

# Cost of Coolant – Rapport

**ELFORSK projektnummer:**

352-037

**Titel:**

Cost of Coolant

**Projektleder:**

Mikkel S. Meldgaard, DAMRC

**Projektleders e-mail:**

[msm@damrc.com](mailto:msm@damrc.com)

**Projektansvarlig virksomhed:**

DAMRC F.M.B.A

Sandagervej 10

7400 Herning

**Projektperioden:**

3. februar 2020 – 31. marts 2021

**Version:**

1.0 (24. marts 2021)

## Indholdsfortegnelse

1	Dansk resumé - formål, resultater og videre anvendelse .....	3
2	Engelsk resume - formål, resultater og videre anvendelse .....	5
3	Projektets formål .....	7
4	Processen og opnåede resultater .....	7
5	Projektledelse og administration (WP1) .....	9
6	Potentialeafdækning (WP2) .....	9
7	Tekniske forsøg (WP3) .....	13
8	Validering, analyse og kvalitetssikring (WP4) .....	22
9	Konklusion (WP5) .....	55
10	Effekten af resultaterne – energibesparelser .....	57
11	Perspektivering og videre anvendelse af resultater .....	58
12	Bilag .....	59

## En stor tak til...

- ELFORSK-fonden, der med sin økonomiske og formidlingsmæssige støtte til dette projekt er med til at skabe rammerne for at yderligere energi- og miljøoptimeringer kan finde sted i den danske bearbejdningsindustri.
- Materiale- og teknologileverandører, for jeres store ekspertise og sparring med os for at opnå projektets resultater.
- Teamet hos DAMRC for at være med til at få projektets tekniske, administrative og formidlingsmæssige opgaver udført på fornemste vis.

God læselyst

# 1 Dansk resumé - formål, resultater og videre anvendelse

DAMRC har gennem flere år gennemført produktivitetsoptimeringer og industriforskning med henblik på at styrke dansk industri, herunder særligt bearbejdningsindustriens rammebetingelser og muligheder for at adaptere ny viden mhp. at fastholde og styrke sin position.

Gennem dette projekt har DAMRC arbejdet for at opbygge viden om og forståelse for hvad der sker når man begynder at arbejde med at reducere trykket og flowet på kølesmøremiddelsystemer. Projektet er skabt på baggrund af litteratur, som har vist at kølesmøremiddelprocessen udgør en væsentlig andel af CNC-bearbejdningscentres samlede energiforbrug, og har til formål at omsætte denne viden til en praktisk demonstration af, i hvilket omfang det er muligt at formindske energiforbruget ved CNC-fræsning ved at justere på kølesmøremiddel tryk og flow for processer som kræver kølesmøremiddel. En vigtig del er at forstå de afledte effekter det har på bearbejdningskvalitet og arbejdsmiljø såvel som økonomiske og miljømæssige aspekter, som er afsøgt i en kombination af geometriske målinger, visuelle analyser samt målinger vedr. arbejdsmiljø aspekter.

Projektet er bygget op som et komparativ for-projekt der kan danne grundlagt for et større projekt, og har derfor også afsøgt potentialet for projektet. Dette er gjort gennem en potentialeafdækning, ved at kortlægge markedsstørrelsen for flow- og trykreduktion, herunder antal CNC-styrede bearbejdningscentre i industrien som hhv. har eller kan opgraderes til at kunne tryk og flow justere. Afdækningen har vist, at ud af den danske maskinpark på 15.000 maskiner er ca. 5% af maskinerne, som kan trykjusteres i deres kølesmøremiddelsystem. Såfremt disse ca. 750 maskiner kan reducere deres energiforbrug med 25%, vil det beløbe sig i en årlig energibesparelse på ca. 1,67 GWh og en reduktion på 485,2 ton CO<sub>2</sub>. Såfremt tryk/flow reduktion skal udbredes til de resterende 95% af den danske maskinpart vil det kræve en investering i justerbare anlæg med en enhedspris på mellem 75.000-250.000 kr. pr. maskine, hvilket fra et økonomisk break-even synspunkt først balancere efter reduktion af energiforbruget på minimum ca. 30'000 kWh pr. maskine. Installerer trykjusterbare systemer imidlertid på samtlige bearbejdningscentre i Danmark, vil der være en potentiel national energibesparelse på 33,4 GWh, såfremt trykjusteringerne foranlediger sænkelse af energiforbruget med 25%.

Efterfølgende er der gennemført en systematisk testfase i DAMRC eget Teknologicenter, på et CNC-bearbejdningscentre med justerbart tryk- og flow- kølesmøremiddelsystem og ved brug af strømmålingsudstyr. Testfasen har bestået af tre forsøgsrækker hvor bearbejdningsforsøg i tre gængse materialer i industrien, rustfrit stål (AISI304), stål (S275) og aluminium (AW6082), er gennemført. For hver forsøgsrække er trykket og flowet blevet justeret jf. prædefinerede inkrementer, således der opnås klar forståelse for sammenhængen mellem tryk og flow indstillingen, og det faktiske energiforbrug. Hvilket har medført at 12 forskellige tryk- og flow indstillinger er blevet testet for de tre materialer, med tilhørende strømmålinger.

Gennem de praktiske bearbejdningsforsøg har projektet vist at *der ér en væsentlig energibesparelse at hente ved nedjustering af kølesmøremiddel trykket og flowet*. Ved en trykreduktion fra 40bar til 18bar har forsøgene vist, **at det samlede energiforbrug for bearbejdningscentret kan reduceres med 15-25%**. Det svarer reelt til reduktioner i kW-forbruget på 1,2kW, 1,3kW og 0,5kW ved reduktion af trykket fra 40 til 18 bar for forsøgene i hhv. aluminium, stål og rustfrit stål (start forbrug ved 40bar var 4,8kW, 5,5kW og 3,8kW).

Projektet har desuden vist at der er en stor sammenhæng mellem flow gennemstrømningen og det generelle energiforbrug – således har studiet vist at halvering af flowet ved reduktion af flow kanalernes diameter, kan reducere energiforbruget med 20-30% mens trykket fastholdes ved maksimum indstilling (i dette projekt, 40bar). I kW svarer dette til en reduktion i størrelsen 1-1,7kW, hvilket også fremhæver denne tilgang til energibesparelser som vigtig og relevant for industrien. Dette resultat indikerer endvidere, at der ved ”tør bearbejdning” er en potentiel større energimæssig gevinst at hente – såfremt bearbejdningsforholdene tillader det.

Pba. disse resultater har det ikke været muligt at definere en specifik regel for energibesparelsen ved tryk/flow reduktion, da forsøgene har vist at de i høj grad afhænger af hvor stor andel kølesmøremiddel anlæggets energiforbrug udgør af det totale forbrug for bearbejdningscentret. Dog har det vist at der er væsentlige energibesparelser at opnå, såfremt bearbejdningsvirksohederne aktivt arbejder med at identificere de ikke kritiske processer ift. brug af kølesmøremiddel, hvorved der kan arbejdes med justering af tryk/flow – og at der ved at kigge ind i bearbejdningscentres støtteprocesser er store potentialer for mærkbare energibesparelser.

Emne kvalitetsanalyserne har IKKE vist nogen tendentielt negativ påvirkning fra det lavere tryk og flow. Dog er der med hensyn til værktøjsstand og slid observeret tendentielt forøget slid på værktøjerne brugt til forsøgene i stål. Grundet råemnets karakteristika med glødeskal indikere disse resultater, at relevansen for tryk/flow reduktioner ved materialeforhold med glødeskaller og lignende er begrænset. Analyserne har endvidere vist udfordringer med spånafledning ved lommer ved bearbejdning af tungere materialer med høj densitet (stål og rustfrit stål ved disse forsøg). Dette blev observeret ved trykindstillinger under 25 bar, hvilket indikerer, at der er en kritisk grænse, under hvilken, kølesmøremidlet ikke har kraft nok til at spule spånerne væk – og derved begrænser relevansen for kølesmøremiddel med lavt tryk. Målinger af partikkelkoncentrationen af våde partikler (hhv. 10my og 1my partikel størrelse) for forsøgene i rustfrit stål (AISI304), har vist en tendens til en faldende koncentration ved lavere tryk for begge partikel størrelser, med tendentielle ændringer på ca. 50% og 33% for hhv. 10my og 1my partikler. Dette indikerer at der i mindre grad dannes olie røg- og tåger, hvilket har en positiv indvirkning på maskinoperatørernes sundhed og derved arbejdsmiljøet.

Resultatet af dette projekt – sammen med resultater fra andre projekter hos hhv. DAMRC og Aarhus Universitet vedr. energiforbrug på bearbejdningsmaskiner – har etableret et fundament for et fremtidigt projekt, hvortil der vil blive søgt fondsmidler. Dette projekt vil studere energiforbruget for støtteprocesser og ”stand-by-modes” på bearbejdningscentre, med målet om at identificere energibesparelspotentialer ved disse processer, da disse førertalte projekter har vist at op mod 90% af et bearbejdningscenters energiforbrug går til disse forskellige støtteprocesser og ”stand-by-modes”.

Desuden vil DAMRC fortsat kommunikere og fremhæve projektets opnåede erkendelser og resultater, som en bæredygtig metode for bearbejdningsvirksohederne til at reducere sit energiforbrug på bearbejdningscentre – og potentielt sin bundlinje.

## 2 Engelsk resume - formål, resultater og videre anvendelse

For several years, DAMRC has carried out productivity optimizations and industrial research with the purpose to strengthen the Danish production industry, in particular the machining industry.

Through this project, DAMRC has gained knowledge and understanding of what happens to the machining process and energy consumption, when you reduce the pressure and flow of the coolant supply. The project is based on literature, which has shown that the process of delivering coolant to the machining process accounts for a significant proportion of the total energy consumption of CNC machines. The project aims to translate this knowledge into a practical demonstration of the extent to which it is possible to reduce energy consumption of CNC milling, by reducing the pressure and flow of the coolant supply. An important aspect is to understand the derived effects it has on machining quality and working environment as well as economic and environmental aspects, which are examined in a combination of geometric measurements, visual analyzes and measurements on aspects related to the work environment and health issues.

The project is built up as a comparative pre-project that can form the basis for a larger project. As a foundation for the project DAMRC has made a mapping of the potential for adjustments in pressure of coolants today in danish/Nordic machining industry. This was done by mapping the danish market size for CNC machines, including estimations on the number of CNC machines with the present ability to adjust the flow and pressure of the coolant supply. The mapping showed that approximately 5% out of the overall 15.000 danish CNC-machines are able to adjust the pressure of the coolant supply, whereas the flow is a derived effect. Given that these approximately 750 machines can reduce their energy consumption by 25%, this will amount to an annual energy saving of approx. 1,67 GWh and a reduction of 485,2 tons of CO<sub>2</sub>.

To make the remaining 95% of the CNC-machines in Denmark capable of adjusting coolant supply pressure, it would require an investment in retrofitting the CNC-machine with a pressure adjustable coolant supply unit. This will likely be an investment in the range of DKK 75,000-250,000 per coolant supply unit, which means that at least 30'000 kWh must be saved before break-even. However, if pressure-adjustable systems were installed in all CNC-machines in Denmark, there would be a potential national energy saving of 33.4 GWh, if the pressure adjustments cause a reduction in energy consumption by 25%.

After mapping out the market potential DAMRC has conducted a series of practical machining tests, evaluating the actual saving potential, using a CNC Milling Machine, to which a retrofitted pressure adjustable coolant-supply-system has been added.

The tests consist of three test series – each series with its own material. The materials tested is aluminum (AW6082), steel (S275), and stainless steel (AISI304), as these are widely used in the danish industry.

For each series of the tests, the pressure has been adjusted cf. pre-defined increments, to obtain a broad understanding of the connection between the pressure and flow settings, and the energy consumption. This has resulted in 12 different pressure and flow settings that have been tested for the three materials, while the energy consumption has been monitored.

Through the practical machining experiments, the project has shown that *there is a significant energy saving to be gained by reducing the coolant supply pressure*. At a pressure reduction from 40bar to 18bar, the experiments have shown that **the total energy consumption for the CNC-machine can be reduced by**

**15-25%.** This corresponds to reductions in the kW consumption of 1.2kW, 1.3kW, and 0.5kW, for respectively aluminum, steel, and stainless steel (stating consumption was averagely 4.8kW, 5.5kW and 3.8kW at 40bar pressure).

The project has also shown that there is a large correlation between the flow rate and the “basic energy consumption”. By halving the flow rate the study has shown that, energy consumption was reduced by 20-30% while maintaining the supply pressure at maximum setting (in this project, 40bar). This was done by reducing the cross-section of the flow channels in the used bushing.

In kW, this corresponds to a reduction in power consumption in the size 1-1.7kW, which also highlights this approach to energy savings as important and relevant for the industry. This result further indicates that in the cases of “dry machining” there is a potential greater energy gain – given that the machining conditions allows it.

Through the project, it has not been possible to define a specific rule for the energy savings by pressure and flow reduction. This is due, that the saving potential is highly correlated with the share of total energy consumption that coolant supply system accounts for. However, the project *has* shown that there are significant energy savings to be achieved if the machining companies actively work to identify the processes to which coolant is non-critical.

The workpiece quality analyzes have NOT shown any tendentious negative impact from the reduced coolant pressure and flow.

In terms of tool condition and tool wear, there has been a tendency of increased wear on the tools used for the tests in steel. This is assumed that this wear is related to the hardened conditions of the shell of the steel bar, which limits the relevance for pressure reduction of coolant supplies in materials with similar conditions. The analysis has also shown challenges with chip evacuation from pockets when machining heavier, high-density materials (steel and stainless steel in these experiments). This was observed at pressure settings below 25 bar, indicating that there is a critical limit below which the refrigerant lubricant does not have enough power to flush the chips away.

For the experiments in stainless steel, measurements of the particle concentration of wet particles (10my and 1my particle size, respectively) have been taken. These have shown a tendency for a decreased concentration at lower pressures for both particle sizes, with tendential changes of approx. 50% and 33% for resp. 10my and 1my particles. This indicates that oil fumes and mists are formed to a lesser extent, which has a positive impact on the health of the machine operators and thereby the working environment.

The result of this project - together with results from other projects from DAMRC and Aarhus University regarding energy consumption on CNC-machines - has established a foundation for a future project for which funding will be sought. This project will study the energy consumption of support processes and stand-by modes in CNC-machines, with the aim of identifying energy saving potentials related to these processes. This builds on the aforementioned projects, which have shown that up to 90% of a CNC-machine’s energy consumption goes to these support processes and " stand-by modes”.

In addition, DAMRC will continue to communicate and highlight the findings and results achieved in the project as a sustainable method to reduce companies’ energy consumption on CNC-machines - and potentially their bottom line.

### 3 Projektets formål

Litteratur har vist at kølesmøremiddel processen udgør en væsentlig andel af CNC-bearbejdningscentres samlede energiforbrug. Dette projekt har til formål at omsætte denne viden til en praktisk demonstration af, i hvilket omfang det er muligt at formindske energiforbruget ved CNC-fræsning ved at justere på kølesmøremiddel tryk og flow for processer som kræver kølesmøremiddel. En vigtig del er at forstå de afledte effekter det har på bearbejdningskvalitet og arbejdsmiljø, såvel som økonomiske og miljømæssige aspekter.

DAMRC vil gennemføre og evaluere praktiske forsøg og målinger, der belyser i hvilket omfang, reduceret tryk og flow reducerer støttestrukturernes energiforbrug på CNC-fræsere. Formålet er således konkret at fastslå størrelsen af effekten af energioptimeringen ved nedjustering i tryk og flow på CNC-bearbejdningsmaskiner i industrien. Dette søges klarlagt gennem praktisk bearbejdningsforsøg hvor energimålinger gennemføres på faktiske bearbejdningscenter, og gennem en komparativ opsætning klarlægges de forskelle der måtte være.

Projektet søger ligeledes at adressere mulige barrierer for konkret implementering i industrien ved at forudsætte at proceskvaliteten skal opretholdes ved lavere tryk og flow.

Det sundheds- og helbredsrelevante aspekt tages også i betragtning, da det er alment kendt at længere tids arbejde med kølesmøremidler medfører en række sundheds- og helbredsrisici – fx kræft. Projektet vil derfor afdække indflydelsen af trykket og flowet af kølesmøremidlet ift. giftige partikler, mhp. at afdække konsekvensen for arbejdsmiljøet.

Alt ovenstående er med til at kaste lys på muligheder til at forbedre konkurrencedygtigheden for danske fremstillingsvirksomheder, hvilket forventes at påvirke produktionsindustrien positivt – både økonomisk og energimæssigt.

### 4 Processen og opnåede resultater

Projektet er bygget op som et komparativ for-projekt der kan danne grundlag for et større projekt. Der er gennemført en potentialeafdækning som konkretiserer og kvalificerer projektideens fulde potentiale. Dette er gjort ved at kortlægge markedsstørrelsen for flow- og trykreduktion, herunder antal CNC-styrede bearbejdningscentre i industrien som hhv. har eller kan opgraderes til at kunne tryk og flow justere.

Efterfølgende er der gennemført en systematisk testfase i DAMRC eget Teknologicenter, på et CNC-bearbejdningscentre med justerbart tryk- og flow- kølesmøremiddelsystem og ved brug af strømmålingsudstyr.

Testfasen har bestået af 3 forsøgsrækker hvor bearbejdningsforsøg i 3 gængse materialer i industrien, rustfrit stål, stål og aluminium, er gennemført. Projektet har søgt at illustrere effekten af tryk- og flowreduktionen i forbindelse med 3 grundlæggende fræseprocesser; planfræsning, lommefræsning og sidefræsning, samt ved tilføjelse af en ekstra – sporfræsning, som tillige blev vurderet relevant at inkludere i testparten.

For hver forsøgsrække er trykket og flowet blevet justeret jf. præ-definerede inkremente, således der opnås bred forståelse for sammenhængen mellem tryk og flow indstillingen, og det faktiske energiforbrug. Hvilket har medført at 12 forskellige tryk- og flow indstillinger er blevet testet for de 3 materialer, med tilhørende strømmålinger.

I forbindelse med gennemførelsen af bearbejdningsforsøgene har der været gennemført en omfattende indkøringsproces, hvor flere forskellige sæt bearbejdningsparametre er blevet afprøvet ved de forskellige materialer for at tilsikre et brugbart ”startpunkt”.

Efterfulgt af de praktiske forsøg er der gennemført en analysefase, hvor emnernes kvalitet er blevet målt via Coordinate Measuring Machine (CMM) og ruhedsmålinger, værktøjerne er inspiceret og slitagen dokumenteret, det samme gør sig gældende for spånformationen. Endvidere er fugtighedsdata blevet registreret ifm. forsøgsgennemførelse. Alt dette giver et omfattende indblik i den konsekvens reduktionen af kølesmøremiddel tryk og flow har på bearbejdningen – både fra et energi- og bearbejdningskvalitetsperspektiv.

Overordnet er der fundet væsentlige energibesparelser som følge af tryk og flow reduktion af kølesmøremidlet, med begrænsede negative konsekvenser på værktøjslid og spånformering.



## 5 Projektledelse og administration (WP1)

Projektet blev formelt underskrevet af partnere d. 3. februar 2020, og er afsluttet d. 31. marts 2021.

Administration og projektledelse af projektets seks arbejdsopgaver er foretaget af Mikkel Meldgaard, Project Manager, DAMRC.

## 6 Potentialeafdækning (WP2)

Dette projekt ses som et for-projekt. Derfor lægges der ud med en potentialeafdækning, som skal være med til at yderligere kvalificere projektideens fulde potentiale. Det sker gennem præcis kortlægning af indenlandsk markedsstørrelse, hvor det undersøges, for hvor mange maskiner det har relevans at arbejde med tryk- og flow reduktion – herunder hvad mulighederne er for opgradering af eksisterende maskiner som pt. ikke kan tryk/flow justere, ligesom det kvalificeres og kvantificeres hvor stor national effekt, målt i kWh, projektets potentiale forventes at rumme.

Potentialeafdækningen kommer således til at indeholde følgende:

- Statistikker på elforbrug i industrien jf. data fra Statistikbanken og relevante rapporter.
- Antal CNC-maskiner i DK / Norden, samt antallet af maskiner med justerbart flow/tryk baseret på dialog med markedsaktører.
- Scenarier for besparelspotentiale baseret på data om energiforbruget samt tilegnet viden om markedsstørrelsen.

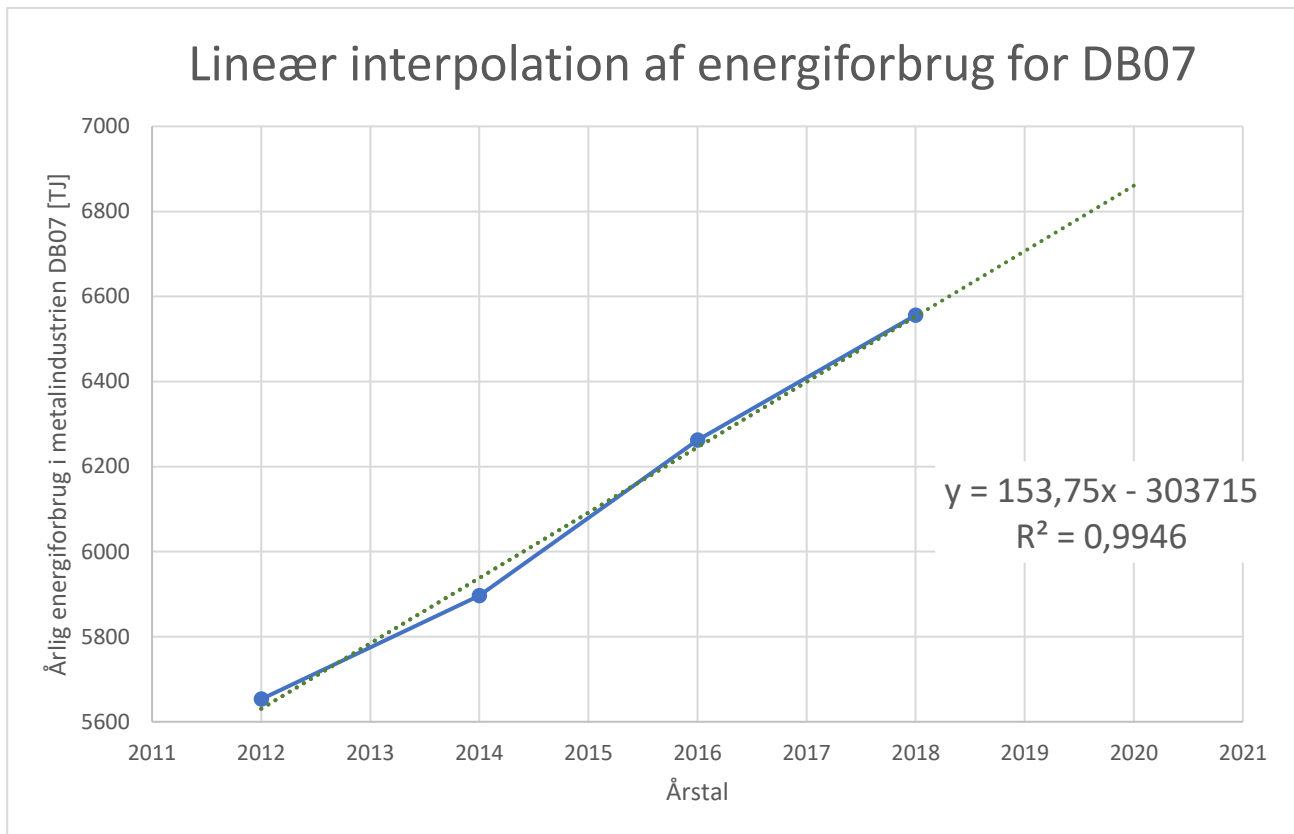
### 6.1 Energiforbrug i bearbejdningsindustrien i Danmark

Senest tilgængelige data for energiforbrug i industrien i Danmark er fra 2018<sup>1</sup>. Statistikken for metalindustrien strækker sig fra 2012-2018, og viser en tydelig lineær udvikling i perioden jf. Figur 1. For at beregne potentialet i så nutidige tal som muligt har DAMRC gjort sig følgende antagelser om energiforbruget frem mod 2020 indenfor maskinforarbejdning:

- Der kan udføres lineær interpolation af energiforbrugsdata for branchegruppen DB07.
- At force majeure hændelser som eksempelvis COVID-19 pandemien ikke har påvirket udviklingen i energiforbruget i industrien.

---

<sup>1</sup> Statistikbanken for branchegruppe DB07 (Metalvareindustrien) (2012-2018) <https://www.statistikbanken.dk/ENEBR>



Figur 1 – Lineær interpolation af energiforbrug for metalindustrien (DB07)

Med en determinationskoefficient på  $R^2 = 0,995$  er antagelsen om lineær udvikling i energiforbruget matematisk valid.

Udviklingen fra 2012 til 2018 i energiforbruget leder således frem til at der i 2020 antagelsesvist har været et energiforbrug i metalindustrien på 6.860 TJ jf. Tabel 1.

Tabel 1 – Udvikling i energiforbrug i metalindustrien (DB07)

Enhed: TJ (terajoule)	2012	2014	2016	2018	2020
Metalindustri DB07	5.653	5.896	6.262	6.556	6.860
Procentvis stigning		4,3%	6,2%	4,7%	4,6%

### 6.1.1 Energiforbrug for maskinforbearbejdningsindustrien

Med fokus på besparelspotentialet i tryk/flow justering af CNC-maskiner er energiforbruget for branchegruppen maskinforbearbejdning særlig relevant at iagttage for dette studie.

Maskinforbearbejdningsbranchen stod for 7% af det samlede energiforbrug for branchegruppen Metalindustri DB07 i 2012 ifølge en kortlægning af energiforbrug i virksomheder af Maagøe et al., 2015<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Rapport udført af Viegand Maagøe, Teknologisk, EnviScan, Energi Midt & Agrotech  
[https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Energibesparelser/kortlaegning\\_af\\_energiforbrug\\_i\\_virksomheder.pdf](https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Energibesparelser/kortlaegning_af_energiforbrug_i_virksomheder.pdf)

Antages denne procentvise andel på 7% af energiforbruget at være konstant igennem perioden 2012-2020, vil fremskrivning således være, at underbranchen maskinforarbejdning står for et energiforbrug på 480,2 TJ, hvilket svarer til 133,4 GWh i 2020, jf. Tabel 2.

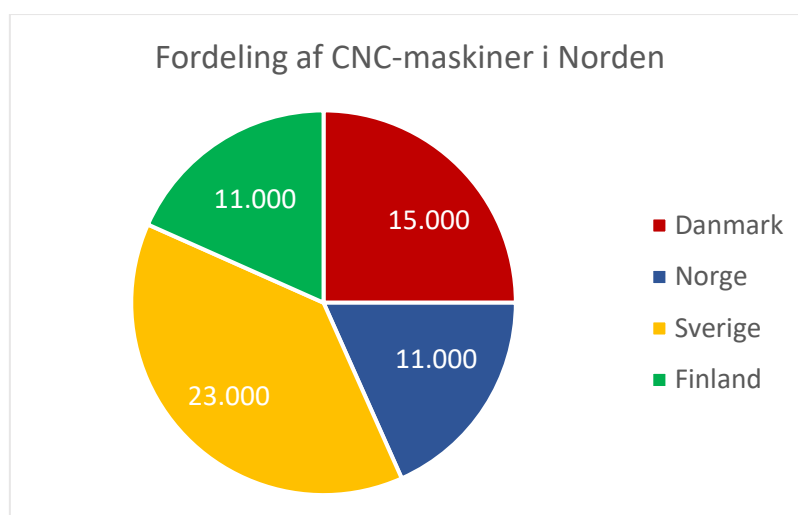
Tabel 2 – Antagelsesvis udvikling i energiforbrug for underbranchen maskinforarbejdning 2012-2020

Enhed: TJ (terajoule)	2012	2014	2016	2018	2020
Underbranche Maskinforarbejdning	395,7	412,7	438,3	458,9	480,2

Ifølge Maagøe et al. (2015) rapporten var energiforbruget for underbranchen Maskinforarbejdning fordelt på 999 Arbejdssteder ultimo 2012.

## 6.2 CNC-Maskiner i Danmark og Norden

Ca. 60.000 CNC-maskiner er installeret i Norden. Heraf står omkring 15.000 maskiner i Danmark lyder vurderingen fra Dansk Værktøjsmaskinforhandler forening (D-V-F). Foreningen repræsenterer hovedparten af forhandlerne af maskiner til Danmark og Norden i øvrigt, heriblandt maskinproducenterne Mazak og DMG Mori.



Figur 2 – Fordeling af CNC-maskiner i Norden iflg. Dansk Værktøjsmaskinforhandler forening

Fordelingen af CNC-maskinerne i de øvrige nordiske lande kan ses i Figur 2.

Efter kontakt med maskinleverandører, samt interview af formand for D-V-F, Lars Lynge, står følgende klart ift. den danske maskinparks nuværende kapaciteter ift. tryk/flow justeringer:

- De maskiner som *kan* justere kølingen, kan kun justere på trykket, hvilket påvirker kølesmøremiddel flowet der bearbejdes med. De er således indbyrdes afhængige, hvorfor justeringsmulighederne på maskinerne betinges af trykket.
- De to største maskinleverandører i Norden; Mazak og DMG Mori vurderer at mellem 5%-10% af maskinerne, der kører i Danmark i dag, har justerbart tryk. 5% af markedet svarer til 750 maskiner som kan justere kølesmøremiddel trykket.

- Enkelte maskinleverandører melder om stigende interesse/forespørgsler på justeringsmulighederne, med henblik på energiforbrug. Flere maskinleverandører melder om lav/ingen interesse fra danske virksomheder i dette tilkøb til maskinerne.
- Vurderingen er at prisen på tilkøbet af justerbart tryk, får mange virksomheder til at fravælge det. Tilkøbet på en større CNC-maskine koster typisk mellem 75.000-250.000 kr. ved maskinleverandøren, men kan også "retrofittes" som 3. parts udstyr fra +75.000 kr.
- Der opleves generelt en større interesse for justerbart tryk fra de øvrige nordiske lande – særlig Norge. Her kræver emnerne, fra et bearbejdningsspektiv, i højere grad mulighed for justering af kølesmøremiddeltrykket, ligesom maskinfabrikkerne oplever at kunderne vil betale for det.

*"Der findes mange drejebænke/fræsemaskiner med standard fast tryk mellem 12-40 bar på det danske marked, hvorimod efterspørgslen på justerbar højtryk i størrelsen 40-80 bar kun er til virkelig highend maskiner, der fylder mindre i den samlede salgsstatistik ift. de øvrige lande i Norden."*

Sales Director, Lau Akstrup Jensen, DMG Mori Denmark

## 6.3 Besparelspotentialet – Scenarier

Med antagelsen om at ca. 750 maskiner er med justerbart tryk i Danmark (5% af DK's maskinpark) er følgende scenarie opsat i Tabel 3 som illustration på gevinsten ved reduktion af energiforbruget på disse 750 maskiner, i intervaller af 5%.

Tabel 3 – Besparelspotentialet på det nuværende antal af justeringsberedte maskiner (5% af maskinerne i DK ≈750 maskiner)

		Besparelspotentiale				
		5%	10%	15%	20%	25%
<b>5% af den danske maskinpark (750 maskiner)</b>	Besparelse i energiforbrug <sup>3</sup>	0,33 GWh	0,67 GWh	1,00 GWh	1,33 GWh	1,67 GWh
	Besparelse i CO <sub>2</sub> <sup>4</sup>	97,0 ton	194,1 ton	291,1 ton	388,2 ton	485,2 ton

Hvis der opnås en besparelse i energiforbrug på 25% på de 750 maskiner er der en forventelig årlig besparelse for klimaet på 1,67 GWh og 485,2 ton CO<sub>2</sub>. Installeres trykjusterbare systemer imidlertid på samtlige bearbejdningsscentre i Danmark, vil der være en potentiel national energibesparelse på 33,4 GWh.

DAMRC har installeret tryk/flow justeringsteknologi til køling igennem spindlen på en CNC-maskine fra 2002 (DMU80T), hvilket antageligt vil kunne gøre sig gældende for store dele af den danske produktionsindustri, hvor der findes leverandører af 3. parts tryk/flow løsninger, som kan eftermonteres på CNC-maskiner i prisklassen 75.000 kr. og op.

Dette synliggør at det er muligt at retrofittes på eksisterende CNC-maskiner og åbner for muligheden for energibesparelser i flere end de 5% af den danske maskinpark som aktuelt kan trykjustere, hvilket vil betyde et yderligere potentiale for CO<sub>2</sub> besparelser. Med en investering på +75.000 kr. pr. maskine, er der dog lange udsigter for økonomisk break-even for virksomhederne, hvor investeringen først balancerer efter reduktion af energiforbruget med minimum 31.250 kWh, forudsat en gennemsnitlig kWh pris på 2,4 kr.

<sup>3</sup> Årlig kWh forbrug pr. maskine: 8.893 kWh ("samlet energiforbrug for maskinforarbejdning"/"antal maskiner i Danmark")

<sup>4</sup> CO<sub>2</sub> besparelse pr kWh: 0,291 kg (Energistyrelsens rapport "Nøgletal om energiforbrug og -forsyning" fra 2017)

## 7 Tekniske forsøg (WP3)

Denne sektion vedrører de planlagte bearbejdningsforsøg, hvilke har til formål at teste hvilken effekt tryk og flow af køle/smøremidlet har på bearbejdningskvalitet, arbejdsmiljø, og ikke mindst energiforbruget under bearbejdning.

Testfasen vil tage udgangspunkt i en af DAMRCs egne CNC-bearbejdningsmaskiner, hvor DAMRC igennem forsøg med forskellige tryk og flow tester påvirkningen dette har på bearbejdningen i forskellige materialer, ved forskellige processer med forskellige værktøjer.

I følgende præsenteres forsøgsdesignet, samt tilhørende procedure

Foruden det opsamlede data fra selve bearbejdningsforsøgene består en væsentlig del af projektet af efterfølgende måling og opsamling af forskelligartede data, bl.a. geometriske målinger og værktøjsanalyse. De procedurer som vedrører disse data, præsenteres i WP4, sammen med dataanalysen.

### 7.1 Forsøgsdesign

Af projektbeskrivelsen er følgende krav defineret som rammen for forsøgsdesignet:

- Test af fire forskellige trykindstillinger og fire forskellige flowindstillinger per materiale
- Test i tre gængse materialer fra industrien (stål, rustfrit stål og aluminium)
- Tre bearbejdningsprocesser i én test (planfræsning, lommefræsning & sidefræsning). Desuden er sporfræsning inkluderet da det er vurderet relevant at inkludere denne bearbejdningstype.

#### 7.1.1 Test emne

Til at teste dette er følgende test emne designet, hvor der både skal gennemføres plan-, lomme- og sidefræsning. Desuden er der yderligere tilføjet sporfræsning i testemnet, idet denne type proces er særlig sensitiv for køle/smøremidlet ift. at lede spåner væk.

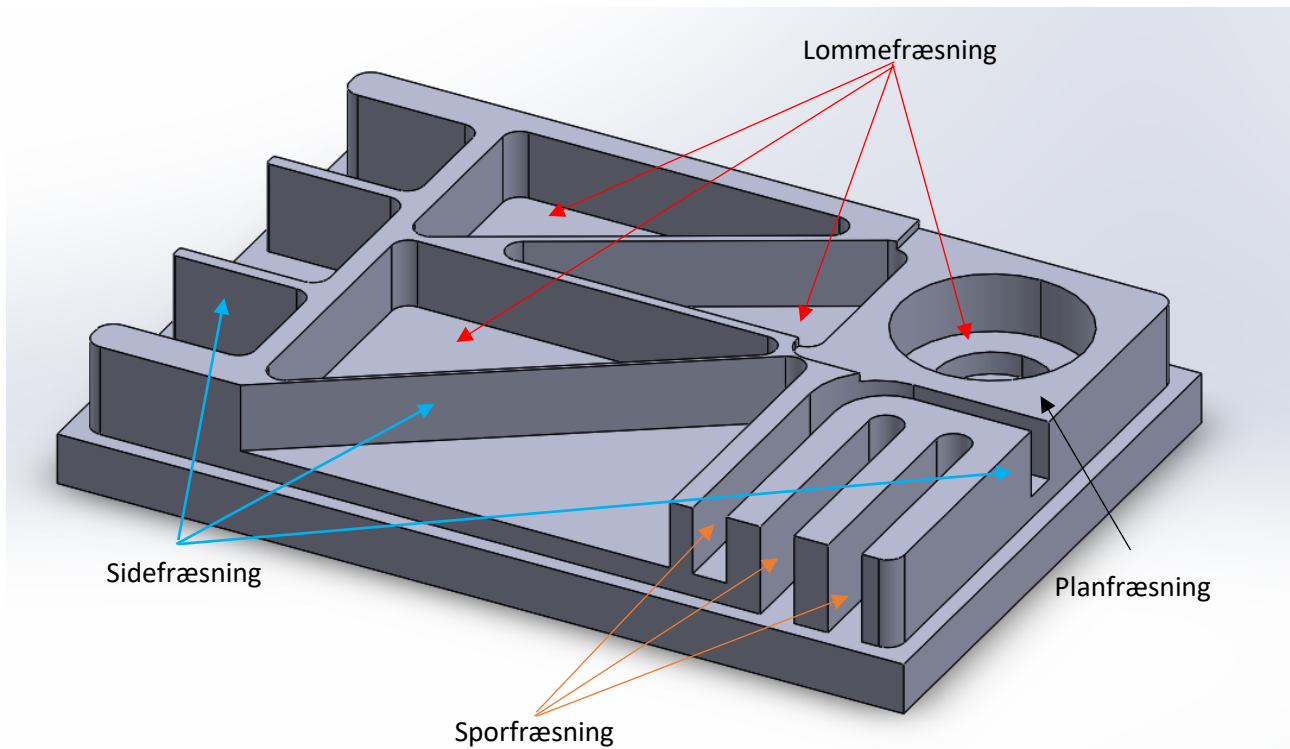
Emnet kan ses a Figur 3 og Figur 4, hvor det er specificeret hvilken type bearbejdningsproces, der gennemføres.

Råemnet til stål og aluminium måler 300x200x50mm.

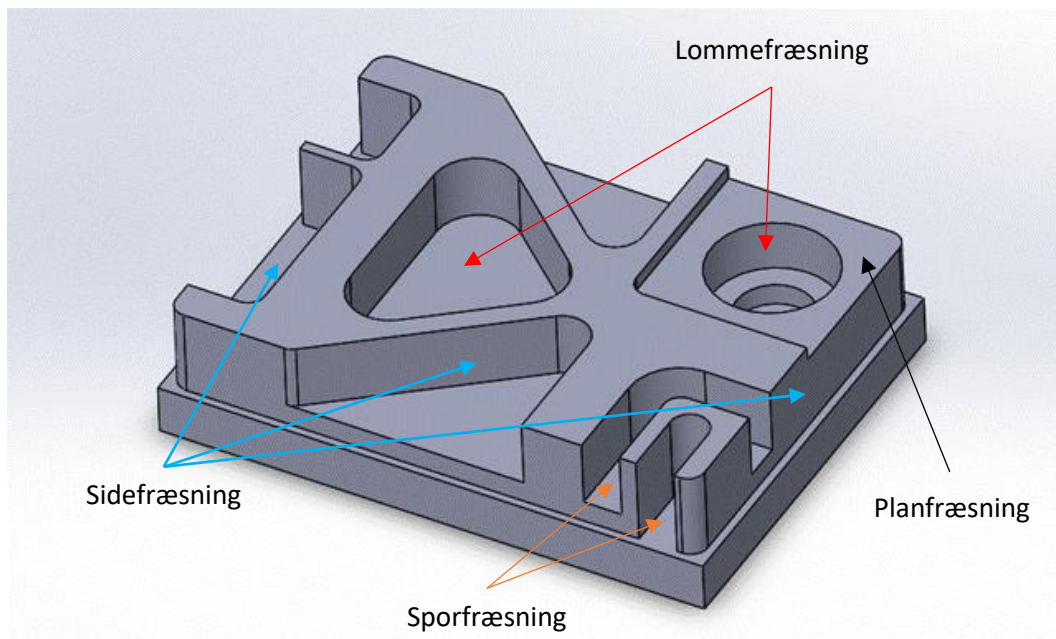
Råemnet til rustfri stål måler 200x150x50mm.

De valgte materialer er:

Aluminium	:	EN AW6082 T651
Stål	:	S275
Rustfrit stål	:	EN 1.4301 / 1.4307 / AISI304



Figur 3: Test emne til aluminium & stål



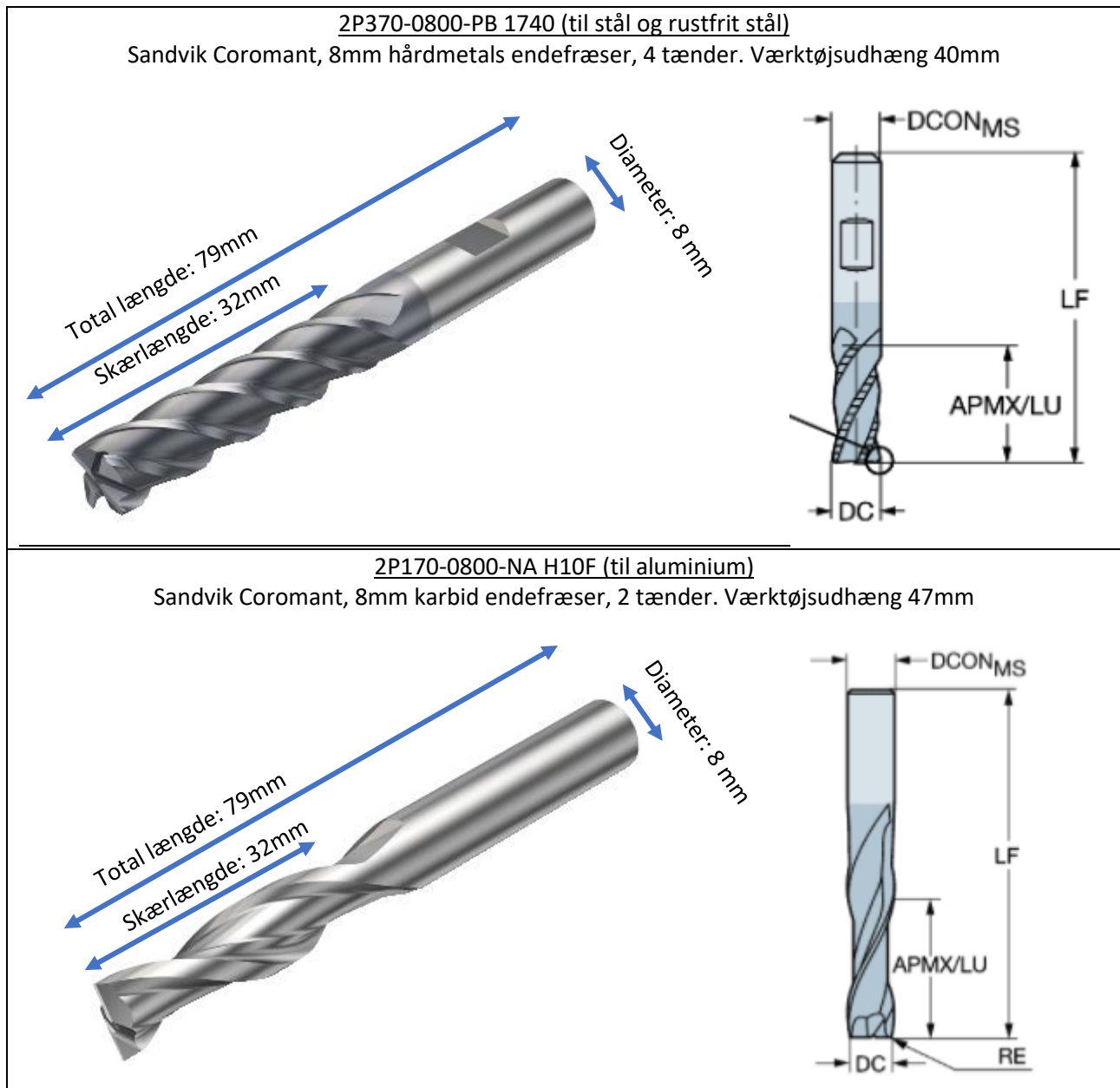
Figur 4: Test emne til rustfrit stål

### 7.1.2 Maskine, værktøj, holder & fikstur

Forsøgene gennemføres på et 5-akset vertikalt bearbejdningscenter (DMU80T), med en 12.000 rpm spindel.

Emnet opspændes på det korteste led i et Lang Micro-Grip fikstur. Siderne præges for at øge stabiliteten og fastspændingen, samt sikre ensartet fiksturering af emnet.

Til forsøgene anvendes to forskellige værktøjer fra Sandvik Coromant. Den ene kan bruges til både stål og rustfrit stål, mens den anden er til aluminium.



Endefræserne monteres begge i en hydraulisk værktøjsholder fra Erickson (HydroForce DV40HCTHT20070M) med en 8mm bøsning med køling gennem spindlen. Til aluminium & stål blev der brugt en 393.CG-200852 bøsning, og til rustfri stål blev der brugt en 393.CF-20 08 50 (se Figur 5).



Figur 5: Øverst t.h. en 393.CG-200852 bøsning. Nederst t.h. en 393.CF-200852 bøsning.

Til køling er der anvendt kølesmøremiddel fra Quaker Houghton Danmark – Hocut 4940 med en oliekoncentration på ca. 8%.

### 7.1.3 Bearbejdningsstrategi, værktøjsbaner og bearbejdningsparametre

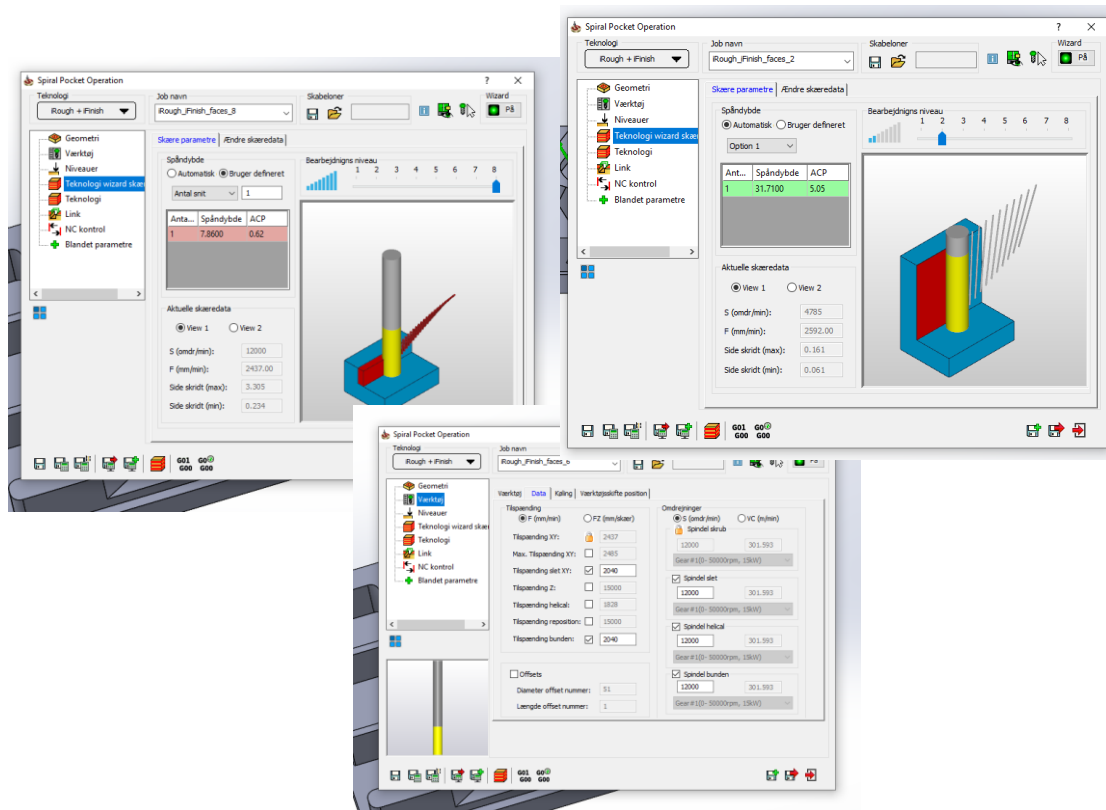
For hvert test emne benyttes den samme fræser til alle operationerne.

Det er valgt at der skal benyttes *dynamisk fræsning*<sup>5</sup> som bearbejdningsstrategi, ud fra det forhold at denne tilgang til bearbejdning ofte benyttes i industrien ved bearbejdning af komplekse emner.

Til at generere værktøjsbanerne til den dynamisk fræsning, herunder bearbejdningsparametrene, er iMachining funktionen fra CAM-programmet SolidCAM fra CADSYS brugt. iMachining er en bearbejdningsmetode i SolidCAM, som på baggrund af principperne i dynamisk fræsning selv foreslår skæreparametre, bearbejdningssekvens, mm., baseret på den givne geometri, værktøj, materiale, mf. Hvis der er begrænsninger som ønskes overholdt, fx maks. spindelhastighed, maks. spåntykkelse, indgreb mv., kan disse indstilles under iMachining opsætningen. Efter evt. begrænsninger er indstillet, er det muligt at ændre "bearbejdnings niveau" fra 1-8 (se Figur 6), hvor 8 er mest aggressive tilgang og 1 er mest forsigtige tilgang, ift. maks. begrænsninger.

<sup>5</sup> Dynamisk fræsning er CAM-baseret fræsestrategi for skrubbearbejdning, hvor maksimal indgrebsvinkel, spåntykkelse og spåndybde er i fokus. Dette optimerer produktionshastigheden og produktiviteten, ved minimal maskinbelastning.





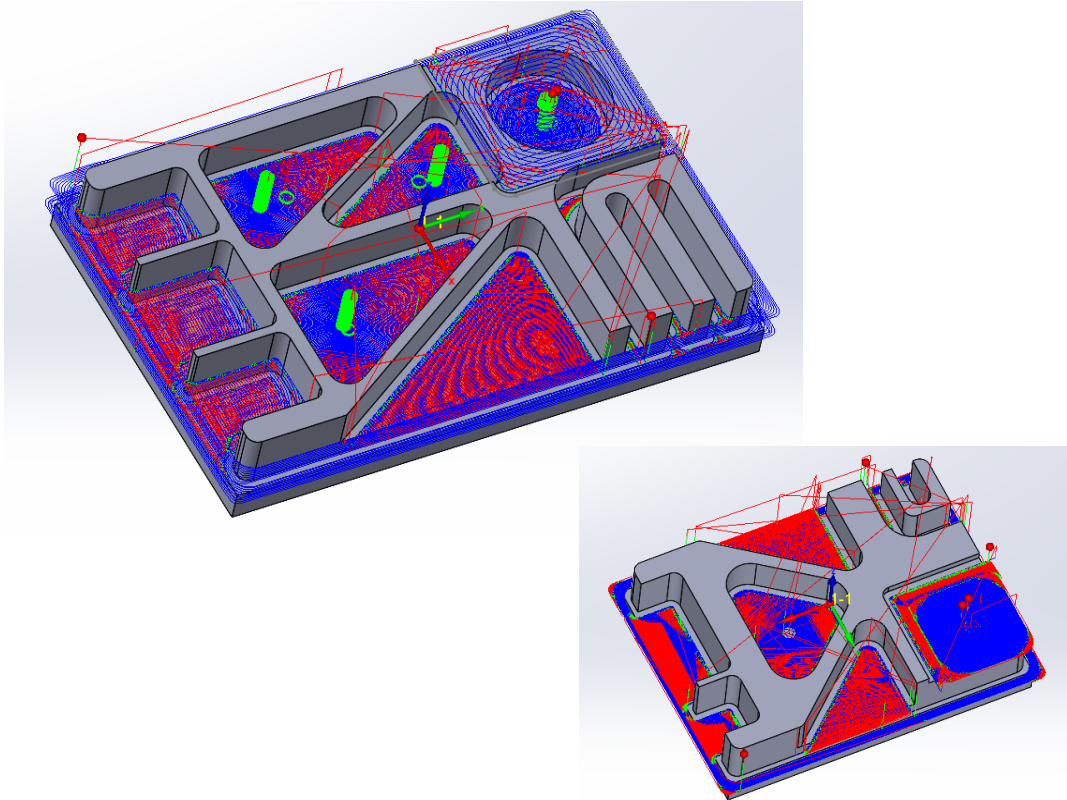
Figur 6: Diverse udklip fra iMachining program opsætning

Det var oprindeligt planlagt at lade SolidCAM og iMachine-metoden selv vælge bearbejdningsparametre, mhp. at udnytte programmets algoritmer til fulde. Under indkøringen af testemnerne blev behovet for at justere parametrene dog tydelig, grundet udfordringer med at etablere en acceptabel bearbejdningskvalitet. De endelige parametre for de tre forsøgsserier kan ses af følgende tabel, Tabel 4.

Tabel 4: Bearbejdningsparametre- og opsætning

	Aluminium	Stål	Rustfrit
Værktøj	2P170-0800-NA H10F	2P370-0800-PB 1740	2P370-0800-PB 1740
Bøsning	393.CG-200852	393.CG-200852	393.CF-200852
<b>Bearbejdningsparametre - skrub</b>			
Skærehastighed (Vc)	302	256,5 - 262	120 – 136
Spindelhastighed (N)	12000	10206 - 10425	4785 – 5421
Tilspænding pr tand (fz)	0,051 – 0,087	0,046 – 0,129	0,135 / 0,114 / 0,099
Maks. spåntykkelse (ct)	0,1	0,052	0,038
Radialt indgreb (Ae)	0,73 - 3,31	0,53 - 2,469	0,161 – 0,304
Aksialt indgreb (Ap)	2,85 / 7,85 / 20,85 / 23,85	2,85 / 14,45 / 20,85 / 23,85	4,7 / 23,7 / 31,7
<b>Bearbejdningsparametre – slet</b>			
Skærehastighed (Vc)	302	250 - 302	89,5 - 104,4
Spindelhastighed (N)	12000	9950 - 12000	3562 - 4154
Tilspænding pr tand (fz)	0,0425 - 0,055	0,046 - 0,05	0,035 - 0,015
Radielt indgreb (Ae)	0,15 - 4,0	0,15 - 2,0	0,3 - 2,0
Aksialt indgreb (Ap)	0,15	0,15	0,3

Nedenfor ses værktøjsbanerne for programmeringen i SolidCAM iMachining for hhv. aluminium/stål (t.v.) og rustfrit stål (t.h.).



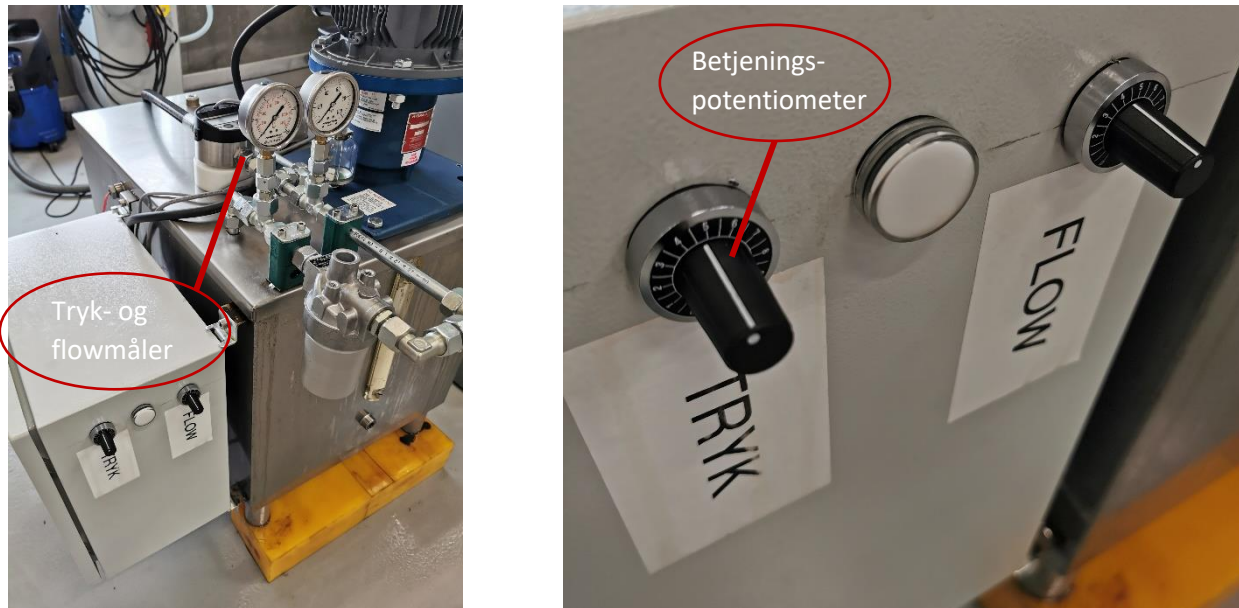
Figur 7: Værktøjsbaner for aluminium/stål (t.v.) og rustfrit stål (t.h.)

#### 7.1.4 Tryk og flow indstillinger

Med det installerede køle/smøremiddel anlæg er det muligt at justere tryk og flow af køle/smøremidlet uafhængig af hinanden. Af Figur 8 kan betjeningspotentiometrene ses, hvorfra trykket og flowet kan indstilles.

Via potentiometrene kan trykket og deraf flowet justeres. Dog afhænger det faktiske tryk og flow, som forlader anlægget af flere forhold, hvor særligt kanalerne i bøsningen som tillader indvendig køling, sætter begrænsning for hvor stort flow, der kan opereres med. Desuden er anlægget udstyret med en overtryksventil, således der (med den nuværende overtryksindstilling) maksimalt kan leveres et tryk på 40 bar – svarende til det maksimalt tilladte indvendige tryk på bearbejdningscentret.

For at monitorere og kontrollere det faktiske tryk og flow er der installeret hhv., en trykflæser (bar), samt en flow måler (l/min). Heraf kan det faktiske tryk og flow som forlader anlægget aflæses.



Figur 8: Det justerbare køle/smøremiddelanlæg. Til højre ses betjeningspanelerne hvorfra tryk og flow kan indstilles.

Til forsøgsrækken benyttes en række prædefinerede tryk indstillinger i intervallet 40 – 18 bar, mens kølesmøremiddel flowet er en afledt af det givne kølesmøremiddel tryk. Dette skyldes disse to parametres gensidige fysiske afhængig.

Det er besluttet at benytte kølesmøremiddel-tryk-indstillingen som variable på baggrund af *Potentialeafdækningen (WP2)*, som viser at størstedelen de danske bearbejdningscentre kun kan justere og kontrollere kølesmøremiddel trykket, mens flowet er en afledt effekt heraf.

Indstillingen af trykket er sket efter følgende protokol:

1. Kontrollér og udskift evt. FILTER i køle/smøreanlæg
2. Tænd for køle/smøremiddel gennem spindlen
3. Skru TRYK indstilling op på maksimalt tryk
4. Skru gradvist op for FLOW indstilling til TRYK-MÅLEREN viser det ønskede tryk
5. Skru gradvist NED for TRYK indstillingen. STOP når trykket falder i TRYK-MÅLEREN

For hver forsøg i forsøgsrækken nedjusteres trykket med 2 bar (40bar, 38bar, 36bar...). Under forsøgene aflæses og registreres flowet, ligesom det faktiske tryk kontrolleres (og tilrettes såfremt det har ændret sig).

### 7.1.5 Strømmåling

Til at måle strømforbruget ved bearbejdningen, bruges en TinyTag datalogger fra Gemini Data loggers (TinyTag TV-4804) (se Figur 9), som monteres direkte på én af faserne fra bearbejdningscentrets hovedkabel (tidligere forsøg har vist at strømmen for hver af de 3 faser er tilnærmelsesvis den samme, herunder fordelingen af forbruget under bearbejdning).



Figur 9: TinyTag Datalogger med strøm tang

Loggeren måler strømmen (I) gennem kablet, og er indstillet til at måle én gang i sekundet (max værdi) i milliampere (mA).

Til beregning af kW forbruget (P), er følgende formel anvendt, under nedenstående forudsætninger.

$P[kW] = (I * U * \sqrt{3} * \cos(\phi))/1000$ , hvor:

- I [A]: Strømforbruget. I = middel af strømforbruget på fasen/faserne
- U [V]: Spændingen. Der regnes med en gns. spænding på 400V
- $\Phi$  (phi): Effekt tab. Der regnes med et forventet effekttab på 20%.

Konverteringen fra effektforbruget (kW) til energiforbruget (kWh) regnes ved:

$kWh = kW * t$ , hvor:

- t [timer]: tid angivet i timer

## 7.2 Forsøgsprocedure

Da målet er at udforske den energimæssige effekt af justering af køle/smøremiddel tryk- og flow, uden at bearbejdningens kvalitet samt værktøjets standtid forringes markant er følgende procedure opsat:

- Bearbejdning sker i materialer fra samme batch
- Bearbejdning sker med en ny fræser for hver tryk-flow indstilling, således værktøjsslid kan analyseres og korreleres med disse indstillinger
- Kun køle/smøremiddel tryk- og flow ændres forsøgene imellem.

I forbindelse med bearbejdningen opsamles følgende data:

- Strømforbrug (mA)
- Faktiske tryk fra køle/smøremiddelanlægget (bar)
- Faktisk flow fra køle/smøremiddelanlægget (l/min)
- Start tidspunkt (tt:mm:ss)
- Slut tidspunkt (tt:mm:ss)

Straks efter bearbejdningen er færdig registreres fugtighedsdata fra to fugtighedsmålere ved at placere disse inde i bearbejdningsområdet. Her registreres hhv. den generelle fugtighed i rummet, efterfulgt af fugtigheden inde i bearbejdningsområdet, med henblik på at kunne kortlægge forskellen. Fugtigheden

måles i %. Foruden fugtighedsmålingerne har **AVS Danmark** stillet udstyr til rådighed til at kunne måle partikkelkoncentrationen ved forsøgsrækken i rustfrit stål.

Der opsamles spåner til analyse i WP4 fra tre placeringer i bearbejdningscentret, se Figur 10.

Placering A



Placering B



Placering C



*Figur 10: Placeringer for opsamling af spåner*

Alt opsamlet data samles sammen med testemnet og test værktøjet til analyse i WP4.

Testproceduren hvori ovenstående data registreres findes i Bilag A – Testprotokoller.

## 8 Validering, analyse og kvalitetssikring (WP4)

Denne arbejdsplanke vedrører opmåling og validering af test emne-, værktøj og spåner og efterfølgende analyse af dette samt de øvrige data, der er opsamlet under bearbejdningsforsøgene.

Følgende data indsamles for ovenstående analyse:

- Kvalitetskontrol (CMM-opmåling af geometri og overfladekvalitet via ruhedsmålere)
- Værktøjsslid (Visuel inspektion)
- Spånafbrydning (Spånformation)
- Sundhedsdata (Fugtighedsmåling & partikel måling for test serien med rustfrit stål)
- Energiforbrug (Strømmåling)

### 8.1 Validerings- og analyse metode

#### 8.1.1 Energiforbrug

Som forklaret i afsnit 7.1.5, Strømmåling, måles bearbejdningscentrets energiforbrug via en strømtang, som registrerer maksimal strømmen for hvert sekund. Baseret på middelstrømmen regnes energiforbruget.

#### 8.1.2 Kvalitetskontrol

Kvaliteten af testemnet evalueres ved måling af adskillige geometriske målinger og overflade ruhed.

De geometriske målinger foretages på en TESA MICRO-HITE 3D CMM<sup>6</sup>-opmåler. Overfladeruhed målingerne foretages med en håndholdt Mahr MarSurf PS1 ruhedsmåler (se Figur 11).



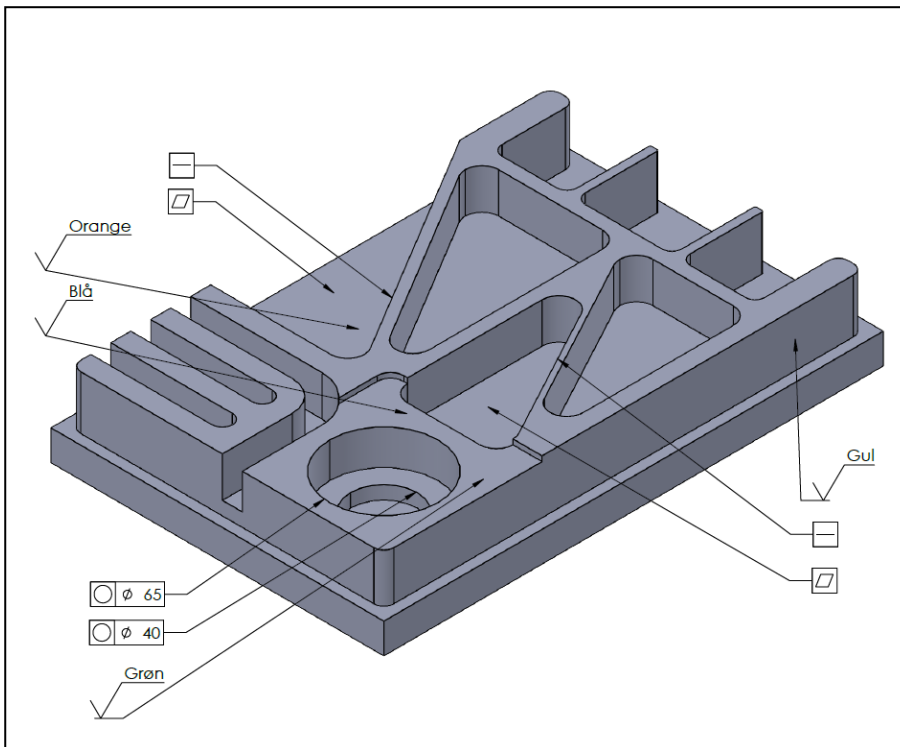
Figur 11: Venstre, TESA CMM-opmåler. Højre, Mahr ruhedsmåler

Følgende illustrationer viser hvor på emnet der foretages målinger og hvad der måles for emnegeometrien til forsøgene i hhv. aluminium og stål, samt geometrien til forsøgene i rustfrit stål.

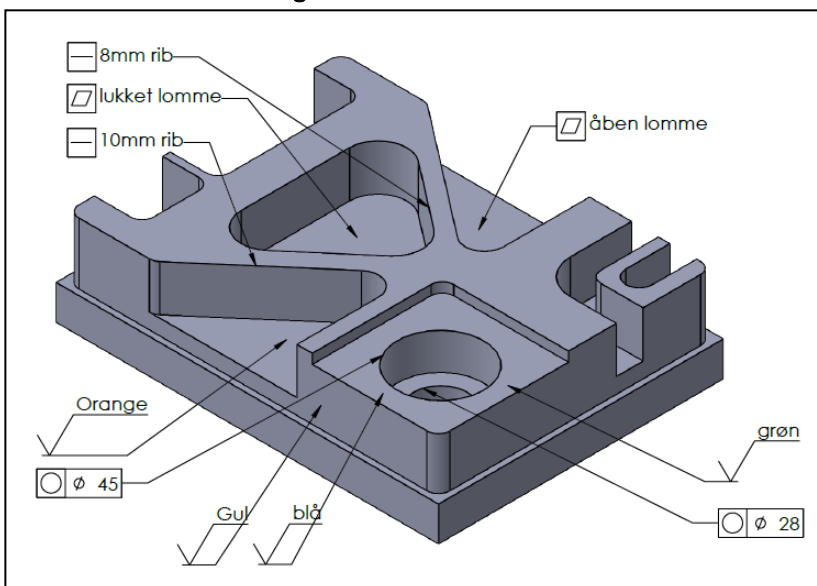
<sup>6</sup> CMM står for "Coordinate Measuring Machine" og er et præcisionsmåleudstyr som via berøringsprober, præcist, kan punktmåle emnedimensioner og geometriske tolerancer

De komplette test protokoller kan findes i Bilag A – Testprotokoller, som også udspecificerer hvor målingerne foretages. Se symbolforklaring nedenfor.

### 8.1.2.1 Emne validering – stål og aluminium

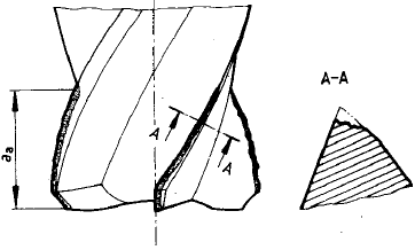
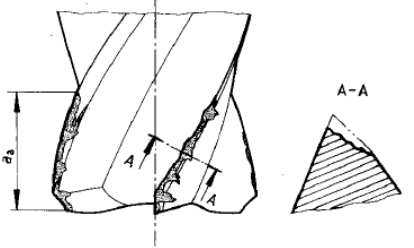
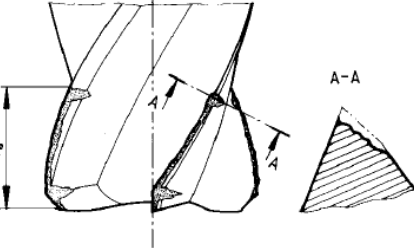


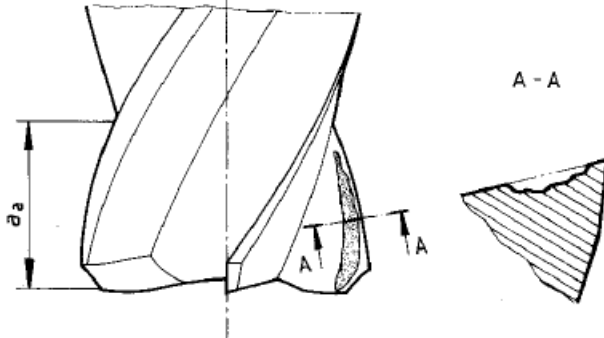
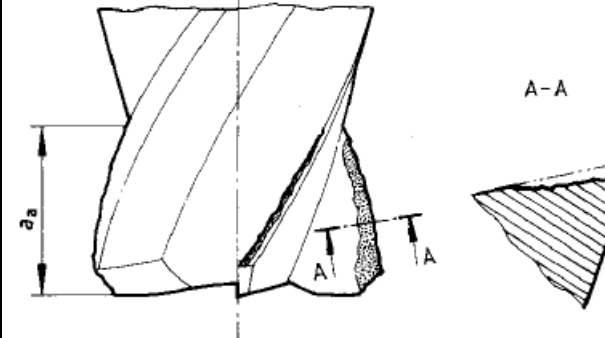
### 8.1.2.2 Emne validering – rustfrit stål

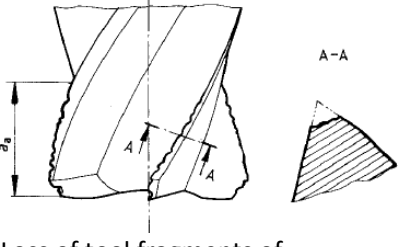
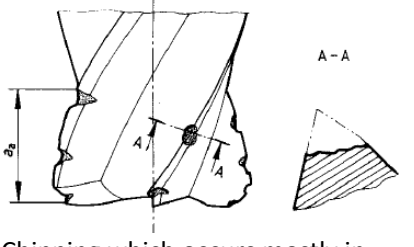
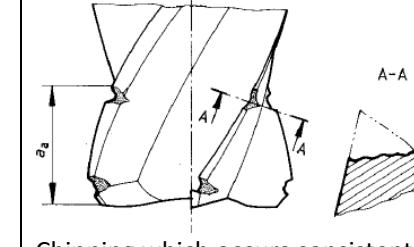


### 8.1.3 Værktøjsslid

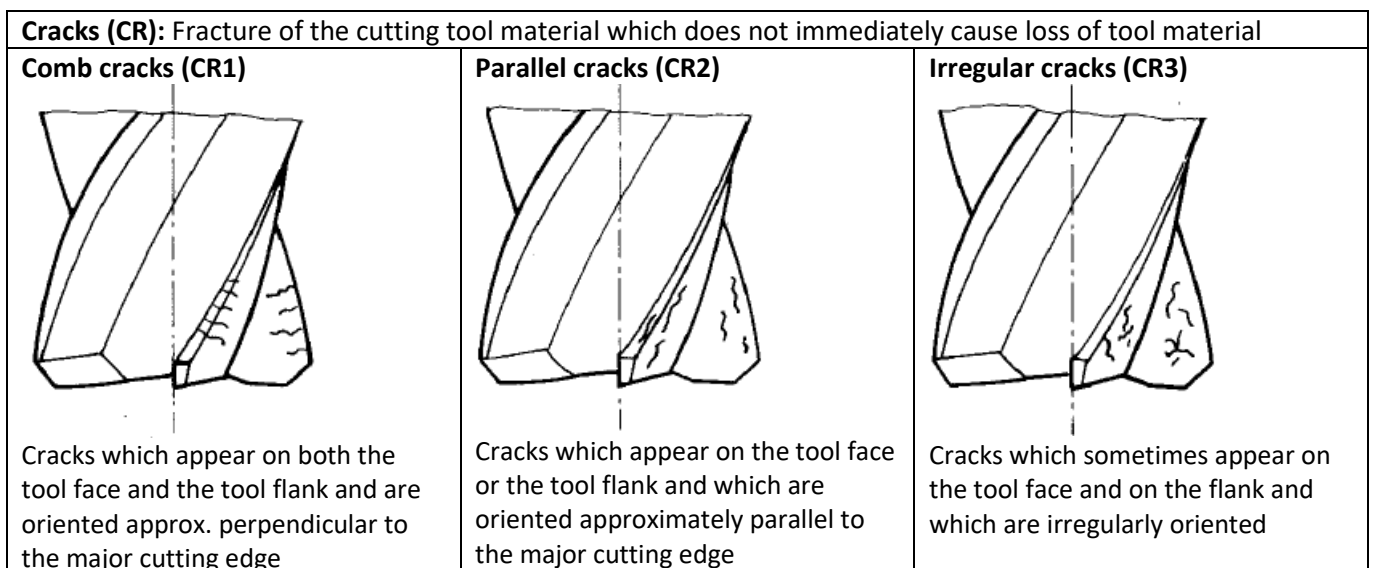
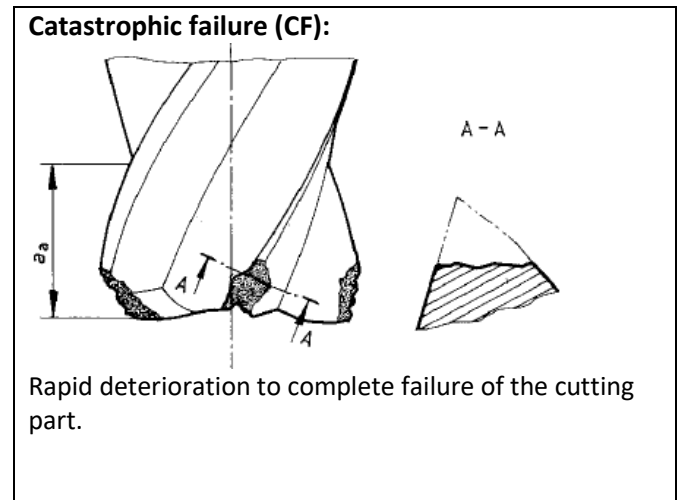
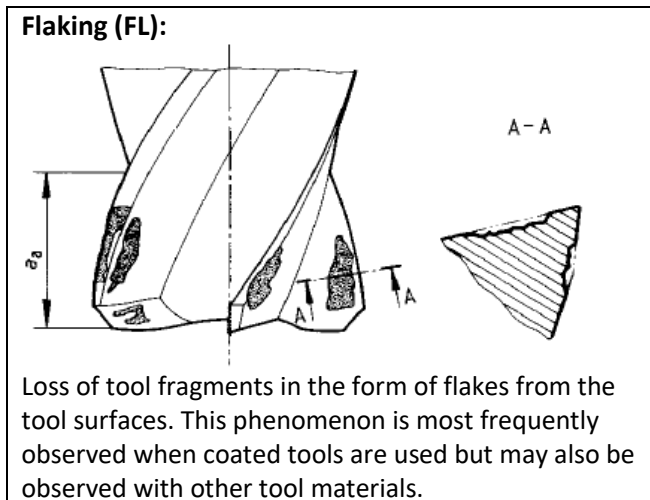
Forsøgene er designet således spåntiden er så lang, at det forventes at der vil kunne registreres en vis grad af værktøjsslid. Værktøjsslidet vurderes ved visuel inspektion med høj opløsnings billeder og klassificeres med udgangspunkt i ISO 8688-2 "Tool Life testing in milling", som bl.a. indeholder en række forskellige klassifikationer. Disse fremgår af følgende visualiseringer:

<p><b>Flank wear (VB):</b> Loss of material from the tool flanks during cutting which results in the progressive development of a flank wear land.</p>		
<p><b>Uniform flank wear (VB1)</b></p>  <p>Wear land which is normally of constant width and extends over those portions of the tool flanks adjoining the entire length of the active cutting edge.</p>	<p><b>Non-Uniform flank wear (VB2)</b></p>  <p>Wear land which has an irregular width and for which the profile generated by the intersection of the wear and the original flank varies at each position of measurement</p>	<p><b>Localized flank wear (VB3)</b></p>  <p>Exaggerated and localized form of flank wear which develops at a specific part of the flank.</p>

<p><b>Face wear (KT):</b> Gradual Loss of tool material from the tool facing during cutting.</p>	
<p><b>Creater wear (KT1)</b></p>  <p>Progressive development of a crater oriented approximately parallel to the major cutting edge and with a maximum depth some distance away from the major cutting edge.</p>	<p><b>Stair-formed face wear (KT2)</b></p>  <p>Form of wear in which the maximum depth of the wear scar, measured perpendicular to the tool face, occurs at the intersection of the wear with the tool major flank.</p>

<p><b>Chipping (CH):</b> Edge deterioration where parts of the edge break away.</p>		
<p><b>Uniform chipping (CH1)</b></p>  <p>Loss of tool fragments of approximately equal size along the cutting edges, which significantly influences the uniformity of the width of the flank wear land.</p>	<p><b>Non-uniform chipping (CH2)</b></p>  <p>Chipping which occurs mostly in connection with cracks at a small number of positions along the active cutting edges but with no consistency from the one cutting edge to another.</p>	<p><b>Localized chipping (CH3)</b></p>  <p>Chipping which occurs consistently at certain positions along the active cutting edge</p>





### 8.1.4 Spånbrudning og spånformation

En væsentlig del af bearbejdning handler om spånerne, da disse kan fortælle om hvad der er sket under bearbejdningsprocessen. Ved denne evaluering vil fokus særligt være på om a) spånerne er bukket og/eller har bukkemærker, b) om spånerne er kortere end spåndybden og c) spånernes farve. De første to fokusområder giver information om spånerne er blevet effektivt ledt væk af køle/smøremidlet mens spånfarven fortæller noget om bearbejdningstemperaturerne, og derved om kølingen har været god nok (særligt ved stål og rustfrit stål). Endvidere fokuseres der på hvorvidt spånerne var ledt væk fra særligt lommerne af test emnet.

### 8.1.5 Sundhedsdata

For at opnå indsigt i de sundhedsmæssige aspekter vedr. tryk/flow ændring, måles luftfugtigheden ved maskinen – hhv. før og efter lågen til bearbejdningssentret åbnes mhp. at afdække om der kan observeres en forskel. Dette bruges som simpel indikator for om der er mere kølesmøremiddel i omgivelserne. Som support til dette måles partikelkoncentrationen af partikler <10  $\mu\text{m}$  og <1  $\mu\text{m}$ , for at afdække hhv. mængden af olietåger (moderat str. partikler) og olierøg (små partikler), via måleudstyr udlånt af AVS Danmark.

## 8.2 Resultater

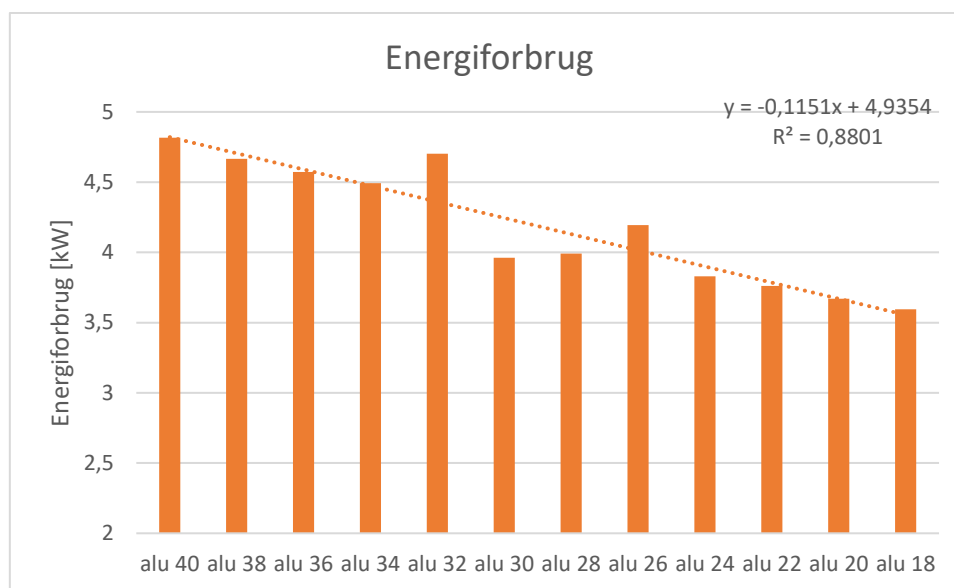
Følgende præsenterer de indsamlede og analyserede data for bearbejdningsforsøgene.

### 8.2.1 Energiforbrug & bearbejdningsdata

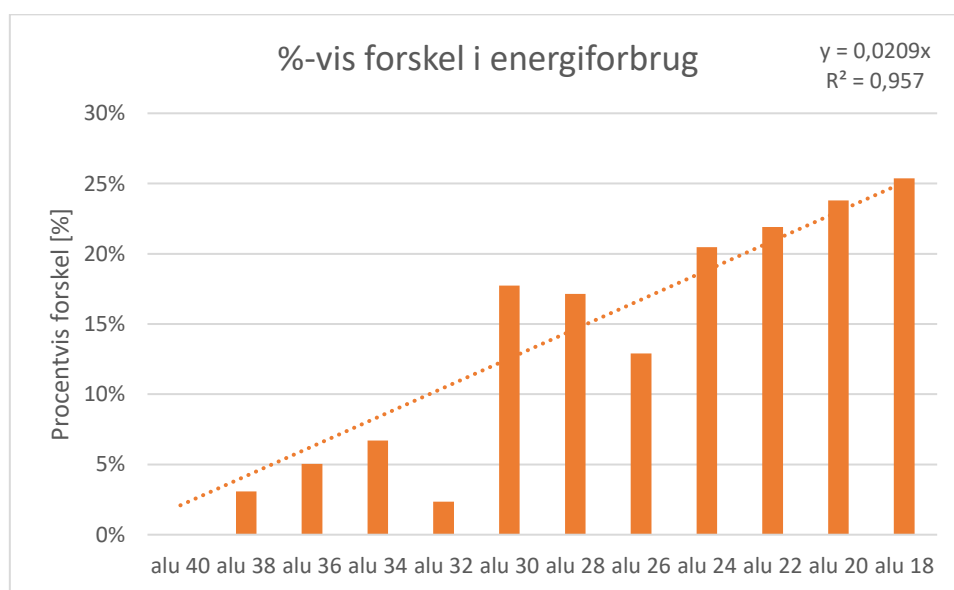
Projektets hovedfokus er, om der er en energimæssig gevinst ved at nedjustere kølesmøremiddel tryk & flow – og hvilken konsekvens der er herved. For projektet er dette gjort ved at nedjustere tryk og flow for et eksternt system, som leverer kølingen gennem spindlen.

#### 8.2.1.1 Energiforbrug & bearbejdningsdata – Aluminium AW6082

Ved at måle på strømforbruget for hele systemet under bearbejdningsdata er der registreret følgende data vedr. strømforbruget, ved bearbejdningsdata i aluminium AW6082.



Figur 12: kW forbrug – aluminium (AW6082)

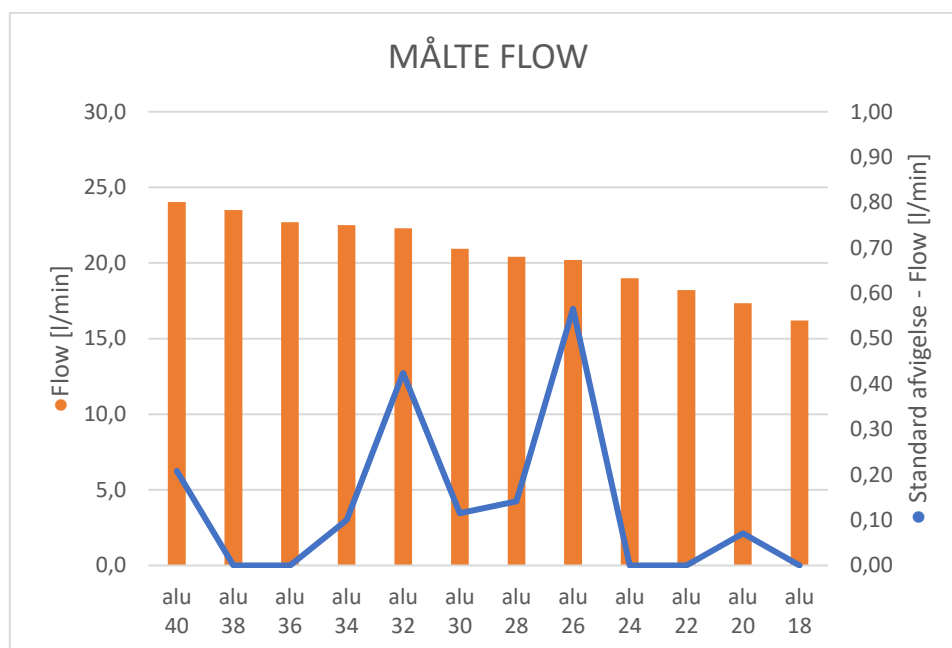


Figur 13: Relativ ændring i kW - aluminium (AW6082)

Som det ses af strømmålingsresultaterne fra aluminium bearbejdning, er der en stærk sammenhæng mellem hvilket tryk, der bearbejdes ved, og det respektive energiforbrug. Forsøgsrækken viser at energiforbruget under bearbejdning kan reduceres med helt op mod 20-25% ved halvering af kølesmøremiddel trykket fra 40 bar til 20 bar.

Ved målingerne bemærkes særligt forsøg 32 og 26, med markante afvigelser. Sammenholdes disse afvigelser med det målte flow (se Figur 14), kan det ses at disse udfald korrelerer med større standard afvigelse på flowmålingen. Baseret på kølesmøremiddelanlæggets opbygning kan det sammenholdes med en tilretning i trykindstillingen, hvilket har været krævet grundet løbende trykfald forårsaget af gradvis tilstopning af finmaskefilteret.

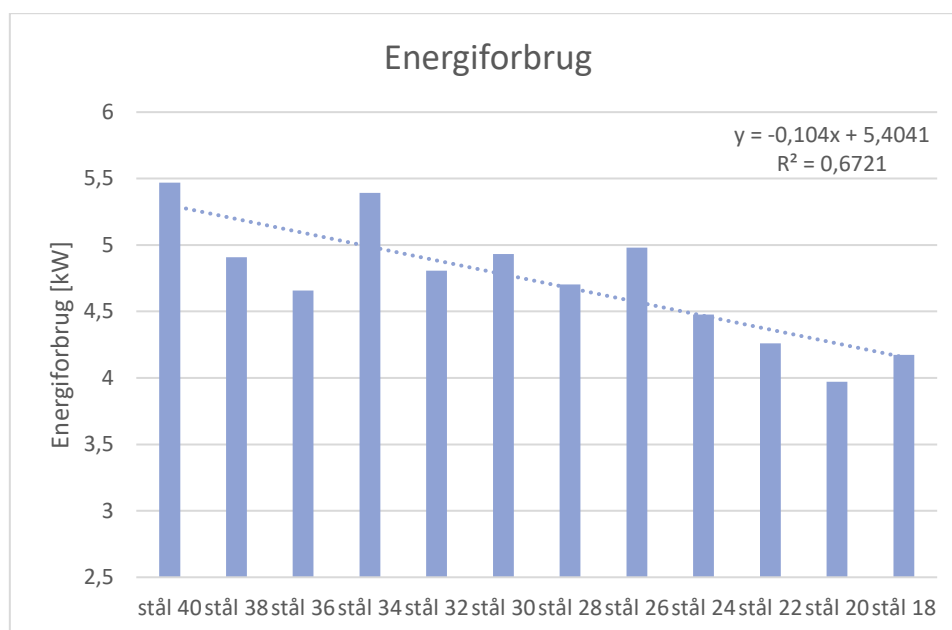
Foruden at forklare afvigelserne, viser dataene også sensitiviteten og indflydelsen kølesmøremiddelanlægget på strømforbruget – og derved energiforbruget. Dette bekræfter at kølesmøremiddelanlæg udgør en væsentlig del af energiforbruget på bearbejdningscentre.



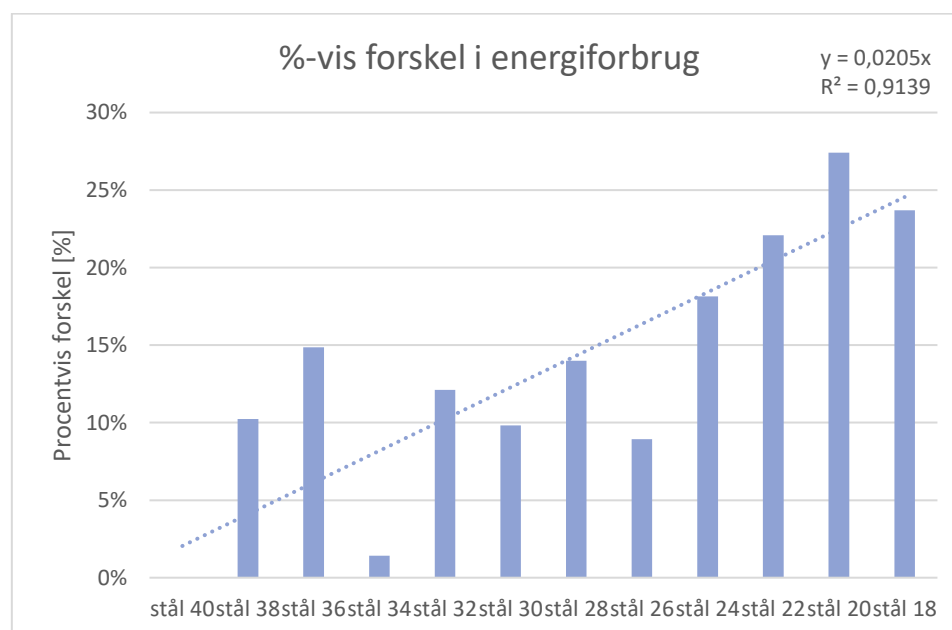
Figur 14: Flowmåling og standardafvigelse - aluminium (AW6082)

### 8.2.1.2 Energiforbrug & bearbejdningsdata – Stål S275

Foruden målingerne fra forsøgene i aluminium er følgende data vedr. strømforbruget ved bearbejdning i stål S275 registreret.



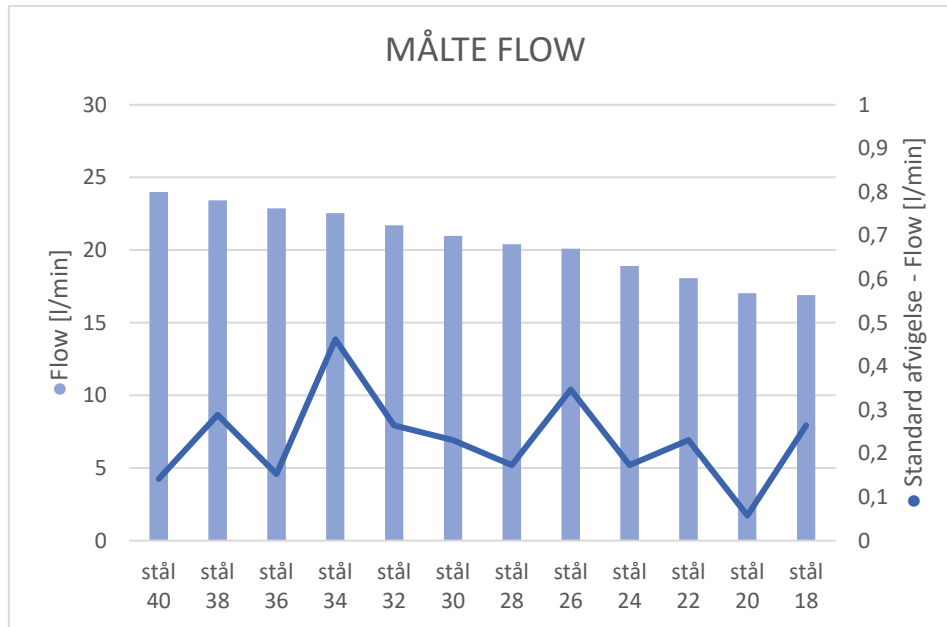
Figur 15: kW forbrug - stål S275



Figur 16: Relativ ændring i kW - stål S275

Som det ses af strømmålingsresultaterne fra stål bearbejdning, er der også her en stærk sammenhæng mellem hvilket tryk der bearbejdes ved, og det respektive energiforbrug. Det er værd at bemærke *den relative ændring i strømforbruget, som er tilnærmelsesvis identisk med forsøgene i aluminium, med en ændring i energiforbruget på ca. 2% for hver gang trykket op- eller nedjusteres én bar.*

Dog er det værd at bemærke en væsentlig større variation i strømmålingerne for stålforsøgene, sammenlignet med målingerne for aluminium, hvilket særligt kommer til udtryk ved  $R^2$ -værdien for den lineære tendenslinje, som for den relative forskel i energiniveau ligger på 0,91 for stål mod 0,96 for aluminium.



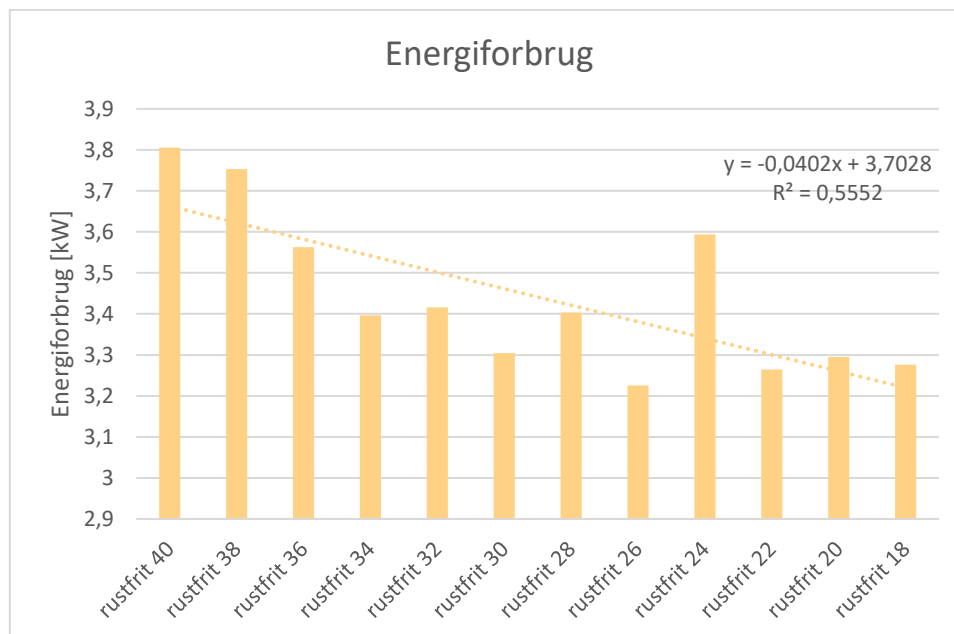
Figur 17: Flowmåling og standardafvigelse – stål S275

Studerer de opsamlede flowdata (Figur 17) kan det ses at der, fordelt over hele forsøgsrækken, generelt er en større tendens til afvigelse i flowmålingerne, sammenlignet med forsøgene i aluminium. Dette indikerer løbende justeringer af kølesmøremiddeltrykket – forventelig grundet trykfald fra gradvis filter tilstopning, og korrelerer tydeligt med afvigelserne fra den lineære tendens i strømforbruget. Som ved forsøgene i aluminium tydeliggør det blot hvor sensitivt strømforbruget er ift. løbende justering af trykindstillingerne – og derved hvor væsentlig andel af strømforbruget, kølesmøremiddelsystemet udgør.

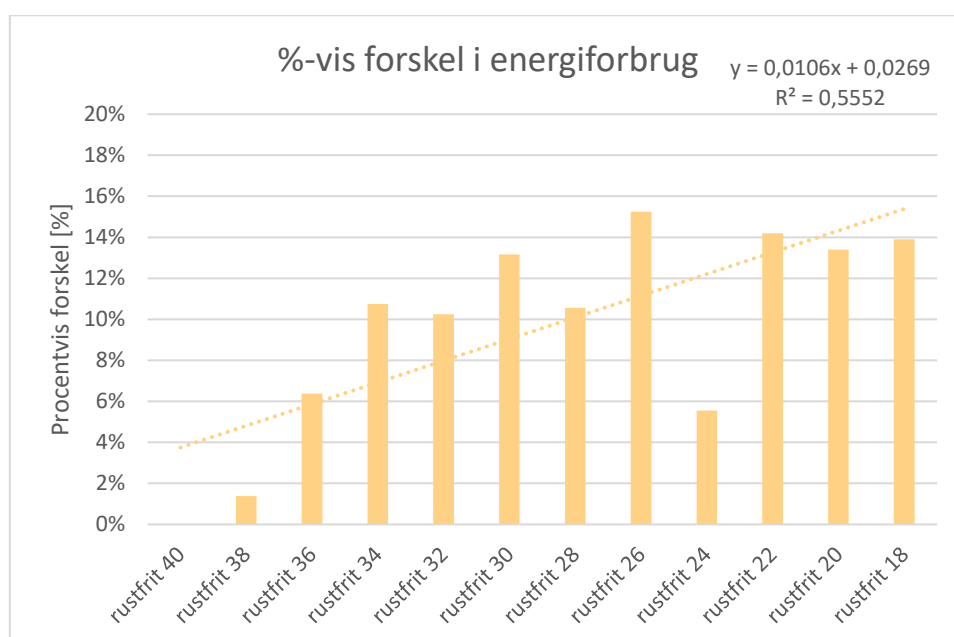
### 8.2.1.3 Energiforbrug & bearbejdningsdata – Rustfrit stål 304

For forsøgene i rustfrit stål 304 er følgende strøm- og flowmålinger opsamlet.

For disse data bør det bemærkes hvilken indflydelse valget af bøsning har haft på særlig strømmålingerne, idet denne type bøsning tillader en lavere flowgennemstrømning. Dette ses i første omgang ved at flowet ved 40 bars tryk er reduceret fra ca. 24 L/min til ca. 12,5 L/min, hvilket medfører en direkte reduktion i strømforbruget på hhv. ca. 1kW og ca. 1,6kW, fra hhv. ca. 4,8kW for aluminiumsbearbejdningen og ca. 5,4kW for stål bearbejdningen til ca. 3,8 kW for rustfrit stål bearbejdningen. Alene valget af bøsning (og heraf kølestrategi) viser således at det er muligt at reducere energiforbruget markant. I dette specifikke tilfælde 20- og 30%.



Figur 18: kW forbrug – rustfrit stål 304

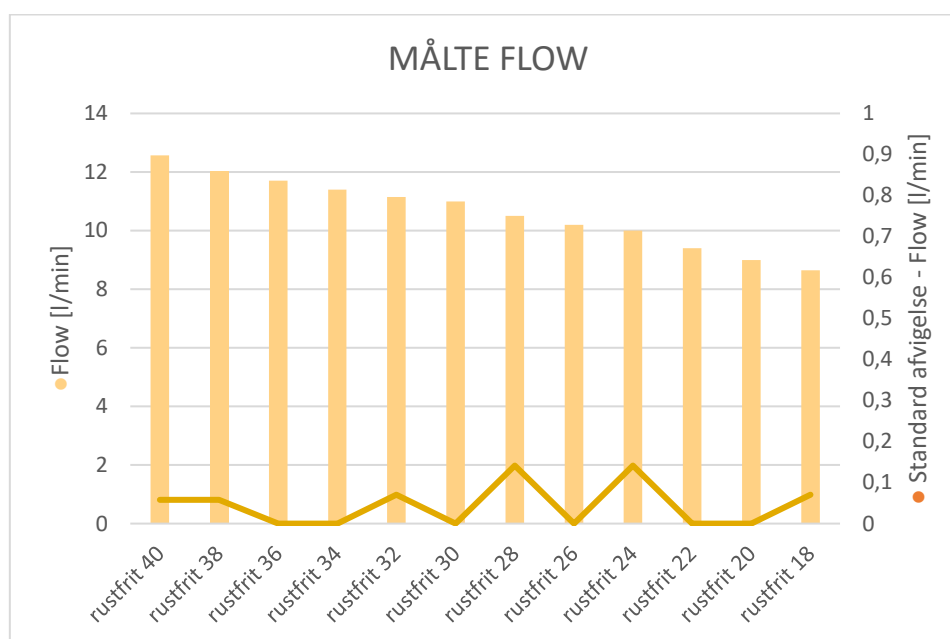


Figur 19: Relativ ændring i kW - rustfrit stål 304

Studerer den relative ændring i strømforbrug (Figur 19) som følge af tryk/flow reduktionen ses det at den procentuelle gevinst er mindre i dette tilfælde hvor bøsningen har medført lavere flowgennemstrømning. Dog ses der stadig en reduktion i forbruget i størrelsesordenen 10-15% ift. udgangspunktet med de 40 bars tryk. Mens der særligt ved målingerne for aluminiumsforsøgene var en stærk lineær sammenhæng mellem tryk og strømforbrug, er denne ikke til stede ved målingerne fra forsøgene i rustfrit stål. Tendensen er i stedet at ændringen i strømforbrug er "stor" ved ændring af tryk i intervallet 30-40bar, mens der fra 18-30bars tryk kun er en meget begrænset ændring i energiforbruget (<5%), såfremt afvigelserne ved tryk 28 & 24 ikke tages i betragtning. Dette indikerer at en kritisk grænse nås ved lavere flowgennemstrømning, hvor den andel kølesmøremiddelsystemet udgør af det samlede strømforbrug er begrænset til et minimum.

Sammenholdes strømmålingsdataene (Figur 19) med det målte flow (Figur 20), kan det ses at afvigelserne i strømmålingerne ved tryk 28-, 24- og delvis 32 korrelerer med større standard afvigelse på flowmålingen. Som ved de forrige forsøgsrækker med aluminium og stål, forklarer flowafvigelsen, strømefvigelsen, hvilket styrker hypotesen om en kritisk grænse for kølesmøremiddelsystems andel af strømforbruget, under hvilken der ikke kan opnås nogen nævneværdig energibesparelse - en grænse som umiddelbart har en væsentlig sammenhæng med flowgennemstrømningen.

Grænsen forventes således både at kunne nås med ekstremt lavt kølesmøremiddel tryk og brug af bøsning til alm. indvendig køling, eller også ved brug af high-pressure, low flow kølesmøremiddel systemer og strategier.



Figur 20: Flowmåling og standardafvigelse - rustfrit stål 304

#### 8.2.1.4 Energiforbrug & bearbejdningsdata – Opsamling

Opsummeret kan det udledes at der er en stærk sammenhæng mellem energiforbruget for bearbejdningscentret og kølesmøremiddelsystemet. Der er observeret **strømbesparelser op til hhv. 15- og 25% ved trykreduktion fra 40 til 18 bar** - afhængig af maksimale flowgennemstrømning for holder-bøsning-værktøjsopsætning. Desuden har strømmålingerne vist en stærk sammenhæng mellem det generelle strømforbrug og flowet, mens kølesmøremiddeltrykket snarere skal betragtes som en afledt effekt af de maksimale begrænsninger et givent system opererer under – i kontekst af kølesmøremiddelsystemer og køling- og smøring.

Desuden har forsøgene vist at kølesmøremiddelanlæggets andel af strømforbruget når en kritisk grænse når flowgennemstrømningen er tilstrækkelig lav. Under denne grænse udgør systemet tilsyneladende så lille en andel af det samlede strømforbrug, at der ikke nås nogen nævneværdig strømbesparelse ved lavere flow og tryk. Dette giver grundlag for at industrien kan identificere denne kritiske grænse, og såfremt materiale og opsætning tillader det, indstille trykket således flowet svarer til denne kritiske grænse, mhp. at reducere energiforbruget.

*”Samlet viser forsøgene at det er muligt at reducere strømforbruget væsentlig, ved reduktion af kølesmøremiddeltryk og flow. Desuden indikerer forsøgene at det kan give god mening at arbejde med minimering af flowgennemstrømning fra et energiperspektiv”*

Samlet viser forsøgene at det er muligt at reducere strømforbruget væsentlig, ved reduktion af kølesmøremiddeltryk og flow. Desuden indikerer forsøgene at det kan give god mening at arbejde med minimering af flowgennemstrømning fra et energiperspektiv. Det kunne fx være via bøsningvalg og/eller køle-smøre teknik, hvor fx minimum quantity lubrication – MQL, eller high pressure coolant systems med minimalt flow, forventes at kunne medføre positive effekter, både energimæssigt og fra et bearbejdningsperspektiv.

## 8.2.2 Kvalitetskontrol

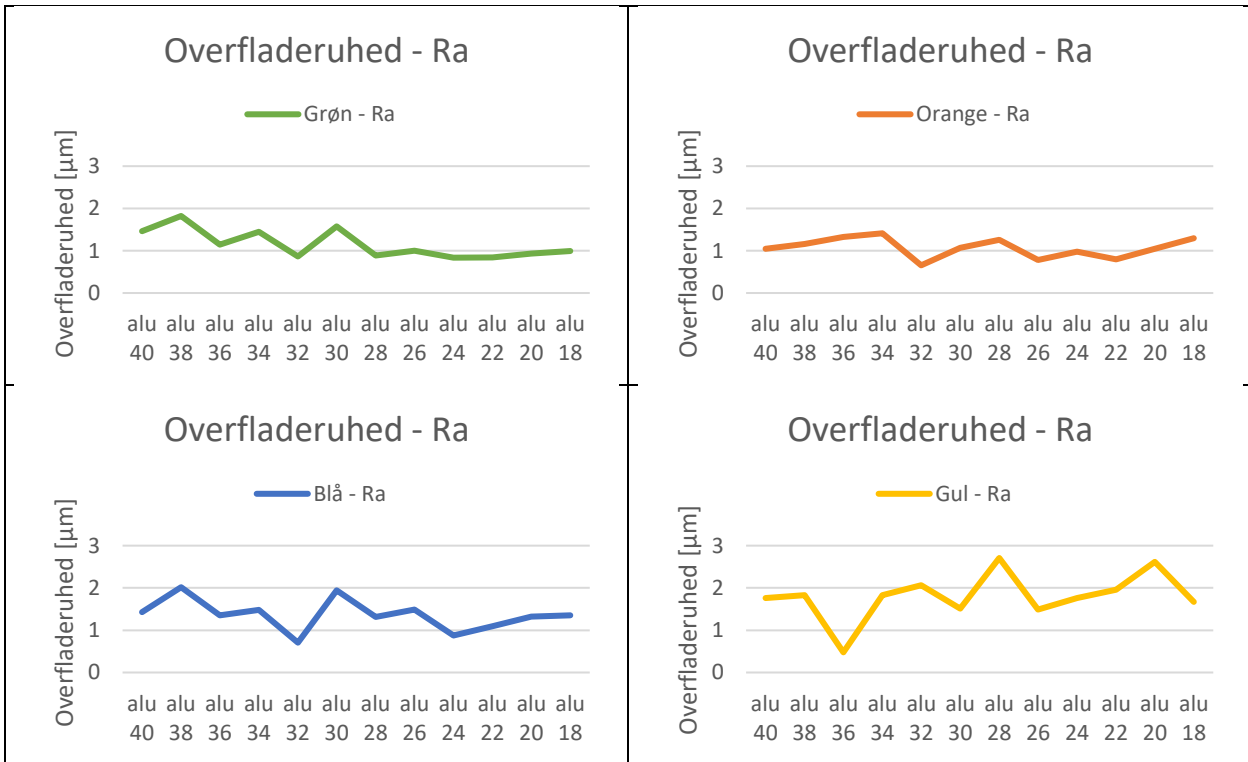
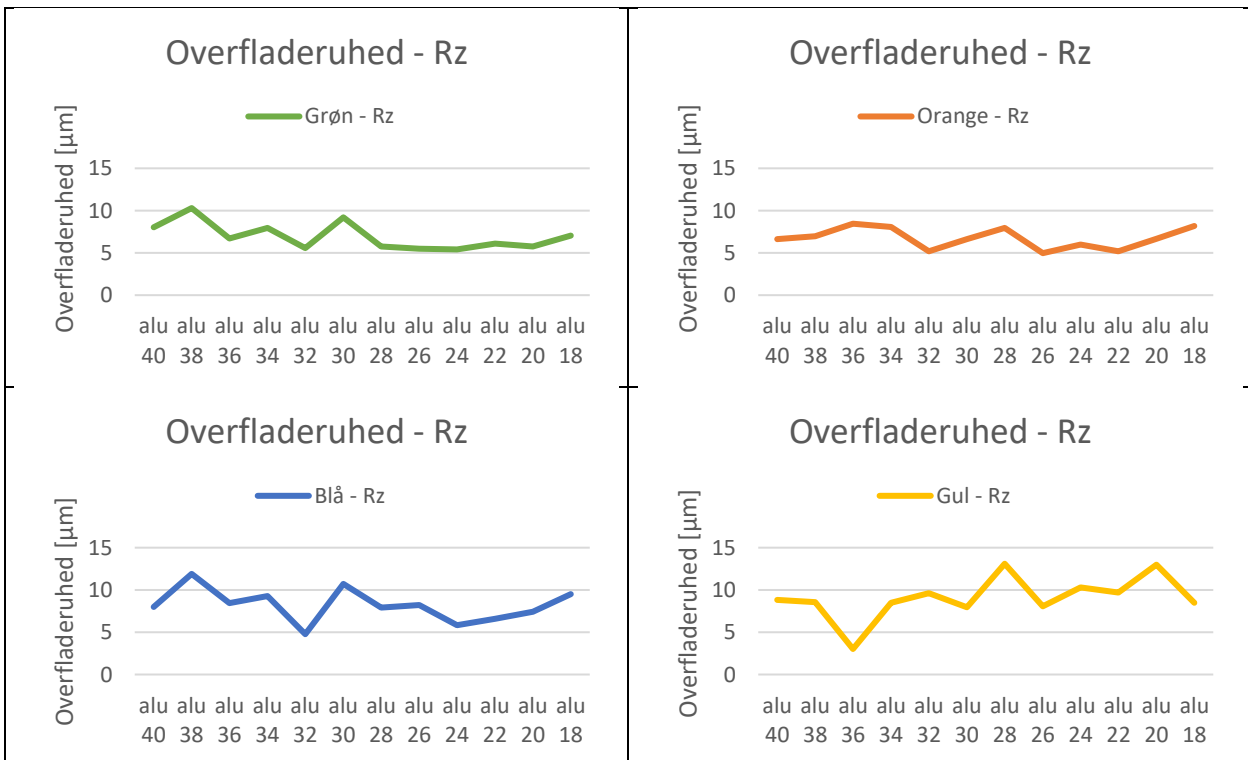
En væsentlig del af præmissen for at nedjusterer tryk og flow er at bearbejdningens kvalitet ikke ofres. Følgende præsenterer de målinger der er foretaget til at evaluere effekten på emne kvaliteten.

### 8.2.2.1 Overfladeruhed

Jf. forsøgsproceduren er der foretaget målinger af overfladeruheden (Ra og Rz) fire steder pr. test emne. Målingerne for aluminium fremgår af diagrammerne i Tabel 5 & Tabel 6. Målingerne for stål fremgår af diagrammerne i Tabel 7 & Tabel 8. Målingerne for rustfrit stål fremgår af diagrammerne i Tabel 9 & Tabel 10.

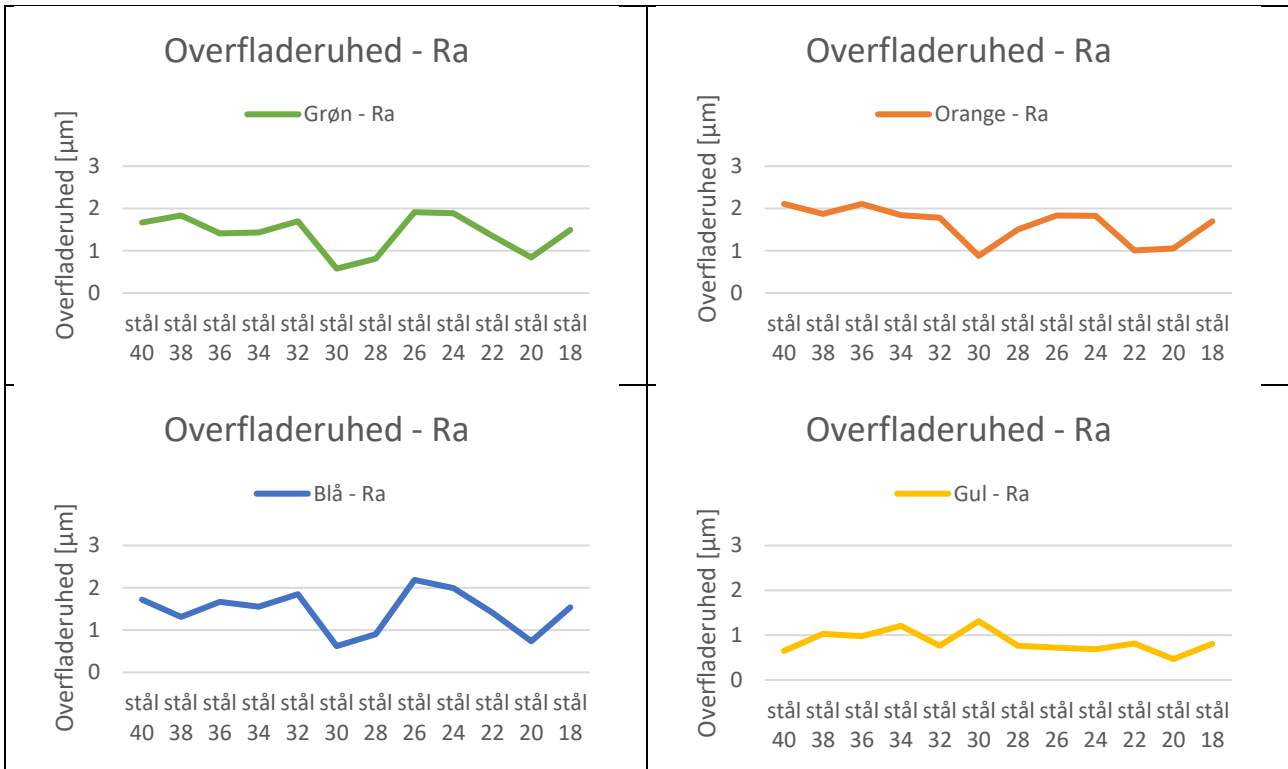
Studerer tendenserne som følge af ændring af kølesmøremiddeltrykket kan der ikke drages nogen entydig konklusion på hvorvidt overfladekvaliteten påvirkes, gældende for alle 3 materialer. Ved enkelte af målingerne er der en svag stigende eller faldende tendens – dog er der for ingen af materialerne en klar tendens for systematisk ændring i overfladekvaliteten. Den umiddelbare konklusion vedr. overfladekvaliteten er således **at måleusikkerheden og den generelle variation i overfladeruheden som følge af bearbejdningsprocessen overstiger den evt. systematiske effekt, ændringen i kølesmøremiddel tryk & flow har på overfladen.**



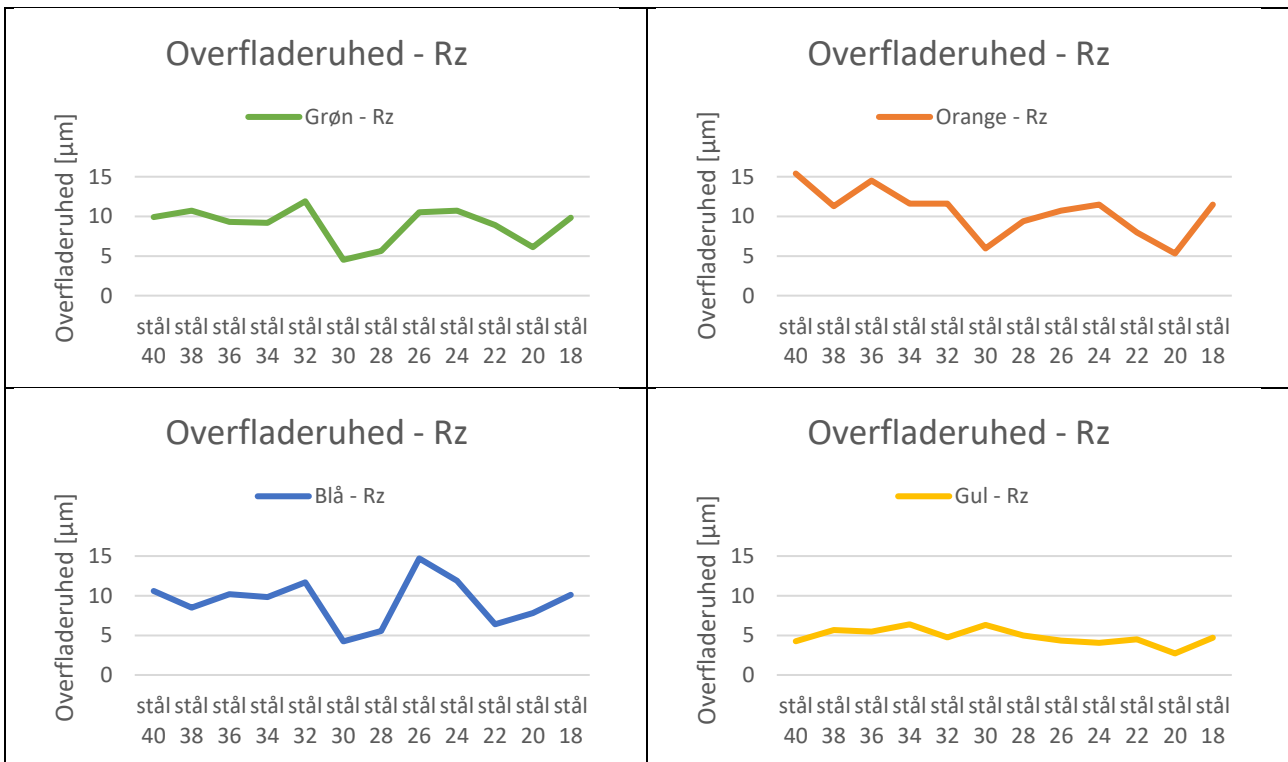
**ALUMINIUM AW6082**
*Tabel 5: Overfladeruhed - Ra-værdier - Aluminium (AW6082)*

*Tabel 6: Overfladeruhed - Rz-værdier - Aluminium 6082*


**STÅL S275**

Tabel 7: Overfladeruhed - Ra-værdier – Stål S275

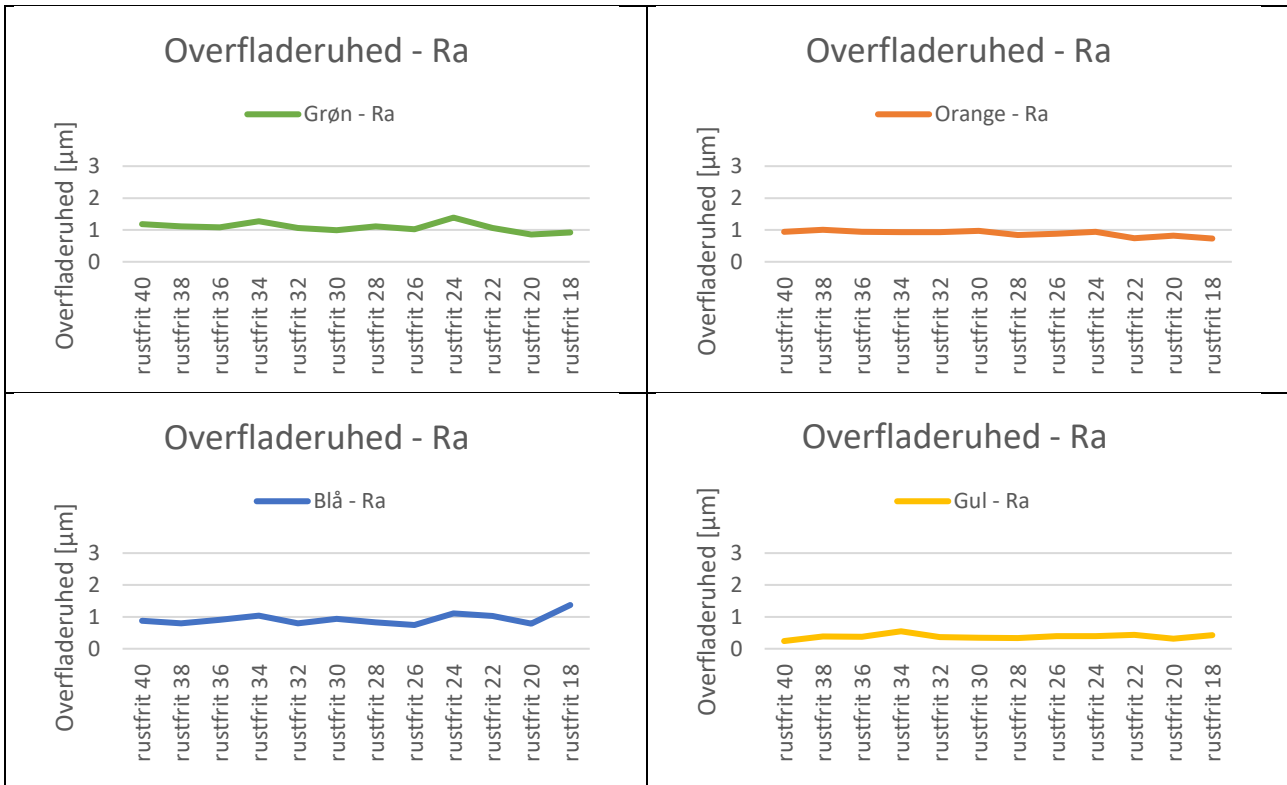


Tabel 8: Overfladeruhed - Rz-værdier - Stål S275

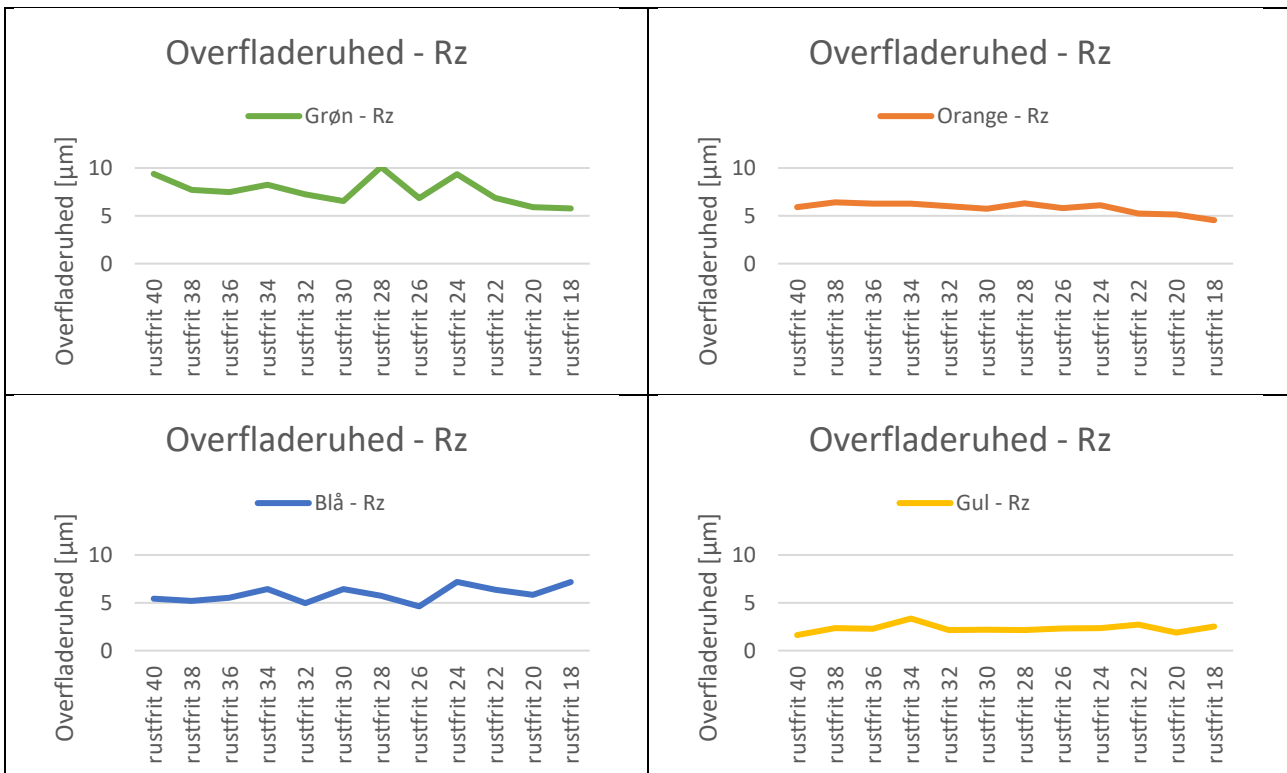


**RUSTFRIT STÅL AISI304**

Tabel 9: Overfladeruhed - Ra-værdier – Rustfrit stål 304



Tabel 10: Overfladeruhed - Rz-værdier - Rustfrit stål 304

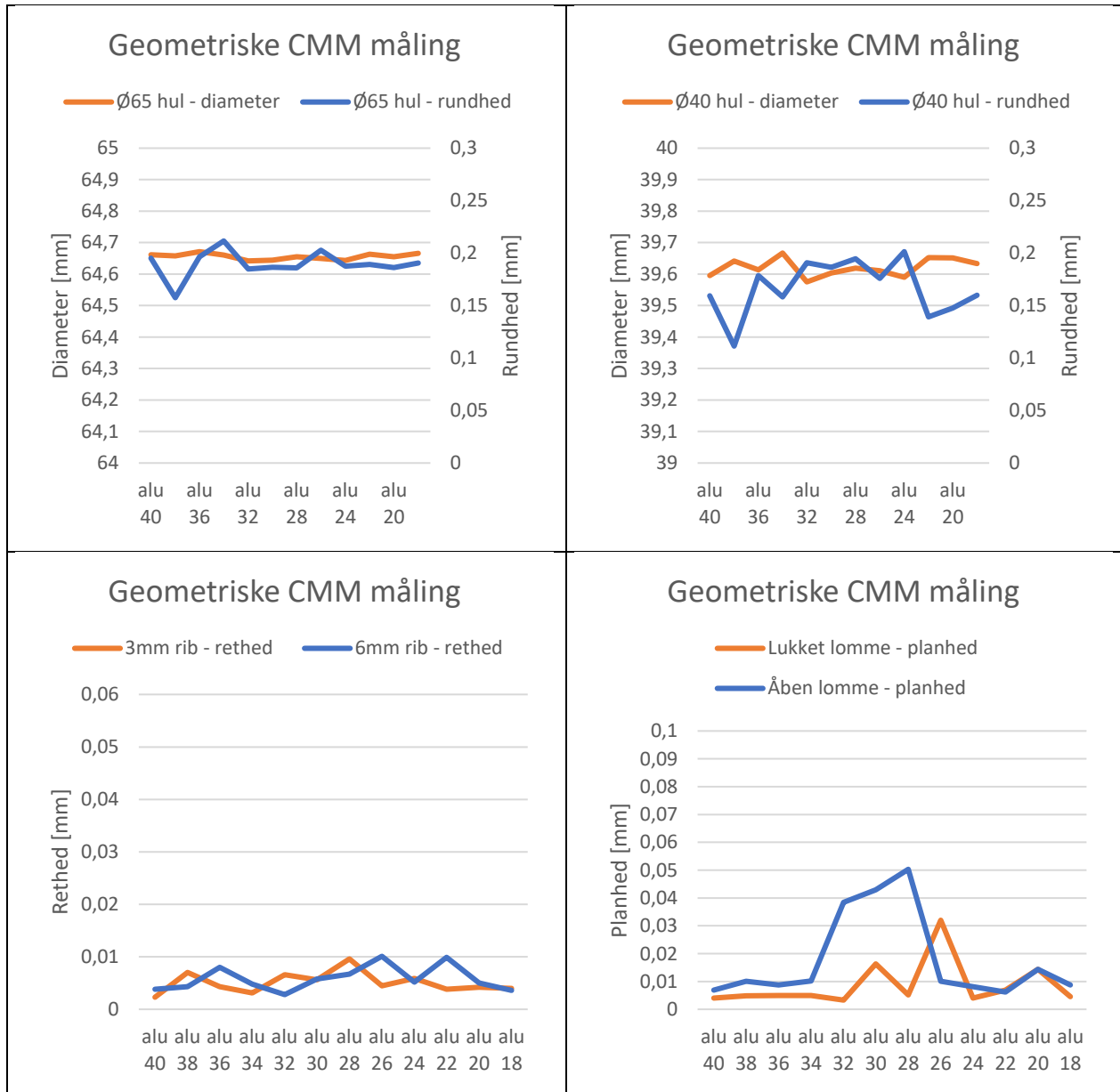


### 8.2.2.2 Geometriske målinger

Foruden at måle overfladeruheden, er der tillige foretaget forskellige CMM-målinger mhp. at afdække om der kan registreres systematisk påvirkning på de geometriske mål som følge af tryk/flow ændring.

#### Aluminium AW6082

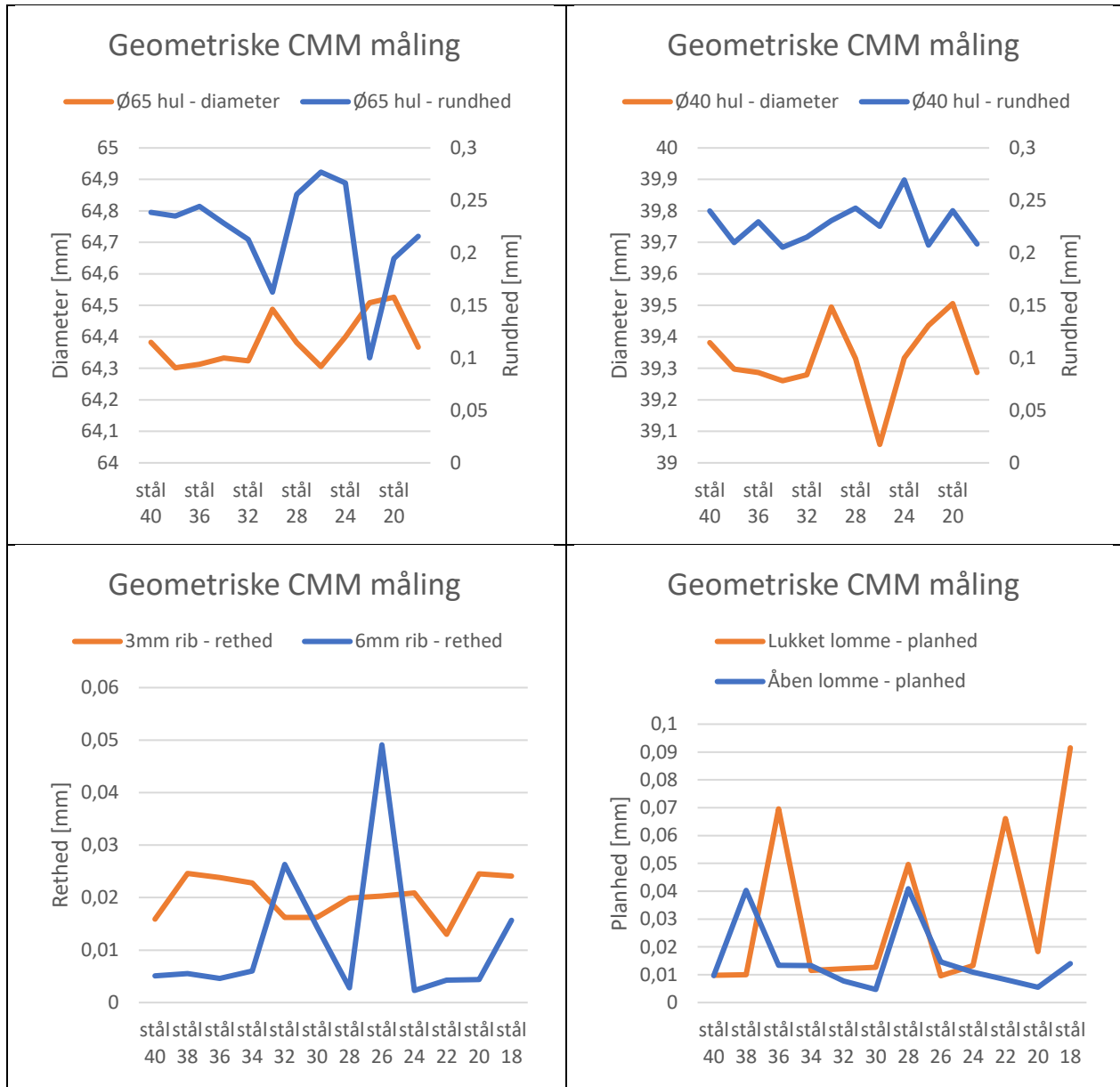
Tabel 11: CMM-måling for aluminium (AW6082)



Uagtet om det er diameter, rundhed, planhed eller rethed er der ikke nogen entydig systematisk tendens der kan drages ift. reduceret tryk & flow ved bearbejdning i *aluminium*. På samme måde som ved målingerne af overfladeruheden, indikerer dette, at tryk/flow justeringerne ikke har en tendentiell effekt på emnegeometri- og tolerancer.

**Stål S275**

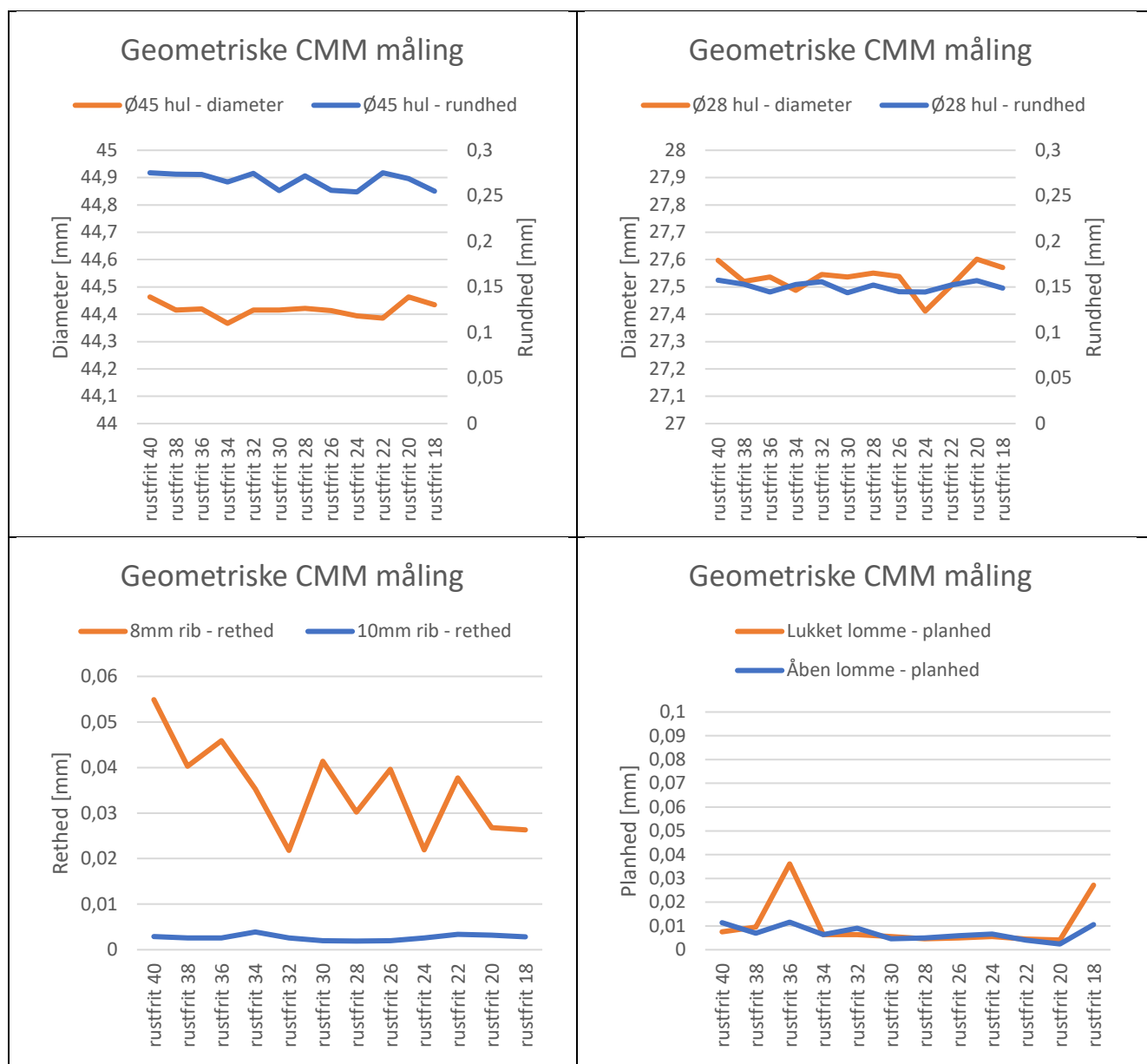
Tabel 12: CMM-måling for stål S275



Uagtet om det er diameter, rundhed, planhed eller rethed, kan der ikke drages en entydig tendens ift., at det reduceret tryk & flow ved bearbejdning i stål skulle have en påvirkning herpå. Det kan derfor ikke konkluderes at tryk/flow justeringerne har en tendentiell effekt på emnegeometri- og tolerancer.

**Rustfrit stål AISI304**

Tabel 13: CMM-måling for rustfrit stål 304



Med undtagelse af rethed ved "8mm rib", kan der ikke konstateres nogen entydig påvirkning fra kølesmøremiddel tryk/flowet på emnernes geometri og tolerancer for forsøgene i rustfrit stål. For retheden ved "8mm rib" er der en tendens til at retheden bliver bedre ved lavere tryk. Dog ses der ikke nogen logisk sammenhæng mellem dette, hvorfor tendensen mest sandsynligt er forårsaget af andre aspekter end kølesmøremiddel trykket og flowet.

Således kan det blot konstateres at kølesmøremiddel trykket og flowet ikke, tendentielt, har påvirket emnets geometri og tolerancer.

### 8.2.3 Værktøjsslid

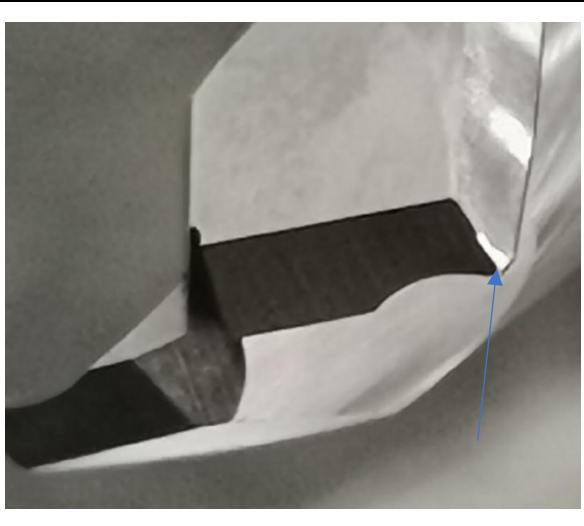
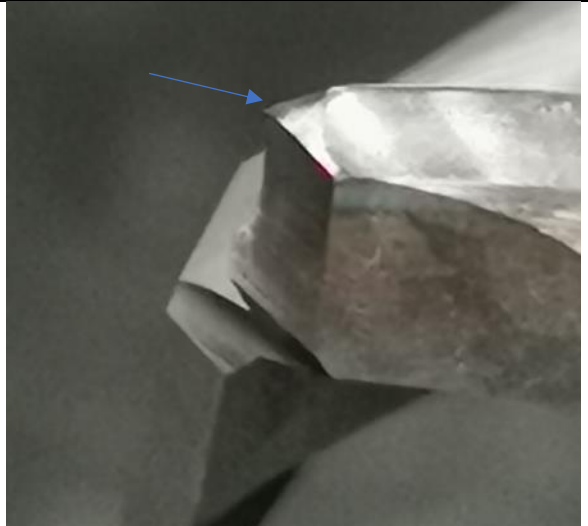

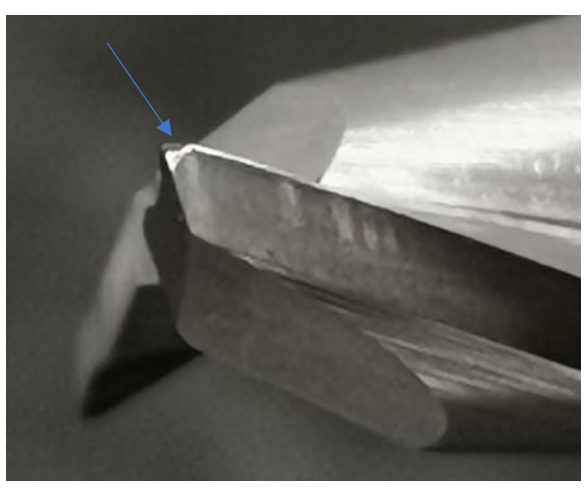
En anden ikke uvæsentlig parameter er påvirkningen på værktøjsslid. Denne vurdering er foretaget via en visuel inspektion af de skader og slidtype værktøjet må have fået under bearbejdningen. Vurderingen og klassificeringen er foretaget jf. artsbestemmelsen fra ISO 8688-2. Slidtyperne kan ses i afsnit 8.1.3

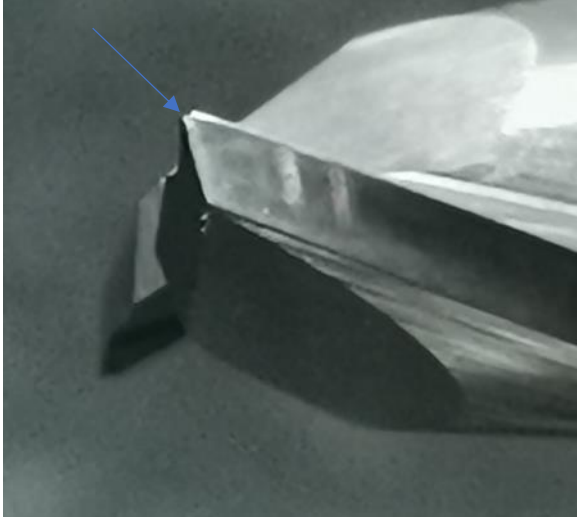


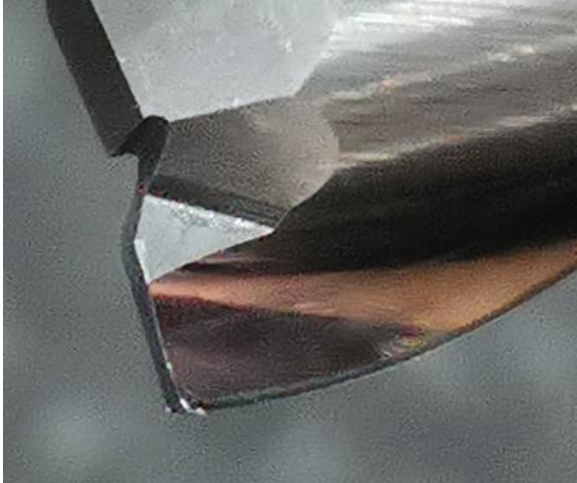
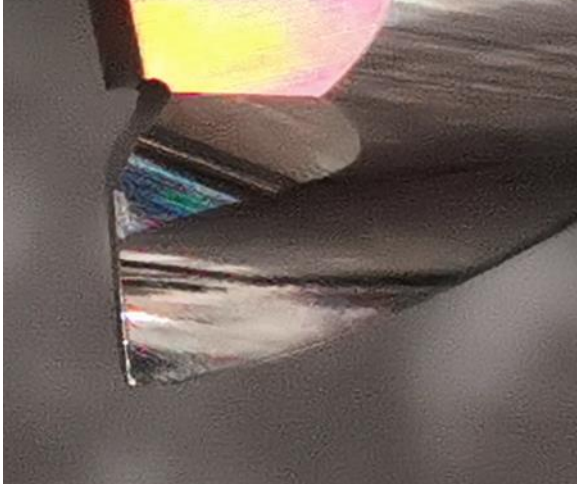
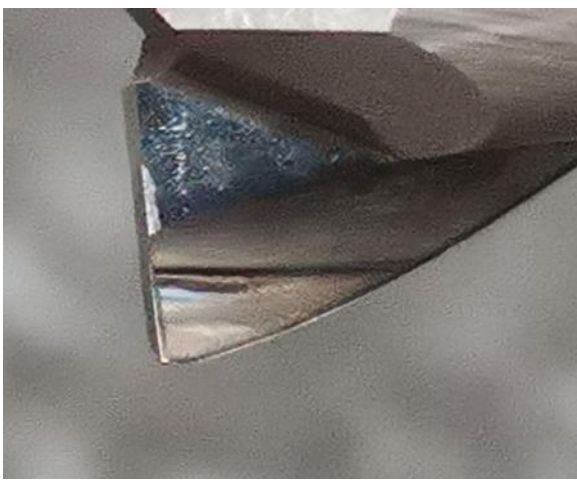
Bemærk: For hver kølesmøremiddel indstilling er der benyttet en ny fræser.

#### 8.2.3.1 Værktøjsslid analyse – Aluminium

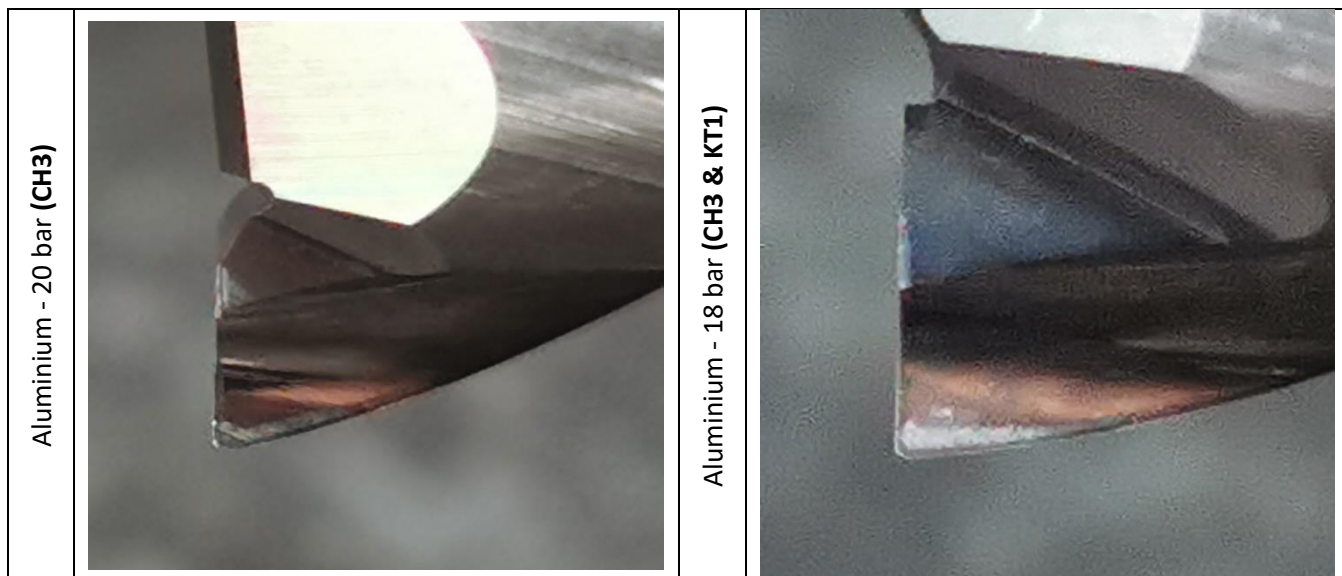
For forsøgene i aluminium er den generelle tendens for samtlige værktøjer et meget begrænset slid. For samtlige værktøjer kan der observeres små frakturer (tendens til minimal "localized chipping", CH3) på det yderste af skærespidsen (se eksempler Tabel 14, indikeret af pile). Dog er der ikke nogen væsentlig tendentiell forskel at observere som følge af reducerede tryk og flow.

Tabel 14: Oversigt værktøjsslid – visuel inspektion af skærespids for forsøgene i aluminium (AW6082)

Aluminium – 40 bar (CH3)		Aluminium - 38 bar (CH3)	
Aluminium - 36 bar (CH3)		Aluminium - 34 bar (CH3)	

<p>Aluminium - 32 bar (CH3)</p>		
<p>Aluminium - 28 bar (CH3)</p>		
<p>Aluminium - 24 bar (CH3)</p>		



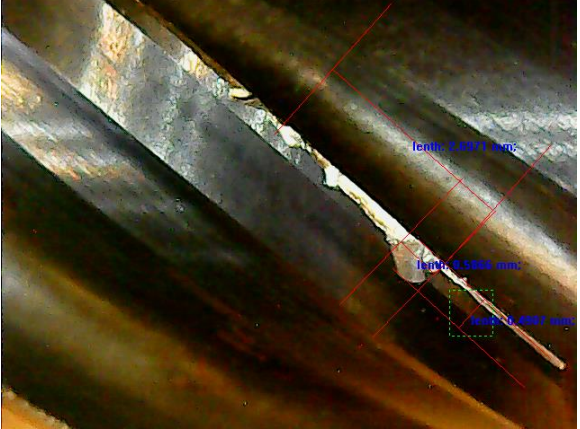


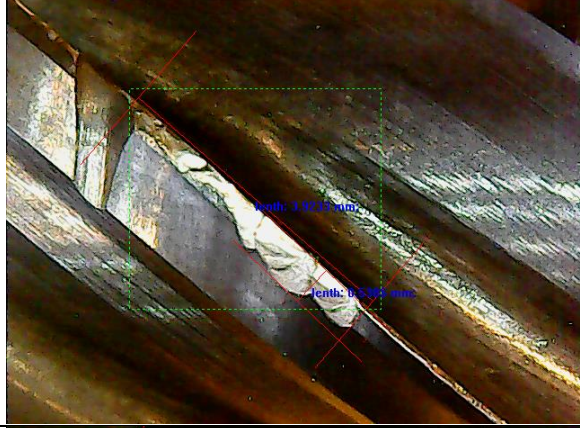

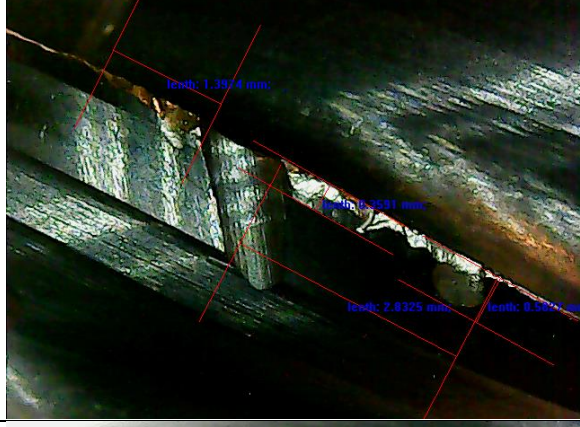
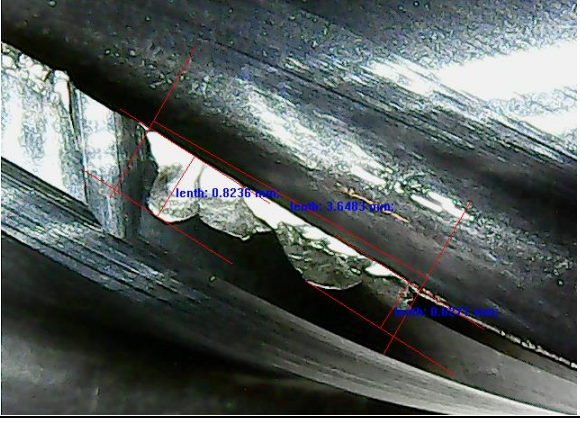
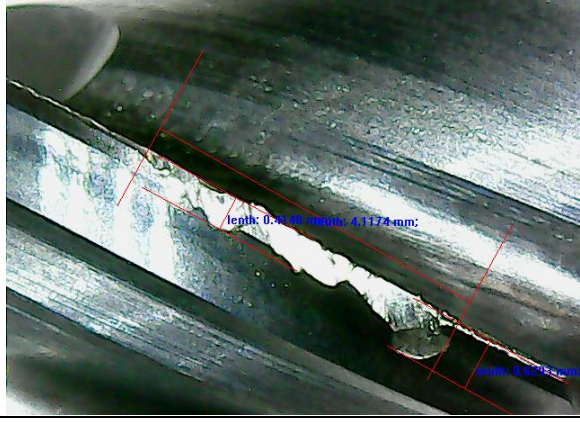


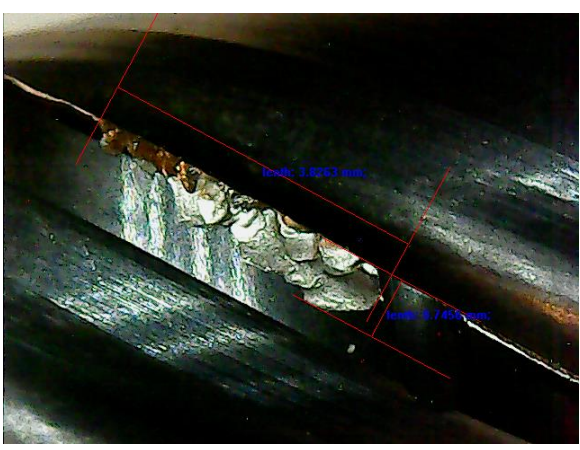
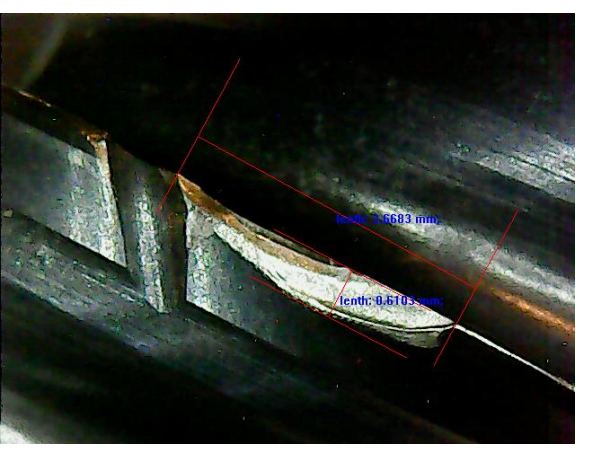
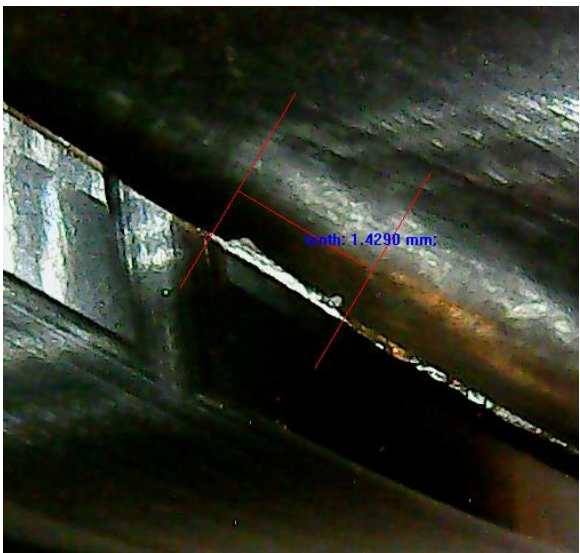

### 8.2.3.2 Værktøjsslid analyse – Stål

For forsøgene i stål er det tydeligt at værktøjet har været hårdt belastet med flere store og tæt på fatale brud på ét eller flere af skærene. På billederne i Tabel 15 kan de værste skader på hvert enkelt værktøj ses, sammen med de forskellige slidtyper der er identificeret. Her kan det ses at der ved 40bars tryk kan observeres forholdsvis store skader på fræserens skær, med decideret frakturer og brud på skæret. Grundet frakturerne er det umuligt at fastslå 100% hvilken slidtype har forårsaget frakturerne. Via klassificeringsskemaet kan der dog udledes at det primære slid som forventeligt har forårsaget disse frakturer er "localized flank wear" (VB3), mens der generelt ses flank wear på alle skærene (VB). Dog kan der også for nogle værktøjer (tryk 34, 30, 26, 24 og 22) også registreres slidtyper som minder om hhv. "non-uniform chipping" og "localized chipping" (CH2 & CH3). Det er svært at udlede om "chipping" sliddet stammer fra utilstrækkelig køling grundet det lavere tryk og flow, eller om det blot skyldes høj mekanisk belastning over lang tid. Imidlertid synes der at kunne observeres en tendens til at "flank wear frakturerne" (VB) bliver større og mere "catastrophic" (CF) ved lavere tryk – med undtagelse for forsøget med 20 bars tryk. Der kan ikke defineres nogen tydelig grænse – dog kan der allerede ved tryk 36 bar observeres frakturer op til 4mm i længde, mod maks. 2mm ved 40 bar. Dette ene resultat indikerer at der allerede ved marginalt lavere tryk må forventes kortere levetid – dog er der en stor usikkerhed ved denne udledning, idet mange ukontrollerbare faktorer påvirker hvordan slid udvikler sig til reelle frakturer.

Foruden frakturerne på selve skæret (Tabel 15), er der gennem forsøgsrækken med stål også registreret flank wear (VB) frakturer og slid på skærespidsen. Her er der registreret frakturer på ca. 2 x 0,6 og 0,9 x 0,7 mm ved hhv. 38- og 20 bars tryk, mens der fx for værktøjet med 22 bars tryk ikke kan registreres noget nævneværdigt slid på spidsen. Således kan der IKKE udledes nogen entydig konklusion om påvirkningen af trykket og flowet ift., sliddet på skærespidsen.

Tabel 15: Oversigt værktøjsslid – visuel inspektion af skæret for forsøgene i stål (S275)

Stål - 40 bar (VB1/VB3)		Stål - 38 bar (VB1/VB3)	
Stål - 36 bar (VB1/VB3)		Stål - 34 bar (VB1/VB3 & CH2)	
Stål - 32 bar (VB1/VB3)		Stål - 30 bar (VB1/VB3 & CH2)	
Stål - 28 bar (VB1/VB3)		Stål - 26 bar (VB1/VB3 & CH3)	




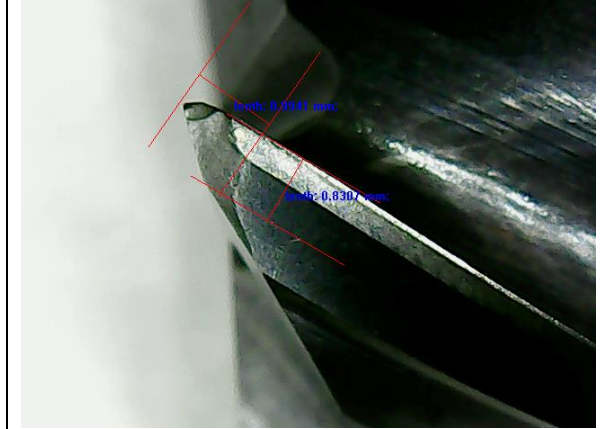
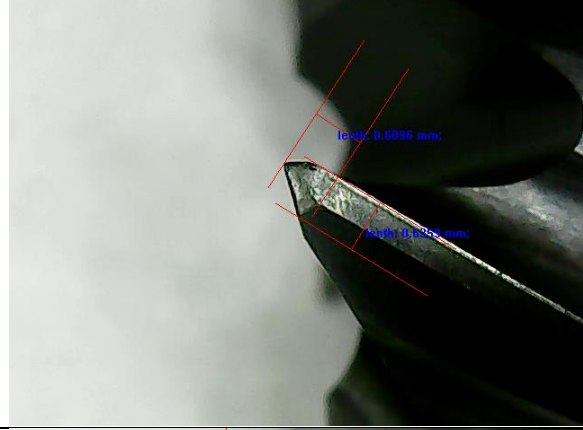
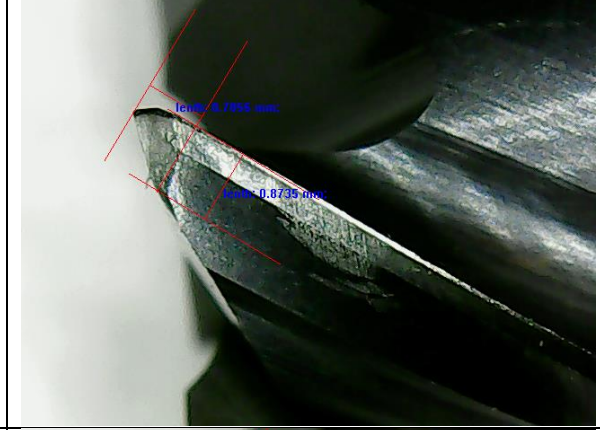
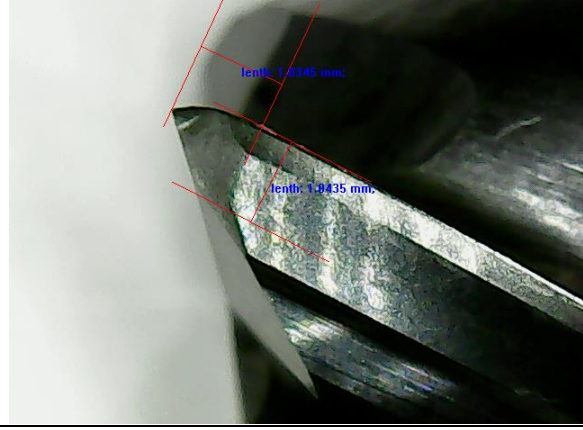
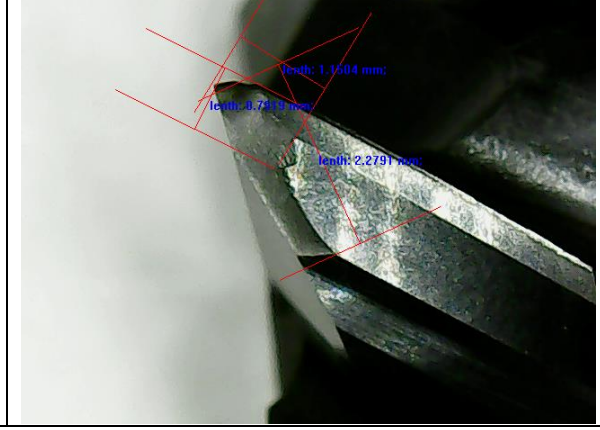
Stål - 24 bar (VB1/VB3 & CH3)		Stål - 22 bar (VB1/VB3, CH3, FL &	
Stål - 20 bar (VB1/VB3 & KT2)		Stål - 18 bar (VB1/VB3 & CF)	

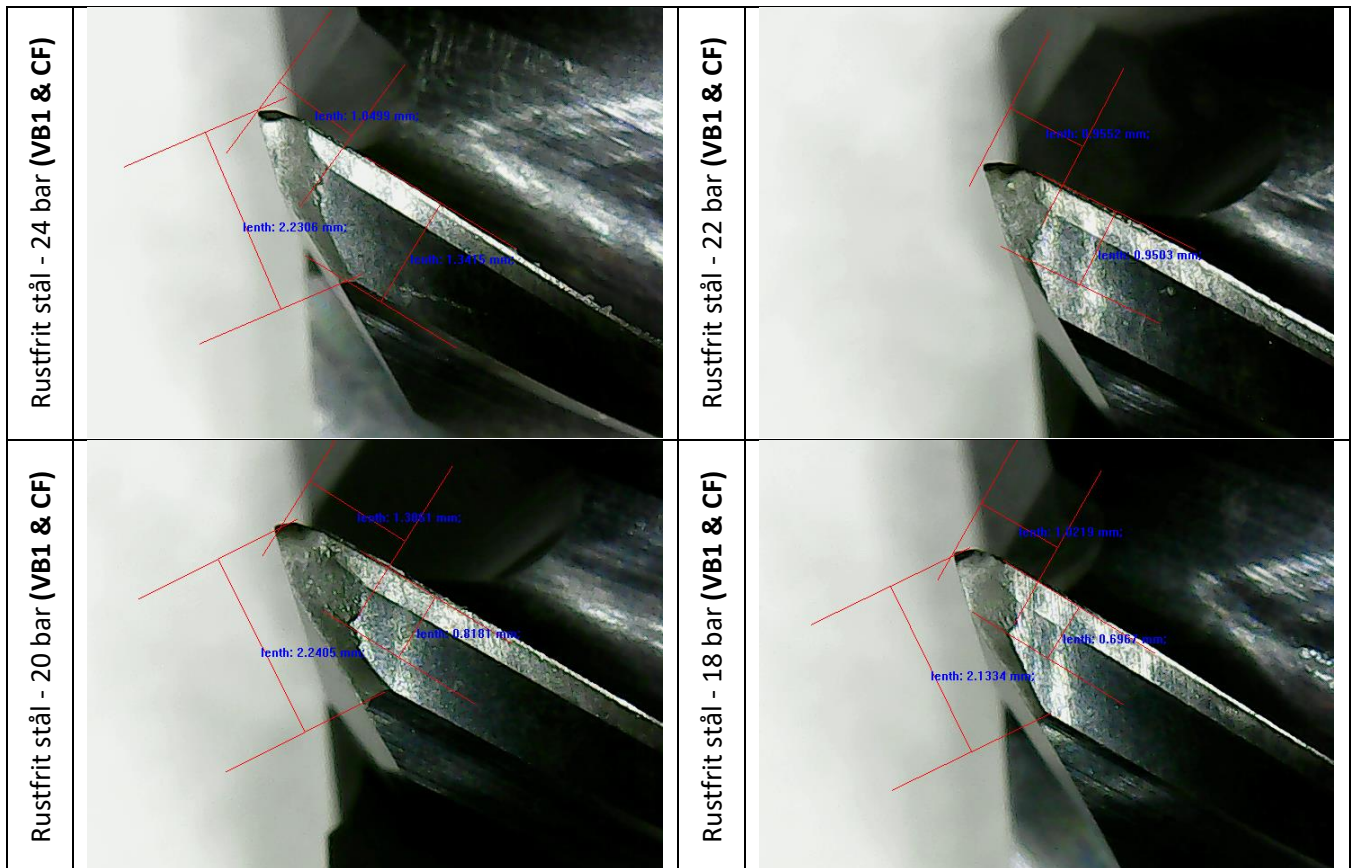
### 8.2.3.3 Værktøjsslid analyse – Rustfrit stål

Hvor der ved forsøgene i stål var tydeligt slid og frakturer på selve skæret, er der for samtlige værktøjer fra forsøgene med rustfrit stål kun meget begrænset uniform flank wear (VB1) på selve skærene. Imidlertid har samtlige værktøjer, foruden værktøjet ved 40 bars tryk, frakturer (mindre grad af CF) på én eller flere af skærespidserne.

Der kan ikke drages en entydig konklusion ift., hvorfor værktøjet fra forsøget med 40 bars tryk er intakt – mest sandsynligt skyldes tilfældigheder, om end det principielt kan relateres trykket. Dog kan der IKKE udledes nogen tendens for at størrelsen på eller antallet af frakturerne stiger som følge af lavere tryk og flow.

Tabel 16: Oversigt værktøjsslid – visuel inspektion af skærespids for forsøgene i rustfrit stål (AISI304)

Rustfrit stål - 40 bar (VB1)		Rustfrit stål - 38 bar (VB1 & CF)	
Rustfrit stål - 36 bar (VB1 & CF)		Rustfrit stål - 34 bar (VB1 & CF)	
Rustfrit stål - 32 bar (VB1 & CF)		Rustfrit stål - 30 bar (VB1 & CF)	
Rustfrit stål - 28 bar (VB1 & CF)		Rustfrit stål - 26 bar (VB1 & CF)	



#### 8.2.3.4 Værktøjsslid analyse – Opsamling

Følgende kan opsummeres for værktøjsslidet for de tre testede materialer:

- For aluminium og rustfrit stål - **kan der ikke udledes nogen entydig sammenhæng mellem værktøjsslid og kølesmøremiddel tryk og flow**. Dog gælder der for begge tilfælde at værktøjet fra forsøget med 40bars tryk var mindst slid / med minimale frakturer ift., alle øvrige tryk og flow indstillinger.
- For stål - kan der **ses en svag tendens til større og mere katastrofale frakturer på selve skæret** – grundlaget for det øgede slid kan evt. skyldes glødeskal fra materialefremstillingsprocessen. Dog ses også en tendens til højere grad af katastrofalt slid som følge af lavere tryk og flow. Dette indikerer at der i tilfælde med fx glødeskaller kan være øget behov for optimal køling, hvorved reduceret kølesmøremiddel tryk/flow medfører negative konsekvenser for værktøjsstandtid – og processikkerhed.

*”Dette indikerer at der i tilfælde med fx glødeskaller kan være øget behov for optimal køling, hvorved reduceret kølesmøremiddel tryk/flow medfører negative konsekvenser for værktøjsstandtid – og processikkerhed”*





Til alle analyserne bør dog tilføjes den bemærkning at mange af de slidtendenser og frakturer der observeres, kan være forårsaget af andre ukontrollerbare faktorer – særligt for forsøgene i stål - og rustfrit stål - forventes materiale variation at have en stor indflydelse på sliddet – en faktor som ikke kan kontrolleres.





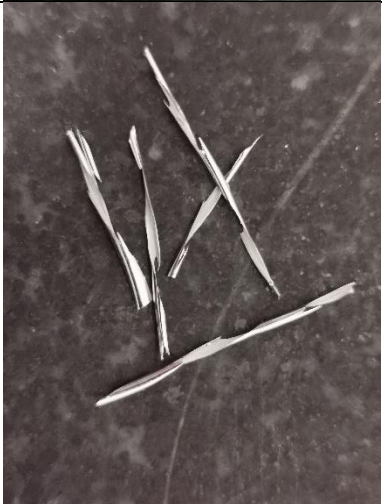
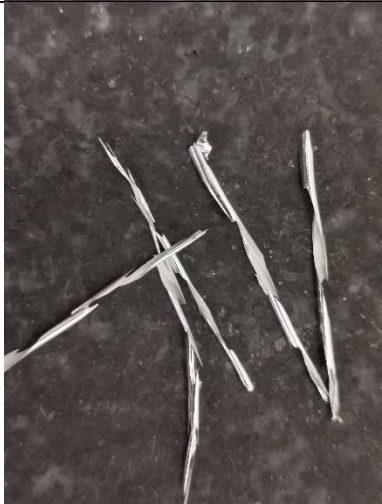
## 8.2.4 Spånproduktion og spånformation

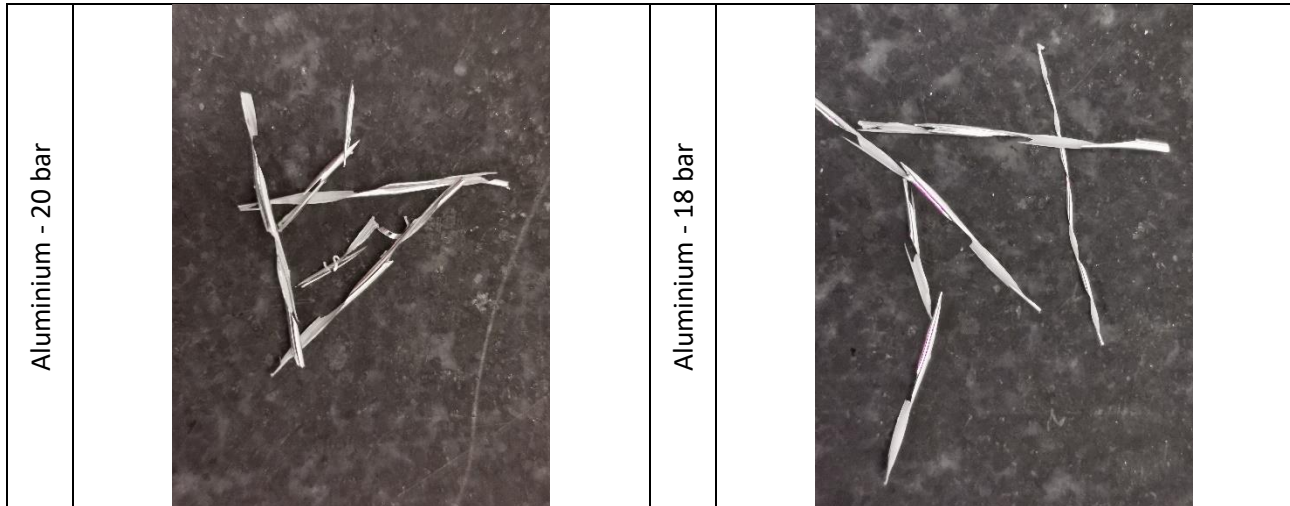
### 8.2.4.1 Spånproduktion & spånformation – Aluminium

Tabel 17 viser spånerne for de forskellige tryk/flow indstillinger for forsøgsrækken med *aluminium*. Studeres spånerne jf. de opsatte kriterier er der, som forventet, ikke nogen synlig farve forskel på aluminiumsspånerne, grundet begrænset varmeudvikling. Kigges der på spånerne ift. bukkemærker, afkortede spåner, samt generelt ift., hvor ”rene” de er skåret, ses der umiddelbart en gradvis ændring fra 30bars tryk og ned, hvor der er en tendens til at spånerne er kortere, og knap så regelmæssige som ved kølesmøremiddel tryk over 30 bar. Dette indikerer at spånerne i større grad IKKE spules væk fra bearbejdningsområdet, og derved udsættes for ”re-cutting” – altså at blive skåret over efter at være blevet til ”spån”. Dog er det også muligt at det reducerede tryk medfører at skærekanten hurtigere bliver ”døv”, hvilket medfører reducerede skæreevne.

Tabel 17: Spåner fra bearbejdningsforsøg i aluminium (AW6082)

Aluminium – 40 bar				Aluminium - 38 bar			
Aluminium - 36 bar				Aluminium - 34 bar			

Aluminium - 32 bar				Aluminium - 30 bar			
Aluminium - 28 bar				Aluminium - 26 bar			
Aluminium - 24 bar				Aluminium - 22 bar			



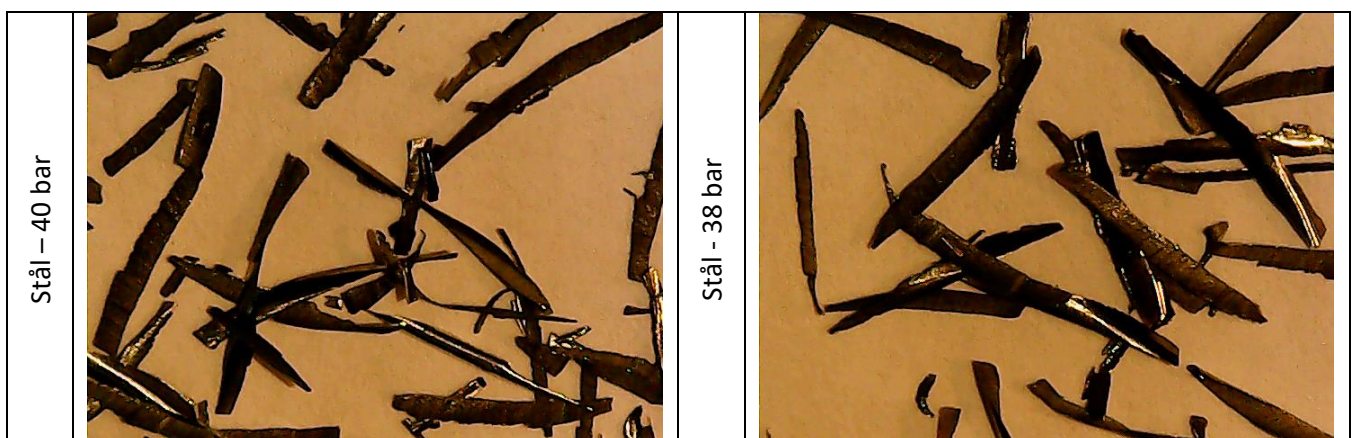
#### 8.2.4.2 Spånbrudning & spånformation – Stål S275

Tabel 18 viser spånerne for de forskellige tryk/flow indstillinger for forsøgsrækken med *stål* -. Studeres spånerne jf. de opsatte kriterier er der ikke nogen synlig farve forskel på spånerne. Grundet værktøjets udformning med spånbruder er det sværere af vurderer om spånerne er blevet "re-cuttet", idet brydningen er anderledes end ved bearbejdningen af aluminium.

I forbindelse med forsøgene er det registreret at spånerne ikke er spulet væk fra lommerne på emne ved de lavere tryk – sammenholdes denne information med spånernes størrelse ses det at ved ca. 24 bar og lavere forekommer en større mængde små spåner og "spånfrakturer". Det indikerer at disse spåner er blevet "re-cuttet" – formentlig grundet at de ikke straks er blevet spulet væk fra lommer og huller, foranlediget af spånernes højere densitet.

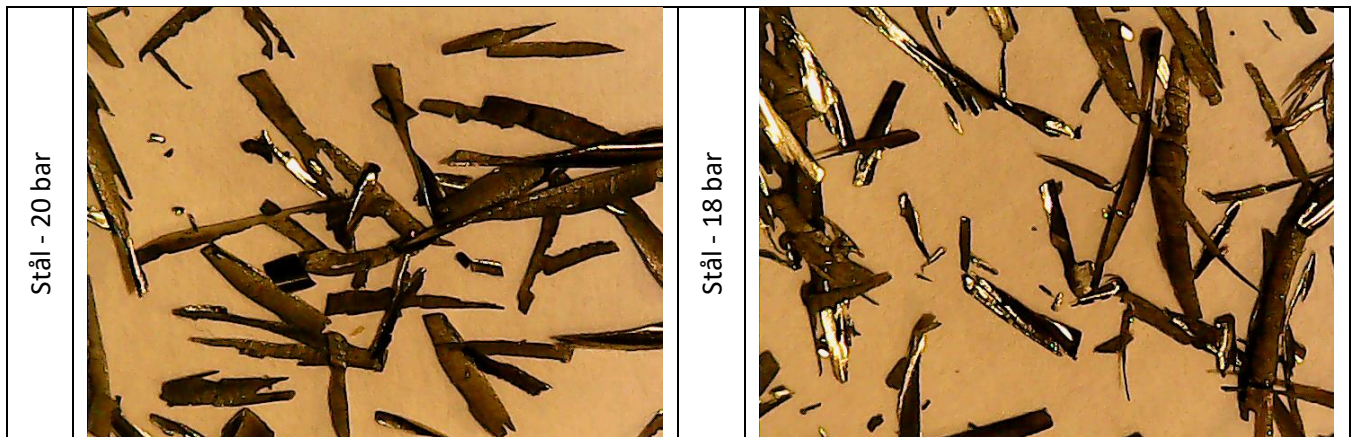
Således indikerer dette at der kan forekomme udfordringer med at lede spånerne effektivt væk fra skærezonen ved tryk under ca. 25 bar.

Tabel 18: Spåner fra bearbejdningsforsøg i stål (S275)





Stål - 36 bar		Stål - 34 bar	
Stål - 32 bar		Stål - 30 bar	
Stål - 28 bar		Stål - 26 bar	
Stål - 24 bar		Stål - 22 bar	

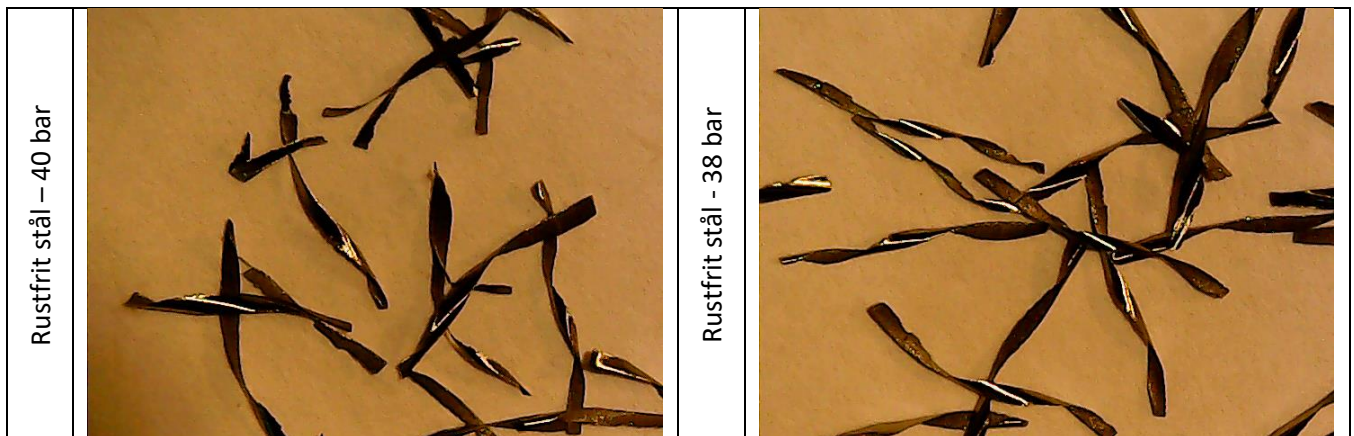










#### 8.2.4.3 Spånbrudning & spånformation – Rustfrit stål AISI304

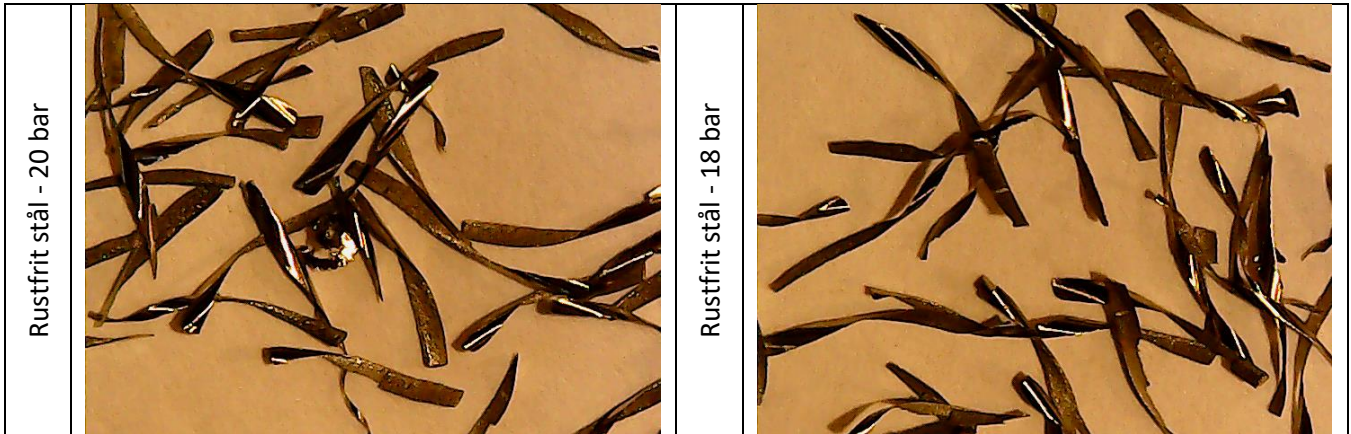
Tabel 19 viser spånerne for de forskellige tryk/flow indstillinger for forsøgsrækken med *rustfrit stål* -. Studeres spånerne jf. de opsatte kriterier er der ikke nogen synlig farve forskel på spånerne. Som ved forsøgene i stål - er det sværere af vurderer om spånerne er blevet "re-cuttet" grundet værktøjets udformning med spånbruder.

Som ved forsøgene i stål - er der ved lavere tryk (<25bar) en tendens til at spånerne ikke spules væk fra emnets lommer. Som ved stål - indikerer dette at der kan forekomme udfordringer med at lede spånerne effektivt væk fra skærezonen ved tryk under ca. 25 bar, som også her medfører at operatører bør overveje hvilken effekt det har ift. effektiv spånafledning.

Tabel 19: Spåner fra bearbejdningsforsøg i rustfrit stål (AISI304)



Rustfrit stål - 36 bar		Rustfrit stål - 34 bar	
Rustfrit stål - 32 bar		Rustfrit stål - 30 bar	
Rustfrit stål - 28 bar		Rustfrit stål - 26 bar	
Rustfrit stål - 24 bar		Rustfrit stål - 22 bar	



#### 8.2.4.4

##### Spån brydning & spånformation – Opsamling

Ved analyse af spånerne fra de tre testede materialer har det været tydeligt at den primære effekt af reducerede tryk og flow har været evnen til effektiv spånafledning fra lukkede lommer og huller. **Her kunne det observeres, at der ved tryk under ca. 25 bar, var større udfordringer med at spule spånerne væk fra skærezonen ved både stål og rustfrit stål.** Det henleder til, at operatører som ser værdi i at gøre brug af indsigt fra dette studie, skal være opmærksom på, hvorvidt en specifik emne-geometri, samt materialet, kan medføre udfordringer ift. spånafledning, særligt ved lave trykindstillinger.

**Det kan observeres, at der ved tryk under ca. 25 bar, er større udfordringer med at spule spånerne væk fra skærezonen ved både stål og rustfrit stål.**

*Tabel 20: Acceptabel spånafvikling ved dynamisk fræsning*

	Aluminium AW6082	Stål S275	Rustfri – AISI304
<b>Plan, side og sporfræsning</b>	≥ 18 bar	≥ 18 bar	≥ 18 bar
<b>Lomme-fræsning</b>	> 18 bar	> 25 bar	> 25 bar

Der skal henledes opmærksomhed på at ovennævnte observationer vedr. spåner, spånformation og spånafvikling er gældende for dynamisk bearbejdning med endefræsere. Ved væsentlig ændrede strategi, værktøjstype og materiale er det sandsynligt at andre effekter vil opleves.

## 8.2.5 Sundhedsdata

Som beskrevet er der opsamlet luftfugtighedsdata hhv. før og efter bearbejdningerne som indikator for de sundhedsmæssige vilkår operatøren udsættes for ved ændring af tryk/flow indstillingen. Som support til disse målinger, er partikkelkoncentrationen (ppm) målt på forsøgene i rustfrit stål. Disse målinger vil afsløre eventuelle ændringer i mængden af hhv. kølesmøremiddeltåger- og røg.

### 8.2.5.1 Luftfugtighedsmålinger

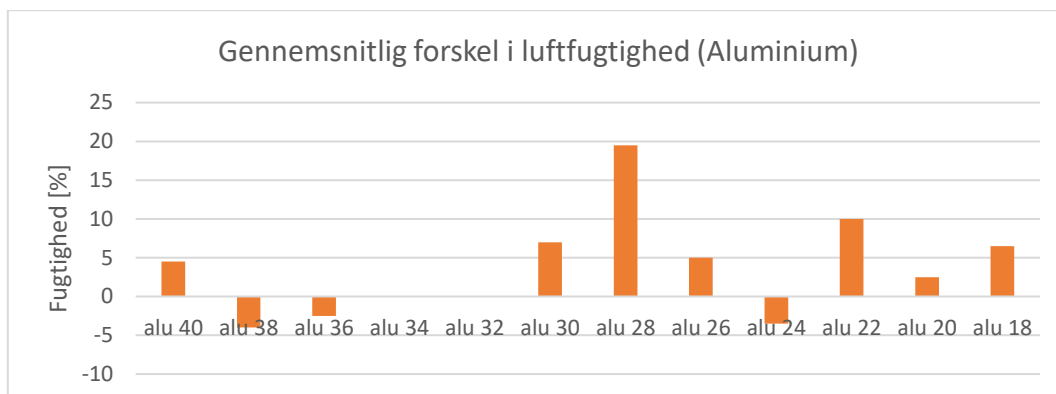
Figur 21 præsenterer de gennemsnitlige målinger for forskel i luftfugtighed for forsøgene i aluminium, Figur 22, målingerne for forsøgene i stål, og Figur 23, målingerne for forsøgene i rustfrit stål.

Fælles for samtlige materialer for samtlige målinger var stor variation i den absolutte luftfugtighed. Således var intervallet for luftfugtighedsmålingerne før bearbejdning mellem 44-79%, mens dette interval efter bearbejdning (med kølesmøremiddel tåger/røg i luften) var mellem 44-94%. Grundet denne store variation

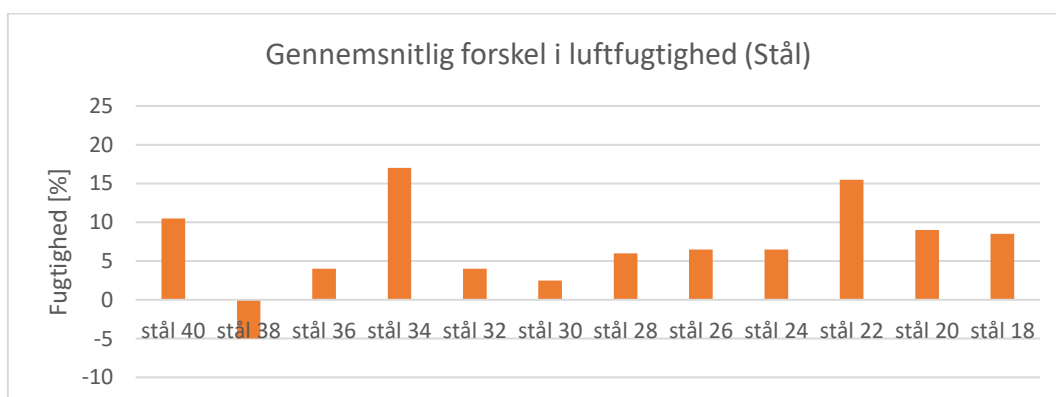
i målingerne – som i høj grad hænger sammen med den generelle luftfugtighed den givne dag, kan der ikke heraf udledes nogen tendenser.

Studerer den relative ændring i luftfugtigheden for de tre materialer, ses der heller ikke her en tydelig tendens i luftfugtigheden som følge af tryk/flow ændringerne. Det er særlig tydelige flere steder hvor der ved blot 2 bars justering af trykket observeres +15% forskel i den relative luftfugtighed, fx ved alu30-26 og stål36-32.

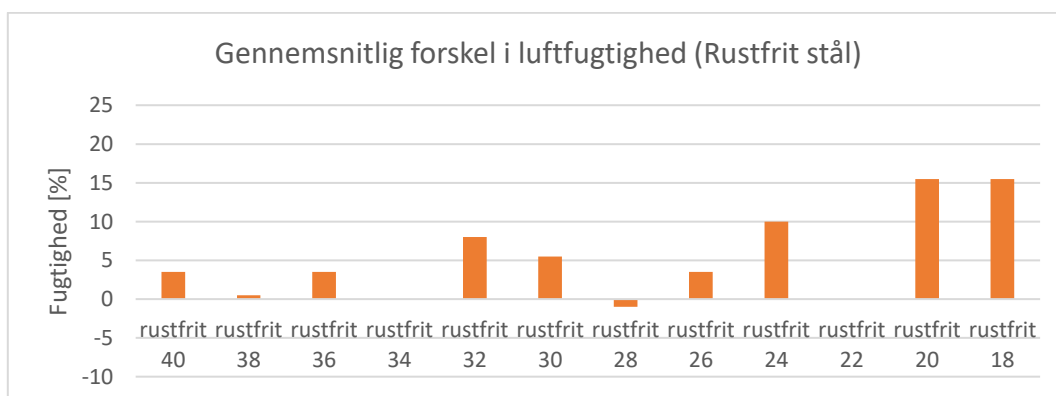
På baggrund af den store variation i målingerne og ingen tydelig tendens, kan der ikke drages nogen sammenhæng mellem luftfugtigheden og tryk/flow ændringerne.



Figur 21: Gennemsnitlige luftfugtighedsmålinger for Aluminium 6082



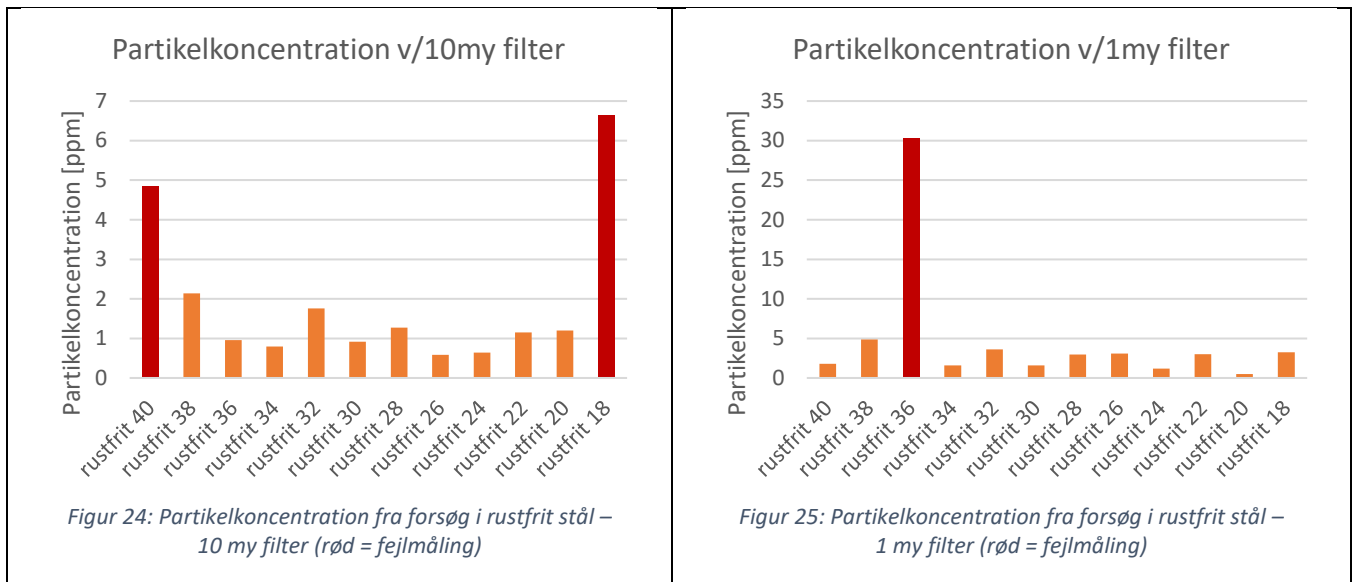
Figur 22: Gennemsnitlige luftfugtighedsmålinger for Stål S275



Figur 23: Gennemsnitlige luftfugtighedsmålinger for Rustfrit stål AISI304

### 8.2.5.2 Partikelkoncentrations målinger

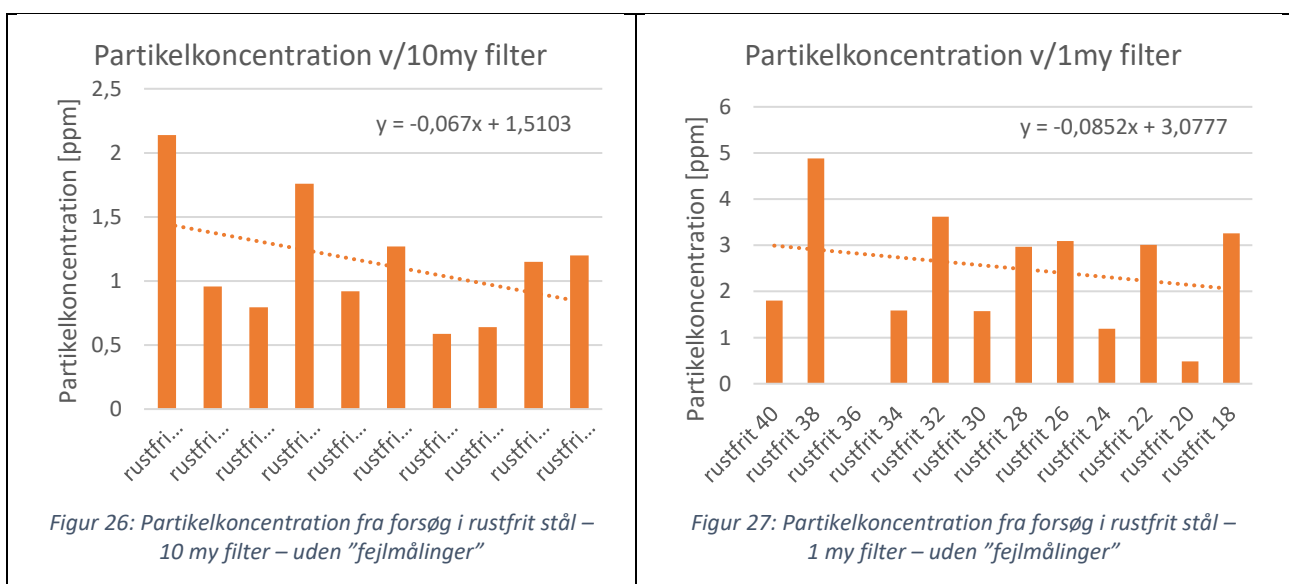
Grundet begrænsede indsigter via luftfugtighedsmålinger er sundhedsdataene supporteret og tilført værdi via partikelkoncentrationsmålinger for hele testserien af rustfrit. Disse målinger er gennemført i samarbejde med AVS Danmark, som har stillet måleudstyr til rådighed. Til disse målinger er der benyttet en "Dusttrack Aerosol Monitor" fra TSI, som måler koncentrationen af våde partikler – i dette tilfælde partikler under hhv. 10 my og 1 my. Målingerne herfra er præsenteret i hhv. Figur 24 og Figur 25.



Studeres målingerne fra partikelkoncentrationen er det tydeligt at se afvigelser på målingerne ved hhv. 40bar, 36bar og 18bar tryk (røde datapunkter i Figur 24 og Figur 25), hvilket AVS tilskriver at være fejlmålinger.

Ekskluderes disse afvigelser, kan det ses af Figur 26 og Figur 27 at der er en tendens til faldende partikelkoncentration ved lavere tryk indstilling, gældende for begge målinger.

Målingerne indikerer således at der kan forventes lavere koncentration af sundhedsskadelige stoffer ved lavere tryk – dog med en vis variation.



## 9 Konklusion (WP5)

Gennem projektet er det undersøgt hvilken effekt kølesmøremiddel tryk- og flowet har på bearbejdningscentres samlede energiforbrug ifm. fræsning. Potentialet er først afdækket ift., den potentielle energigevinst, der kan opnås ved reduktion af tryk og flowet, hvorefter praktiske bearbejdningsforsøg er gennemført for, eksperimentelt, at kortlægge den faktiske gevinst. Desuden er det undersøgt hvilken konsekvens det har at justere tryk og flowet, ift. emne kvalitet, værktøjsslid, spånformering og sundhed.

Potentialeafdækningen har kortlagt, at det er et begrænset udsnit af den eksisterende maskinpark i Danmark, som pt. kan justere kølesmøremiddel tryk og flowet – estimeret til at være ca. 5% af den samlede danske maskinpark, svarende til ca. 750 bearbejdningscentre. Desuden har afdækningen vist, at det er tryk, som kan justeres på maskiner i dag, mens flowet er en afledt effekt.

Afdækningen har vist, at såfremt de 5% af den danske maskinpark, som kan trykjusteres, kan reducere energiforbruget med 25%, vil det beløbe sig i en årlig energibesparelse på ca. 1,67 GWh (1,67 mio. kWh) og en reduktion på 485,2 ton CO<sub>2</sub>. Ved en fuld udrulning (svarende til 100% af den danske maskinpark) svarer dette til en besparelse på 33,4 GWh. Dog vil dette kræve efterinstallation af kølesmøremiddelanlæg, der kan justere tryk – en investering i størrelsen 75.000 - 250.000 kr., afhængig af kapacitet, leverandør, mv.

Gennem de praktiske bearbejdningsforsøg har projektet vist at der er en stor energibesparelse at hente ved nedjustering af kølesmøremiddel tryk – forsøgene har vist, at ved en trykreduktion fra 40bar til 18bar ved indvendig køling kan reducere det samlede energiniveau for bearbejdningscentret med mellem 15-25%.

Sammenholdes resultaterne fra bearbejdningsforsøgene og potentialeafdækningen, med den i ansøgningen estimeret årlige energibesparelse på 16-27 GWh (mio. kWh), har projektet synliggjort at besparelser op til 25% er realistiske, og at det fulde potentiale derfor kan være helt op mod 33,4 GWh årligt ved en fuld udrulning af ovenstående indsigter under forudsætning af, at samtlige danske bearbejdningsprocesser adapterer reduktion af tryk og flow jf. projektets resultater. Mere realistisk er estimatet vedr. de 5% af den samlede danske maskinpark, som allerede kan trykjusteres, hvorfor en reel udrulning på den korte tidshorizont potentielt vil kunne reducere det årlige energiforbrug for CNC-bearbejdningsmaskiner op til 1,67 GWh.

Forsøgene har desuden vist at der er en stor sammenhæng mellem flow gennemstrømningen og det generelle energiforbrug – således har studiet vist at halvering af flowet ved reduktion af flow kanalernes diameter, kan reducere energiforbruget med 20-30% mens tryk fastholdes ved maksimum indstilling (i dette forsøg 40bar). Dette indikerer endvidere, at der ved "tør bearbejdning" er en potentiel større energimæssig gevinst at hente – såfremt bearbejdningsforholdene tillader det.

Hvor indsigterne vedr. energibesparelse ifm., tryk og flow justering, åbner disse indsigter for, at bearbejdningsvirksomheder som IKKE har maskiner der kan tryk/flow justere, alligevel vil kunne arbejde aktivt med at reducere energiforbruget ved at lave fysiske kølesmøremiddel begrænsninger på deres bearbejdningscentre. Desuden giver det yderligere anledning til at forstå hvilke processer i bearbejdningsmaskiner, der er "energislugerer" og derfra identificere og kvalificere mulighederne for yderligere energioptimering.

Hvor ovenstående har vist at der er en reel og væsentlig energibesparelse at opnå ved at arbejde med nedjustering af kølesmøremiddel tryk og flow, er det kun relevant såfremt det ikke kompromitterer kvaliteten af bearbejdningen. Her er emnekvaliteten den vigtigste parameter – dog er elementer som værktøjsslid (og deraf standtid) dog også vigtig fra et økonomisk perspektiv.

Til at vurdere indflydelsen på emnekvaliteten er overfladeruheden målt forskellige steder på emnet, ligesom der er foretaget CMM målinger til at registrerer tendentielle ændringer i de geometriske mål. Ved analyse af disse målinger ses der IKKE nogen tendentiell ændring i emnekvaliteten som følge af justering i kølesmøremiddel tryk og flow.

Analysen af værktøjerne, deres slidtyper og graden af slid har for forsøgene i aluminium (AW6082) og rustfrit stål (AISI304) ikke vist nogen sammenhæng mellem værktøjets stand og kølesmøremiddel trykket og flowet. For forsøget i stål (S275) er der indikationer af at lavere tryk og flow medfører større og mere fatale skader på værktøjet. Grundet skadernes placering indikerer analysen, at der i materialer med fx glødeskaller kan være øget behov for optimal køling, hvorved reduceret kølesmøremiddel tryk og flow medfører negative konsekvenser for værktøjsslidet – og derved standtid og processikkerhed.

Ved analyse af spånerne er den primære tendens at det ved høj densitets materialer (stål og rustfrit stål) ved lavere indvendig køle tryk (25bar og derunder) er besværet at lede spånerne væk fra lukkede lommer. Dette øger risikoen for spånpakning og ”re-cutting” af spånerne, hvilket ultimativt kan medføre værktøjsbrud og kasserede emner. Dette betyder det er vigtigt at tage hensyn til spånafledningen i arbejdet med nedjustering af kølesmøremiddel trykket og flowet.

Slutteligt er der indsamlet data med henblik på at sammenholde kølesmøremiddel trykket med de sundhedsmæssige konsekvenser. Der er hhv. indsamlet data vedr. luftfugtigheden før og efter bearbejdning, samt målinger af partikelkoncentrationen for forsøgene i rustfrit stål (AISI304). Målingerne af luftfugtigheden har ikke vist nogle konkluderende resultater. Målingerne af partikelkoncentrationen af våde partikler (hhv. 10my og 1my partikel størrelse), har vist en tendens til en faldende koncentration ved lavere tryk for begge partikel størrelser. Dette indikerer at der i mindre grad dannes olie røg- og tåger, hvilket har en positiv indvirkning på maskinoperatørernes sundhed.

Opsummeret viser projektet at der er en væsentlig energi gevinst at hente ved nedjustering af kølesmøremiddel trykket og fysisk begrænsning af kølesmøremiddel flowet, ligesom det har valideret at det ikke er urealistisk at energireduktionen kan være op mod 25%. Således validerer forsøgene, potentialeafdækningen, som indikerer at det er muligt at nå en årlig national energibesparelse på ca. 1,67 GWh på de CNC-centre i Danmark som kan justere i dag. Kan bearbejdningsscentret ikke allerede trykjustere har studiet afdækket at den økonomiske investering ifm. efterinstallation af et tryk justerbart kølesmøremiddelanlæg, forventelig ikke vil kunne dækkes af den energibesparelse der opnås, hvorved implementeringen af justerbart tryk/flow på flere bearbejdningsscentre i Danmark drives af fokus på miljø og sundhedsparametrene undersøgt i dette projekt.



## 10 Effekten af resultaterne – energibesparelser

Gennem projektet er det undersøgt hvilken effekt kølesmøremiddel trykket- og flowet har på bearbejdningscentres samlede energiforbrug ifm. bearbejdning (fræsning).

Potentialeafdækningen har kortlagt, at det er et begrænset udsnit af den eksisterende maskinpark, som pt. kan justere kølesmøremiddel trykket og flowet – estimeret til at være ca. 5% af den samlede danske maskinpark, svarende til ca. 750 bearbejdningscentre. Desuden har afdækningen vist, at det alene er trykket som kan justeres/kontrolleres på maskiner i dag, mens flowet er en afledt effekt.

Afdækningen har vist, at såfremt de 5% af den danske maskinpark som kan trykjusteres, kan reducere energiforbruget med 25%, vil det beløbe sig i en årlig energibesparelse på ca. 1,67 GWh og en reduktion på 485,2 ton CO<sub>2</sub>, hvilket, baseret på forsøgsresultaterne, vurderes at være praktisk realistisk. Såfremt tryk/flow reduktion skal udbredes til de resterende 95% af den danske maskinpark vil det kræve en investering i et justerbart anlæg med en enhedspris på mellem 75.000-250.000 kr. Fra et økonomisk perspektiv har estimeringerne vist, at dette ikke er en attraktiv investering, baseret på at break-even for investeringen først sker efter opnåelse af energibesparelser på >30.000 kWh.

Gennem de praktiske bearbejdningsforsøg har projektet vist at der er en væsentlig energibesparelse at hente ved nedjustering af kølesmøremiddel trykket og flowet. Ved en trykreduktion fra 40bar til 18bar har forsøgene vist, at det samlede energiforbrug for bearbejdningscentret kan reduceres med mellem 15-25%. Det svarer reelt til reduktioner i kW forbruget på 1,2kW, 1,3kW og 0,5kW ved reduktion af trykket fra 40 til 18 bar for forsøgene i hhv. aluminium, stål og rustfrit stål (start forbrug ved 40bar var hhv. 4,8kW, 5,5kW og 3,8kW).

Forsøgene har desuden vist at der er en stor sammenhæng mellem flow gennemstrømningen og det generelle energiforbrug – således har studiet vist at halvering af flowet ved reduktion af flow kanalernes diameter, kan reducere energiforbruget med 20-30% mens trykket fastholdes ved maksimum indstilling (i dette projekt, 40bar). I kW svarer dette til en reduktion i størrelsen 1-1,7kW, hvilket også fremhæver denne tilgang til energibesparelser som vigtig og relevant for industrien. Dette resultat indikerer endvidere, at der ved "tør bearbejdning" er en potentiel større energimæssig gevinst at hente – såfremt bearbejdningsforholdene tillader det.

På disse resultater har det ikke været muligt at definere en specifik regel for energibesparelsen, da forsøgene har vist at de i høj grad afhænger af hvor stor andel kølesmøremiddel anlæggets energiforbrug udgør af det totale forbrug for bearbejdningscentret. Dog har det vist at der er væsentlige energibesparelser at opnå, såfremt bearbejdningsvirksomhederne aktivt arbejder med at identificere hvor ikke kritiske processer ift. kølesmøremiddel – og at der ved at kigge ind i bearbejdningscentres støtteprocesser er store potentialer for mærkbare energibesparelser.

## 11 Perspektivering og videre anvendelse af resultater

DAMRC har i sin daglige interaktion med industrien og bearbejdningsvirksomhederne oplevet stigende interesse i klimabevidsthed og for hvordan de fx kan inkorporere elementer fra FN's 17 verdensmål i deres forretning og daglige processer, på en bæredygtig måde. Med dette projekt har DAMRC skabt værdifuld viden om og indsigt i hvordan bearbejdningsvirksomhederne bl.a. kan arbejde med støtteprocesserne mhp. at reducere deres energiforbrug og på den måde bl.a. arbejde i retning af mål 12: "Ansvarlig forbrug og produktion". Dette betyder at vi, DAMRC, aktivt kan hjælpe danske bearbejdningsvirksomheder med at reducere deres energiforbrug gennem oplysning og information – viden der tages med fremadrettet når DAMRC interagerer med industrien.

Projektet har bekræftet og dokumenteret resultater fra tidligere studier og projekter (ELFORSK projekt nr. 351-031 Energioptimeret brug af CNC-maskiner) hos DAMRC vel at mærke på de samme maskiner som ses ude i den danske industri. Således er det bl.a. bekræftet at støtteprocesser som kølesmøremiddel systemet udgør en væsentlig andel af bearbejdningscentres samlede energiforbrug. Disse resultater danner, sammen med studier fra bl.a. Aarhus Universitet, grundlag for at undersøge og forstå hvor og hvordan energien reelt forbruges i bearbejdningscentre – altså forstå hvilke processer der forbruger – og under hvilke forhold.

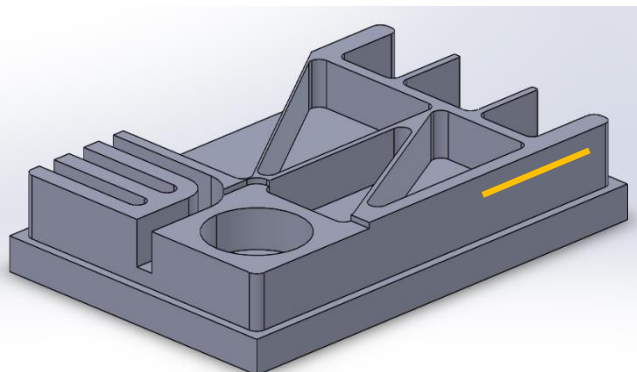
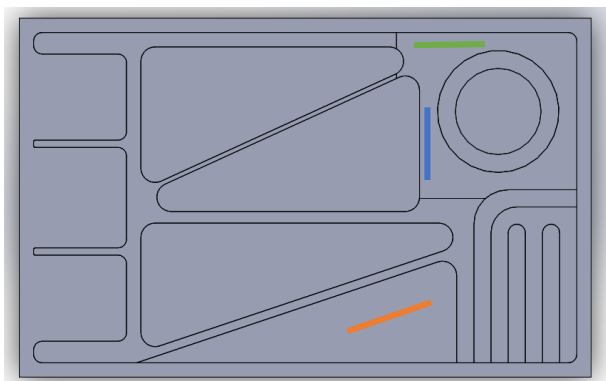
Næste skridt er derfor, sammen med Aarhus Universitet og flere andre partnere at søge et fælles projekt med fokus på at finde frem til hvordan energiforbruget for hjælpeprocesser og -funktioner, samt stand-by-modes forbruges, og derfra hvordan det kan reduceres. Grundlaget for dette projekt er, at studierne, samt litteratur, viser at op mod 90% af energiforbruget for bearbejdningscentre benyttes til hjælpeprocesser, -funktioner og stand-by-modes. Målet med et sådant projekt er, ultimativt, at vise industrien hvor der kan justeres og fin-tunes, mhp. at opnå væsentlige energibesparelser.

# 12 Bilag

## Bilag A – Testprotokoller Målepunkter for Aluminium & Stål

Materiale: \_\_\_\_\_ Tryk: \_\_\_\_\_ Flow: \_\_\_\_\_ ID: \_\_\_\_\_ Dato: \_\_\_\_\_

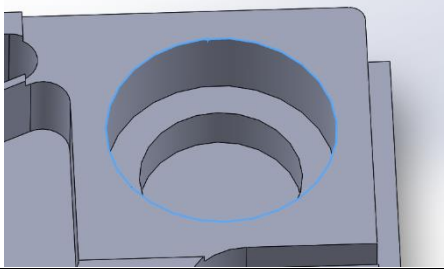
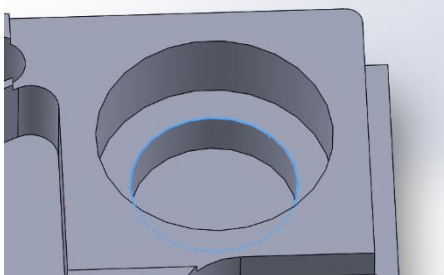
### Overflade måling

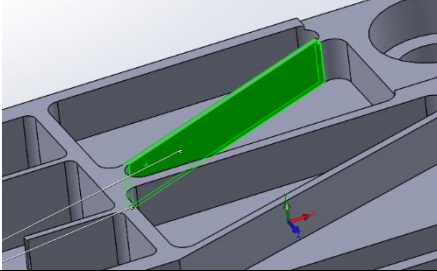
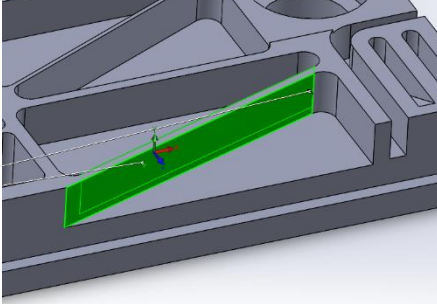
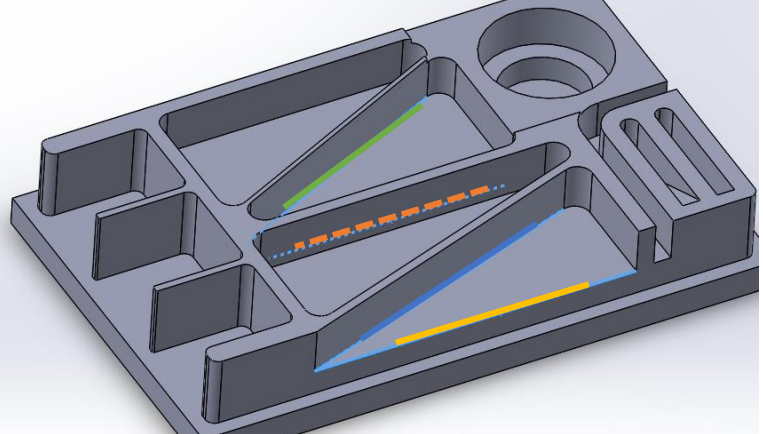


Målepunkter for overfladeruhed:

Grøn: _____ Ra _____ Rz	Orange: _____ Ra _____ Rz
Blå: _____ Ra _____ Rz	Gul: _____ Ra _____ Rz

### CMM-måling

	<p><b>Ø65 hul</b></p> <p>Rundhed 2-3 mm under overflade</p> <p>_____</p>
	<p><b>Ø40 hul</b></p> <p>Rundhed 2-3 mm under overflade</p> <p>_____</p>

	<p><b>3 mm rib</b></p> <p>Rethed 5 mm under topplan: _____</p>
	<p><b>6 mm rib</b></p> <p>Rethed 5 mm under topplan: _____</p>
<p><b>Planhed i to lommer</b></p> <p>Grøn/orange:</p> <p>_____</p> <p>Blå/gul:</p> <p>_____</p>	

**Spån evaluering, jf. "Spån klassificering" + kommentarer**

---



---

**Værktøjsslid – typer af værktøjsslid + kommentar + billeder**

---

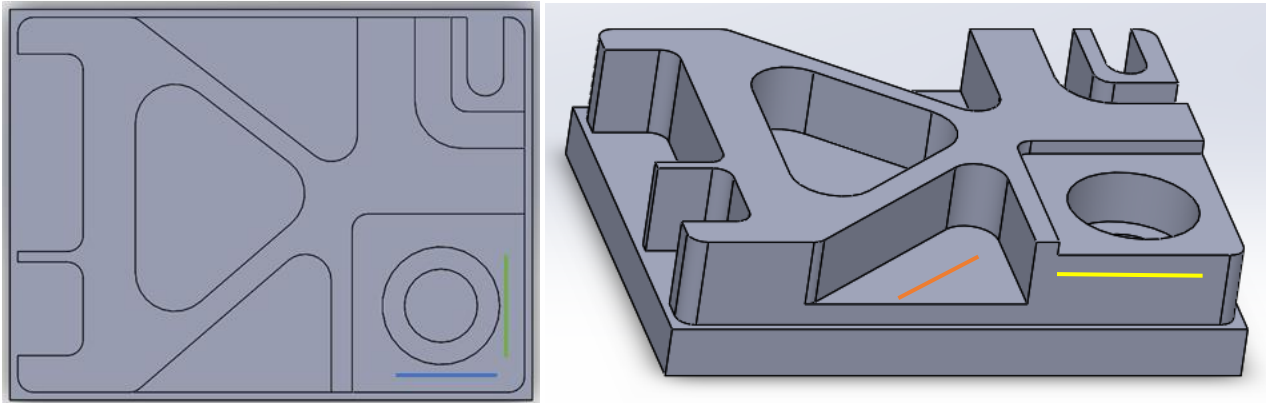


---

### Målepunkter for rustfrit stål

Materiale: \_\_\_\_\_ Tryk: \_\_\_\_\_ Flow: \_\_\_\_\_ ID: \_\_\_\_\_ Dato: \_\_\_\_\_

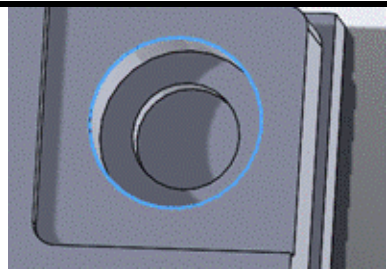
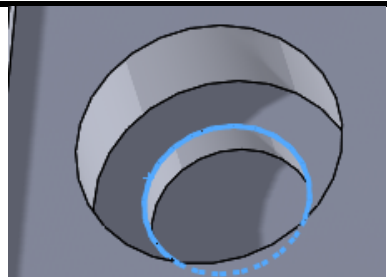
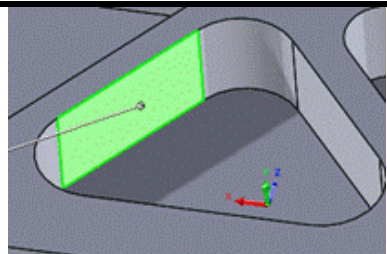
#### Overfladekvalitet (ruhed)

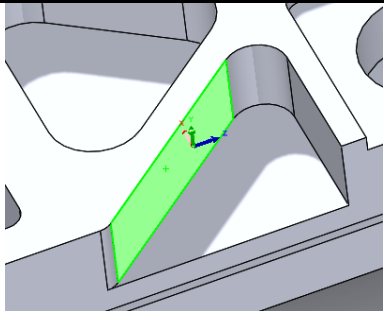
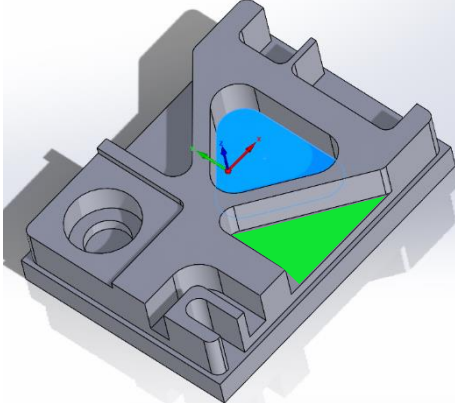


Målepunkter for overfladeruhed:

Grøn: _____ Ra _____ Rz	Orange: _____ Ra _____ Rz
Blå: _____ Ra _____ Rz	Gul: _____ Ra _____ Rz

#### CMM-måling

	<p><b>Ø45 hul</b> Diameter 2-3 mm under overflade</p> <p>_____</p> <p>Rundhed 2-3 mm under overflade</p> <p>_____</p>
	<p><b>Ø28 hul</b> Diameter 2-3 mm under overflade</p> <p>_____</p> <p>Rundhed 2-3 mm under overflade</p> <p>_____</p>
	<p><b>8 mm rib</b></p> <p>Rethed 5 mm under topplan: _____</p>

	<p><b>10 mm rib</b></p> <p>Rethed 5 mm under topplan: _____</p>
<p><b>Planhed i lommer</b></p> <p>Åben (grøn): _____</p> <p>Lukket (blå): _____</p>	

**Spån evaluering, jf. "Spån klassificering" + kommentarer**

---



---

**Værktøjsslid – typer af værktøjsslid + kommentar + billeder**

---



---