



Frønesbrua

Erfaringsrapport fra automatisert produksjon for bygging av stålbruer basert på lasersveis



Forord

Denne rapporten er utarbeidet i forbindelse med et FoU-arbeid for å utvikle en automatisert produksjonsprosess for bygging av stålbruer basert på laser- og laser-hybridsveising. Målet med dette arbeidet er å vise at automatisert produksjon med bruk av lasersveis kan gi gevinster både med tanke på kvalitet, økonomi og miljø. Arbeidet har bestått i bygging av en brukasse i stål til Frønes gang- og sykkelbru i Åfjord kommune, og har vært gjennomført som et samarbeid mellom Statens vegvesen Divisjon Utbygging og Prodtex. DNV har bidratt som rådgiver på områder som kvalifisering, kvalitetskontroll og kvalitetssikring av laser- og laser-hybrid sveis.

Erfaringsrapporten fra byggingen av brukasse til Frønes gang- og sykkelbru er skrevet av Jostein Myklebust, Prodtex. Det er også gitt et vedlegg til rapporten, skrevet av DNV, ved Stian Gurrik og Tone Hasle.

INNHOOLD

1	SAMMENDRAG	4
2	INNLEDNING	7
2.1	REFERANSE-DOKUMENT	8
3	BESKRIVELSE AV KONSTRUKSJON	9
3.1	BRUKASSE FOR AUTOMATISERT PRODUKSJON	10
3.2	ENDETVERRBÆRERE	11
3.3	SAMMENSTILLING NÆRT BRU-STED	11
3.3.1	<i>Korrosjonsbeskyttelse av boltet forbindelse</i>	12
4	KVALIFISERING AV SVEIS	14
4.1	RENSING AV SVEISESONER.....	14
4.2	SVEISEPARAMETERE.....	14
4.2.1	<i>Sveisegass</i>	15
4.3	SVEISEFEIL	15
4.3.1	<i>Bindefeil</i>	15
4.3.2	<i>Porer</i>	15
4.3.3	<i>Undercut</i>	15
5	PRODUKSJON	16
5.1.1	<i>Prefabrikasjon av plater</i>	16
5.2	SOFTWARE.....	17
5.3	PRODUKSJONSUTSTYR (HARDWARE).....	18
5.3.1	<i>Sveisegantry</i>	19
5.3.2	<i>Laserkilde</i>	19
5.3.3	<i>Fronius laserhybrid sveiseutstyr</i>	20
5.3.4	<i>Lasertracker fra Servorobot</i>	21
5.4	LAGER OG LOGISTIKK	22
5.5	PREFABRIKASJON AV KASSETTER	23
5.6	PREFABRIKASJON AV SIDEKANTER	25
5.7	PRODUKSJON OG SAMMENSVEISING AV BRUKASSE.....	25
5.8	UTFORDRINGER I PRODUKSJON.....	27
6	HELSE, MILJØ OG SIKKERHET (HMS)	28
6.1	MONTERING MED ROBOT	28
6.2	SVEISING MED LASER.....	28
6.3	ARBEIDSMILJØ.....	28
7	ØKONOMI	29
8	KVALITET	30
8.1	SERTIFISERING.....	30
8.2	ENGINEERING	30
8.3	MATERIALE	30
8.4	SKJÆRING / FUGING	30
8.5	SVEISING	30
8.5.1	<i>Destruktiv testing - Makroslip</i>	31
8.5.2	<i>NDT</i>	31
8.5.2.1	<i>Visuell kontroll</i>	31
8.5.2.2	<i>Ultralyd</i>	32
8.5.2.3	<i>Phased Array (PA)</i>	32
8.5.2.4	<i>Sveiseovervåking fra Plasmø</i>	32
9	FREMDRIFT	34
10	MILJØ	35

10.1	SAMMENDRAG OG OPPSUMMERING.....	36
10.2	MODERNE TEKNOLOGI SOM FORBRUKER MINDRE ENERGI.....	40
10.3	BRUK AV REN, FORNYBAR ENERGI.	42
10.4	VALG AV MILJØVENNLIGE INNSATSMATERIALER.....	43
10.5	KORT AVSTAND TIL MARKEDET	43
11	TRANSPORT OG MONTERING.....	44
12	VEDLEGG	45

1 SAMMENDRAG

Frønesbrua er et utviklingsprosjekt som skal vise at automatisert produksjon med lasersveis kan gi både kvalitetsmessig, økonomiske og miljømessige gevinster på produksjon av store stålkonstruksjoner til norske flytebruer og hengebruer. Arbeidet har vært et samarbeid mellom Prodtex, Statens vegvesen ved E39 bru over Bjørnafjorden og Det Norske Veritas. Videre er det en rekke utstysrleverandører til fabrikken til Prodtex på Fiskå.

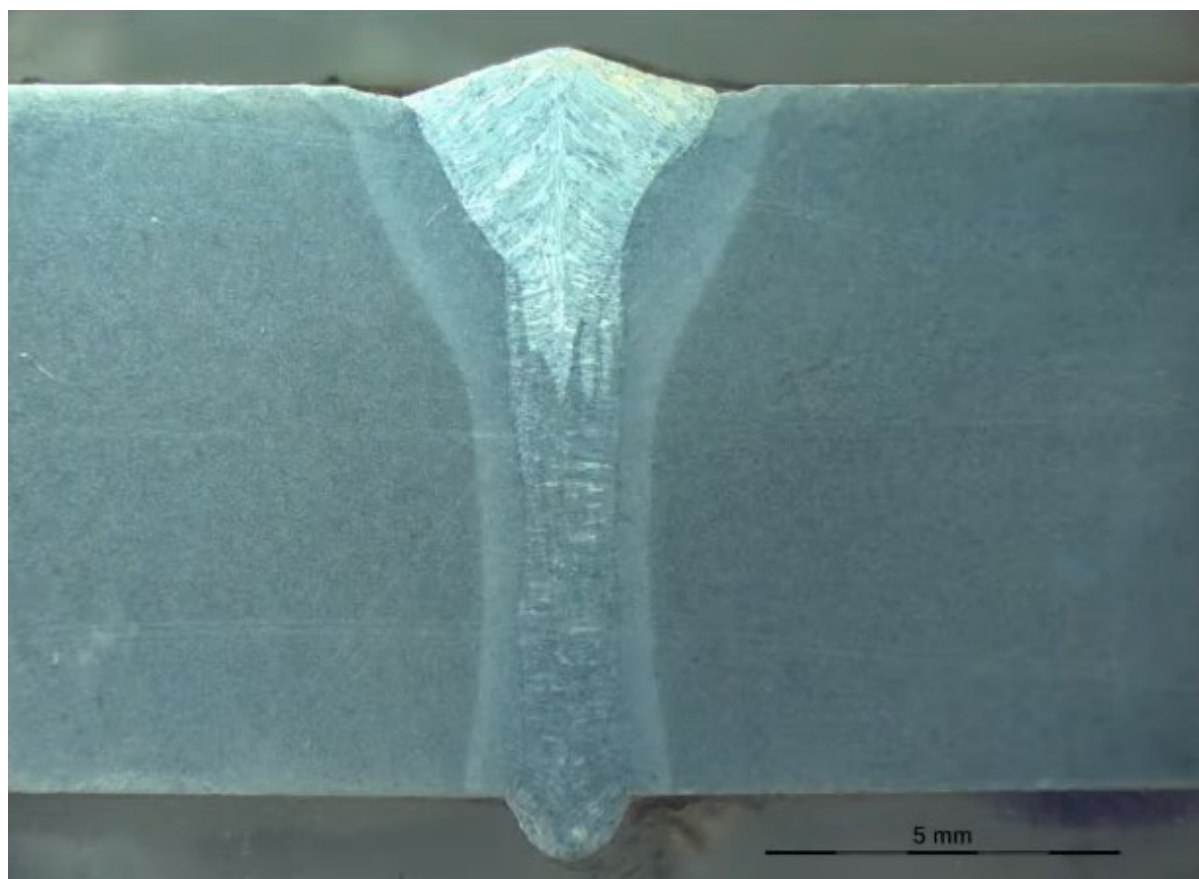
Det har blitt jobbet med å ta i bruk sveising med laser og laserhybrid innen flere industrier, blant annet vindmølletårn og tyngre verktøymaskiner. Så langt vi vet er det ikke blitt brukt til denne type konstruksjoner tidligere.

De største fordelene med lasersveis sammenlignet med tradisjonell MIG/MAG sveis er:

- Mindre varmetilførsel og mindre deformasjoner
- Mye raskere sveising
- Kan sveise både butt og T-forbindelse fra en side med full gjennombrenning

Det er tre sveiseforbindelser som har hatt kvalifiseringsfokus til Frønesbrua:

- Buttsveis 8 mm plate
- Buttsveis 10 mm plate
- T-forbindelse 8 mm plate

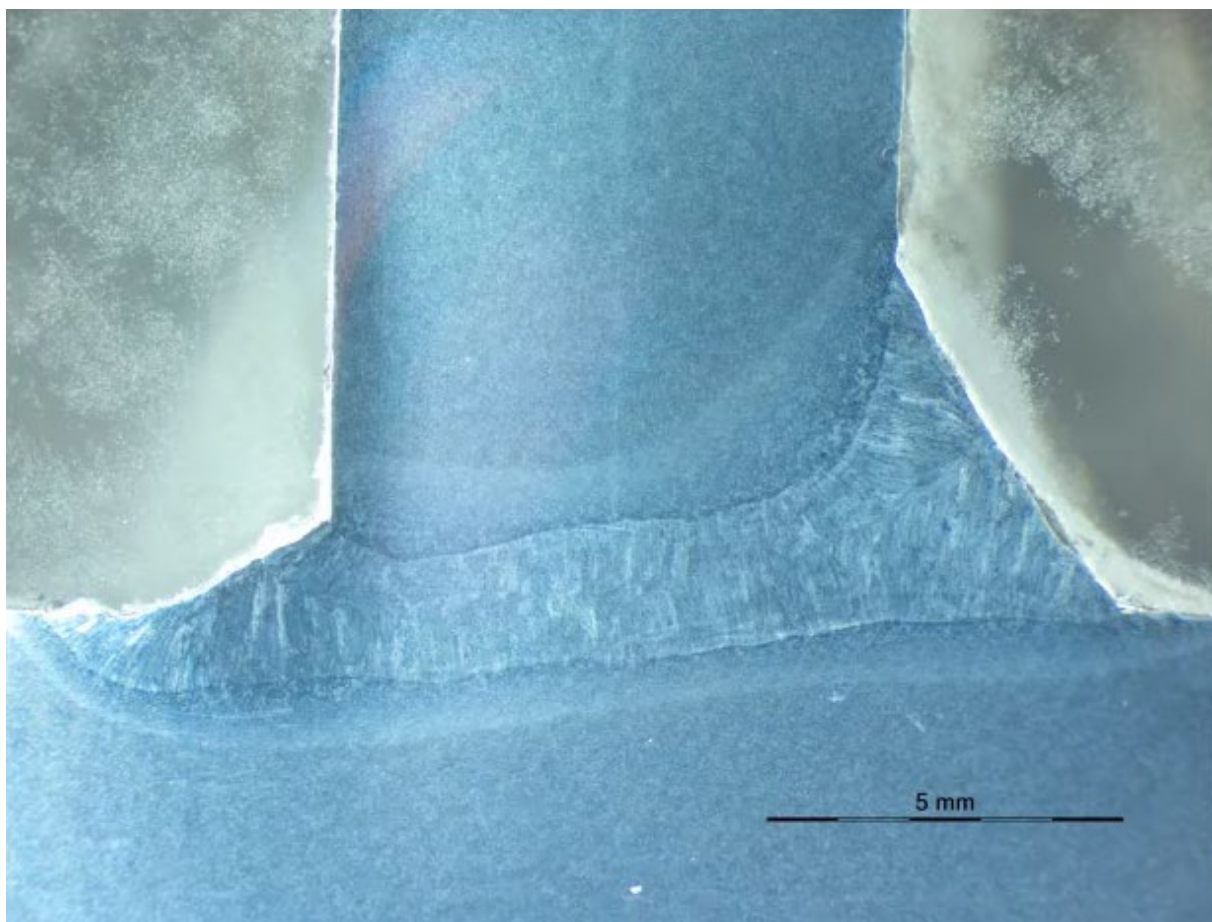


Figur 1 Laserhybrid buttsveis

Vi ser at det i vårt FoU-arbeid er potensiale til å laser-sveise de aller vanligste forbindelsene våre 4-8 ganger hurtigere enn robotisert MIG sveis.

Beregninger på miljø viser at det er store reduksjoner i energibruk og CO₂ utslipp ved en lokal fabrikasjon med moderne produksjonsmetoder. Når det etter hvert tilbys fossilfrie stål på markedet, vil produksjon og transport være dominerende på utslipp.

Det er utfordrende å finne gode sveiseparameter siden det må gjøres bøyepøver for å oppdage feil og verifisere sveisekvalitet. Mange av sveisene har hatt en *flaw* på cap-siden etter bøyning som er utenfor akseptkriteriet.



Figur 2 Laser Hybrid T-forbindelse fra en side

T-Forbindelse 8 mm har hatt utfordringer med små porer og bindefeil på cap-siden som følge av vinkel på laserhodet. Det er også små antydninger til undercut.

I prosjektet er det vist at helautomatisert produksjon i prefabcelle fungerer utmerket. Produksjon av kassetter ble etter hvert så stabil og godt fungerende at det kjørte i perioder uten bemanning. Det ble også utført retting av kassetter med laserlys ute av fokus som en del av prosessen.

Sammenstillingen av brukasse foregikk semi-automatisk. Det viste seg at sveisedeformasjoner ble så store at en del kassetter måtte jekkes på plass. Ferdig sveist brukasse hadde likevel en meget jevn overflate både på underside og overside. Dette viser at lasersveis gir vesentlig mindre sveisedeformasjoner enn tradisjonell MIG sveis.

Det har vært en del utfordringer med å få stabil sveiseprosess. Hovedårsaker er:

- Problemer med lasertracker
- Unøyaktighet på skjærte plater
- Sveisedeforonasjoner

Siden dette er et forskingsprosjekt og for å få et bedre bilde av sveisekvalitet ble det brukt bedre utstyr enn krav i regelverk til sveisekontroll, dette har gitt større mengde sveisefeil enn det som ville blitt oppdaget med tradisjonell NDT.

På grunn av en del utfordringer med fabrikasjon har ikke dette blitt en referanse for kostnads-effektiv produksjon, men det viser tydelig at med rett design og automatisert fabrikasjon vil det være potensiale for vesentlige besparelser med norsk automatisert produksjon.

Programvare for modellering, programmering og styring av robot, samt utstyr som er brukt i produksjon (f.eks. type robot, sveiseutstyr og annet) er detaljert beskrevet med typenummer i kapittel 5. Referanse til utstyret er slik at oppsettet kan tas i bruk av andre i bransjen og at prinsippet med deling av informasjon gjennom FoU-arbeid blir realisert.

Det er referert til sveiseparametere og justering/vurdering av disse i utviklingsarbeidet. En tabell er vist i vedlegg der sveiseparametere for de ulike sveisene er definert samt hvilke innstillinger/forutsetninger som er brukt. Dette er et omfattende arbeid med mange parametere. Hvert verksted som tar i bruk teknologien, må finne sin vei til god kvalitet. Det vi presenterer her er våre erfaringer så langt.

Det er gjort et omfattende kvalitetssikringsarbeid gjennom både destruktiv testing (DT) og ikke-destruktiv testing (NDT). Det viser seg at det oppstår sveisefeil på nye steder og på andre måter enn ved MIG-sveising. En må derfor være oppmerksom på at tradisjonelle NDT-testmetoder kan måtte justeres for å fange opp sveisefeil. I vedlegg er det tatt med rapporter fra NDT som vi anser som viktig å dele i dette FoU-arbeidet.

Film om FoU-arbeidet:

[Statens vegvesen - E39 Stord-Os - Automatisert lasersveising i bygging av fremtidens bruer - YouTube](#)

2 INNLEDNING

Denne rapporten beskriver prosessen med utvikling og produksjon av Frønesbrua. Dette er en gangbru som skal leveres til Åfjord kommune som et utviklingsprosjekt for å teste automatisert stålbygging og lasersveis.

Prodtex gjorde en avtale med Statens Vegvesen om å levere brukasse i stål med endetverrbærere og kempere. Dette ble designet til å passe sammen med landkar, limtretrager og strekkstag fra andre leverandører. Prodtex leverte brukasse ferdig sammensatt i Åfjord.

Prosjektet er finansiert av ferjefri E39, der målet er å verifisere at en automatisert produksjon i Norge kan være konkurransedyktig med stål levert fra verft i Asia eller Europa.



Figur 3 Frønesbrua



Figur 4 Åfjord – 60 km nord for Trondheim

Åfjord er et tettsted på Fosen med ca. 3500 innbyggere og ligger ca. 60 km nord for Trondheim (luftlinje).



Figur 5 Frønesbrua i kart

2.1 Referanse-dokument

10043_Krymp_Rev4_Stagfester og lagerplassering.pdf

22.07.21 - Manual for lasting og sikring.pdf

22.07.21 - Manual for overflatebehandling.pdf

Rapport - Detaljprosjektering av brudekket SVV Rev2.docx

3 BESKRIVELSE AV KONSTRUKSJON

Utgangspunktet for dette prosjektet var å utvikle en stålsandwich-konstruksjon som var tilpasset automatisert produksjon og lasersveis.

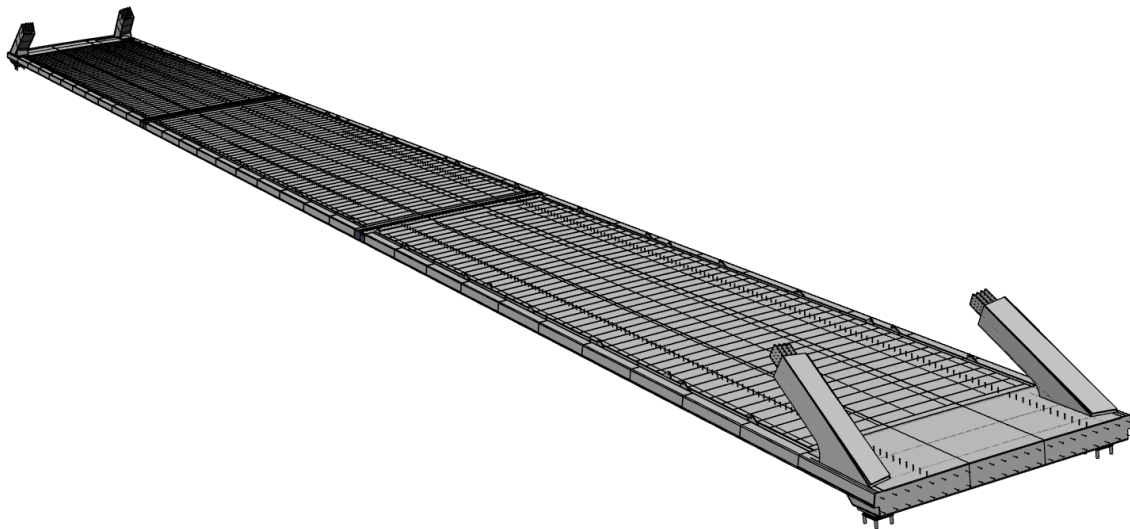
Hoveddimensjoner gitt av SVV:

- Lengde bru: ca. 65 meter
- Bredder kjørebane: 3 meter
- Bredder stålkasse: 5,4 meter

Stålkasse skulle være en slank sandwich slik at den kan produseres som en rett konstruksjon og jekkes opp og monteres i en bue.

Krav til stålsandwich:

- Topp-plate: 10 mm
- Bunnplate: 8 mm
- Høyde sandwich: 250 mm
- Avstand tverrstivere: 400 mm (maks)



Figur 6 Brukasse

Vekt stålkasse: 89 ton (ca. 32 tonn på endestykker og 25 tonn på midtstykke)

3.1 Brukasse for automatisert produksjon

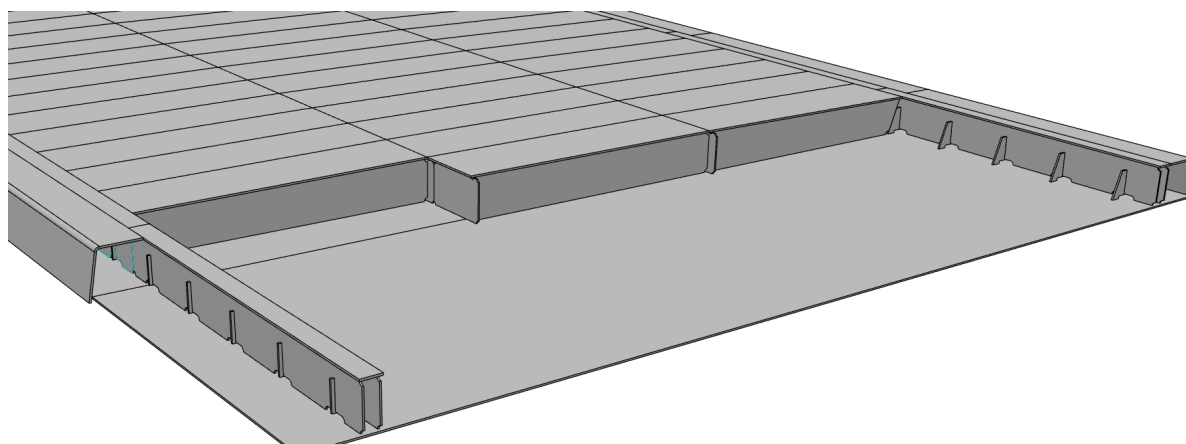
For å kunne produsere automatisert, vil det på stort sett alle konstruksjoner være nødvendig å tilpasse konstruksjon for å få til en god og effektiv automatisering. Det ble jobbet mye med hvordan dette kunne løses på best mulig måte.

På en slik konstruksjon ville det på et tradisjonelt design bli benyttet mye større plater for å redusere sveisemengde. Automatisering krever høyere presisjon enn manuell fabrikasjon, og det er enklere å få god passform med mindre komponenter som settes sammen. Produksjons-celler blir også mindre, noe som gir en lavere kostand for bygging av fabrikk.

En rekke ulike løsninger ble vurdert, men ble til slutt valgt et konsept der det prefabrikeres små kassetter som monteres automatisert i jigg.

Underveis i produksjon viste det seg at dette konseptet hadde en del uheldige løsninger. De to største utfordringene var:

- Oppnå gode nok toleranser mellom sidekanter
- Buling av bunnplate på grunn av sveising



Figur 7 Konsept brukasse

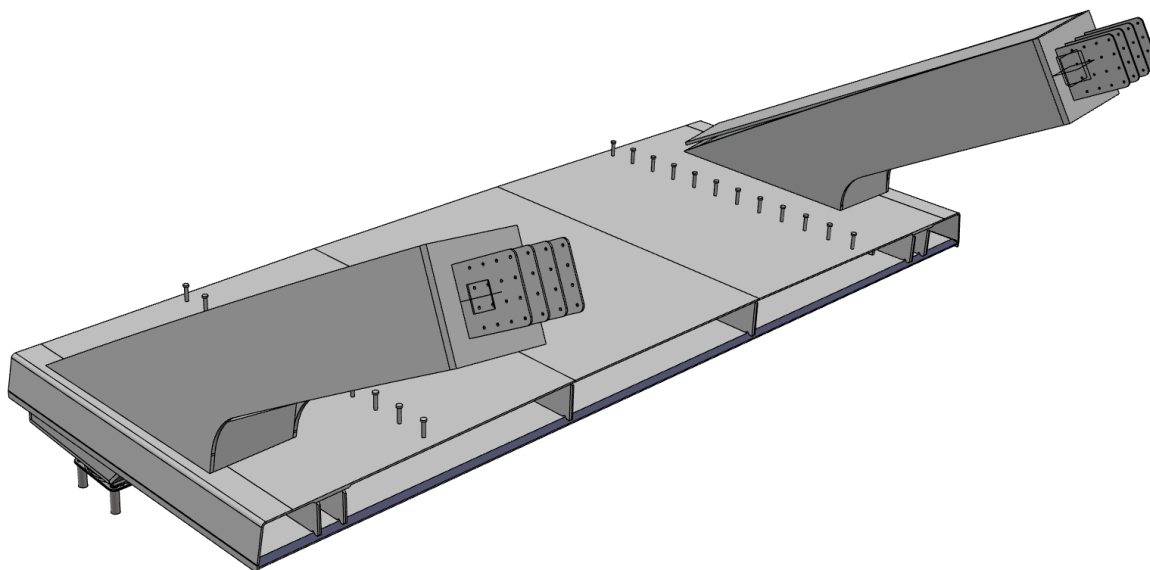
Grunnen til at dette konseptet ble valgt er at det ble vurdert som det beste for automatisert fabrikasjon. En ulempe er at det blir mye butt-sveis i topp-dekke. Ved å utvikle en stabil og sikker prosess med god overvåkning av sveiseprosess er ikke dette vurdert som negativt. Ved sveising av brudekket har det blitt mye reparasjoner av sveis. I tillegg til utfordringer med utstyret for fugefølging har akseptansenivå for porer medført relativt mye reparasjoner.

En alternativ løsning for å redusere mengde med sveis var å sveise sammen et rammeverk av stegplater og så legge på en større topp-plate og bruke ren laser (stake weld) for å sveise topp-plate til innvendige stivere. Dette ble vurdert som en mer usikker løsning. Dette konseptet vil bli grundig testet før neste sandwich-konstruksjon skal bygges.

3.2 Endetverrbærere

Endetverrbærere og kempere blir bygd av 20 mm plater og produsert på tradisjonelt vis. Denne delen av brukasse er ikke automatisert da det må brukes betydelige ressurser for å lage verktøy og jigger for automatisert produksjon.

Det var i utgangpunktet planlagt å sveise det meste med en flyttbar robot, men på grunn av mangel på ressurser til programmering ble det valgt å leie inn sveisere for å gjøre manuell sveising. Dette gir derfor ikke så mye nyttig info til forskningsprosjektet og er derfor ikke omtalt så mye i denne rapporten.



Figur 8 Endetverrbærer med kempere

På toppen av kempere er det en 40 mm syrefast plate som er anleggsplate for limtredeger. Det er sveist på syrefaste plater for å sette inn ståldybler for feste av limtredeger.

Under endetverrbærer er det plater for innfesting av bru-lager. Disse har forskjellig utforming i hver ende.

3.3 Sammenstilling nært bru-sted

Brukasse er en lang og slank konstruksjon som er vanskelig å løfte og transportere i en del. Det ble derfor valgt å dele brukasse i 3 deler. Derfor måtte det designes en metode for sammenstilling i Åfjord.

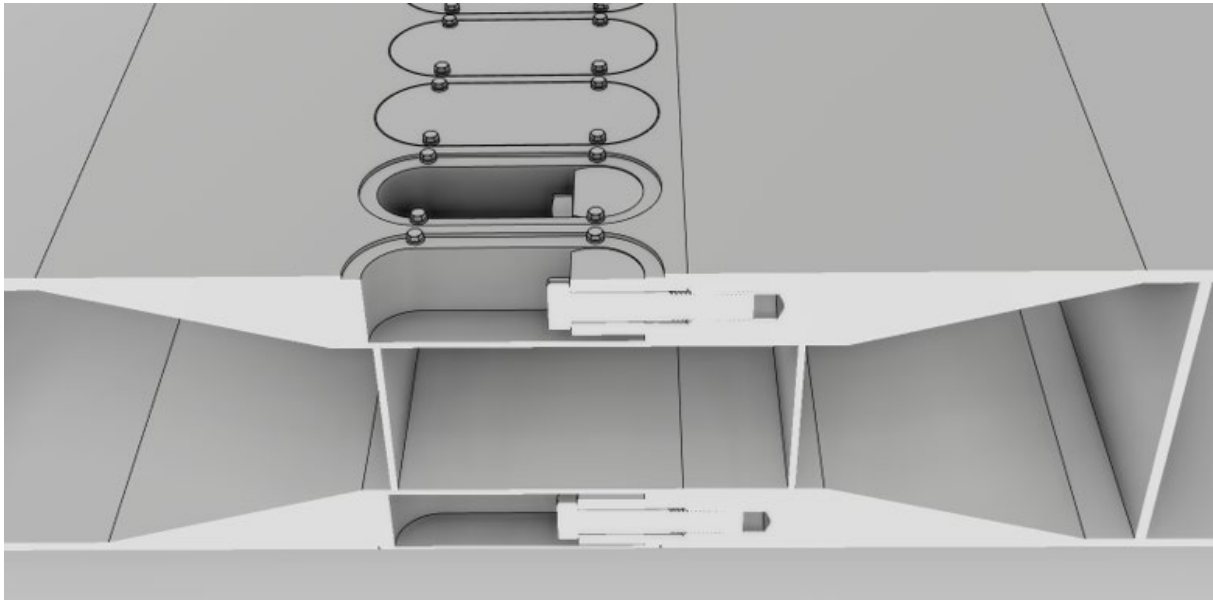
For sammenstilling av de 3 delene ble det både vurdert sveist og boltet forbindelse. Å velge en sveist forbindelse vil være det tradisjonelle, men det er et omfattende arbeid å sveise sammen en slik brukasse ute i felt. Det er høye krav til både sveis og overflatebehandling.

Hele området som skal sveises og overflatebehandles må bygges inn i et telt. Teltet må også oppvarmes i den kalde årstiden.

Overflatebehandling er en omfattende prosess og krever:

- Sandblåsing
- Varm-metallisering
- Grunning
- Mellomstrøk (x2)
- Toppstrøk

For å få redusert kostnader og redusert tid på montering var det et ønske fra Statens Vegvesen å få testet en boltet forbindelse. Det er derfor valgt å bruke en boltet forbindelse til sammenstilling i Åfjord. Den vil ha en vesentlig høyere kostnad i produksjon, men alt av sveis og overflatebehandling kan gjøres innendørs i fabrikkhall før det sendes til Åfjord. Det vil da være en relativt liten jobb å sammenføye brukasse der brua skal monteres, slik at de totale kostnadene på ferdig sammensatt brukasse skal bli lavere.



Figur 9 Boltet forbindelse - snitt

Element til bolta forbindelse viser seg å være dyrere å produsere enn estimert og det nærmer seg en pris der tradisjonell sammenføring med sveis vil være konkurransedyktig på pris. På sammenstillingstid vil en boltet løsning være langt raskere. Det viste seg under montering at det gikk raskere enn forventet og det tok mindre enn 3 dager å heise på plass bruseksjoner og bolte sammen begge skjøter.

3.3.1 Korrosjonsbeskyttelse av boltet forbindelse

I en boltet forbindelse vil det være mange bolter, skiver og hulrom som er utsatt for fukt og dermed korrosjon. Det er derfor laget deksel-plater over alle bolter der hulrom fylles et korrosjonshindrende stoff før plater skrues på.

Ulike korrosjonshemmende stoff har vært vurdert:

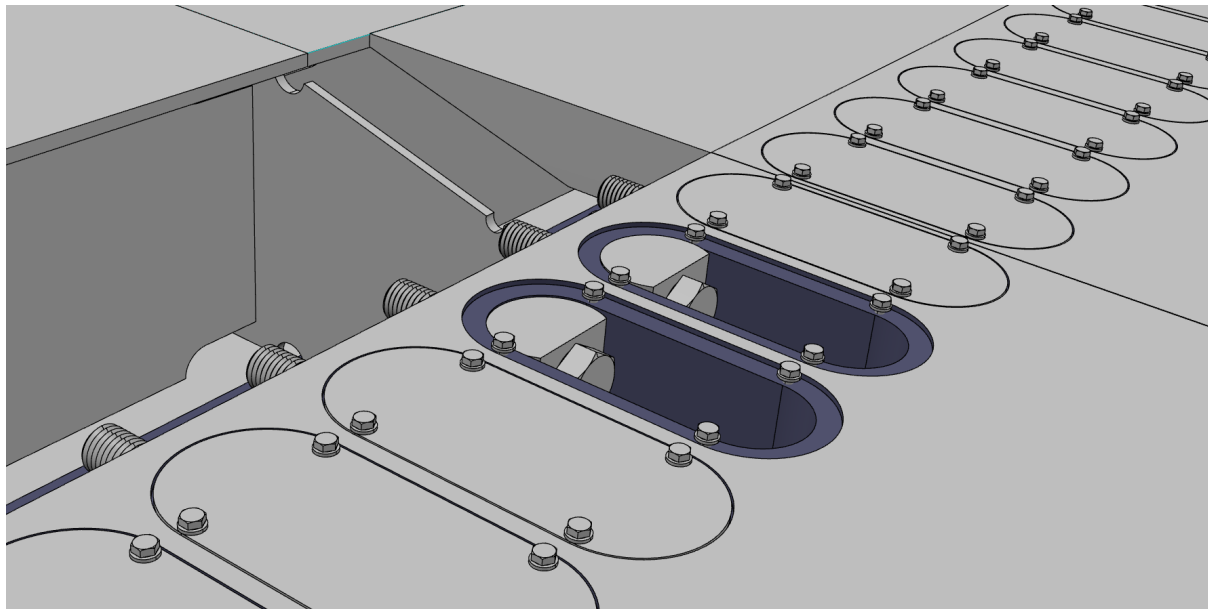
- Tre tjære
- Tectyl
- Molykote
- Texaco smørefett
- Tec 7 membran pasta
- Sikaflex 11 FC

Det er viktig at et korrosjonshemmende stoff har stor nok viskositet til å unngå lekkasje, også på varme sommerdager når sola varmer opp brukasse til over 50 grader.

Det kan også tenkes hensiktsmessig å velge forskjellig stoff på overside og underside. På overside er det andre behov enn på underside. På oversiden av brukasse må lommer for bolter

være fullstendig fylt opp for å unngå at det kommer vann inn når det renner vann over brukasse. Det vil heller ikke bli lekkasje ved lav viskositet.

På undersiden kan det bli lekkasje dersom viskositet blir for lav, mens det er mindre risiko for vanninntrengning.



Figur 10 Boltet forbindelse

Etter flere diskusjoner ble det besluttet å gå for samme fyllmasse på alle skruelommer. Multifak EP 0. Fett i viskositet NLGI0. Valget er gjort ut ifra ønsket om et produkt som holder seg på plass under alle klimatiske forhold, også ved soloppvarming inntil 60 grader. Leveres i forpakninger på 18 kg, 50 kg og 180 kg

4 KVALIFISERING AV SVEIS

For å få til en effektiv automatisert produksjon vil det være nødvendig å sveise på et begrenset område, så en økning i sveisehastighet vil være nødvendig for å få en tilfredsstillende produksjonshastighet.

Det vil også være nødvendig med høyere presisjon, og sveis med mindre varmepåvirkning vil gi mindre sveisetrekk dermed bedre presisjon.

Laserhybridsveis gir vesentlig høyere sveisehastigheter, og mindre varmepåvirkning enn tradisjonell MIG/MAG sveising. Det er derfor jobbet med å utvikle og kvalifisere sveiseprosedyrer for laserhybridsveising.

Sveising av brukonstruksjoner med laser er ikke definert i håndbøkene til SVV og det må dokumenteres at ferdige sveiser tilfredsstiller nødvendige krav.

Det har derfor vært jobbet med å kvalifisere følgende sveiser for bruk i Frønesbrua:

- Buttsveis 8 mm (bunnplate)
- Buttsveis 10 mm (topp -plate)
- T-forbindelse med full gjennombrenning fra en side

Bilde av disse sveisene er vist i sammendrag fremst i denne rapporten.

Det er krevende å få til gode lasersveiser. Det har vært relativt mye sveisefeil og sveisene er ikke godkjent for generell bruk. Det er gitt prosjektgodkjennelse for bruk på Frønesbrua siden den har lav statisk belastning og liten utmattingslast. Mye av sveisefeilene ville ikke blitt oppdaget om akseptkriteriet hadde vært 3 mm porer som regelverket krever.

Den dårligste laserhybrid sveisen i kvalifiseringa hadde bedre verdier på strekkfasthet enn den beste manuelle.

4.1 Rensing av sveisesoner

Ulike skjæremetoder, slag og glødeskall på plater og andre urenheter fører til at alle sveisesoner som skal sveises med laser må renses. Rensemetoder kan være:

- Slyngrensing
- Sandblåsing
- Sliping

Rensing bør gjøres av hele skjære-flaten og minimum 20 mm fra sveisesone.

4.2 Sveiseparametere

I tillegg til fuger er det en rekke andre sveiseparametere som må justeres inn:

- Sveisegass
- Sveisehastighet
- Lasereffekt
- MIG spenning/effekt
- Fokus
- Sveisevinkel
- Buelengde
- Avstand laserlys til migtråd
- Ledende laser eller tråd
- Platemateriale

4.2.1 Sveisegass

Det er flere ulike sveisegasser som har blitt testet:

- Helium
- Argon
- Argon-mix, Det er gjort forsøk med både 18%, 8% og 2%.

Erfaring viser at 2% Argon-mix gir minst sprut og best sveiseresultat.

Det er montert et avsug for å fjerne sveiserøyk. Det er et relativt kraftig avsug og det har vist seg at dette også fjerner en del av sveisegassen. Dette ble utbedret underveis i produksjonen.

4.3 Sveisefeil

Det har vært en del utfordringer med uforutsette sveisefeil både på sveiseprøver og i produksjon av Frønesbrua. Se vedlegg fra DNVGL, Vitec og Vertikalservice.

4.3.1 Bindefeil

Årsak til at bindefeil oppstår kan være at laserstråle ikke treffer midt i sveisefuge. Plater skjæres med så fine kutt og passer så godt sammen at det er vanskelig for tracker å lese hvor fugen er, noe som kan løses med å gi kantene en liten fas.

4.3.2 Porer

Den andre store feilkilden har vært porer og ansamlinger av porer. Årsak til porer er forurenninger i sveisefuge og her er flere faktorer som spiller inn.

Slagg på platene har også vært en betydelig utfordring og det har vært nødvendig å slyngrense sveisesoner for å få bedre sveisekvalitet. Det har imidlertid ikke løst alle utfordringer med porer og poreansamlinger.

Det var en tid mistanke om at skjæremetode påvirket sveisen, men slik det ser ut nå vil alle plater ha så mye urenheter i sveisesone at det må utføres en form for rensing av sveisesone.

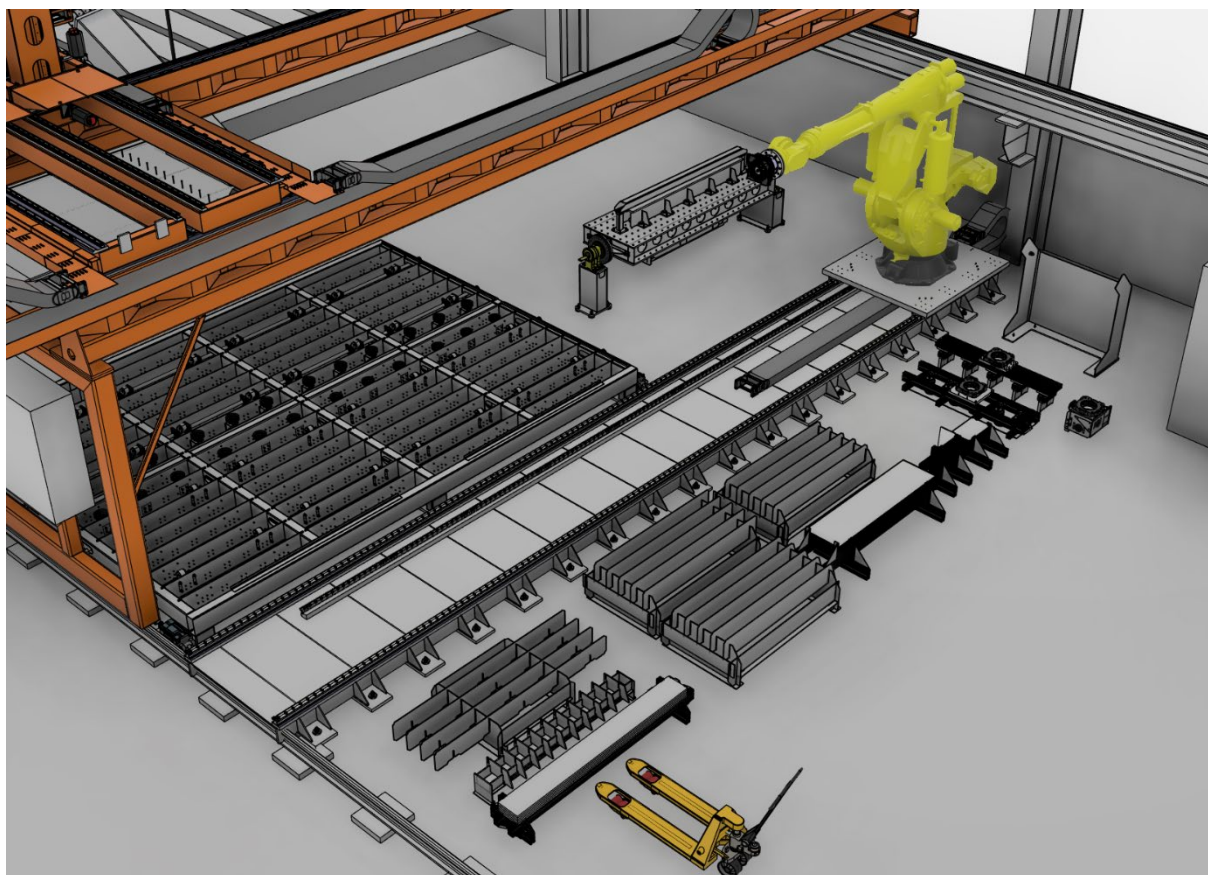
Foreløpige tiltak for å få mindre porer i sveis er bedre reinhold under montering, og blåsing med luft etter punktveising.

4.3.3 Undercut

Få tilfeller av undercut under visuell inspeksjon. Er innenfor akseptkriterier for laserhybrid sveis. Ihht. NS-EN ISO 15614-14.

5 PRODUKSJON

Det er brukt betydelige ressurser på design og bygging av produksjonslinje for denne brua. Intensjon er at mye av denne produksjonslinja kan gjenbrukes til andre prosjekt senere.



Figur 11 Produksjons-celle for brukasse

Produksjonslinje inneholder følgende hovedkomponenter:

- Laserkilde Trumpf 10 kW
- Fronius, 2 stk laserhybrid sveisehoder
- Sveisegantry med 2 sveiseroboter
- Jigg for sammenstilling av brukasse
- Celle for prefabrikasjon med sveisebord utstyrt med manipulator
- Monteringsrobot 400 kg på 11 meter lang skinne
- Magasin og plukkestasjoner for plater

5.1.1 Prefabrikasjon av plater

Å få frem plater med gode nok toleranser og materialkvalitet har vist seg å være viktigere enn forutsett. Lasersveis har mye høyere krav til fuge, toleranser og renhet enn en tradisjonell MIG sveis.

Det er 3 ulike skjæremetoder som er aktuelle for denne type produksjon:

- Plasma
- Fiberlaser
- CO₂ laser

Når plater til Frønesbrua ble bestilt laserskjært var det med tanke på god presisjon. Det var ikke kunnskap om at ulike skjæremetoder kunne gi ulike sveiseresultat. De første testene som ble gjort med plasma viste et godt sveiseresultat, og det ble da dratt en rask konklusjon om at plasma-skjærte plater gir bedre sveis. Det er så langt ikke dokumentert at dette gjelder alltid. Det må utføres mer forskning på dette området for å finne mer av sammenhengen mellom skjæremetode og sveisekvalitet. Til produksjon av brua har Prodtex valgt å slyngrense alle sveisesoner og da fjernes alt belegg og usikkerhet rundt urenheter som følge av bearbeiding av platene.

Til Frønesbrua ble laserskjæring valgt fordi det har høyere presisjon og bedre toleranser på ferdige plater. Det viste seg likevel at platene hadde relativt store enkelt avvik, opp mot 1,5-2 mm på noen plater. Årsaker til avvik på skjærte plater kan ha flere årsaker, det kan være slitt skjæreutstyr som har slakke i føringer og tannstenger. Under skjæring varmes stålplatene og det gir varmedeformasjoner som gjør at platene flytter seg på skjærebordet. Så store avvik som vi fikk på denne leveransen, kan vanskelig forklares med dårlig skjæreutstyr og varmedeformasjoner under skjæring. Vi vet derfor ikke hvorfor det har vært så store avvik. Ved neste produksjon vil det bli jobbet mer med å finne muligheter for mindre dimensjonsavvik i tillegg til bedre kvalitetskontroll før plater går til montering.

Prodtex jobber med å få på plass eget skjæreutstyr. Dette vil gi en bedre og jevnere kvalitet som ikke er avhengig av hvor det er skjært og hvilket utstyr skjærelleverandør har. Før det investeres i skjæreutstyr må det gjøres mer forskning på presisjon og sveisbarhet til ulike skjæremetoder.

5.2 Software

En viktig del av en effektiv produksjon er å ha en mest mulig automatisert og digital prosess fra produktutvikling til arbeidsinstruksjoner, programmering og kontroll av produksjon.

Prosjektet er gjennomført på en softwareplattform kalt 3DEXPERIENCE, som er en cloud løsning levert av Dassault Systèmes. Denne softwaren brukes mye i både bilindustri og flyindustri.

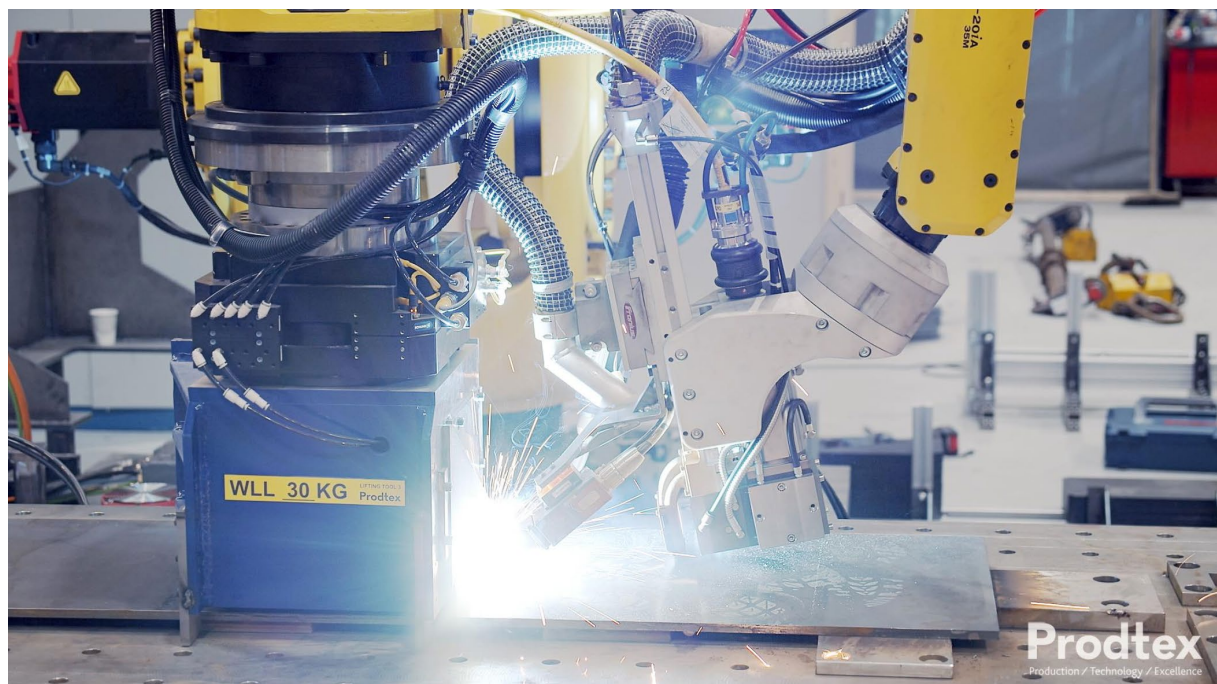
All data knyttet til modellering, simulering og robotprogrammering ligger lagret på denne plattformen. Revisjoner av data blir også håndtert internt i 3DEXPERIENCE. Tabellen under viser de nødvendige lisensene som kreves i de forskjellige disiplinene.

Nr	Beskrivelse	Lisens (rolle)
1	3D-modellering	Civil Designer
2	Simuleringer og FEM-analyser	Structural Engineer
3	Modellering av robotcelle	Equipment & Layout Engineer
4	Robotprogrammering	Fabrication Robot Programmer

Prodtex har bare tatt i bruk deler av det som er tilgjengelig, men jobber kontinuerlig med å utvide bruken av digitale muligheter.

5.3 Produksjonsutstyr (Hardware)

Sveis med laser er kjent teknologi, primært brukt til tynnere plater.



Figur 12 Sveising med laserhybrid

Nedenfor er en liste med utstyr som er brukt i produksjonsprosessen på Frønesbrua, hovedkomponentene er beskrevet nærmere i eget underkapittel:

Nr	Beskrivelse	Typebetegnelse
1	Sveisegantry	Prodtex design
2	Sveisejigg assembly	Prodtex design
3	Sveiserobot 1	Fanuc M-20iA 35M
4	Sveiserobot 2	Fanuc M-20iA 35M
5	Flyttbar robot	Fanuc Arc Mate 120iD
6	Laserkilde	Trumpf Trudisc10002
7	LaserHybrid Typa A	Fronius tps/I 500
8	LaserHybrid Type C	Fronius tps/I 500
9	Sveisekilde MIG	Fronius tps/I 400
10	Lasertracker	Serverobot
11	Force/Torque sensor	ATI
12	Manipulator	Fanuc
13	Monteringsrobot	Fanuc M900iB-400L

14	Skinne for monteringsrobot	Prodtex design
15	PLC	Beckhoff IPC C6930

5.3.1 Sveisegantry

Prodtex har utviklet og satt i drift en sveise-gantry som har kapasitet til å holde 2 sveiseroboter. Disse kan da flyttes mellom prefabcelle og produksjonscelle for sammenstilling. Grunnen til at sveiseroboter monteres på en gantry er at de har begrenset rekkevidde.

Når sveisegantry ble utviklet ble det besluttet gjenbruk av noen stålkonstruksjoner. Disse stålkonstruksjonene ble det ikke gjort grundige analyser av og det viser seg i ettertid at det burde vært større stivhet. Det oppstår lett svingninger og deformasjoner når roboter kjøres. Dette kan gi opphav til sveisefeil. Anbefaler utvikling av ny stålstruktur med større stivhet.

5.3.2 Laserkilde

For å kunne sveise med laser er det kjøpt en 10 kW laserkilde fra Trumpf. Laserkilde har 4 utganger og disse må startes og stoppes samtidig. Maksimal effekt på alle utganger til sammen er 10 kW.

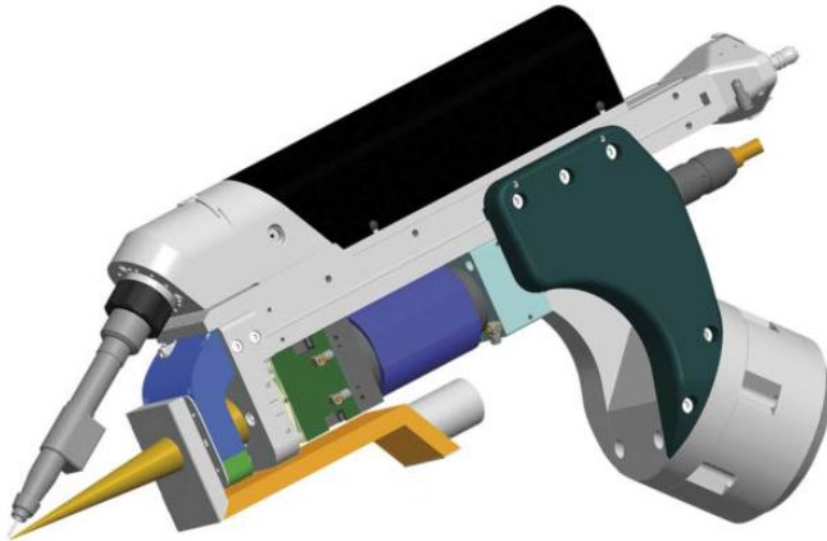
For produksjon av Frønesbrua vil det benyttes bare en utgang og vil sveise med inntil 10 kW.



Figur 13 Laserkilde

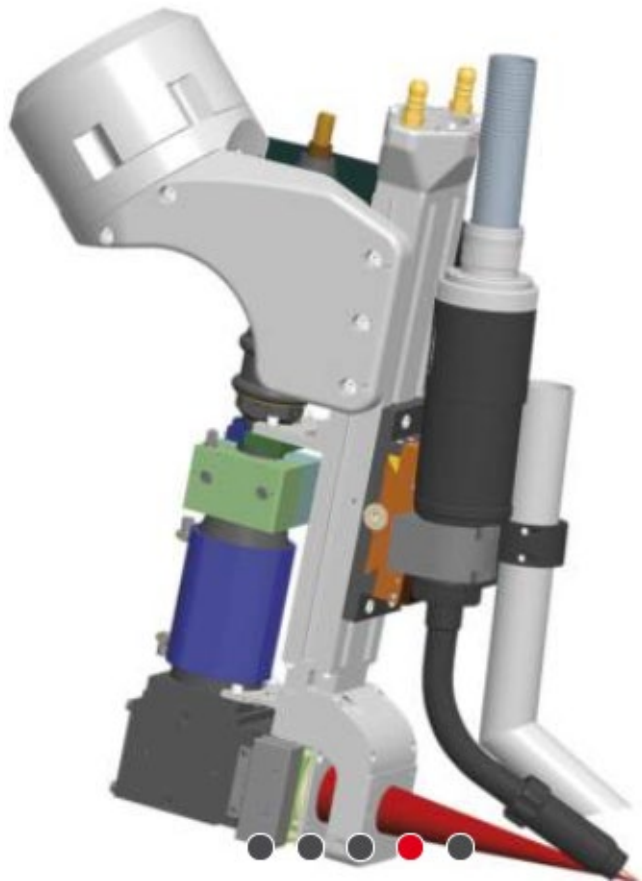
5.3.3 Fronius laserhybrid sveiseutstyr

Det er kjøpt inn to ulike sveisehoder for laserhybridsveis fra Fronius. Ett hode for buttsveis Type A, og ett for sveising av T-forbindelser Type C. Begge sveisehoder kan brukes til ulike sveiseoperasjoner avhengig av bevegelighet til robot og adkomst på arbeidsstykke.



Figur 14 Fronius laserhode type A

Sveisehodet type C har en avstand fra fokuspunkt til bakkant på sveisehodet på ca. 420 mm. Det gjør at enn trenger en avstand til neste profil for å kunne sveise T-forbindelser, med optimalisering av sveisevinkler er minimum avstand 395mm.



Figur 15 Fronius laserhode Type C

5.3.4 Lasertracker fra Servorobot

Lasertracker er en sensor som er montert på sveishode med programvare som leser sveisefuge. Dette gjør det mulig å følge sveisefugen.

Ved robot MIG-sveising kan sveistråden brukes til søk for å finne posisjoner på arbeidsstykket før sveising starter, og fugefølging under sveis. Fugefølging krever pendling av sveis for å følge. Lasersveis kjøres uten pendling, derfor kan ikke tråd brukes til dette.

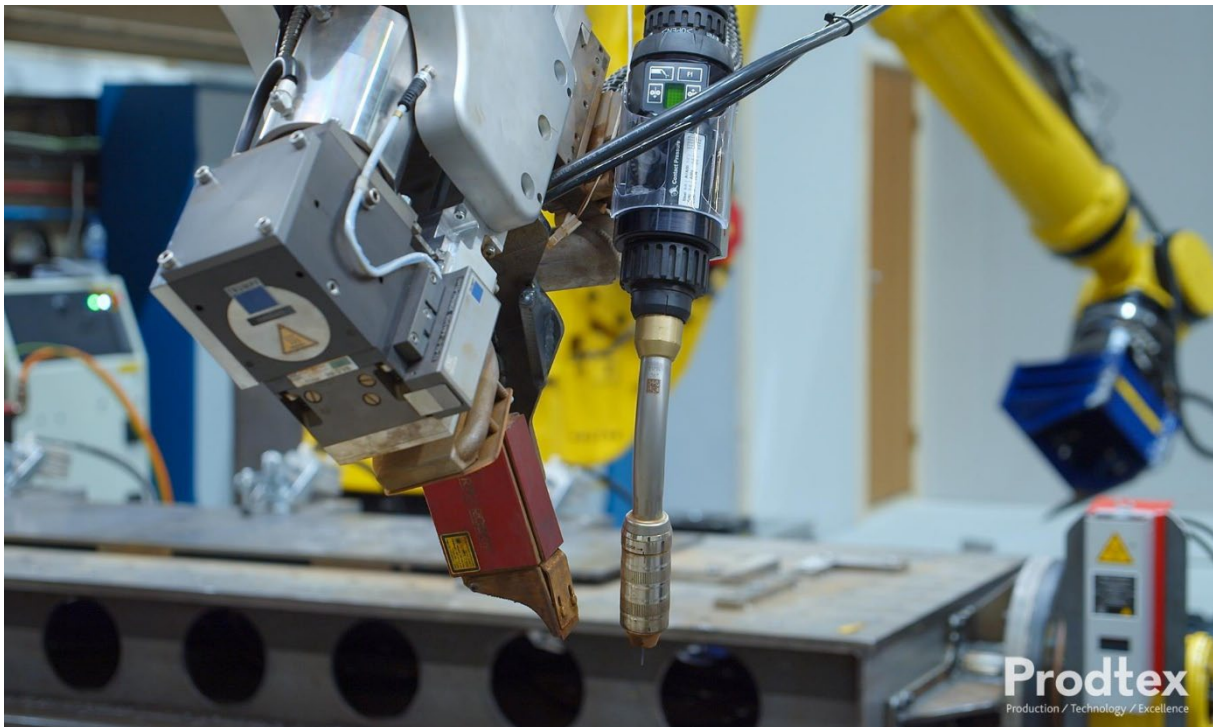
Lasertracker fra Servo-Robot gjør det mulig å fugefølge kanter eller fuger og søk av start- og slutt punkt. Under sveising vil lasertracker finne sveiselinjen og korrigere posisjonen til sveisepistolen i sanntid i forhold til sveisefuge.



Figur 16 Lasertracker

Det har vært en rekke utfordringer med å få til en stabil drift av lasertracker. Siden den leser konturer i overflate, er den avhengig av en liten fas. Laser-skjærte plater passer så godt sammen at det i mange tilfeller ikke er mulig å detektere fugen. Dette gjør at sveiseprosessen sporer av.

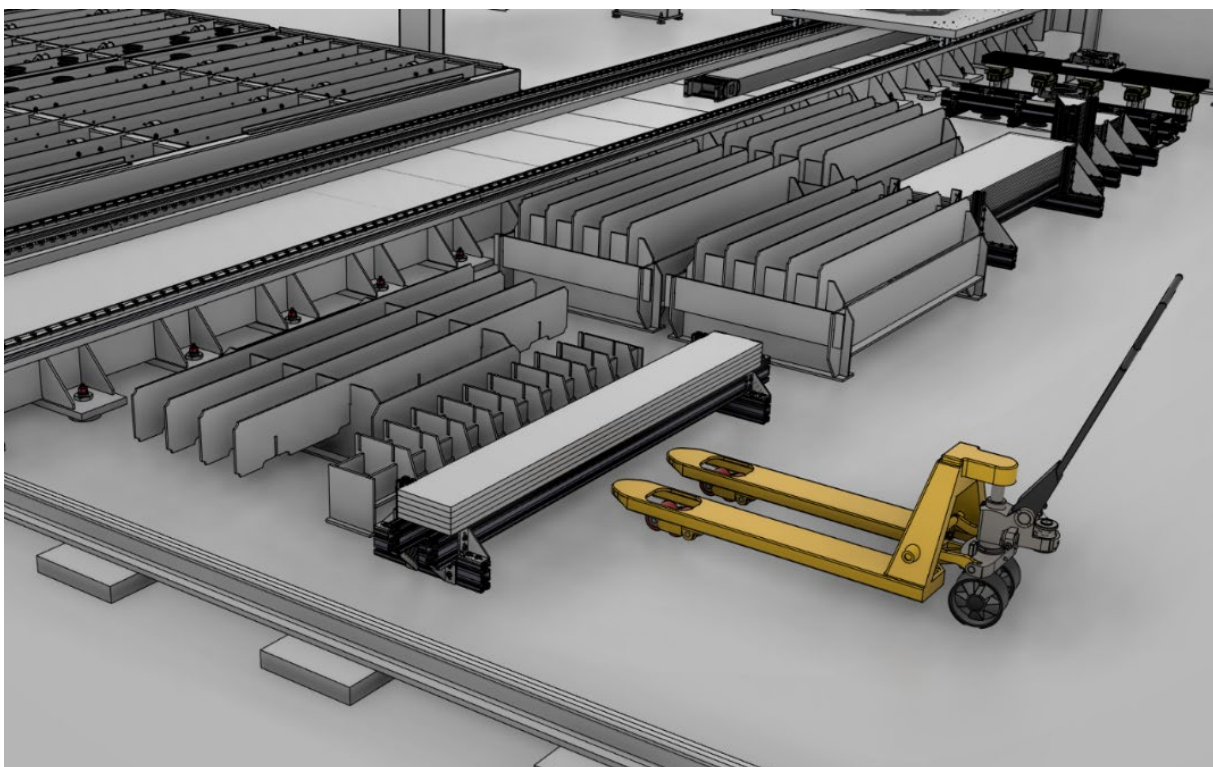
Det har også vært utfordring med å passere punkt. Under montering av plater må de punktsveises for å sikre at det ikke blir for store avvik under sveis. Når lasertracker skal passere sveisepunkt blir det ofte avsporing og avbrudd av sveise prosess, som følge av krav til å finne fuger på 0,1mm. Dette gjør at utstyret ikke klarer å filtrere bort punkt sveis.



Figur 17 Lasertracker montert på Fronius sveisehode Type C

5.4 Lager og logistikk

For en automatisert produksjon er det viktig med et godt system på inngående materiale for å unngå stopp i produksjonslinje. For dette prosjektet er det relativt små mengder stål, og det er ikke lagt opp til et automatisert lagersystem.



Figur 18 Plukkestatjoner / magasin for plater

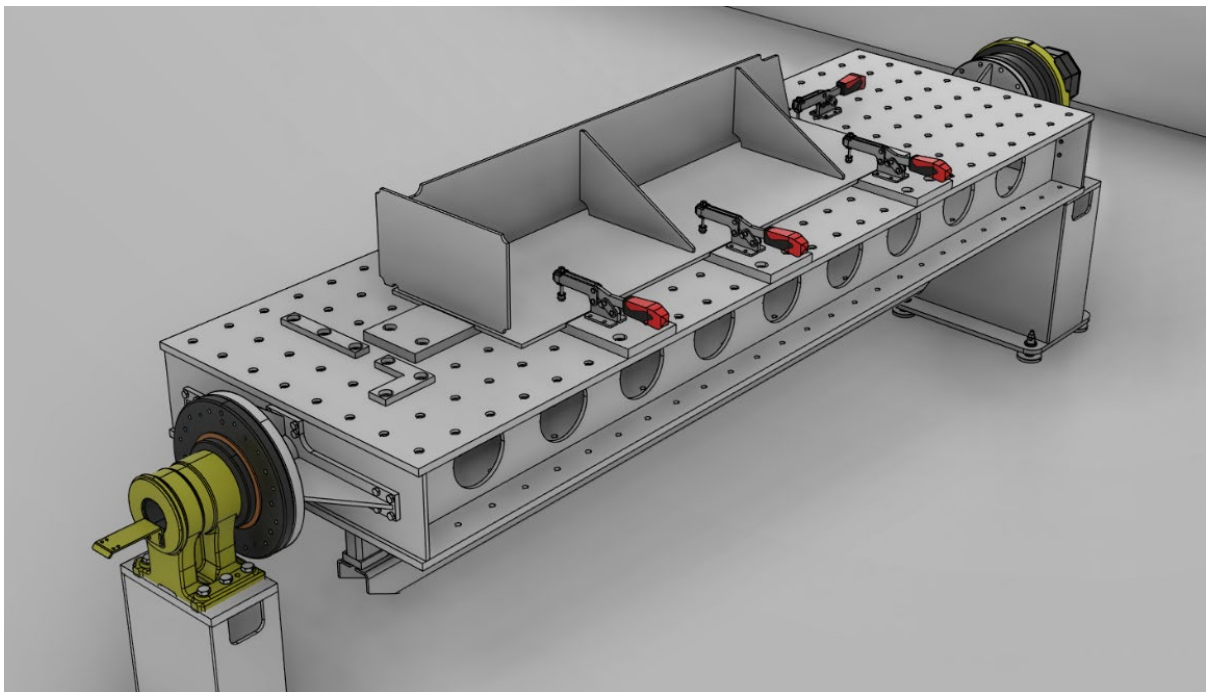
Det er laget enkle plukkstasjoner der monteringsrobot kan hente plater. Plukkestasjoner/magasin er dimensjonert for å kunne bygge 2 meter med brukasse. Når det er ferdig, skal brukasse skyves fram manuelt og da blir materiallager også byttet med fulle magasin.

For fremtidige og større prosjekt må plater leveres ferdig etter detaljert spesifikasjon slik at en i størst mulig grad unngår unødvendig håndtering.

Når det er investert i eget skjæreutstyr vil det også jobbes mot automatisert håndtering fra skjæring til sveising. Dette er krevende å få til da ulike platebiter må innom ulike stasjoner for videre bearbeiding. Det kan for eksempel være preparering av sveisefuger og rensing av plater.

5.5 Prefabrikasjon av kassetter

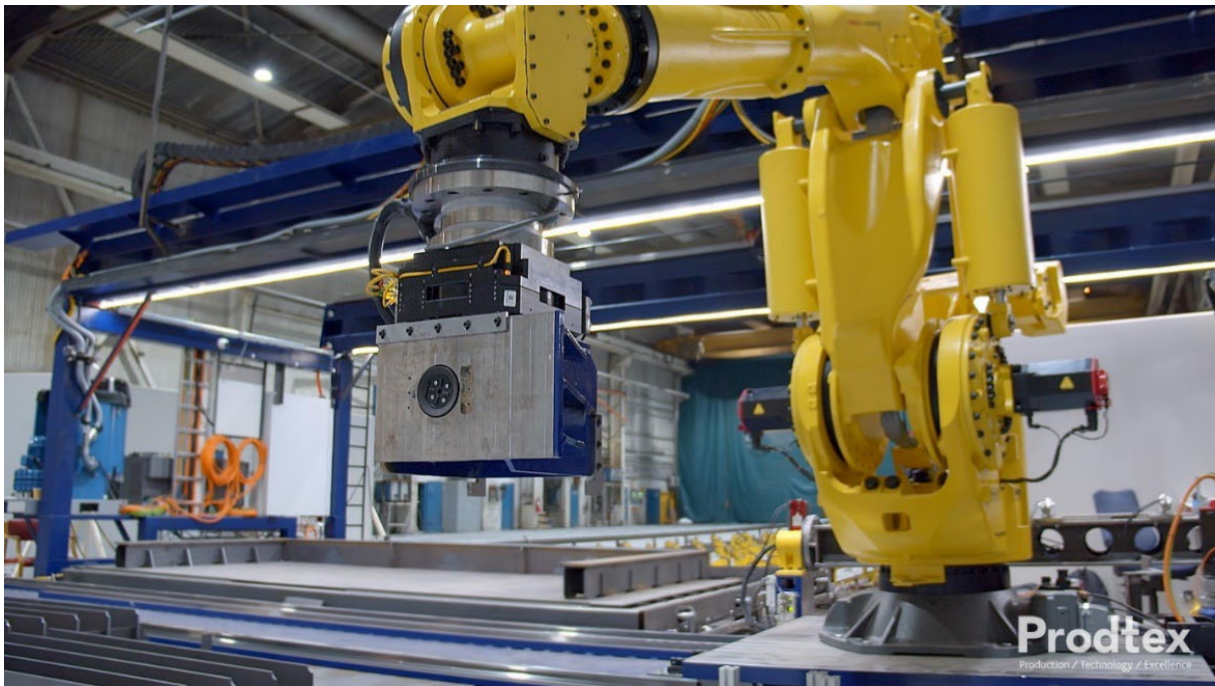
Kassetter til brukasse prefabrikeres på et sveisebord som er montert på manipulator fra Fanuc. Sveisebord kan da roteres til mest gunstig posisjon for hver enkelt sveis. Dette gir også mulighet til å legge sveis med vanskeligere adkomst.



Figur 19 Prefabrikasjon av kassetter

Sveisebordet er laget for enkelt å kunne tilpasses nye konstruksjoner ved at det har et hullbilde der støttebrikker og klemmer kan boltes fast i ulike posisjoner.

Kassetter blir produsert helautomatisert der både montering og sveis blir gjort uten personell til stede i produksjonscelle. Robot legger deler på plass før sveiserobot kommer og setter nødvendig punkt. Monteringsverktøy løftes bort før det legges kontinuerlig sveis.



Figur 20 Monteringsverktøy for kneplater og stegplater

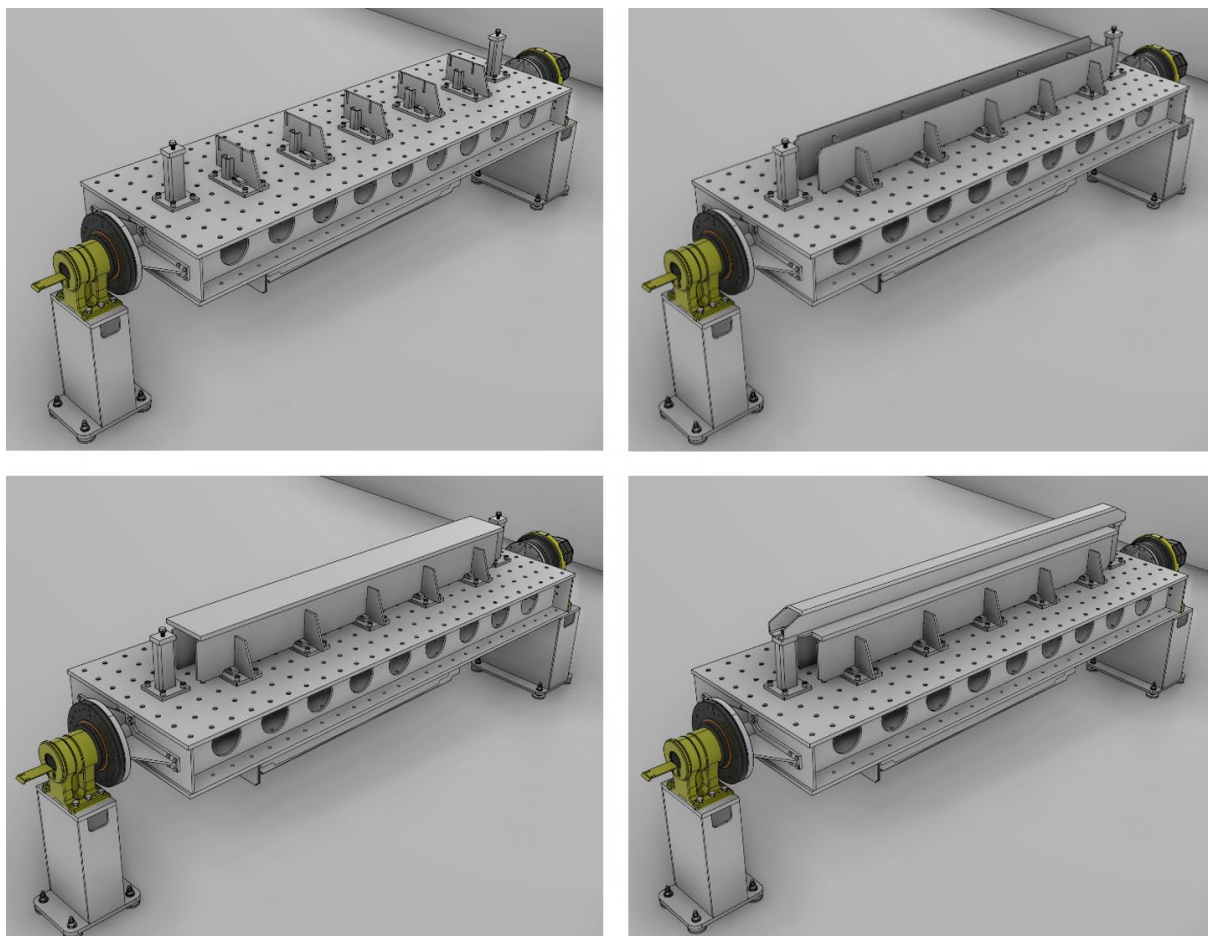


Figur 21 Prefabrikasjon av kassetter

Prefabrikasjon av kassetter har fungert godt, med noen mindre utfordringer med sveisedeformasjoner. Ved sveising av horisontal kilsveis på steg til toppplate fikk vi ett avvik på 0,7mm i bunnen av steget, men det ble løst med varmretting der vi fokuserte laserstrålen til en diameter på ca.35 millimeter målt på flaten til plata, og kjørte den i et mønster som danna en kile. Ved å gjøre det får vi deformasjonen i kassetten tilbake til null og har dermed en rett kant å montere mot bunnplata.

5.6 Prefabrikasjon av sidekanter

Sidekanter ble montert og sveist på samme sveisebordet som kassetter. Deretter ble T-forbindelse sveist med laser-hybrid fra en side, med full gjennombrenning.



Figur 22 Monteringsrekkefølge sidekanter

Når celle for prefabrikasjon ble rigget for sidekanter, ble det produsert et større antall av disse. Produksjon av kassetter ble da satt på vent. Dette for å unngå for mye arbeid med ombygging av sveiseceile. Sidekanter fikk små sveisedeformasjoner og retting av disse var ikke nødvendig.

5.7 Produksjon og sammensveising av brukasse

Sammenstilling av brukasse er en kombinasjon av manuell og automatisert produksjon. Bunnplate legges manuelt ned på sveisebordet og skjot mot forrige bunnplate sveises med laserhybrid. Sidekanter settes på manuelt og sveises på samme måte som bunnplate. Deretter monteres kassetter med monteringsrobot og sveises med laserhybrid sveiseutstyr. Det ble utviklet verktøy for å posisjonere kassetter med robot



Figur 23 Montering av kassetter med robot

Det viste seg at når kassetter ble sveist mot bunnplate, ble det større sveisedeformasjoner enn forventet og gjorde automatisert montering vanskelig. Det ble derfor nødvendig å bruke jekkeutstyr på mange av kassetene og det ble mer manuelt arbeid enn planlagt under sammenstilling av brukasse. Sveisedeformasjoner gav både buling på bunnplate og endret avstand mellom sidekanter.



Figur 24 Sveising

5.8 *Utfordringer i produksjon*

Det må skilles mellom feil på sveiseprøver og sveisefeil i produksjon. I produksjon kommer det til flere utfordringer enn det er på testsveising på små prøvestykker. Noe av det som har gitt utfordringer i produksjon er:

- Dårlige toleranser på skjærte plater. På en del plater har det vært relativt store avvik som har gitt feil fuger og følgefeil over på neste rad med kassetter. Her vil det bli gjort grundige undersøkelser for å finne bedre skjæreutstyr til neste prosjekt samt en bedre kvalitetskontroll av plater før montering.
- Gantry er ustabil, rister og kommer i svingninger når robot kjøres. Det er også så store deformasjoner at kjøring av en robot påvirker posisjon til den andre. Det vil bli jobbet med avstivning av gantry til neste prosjekt.
- Sveisedeformasjoner har gitt utfordringer med å montere kassetter slik at det gir best mulig fuge. Saksing og glippe har hatt relativt store variasjoner.
- Design av brukasse har ikke vært optimalt for å kunne takle avvik på plater og sveisedeformasjoner. Kunne fått et bedre resultat ved å gjøre justeringer på design. Det finnes nå mye mer kunnskap om sveisedeformasjoner ved bruk av laser og det vil bli jobbet videre med forbedringer. Generelt montere og punkt-sveise mest mulig før fullsveising.

6 HELSE, MILJØ OG SIKKERHET (HMS)

Automatisert produksjon der det monteres med robot og sveises med laser krever høyt fokus på HMS for å unngå uønskede hendelser.

For alle oppgaver som skal utføres skal risiko vurderes og nødvendige tiltak for å unngå skader på personell eller utstyr gjennomføres. Der det er nødvendig med opplæring skal den være dokumentert gjennomført.

For oppgaver som har risiko for skader på personell eller utstyr skal det utarbeides sjekklister som må gjennomgås før operasjon utføres.

6.1 *Montering med robot*

Bruk av robot til monteringsoperasjoner er nytt i denne type industri og krever god opplæring og sikkerhetsprosedyrer for å unngå skader. Dette er kraftige verktøy som har stort skadepotensiale. Det må derfor være et utgangspunkt at det ikke er personell til stede når robot skal kjøres.

Produksjon av Frønesbrua har vært et pilotprosjekt for utvikling av teknologi til denne type produksjon. Det har derfor vist seg nødvendig å ha personell til stede mye av tiden. For å redusere risiko for skader når personell jobber sammen med robot er hastighet på robotbevegelser satt ned til meget lav hastighet.

6.2 *Sveising med laser*

Laserlys har stort skadepotensiale og det er meget viktig med godt HMS arbeid for å redusere risiko for skader. Laserlys eller refleksjon fra laserlys kan gi skader på syn og i verste fall miste helt synet.

Prodtex har jobbet mye med rutiner for hvordan risiko kan reduseres til et minimum.

Produksjonshall har vært låst fra utsiden ved all lasersveis. Alle som jobber i hallen, har brukt laserbriller. Det har hittil blitt brukt manuell låsing av alle dører inn til sveisehall i henhold til egen prosedyre, men det jobbes med å få på plass et system med magnetkontakter på dører slik at strøm til laserkilde brytes dersom en av dørene åpnes under sveising.

I dette prosjektet har det vært ett alvorlig avvik der feil type vernebriller ble benyttet i kort tid under lasersveising. Tiltak: Alle vernebriller som ikke er godkjent for laserlys er inndratt og skal ikke brukes i produksjonshall.

6.3 *Arbeidsmiljø*

Prodtex AS skal jobbe for et godt arbeidsmiljø på alle plan. Dette skal jobbes kontinuerlig for å redusere farlige situasjoner, skader og ulykker. Det skal også jobbes aktivt for trivsel, og legge til rette for helsefremmende faktorer som også vil gi en gevinst i form av lavt sykefravær, god produktivitet og bedre produkter med mindre feil.

Prodtex jobber systematisk med å forbedre gode prosesser og jobber frem mot ISO 9001 sertifisering.

7 ØKONOMI

Automatisert produksjon kan gi store fordeler med både kvalitet og økonomi.

Produksjon av pilotbru er ikke et godt bilde på fremtidig produksjonskost. I pilotprosjektet er det brukt mye ressurser til FOU. Det er også funnet løsninger som i en etterfølgende produksjon vil kunne bli mye rimeligere. Et litt forenklet oppsett over økonomien vil se slik ut:

Foreløpig etterkalkyle Åfjord						
		Vekt tonn			Timer pr tonn	Timer totalt
Produksjonskostnader	9 796 500,00	91,00			59,78	5 440,00
		Vekt tonn	Pris pr tonn			
Material	1 336 500,00	99,00	13 500,00			
		Antall mann	Antall uker	Pris pr time	Timer pr uke	Timer
Lønn operatør PI	528 000,00	3,00	11,00	400,00	40,00	1 320,00
		Antall mann	Antall uker	Pris pr time	Timer pr uke	Timer
Lønn programmering	840 000,00	1,00	20,00	1 050,00	40,00	800,00
		Antall mann	Antall uker	Pris pr time	Timer pr uke	Timer
Manuell sveising og montering	176 000,00	1,00	11,00	400,00	40,00	440,00
		Antall mann	Antall uker	Pris pr time	Timer pr uke	Timer
Reperasjon	896 000,00	8,00	8,00	350,00	40,00	2 560,00
		Antall mann	Antall uker	Pris pr time	Timer pr uke	Timer
Montering	320 000,00	4,00	2,00	1 000,00	40,00	320,00
Bolteforbindelser	650 000,00					
Rekkverk	600 000,00					
Kvalitetskontroll	1 000 000,00					
Overflatebehandling	1 050 000,00					
Transport	250 000,00					
Design	1 500 000,00					
Sveisekvalifisering	650 000,00					
Overhead	3 478 200,00					
Salgspris ordre	10 106 000,00					
		Vekt tonn	Pris pr tonn			
Salgspris bru	6 825 000,00	91,00	75000			
Salgspris design	1 300 000,00					
Salgspris sveisekvalifisering	1 000 000,00	Andel kontroll	Andel Rep			
Transport	250 000,00					
Monteringsputer	581 000,00					
Rapportering	150 000,00					
Dekningsbidrag	309 500,00					
Resultat	- 3 168 700,00					

Figur 25 Etterkalkyle

Kostnadsbilde er også preget av at all sveisekontroll er gjort med boring på 1 mm. Vanlig standard er 3 mm. Dette medfører at en finner og reparerer områder som en ellers ikke vil definere som sveisefeil. Pris for kontroll og reparasjon vil bli betydelig redusert ved produksjon av en ny tilsvarende bru.

Beregnet kostnad til overhead kan sannsynligvis halveres ved produksjon av en ny kopi. Dette fordi en ved neste produksjon vil ha betydelig kortere gjennomløpsti i fabrikken. Når det gjelder kostnader til overflatebehandling er m² prisen høy. Bruk av moderne teknologi vil ikke redusere den betydelig, men en kan få rustfri overflate til samme pris.

8 KVALITET

Å sikre god kvalitet på både prosjektgjennomføring og ferdig produkt er et absolutt krav. Et kvalitetssystem må ligge til grunn for å lykkes med dette.

8.1 *Sertifisering*

Prodtex har jobbet aktivt med kvalitetssikring og er nå sertifisert i henhold til NS-EN 1090-serien for å kunne levere CE-merkede stålkonstruksjoner.

Prodtex jobber også med sertifisering i henhold til NS-EN ISO 9001 og NS-EN ISO 3834-serien. Dette arbeidet vil ikke være ferdig før levering av Frønesbrua, men forbedring av kvalitet vil være et kontinuerlig arbeid frem til sertifisering.

Produksjonsutstyret som Prodtex bruker er underlagt forskrift om maskiner, som pålegger at utstyret skal CE-merkes. Som en del av arbeidet med CE-merking av utstyret er det utført detaljerte risikoanalyser og iverksatt tiltak for å redusere risiko.

8.2 *Engineering*

All modellering, simulering, analyser og programmering blir gjort i 3D Experience fra Dassault Systemes. Dette er en meget omfattende programvare pakke som er mye brukt i bil-industri og flyindustri. Å gjøre mest mulig operasjoner i samme programvare med samme modell er med på å redusere feilkilder og sikre god kvalitet på engineering.

8.3 *Materiale*

Plater som ble levert fra SSAB hadde et glødeskall med betydelig tykkelse. Alle plater ble derfor slyngrenset etter skjæring og Prodtex må ha et kvalitetssystem som sikrer at dette ikke blir et problem i fremtiden. Det må enten spesifiseres hvordan platene skal leveres eller sørge for at glødeskall og slagg fjernes på annen måte.

Sveiseprøver gjort på MC stål, bru-produksjon ML stål. Det var ikke tilgjengelig stål med ML kvalitet før det ble levert materiale til brua. Materiale til sveiseprøver måtte derfor kjøpes i MC kvalitet. Det viste seg nødvendig å gjøre justeringer på sveiseparametere ved overgang fra MC til ML,

8.4 *Skjæring / fugging*

For dette prosjektet har det vært betydelige utfordringer med skjæring av plater. Avvik på platemål gir utfordringer med montering og sveisefeil. Det må sikres bedre at vi får tilstrekkelig høy kvalitet på skjæring til at det ikke får noen konsekvenser for videre fabrikkasjon. Egenkontroll av inngående materiale må også være tilstrekkelig til å ta ut plater med for store avvik.

8.5 *Sveising*

Et meget viktig punkt for å oppnå tilstrekkelig kvalitet på ferdig produkt er å sikre jevn og god kvalitet på sveising. Kontroll av sveis gjøres med både destruktive metoder og ikke-destruktive metoder.

Prodtex har hele tiden hatt som målsetting å sveise med så god kvalitet at det ikke blir noen diskusjon om hvorvidt det er innenfor eller utenfor akseptkriterier. Det har vist seg utfordren-

de å få til en jevn kvalitet uten sveisefeil og det jobbes kontinuerlig med å utvikle prosedyrer og rutiner som reduserer feil og reparasjoner.

8.5.1 Destruktiv testing - Makroslip

Under utvikling av sveiseprosedyrer tas det jevnlig prøver av sveis ved å sage ut prøvestykker som slipes og syre-behandles for å få frem materialstruktur.

Prodtex har kjøpt utstyr for å utføre dette, og sikrer en bedre kontroll av det som sendes inn til tredjepart for verifikasjon/godkjenning.

8.5.2 NDT

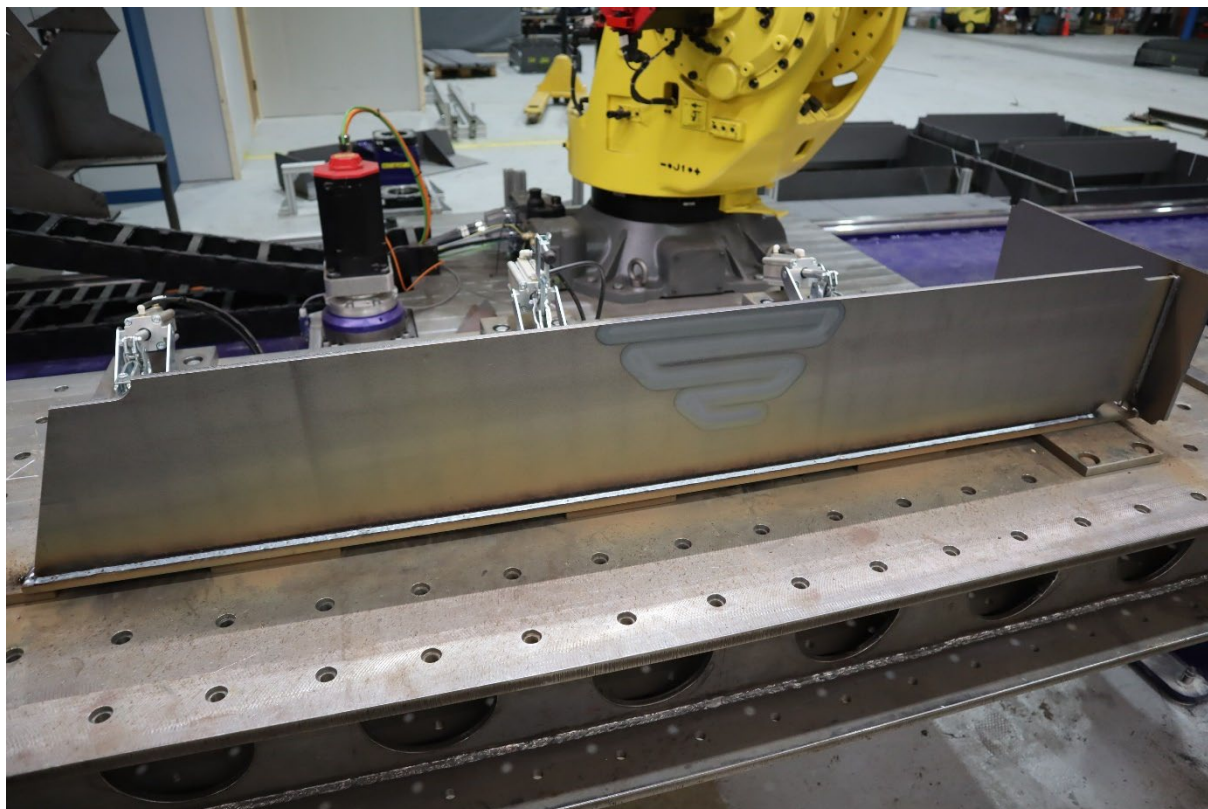
Det finnes en rekke ikke-destruktive metoder for kontroll av sveis. Hvilken metode som skal brukes vurderes for hver enkelt sveis.

Siden dette var et forskningsprosjekt ble det valgt å kjøre en mer omfattende NDT kontroll enn dagens regelverk krever. Det har vært søkt etter porer med størrelse ned til 1 mm, og disse har også blitt reparert. Dette har resultert i mer reparasjonssveis enn nødvendig.

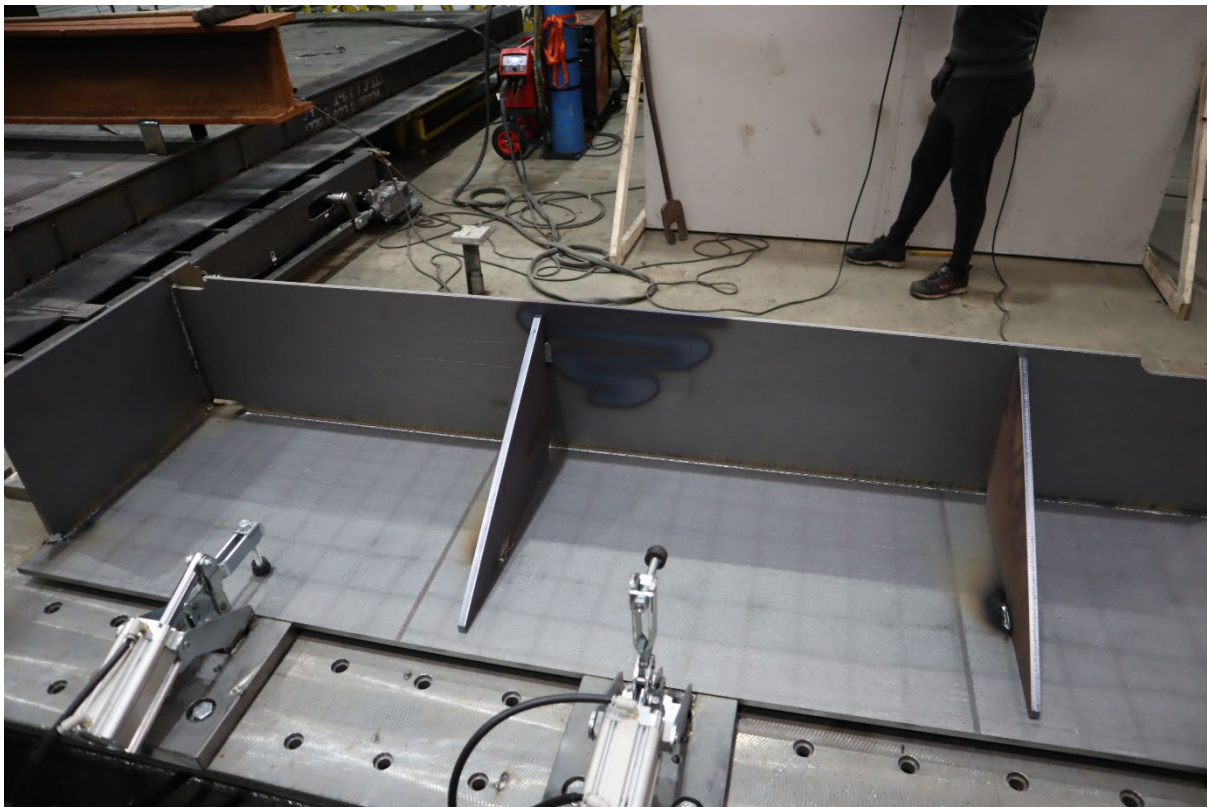
8.5.2.1 Visuell kontroll

Visuell kontroll er en metode som skal brukes på alle sveiser så langt det er mulig. For en del sveiser er ikke bakside tilgjengelig etter sveis og det må da gjøres vurderinger på hvordan det kan kompenseres for manglende visuell kontroll.

Det ble tatt bilde av alle sveiser. Disse bildene er lagret i et system der alle bilder er merket med dato og tid.



Figur 26 Bilde av sveis front



Figur 27 Bilde av sveis bakside

8.5.2.2 Ultralyd

Ultralyd er en mye brukt metode for kontroll av sveis. Den gir gode resultat på mange typer sveis og er også brukt både på sveiseprøver og kontroll på flere sveiser på Frønesbrua.

8.5.2.3 Phased Array (PA)

For kontroll av sveiser i topp-plate av Frønesbrua ble Vitec leid inn for 3.parts verifikasjon av sveiser. Vitec har utstyr for Phased Array kontroll.

Phased Array er bygd på vanlig ultralyd, men her inneholder lydhodene alt fra 10 til 265 element mens konvensjonelle lydhoder har 1 til 2. Det er en god metode på vanskelige geometrier og der det er ønskelig med oppfølging av defekter som sprekker, sveisefeil, korrosjon, erosjon osv.

Med dette utstyret finnes meget små feil og defekter som ikke kan observeres med tradisjonell NDT.

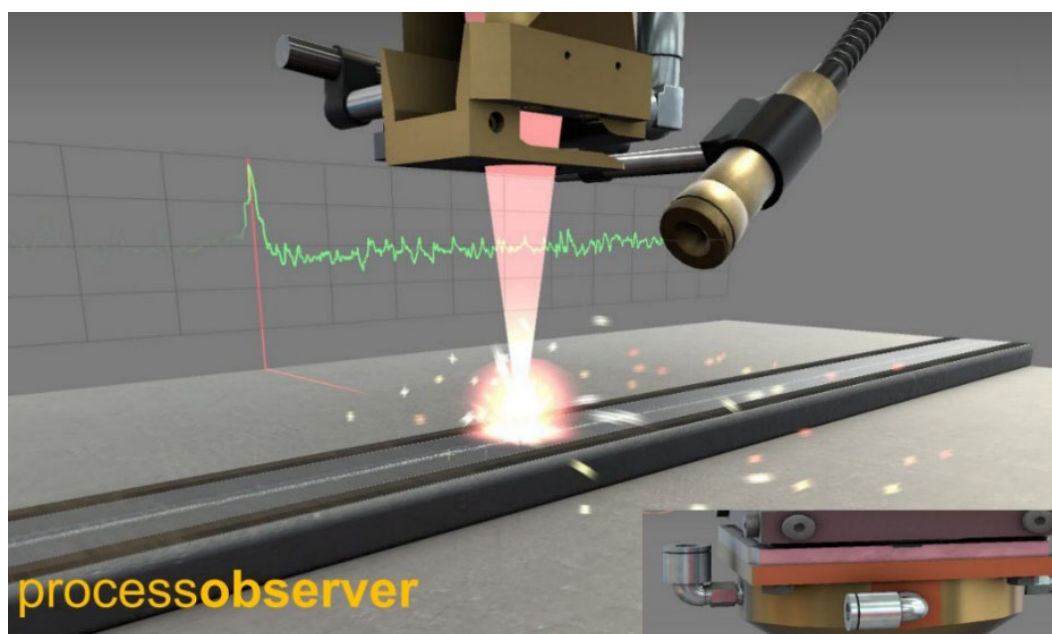
8.5.2.4 Sveiseovervåkning fra Plasm

Prodtex har kjøpt et avansert sveiseovervåkningssystem fra Plasm der det er muligheter for å unngå tradisjonell NDT på lenger sikt. Dette er utstyr som brukes mye i bilindustri og andre prosesser det er viktig med god kontroll på. Først må det skapes tillit til at dette systemet avdekker alt av feil som kan oppstå.



Figur 28 Plasmo prinipp

Plasmo utstyr er nå fungerende og det jobbes med registrering av data for ulike sveisetyper opp mot tradisjonell NDT. Data sammenlignes også med destruktive tester for å få mer kunnskap om hvilke feil som kan oppdages. På lenger sikt må dette utstyret kvalifiseres til å erstatte det meste av tradisjonell NDT.



Figur 29 Plasmo prinipp

Plasmo har utstyr for skanning av overflate både før og etter sveising. I tillegg samles det inn data fra sveiseprosessen som sammenlignes med data fra en god sveis. Ved avvik skal sveising opphøre umiddelbart inntil feilen er funnet.

9 FREMDRIFT

I februar 2020 ble det signert kontrakt på Frønesbrua mellom Prodtex AS og SVV med levering 15. oktober 2020.

Før produksjonen startet skulle det designes, bygges og settes i drift en ny sveisegantry i stål-fabrikken. I tillegg designet Prodtex også jigger, manipulatorer og ulike gripeverktøy for automatisert handtering av byggematerialer. Arbeidet med installasjon og igangkjøring av fabrikken tok lenger tid enn planlagt, dette hadde flere årsaker.

Covid-19 hadde en betydelig innvirkning på totaltiden i prosjektet. Den første konsekvensen var forsinket levering av utstyr til fabrikken. I tillegg gjorde situasjonen det umulig å få inn kvalifisert personell til oppstart og tuning av utstyr. Dette arbeidet måtte dermed utføres av egne ressurser i selskapet noe som medførte at hver delprosess tok lenger tid.

Eksempel på dette er:

- Laserkilde fra Trumpf
- Laser hybrid sveiseutstyr fra Fronius
- Lasertracker fra Servorobot
- Overvåkningsutstyr fra Plasmio
- Laser Metal Deposition (LMD) utstyr fra Trumpf

Når utstyr for lasersveising kom på plass i fabrikken startet arbeidet med kvalifisering av sveiser. Ved oppstart av nytt utstyr er dette et omfattende arbeid, og en kunne kommet betydelig raskere fram til riktige sveiseparametere dersom en hadde hatt planlagt support fra leverandører til stede under dette arbeidet.

I tillegg ble det brukt strenge akseptkriterier under prosessen med godkjenning av sveisene. Porer på ned til 1 mm ble detektert under NDT testing, mot normalt akseptert 3 mm. Dette gjorde også sitt til at arbeidet med å få godkjente sveiser tok lang tid.

All informasjon er lagret i cloud systemet til Dassault og det er tilgang via en nettleser. For å kunne følge fremdrift har Statens Vegvesen fått tilgang til 3D modellen. Planen var i utgangspunktet å mer eller mindre automatisk oppdatere status for modellen ved bruk av fargekoder. På grunn av forsinkelser i produksjonsfasen ble ferdigstillingen av systemet for oppdatering av fargekodene/statusoppdateringene nedprioritert og ble ikke tatt i bruk på Frønesbrua.

Design model (EBOM)	In Work
	Approved
Production model (MBOM)	Material Cut
	Prefabricated
	Mounted
	Assembly Weld
	Final Approval

Figur 30 Fagekoder i 3D modell

10 MILJØ

Å ta vare på miljøet får høyere og høyere prioritet, noe som må få konsekvenser for hvilke prosjekter som skal realiseres og hvordan disse skal gjennomføres.

Denne rapporten går ikke inn i vurdering på hvilke prosjekter som skal realiseres, dette er et altfor omfattende tema å vurdere her.

Utdrag fra artikkel på Statens Vegvesen sine nettsider den 03.12.2020:

Vegvesenet skjerper klima- og miljøkrav

Statens vegvesen stiller nå krav til at alle prosjekter over 200 millioner kroner skal sertifiseres gjennom CEEQUAL.

Vegvesenet har vedtatt at alle prosjekter med en investeringsramme på over 200 millioner skal sertifiseres i tråd med Ceequal. Flere av etatens vegprosjekter er allerede sertifisert etter denne ordningen.

CEEQUAL (The Civil Engineering Quality Assessment & Awards Scheme) er et internasjonalt miljøsertifiseringssystem for anleggsprosjekter der målsetningen er å gjøre disse mer miljøvennlige og bærekraftige. Dette er en tilsvarende ordning som BREEAM, som er utbredt i byggsektoren. Ceequal er en bransjestandard som skal stille enhetlige og forutsigbare miljøkrav til anleggsbransjen.

Sertifiseringsordningen omfatter et bredt spekter av miljøhensyn, fra klima og energiforbruk, via arts mangfold og kulturminner til forholdet til naboer og andre interesseparter. Ordningen krever at anleggsprosjektet vurderes opp mot et sett av miljøkriterier, og hvert kriterium krever framlegging av dokumentasjon på oppfyllelse. Vurderinger og dokumentasjonen skal gjennomgås og godkjennes av en godkjent tredjepart. Kriteriene kan brukes på de ulike fasene i et anleggsprosjekt, fra planfase via prosjektering til utbygging separat, eller på prosjektet som helhet.

Denne rapporten vil belyse fordeler og ulemper med en norsk automatisert produksjon sammenlignet med stål innkjøpt fra Europa eller Asia. Dette forutsetter at et prosjekt er vedtatt bygget og at miljøkonsekvenser av det er belyst tidligere.

Hvordan kan vi realisere et vedtatt prosjekt med minst mulige konsekvenser for miljø. Dette inkluderer stålbygging, transport og monteringsoperasjoner.

For å gi et bilde på miljøbelastning ved forskjellige byggemetoder kopierer vi inn en analyse som er gjort for bygging av Nerlandsøybrua. Den viser at en moderne byggemetode med bruk av materialer med gunstige CO₂ avtrykk er overlegen de metoder en sammenligner med.

Vår produksjon har halvparten av tilsvarende betongbru og en tredjedel av kinesisk bygd stålbru.

10.1 Oppsummering miljø

Prodtex Industri AS skal være det mest miljøvennlige alternativet for produksjon av store stålkonstruksjoner. Våre virkemiddel for å nå dette målet er:

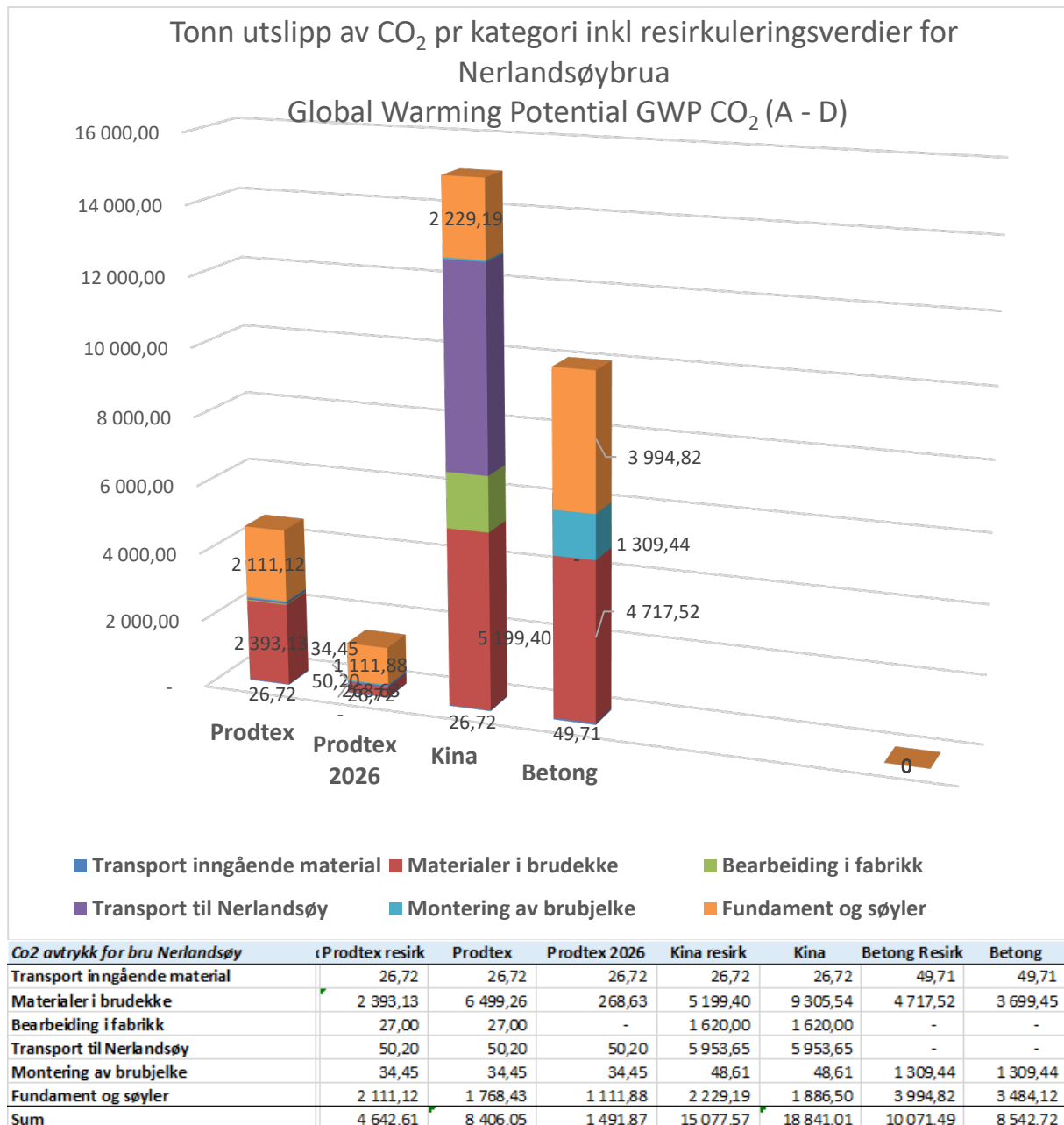
- Moderne teknologi som forbruker mindre energi
- Bruk av ren og fornybar energi
- Valg av de mest miljøvennlige innsatsmaterialer
- Kort avstand til markedet

Sammenlignet med konstruksjoner produsert i Asia og alternativ i betong er CO₂ avtrykket vårt betydelig mindre. Alle 4 elementene over bidrar til denne konkurransekraften. Detaljer i sammenligning mot betong og Asia produksjon viser i figur under.

Som en ser av tabellen nedenfor er det CO₂ avtrykk for stål materialene som står for meste-parten av avtrykket. Det er derfor viktig for Prodtex å ha nærhet til stålprodusenter som SSAB. Oppskriften på et miljøvennlig produkt er:

- Bruke de beste underleverandørene
- Nærhet i forsyningskjeden
- Moderne produksjonsutstyr og effektive produksjonsprosesser som i kombinasjon med godt design kan redusere bruk av materialer
- Tilgang til fossilfri energi
- Nærhet til markedet

Prodtex er god på alle punktene.

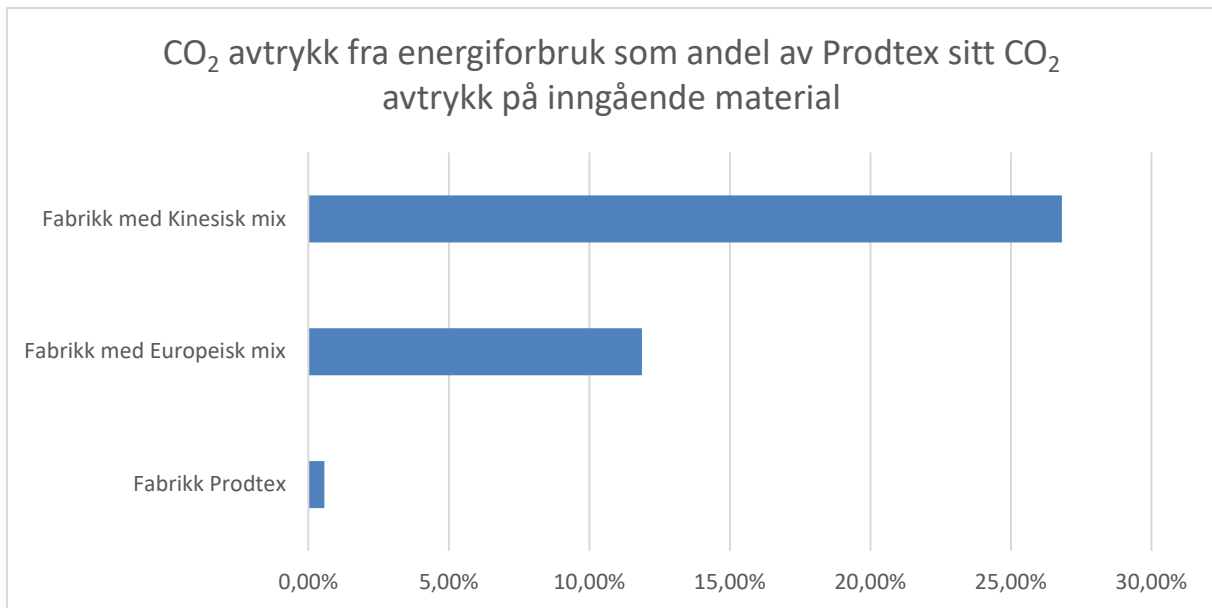


Figur 31 Utdrag fra miljørapport - ny bru til Nerlandsøy

Rapporten viser at vår produksjon har under 50% av belastningen til betongalternativ og 25% av belastningen til Asiaproduksjon når en tar med verdier for resirkulering.

NB! For at stål og betong skal kunne sammenlignes må resirkuleringsverdier vær hensyntatt. Dette fordi armeringsstål som i betongbru har nesten lik vekt med stålplater ikke får CO₂ belastning før ved resirkulering.

Mye av effekten i denne sammenligningen kommer fra material og transport. For å illustrere fabrikkens sin betydning har vi satt opp tabellen figuren under.



Figur 32 CO₂ avtrykk

Fabrikken sitt CO₂ avtrykk i forhold til medgått material

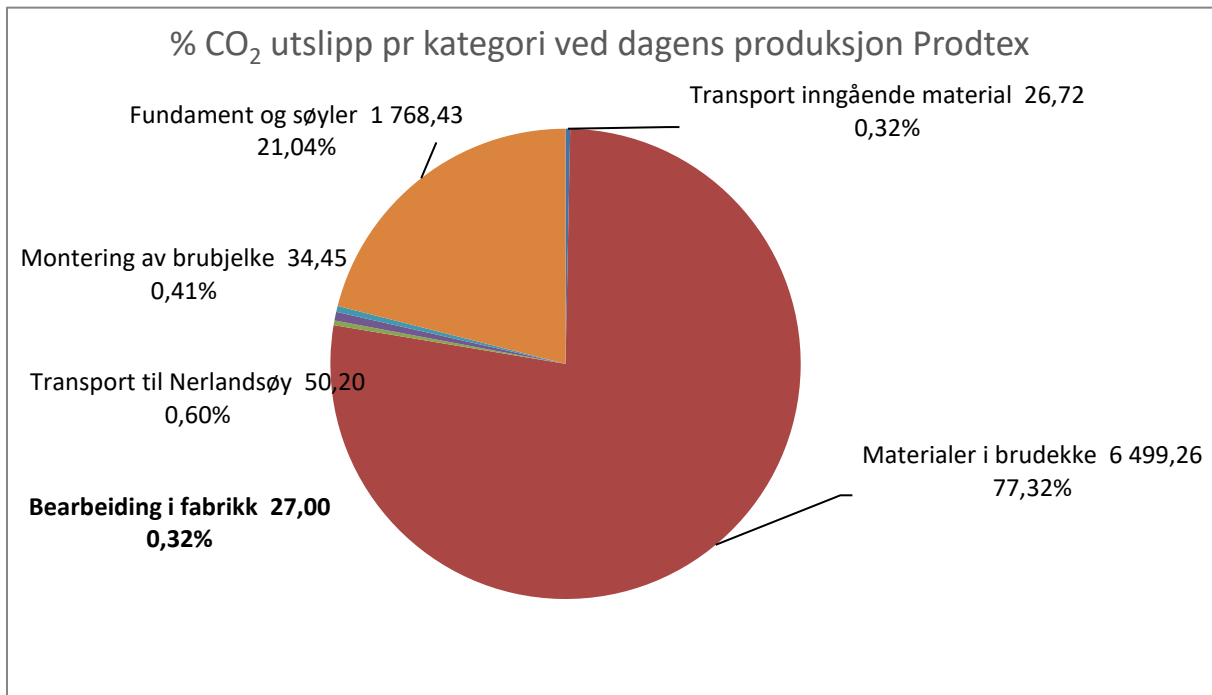
	Prodtex	Manuell Europa	Manuell Kina
Årsforbruk KWh	900 000,00	1 800 000,00	1 800 000,00
Faktor	0,03		
Faktor Europa-mix		0,31	
Kina-mix			0,70
Utslipp pr år fabrikk sertifikat	27 000,00	-	-
Utslipp pr år Europa-mix	-	558 000,00	-
Utslipp pr år fabrikk Kina-mix	-	-	1 260 000,00
Årsproduksjon (ton)	2 000,00	2 000,00	2 000,00
Stålets sin CO ₂ faktor	2 350,00	2 350,00	2 350,00
Utslipp pr år (kg)	4 700 000,00	4 700 000,00	4 700 000,00
Fabrikk sin andel Prodtex	0,57 %		
Fabrikk sin andel Europa-mix		11,87 %	
Fabrikk sin andel Kina-mix			26,81 %

NB! Fabrikkenes sin andel er basert på CO₂ avtrykk fra Prodtex sin stålleverandør. Kinesisk stål vil ha høyere verdi.

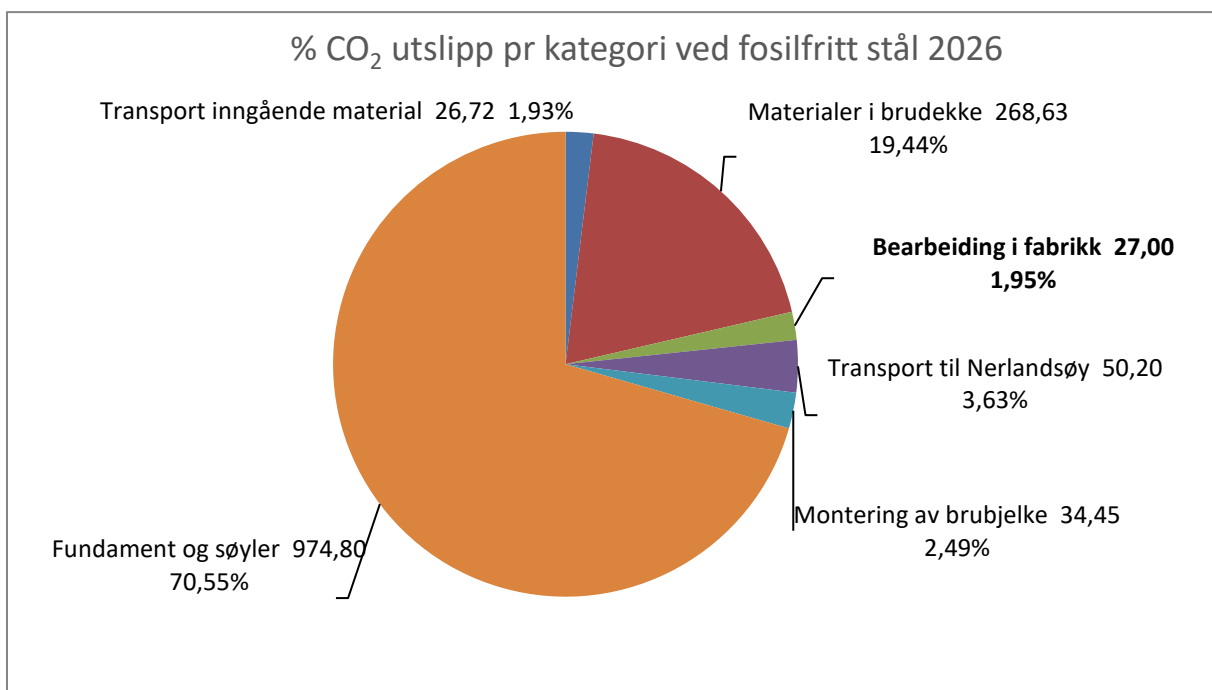
Figur 33 CO₂ avtrykk produksjon

Illustrasjonen forutsetter at manuell fabrikk bruker dobbelt så mye energi på likt produksjonsvolum. Det er en veldig konservativ antagelse. Den manuelle fabrikk må smelte minst 5 ganger så mye material, slipe og varmrette samtidig som den vil trenge et betydelig større areal for å produsere samme mengde på grunn av lengre produksjonstid.

Når materialleverandørene lykkes med å redusere sitt miljøavtrykk og nærme seg en fossilfri produksjon vil fabrikkens sitt avtrykk og de andre små utslippene få større betydning. En kan derfor ikke ta vekk oppmerksomheten fra de element som i dag har en liten andel.



Figur 34 CO₂ utslipp på bru



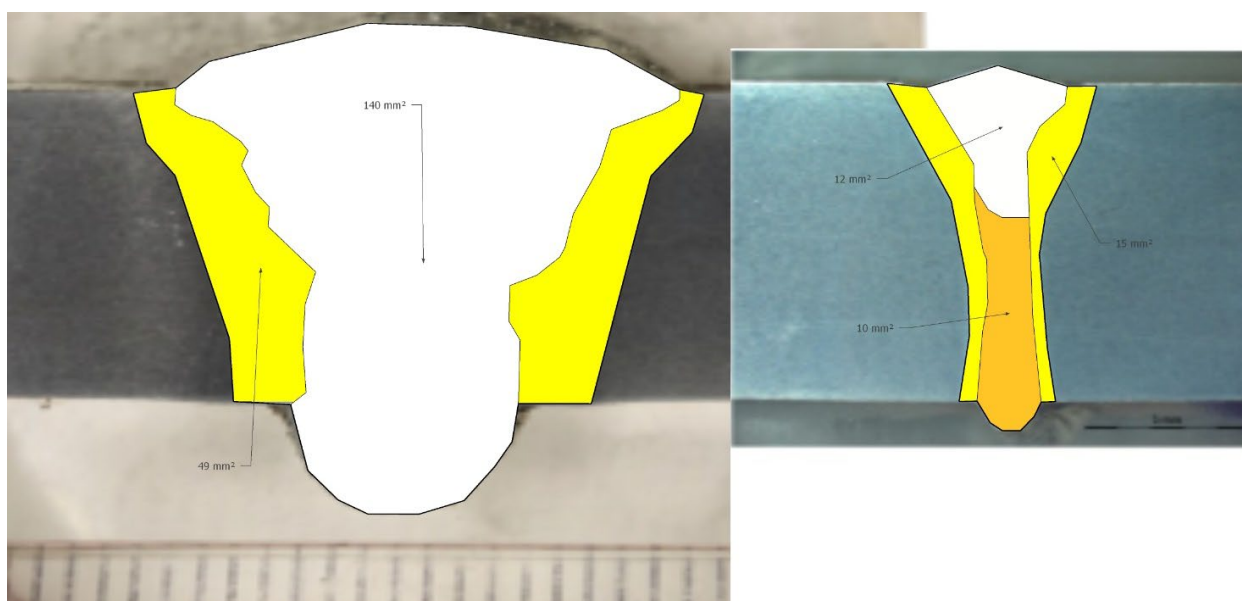
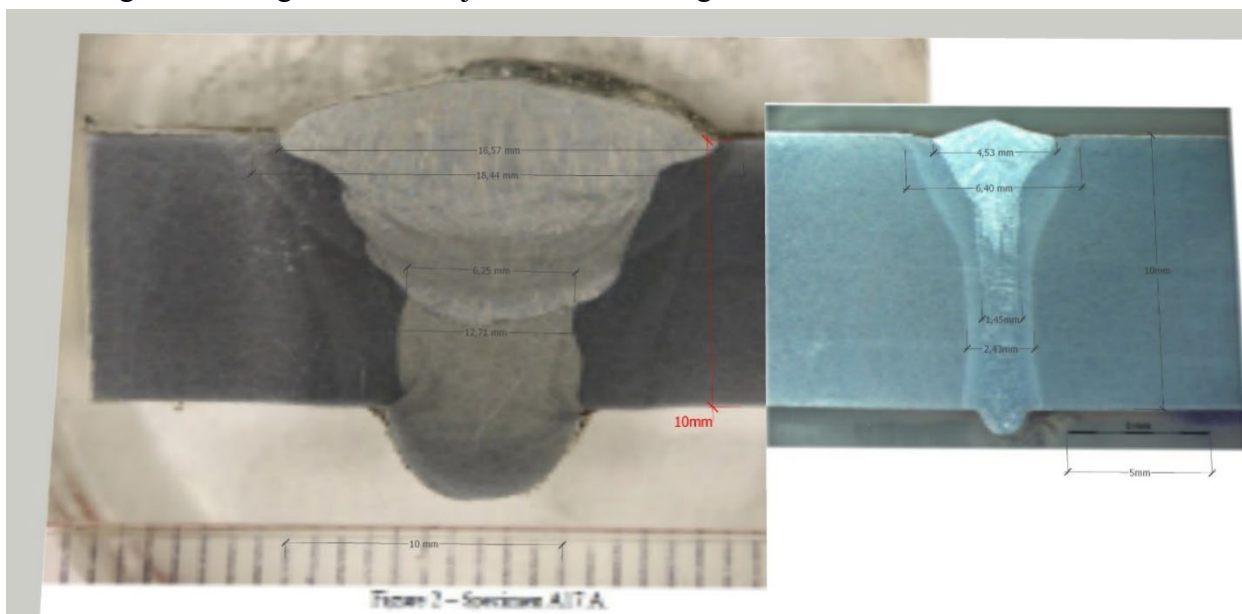
Figur 35 CO₂ utslipp på bru med fossilfritt stål

10.2 Moderne teknologi som forbruker mindre energi.

Bruk av robotisert montering og lasersveis er med på å øke gjennomstrømmingen i fabrikken betydelig. Det medfører at energibruk pr produsert enhet blir redusert fordi en stor del av energibruken ikke varierer med produksjonsmengde. Vi kan nevne element som

- Oppvarming av verkstedhaller og kontorer.
- Lys
- Ventilasjon
- Produksjon av trykkluft og gass (lekkasjer og svinn er ofte uavhengig av volum).

Lasersveis er en presis produksjonsprosess som reduserer varmepåvirkningen som trengs for å smelte materialer. Prosessen medfører også en betydelig reduksjon i behovet for sliping av sveiser og varmretting av konstruksjonen etter sveising.



Figur 36 Manuell og lasersveis av 10mm plate sveist butt i butt

En vanlig skjøt av 10mm plate krever 3 sveistråder og gir et oppvarma areal som er nær 10 ganger større enn laserhybrid sveis. I tillegg er bruken av sveistråd 12 ganger større for manuell sveis. Sveistråd har større miljøavtrykk pr kilo enn stålplatene. Til tross for at vår produksjonsmetode gir nesten en dobling i antall meter sveis, er energibruken i prosessen mindre enn 20% av manuell prosess.

Moderne produksjon med lasersveis medfører også at antall sveise apparater rundt om i hallen blir sterkt redusert. Apparatene forbruker ofte energi også når en ikke sveiser, men har påslått apparat.



Figur 37 Laser Hybrid sveis med full gjennombrenning

Behov for å slipe sveis er ved laser nesten redusert til null. På Frønesbrua er slip av sveis kun brukt der en har feil i sveisen. Ved ordinær produksjonsmetode er slipemaskiner en betydelig bruker av energi.



Figur 38 Dekksflate sveist med laser uten etterbehandling med varme

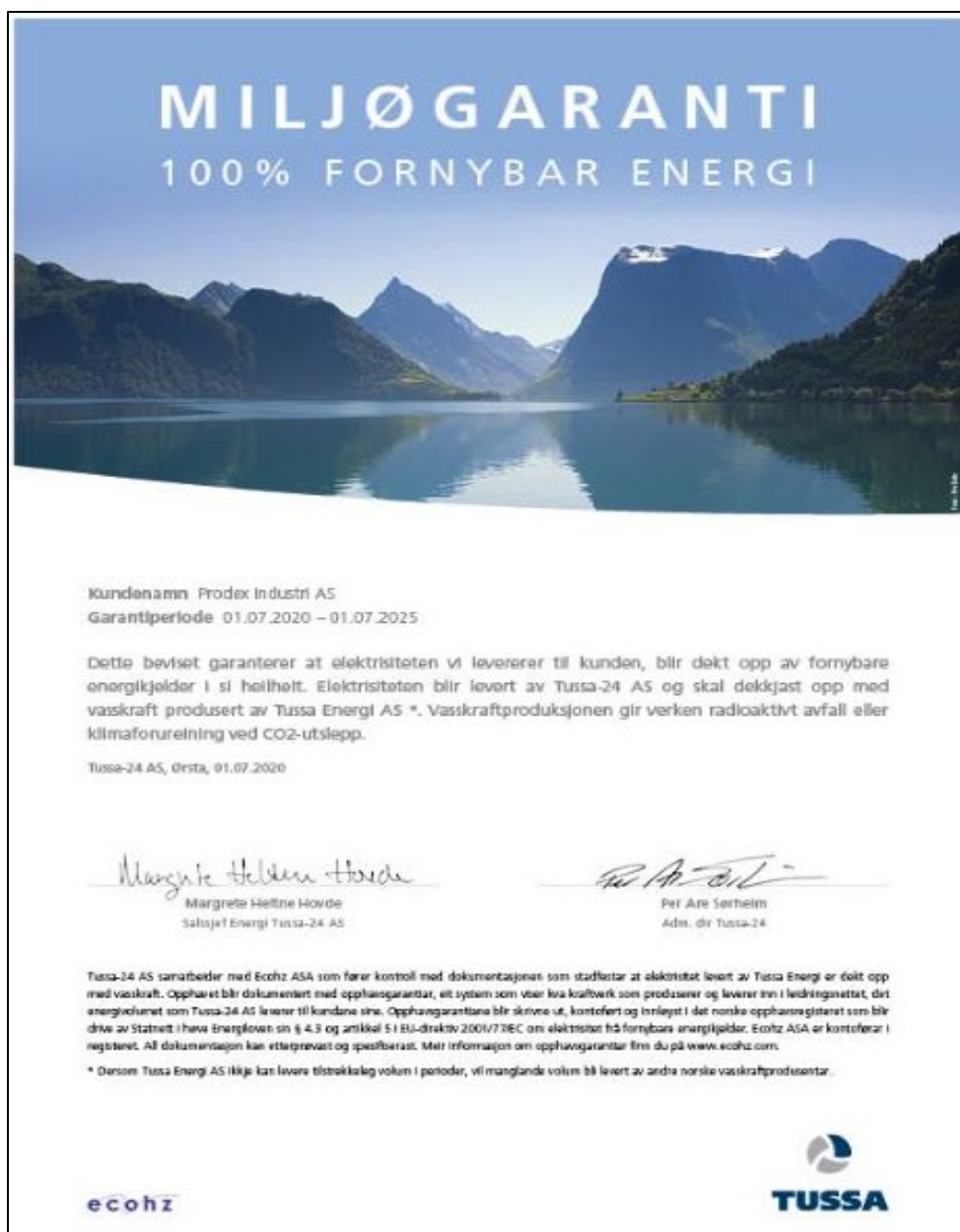


Behovet for varmretting av produserte enheter er fraværende ved vår produksjonsmetode. Konstruksjonen har svært høy standard på presisjon uten bruk av varmretting. Slik varmretting krever normalt et høyt energiforbruk, enten til induksjonsvarme eller ved varming med gass.

10.3 **Bruk av ren, fornybar energi.**

Prodtex AS og Prodtex Industri AS har innkjøpsavtale på strøm med Tussa. Dette er en avtale som sikrer at den energien som blir levert er basert på fornybar vannkraft.

Sertifikat for ren og fornybar strøm fra vannkraft betyr at vi i anbud får bruke 0,03 kilo CO₂ pr kilowatt time som er forbrukt. Uten sertifikat må det brukes faktor på 0,31. Ingen industri regioner i Kina som ligger ved kysten har verdier på under 0,6.



Figur 39 Miljøsertifikat

10.4 Valg av miljøvennlige innsatsmaterialer

Prodtex Industri AS sin viktigste innsatsfaktor er stålplater. CO₂ avtrykket på platene er avhengig av mange faktorer som:

- Hvor kommer malmen fra og hvor effektiv er prosessen i gruven
- Hvor stor andel er gjenbruk av skrap
- Hvilken prosess blir brukt
- Hvilken type energi blir brukt i prosessen

Prodtex Industri har i pilotprosjektet brukt material fra SSAB. Materialet har en lavere CO₂ avtrykk enn gjennomsnittet for denne type material og SSAB jobber aktivt for å redusere ytterligere. I 2026 vil de kunne levere ut i markedet 1 mill. tonn med material som er fossilfritt. I 2045 skal alt materiale være fossilfri.

10.5 Kort avstand til markedet

I figuren som sammenligner CO₂ avtrykk for Nerlandsøy viser at transport fra Kina har et CO₂ avtrykk som er større enn Prodtex Industri sitt totale avtrykk når resirkulering er inkludert.

For å frakte 560 meter med brukonstruksjon er følgende data brukt.

- Fart: 12 knop
- Ytelse: 6000 kW (snitt for last og tom retur)
- Tidsbruk: 1875 timer (ikke hensyntatt ventetider)
- Distanse: 22500 nautiske mil tur retur
- Drivstoff forbruk: 1920 tonn – 200 gram pr kw/h
- CO₂ utslipp: 5928 tonn – 3,1 kg CO₂ pr liter

Det er svært lite sannsynlig at avtrykket fra transport over så lange distanser vil bli vesentlig redusert i de næreste årtier.

Kortreist produksjon er derfor en av de viktigste miljøtiltak. Det betyr også at dersom Prodtex Industri AS vil eksportere til Asia, Australia, Amerika eller Afrika så bør det skje ved etablering av lokal produksjon. Slik produksjonskapasitet kan være kopi av eksisterende fabrikk og styrt og programmert fra Prodtex Industri AS.

11 TRANSPORT OG MONTERING

Brukasse produseres i 3 deler i Prodtex sin fabrikk på Fiskå. Brukasse ble levert ferdig overflatebehandlet. Brua ble transportert på lekter til Monstad kai i Åfjord og kjørt på bil til brusted.

Bruseksjoner ble løftet på plass over elva med mobilkran og boltet sammen før jekking til korrekt høyde. Bolteforbindelse mellom seksjoner gjorde at det ble meget rask montering av stålkasse. Ingen sveising eller overflatebehandling av skjøtesoner på byggeplass.



Figur 40 Løft av stålkasse over elva

Det var misforståelse på plassering av brulager og hengeører slik at det måtte gjøres justeringer under montering av stålkasse. Dette er ikke relevant for forskingsprosjektet og er derfor ikke beskrevet nærmere i denne rapporten



Figur 41 Montert stålkasse



12 VEDLEGG

- Vedlegg A: Rapport fra DNVGL på kvalifisering av sveiser
- Vedlegg B: Godkjente og signerte WPQR og WPS for bruk på Frønesbrua
- Vedlegg C: NDT rapporter fra Vitec og Vertikalservice
- Vedlegg D: Sveiselogg



STATENS VEGVESEN Divisjon Utbygging
5008 Bergen
Norway

DNV AS Oil & Gas
Environmental Loading & Response-
4100-NO
Veritasveien 1

1363 Høvik
Norway
Tel: +4767579900
945 748 931

Date: 2022-01-27
Our reference: 1336710
Your reference: [Your Ref]

Vedlegg til Prodtexs erfaringsrapport fra Frønesbrua

Introduksjon og bakgrunn:

DNV har blitt spurt av Statens Vegvesen (SVV) om å utarbeide en erfaringsrapport i forbindelse med DNVs involvering i prosjektet med lasersveising av Frønesbrua i Åfjord. Prodtex har utarbeidet en erfaringsrapport (Frønesbrua erfaringsrapport, revisjon 0, datert 28.10.2021) som tar for seg erfaring fra hele prosessen fra Prodtex' perspektiv. Hensikten med DNVs erfaringsrapport er å bidra med et nytt perspektiv. DNV har ikke vært involvert i hele prosessen, men har rådgitt på områder som kvalifisering, kvalitetskontroll og kvalitetssikring av lasersveis. Denne erfaringsrapporten vil derfor fokusere på disse punktene. Etersom dette omfanget kun er en del av den totale prosessen, er denne erfaringsrapporten også utarbeidet på en slik måte at den er tiltenkt å være et vedlegg til Prodtex erfaringsrapport).

Følgende punkter vil bli diskutert i denne rapporten:

- Kvalifisering av sveis
- Ikke-destruktiv prøving
- T-forbindelser

Kvalifisering av sveis:

Under kvalifisering av sveisene kom det frem at sveis fra lasersveising har noen detaljer som er annerledes enn ved konvensjonell sveising. Det éne er en skarp vinkel ved roten, og det andre er tendenser til kantsår.

Den skarpe vinkelen ved roten kommer av at en veldig liten sone blir smeltet ved lasersveising, sammenlignet med konvensjonell, og dette medfører at overgangen mellom plate og rot blir brå, og medfører en skarp vinkel. Effekten av slik vinkel må vurderes etter applikasjonen, f.eks. kjærveffekten ved utmattingsbelastning.

Kantsårene, til tross for å være innenfor akseptkriteriene, viste seg å skape noe som kunne tolkes som åpning av sprekker under bøyepøving. Ved mer detaljert analyse viste det seg dog at det ikke var sprekker, men duktil «tearing» av materialet, noe som ikke nødvendigvis er negativt. Dette er dog vanskelig å vurdere, og ville sannsynligvis blitt underkjent ved kvalifisering utenfor et forskningsprosjekt. Ved senere sveiser ble problematikken med kantsåret løst, slik at bøyepøvene så normale ut. Selv om de observerte kantsårene var grunne, så var de skarpe og hadde typisk lang utstrekning. Det er derfor en usikkerhet omkring betydningen av slike kantsår med tanke på utmattingssegenskaper sammenlignet med tradisjonelle sveiser. Betydningen av slike kantsår bør dokumenteres for utmattingspåkjennte applikasjoner dersom de skal tillates.

Page 2 of 3

Konklusjonen er at lasersveis må vurderes og bedømmes opp imot egnede krav for lasersveis, og ikke opp mot hva man er vant til å se for konvensjonell sveising. Dette kan bli utfordrende for inspektører som ikke har inspirert slike sveiser før.

Et punkt som viste seg å være et mindre problem enn først antatt var hardhet. På grunn av den lokalt høye varmetilførselen, og dermed raske avkjølingshastighet, ble det antatt at det ville være en utfordring å få hardhetsverdier ned til et akseptabelt nivå i varmpåvirket sone. Dette ble ikke et problem, trolig grunnet blant annet et materialvalg egnet for lasersveising (lavt karboninnhold).

Ikke-destruktiv prøving:

Ikke-destruktiv prøving (NDT) av lasersveiste buttforbindelser viste seg å være mer utfordrende enn først antatt. Spesielt på grunn av I-fugen som er mulig ved bruk av lasersveising så egner ikke konvensjonell ultralyd seg som en metode for å pålitelig oppdage volumetriske feil. Dette er på grunn av hvordan lyden reflekteres fra eventuelle feil i «fusion line», som er annerledes enn ved en V-fuge. Spesielt viktig er dette også på grunn av hvor liten en I-fuge vil være, og det kan oppstå situasjoner hvor man bommer på fugen. Radiografi, en annen metode som er velkjent, vil også være problematisk både med tanke på fuge-vinkelen, men også spesielt hvordan dette ville påvirke produksjonen.

I dette prosjektet ble det derfor besluttet å bruke PAUT og TOFD, to metoder som tilsammen ga en god dekningsgrad av sveisens tykkelse, og som ville kunne finne eventuelle feil i «fusion line».

Konklusjonen fra dette prosjektet er at ved bruk av lasersveising vil ikke konvensjonell NDT nødvendigvis være egnet. Hver sveisefuge bør vurderes av kompetente NDT-eksperter for å finne beste metode for å finne eventuelle feil. Ved bruk av en uegnet NDT-metode vil det kunne skapes en falsk trygghet.

Kombinert med lasersveisingens gode reproducerbarhet er det meget viktig å kunne identifisere relevante feil, da man kan argumentere for at eventuelle feil som blir oversett under kvalifisering da har stor sannsynlighet for å være med videre i produksjon, grunnet bedre repeterbarhet av prosessen.

Tilkomst under produksjon må også vurderes under planleggingen av NDT, da flere sveiser kan være vanskelig å få tilgang til ved senere inspeksjon etter nødvendig holdetid. Dette er en utfordring også ved konvensjonell sveising, men ved automatisert laser- / laserhybridsveising får man nye utfordringer, som f.eks. sveising av T-forbindelser fra én side (se neste punkt).

T-forbindelser og a-mål:

Laser- og laserhybridsveising gir en stor produksjonsfordel for T-forbindelser i og med at det blir mulig å kun sveise fra den ene siden, men få en fullverdig sveis på grunn av full gjennombrenning. Utfordringen med dette er at konstruksjonsdetaljer kan ha vært designet med tanke på sveising fra begge sider, med et visst a-mål. De to problemstillingene man får da er:

- Avhengig av prosess kan man få mindre a-mål enn ved konvensjonell prosess på den ene siden.
- Den andre siden vil ikke ha et a-mål i det hele tatt.

Det positive med laser- og laserhybridsveising er at det er mulighet for full gjennombrenning hvor dette ikke har vært mulig med konvensjonell sveising. Man kan dermed argumentere for at full gjennombrenning kan erstatte manglende a-mål, såfremt arealet er tilsvarende. Full gjennombrenning bør være en forutsetning, da det er vanskelig å kontrollere grad av gjennombrenning.



Page 3 of 3

Sincerely
for DNV AS

Stian Gurrik
Senior engineer

Mobile: +4797018189
Stian.Gurrik@dnv.com

Tone Hasle
Principal Engineer

Mobile: +4790147508
Tone.Hasle@dnv.com



Statens vegvesen
Pb. 1010 Nordre Ål
2605 Lillehammer

Tlf: (+47) 22 07 30 00

firmapost@vegvesen.no

vegvesen.no

Tryggere, enklere og grønnere reisehverdag