

Projektnummer: 351-031

Titel: **Energiøptimeret brug af CNC-maskiner i industrien**

Projektleder: Charlotte Frølund Ilvig

Projektleders e-mail: chi@damrc.com

Projektansvarlig virksomhed: DAMRC F.M.B.A

Projektperioden: 21.marts 2019 - 31. december 2020



Teknisk Slutrapport

1	Dansk resumé - formål, resultater og videre anvendelse	3
2	Engelsk resume - formål, resultater og videre anvendelse	4
3	Projektets formål	6
4	Processen og opnåede resultater	6
5	WP2: Identifikation af relevante projektpartnere og industrielle projektdeltagere.....	7
6	WP 3 Forstudie:	7
6.1	FORSTUDIE 1.....	7
6.2	FORSTUDIE 2.....	18
6.3	SLUTSTUDIE	28
6.4	Grundlæggende forsøgsprotokol for For- og Slutstudie	36
7	WP4: Komparativ analyse af initierende og optimerede bearbejdningsprocesser:	39
8	WP 5 Konklusion og rapport.....	44
9	Effekten af resultaterne – energibesparelser.....	45
10	Perspektivering og videre anvendelse af resultater	46
11	Oversigt over formidlingsaktiviteter for udbredelse af projektets resultat	47
12	Bilag	47

1 Dansk resumé - formål, resultater og videre anvendelse

DAMRC har gennem flere år gennemført produktivitetsoptimeringer ved adskillige industriebearbejdningsevksomheder i Danmark via stabilitetsoptimering med modalanalyseudstyr. Stabilitetsanalysen er med til at tilsikre stabile bearbejdningsevforudsætninger gennem justering af bearbejdningsevparametre. Bearbejdes der ved ustabile forhold, er det kendt, at skærekvæfterne øges drastisk.

DAMRC har, på baggrund af denne viden om stabilitet og skærekvæfter, en hypotese om, at bearbejdningsevstabilitet har en væsentlig indflydelse på energiforbruget ved en bearbejdningsevproces. Hypotesen består i, at DAMRC forventer, at øget bearbejdningsevstabilitet og produktivitet har en positiv indflydelse på energiforbruget ifm. bearbejdning.

Gennem nærværende projekt er denne hypotese blevet testet. Dette er gjort via komparative eksperimentelle forsøg hhv. interne laboratorieforsøg hos DAMRC, og forsøg/målinger på faktiske produktioner hos forskellige industrivirksomheder. Her er strømforbruget målt for en given bearbejdningsevproces/emne, hvor bearbejdningsevparametrene IKKE er blevet optimeret. Efterfølgende er parametrene blevet optimeret via modal stabilitetsanalyse samt skærebaneanalyse, mhp. at opnå produktivitetsevforbedringer. Herefter er en tilsvarende bearbejdningsevproces gennemført, hvor strømforbruget igen måles. Disse strømmålinger konverteres til det faktiske energiforbrug pr. proces/emne, hvorefter forbruget hhv. før og efter sammenlignes, med henblik på at forstå den energimæssige påvirkning af produktivitetsoptimeringen via stabilitets- og skærebaneanalyse.

Både målinger fra industrioptimeringerne på egentlige produktioner og laboratorieforsøgene hos DAMRC har vist, at:

- når bearbejdningsevproduktiviteten øges, forøges strømforbruget også – dog ikke proportional ift. hinanden.
- når bearbejdningsevstiden reduceres som følge af produktivitetsoptimeringen, reduceres energiforbruget pr. emne – forårsaget af det IKKE-proportionale forhold mellem produktivitetsevforøgelse og strømforbrugsforøgelse.

Dette leder til konklusionen; **det er muligt at reducere energiforbruget pr. emne ved produktivitetsoptimering via stabilitets- og skærebaneanalyse**. Resultater fra det interne laboratorieforsøg ved DAMRC (FORSTUDIE 1) har vist, at det er muligt at opnå helt op til 40% reduktion i energiforbrug pr emne, forudsat at samtlige processer er blevet optimeret for emnet. Industrieforsøgene har vist tilsvarende tendens, med reduktion af energiforbruget pr. emne – dog typisk i størrelsesordenen 0-10% reduktion. Denne forskel i besparelsevspotentialet tilskrives at optimeringen ved industrieforsøgene kun har fokuseret på en eller få af bearbejdningsevprocesserne. Det interessante ved disse tal er, at det er muligt at producere mere for den samme mængde energi på den samme maskine.

Arbejdes der ud fra en forudsætning om nationalt fuld udrullet optimering af samtlige bearbejdningsevprocesser via stabilitets- og skærebaneanalyse, forventes en akkumuleret energibesparelse for den samlede produktionsevsvolumen på mellem 5-50 mio. kWh. Udgør udrulning blot 1% af det fulde udrulningsevspotentiale vil besparelsen stadig være mellem 0,5-5 mio. kWh årligt.

Hypotesen for projektet var, at der er en stærk sammenhæng mellem bearbejdningsstabilitet og energiforbruget – og at optimeringer via stabilitetsforbedringer derfor vil have en positiv indflydelse på energiforbruget. Projektet har imidlertid indikeret, at den primære ”driver” for energireduktioner, er stærkt relateret til den reduceret bearbejdningsstid. Dette fremhæver en af de mest interessante resultater fra dette projekt; hvor lille en andel af det samlede energiforbrug for en bearbejdningsproces, der reelt går direkte til bearbejdningscentret og skæreprocessen.

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 formentlige projektresultater 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 de i projektet opnåede erkendelser og resultater, som en bæredygtig metode for bearbejdningsvirksomhederne til både at forbedre sin bundlinje, og samtidig reducere sit energiforbrug pr. emne.

2 Engelsk resume - formål, resultater og videre anvendelse

DAMRC has though several years performed productivity optimizations at various companies in Denmark. This is done by stability optimization through modal analysis. From this work, it is known that machining at unstable conditions increases cutting forces dramatically. Based on the knowledge of machining stability and cutting forces, it is expected that machining stability affects the energy consumption of the machining process, and that increased stability and productivity will have a positive impact on the energy consumption.

This hypothesis has been tested in this project through comparative studies, where energy consumption has been recorded pre-and post-stability and productivity optimizations. This has been studied through internal experimental studies at DAMRC Technology Center and furthermore with industrial tests at multiple machining companies across Denmark, using true production parts.

The power consumption has been measured for a specific process/part, where the parameters have not been optimized. The parameters have then been optimized via modal stability analysis and cutting forces analysis to obtain productivity improvements. Secondly a similar machining process has been conducted and the power consumption has been measured again. These measurements are converted into actual power consumption per process/part, and such the consumption can be compared before and after optimization to understand the influence of power on the optimization via stability- and cutting force optimization.

Both measurement from the industrial partners on real production as well as the lab-tests at DAMRC has shown that.

- When productivity is increased, the power consumption is increased – however not proportional.

- When machining time is reduced as a consequence of the productivity optimization, the power consumption is reduced per part – resulting from the NON-proportional relation between productivity increase and increase of power consumption.

This leads to the conclusion, **that productivity optimizations achieved via stability optimization is most likely to reduce energy consumption per part.** Results from pre-studies show as much a 40% reduction in energy consumption per part, when all processes have been optimized via modal stability analysis. Similar, however not as large effects are seen in industry cases, where a typical reduction in energy consumption per part is between 0-10% compared to reference consumption before optimization. The interesting aspect of these numbers is, that they “allow” to reduce energy consumption per part, or to produce more parts using the same total amount of energy.

In a situation with a theoretical full national implementation of modal stability- and tool path optimization, an accumulated national saving between 5-50 mio. kWh might be possible. Settling at just 1% full implementation the accumulated national saving would still be in the range of 0,5-5 mio. kWh.

Originally it was believed that machining at optimal stability conditions would yield a reduction in energy consumption. However, the studies have indicated that the main driver for energy reductions is most likely the reduced machining time. This outlines one of the most important findings of this project – how small portion of the total energy consumption that is used on pure machining.

The results of this project – coupled with findings from similar projects carried out by DAMRC, as well as Aarhus University, has established a foundation for a future project to which funds will be sought. This project aims to study the power consumption of auxiliary processes and stand-by modes of machine centers, with the goal to find possibilities for energy reductions, as studies show that these uses up to 90% of total energy consumption.

Further, the results will ongoing be communicated by DAMRC as a method to work sustainable with energy consumption per part which also benefitting economically.

3 Projektets formål

Gennem optimering af processer i spåntagende bearbejdning, primært i dreje- og fræseprocesser, sigter vi mod at reducere industriens energiforbrug. Gennem modal analyse kan bearbejdningsparametre for stabil og vibrationsfri bearbejdning optimeres. Antagelsen er, at en optimeret proces har lavere energiforbrug, hvilket søges bevist gennem komparativ analyse.

Det er søgt demonstreret at det er muligt at gøre metalbearbejdning mere effektiv – til gavn for miljø og økonomi.

De deltagende virksomheder opnår en optimering på deres spåntagende processer, hvorved produktionstiden nedsættes på det enkelte emne, værktøjsslid mindskes og der skabes bedre overflader på emnerne.

Alle disse elementer er med til at forbedre virksomhedernes produktivitet og konkurrenceevne samt forventeligt resultere i en markant reduktion af processernes energiforbrug. Ligeledes vil formidlingen af den forventede positive sammenhæng mellem produktivitet og energibesparelse bane vejen for udbredelsen af optimeringsindsatser gennem modal analyse.

Kort opsummeret var projektets formål og arbejdsplaner:

”At demonstrere, at det er muligt at gøre metalbearbejdning mere effektiv, til gavn for miljø og økonomi. Denne del af projektet er gennemført.”

4 Processen og opnåede resultater

Projektet er bygget op som en komparativ analyse med forstudier gennemført hos DAMRC hvor der gennem bearbejdningsforsøg skabes et udgangspunkt for - og en indikation af - hvorvidt man kan forvente reelle energibesparelser.

Til måling af energiforbrug er anvendt en digital strømtang monteret på centrrets hovedkablet, hvilket muliggør præcis registrering af start/stop tidspunkt, med henblik på at opnå den højst mulige målenøjagtighed. Herfra udledes det generelle strømforbrug, samt forbruget pr. emne/proces.

Optimeringen består i modal analyse, såvel som skærebaneanalyse med henblik på at optimere processen og derved spare reducere bearbejdningstiden – og forventeligt energiforbruget. Som led i den komparative analyse gennemføres både en måling på bearbejdningen med brug af oprindelige skæreparametre, samt med brug af optimerede skæreparametre, hvilket danner grundlag for sammenligning af energiforbruget.

Der er gennemført 2 forstudier og 1 slutstudie hos DAMRC, samt 12 industribesøg, hvilket har resulteret i 15 optimeringsforsøg og 11 har bidraget med reelle resultater til projektet ift. energidata.

5 WP2: Identifikation af relevante projektpartnere og industrielle projektdeltagere

Identifikationen forestås af DAMRC på baggrund af nærværende projektbeskrivelse, og målet er, at min. 10 små, mellemstore og store virksomheder deltager i projektet og får optimeret deres processer gennem modal- og skærebaneanalyser.

Der blev udvalgt i alt 14 virksomheder, som alle råder over såvel ældre som nyere maskiner. Virksomhederne er et mix af såvel mindre, mellemstore som store virksomheder med en større andel af mellemstore virksomheder. Alle virksomheder har både ældre og nyere maskiner. Gennem projektet er vi blevet opmærksom på, at det tyder på, at nye og nyere maskiner forbruger mere energi end de ældre maskiner grundet flere sensorer og mere elektronik. Det har dog ikke været en del af projektet at bevise dette men på baggrund af projektresultatet giver det anledning til at dette bør undersøges dybere.

6 WP 3 Forstudie:

Projektet tager sit udgangspunkt i et forstudie på DAMRC's maskiner hvor vi igennem forsøg med sporfræsning og skærebaneanalyse vil skabe et udgangspunkt for, hvorvidt vi kan forvente reelle energibesparelser gennem projektet. Ved et positivt udfald af forstudiet undersøges reelle produktionsprocesser i den danske bearbejdningsindustri for optimeringspotentialer og mulig reduktion af energiforbrug. Det er afgørende at komme i mål med milepælen forud for den konkrete eksekvering og implementering i industrien.

Forud for de komparative studier i industrien er projektet tilrettelagt med et forstudie, med formålet at verificere hypotesen; kan der opnås en energibesparelse ved optimering via modal stabilitets analyse. Dette studie blev gennemført ved kontrollerede test i DAMRC's Teknologicenter på 4 gængse materialer, og er detaljeret beskrevet i følgende afsnit. Foruden det planlagte forstudie, blev det under projektførelsen erfaret at det kunne være relevant at udbygge den viden som var etableret under det oprindelig planlagte forstudie (*Forstudie 1*). Derfor blev to ekstra forstudier tilføjet. Et hvor den energimæssige effekt er undersøgt for et svært bearbejdeligt materiale, med 4 forskellige værktøjer, omtalt Forstudie 2. Tillige er det løbende med projektets gennemførelse erkendt at grundlaget for de opnåede energioptimeringer ikke er kortlagt. Derfor blev et slutstudie til gennemførelse i DAMRC's Teknologicenter etableret.

6.1 FORSTUDIE 1

Denne del-rapportering, omhandler udelukkede test og resultater fra interne bearbejdnings-test udført hos DAMRC, som forstudie 1.

Specifikt for dette forstudie, har formålet være indledende at afdække hvorvidt optimering af spåntagende processer via modalanalyse med TapTest udstyret har en positiv effekt på energiforbruget eller om hypotesen kan forkastes.

6.1.1 Forsøgsopsætning

Til at teste hvorvidt en energioptimering er muligt, er der designet et forsøgsstudie til fræsning, bestående af:

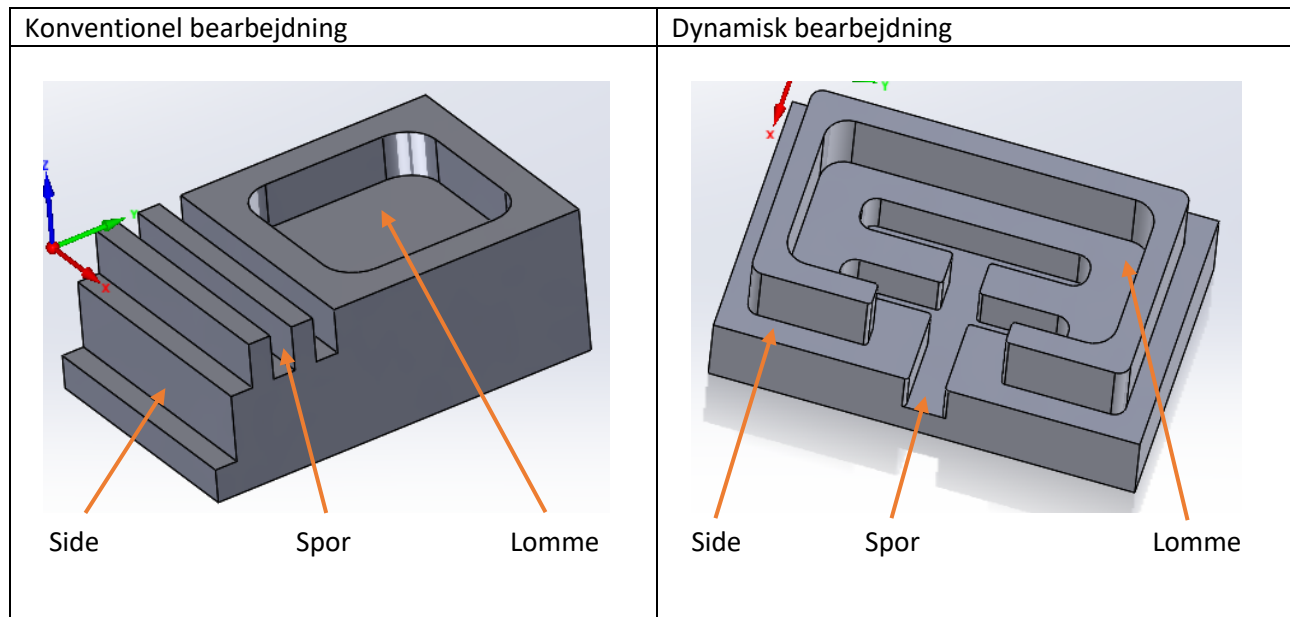
- 2 bearbejdningsmetoder (konventionel og dynamisk fræsning)

- 3 bearbejdningstyper (sidefræsning, sporfræsning og lommefræsning)
- 4 materialer (stål, rustfrit, støbejern og aluminium)

6.1.1.1 Bearbejdningstyper

Det er valgt at teste effekten af optimeringen, på hhv. konventionel og dynamisk fræsning, da begge bearbejdningstyper er vidt udbredt i industrien.

Til hver metode er der designet en specifik CAD-model, tilpasset den respektive bearbejdningstype. Begge design inkluderer de 3 bearbejdningstyper som ønskes undersøgt (sidefræsning, sporfræsning og lommefræsning). Til begge metoder måler råemnet 175 x 110 x 75 (LBH).



Bearbejdningsskemaet for hhv. konventionel og dynamisk fræsning er:

Konventionel:

Side (20mm dyb) → Side (30mm dyb) → Spor (20mm dyb) → lomme (20mm dyb)

Dynamisk:

Side (25mm dyb) → Lomme (25mm dyb) → Spor (25mm dyb)

6.1.1.2 Materialer

Til forstudieforsøgene undersøges 4 materialer. De valgte materialer er:

Stål	C45E, EN10083-2: 2006, Hot rolled in normalized condition
Rustfri stål	316L / 1.4404, EN10272
Støbejern	EN-GJS-500-7C, EN 16482
Aluminium	7075-T651

6.1.1.3 Værktøjer

Til forsøgene anvendes to forskellige værktøjer fra Sandvik Coromant, tilpasset testmaterialet.

Endefræserne opspændes i en hydraulisk værktøjsholder, fra Kennametal, Hydraulic Chucks HydroForce™ High-Torque Line, DV AD (DV40HCTHT20070M).

2P360-1000-PA 1630

Sandvik Coromant, 10mm hårdmetals endefræser, 4 tænder



Velegnet til materiale type: P, M, K & S

- (P) C45E
- (M) 316L / 1.4404
- (K) EN-GJS-500-7C

2P160-1000-NA H10F

Sandvik Coromant, 10mm alu endefræser, 2 tænder



Velegnet til materiale type: N

- (N) 7075-T65

6.1.1.4 Forsøgs serier

For hver bearbejdningsmetode og materiale, gennemføres en forsøgsserie, hvor energiforbruget måles på hhv. indkørte base skæreparametre med afsæt i opslagsværker, samt optimerede skæreparametre fundet vha. TapTest udstyret.

Nedenstående tabel viser de planlagte forstudie forsøgsserier.

Forsøgs #ID	Materiale	Bearbejdningsmetode	Ikke optimerede/ optimerede	Værktøj
1.1	C45E	Konventionel	Ikke optimerede	2P360-1000-PA 1630
1.2	C45E	Konventionel	Optimerede	2P360-1000-PA 1630
1.3	C45E	Dynamisk	Ikke optimerede	2P360-1000-PA 1630
1.4	C45E	Dynamisk	Optimerede	2P360-1000-PA 1630
2.1	316L / 1.4404	Konventionel	Ikke optimerede	2P360-1000-PA 1630
2.2	316L / 1.4404	Konventionel	Optimerede	2P360-1000-PA 1630
2.3	316L / 1.4404	Dynamisk	Ikke optimerede	2P360-1000-PA 1630

2.4	316L / 1.4404	Dynamisk	Optimerede	2P360-1000-PA 1630
3.1	EN-GJS-500-7C	Konventionel	Ikke optimerede	2P360-1000-PA 1630
3.2	EN-GJS-500-7C	Konventionel	Optimerede	2P360-1000-PA 1630
3.3	EN-GJS-500-7C	Dynamisk	Ikke optimerede	2P360-1000-PA 1630
3.4	EN-GJS-500-7C	Dynamisk	Optimerede	2P360-1000-PA 1630
4.1	7075-T65	Konventionel	Ikke optimerede	2P160-1000-NA H10F
4.2	7075-T65	Konventionel	Optimerede	2P160-1000-NA H10F
4.3	7075-T65	Dynamisk	Ikke optimerede	2P160-1000-NA H10F
4.4	7075-T65	Dynamisk	Optimerede	2P160-1000-NA H10F

6.1.1.5 Udvælgelse af skæreparametre

Ved "traditionel" brug af TapTest udstyret, hvor en given bearbejdning ønskes optimeret, forelægger der typisk base skæreparametre som har været anvendt indtil optimeringen. Idet forstudiebearbejdningerne er konstruerede, forefindes ingen base-skæreparametre. For at kunne gennemføre forsøgene har det derfor været nødvendigt at definere base-skæreparametrene.

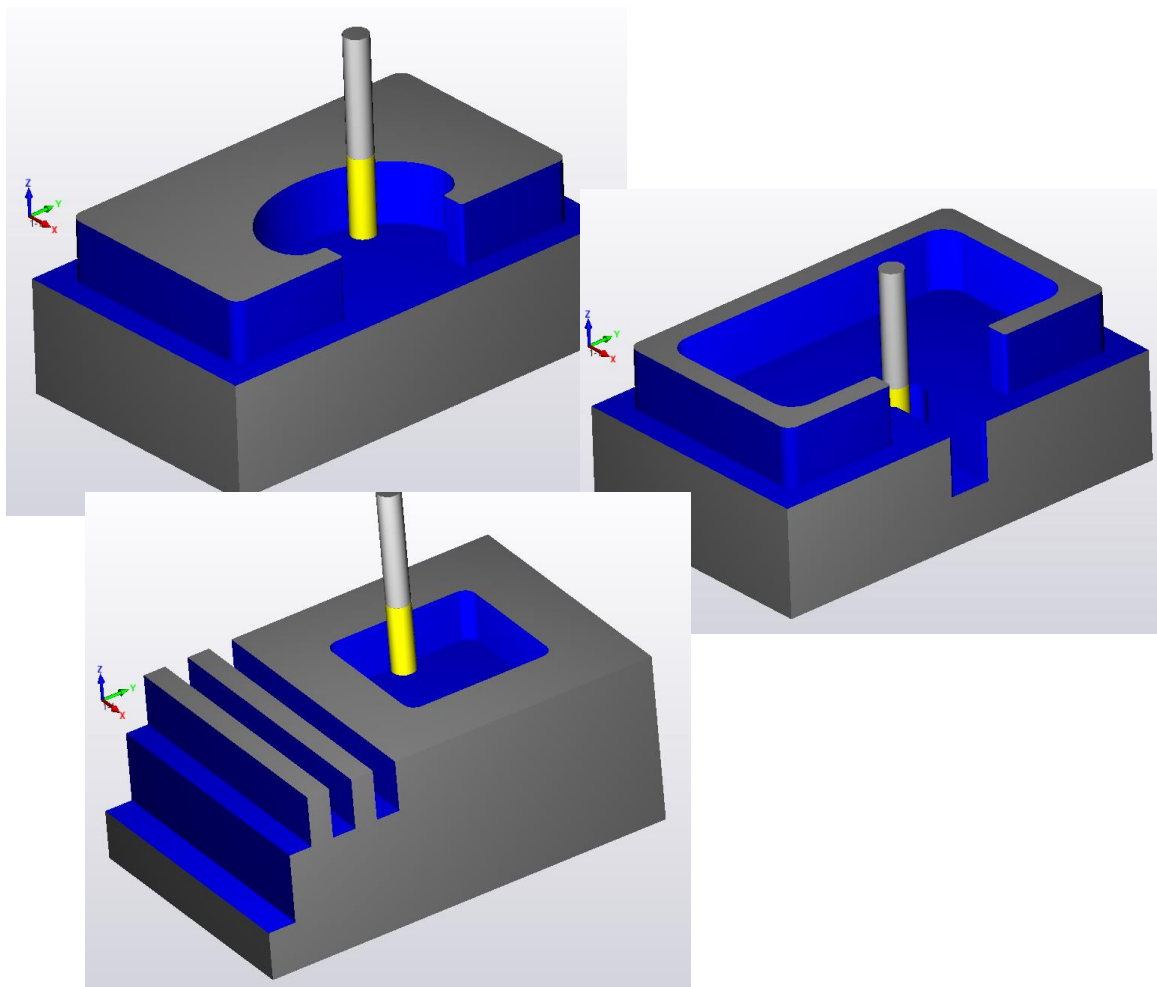
Fastlæggelsen blev først forsøgt gennemført ud fra Sandvik Coromant's opslagsværk "Roterende Værktøjer" fra 2015, med generelle anbefalinger til de specifikke værktøjer. Disse parametre blev dog fundet utilstrækkelige, idet anbefalingerne ikke inkluderede nogle guidelines ift. fræsedybde- og indgreb, ligesom der kun i minimal grad tages hensyn til de specificerede testmaterialer. For at holde forstudierne så industrinære blev denne "oplagte" fastlæggelsesmetode fravalgt, da skæreparametrene vurderes for lave ift. industriens standard.

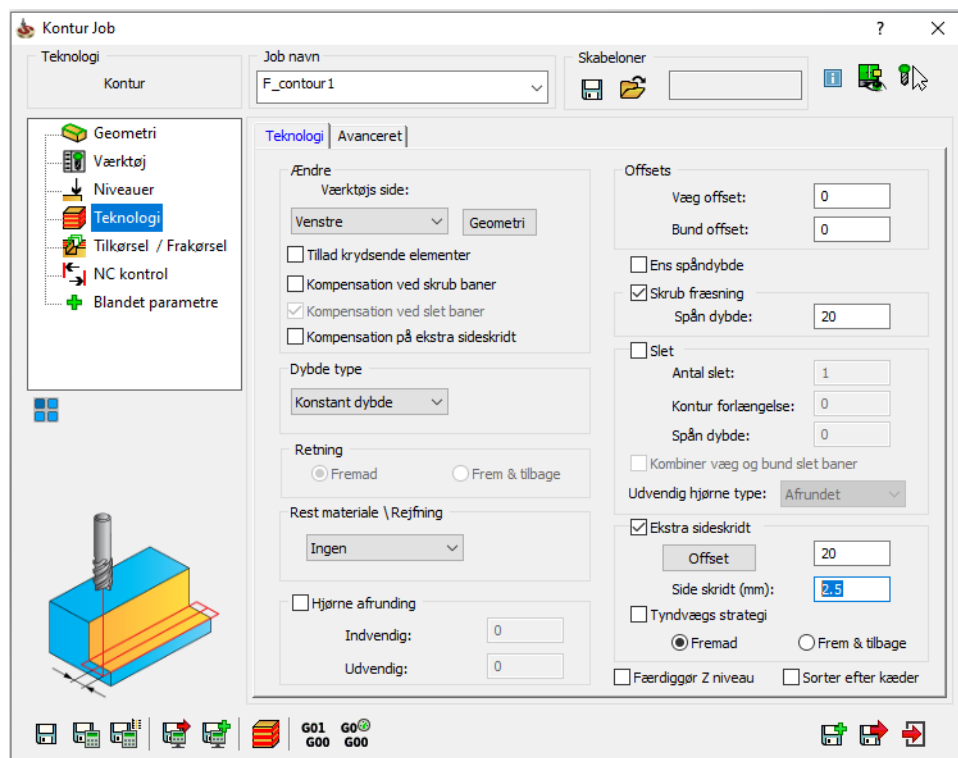
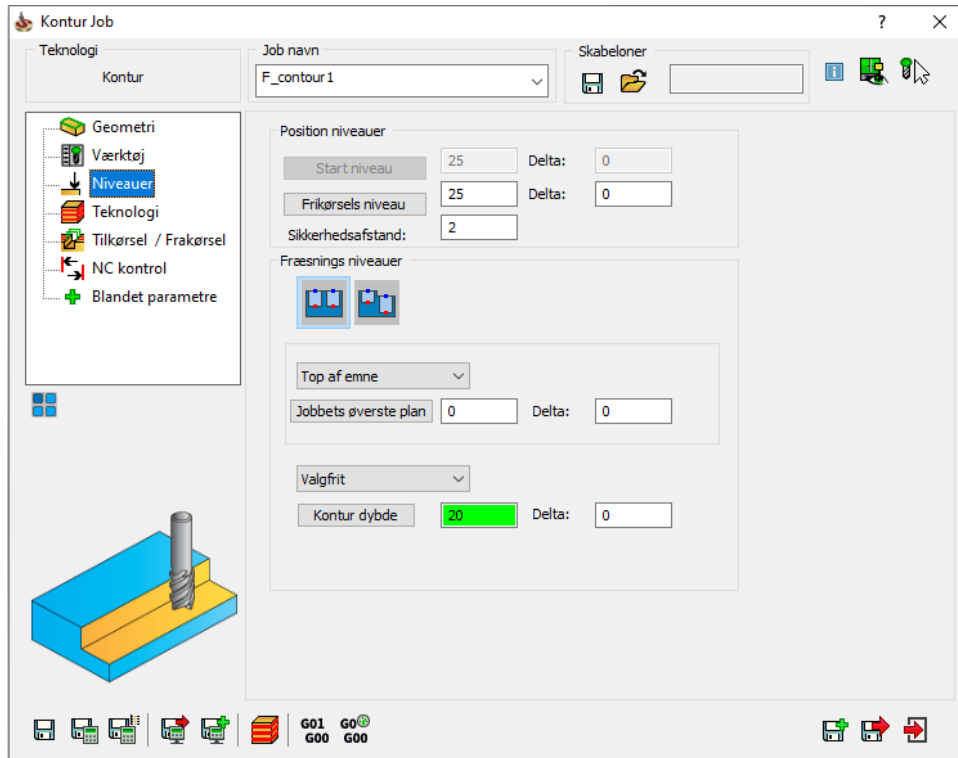
I stedet blev det forsøgt at bruge Sandvik Coromant's online kalkulator "CoroPlus ToolGuide". Denne kalkulator beregner specifikt hvilke skæreparametre, Sandvik Coromant anbefaler til den givne bearbejdning, hvor både fræser, materiale, maskine, bearbejdningstype- og metode og emneparametre tages i betragtning. Denne tilgang viste i første omgang lovende resultater, hvor konventionel bearbejdning i aluminium (7075-T65) blev indkørt, med tilhørende tilpasninger for at opnå en stabil bearbejdningsproces, efterfulgt af energimålinger på hhv. base- og optimerede skæreparametre (det var her tydeligt at fræseren var presset til det yderste). Da der efterfølgende skulle gennemføres indkøring og forsøg i 7075-T65 ved dynamisk fræsning, var skæreparametrene så aggressive at fræseren knækkede under bearbejdning. Ud fra disse erfaringer, blev det besluttet at finde en 3. metode til fastlæggelse af skæreparametre.

Her blev Kyocera's "Produktkatalog – Metal 2013-2014" valgt som reference til fastlæggelse af skæreparametrene til de konventionelle bearbejdninger. De anbefalede skæreparametre blev fundet ved opslag på en fræser, med tilnærmelsesvis tilsvarende geometri som de valgte til dette forstudie. Denne fastlæggelsesmetode, blev fundet anvendelig til fastlæggelse af baseparametrene for de konventionelle bearbejdninger.

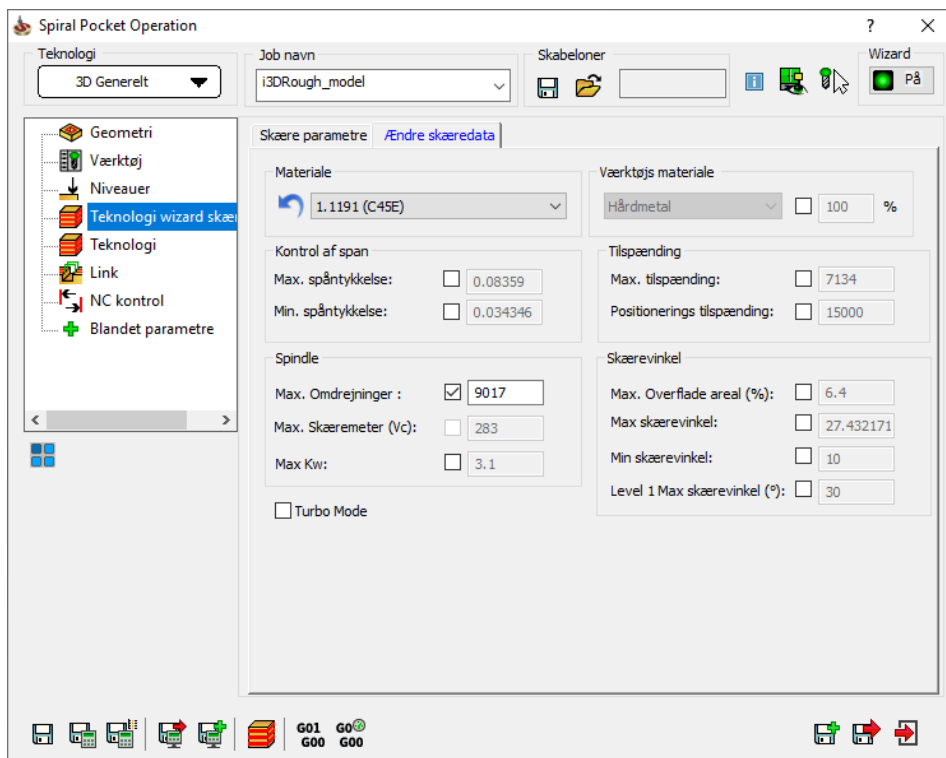
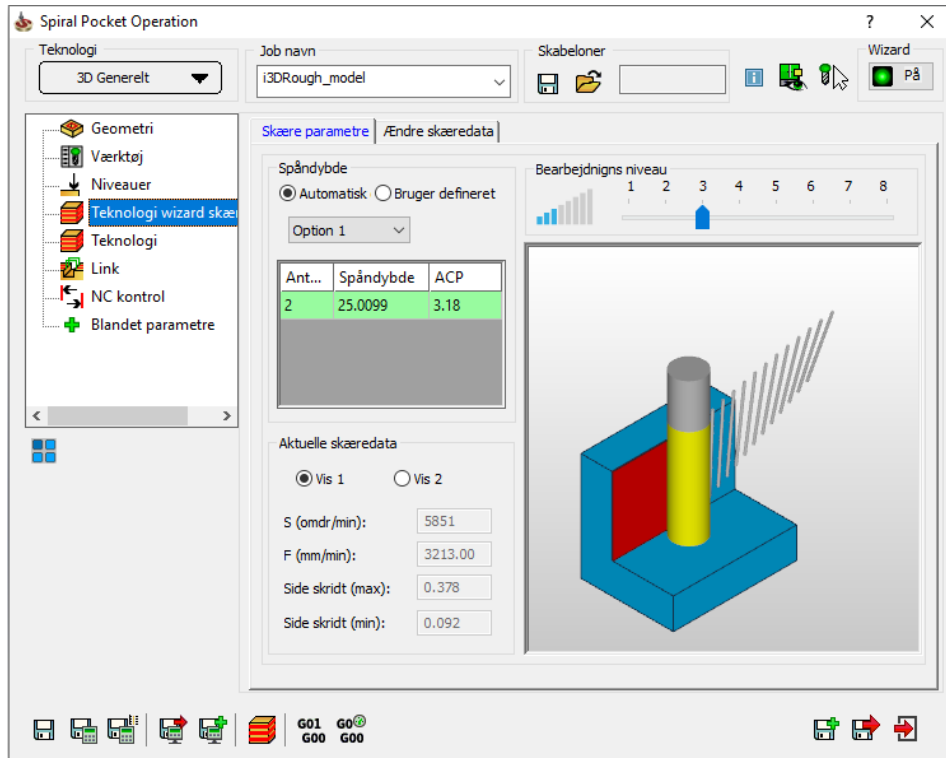
Til fastlæggelse af baseparametrene ved dynamisk bearbejdning blev CAD/CAM-programmet SolidCAM iMachining anvendt. iMachining er en funktion i SolidCAM, som selv foreslår skæreparametre, bearbejdningssekvens, mm. baseret på den givne geometri, værktøjet, materialet, mv., og bruges mange steder i industrien til hurtigt at producere et bearbejdningsprogram, med passende skæreparametre. Programmet fungerer ved at det er muligt at ændre "bearbejdnings niveau" fra 1-8 (se Figur 2), hvor 8 er max belastning og 1 er min. belastning. Til bearbejdning i stål/jern materialerne, blev bearbejdnings niveau 3 valgt som base reference for skæreparametrene, mens niveau 8 blev valgt ved aluminium, grundet behovet for højere spindelhastigheder, for at sikre effektiv spånbrydning.

Nedenfor ses forskellige elementer af programmeringen i SolidCAM, hvori de forskellige bearbejdningsparametre hhv. indtastes og/eller findes afhængig af bearbejdningen.





Figur 1 – Programmeringsmenu for konventionel bearbejdning



Figur 2 - Programmeringsmenu for dynamisk bearbejdning

6.1.1.6 Base skæreparametre

Nedenstående tabel udgør baseskæreparametrene, defineret ud fra ovenstående metoder, med tilhørende indkøring og tilpasninger.

#	Type	Vc [m/min]	N [RPM]	Fz [mm/tooth]	Ap [mm]	Ae [mm]
1.1 C45E Konv.	Side 20	120	3819,7	0,039	20	2
	Side 30	120	3819,7	0,039	30	2
	Spor	120	3819,7	0,039	7,5	10
	Lomme	120	3819,7	0,039	20	2
1.3 C45E Dyn.	Side	137,5	137,5	0,137	25	0,378-0,092
	Spor	137,5	137,5	0,137	25	0,378-0,092
	Lomme	137,5	137,5	0,137	25	0,378-0,092
2.1 316L Konv.	Side 20	120	3819,7	0,044	20	2,5
	Side 30	120	3819,7	0,044	30	2,5
	Spor	65	2069	0,038	5	10
	Lomme	120	3819,7	0,044	20	2,5
2.3 316L Dyn.	Side	137,2	4366	0,137	25	0,379-0,093
	Spor	137,2	4366	0,137	25	0,379-0,093
	Lomme	137,2	4366	0,137	25	0,379-0,093
3.1 GJS-500-C7 Konv.	Side 20	180	5729,6	0,051	20	2,5
	Side 30	180	5729,6	0,051	30	2,5
	Spor	155	4933,8	0,038	5	10
	Lomme	180	5729,6	0,051	20	2,5
3.3 GJS-500-C7 Dyn.	Side	224,4	7142	0,1	25	0,852-0,214
	Spor	224,4	7142	0,1	25	0,852-0,214
	Lomme	224,4	7142	0,1	25	0,852-0,214
4.1 7075 Konv.	Side 20	377	12000	0,2	20	1,5
	Side 30	377	12000	0,2	30	1,5
	Spor	188,5	6000	0,064	5	10
	Lomme	337	12000	0,2	20	1,5
4.3 7075 Dyn.	Side	298,9	9515	0,1585	25	0,882-0,086
	Spor	298,9	9515	0,1585	25	0,882-0,086
	Lomme	298,9	9515	0,1585	25	0,882-0,086

6.1.1.7 Optimerede skæreparametre

Med udgangspunkt i baseskæreparametrene, samt TapTest udstyret, er følgende optimerede skæreparametre fundet og indkørt.

#	Type	Vc [m/min]	N [RPM]	Fz [mm/tooth]	Ap [mm]	Ae [mm]
1.2 C45E Konv.	Side 20	183,8	5850	0,039	20	2,5
	Side 30	183,8	5850	0,039	30	2,5
	Spor	164,3	5230	0,039	7,5	10
	Lomme	183,8	5850	0,039	20	2,5
1.4 C45E Dyn.	Side	183,8	5850	0,137	25	0,378-0,092
	Spor	183,8	5850	0,137	25	0,378-0,092
	Lomme	183,8	5850	0,137	25	0,378-0,092
2.2 316L Konv.	Side 20	183,15	5830	0,044	20	2,5
	Side 30	183,15	5830	0,044	30	2,5
	Spor	95,8	3050	0,038	7,5	10
	Lomme	183,15	5830	0,044	20	2,5
2.4 316L Dyn.	Side	160	5095	0,12	25	0,506-0,218
	Spor	160	5095	0,12	25	0,506-0,218
	Lomme	160	5095	0,12	25	0,506-0,218
3.2 GJS-500-C7 Konv.	Side 20	246,6	7850	0,051	20	2,5
	Side 30	246,6	7850	0,051	30	2,5
	Spor	111,5	3550	0,048	7,5	10
	Lomme	246,6	7850	0,051	20	2,5
3.4 GJS-500-C7 Dyn.	Side	246,3	7841	0,1	25	0,852-0,596
	Spor	246,3	7841	0,1	25	0,852-0,596
	Lomme	246,3	7841	0,1	25	0,852-0,596
4.2 7075 Konv.	Side 20	346,1	11016	0,2	20	2
	Side 30	346,1	11016	0,2	30	2
	Spor	213,6	6800	0,064	5	10
	Lomme	346,1	11016	0,2	20	2
4.4 7075 Dyn.	Side	346,1	11016	0,1585	25	0,882-0,415
	Spor	346,1	11016	0,1585	25	0,882-0,415
	Lomme	346,1	11016	0,1585	25	0,882-0,415

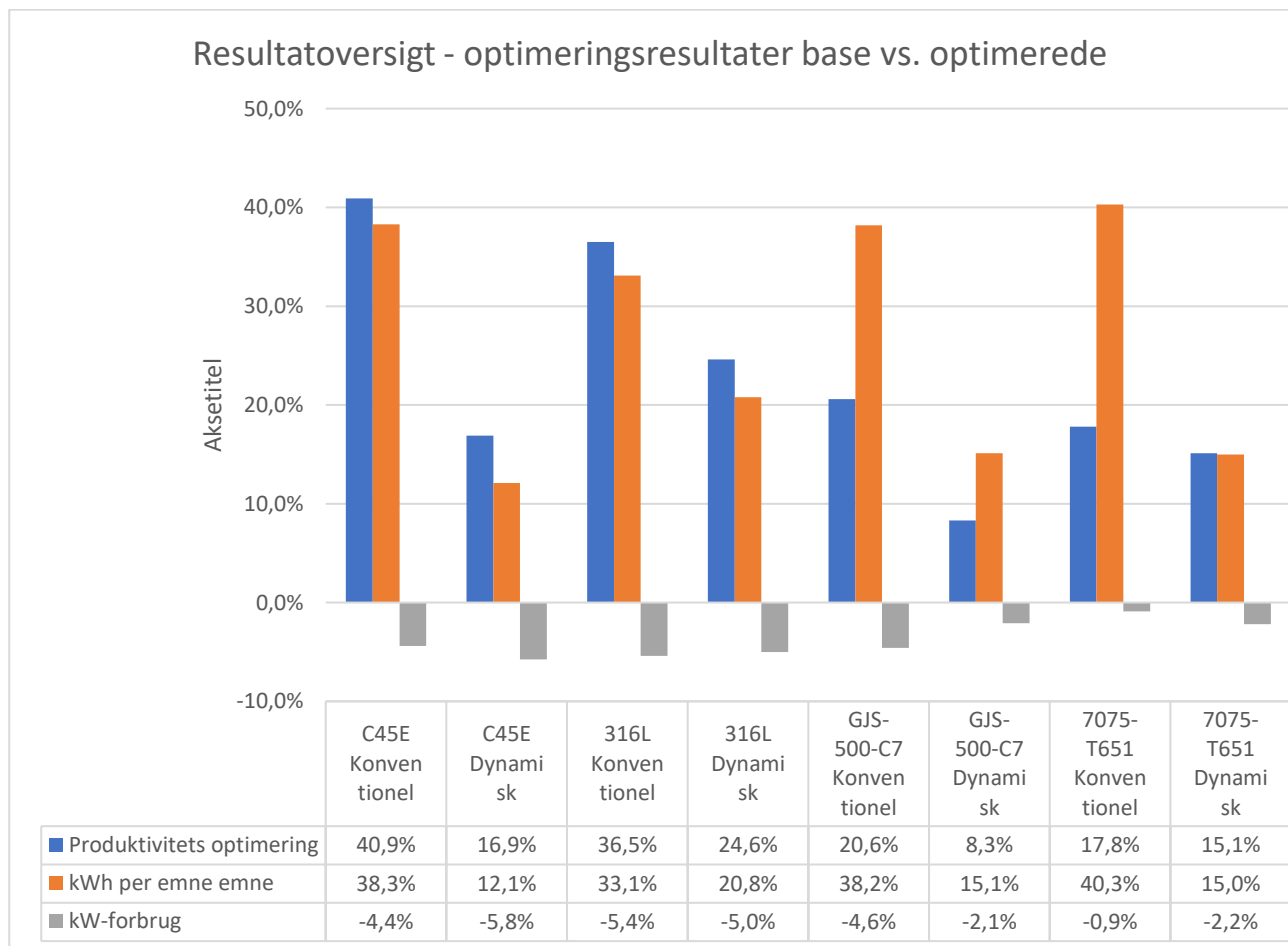
6.1.2 Testresultater for Forstudie 1

Følgende data er opsamlet ved gennemførelse af forstudieforsøgene:

- Teoretisk optimering for hver bearbejdningstype
- Bearbejdningstid jf. SolidCAM
- Bearbejdningstid jf. TinyTag Datalogger
- Interval for spindelbelastningen
- Strømforbrug (I) for bearbejdningen

Med afsæt i disse data er den realiserede tidsoptimering- og energibesparelse beregnet med udgangspunkt i basebearbejdningen. Nedenstående resultatoversigt, viser de, for projektet, vigtigste data. Datatabeller, med øvrige data, kan eftersendes ved forespørgsel.

Note. Ved strømmålingerne på kun én fase, er det antaget at forbruget er tilsvarende på de to øvrige faser, i.e. "strømmen * 3".



Figur 3 - Diagrammet visualiserer effekten af produktivitetsoptimeringen.

Positiv ændring = øget produktivitet/lavere energiforbrug. Negativ ændring = øget energiforbrug

Det kan ses hvordan der for alle de optimerede bearbejdninger, er højere kilowatt forbrug [kW] på maskinen ift. base-bearbejdningen. Det kan derved konkluderes, at TapTest produktivitetsoptimering medfører en større belastning på maskinen (spindlen), hvilket medfører et større kW-forbrug. Dette understøttes af registreringer af spindelbelastningen, hvor det er observeret at spindelbelastningen øges

for alle de optimerede bearbejdnings (tabeller indeholdende spindelbelastningsobservationerne kan eftersendes ved forespørgsel). Der er dog ikke umiddelbart nogen klar tendens i størrelsen af det øgede forbrug.

For at få det komplette billede af optimeringens effekt skal kW-forbruget sættes i relation med bearbejdningstiden. Idet der opnås en produktivitetsoptimering på 3-20 gange større end det øgede kW-forbrug, **mindskes det faktiske energiforbrug (kWh) per emne**, til trods for det øgede kW-forbrug. Ved den dårligste case fra forstudiet, ligger den realiserede energioptimering 5%-point under den realiserede produktivitetsoptimering per emne. Her hentes dog stadig en energioptimering per emne på 12% +/-, mens energiforbrugsoptimeringen i 2 af studierne er ca. dobbelt så stor som produktivitetsoptimeringen (38,2 og 40,3%). For alle 4 forsøg kan det ses at den største gevinst have været ved konventionel bearbejdning.

Derved kan det konkluderes, at kW forbruget øges grundet øget belastning, mens energiforbruget (kWh) mindskes per emne, drevet af den kortere bearbejdningstid.

Til denne konklusion, skal der tages forbehold for at:

- At der kun måles/analyseres på selve bearbejdningen. Derved kan den faktiske energioptimering vise sig at være mindre, idet visse baggrundsprocesser i maskinen forbruger uagtet af at maskinen bearbejder eller ej.
- At resultaterne er meget positive, hvilket kan skyldes at der er blevet optimeret på alle værktøjer/bearbejdningsprocesser, hvilket ikke altid er tilfælde i industrien. Derved kan det forekomme at der realiseres mindre forbedringer i industrien.

På Figur 4 ses de bearbejdede test emner fra endefræser forstudiet.



Figur 4 - Testemner fra forstudie med endefræser

6.2 FORSTUDIE 2

6.2.1 Formål

Gennem Forstudie 1 blev det erfaret at effektforbruget (kW) på bearbejdningscentret generelt forøges en smule. Dog blev bearbejdningstiden reduceret forholdsvis mere, hvilket resulterede i et samlede lavere energiforbrug (kWh) per test emne. Efterfølgende er denne viden bragt til anvendelse i industrien, hvor optimeringer og energimålinger på produktionsemner er foretaget, med henblik på at validere at energireduktionen også forplantes i industrien ved modal analyse optimering.

Med afsæt i Forstudie 1, samt hvad der er observeret i industrien, er et ekstra forstudie initieret; "Forstudie 2". Fra industrien har det været udtrykt at bearbejdning i svært bearbejdelige materialer er særlig interessant at få yderligere undersøgt, da 1) optimering via modal analyse er mindre gunstig i disse materialer, samt 2) fordi bearbejdningerne typisk tager længere tid- og belastningen på maskinerne typisk er højere for disse materialer.

Foruden ovennævnte, har det for DAMRC også været interessant at se den energimæssig effekt ved optimering af forskellige typer værktøjer, da der fra Forstudie 1, samt industrioptimeringerne, overvejende har været testet et fåtal af værktøjstyper.

Denne delrapport omhandler således udelukkende aktiviteter og resultater relateret til Forstudie 2, hvor målet har været at afdække om energireduktioner tilsvarende de som er observeret i Forstudie 1 og i industrien, gør sig gældende i et svært bearbejdeligt materiale, samt om der er forskel på reduktionen grundet værktøjstypen.

6.2.2 Testopsætning

Til at teste hvorvidt en energioptimering er muligt, er forstudiet designet om et emne som skal bearbejdes med hhv., 3 fræse værktøjer og 1 hul bor.

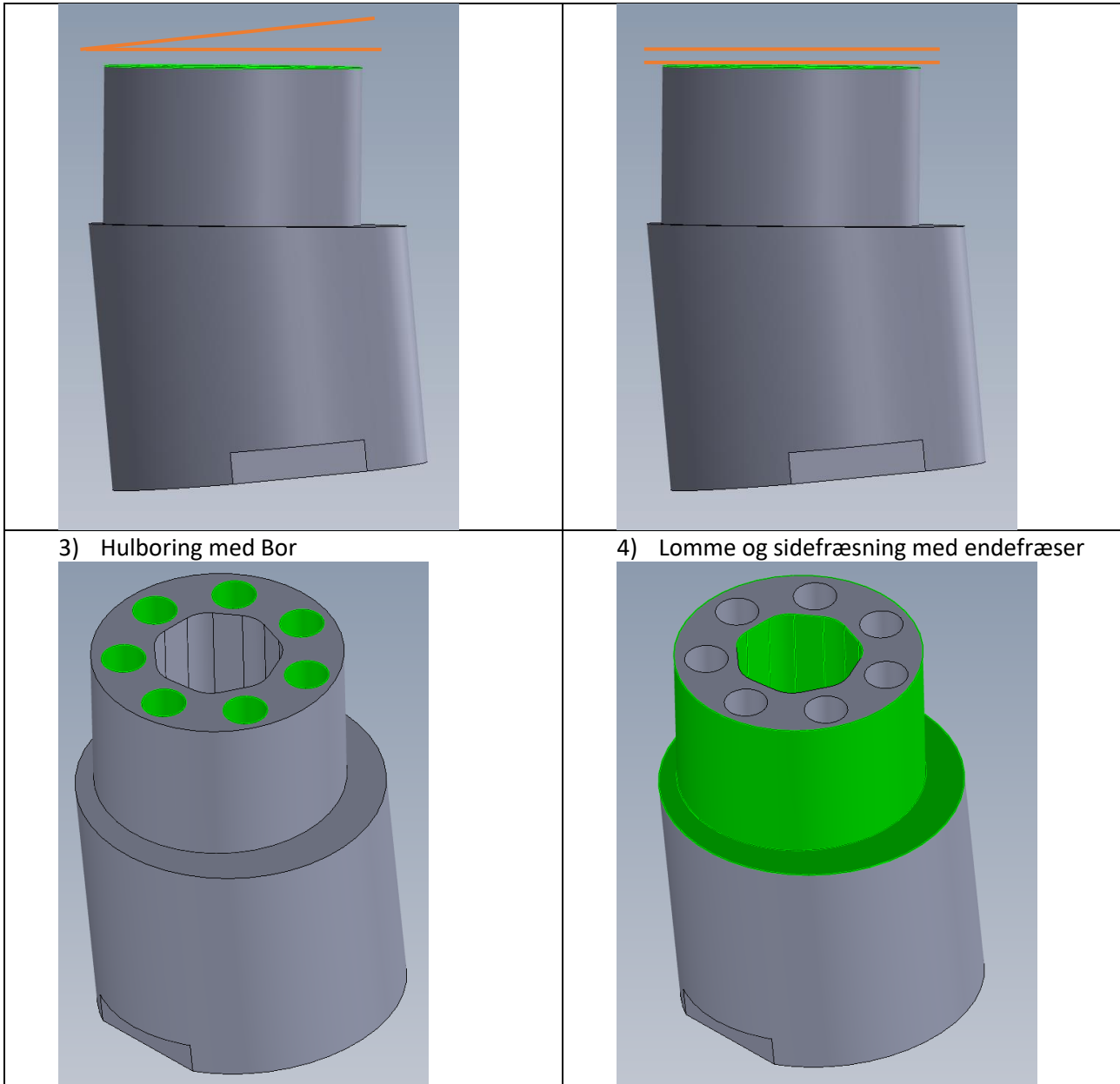
Bearbejdningen gennemføres i Duplex 1.4462, som er et svært bearbejdeligt rustfrit materiale. Det er vurderet at Duplex 1.4462 er en god repræsentant for de svært bearbejdelige materialer, ift. mekaniske karakteristika samt bearbejdelighed. Råemnet er en rundstang (Ø100 mm) i længder af 150 mm.

Det er valgt at 4 forskellige værktøjer skal udføre en given bearbejdning. De fire værktøjer, og den respektive bearbejdningstype som skal produktivitetsoptimeres med henblik på at undersøge energiforbruget er:

- | | | |
|---------------------------------------|---|---------------------------------|
| 1. Knivhoved med karbid platter | → | "vinkel" planfræsning |
| 2. Plattefræser med keramiske platter | → | planfræsning |
| 3. Bor med udskiftelige borespids | → | hul-boring |
| 4. Solid endefræser | → | Dynamisk lomme og side fræsning |

Emnet som skal bearbejdes, samt de forskellige bearbejdninger er visualiseret nedenfor.

1) "Vinkel"-planfræsning med knivhoved	2) Planfræsning med keramisk fræser
----------------------------------------	-------------------------------------



Note:

Under gennemførelsen af forstudiet, blev først gennemført to bearbejdningshvor der blev "indkørt" på test geometrien med de valgte værktøjer. Under indkøringen af værktøjerne viste det sig imidlertid at den oprindelige test geometri og værktøjerne som skulle optimeres, ikke fungerede godt sammen. Derfor blev test geometrien, samt de bearbejdnings værktøjerne skulle udføre revideret, ud fra betragtningen at de ikke påvirker kvaliteten og validiteten af studiet. Alene disse udfordringer illustrerede udfordringen ved bearbejdning i disse svært bearbejdelige materialer.

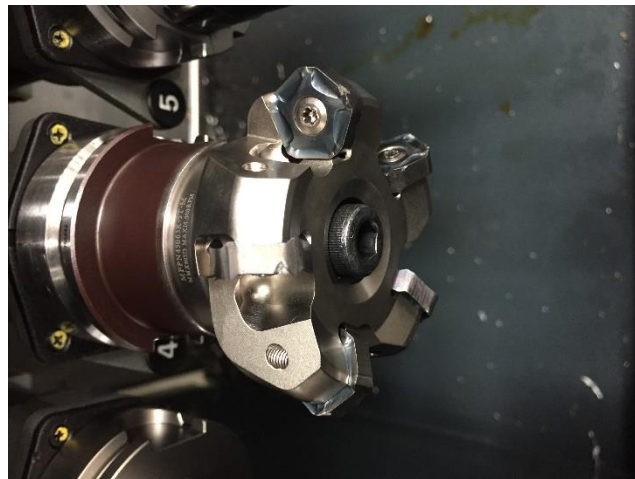
6.2.2.1 Værktøjer

Til testen anvendes følgende værktøjer:

D63 5-skærs Knivhoved

Kyocera Unimerco 63mm 5-skærs knivhoved, med 45 grader vinklet platter. ID# MFPN45063R-5T-M

Kyocera Unimerco 5-sidet vendbare karbid platte med PR1535 coating. ID# PNMU1205ANER-SM



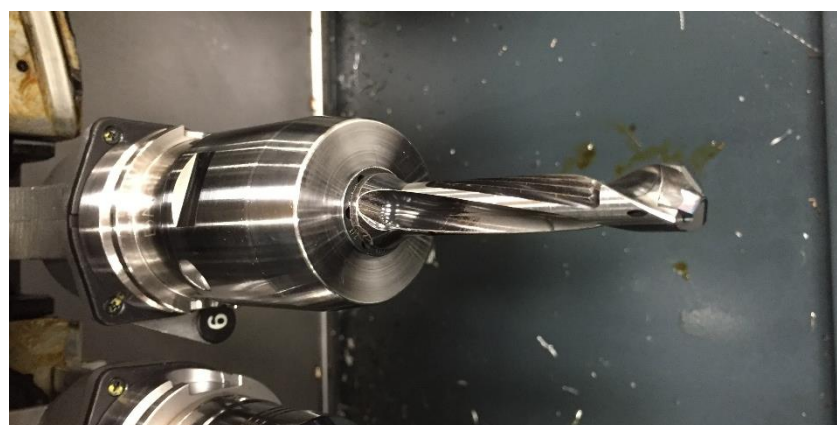
D25 2-skærs Plattefræser

Sandvik Coromant 25mm 2-skærs plattefræser til runde platter. ID# R300C-025A20-09M
Sandvik Coromant 9,523mm keramisk platte. ID# RPGN090300E RPG32A 6060



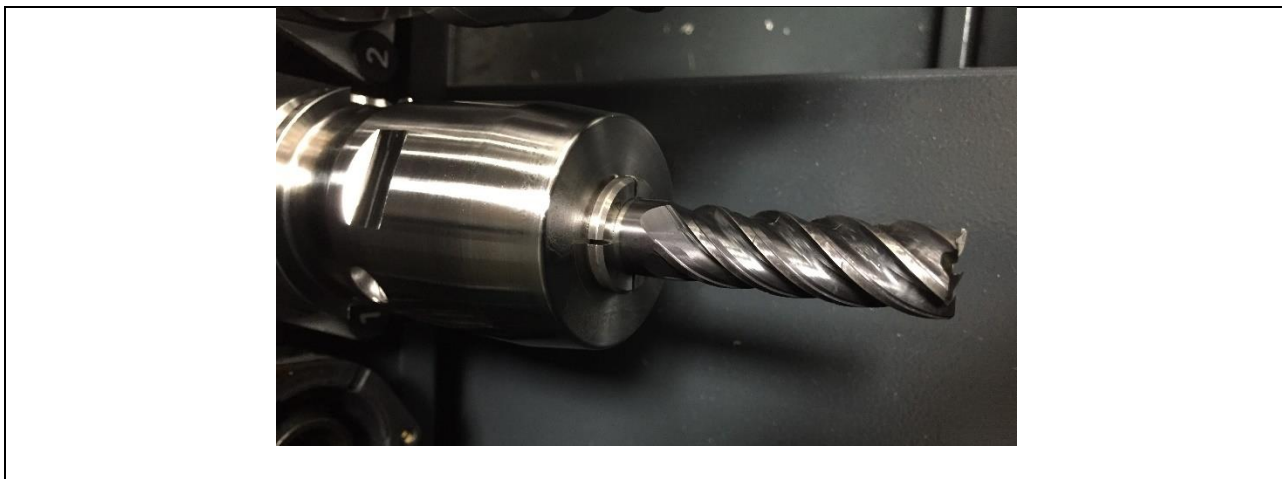
D14,3 Bor med udskiftelig borespids

Kyocera Unimerco Modulær MagicDrill DRA. ID# SF16-DRA140M-5
Kyocera Unimerco 14,3mm Dra insert borespids. ID# 1430M-GM



D16 5-skærs solid endfræser

Kennametal 16mm 5-skærs solid hårdmetals endfræser med spånbryder og KC632M coating. ID# TCDE1600A5CRG



6.2.2.2 Forsøgsstruktur

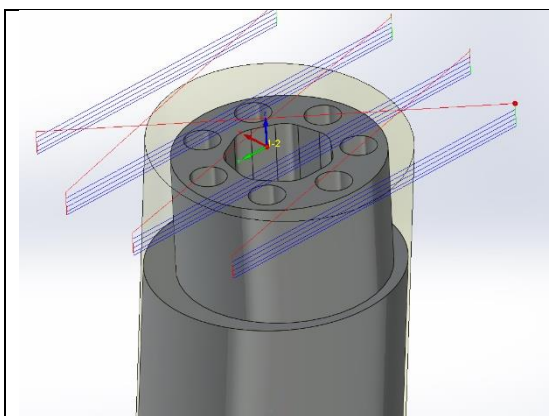
For at kunne undersøge hvilken effekt modal analyse optimering har på energiforbruget, er forsøgsstrukturen opsat på følgende vis.

Der fastsættes base bearbejdningsparametre for de fire værktøjer ud fra det respektive værktøjskatalog samt rådgivning fra den respektive værktøjsleverandør. Disse parametre forsøges indkørt, og evt., justeringer foretages ud fra den betragtning, at bearbejdningen naturligvis skal ske under stabile forhold. Når disse parametre er fastlagt og indkøringsmæssig verificeret, gennemføres modale analyser af de fire værktøjer. Ud fra de opnåede modale resultater (SLD-diagrammer) optimeres bearbejdningen gradvis ved at teste nye optimerede parametre gennem ”indkørings-bearbejdnings”. Når de endelige optimerede parametre er fastsat, gennemføres hele bearbejdningen af test-emnet, først med brug af *base* bearbejdningsparametre hvor det tilhørende energiforbrug måles, efterfulgt af en bearbejdning med de *optimerede* bearbejdningsparametre.

6.2.2.3 Bearbejdningsstrategi og bearbejdningsparametre

Følgende sektion præsenterer bearbejdningsstrategien for de forskellige bearbejdningsprocesser af test emnet, samt de tilhørende bearbejdningsparametre.

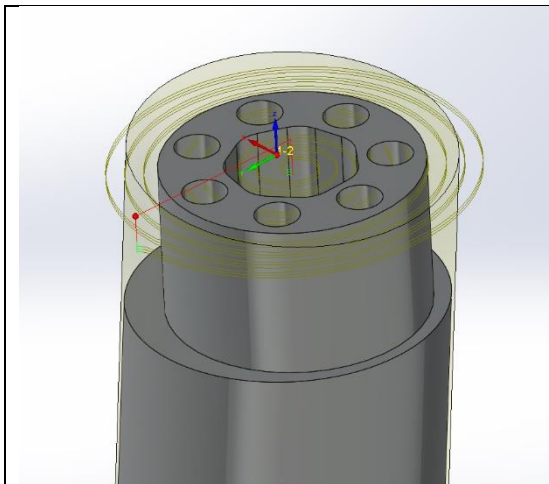
Planfræsning med knivhoved



Billedet visualiserer værktøjsbanerne for planfræsningsprocessen med knivhovedet

Bearbejdningsparametre	Base	Optimerede	
Cutting speed	80	91	m/min
Spindle speed	404	459	rpm
Axial depth of cut	1,5	2	mm
Radial width of cut	44,1	44,1	mm
Feed pr. tooth	0,25	0,25	mm
Material Removal Rate	33,41	50,60	cm ³ /min

Planfræsning med keramisk plattefræser

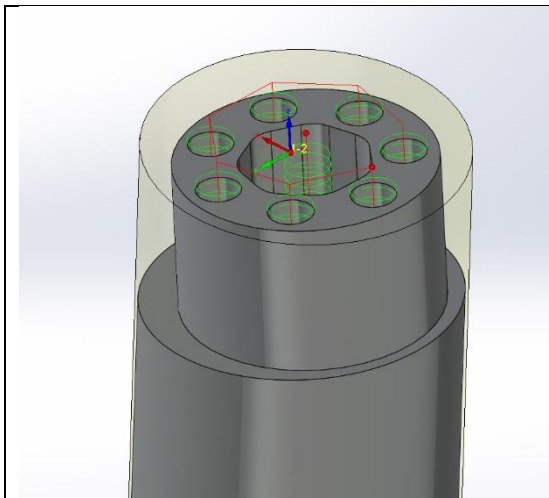


Billedet visualiserer værktøjsbanerne for planfræsningsprocessen med keramiske platter

Bearbejdningsparametre	Base	Optimerede	
Cutting speed	1278	1556,9	m/min
Spindle speed	16272	19823	rpm
Axial depth of cut	1	1	mm
Vinkel spænd	15,5 – 45	21,3 – 66	Grader
Radial width of cut	0,426 – 3,66	0,854 – 7,416	mm
Feed pr. tooth	0,18	0,18	mm
Material Removal Rate	2,5 – 21,44	6,09 – 52,92	cm ³ /min

Note: Keramisk fræsning var opsat som dynamisk fræsning – det medfører at bearbejdningsbanerne lægges således, at der, så vidt muligt, fastholdes et konstant spånindgreb. Dette gøres ved at programmet løbende justerer den radiale indgrebsvinkel inden for et vinkelspænd. Derfor kan det radiale indgreb, samt produktiviteten ikke specificeres som en konstant, men kun som et interval.

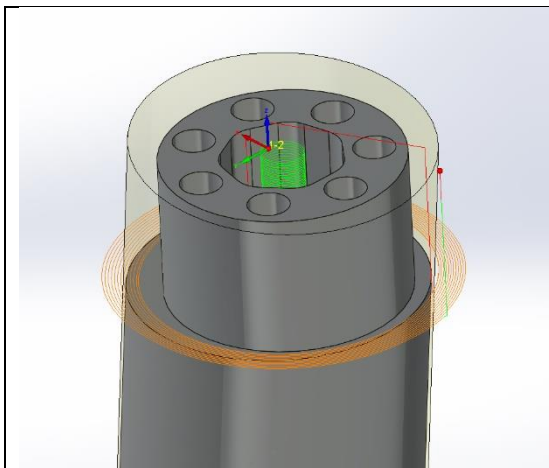
Hulboring med udskifteligt borehoved



Billedet visualiserer værktøjsbanerne for boreprocessen

<u>Bearbejdningsparametre</u>	<u>Base</u>	<u>Optimerede</u>	
Cutting speed	40	51,6	m/min
Spindle speed	890	1148	rpm
Feed pr. revolution	0,30	0,40	mm/rev
Material Removal Rate	42,90	73,79	cm ³ /min

Lomme- og sidefræsning med endefræser



Billedet visualiserer værktøjsbanerne for hhv. lomme- og sidefræsningsprocessen med endefræsere

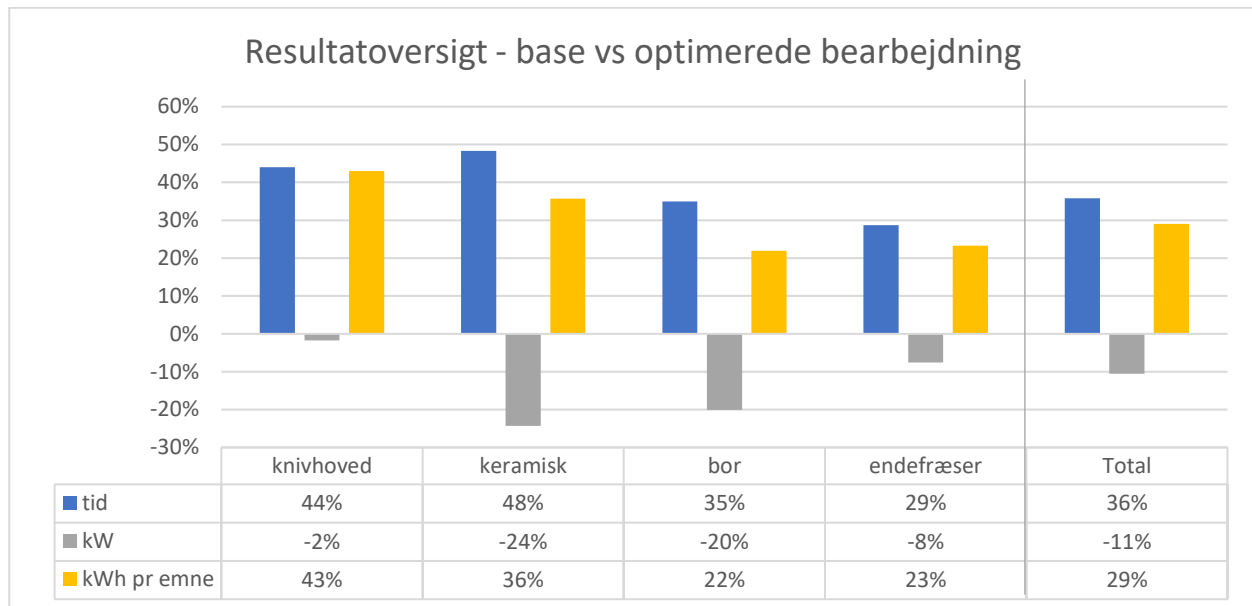
<u>Bearbejdningsparametre</u>	<u>Base</u>	<u>Optimerede</u>	
Cutting speed	60	83,9	m/min
Spindle speed	1193	1669	rpm
Axial depth of cut	46	46	mm
Radial width of cut	1,28	1,28	mm
Feed pr. tooth	0,10	0,10	mm
Material Removal Rate	35,12	49,14	cm ³ /min

6.2.3 Testresultater for forstudie 2

Følgende data er opsamlet ved gennemførelse af forstudieforsøgene:

- Teoretisk optimering for hver bearbejdningstype
- Bearbejdningstid jf. TinyTag Datalogger
- Strømforbrug (l) for bearbejdningen

Med afsæt i disse data er den realiserede tidsoptimering- og energibesparelse beregnet med udgangspunkt i basebearbejdningen. Nedenstående oversigt viser den relative effekt af optimeringen, fordelt på hhv. de fire delprocesser/værktøjer samt fra et "Total" perspektiv, for bearbejdningen.



Figur 5: Diagrammet visualiserer effekten af produktivitetsoptimeringen.

Positiv ændring = øget produktivitet/lavere energiforbrug. Negativ ændring = øget energiforbrug

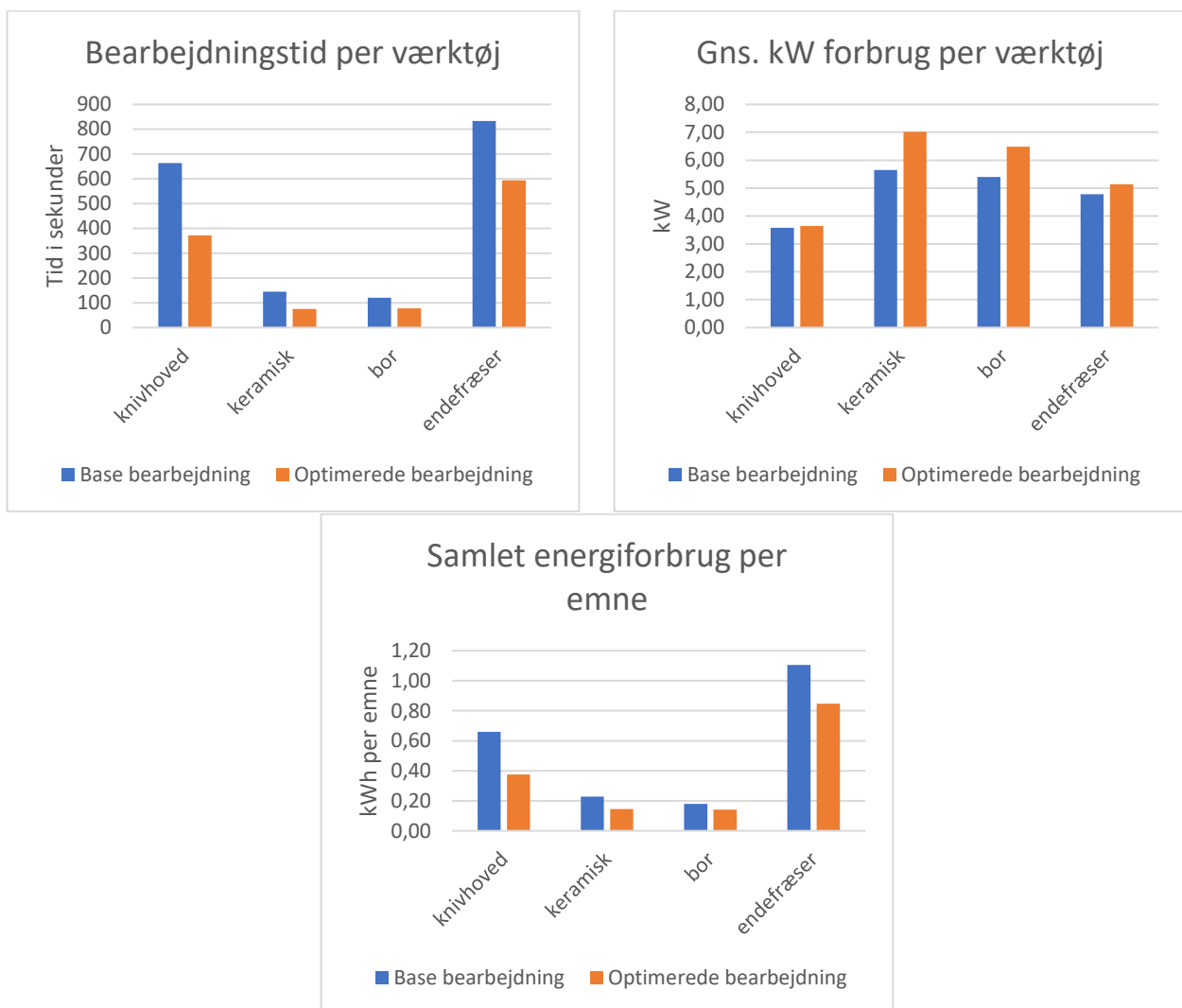
Konklusionen fra Forstudie 1, var at der ved alle de gennemførte optimeringer blev observeret en stigning på effektforbruget (kW) på bearbejdningmaskinen. Denne stigning blev opvejet af den kortere bearbejdningstid som følge af optimeringen vha. modal analyse (TapTest), hvorved det samlede energiforbrug (kWh) pr. emne blev reduceret.

Dette andet forstudie, Forstudie 2, blev initieret ud fra en begrundet mistanke om at energireduktionen pr. emne ved svært bearbejdelige emner formodes mindre gunstig, grundet de mere udfordrende bearbejdningforhold. Studeres resultaterne fra bearbejdningen i Duplex .4462, kan det ses at den samme tendens som blev observeret ved Forstudie 1 også er til stede ved Forstudie 2. Af Figur 5, "Total", kan det ses hvordan bearbejdningstiden for emnet er reduceret med 36%, hvilket effektivt resulterer i en energireduktion pr. emne på 29%. Fra det store perspektiv er tendensen som blev observeret i Forstudie 1, den samme ved dette forstudie.

Det er yderst interessant at, hvordan kW forbruget for hhv., knivhovedet og endefræseren er øget meget begrænset (2- & 8%), mens kW forbruget for den keramiske fræser- og boreprocessen øges betydeligt med hhv. 20- og 24%. For energiforbruget pr emne resulterer det i, at besparelsen er mindre lukrativ, omend reduktionen pr. emne stadig er på 29%, svarende til en reduktion på 0,62 kWh.

Figur 6 viser hhv., tidsforbruget og det faktiske kW og kWh pr. emne forbrug. Det som er værd at bemærke er, bearbejdningstiden for de respektive processer samt det gennemsnitlige kW forbrug pr. proces/værktøj. Her ses det nemlig at hhv., planfræsningen med keramiske platter og boreprocessen begge forholdsvis er mere energikrævende processer, men at de ved forsøget har haft forholdsvis kort bearbejdningstid. Derved fremstår disse to processer (keramisk fræsning og boreprocessen) ikke som to energikrævende processer, til trods for at processerne i realiteten er de mest energikrævende fra et kW perspektiv.

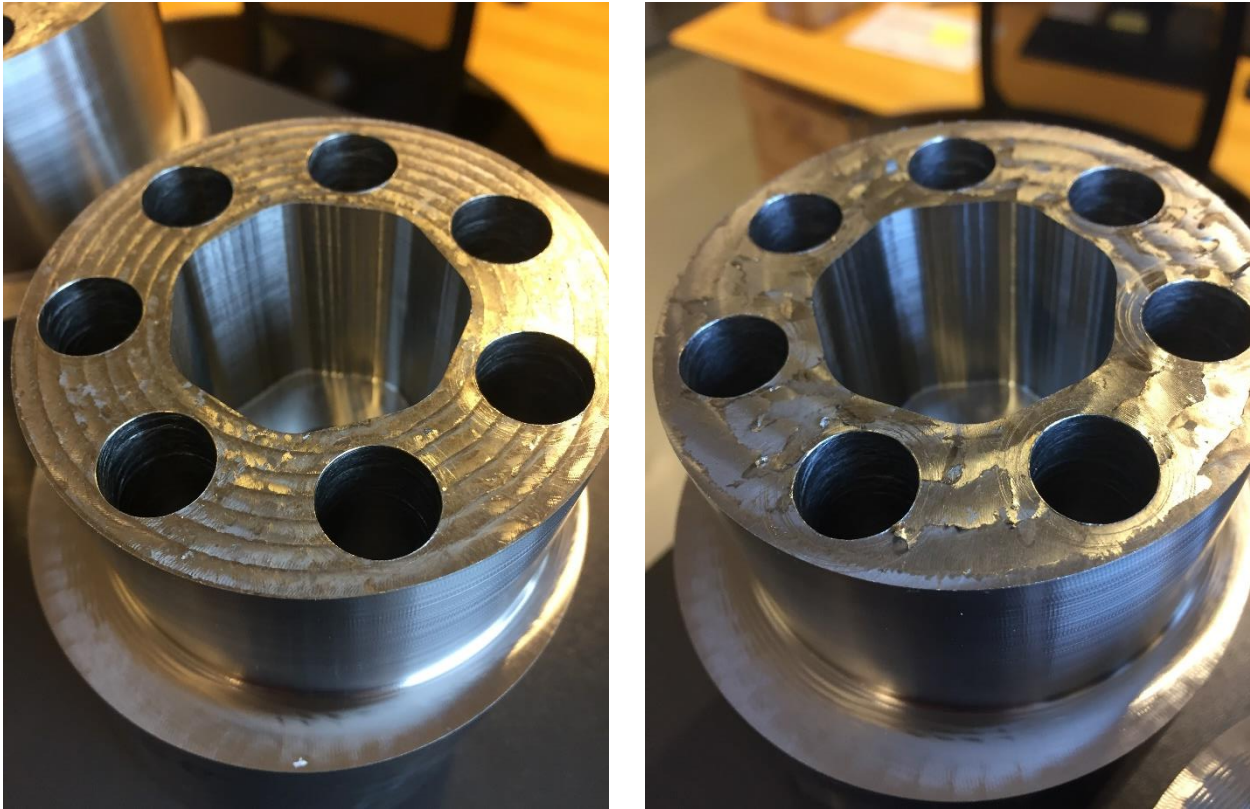
Alene ved at analysere bearbejdningstiderne, samt energiforbruget relateret til Forstudie 2, kan det altså udledes at der ikke nødvendigvis er en sammenhæng mellem gunstigheden af energireduktionen og materialets bearbejdighed. Dog viser resultaterne i stedet en mulig sammenhæng mellem bearbejdningens karakteristika (bearbejdningstype, fx fræse vs. boreproces) og størrelsen på energireduktionen pr. emne, og/eller en sammenhæng mellem udnyttelsen af bearbejdningens kapacitet (spindel hastighed, moment og/eller kraft) og energiforbruget.



Figur 6: Sammenligning af det faktiske forbrug, hhv. før og efter optimering med modal analyse.

Et element som er værd at tage i betragtning vedr. ovenstående udledning er, at alle processerne viste sig udfordrende ift., bearbejdning i materialet. Særligt planfræsningen med keramiske platter var udfordrende, både for base-processen, såvel som den optimerede proces. Billeder af emnerne for bearbejdning med hhv., base- og optimerede parametre kan ses på Figur 7. Her er det tydeligt at den opnåede

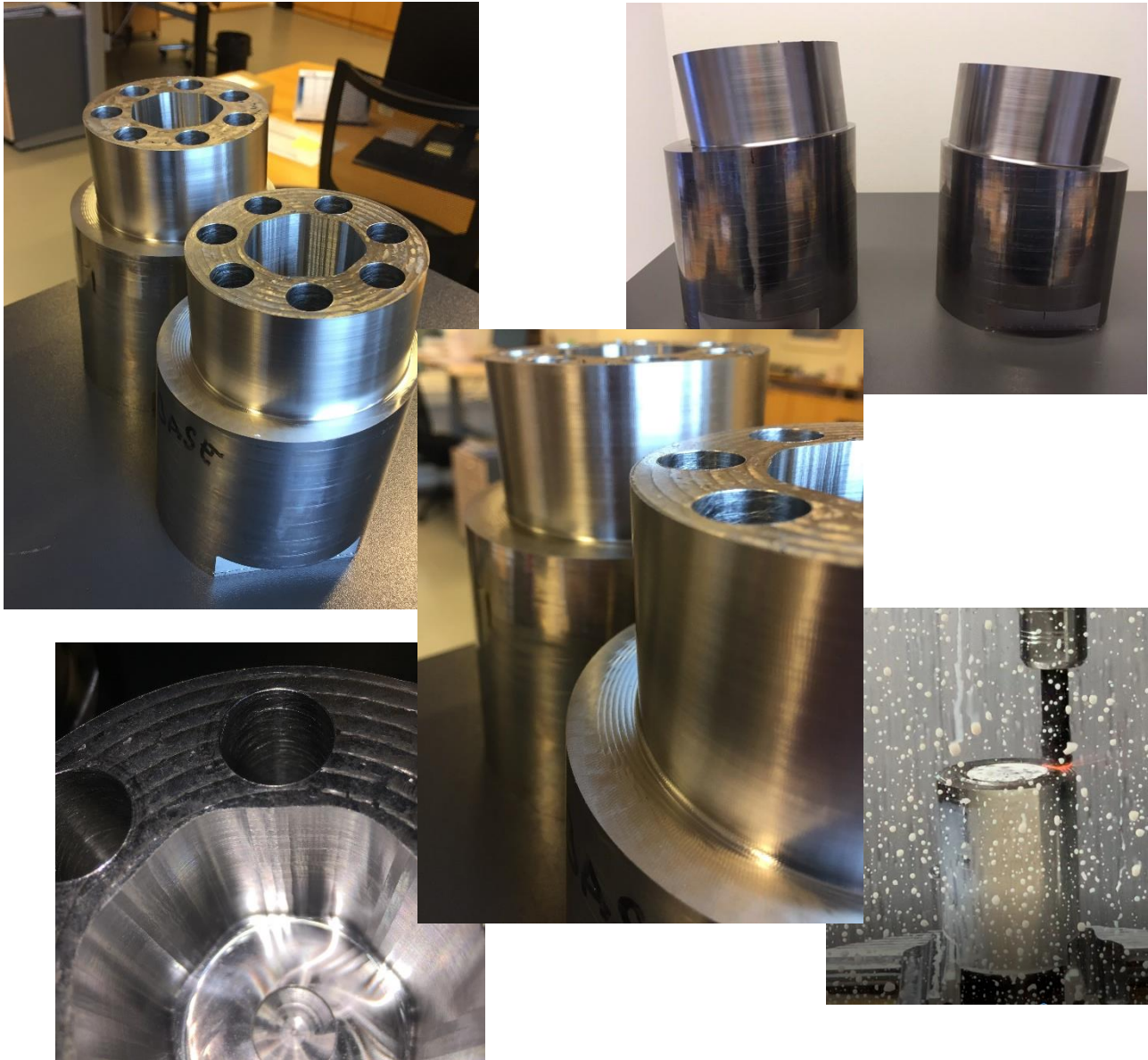
overfladekvalitet ikke er optimal, hvilket tillige indikerer at noget i bearbejdningen ikke har kørt som det burde. Med det in-mente kan det således diskuteres hvorvidt strømmålingerne for bearbejdningsprocessen med keramiskfræsning er valid, eller om denne sub-optimalitet har forvredet resultatet.



Figur 7: Venstre - slutemne efter base bearbejdning. Højre - slutemne efter optimerede bearbejdning

Opsummeret:

- Studiet har vist at der for svært bearbejdelige materialer er mulighed for at opnå en væsentlig energireduktion pr. emne
- Studiet har desuden, ved at teste flere værktøjer, givet indikationer for at energireduktionen har en stor sammenhæng mellem det værktøj- og/eller den proces der skal køres. Dette må forventes at hænge sammen med belastningen på spindlen, og derved spindlens andel af det samlede strømforbrug for maskinen.



Figur 8: Testemner og billeder fra FORSTUDIE 2

6.3 SLUTSTUDIE

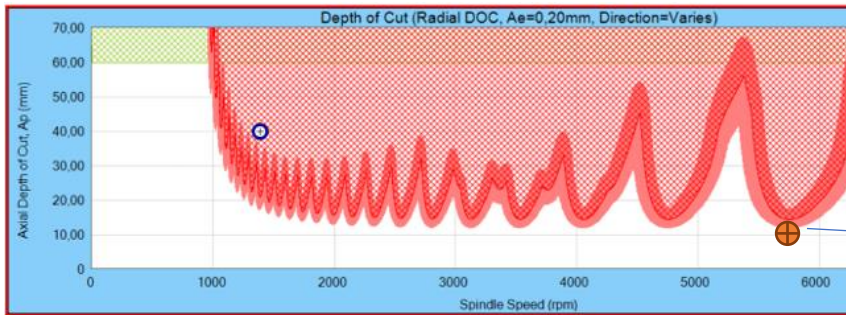


6.3.1 Formål med slutstudie

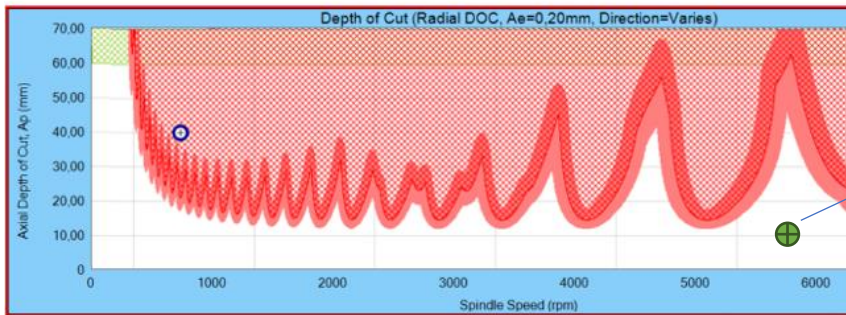
I forbindelse med de gennemførte forstudier, samt industrielle komparative aktiviteter i projektet er det blevet bekræftet at det er muligt at optimere bearbejdningsprocessers produktivitet, og samtidig samlet set opnå en energireduktion per emne. Hverken forstudierne eller industribesøgene har imidlertid afdækket om denne energi reduktion alene skyldes kortere bearbejdnings tid og derved en reduktion af energiforbruget til støtteprocesser, eller om det også skyldes den øgede stabilitet, forårsaget af mere stabile bearbejdningsparametre.

Hypotesen er her, at energiforbruget mindskes ved at bearbejde ved maksimal stabile parametre, da der teoretisk opnås lavere skærekrafter som følge heraf. Dog er det også vigtigt at anerkende indflydelsen af støtte processer, fx køle-smøremiddelsystemet, hvilket følgende studie også, potentielt, vil give indsigt i.

Formålet med dette slutstudie er således at undersøge hvor stor indflydelse det har at bearbejde ved hhv. optimal og sub-optimal stabilitet. Det vil vi gøre ved at måle energiforbruget for hhv. en stabil- og sub-stabil bearbejdning, hvor alle bearbejdningsparametre er ens (dybde, tilspænding, hastighed, program, mv.), men hvor vi ved at justere værktøjsudhængen kan justere maskindynamikken. Herved opnås hhv. stabile og sub-stabile bearbejdningsforudsætninger, hvorved det kan testes hvilken effekt dette har på energiforbruget – og afledt deraf de påviste optimeringer fra de forrige forsøg.



Sup-Optimal
stabilitet



Optimal
stabilitet

6.3.2 Testopsætning

Præmissen for testopsætningen har været at have tæt på konstant belastning på spindlen (fræsere) og således minimere andelen af "ildgang" (bevægelse af fræsere i luften, uden indgreb i emnet) under forsøget. Dette begrundes med ønsket om at have så højt en andel af energiforbruget relateret direkte til spindlen, ud fra den præmis at risikoen for "at måle på det forkerte" herved mindskes – og derved reduceres risikoen for at drage forkerte konklusioner fra et validitetsperspektiv.

Til studiet bearbejdes i to materialer: AW5083 (aluminium) og C45E (stål), med hhv. en 10mm endfræser til aluminium (Kennametal KOR5 10mm endmill - ACDD1000A5CCS) og til stål (Kennametal Harvi II 10mm endmill - TCDE1000A5CRE).

For hver endfræser gennemføres en stabilt og sub-stabil bearbejdning, hvor bearbejdningsprogrammet (CAM-programmet) er identisk. For begge materialer bearbejdes der med metoden "sidefræsning".

Oprindeligt var studiet designet således bearbejdningerne i hhv. stål og aluminium var identiske i bearbejdningsstrategi og CAM-opsætning (med undtagelse af skæreparametre). Efter at have gennemført studiet i aluminium, viste studiet i stål dog at den oprindelige bearbejdningsstrategi/CAM-opsætning ikke var mulig at gennemføre, grundet værktøjsbrud som følge af bearbejdningsstrategien. Således varierer bearbejdningerne i hhv. aluminium og stål fra hinanden og vil derfor IKKE være 1-til-1 sammenlignelige. Dog bygger de på identiske principper, hvilket skulle muliggøre sammenholdelse af resultaterne.

Den specifikke bearbejdningsstrategi, samt råemne og emne udformning for hhv. aluminium og stål fremgår af afsnittet Bearbejdningsstrategi og bearbejdningsparametre.

6.3.2.1 Værktøjer

De to værktøjer benyttet til studiet kan ses her. Begge værktøjer er 10mm i diameter og har 5 tænder.



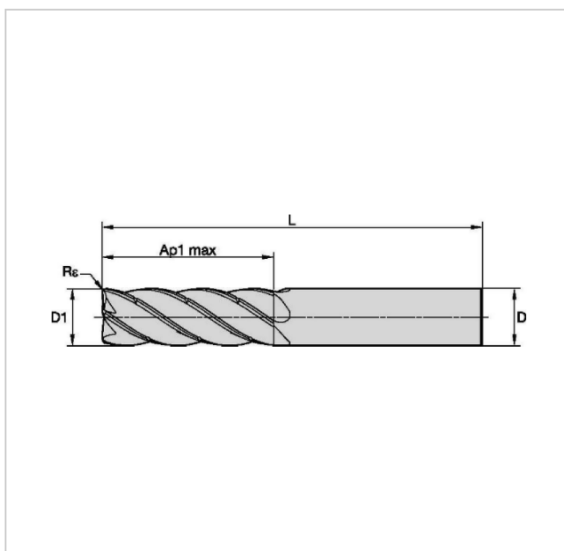
High-Performance Solid Carbide End Mills ▪ HARVI™

HARVI II Trochoidal ▪ TCDE ▪ Unequal Flute Spacing

Metric Inch

SAP Material Number	6274622
ISO Catalog Number	TCDE1000A5CRE
Grade	KC643M
Adapter Style Machine Side	Straight-Cylindrical
[D1] Effective Cutting Diameter	10.0000
[D] Adapter / Shank / Bore Diameter	10.0
[AP1MAX] 1st Maximum Cutting Depth	30.0000
[L] Overall Length	80.0000
[Re] Corner Radius	0.5000

[See all Product Variants](#)



High-Performance Solid Carbide End Mills

KOR™ 5 ▪ 5 Flutes ▪ Straight Shank

Metric Inch

SAP Material Number	6665604
ISO Catalog Number	ACDD1000A5CCS
Grade	K600
Adapter Style Machine Side	Straight-Cylindrical
[D1] Effective Cutting Diameter	10.0000
[D] Adapter / Shank / Bore Diameter	10.0
[AP1MAX] 1st Maximum Cutting Depth	30.0000
[L] Overall Length	75.0000

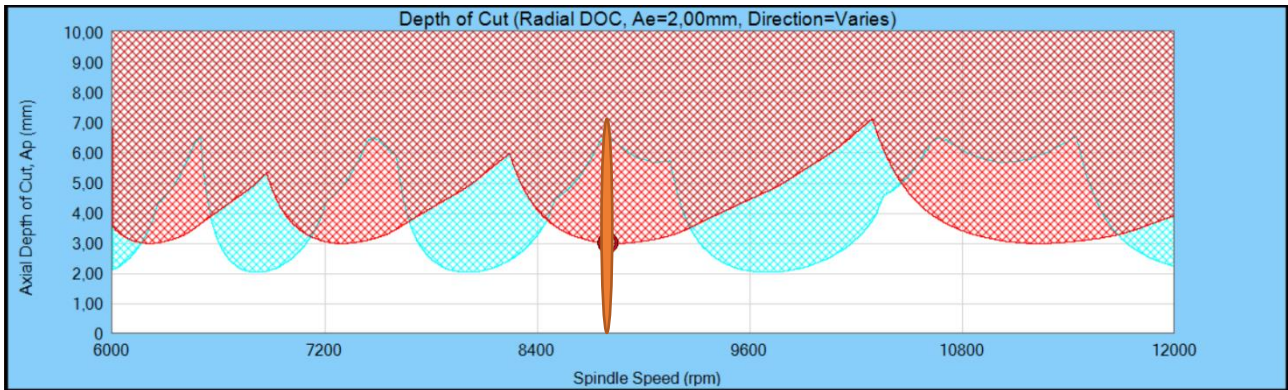
[See all Product Variants](#)

Til forsøget er der foruden ovenstående værktøjer benyttet en hydraulisk holder fra Sandvik Coromant - 930-I40-HD-20-097 og en CF10 bøsning (coolant thought). Studiet er gennemført på en 5-akset DMU80T med en 12000rpm spindel.

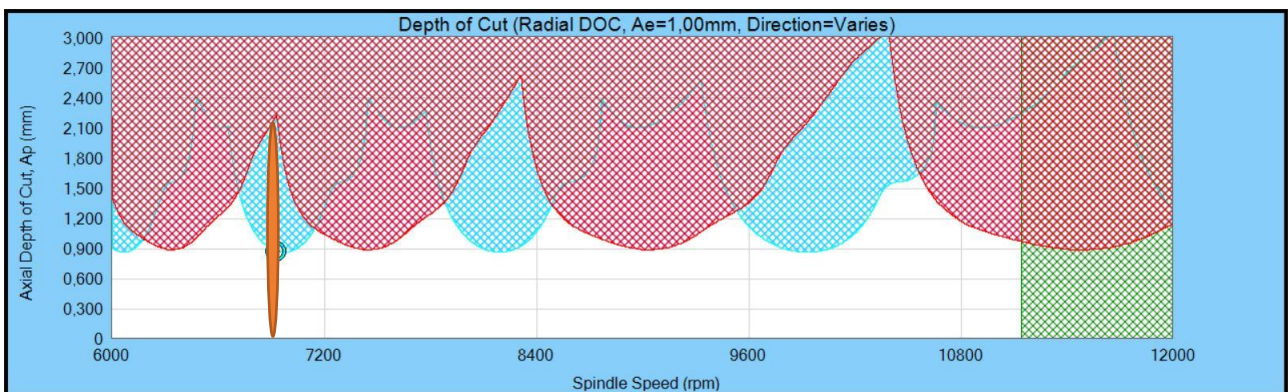
6.3.2.2 TapTest og fastlæggelse af spindelhastighed

Til at fastslå spindelhastighed og udhæng benyttes DAMRC's TapTest udstyr, idet der ønskes at finde én hastighed som ved et givent værktøjsudhæng er stabil, mens hastigheden er "sub-stabil" ved et andet udhæng.

Metodikken for at finde hhv. udhængsværdier samt spindelhastighed, har været at tage en TapTest måling for udhæng 40mm. Med dette udhæng som udgangspunkt gennemføres et antal TapTest målinger ved øvrige udhæng over- og under udhæng 40mm. For begge værktøjer resulterede disse test i brugen af hhv. udhæng 39 og 43mm. Stabilitetsdiagrammet for KOR5 aluminiums fræseren fremgår af Figur 9, mens diagrammet for HARVI II stål fræseren fremgår af Figur 10.



Figur 9: Stabilitetsdiagram for HARVI II stål fræser. Blå kurve er for udhæng 39mm. Rød kurve er for udhæng 43mm. Orange markering angiver den valgte spindelhastighed til studiet



Figur 10: Stabilitetsdiagram for HARVI II stål fræser. Blå kurve er for udhæng 39mm. Rød kurve er for udhæng 43mm. Orange markering angiver den valgte spindelhastighed til studiet

Som det fremgår af Figur 9 benyttes der til studiet i aluminium en spindelhastighed på 8798 rpm. Til studiet i stål benyttes spindelhastigheden 6927 rpm.

6.3.2.3 Bearbejdningsstrategi, råemne og emne udformning

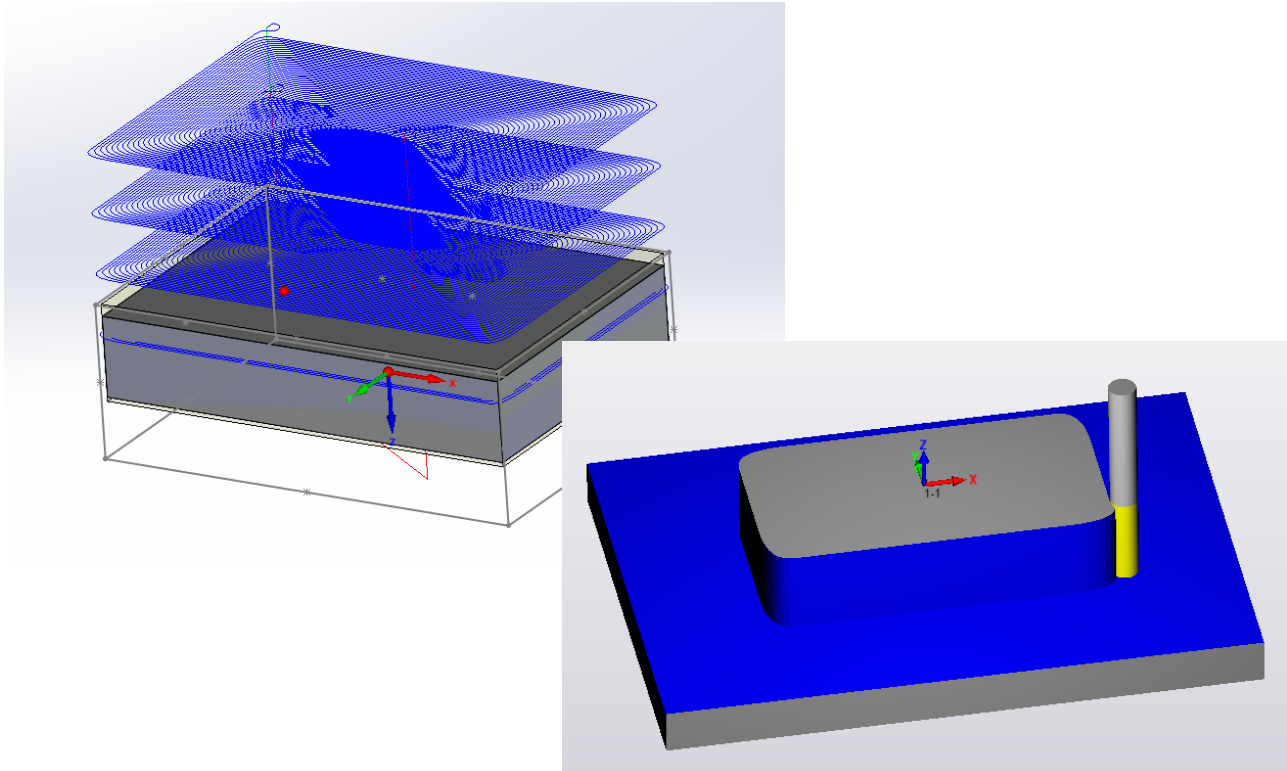
Følgende sektion præsenterer bearbejdningsstrategien, råemne og emne udformning for bearbejdningen i hhv. aluminium og stål.

Aluminium

Råemnet til forsøgene i aluminium har et tværsnit på 150 x 210mm (XY-planet), samt en højde på ca. 150mm.

CAM-programmet er opsat i SolidCAM som en "facemill" operation, hvor bearbejdningsstrategien "spiral" er anvendt med "blødt indløb", niveau 2. Med afsæt i skæredataanbefalinger fra Kennametal, bearbejdes der med 20% radielt indgreb (A_e 2mm / 80% overlap), ved fuldt aksialt indgreb (A_p 30mm), samt en tilspænding per tand, f_z , på 0,07mm/tand. Spindelhastigheden på 8798 rpm, er fundet via stabilitetsdiagrammerne målt for værktøjet ved udhæng 39 (stabil) og 43 (ustabil).

For at opnå tilstrækkelig bearbejdningsstid bearbejdes 4 lag materiale (i alt 120mm) per test. Følgende figur visualiserer værktøjsbanerne.



Stål

Råemnet til forsøgene i stål har et tværsnit på 150 x 210mm (XY-planet), samt en højde på ca. 150mm.

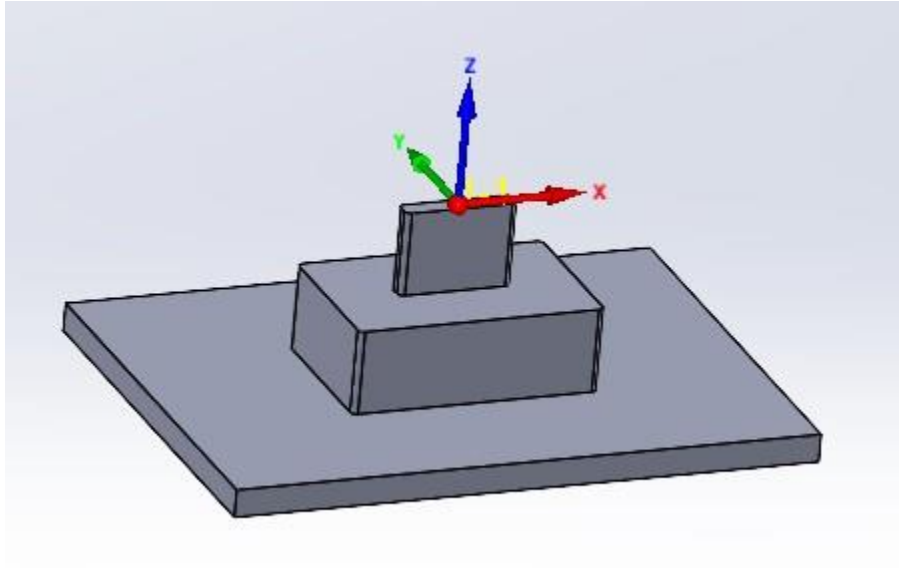
Oprindeligt var forsøget hertil designet således der via en spiral værktøjsbane skulle fjernes 3 lag materiale á hver 30mm efter samme spiral strategi som anvendt ved aluminiums-studiet. Under indkøring af emnet brækkede værktøjet dog som følge af emne afbøjning i center af emnet (se Figur 11). Derfor blev bearbejdningsstrategien ændret for studiet i stål.



Figur 11: Værktøjsbrud under indkøring i stål

Den nye "teststrategi" i bearbejdningen af stål tager udgangspunkt i at undgå at bearbejde emnet når det bliver tyndvægget og derved afbøjer.

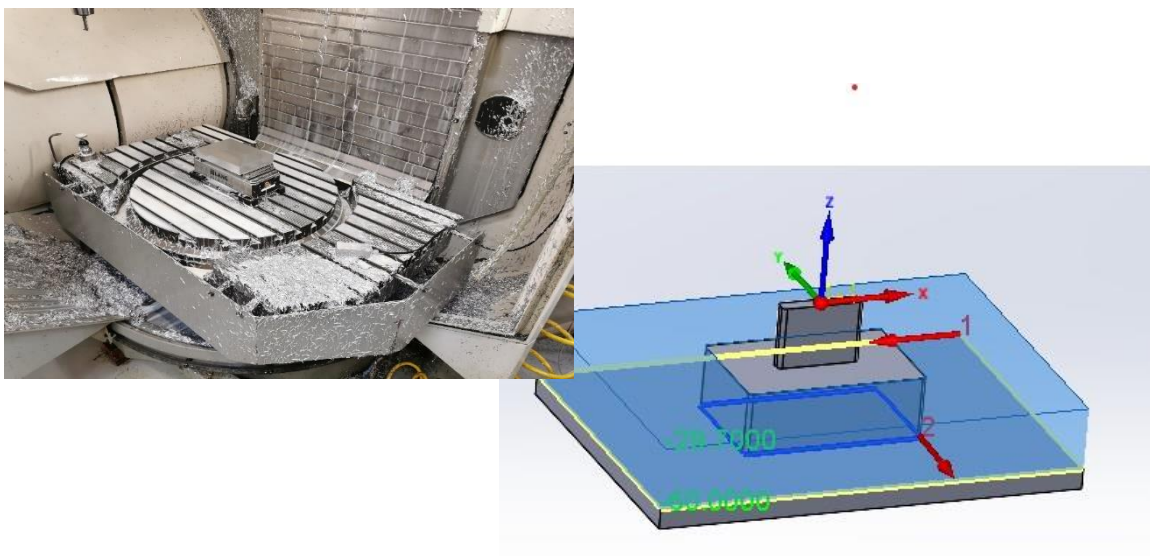
For at kunne dette bruges følgende emne udformning, hvor der bearbejdes 2 lag/niveauer per test.



Figur 12: Emne udformning til forsøg i stål

CAM-programmet opsat til bearbejdning af denne "geometri" er 2D-iMachine, som baserer sig på den dynamiske fræsestrategi, en strategi som optimerer værktøjsbanen til at have konstant spåntykkelse, mhp. maksimal udnyttelse af fræseren. Opsætningen af iMachine CAM-programmet tager udgangspunkt i "bearbejdningniveau" 3. Det giver en A_e mellem 0,076 og 0,274mm, samt en tilspænding på 0,16 mm/tand. Spindelhastigheden er fastsat til 6927 rpm, baseret på stabilitetsdiagrammet.

Se Figur 13 for opdeling af lag, mf., ifm. bearbejdningen af stålemnet.



Figur 13: Opdeling af lag på stål emne til slutstudie

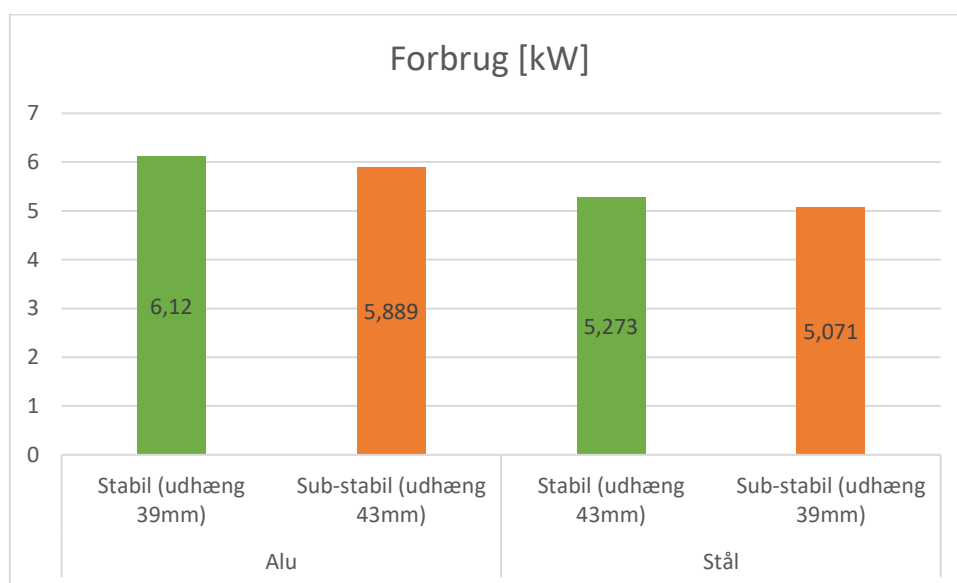
6.3.3 Testresultater for slutstudiet

Følgende data er opsamlet ved gennemførelse af forstudieforsøgene:

- Bearbejdningstid jf. TinyTag Datalogger
- Strømforsøg (I) for bearbejdningen

Med afsæt i disse data er effekten af stabil vs. sub-stabil bearbejdning analyseret, jf. ovenstående fremgangsmåde.

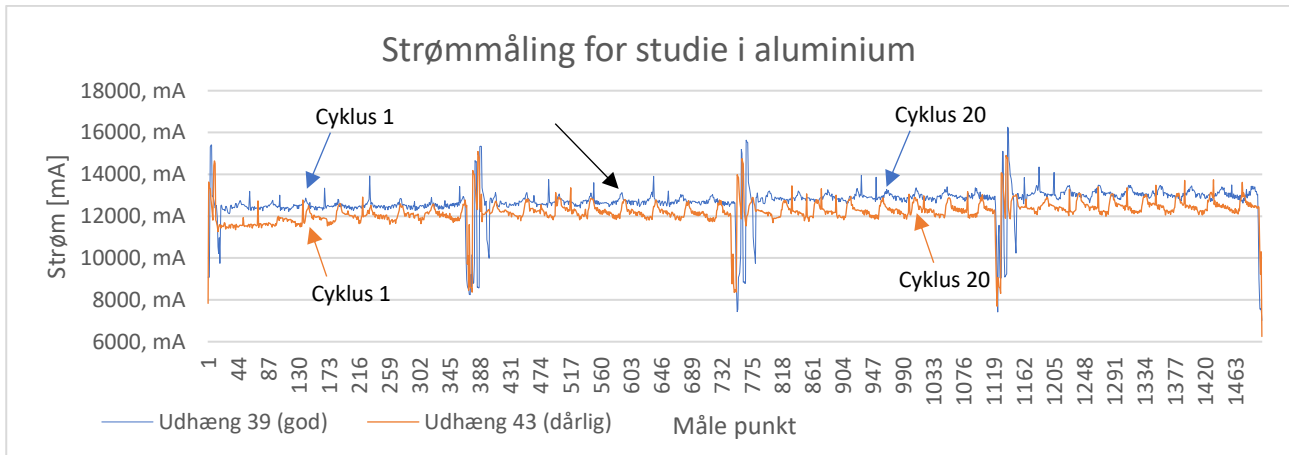
Ved omregning til kW forbrug, ses det – mod forventning – at kW forbruget for begge de to stabile bearbejdninger er større end kW forbruget for de sub-stabile bearbejdninger. Dette danner umiddelbart grundlag for at forkaste hypotesen om reduceret energiforbrug ved stabile bearbejdninger. Dog rejser resultatet samtidig en række ubesvarede spørgsmål omhandlende hvorfor resultatet er som det er.



Figur 14: kW forbrug for bearbejdningsstudierne

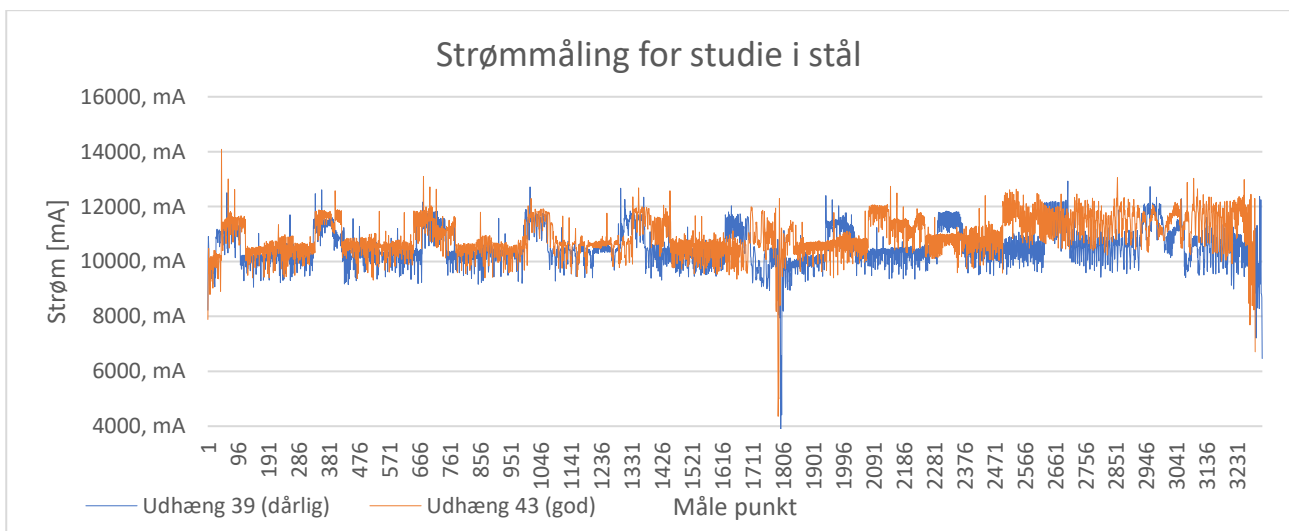
For at opnå indledende indsigt i dette visualiseres de faktiske strømmålinger for bearbejdningsstudiet i hhv. aluminium i Figur 15 og stål i Figur 16.

For forsøgene er det først og fremmest værd at bemærke de udsving som ses i strømmålingen. De tre store udsving fra studiet i aluminium repræsenterer hver et lag skifte. Dog er de små udsving langt mere interessante (markeret med sort pil), da de, efter nærmere analyse, hænger sammen med de periodiske start- og stop af kølesmøremiddel pumpe systemet som styres af "fill-level sensorer". Her er således en væsentlig kilde til usikkerhed, da det ikke er garanteret at pumpe cyklusserne kører identisk og samme antal gange under hhv. det ene og det andet forsøg. Bl.a. ses der en svag forskydning i studiet i aluminium, hvor der gennem 20 pumpe cyklusser under forsøgsperioden er sket en forskydning på én pumpe cyklus, således kølesmøremiddelpumperne kører minimum en ekstra sekvens ved udhæng 39 (stabilt udhæng) ift. udhæng 43 (ustabilt udhæng).



Figur 15: Strømmåling for bearbejdningsstudiet i aluminium

Foruden disse pumpecykler ses der en generel forskydning af strømforbruget mellem de to bearbejdningscyklusser. Mens den eneste kontrollerede forskel mellem bearbejdningerne er værktøjsudhængen – og derved processtabiliteten – kan det ikke afskrives om det lavere energiniveau alene kan tilskrives processtabiliteten, eller om andre aspekter påvirker forbruget.



Figur 16: Strømmåling for bearbejdningsstudiet i stål

For bearbejdningen i stål ses samme tendens mht., pumpecyklerne. Mens der ved bearbejdning af "lag 1" ikke er samme tydelige forskel i strømforbrug som observeres for forsøget i aluminium, ses det at forbruget stiger midtvejs i bearbejdningen af lag 2 ved udhæng 43. Denne stigning blev også registreret ifm. monitorering af spindelbelastningen, som viste en stigning i belastningen fra ca. 24-33% til ca. 30-36%, hvilket med stor sandsynlighed hænger sammen med et stigende værktøjsslid.

Strømmålingerne viser således for studierne i hhv. aluminium og stål at der indikativ er mange processer, foruden selv bearbejdningsprocessen, som påvirker hvad det faktiske energiforbrug har været.

Således kan der af det gennemførte slutstudie udledes flere plausible konklusioner, afhængig af perspektiv og betragtninger. To af de mulige vil sige at;

"... sub-stabile bearbejdningsforudsætninger er, isoleret set, tilsyneladende mindre energiforbrugende end stabile bearbejdningsforudsætninger."

Samtidig kan der udledes en alternativ konklusion om at;

"... indflydelsen af hhv. stabile og sub-stabile bearbejdningsforudsætninger er så lille at der ikke i en samlede analyse af energiforbruget på bearbejdningsmaskinen kan konkluderes om den ene bearbejdningsforudsætning er mere energieffektiv end den anden. Studiet har imidlertid vist at både støttestrukturer, samt elementer som værktøjsslid har en væsentlig indflydelse på energiforbruget."

Ovenstående konklusioner påpeger således at der endnu er mange ubesvarede spørgsmål ift. hvordan energiforbruget påvirkes under forskellige forudsætninger og parametre, samt at det i en vis udstrækning er påvirket af flere ukontrollerede processer.

6.4 Grundlæggende forsøgsprotokol for For- og Slutstudie

6.4.1 Strømmåling

Til at måle strømforbruget ved bearbejdningsmaskinen, bruges en TinyTag datalogger fra Gemini Data loggers (TinyTag TV-4804), som monteres direkte på faserne fra bearbejdningsmaskinens hovedkabel (en datalogger pr. fase).



Loggeren måler strømmen (I) gennem kablet, og er indstillet til at måle 1. gang i sekundet (enden af hvert sekund) i miliampere (mA).

Da bearbejdningsmaskiner kører på 3 faser, blev der i de første 4 forsøgssekvenser (Alu 7075-T65 og GJS-500-C7) under Forstudie 1 målt med tre loggere – én på hver af de tre faser (to ekstra loggere venligst udlånt af Dansk Energirådgivning). Resultaterne heraf viste, at hver fase udgjorde mellem 30-36% af det samlede kW forbrug (totalt 100%). Desuden kunne det ses på de fire målinger at variationen i strømforbruget var +/- 1% for hvert kabel. Derfor blev det besluttet for de resterende forsøg i forstudiet, samt for industriforsøgene, at måling på én fase er tilstrækkeligt som repræsentant for bearbejdningsenergiforbrug.



Til beregning af kW forbruget, 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 faser/faserne
- U [V]: Der antages en gns. Spænding på 400V
- Φ (effekttab): 0,8 ud fra antagelsen om at effekttabet ca. passer med denne værdi.

Konverteringen fra effektforsbruget (kW) til energiforsbruget (kWh) regnes ved:

$kWh = kW * t$, hvor:

- t [timer]: tid angivet i timer

6.4.2 Emneopspænding

Råemnerne opspændes på emnets lange led i et Lang Makro-Grip fixtur. Siderne præges for at øge stabiliteten af fixtureringen, samt sikre ensartet opspænding af råemnerne.



6.4.3 Programmering

CAM-programmet SolidCAM er brugt til programmering bearbejdningerne.

7 WP4: Komparativ analyse af initierende og optimerede bearbejdningsprocesser:

I WP4 gennemføres den komparative analyse af bearbejdningsprocesser i den danske bearbejdningsindustri, der er kernen i nærværende projekt. Gennem optimeringer vha. modal stabilitetsanalyse og skærebaneanalyse vurderes det, om optimeringerne er en effektiv metode for energiproduktion af industriens bearbejdningsprocesser.

Den komparative optimeringsmetode som er benyttet hos industrien, er den samme som er benyttet under For- og Slutstudierne. Metoden består i måling af strømforbruget for en given proces eller emne, FØR optimering. Herefter gennemføres en analytisk modal stabilitets analyse, såvel som skærebaneanalyse med henblik på at identificere optimeringsmuligheder og herfra optimere processen – typisk med målet om reduceret bearbejdnings tid. EFTER optimeringen er gennemført, foretages en ny strøm måling på den optimerede proces under tilsvarende rammebetingelser som ”FØR-målingen”. Disse strømmålinger danner sammen med optimeringsresultatet grundlaget for komparativt at sammenligne effekten af optimeringsindsatsen – både fra et produktivitetsperspektiv, såvel som et energiperspektiv.

Et væsentligt succeskriterie for denne arbejdsplan har været industriens villighed til at deltage, ved at stille produktion, maskiner og mandskab til rådighed. Her er der gennem DAMRC's- og Dansk Energirådgivning's netværk identificeret potentielle industrivirksomheder med relevante produktionsprocesser, hvorefter der har været indledt kontakt med disse potentielle projektdeltagere, mhp., at opnå aftaler ift. deltagelse. Disse har været et mix af små, mellemstore og store virksomheder – med en overvægt af små og mellemstore virksomheder, hvilket svarer til den typiske størrelse af bearbejdningsvirksomheder.

DAMRC har under hvervingsprocessen erfaret at det har været svært at etablere deltagelsesaftaler hos virksomhederne, grundet travlhed i branchen og senest grundet Covid-19 – det er dog lykkedes at opnå aftaler med 12 industrivirksomheder, hvilket har resulteret i 15 optimeringsforsøg, og 11 har bidraget med reelle resultater til projektet ift. energidata. Hermed blev målet i projektet med 10 virksomheder opnået. Foruden de gennemførte industribesøg, var yderligere to virksomheder interesserede i at deltage i projektet. Det er ikke lykkedes at inkludere disse virksomheder i projektet grundet Covid-19.

Tabel 1 viser de gennemførte industrioptimeringer samt resultater. Som forventet er særligt energioptimeringen ikke så prominent som ved forstudierne. Dog er der ved majoriteten af casene opnået både produktivits- og energioptimeringer. Resultaterne underbygger forstudierne, hvor graden og størrelsen af energireduktionen afhænger af hvor stor andel af bearbejdningsprocessen der er blevet optimeret.

Den generelle opfattelse har været at virksomhederne har været tilfredse med den/de optimeringer de har fået implementeret i deres produktion.

Gennem industritestene har det været en udfordring med maskinnedbrug, begrænset adgang til strømkilder, samt begrænsninger i hvorledes maskinerne kan justeres, hvilket afspejler sig i nogle af test forsøgene. Dette er vilkårene ved samarbejde direkte med industrimaskiner.

Tabel 1: Anonymiseret oversigt over industrioptimeringer

Virksomhed	Optimeringsbesøg	Noter	Optimeringer
------------	------------------	-------	--------------

1	13/8/2019		<p>Ø22,5 Z10 endefræser – 58% produktivetsforøgelse Udvendig skrub drejning – 28% produktivetsforøgelse Tidsoptimering: 185 sek. → 145 sek. = 39 sek. pr. emne Energioptimering – 3% pr. emne.</p>
2	20/8/2019	Opgave 1)	<p>Ø10 Z5 endefræser – 31% produktivitet Udvendig skrub drejning – 35% produktivetsforøgelse Tidsoptimering: 120 sek. → 105 sek. = 15 sek. Pr. emne Energioptimering – 7,7% pr. emne.</p>
3	20/8/2019	Opgave 2)	<p>Ø12 Z4 endefræser – 82% produktivitet Tidsoptimering: 121 sek. → 98 sek. = 23 sek. pr. emne Energioptimering – 17,3% pr. emne.</p>
4	19/9/2019	Strømforbruget kunne ikke måles, grundet længden på bearbejdningsprocessen	<p>Ø52 Z5 knivhoved – 29% produktivitet. Reduktion af bearbejdnings tid: ca. 30 min pr. emne Energioptimering – NA</p>
5	25/9/2019	De producerer 9.000 af disse emner om ugen.	<p>Udvendig Skrubdrejning – 43% produktivitet Tidsoptimering: 101 sek. → 98 sek. = 3 sek. Pr. emne Energioptimering – 4,1% pr. emne.</p>
6	10/10/2019		<p>Udvendig Skrubdrejning – 5% produktivitet Stikstål til konturdrejning – 22% produktivitet D4 Z2 Endefræser: -30,9% Tidsoptimering: 236 sek. → 218 sek. = 18 sek. Pr. emne Energioptimering – 11,7% pr. emne.</p>
7	15/10/2019	Maskinen der var afsat, var meget lidt justerbar, og den proces vi kunne	Ingen optimering

		optimere, var ekstremt kort.	
8	16/10/2019	Opgave 1.	D100 z10 knivhoved – 42% produktivitetsforøgelse Tidsoptimering: 123 sek. → 91 sek. = 32 sek. Pr. emne Energioptimering – 0% pr. emne.
9	16/10/2019	Opgave 2.	D220 z6 knivhoved – 86% produktivitetsforøgelse Tidsoptimering: 64 sek. → 35 sek. = 29 sek. Pr. emne Energioptimering – 45,9% pr. emne.
10	11/12/2019		Ø100 z8 knivhoved – 80% produktivitetsforøgelse Ø25-13 konkav profilfræser – 14% produktivitetsforøgelse Tidsoptimering: 226 sek. → 217 sek. = 9 sek. Pr. emne Energioptimering - 11,6% MERE energi pr. emne.
11	18/12/2019	Kun ét værktøj i maskinen som bearbejder 24/7	Ø6 z3 Endefræser – 13% produktivitetsforøgelse. Energibesparelse: 3,6%
12	26/2/2020	Èt værktøj optimeret	Ø12 z5 Endefræser – 30,4% produktivitetsforøgelse. Energibesparelse proces: 20,1%
13	3/6/2020	Optimering af endefræser i Rustfri (316L) - Tilspændingen kunne ikke tilpasses on-the-fly. Derfor blev der ikke målt på den faktiske optimering	Ø10Z4 endefræser – teoretisk optimering på 35%. Feed'en blev IKKE tilrettet, hvorved den rigtige optimering ikke kunne testes. Umiddelbart måles en energibesparelse pr. Emne på 2,8% - dog behæftet med stor usikkerhed
14	3/6/2020	Optimering af endefræser i Alu (6060). En lomme/hulfræsningsprocess. En del af processen blev optimeret mens en anden del forblev ved gamle parametre.	Optimering af processen med 67%, resulterende i 14 sek. Besparelse pr/lomme. Energireduktion på 1,1% pr process. Forventlig højere, hvis det totale strømforbrug var blevet målt.

		Strømmen blev målt direkte på maskinen, istedet for hovedkablet. Derfor er den totale strøm maskinen bruger ikke målt.	
15	27/8/2020	Optimering af udborestål. Grundet et brækket værktøj blev et midlertidig værktøj optimeret og gjort anvendelig. Dette afspejler sig dog i både produktivitetsoptimering og energioptimeringen.	Optimering af midlertidig udborestål således denne er anvendelig. Resultatet er en nedgang i produktivitet med 45% ift. det oprindelige værktøj. Dette medfører en forøgelse af energiforbruget på 54,6% pr. proces. Bemærk dog at reference parametrene stammer fra værktøj #1, mens de optimerede parametre er fra det optimerede værktøj #2, hvorved validiteten af disse "optimeringer", gør målingerne ikke-brugbare.
16		Aflyst pga. Corona	
17		Aflyst pga. Corona	

Mens procentsatser giver et sammenligneligt indblik i effekten af de forskellige optimeringer, er det svært at udlede den faktiske effekt ud fra disse. Det er for de fleste af industrioptimeringerne usikkert hvor stor produktionen af den optimerede proces er. Baseret på den oplyste viden er der estimeret hvor stor energimæssig effekt, produktivitetsoptimeringen har medført. Dette fremgår af Tabel 2, hvor det kan ses at medianen for den årlige energibesparelse ligger på ca. 50 kWh pr proces/emne - i høj grad afhængig af hvor mange bearbejdningstimer/emner processen kører årligt. Dette fremgår tydeligt af bl.a. case 2, 5 og 12.

Tabel 2: Estimation af faktiske effekt af industrioptimeringerne.

* Årlig stk / timer kendes

** Årlig stk / timer er estimeret

Virksomhed	Dato	kWh optimering	kWh reduktion	Årlig stk tal/timer	Årlig kWh reduktion
Case 1	13-aug 19	3%	0,005	10000*	<u>50</u>
Case 2	20-aug 19	7,70%	0,023	20**	<u>0,46</u>
Case 3	20-aug 19	17,30%	0,038	20**	<u>0,76</u>
Case 4	19-sep 19	NA	NA	NA	<u>NA</u>
Case 5	25-sep 19	4,10%	0,007	450000*	<u>3150</u>
Case 6	10-okt 19	11,70%	0,075	600*	<u>45</u>
Case 7	15-okt 19	NA	NA	NA	<u>NA</u>

Case 8	16-okt 19	0,50%	0,0004	500**	<u>0,2</u>
Case 9	16-okt 19	45,90%	0,005	500**	<u>2,5</u>
Case 10	11-dec 19	-11,60%	-0,079	500**	<u>-39,5</u>
Case 11	18-dec 19	3,60%	0,001	540000**	540
Case 12	26-feb 20	20,10%	0,73	500*	365
Case 13	03-jun 20	NA	NA	NA	NA
Case 14	03-jun 20	1,10%	0,001	48000**	48
Case 15	27-aug 20	NA	NA	300*	NA
				Sum	<u>4162,4 kWh</u>

8 WP 5 Konklusion og rapport

Gennem projektet er der arbejdet med adskillige aspekter af indflydelsen af stabilitetsanalyse og optimering på energiforbruget ved CNC-bearbejdning.

Projektet har igennem to forstudier undersøgt om der er en energimæssig gevinst at hente gennem produktivitetsoptimering via stabilitetsanalyse. Begge disse forstudier har vist, at strømforbruget, ved forbedring af produktiviteten gennem justering og/eller forøgelse af hhv. spindelhastighed, tilspænding og spåndybder, stiger. Studierne viser imidlertid også at energiforbruget per emne, som følge af optimering, falder. Således har studierne vist at det er muligt at opnå en produktivitetsoptimering, og derigennem reducere energiforbruget per emne.

Efterfølgende er der gennemført en række optimeringer i industrien, mhp. at afdække og påvise at tilsvarende resultater kan opnås i industrien. Industristudiet har i den forbindelse påvist samme tendens – at produktivitetsoptimeringen typisk medfører et svagt stigende strømforbrug, men at forbruget pr. emne reduceres.

Mens resultaterne fra forstudierne har vist relativ store optimeringer som følge af, at ALLE processer under disse er blevet optimeret, er optimeringerne (både produktivitet og energi) fra industrien typisk af mindre størrelse per emne. Dette har en naturlig sammenhæng med at der typisk indgår væsentlig flere processer pr. emne end det har været muligt at analysere og optimere gennem studiet. Eksemplet er givet i en optimering på 20% af en proces som udgør 20% af den samlede bearbejdning. Her er den reelle optimering for emnet således kun på 4%, hvilket er samme effekt der er set for industristudiet. Dog har studiet vist en typisk energireduktion på mellem 0- og 10% per emne – i sjældnere tilfælde væsentlig højere reduktioner.

Slutteligt er der gennemført et slutstudie med det formål at afdække hvorvidt en målbar andel af energireduktionen relaterer sig til den øget stabilitet fundet via stabilitetsdiagrammerne, eller om energireduktionerne primært relaterer sig til den reduceret bearbejdningstid, og derved fx reduceret brug af støtteprocesser (fx kølesmøremiddel anlæg, mf.).

Studiets målinger viser umiddelbart at øget stabilitet mod forventningen forbruger mere energi. Dog er observeres samtidig periodiske "peaks" i strømforbruget. Ved analyse er disse "peaks" relateret til kølesmøremiddelsystemernes pumper periodiske drift. Ud fra denne viden kan det konkluderes at variationen i støttesystemernes strømforbrug overstiger den eventuelle forskel i energiforbruget der er mellem stabile og ikke stabile bearbejdningsprocesser. Disse resultater indikerer at det er vigtigere at fokusere energieffektive støttesystemer end på selve bearbejdningsprocessen, ud fra et energioptimeringsperspektiv.

Sammenholdes de opnåede resultater med de i ansøgningen påførte resultater opstår et nuancerede billede af energiforbedring som følge af produktivitetsforbedringer.

(Kordonowy, 2002) rapporterer om 20% energibesparelser som følge af produktivitets forbedringer, mens (Zelinski, 2018) rapporterer om op til 70% energibesparelser. Sammenholdes disse tal med resultaterne fra FORSTUDIE 1, bekræftes det at det er muligt at opnå store energibesparelser pr. emne – forstudiet har vist besparelser pr. emne mellem 12-40%, afhængig af bearbejdningsstrategi, materiale og størrelsen på optimeringen. Tages industrioptimeringerne imidlertid i betragtning, ses en væsentlig lavere energioptimering pr. emne som typisk ligger mellem 0-10%. Dette skyldes, som pointeret ovenfor, at en procesvis energioptimering på fx 20% kan udgøre en væsentlig mindre andel i en samlet produktionsopsætning.

Projektets resultater supporterer endvidere rapportering om at støtteprocesser udgør en væsentlig andel af CNC maskinernes energiforbrug – fra (Kordonowy, 2002) op mod 75%. Her er et væsentligt aspekt at, *såfremt én proces udgør en stor andel af en produktion, er der ofte væsentlige energibesparelser at opnå via produktivitetsoptimeringer som fx modal stabilitets- og skærebaneanalyse*. Er andelen modsat lille, vil energireduktionen pr. emne være tilsvarende.

Betragtes projektets resultater i et nationalt perspektiv, kan det være svært at udlede den fulde effekt af optimeringerne. Fra et energiforbrugsperspektiv, der IKKE tager hensyn til antal producerede emner/gennemførte processer, viser projektet, at produktivitetsoptimeringer, isoleret set, vil have en negativ effekt på det nationale energiforbrug for CNC-maskiner. Betragtes effekten imidlertid pr. emne eller proces er billedet modsat og vil medføre en energireduktion pr. emne/proces, svarende til at den danske CNC-produktion vil kunne producere flere emner for den samme mængde energi. Under forudsætningen at en fuld udrulning påvirker en kontinuert proces, sammenlignelig med hhv. processen fra Case 5 & 12, og ved ca. 15000 CNC-maskiner i Danmark (Dansk Værktøjsmaskinforhandler forening) ville en årlig national energibesparelse pr. emne/proces kunne nå op mellem 5-50 mio. kWh.

Grundet bearbejdningsindustriens forskelligartet produktion, som ofte varierer meget fra dag til dag, uge til uge, vil en sådan udrulning dog være urealistisk. Således vil en realistisk udrulning snarere udgøre <1% af det samlede forbrug, og således vil en national besparelse tilsvarende forventes reduceret – men dog vil den således stadig kunne forventes at være i størrelsen 0,5-5 mio. kWh, årligt. At en fuld udrulning praktisk er svært, bekræfter imidlertid blot de indikative resultater fra SLUTSTUDIET, som peger på, at en mere effektiv tilgang til reduktion af bearbejdningsindustriens energiforbrug består i at fokusere på mere energieffektive støttesystemer frem for selve bearbejdningsprocessen.

9 Effekten af resultaterne – energibesparelser

Gennem projektet er der arbejdet med adskillige aspekter vedr. indflydelsen af stabilitetsanalyse og procesoptimering ift. energiforbruget ved CNC-bearbejdning.

Forstudier såvel som komparative industrioptimeringer har vist at det er muligt at opnå BÅDE produktivitetsoptimeringer og energibesparelser pr. emne via optimering med modal stabilitetsanalyse og skærebaneanalyse. Ved fuld optimerede processer, helt op mod 40% energibesparelser pr. emne, jf. FORSTUDIE 1. Projektet har kastet lys på, at industriens reelle energibesparelse ofte er noget mindre, idét her typisk fokuseres på nogle få udvalgte processer til optimering, i stedet for optimering af samtlige processer tilhørende et emne. Således ligger energibesparelsen pr. emne i industrien typisk kun på 0-10 %.

Den resulterende effekt for deltagervirksomhederne kan således ses i Tabel 3, hvor der ses samlede besparelser lige fra <1kWh til >3000kWh for én produktion/ét emne. Forudsat at deltagervirksomhederne har fortsat med de optimerede bearbejdningsparametre, er der således gennem projektet opnået en akkumuleret energibesparelse på ca. 4,2 MWh, ved 11 optimeringscases.

Tabel 3: Estimation af faktiske effekt af industrioptimeringerne.

* Årlig stk / timer kendes

** Årlig stk / timer er estimeret

Virksomhed	Dato	kWh optimering	kWh reduktion	Årlig stk tal/timer	Årlig kWh reduktion
Case 1	13-aug 19	3%	0,005	10000*	<u>50</u>

Case 2	20-aug 19	7,70%	0,023	20**	<u>0,46</u>
Case 3	20-aug 19	17,30%	0,038	20**	<u>0,76</u>
Case 4	19-sep 19	NA	NA	NA	<u>NA</u>
Case 5	25-sep 19	4,10%	0,007	450000*	<u>3150</u>
Case 6	10-okt 19	11,70%	0,075	600*	<u>45</u>
Case 7	15-okt 19	NA	NA	NA	<u>NA</u>
Case 8	16-okt 19	0,50%	0,0004	500**	<u>0,2</u>
Case 9	16-okt 19	45,90%	0,005	500**	<u>2,5</u>
Case 10	11-dec 19	-11,60%	-0,079	500**	<u>-39,5</u>
Case 11	18-dec 19	3,60%	0,001	540000**	540
Case 12	26-feb 20	20,10%	0,73	500*	365
Case 13	03-jun 20	NA	NA	NA	NA
Case 14	03-jun 20	1,10%	0,001	48000**	48
Case 15	27-aug 20	NA	NA	300*	NA
				Sum	<u>4162,4 kWh</u>

Det interessante ved disse tal er, at det er muligt at producere mere for den samme mængde energi på den samme maskine. Således har projektet vist at produktivitetsoptimering IKKE har en entydig negativ effekt på energiforbruget, men faktisk kan medføre en win-win situation – både økonomisk og energimæssigt. Tillige kan det medføre at indkøb af evt. nye maskiner kan udskydes eller undgås, hvilket igen har en positiv effekt på hel forsyningskædens samlede energiforbrug (den faktiske effekt heraf er svær at kvantificere, grundet mange variable som maskinleverandør, maskintype, mv.).

10 Perspektivering og videre anvendelse af resultater

Projektet har dannet afsæt for hvordan optimering via modal analyse i bearbejdningsregi har et positivt sammenfald med den energimæssige konsekvens. Dette betyder at DAMRC aktivt kan hjælpe danske spåntagningsvirksomheder med at reducere deres energiforbrug. Den oparbejdede viden tages med fremadrettet når DAMRC laver tap-test optimeringer i industrien.

Desuden har projektet vist, at en stor del af energiforbruget til bearbejdningscentre benyttes til diverse støtteprocesser. Disse indikationer støttes af resultaterne fra et andet projekt hos DAMRC, (352-037 Cost of Coolant) støttet af ELFORSK, som viser at +25% - muligvis helt op mod 50% af energiforbruget alene kan gå til kølesmøremiddel pumpe-systemet. Disse resultater danner, sammen med studier fra bl.a. Aarhus Universitet, grundlag for at undersøge og forstå hvor og hvordan energien forbruges i bearbejdningscentre. 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 kan reduceres. Grundlaget er at studierne, samt litteratur, viser at op mod 90% af energiforbruget for bearbejdningscentrene benyttes til disse processer/funktioner.

11 Oversigt over formidlingsaktiviteter for udbredelse af projektets resultat

<https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:6518767368288628736>

<http://www.teknovention.dk/?type=page&id=750&itemid=16999>

<https://www.facebook.com/Damrc.dk/posts/1343658039108521>

Den 27. maj blev projektet præsenteret ved **Manufacturing Festival Denmark 2020** som et online seminar via Zoom med 70 deltagere under sporet om fremtidens produktion (<https://manufacturingfestival.dk/>). Oplægget i sin helhed havde overskriften: Green Machining - Når procesoptimering og grønne regnskaber går hånd i hånd

Roll-up



Seminar den 16. september – afholdt som en ELFORSK DAG hos DAMRC i fællesskab med 2 øvrige ELFORSK projekter med indlæg fra LUND Maskinfabrik for dette projekt – se vedhæftede PDF i Bilag

Projektets resultater præsenteres igen på Manufacturing Festival i april 2021.

12 Bilag

Seminar 16. september – Lund Maskinfabrik PPT

Seminar 16. september - DAMRC PPT

Link til Video <https://www.linkedin.com/posts/danish-advanced-manufacturing-and-research-center-damrc-kan-man-spare-energi-ved-at-optimere-bearbejdningsprocesser-activity-6745599223699431424-W00z>