

Rat Rod Drivlinje-Konseptet

FORFATTERE: Bjørn Christian Halvorsen (120324)
Nicolai Bakketun (470579)
Stian Høigård (120375)

16.05.2018

Førord

Oppgaven er skrevet ved institutt for vareproduksjon og byggingsteknikk ved NTNU i Gjøvik og er vektet med 20 studiepoeng. Denne oppgaven markerer slutten på bachelorgraden i ingeniørfag – maskin, retning Industriell design. Oppdragsgiver er NTNU i Gjøvik .

Bacheloroppgaven er utarbeidet i perioden Januar 2018 - Mai 2018.

Vi retter en takk til Harald Bertin Jøsendal for sin bistand med råd og veiledning under arbeidet.

Gjøvik, Mai 2018

Sammendrag

Tittel	Rat Rot Drivlinje-Konseptet	Dato: 16.05.2018
Deltagere:	Bjørn Christian Halvorsen (120324) Nicolai Bakketun (470579) Stian Høigård (120375)	
Veileder:	Harald Bertin Jøsendal ved NTNU i Gjøvik	
Oppdragsgiver:	NTNU i Gjøvik	
Stikkord:	Aksling, materialer, motoreffekt, produksjonsmetoder, økonomi	
Antall sider: XX	Antall vedlegg: 31	Publiseringsavtale inngått: Ja
<p>Kort beskrivelse av oppgaven:</p> <p>NTNU i Gjøvik er i gang med et større, tverrfaglig ombyggingsprosjekt av en 1982 Volkswagen Transporter Dobbeltkabiner døpt Rat Rod. Planen er å erstatte den originale dieselmotoren med en kraftigere bensinmotor fra en 1996 Volkswagen Golf Syncro GL.</p> <p>Rapporten er ment som en mulighetsstudie for å avdekke hvilke alternative løsninger som er mest aktuelle for å erstatte det eksisterende drivverket til skolens konseptbil. Oppgaven konsentrerer seg nærmere sagt om bakakslingen, hvor målet er å finne en ny type aksling tilpasset den nye motoreffekten. Problemstillingen dreier seg i hovedsak om å avdekke hva som er på teknologifronten innen akslinger, og avdekke de mest hensiktsmessige løsningene med tanke på produksjonsmetoder, styrkeegenskaper og kostnader. Viktige aspekter ved studiet omhandler konstruksjonsmessige antagelser, dynamiske påkjenninger, materialvalg, produksjonsteknologi og kostnader.</p>		

Abstract

Title	Rat Rot Powertrain- concept	Date: 16.05.2018
Participants:	Bjørn Christian Halvorsen (120324) Nicolai Bakketun (470579) Stian Høigård (120375)	
Supervisor:	Harald Bertin Jøsendal with NTNU in Gjøvik	
Employer:	NTNU in Gjøvik	
Keyword:	Axis, materials, engine power, production methods, economy	
Number of pages: XX	Number of appendix: 31	Availability: Open
<p>Brief description of the assignment:</p> <p>NTNU in Gjøvik is in the process of a major, interdisciplinary rebuilding project of a 1982 Volkswagen Transporter Double Cabins named Rod Rod. The plan is to replace the original diesel engine with a more powerful gasoline engine from a 1996 Volkswagen Golf Syncro GL.</p> <p>The report is intended as a feasibility study to reveal which alternative solutions are most appropriate to replace the existing drive shaft of the school concept car. The task concentrates on the rear axle, where the aim is to find a new type of shaft adapted to the new engine power. The problem is mainly about revealing what is happening in the technology front within axles, and revealing the most appropriate solutions in terms of production methods, strengths and costs. Important aspects of the study concern constructive assumptions, dynamic stresses, material selection, production technology and costs.</p>		

Formel -og symbol-liste

Type og nummer	Formel
1. Effektformel 1	$P = Fv = \frac{\pi dn}{60} [W] \text{ hvor } n = \text{turtall}$
2. Effektformel 2	$P = M_v \omega$
3. Skjernspenning ved vridning	$\tau_v = \frac{M_v}{W_p} [MPa]$
4. Bøyepening	$\sigma_b = \frac{32M_b}{\pi d^3} [MPa]$
5. Akselvekt-fordelingsformel	$Wr = W \frac{CGf}{WB} [kg]$
6. Polart arealmotstandsmoment for massiv aksling	$W_p = \frac{\pi}{16} d^3 [mm^3]$
7. Maks skjærspenning	$\tau_{maks} = \frac{16}{\pi d^3} \sqrt{M_b^2 + M_v^2} [MPa]$
8. Maks Bøyepening	$\sigma_{b maks} = \frac{1}{2} \sigma_b + \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_b^2 + 4\tau^2} [MPa]$
9. Tillatt spenning	$\sigma_{tillatt} = \frac{\sigma_F}{Sikkerhetsfaktor} [MPa]$
10. Vrimoment	$M_v = \frac{30P}{\pi n} [Nm]$
11. Diameterformel	$d = \sqrt[3]{\frac{32^2 \sqrt{M_b^2 + 0,75(\alpha_0 M_v)^2}}{\pi \sigma_{till}}}$
12. Kostnad per produsert enhet	$\frac{\text{Sum}_{\text{FasteKostnader}} + \text{Sum}_{\text{VariableKostnader}}}{\text{Antall enheter}}$
13. Damping ratio	$\varepsilon = \frac{C}{C_{cr}}$

Begrep og definisjoner

Jevnførende spenning	En tenkt normalspenning som tilsvarer effekten av normalspenninger og skjærspenninger på konstruksjonen
Tillatt spenning	Materialets flytegrense delt på en sikkerhetsfaktor bestemt ut fra lastsituasjonen
Rat Rod	Det er mange definisjoner på Rat Rod, men vi snakker hovedsakelig om en ombygd klassisk bil hvor bilens design er bevart og ofte preget av et rustent eller slitt utseende.
Drivlinje	Mekanisk system bestående av komponenter som clutch, girkasse, mellomaksel, differensial, aksling og hjul som sørger for å drive bilen fremover ved å overføre motorkraften til drivhjulene. I vårt tilfelle begrenser vi oss til bakakslingen når vi snakker om dette.
Bakaksling	Ved bakhjulsdrift (RWD): Aksling tilkoblet differensial som overfører effekt og vrimoment fra motor til hjulene.
Damping ratio	For konstruksjoner og systemer utsatt for støt og vibrasjon (oftest i sammenheng med dynamiske lastforhold): En ubenevnt størrelse som måler amplituden på gradvis minkende oscillerende svingninger med tiden etter en påkjenning.

Innholdsfortegnelse

TABELLER	8
1.0 INNLEDNING	10
1.1 BAKGRUNN	10
1.2 PROBLEMSTILLING	10
1.3 PRIMÆRBEGRENSNINGER	11
1.5 ANDRE STUDIER PÅ OMRÅDET	12
1.6 DISPOSISJON	12
2.0 METODE	13
FOR Å SVARE PÅ PROBLEMSTILLINGEN HAR VI VALGT Å GJØRE FØLGENDE:	13
2.1 ORIGINAL AKSLING	13
3.0 TEORI	14
3.1 ALUMINIUM 6061 – T6	14
3.2 ULEGERT MASKINSTÅL E335	15
3.3 KARBONFIBER	17
3.4 STAINLESS STEEL 316L	18
3.5 STØPING	19
3.5.1 Kokillestøping	19
3.5.2 Hydroforming	20
3.5.3 Trykkstøping	20
3.5.4 Sandstøping	20
3.5.5 Stangstøping	21
3.6 SMING	21
3.6.1 Generelt	21
3.6.2 Partiellsming	21
3.6.3 Valsing	21
3.6.4 Varmvalsing	22
3.6.5 Finvalsing og trykkulling	23
3.7 ETTERARBEID	23
3.7.1 Strålerensing	23
3.7.2 Termisk rensing	23
3.7.3 Mekanisk rensing	23
3.7.4 Kontroll	24
3.7.5 Varmebehandling	24
3.7.6 Impregnering	24
3.8 KARBONFIBERVIKLING	24
3.8.1 Karbonfiber og Epoksy	24
3.8.2 Maskinstyring	25
3.9 STANDARDER	26
3.9.1 ISO/ ASTM	26
3.9.2 Andre Standarder	27
3.10 PROGRAMVARE	28
3.10.1 SolidWorks	28
3.11 3D-PRINTERE	29
3.12 METALL PULVER	29
3.12.1 Tilvirkning av pulver	29
3.13 ADDITIV TILVIRKNING	31
3.13.1 Grunnlag	31
3.13.2 Byggeprosessen PBF	32

3.13.3 <i>Selective laser melting (SLM)</i>	32
3.13.4 <i>Selective Laser Sintering (SLS)</i>	33
3.13.5 <i>Electronic beam melting (EBM)</i>	34
3.13.6 <i>Laminated object manufacturing (LOM)</i>	35
3.13.7 <i>Binder Jetting</i>	36
4.0 DIMENSJONERING OG BEREKNINGER	37
4.1 FORUTSETNINGER.....	37
4.2 BEREKNINGER.....	38
5.0 ANALYSE OG RESULTAT	44
INTRODUKSJON.....	44
6.1 SPENNINGER.....	49
AL 6061-T6, 28 mm:.....	49
AL 6061-T6, 42 mm:.....	49
E335, 28 mm:.....	50
E335, 40 mm:.....	50
SS316, 28 mm:.....	51
SS316, 47 mm:.....	51
Karbon/epoksy kompositt, 28 mm:.....	52
6.2 FORSKYVNINGER.....	52
AL 6061-T6, 28 mm:.....	52
AL 6061-T6, 42 mm:.....	53
E335, 28 mm:.....	53
E335, 40 mm:.....	54
SS316, 28 mm:.....	54
SS316, 47 mm:.....	55
Karbon/epoksy kompositt, 28 mm:.....	55
5.2 TRADISJONELLE TILVIRKNINGSMETODER.....	55
5.2.1 <i>Støpning av metall</i>	55
5.3 MASKINERING.....	56
5.3.1 <i>Dreining</i> <i>Det er flere faktorer som spiller inn når det gjelder hastigheten for dette, materialtype og hardheten i denne samt hvilken overflatefinish sluttproduktet har krav til. Formelen for skjærhastigheten har benevnelse m/min, og er uttrykt ved:</i>	56
5.3.2 <i>Fresing</i>	57
5.3.3 <i>Kostnader knyttet til maskinering</i>	58
5.4 KARBONFIBERVIKLING.....	59
5.4.1 <i>Tidsbruk</i>	59
5.4.2 <i>Kostnader knyttet til karbonfibervikling</i>	60
5.5 ADDITIV TILVIRKNING.....	61
5.5.1 <i>Hastighet</i>	61
5.5.2 <i>Kostnader knyttet til Additive Manufacturing (AM)</i>	61
6.0 DISKUSJON	63
6.1 DISKUSJON AV METODE OG UTFØRELSE.....	63
<i>Metode</i>	63
<i>Utførelse og begrensninger</i>	64
6.2 DISKUSJON AV ANALYSE OG RESULTAT.....	64
7.0 OPPSUMMERING	67
8.0 REFERANSER	69
VEDLEGG B RESULTATER FRA SIMULERING	84
1. SPENNINGER.....	84
2. FORSKYVNINGER.....	91

Figurer

Figur 1 Hot Rolled Long Products	22
Figur 2 Varmvalsing	22
Figur 3 Mønster med maskinstyring	26
Figur 4 AM- Standarder generalisert.....	27
Figur 5 Solidworks AM.....	29
Figur 6 Solid-state Reduction	30
Figur 7 Elektrolyse.....	31
Figur 8 Illustrasjon SLS	34
Figur 9 Illustrasjon EBM	35
Figur 10 Illustrasjon LOM	36
Figur 11 Illustrasjon Binder Jetting Figur 12 3D Printing	37
Figur 13 Opprinnelig drivaksel (reservedeler.no U.D)	38
Figur 14 Laster på bakaksling beskrevet som et kraftsystem	40
Figur 15 Skisse av bakaksling.....	45
Figur 16 Lokasjon høyest spenning Al (28mm)	49
Figur 17 Lokasjon høyest spenning Al (42mm)	49
Figur 18 Lokasjon høyest spenning E335 (40mm)	50
Figur 19 Lokasjon høyest spenning SS316 (28mm).....	51
Figur 20 Lokasjon høyest spenning SS316 (47mm).....	51
Figur 21 Lokasjon høyest spenning kompositt (28mm)	52
Figur 22 Lokasjon høyest forskyvning Al (28mm)	52
Figur 23 Lokasjon høyest forskyvning Al (42mm)	53
Figur 24 Lokasjon høyest forskyvning E335 (28mm)	53
Figur 25 Lokasjon høyest forskyvning E335 (40mm)	54
Figur 26 Lokasjon høyest forskyvning SS316 (28mm).....	54
Figur 27 Lokasjon høyest forskyvning SS316 (47mm).....	55
Figur 28 Lokasjon høyest forskyvning kompositt (28mm)	55
Figur 29 Utvikling skjærhastighet, fra forelesing TEK2111	57
Figur 30 Skjærhastighet – Fresing, fra forelesing TEK2111	58
Figur 31 Kostnadsbilde AM (RUFFO 2006).....	62

Tabeller

Tabell 1 S275J2G3 (NorskStål)	14
Tabell 2 Sammensetning E295 (metalinfo 2018)	14
Tabell 3 Sammensetning Al6061- T6.....	15
Tabell 4 Sammensetning E335.....	16
Tabell 5 Karbonfiber	17
Tabell 6 Sammensetning 316L.....	19
Tabell 7 Vektestimater for aksling av nytt materiale basert på opprinnelig diameter	41
Tabell 8 Vekt av bil og ny aksling med opprinnelig diameter.....	41
Tabell 9 Bøyemoment for alle 4 materialtyper	41
Tabell 10 Bøyemoment for alle 4 materialer med ny diameter.	41
Tabell 11 Bøyespennning for alle 4 materialtyper med opprinnelig diameter	42
Tabell 12 Bøyespennning for alle 4 materialer med ny diameter	42
Tabell 13 Tabell 11 Maksimal skjærspennning for hvert materiale med opprinnelig diameter.	43
Tabell 14 Maksimal skjærspennning for hvert materiale med ny diameter.	43
Tabell 15 Maksimal bøyespennning for hver materialtype	43
Tabell 16 Ny akseldiameter	47
Tabell 17 Volum, ny aksling med økt diameter	47
Tabell 18 Vekt, ny aksling med økt diameter	48
Tabell 19 Wr, ny aksling med opprinnelig diameter + bil.....	48
Tabell 20 Wr, ny aksling med økt diameter + bil	48
Tabell 21 Produksjonshastighet vikling	59
Tabell 22 Størkningstid (x. Qian 2016).....	60

Tabell 23 Prosessrekkefølge og estimert tidsforbruk karbonfibervikling	60
Tabell 24 Printerhastighet	61
Tabell 25 Benevnelser byggetid – Formel.....	63

1.0 Innledning

1.1 Bakgrunn

Bilindustrien er i stadig utvikling og tar i bruk nye metoder i utvikling og produksjon av karosseri, deler og verktøy. 3D-printing av prototyper har vist seg å være en svært effektiv metode med tanke på utviklingstid, kostnader og materialbruk. I følge rapporten fra FNs Klimapanel, står industrien for 21% av CO₂ utslipp (IPPC 2013). Sammenliknet med tradisjonelle produksjonsmetoder, kan for eksempel 3D-printing kutte kostnader med 92,5% og nedgang i tidsbruk med 61,21% for utvikling av nye produkter og deler til bilindustrien (Stratasys 2018). Det er dermed grunn til å tro at 3D-printing, additive produksjonsmetoder, blir satset mer på i fremtiden, og at denne metoden kommer til å spille en større rolle for økonomi, miljø og fremtidens teknologi.

Det finnes i dag ulike metoder for å produsere drivaksler for kommersielle transportmidler til bilindustrien. Drivaksling til kjøretøy blir brukt til å overføre rotasjonsbevegelse fra girkassa til hjulene i en konstant hastighet.

I utvikling- og produksjonsfasen skal materialforbruk, økonomiske og miljømessige forhold tas hensyn til. Dimensjonering av drivaksler skal først og fremst tilfredsstillende akslingen mot brudd men også med hensyn på støy, vibrasjoner og ytre faktorer. Dersom dette ikke blir tilfredsstillende kan det få store konsekvenser for økonomi og miljø.

Rapporten omhandler en mulighetsstudie for drivakslingen til Rat Rod prosjektet ved NTNU i Gjøvik, og skal rettes mot hvordan additive produksjonsmetoder kan brukes til fremstilling av drivakslinger.

1.2 Problemstilling

Denne rapporten tar utgangspunkt i følgende problemstilling

Skolen har et ombyggingsprosjekt av en dieseldrevet 1982 Volkswagen Type 2 (T3) som skal bli bensindrevet. Hensikten med rapporten er å avdekke mulighetene, med tanke på styrke, produksjon og kostnad, for utskift av det originale drivverket tilpasset den nye motoreffekten. Rapporten begrenser seg til 4 typer aktuelle legeringer av forskjellig slag som aktuelle kandidater hvor en av dem også belyser mulighetene for metall-3D- printing av ny drivaksel.

1.3 Primærbegrensninger

Med alternativ aksel menes ny aksling som er tilrettelagt for ny motoreffekt, dreiemoment og vekt på kjøretøyet. Denne rapporten vil begrenses til 4 typer legering på grunn av arbeidsmengde og omfang. 1 av disse legeringene er med tanke på 3D printing. Det blir fulgt europeisk/norsk standard NS-EN på legeringene, rapporten tar ikke med standarder fra andre regioner som USA. De fire legeringene som er valgt ut er følgende:

- * Aluminium 6061-T6
- * Ulegert maskinstål E335
- * Karbonfiber
- * Stainless Steel 316 (pulvermetall til 3D printing)

De utvalgte legeringene har ulike egenskaper, der de viktigste ulikhetene går på flytegrense, strekkfasthet, E-modul, duktilitet og hardhet. Dette vil bli gått i dybden på senere i rapporten i kapittel Grunnlaget for de ulike legeringen er at man dekker ett større utvalg av akslinger for sammenlikning.

Beregningene som er foretatt vil begrenses til og gjelde bøyepenninger samt vridning på aksel, utregninger og nærmere forklaring er beskrevet i kapittel ...

Rapporten begrenses til kun og gjelde bakakslingen, den tar ikke for seg hverken lager, oppbygging av kuler eller kryss.

1.4 Definisjoner, produksjonsmetoder

3D – Tredimensjonal

AM – Additive Manufacturing

1.5 Andre studier på området

(Grøstad 2016) vurderer i sin masteroppgave for NTNU på additiv tilvirkning av verktøyholdere i stål i forhold til tradisjonelle tilvirkningsmetoder, og tester dette i prosjektet sitt sammen med bedriften Sandvik Teeness. Masteroppgaven til Grøstad omhandler mindre og komplekse geometrier, og er tilsynelatende den eneste av sitt slag med additiv tilvirkning av metallprodukter i Norge.

I en masteroppgave utført av Roar Nelissen Leirvåg (Leirvåg 2013) publisert ved NTNU Trondheim, gjør Leirvåg en mulighetsstudie for Oshaug Metall AS om additiv tilvirkning av større produkter som skal brukes til offshore- og skipsindustrien. Leirvåg sammenlikner 3D-printere og gjør evalueringer rundt tilvirkningen av additive modeller som skal brukes til sandstøping av produkter. Da denne masteroppgaven tar for seg tilvirkning av større produkter vil konklusjoner og slutninger bli nevnt senere i rapporten.

Resultatene i de nevnte rapportene baseres på testing og vurderinger som er gjort sammen med bedrifter, og produktene har mer avanserte geometrier enn denne rapporten tar for seg. Det er likevel nærliggende å vurdere disse rapportene sammen med annen tilgjengelig litteratur om additiv tilvirkning.

1.6 Disposisjon

Kapittel 2: Presentasjon av nødvendig teori med tanke på materialeegenskapene til de valgte materialene oppgaven begrenser seg til.

Kapittel 3: Beskrivelse av de mest brukte metodene for produksjon i automobilindustrien, i tillegg til karbonfibervikling og additiv tilvirkning

Kapittel 4: Beskrivelse av det metodiske arbeidet, argumentasjon for tilvirkningsprosess og hvordan beregningene er utført.

Kapittel 5: Metodevalg, utførelse, resultat og analyse blir diskutert. En oppsummering av hovedpunktene. I tillegg diskuteres andre relevante perspektiver for oppgaven, med et kort forslag til videre arbeid som avslutning.

2.0 Metode

For å svare på problemstillingen har vi valgt å gjøre følgende:

- Litteraturstudie
 1. Benytte artikler og studier gjort på området for å avdekke hva som er det nyeste av produksjonsmetoder for akslinger til bilindustri, både konvensjonelle og via 3D-printing teknologi, og finne ut hvilke som er kan være aktuelle for oss innen gitte kostnadsrammer.
 2. Benytte standarder som NS-EN for å finne riktige størrelsesverdier i henhold til krav for dimensjonering, mål, og styrkeegenskaper.
 3. Beregninger som vil oss svar på de utvalgte typers egnethet som material til bruk i nytt drivverk og om de tilfredsstill standardiserte krav med tanke på styrke og utmatting.
- Konstruksjons -og simuleringsverktøy som DS SolidWorks for dimensjonering og analyse av de aktuelle materialtypene.
- Vi benytter SolidWorks til å lage en enkel modell av akslingen for å simulere påkjenninger gjennom å spesifisere materialtype og laster og gjennomføre dynamiske simuleringer.
- Hjelp fra veileder.
- Undersøke med veileder rundt skolens økonomiske begrensninger rundt prosjekter når vi skal vurdere de aktuelle alternativene.
- Arbeidet foregår både selvstendig og gjennom samarbeid via internett og møter på skolens område.

2.1 Original aksling

Etter mange søk og leting har det vist seg at å finne tilstand/legering på den originale akselen var vanskeligere enn antatt. Mailkorrespondanse med ulike forhandlere har ført til videresendelse til importører som igjen sender det videre. Dermed vil legeringen til original aksel bli antatt i denne rapporten, slik at det er mulig å gjøre en sammenligning med de alternative akslingene som rapporten er begrenset til. Valget falt på S275J2G3, da dette er et seigt materiale som blir brukt i flere typer akslinger. Bokstavene og tallene i denne typen stål, står for følgende:

S	Konstruksjonsstål
275	Minimum flytegrense N/mm ²
J2	Slagseighet min 27J ved -20° C
G3	Leveringstilstand

Tabell 1 S275J2G3 (NorskStål)

Sammensetning til denne legeringen er som følge:

Komponent	%
C	0-0.180
P	0-0.035
Mn	0-1.500
S	0-0.035
Fe	Resterende

Tabell 2 Sammensetning E295 (metalinfo 2018)

S275J2G3 har en flytegrense på 275MPa og en nominell strekkfasthet på 400-540 Mpa

3.0 Teori

3.1 Aluminium 6061 – T6

Aluminium er et lettmetall som benyttes mye innen transportsektor så vel som i bygningsindustrien. Materialet er kjent for å være lett formbart ved konvensjonelle bearbeidingsmetoder som valsing, pressing, ekstrudering, trekking og trykking. Det er også velegnet til støpning.

Generelle fordeler ved aluminium er omfatter egenskaper som høy styrke og seighet (avhengig av legering og leveringstilstand), men middels utmattingsstyrke. Den har lav vekt og høy motstandsevne mot korrosjon i sammenliknet med stål. Aluminium har et tynt oksidsjikt på overflaten som beskytter det mot korrosjon som er en verdifull egenskap for vårt bruksområde hvor materialet vil utsettes for all slags vær og sesonger.

Legeringen har god sveisbarhet men med også lavere styrke i sveisesonen.

En ulempe og mulig utfordring ved aluminium er relativt lav elastitetsmodul og utmattingsfasthet sett i forhold til stål og er derfor noe begrenset i dets bruksområder generelt sett. Styrken kan forbedres vesentlig ved legering med andre metaller (Hydro 2018).

Sveiste og støpte legeringer graderes først med et firesifret nummer som representerer dets største legeringselement hvor eksempelvis 6XXX inkluderer større grader av magnesium og silisium.

Materiale	Strekfasthet	Flytegrense	Kjemisk komposisjon	%
Aluminum 6061 - T6	0-18	8	Mg	1.0
			Si	0.6
			Cu	0.28
			Cr	0.20
			Al	resten

Tabell 3 Sammensetning Al6061- T6

(Kenneth G. Budinsky 2010)

AL 6061-T6 er en lett og sterk legering i forhold til ulegert aluminium som i sin generelle form er for myk til strukturell bruk. En viktig egenskap til legeringen er dens meget gode korrosjonsbestandighet. Legeringen er godt egnet til bearbeidingsmetoder og brukes gjerne til forming av konstruksjonsrør, både faste og hule. Den er ofte benyttet innen tungindustriapplikasjoner som lastebilrammer, skipsbygging, broer, fly og helikopter, rør, nagler, transport og motorbåter. Numrene representerer hardhetsgraden og hvordan den ble oppnådd. For denne legeringen indikerer T6 at den var varmebehandlet og kunstig herdet (Hydro 2018).

AL 6061 har en flytegrense på 276 MPa, nominell strekkfasthet på 310 MPa (glemco.com U.D), og en maksimal skjærspenning på 207 MPa (matweb.com U.D).

3.2 Ulegert maskinstål E335

Stål er smibare legeringer av jern, Fe, og blir benyttet innen bygg, vei, jernbane og tungindustri. Det har utallige muligheter med tanke på egenskaper ved hjelp av legeringselementer og behandling. Egenskapene grupperes inn i fire hovedgrupper, basert på ulike prinsipper.

1. Fersking
2. Desoksidasjon og legering
3. Utstøpning
4. Valsing/ Smiing

Fordeler med stål er at det kan produseres i svært store mengder, og at egenskapene kan endres med legering og varmebehandling. Det blir da muligheter for store spennvidder og store dimensjoner REF.

Ulempen med stål er at det ikke er korrosjonsbestandig. Det er like vel muligheter for å få tak i rustfritt og slyngel og prime produkter. Sett i forhold med aluminium er vekten betydelig høyere i stål.

E335 er et ulegert maskinstål, som betyr at det ikke har krav til slagseighet, men at det fortsatt er sveisbart. Denne type stål er som oftest smidd stål satt sammen for å oppnå følgende bestemte mekaniske- og ingeniøregenskaper.

- Styrke
- Duktilitet
- Seighet
- Utmattelsesseighet

Denne ståltypen har deoksidasjon FN, dette står for at utettet stål ikke er tillatt (Johansen 2008). Utettet stål er stål som når det størkner under gassutvikling inneholder porer (Kolbeinsen 2009). Dette stålet har derfor krav til og være tettet stål. Stål som er tettet kjennetegnes ved at løst oksygen er enten fjernet eller bundet kjemisk før utstøpning, det vil dermed ikke dannes porer under størkningen (Kolbeinsen 2018). Vil også ha mindre tendens til seigring, samtidig som omslagstemperaturen er lavere. Denne temperaturen forteller om en relativt skarp overgang fra seig til sprø tilstand ved avkjøling av stålet (Pedersen 2011). E335 som blir beskrevet i denne rapporten er referert som høystyrkestål, AHSS, på grunn av strekkfastheten, 550+ Mpa. Denne typen stål er blitt forsket på i mange år og utviklingen har gjort at styrken i dag er 50% sterkere enn tidligere forgjengere. Det er i dag ingen andre materialer i bilindustrien som kan sammenlikne seg med variasjon og styrke. Dette medfører at det kan dimensjoneres mindre deler med høy styrke.

Materiale	Strekkfasthet	Flytegrense	Kjemisk komposisjon	%
Maskinstål E335	550-710	275-335	Fe	99.898
			P	0.045
			S	0.045
			N	0.012

(Steel 2018)

Tabell 4 Sammensetning E335

E335 har en maksimal skjærspenning på 380 MPa (Makeitform.com U.D)

3.3 Karbonfiber

Karbonfiber er et materiale med lav vekt og høy styrke som har at en eksponentiell økning i popularitet innen bilindustrien de siste 60 årene. Materialet benyttes i økende grad i tilfeller hvor styrke, vekt, temperatur -og korrosjonsbestandighet prioriteres fremfor lave kostnader. På grunn av den høye vektprisen og de store produksjonskostnadene sammenliknet med konvensjonelle metaller er karbonfiber fortsatt hovedsakelig brukt til fremstilling av høyverdi produkter som for eksempel moderne fly, superbiler, konseptbiler, og militært utstyr. «Blant annet blir motordeler som stempelbolter og veivstenger laget av karbonkompositter. Aksler og koblinger i fiberkompositt gir blant annet høy torsjonsstivhet kombinert med stor radiell elastisitet, høy demping og lav vekt.» (Johansen 2008).

Fremstillingsmetoden starter ved å forkulle organiske fibrer av akryl eller rayon (Johansen 2008). Karbonfiber er bånd bestående av flatpressede, bikubeformede karbonkrystaller justert i en lang akse med høy styrke i akseretningen og deretter organisert til fiberstruktur som har den samme heksagonale strukturen som de opprinnelige karbonkrystallene. Fibrene, bestående av flate bånd av karbonkrystaller, blir så tilvirket ved veving og gjort om til en karbonduk av tykkere fibre (Ore 2009). Karbonfiberkompositter består som regel av impregnerte fibermatter laminert med epoksyharpiks. Karbonfiber er også tilgjengelig som hakkede tråder, som granulat til fremstilling av ulike typer termoplaster, og som pulver til 3D printing.

Materiale	Strekkfasthet	Flytegrense
Karbonfiber	600-1080	985 (MatWeb 2018)

(Composites 2009)

Tabell 5 Karbonfiber

Bilmarkedet for karbonfiber og kompositter av det indikerer at bruken av dette materialet innen bilsektoren vil fortsette å være begrenset til høyverdi produkter brukt til for eksempel produksjon av racing -og luksusbiler med mål om vektbesparelse og lavere drivstofforbruk innen år 2020 (Vicari 2015). Men etter 2020 er det trolig at prisene på karbonfiber vil synke som følge av at nye tilvirkingsmetoder reduserer syklus tid på fremstillingsprosessen.

Fordeler ved karbonfiber og karbonfiberkompositter:

- Høyere styrkeegenskaper enn stål kombinert med en brøkdelen av vekten gjør at drivstoffutgifter minker og levetiden forbedres. For mange forbrukere er drivstofforbruk en avgjørende faktor i valg ny bil på grunn av økende pendleavstander (Panjwani 2018).

- En betydelig vektreduksjon ved utskift av større motordeler som gir drastisk økning i drivstoffeffektivitet. Ifølge U.S Department of Energy (DOE) vil en vektreduksjon på 10 prosent medføre en økning på mellom 6 og 8 prosent i drivstofføkonomi (Panjwani 2018).
- Gir økende grad av frihet til ingeniører og designere av bilkomponenter enn konvensjonelle metaller, med like styrkeegenskaper i alle retninger, og tillater produksjon av produkter med andre type former og fasonger.

Mulige utfordringer:

- Vanskeligere å modellere ved samtidig å bevare materialets strukturelle integritet enn metall på grunn av komplekse egenskaper for fibrenes motstandsevne mot ulike typer spenninger, deres distribusjon og orientering.
- Mangel på kompetanse - karbonfiberkompositter oppfører seg svært ulikt fra metaller som har samme egenskaper i alle retninger og som er det tilfelle de fleste teknologer kanskje er kjent med.
- Økonomi og reliabilitet ved testforsøk - testing av karbonfiberkompositter er mer komplekst på grunn av varierende materialeegenskaper i ulike deler av konstruksjonen, og en testprøve vil ikke gi fullverdig svar på hvordan konstruksjonen vil oppføre seg under forskjellige påkjenninger som en prøvestav av metall. På grunn av dette må de ulike delene støpes, formes og testes på individuell basis for å kunne forstå materialets ytelse (Panjwani 2018), noe som fører til økte produksjonskostnader.

Flytegrense og strekkfasthet for kompositter er vanskelig å anslå på grunn av store egenskapsvariasjoner for de ulike typene. Følgende data er basert på gjennomsnittet av verdier for en rekke materialer som faller under kategorien «karbonfiberkompositt med epoksyharpiks» i denne databasen. Vi vedkjenner at gjennomsnittsverdien kan påvirkes av verdier for mindre aktuelle typer tilvirket på forskjellige måter og representerer ingen spesifikk grad.

Karbonfiberkompositt med epoksyharpiks har en flytegrense på 985 Mpa og nominell strekkfasthet på 1080 Mpa (MatWeb 2018)

3.4 Stainless steel 316L

316L betyr at den har lavere innhold av karbon enn vanlig 316 stål (Bell 2018). Fordelen med dette er at sveiseegenskapene er bedre enn for 316 som gjør den mer anvendelig (Astrup U.D). Dette er en ståltipe med legering som gjør at den er korrosjonsbestandig på grunn av Cr

innholdet er over 12% som gjør at det dannes en passiv film på overflaten som er tett og sitter fast (Johansen 2012). Denne typen blir kalt syrefast fordi det har minimum 2% innhold av molybden. Med dette menes at den har større motstandsevne mot korrosjon fra en del syrer som svovelsyre, saltsyre, eddiksyre etc. Typiske bruksområder for denne typen legering er utendørs rekkverk, kasseroller, kapslinger samt utstyr som står under forhold hvor slike syrer kan inntreffe. Eksempel på et slikt forhold er i scrubber- området i et forbrenningsanlegg. Denne typen tåler høye spenninger, og høye temperaturer da styrken økes i dette. Derfor er den mye brukt innen maritim sektor (Astrup U.D).

Rustfritt stål 316L

Materiale	Strekfasthet	Flytegrense	Kjemisk komposisjon	
Stainless Steel 316	517	207	Fe	69,045
			C	0.030
			Mn	2
			Si	0.75
			P	0.045
			S	0.03
			Cr	16
			Mo	2
			Ni	10
			N	0.10

(Products 2018)

Tabell 6 Sammensetning 316L

3.5 Støping

3.5.1 Kokillestøping

Kokillestøping er en støpningsmetode i varige former. For masseproduksjon brukes hydrauliske kokilleformer som gir nøyaktig og rask produksjon, som igjen medfører jevnere kvalitet på produktet. Metoden har vist å være hendig til produksjon av mindre metallemer.

Metallsmelta føres inn i kokilleformen, og avkjøles i den. Dermed er det metallens egenvekt, og ikke ytre trykk, noe som gjør bruken av kjerner blir lettere å føre ut av støpen.

Kokillestøping egner seg til emner mellom 1-10kg.

Fordelene med kokillestøping er blant annet at emnene får glattere overflate, bedre fasthetsegenskaper og nøyaktige dimensjoner (Corneliussen 2015). Det er også gode muligheter for å automatisere metoden, og dette kan kutte kostnader

3.5.2 Hydroforming

Denne typem forming ble utviklet for å gi et kostnadseffektivt middel for produksjon av trukket eller asymmetriske deler. Alle typer materialer som er i stand til å kaldformes kan benytte denne metoden. Det øvre støpeelementet består av ett formkammer av olje, gummimembran og slitasjepute. Nedre støpeelement består av en avstøpningsmodell og en festering rundt denne avstøpningsmodellen er festet til et hydraulisk stempel. Formpressen starter ved at aluminiumet legges på festeringen, deretter lukkes formen ved at det øvre elementet presses ned. Det øvre kammeret er trykkbelastet med olje og stempelet presser avstøpningsmodellen gjennom festeringen og inn i det øvre kammeret. Siden det er gummi i den øvre formen vil aluminiumet bli formet uten skade. Gummimembranen omslutter hele emnet og former etter avstøpningsmodellen. Når pressingen er fullført slippes trykket i det øvre kammeret og stemplet trekkes tilbake (Forming 2018).

3.5.3 Trykkstøping

Trykkstøping foregår i halv eller helautomatiske trykkstøpemaskiner, hvor metallsmelta blir ført inn i formen med høyt trykk inn i formene. Kaldkammermetoden er for denne rapporten mest aktuelt, da kaldkammermetoden kan benyttes til aluminium.

Metallet smeltes i en digel før den sprøytes inn i formen med et trykk mellom 200-1500 bar (Corneliussen 2015). Med denne metoden kan produksjonen stå for ca. 20 produkter pr. time.

3.5.4 Sandstøping

I motsetning til kokillestøping brukes det former som ikke kan brukes på nytt når smelta har størknet. Det formes i stedet en modell av produktet, og sand trykkes rundt modellen.

Modellen tas bort og sanden har tatt form av modellen.

For å lage selve modellen som blir lagt i sanden, brukes generative metoder. Dette er en direkte tilvirkning av modellen, som kan være med additiv tilvirkning, 3D-printing. Dette medfører at vi kan støpe produkter med avansert geometri, men gjør også at heleemner kan støpes, uten at det trengs metoder som sveising i etterkant.

(Leirvåg 2013) så på denne metoden i sin masteroppgave.

3.5.5 Stangstøping

Dette er en form for kokillestøping som tidligere nevnt for aluminium. Støpene blir gjort i «bunnløse» vannkjølte kokiller. Denne metoden er svært ettertraktet å bruke når det skal være lange emner. Svært liten lunger dannelse og blæredannelse da digelen opptrer som en stor mater. Fin overflate uten sandinneslutninger, dermed går lave pussekostnader (Corneliussen 2015).

3.6 Smiing

3.6.1 Generelt

Ved å deformasjons-behandle materialet vil urenheter og inneslutninger bli redusert eller fjernet, og materialet får en bedre struktur da strukturen til korna blir påvirket av knaing. Materialet får forbedrede egenskaper med tanke på strekkfasthet, duktilitet og motstand mot korrosjon. Dette er svært viktig med tanke på produkter som får påkjenninger som torsjonskrefter og svingninger. For at materialet skal tåle disse påkjenningene må materialet varmes opp før smiingen begynner. Typiske metoder for smiing er bruk av pressing og hamring (Corneliussen 2015).

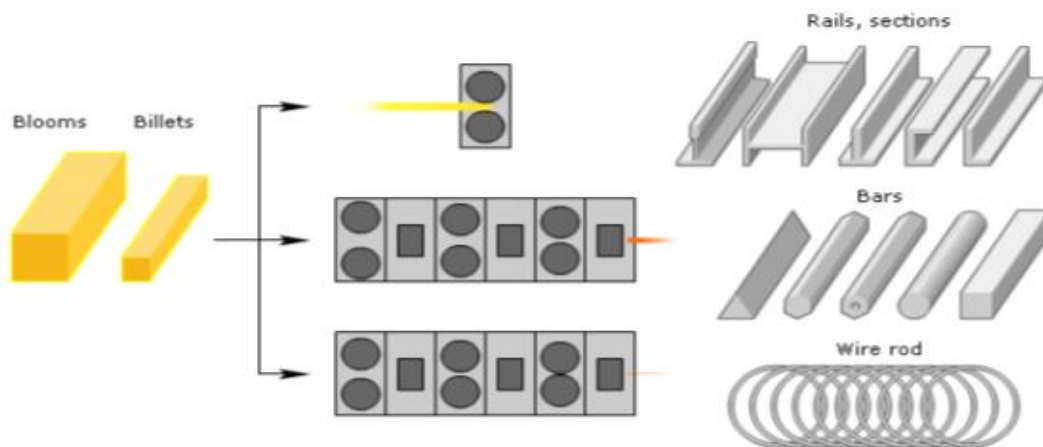
3.6.2 Partiellsmiing

En metode som ifølge (Myklebust 2015) blir brukt til støpning av aksler er partiellsmiing. Prosessen foregår ved at et emne blir støpt med en basisgeometri hvor den senere går igjennom en smi- prosess. Myklebust hevder videre at denne metoden reduserer antall smi-operasjoner, og at det kan produseres et hybrid produkt som er delvis smidd. Dette kan gjøre produksjonen billigere.

3.6.3 Valsing

Med valsing menes en formgivende prosess der emnet blir ført mellom 2 valser som har motsatt dreieretning. Tykkelsen på emnet som skal valeses er større enn avstanden mellom valsene. dette blir trukket inn mellom valsene, og kraften blir overført til emnet ved hjelp av friksjon mellom valsene og emnet (Corneliussen 2015).

Hot-rolled Long Products

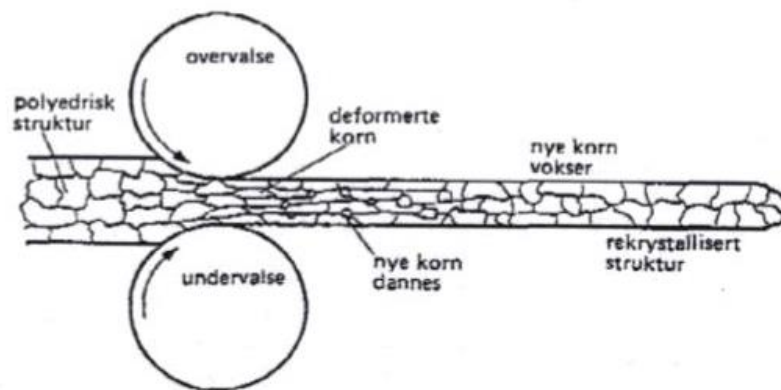


Figur 1 Hot Rolled Long Products

(Narvik 2007)

3.6.4 Varmvalsing

Valsing har den fordelen at den forbedrer strukturen til materialet som blir valset. Strukturen som er grovkrySTALLinsk blir ved riktig temperatur og valsingsgrad overført gjennom krystallisasjon som skjer fortløpende til en mer finkornet struktur, den får også da bedre mekaniske egenskaper. Mekaniske egenskaper er et uttrykk for materialers reaksjon på ytre krefter. Disse innebærer Fasthetsegenskaper, hardhet, flytegrense mm. 80-90% av all stålproduksjon i verden foregår gjennom valseverk. Dette forteller den store tekniske og økonomiske betydning som fremgangsmåten har.



Figur 2.4 Rekrystallisasjon under varmvalsing

Figur 2 Varmvalsing

3.6.5 Finvalsing og trykkulling

Dette er en sluttbehandling. Ved hjelp av dette så blir overflaten glatt, samt overflatehardheten og styrken til emnet/materialet økes. For materialet her ligger hardhets økingen på ca. 30%, hardheten vil avta omtrent lineært innover (Corneliussen 2015).

3.7 Etterarbeid

3.7.1 Strålerensing

Det er ulike rengjøringsmetoder etter støpning. Strålerensing deles opp i to hovedkategorier, trykkstråling og slyngestråling.

- Trykkstråling skyter strålemiddelet mot arbeidsstykket med hjelp av trykkluft, damp eller vann.
- Slyngestråling har et slynghjul som akselererer rundt og kaster strålemiddelet mot arbeidsstykket.

Slyngestråling blir i dag brukt hyppigere enn slyngestråling, da dette ofte er billigere og mer effektivt.

Strålemiddlene som blir brukt i disse metodene er sand, hvitt støpejernskrap og ståltråd-korn. Vann blir særlig brukt til rensing av store støpstykker som ikke er egnet for mekanisk rensing (Corneliussen 2015).

3.7.2 Termisk rensing

Denne metoden blir brukt ved hjelp av acetylenoksygenflamme og tilsetningspulver. Pulveret som tilsettes øker intensiteten til flammen slik at gjerning av kjernestabler, støpegrader mm. skjer enkelt og hurtig. Ved gjenbruk av aluminium egner denne rensesmåten seg svært godt da de mekaniske egenskapene har lav spredning og holder godt på styrke og duktilitet (Bilsbak 2012).

3.7.3 Mekanisk rensing

Meisling og sliping som rengjøringsmetode går i kategorien mekanisk bearbeiding, og er metoder som er tunge og lite miljøvennlige. I denne type rengjøringsmetoder blir avanserte roboter og systemer mye brukt. Dette på grunn av avanserte geometrier og størrelser, gradene på støpeemnet. Utvekstene som støpeemnet har fått kan og skape utfordringer ved mekanisk rensing. Styresystemet blir programmert for å finne ujevnheter og andre faktorer som skal

fjernes fra støpeemnet med hjelp av sensorer. Robotene sliper dermed bort differansen (Corneliussen 2015).

3.7.4 Kontroll

Kontroll av støpegods er en viktig del av tilvirkningsprosessen. Ved kontroller kan det oppdages hvilke feil som emnet har fått under tilvirkningen. Dersom det brukes statistiske metoder kan områdene avdekkes ved hjelp av datamateriale. Ved mål- og form-kontroll kan alminnelige tradisjonelle verktøy benyttes. Ved store serieproduksjoner er det ofte mer lønnsomt med spesialverktøy og kontrollfiksturer.

Kontroll av overflate skjer ofte av arbeidene personell. Sprekker sjekkes med ulike metoder som for eksempel ultralyd penetreringsmetode.

Dynamisk punktmåling er måling ved hjelp av x-y-z punkter, som viser om støpegodset er innenfor de gitte standardene (Laserteknikk 2018).

3.7.5 Varmebehandling

Varmebehandling av støpegods blir utført med to ulike metoder, avspenningsgløding eller normaliserende gløding (Corneliussen 2015).

- Avspenningsgløding blir brukt til gods som har hatt varierende avkjølingshastighet i ulike partier. Avspenningsglødingen tar bort indre spenninger i godset.
- Normaliserende gløding blir brukt for å gi bedre mekaniske egenskaper, og skjer ved homogenisering av sekundærstrukturen og kornstørrelsen.

3.7.6 Impregnering

Impregnering utføres for å tette porer som kan oppstå under størkningen. En fordel med impregnering er at korrosjonsmotstanden øker. Det er vanskelig å få lettmetallgodt helt tett, og det oppstår lunger eller mikroporer. Dette gjør at godset porøst. Hvor stor porøsitet er godkjent bør oppgis, samt innvirkningen av denne på fasthetsegenskapene (Corneliussen 2015).

3.8 Karbonfibervikling

3.8.1 Karbonfiber og Epoksy

Karbonfiber sin fordel er lav vekt og god styrke, og veier ifølge (Grøndalen 2017) en femtedel av stål. Karbonfiber, som blir fremstilt av polyakrylnitril, PAN eller rayon, kan oppnå E-

modul opp mot $350\,000\text{ N/mm}^2$ med varmebehandling på 1800°C for å danne grafittfiber.

Ved varmebehandling fra $1200\text{--}1600^\circ\text{C}$ kan egenskaper tilvirkes etter ønske, og oppnå E-modul på $250\,000\text{ N/mm}^2$. Egenskaper som kan påvirkes av varmebehandling er blant annet lav slitestyrke, friksjon, bruddforlengelse, varmeutvidelse og massetetthet. I tillegg kan det nevnes at karbonfiber har høy temperaturbestandighet og utmattingsfasthet

Epoksy er et kjemisk middel som er kunstharpiks og blandes inn i karbonfiber som bindemiddel. Epoksyen er flytende og består av to komponenter, resin og hardener, som medfører en kjemisk reaksjon, og sammen med varmebehandling stivner epoksyen. Det er mulig å blande inn flere komponenter i epoksyen for å oppnå ulike egenskaper i materialet som akselerator, tynnere og fyllstoffer. Epoksyen gir materialet styrke og tetter porer og luftrom i karbonfiberen (Gauthier 1990). Gauthier nevner og at det er svært viktig ved bruk av to-komponent epoksy at blandingsforholdene er eksakte for å oppnå best mulig resultat.

3.8.2 Maskinstyring

Som mange andre produksjonsmetoder er også karbonfibervikling en maskinstyrt prosess. Dette medfører ifølge (Peters 2011) at viklingen kan foregå i ikke-sylindriske og usymmetriske mønstre, i tillegg sørge for at fibrene legger seg jevnere og en kontrollert påføring av resin. Datamaskinen bak den maskinstyrte prosessen kan med utviklingen av mer hukommelse ha en bevegelsesfrihet opp til seks akser. Dette medfører derfor at kombinasjonen av bevegelses frihet og jevnere lag med fibere øker materialets mekaniske egenskaper, og det kan produseres produkter med avanserte geometrier. Det viser seg også at med de nevnte egenskapene maskinstyring fører med seg gjør at arbeidet med analyse av materialet og konstruksjonen blir lettere. Dette er da med metoder som «Finite Element Method (FEM)» det gjøres en analyse for eksempel bøy, strekk, vridning og brudd.



Pattern 1 – Full coverage after 9 circuits



Pattern 1 – Partial coverage after 3 of 9 circuits



Pattern 2 – Full coverage after 9 circuits



Pattern 2 – Partial coverage after 2 of 9 circuits

Figur 3 Mønster med maskinstyring

(Peters 2011)

3.9 Standarder

3.9.1 ISO/ ASTM

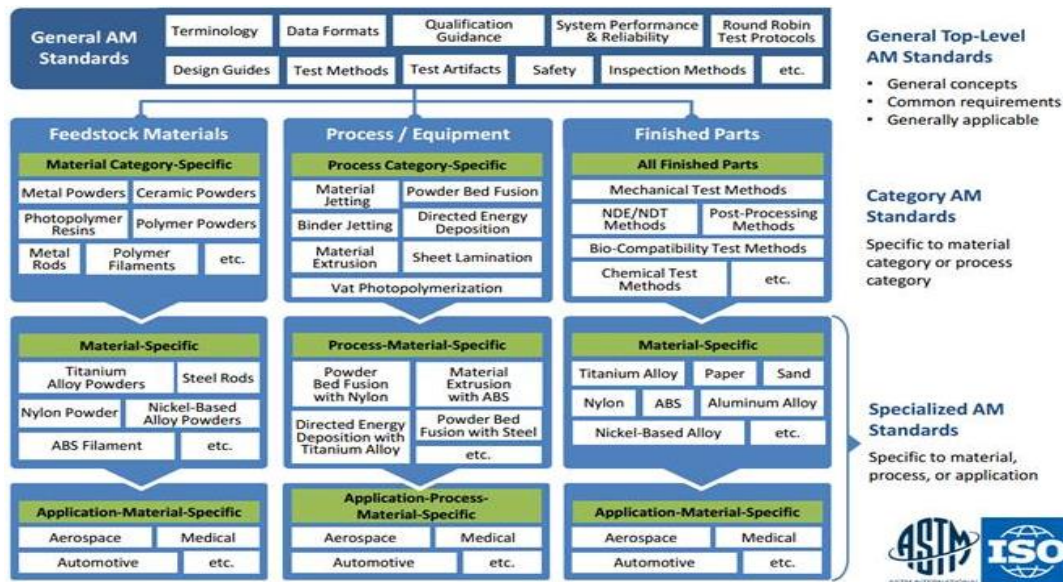
Ny teknologi, utstyr og materialer gjør at AM er på vei til å bli en kostnadsbesparende metode. AM bruker dataassisterte programvarer til å lage produkter, deler og prototyper lag for lag. Dette har fordeler som at etterarbeid ofte ikke er nødvendig, det er lett å endre design og prosessen fra idé til produkt går raskere. I tillegg er det mulig å produsere geometrier som ikke er mulig med tradisjonelle produksjonsmetoder.

AM blir i dag brukt i industrier som:

- Luftfart
- Ubemannet luftfart
- Medisin og kirurgi
- Materialteknologi
- Forbrukerprodukter

Med et økende marked for AM er det viktig med standarder som retningslinjer for bruk av produksjonsmetoden.

ATSM International og ISO inngikk i 2011 et samarbeid, «A Partner Standard Developing Organization», for å utvikle standarder som skal sørge for samhandling og integrasjon mellom applikasjonene. Denne samhandlingen gjør at der det tidligere ikke har vært noen standarder kan utvikles nye, formelle vedtak ved publisering og vedlikehold av utgitte standarder (International 2018).



Figur 4 AM- Standarder generalisert

(International 2018)

Noen utgitte standarder fra ISO/ ASTM

- Guide for AM – General Principles – Requirements for Purchased AM Parts (ISO/ATSM 52901)
- Guidelines for Design for AM (ISO/ASTM 52910)
- Specification for AM File Format Version 1.2 (EN ISO/ASTM 52915)
- Terminology for AM – General Principles – Terminology (EN ISO/ASTM 52900)
- Terminology for Additive Manufacturing – Coordinate system and Test Methodologies (EN ISO/ASTM 52921)

3.9.2 Andre Standarder

Det er flere som lever tjeneste for standarder. Disse har gjerne et bredere utvalg av standarder, og er gjerne tilpasset sin region.

- DIN (Deutsches Institut für Normung)
- VDI (Verein Deutscher Ingenieure)
- BSI (British Standards Institution)

3.10 Programvare

3.10.1 SolidWorks

Solidworks er et CAD (Computer-aided design) designprogram med alle verktøy som trengs for en fullverdig og effektiv designprosess (Grøstad 2016). Det finnes mange ulike slike CAD programmer, alt fra de som er gratis til de profesjonelle programmene som må kjøpes.

Utviklingen her har vært stor de siste årene da man er avhengige av slike programmer for å få ned kostnadene. Det som har forenklet programvaren med årene er at designere og produksjonsteam kan sitte og jobbe med en felles oppgave. Om noen gjør endringer ved designet eller på konstruksjonen, blir det endret i alle systemene slik at man ikke må gjøre dette flere ganger. Når delene eller konstruksjonen er tegnet, kan man få ut en BOM- liste. En BOM- liste er materialister som man trenger for produksjonen. Det er mulighet for å jobbe med andre CAD formater i deres format eller konvertere disse til SolidWorks-fil.

En del av programvaren til SolidWorks inneholder CAM. CAM er utviklet av samarbeidspartneren CAMWorks. Dette går ut på at de kan gjøre om 2D og 3D tegningene til og prate med CNC- styrte maskiner, slik som dreining, fresing og skjæring. Utviklingen av programmet har ført til at man ikke lenger trenger og vente til designet er ferdig før produksjon, dette kan nå utføres samtidig (Solidworks 2018). Det er en rekke simulering verktøy i programvaren også, blant annet en som går på strukturell analyse verktøy. Denne bruker FEA (Finite Element Analysis) metoder på CAD modellene for å se hvordan produktet vil fremstå ovenfor fysiske krefter i virkeligheten (CAMWorks 2018). Andre simuleringmuligheter er modeller som påvirkes av væske eller innenfor tilvirkning av plastikkdeler. De har en egen plattform med tanke på lagring av filer og informasjon. Slik at man har kontroll over deler man har laget og sammenstillinger, og de lett kan hentes opp fra kartoteket uten at man trenger være redd for tap av informasjon (Solidworks 2018).

Noe som har vært, og fremdeles er, problematisk med tilvirkning med AM metoden. Filene må igjennom mange ulike filformater ved hjelp av konverteringer. Problemet kommer under konverteringene. Filene kan miste informasjon, eller det kan være en risiko for at filene ikke åpnes (Grøstad 2016). 3Dxpert som SolidWorks har utgitt på sin 2018- utgave av programmet, skal hjelpe til med og løse denne problematikken. Denne programvaren gjør at man kan implementere 3D CAD tegningene direkte i programmet 3Dxpert, og denne har flere verktøy som hjelper brukeren til å ferdigstille produktet til 3D-printing (Rushton 2018). Printerbordet med mål kommer opp så man kan stille inn produktet i forhold til printer.

Videre optimaliseres strukturen for objektet som skal printes, og setter opp støtter for denne. Dette skal gjøre at man slipper for mange konverteringer som igjen kan føre til informasjonstap og en ufullstendig modell (Systems 2018).



Figur 5 Solidworks AM

3.11 3D-Printere

Det finnes flere ulike 3D- printere. For å begrense omfanget og listen nevnes derfor kun et utvalg av de ledende på markedet, og de maskinene som kan produsere produkter av metallpulver.

Produsent	Maskinnavn	Hentet fra
GE Additive	Acram EBM Spectra H	GE (2018)
GE Additive	Acram EBM A2X	
EOS	EOSINT M 280	(EOS 2018)
EOS	PRECIOS M 080	

Tabell 4 1 3D- Printere

3.12 Metall pulver

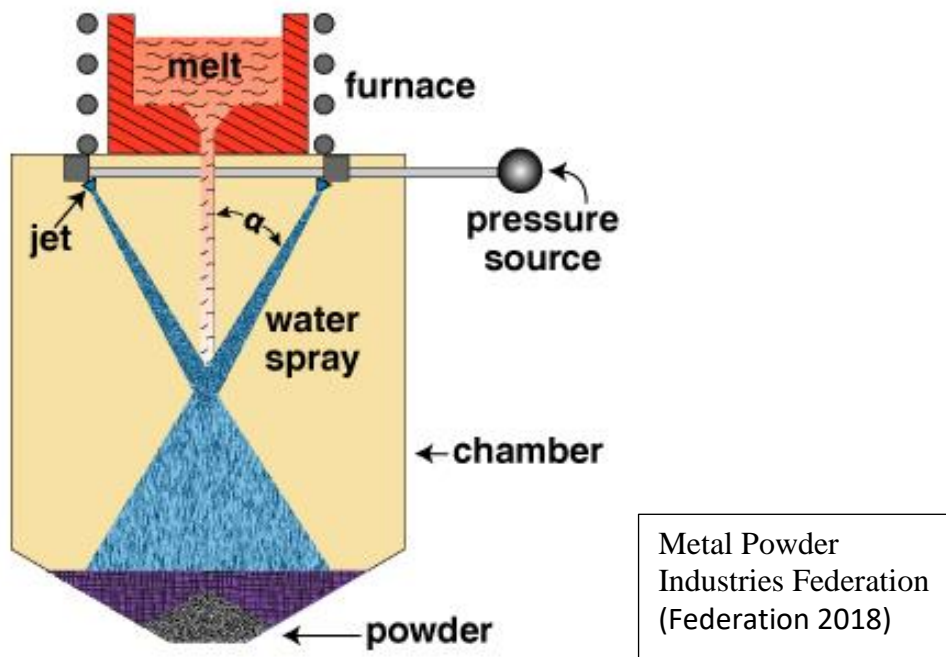
3.12.1 Tilvirkning av pulver

Denne rapporten tar for seg Stainless Steel 316L som pulverform, da 316L kan brukes til additiv tilvirkning av produkter. SS316L er et rustfritt stål som på grunn av sine gode egenskaper også kan brukes maritime miljøer. Det skal likevel nevnes at det finnes flere ulike

stål og legeringer tilgjengelig på markedet (Ta opp dette senere). Fremgangsmåten for tilvirkning av metallpulver er like vel lik.

«Solid- State Reduction»

For å redusere karbon og oksygen blir jernoksidene, malmen, først knust opp og varmet til en smelte. Denne smelta størknes, knuses på nytt og fremmedstoffer, ikke-jernholdige, fjernes fra pulveret. Kvaliteten til pulveret avhenger av renheten til jernoksidene da dette pulveret ikke blir raffinert.



Figur 6 Solid-state Reduction

Forstøving

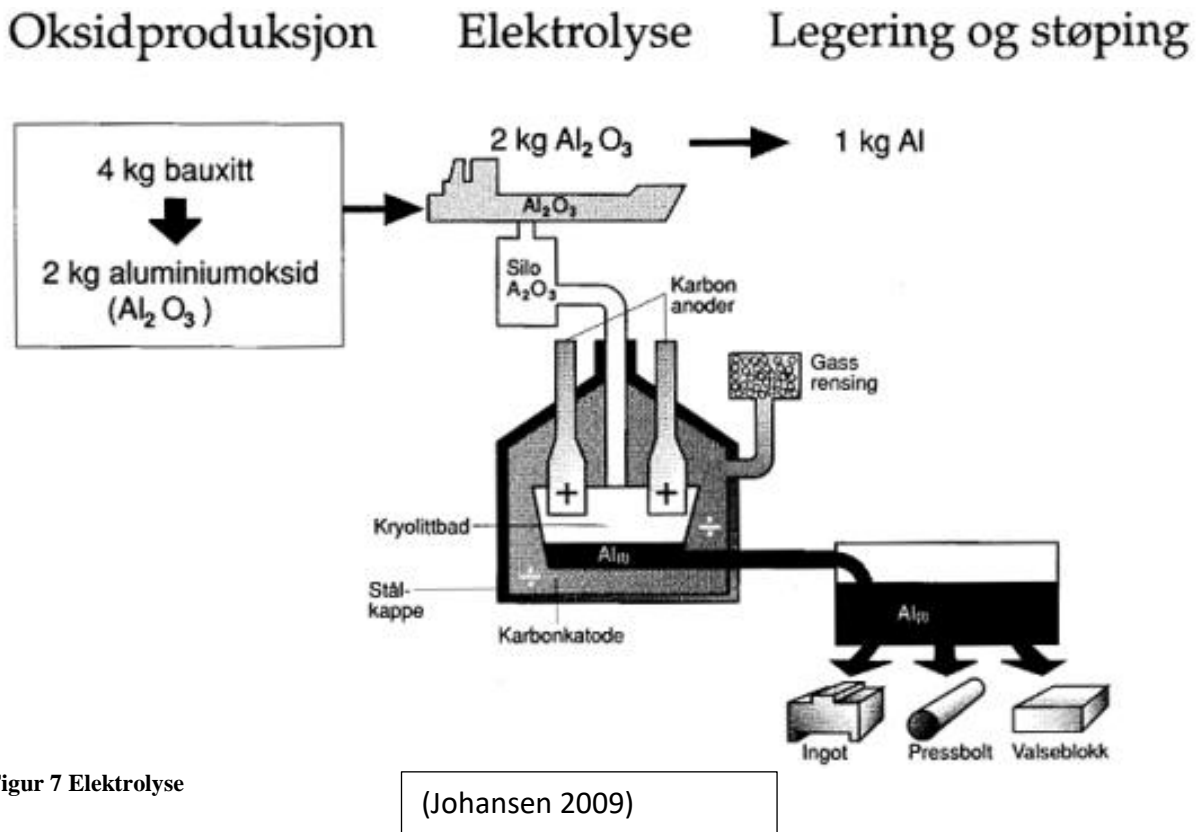
Forstøvingsprosessen går ut på å separere smelta i små dråper. Da det er uønsket at metalldråpene skal treffe hverandre før de er nedkjølt, må det skje en hurtig nedkjøling av metalldråpene. Ved å separere smelta i tynne strømmer og tilføring av høyenergistråler av væske eller gass, oppnås det en forstøving av smelta.

Elektrolyse

Elektrolyse av metaller er en svært energikrevende prosess. Det er derfor ikke alltid hensiktsmessig å bruke denne metoden. Metal Powder Industries Federation, (Federation 2018), skriver i sin gjennomgang av tilvirkning av metallpulver at denne metoden blir brukt

til høyverdig pulvere som for eksempel aluminium mfl.

Malmen som aluminium finnes i, bauxitt, må bearbeides igjennom til aluminiumoksid før det kan gå igjennom elektrolyseprosessen. Malmen bearbeides i raffineri med Bayer-metoden. Når malmen er bearbeidet til aluminiumoksid vil forholdet være 2:1 med primæraluminium. Fremstilling av aluminium er en svært energikrevende prosess, og sammenliknet med stål bruker elektrolyse dobbelt så mye energi (Johansen 2009).



Figur 7 Elektrolyse

Kjemisk prosess

De fleste kjemiske prosesserer, i tilvirkning av metallpulver, går på oksygenreduksjon, termisk dekomponering og utfellinger. Denne metoden kan produsere finkornet pulver, og vil sammen med varmebehandling gi meget god renhet på pulveret.

3.13 Additiv Tilvirkning

3.13.1 Grunnlag

AM kjennetegnes ved at materialet som produktet som skal tilvirkes i legges lag for lag. De tradisjonelle metodene baserer seg på å fjerne materiale fra et emne, noen ganger i flere trinn

som for eksempel sponfraskillende metoder. Fordelen med å legge lag for lag er at det da ikke trengs å ta hensyn til geometrier eller slippvinkler. AM har vært i utvikling i snart 3- tiår og var i begynnelsen en metode for å utvikle prototyper ved hjelp av pulverbad-metoden. Likevel er det etter mange år med utvikling få bedrifter som kun baserer seg på AM som rein produksjonsmetode i større skala. AM har blant annet fått stor suksess innen felt som medisin, luft- og romfart (Grøstad 2016).

3.13.2 Byggeprosessen PBF

PDF kan sees på ifølge (Grøstad 2016) som en syklus. Det er en rulle eller skovl legger et tynt lag med pulver på en byggeplate, i en tykkelsesorden fra 20 til 100 μm . Pulveret tilføres fra en beholder som er montert på siden. En skanner vil deretter smelte pulveret fast i byggeplaten. Deretter gjentar prosessen seg med nytt lag av pulver og skanning. Overflødig pulver vil bli skyvet tilbake til beholderen. Skanneren som smelter pulveret kan programmeres slik at skanningen tar tilfeldig rekkefølge og retning, slik at restspenninger i materialet kan unngås. Da prosessen er under beskyttende atmosfære og atmosfæren bestemmes av hvilket materiale som blir brukt, for eksempel N_2 gass ved aluminium og stål (Grøstad 2016).

3.13.3 Selective laser melting (SLM)

Dette er en teknikk som bruker 3D CAD-data. Print-objektet blir dannet ved at en sterk laserstråle binder og smelter pulveret sammen. Dette blir smeltet sammen til en solid del i motsetning til «Selective Laser Sintering» (SLS). Denne metoden var det en tysk forskningsgruppe som etablerte i 1995. i likhet med andre metoder for denne type fremstilling så må CAD filene behandles med programvare som omdanner de til 2D lag. Prosessen foregår ved at et tynt lag av pulveret som delen skal produseres med blir lagt på en plate, og smeltet med laserstråle. Mønsteret er et todimensjonalt tverrsnitt av den 3 dimensjonale modellen. Laserstrålen er så intens/sterk at pulveret smeltes til et solid objekt. Sylindrer senker så delen før ett nytt lag med pulver blir lagt på som smeltes. Dette gjentas frem til produktet er ferdig produsert etter tegningen (3Dprintingfromscratch.com 2018). pulveret som ikke brukes blir støvsugd og går gjennom en sikteprosess for deretter å brukes på nytt. Dette gjør at det blir svært lite svinn av pulver (Sørli 2018)

Fordeler:

- Lavt materialforbruk
- Lite svinn
- Detaljrike, komplekse deler
- Ingen bruk av støttemateriale
- Veldig lav begrensning på geometri
- Høy mekanisk lastekapasitet, sammenlignbart med smiing.

Ulemper:

- Mye etterarbeid
- Stort strømforbruk
- Treg prosess, forhold til tradisjonell maskinering

3.13.4 Selective Laser Sintering (SLS)

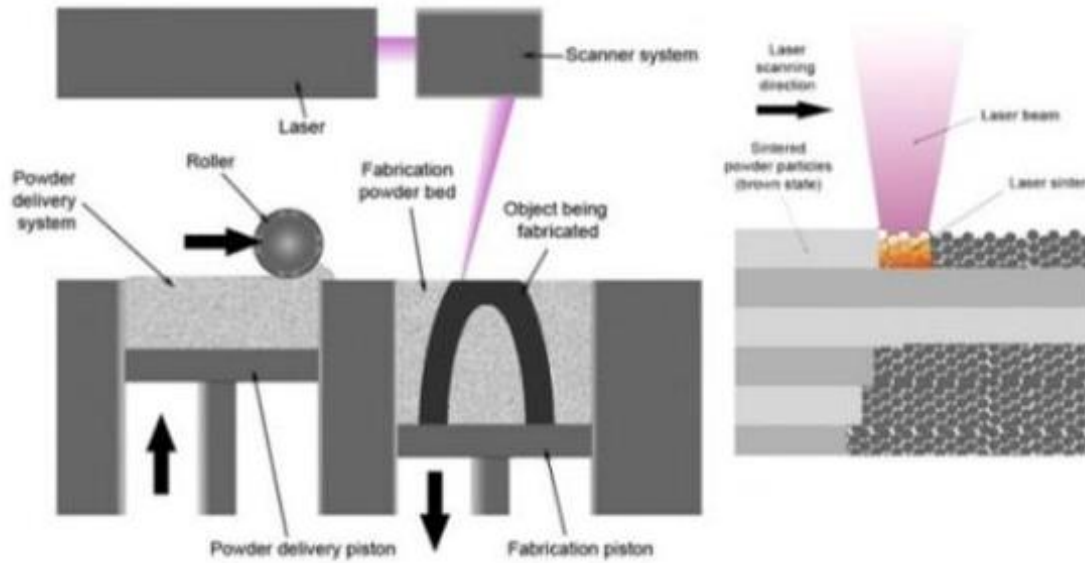
Metoden for denne er veldig lik den foregående SLM. Prosessforløpet er det samme, bortsett fra at pulveret smeltes sammen så blir det i denne metoden sintret sammen. Maskinen er bygd opp på lik måte med pulver og arbeidsstykket som blir senket ned etter hver sintring som ved SML (3Dprintingfromscratch.com 2018).

Fordeler:

- Stort utvalg av materialer
- Fordelene fra SLM

Ulemper:

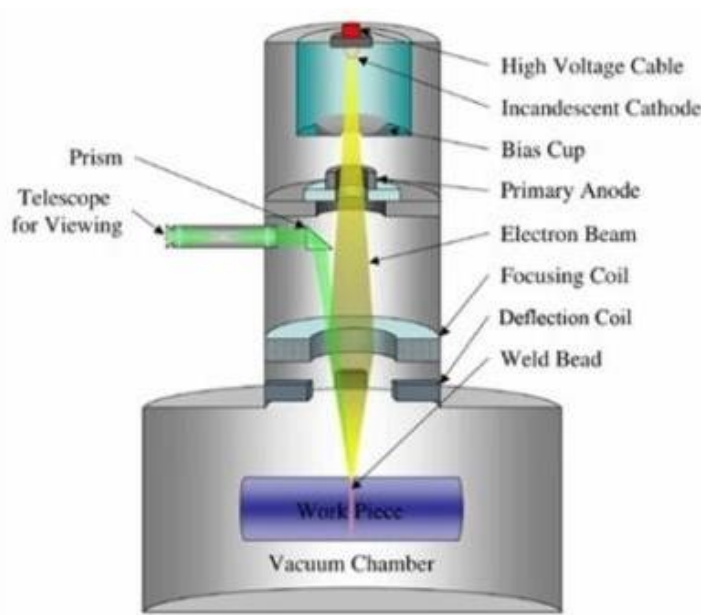
- Porøse deler
- Ujevn finish



Figur 8 Illustrasjon SLS

3.13.5 Electronic beam melting (EBM)

Dette er en metode som er lik den foregående metoden. Forskjellen i disse 2 er at istedenfor bruk av laser så bruker denne metoden elektronstråle istedenfor. En data styrer strålen, dette skjer i høyvakuüm som vist på bildet. Dette utføres som regel under høy temperatur opptil 1000 °C. forhold til SLM er denne metoden treg og ofte kostbar. Det er også mindre tilgjengelighet av materialer (3Dprintingfromscratch.com 2018).



Figur 9 Illustrasjon EBM

Fordeler:

- Stor fleksibilitet
- Gode egenskaper, likheter med smidde deler
- Kostnadseffektiv for mange deler, reduksjon av lagermateriell og avfall
- Reduksjon av tilvirkningstid (fra bestilling til leveringsklar del)
- Ofte 3-5 ganger så raskt forhold til andre AM metoder

Ulemper:

- Etterbehandling kreves ofte
- Forebyggende vedlikehold
- Stor grad av validering kreves

3.13.6 Laminated object manufacturing (LOM)

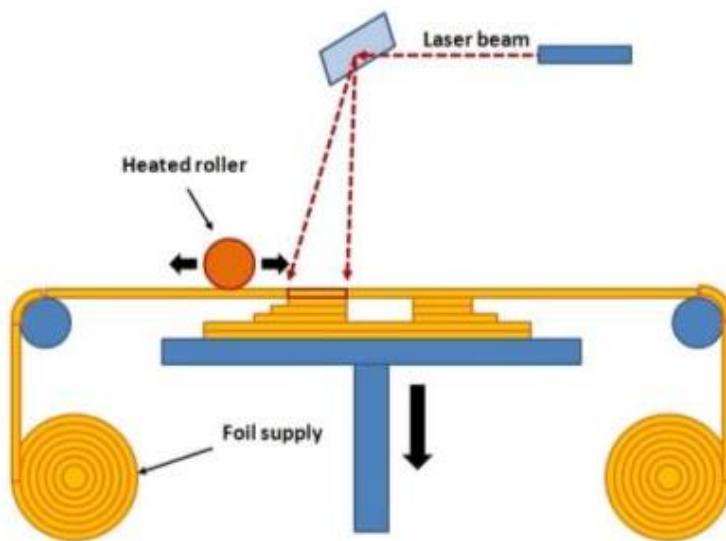
Denne metoden er litt annerledes en de foregående, ved at her blir lim belagte metall laminat smeltet sammen ved hjelp av varme og trykk. Delene vil deretter kuttes etter form ved hjelp av en kniv eller laser som er datastyrt. Her må delene etterbehandles ved hjelp av maskinering, boring etc. filformatet for denne prosessen er datamaskinformat, dette er normalt sett STL eller 3DS. Her brukes ark kontinuerlig som er belagt med lim. Dette legges på tvers i forhold til den oppvarmede valsen som ruller over og smelter lagene sammen. Kniv/laser vil deretter kutte av materialet til ønsket dimensjon. De kryss skjærer også overflødig materiale så dette blir enklere og fjerne når modellen er ferdig. Plattformen der delen skapes flyttes ca 1,58mm ned pr gang, så blir ett nytt lag festet med rullen, frem til delen er ferdig (3Dprintingfromscratch.com 2018)

Fordeler:

- Billig materiale
- Flere ulike typer materiale
- Mulighet for større modeller
- Rask og nøyaktig
- Miljøvennlig

Ulemper:

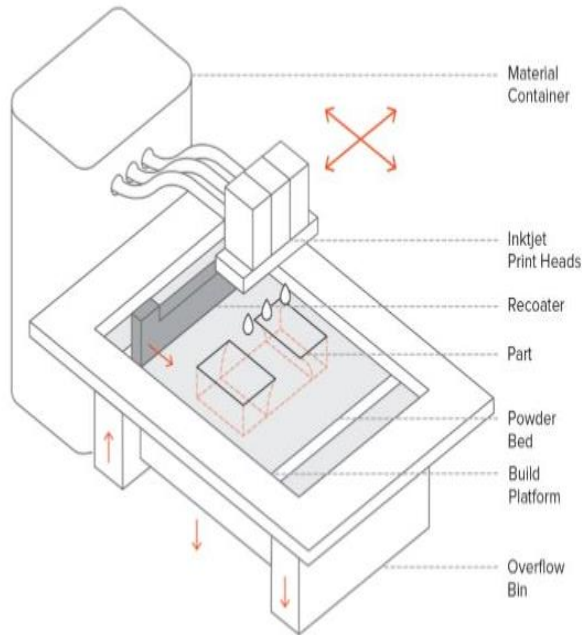
- brannfare
- Ikke lik nøyaktighet og stabilitet som andre metoder
- Begrenset 3D geometrier
- Tendens til og få mye kast av materiale



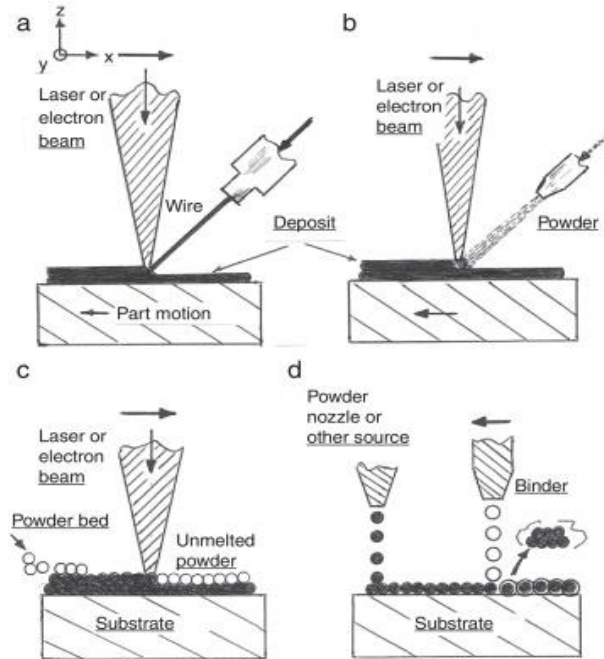
Figur 10 Illustrasjon LOM

3.13.7 Binder Jetting

Først blir det lagt et tynt lag med pulver over plattformen der delen lages. En vogn med blekkdyser går over pulveret, og drypper festemiddel på pulveret og binder dette sammen. Deretter legges et nytt lag pulver på og prosessen gjentas, dette skjer frem til delen er fullført. Når delen er ferdig ligger den igjen i pulveret for å få styrke. Delen blir så tatt ut av pulveret, pulveret som ikke har blitt bundet blir rengjort ved hjelp av trykkluft (3dhubs.com 2018).



Figur 11 Illustrasjon Binder Jetting



Figur 12 3D Printing

4.0 Dimensjonering og Beregninger

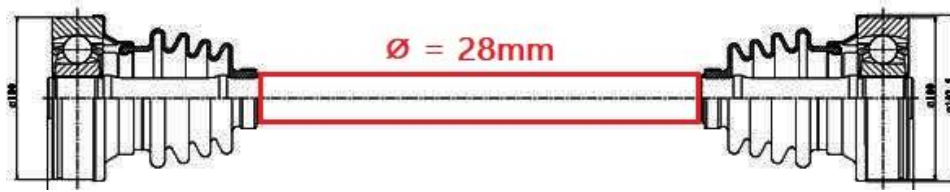
4.1 Forutsetninger

Beregningene baserer seg på en del forutsetninger og antagelser for gjennomførselen.

- Hovedmateriale:
«Legeringstype for originalakslingen er ukjent og vi må anta materialtype. Ofte benyttes et seigt stålmateriale for slike formål» (Johansen 2011), derfor velges S275 som har flytegrense $R_e = 275 \text{ N/mm}^2$.
- Diameter:
På grunn av manglende info om akslingens minste diameter, som er dimensjonerende for våre utregninger, velges en tilnærming på 28 mm.
- Akslingen antas å være massiv, og uten spor eller avtrapninger (som både er en forenkling og slutning basert på tegninger).
- Vi ser velger å se bort ifra vekt og dimensjoner på differensial og benytter en enkel sylindrisk modell for dimensjonering og simulering.

Man starter med å kartlegge lastsituasjonen og hvilke krefter komponenten utsettes for. Dette vil fungere som basis for våre utregninger.

Akslingen er en bærende, dynamisk belastet konstruksjon som regnes å være utsatt for bøyepenninger og skjærspenninger.



Figur 13 Opprinnelig drivaksel (reservedeler.no U.D)

Spenninger:

1. Bøyesspenning, σ_b
2. Bøyemoment, M_b
3. Skjærspenning ved vridning, τ_v
4. Vrimoment, M_v

4.2 Beregninger

Gammel motor er en 1.6 liter firetaktsmotor på 50 HK som tilsvarer en effekt på 37 000 W. Den nye motoren, som det skal dimensjoneres for, er en bensinmotor på 90 HK, 66 000 W fra en 1996 Volkswagen Golf Syncro. På grunn av våre manglende opplysninger om opprinnelig materiale på akslingen, går vi ikke ut ifra lastbærende vekt dimensjonert fra fabrikk, men velger heller å ta utgangspunkt i bilens egenvekt, «curb weight» som dimensjoneringsgrunnlag og som ekskluderer laster i form av passasjerer og bagasje. Med en enkel effektlikning kan hjulets turtall utfra ny motoreffekt på 66 kW estimeres ved bruk av innsetting.

$$P = Fv = \frac{\pi n}{60}$$

For å kunne beregne vrimomentet overført fra motor til aksling og så hjul, estimerer man turtallet ut ifra total hjuldiameter (inkludert dekk) som er på 659 mm (26 inches) = 2.16 feet (truckscience.com U.D).

Velger $n = 1915$ o/min.

En formel for utregning av bilens topphastighet kan vurdere om dette er en god estimering av turtallet.

$$5. \quad v = \frac{rpm * 60 * d_{hjul} * \pi}{5280}$$

Det presiseres at dette er kun en teoretisk utregning for hastighet og tar ikke bilens vekt i betraktning. Med valgte verdier for total hjuldiameter og turtall gir dette oss en $v_{top} \approx 238 \frac{\text{km}}{\text{h}}$.

At dette er et godt estimat for turtallet kan også underbygges med denne formelen for moment: Torque (lb.in) = 63,025 x Power (HP) / Speed (RPM) (WENtechnology U.D).

$$P_{ny\ motor} = \frac{\pi * 659\ mm * 1915\ rpm}{60} = 66\ 077\ W \approx 66\ 000\ W$$

Videre har vi effektformel 2 som baserer seg på vrimoment og hjulets vinkelhastighet.

$$P = M_v \omega$$

En formel for utregning av vrimoment kan så utledes som gir oss et grunnlag for å kunne dimensjonere de fire potensielle akslingene tilpasset den nye motoreffekten.

$$P = M_v \omega \rightarrow M_v = \frac{30P}{\pi n}$$

Med valgte verdier for effekt og turtall gir dette os et vrimoment på 329.000 Nm som overføres fra motor til bakaksling og hjul. Siden bilen er bakhjulsdrevet, blir dette benyttet som dimensjonerende torsjonsmoment ansvarlig for å drive bilen fremover.

Siden det dimensjoneres kun med hensyn på bakaksling, er det av interesse å avdekke hvor mye av bilens egenvekt som denne må bære. Siden motoren er plassert bak i bilen, har Volkswagen T3 en tilnærmet 50/50 vektfordeling (GMW U.D). I tillegg er det også kjent at bilens akselavstand, altså avstand fra senter på hvert av hjulene, er lik 2460 mm (Automobile-catalog.com U.D). Ut ifra disse opplysningene kan vekt på bakaksling regnes ut ved å benytte følgende formel (truckscience.com U.D).

$$Wr = W \frac{CGf}{WB} [kg]$$

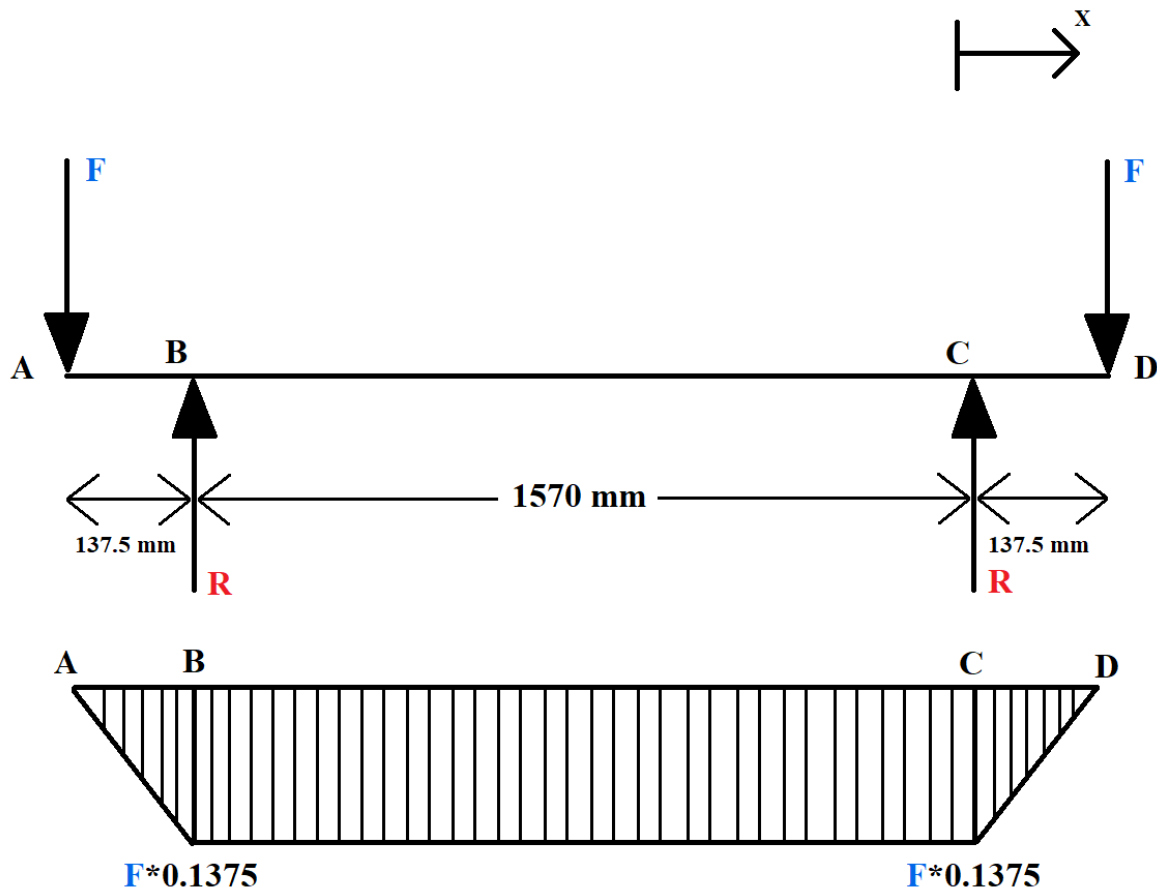
Hvor Wr = vekt på bakaksling, W = total vekt (egenvekt i vårt tilfelle), CGf = avstand fra bilens messesenter til frontaksling og WB = akselavstand. En tilnærmet 50/50 vektfordeling medfører omtrent samme lastbærende egenskaper på begge akslinger, og man finner at Wr = Wf (vekt på frontaksling) = 705 kg.

Skjærspenning forårsakes i akslingen ved vridning når motoreffekten overføres til hjulet. Ved å benytte en definisjon på skjærspenning ved vridning, kan man ved å sette inn for vrimoment – Mv og Polart arealmotstandsmoment – Wp finne denne verdien.

$$\tau_v = \frac{M_v}{W_p} [MPa]$$

Som tidligere beregnet resulterer motorens effekt i et vrimoment på 329.000 Nm. Motstandsmomentet for massiv aksling er definert som $\frac{\pi}{16} d^3$. For eksisterende diameter antatt å være cirka 28 mm, gir dette en $\tau_v = 76,3N/mm^2$.

Ettersom vekt på bakakslingen nå er kjent, kan bøyemomentet finnes ved å sette opp problemet som en likevektsbetraktning mellom bilens egenvekt satt opp som to kraftkomponenter tilsvarende 705 kg, og hjulene som opplagerkrefter i y-retning.



Figur 14 Laster på bakaksling beskrevet som et kraftsystem

På grunn av symmetri ser man at $F = R$. Ved å benytte momentlikning og ta momentet om AD, BC og CD, finner man at største bøyemoment går fra punktet C til D. Bøyemomentet virker altså på hvert av hjulene og kan skrives som $M_b = F \cdot 0,1375 = 3458 \text{ N} \cdot 0,1375 \text{ m} = 475,475 \text{ Nm}$ for opprinnelig aksling. Dette gir oss en basis for beregning av bøyemoment til alle fire materialtypene i fortsettelsen.

For å anslå om påkjenninger forårsaket av ny motoreffekt ikke overskrider materialenes fasthetsegenskaper, må maksimal skjærspenning $\sigma_{b_{maks}}$ og bøyespennning $\tau_{v_{maks}}$ bestemmes. For å kunne dimensjonere for alle fire materialtypene, må man først finne ut av bidraget til endring i bilens egenvekt for hver kandidat. Dette oppnås gjennom å gange materialets massetetthet [kg/mm^3] med volumet for en sylinder gitt ved $v = \pi \cdot r^2 \cdot h$. Ut ifra dette kan vekten av en aksling med samme diameter = 28 mm produsert av hvert materiale estimeres ved bruk av innsamlede data for tetthet.

Vekt av ny aksling (diameter = 28 mm):

AL 6061-T6	$966731 \text{ mm}^3 * 0,0000027 \text{ kg/mm}^3 = 2,610 \text{ kg}$
E335	$966731 \text{ mm}^3 * 0,0000079 \text{ kg/mm}^3 = 7,637 \text{ kg}$
SS316L	$966731 \text{ mm}^3 * 0,000008 \text{ kg/mm}^3 = 7,734 \text{ kg}$
Karbon/epoksy kompositt	$966731 \text{ mm}^3 * 0,00000143 \text{ kg/mm}^3 = 1,382 \text{ kg}$

Tabell 7 Vektestimater for aksling av nytt materiale basert på opprinnelig diameter

Videre antas S275 som originalmateriale for originalakslingen. Vekt av opprinnelig aksling estimeres dermed til $966731 \text{ mm}^3 * 0,0000079 \text{ kg/mm}^3 = 7,637$. Trekker så denne verdien fra bilens egenvekt: $1410 - 7,637 \text{ kg} = \underline{1402,363 \text{ kg}}$.

Resulterende totalvekt av bil og ny aksling:

AL 6061-T6	$(1402,363 + 2,610) \text{ kg} = 1404,973 \text{ kg}$
E335	$(1402,363 + 7,637) \text{ kg} = 1410 \text{ kg}$
SS316L	$(1402,363 + 7,374) \text{ kg} = 1409,737 \text{ kg}$
Karbon/epoksy kompositt	$(1402,363 + 1,382) \text{ kg} = 1403,745 \text{ kg}$

Tabell 8 Vekt av bil og ny aksling med opprinnelig diameter

Man kan nå finne bøyemomentet for hver aksling ved å sette inn i likningen $M_b = F * 0,1375$.

M_{bT6}	460,034 Nm
M_{bE335}	475,475 Nm
M_{bSS316}	475,393 Nm
$M_{bKarbonEpoksy}$	473,371 Nm

Tabell 9 Bøyemoment for alle 4 materialtyper

Tabell 5.3 Bøyemoment for alle 4 materialer med opprinnelig diameter (28 mm).

M_{bT6}	473,478 Nm
M_{bE335}	475,475 Nm
M_{bSS316}	475,406 Nm
$M_{bKarbonEpoksy}$	473,344 Nm

Tabell 10 Bøyemoment for alle 4 materialer med ny diameter.

*Viser til vedlegg A Skisser og beregninger for utregning av bøyemoment – M_b , og kapittel 6 Analyse og resultat for utregning av ny diameter

Bøyesspenning for massiv aksling beregnes ut ifra denne likningen.

$$\sigma_b = \frac{32M_b}{\pi d^3} [MPa]$$

Tilsvarende for bøyemoment gir dette oss fire bøyesspenninger for hvert materiale basert på opprinnelig diamettermål som vil bli brukt for å finne maks bøyesspenning i videre beregninger.

σ_{bT6}	213,46 MPa
σ_{bE335}	220,62 MPa
σ_{bSS316}	220,59 MPa > Re_{SS316}
$\sigma_{bKarbonEpoksy}$	219,65 MPa

Tabell 11 Bøyesspenning for alle 4 materialtyper med opprinnelig diameter

σ_{bT6}	65,1 MPa
σ_{bE335}	75,7 MPa
σ_{bSS316}	46,6 MPa < Re_{SS316}
$\sigma_{bKarbonEpoksy}$	219,65 MPa

Tabell 12 Bøyesspenning for alle 4 materialer med ny diameter

Ny diameter gjør at SS316 nå ligger godt under materialets flytegrense, men det på bekostning av stor diameter og svært høy vekt.

Dimensjonerende skjærspenning regnes ved hjelp av formel for maksimal skjærspenning,

τ_{maks} via innsetting av Mb-verdier for alle fire materialtyper, og vrimomentet gitt av motorpådraget.

$$\tau_{maks} = \frac{16}{\pi d^3} \sqrt{M_b^2 + M_v^2} [MPa]$$

$\tau_{maks T6}$	131,2 MPa < 207 MPa
$\tau_{maks E335}$	134,1 MPa < 380 MPa
$\tau_{maks SS316}$	134,1 MPa
$\tau_{maks KarbonEpoksy}$	133,7 MPa

Tabell 13 Tabell 11 Maksimal skjærspenning for hvert materiale med opprinnelig diameter.

$\tau_{maks T6}$	39,6 MPa < 207 MPa
$\tau_{maks E335}$	46 MPa < 380 MPa
$\tau_{maks SS316}$	28,4 MPa
$\tau_{maks KarbonEpoksy}$	133,7 MPa

Tabell 14 Maksimal skjærspenning for hvert materiale med ny diameter.

Formel for maks bøyespenning benyttes til beregning av dimensjonerende σ_b .

Økt diameter gir en sterk reduksjon i maksimal skjærspenning for alle typer unntatt karbonfiber/epoksy som får samme spenning på grunn av lav diameter. Manglende data om maksimal skjærspenning for SS316 og Karbon/epoksy kompositt gjør at ingen slutning kan trekkes i denne omgang.

Formel for maks bøyespenning benyttes til beregning av dimensjonerende σ_b .

$$\sigma_{b_{maks}} = \frac{1}{2}\sigma_b + \frac{1}{2}\sqrt{\sigma_b^2 + 4\tau^2} \text{ [MPa]}$$

Faktorer i denne utregningen inkluderer bøyespenning for hvert materiale og skjærspenning, τ_v basert på overført vrilmoment til aksling utregnet med hensyn på ny motoreffekt, og polart arealmotstandsmoment for opprinnelig aksling på 28 mm.

$\sigma_{b_{maks T6}}$	238 MPa
$\sigma_{b_{maks E335}}$	244,4 MPa
$\sigma_{b_{maks SS316}}$	244,4 MPa
$\sigma_{b_{maks KarbonEpoksy}}$	243,5 MPa

Tabell 15 Maksimal bøyespenning for hver materialtype

5.0 Analyse og Resultat

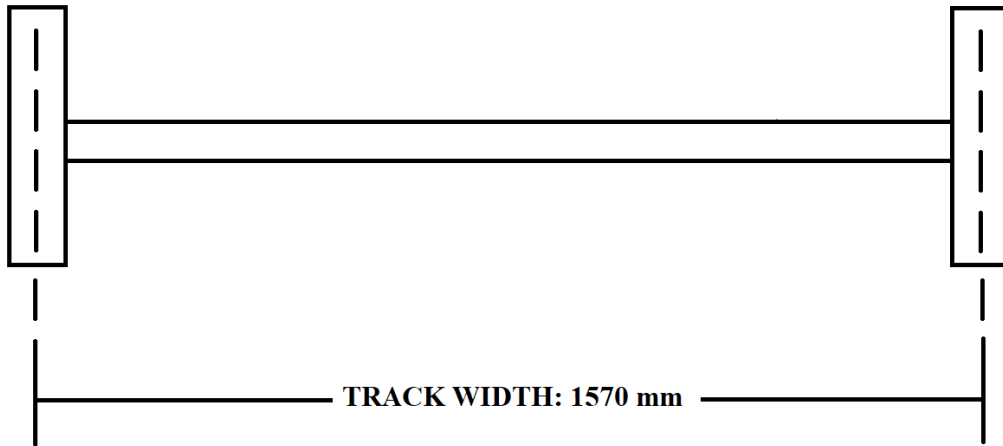
Introduksjon

I dette kapitlet vil det bli gjennomgått en vurdering av resultater fra digital simulering med hensyn på beregninger og antagelser presentert i kapittel 4. Med utgangspunkt i materialenes fasthetsegenskaper og produksjonsmetoder diskutert i kapittel 3, vurderes nå de ulike alternativene gjennom å analysere egnethet med tanke på utmatting via en dynamisk spenningsanalyse, samt å veie opp de ulike tilvirkingsmetodene ved en sammenlikning av produksjonskostnader i henhold til skolens budsjett på Kr 10.000 NOK. Økonomiske aspekter ved å både engangs -og masseproduksjon av en aksling av ulike materialene vises gjennom kostnadskalkyler der kostnader knyttet til anskaffelse av råmateriale, tilvirking og andre utgifter blir veid opp mot hverandre og vurdert i forhold til budsjettet.

Modellering og simulering av de ulike materialtypene og diameterne er utført i programmet SolidWorks 3D CAD and/or Simulation Software 2017 på med utgangspunkt i gitte beregninger. Kalkylene viser samtlige faste og variable kostnader forbundet ved produksjon av 10.000 akslinger i serie. Enhetskostnadene er funnet ved bruk av formel for produksjonskostnader per enhet.

To analyser er utført per materialtype hvor det er forsøkt å gi en forholdsvis nøyaktig representasjon av laster og grensebetingelser ved bruk av SolidWorks simuleringsverktøy. Det er blitt gjort en dynamisk spenningsanalyse med hovedvekt på å simulere de faktiske forholdene på best måte ved å gjengi kreftene påført av bilens egenvekt og den overførte motoreffekten (normalspenninger og skjærspenninger), samt vibrasjoner påført akslingen av dynamiske forhold.

For å kunne representere virkeligheten på en god måte, er ikke statiske simuleringer med konstante og lineært økende krefter tilstrekkelig. For slike analyser der konstruksjonen regnes med å være i ro, er modellens partikkelhastighet -og akselerasjon antatt å være null. Dette medfører neglisjering av faktorer som treghet og dempningskrefter som er viktige for å kunne vurdere de ulike variantenes lastekapasitet på nøyaktig vis. Derfor benyttes en dynamisk analyse for dette tilfellet. «Dynamic Analysis» i SolidWorks er basert på frekvenser. Modellens respons kalkuleres ved å registrere bidraget fra hver modus på lastmiljøet. «Dynamic Analysis» benyttes til å sikre mekaniske konstruksjonselementers strukturelle integritet og redusere vibrasjonspåkjenninger under dynamiske forhold (Solidworks.com 2017).



Figur 15 Skisse av bakaksling

Fordeler og ulemper ved bruk av SolidWorks Simulation Software:

- Primært et CAD program brukt for modellering og enkle analyser. FEA (Finite Element Analysis) delen er derfor noe begrenset.
- Ikke på høyde med dedikerte FEA-programmer som Ansys og Abaqus for simulering av store, intrikate konstruksjoner utsatt for komplekse lastsituasjoner med stor nøyaktighet.
- Et godt alternativ for simulering av enkle geometrier, (i vårt tilfelle et «solid» element), utsatt for krefter basert på klassisk mekanikk.
- SolidWorks er raskere til modellering av enkle geometrier, og FEA-delen produserer resultater raskere enn for eksempel programmer som Ansys når man skal gjennomføre mange simuleringer.
- Sammenliknet med analytiske programsystemer og fysisk testing av konstruksjoner utsatt for nedbøyning på grunn av moment og skjærkrefter hadde SolidWorks Simulation kun et prosentvis avvik på 0,08 – 1,23 (solidsolutions.co.uk 2017).

Introduserer «Damping ratio» som definert under.

$$\varepsilon = \frac{C}{C_{cr}}$$

Hvor ε = damping ratio, C = damping coefficient [N-s/m] og C_{cr} = critical damping coefficient [N-s/m].

«Damping ratio» er innen klassisk mekanikk en benevningsfri størrelse som beskriver forholdet mellom dempningskoeffisienten C og kritisk dempningskoeffisient C_{cr} . Damping er et begrep på en kraft som motvirker svingninger. Et materials vibrasjon kan beskrives som en oscillerende kurve med hensyn på tiden. En dempningskraft kan motvirke slike svingninger

på flere måter, og generelt deles de inn i to hovedgrupper: Frie og tvungne svingninger. Frie svingninger har ingen motvirkende kraft til å regulere svingforløpet, mens tvungne kan være utsatt for en eller flere slike krefter (uia.no U.D). Frie dempede svingninger kan videre deles inn i:

- «Overdempede svingninger: stor dempningskraft slik at svingninger ikke oppstår» (uia.no U.D).
- «Kritisk dempede svingninger: dempningskraft slik at vi er på grensen til å få svingninger» (uia.no U.D).
- «Underdempede svingninger: liten dempningskraft slik at svingninger oppstår» (uia.no U.D).

«Damping ratio» eller dempningsforhold, kan deles inn i tre forskjellige kategorier avhengig av verdien på forholdet:

- $\varepsilon = 0 \Leftrightarrow$ Udempet (Ingen dempningskraft motvirker svingninger)
- $\varepsilon < 1 \Leftrightarrow$ Underdempet (Svingninger oppstår)
- $\varepsilon = 1 \Leftrightarrow$ kritisk dempning (bilen har null vibrasjon og er overdempet, som betyr økte variasjoner i påkjenninger på dekket og dårligere veigrep (Kasprzak 2014).
- $\varepsilon > 1 \Leftrightarrow$ Overdempet (Ingen svingninger oppstår)

Ifølge (Kasprzak 2014) er et dempningsforhold lik 0,2 typisk for personbiler og en optimal verdi for komfort og stabilitet. $\varepsilon = 0,2$ tillater altså moderate svingninger, med en dempningstid på 1 ½ til 2 sykler (Kasprzak 2014). Med bakgrunn i dette er valgt dempningsforhold dermed lik 0,2 som er lagt inn i programsystemet for samtlige analyser.

I simuleringene er det utført to analyser per aksling. Først for opprinnelig diameter, og så for nytt diametermål dimensjonert med hensyn på lastsituasjonen. For dynamisk påkjente konstruksjoner er det størst sjans for sprekkdannelse og utmattingsbrudd, særlig i sveisesoner og i overganger. Målet med å analysen er undersøke hvert materiales evne til å motstå spenningskonsentrasjonene påført under dynamisk påkjenning. Simuleringene bekrefter om det er behov for å benytte ny dimensjonert diameter eller ikke. Hensikten er å finne en ideell tykkelsesverdi med hensyn på dempningsgrad – for komfort og kjørestil, styrkeegenskaper – sikre mot brudd: spenninger skal ikke overstige materialets flytegrense, og til slutt vurdere hvert alternativ med tanke på tilnærmede produksjonskostnader i henhold til skolens budsjett. Begrunnelsen for å benytte flytegrense som dimensjonerende/tillatt spenningsverdi, er fordi sprekkdannelse innen akseptable grenser oppstår under relativt små belastninger i mange

deler av konstruksjonen. Etter eksempelvis 10^6 - 10^8 sykler kan disse sprekkene ha vokst store nok til å skape potensielle brudd lenge før bruddgrensen er nådd (researchgate.net U.D). For å dimensjonere ny aksling utsatt for dynamisk lastvirkning, benyttes en likning for omtrentlig beregning av ny akseldiameter tilpasset den økte motoreffekten for hvert av de fire valgte materialtypene.

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 \sqrt{M_b^2 + 0,75(\alpha_0 M_v^2)}}{\pi \sigma_{till}}}$$

Hvor:

α_0 = Faktor avhengig av lastforløp = 0,6 for vekslende bøyning og hvilende vridning.

σ_{till} = Tillatt spenning = Materialets flytegrense / Sikkerhetsfaktor. Sikkerhetsfaktor = 4 for dynamisk belastning uten kjervvirkning (spor, avtrapninger etc.) $\rightarrow \sigma_{till} = Re/4$

Etter innsetting av bøyemoment avhengig av akslingens vekt, og vrilmoment fra motorpådraget, får man følgende nye diametere.

Ny akseldiameter:

Materiale	Ny dimensjonerende diameter
AL 6061-T6	42 mm
E335	40 mm
SS316	47 mm
Karbon/epoksy kompositt	28 mm

Tabell 16 Ny akseldiameter

Volum, ny aksling med økt diameter

AL 6061-T6	$\pi * (21)^2 * 1570 \text{ mm} = 2175144 \text{ mm}^3$
E335	$\pi * (20)^2 * 1570 \text{ mm} = 1972920 \text{ mm}^3$
SS316	$\pi * (23,5)^2 * 1570 \text{ mm} = 2723863 \text{ mm}^3$
Karbon/epoksy kompositt	$\pi * (14)^2 * 1570 \text{ mm} = 966731 \text{ mm}^3$

Tabell 17 Volum, ny aksling med økt diameter

Vekt, ny aksling med økt diameter

AL 6061-T6	$2175144 * 0,0000027 = 5,873 \text{ kg}$
E335	$1972920 * 0,0000079 = 15,586 \text{ kg}$
SS316	$2723863 * 0,000008 = 21,8 \text{ kg}$
Karbon/epoksy kompositt	$966731 * 0,00000143 = 1,382 \text{ kg}$

Tabell 18 Vekt, ny aksling med økt diameter

*Viser til kapittel X Dimensjonering og beregninger, og vedlegg A – Skisser og beregninger for vekt av ny aksling med opprinnelig diameter.

Wr, ny aksling med opprinnelig diameter + bil

AL 6061-T6	$1404,973 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * (0,5) = 6891,4 \text{ N}$
E335	$1410 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * (0,5) = 6916 \text{ N}$
SS316	$1409,737 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * (0,5) = 6915 \text{ N}$
Karbon/epoksy kompositt	$1403,745 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * (0,5) = 6885 \text{ N}$

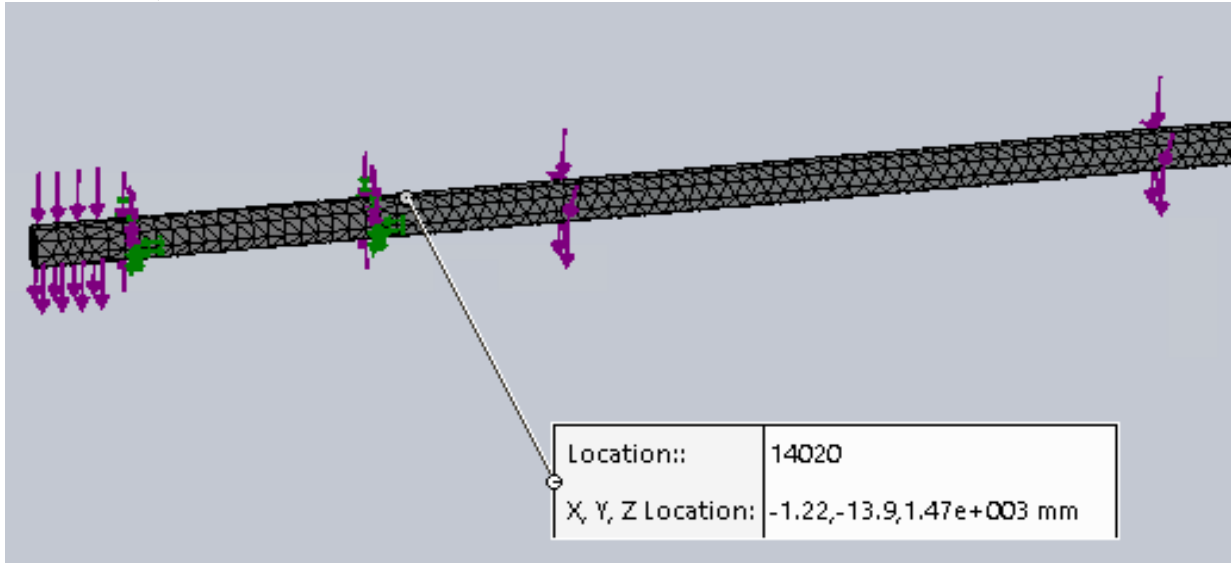
Tabell 19 Wr, ny aksling med opprinnelig diameter + bil
Wr, ny aksling med økt diameter + bil

AL 6061-T6	$1408,236 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * (0,5) = 6907 \text{ N}$
E335	$1418 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * (0,5) = 6955 \text{ N}$
SS316	$1424 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * (0,5) = 6986 \text{ N}$
Karbon/epoksy kompositt	$1403,74 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * (0,5) = 6885 \text{ N}$

Tabell 20 Wr, ny aksling med økt diameter + bil

6.1 Spenninger

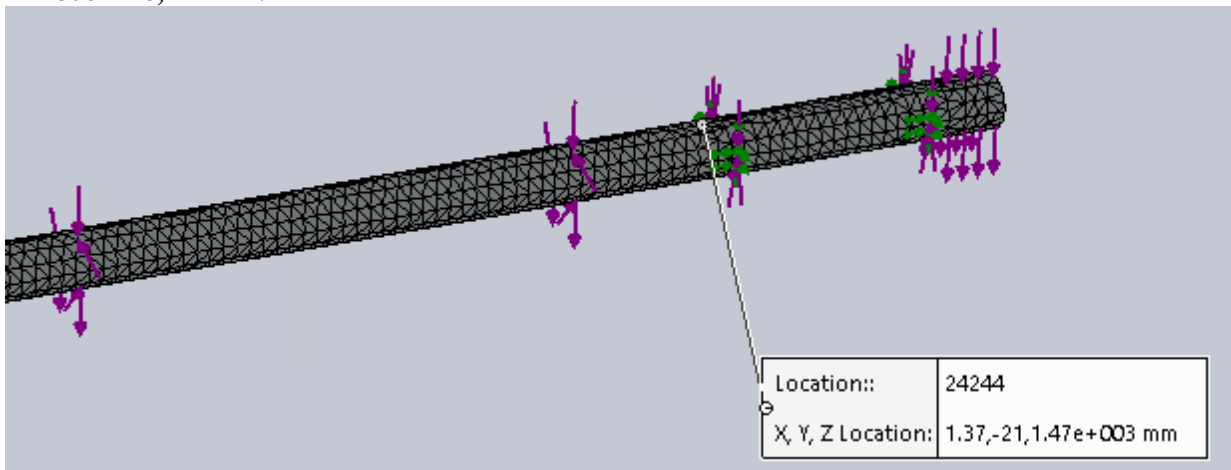
AL 6061-T6, 28 mm:



Figur 16 Lokasjon høyest spenning Al (28mm)

Høyeste spenning: $3.14E+02 = 314 \text{ MPa} > R_{eT6} = 276 \text{ MPa} \rightarrow$ Ikke OK. Påkjenninger overskrider flytegrensen. Altså må den tykkere varianten velges for dette materialet.

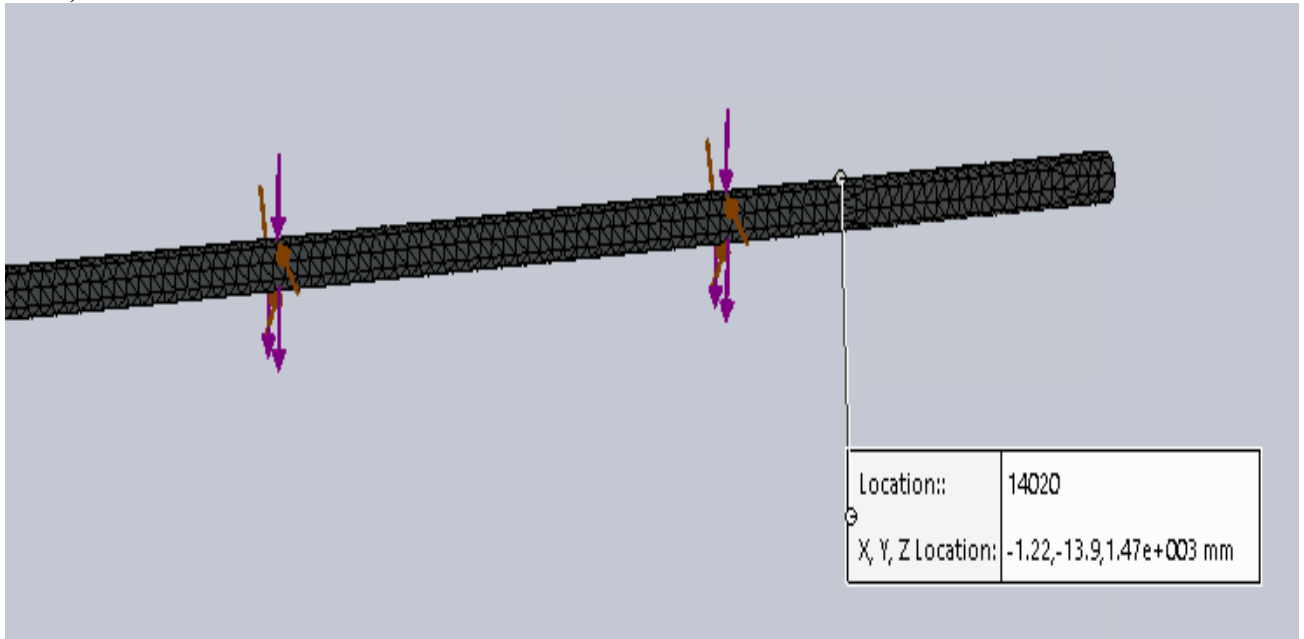
AL 6061-T6, 42 mm:



Figur 17 Lokasjon høyest spenning Al (42mm)

Høyeste spenning: $1.08E+02 = 108 \text{ MPa} < R_{eT6} = 276 \text{ MPa} \rightarrow$ OK

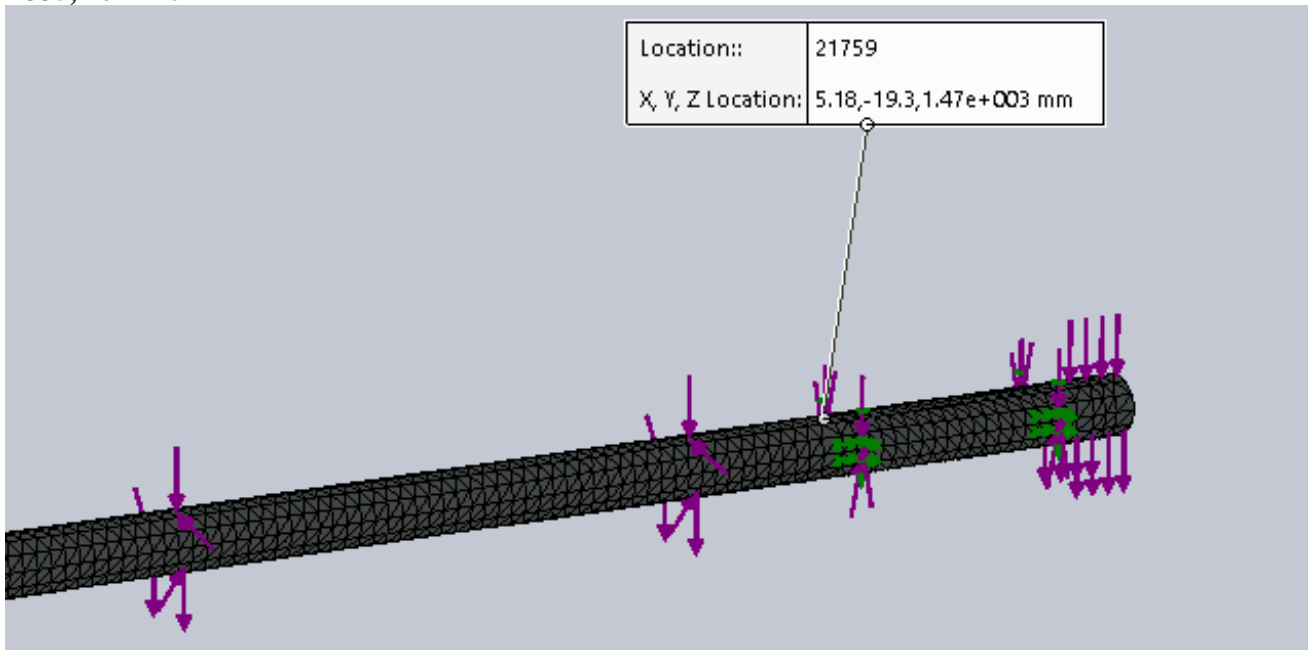
E335, 28 mm:



Figur 4. 1 Lokasjon av høyeste spenning for E335 maskinstål (28 mm)

Høyeste spenning: $3.18E+02 = 318 \text{ MPa} < R_{e335} = 335 \text{ MPa} \rightarrow$ Nærmere Re, men konstruksjonen er fortsatt OK med benyttet sikkerhetsfaktor.

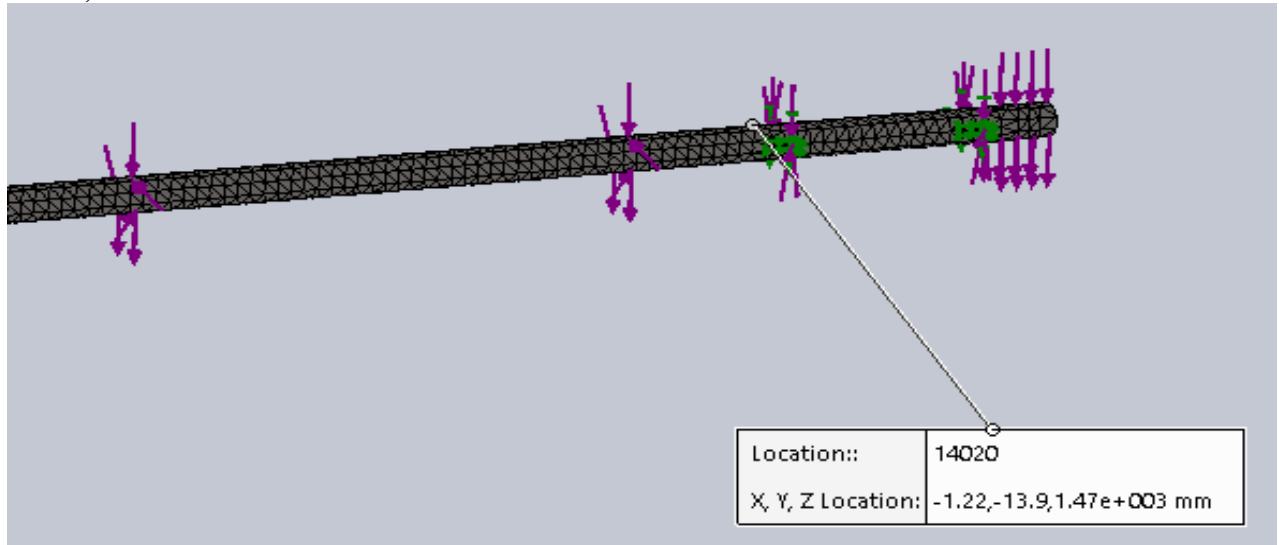
E335, 40 mm:



Figur 18 Lokasjon høyest spenning E335 (40mm)

Høyeste spenning: $1.21E+02 = 121 \text{ MPa} < R_{e335} = 335 \text{ MPa} \rightarrow$ OK

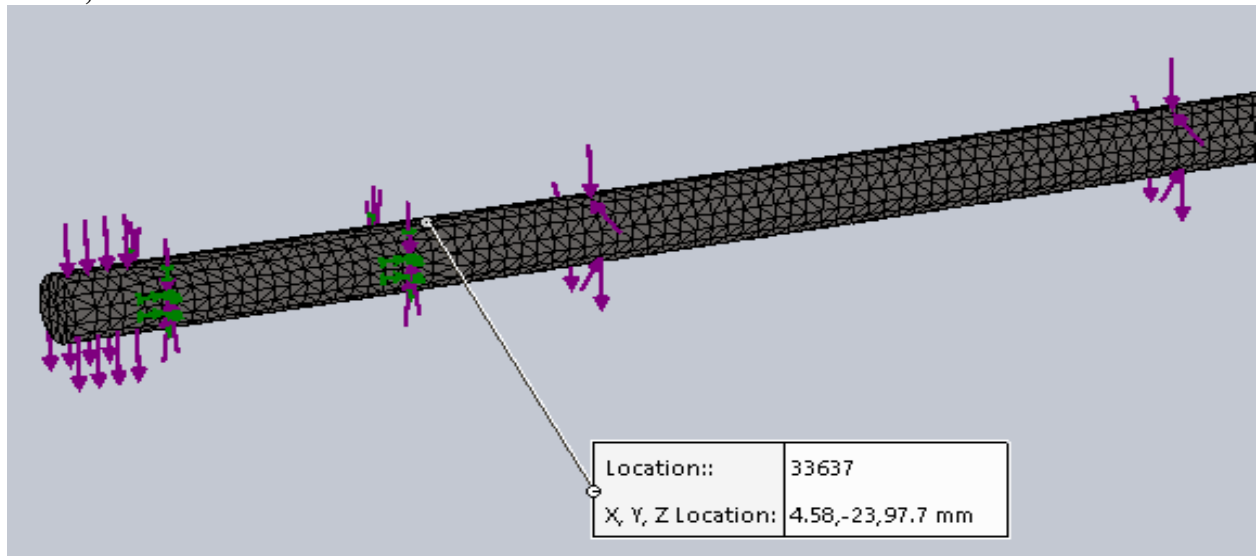
SS316, 28 mm:



Figur 19 Lokasjon høyest spenning SS316 (28mm)

Høyeste spenning: $2.86E+02 = 286 \text{ MPa} > R_{e316} = 205 \text{ MPa} \rightarrow$ Ikke OK: Må benytte tykkere diameter for dette materialet.

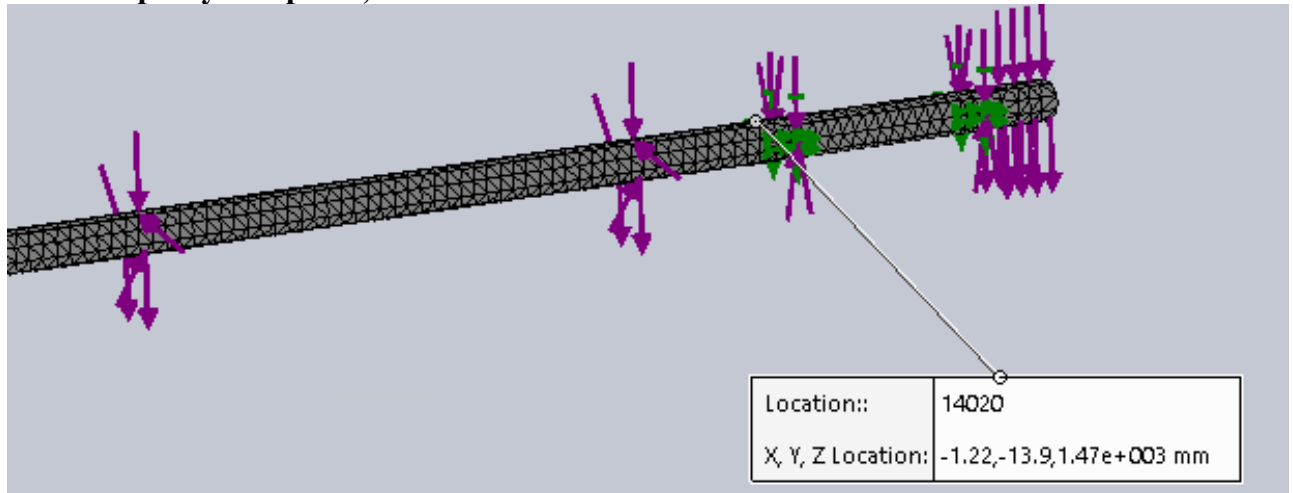
SS316, 47 mm:



Figur 20 Lokasjon høyest spenning SS316 (47mm)

Høyeste spenning: $8.23E+01 = 82,3 \text{ MPa} < R_{e335} = 335 \text{ MPa} \rightarrow$ OK

Karbon/epoksy kompositt, 28 mm:

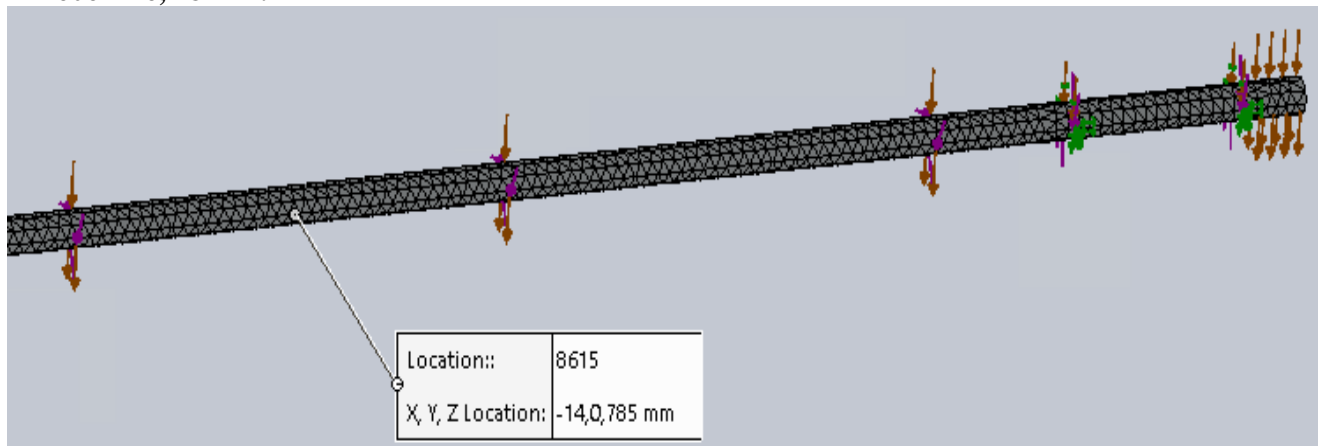


Figur 21 Lokasjon høyest spenning kompositt (28mm)

Høyeste spenning: $3.04E+02 = 304 \text{ MPa} \ll R_{e\text{KarbonEpoksy}} = 985 \text{ MPa} \rightarrow \underline{\text{OK}}$

6.2 Forskyvninger

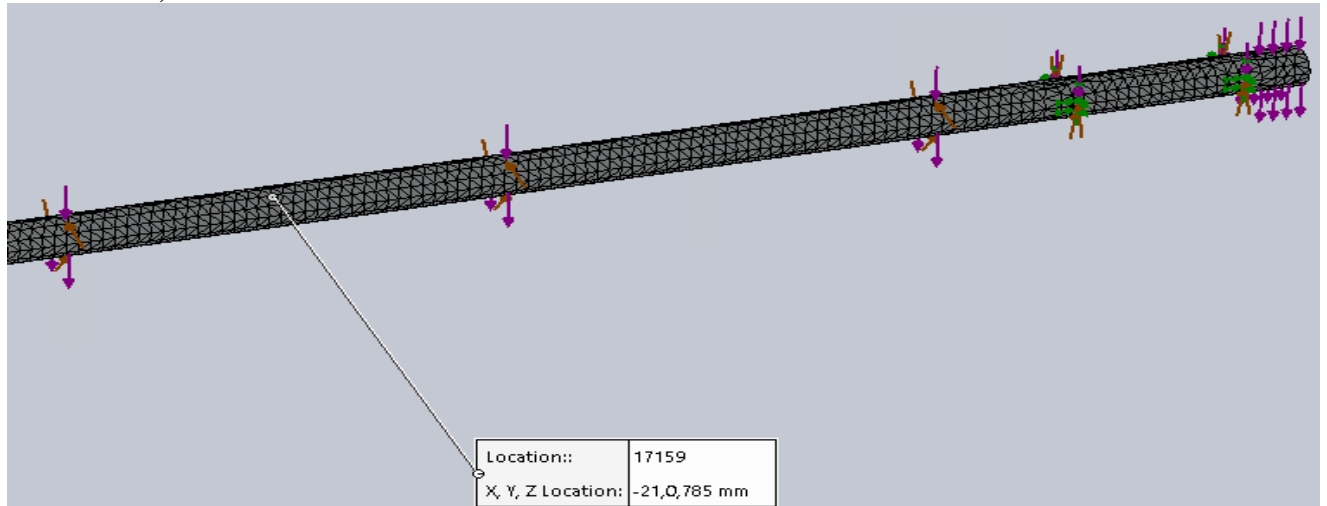
AL 6061-T6, 28 mm:



Figur 22 Lokasjon høyest forskyvning Al (28mm)

Høyeste nedbøyning befinner seg på midten av akslingen, 785 mm fra hver ende, i sentrum av tverrsnittet og er på $1.97E+01$ (19,7 mm)

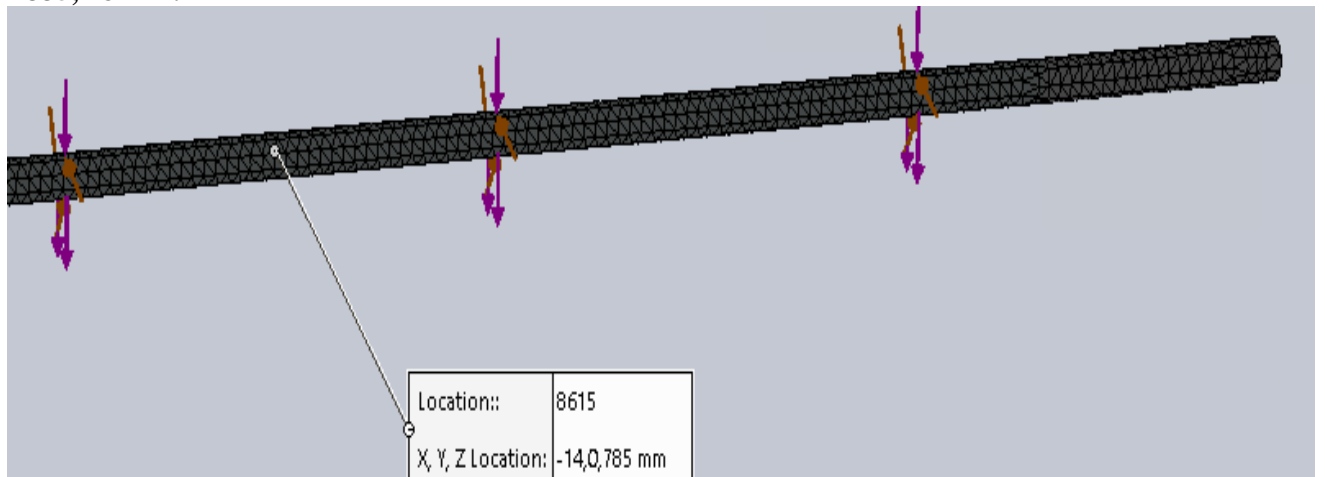
AL 6061-T6, 42 mm:



Figur 23 Lokasjon høyest forskyvning Al (42mm)

Største nedbøyning befinner seg på midten av akslingen, 785 mm fra hver ende, i sentrum av tverrsnittet med en verdi på kun **3.97E+00 mm (3,97 mm)**.

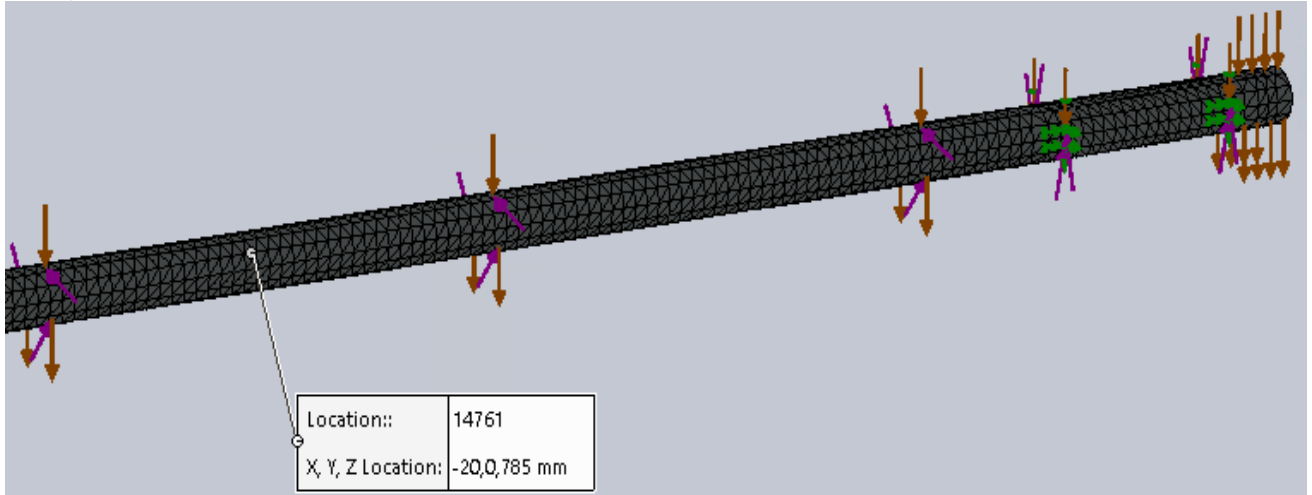
E335, 28 mm:



Figur 24 Lokasjon høyest forskyvning E335 (28mm)

Største nedbøyning befinner seg også her på midt på akslingens lengde, og i sentrum av tverrsnittet (som ble utfallet for samtlige eksemplarer i analysen). Det registreres en litt større verdi på **7.32E+00 (7,32 mm)** sammenliknet med aluminium.

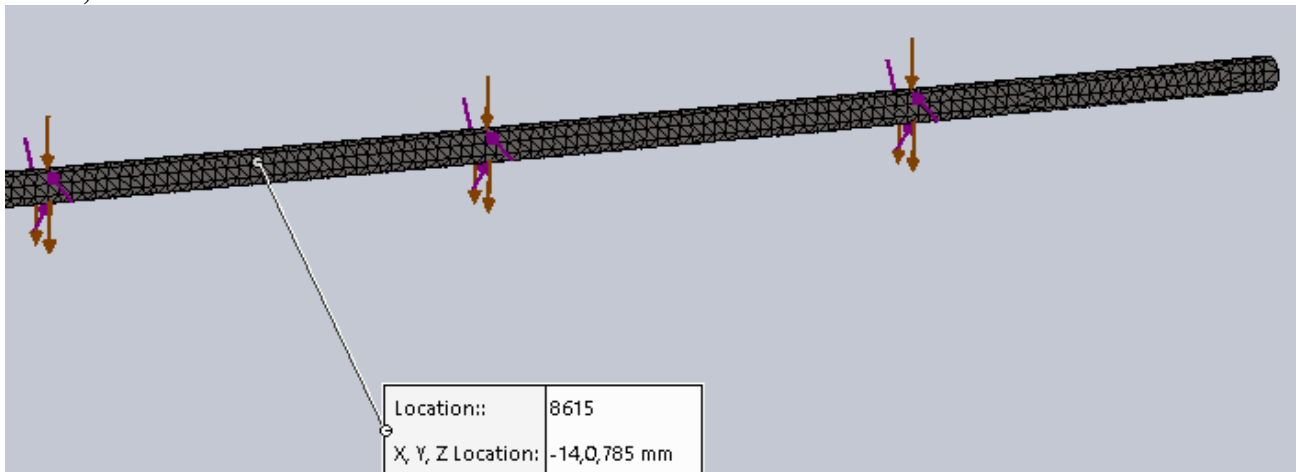
E335, 40 mm:



Figur 25 Lokasjon høyest forskyvning E335 (40mm)

Største nedbøyning for tykkere aksling i E335 måler **1.80E+00 (1,8 mm)**.

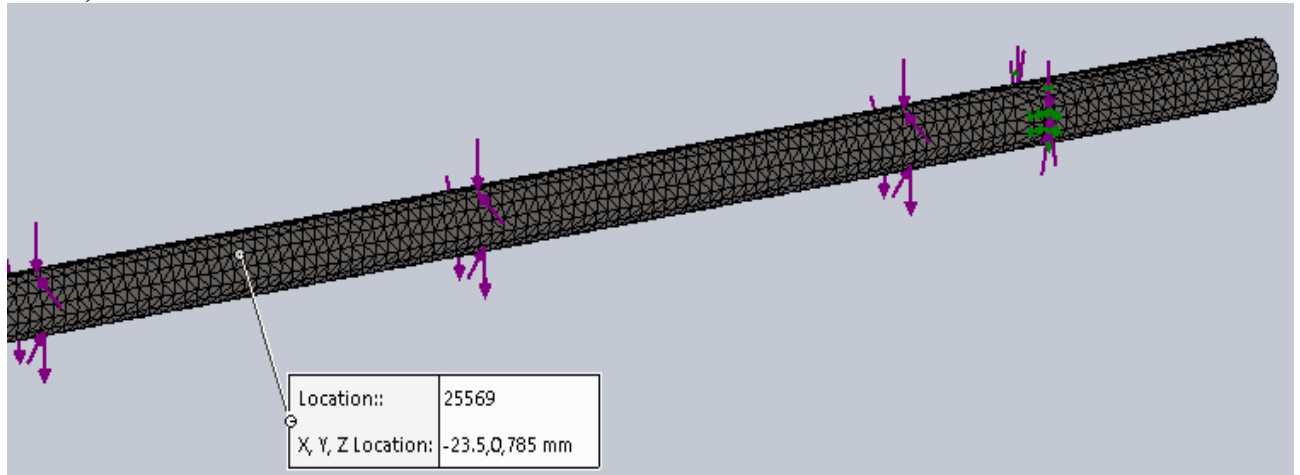
SS316, 28 mm:



Figur 26 Lokasjon høyest forskyvning SS316 (28mm)

SS316 hadde lik forskyvning som original aksling i E335 på **7.32E+00 (7,32 mm)**. Ved nærmere undersøkelse av resultatene fra simuleringen for SS316 (28 mm), ser man at forskjellene representeres kun ved små endringer i lokasjonen på enkelte av nodene sammenliknet med E335 (28 mm).

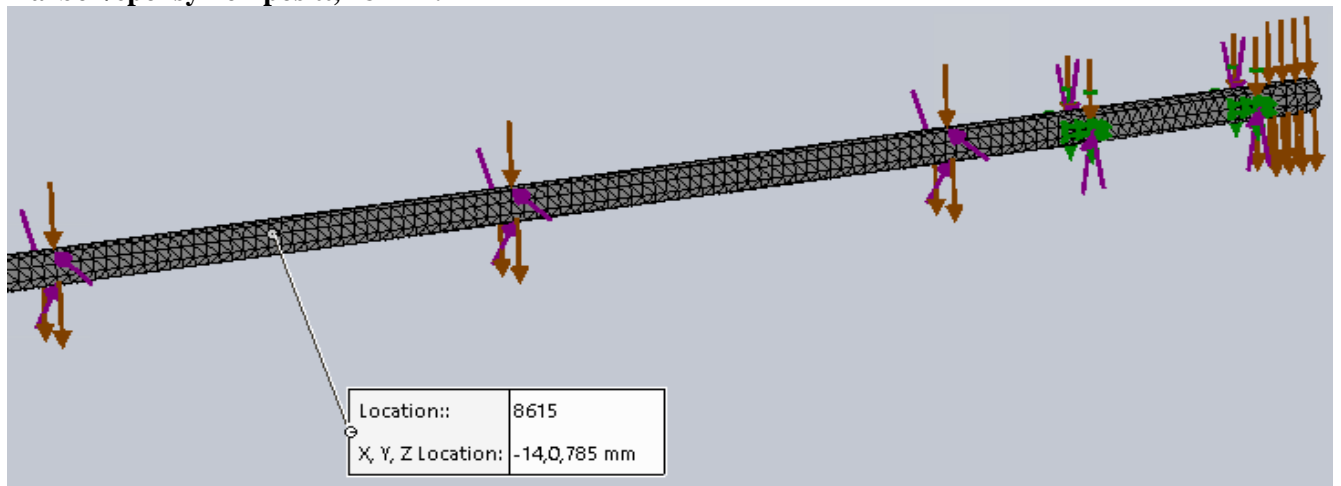
SS316, 47 mm:



Figur 27 Lokasjon høyest forskyvning SS316 (47mm)

Dimensjonert aksling i SS316 hadde omtrent samme forskyvning som E335 (40 mm) lik **1.09E+00 (1.9 mm)**.

Karbon/epoksy kompositt, 28 mm:



Figur 28 Lokasjon høyest forskyvning kompositt (28mm)

For akslingen i karbon/epoksy kompositt er største nedbøyning lik **1.32E+01 (13,2 mm)**.

5.2 Tradisjonelle tilvirkningsmetoder

5.2.1 Støpning av metall

Prosessyklusen rundt støpning avhenger av metallet og hvilken prosess som er valgt. For å begrense rapporten vil det bli beskrevet en generell injeksjonsavstøpning tilpasset rundstål, uten hensyn på støpemaskin.

Prosessyklusen består av fem hovedprosesser. Den totale tiden kan variere fra 2 sekunder til 1 minutt, og består av

- klemming
- injeksjon
- avkjøling
- ejsksjon
- trimming

Kostnadene knyttet opp mot denne metoden

- Materialkostnad
- Produksjonskostnad
- Verktøykostnad

Kostnadene knyttet til produksjon er primært knyttet opp mot timeantall og syklus.

Timeantallet er proporsjonalt med størrelsen av maskinen som blir brukt, der som det skal produseres større dimensjoner øker også timeantallet (customparnet.com 2018).

5.3 Maskinering

Det er mange ulike maskineringsmetoder avhengig av produksjonsprosessen som er valgt. For å begrense denne rapporten blir det beskrevet om de viktigste maskineringsverktøyene samt kostnader knyttet opp imot disse. Den største og viktigste gruppen her er sponfraskillende metoder, eksempler på dette er dreining, fresing etc.

5.3.1 Dreining

Det er flere faktorer som spiller inn når det gjelder hastigheten for dette, materialtype og hardheten i denne samt hvilken overflatefinish sluttproduktet har krav til. Formelen for skjærehastigheten har benevnelse m/min, og er uttrykt ved:

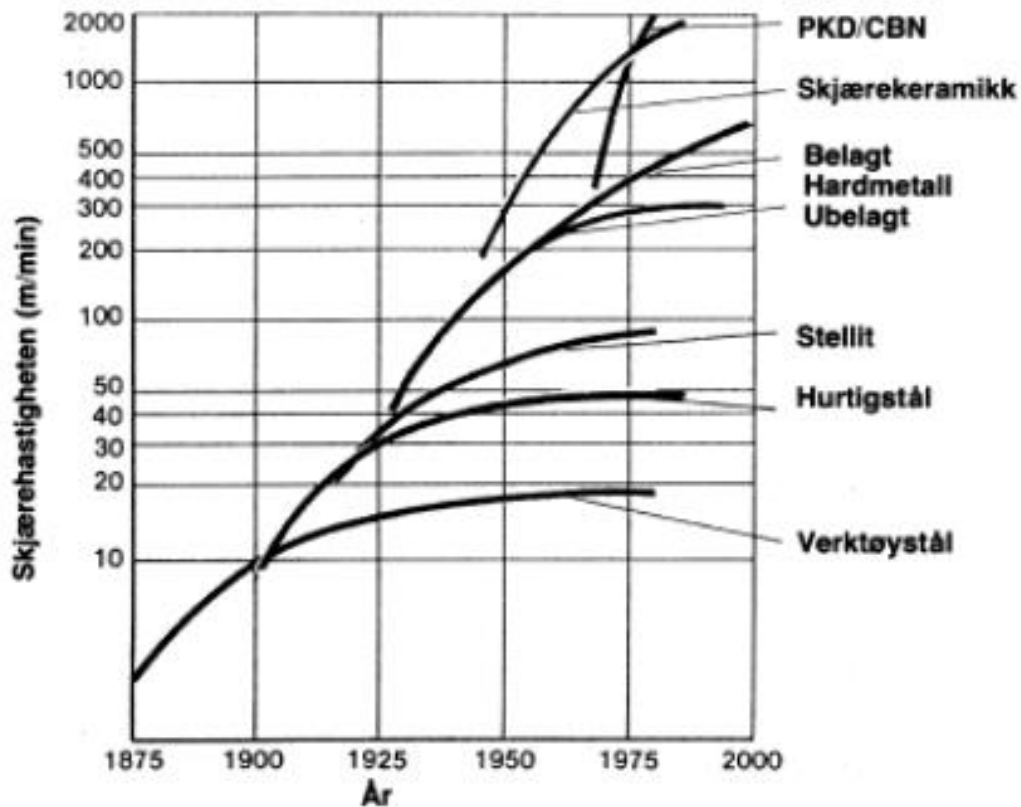
$$V_c = \frac{D \times \pi \times n}{1000}$$

V_c = Skjærehastighet (m/min)

D = diameter (mm)

n = spindelhastighet (o/min)

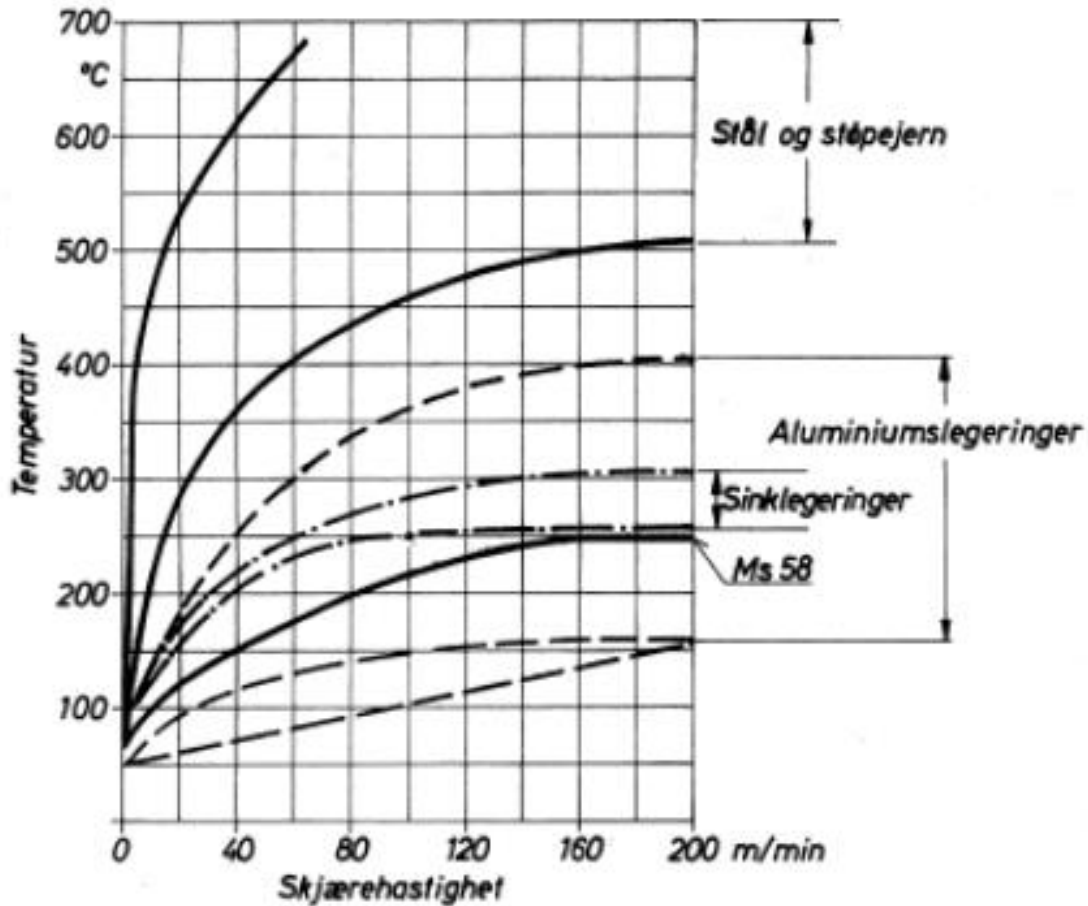
En annen variabel som blir kalt f er i mm/o. Dette er verktøyets forflytning langs arbeidsstykket (J. Nilsen 2009). Grunnen til forandring i skjærehastigheten i ulike materialer med samme diameter, kommer av at matingen blir forskjellig med tanke på hardheten i materialet som skal dreies og skjæret til maskinen.



Figur 29 Utvikling skjærehastighet, fra forelesing TEK2111

5.3.2 Fresing

Under fresing vil arbeidsstykket være rolig mens verktøyet beveger seg og tar bort materiale. Hastigheten for denne metoden har samme formel som for dreining. Annen viktig faktor her er V_f , denne beskriver hvor raskt verktøyet mates ned i arbeidsstykket oppgis i mm/min (J. Nilsen 2009).



Figur 30 Skjærehastighet – Fresing, fra forelesing TEK2111

5.3.3 Kostnader knyttet til maskinering

Kostnadene knyttet opp mot maskinering:

- Verktøy
- Vedlikehold og reparasjon
- Energikostnad
- Produksjonskostnad
- Innkjøp maskin

Verktøyet i slike maskiner er hovedsakelig sagblader. For å spare disse mest mulig er det viktig å bruke riktig sagblad for materialene/dimensjonene som blir brukt i sagan. For denne rapporten, med tanke på aksling, vil original aksling på 28 mm ha tanning 10. Tanning er antall tenner på bladet pr. tomme (25.4mm) Den nye dimensjonen på akslingen ville hatt tanning 8, som strekker seg fra 30-50mm arbeidsstykker. Når det skiftes blad, er det viktig å kjøre inn bladet, denne får da lengre levetid (ail.no U.D). Dette gjøres ofte ved at man tar en

massiv aksling med stor diameter og kjører sagen med svært lav mating for å «herde» bladet. Produksjonskostnad kan være veldig variabel etter hvordan båndsag man har, disse kommer i mange ulike modeller. Dersom man har båndsag som ikke er automatisk, kreves dette personell hele døgnet.

Med halvautomatisk, holder det å legge emnet (gjerne 6 eller 12m) på sagen og ta en reinkapp i enden. Så er sagen stilt inn slik at den mater til bestemt lengde, og kapper. Etter kappet blir lik lengde matet og kappet. Da trengs det kun personell når det ikke er mer igjen av emnet og nytt emnet må mates inn i sagen.

Med helautomatisk har sagen et kammer og henter frem emnene selv, samt mater disse til bestemt lengde. Da trenger personell kun å fylle på kammeret når det nærmer seg tomt. Dette er lønnsomt dersom man har mange deler i lik lengde som gjør at sagen kan stå og gå selv uten nye innstillinger.

5.4 Karbonfibervikling

5.4.1 Tidsbruk

Ved bruk av standard konvensjonell karbonfibervikling er det følgende begrensninger ved produksjon ifølge (Michael Päßler 2005)

- En filamentguide per dor*
- Begrenset produksjonshastighet
- Lav automatiserings kapasitet, spesielt med tanke på utskiftning av dor
- Lang syklus tid

*dor = føringsstaget av karbonfibertråden

Det er likevel mulig å kjøre flere tråder for en raskere prosess.

Tidsbruk Karbonfibervikling	
m/min	
Min	Max
60	90

Tabell 21 Produksjonshastighet vikling

Prosessen krever størkningstid av karbonfiber og epoksy. Det er likevel ulike variabler som skal tas hensyn til av sammensetning av epoksy, temperatur og vinkelen viklingen foregår på. Denne rapporten går ikke inn i dybden på disse egenskapene.

Størkningstid	
Tid (timer)	2
Temperatur (°C)	120

Tabell 22 Størkningstid (x. Qian 2016)

Det ses på som hensiktsmessig for produksjonen å vikle lange arbeidsstykker, for så å dele arbeidsstykket i riktig dimensjonert lengde. Oppdelingsprosessen skjer for det meste i dag med tradisjonell mekanisk kutting. Det oppstår dermed stor slitasje på skjærebladene, og mikrobrudd i karbonfibrene, noe som kan forårsake brudd. Det vil derfor være en prosedyre med påføring av bindemiddel på endene av de oppkuttete endene (Jens Bliedtner. 2013).

5.4.2 Kostnader knyttet til karbonfibervikling

Utfordringer med karbonfibervikling er kostnader knyttet rundt oppsett av viklemaskin, og rengjøring. I tillegg må det være en operatør til stede under prosessen. Dette for å sikre nok tilførsel av epoksy, fiber og oppsett av utstyret. Det vil forekomme en høyere grad av materialsvinn og maskinstans under vikleprosessen, noe som vil ha innvirkninger på kostnadsbildet (Duvall U.D).

(Vestlund 2013) gjør i sin rapport en kost- og tidsestimerting av tilvirkning av et stridshode i karbonfiber, og har i sitt arbeid blant annet vurdert på karbonfibervikling sammen med Saab Dynamics AB.

Vestlund utarbeidet følgende skjema for tilvirkning ved vikling:

Prosessrekkefølge og estimert tidsforbruk			
		Tilstedeværelse av operatør [min]	
Prosess	Estimert tid [min]	Prototypetilvirkning (ingen automatisering)	Serieproduksjon (automatisering)
Karbonvikling	10	2	1
Impregnering	120	1	1
Epoksy impregnering	120	20	20
Av tagning av arbeidsstykket	1	1	0,5
Oppsett av maskin	2	2	1
Maskinering	1	1	0
Av tagning fra maskin	1	1	1

Tabell 23 Prosessrekkefølge og estimert tidsforbruk karbonfibervikling

5.5 Additiv tilvirkning

5.5.1 Hastighet

Det vil være ulik printerhastighet variert på maskintype og maskinmerke. I følge (sculpteo.com 2018) er dette på grunn av variabler blant annet innen

- Temperatur på dyse
- Materialets smeltetemperatur
- Tykkelse på lagene
- Lasereffekt

Det er i denne rapporten er det tatt utgangspunkt i maksimal printerhastighet for metall printere, uten hensyn på leverandør eller printertype.

Teknologi	Printerhastighet
SLS	48 mm/t
SLA	14 mm/t
DMLS	8 mm ³ /s
FDM	150 mm/t

Tabell 24 Printerhastighet

5.5.2 Kostnader knyttet til Additive Manufacturing (AM).

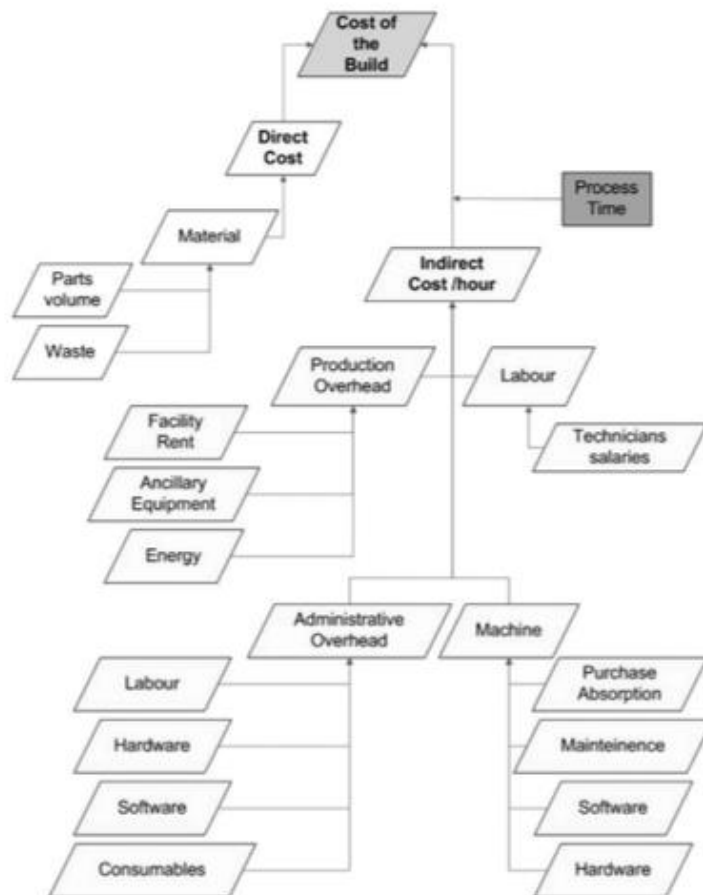
Ved vurdering av kostnadsbilde ved bruk av AM må det tas hensyn til bygg-volumet. Det må i tillegg tas hensyn til tilrettelegging av støttestrukturer og elementer som må fjernes før produktet er ferdig, og det vil forekomme materialsvinn av pulver. I tillegg vil det være en variabel kostnad med energibruken når printeren er i bruk. Det vil være utfordringer med maskinproduktivitet som en del av kostnadsdriverne, da det tar tid å oppnå et produksjonsnivå der kapasiteten blir utnyttet fullt ut (Grøstad 2016).

Kostnader knyttet til AM produksjon kan uttrykkes ved følgende formel ifølge (RUFFO 2006)

Formel 1 Produksjonskostnad AM

$$C_{Build} = (C_{Indirect} \times T_{Build}) + m \times Price_{raw\ material} + (E_{Build} \times Price_{Energy})$$

C_{Build}	Total byggekostnad
$C_{Indirect}$	Total indirekte kostnader per time
T_{Build}	Total byggetid
m	Masse til produkt og støttestruktur
$Price_{Raw\ material}$	Pulvermetallkostnader
E_{Build}	Energikostnader knyttet til produksjon



Figur 31 Kostnadsbilde AM (RUFFO 2006)

For å gjøre en vurdering av kostandene av produksjon ved AM er det hensiktsmessig å gjøre overslag og kvalitative vurderinger. Denne rapporten vil ikke ta for seg spesifikk utregning av produksjons tid ved AM. Det er like vel viktig å poengtere at produksjonstiden kan regnes ut med likningen som (Grøstad 2016) nevner i sin rapport:

Formel 2 Byggetid, sekunder (Grøstad 2016)

$$T = \frac{V}{Lt \times Ss \times Ds} + \frac{4h \times \sqrt{\frac{V}{h}}}{Lt \times Ss} + \frac{h \times Ct}{Lt}$$

T	Tid, sekunder
V	Volum av komponent
Lt	Tykkelse av lag
Ss	Skannerhastighet
Ds	Avstand mellom skannelinjene
H	Høyden av komponent
Ct	Tiden det tar fra lag er skannet til neste lag skannes

Tabell 25 Benevnelser byggetid – Formel

For å få en oversikt over det totale kostnadsbildet, må kostnader for alle prosesser legges til. Med dette menes fjerning av støttestruktur og etterarbeid med arbeidsstykket.

6.0 Diskusjon

6.1 Diskusjon av metode og utførelse

Metode

Gjennom å utføre en litteraturstudie har deltagerne i rapporten satt seg inn i metoder for produksjon og tilvirkning av drivakslinger. En negativ konsekvens av dette er omfanget av produksjonsmetodene. Blant annet er additiv tilvirkning er en metode som er under stor utvikling, og det samme er materialteknologien på det samme feltet. Rapporten har ikke tatt for seg standarder innen additiv tilvirkning, og dette kan ha innvirkning på blant annet tid og kostnadsbruk, noe som igjen vil ha stor innvirkning på resultatet.

Et annet aspekt ved litteraturstudiet er kildebruken. Mange av opplysningene som har blitt brukt er fra leverandører som driver i markeder som konkurrer med hverandre, både på leveranser, tid og kostand. Informasjonen av materialer og utstyr kan derfor være påvirket av hvordan bedrifter markedsfører produktene sine, som igjen påvirker resultatet av rapporten.

Med mangel på konkrete forutsetninger vil både verdier og resultater blir påvirket av de antagelser rapporten begrenser seg til. For å oppnå en høyere grad av validitet, ville et samarbeid med en bedrift med spesialisering på tilvirkning av aksler gitt et annet resultat enn det denne rapporten har fått. Det vil være faktorer i denne rapporten som uteblir da informasjon fra automobilindustrien har vist seg vanskelig å få tak i. Dette kan skyldes bedriftshemmeligheter

Utførelse og begrensninger

En svakhet med denne oppgaven er at resultatene baserer seg på teoretiske verdier med flere variabler. Det er ikke produsert en modell av drivaksling med AM- metode for reel testing. Med mer tid ville dette vært en mulighet, om modellen hadde blitt skalert. På grunn av rapportens omfang og kompleksitet, har begrensningene rundt drivakslingen vært ytterst nødvendig. Andre tilnærminger kunne for eksempel vært beregninger med flere variabler som lager, friksjon og rullestand.

I kapittel 4 uttrykkes produksjonsmetodene. Argumentasjon for å fremstille drivakslingen med AM. Like vel anses det som svært vanskelig å tilvirke en reelstørrelse på akslingen, uten å måtte bruke en form for sammenføyning. Selv om geometrien til drivakslingen er enkel, er det designmessige utfordringer med tilvirkningsmetoden. Det vil kreve mye metallpulver, da dimensjoneringen med 316L viser stor diameter. Dette vil være lite økonomisk både for en prototype og serieproduksjon.

I delkapittel 5.4.2 er det gjort en estimering av tids- og kostnadsestimering av karbonfibervikling. Med store variabler innen karbonfibervikling med epoksy, vil det forekomme avvik ved beregning av tids- og kostestimering. I (Vestlund 2013) sin estimering , som er basert på samarbeid med forsvarsindustrien i Sverige, der dimensjoner og design ikke er oppgitt, vil det være vanskelig å sammenlikne tilvirkningsprosessen som denne rapporten tar for seg. Estimeringen til Vestlund gir likevel et godt innblikk i tilvirkningen.

6.2 Diskusjon av analyse og resultat

Ut ifra de begrensinger som er satt for denne rapporten, er arbeidsstykket som skal produseres i all hovedsak et rundjern. Ingen additiv tilvirkningsprosess per i dag vil være gunstig for denne type produksjon med tanke på kostnad, volum og størrelsen på arbeidsstykket. Additiv tilvirkning er tilpasset langt mer komplekse geometrier og ofte mindre størrelser.

Arbeidsstykket rapporten tar for seg er dimensjonert til diameter 47mm og lengde 1570/2, det er da ikke tatt hensyn til differensialen. I virkeligheten er det en viss avstand mellom akslingene i denne.

Akslingen vil bli for stor for en tilvirkningsprosess med DSLM/ SLM-metode, selv om det er rimelig å anta at denne metoden ville gitt de beste mekaniske egenskapene i materialet. En metode for større arbeidsstykker vil være Binder Jetting, som blant annet kan benyttes til

tilvirkning av støpeformer. Binder jetting vil ha kapasiteten til å produsere nærmere enn andre metoder med tanke på størrelse. Den begrenser seg likevel, men vil ikke klare å møte de mekaniske materialegenskapene slik som DMLS/ SLM. Tidsbruken og kostnader knyttet opp mot viser seg å bli for høye.

Det vil være å anse at AM kan benyttes til å prototype aktuelle nye design for drivakslinger.

Den mest hensiktsmessige metoden for å produsere akslinger kostnadmessig er fremdeles ved avstøpning. Med støpemetodene som er tatt for seg her, kan man tilvirke både aluminium og maskinstål til en mer fordelaktig pris enn ved AM. Ulempen med denne metoden fremfor AM er at arbeidsstykkene må etterbehandles mer omfattende etter støp, med blant annet dreining, fresing, valsing og kapping. Tiltak for å begrense kostnadene for disse metodene er forklart i kapittel 5.3.3. Selv om de må igjennom maskinering, noe som AM ikke er nødt til i samme grad. Kostnadene for tilvirkning ved støpemetodene er fortsatt lavere, og med de samme mekaniske egenskapene. Ved masseproduksjon av emner er støpeformer for gjenbruk, samt at det ikke er nødvendig å programmere maskiner for hvert enkelt arbeidsstykke. Om produksjon en og en på grunn av ulik størrelse og toleranser, vil støpemetoden blitt svært kostbar per produsert enhet.

Fordelen med bruk av karbonfibervikling er at det kan vikles lange og store arbeidsstykker, som medfører at arbeidsstykkene kan kappes til lengder etter designønsker. Det er i dag teknologi som kan vikle i mange akser og legge fibertråden i ulike vinkler i forhold til hverandre. Dette gir store fordeler hva gjelder styrke og volum produksjon, dersom tidsforbruket ikke er vesentlig.

Utfordringer knyttet til denne produksjonen er at karbonfiber responderer dårlig til kapping med tanke på mikrosprekker. Det vil være nødvendig å etterbehandle arbeidsstykkene etter kapping. Sammen med lang prosessetid og liten automatiseringsmulighet kan det vurderes om denne metoden skal benyttes til spesialproduksjon rettet mot spesifikke behov som for eksempel styrke/ vekt ratio.

6.3 Andre perspektiver

Det vil være naturlig å diskutere konsekvensen av forskjellene mellom produksjonsmetoder i andre perspektiver. Det er naturlig at miljø og økonomi er av mer interesse enn kun beregningsteknikk, teknologi og sikkerhet.

Slik det fremgår i kapittel xx, kan man se betydelige forskjeller i tidsbruken i produksjonen. I tillegg til store ressurser knyttet mot produksjonen av metallpulver. Da det viser seg at diameteren på akslingen ved AM er 47mm, hele 67,86% økning, vil dette føre til en enda større belastning med tanke på naturressurser.

Karbonfiberens egenskaper anses å være svært gode. Tilvirkningsprosessen er lengre enn ved støpning av metall, men det kan ikke utelukkes at metoden kan benyttes for å fremstille prototyper, og inngå i en serieproduksjon uten store forskjeller kostnadsmessig.

(Vestlund 2013) indikerer i sin konklusjon at det skiller 28,1% i pris, men at det er en usikkerhet på virksomhetsutgifter på 26% av produksjonskostnadene.

Sammenliknet med for eksempel aluminium kan ikke karbonfiber brukes til gjenbruk, en ikke-fornybar ressurs, og burde derfor holdes på et minimum. Sett i et bedrift- og samfunnsøkonomisk perspektiv burde det gjøres godt forarbeid for å sikre lønnsomheten, og med tanke på miljøet.

6.5 Forslag til videre arbeid

- Bruk av standarder til additiv tilvirkning har ikke vært i fokus i denne rapporten. Et interessant tema ville vært å gå inn i de ulike standardene og se forskjeller eller trekke paralleller mellom standardene
- I denne rapporten benyttes en forenklet modell av akslingen til beregninger og simuleringer. Det er ikke tatt hensyn til kjerver og lager. Med additiv tilvirkning som metode, kan det være interessant å undersøke mer rundt mulighetene ved design av en ny drivaksling.
- Med indikasjoner på at karbonfiberpriser synker, kan det være interessant å se på design, tilvirkning og kostnadsanalyse av prototyper med karbonfibervikling som tilvirkningsprosess.

7.0 Oppsummering

Kostnader knyttet til produksjon av akslinger i karbonfiber vil i hovedsak ligge på tap i arbeidsmengde, da det blir forflytning av arbeidsstykker og nedetid av viklemaskinene. Det vil være mindre kostnader knyttet til svinn sammenliknet med støpestål, da det er lettere å tilpasse definerte lange lengder for å oppnå god volumproduksjon. Det vil og variere kostnader knyttet variabler i den kjemiske sammensetningen av epoksy med tilføring av blandingsmidler.

Med additiv tilvirkning vil kostnader bli svært høye. Det er på grunn av meget høy materialpris, og for å oppnå et akseptabelt volumnivå på produksjonen må det være tilgang til mange 3D-printere. Energipriser må også vurderes i kalkylen.

Det vil være svært få kostnader knyttet til operatørtimer.

Rapporten tar for seg tilbud på støpestål i fra Tibnor og Norsk Stål. Det er tatt forenklete overslagsberegninger av kostnader knyttet mot maskinering av støpestål. Da lengdene leveres fra leverandør, a 6meter E335, medfører dette utfordringer knyttet til kapping, da det vil bli igjen lange rester som ikke går opp ned arbeidsstykkets lengde. Dette vil gi innvirkninger på kostnaden, og svinn. Med en 6 meter E335, som vil gi 3 emner, og en restlengde på 1290mm, 14.297kg som tilsvarer 135kr pr aksling. Kostnaden på svinn må regnes inn i kalkylen.

Ut i fra våre vurderinger med hensyn av tid og kostnader, vil støpejern med medfølgende maskineringsprosesser, være den billigste løsningen, den minst tidkrevende og oppnå høyest volumproduksjon. Det er også kun denne løsningen som holder budsjettet på Kr 10.000.

Resultatene fra dynamiske simuleringer og beregninger viser at SS316L er et dårlig valg på grunn av en svært stor økning i både diameter og vekt for ny aksling, og at opprinnelig diameter ikke tilfredsstillende lastene da flytegrensen overstiges Det samme kan man si for E335; størrelsen på vekten av akslingen for disse materialene er ikke akseptable da det vil ganske sikkert føre til kjapt utmattingsbrudd.

Dette kan tyde på at enten AL 6061-T6 eller Karbonfiber er de mest egnede materialtypene basert på styrke, additive tilvirkningsmetoder og kostnad. En aksling med ny diameter i AL 6061-T6 har tilstrekkelig styrkeegenskaper, og en akseptabel vekt på 5,873 kg takket være

dens lave massetetthet. Karbonfiber er et klart valg hvis lav vekt og gode styrke er kravet, men med en pris på 825,15 Kr per stag kan det bli i dyreste laget.

8.0 Referanser

3dhubs.com (2018). "Introduction to Binder Jetting 3D printing." from <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing>.

3Dprintingfromscratch.com (2018). "Types of 3D printers or 3D printing technologies overview." from <http://3dprintingfromscratch.com/common/types-of-3d-printers-or-3d-printing-technologies-overview/>.

ail.no (U.D). "Få mer ut av din båndsag ". from http://www.ail.no/content/documents/produktkataloger/mer_ut_av_sagen_din.pdf.

Astrup (U.D). "Egenskaper og anvendelsesområder for rustfrie stål kvaliteter." from https://www.google.no/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiTsZ7IgonbAhWFFJoKHQ0DBFEQFggqMAA&url=https%3A%2F%2Fastrup.no%2Fcontent%2Fdownload%2F4804%2F16993%2Fversion%2F1%2Ffile%2FEgenskaper%2Bog%2Banvendelsesomr%25C3%25A5der%2Bfor%2Brustfrie%2Bst%25C3%25A5kvaliteter.pdf&usq=AOvVaw3u_h4FEnOCL2jgCODRH-ew.

Automobile-catalog.com (U.D). "1982 Volkswagen Transporter Bus 1.6 (man. 4)." from http://www.automobile-catalog.com/make/volkswagen/transporter_t2/transporter_t2/1982.html.

Bell, T. (2018). "Type 316 and 316L Stainless Steel."

Bilbak, A. (2012). Mikrostruktur og mekaniske egenskaper for skrueekstrudert aluminium: Karakterisering av skrueekstrudert aluminium etter ulike rensmetoder av råmaterialet, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU).

CAMWorks (2018). "SOLIDWORKS CAM." from <https://camworks.com/solidworks-cam-powered-by-camworks/>.

Composites, P. (2009). "Mechanical Properties of Carbon Fibre Composite Materials, Fibre / Epoxy resin (120°C Cure)."

Corneliussen, R. G. (2015). Tilvirkningsteknikk, Fagbokforlaget.

custompartnet.com (2018). "Die Casting." from <http://www.custompartnet.com/>.

Duvall, F. W. (U.D). "COST COMPARISONS OF WET FILAMENT WINDING VERSUS PREPREG FILAMENT WINDING FOR TYPE II AND TYPE IV CNG CYLINDERS."

EOS (2018). "System and Equipment for Metal Manufacturing." from https://www.eos.info/systems_solutions/metal/systems_equipment.

Federation, M. P. I. (2018). "Making Metal Powder." from <https://www.mpif.org/IntroPM/making-powder.asp>.

Forming, J. (2018). "Hydroforming." from <http://www.jmpforming.com/>.

Gauthier, M. M. (1990). Engineering Materials Handbook

GE (2018). "Additive manufacturing machines." Electron Beam Melting (EBM) machines. from <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/machines>.

glemco.com (U.D). "6061-T6 Aluminum." from http://www2.glemco.com/pdf/NEW_MATERIAL_LIST/Alumina%206061-T6.pdf.

GMW (U.D). "VW Vanagon Specialists." from <http://www.gmwerks.com/Vanagon.html>.

Grøndalen, Ø. (2017). Materiallære. Fagbokforlaget.

Grøstad, E. (2016). Additiv Tilvirkning som Produksjonsmetode for Verktøyholdere, NTNU.

Hydro (2018). "6061-T6 Aluminum Properties." from <https://www.hydroextrusions.com/en-US/profiles/6061-t6-aluminum-properties/>.

International, A. (2018). "Additive Manufacturing Overview." from <https://www.astm.org/industry/additive-manufacturing-overview.html>.

IPPC (2013). FNs klimapanelers femte hoved rapport: Klima i endring: Intergovernmental Panel on Climate Change (FNs klimapanel)

J. Nilsen, A. J. (2009). "Sponfraskillende bearbeidning og skjæreteknikk."

Jens Bliedtner., S. R., Hartmut Müller., Andreas Petrich (2013). "Laser Cutting of Carbon Fibres
A laser cutting procedure with integrated cutting edge sealing."

Johansen, H. (2008). "Komposittmaterialer."

Johansen, H. (2008). Sveisbare konstruksjonsstål.

Johansen, H. (2009). "Aluminium."

Johansen, H. (2011). "Aksler."

Johansen, H. (2012). "Korrosjonsbestandig Stål."

Kasprzak, J. (2014). "Understanding your Dampers: A guide from Jim Kasprzak."

Kenneth G. Budinsky, M. K. B. (2010). Engineering Materials Properties and Selection.

Kolbeinsen, L. (2009). "Utettet stål." from https://snl.no/utettet_st%C3%A5l.

Kolbeinsen, L. (2018). "Tettet stål." from https://snl.no/tettet_st%C3%A5l.

Laserteknikk, M. (2018).

Leirvåg, R. N. (2013). Additive Manufacturing for Large Products, NTNU - Trondheim.

Makeitform.com (U.D). "EN 1.0060 (E335) Non-Alloy Steel." from <https://www.makeitfrom.com/material-properties/EN-1.0060-E335-Non-Alloy-Steel>.

MatWeb (2018). "Overview of materials for Epoxy/Carbon Fiber Composite." from <http://www.matweb.com/search/datasheettext.aspx?matguid=39e40851fc164b6c9bda29d798bf3726>.

matweb.com (U.D). "Aluminum 6061-T6; 6061-T651." from <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=ma6061t6>.

metalinfo (2018). "E295." from <https://www.metalinfo.com/?ref=matmatch>.

Michael Päßler, R. S. (2005). "Filament winding with increased efficiency." from <http://www.storhy.net/>.

Myklebust, B. N. (2015). Optimale tilvirkningsprosesser for tappskiver av stål fremstilt ved kun støping, eller støping etterfulgt av varmsmiing, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.

Narvik, H. i. (2007). "Metaller." from <http://docplayer.me/14024346-Metallene-kjennetegnes-mekanisk-ved-at-de-kan-vaere-meget-duktilite-konstruksjonsmetaller-har-alltid-en-viss-duktilitet-og-dermed-seighet.html>.

NorskStål Tabeller og Standarder.

Ore, S. (2009). "Karbonfiber." from <https://snl.no/karbonfiber>.

Panjwani, L. (2018). "Understanding the Potential of Carbon Fiber Composites for Automobiles." from <https://www.rdmag.com/article/2018/01/understanding-potential-carbon-fiber-composites-automobiles>.

Pedersen, B. (2011). "Omslagstemperatur." from <https://snl.no/omslagstemperatur>.

Peters, S. T. (2011). Composite Filament Winding S. T. Peters, The Materials Information Society.

Products, P. S. S. (2018). "316/316L Stainless Steel."

researchgate.net (U.D). "Should we use yield strength or ultimate tensile strength in fatigue test for metallic material? Why? What is the minimum load level we need to use?". from https://www.researchgate.net/post/Should_we_use_yield_strength_or_ultimate_tensile_strength_in_fatigue_test_for_metallic_material_Why_What_is_the_minimum_load_level_we_need_to_use.

reservedeler.no (U.D). "Drivaksel." from <https://www.reservedeler24.co.no/>.

RUFFO, M., TUCK, C. & HAGUE, R. (2006). "Cost estimation for rapid manufacturing-laser sintering production for low to medium volumes. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B." [Journal of Engineering Manufacture](#).

Rushton, M. (2018). "Introducing 3DXpert for SOLIDWORKS – Your Direct Path from SOLIDWORKS to Additive Manufacturing." from <http://blogs.solidworks.com/solidworksblog/2018/02/introducing-3dexpert-solidworks-direct-path-solidworks-additive-manufacturing.html>.

sculpteo.com (2018). "3D Printing Speed." from <https://www.sculpteo.com/en/glossary/3d-printing-speed-definition/>.

solidsolutions.co.uk (2017). "So how accurate is SOLIDWORKS Simulation?". from <https://www.solidsolutions.co.uk/blog/2017/09/so-how-accurate-is-SOLIDWORKS-simulation/#.Wvs9NBOFNTa>.

Solidworks (2018). "Why Choose SOLIDWORKS CAM?"
."

Solidworks (2018). "Why Choose SOLIDWORKS Flow Simulation?". from <https://www.solidworks.com/product/solidworks-flow-simulation>.

Solidworks.com (2017). "Dynamic Analysis." from http://help.solidworks.com/2017/english/SolidWorks/cworks/When_to_Use_Dynamic_Analysis.htm.

Sørli, D. (2018). "Additiv Manufakturering - Hvordan virker det, og hva kan det brukes til?". from <https://vikenklynge.no/arrangementer/20180228/viken-teknologiklynge-3D-printing.pdf>.

Steel, J. L. S. (2018). "Steel Grades Carbon Steel E335." from <http://www.steelgr.com/Steel-Grades/Carbon-Steel/e335.html>.

Stratasys, I. (2018). "Five ways 3D Printing Is Transforming the Automotive Industry." [techdirections](#)(March 2018).

Systems, D. (2018). "Direct Path from SOLIDWORKS to Additive Manufacturing." from <https://www.3dsystems.com/software/3dexpert-solidworks>.

truckscience.com (U.D). "1982 Volkswagen Transporter Combi 1.6 Diesel tire and wheel sizes." from http://www.automobile-catalog.com/tire/1982/40385/volkswagen_transporter_combi_1_6_diesel.html.

truckscience.com (U.D). "How to calculate axle weights". from <https://truckscience.com/calculate-axle-weights/>.

uia.no (U.D). "Periodisk bevegelse." from <http://grimstad.uia.no/perhh/phh/fag/fysikk/ff0300/f/k13/029.htm>.

Vestlund, J. (2013). "Shatter free shell body for warhead."

Vicari, A. (2015). "Will Carbon Fiber Find Widespread Use in the Automotive Industry?".
from <http://www.machinedesign.com/contributing-technical-experts/will-carbon-fiber-find-widespread-use-automotive-industry>.

WENtechnology (U.D). "Power-Torque." from
http://www.wentec.com/unipower/calculators/power_torque.asp.

x. Qian, Y. G. Z., X.F Wang, Y.J Heng, J.H Zhi (2016). "Effect of carbon fiber surface functionality on the moisture absorption behavior of carbon fiber/epoxy resin composites."

Vedlegg A Beregninger

BEREGNINGER

SPENNINGER:

- Skjærspenning ved vending, $\hat{\tau}_v$
- Vrimoment, M_v

BØYESPENNINGER:

- Bøyenspenning, σ_b
- Bøyemoment, M_b

Total hjuldiameter: 639 mm (26") = 2,16 ft

Ny motorkraft: 90 HK = 66 kW

Bilens egenvekt (curb weight): 1410 kg

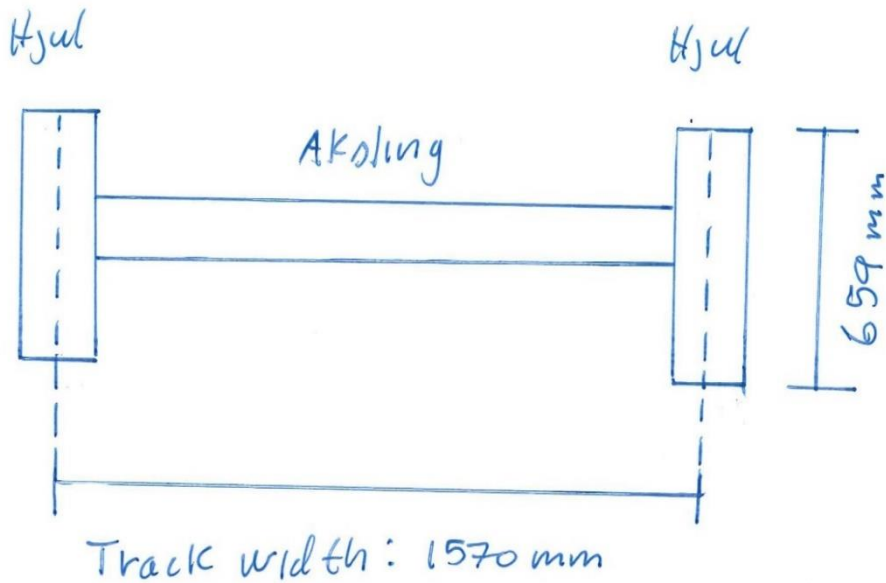
$$\text{Effekt: } P = Fv = \frac{\pi d n}{60} [W]$$

$$\text{Velger: } n = 1915 \Rightarrow P = \frac{\pi \cdot 639 \text{ mm} \cdot 1915 \text{ rpm}}{60}$$

$\approx 66000 \text{ W ok}$

$$P = M_v \cdot \omega = M_v \cdot \frac{2\pi n}{60} = M_v \frac{\pi n}{30}$$

$$\Rightarrow M_v = \frac{30P}{\pi n} (n=1915) = \frac{30 \cdot 66 \cdot 10^3}{\pi \cdot 1915} = \underline{\underline{329 \text{ Nm}}}$$



Benytter track width som
lastbærende lengde.

(Teoretisk) topphastighet (ny motor):

$$V = \frac{\text{rpm} \cdot 60 \cdot d \pi}{5280} = \frac{1915 \cdot 60 \cdot 2,16 \text{ ft} \cdot \pi}{5280}$$

$$\approx 148 \text{ mph} \approx 238 \text{ kmh}$$

SKJÆRSPENNING VED VRIDNING

$$\tau_v = \frac{M_v}{W_p}$$

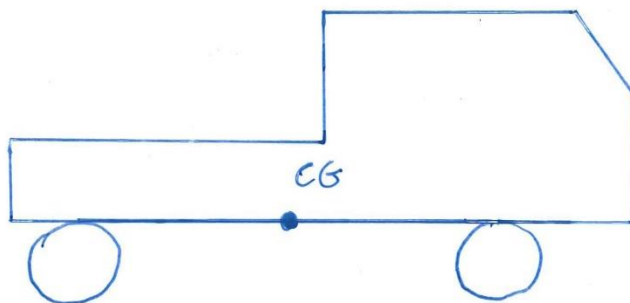
Hvor W_p = Polart arealmotstandsmoment

$$W_p \text{ (massiv aksling)} = \frac{\pi}{16} d^3 = \frac{\pi}{16} (28 \text{ mm})^3$$

$$= 4310 \text{ mm}^3$$

$$\Rightarrow \tau_v = \frac{329\,000 \text{ Nmm}}{4310 \text{ mm}^3} = 76,3 \text{ N/mm}^2$$

Bilens vektfordeling $\approx 50/50$



Wheelbase = 2460 mm

Vekt på bakaksling = Tot. vekt $\left(\frac{CG_f}{WB} \right)$

CG_f = Avstand fra massesenter CG til frontaksling
 WB = Wheelbase

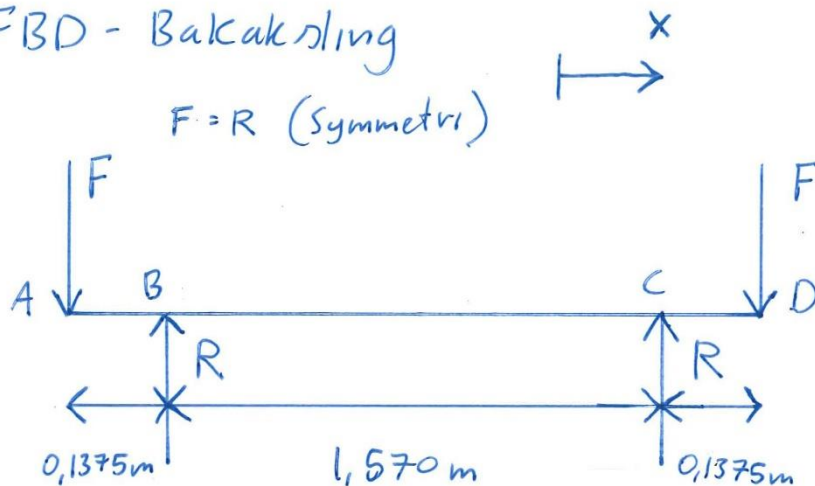
$$= 1410 \text{ kg} \left(\frac{1,230 \text{ m}}{2,460 \text{ m}} \right) = \underline{705 \text{ kg}}$$

$$705 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = \underline{6916 \text{ N}}$$

$$\frac{6916 \text{ N}}{2} = 3458 \text{ N} = F$$

FBD - Bakkerling

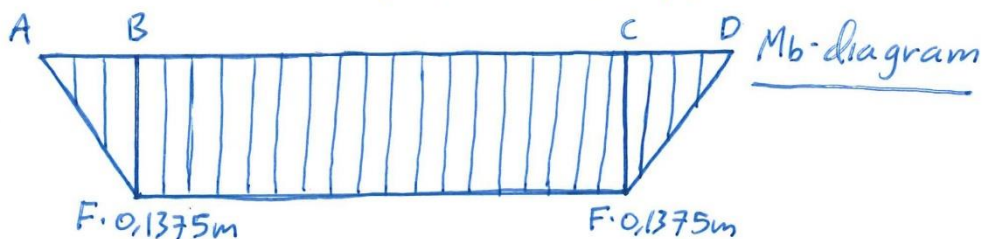
$F = R$ (Symmetri)



AB: Fx

$$BC: Fx - F(x - 0,1375 \text{ m}) = F \cdot 0,1375 \text{ m}$$

$$CD: 0,1375 \text{ m} \cdot F - F(x - (1,570 \text{ m} + 0,1375 \text{ m})) = -Fx + F \cdot 1,570 \text{ m} + 2F \cdot 0,1375 \text{ m}$$



$$M_b = F \cdot 0,1375 \text{ m} = 3458 \text{ N} \cdot 0,1375 \text{ m} = \underline{475,475 \text{ Nm}}$$

(Opprinnelig aksling)

\Rightarrow Bøymomentet virker på hjul B og C.

Tetthet, AL 6061-T6:

$$2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \underline{0,0000027 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3}}$$

Tetthet, E335:

$$7900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \underline{0,0000079 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3}}$$

Tetthet, 316:

$$8000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \underline{0,000008 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3}}$$

Tetthet, Karbonfiber/epoksi kompositt:

$$1430 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \underline{0,0000143 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3}}$$

$$\begin{aligned} \text{Sylindervolum: } V &= \pi \cdot r^2 \cdot h \\ &= \pi \cdot (14 \text{ mm})^2 \cdot 1570 \text{ mm} \\ &= 966731 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

Vekt, ny aksling:

(masse = volum · massefettthet)

$$\text{Masse (T6): } 966731 \text{ mm}^3 \cdot 0,0000027 = 2,610 \text{ kg}$$

$$\text{Masse (335): } 966731 \text{ mm}^3 \cdot 0,0000079 = 7,637 \text{ kg}$$

$$\text{Masse (316): } 966731 \text{ mm}^3 \cdot 0,000008 = 7,734 \text{ kg}$$

$$\text{Masse (Karbon/epoksi): } 966731 \text{ mm}^3 \cdot 0,0000143 = 1,382 \text{ kg}$$

Antar 5275 som opprinnelig
materiale

Masse (originalaksling) =

$$966731 \text{ mm}^3 \cdot 0,0000079 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3} = \underline{7,637 \text{ kg}}$$

Vekt av bil minus aksling:

$$1410 \text{ kg} - 7,637 \text{ kg} = \underline{1402,363 \text{ kg}}$$

Vekt av bil plus ny aksling:

$$\text{AL 6061-T6} : (1402,363 + 2,610) \text{ kg} = 1404,973 \text{ kg}$$

$$335 : (1402,363 + 7,637) \text{ kg} = 1410 \text{ kg}$$

$$316 : (1402,363 + 7,374) \text{ kg} = 1409,737 \text{ kg}$$

$$\text{Karbon/epdug} : (1402,363 + 1,382) \text{ kg} = 1403,745 \text{ kg}$$

BØYESPENNING

$$\left[\sigma_b (\text{massiv aksling}) = \frac{32 M_b}{\pi d^3} \right]$$

$$= \frac{32 \cdot 475475 \text{ Nm}}{\pi \cdot (28 \text{ mm})^3} = \underline{220,62 \text{ N/mm}^2}$$

(opprikket aksling)

$$M_b(T6) = 3345,7 \text{ N} \cdot 0,1375 \text{ m} = 460,034 \text{ Nm}$$

$$M_b(335) = 3458 \text{ N} \cdot 0,1375 \text{ m} = 475,475 \text{ Nm}$$

$$M_b(316) = 3457,4 \cdot 0,1375 \text{ m} = 475,393 \text{ Nm}$$

$$M_b(\text{Karbon/epoksi}) = 3442,7 \cdot 0,1375 \text{ m} = 473,371 \text{ Nm}$$

$$\sigma_b(T6) = \frac{32(460034 \text{ Nm})}{\pi(28 \text{ mm})^3} = 213,46 \text{ MPa}$$

$$\sigma_b(335) = \frac{32(475475 \text{ Nm})}{\pi(28 \text{ mm})^3} = 220,62 \text{ MPa}$$

$$\sigma_b(316) = \frac{32(475393 \text{ Nm})}{\pi(28 \text{ mm})^3} = 220,59 \text{ MPa}$$

$$\sigma_b(\text{Karbon/epoksi}) = \frac{32(473371 \text{ Nm})}{\pi(28 \text{ mm})^3} = 219,65 \text{ MPa}$$

MAKS SKJÆRSPENNING (MASSIV AKSLING)

$$\left[\tau_{\max} = \frac{16}{\pi d^3} \sqrt{M_b^2 + M_v^2} \right]$$

$$\tau_{\max}(\text{T6}) = \frac{16}{\pi (28\text{mm})^3} \sqrt{(460\,034)^2 + (329\,000)^2} = 131,2 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\max}(335) = \frac{16}{\pi (28\text{mm})^3} \sqrt{(475\,475)^2 + (329\,000)^2} = 134,1 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\max}(316) = \frac{16}{\pi (28\text{mm})^3} \sqrt{(475\,393)^2 + (329\,000)^2} = 134,1 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\max}(\text{Carbon/epoxy}) = \frac{16}{\pi (28\text{mm})^3} \sqrt{(473\,371)^2 + (329\,000)^2} = 133,7 \text{ MPa}$$

MAKS BØYESPENNING

$$\left[\sigma_{b\max} = \frac{1}{2} \sigma_b + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_b)^2 + 4\tau^2} \right]$$

$$\sigma_{b\max}(\text{T6}) = \frac{1}{2} (213,46) + \frac{1}{2} \sqrt{(213,46)^2 + 4(76,3)^2} = 238 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{b\max}(335) = \frac{1}{2} (220,62) + \frac{1}{2} \sqrt{(220,62)^2 + 4(76,3)^2} = 244,4$$

$$\sigma_{bmax} (316) = \frac{1}{2} (220,59) + \frac{1}{2} \sqrt{(220,59)^2 + 4(76,3)^2} = 244,4 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{bmax} \left(\begin{array}{l} \text{Karbon} \\ \text{epoxy} \end{array} \right) = \frac{1}{2} (219,65) + \frac{1}{2} \sqrt{(219,65)^2 + 4(76,3)^2} = 243,5 \text{ MPa}$$

OMTRENTLIG BEREGNING AV NY
AKSELDIAMETER TILPASSET NY
MOTOREFFEKT OG MATERIALE.

OMTRENTLIG BEREGNING FOR
MASSIV SYLINDRISK AKSEL UTSATT
FOR DYNAMISK BELASTNING.

- Setter jevn/løpende = tillatt spenning:

$$\sigma_j = \frac{\sqrt{M_b^2 + 0,75 (\alpha_o \cdot M_v)^2}}{\frac{\pi d^3}{32}} = \sigma_{till}$$

$$\Rightarrow d = \sqrt[3]{\frac{32 \sqrt{M_b^2 + 0,75 (\alpha_o \cdot M_v)^2}}{\pi \cdot \sigma_{till}}}$$

α_o = Faktor avhengig av lastforløp

= 0,6 for vekslende bøyning og holende vridning

σ_{till} = Tillatt spenning = $\frac{R_e}{4}$ for dynamisk belastning uten kjeru.

$$\frac{Re_{(\tau 6)}}{4} = \frac{276}{4} = 69 \text{ MPa}$$

$$\frac{Re_{(335)}}{4} = \frac{335}{4} = 83,75 \text{ MPa}$$

$$\frac{Re_{(316)}}{4} = \frac{205}{4} = 51,25 \text{ MPa}$$

$$\frac{Re_{(\text{karbon/epoksy})}}{4} = \frac{985}{4} = 246,25 \text{ MPa}$$

Etter innsetting:

$$d_{(\tau 6)} = \underline{41,69 \text{ mm}} \text{ Velger } \underline{\underline{42 \text{ mm}}}$$

$$d_{(335)} = \underline{39,46 \text{ mm}} \text{ Velger } \underline{\underline{40 \text{ mm}}}$$

$$d_{(316)} = \underline{46,48 \text{ mm}} \text{ Velger } \underline{\underline{47 \text{ mm}}}$$

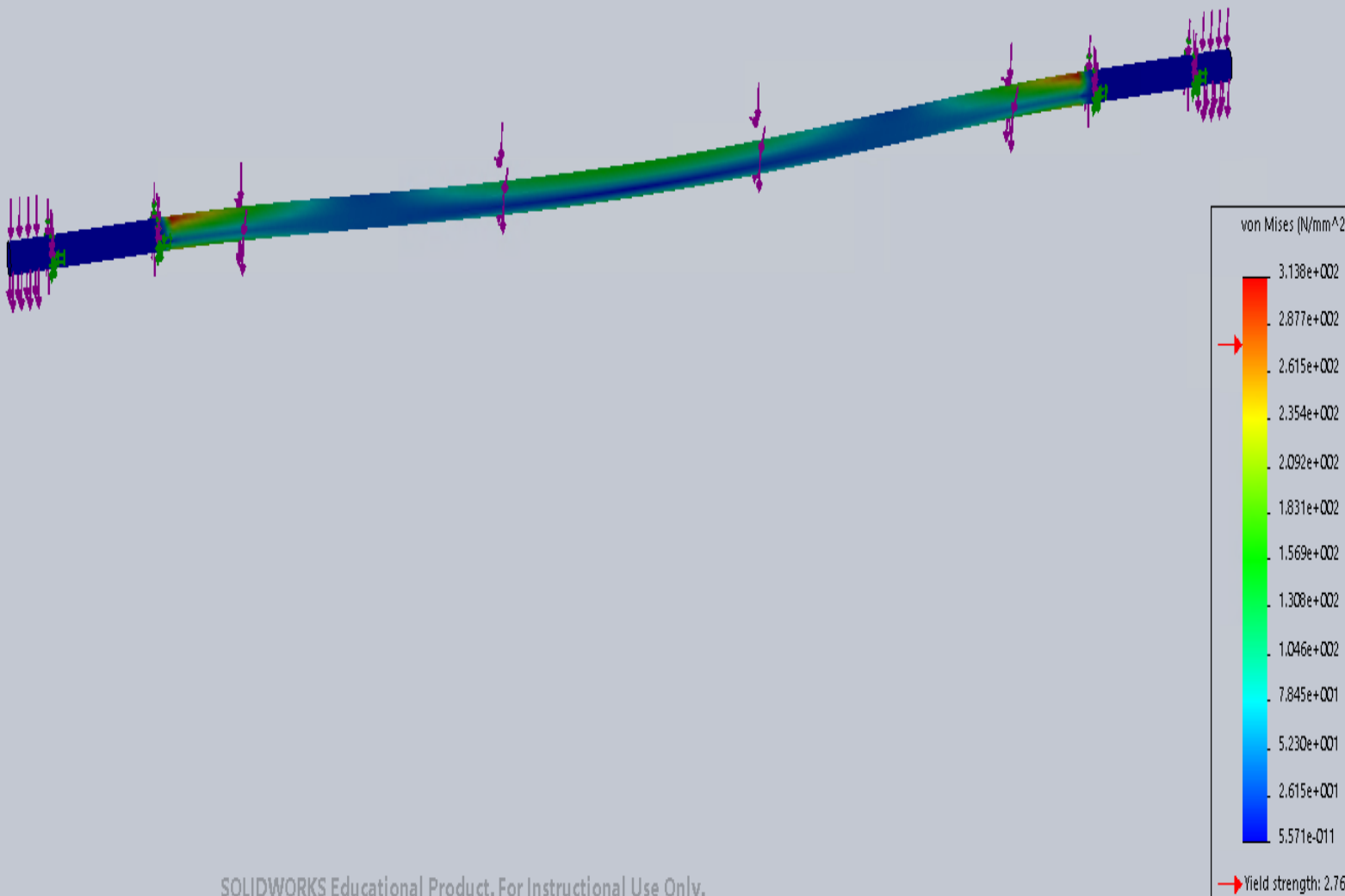
$$d_{(\text{karbon/epoksy})} = \underline{27,51 \text{ mm}} \text{ Velger } \underline{\underline{28 \text{ mm}}}$$

Vedlegg B Resultater fra simulering

1. Spenninger

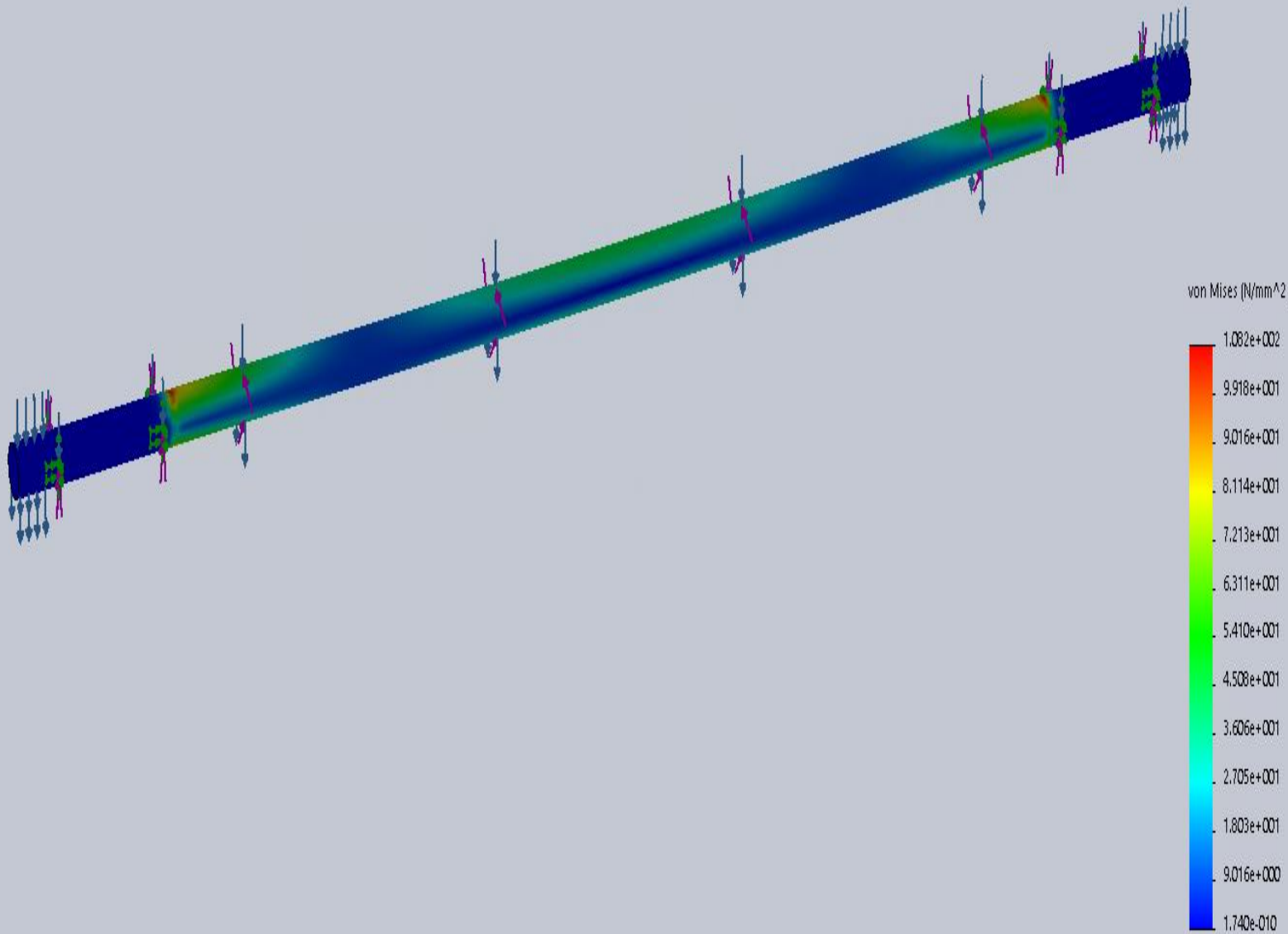
Al 6061-T6 28 mm.

Study name:Dynamic 1				
Units: N/mm ² (MPa)				
Selected reference : N/A				
Node	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	VON (N/mm ² (MPa))
14020	-1.22018	-13.9467	1469.69	3.14E+02
13049	-1.22018	13.9467	1469.69	3.13E+02
9121	-1.22018	13.9467	100.31	3.12E+02
13777	-1.22018	-13.9467	100.31	3.12E+02
13051	3.62347	13.523	1472.29	3.07E+02
14022	3.62347	-13.523	1472.29	3.05E+02
13779	3.62347	-13.523	97.7069	3.00E+02
13042	-4.78828	13.1557	1469.69	2.99E+02



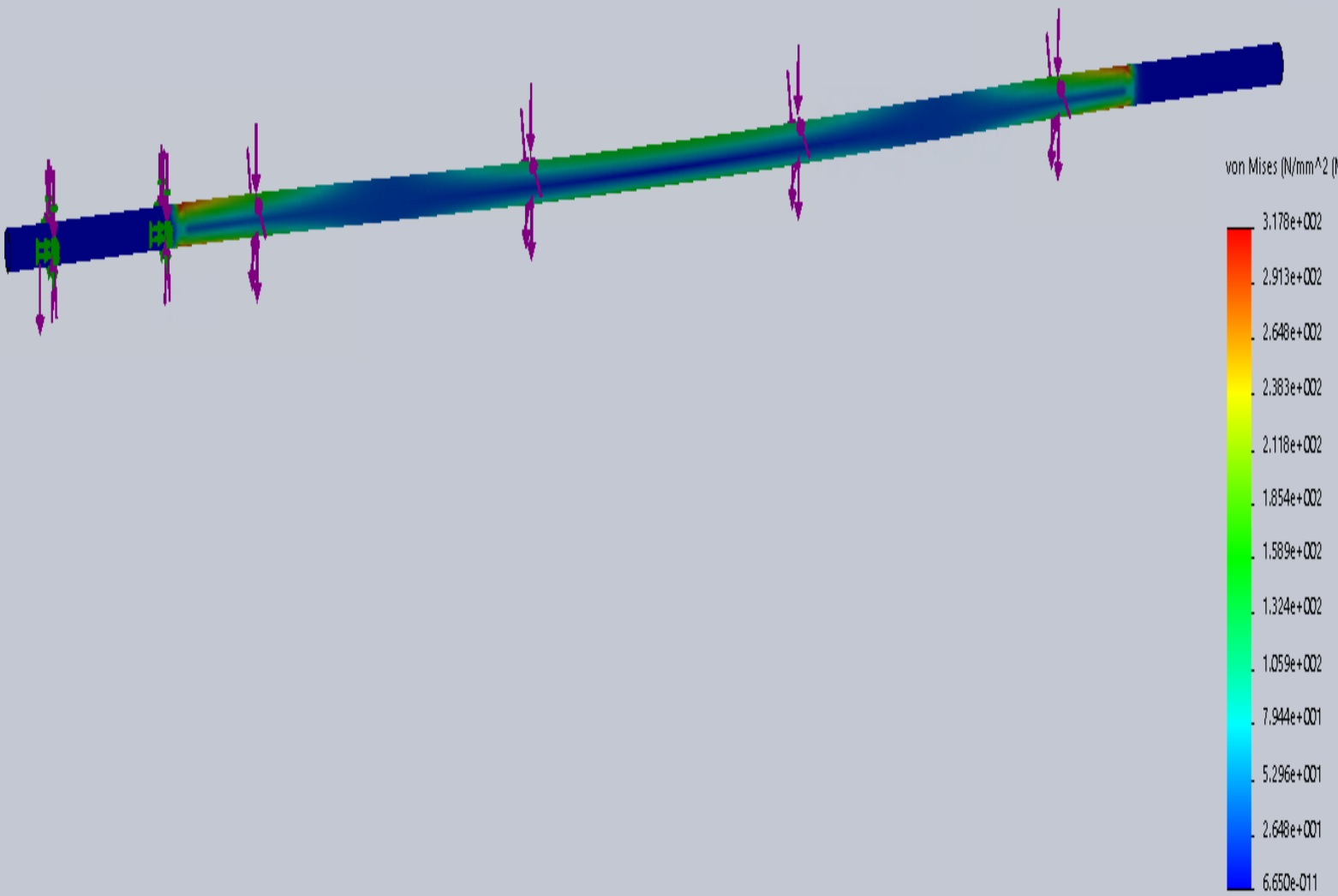
AL 6061-T6 42 mm.

Study name:Dynamic 1						
Units: N/mm ² (MPa)						
Selected reference : N/A						
Node	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	VON (N/mm ² (MPa))		
24244	1.37346	-20.955	1472.28	1.08E+02		
24238	4.0969	-20.5965	1472.28	1.07E+02		
23849	1.37346	-20.955	97.7184	1.07E+02		
22880	1.37347	20.955	1472.28	1.07E+02		
17773	4.0969	20.5965	97.7184	1.06E+02		
17769	1.37347	20.955	97.7184	1.05E+02		
22875	-2.74105	20.8203	1472.28	1.03E+02		



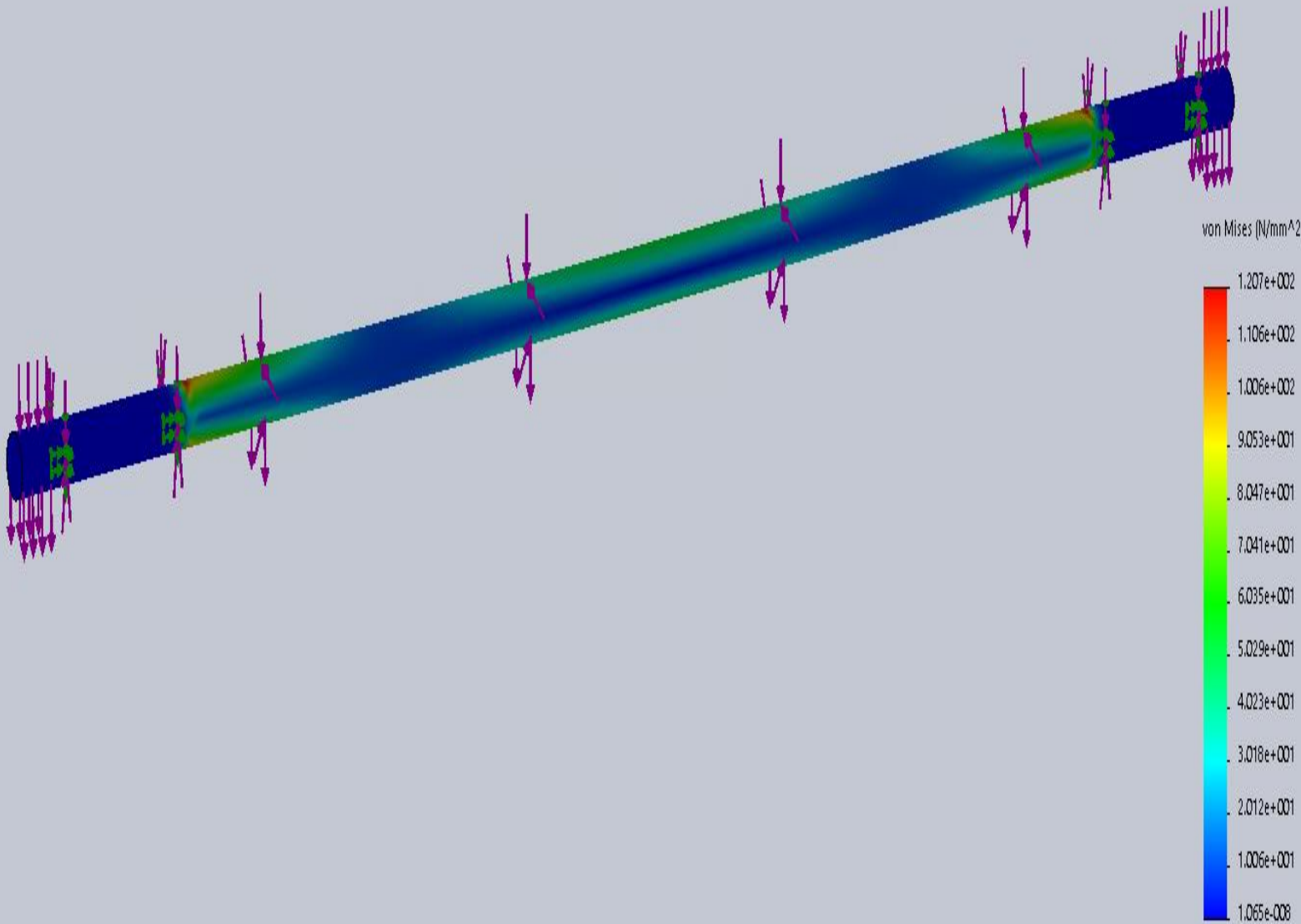
E335 28 mm.

Study name:Dynamic 1						
Units: N/mm ² (MPa)						
Selected reference : N/A						
Node	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	VON (N/mm ² (MPa))		
14020	-1.22018	-13.9467	1469.69	3.18E+02		
9121	-1.22018	13.9467	100.31	3.16E+02		
13777	-1.22018	-13.9467	100.31	3.16E+02		
13049	-1.22018	13.9467	1469.69	3.16E+02		
13051	3.62347	13.523	1472.29	3.12E+02		
14022	3.62347	-13.523	1472.29	3.10E+02		
13779	3.62347	-13.523	97.7069	3.05E+02		
11431	3.62347	13.523	97.7069	3.02E+02		
13042	-4.78828	13.1557	1469.69	3.02E+02		



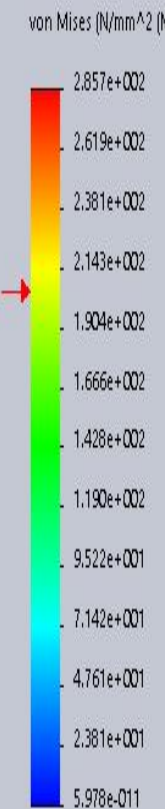
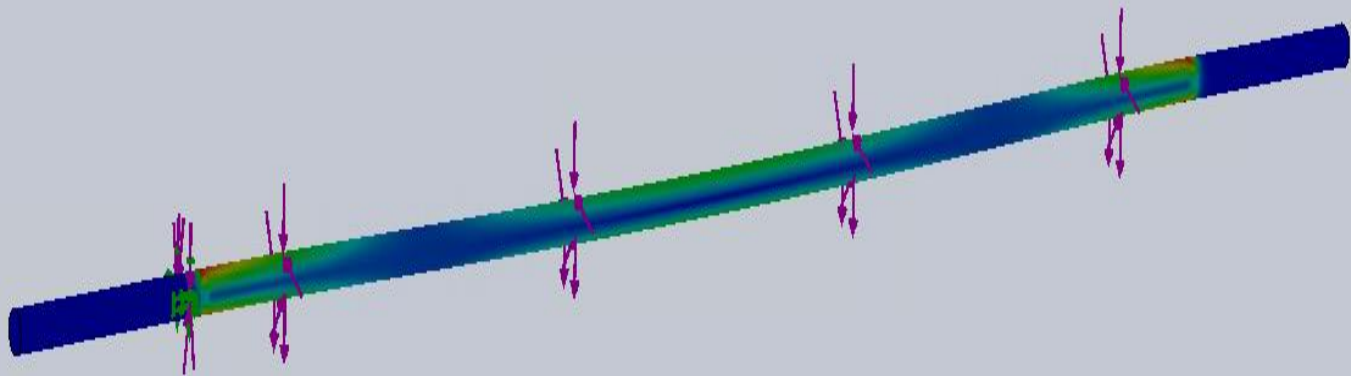
E335 40 mm.

Study name:Dynamic 1						
Units: N/mm ² (MPa)						
Selected reference : N/A						
Node	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	VON (N/mm ² (MPa))		
21759	5.17638	-19.3185	1472.29	1.21E+02		
21390	5.17638	-19.3185	97.7069	1.20E+02		
20416	5.17638	19.3185	1472.29	1.19E+02		
18658	5.17638	19.3185	97.7069	1.18E+02		
21388	-2.38E-07	-20	100.31	1.16E+02		
21757	-2.38E-07	-20	1469.69	1.16E+02		
20414	-1.51E-06	20	1469.69	1.15E+02		



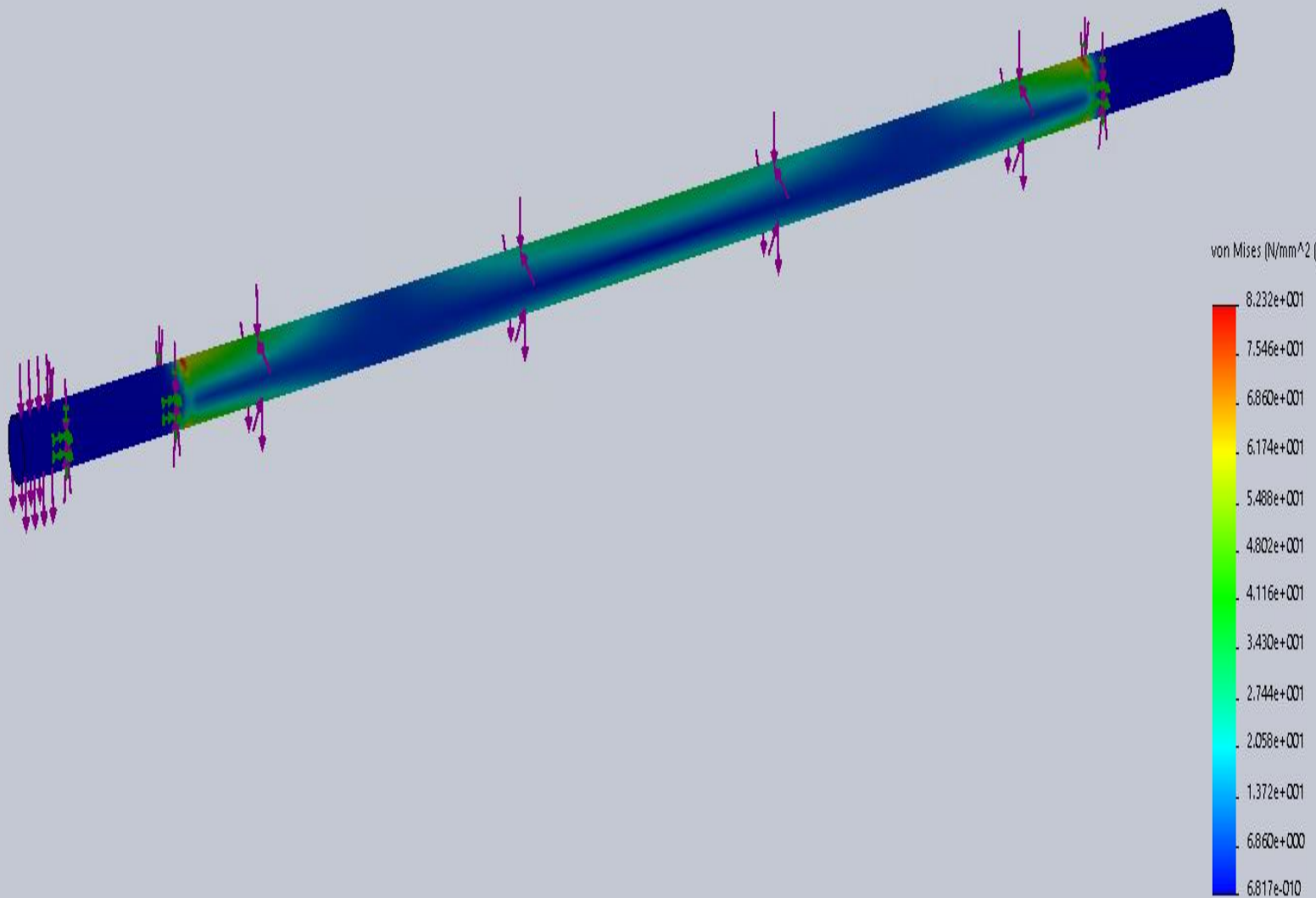
SS 316, 28 mm:

Study name:Dynamic 1								
Units: N/mm ² (MPa)								
Selected reference : N/A								
Node	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	VON (N/mm ² (MPa))				
14020	-1.22018	-13.9467	1469.69	2.86E+02				
9121	-1.22018	13.9467	100.31	2.85E+02				
13777	-1.22018	-13.9467	100.31	2.84E+02				
13049	-1.22018	13.9467	1469.69	2.84E+02				
13051	3.62347	13.523	1472.29	2.81E+02				
14022	3.62347	-13.523	1472.29	2.78E+02				
13779	3.62347	-13.523	97.7069	2.74E+02				
11431	3.62347	13.523	97.7069	2.72E+02				
13042	-4.78828	13.1557	1469.69	2.72E+02				



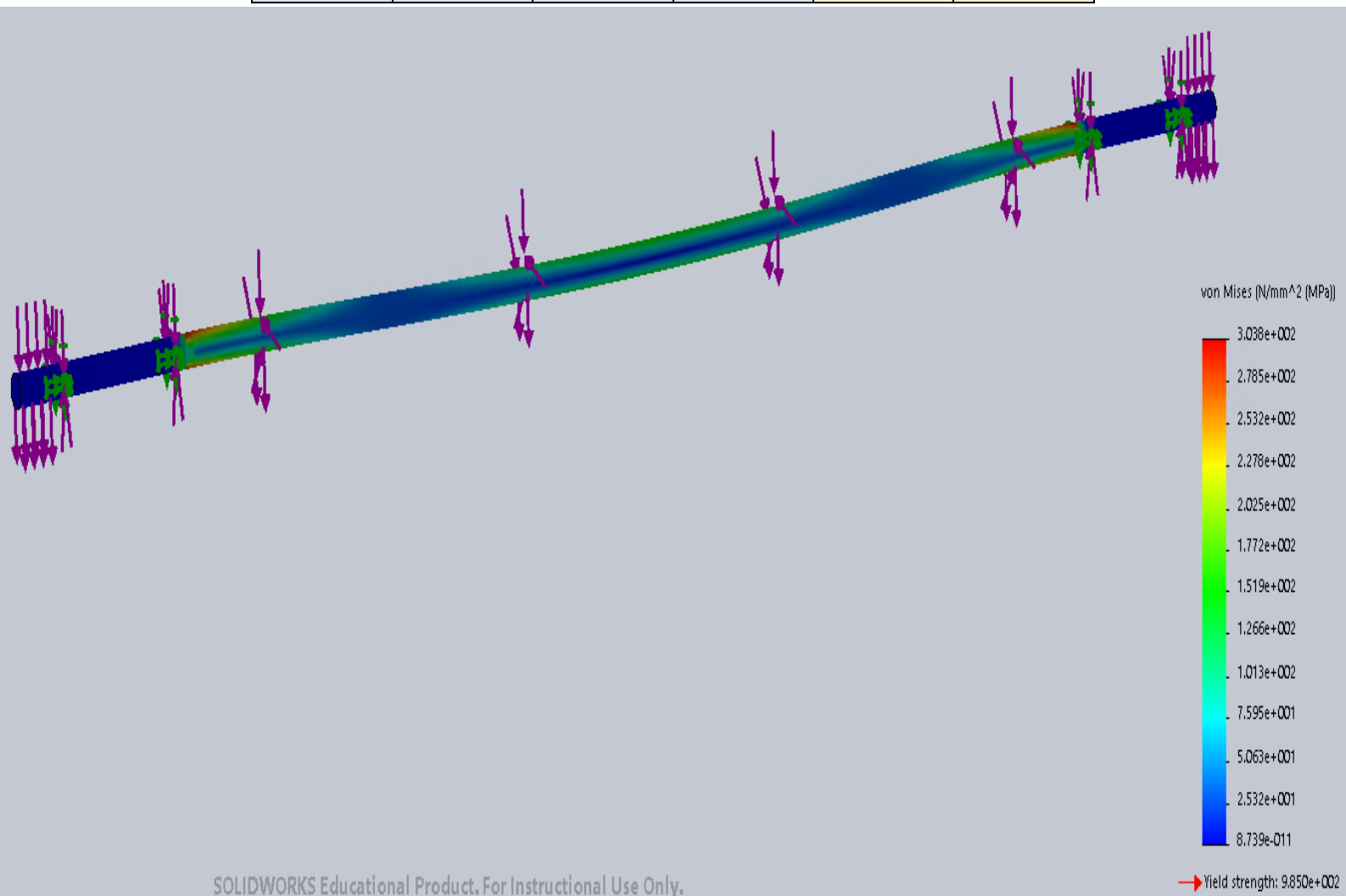
SS316, 47 mm.

Study name:Dynamic 1						
Units: N/mm ² (MPa)						
Selected reference : N/A						
Node	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	VON (N/mm ² (MPa))		
33637	4.58462	-23.0485	97.7184	8.23E+01		
34132	1.53697	-23.4497	1472.28	8.19E+01		
26202	4.58462	23.0485	97.7184	8.14E+01		
32451	1.53697	23.4497	1472.28	8.12E+01		
34126	4.58462	-23.0485	1472.28	8.00E+01		
20966	-3.06736	-23.299	97.7184	7.91E+01		
33631	1.53697	-23.4497	97.7184	7.88E+01		
26196	1.53697	23.4497	97.7184	7.88E+01		



Karbon/epoksy kompositt, 28 mm.

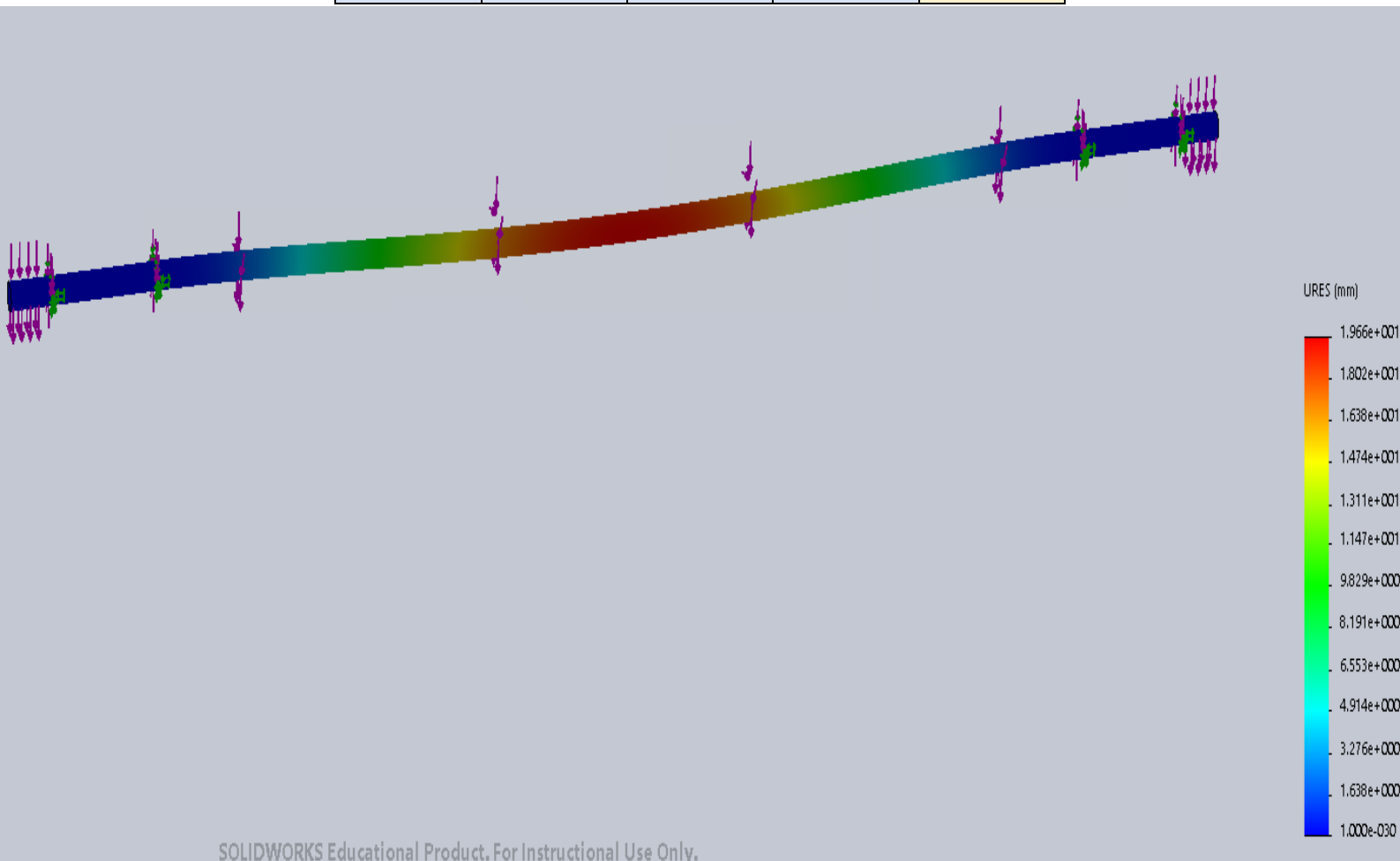
Study name:Dynamic 1						
Units: N/mm ² (MPa)						
Selected reference : N/A						
Node	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	VON (N/mm ² (MPa))		
14020	-1.22018	-13.9467	1469.69	3.04E+02		
13049	-1.22018	13.9467	1469.69	3.03E+02		
9121	-1.22018	13.9467	100.31	3.00E+02		
13777	-1.22018	-13.9467	100.31	2.99E+02		
1508	-2.43107	-13.7873	1461.88	2.98E+02		
1175	-2.43107	13.7873	1461.88	2.98E+02		
1378	-2.43107	-13.7873	108.12	2.97E+02		
1045	-2.43107	13.7873	108.12	2.97E+02		
14022	3.62347	-13.523	1472.29	2.93E+02		
13051	3.62347	13.523	1472.29	2.92E+02		
13042	-4.78828	13.1557	1469.69	2.90E+02		
10452	2.43108	13.7873	1464.48	2.90E+02		
11439	7	12.1244	97.7067	2.89E+02		



2. Forskyvninger

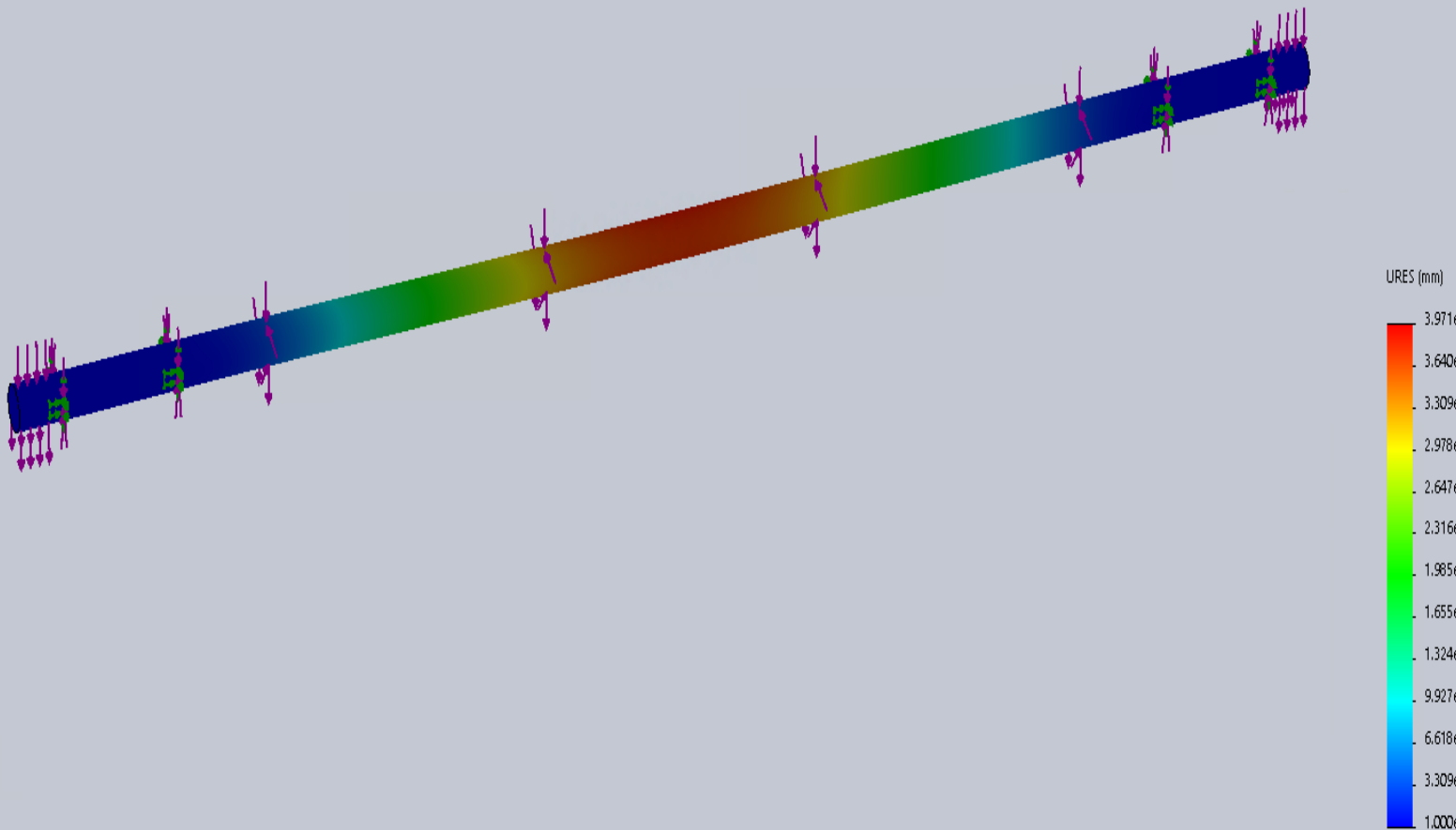
AL 6061-T6, 28 mm.

Study name:Dynamic 1				
Units: mm				
Selected reference : N/A				
Node	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	URES (mm)
8615	-14	0	785	1.97E+01
848	-14	0	790.207	1.97E+01
847	-14	0	779.793	1.97E+01
8606	-14	0	795.414	1.96E+01
8624	-14	0	774.586	1.96E+01
849	-14	0	800.62	1.96E+01
846	-14	0	769.38	1.96E+01
8603	-13.1557	-4.78828	787.603	1.96E+01
8605	-13.1557	4.78828	787.603	1.96E+01
8612	-13.1557	-4.78828	782.397	1.96E+01
8614	-13.1557	4.78828	782.397	1.96E+01
8604	-13.1557	4.78828	792.81	1.96E+01
8602	-13.1557	-4.78828	792.81	1.96E+01



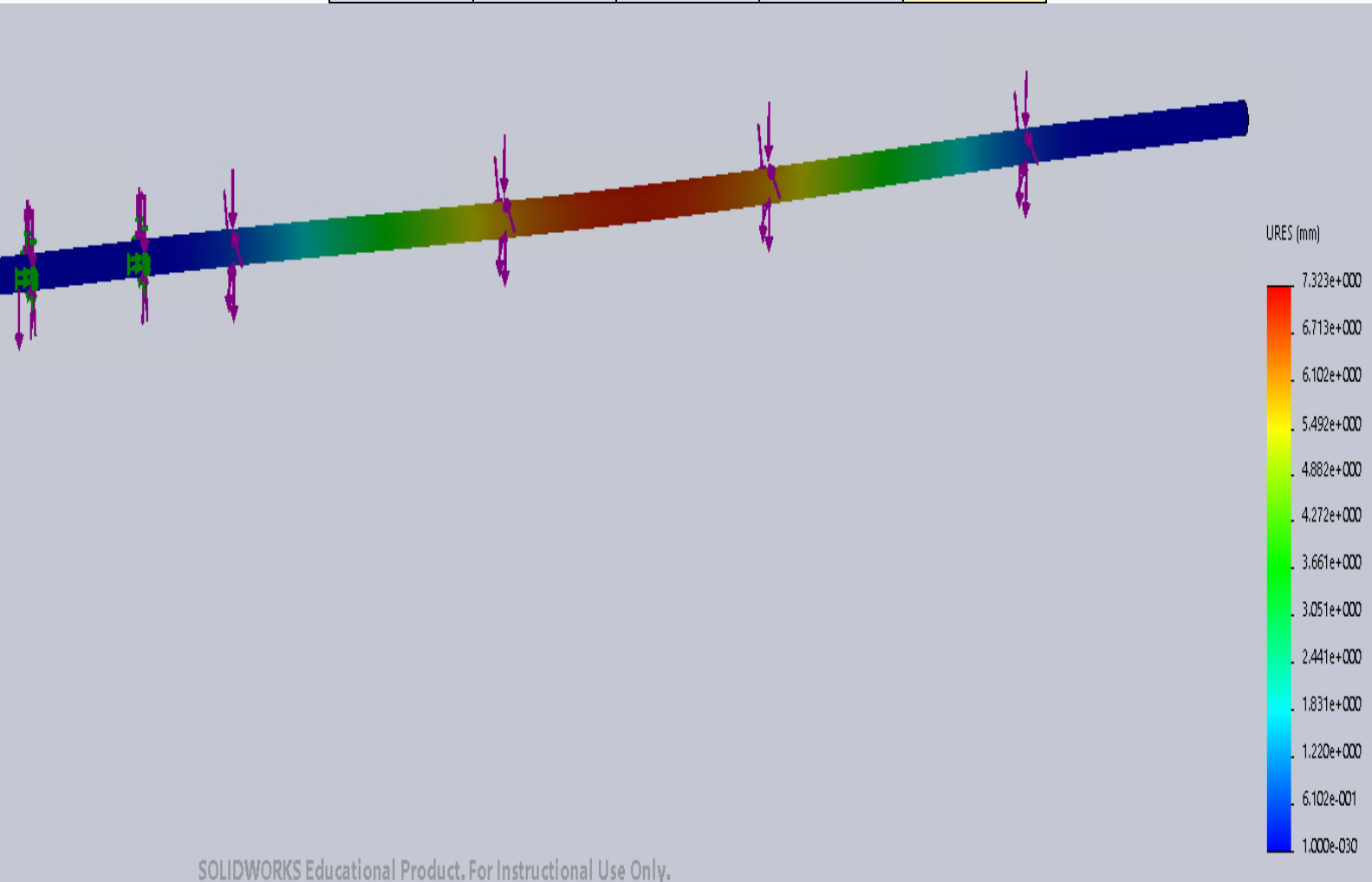
AL 6061-T6, 42 mm.

Study name:Dynamic 1				
Units: mm				
Selected reference : N/A				
Node	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	URES (mm)
17159	-21	0	785	3.97E+00
1074	-21	0	790.207	3.97E+00
1073	-21	0	779.793	3.97E+00
17150	-21	0	795.414	3.97E+00
17167	-21	0	774.586	3.97E+00
1075	-21	0	800.62	3.97E+00
1072	-21	0	769.38	3.97E+00
17149	-20.2844	5.4352	787.603	3.97E+00
17147	-20.2844	-5.4352	787.603	3.97E+00
17158	-20.2844	5.4352	782.397	3.97E+00
17156	-20.2844	-5.4352	782.397	3.97E+00
17148	-20.2844	5.4352	792.81	3.97E+00
17146	-20.2844	-5.4352	792.81	3.97E+00



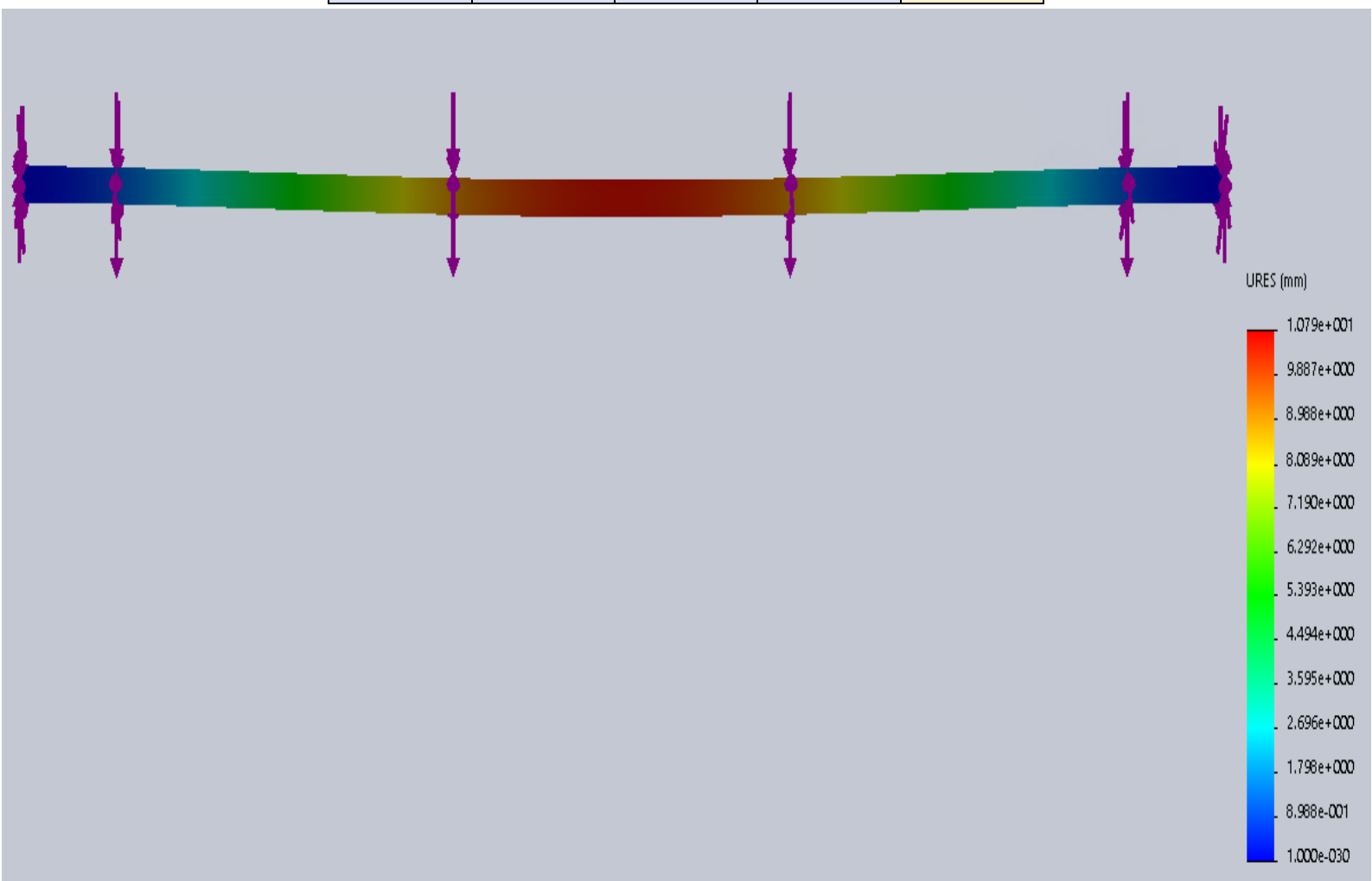
E335, 28 mm.

Study name:Dynamic 1				
Units: mm				
Selected reference : N/A				
Node	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	URES (mm)
8615	-14	0	785	7.32E+00
848	-14	0	790.207	7.32E+00
847	-14	0	779.793	7.32E+00
8606	-14	0	795.414	7.32E+00
8624	-14	0	774.586	7.32E+00
849	-14	0	800.62	7.32E+00
846	-14	0	769.38	7.32E+00
8603	-13.1557	-4.78828	787.603	7.31E+00
8605	-13.1557	4.78828	787.603	7.31E+00
8612	-13.1557	-4.78828	782.397	7.31E+00
8614	-13.1557	4.78828	782.397	7.31E+00
8604	-13.1557	4.78828	792.81	7.31E+00
8602	-13.1557	-4.78828	792.81	7.31E+00



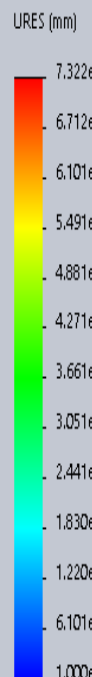
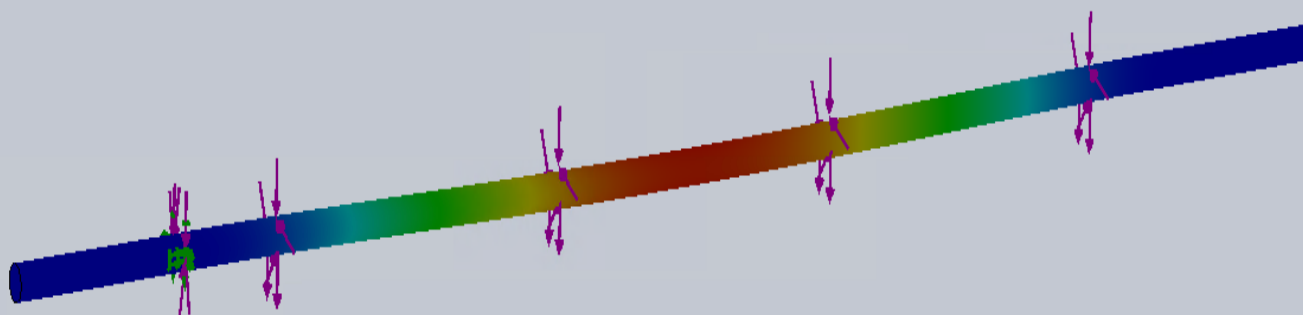
E335, 40 mm.

Study name:Dynamic 1				
Units: mm				
Selected reference : N/A				
Node	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	URES (mm)
14761	-20	0	785	1.80E+00
1046	-20	0	790.207	1.80E+00
1045	-20	0	779.793	1.80E+00
14754	-20	0	795.414	1.80E+00
14770	-20	0	774.586	1.80E+00
1047	-20	0	800.62	1.80E+00
1044	-20	0	769.38	1.80E+00
14753	-19.3185	5.17638	787.603	1.80E+00
14760	-19.3185	5.17638	782.397	1.80E+00
14751	-19.3185	-5.17638	787.603	1.80E+00
14758	-19.3185	-5.17638	782.397	1.80E+00
14752	-19.3185	5.17638	792.81	1.80E+00
14750	-19.3185	-5.17638	792.81	1.80E+00



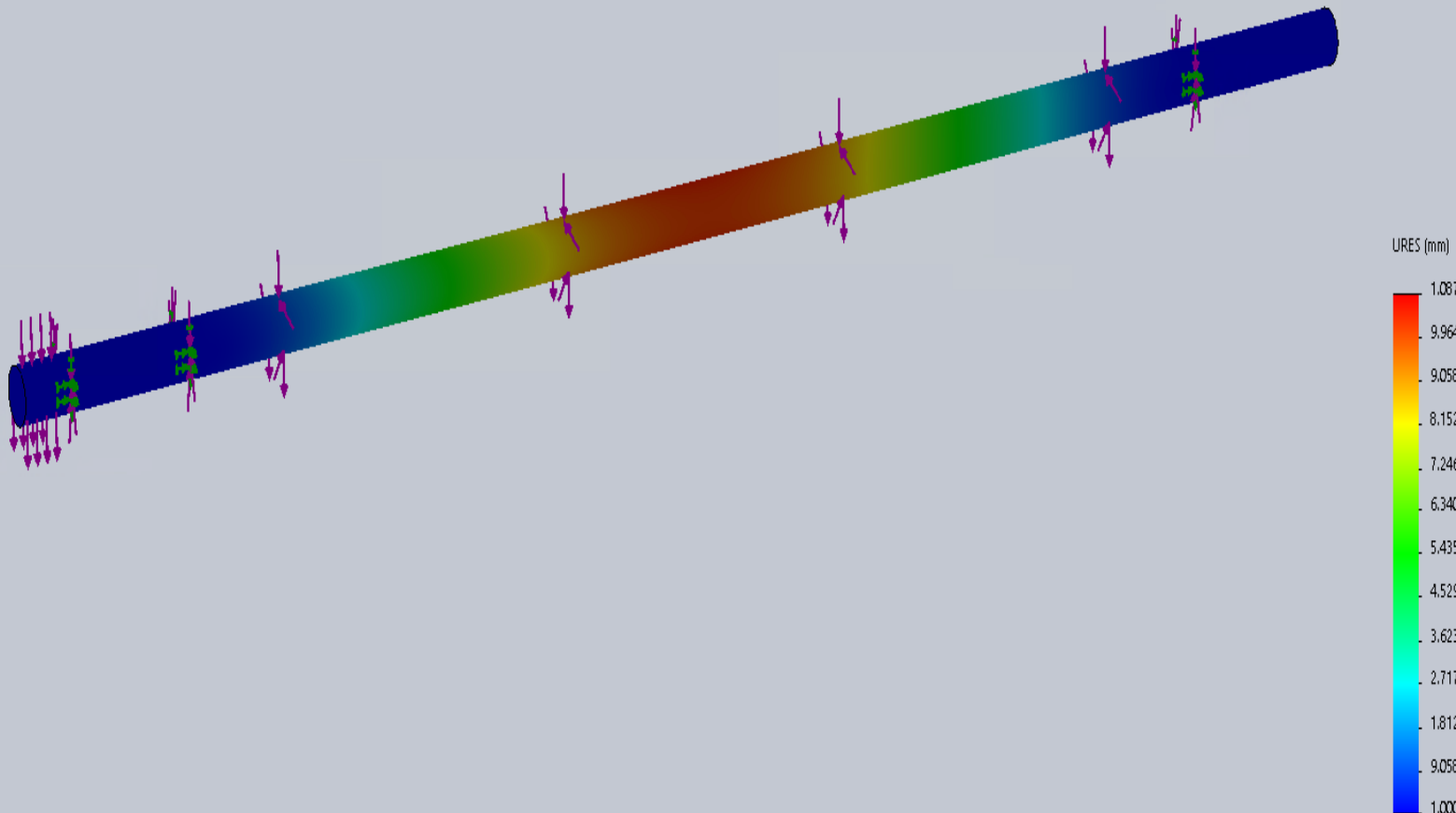
SS316, 28 mm.

Study name:Dynamic 1				
Units: mm				
Selected reference : N/A				
Node	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	URES (mm)
8615	-14	0	785	7.32E+00
848	-14	0	790.207	7.32E+00
847	-14	0	779.793	7.32E+00
8606	-14	0	795.414	7.32E+00
8624	-14	0	774.586	7.32E+00
849	-14	0	800.62	7.31E+00
846	-14	0	769.38	7.31E+00
8603	-13.1557	-4.78828	787.603	7.31E+00
8605	-13.1557	4.78828	787.603	7.31E+00
8614	-13.1557	4.78828	782.397	7.31E+00
8612	-13.1557	-4.78828	782.397	7.31E+00
8604	-13.1557	4.78828	792.81	7.31E+00
8602	-13.1557	-4.78828	792.81	7.31E+00



SS316, 47 mm.

Study name:Dynamic 1				
Units: mm				
Selected reference : N/A				
Node	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	URES (mm)
25569	-23.5	0	785	1.09E+00
1263	-23.5	0	779.793	1.09E+00
1264	-23.5	0	790.207	1.09E+00
25577	-23.5	0	774.586	1.09E+00
25560	-23.5	0	795.414	1.09E+00
25568	-22.9865	4.88592	782.397	1.09E+00
25566	-22.9865	-4.88593	782.397	1.09E+00
25559	-22.9865	4.88592	787.603	1.09E+00
25557	-22.9865	-4.88593	787.603	1.09E+00
25567	-22.9865	4.88592	777.19	1.09E+00
25565	-22.9865	-4.88593	777.19	1.09E+00
25558	-22.9865	4.88592	792.81	1.09E+00
25556	-22.9865	-4.88593	792.81	1.09E+00



Karbon/epoksy, 28 mm.

Study name:Dynamic 1				
Units: mm				
Selected reference : N/A				
Node	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	URES (mm)
8615	-14	0	785	1.32E+01
848	-14	0	790.207	1.32E+01
847	-14	0	779.793	1.32E+01
8606	-14	0	795.414	1.32E+01
8624	-14	0	774.586	1.32E+01
849	-14	0	800.62	1.32E+01
846	-14	0	769.38	1.32E+01
8603	-13.1557	-4.78828	787.603	1.32E+01
8605	-13.1557	4.78828	787.603	1.32E+01
8614	-13.1557	4.78828	782.397	1.32E+01
8612	-13.1557	-4.78828	782.397	1.32E+01
8604	-13.1557	4.78828	792.81	1.32E+01
8602	-13.1557	-4.78828	792.81	1.32E+01

