Nikkel og Teflon blanding
- Keronite og Teflon blanding
-

Under test blev et tykt lag kalk opbygget på alle testemner. Kalken var ikke "bare faldet af" under test. Men kalken var nem at fjerne, enten ved let mekanisk påvirkning eller i ultralydsbad.



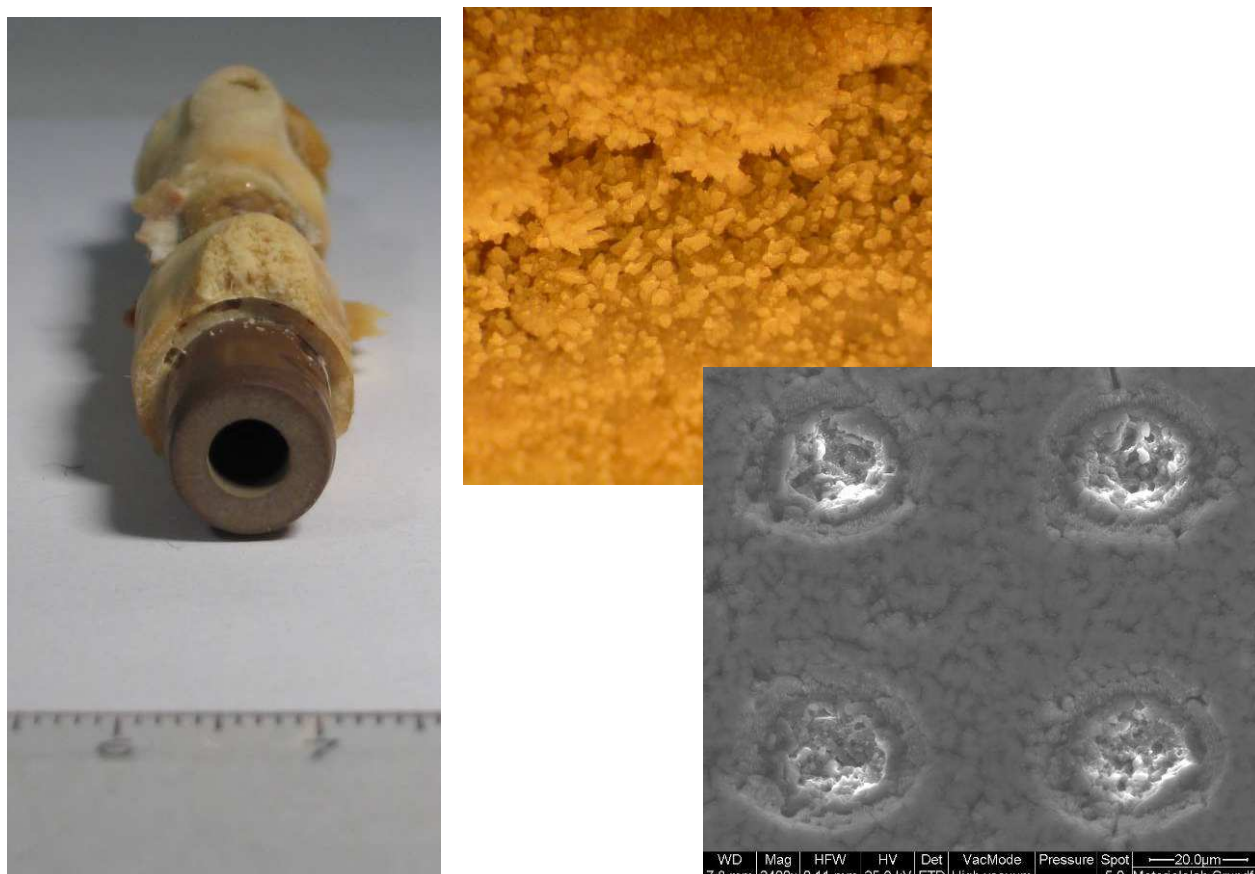
Figur 3-2 Opbygning af kalklag på testrør belagt med den overflade, der skal testes. Der indsættes referencerør af rustfrit stål eller andre materialer for sammenligning

Laboratorieudstyret virker fint til udfældning af kalk på testemnerne, men det kan være vanskeligt at drage konklusionerne fra faldtest. Resultaterne er, at selvom kalkbelægningen bliver slået løs - hvis belægningen har formet en "kappe" hele vejen rundt om røret, kan den løse "kappe" glide frem og tilbage nogen gange, inden den falder af.

3.2.2 Aksler

4 aksler blev belagt med forskellige belægninger og testet i prøvestanden hos Teknologisk Institut. Resultaterne var positive – overfladerne så ud til at virke kalkafvisende, men kalken faldt/sprang ikke af af sig selv. Der skulle suppleres med en let fysisk påvirkning til at fjerne kalkbelægninger, såsom at skrabe let med en skrueetrækker.

Figur 3-3 viser fotos af akslen med kalklag samt detaljer af overfladen taget gennem mikroskop.



Figur 3-3 Fotos af kalkudfældning på keramiske aksler samt (det sort/hvid billede) detaljer af den rene overfladestruktur som set gennem mikroskop, forstørret x2400

3.2.3 Andre emner

Et antal små plader er blevet belagt med sol-gel og afprøvet hos APV og Grundfos.

I APV's testopstilling er rustfri stålplader med 4 forskellige sol-gel belægninger blevet afprøvet. Sol-gel typerne er INC 26, INC 23, INC 33 og SG 21. Indledningsvis omfattede afprøvningen en mekanisk test med varierende tryk, som bl.a. er en god måde at teste kontaktpunkterne, dvs. der hvor det største slid er. Resultaterne var positive, og for yderligere at undersøge, om belægningen er blevet gennemslidt blev pladerne testet med varmt saltvand – evt. huller i belægningen bliver tydeligt vist som korrosion. Pladerne er efterfølgende blevet undersøgt under mikroskop hos Teknologisk Institut. Der kan konkluderes følgende:

- SG 21: Ikke egnet
- INC 26: Ikke egnet
- INC 23: Velegnet
- INC 33: Velegnet

Næste trin var at udvælge enten INC 23 eller INC 33 til felttest, jf. afsnit 4.1.1

Hos Grundfos har man en testopstilling, hvor der kan undersøges slitage over tid på standardstørrelse (100 mm x 100 mm) plader. Pladerne neddyppes i vand eller i en vand/sand blanding og roteres. Der blev testet følgende pladetyper i testopstillingen – med følgende resultater:

Pladetype	Belægning	Test medie	Temperatur	Tid	Resultater	
					FTIR	SEM
Rustfrit stål 1.4301	INC 33	Vand	80°C	13 mdr.	Tendens til ændringer af belægning	
Rustfrit stål 1.4301	INC 33	Vand/sand	80°C	13 mdr.	Konklusion ikke mulig	Tendens til nedbygning af belægning
Rustfrit stål 1.4401	INC 33	Vand	80°C	13 mdr.	Tendens til ændringer af belægning	
Rustfrit stål 1.4401	INC 33	Vand/sand	80°C	13 mdr.	Konklusion ikke mulig	
Polypropylen	INC 33	Vand	60°C	7,5 mdr.	Belægning er intakt	
Polyamid (PA66)	INC 33	Vand	60°C	7,5 mdr.	Belægning er intakt	

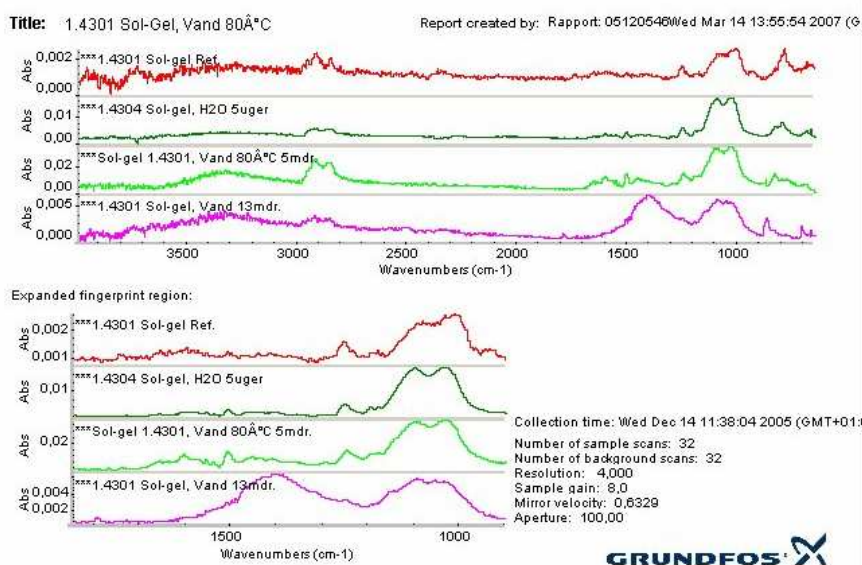
Tabel 3-1 Resultater af slidtest hos Grundfos (FTIR = Fourier Transform Infrared, SEM = Scanning Electron Microscope)

FTIR

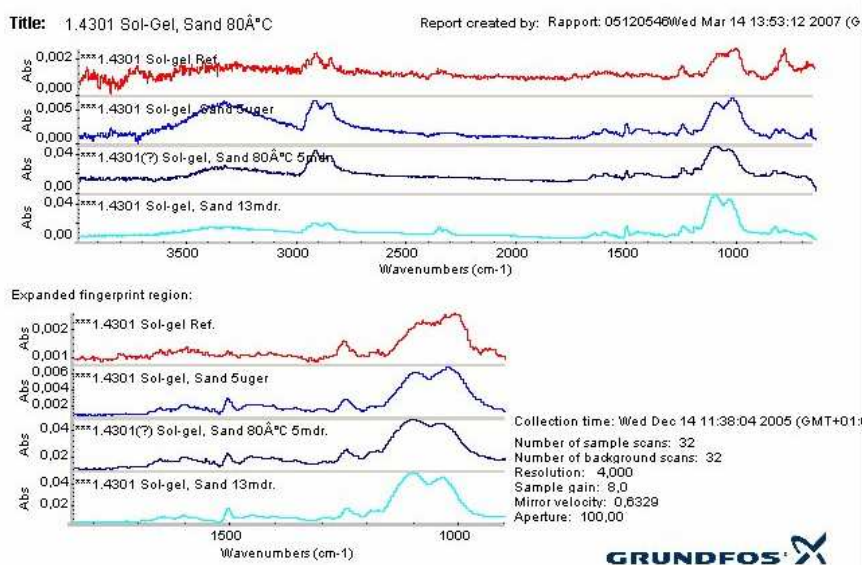
Der er anvendt FTIR (Fourier Transform Infrarød) og SEM (Scanning Electron Microscope) til at karakterisere overfladerne før og efter eksponering.

Testemnerne i rustfrit stål har været vanskelige at karakterisere ved FTIR. Det har ikke været muligt at se en tydelig udvikling over tid pga. forholdsvis lav absorption. Se eksemplerne i figur 3-4. I vand ses en tendens til at belægningerne ændres over tid, men i vand/sand er det sværere at konkludere noget.

Eksempel 1.4301 i vand



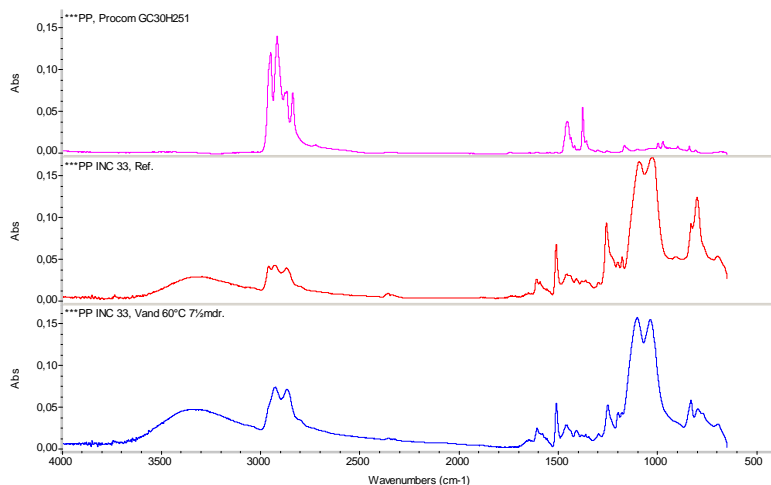
Eksempel 1.4301 i vand/sand



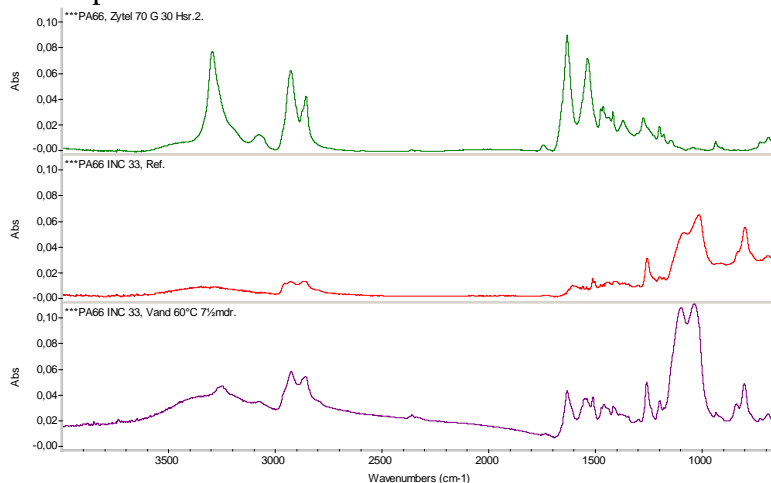
Figur 3-4 Eksempler på FTIR analyse af rustfrie stål emner

Testemner i polypropylen og polyamid har umiddelbart været lettere at karakterisere ved FTIR, se spektre i figur 3-5. Spektre viser at belægningen stort set ikke ændrer sig over tid.

Eksempel: PP med INC 33 i vand



Eksempel: PA66 med INC 33 i vand



Figur 3-5 Eksempler på FTIR analyse af plastemner

Der er lavet SEM-billeder af testemnerne i rustfrit stål 1.4301 inden og efter sandtest. Samtidig er der udført EDX-analyse (Energy Dispersive X-Ray analyse), for at måle tilstedeværelsen af sol-gel belægningen.

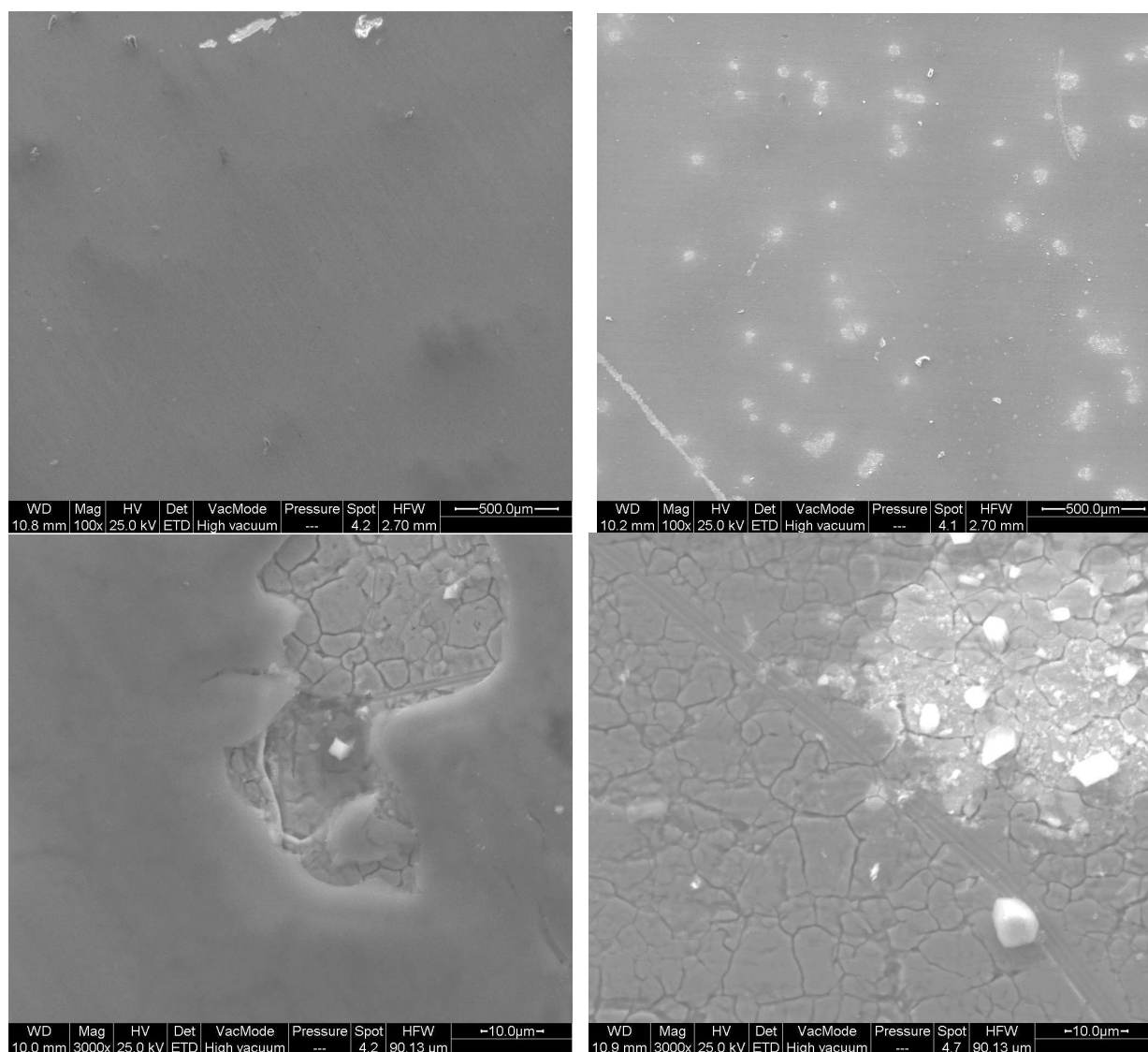
Reference emne (se billeder i figur 3-6):

Ved undersøgelse med SE detektor fremstår overfladen mørk i et jævnt lag dog med nogle lyse områder. EDX analyser viser at den jævne mørke overflade har pænt signal fra silicium hvilket indikerer at der er sol gel belægning. Analyser i lyse områder giver intet signal fra silicium hvoraf det konkluderes at de lyse områder er huller i sol-gel belægningen.

Emne efter 13 mdr. sand test (se billeder):

Der ses en del flere lyse områder med mange partikler. EDX analyser viser at det mørke område indeholder silicium mens de lyse områder ikke gør. De lyse områder er pænt afgrænsede og virker ikke som om det skyldes slid nærmere nedbrydning.

Ved sammenligning mellem reference og efter 13 måneders test ses det at der efter test er kommet flere huller i belægningen og at der i hullerne klæber sig en masse partikler til overfladen. EDX analyserne viser mindre signal fra den intakte belægning på testede emne end tilsvarende område på referencen. Dette indikerer at belægningen ikke kun har flere huller men at den også generelt er blevet tyndere.



Figur 3-6 SEM-billeder af testemner: Før og efter sand-test. Til venstre ses SEM-billeder af referenceemnet i 1.4301 ved forstørrelse 100x øverst og 3000x nederst. Til højre ses SEM-billeder af testemnerne efter 13 måneders test i vand/sand ved henholdsvis forstørrelse 100x øverst og 3000x nederst.

4 Felttest

4.1.1 En plade varmeveksler med sol-gel belægning

Prøveemnets funktion

Varmeveksleren anvendes til at opvarme koldt, kalkholdigt grundvand til rengøringsformål på mejeriet. Koldt grundvand varmes til ca. 65 °C, og bruges til at spule forskellige maskindele af processen rene. Der forbruges ca. 100 - 120 m³ vand om ugen.

Varmeveksleren består af et antal tynde plader, og især ved kontaktpunkterne mellem pladerne kan der være problemer med belægninger af kalk og andet smuds.

Perspektiverne ved anvendelse af en overfladebehandling af rustfri stålplader er, at disse kan anvendes som erstatning for titanium, som er et meget dyrt materiale, men nødvendigt, når der er tale om veksler, der skal opererer i aggressive miljøer, som f.eks. saltvand.

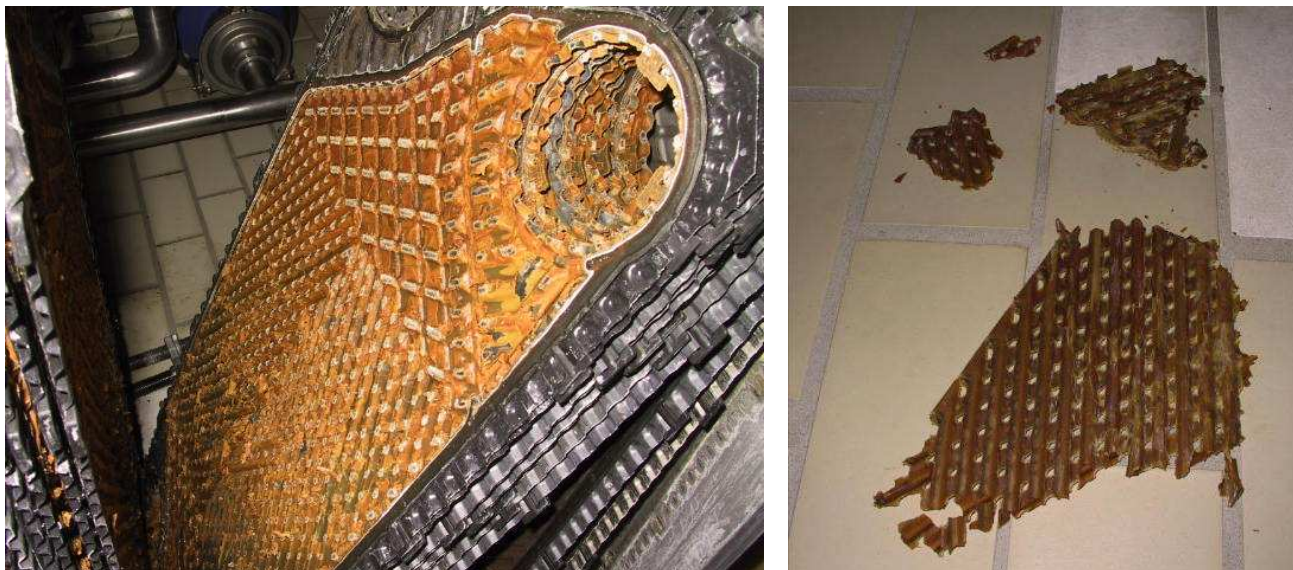
Godkendelse af overfladebelægning

For produkter, der installeres i mejerier, er det et ufravigeligt krav fra mejerierne, at materialer anvendt til overfladebelægning skal være fødevarer godkendt. I løbet af projektet har bl.a. mejerierne strammet deres krav yderligere, dvs. selv om varmeveksleren kun anvendes til opvarmning af vand til rengøringsformål, blev det også et krav, at materialerne skulle fødevarer godkendes. Undersøgelserne inden opnåelse af en godkendelse kan være en omfattende og tidskrævende proces, især hvis det anvendte stof indeholder nogle komponenter, der ikke allerede står på prøvningernes positive – eller negative lister. Det var tilfældet med sol-gel materialerne, hvor undersøgelserne skulle starte fra bunden. Det blev valgt at gennemføre undersøgelser på de 2 forskellige komponentsammensætninger, der viste gode resultater fra laboratorietests, nemlig INC 23 og INC 33. Tidligere erfaringer fra såvel laboratorie- og feltafprøvning har vist, at begge materialer har gode kalk- og smudsafvisende virkninger, dog ligger INC 33 marginalt bedre end INC 23.

Laboratorieprøvningerne viste, at INC 33 indeholdte et uønsket stof i for store mængder til godkendelsen. INC 23 indeholdte ingen uønskede stoffer, og blev godkendt.

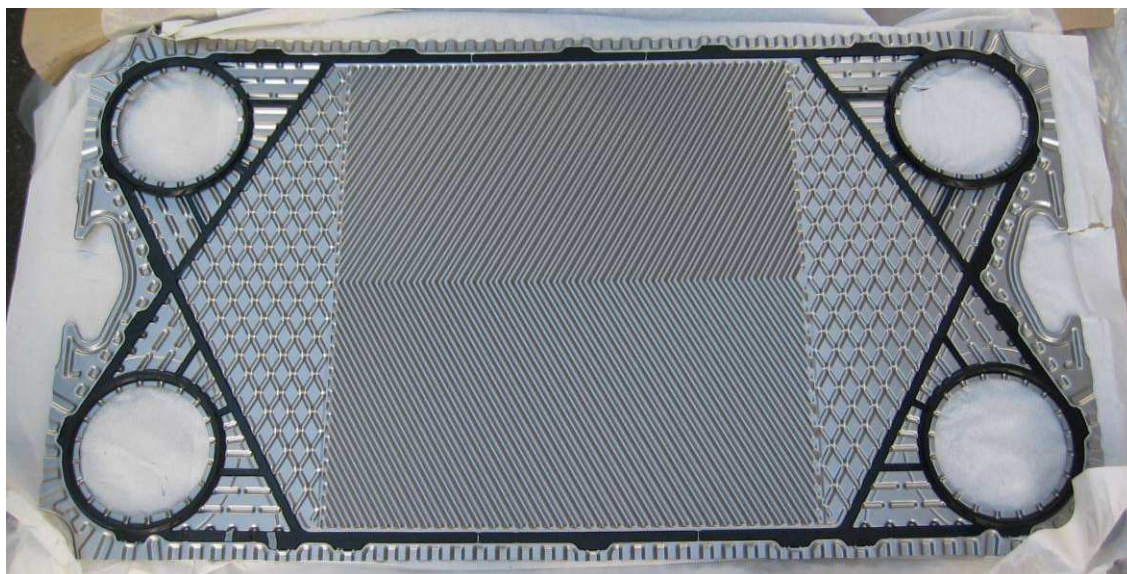
Felttest

Straks efter godkendelsen var i hus, fremstillede APV Heat Transfer et sæt plader til en vand/vand varmeveksler hos Brabrand Mejeri. Veksleren består af 31 tynde rustfri stålplader i størrelsen 495 mm x 925 mm. Begge sider af pladerne er blevet behandlet med en sol-gel belægning af firmaet Acccoat A/S, der har stor erfaring i industrielle overfladebehandlinger. Veksleren erstattede en næsten identisk veksler, som er blevet anvendt som reference, men dog med et sæt almindelige rustfri stålplader uden nogen form for overfladebehandling. Erfaring med den eksisterende veksler er, at den under normal drift lukker til med kalk og andet snavs efter 4, maks. 6 uger, hvorefter den skal CIP-renses med kemikalier. Rensning koster tid og ressourcer, og belaster miljøet. Figur 4-1 viser, hvor meget belægning der var i den eksisterende veksler ved en rutinerengøring efter ca. 4 uges drift.



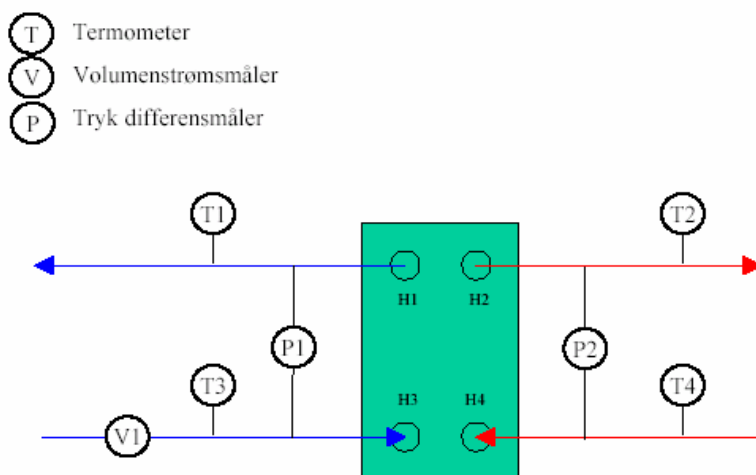
Figur 4-1 Typisk tilkalkning og tilsmudsning af veksler hos Brabrand Mejeri

Den nye veksler med de behandlede plader har nu været i drift siden 29. november 2006, dvs. i skrivende stund har veksleren været i drift i 12 uger, uden at der har været problemer. Figur 4-2 viser et billede af en ny, behandlet plade.



Figur 4-2 En ny, sol-gel belagt varmevekslerplade

Der blev monteret supplerende instrumenter til at give mulighed for at følge tryk- og temperaturforhold omkring veksleren for at få en hurtig indikation af problemer med tilstopning og evt. at kortlægge tilstopningsforløbet. Efter mere end 3 måneders drift er der dog fortsat ingen tegn på tilstopning af veksleren, og måledata har stort set vist konstante værdier. Figur 4-3 viser en skitse af vekslerinstallationen, inkl. instrumentering.



Figur 4-3 Skitse af varmevekslerinstallationen, inkl. instrumentering

Veksleren er blevet åbnet og inspiceret to gange i løbet af de 12 uger, og inspektion viser pæne overflader. Der er en tydeligt kalklag, men kalken er meget let at fjerne, f.eks. ved let berøring, børstning eller spuling med almindelig vand. Sidste gang veksleren blev inspiceret var det nødvendigt at spule kanterne af pladerne rene med vand inden veksleren blev samlet igen for at undgå utætheder i pakninger.

Figur 4-4 viser billeder af veksleren efter ca. 12 uges drift.



Figur 4-4 Veksler med sol-gel belagte plader. Kalk og andet snavs var meget let at fjerne.

Felttest fortsætter for parternes egen regning, selvom projektet er afsluttet.

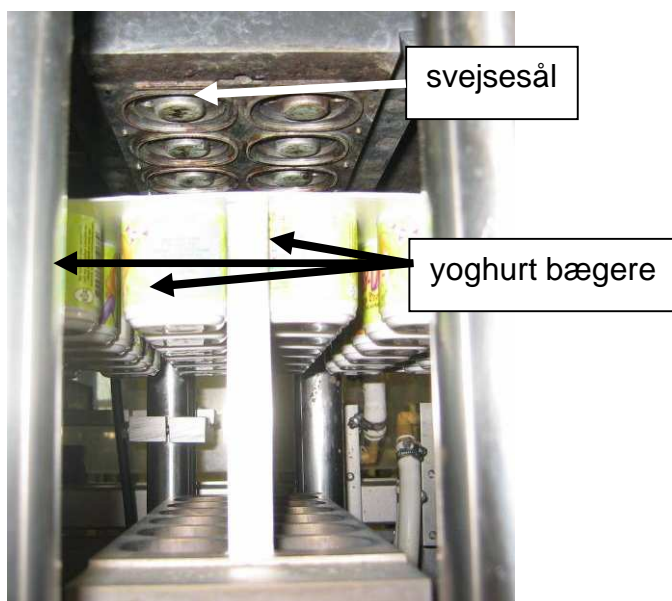
4.1.2 En svejsesål med tribologisk behandling

Prøveemnets funktion

En svejsesål er en særlig, men vigtig maskindiel, som findes på emballage- og tappelinier hos en lang række fødevarer virksomheder, og er almindelige på mejerier. Svejsesålen funktion er at svejse plast- eller folielåger på bægre fyldt med slutprodukter som f.eks. yoghurt. Tolerancerne er små, især fladhed og positionering, dvs. der er behov for stor nøjagtighed for at sikre, at lågerne svejses tæt. På grund af unøjagtig påfyldning, overfyldte bægre eller andre produktionsmæssige årsager bliver svejsesålenes arbejdsflader ofte snavsede. Dette betyder, at lågene ikke fastgøres ordentlig, dvs. der sker spild af slutproduktet, og produktionen skal standses, og overfladerne gøres rene. Da svejse-sålenes arbejdsflader er meget varme, kan påbrændte mælkeprodukter være svære at rense af, men for hårdhændede metoder kan nemt ødelægge overfladen – og dermed svejsesålenes funktion. Traditionelt belægges svejsesåle med teflon, men efter gentaget rengøring er Teflon-belægning ofte slidt af, og værktøjet kræver endnu hyppigere rengøring. Rengøring foretages manuelt og kræver ofte uplanlagte driftsstop inden produktionen kan fortsætte.

Felttest

En svejsesål fra en yoghurt-tappelinie hos Brabrand Mejeri er blevet belagt med kromnitrid, som er en meget hård keramisk tribologisk belægning. Figur 4-5 viser svejsesålen installeret i drift hos Brabrand Mejeri.



Figur 4-5 Den overfladebehandlede svejse-sål under felttest hos Brabrand Mejeri

I skrivende stund har den behandlede svejse-sål været i drift i ca. 4 måneder, og har fungeret upåklageligt. Vurderingen fra mejeriets side er meget positiv: Normal skal svejse-sålen rengøres ca. hver 14. dag. Med den nye overflade har maskindelen opført sig uden problemer, er nem at rengøre uden efterfølgende problemer med pasninger og utætheder, og det vurderes, at der helt klart er besparelser ved mindre driftsstop, spildt eller kasseret slutprodukt, ressourcer til rengøringstid, kemikalier til rengøringsmidler mm.

4.1.3 Blæserhjul med sol-gel belægning

Prøveemnes funktion

Blæserhjul i tørretumblere skaber den luftstrøm, som bliver blæst ind i tøjet og dermed skaber tørringen. Blæserhjulet bliver under brug nemt belagt med fnuller fra tøjet, der skal tørres. Blæserhjulets effekt nedsættes, og tørretiden forlænges - og med jævne mellemrum, skal hjulet rengøres. Der er således behov for blæserhjul, som kan holde sig fri for fnug i længere tid, hvorved en tørretid, som svarer til et rent blæserhjul, kan bibeholdes - og dermed et tilsvarende lavt elforbrug, samt at antallet af servicebesøg kan nedsættes.

Felttest

I projektets fase 1 blev afprøvet et blæserhjul belagt med sol-gel type INC 23 sammen med et standard blæserhjul i tørretumblere installeret på Electrolux's fabrik i Tommerup.

Resultaterne var gode, se figur 4-6, der tydeligt viser, at referencehjulet har et loddent udseende, idet det er belagt med tøjfnuller over hele overfladen. Desuden er der store klumper af sammenpresset fnuller, især hvor der er sat clips på hjulet for afbalancering. Det sol-gel belagte blæserhjul er helt blankt i hele overfladen bortset fra, hvor der er monteret clips for afbalancering af blæserhjulet.



Figur 4-6 Til venstre ses reference blæsehjulet, som overalt er belagt med fnuller, og har et loddent udseende. Til højre ses det sol-gel belagte blæserhjul, som står helt blankt

På baggrund af de positive resultater blev yderligere 2 blæserhjul belagt og testet under særlig hårde betingelser i en tørretumbler i USA. En udtalelse fra importøren, som aftager en stor part af tørretumblere produceret af Electrolux lyder, at de belagte blæserhjul er helt rene, og at teknikken virker meget lovende.

Afprøvning af blæserhjulene er fortsat i projektets fase 2, og resultaterne er ligeledes meget positive. Efter langtidsafprøvning af blæserhjul i USA, 6 blæserhjul i Tyskland og yderligere 2 blæserhjul i Danmark er konklusionen, at en sol-gel belægning af blæserhjul løser driftsproblemer med fnuller og andet skidt, og at belægningen nu er klar til kommerialisering.

4.1.4 Varmelegemer med sol-gel og tribologiske behandlinger

Prøveemnets funktion

Varmelegemer er beregnet til opvarmning af vand i industrielle vaskemaskiner. I vaskemaskinen sidder der 3 varmelegemer i bunden, hvilket giver mulighed for både at have et belagt varmelegeme og en reference i samme maskine.

Felttest

Afprøvninger fra fase 1 blev afsluttet uden at man kunne drage tydelige konklusioner. Derfor er afprøvning af varmelegemer med tribologiske overflader og sol-gel belægning en fortsættelse af prøvningerne fra fase 1.

De eksisterende varmelegemer blev undersøgt ca. et halvt år efter fase 2 startede, men desværre viser det sig, at legemerne er blevet afkalket for nylig under et planmæssigt servicebesøg. Varmelegemerne blev alligevel inspiceret, men det var ikke muligt at aflede nogle resultater om virkningen af overfladebehandlingerne.

Da varmelegemerne kort tid efter stod til at blive udskiftet og erstattet af nye varmelegemer, var det ikke muligt at fortsætte testen, og der kan ikke drages konklusioner omkring virkning af overfladebehandlingerne. Det kan dog konstateres, at der ikke har været særlig store kalkbelægnings på varmelegeme, som underbygger tidligere erfaringer, der peger på, at kalken bygges op til en vis tykkelse, hvorefter den springer af i flager på grund af interne spændinger mellem kalkbelægningen og varmelegemet, evt. hjulpet af den gentagne opvarmnings- og afkølingscyklus, som varmelegemerne typisk har – og som muligvis påvirker vedhæftningen af kalk.

Varmelegemerne er dog blevet behandlet med nogle eksperimentale tribologiske overflader kombineret med laserstrukturerede mønstre og afprøvet i laboratorium, jf. aktiviteterne herfra. Som beskrevet i afsnit 1.2.3 har det ikke været muligt at foretage klassificering af de respektive mønstres indvirkning på de kalkafvisende egenskaber, da der kræves et større struktureret areal på de enkelte testemner og en større række supplerende forsøg.

4.1.5 Små flow- og tryksensorer med sol-gel belægninger

Prøveemnets funktion

Den relative tryk sensor og vortex flow sensor er kombineret med temperatur sensorer. De anvendes i kedler til centralvarmesystemer, hvorimod differential tryk sensoren anvendes i robuste pumpeapplikationer til industrieldrift, som f.eks. olie.

På figur 4-7 er vist et foto af de omtalte sensorer.



Figur 4-7 Tryk- og flowsensorer

Felttest

Fem af hver sensortype blev belagt med 2 forskellige sol-gel-belægninger, dvs. 20 testemner i alt, og sensorerne blev installeret i Grundfos' egen testopstilling i Brabrand,

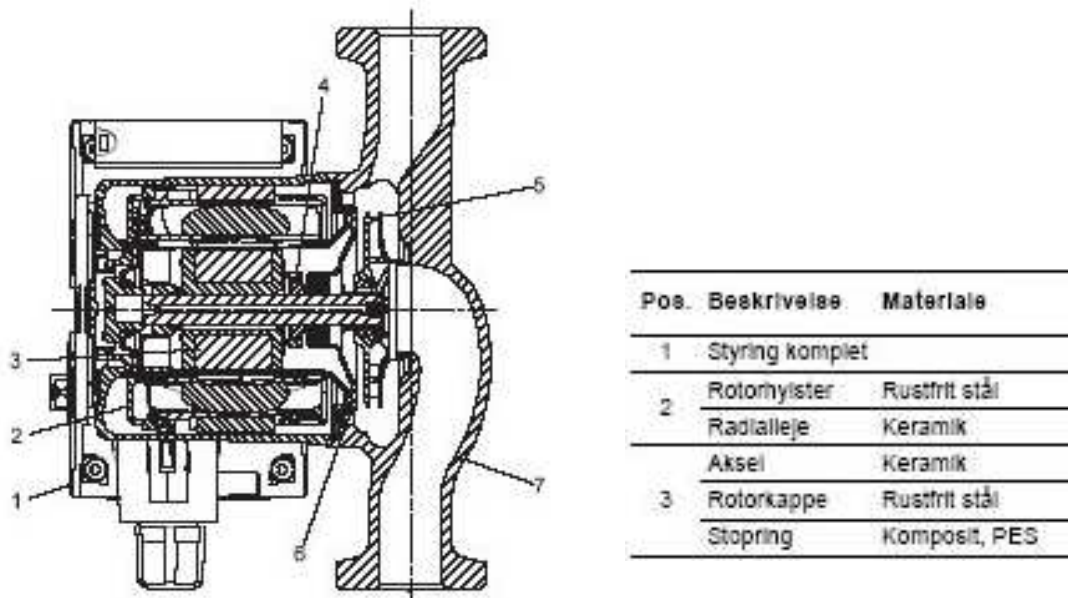
Tryksensorerne blev udsat for en såkaldt tryk/chok-test bestående af 8000 cykler med vandtemperatur vekslende fra 5 – 95 °C. Resultaterne var meget flotte - der var ingen kalkbelægninger på testemnerne.

Indledende undersøgelse af flowsensorerne viste en forholdsvis stor fejlprocent i målernes signalændring efter behandling, som evt. kunne skyldes behandlingen. Flere flowsensorer blev belagt og afprøvet.

4.1.6 Aksler og rotorhylster til cirkulationspumper med sol-gel og tribologiske behandlinger

Prøveemnets funktion

Snittegningen i figur 4-8 viser den fysiske placering af aksel og rotorhylster i cirkulationspumper.



Figur 4-8 Snittegning af cirkulationspumpe, med angivelsen af aksel og rotorhylster

Under almindelige driftsforhold sker der tilkalkning omkring cirkulationspumpernes aksel, når der opereres i kalkholdigt vand. Kalken kan blokere for akslernes rotation, og pumperne går i stå. Akslerne er fremstillet af et keramisk materiale og opererer i et temperaturområde på maksimalt 85 °C.

Felttest

De behandlede aksler og rotorhylster er blevet monteret i pumper, som er blevet afprøvet i Grundfos' egne prøvestande. Figur 4-9 viser et foto af testopstillingen i Brabrand, hvor pumperne blev monteret til langtidsafprøvning.

Sol-gel belægninger

Indledningsvis var der forsøgt med en sol-gel- belægning på både aksel og rotorhylster i 15 pumper, men pasningen var for stram, og belægningen lukkede for akslens rotation. Efterfølgende blev kun akslen belagt og afprøvet i 10 nye pumper. Pumperne er blevet testet i Grundfos' prøvestand i Brabrand i ca. 3 måneder.

Der er opsamlet en del data, men det statistiske grundlag er ikke så stort, så resultaterne er en blanding af kvalitativ vurderinger og identificering af nogle trends. Tabel 4-1 viser de overordnede resultater.



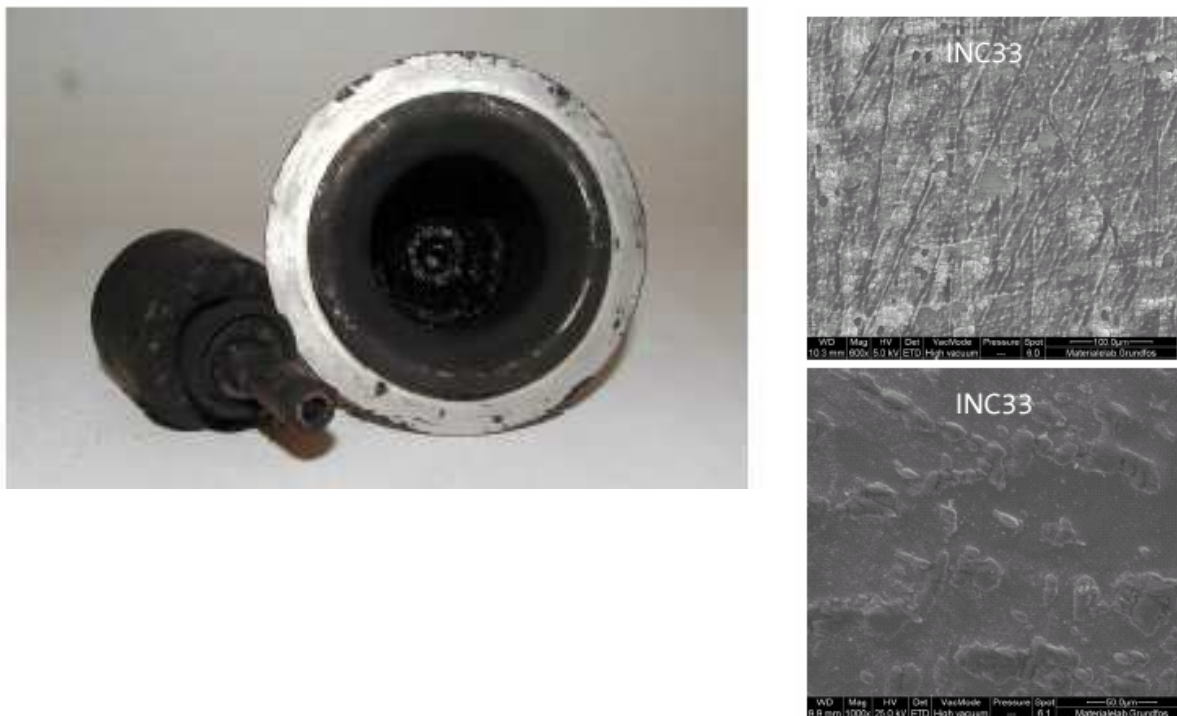
Figur 4-9 Foto af Grundfos' testopstillingen i Brabrand

Type	Antal	Blokeret	%
Std. pumpe	15	3	20
DLC aksel	2	1	50
INC23	4	0	0
INC33	4	1	25
SG21	7	4	57

Tabel 4-1 Overordnede resultater af langtidsafprøvning

3 pumper blev udtaget til en supplerende laboratorietest med magnetit. Magnetit-holdigt vand er meget slidende for overflader, og i testen cirkuleres en blanding af magnetit

opslæmmet i vand gennem pumpen. Afprøvning varer 128 døgn. Figur 4-10 viser resultaterne, og som det fremgår, slides sol-gel belægningen af, men da kun 3 pumper deltog i testen vurderes grundlaget til at være for spinkelt til at kunne drage konklusioner.



Figur 4-10 Resultater af magnetit-test

Der blev også udført en lagringstest hos Grundfos. Pumperne testes i vand, herefter de ligger i en ovn i 42 døgn (i denne periode vil vandet tørre ud), hvorefter pumperne forsøges startet. Tabel 4-2 viser resultaterne, hvor der sammenlignes med et tilsvarende antal almindelige pumper uden behandlede dele. Som det fremgår, startede ca. halvdelen af pumperne i begge grupper, mens den anden halvdel ikke kunne startes. Helt præcist startede flere pumper med behandlede dele, men det vurderes at det statistiske grundlag ikke er nok til at drage endelige konklusioner.

Test	Type	Placering i ovn		Tid (døgn)	Starter
Lagringstest	Alm. pumpe	Hoved		42	nej
Lagringstest	Alm. pumpe	Hoved		42	nej
Lagringstest	Alm. pumpe	Hoved		42	nej
Lagringstest	Alm. pumpe	Hoved		42	nej
Lagringstest	Alm. pumpe	Hoved		42	nej
Lagringstest	Alm. pumpe		Vandret	42	Trin 1 207V
Lagringstest	Alm. pumpe		Vandret	42	Trin 1 207V
Lagringstest	Alm. pumpe		Vandret	42	Trin 1 207V
Lagringstest	Alm. pumpe		Vandret	42	Trin 3 207V
Lagringstest	Alm. pumpe		Vandret	42	nej
Lagringstest	INC23	Hoved		42	Trin 1 207V
Lagringstest	INC23	Hoved		42	nej
Lagringstest	INC23	Hoved		42	nej
Lagringstest	INC23		Vandret	42	Trin 1 207V
Lagringstest	INC23		Vandret	42	nej
Lagringstest	INC33	Hoved		42	Trin 1 207V
Lagringstest	INC33	Hoved		42	Trin 1 207V
Lagringstest	INC33	Hoved		42	Trin 1 207V
Lagringstest	INC33		Vandret	42	Trin 1 207V
Lagringstest	INC33		Vandret	42	nej

Tabel 4-2 Resultater af lagringstest

Tribologisk behandlinger

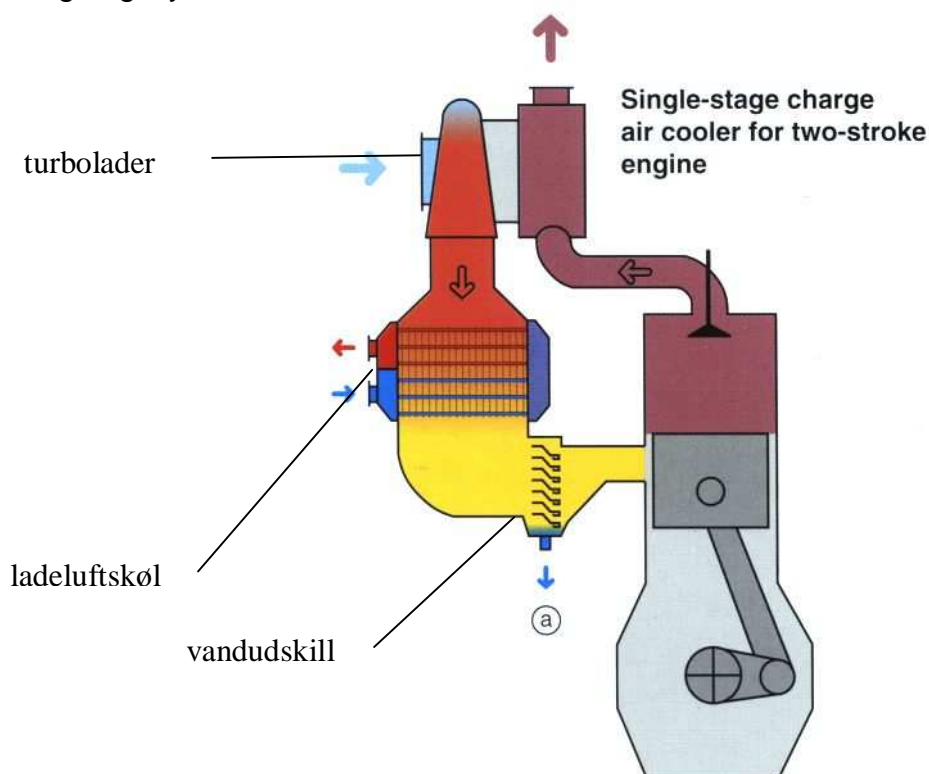
2 aksler blev belagt med forskellige DLC-belægninger og testet i prøvestanden hos Teknologisk Institut. Resultaterne var positive – overfladerne så ud til at virke kalkafvisende, men kalken faldt/sprang ikke af af sig selv. Der skulle suppleres med en let fysisk påvirkning til at fjerne kalkbelægninger, såsom at skrabe let med en skruetrækker.

2 aksler blev indbygget i pumper og afprøvet i testopstillingen i Brabrand. Efter 60 døgn driftstid var den ene aksel blokeret med kalk, der havde sat sig mellem akslen og rotorhylster, mens den anden havde lidt kalk i toplejet, men kalken sad løst og pumpen kørte videre.

4.1.7 Ladeluftkøler med sol-gel belægning

Prøveemnets funktion

Alle skibsmotorer og landbaserede motorer for produktion af el bliver i dag bygget med turboer, som øger mængden af luft i forbrændingskammeret. Ladeluftkøleren sidder imellem turboen og forbrændingskammeret og køler luft ned. Ved nedkøling af luften fylder luften mindre, hvorved mængden af luft i forbrændingen øges. Til at køle luften ned benyttes vand, som bliver ledt igennem et antal rør i ladeluftkøleren. Omkring disse rør strømmer luften, som derved afgiver varme til vandet. Rørene er påmonteret finner for at forbedre varmeovergangen, og Figur 4-11 viser placeringen af ladeluftkøleren i motorens luftindsugningssystem.



Figur 4-11 Forbrændingsmotor med turbolader, ladeluftkøler og vandudskill

Når motoren er i drift, vil køleren sode til. Dette vil resultere i en forøgelse af trykfaldet henover køleren. Der er erfaring med, at en stigning i trykfald henover køleren er øget med 40-50 % efter 9000 timers drift. Yderligere kan soden indeholde svovl, som blandet med kondensat kan få køleren til at erodere, hvilket nedsætter levetiden. En smudsafvisende overfladebehandling kan derfor modvirke en trykfaldsforøgelse samt forhindre dele af køleren i at erodere.

Felttest

I projektets fase 1 blev en ladeluftkøler belagt med sol-gel INC 23 afprøvet hos gartneriet Varpelev Tomater A/S, idet de har kedelige erfaringer med standard ladeluftkølere, der har en kortere levetid end forventet. Det antages, at køleren soder til med et svovlholdigt puds, som efterfølgende får køleren til at erodere. To kølere med elementer behandlet med sol-

gel af typen INC 23 blev fremstillet hos Vestjysk Industrilakering, som har professionel erfaring med lakeringsprocesser. Da Gartneriet fik monteret kølerne, viste det sig hurtigt, at kølerne ikke kunne levere en tilfredsstillende køling, og en ny standardkøler blev installeret og forsøget stoppede. Der var fremført mange hypoteser om, hvad den reducerede ydelse skyldes, inkl. at sol-gel belægningen påvirker kølefladernes varmeovergangstal.

I fase 2 er der indledningsvis gennemført en række systematiske laboratorieundersøgelser for at undersøge årsagen nærmere. Konklusionen var, jf. afsnit 1.2.1, at problemerne udelukkende skyldes belægningsprocessen og ikke selve belægningen. Da der siden afslutningen af fase 1 er blevet udviklet nye belægningsmetoder, blev der straks iværksat belægning og installation af en ny veksler til Varpelev Gartneri. Figur 4-12 viser en foto af installationen og den behandlede veksler.

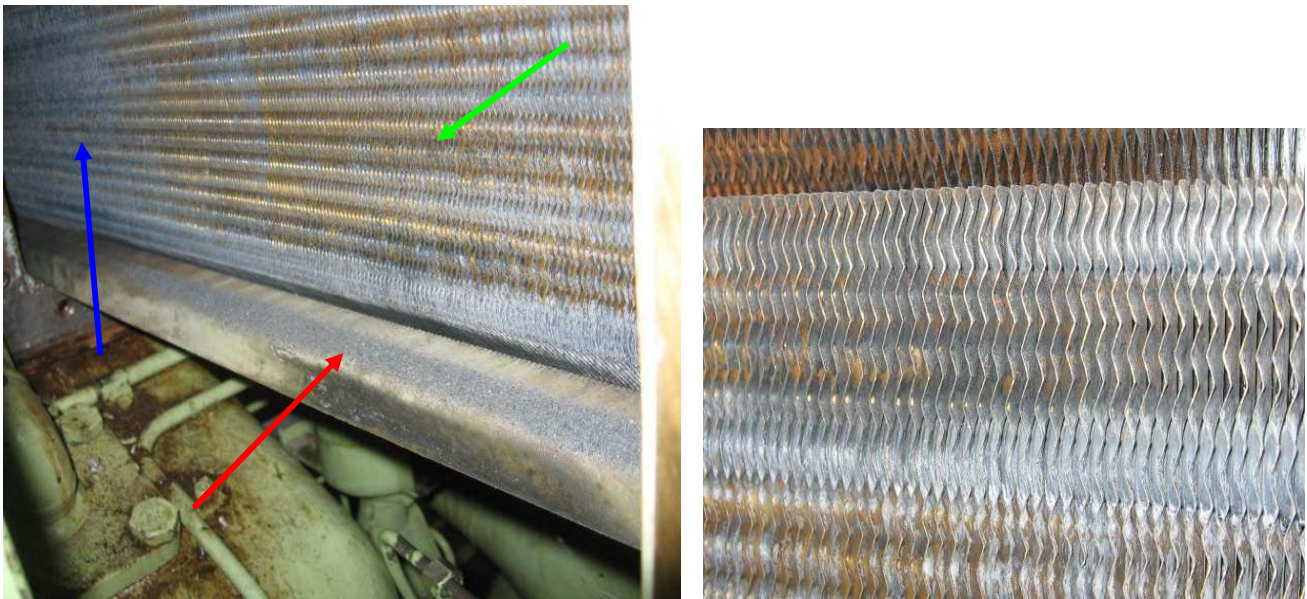


Figur 4-12 Ladeluftskøler monteret hos gartneriet Varpelev Tomater A/S

Motoren er en 12V28/32 gas motor. Det der gør denne motor lidt speciel, er at naturgassen bliver blandet med indsugningsluften før turboladeren. Derfor er det ikke ren luft, der strømmer igennem ladeluftkøleren. Den overfladebehandlede køler har en finneafstand på 2,12 mm.

Veksleren har fuldt ud ydet den ønskede (og beregnede) effekt, og overfladerne viser ingen synlig tegn på korrosion. I forbindelse med almindelig serviceeftersyn, som blev foretaget efter 6 måneders drift kunne konstateres en lettere tilsmudsning af kølerens kolde side, se figur 4-13. Smudset kunne let børstes af med en almindelig blød husholdningskost.

Baseret på de oprindelige kølere vides det, at det er den kolde side der er værst ramt af tæring, derfor blev en prøve af smudset sendt til analyse hos Teknologisk institut. Analysen viste, at prøven bestod primært af kobbersulfid, som kan dannes når kobber påvirkes af svovlbrinte. Det peger på, at overfladebelægningen ikke har været fuldstændigt, da der ellers ikke vil være blotlagte kobberoverflader. Konklusionen er, at sol-gel påføringsmetoden er blevet markant bedre, men der er behov for en yderligere optimering.



Figur 4-13 Kølerens kolde side. Bemærk smuds der ligger på sideplade (rød pil), område hvor der er blevet børstet (grøn pil) og område hvor der ikke er børstet smuds af (blå pil). Foto til højre viser en detalje af finnerne

På basis af projektets resultater har Vestas aircoil nu valgt at behandle en række kølere, som skal leveres til en motorbygger. Disse kølere bliver sat i drift i 2007.

Besparelspotentialet for disse veksler er stort. Typisk tærer mange veksler op i løbet af kort tid – typisk inden for 2 år. Den valgte belægning, INC 23, har viste gode korrosionsbeskyttende egenskaber sammen med smudsafvisende evner.

5 Perspektiver for elbesparelser

5.1 Vekslerplader

De behandlede vekslerplader afprøvet hos Brabrand Mejeri kører stadig uden der har været et behov for at rense veksleren. Derfor er det vanskeligt at vurdere elbesparelserne, men der kan påpeges væsentlige afledte besparelser pga. det reducerede rensningsbehov. CIP- og rengøringsfrekvensen er faldet drastisk med besparelser i mandskabsressourcer, kemikalier, driftmæssige forstyrrelser m.m. Der er tidligere blevet skønnet en besparelse på 40 GWh ved øget pumpning og varmetab i rørledninger ved dårlig veksling af varme især i fjernvarmenet.

Arla Foods ved Brabrand Mejeri udtaler: "Efter de behandlede vekslerplader er blevet monteret i veksleren har der ikke været behov for at rense for kalk. Der skønnes en besparelse på 10.000 kr. / år. Efter de positive resultater er der væsentlige energibesparelspotentiale ved fx at behandle veksler til isvand og ammoniak, som vi har i vores isvandsanlæg. I dag skal de CIP-renses med kemikalier 1 gang om året, timeforbruget til dette er 8 timer for en veksler. Efter CIP-rensning er der 10-12% større flow gennem veksleren, dvs. el-besparelsen derved er ca. 5.000 kr., jf. NIPO og Energirådgivningsrapport for Brabrand Mejeri. Der vil ligeledes være en energibesparelse, hvis man behandlede veksler til plader til varmekreds og isvandskreds på pasteur-anlæg."

5.2 Svejsesål

Svejsesålen har fungeret uproblematisk siden montering, ca. 4 måneder. Tidligere var det nødvendigt at rense hver 14. dag. Afledte besparelser omfatter besparelser i mandskabsressourcer, kemikalier, mindre spild af slutprodukt, færre driftmæssige forstyrrelser m.m.

Konklusioner fra Arla er, at efter 5 måneders drift med den tribologiske belagte svejsesål er besparelsen ved færre driftsstop, færre kasserede slutprodukter på grund af utætte bægre, ressourcer til rengøring og udskiftning af svejsesål beregnet til 52.640 kr./år.

I danske procesvirksomheder findes der hundredvis af pakke- og tappelinier, hvor der anvendes svejsesåle, dvs. besparelspotentialet på landsplan er betydeligt.

5.3 Blæserhjul

Det anslås, at et tilsmudset blæserhjul i en tørretumbler vil medføre 5 % øget energiforbrug til drivmotoren, som er på 1,0 kW. For en industritumbler med typisk 5 timers brug dagligt i 300 brugsdage årligt, bliver der et ekstra energiforbrug på:

$$5 \% \times 1\text{kW} \times 5 \times 300 \text{ timer} = 75 \text{ kWh/år pr tumbler}$$

Ved 50.000 tumblere i Danmark bliver der et ekstra elforbrug alene på motoren på 3,8 GWh/år.

Projektet har underbygget de positive resultater fra fase 1, og det vurderes at belægning af blæserhjul nu er kommercielt fornuftigt.

5.4 Sensorer og pumper

Der er installeret over en halv million vådpumper i Danmark, og de kører gennemsnitligt 285 dage om året. Et gennemsnitlig estimat på tabet, der skyldes udfældning af kalk i pumpen er 2-3 W. Dette vil samlet set betyde et tab på 7 GWh/år alene i Danmark. For større pumper er der yderligere tidligere blevet skønnet en elbesparelse på op mod 7,5 GWh/år.

Resultaterne fra afprøvning af såvel små tryk- og flowsensorer samt aksler og rotorhylster har ikke givet enstydige resultater. Sol-gel behandling af aksler og rotorhylster var ikke en succes, men resultaterne af en tribologisk behandling af aksler ser positive ud. Der er behov for et større statistisk grundlag for at kunne konkludere yderligere.

Grundfos udtaler, at det har været spændende at afprøve forskellige belægninger for at modvirke kalk/snavs i Grundfos produkter. I fremtiden vil der for Grundfos være et stort potentiale i at anvende overflader med en specifik funktionalitet for at skabe yderligere elbesparelse i produkterne.

5.5 Ladeluftkølere

En del af de fremstillede ladeluftkølere anvendes på turboladede dieselmotorer, som bruges til el-produktion. Hvis køleren kan holdes ren, bliver totalvirkningsgraden på motoren højere. Det er tilfældet efter endt afprøvning af en køler hos Varpelev Gartneri, hvor tidligere problemer fra fase 1 er blevet løst.

Da det i Danmark vurderes, at der årligt produceres 200.000 MWh el ved hjælp af motorer (i forbindelse med fjernvarmeanlæg) med ladeluftkølere vil smuds og sod på ladeluftkøleren medføre ekstra energiforbrug på 500 MWh. Derudover kommer el-produktion i forbindelse med gartnerier og lignende.

Hertil kommer motorer for produktion af el uden for fjernvarmeproduktion, som for gartnerier.

Fouling på vandsiden øger tryktabet gennem køleren, hvilket resulterer i et øget elforbrug på fødepumperne. Endvidere falder køleevnen, hvilket igen giver lavere totalvirkningsgrad på motoren.

Vestas aircoil har nu iværksat behandling af flere kølere.

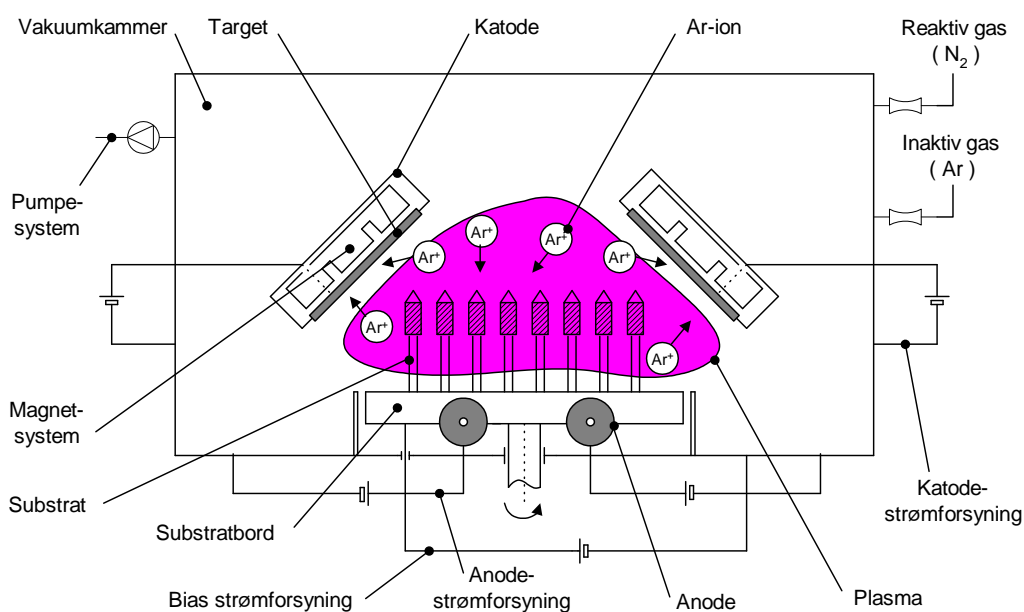
6 Bilag: Beskrivelse af materialer

6.1 Belægningsprincipper

6.1.1 PVD-belægning

PVD (Physical Vapor Deposit) er en fællesbetegnelse for en række tørre belægningsprocesser, som bygger på en fysisk fordampning og efterfølgende deponering af en metalkomponent. Hos Tribologisentret, Teknologisk Institut anvendes en variant af teknologien, som betegnes *reaktiv magnetron sputtering PVD*. Ved reaktiv magnetron sputtering udnyttes det, at atomer og elektroner med høj energi ved kollision med en fast overflade vil løsrive atomer eller molekyler fra overfladen som resultat af impulsoverførsel. På denne måde dannes atomar eller molekylært "støv" af det faste stof, som via tilsætning af reaktive gasser kan udnyttes til at danne keramiske eller diamantlignende belægninger. Til bombardering af overfladen anvendes ioner af ædelgasser, primært argon, da de ikke reagerer med den bombarderede overflade eller de løsrevne partikler. Ædelgassen benævnes også arbejdsgassen, da den ikke direkte deltager i kemiske reaktioner i processen. Ionbombardementet udføres i et plasma ved højt vakuum. I plasmaet er etableret et elektrisk felt med en spændingsforskel på ca. 1000 V, hvilket betyder, at frie elektroner i plasmaet accelereres.

Ved accelerationen kolliderer de frie elektroner med atomer eller molekyler af ædelgassen, hvorved der fjernes en elektron fra det neutrale atom eller molekyle. Dette medfører en ionisering af ædelgassen til f.eks. Ar^+ -ioner, der accelereres mod den negativt ladede katode, som udgøres af fordampningskilden. Argonionerne har en sådan størrelse og så meget energi, at partikler fra fordampningskilden forstøves ved kollisionen. Partiklerne kan derefter kondensere på emneoverfladen med en belægning som resultat. Figur 6-1 viser en principskitse af den anvendte teknologi:



Figur 6-1 Principskitse af PVD-teknologien ved anvendelse af reaktiv magnetron sputtering

PVD-processen kan karakteriseres som værende en sigtelinieproces. Herved forstås, at de partikler, der fordampes, bevæger sig i rette linier fra fordampningskilden. Dette betyder, at der ikke opnås belægning rundt om hjørner, medmindre emnet bevæges. Derfor er der i processen anbragt et substratbord, som er en roterende emneholder, der sikrer, at emnerne opnår en homogen lagtykkelse.

På figuren ses desuden, at der kan tilføres en reaktiv gas som supplement til arbejdsgassen, hvilket i de fleste tilfælde gøres i form af kvælstof, ilt eller kulstofholdige gasser. Fordampningskilden er i de fleste tilfælde titan, krom, aluminium eller grafit, som kombineret med de reaktive gasser giver mulighed for forskellige belægningskompositioner.

Da processen er en sigtelinieproces, sættes der krav til emnernes geometri og dimensioner. Dette betyder, at partiklerne fra fordampningskilden helst skal ramme substratoverfladen i en vinkel mellem 45° og 90° , og det betyder ydermere, at det ikke er muligt at belægge længere ned i huller end ca. lysningsdiametere.

Belægningen udføres batchvis, hvilket betyder, at prisen afhænger af emnets størrelse og mulighed for fiksering i proceskammeret. Overordnet kan det siges, at små emner muliggør større stykantal pr. batch og dermed en lavere stykpris, mens det modsatte er tilfældet for store emner. Grænsen for hvor store emner, der kan belægges, afhænger af maksimumdimensionen for belægningszonen i kammeret. På Tribologicenterets udstyr kan emner op til ca. \varnothing 400 mm og maksimalt 500 mm i højden belægges.

6.1.2 Belægningskarakteristik

Med de anvendte teknologier er det blevet muligt at designe en overflade næsten uden begrænsninger. Det er muligt at skræddersy en række egenskaber for en belægning afhængig af dens anvendelsesområde, hvilket gør anvendelserne mangfoldige. Formålet med dette afsnit er at foretage en beskrivelse af de opbygningsmæssige og strukturelle forhold, som indgår i en belægningsproces. Indledningsvis defineres den tekniske betydning af en overfladebelægning på følgende måde:

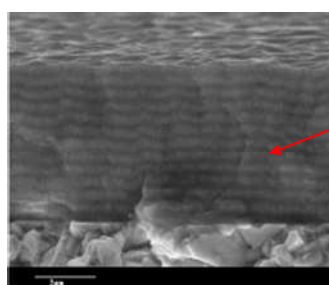
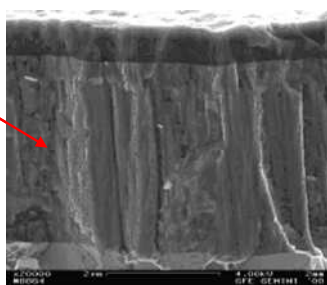
En belægning er et lag af materiale, som er dannet naturligt, syntetisk eller deponeret kunstigt på overfladen af et substrat, som er lavet af et andet materiale, med henblik på at opnå ønskede tekniske eller dekorative egenskaber.

Substratet og belægningen udgør dermed hver sin separate fase i systemet. Mellem belægningen og substratet findes en grænseflade i form af et lag med en afgrænset volumen. Grænsefladelaget optræder som et mellemlid, der sædvanligvis har som funktion at skabe vedhæftning til substratet. Derfor anvendes ofte basislag med en bestemt kemisk komposition, som sikrer en god vedhæftning til substratet.

6.1.3 Belægningssystemer

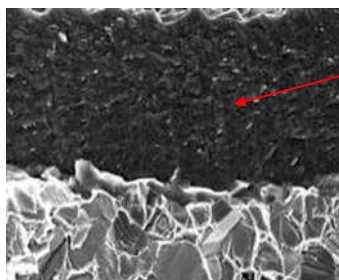
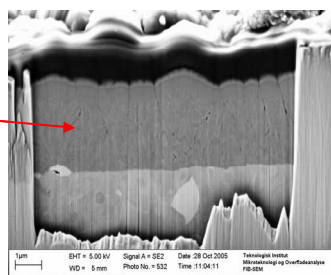
Belægningssammensætningen er en vigtig parameter i forbindelse med design af en teknisk overfladebelægning. Årsagen hertil er, at mange af belægningens egenskaber kan føres tilbage til den egentlige belægningsstruktur. Oftest opdeles belægningssammensætningen i hovedgrupperne illustreret i figur 6-2.

Nanokrystallinske enkeltlags-belægninger
TiN, TiAlN, CrN, Si₃N₄, TiCN, etc.
(3-10 μm)



Multilagsbelægninger
TiN/TiAlN, CrN/TiN, TiAlN/Al₂O₃, CrN/TiAlN, TiCN/TiAlN, etc.
(lagtykkelse ned til ca. 10 nm)

Functionally Gradient Coatings, (Graderede lag)
Diamond-like Carbon (DLC)



Nanokomposit-belægninger
Ti-Si-N

Figur 6-2 Forskellige belægningssammensætninger

Her er det illustreret hvorledes der skelnes mellem enkeltlags-, multilags-, nanokomposit-belægninger og functional gradient coatings (FGC). De enkelte lag i en multilags-belægning kan være sammensat af både enkeltlags-, nanokomposit- eller FGC-komponenter. Dermed fremgår det, at en belægning ofte kan betragtes som et belægningssystem, som er komplekst sammensat af forskellige komponenter. Ved målrettet design af belægningssystemer opnås muligheder for at påvirke belægningens egenskaber, hvad enten det er specifikke overflade-, korrosions- eller f.eks. mekaniske egenskaber der ønskes. I det nærværende arbejde er følgende belægningssystemer anvendt:

Behandling	Struktur	Opbygning / Komposition	Procestype
WC-C	Multilag	Multilagsbelægning opbygget af et bindelag efterfulgt af et støkiometrisk graderet kompositlag bestående af wolframkarbid og kulstof.	PVD
DLC-TR	Multilag	Multilagsbelægning opbygget af et bindelag, et kulstofbaseret graderet mellemlag efterfulgt af et toplag bestående af amorf kulstof.	PVD
TiAlN-TR	Enkeltlag	Krystallinsk multikomponentbelægning bestående af støkiometriske mængder af TiN og AlN opløst i hinanden.	PVD

Tabel 6-1 Tribologiske overflader

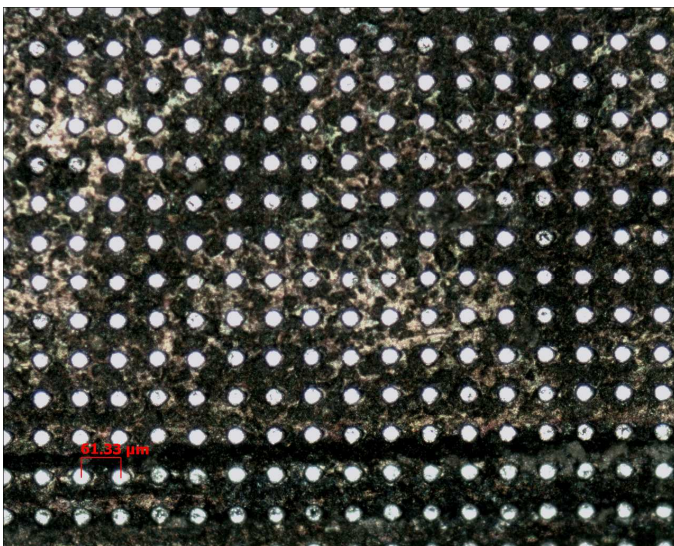
Et spændende eksempel af en ny multi-lags teknik baseret på nanoteknologi er overfladebelægning af et grundmateriale med en hård og slidstærk tyndfilm (ca. 3 μm i totaltykkelse) efterfulgt af laserbearbejdning til fabrikation af et struktureret netværk af huller lavet med en femtosekundlaser. Teknikken kaldes "laser teksturering af DLC belagte varmelegemer".

Teksturering er udført med en femtosekund-laser. Fordelen ved at benytte en ultrakort pulseret laser er, at man kan undgå eller i det mindste begrænse skadepåvirkningerne af det omkringliggende materiale. En anden fordel er, at spidsintensiteten er meget høj selv ved lave middelintensiteter. Dette bevirker at alle materialer kan bearbejdes, selv materialer der er transparente for bølglængden af laserlyset (775 nm).

Der er bearbejdet forskellige mønstre der er stigende i kompleksitet.

- Huller i et kubisk mønster med en afstand på 40 μm
- Huller i et kubisk mønster med en afstand på 60 μm (se billede i figur 6-3)
- Huller i et kubisk mønster med en afstand på 100 μm
- Parallelle linier med en afstand på 40 μm
- Parallelle linier med en afstand på 60 μm
- Parallelle linier med en afstand på 100 μm
- 2 sæt parallelle linier med en afstand på 40 μm i en vinkel på 90° til hinanden
- 2 sæt parallelle linier med en afstand på 60 μm i en vinkel på 90° til hinanden
- 2 sæt parallelle linier med en afstand på 100 μm i en vinkel på 90° til hinanden
- Cirkler med en diameter på 100 μm i et heksagonalt mønster med en afstand på 200 μm
- 3 sæt parallelle linier med en afstand på 100 μm i en vinkel på 120° til hinanden

Alle forsøg er udført i 2 forskellige dybder. Figur 6-3 viser et eksempel af tekstureret DLC.



Figur 6-3 Laser tekstureret DLC i et kubisk mønster med en afstand på 60 μm . Billedet er taget i et lysmikroskop.

6.1.4 Sol-gel belægninger

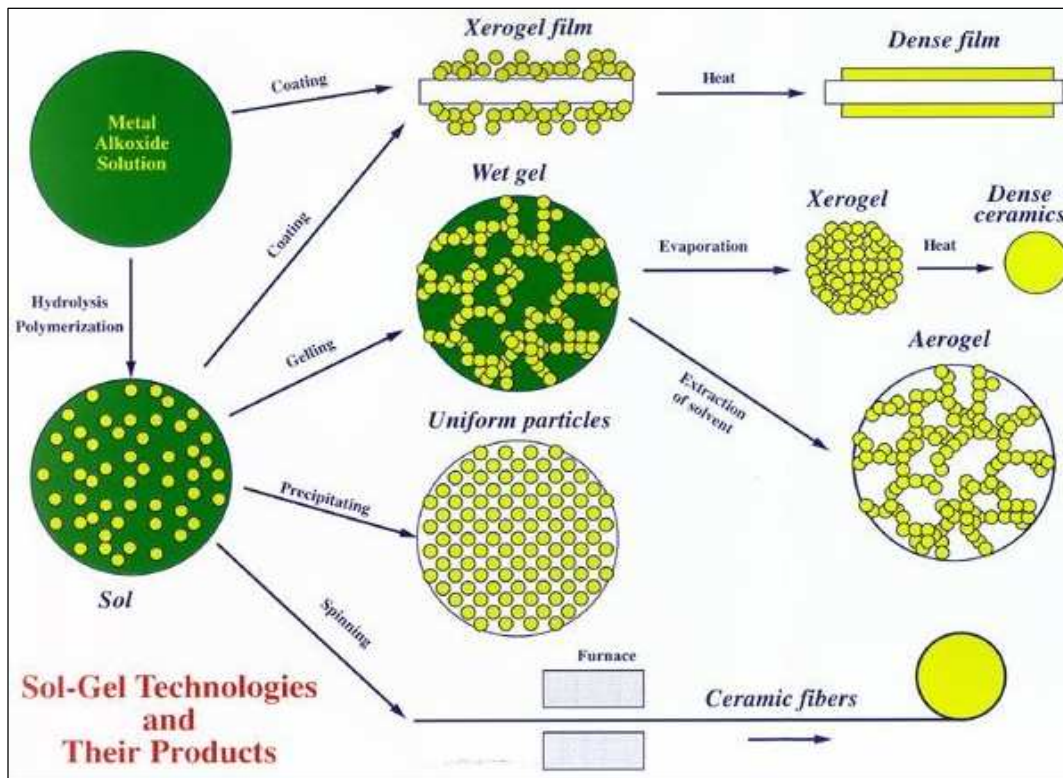
Overfladebehandlingen, som bygger på sol-gel teknologien, må betragtes som en lak. Den kan være opbygget som 1-komponent eller fler-komponent system. Hærdeprocessen foregår ved stuetemperatur ellers ved at varme op til ca. 200°C eller alternativt med UV-lys eller IR stråling. Lakken kan påføres med traditionelle metoder kendt fra lakeringsindustrien - det vil sige: Sprøjtning, rulning, neddykning mm.



Figur 6-4 Belægningsproces for sol-gel

Sol-gel processen består af to syntese-trin, hvor man først danner en kolloid væske, som indeholder partikler i størrelsen 5-15 nanometer, ved specielle teknologier op til 50 nanometer. Denne blanding kaldes sol. Dernæst krydsbindes indholdsstofferne under fjernelse/fordampning af opløsningsmidlet, og der dannes et tredimensionalt netværk, også betegnet som gel. Endelig følger hærkning af belægningen. Processen er illustreret i figur 6-4.

Figur 6-4 viser de forskellige syntese-trin, som er mulige ved anvendelse af metalalkoxider. Metalalkoxider er molekyler, hvor et metal- eller halvmetalatom er kemisk bundet til ilt og alkoholgrupper. I tilfælde af at halvmetalatomet er silicium, betegnes råstofferne som silaner og siloxaner. Silaner kan påføres substratoverfladen i en direkte proces, hvor der dannes meget tynde belægninger med en lagtykkelse på 10 til ca. 500 nm. Til fremstilling af de aktuelle kalkafvisende overflader er der primært anvendt sol-gel synteseruten. Som vist i figur 6-5 omdannes metalalkoxidvæsken til en sol via en kombineret hydrolyse- og polymerisationsproces. Denne sol indeholder de omtalte nanopartikler i kolloidal form. Solen kan blendes og kombineres med andre sole eller kemiske reagenser, og påføres herefter substratoverfladen, hvor geleringsprocessen indledes. Sol-gel teknologien tillader syntetiseringen af meget forskellige produkter, såsom tynde funktionelle belægninger, keramiske porøse strukturer samt keramiske fibre.



Figur 6-5 Syntesetrin for fremstilling af sol-gel

Sol-gel belægningen beskytter overfladen med en 1- 10 μm tynd, typisk transparent film, der består af et kovalent bundet netværk af uorganiske og organiske forbindelser i en såkaldt hybridstruktur. I projektet er der arbejdet med 5 forskellige belægningstyper. Der er udført test af både 1- og 2-komponent systemer.

Teknologisk Instituts Center for Materialeprøvnings koncept til kalkafvisende belægninger bygger på en kombination af en meget lav overfladespænding, egenspændinger i interfacen mellem overflade og kalk samt en lokalt isoleret kalkdannelse i form af lokale kimpunkter, som er statistisk fordelt på overfladen.

Princippet er at koncentrere kalkdannelsen ud fra disse små punkter, som er omgivet af upolære, afvisende arealer. Det er bevidst ønsket, at der dannes kalk på overfladen ved disse kimpunkter. Men når kalklaget opnår en kritisk tykkelse, vil egenspændingerne i interfacen mellem kalken og overfladen blive større end adæsionskræfter til overfladen, og kalken vil brække let af.

Belægning	Komp.	Hærde temp. [°C]	Effekt
LRC-1	2	Rt, 120	Lakkoncept 1: primær kalkafvisende
LRC-2	1	120	Lakkoncept 2: primær kalkafvisende samt smudsafvisende
LRC-3	2	80	Lakkoncept 3: primær kalkafvisende samt korrosionsbeskyttende
LRC-4	2	Rt, 50, 130	Lakkoncept 4: primær kalkafvisende, desuden korrosionsbeskyttende samt smudsafvisende
INC-23T	1	170°C	Lakkoncept 5: primær smudsafvisende, desuden god korrosionsbeskyttelse samt antismuds

Tabel 6-2 Anvendte sol-gel varianter

6.2 Industriel implementering af sol-gel belægningerne

Center for Materialeprøvning har indledt et samarbejde med kommercielle industrilakerer, med henblik på overførelse af sol-gel belægningerne fra laboratorieniveau til industriel anvendelse. I kraft af at sol-gel belægningernes udgangspunkt er sammenlignelig med en lak, kan industrilakerernes mangeårige ekspertise og erfaring med lakering bruges til implementering af de nye belægninger. De første erfaringer med sol-gel belægningerne er gjort i forbindelse med belægningerne på felttest af ladeluftskøler og vandudskillere til Vestas Aircoil samt pladeveksler til Arla Foods.

6.3 Materialeegenskaber

6.3.1 Overfladeenergier

Det gælder generelt i naturen, at et givet system gerne vil søge mod den laveste energitilstand, som er mulig. Overfladen på et emne af et givet materiale har en tilknyttet energi pr. arealenhed kaldet overfladeenergien eller "overfladespændingen". Denne størrelse benævnes normalt γ og opgives ofte i enten milliNewton/meter (mN/m) eller Joule/kvadratmeter (J/m²).

Har et materiale f.eks. en relativ høj overfladeenergi, vil materialet generelt have en tendens til at binde godt mod et andet materiale. Dette kan intuitivt forstås således, at en binding mod et andet materiale vil mindske arealet af den højenergiske overflade, og derved vil systemet som "ønsket" opnå en lavere energitilstand.

Overfladeenergien er derfor med til at beskrive bindingsstyrken mod et givet materiale. Bindingsstyrken er af stor betydning i mange anvendelser. I nogle tilfælde ønskes en god bindingsstyrke (en god adhæsion), som f.eks. inden for metallisering, maling og kompositproduktion. I andre tilfælde ønskes en overflade, der ikke er modtagelig for aflejring af et andet materiale, som f.eks. udfældning af kalk på varmespiraler og varmevekslerplader.

Overfladeenergien varierer meget fra materiale til materiale. F.eks. har en typisk slip-let overflade som PTFE (Teflon®) en meget lav overfladeenergi på ca. 18 mN/m, mens en

højenergitisk overflade som rustfrit stål kan have en overfladeenergi på over 100 mN/m, når stålets naturlige oxidhinde brydes.

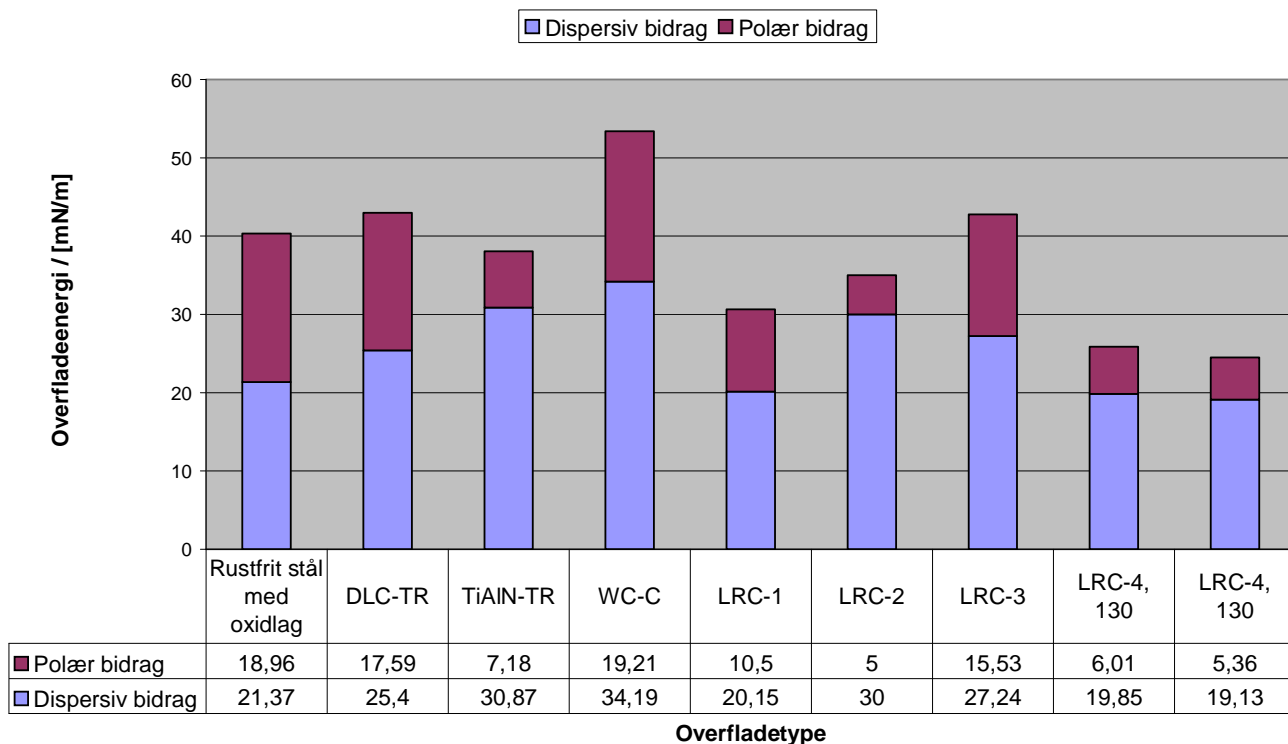
Generelt vil et fald i overfladeenergien indikere en øget evne til at afvise "påklæbning" af andre materialer. Med henblik på at minimere f.eks. vedhæftning af kim, kan det derfor antages, at det er vigtigt at have en lav overfladeenergi, som det kalkholdige vand er i kontakt med. Dette kan bekræftes af mange iagttagelser, hvor kimdannelser oftest sker på ru overflader ved kanter og lignende, samt hvor overfladen vil have mange defekter, som har en høj overfladeenergi.

Adhæsionsegenskaberne er dog ikke alene og direkte afhængig af overfladeenergien. Overfladeenergien kan opsplittes i (mindst) to parametre, det disperse- (γ_d) og det polære (γ_p) bidrag:

$$\gamma_{total} = \gamma_d + \gamma_p$$

Hvor γ_d beskriver den dynamiske ladningsfordeling fra elektronerne, og hvor γ_p beskriver de polære bindinger. Der er altså tale om to forskellige bindingstyper. Bestemmes disse parametre, kan der gives en bedre beskrivelse af adhæsions- og bindingskræfter ved kimdannelse.

Det interessante er, at ved at modificere en overflades kemiske komposition, f.eks. vha. belægning eller anden overfladebehandling, ændres også overfladeenergien. I mange tilfælde kan f.eks. både den totale overfladeenergi og det polære bidrag sænkes, så overfladens tendens til at binde til andre polære overflader minimeres. Figur 6-6 angiver eksempler på overfladeenergiparametre for de i projektet anvendte overfladebehandlinger. Det skal specielt bemærkes, at for rustfrit stål vil værdierne være meget afhængige af, om stålets naturligt forekommende oxidhinde er brudt eller intakt.



Figur 6-6 Overfladeenergi for de i projektet anvendte overflader

Nogle af overfladerne med en forholdsvis høj overfladeenergi i Figur 6-6 fx WC/C viser overraskende gode kalkafvisende egenskaber. Dette tyder på, at andre parametre udover overfladeenergien har stor betydning for vedhæftningen kalk og smuds f.eks. ruhed. Disse parametre vil blive undersøgt nærmere i fase 2.