INDUSTRIALIZING LOW COST ADDITIVE MANUFACTURING

Opslagsværk

Resumé

Dette dokument beskriver 3D-print teknologier, evaluering af 3D-print materialer og erfaringer og opdagelser gjort gennem projektet.

DAMRC, Herning

DEN EUROPÆISKE UNION
Den Europæiske Fond for Regionaludvikling
Vi investerer i din fremtid

Indholdsfortegnelse

Tilgængelige 3D-print teknologier i projektet ..... **Fejl! Bogmærke er ikke defineret.**

Termoplast: 4

FDM (Fused Deposition Modeling) / FFF (Fused Filament Fabrication) 4

Printbare materialer 4

Beskrivelse af printteknologien 4

Fordele 4

Ulemper 4

SLS (Selective Laser Sintering) 5

Printbare materialer 5

Beskrivelse af printteknologien 5

Fordele 5

Ulemper 5

Materialestudie 6

PA 6

PS 6

HIPS 6

PEEK 6

ABS 6

POM 6

PET 6

PETG 7

PLA 7

Hærder plast: 8

SLA (Stereolithography) / DLP (Digital Light Processing) 8

Printbare materialer 8

Beskrivelse af printteknologien 8

Fordele 9

Ulemper 9

MJ (Material Jetting) / DOD (Drop on Demand) 9

Printbare materialer 9

Beskrivelse af printteknologien 9

Fordele 9

Ulemper 9

Materialestudie 10

Fotopolymer resin 10

Durable resin 10

DEN EUROPÆISKE UNION
Den Europæiske Fond for Regionaludvikling
Vi investerer i din fremtid

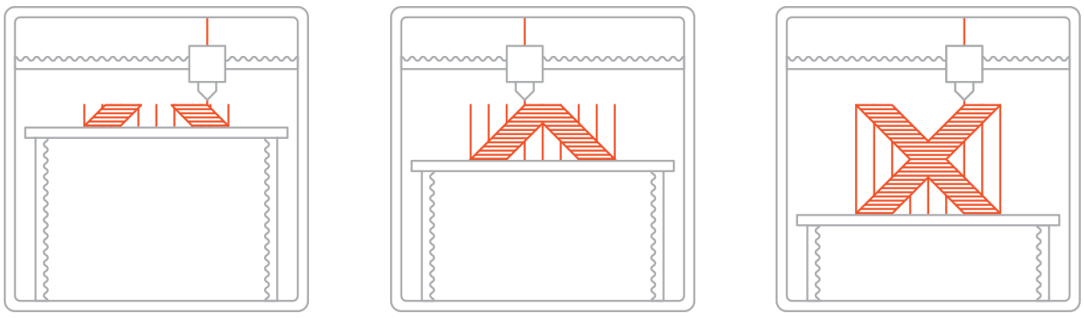
All-round resin 10
Rigid resin 10
Materialematrix 11
Erfaringer fra virksomhedscases 12
Millpart A/S 12
Maskinfabrikken Polund A/S 13
QRS A/S – Quality Robot Systems 12
RIVAL 14
EV Metalværk 13
Forsøg med 3D-printede emner 15
Forsøgsbeskrivelser 15
Første forsøgsrunde 15
Anden forsøgsrunde 16
Forsøgsopstillinger 17
Første forsøgsrunde 17
Anden forsøgsrunde 17
Opsamlet data fra forsøgsrunder 18
Første forsøgsrunde 18
Anden forsøgsrunde 20
Konklusioner på forsøgsrunder 21
Første forsøgsrunde 21

DEN EUROPÆISKE UNION
Den Europæiske Fond for Regionaludvikling
Vi investerer i din fremtid

Termoplast:

FDM (Fused Deposition Modeling) / FFF (Fused Filament Fabrication)

Denne type printer er tilgængelig hos DAMRC, Rival, QRS og Nexttech (med ilægning af fiberforstærkning).



Printbare materialer

- PLA
- ABS
- ASA
- PET/PETG
- PA (nylon)
- PC
- PP
- POM
- HIPS
- PEEK

Der kan forekomme fiberforstærkninger (korte op klippede) i diverse materialer. Der forefindes også maskiner (Markforged) som kan ilægge strenge af fibre mellem de printede lag (hvor længde tilpasses efter komponenten der printes).

Beskrivelse af printteknologien

Komponenten som printes opbygges ved at smelte en streng af plast (filament), som herefter ekstruderes ud i den ønskede udformning. Opbygningen af parten sker lagvis, typisk med en lagtykkelse på 0,05 – 0,4 mm i tykkelse (mest almindelig 0,2mm).

Fordele

- Billige maskiner, og stor udbredelse
- Stort udvalg af materialer og leverandører
- Billige print

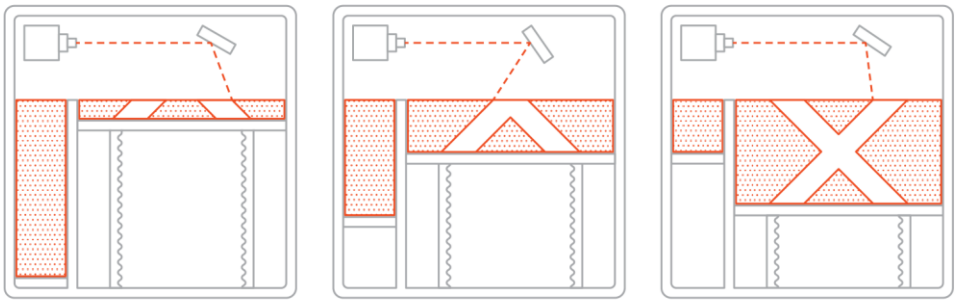
Ulemper

- Anisotropiske styrkeegenskaber
- Stor forskel i materialekvalitet mellem leverandører
- Kræver væsentlige design hensyn
- Lav præcisionsgrad

DEN EUROPÆISKE UNION
Den Europæiske Fond for Regionaludvikling
Vi investerer i din fremtid

SLS (Selective Laser Sintering)

Denne type af printer er tilgængelig hos Nexttech (PA som materiale).



Printbare materialer

- PA
- PA med forstærkning (glas, fiber, aluminium)
- PS
- TPU

Der kan iblandes glas eller aluminiums granulat i materialet for at ændre på materialeegenskaberne.

Beskrivelse af printteknologien

Materialet der anvendes til at opbygge det ønskede komponent, er et fint pulver som fordeles ud i et tyndt lag i en beholder. Dette lag belyses af en laser som smelter materialet der hvor komponenten skal opbygges. Der påføres herefter et ny lag pulver, hvorved komponenten opbygges. Kammeret hvori printningen af komponenten sker, opvarmes til ca. 90% af materialets smeltetemperatur for at kunne reducere varmemængden som laseren skal påvirke materialet med og derved reducere størrelsen af den påkrævede laser. Grundet opvarmningen af kammeret opleves der at materialepulveret som anvendes, deformeres i form, hvilket resultere i at materialet kun kan genanvendes som en procentdel af den blanding der iføres maskinen (normalvis ca. 30% genanvendt materiale i en blanding). Grundet dette, stilles der ofte i industrien krav til at opnå højst mulig udnyttelsesgrad, for at reducere genbrugsmateriale/ spildmateriale. Det er muligt at indbygge vibrationsdæmpning i en komponent, ved at lave udhulinger (lukkede lommer) hvori plastgranulatet ikke smeltes, som derved kan absorbere vibrationer gennem bevægelsen af de enkelte partikler.

Fordele

- Støtte/supportmateriale er ikke nødvendigt
- Hurtig printmetode (relativt til andre printmetoder)
- Ensartet styrkeegenskaber i alle retninger

Ulemper

- Ru overflade – lav præcisionsgrad
- Kræver en inaktiv atmosfære for at undgå uønskede inklusioner ved materialesmeltningen
- Stort og dyrt maskineri – Industrielle maskiner med henblik på masseproduktion
- Store plane flader kan være svære at genskabe, grundet risiko for vridning og oversintring

DEN EUROPÆISKE UNION
Den Europæiske Fond for Regionaludvikling
Vi investerer i din fremtid

Materialestudie

PA

(Polyamid, også kendt som Nylon) er en polymer bestående af amidbindinger mellem diamin og dicarboxylsyre. PA er kendetegnet ved at have en høj slidstyrke, men optager en del vand hvilket kan have betydning for materialets mekaniske egenskaber og kan være ret ustabil over for UV. PA har en anvendelsestemperatur på op til 100°C.

PS

(Polystyren) er bestående af en lang kæde af styren molekyler. PS er kendetegnet ved en god hårdhed og stivhed, men er samtidigt sprødt. PS har en anvendelsestemperatur på op til 70°C. PS tåler ikke opløsningsmidler og har en dårlig bestandighed over for UV.

HIPS

(high impact polystyren) er en modificeret version af polystyren, som er fremstillet til miljøer hvor stødbestandighed er påkrævet.

PEEK

(Polyether ether ketone) er et delkrystalinsk materiale med en meget høj styrke (relativt til andre polymerer). Materialet har en god temperaturbestandighed, og har gode egenskaber i forhold til slid og friktion. Peek lyder som vidundermaterialet, men har også et prisskilt der matcher (kan købes til en pris fra 3700dkk pr. kg). PEEK har en anvendelsestemperatur på op til 260°C. PEEK har dårlig bestandighed over for acetone og koncentreret svovl- og salpetersyre.

ABS

(Acrylnitril- Butadien-Styren) er en amorf plast med god ridsebestandighed, samt god slagbestandighed. ABS anvendes bl.a. til produktionen af Legoklodser grundet materialets gode dimensionsstabilitet, men kan dog have dårlig bestandighed over for UV, samt har en dårlig bestandighed over for organiske opløsningsmidler og olie. ABS har en anvendelsestemperatur på op til 80°C. Ønskes en høj vejr- og UV-bestandighed, kan ASA anvendes som alternativ til ABS, da dette materiale har lignende mekaniske egenskaber (og er udviklet som alternativ til ABS).

POM

(Polyoxymethylen) er et plastmateriale med gode mekaniske egenskaber i forhold til stivhed og sejhed, samt dimensionsstabilitet. Foruden dette har POM et lavt vandoptag. POM har en anvendelsestemperatur på op til 90°C, men er dog ikke særlig resistent mod mange syrer eller estere.

PET

(Polyethylenterephthalat) findes både i et amorft transparent materiale, som finder stor anvendelse inden for engangsvandflasker, og som et delkrystallinsk opakt materiale som ofte anvendes i elektriske komponenter. Den amorfe variation kendetegnes ved at have en høj overfladehårdhed og god slagbestandighed, denne variation har en anvendelsestemperatur på op til 60°C. Den delkrystallinske variation er kendetegnet ved en stor stivhed og mekanisk styrke, samt har en god dimensionsstabilitet, foruden høj overfladehårdhed og god slagbestandighed. Den delkrystallinske variant har en anvendelses temperatur på op til 100°C. Fælles for begge versioner er at de har dårlig bestandighed over for stærke opløsningsmidler (syrer og baser), samt det er svært at lime/klæbe materialet. Begge variationer udsættes også for hydrolytisk nedbrydning ved kontakt med vand med en temperatur på over 55°C.

PETG

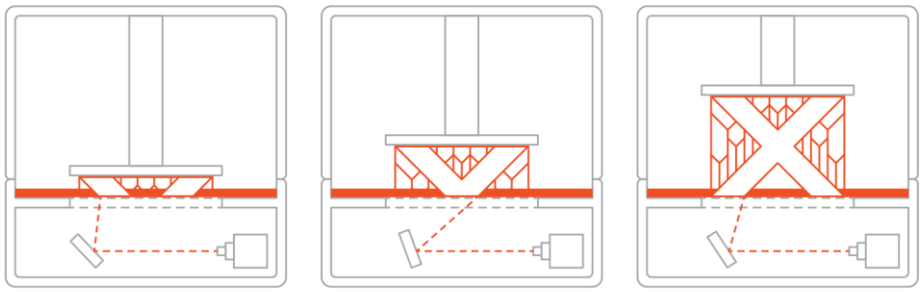
G'et står for "glykol-modificeret" og er en modificeret version af PET, med forbedrede egenskaber i forhold til slagbestandighed og er med til at gøre materialet nemmere at 3D printe. PETG har en anvendelsestemperatur på op til 88°C.

PLA

(PolyLacticAcid) er et bionedbrydeligt materiale fremstillet af biologisk materiale (f.eks. majs) og er derved et oplagt valg ud fra et miljømæssigt perspektiv. Dette materiale er et af de mest anvendte materialer til 3D print ved anvendelsen af FDM-teknologien. PLA har en anvendelsestemperatur på op til 60°C, med mekaniske egenskaber mindende om egenskaberne for polystyren (PS), men har dårlig bestandighed over for opløsningsmidler som f.eks. indeholder benzen eller klorider.

Hærder plast:

SLA (Stereolithography) / DLP (Digital Light Processing)



Printbare materialer

- Fotopolymer resin (epoxy, akryl)

Beskrivelse af printteknologien

Fotopolymer resin er en epoxy på væskeform, som er tilført en fotoinitiator som aktiveres gennem belysning af UV-stråling. Ved SLA-teknologien anvendes en laser som udsender den påkrævede belysning til et spejl, som bevæger sig efter hvor komponenten skal opbygges. Ved DLP-teknologien anvender en projektor som udsender lyset inden for et givet område, hvorved projektorens opløsning danner grundlag for tolerancegraden/præcisionen af komponenten. Både ved SLA og DLP opbygges komponenten ved at printerens bundplan føres ned i en beholder med fotopolymer resin på væskeform, hvorefter laseren/projektoren hærder et tyndt lang. Lagtykkelsen kan justeres ned til 0,005mm, som bestemmes ud fra bundplanets afstand ned til bundfladen af væskekaret. Laget belyses i den udformning som ønskes, hvorefter bundplanet og emne hæves en lagtykkelse, som endnu en gang belyses i ønskede udformning. Denne proces gentages indtil komponenten er fuldt opbygget. Grundet virkemåden for denne teknologi, kræves der at komponenten enten bliver solid, eller at der laves huller til dræn af overflødig væske. Supportmateriale opbygges som runde søjler som har et lille kontaktpunkt, i stedet for at have en stor kontaktflade, da materialet hærder sammen og derved påkræver destruktiv bearbejdning for at blive fjernet.

DEN EUROPÆISKE UNION
Den Europæiske Fond for Regionaludvikling
Vi investerer i din fremtid

Fordele

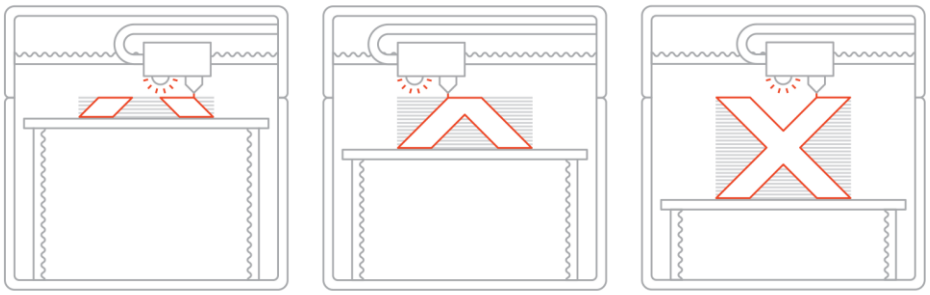
- Høj præcisionsgrad
- Komponenterne har en lav overfladeruhed

Ulemper

- Den anvendte fotopolymer er sundhedsskadelig og kræver væsentlige sikkerhedshensyn
- Kræver en del efterbearbejdning (rensning, efterhærdning og fjernelse af supportmateriale)
- Er ofte kun anvendelig til visuelle prototyper grundet lav styrke og høj sprødhed

MJ (Material Jetting) / DOD (Drop on Demand)

Denne type af printer er tilgængelig hos Nexttech.



Printbare materialer

- Fotopolymer resin (epoxy) og voks

Beskrivelse af printteknologien

Komponenten som skal printes, opbygges ved at en lang række dyser dispensere meget små dråber af materiale som efterfølgende belyses af UV-lys for at hærde materialet. Lagtykkelsen for printeren er forudindstillet efter hvilket materiale der printes med – grundet den komplekse fysik omhandlende dråbe formation. Typisk vil lagtykkelsen være mellem 16 -32 µm. Med begrundelse i at der arbejdes med flydende materialer, er der påkrævet supportmateriale på alle flader. Med begrundelse i denne teknologis virkemåde påkræves det at emner laves solide. Grundet meget lille lagtykkelse, er det ikke påkrævet med efterhærdning af emnet, som ved SLA, da materialet gennemhærdes allerede ved printprocessen.

Fordele

- Har den højeste præcisionsgrad af de omtalte printteknologier, grundet den lave lagtykkelse
- Meget lav overfladeruhed
- Homogene styrkeegenskaber i alle retninger
- Kan printes med farver

Ulemper

- Er ofte kun anvendelig til visuelle prototyper grundet lav styrke og høj sprødhed
- Den anvendte fotopolymer er sundhedsskadelig og kræver væsentlige sikkerhedshensyn
- Høje omkostninger associeret med teknologien – afledes til kostpris på komponenterne

Materialestudie

Fotopolymer resin

Er en væske bestående af monomerer som indeholder enten akrylat eller metakrylat. Væske kan også bestå af en epoxy med en katodisk fotoinitiator. Denne type af plast, er hærdeplast og vil antænde/forkulle hvis det udsætte for høje temperaturer. [for mere dybdegående beskrivelse af materialet se: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/80083/pandey_ramji.pdf?sequence=1]

Eksempler på resin:

Durable resin

Durable er en relativ fleksibel resin. Den udmærker sig også ved, at den har en forholdsvis lav friktion. anbefaler denne resin til emballage, snap løsninger, bøsninger og filmhængsler.

All-round resin

En allround resin har middel styrke og middel fleksibilitet. anbefaler denne resin til test af form and fit, prototyper, støbeforme til kold støbning, styr og opspændings fixture.

Rigid resin

Rigid er en glasforstærket resin. Denne resin udmærker sig ved at være meget stiv og meget formstabil. anbefaler denne resin til turbine og køler blade, styr, opspændings fixture og manifolds.

Materialematrix

Materiale	Mekanisk styrke	Slidstyrke	Slagbestandighed	Vandabsorption	Formstabilitet	Temperaturbestandighed	Opløsningsmiddelsbestandighed	Miljøbelastning	Pris	
Fotopolymer	2	3	2	5	5	5	5	1	2	30
PA	3	4	4	1	3	4	4	2	4	29
PS	2	2	1	3	3	3	1	3	3	21
HIPS	2	2	3	3	3	3	1	3	4	24
PEEK	5	4	3	4	5	5	4	2	1	33
ABS	3	3	4	4	5	4	2	3	5	33
POM	4	4	5	5	4	3	3	3	3	34
PET (PETG)	3	3	5	4	5	4	3	3	5	35
PLA	4	2	2	3	3	1	2	5	5	27

I ovenstående figur, er de forskellige undersøgte materialer specificeret inden for en række forskellige kriterier som har betydning for projektet. Disse kriterier bedømmes for hvert materiale, hvor der gives en karakter afhængigt af materialets egenskaber inden for det givne kriterie. Materialerne vurderes på en skala fra 1 til 5, hvor 1 gives som dårligste karakter og 5 gives som bedste karakter.

- Mekanisk styrke vurderes ud fra materialets brudspænding og forlængelse ved brud
- Slidstyrke vurderes ud fra materialets evne til at modstå mekanisk slid
- Slagbestandighed vurderes ud fra materialets evne til brud og revner ved spontan mekanisk belastning
- Vandabsorption vurderes ud fra hvor stor tilbøjelighed materialet har til at optage vand, og hvilke betydninger det har for de mekaniske egenskaber for materialet
- Formstabilitet vurderes ud fra hvordan materialet vil opføre sig over tid, plast med en høj formstabilitet vil beholde en brugbar udformning i længere tid end materialer med en lav formstabilitet
- Temperaturbestandighed for de enkelte materialer vurderes ud fra den af rias.dk angivne maksimale anvendelses temperatur (hvis denne data har været tilgængelig hos Rias)
- Opløsningsmiddelsbestandighed vurderes ud fra materialet evne til at modstå stærke og svage opløsningsmidler, samt syrer og baser (foruden hydrolyse hvor plast nedbrydes af varmt vand)
- Miljøbelastning vurderes ud fra hvor meget energi der anvendes for at fremstille 1 kg af materialet, samt hvorvidt materialerne er bestående af biomateriale eller om de er sundhedsskadelige
- Pris vurderes ud fra et genneralt perspektiv om hvad de enkelte materialer koster i anskaffelse ved de enkelte forhandlere samt fra forskellige producenter

Erfaringer fra virksomhedscases* se separat dokument for uddybende beskrivelse

Millpart A/S

1. Første udgave af printede kæber til bearbejdning
   - Materiale PLA
   - Vægtykkelse 2,5 mm
   - Infill % 40 %
   - Lagtykkelse 0,15 mm
   - Printretning Liggende horisontalt

Erfaring: Blev anvendt til fixturering af støbte emner. Efter ét emne flækkede og revnede kæberne. Der blev testet med forskellige momenter (NM) til at spænde med og vi konstaterede, at vi ved for højt spændetryk, ikke fik bedre fat i emnet samt at printet heller ikke kunne holde til det.

2. Anden udgave af printede kæber til bearbejdning
   - Materiale PLA
   - Vægtykkelse 3,2 mm
   - Infill % 60%
   - Lagtykkelse 0,15 mm
   - Printretning Stående vertikalt som den skal anvendes

Erfaring: Blev anvendt til de samme støbte emner som første udgave. Først efter 20 emner var der få synlige revner i kæberne.

QRS A/S – Quality Robot Systems

1. ”Topbakker” til robotarm
   - Materiale PLA til mindre emner, ABS & PETG til større emner

Erfaring: QRS har implementeret 3D printet top-bakker. Der bliver printet top-bakker til at kunne holde runde, firkantede og komplekse emner. Printet bakker med luft udtag til at blæse emner rene inden grib er også implementeret. 3D print har vist at kunne erstatte metalemner 1 til 1 – dog med forbehold for styrke forskelle og tolerancer. Særlig fordelagtig ved små serier og skiftende design.

2. Gribeflange til robotarm
   - Materiale PLA til mindre emner, ABS & PETG til større emner. PETG på grund af dets gode styrke egenskaber og er samtidig nemt at printe.

Erfaring: Blev anvendt til gribeflange, som monteres direkte på robotarme. Her var udfordringen tilstrækkelig god montering af bolte. Flere løsninger med både 3D printede gevind og integration af metal gevind blev testede. Det har dog været usikkerhed omkring de aflæste momenter. Der er testet i bunden af momentnøglens skala og har ikke altid været entydigt svar. Det burde eftertestes med mere præcist testudstyr for at validere resultater. Dette har QRS ikke haft til rådighed.

Samlede erfaring: Ved at kombinere 3D print og metal komponenter i det omfang det giver mening (fx ifm. gevind) kan 3D printede komponenter til robotgribere bruges til at gribe emner i vægtklassen 1-5 kg. Dog skal belastningen på emnet vurderes for forsvarligt at kunne afgøre om 3D print er relevant, med og uden integration af styrkende metal elementer.

EV Metalværk

1. Fixturering af emner til CMM-opmåling (koordinat-måle-maskine)
   - Materiale PLA
   - Vægtykkelse 3 mm
   - Infill % 60%
   - Lagtykkelse 0,15 mm
   - Printretning Liggende

   Erfaring: Fixturerne blev brugt på små emner i cirkulær udformning (tommelfinger størrelse) ifm., CMM-opmåling. De 3D printede fixturer viste sig her at være for svage, hvorved fixtureringen af emnet ikke var tilstrækkelig. Dette kunne muligvis løses med mere robuste fixtureringsløsninger – dog fastholdes eksisterende metal fixturer pt.

2. Fastholdelse af emner til laserindgravering
   - Materiale PLA

   Erfaring: Til lasergravering er der arbejdet med en mere generel problemstilling, som kan anvendes til en bred serie af emner. Der er designet en vinkelblok med en række trappetrin, som vil muliggøre at de fleste emner kan ligge vandret, hvorved graveringen af serienummer/partnummer ikke bliver forvreden – Hertil fungerer 3D print godt.

Maskinfabrikken Polund A/S

1. Printede kæber til bearbejdning af prototype med kompleks cylindrisk geometri, der bearbejdes frem fra en solid blok af materiale hvor multiple skruestik er påkrævet for at fastholde emnet.
   - Materiale PLA
   - Vægtykkelse 3,2 mm
   - Infill % 60%
   - Lagtykkelse 0,15 mm
   - Printretning Stående vertikalt som den skal anvendes

Erfaring: Ingen erfaring - Af forskellige årsager har det indtil videre desværre ikke været muligt at afprøve de fremstillede kæber.

Sjølund A/S

1. Fixtur til fastholdelse af metal profiler i organiske former.
   - Materiale PA (SLS)
   - Infill Løst pulver til vibrationsdæmpning

Erfaring: Et nedskalleret fixtur blev printet med interne kanaler og vibrationsdæmpning til anvendelse af specielle emner hvor sugekopper med kanal inde i fiksturet skulle kunne sikre bedre fiksering samt mindske vibrationer. Disse er dog udsat grundet Covid-19 og derfor er der ikke printet en fikstur i fuld størrelse

2. Valse ruller
   - Materiale POM (SLS)
   - Infill Solid

Erfaring: Valse rullerne er brugt flittigt i produktionen. Både ved snævre valsninger og hårdt stål, hvor der er størst belastning. Rullerne har indtil videre klaret sig igennem uden problemet, dog melder personalet om den tydeligt mere sprøde lyd fra materialet i det printede POM ift. Det tidligere bearbejdede nylon.

RIVAL

1. Limdyse til påførelse af lim
   - Materiale PLA
   - Vægtykkelse 3 mm
   - Infill % 60%
   - Lagtykkelse 0,15 mm
   - Printretning Stående

   Erfaring: Der er testet tre dyser af forskellig størrelse (1-, 3- og 7-fingrede dyser). Dyserne med 1- og 3-fingre fungerede godt. Dysen med 7 fingre var ikke stærk nok ift. det indvendige tryk den blev udsat for. Forsøgene har vist at 3D printede dyser kan anvendes på visse områder men ikke alle.

2. Fixtur til emner til CMM-opmåling
   - Materiale PLA
   - Vægtykkelse 3 mm
   - Infill % 60%
   - Lagtykkelse 0,15 mm
   - Printretning Stående

   Erfaring: Der er fremstillet fiksturer til to forskellige emner. Forsøgene har vist at 3D printede plast fixturer godt kan bruges til fiksering af emner til CMM-opmåling. Den store fordel er at produktionsmaskiner ikke skal tages ud af drift til fremstilling af fixtur-komponenter

3. Opbevaringsholdere til CMM-opmålings-prober
   - Materiale PLA
   - Vægtykkelse 3 mm
   - Infill % 60%
   - Lagtykkelse 0,15 mm
   - Printretning Stående

   Erfaring: Der er fremstillet et antal holdere, hvori CMM-proberne forsvarligt kan opbevares, og som er tilpasset hver enkel probe. Det har været hurtigt at fremstille og medfører bedre og mere sikker indretning af CMM-området – mindre risiko for at ødelægge måle-proberne.

Forsøg med 3D-printede emner i bad af køle-/smøremiddel

Forsøgsbeskrivelser

Første forsøgsrunde

Der er blevet udført forsøg på otte forskellige kombinationer af 3D-print materialer og teknologier. De er som følgende i tabellen til højre:

FDM / PA+	FDM / ABS	FDM / Nylon (PA)
FDM / COP	FDM / PETG	FDM / PLA
SLA / Fotopolymer	SLS / PA	

Forsøgene er blevet gennemført over en periode på omtrent 14 dage. Forløbet har bestået af nedsænkninger og optagninger af test-emnerne i en periodisk proces. Emnerne har været lagt i badet i 24 timer for hver nedsænkning i beholderen med køle-/smøre-middel.

For hver optagning har emnerne været i ude af badet i 24 timer. Omkring to timer før og efter nedsænkning i badet, har emnerne gennemgået en runde målinger ud fra nogle parametre som er beskrevet i ”Forsøgsparametre”.

Emnerne blev målt og vurderet ud fra følgende punkter:

- Hårdhed i Shore-D
    - For at kunne påvise om der sker ændringer i emnernes hårdhed ændrer sig gennem forsøgets forløb.
- Dimensionsmål
    - For at kunne påvise om der sker ændringer i emnernes dimensioner som følge af absorption af køle-/smøre-middel og /eller nedbrydning af materialet.
- Vægt
    - For at kunne påvise om emnerne ændrer sig vægtmæssigt som følge af absorption af køle-/smøre-middel.

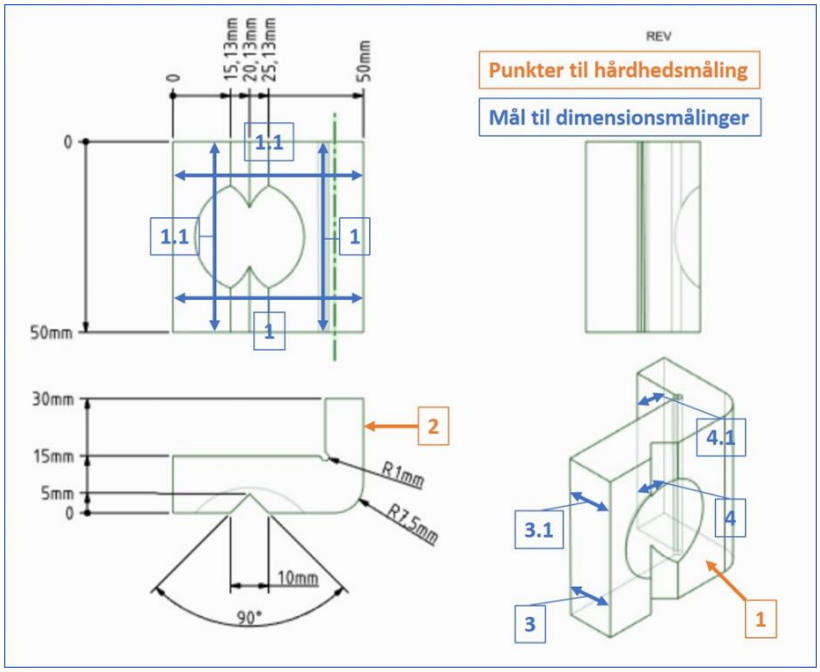
Køle-/Smøre-midlet anvendt under forsøget er af fabrikatet Rhenus fra OK. Typen er en FU-800 med en koncentration på 8%.

Følgende er en liste over det anvendte udstyr gennem forsøgene:

- Durometer til måling af hårdheden af emnerne i Shore D.
- Skruestik med tilhørende Nm-nøgle til deformationstests. Nøglen var under hele forløbet indstillet til 12 Nm.
- Præcisionsvægt til måling af emnernes vægt.
- Mikrometerskruer for at måle præcise ændringer i dimensionerne af emnerne

DEN EUROPÆISKE UNION
Den Europæiske Fond for Regionaludvikling
Vi investerer i din fremtid

Illustration over mål og punkter brugt gennem forsøget til validering af hårdhed, dimensionsstabilitet og deformationsstabilitet.



Anden forsøgsrunde

Der er blevet udført forsøg på otte forskellige kombinationer af 3D-print materialer og teknologier. De er som følgende i tabellen til højre:

FDM / PA+	FDM / ABS	FDM / Nylon (PA)
FDM / COP	FDM / PETG	FDM / PLA
SLA / Fotopolymer	SLS / PA	

Forsøgene blev gennemført ved hjælp af 1. et standard skruestik og 2. et specialfremstillet fixtur der holder kæberne på så stor en kontaktflade som muligt. (Se næste side for forsøgsopstilling)

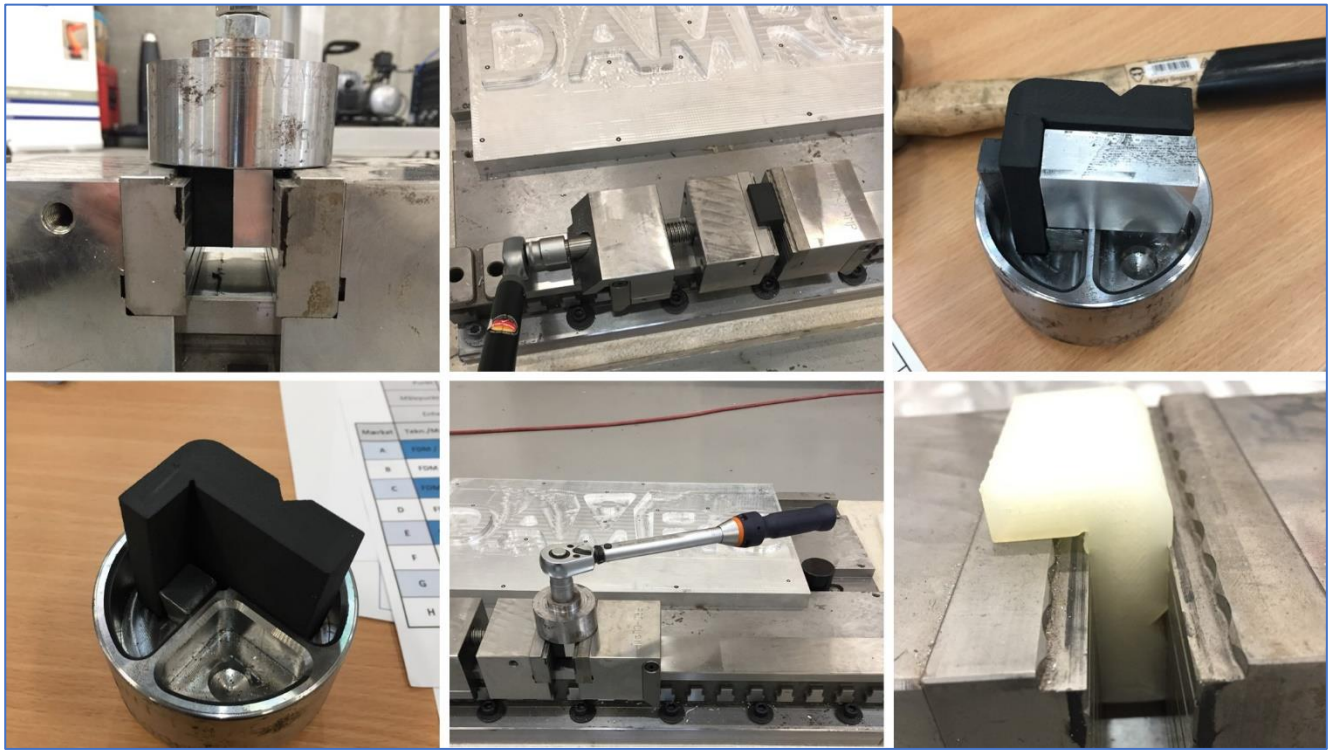
Emnerne blev i denne runde vurderet ud fra mekanisk trykstyrke og vridstyrke da disse to aspekter er meget relevante når det kommer til anvendelse i bearbejdningsmæssige opsætninger.

DEN EUROPÆISKE UNION
Den Europæiske Fond for Regionaludvikling
Vi investerer i din fremtid

Forsøgsopstillinger

Første forsøgsrunde

Anden forsøgsrunde



DEN EUROPÆISKE UNION
Den Europæiske Fond for Regionaludvikling
Vi investerer i din fremtid

Opsamlet data fra forsøgsrunder

Første forsøgsrunde

Nedsænkning i køle-/smøre-middel

Resultater fra første forløb med 6 af 8 typer emner:

Forsøg af 3D-Printede emner											
	Base Data										
	1. opmåling	Punkt:	Hårdhed 1	Hårdhed 2	Dim.mål 1	Dim.mål 1.1	Dim.mål 2	Dim.mål 2.1	Dim.mål 3	Dim.mål 3.1	Vægt
Mærkat	Tekn./Mat.	Enhed:	[Shore D]	[Shore D]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]
A	FDM / PA+		75	74	50,07	50,05	50,19	50,19	15,01	15,31	42,09
B	FDM / ABS		71	70	50,12	49,92	49,88	49,86	14,92	15,22	37,01
C	FDM / Nylon		70	70	50,14	50,3	49,42	49,34	14,93	15,06	42,37
D	FDM / PLA		81	81	50,2	50,18	49,87	49,94	14,72	14,7	43,14
E	SLA /Fotop.		80	81	50,05		49,64		14,65		48,41
F	SLS / PA		71	72	50,1		49,94		14,67		36,82
	Runde (våd) - fredag d. 29/3										
	9. opmåling	Punkt:	Hårdhed 1	Hårdhed 2	Dim.mål 1	Dim.mål 1.1	Dim.mål 2	Dim.mål 2.1	Dim.mål 3	Dim.mål 3.1	Vægt
Mærkat	Tekn./Mat.	Enhed:	[Shore D]	[Shore D]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]
A	FDM / PA+		75	74	50,09	50,04	50,18	50,19	15	15,31	42,18
B	FDM / ABS		74	72	50,14	49,98	49,97	50	14,99	15,23	37,99
C	FDM / Nylon		58	62	50,28	50,45	49,55	49,46	15,05	15,18	43,26
D	FDM / PLA		82	83	50,28	50,24	49,93	49,99	14,74	14,73	43,5
E	SLA /Fotop.		79	81	50,12		49,7		14,67		48,66
F	SLS / PA		71	72	50,18		50		14,7		37,83
	Sammenligning af forsøgsresultater - før og efter										
Mærkat	Tekn./Mat.		Måling 1	Måling 2	Dim.mål 1	Dim.mål 1.1	Dim.mål 2	Dim.mål 2.1	Dim.mål 3	Dim.mål 3.1	Vægt
A	FDM / PA+		0	0	0,02	-0,01	-0,01	0	-0,01	0	0,09
B	FDM / ABS		3	2	0,02	0,06	0,09	0,14	0,07	0,01	0,98
C	FDM / Nylon		-12	-8	0,14	0,15	0,13	0,12	0,12	0,12	0,89
D	FDM / PLA		1	2	0,08	0,06	0,06	0,05	0,02	0,03	0,36
E	SLA /Fotop.		-1	0	0,07		0,06		0,02		0,25
F	SLS / PA		0	0	0,08		0,06		0,03		1,01

*Hele datasættet følger med opslagsværket som bilag.

DEN EUROPÆISKE UNION
Den Europæiske Fond for Regionaludvikling
Vi investerer i din fremtid

Resultater fra andet forløb med de resterende 2 typer emner:

Forsøg af 3D-Printede emner								
	Base Data - Inden første nedsænkning - Onsdag d. 4/9							
	1. opmåling	Punkt:	Hårdhed 1	Hårdhed 2	Dim.mål 1	Dim.mål 2	Dim.mål 3	Vægt
Mærkat	Tekn./Mat.	Enhed:	[Shore D]	[Shore D]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]
G	COP / FDM		75	76	50	49,854	14,599	33,04
H	PETG / FDM		76	76	49,487	50,296	14,871	42,59

	Runde efter 5. nedsænkning (våd) - Onsdag d. 18/9							
	10. opmåling	Punkt:	Hårdhed 1	Hårdhed 2	Dim.mål 1	Dim.mål 2	Dim.mål 3	Vægt
Mærkat	Tekn./Mat.	Enhed:	[Shore D]	[Shore D]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]
G	COP / FDM		76	76	49,92	50,434	14,566	33,7
H	PETG / FDM		76	76	49,564	50,558	15,092	42,62

	Sammenligning af testresultater - før og efter							
Mærkat	Tekn./Mat.		Hårdhed 1	Hårdhed 2	Dim.mål 1	Dim.mål 2	Dim.mål 3	Vægt
G	COP / FDM		1	0	-0,08	0,58	-0,033	0,66
H	PETG / FDM		0	0	0,077	0,262	0,221	0,03

*Hele datasættet følger med opslagsværket som bilag.

DEN EUROPÆISKE UNION
Den Europæiske Fond for Regionaludvikling
Vi investerer i din fremtid

Anden forsøgsrunde

Mekanisk kompressionsstyrke og vridstyrke

2. Runde Forsøg			
	Punkt:	Mekanisk trykstyrke	Vridstyrke
	Målepunkt:	Indtil brud/kraftig deformation	Indtil brud/kraftig deformation
	Enhed:	Nm	Nm
Mærkat	**Tekn./Mat.**		
A	**FDM / PA+**	200 Nm / 14,880mm	130 Nm
	Noter:	Ikke brudt	Meget pludseligt brud
B	**FDM / ABS**	78 Nm / Komplet brudt	108 Nm
	Noter:	Ved 70 Nm opstod der flere klik og brud-lyde	
C	**FDM / Nylon**	200 Nm / 14,031 mm	106 Nm
	Noter:	Ikke brudt	
D	**FDM / PLA**	200 Nm / 11,604 mm	184 Nm
	Noter:	Ikke brudt, kraftig deformation	
E	**SLA /Fotop.**	200 Nm / 14,552 mm	140 Nm
	Noter:	Første deformation ved 140 Nm, svag deformation	
F	**SLS / PA**	200 Nm / 14,130 mm	138 Nm
	Noter:	Første deformation ved 90 Nm, svag deformation	
G	**COP / FDM**	75 Nm / 11,408 mm	70 Nm
	Noter:	Første deformation ved 60 Nm	
H	**PETG / FDM**	85 Nm / 13,309 mm	100 Nm
	Noter:	Begyndende deformation ved 70-75 Nm	Meget pludseligt brud

DEN EUROPÆISKE UNION
Den Europæiske Fond for Regionaludvikling
Vi investerer i din fremtid

Konklusioner på forsøgsrunder

Første forsøgsrunde

Der er set en række forskellige resultater for de enkelte materialer gennem dette forsøg. Det forventes at resultaterne kan anvendes til at udføre videre forsøg, samt at resultaterne kan danne grundlag for det rigtige materialevalg ift. fixturering af emner.

Ud fra de noterede resultater for de enkelte materialer, kan der udledes en række konklusioner:

Ved FDM/Nylon (PA) kan det ses at der ikke har været nogen god formstabilitet af materialet. Samtidigt er der sket en væsentlig degradering af materialet over forsøgets løbsperiode. Der kan heraf udledes, at dette materiale ikke vil være noget oplagt valg til bearbejdnings-setups. Dette står i stærk kontrast til SLS/Nylon (PA), som i teorien er det samme materiale, men kan tyde på at der har været en væsentlig ændring i typen af additiver der har været i de to materialer. SLS/Nylon (PA) har vedligeholdt sin hårdhed gennem forsøgets forløb samtidig med at holde deformationsstabiliteten. SLS/Nylon (PA) kunne derfor være et oplagt bud til anvendelse i fixturering af emner under bearbejdning.

For FDM/ABS er det observeret at materialet er begyndt at deformere ved 8. belastningstest. Der kan dog ikke udledes nogen konklussive resultater herfra, da forsøget er stoppet ved 9. belastningstest efter en forsøgsperiode på 12 dage. For at kunne finde ud af om materialet er begyndt at degradere er det nødvendigt at udføre videre forsøg som på nuværende tidspunkt ikke er planlagte.

De bedste resultater i dette forsøg er klart opnået ved FDM/PA+ som har en høj dimensionsstabilitet, ingen væskeoptag, samt minimal til ingen deformation ved belastningstesten.

Som tæt forfølger kommer FDM/PLA som også har givet rigtig gode resultater gennem forsøget. PLA er et billigt og let tilgængeligt materialet som (næsten) alle FDM-maskiner kan printe med.

Herunder er resultaterne for de enkelte materialer beskrevet i mere detalje.

PA+ / FDM

Lette svingninger i målingerne af overfladehårdhed af materialet over forsøgets løbsperiode. Denne tilskrives målingsusikkerhed, hvorfor der konkluderes for PA+ ikke at ske nogen ændring af materialets hårdhed som følge af udsættelse for emulsion/vand.

Materialet udviser en høj grad af dimensionsstabilitet, og udviser ingen tegn på at optage vand over projektets forløb. Ved deformationsforsøg ses der en let deformation af materialet ved førte belastning (i størrelsesorden $0{,}02mm$), ved efterfølgende belastninger ses der ingen signifikant deformation af materialet.

For PA+ konkluderes det at materialet har den højeste formstabilitet af alle de testede materialer, der sker ingen målbar optag af vand, samt at materialets hårdhed ikke er degraderet over forsøgets løbsperiode.

ABS / FDM

Der blev ikke fundet noget signifikant ændring af hårdhed over forsøgets løbsperiode i dette materiale. Let til middel opsvulmning af materialet er observeret på dimensionerne 2 & 2.1 med en stigning på op til $0{,}14mm$ over forsøgets løbsperiode.

Ved belastningstest, ses der ikke nogen umiddelbar ændring før og efter belastning ved de første 7 opmålinger, men ved 8. opmåling begynder der at kunne ses en tendens til at materialet komprimeret ved

belastning. Dette kan skyldes degradering af materialet, men kan også skyldes målefejl. For at kunne træffe en mere retvisende konklusion på dette er yderlige forsøg nødvendige.

ABS er også et af de materialer der har optaget mest vand over forsøgets løbsperiode med et totalt optag på 3%, væskeoptaget er sket løbende over perioden uden nogen markante ændringer.

Nylon (PA) / FDM

Dette materiale har set en stor ændring i overfladehårdhed over forsøgets løbsperiode, med et fald på op mod 17%. Ændringen ses løbende med målbar ændring allerede efter første nedsænkning.

Samtidigt ses en opsvulmning af materialet med en signifikant ændring over forsøgets løbsperiode, hvilket resultere i stigninger af emnets mål på op til $0{,}15mm$ hvilket kan have en væsentlig betydning ved opspænding af emner med høje krav til placeringstolerance.

En umiddelbar konklusion vil være at FDM/PA som materiale og teknologi ikke er passende ved det givne miljø med emulsion og vand.

PLA / FDM

Der observeres ikke umiddelbart nogen ændring i materialets overfladehårdhed gennem forsøgets løbsperiode. En let tendens til væskeoptag er observeret, men over forsøgets løbsperiode, er der kun målt en stigning på 1%, hvorfor der kan stilles spørgsmål ved hvorvidt dette resultat er signifikant.

Noget kunne tyde på at materialet har optaget væske, da emnerne har udvidet sig let, hvilket over forsøgets løbsperiode har ledt til en stigning i dimensionerne 1 & 1.1 på $0{,}06 - 0{,}08mm$. Ved belastningsforsøgene ses det at emnet ikke giver nogen målbar dimensionsændring før og efter belastning, hvilket derved tyder på en stor stivhed af materialet.

Umiddelbart er resultaterne for FDM/PLA meget positive, med lav til ingen vandoptag og god dimensionsstabilitet – Det kan derved tyde på at PLA er et godt valg når det kommer til at vælge en billig og miljøvenlig løsning.

Fotopolymer / SLA

Der er ikke målt nogen ændring af materialets overfladehårdhed over forsøgets løbsperiode, samt der er observeret stor formstabilitet af fladerne hvor belastningstest er udført. Der er målt et let væskeoptag gennem forsøget, hvilket formodes at have resulteret i lette stigninger af de målte dimensioner.

Tages processen og materialet samt forsøgets resultater i betragtning, kan der stilles spørgsmål ved hvorvidt SLA/Fotopolymer er det optimale valg. Dette kan begrundes i at processen og materialet er meget dyr og derved resultere i komponenter der opnår dårligere resultater end FDM/PA+ som (formodes) at være billigere at fremstille. SLA kan dog stadigt give mening, især ved fixturer og gribere hvor der stilles store krav til placeringspræcision.

PA / SLS

Der er ikke observeret nogen signifikant ændring i materialets overfladehårdhed, trods materiale er observeret til at opnå en stigning i vægt på 3% over forsøgets løbsperiode, hvilket tyder på et mærkbart væskeoptag for materialet.

Det er observeret at materialet er svulmet grundet optag af væske, hvilket har resulteret i en øjeblikkelig stigning af dimensionen 1 på $0{,}06mm$ allerede efter første nedsænkning. Dette stemmer også overens med at største stigning af væskeoptage/ændring af egenvægt er observeret efter første nedsænkning. Ved efterfølgende nedsænkninger har emnet haft en nogenlunde stabil vægt, samt dimensionsstabilitet.

Der ses en næsten øjeblikkelig ændring af materialet, som hurtigt opnår et nyt stabilt niveau, hvorefter materialet er rimeligt dimensionsstabilt. Afhængigt af brugstilfælde kan SLS/PA være et oplagt valg, med begrundelse i at emnet er fremstillet solidt, dog kan eller vil dette resultere i forhøjede omkostninger.

COP / FDM

Der blev ikke observeret nogen signifikant ændring i materialets overfladehårdhed selvom emnet har opnået en vægtmæssig stigning på 2% efter endt forsøg. Gennem forsøget har emnet vedligeholdt en god dimensionsstabilitet samt nogenlunde vægtstabilitet. COP/FDM kunne være et godt valg til brug i bearbejdningsmæssige opsætninger.

PETG / FDM

Lige som COP/FDM, har PETG/FDM heller ikke haft en ændring i sin overfladehårdhed. Vægten på emnet er kun ændret med 0,1%, hvorfor det må siges at være som før forsøget blev igangsat. Ved opmålinger af dimensioner ses der en mærkbar ændring fra før forsøget blev igangsat og efter endt forsøg på op mod 0,5%. Dette kunne give udslag i et bearbejdningsmæssigt set up, hvorfor det muligvis er mere fordelagtigt at anvende til andre formål som opmåling.

DEN EUROPÆISKE UNION
Den Europæiske Fond for Regionaludvikling
Vi investerer i din fremtid