

Jan-Are Gudbrandsen

Er FS- sveising av aluminiumprofiler til paneler til bruk i bruer lønnsom og bærekraftig?

Master in Sustainable manufacturing

Inn levering : Juni 2021

Veileder: Geir Ringen

Norwegian University of Science and Technology

Department of Manufacturing and Civil Engineering

Sammendrag

Det er gjennomført en studie knyttet til FS-sveising av større aluminiumsprofiler. Studien er gjennomført som en kombinasjon av litteraturundersøkelser og innhenting av kvantitative data og en gjennomført kvalitativ intervjurunde med produsenter av ekstruderte profiler, FS-sveiste paneler i aluminium og produsenter av utstyr og jigger for FS-sveising.

Formålet med undersøkelsen var å vurdere om det var et økonomisk grunnlag for å bygge en bru basert på FS-sveiste varmekstruderte aluminiumsprofiler i lengder av 15 meter.

Oppgaven avdekket manglende informasjon som kunne danne grunnlag for endelig vurdering der blant annet manglende kunnskap om krav til ekstruderte profiler for FS-sveising ikke var tilgjengelig. Endelige dimensjoneringskriterier synes ikke å være avdekket med hensyn på materialvalg da utmattingsdata knyttet til både til ferdig ekstruderte profiler og FS-sveiste sammenføyninger ikke var tilgjengelig.

Basert på manglende kunnskap, noe som ble avdekket i prosjektet kom man ikke i mål med p svare på hovedspørsmålet med forskningen.

Forord

Denne masteroppgaven er utarbeidet vårsemestret 2021 ved NTNU. Oppgaven, som ble definert som en del av et prosjekt der blant annet Leirvik Sveis as og Hydro Aluminiumsprofiler med flere deltar, er knyttet til mulig bruk av friksjonssveiste (FSW) aluminiumsprofiler som konstruksjonsmateriale i hengebruere. Aluminium vurderes som erstatning for stål, som tradisjonelt har vært benyttet i hengebroer i Norge.

Oppgavens gjennomføring er preget av den pandemien som hele verden var utsatt for i 2020-2021 og som skapte store begrensninger i muligheten til reising og fysiske laborasjoner. Mange virksomheter både i Norge og over hele verden hadde sine medarbeidere på hjemmekontor noe som innvirket på muligheten til å få tilgang og kontakt med de optimale ressurser som kunne bidra til å få mest mulig underlag for oppgaven. På toppen av dette la den eneste leverandøren av teknologi innen Friksjonssveising (FSW) i Skandinavia, ESAB as, i mars 2021 ned all sin virksomhet knyttet til FS-Sveising. Ønskede aktiviteter og tilgang på til forsøk med testresultater ble dermed ikke lenger mulig noe oppgavens forskningsdel også bærer preg av.

Underveis i oppgaven ble det etter hvert en følelse av å "male seg inn i et hjørne". Kunnskap jeg trodde eksisterte og som jeg kunne få tilgang knyttet til FS-sveising, krav til sveisingen, fremstilling av profiler og kostnader både for profiler og sveiste paneler fantes ikke, eller ble ikke gjort tilgjengelig. Forklaringen var at dette var bedriftsintern informasjon som man av konkurransehensyn ikke kunne opplyse om. Så hva gjør man da? Tar tak i oppgaven på nytt og forutsetter at de "ting" man trodde det fantes kunnskap og kompetanse innen, ikke fantes? Dette preger oppgaven da den i større grad hensyntar det man avdekket, eller det man ikke avdekket, underveis i prosjektperioden.

Geir Mosaker på Leirvik sveis har vært en god diskusjonspartner i de kontakter jeg har hatt med aktører, nasjonalt og internasjonalt, både innenfor produksjon av aluminiumsprofiler og FS-sveiste aluminiums paneler. En stor takk til han.

Til slutt vil jeg takke min veileder ved NTNU, Geir Ringen, for faglige innspill og fruktbare tilbakemeldinger. Særlig når jeg, på basis av både pandemi, nedleggelse av samarbeidspartner i prosjektet og at jeg ikke fikk tilgang til nødvendig informasjon ble preget av stor frustrasjon, fikk støtte til å fortsette på tross av de relativt store utfordringene med å skaffe det ønskede underlaget for å best mulig svare på oppgavens problemstilling.

Harstad, juni 2021

Jan-Are Gudbrandsen

Innhold

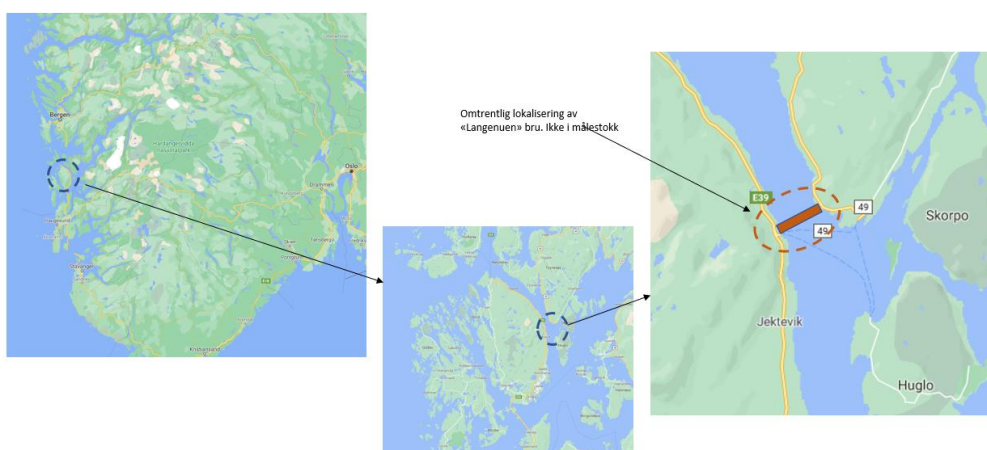
Sammendrag	2
Forord	3
1 Bakgrunn.....	6
1.1 Introduksjon	8
1.2 Oppbygging av brukonstruksjon, dekke	9
1.3 Definisjon av problem	10
1.4 Oppgavens oppbygging	10
1.5 Oppgavens begrensninger.....	11
2. Forskningsmetodikk	12
2.1 Metode benyttet i oppgaven	14
2.2 Validitet og pålitelighet	15
3. Litteratur gjennomgang.....	16
3.1 Egenskaper til metaller.....	17
3.1.1 Mekaniske egenskaper	17
3.2 Fysikalske egenskaper til metaller.....	25
3.2.1 Tetthet - vekt.....	25
3.2.2 Smeltetemperatur	26
3.2.3 Termisk utvidelseskoeffisient.....	26
3.3 Korrosjonsegenskaper	28
3.3.1 Passivisering	29
3.4 Aluminium and aluminium legeringer.....	29
3.4.1 Aluminium kvaliteter	31
3.4.2 Styrke mekanismer i aluminium.....	32
3.4.3 Løsningsstyrking og partikkelstyrking.....	33
3.4.4 Fabrikasjon av AL6063-T6 og Al6082-T6	34
3.5 Bearbeidingsmetoder for aluminium og aluminiumslegeringer	35
3.5.1 Ekstrudering av aluminiumsprofiler (plastisk bearbeiding)	36
3.5.2 Standard krav til ekstruderte profiler.....	38
3.6 Sammenføyning av aluminium og aluminiumslegeringer	38
3.6.1 Sammenføyningsprosesser	39
3.6.2 TIG sveising.....	41
3.6.4 MIG sveising.....	42
3.7 Friction Stir Welding.....	43
3.8 Kost-nytte vurderinger	46
3.8.1 Kostnader forbundet med sveisearbeider	47

3.9 Bærekraft.....	48
4 CASE- studie Langenuen	50
5.1 Hvilke forutsetninger lå til grunn for oppgaven	50
5.1.1 Kvantitative spørsmål	51
5.3 Hva innvirker på kvaliteten på en FS-sveist forbindelse	53
5.2.1 Varmetilførsel ved sveising	54
5.3 Hvilke kriterier ligger til grunn for valg av metode og materialvalg.....	55
5.4 Hvilke kostander er forbundet med fremstilling av profiler	56
5.5 Hvilke kostnader er forbundet med fremstilling av paneler	57
5.6 Hvordan vil valg av aluminium innvirke på bærekraft i forhold til stål	57
6 Diskusjon	57
8 Konklusjon (1-2 sider).....	59
8.1.1 FS-sveising	60
8.1.2 Utmattingssegenskaper på tykkveggede profiler	60
8.1.3 Dimensjonsnøyaktighet.....	60

1 Bakgrunn

Langenuen prosjektet¹, som vurderer bygging av en hengebru i aluminium som et alternativ til en bru i stål, ser på mulige sammenføyningsprosessene for å produsere aluminiums paneler sammenføyd av ekstruderte aluminiumsprofiler, paneler som inngår i bro kassene , der blant annet er "*Friction Stir welding*" er sentral i vurderingen. Med dette som grunnlag ble jeg opptatt av muligheten til å benytte FS-sveising (FSW: Friction Stir Welding)² som ble vurdert i rapporten, som en aktuell metode, i en produksjonslinje for aluminiums broer, til sammenføring av ekstruderte aluminiumsprofiler til større brupaneler i aluminium. Paneler som deretter skulle skjøtes sammen til seksjoner ved bruk av MIG sveising, manuelt, mekanisert eller robotisert. Som Erga m.fl viser til så finnes det over 17.000 broer og fergekaier i Norge som i all hovedsak består av betong i kombinasjon med stål eller rene stålbruer. I tillegg planlegges det i fremtiden med relativt mange bruer i ulike størrelser samt oppdateringer av eksisterende bruer der aluminium kan være et alternativ.

Studien knyttet til bruk av aluminium tar utgangspunkt i et prosjekt der det vurderes å erstatte ferge på E6 mellom Bergen og Haugesund med 2 bruer, hvorav den ene har fokus i prosjektet for kryssing av fjorden Langenuen og den andre knyttet til Boknafjorden. Kryssing av Boknafjorden³ vil ha annen løsning enn kryssing av Langenuen der man ser på bruken av en "tradisjonell" hengebru med et bruspenn på om lag 1235 meter (DR.TECHN. Olav Olsen, 2020) og en totallengde på brua på 1775 meter. Figur 1 Omtrentlig lokalisering av Langenuen bru. Kartutsnitt fra Google (kilde , Olav Olsen 2019) viser planlagt plassering av hengebru over Langenuen (DR.TECHN. Olav Olsen, 2020).



Figur 1 Omtrentlig lokalisering av Langenuen bru. Kartutsnitt fra Google (kilde , Olav Olsen 2019)

¹ Dr.Tecn Olav Olsen(2020) Rapport. Langenuen Suspension Bridge, Aluminium bridge girder alternative.

² FSW – Friction Stir Welding, ingen "god" Norsk oversettelse så forkortelsen FS-sveising benyttes i denne oppgaven som en "type" friksjonssveising som blir nærmere gjennomgått senere i oppgaven.

³ På grunn av Boknafjordens bredde er det foreslått løsninger basert på et konsept med flytebru..

Bruk av aluminium som konstruksjonsmateriale i bru konstruksjoner er svært lite utbredt i forhold til stål og betong. I all hovedsak har bruprosjekter der aluminium er valgt vært basert på spesielle forhold⁴ der man har hatt begrenset tilgjengelig kunnskap om bruk av aluminium i forhold til stål. Konservative dimensjoneringsregler har også bidradd til at bruken har blitt noe redusert sammen med en tradisjonell vurdering om at konstruksjoner i aluminium er dyrere enn konstruksjoner i stål i tillegg til at det er manglende erfaring knyttet til bruken av aluminium (Jordan, Rao, Aamaro, & Allison, 2019)

Aluminium er også kjent som et materiale som har gode egenskaper, avhengig av kvalitet, når det gjelder motstand mot korrosjon, er lett og ikke minst er resirkulerbart i det "uendelig". Smelting av resirkulert aluminium utgjør 5% av energibruken i forhold til å fremstille materialet fra malm (Constellium, 2016). Bruk av resirkulert aluminium i bruer vil derfor også være gunstig med hensyn på bærekraft.

Aluminium som konstruksjonsmateriale kan hvis rett kvalitet er benyttet, stå ute i nesten ubegrenset tid uten noen form for overflatebehandling⁵. En undersøkelse av eksisterende mindre bruer i Norge i 2017 (Erga, 2017) viste at aluminium som konstruksjonsmateriale ikke korroderte og reduserte vedlikeholdskostnadene med over 70% sammenliknet med tilsvarende strukturer i stål.

Med bakgrunn i at aluminium var antatt å være et "mer" bærekraftig material i forhold til stål ble oppgavens opprinnelige problemstilling utarbeidet og et arbeid med å skape mest mulig grunnlag for å løse oppgaven ble igangsatt.

Det ble etter hvert klart at de forutsetningene som var gitt i rapporten for Langenuen prosjektet kun hadde skrapet i "overflaten" når det kom til FS-sveising, herunder tekniske krav, toleranser på profiler og toleranser på ferdig sveiste paneler, maskiner, utstyr mm. Særlig viste det seg at både toleranser på selve profilene og overflaten etter ekstrudering (Sundstrøm, 2018) og utførelsen av FS-sveisingen kunne innvirke betydelige på utmattings egenskaper (Lombard, 2007) . Dette medførte at oppgavens problemstilling underveis ble omdefinert til å ha fokus på krav, og muligheten, til å benytte FS sveising for sammenføyning av ekstruderte aluminiumsprofiler til ferdige paneler i størrelsesorden 15000 x 4000mm. Oppgaven ble av tids- og praktiske årsaker derfor begrenset til FS-sveising av paneler. Prosessen med sammenføyning av paneler til større broseksjoner er kun overfladisk omhandlet.

⁴ Dette kunne typisk være knyttet til egne prosjekter der man skulle fremme bruk av aluminium knyttet til lokal, regional eller nasjonal aluminiumsindustri.

⁵ Informasjon fra Leirvik Sveis as om at boligkvarteret på Snorre-plattformen, utført i aluminium, har stått ubehandlet offshore siden det ble installert i 1991.

1.1 Introduksjon

Frem til i dag har det i Norge ikke blitt bygd hengebroer ved bruk av brobjelker i aluminium (DR.TECHN. Olav Olsen, 2020). Mindre broer som Arvida bygd i 1950 i Canada og Forsmo bygd i 1995⁶ var bygd i samarbeid med aluminiumsindustrien og forskningsinstitusjoner for å promotere aluminiumsindustrien, men har ikke gitt forventet utvikling når det gjelder bruk av aluminium i både små og store vei broer. I og med at aluminium kan medføre at broen blir lettere som igjen reduserer omfanget av infrastruktur og støttestruktur inkludert slankere wirer (for hengebroer), vil en bru i aluminium vurderes å kunne gi en mer bærekraftig alternativ til hengebroer i stål (DR.TECHN. Olav Olsen, 2020). Dette inkluderer måten aluminiumet som benyttes i broen er fremstilt (nytt material fra malm eller resirkulert materiale) og aluminiums gode egenskaper når det gjelder værbestandighet der riktig valg av kvalitet kan gjøre det unødvendig med overflatebehandling av strukturen, både når konstruksjonen er ny og gjennom konstruksjonens levetid.

Aluminium brukes innen en rekke områder der kombinasjon av lav vekt, styrke og korrosjonsegenskaper gjør materialet attraktivt (Martin, 2015). I Norge har materialet hatt stor anvendelse inn båtbygging og til bruk i offshore iblant annet boligkvarter og helikopterdekk. Både med hensyn på materialets lave vekt, styrke og ikke minst gode korrosjonsegenskaper.

FS-sveising, som er sammenføyningsprosess der materialene som skal sammenføres ikke smelter, men der man oppnår en sammenføyning (sveis) gjennom introduksjon av varme og trykk (Lombard, 2007). I en verden der man stadig ser på muligheten av å redusere vekt og samtidig bedre ytelsen har ulike sammenføyningsmetoder basert på at materialene smeltes sammen blitt utviklet og forbedret. Eksempelvis har det typisk for Norsk industri vært TIG-sveising, MIG sveising, plasmaveising og friksjonssveising som har vært brukt for sammenføyning av aluminium.

Aluminium som konstruksjonsmateriale har egenskaper som skiller seg fra stål og for konstruktører og forskere som skal benytte aluminium i konstruksjoner er det avgjørende at de har detaljert kunnskap om hvordan utmattingsegenskapene i en FS-sveist forbindelse er påvirket av parameterne og forholdene ved sveisingen (Jordan, Rao, Aamaro, & Allison, 2019).

FS-sveising er i vurdert til å være den viktigste utviklingen innen sammenføyning av metaller (ERASMUS Project E+ 2017-1-SK01-KA202-035415, 2017) på mange år og er definert som en "grønn" teknologi på grunn av energieffektiviteten, miljøvennlighet og allsidighet. Sammenliknet med tradisjonelle sammenføyningsmetoder⁷ benyttes mindre energi pr meter sveis, ingen bruk av gass- eller pulverbeskyttelse under sveisingen. Siden metoden ikke smelter metallet⁸ og det ikke benyttes tilsett

⁶ Foredrag av Dr.Ing Trond Furu , Norsk Hydro ASA

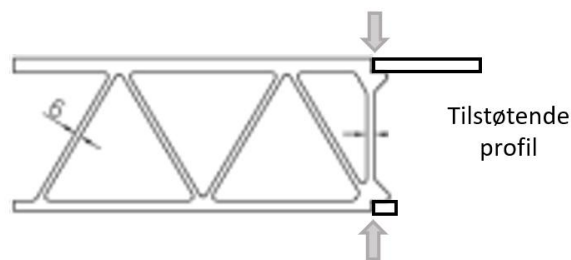
⁷ Tradisjonelle metoder – TIG og MIG

⁸ Sammenføyning ved diffusjon ved temperaturer under metallens smeltetemperatur

materiale under sveisingen er det ikke knyttet usikkerheter til valg av tilsett material (som er typisk for tradisjonelle metoder) noe som gjør at nesten alle aluminiums kvaliteter kan FS-sveises, også de kvaliteter som er dårlig sveisbare med tradisjonelle metoder (Misha, 2005). Metoden er også godt egnet til å sammenføye ulike metaller, metaller som ikke kan sammenføyes med tradisjonelle smeltesveisemetoder.

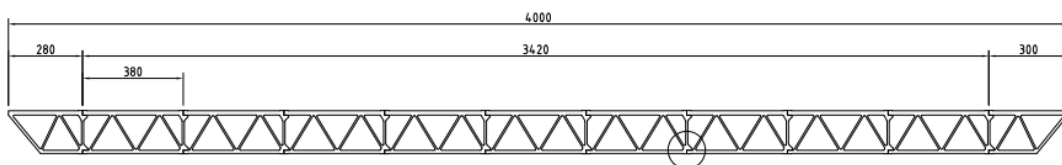
1.2 Oppbygging av brukonstruksjon, dekke

For å fremstille brosegmentene som skal inngå i dekket er det vurdert sammenføyning av ekstruderte aluminiumsprofiler med lengde 15 meter som FS-sveises sammen i lengderetningen til en total bredde på 4 meter. Den vurderte sammenføyningen baseres på at profilene settes sammen som vist på Figur 2 Prinsipp med FS-sveising av ekstruderte profiler (kilde Leirvik sveis as). Både oversiden og undersiden av profilen sammen føyes samtidig med FS-sveising. Pilene på figur angir FS-sveisens plassering



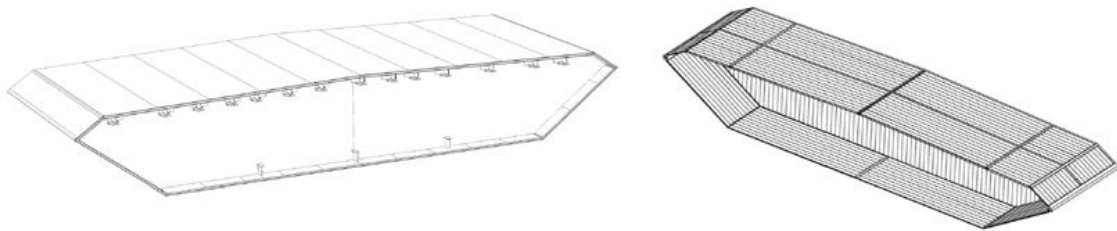
Figur 2 Prinsipp med FS-sveising av ekstruderte profiler (kilde Leirvik sveis as)

De sammenføyde profilene FS-sveises sammen til paneler med bredde 4 meter og lengde 15 meter slik det er vist på Figur 3 Ferdig sveiste paneler (kilde: Leirvik sveis as).



Figur 3 Ferdig sveiste paneler (kilde: Leirvik sveis as)

De ferdige sveiste panelene kan settes sammen på 2 ulike måter (DR.TECHN. Olav Olsen, 2020), enten langsetter bru kassene eller på tvers av bru kassene slik det er visst på Figur 4.



Figur 4 Alternative orientering på ferdig sveiste paneler i brukassene(kilde: Olsen)

1.3 Definisjon av problem

Denne oppgaven er utviklet og gjennomført med det mål å svare på hovedspørsmålet i denne forskningen – **er FS-sveising av aluminiumsprofiler til paneler til bruk i brukonstruksjoner lønnsom og bærekraftig?** For å svare på dette var det nødvendig å få svar på følgende:

- *Hvilke forutsetninger lå til grunn for oppgaven?*
- *Hvilke krav stilles til aluminiumsprofiler som skal FS-sveises?*
- *Hva er det som innvirker på kvaliteten på en FS-sveist forbindelse?*
- *Hvilke dimensjoneringskriterier ligger for valg av metode og materialvalg?*
- *Hvilke kostnader er forbundet med fremstilling av profiler*
- *Hvilke kostnader er forbundet med fremstilling av paneler*
- *Hvordan vil valg av aluminium innvirke på bærekraft⁹ i forhold til valg av stål*

Oppgaven, som ble gjennomført avdekket etter hvert som tiden gikk og informasjon ble tilgjengelig både gjennom litteratursøk og ved kontakt med ulike produsenter, forhold som medførte at definisjonen av det opprinnelige hovedspørsmålet ble noe endret underveis.

1.4 Oppgavens oppbygging

Oppgaven tar for seg metoden benyttet for å skape kunnskap som gir grunnlag for å svare på spørsmålene.

⁹ I denne oppgaven er vurdering rundt bærekraft hovedsakelig knyttet til miljø, men noen innspill knyttet til lokale/regionale eller nasjonale påvirkninger blir diskutert

Oppgaven er, etter at metode benyttet for forskningen, bygd opp med en gjennomgang av aktuell teori som, på basis av oppgavens forskningsspørsmål med tilhørende underkapittel, vurderes essensiell for å svare på spørsmålene.

Deretter tar oppgaven for seg de resultater man har innhentet gjennom litteratursøk og intervjuer av både produsenter av profiler, produsenter av FS-sveise produkter og leverandører av FS-sveisemaskiner med tilhørende utstyr.

Oppgave diskuterer deretter de ulike resultater knyttet til teori med henvisning til de aktuelle forskningsspørsmål

1.5 Oppgavens begrensninger

Oppgaven, selv om den tar for seg utmatting knyttet til FS-sveiste forbindelser, går ikke inn i dybden i selve utmattingsproblematikken. I tillegg vil oppgavens ha begrensninger når det gjelder detaljer knyttet til ekstrudering selv om oppgaven omhandler de krav som stilles til ekstruderte profiler som skal FS-sveises. Oppgaven vil heller ikke ha fokus på de valgte utforminger av profiler eller gå i dybden når det gjelder materialkvalitet som er ønsket benyttet i broprosjektet selv om materialkvaliteten av praktiske årsaker sammenlikning med andre kvaliteter.

Oppgaven omhandler kost—nytteverdier for bruk av aluminium i broer men vil ha begrensninger når det gjelder nøyaktighet i analysen da ingen leverandører, verken av profiler og /eller FS-sveiste paneler ville oppgi eksakte priser på de ønskede profiler og paneler. Det at leverandører ikke gir informasjon knyttet til pris og fremstilling er særlig typisk innenfor denne relativt nye teknologien (FSW) som planlegges benyttet for sammenføyning av aluminiumsprofiler (Jordan, Rao, Aamaro, & Allison, 2019). Det er heller ikke gjennom litteratursøk og kontakt med ulike leverandører av FS-sveiste produkter funnet noen som har produsert paneler eller liknende av større ekstruderte aluminiumsprofiler i kvalitet Al6082-T6 som ønskes vurdert i denne oppgaven.

Oppgaven vil heller ikke gå i dybden på mulige mekanisering- automatisering eller robotiserte løsninger for sammenføyning av paneler, dette selv om aktuelle teknologier for sammenføyning av panelene diskuteres rent prinsipielt.

Oppgaven tar heller ikke for seg problematikk knyttet til dimensjonering, dvs hvorvidt statiske beregninger er avgjørende for valg av materialkvalitet dynamisk beregninger¹⁰ skal danne grunnlag for

¹⁰ Statistiske beregninger sammenlikner materialer basert på flytegrense. Dynamiske beregninger hensyntar utmatting, dvs hvordan konstruksjonen som utsettes for varierende belastninger over tid vil oppføre seg..

valg av materialkvalitet. Men ulike problemstillinger og forhold som kan innvirke på utmattingssegenskapene vil drøftes.

2. Forskningsmetodikk

Forskning er en systematisk prosess som går ut på å samle inn, analysere og tolke data og informasjon for å øke kunnskapen og forståelsen knyttet til et forhold, fenomen eller tilstand som er interessant (Leedy, 2015).

I startfasen av en forskningsoppgave så definerer man et problem som man ønsker svar på hvoretter man definerer hva man faktisk ønsker svar på. For å ha et best mulig grunnlag for både å definere et problem for å finne ut hva som faktisk er av kunnskap omkring problemstillingen eller det man ønsker å få svar på og forhold som kan støtte opp om eventuelle data som samles inn, er det alltid en fordel å starte med en gjennomgang av litteratur som finnes innenfor emnet (Leedy, 2015).

Som hjelp i å få svar på hovedspørsmålet deler man ofte inn problemstillingen inn i mindre problemstillinger ("underspørsmål") som man enklere kan håndtere (Leedy, 2015). De mindre problemstillingene må kunne undersøkes hver for seg men må samtidig være et bidrag til å svare på hovedspørsmålet med forskningen.

Som grunnlag for forskningen tar man ofte utgangspunkt i antagelser eller hypoteser, eksempelvis i denne forskningen, at FS-sveising av store ekstruderte aluminiumsprofiler er knyttet til leveranse av tilstrekkelig mengde profiler til en akseptabel pris, eller at valg av aluminium i stedet for stål i bruer er knyttet til manglende kunnskap hos kjøperne av bruen om materialet aluminium. Som Leedy m.fl viser til så er det, selv om man har noen hypotese, viktig å gå inn i hypotesene med et åpent sinn om hva man finner, eller ikke finner.

Et viktig forhold for å få svar på forskningens hovedproblem og de mindre problemstillingene i oppgaven, er å planlegge selve forskningen og hvilke metoder som skal benyttes for å skaffe frem de ønskede og relevante data for oppgaven. På grunnlag av innsamlede data, organiserer å analysere disse relatert til forskningens hovedproblem og de mindre problemstillingene som er definert og vurdert som viktig for å svare på hovedspørsmålet (Leedy, 2015). I denne oppgaven ble det planlagt benyttet en kvantitativ spørreundersøkelse og en kvalitativ undersøkelse, i tillegg til litteratursøk, for å skaffe relevant data til hjelp i forskningen.

Bakgrunnen for valg av en kvantitativ spørreundersøkelse var å få frem, med klare forhåndsdefinerte spørsmål hva slags tekniske og kommersielle data knyttet til FS-sveisingen som var tilgjengelig og fra ulike leverandører av profiler, maskiner og FS-sveiste paneler. I dette ligger at de fleste av de mindre problemstillingene som er definert i oppgaven er knyttet til kvantitative svar som skal bidra til å svare på hovedspørsmålet. En del av spørsmålene var også formulert slik at det kunne lages nye variable basert på enkeltinformasjoner fra andre variabler. Dette er en metode som benyttes når det som det spørres om er så sammensatt at det er vanskelig å måle disse med et spørsmål. Dette er definert som sammensatte mål (Christoffersen, 2011) . Et eksempel på dette knyttet til oppgaven er der man i ett spørsmål ber om hvilke toleransekrav man har til ekstruderte profiler og der man samtidig i et annet spørsmål spør om hvilke krav man har til toleransene ved FS-sveising. Hver av disse vil gi individuelle svar som kan knyttes opp mot en vurdering om det er samsvar mellom krav til FS-sveisingen og de krav som en produsent har på profiler som ekstruderes. Dette igjen vil ha betydning for en "mulighetsvurdering" der man ser på om kravene kan møte hverandre og økonomisk vurdering knyttet til eventuelt forarbeid før FS-sveising, etterarbeid på profiler, dimensjonering av maskin for FS-sveising mm.

For å skaffe mer kunnskap omkring prosessene, grunnlag for valg av materialer i brukonstruksjon og en bredere forståelse av grunnlag for eventuell bruk av aluminium i stedet for stål i bruer med bruk av FS-sveise ekstruderte profiler ble det planlagt gjennomført en kvalitativ undersøkelse. Denne er planlagt gjennomført som et intervju, enten på tlf eller Teams. I følge Christoffersen m.fl er dette den mest benyttede metoden for å innhente kvalitative data innen forskning.

En kvalitativ tilnærming til forskningen kan ha store fordeler. Gjennom godt formulerte spørsmål og oppfølgingsspørsmål i en intervjusituasjon kan man allerede i starten av et prosjekt få innsikt i forhold som det er knyttet mindre eller manglende kunnskap til. Muligheten til å få en bredere bilde av sammensatte problemstillinger eller forhold knytte til forskningen kan avdekkes. Underveis i prosjektet kan man som forsker avdekke forhold som man ønsker å få avklart noe et intervju kan verifisere eller avkrefte. Ikke minst er vel formulerte intervjuer og godt gjennomførte intervjuer til hjelp i å avdekke potensielle problemer, hindringer eller uforutsette forhold knyttet til oppgavens utfordringer (Leedy, 2015).

Når formålet med forskningen er knyttet til et enkelt prosjekt der man ønsker å få mer dybdekunnskap knyttet til en problemstilling er case studie typisk metode for forskningen (Leedy, 2015). Case studier er også aktuelle når spørsmålene i forskningen ofte kan linkes til hvordan eller hvorfor ting skjer eller skal skje (Yin, 2017). Christensen m.fl beskriver case studier som et forskningsdesign som kan benyttes når ett eller få objekter studeres inngående.

2.1 Metode benyttet i oppgaven

Definisjonen av hovedproblemstillingen var basert på de rapporter etc som var tilgjengelig knyttet til prosjektet Langenuen der en så på, og vurderte, muligheten til å benytte ekstruderte aluminiumsprofiler som skulle sammenføres med FS-sveising for fremstilling av større paneler som kunne settes sammen til brusegmenter. Det grunnleggende i hele rapporten var å danne et grunnlag for å se om bruer kan produseres i aluminium i stedet for stål. Selv om Leedy m.fl viser til at det er viktig å begrense antall mindre problemstillinger ble det vurdert at de 7 underspørsmålene definert i denne oppgaven, var av stor betydning for å kunne svare på hovedspørsmålet.

I og med at det er få respondenter og forskningen skal ta for seg ett bestemt eksempel er en case studie aktuell for denne forskningen (Yin, 2017).

For å kunne ha et bredest mulig grunnlag for å svare på forskningsspørsmålet ble det foretatt litteratursøk knyttet til både FS-sveising, "*state of the art*" - erfaringer knyttet til sveising på aluminiumslegeringer og egenskapene til ekstruderte større profiler i større godstykkelser. Litteratursøkene ble også knyttet til mulig erfaringer i bruk av aktuell materialkvalitet som var vurdert i oppgaven og de egenskapene en FS-sveist forbindelse kunne oppnå etter sveising på de aktuelle kvalitetene. I relasjon til stål som i all hovedsak er benyttet i dag omfattet litteratursøket også en vurdering av egenskaper der stål vs aluminium kunne sammenliknes, inkludert søk knyttet til bærekraft og forhold som innvirker på kost-nytte vurderinger ved bruk av stål og aluminium i bruer.

Den kvantitative datainnsamlingen ble basert på et forhåndsdefinert spørreskjema der aktuelle leverandører av aluminiumsprofiler, leverandører av utstyr for FS-sveising og produsenter av FS-sveiste paneler ble forespurt. Det ble avdekket et relativt begrenset antall potensielle kandidater for spørreundersøkelsen "*world wide*". Totalt ble det sendt forespørsel til 17 bedrifter lokalisert i både Norge, Skandinavia, øvrige deler av Europa, Amerika og Asia. Bedriftene ble plukket ut basert på et søk på internett over potensielle leverandører. Der det ble mulig å få en kontaktperson til bedriftene ble forespørselen sendt direkte, i de øvrige tilfeller ble det, etter avtale, sendt forespørsel til informasjonsavdelingen i de aktuelle bedriftene. I tillegg ble det av prosjektet som denne oppgaven samarbeider med (*Langenuen*), gitt navn på aktuelle kontaktpersoner i noen bedrifter som ble kontaktet direkte.

Spørsmålene i den kvantitative undersøkelsen var basert på at respondenten skulle svare på faktisk oppgitte tallverdier knyttet til både tekniske krav, toleranser og pris. En del spørsmål var også knyttet til rene ja/nei spørsmål.

For å svare på spørsmål knyttet til materialvalg i bruer og vedlikeholdskostnader knyttet til bruer i stål ble Statens vegvesen kontaktet.

For å få utdypende og et bredere grunnlag for å vurdere hvilke forhold som kunne innvirke på å svare på forskningens hovedspørsmål ble det gjennomført kvalitative intervjuer.

Valg av intervjuobjekter til den kvalitative spørningen skulle i første omgang baseres på tilbakemeldinger fra den kvantitative undersøkelsen der noen aktuelle respondenter, dvs noen av de som hadde svart på de kvantitative spørsmålene, ble forespurt om de kunne svare på en del spørsmål. 6 kandidater, fra Europa (Norge, Sverige, Tyskland) , USA og Asia var positiv til et muntlig kvalitativt intervju. I tillegg var det betydelig innledende diskusjon basert på en intervjurunde med en produsent av FS-teknologien som dessverre midt i prosjektperioden valgte å legge ned satsningen knyttet til FS-sveising. Imidlertid hadde denne bedriften gjennom sin faglige kunnskap og erfaring gitt gode innspill som har bidratt til å forme innholdet i mange av de etterfølgende spørsmålene som danner grunnlag for resultatene i denne rapporten fra forskningen.

2.2 Validitet og pålitelighet

En viktig forutsetning for at forskningen skal være pålitelig er at resultatene fra forskningen gir nøyaktig, meningsfull og pålitelige resultater som kan bidra til å svare på spørsmålene med forskningen (Leedy, 2015). Et annet forhold avgjørende for påliteligheten av forskningen er at konklusjonen fra forskningen kan generaliseres. Validiteten omhandler forskerens fremgangsmåte og funn på en slik måte at den reflekterer og viser formålet med oppgaven og representerer virkeligheten, dvs at de funn man presenterer gjenspeiler de faktiske forhold når forskningen ble gjennomført (Christoffersen, 2011).

For å skape pålitelighet av de data jeg har samlet har jeg beskrevet hele forskningsprosessen noe Christoffersen m.fl er en god måte å sikre pålitelighet og validitet av de data som benyttes i oppgaven.

Kvaliteten på informantene, dvs intervjuobjektene mener jeg er god da jeg har hatt kontakt, i alle fall basert på informasjon fra bedriftene, personer som representerer både tekniske og kommersielle kunnskap i bedriftene.

Siden dette var et fagområde som fortsatt er relativt nytt og preget av egne "nisjebedrifter" som har etablert egen kunnskap med et kommersielt formål, ble det både mellom meg og aktuelle bedrifter og deltakende bedrifter i prosjektet "Langenuen" skrevet egne fortrolighetserklæringen (NDA-Non

Disclosure Agreement). Bedriftene som har vært omfattet av prosjektet er anonymisert og kan ikke gjenkjennes på svar eller responser de har gitt både i den kvantitative spørreundersøkelsen og i de kvalitative muntlige intervjuene.

3. Litteratur gjennomgang

Den teoretiske gjennomgangen har inkludert en oppsummering av de forhold som danner grunnlag for å kunne svare på oppgavens forskningsspørsmål. Teorigjennomgangen har som mål å gjøre leseren kjent med de teoretiske emnene som oppgaven omhandler slik at underlaget og den planlagte forskningen, resultater og metodene som benyttes og fremkommer i rapporten er forankret i anerkjent litteratur og kunnskap.

Siden oppgaven er basert på FS-sveising av aluminiumsprofiler startet teorikapittelet med en introduksjon til aluminium som konstruksjonsmateriale. Dette inkluderer også hvordan de ulike aluminiums kvaliteter får sine egenskaper som styrke, seighet, flytegrense og korrosjonsegenskaper. Da det i dette prosjektet vurderes å benytte aluminium i stedet for stål er egenskaper som har betydning for valg av material i denne sammenhengen omfattet av denne teorigjennomgangen. Dette inkluderer også en introduksjon knyttet til utmatting av metallene og forhold som kan innvirke på utmattingsegenskapene. Noen av de viktigste fysiske egenskapene som kan ha betydning for materialvalg omfattes i den teoretiske gjennomgangen.

Prosjektet vurderer bruk av ekstruderte aluminiumsprofiler som sammenføres til større paneler. Gjennomgang av ekstruderingsprosessen og de forhold som direkte og indirekte kan ha betydning for bruken av ekstruderte aluminiumsprofiler i brukonstruksjonen blir kort, og til dels forenklet gjennomgått i denne oppgaven. Fokus er imidlertid på omkring mulige toleranser og om det vil foreligge egenskaper gjennom profilens tykkelse inkludert overflate som kan innvirke på egenskapene i drift og ved bruk av profilene i produksjon.

Kost-nytte vurderinger er basert på en vurdering hvorvidt bruk av aluminium i en hengebru over Langenuen sammenliknet med å produsere bruene i stål vil være økonomisk fordelaktig både rent prismessig der en hensyntar bærekraft sett i relasjon til samfunnet som helhet. I tillegg vil denne vurderingen også knyttes til hvorvidt produksjon av paneler basert på ekstruderte aluminiumsprofiler vil være kommersielt mulig for en produsent av bruer eller en produsent av ekstruderte aluminiumsprofiler.

En forståelse av hvordan sveise parameterne og forholdene innvirker på utmattingsegenskapene er av stor betydning for ingeniører og forskere som skal ta i bruk FS-sveising (Jordan, Rao, Aamaro, & Allison, 2019). Selv om det finnes en del kunnskap og erfaringer knyttet til FS-sveising og sammenheng mellom sveise-parameter og en god sveiseforbindelse, forefinnes det ingen eksakt og samlet informasjon knyttet til utmattingsegenskaper til FS-sveiste forbindelser slik det forefinnes for de fleste lysbue metodene som MIG og TIG. Siden FS-sveiste forbindelser er fundamentalt forskjellig fra sveiseforbindelser basert på oppsmelting av metallet eksisterer det et betydelig gap i kunnskap knyttet til de forhold som innvirker på utmattingsegenskapene til FS-sveiste forbindelser (Jordan, Rao, Aamaro, & Allison, 2019).

Målet med denne teorigjennomgangen knyttet til FS-sveisingen er å få underlag for en vurdering av FS-sveising som metode for sammenføring av ekstruderte profiler i AL6083-T6 og Al 6063-T6.

3.1 Egenskaper til metaller

For at leseren skal ha et innblikk i de egenskaper som ansees viktig for å svare på oppgavens forskningsspørsmål der blant annet aluminium vurderes opp mot stål, er det innledningsvis gitt en gjennomgang og beskrivelse av det som til denne oppgavens forskningsspørsmål ansees å være de viktigste mekanisk og fysikalske egenskapene til metaller.

Kapittelet forutsetter at leseren har grunnleggende kunnskaper innen materiallære.

3.1.1 Mekaniske egenskaper

Mekaniske egenskaper til metaller er typisk referert i denne sammenhengen når det gjelder bruk av aluminium i bruer knyttet til fasthetsegenskaper som flytegrense, strekkfasthet, E-modul, seighet og utmattingsegenskaper¹¹. Bruddmekaniske egenskaper er ikke omhandlet i denne oppgaven (*Bruddmekaniske egenskaper, typisk referert til som CTOD-Crack Tip Open Displacement for duktile materialer benyttes for å beregne kritiske sprekk lengder i et material før det går til brudd. Sammen med utmattingsdata for aktuelle forbindelser kan dette benyttes for å beregne tid til en eventuell*

¹¹ Egenskaper som sigestyrke, dvs hvordan et material evner å bibeholde styrke og form ved høyere temperaturer, er ikke vurdert i denne oppgaven til å ha betydning for eventuelt valg av aluminium i brukonstruksjoner.

sprekk blir kritisk slik at planlagt kontroll og kontrollmetoder kan implementeres i intervaller slik at sprekker oppdages før de blir kritiske ¹²).

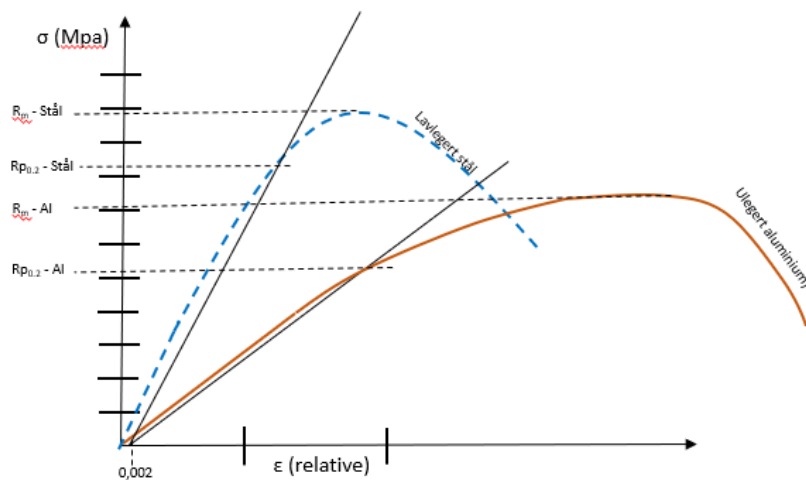
Flytegrense og strekkfasthet sammen med duktiliteten (ofte angitt som bruddforlengelse) og E-modulen er noen av de grunnleggende egenskapene som anvendes i forbindelse med valg av materialer til ulike konstruksjoner. Flytegrensen er definert som den maksimale belastningen vi kan utsette et material for uten at det plastisk deformeres, det vil si får en varig deformasjon.

Strekfastheten er den maksimale belastningen vi kan utsette et material for før det går til brudd.

Brudd forlengelse er den maksimale deformasjonen materialet får, i prosent av opprinnelig lengde, til det går til brudd. E-modulen er et mål for et mål for hvor "stivt" et material er (Kalpakjian, 2014).

Forståelse av sammenhengen mellom disse egenskapene er avgjørende for valg av både materialer, produksjon ved bruk av materialene og under bruk. Sammenhengen er skjematisk vist i Figur 5

Sammenhengen mellom tøyning, deformasjon og belastning (skjematisk, ide etter) for aluminium og for stål fås ved at standardiserte strekkprøver monteres inn i en maskin som "drar" prøven av samtidig som prøvens forlengelse måles. Strekkprøvningsdiagrammet i figuren er typisk resultat fra en slik testing.



Figur 5 Sammenhengen mellom tøyning, deformasjon og belastning (skjematisk, ide etter (Kalpakjian, 2014))

Langs x-aksen (horisontal akse) viser tøyning (ϵ - epsilon) som er en ubenevnt enhet. Langs y-aksen (vertikal akse) vises spenning som materialet er utsatt med benevnelsen Mpa (spenning er uttrykt som aktuell kraft (F) i Newton (N) dividert på tverrsnittet belastningen virker på (mm^2). Dersom vi belaster et material så mye at det får en varig deformasjon på 0.2% (0.002)¹³ definerer vi dette som

¹² Beskrivelsen er fra ikke publiserte foredragsnotater knyttet til bruddmekanikk av store godstykker i stål

¹³ Varig forlengelse vil si at når vi tar vekk belastningen har materialet blitt 0.2% lenger enn det var før belastning.

materialets flytegrense $R_{p0.2}$ ¹⁴. For henholdsvis aluminium og stål er flytegrensen skjematisk vist på figuren. Denne finner vi ved å trekke en linje gjennom den horisontale akse ved 0.2 % varig forlengelse (0.002) og strekker en linje parallelt med kurven til denne linjen krysser kurven.

Den maksimale belastningen materialet utsettes før det går til brudd definerer vi som materialets strekkfasthet, R_m ¹⁵.

Den siste egenskapen som vi teoretisk kan lese direkte ut fra et slikt diagram er hvor mye materialet lar seg elastisk¹⁶ deformere før det når flytegrensen. Dersom vi har en belastning under flytegrensen, anmerker denne på den vertikale akse og trekker en horisontal linje til vi treffer strekkkurven finner vi tøyningen i materialet. Ved deretter å trekke en loddrett kurve fra dette punktet til den treffer den horisontale akse kan tøyningen (ϵ) direkte avleses på kurven¹⁷. Har vi et emne som er utsatt for en tøyning kan vi finne emnets lengde under belastning ved å omregne tøyning til faktisk forlengelse, L , i mm slik vist:

Formel 1 Tøyning

$\epsilon = (L-L_0)/L_0$, der L_0 er emnets opprinnelige lengde

I forbindelse med testing for å finne bruddforlengelsen måler man faktisk bruddforlengelse fysisk på prøvestaven. Dette uttrykkes som A_5 eller A_{10} i materialsertifikater¹⁸ der 5 eller 10 tallet referer til diameter på prøvestaven som er benyttet ved strekkprøvingen. Den faktiske forlengelsen av en prøvestav fremkommer ved at man måler opp målelengden som er en funksjon av prøvestavens diameter. Målelengden anmerkes på prøvestaven før man strekker den av. Når prøvestaven er strukket av, setter man sammen prøvebiten og måler avstanden mellom de på forhånd avmerkede punkter som ble satt før testingen. Forlengelsen (%) fremkommer da som prosentvis endring av den opprinnelige målelengden før testingen $((L-L_0)/L_0) * 100$.

¹⁴ I tillegg til $R_{p0.2}$ benyttes også ofte $\sigma_{0.2}$ og "yield strength" for å angi flytegrensen.

¹⁵ I tillegg til R_m benyttes også σ_m og UTS (Ultimate Tensile Strength) for å angi den samme egenskapene.

¹⁶ Elastisk deformasjon, materialet går tilbake til sin opprinnelig dimensjon/lengde når lasten fjernes. Elastisk deformasjon skjer kun ved belastninger under materialets flytegrense.

¹⁷ Dette forutsetter imidlertid at prøvemaskinen som benyttes til testing er satt opp slik at den viser spenning og tøyning direkte i diagrammet ved testing.

¹⁸ For alle konstruksjonsmaterialer utvikles det materialsertifikater der metallenes egenskaper oppgis sammen med metallets kjemiske sammensetning. Har metallet vært utsatt for prosesser, eksempelvis varmebehandling eller liknende for å endre egenskapen står dette også oppgitt i materialsertifikatet.

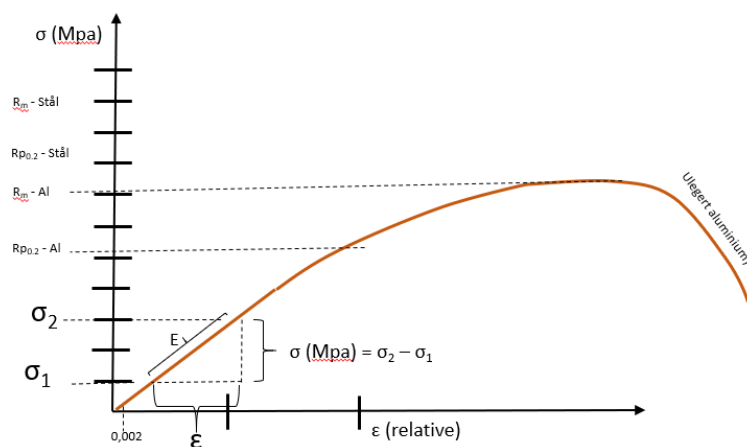
På strekk kurven kan vi finne bruddforlengelsen ved å trekke en strek fra bruddpunktet i kurven ned til den horisontale akse. Streken skal være parallelt med streken vi satt for å finne flytegrensen til materialet. For de 2 kvaliteten som omhandles i denne oppgaven er de mekaniske egenskaper som flytegrense, strekkfasthet gitt i

De mekaniske egenskapene til aluminiumskvalitetene 6063-T6 (Hydro) og 6082-T6 (Hydro) er angitt i **Feil! Fant ikke referanseilden.**

Tabell 1 Mekaniske egenskaper til AL6063-T6 og AL6082-T6

Material	Tykkelsesområde	Flytegrense (MPa)	Strekkfasthet (Mpa)	Brudd forlengelse
6063-Ty	10-25	160	195	8
6082-T6	5-15	260	310	8

Strekk kurven kan også benyttes til å beregne materialets E-modul som er et mål for materialets "stivhet" og er helningen på strekk kurven så lenge materialet ikke er plastisk deformert, dvs belastningen er under materialets flytegrense. E- modulen for stål er om lag 210.000 MPa mens den for aluminium er om lag 70.000 MPa (Gudbrandsen, 1995).



Figur 6 Beregning av E-modulen

Sammenhengen mellom spenning, E-modul og tøyning (så lenge vi er under materialets flytegrense) vist på figur 6, kan uttrykkes ved Hook's lov (Kalpakjian, 2014) med:

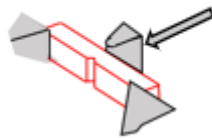
Formel 2 Hook's lov

$$\sigma = \epsilon * E \quad \text{hvor tøyningen } \epsilon, \text{ kan uttrykkes som } \Delta L / L_0 = (L - L_0) / L_0$$

Kjenner vi tøyningen i et materiale, ϵ , kan vi finne den spenningen materialet er utsatt for ved multiplisere med E-modulen. E – modulen er en konstant for ulike materialkvaliteter og er oppgitt i tekniske tabeller.

Merk at tøyningen, ϵ , er dimensjonsløs slik at finner man en endring, eksempelvis lengdeendring i en bjelke under drift kan man ved å benytte Hook's lov finne ut hvilken belastning¹⁹ bjelken utsettes for.

En annet egenskap som typisk knyttes til egenskaper, da i hovedsak stål²⁰, er et metalls seighet, dvs om et metall, ved en gitt driftstemperatur er seigt eller sprøtt når det er et skår til stede i materialet. For å teste denne egenskapen gjennomføres det slagseighetsprøver, Charpy-V tester hvor standardiserte prøvestykker kjøles ned til testtemperatur og deretter slås av med en slaghammer, se Figur 7 Charpy-V stav under testing.



Figur 7 Charpy-V stav under testing

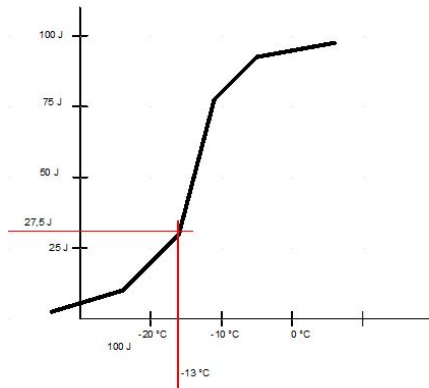
I forbindelse med sveising lager man prøver der ulike soner i sveiseforbindelsen testes for å bestemme om sveisen eller deler av sveisen oppfører seg seigt eller sprøtt ved aktuell temperatur. Denne måten å definere og bestemme seighet på er knyttet til ferrittiske materialer som ved romtemperatur oppfører seg seigt, dvs bruddet er duktilt men som ettersom temperaturen synker til slutt vil nå en temperatur der materialet får sprøbrudd, det vi kaller omslagstemperatur (The Fabricator, 2021), se Figur 82 Eksempel på omslagskurve for et stål der metallet går fra duktilt til sprøtt brudd. Omslagsverdien²¹, dvs der materialet er definert som sprøtt er i dette tilfellet definert som 27.5 Joule. I denne figuren har metallet en omslagstemperatur, dvs der det går fra å gi et seigt

¹⁹ Dette er noe forenklet, i et reelt tilfelle ville man ha hatt behov for å bestemme hvilke retninger materialet utsettes for den største belastningen.

²⁰ I denne sammenhengen ferrittiske materialer som har en kubisk romsentret gitterstruktur, BCC-Body Centret Cubic.

²¹ Omslagsverdien, dvs der man definerer materialet fra å være sprøtt til duktilt kan variere avhengig av et ståls flytegrense. Høyere flytegrense som i høyfaste stål, dvs stål med flytegrense over 355 MPa, kan eksempelvis ha krav til minst 40 J for at materialet skal defineres som seigt ved den aktuelle temperaturen.

brudd til å gi et sprøtt brudd ved testingen er på $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$, noe som gjør at metallet ikke har noen praktisk anvendelse som konstruksjonsmateriale²² når temperaturen er lavere enn $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$.



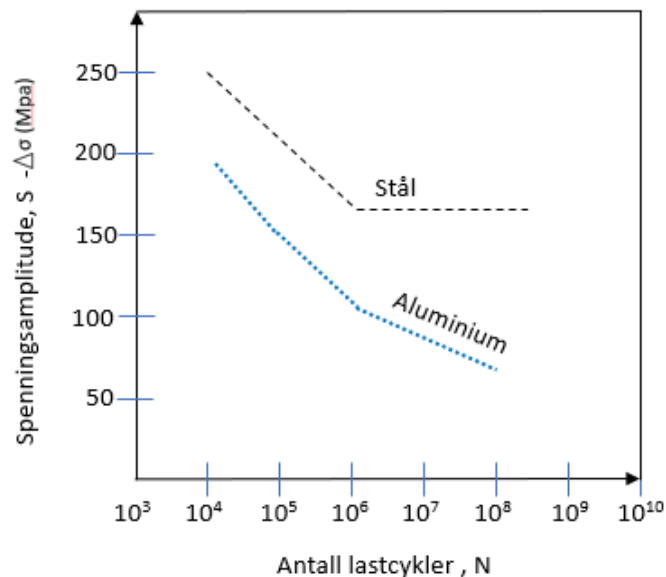
Figur 82 Eksempel på omslagskurve for et stål der metallet går fra duktilt til sprøtt brudd

Dette begrenser typisk mange ferrittiske materialers anvendelse (stål kvaliteter) ved lavere temperaturer, både uten sveis og i sveist tilstand. Aluminium som har en kubisk flate sentrert struktur har ingen omslagstemperatur der det går fra duktilt brudd til sprø brudd og fremviser gode seighetsegenskaper ved temperaturer under $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (The Fabricator, 2021).

Utmatting i denne oppgaven er definert som varierende belastninger en konstruksjon utsettes for under drift. Belastningene knyttet til utmatting forutsetter at disse er under et materials flytegrense. Utmatting kan typisk medføre at en konstruksjon i metall som etter lengre tids påvirkning av varierende belastning går til brudd (Nanninga, 2008). For å teste et materials utmattingsegenskaper gjennomføres ulike typer av tester men den vanligste er å utsette et materiale for en varierende strekk - / bøyebelastning, med ulike varierende spenningsamplituder (forskjell mellom maks spenning og minimum spenning) (Almar-Ness, 2007). I Figur 9 Eksempel på utmattingskurve for et stål og en aluminium kvalitet vises en typisk utmattingskurve for en stål kvalitet og en aluminiums kvalitet (Kalpakjian, 2014). Diagrammet viser ulike spenningsamplituder som et materiale (som ikke er sveist) utsettes for langs den vertikale aksene og antall lastsykler (N) eller repetisjoner som skal til ved den aktuelle spenningsamplituden, langs den horisontale aksene, før materialet går til brudd. Man gjentar nye testinger inntil man når en grense der materialet "aldri" går til brudd eller der man definerer en grense med maksimalt antall lastsykler som et material skal stå uten å havarere. For stål ser man av figuren at når man når en spenningsamplitude på omlag $160\text{--}170\text{ MPa}$ så kan materialet

²² Dette gjelder for et stål som ikke er sveist. En sveis i ståk vil vanligvis innvirke negativt på seigheten.

utsettes for uendelig antall lastsykler uten at det går til brudd. Vi sier at materialet har en utmattingsgrense (Kalpakjian, 2014). For aluminium derimot så ser vi at metallet ikke har noen utmattingsgrense, materialet vil en eller annen gang gå til brudd dersom de varierende belastningene får holde på lenge nok (Kalpakjian, 2014).



Figur 9 Eksempel på utmattingskurve for et stål og en aluminium kvalitet

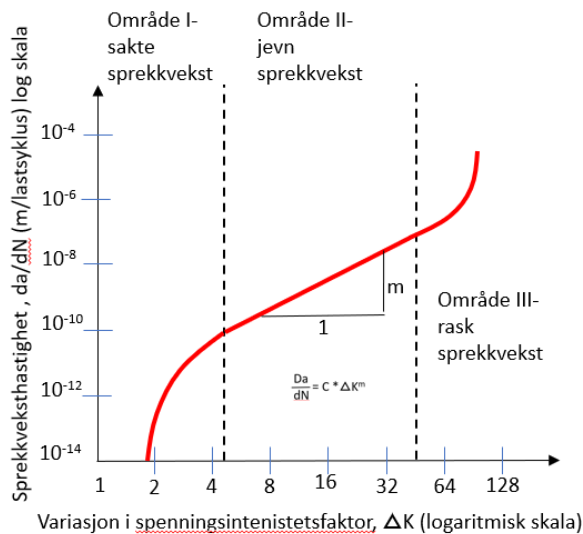
For sveiste konstruksjoner og/eller sveiste forbindelser er det utarbeidet egne regler på hvordan utmattingskurver skal benyttes der sveisens utforming, fuge, kontrollomfang mm ivaretas. Disse kurvene som omhandles i Eurocode ²³ er i all hovedsak utviklet for lysbuesveising. Siden oppgaven ikke vil gå inn på detaljer omkring aktuelle utmattingsberegninger grunnet både mulige sveisemetoder som skal benyttes på brukonstruksjonen i denne oppgaven og at endelig valg av fuge ikke er gjort, omhandles prinsippene vedrørende utmatting og forhold som innvirker på egenskapene på et generelt grunnlag med det formål å bidra til å svare på oppgavens forskningsspørsmål.

For at en konstruksjon skal havarere er det en konsekvens av utmattende bevegelser (varierende spenninger, i all hovedsak strekkspenninger), start av en sprekke og jevn vekst av en sprekke inntil restvernsnittet er så lite at sprekken vokser ukontrollert og til slutt medfører brudd i konstruksjonen (Almar-Ness, 2007). På stålkonstruksjoner som er sveist forutsetter man at det er en defekt til stede og at starten av sprekken, dvs den tiden det tar å etablere en startsprekk på et feilfritt materiale

²³ Eurocode 9, NS-EN 1999-1-3 omhandler prosjektering av aluminiums konstruksjoner hvor del 1-3 ivaretar utmattingspåkjennte konstruksjoner.

dermed er over. Almar-Ness viser til at sprekkveksten kan utgjøre så mye som 90% av den totale levetiden for en konstruksjon som utsettes for utmatting.

På Figur 10 skjematisk fremstilling av sprekkvekst uttrykt ved bruk av Paris likning er de ulike fasene i dannelse av en sprekk, sprekkvekst og til slutt havari inndelt i 3 områder. Henholdsvis initieringsfasen og en sakte sprekkvekst (Fase I), deretter en jevn sprekkvekst som en funksjon av en lastcykel (fase II). Til slutt en ukontrollert sprekkvekst som resulterer i brudd (fase III) (Sundstrøm, High cycle fatigue properties of extruded 6060-T6, 6063-T6 and 6082-T6., 2018).



Figur 10 skjematisk fremstilling av sprekkvekst uttrykt ved bruk av Paris likning

Dannelse av en sprekk i fase I skjer vanligvis fra en overflatefeil i materialet, ekstern eller intern. Eksterne defekter kan være overflatebeskaffenhet (ruhet) eller andre overflatedefekter og eventuelle restspenninger i strekk som er oppstått grunnet fremstilling av profiler o.l., gjennom kjøling eller kaldbearbeiding. Indre materialfeil kan skyldes hulrom (porer el.l) eller inneslutninger (Sundstrøm, High cycle fatigue properties of extruded 6060-T6, 6063-T6 and 6082-T6. Influence of die lines and microstructure on fatigue in flat extruded aluminium profiles, 2018) .

I en sveist konstruksjon forutsetter man at fase I stor grad er over ved at det alltid vil foreligge sveisefeil i en konstruksjon (Almar-Ness, 2007). Bruk av Paris likning forutsetter at konstanten C er kjent og at materialets spenningskonsentrasjonsfaktor K er kjent. Disse verdiene, for en rekke materialer er eksperimentelt fremskaffet gjennom forsøk og kan blant annet være tilgjengelig hos forskningsinstitusjoner (eks SINTEF). Kjenner man da lastsyklusene og frekvensen kan man beregne hvor mye en sprekk vokser pr lastcykel og dermed også hvor mye den vokser over tid.

3.2 Fysikalske egenskaper til metaller

Det teoretiske omfanget knyttet til de fysikalske egenskapene omfatter de forhold som ansees viktig for å svare på forskningsspørsmålene. Mye av grunnlaget for å benytte aluminium i stedet for stål er knyttet opp til de fysikalske egenskapene til aluminium sammenliknet med stål.

De typiske²⁴ fysikalske egenskapene som vurderes å ha betydning for oppgaven og som vil bli omhandlet i det følgende er angitt i Tabell 2 Noen fysikalske egenskaper til stål og aluminium. (Pedersen S.E & Gustavsen, 2007).

Tabell 2 Noen fysikalske egenskaper til stål og aluminium

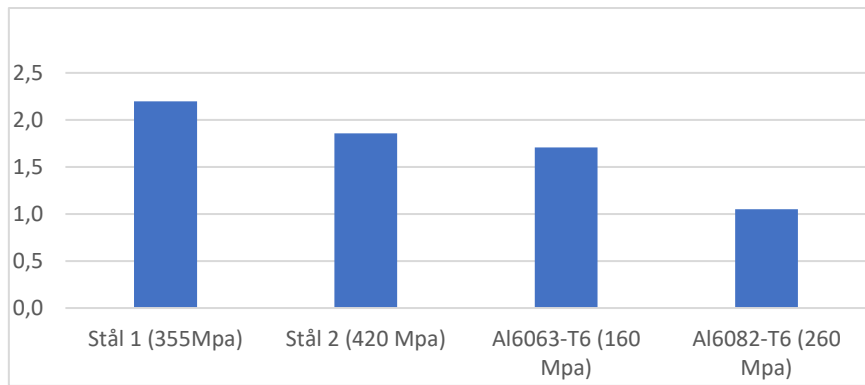
Material	Tetthet (kg / m ³)	Smeltetemperatur (°C)	Termisk ledningsevne (W/m-K)	Termisk utvidelseskoeffisient (m/m- °C x 10 ⁻⁶)
Aluminiumslegeringer	2730	660	230	23,6
Stål	7800	1450	45	13

3.2.1 Tetthet - vekt

Som beskrevet i rapporten knyttet som omhandler muligheten for valg av aluminium i bruer (DR.TECHN. Olav Olsen, 2020) er mye av grunnlaget knyttet opp til vekten av aluminium i forhold til stål, noe som ikke bare reduserer vekten på selve bruelementene men også vekt på tilhørende utstyr som wirer etc som dermed kan reduseres i dimensjoner (DR.TECHN. Olav Olsen, 2020).

Et viktig forhold knyttet til en vurdering av materialer (sammenlikning) i forbindelse med valg til konstruksjoner er forholdet mellom tettheten (vekten) av et material og dets flytegrense ("styrke) og stivhet i forhold til vekt slik det er fremstilt i Figur 11 Forholdet mellom flytegrense og tetthet for 2 stålmaterialer med henholdsvis flytegrense på 355 og 2 aluminium kvaliteter. (Kalpakjian, 2014).

²⁴ Typiske egenskaper er basert på standard tabellverdier som ansees å være akseptabelt vedrørende vurderinger. Egenskapene som er oppsummert i tabellen vil ha noe variasjon avhengig av legeringstype men dette er ikke hensyntatt i denne oppgaven.



Figur 11 Forholdet mellom flytegrense og tetthet for 2 stålmaterialer med henholdsvis flytegrense på 355 og 2 aluminium kvaliteter.

Som det kan leses av figuren har aluminium kvaliteten Al6082-T6, når det gjelder sammenlikning mellom flytegrense og tetthet, om lag dobbelt så høy styrke (flytegrense) pr kg material sammenliknet med eksempelvis stålkvalitet 1.

3.2.2 Smeltetemperatur

Smeltetemperaturen er en egenskap som indirekte har betydning knyttet til produksjon i metaller, eksempelvis ved sammenføring (sveising), re krystallisering og varmbearbeiding , eksempelvis ekstrudering, av metaller (Kalpakjian, 2014) Smeltetemperaturen har også betydning for hvilke temperaturer egenskapene til et material påvirkes, eksempelvis ved stor oppvarming som lokale temperaturøkninger som kan oppstå eksempelvis ved lokal brann på ei bru. For de materialer som baserer sin styrke på utfellingsstyrking vil temperaturen for utfellingsstyrking direkte relateres til et material smeltetemperatur. (Kalpakjian, 2014). Smeltetemperaturen har betydning for muligheten til å varmekstrudere profiler etc.

3.2.3 Termisk utvidelseskoeffisient

Termisk utvidelse er et mål for registrering av hvor mye et material utvider seg per grad materialet øker i temperatur. Denne egenskapen kan ha stor betydning for både produksjon i metallene og også under drift (Kalpakjian, 2014). Den termiske utvidelseskoeffisienten, α , har, sammen med den termiske ledningsevnen til et materia, l betydning ved sammenføyningsprosesser og ved ulike

"varme" formingsprosesser der utvidelse og temperatur kan variere relativt mye på tvers og langs et emne.

Termisk utvidelse og termisk sammentrekning kan medføre dannelse av mikrosprekker, deformasjoner eller at deler kan løsne i løpet av driftstiden. Et annet forhold er knytte til at dersom konstruksjonen ikke tillater de utvidelse eller krympingen som et metall utsettes for under drift kan det som en konsekvens, over tid medføre termisk utmatting med det resultat at det typisk oppstår mikrosprekker i overflaten på et metall (Kalpakjian, 2014).

Effekten av termisk utvidelse²⁵ kan uttrykkes med formelen:

Formel 3 Termisk utvidelse

$$\Delta L = L_0 * \alpha * \Delta T \text{ (lengdeutvidelse)}$$

ΔT er variasjon mellom maksimum og minimum temperatur som et material utsettes for. Et lite eksempel kan vise hva typisk tilfelle kan være med en brukonstruksjon der eksempelvis en profil på 15 meter utsettes for en temperaturendring, ΔT , på 70 °C.

Beregner vi den termiske utvidelsen basert på dette vil vi finne at ΔL for en bjelke på 15 meter i aluminium er 21,24 mm mens en tilsvarende bjelke i stål vil ha en utvidelse på 13,6 mm.

Merk at denne beregningen også kan utvikles videre ved at man ved bruk av Formel 2 Hook's lov kan beregne hvilke belastninger materialet utsettes for dersom det ikke får utvidet seg fritt.

Eksempel ovenfor for aluminium og stål: Utvidelsen er på 21.24 mm. Bjelken vil da ha en lengde på 15,024 meter dersom utgangslengden ved start var 15 meter . Benytter vi Hook's lov finner vi at aluminium ved denne varmepåvirkningen og dersom materialet ikke får utvide seg (evt trekke seg sammen) utsettes for en belastning på 99 MPa (Tøyningen er $1,41 * 10^{-3}$ og E-modulen er 70.000MPa). Tilsvarende ville spenningen vært 190 Mpa for stål (tøyningen er $9 * 10^{-4}$ og E-modulen 210.000 MPa).

²⁵ I dette tilfelle kun tatt i en dimensjon, i lengderetningen som eksempel, for større tykkelser og større arealer må en vurdere både areal- og volumutvidelse.

3.3 Korrosjonsegenskaper

I vurderingen omkring bruk av aluminium relatert til stål er fremhevelsen av korrosjonsegenskapene til aluminium i forhold til stål (DR.TECHN. Olav Olsen, 2020).

Korrosjon er en prosess der metallet gradvis brytes opp. Prosessen bryter ikke bare opp overflaten på et produkt eller en konstruksjon, eksempelvis overflaten på metallet som er benyttet i en stålbru, men reduserer både styrken og komponentens integritet (Kalpakjian, 2014). I tillegg vil korrosjon i overflaten fungere som startpunkt for utmatting og dermed medføre en betydelig reduksjon av levetiden på en konstruksjon ved at startfasen (initieringsfasen) , ref Paris likning, er passert (Almar-Ness, 2007). Metaller som i utgangspunktet hadde en utmattingsgrense vil når de får skader i overflaten ikke lenger ha denne grensen.

For å beskytte en konstruksjon mot korrosjon har man i praksis flere valg. Man kan velge å beskytte materialet ved at det legges på en overflate (maling belegg.el.l) som hindre det aktuelle miljøet eller væsken å nå ned til materialets overflate. Man kan velge å benytte en offeranode, det vil si at man "kobler sammen" et materiale som raskere korroderer i det aktuelle miljøet enn det materialet vi ønsker å beskytte. Dersom offeranodene er plassert rett og blir erstattet før de er korrodert helt vil de fungere som en beskyttelse av strukturen. Dette er en beskyttelse som krever tilstedeværelse av en elektrolytt for å fungere og er heller ikke noe god løsning på brukonstruksjoner da både effekten er svært usikker samt at de i tillegg vil måtte medføre en betydelig vektøkning som det måtte dimensjoners for. Kombinasjon av belegg / maling og bruk av offeranoder er en måte å ytterligere sikre en konstruksjon på, typisk benyttet på konstruksjoner i vann (Scheie, 2013), eksempel på dette er installasjoner offshore.

Stål vil korrodere når det utsettes for fuktighet/vann dersom et ikke er beskyttet (Scheie, 2013).

Å benytte metaller, evt andre materialer som ikke utsettes for korrosjon i det aktuelle miljøet er vanlig der man har mulighet, hvor tilkomst for korrosjonsbeskyttelse er begrenset og det kan forsvares kostnadmessig.

For konstruksjoner som ikke utsettes for utmatting er det mulig å benytte rustrege metaller, typisk stål tilsatt litt krom og kobber (typebetegnelse *corten* stål - <https://snl.no/cortenstål>).

3.3.1 Passivisering

Valg av metaller som ikke korroderer i miljøet det skal benyttes for er typisk knytte til metaller som danner et eget beskyttende belegg på metallets overflate som hindrer ytterligere påvirkning av miljøet utenfor dette belegget. Valg av materialer til ulike formål vil inkludere en vurdering av et metalls korrosjonsmotstand i det aktuelle miljøet (Kalpakjian, 2014). Et materials motstand mot korrosjon avhenger av metallets kjemiske sammensetning i det aktuelle miljøet materialet virker.

En korrosjonsprosess innbefatter en elektrokjemisk reaksjon mot et media som inneholder oksygen slik at det dannes metalloksider. For vanlige konstruksjonsstål dannes jernoksyd, Fe_2O_3 , som er et rødbrunt og porøst oksid (rust) som lett løsner og tillater det mediet materialet utsettes for å tære på metallet under rusten.

På aluminium er "korrosjonsproduktet", Al_2O_3 , et blankt oksid som fester seg til overflaten av metallet som en tynn film som dermed fungerer som en barriere mot mediet slik at metallet ikke korroderer videre (Kalpakjian, 2014). Denne typen oksidbelegg som er typisk for aluminium, titan og rustbestandige stål, kalles passivisering.

Aluminium sine gode korrosjonsegenskaper skyldes at metallet passiviseres. Motstandsdyktigheten til metallet i ulike miljø vil være avhengig av metallets kjemiske sammensetning da legeringselementene som tilsettes i aluminium innvirker på metallets korrosjonsegenskaper i ulike miljø.

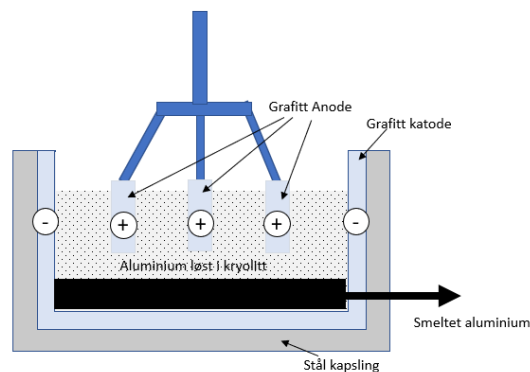
3.4 Aluminium and aluminium legeringer

Opgaven hadde som mål å vurdere aluminium, ikke bare rent som materiale til bruk i bruer, men også med fokus på bærekraft. For kunne gjennomføre vurderinger knyttet til bærekraft og gjenbruk er det viktig å ha kunnskap om fremstilling av aluminium og dets legeringer og muligheten til gjenbruk og resirkulering av aluminiumsprodukter.

I og med at materialet skal benyttes som konstruksjonsmateriale, i denne oppgaven relatert til bruer, er det av betydning å vite hvordan de ulike aluminiums kvaliteter oppnår sine egenskaper.

Aluminium²⁶ er det metallet som det finnes nest mest av på jorda²⁷ (Johansen, 2012) og det tredje mest vanligste kjemiske elementet på jorda etter oksygen og silisium. I utgangspunktet har metallet vært ansett som dyrt grunnet mengden av elektrisitet som er nødvendig for å utvinne rent aluminium

Fremstilling av aluminium gjøres fra en leirliknende malm som utvinnes fra grunne gruver (på grunn av at metallet er lett og samles nært jordas overflate (Miklos, 2020) . Bauxittforekomstene på jorden er i all hovedsak konsentrert i et belte rundt ekvator (Hydro asa) . Ved å knuse malmen og vaske den med en oppvarmet blanding av kalk og lut og med etterfølgende filtrering av den oppvarmede blandingen skiller det gråhvite aluminiumsoksid²⁸ ut. Etter tørking er det et hvitfarget pulver (alumina) som løses i en smelte av kryolitt²⁹ som gjør at energien som behøves for å fremstille aluminium reduseres i forhold til å varme opp oksidet til over 2000 °C. Gjennom en elektrolyse, se Figur 3 Prinsipp med en elektrolyseovne for fremstilling av ren aluminium (fritt etter <https://www.bbc.co.uk/bitesize>) , der man benytter elektroder av grafitt³⁰ som binder seg til oksidet i aluminiumet dannes CO² som brenner av, metallet som da blir igjen som smeltet metal er ren aluminium (GCSE WJEC, 2021).



Figur 3 Prinsipp med en elektrolyseovne for fremstilling av ren aluminium (fritt etter <https://www.bbc.co.uk/bitesize>)

Fremstilling av 1 tonn aluminium krever energi på 211 GJ/tonn mens fremstilling av ett tonn stål fra malm krever om lag 22,7 GJ/tonn (Rankin, 2012). Merk at dette er et eksempel basert på produksjon i Australia, men prosessene som benyttes i resten av verden er i hovedsak bygd på de samme

²⁶ Det 13 element i det periodiske system - SI

²⁷ Utgjør 8% av jordas masse (aluminiumreader.com)

²⁸ Har en smeltetemperatur på 2063 °C

²⁹ Kryolitt er en aluminiums forbindelse med lavere smeltetemperatur (960 °C) enn aluminiumsoksidet men som løser aluminiumoksid når det er smeltet. Prosessen med å løse opp aluminiumoksid i bauxitt er kalt Hall-Heroult prosessen.

³⁰ Forbrukes under prosessen og må erstattes.

prinsipper. I forhold til 2012 da disse dataene er utarbeidet er det gjennomført enkelt modifiseringer og forsøk som kan implementeres og som gjør at energibruken kan bli noe redusert, blant annet for reduksjon av strømtap i elektrodene, nye typer elektroder, nye materialer i ovnene som er mer motstandsdyktig mot den varme løsningen av kryolitt og aluminiumsoksid og mulige nye kjemiske prosessere for å erstatte Hall-Héroult prosessen (Rankin, 2012). Det vil også foregå forskning på fremstilling av stål som også vil effektivisere denne produksjonen slik at forskjellen på ca 8 ganger mer energi / produsert tonn ved produksjon fra malm, slik det ser ut i dag, sannsynligvis ikke vil endre seg så mye.

Resirkulering av aluminium vil kreve mellom 5 og 10 % av energien i forhold til produksjon av aluminium fra malm mens resirkulering av stål vil kreve 35- 40% av energien i forhold til produksjon av stål fra malm (Rankin, 2012). Dette er energi som ikke ivaretar innsamling og sortering av metallene. Variasjon i energibruk for både stål og aluminium kan forklares i ulike materialkvaliteter og ovnstyper.

3.4.1 Aluminium kvaliteter

For å definere de 2 aktuelle kvaliteten i aluminium som vurderes i denne oppgaven i forhold til andre aluminiumslegeringer, er det innledningsvis gitt en oversikt over ulike kvaliteter i aluminium, hva som kjennetegner disse med hensyn på klassifisering med beskrivelse av de prosesser som kan foretas på disse for å få frem ulike egenskaper, særlig knyttet til styrke og korrosjon.

Ren aluminium, som metall, kan tilsettes (legeres) med ett eller flere andre elementer for å få frem ulike kvaliteter med forskjellige egenskaper til ulike formål. Avhengig av hvilke legeringselement som utgjør brorparten av tilsatsen i aluminiumen,³¹ inndeles aluminiums kvaliteter i ulike grupper som vist i **Feil! Fant ikke referansekilden.** (ASM International, 1993). Oversikten tar kun for seg bearbeidbare legeringer, ikke støpe legeringer.

Tabell 3 Klassifiseringssystem for aluminium og aluminiumslegeringer

Hovedlegeringselement	Klassifisering
Ren aluminium \geq 99 %	1xxx
Kobber (Cu)	2xxx
Mangan (Mn)	3xxx
Silisium (Si)	4xxx
Magnesium (Mg)	5xxx
Magnesium (Mg) og silisium (Si)	6xxx
Sink (Zn)	7xxx
Andre elementer	8xxx

³¹ Unntak er for gruppe 6 der tilsatsen av både silisium og magnesium er viktig for å få frem de ønskede utfellingene ved varmebehandling.

Merk: For legeringer i serie 1 er tallene etter det første tallet en angivelse av minimum innhold av aluminium. For serien 2 til 8 vil det andre tallet angi eventuelle modifikasjoner i forhold til bare ett hoved element mens de 2 siste er tallene benyttes for å identifisere ulike kvaliteter innenfor samme gruppe (ASM International, 1993). Alle aluminiumslegeringer er herdbare med bruk av ulike prosesser, enten gjennom deformasjonsstyrking, varmebehandling eller en kombinasjon av varmebehandling og deformasjonsstyrking.

3.4.2 Styrke mekanismer i aluminium

De ulike aluminium kvalitetenes leveringstilstand defineres med en bokstav og tallkode. Hovedgruppene er angitt i (ASM International, 1993).

Tabell 4 Leveringstilstander på aluminiumslegeringer

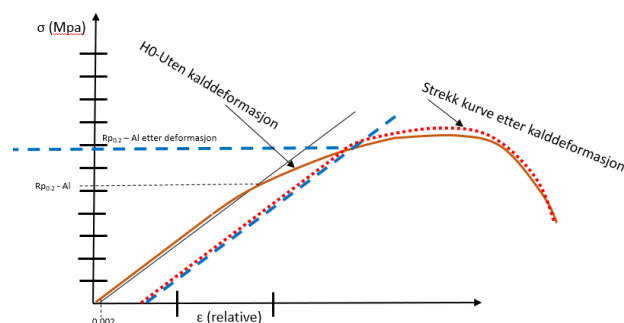
Leveringstilstand	Beskrivelse
F	Lvert i tilstand slik den ble produsert
O	Glødet, metallet er "mykt"
H (etterfulgt av koder, 2,4,6,8,9)	Deformasjonsstyrking. Tallkoder angir defomasjonsgrad
T (etterfulgt av koder, 1-9)	Varmebehandlet, kodene angir type varmebehandling
T6	Materialet er innherdet og varmutherdet *)

*) denne prosessen blir i detalj gjennomgått

I det følgende vil det gis en kort oppsummering av de ulike herdemekanismene på aluminium med fokus på varmebehandlingen med betegnelse T6 som er aktuell for begge aluminium kvalitetene som omhandles i denne oppgaven (Al 6063-T6 og AL6082-T6).

Aluminium kan herdes på 3 forskjellige måter (Johansen, 2012), Deformasjonsherding (herding ved kaldbearbeiding), herding ved legering, herding ved legering og varmebehandling.

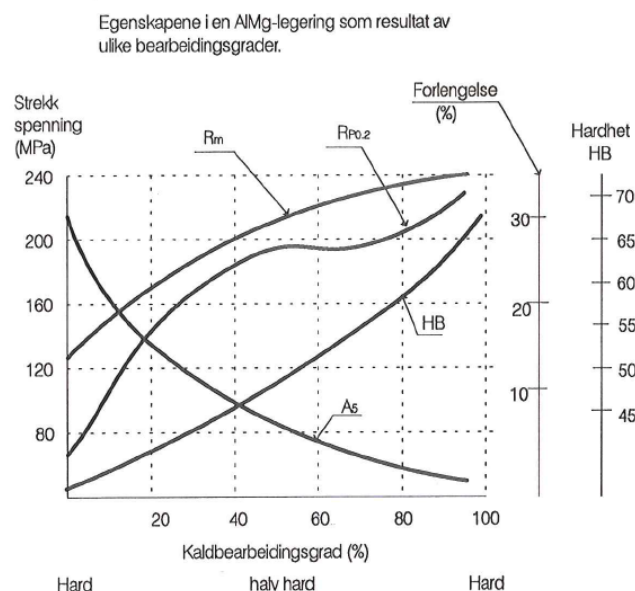
Deformasjonsstyrking gjøres ved at materialet, i kald tilstand, deformeres over metallens flytegrense. Dette er eksemplifisert i Figur 14 Effekten av kalddeformasjon på fasthetsegenskaper (prinsipp)



Figur 14 Effekten av kalddeformasjon på fasthetsegenskaper (prinsipp)

Dette er en herdemekanisme som i stor grad benyttes for rene aluminium kvaliteter og kvaliteter som ikke kan herdes ved varmebehandling. Benevnelsen H benyttes bak tallkoden for disse

legeringene og angir hvor mye et materials tykkelse som er valset ned ved kaldvalsing (ASM International, 1993) . Legg merke til at ved kaldbearbeiding (deformasjonsstyrking) øker flytegrensen og strekkfastheten (liten økning), hardheten øker og bruddforlengelsen (dvs duktiliteten reduseres) angitt som A_5 i Figur 4 Skjematisk fremstilling hvordan kaldbearbeidingen innvirker på egenskapene til aluminium (Figur fra Gudbrandsen) . Utsettes et materiale for oppvarming som er høy nok vil materialet som har fått sin styrke gjennom kaldbearbeiding, re-krystalliseres og går tilbake til sin opprinnelige styrke og duktilitet som materialet hadde før kaldbearbeidingen. Dette kalles re-krystallisering (Kalpakjian, 2014). Temperaturen når dette skjer på kvaliteteter i aluminium som har fått styrke økning gjennom kaldbearbeiding, avhengig av både legering og graden av kaldbearbeiding. Desto større grad av kaldbearbeiding desto lavere temperatur for re-krystallisering (Kalpakjian, 2014).



Figur 4 Skjematisk fremstilling hvordan kaldbearbeidingen innvirker på egenskapene til aluminium (Figur fra Gudbrandsen)

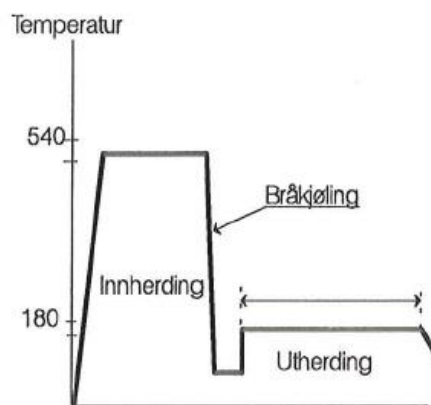
3.4.3 Løsningsstyrking og partikkelstyrking

I og med at styremekanismene i de 2 aluminiums kvalitetene som rapporten tar for seg er basert på styrke økning gjennom partikkelstyrking er det gitt en enkel forklaring knyttet til prinsippene for styrkeøking gjennom løsningsgløding og utharding, typisk referert til som elding når denne prosessen foregår ved romtemperatur over tid (Kalpakjian, 2014).

Prinsipp for å økning av styrke er å hindre dislokasjonsbevegelsene i et metall, det vil forenklet si, muligheten for å flytte ett atom i et atomgitter til en ny posisjon. Desto vanskeligere dette er, desto høyere styrke får legeringen.

Løsningsgløding er en prosess der metallet varmes opp til en gitt temperatur slik at legeringselementene løses inne i gitterstrukturen typisk ca 530 -570 °C for aluminiums kvalitetene i gruppe 6. Deretter må metallet bråkjøles til romtemperatur slik at elementene, hovedsakelig magnesium og silisium er låst i strukturen. Deretter varmes aluminiumslegeringen opp, typiske etter at det er ferdig bearbeidet (eksempelvis ekstrudert) (Kalpakjian, 2014) til temperaturen typisk rundt 150 °C med en holdetid³² på 15-20 timer (ASM International, 1993)

Typisk prinsipp for innherding og utharding er vist i Figur 5 Prinsipp for innherding og utharding i aluminium legeringer i gruppe 6 (Gudbrandsen).



Figur 5 Prinsipp for innherding og utharding i aluminium legeringer i gruppe 6 (Gudbrandsen)

For kvaliteten Al6063-T6 og Al6080-T6 er det kun utharding ved forhøyet temperatur som er aktuell (ASM International, 1993).

3.4.4 Fabrikasjon av AL6063-T6 og Al6082-T6

Aluminiumslegeringer av typen AL6063 og 6082 (i gruppen av Al6XXX legeringer) er som er leget med magnesium og silisium og har stor anvendelse inne transport og til bygninger. Halvfabrikater³³ i

³² Dette er et eksempel. Produsentene har optimalisert temperatur og holdetid til spesifikke sammensetninger slik at de får optimale egenskaper i metallene. Det har i oppgaven ikke vært skaffet tilveie eksakt informasjon, dvs temperatur og holdetid for utførelser, vedrørende disse 2 kvalitetene omhandlet i oppgaven

³³ Halvfabrikater er plater, profiler, rør etc.

disse materialene leveres typisk som bearbejdede kvaliteter fremstilt med med valsing, smiing eller ekstrudert. (Nanninga, 2008)

Forskjellen mellom AL6063-T6 og AL6082-T6 er at AL6082 har et høyere innhold av elementer som silisium (Si), høyere innhold av mangan (Mn) og høyere innhold av Magnesium (Mg) og av elementene krom (Cr) og sink (Zn) (Hydro). Dette resulterer i at AL6083 legeringen får en mer fiberaktig kjernestruktur mens AL6063 som har noe lavere styrke har en re krystallisert finkornet struktur (Nanninga, 2008).

Utgangspunktet for produksjon av AL6063-T6 og AL6082-T6 er at disse kvalitetene har en metallurgi som gjør at legeringselementene kan løses i gitterstrukturene for deretter, enten ved naturlig elding (utherding) eller ved oppvarming å danne utfellinger av MgSi i gitterstrukturen. Utfellingene har avgjørende betydning for styrken i legeringer tilsatt magnesium og silisium (Nieto, 2010).

Fremstilling av legeringene med ønskede egenskaper består i at legeringene, mens de har høy temperatur der elementene Mg og Si er løst i metallet, bråkjøles raskt. Høyere innhold av legeringselementene Mg og Si krever raskere avkjøling av legeringen fra høyere temperatur. For kvaliteten AL6083 er dette mer kritisk enn for AL6063 grunnet det høyere innholdet av Mg og Si som ved for lang avkjølingstid tenderer til å danne utfellinger eller forbindelse med en form og struktur som kan være ødeleggende for legeringens mekaniske egenskaper (Sundstrøm, High cycle fatigue properties of extruded 6060-T6, 6063-T6 and 6082-T6., 2018) . Etter avkjøling til romtemperatur varmes legeringen opp til utherdingstemperaturen i en bestemt holdetid.

3.5 Bearbejdingsmetoder for aluminium og aluminiumslegeringer

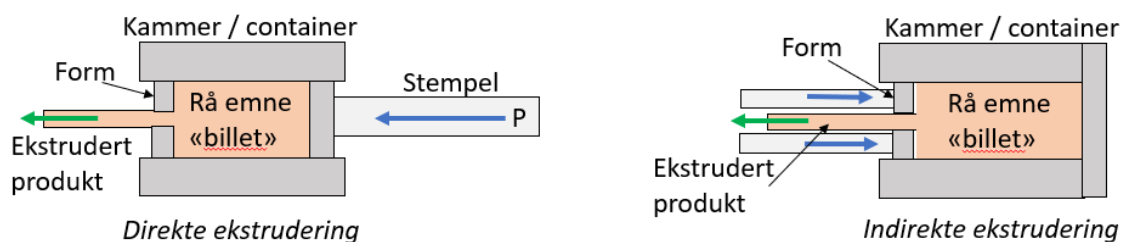
For aluminium er det i all hovedsak 3 prosesser som benyttes for å fremstille halvfabrikater i aluminium. Valsing for å fremstille plater og filer (til eksempelvis matvareindustrien), ekstrudering for å fremstille profiler til ulike formål, bokser og tuber i aluminium og støpning av ulike typer ferdige komponenter (Kalpakjian, 2014). I denne rapporten vurderes bruk av ekstruderte store aluminiumsprofiler til bruk i brukonstruksjoner og ekstruderingsprosessen vil derfor beskrives mer nøyaktig i dette kapitlet.

3.5.1 Ekstrudering av aluminiumsprofiler (plastisk bearbeiding)

Om lag 60% av all aluminium som produseres benyttes i ulike former for ekstruderte produkter (Miklos, 2020). Ekstrudering er i prinsippet en prosess som benytter et massivt kompakt råemne for å fremstille lange lengder eller hulprofiler med konstant tverrsnitts areal (Niето, 2010). Ekstrudering av aluminiumslegeringer, særlig når det kommer til større dimensjoner, er en komplisert prosess som krever god kontroll med de parameter, fysiske og mekaniske, som påvirker kvaliteten av den ekstruderte profilen (Niето, 2010). I dette legger forhold som geometri, dimensjonstoleranser og prosessens innvirkning på mikrostrukturen til det ekstruderte materialet.

Siden dette er forhold som direkte innvirker på en vurdering knyttet til FS-sveising av ekstruderte aluminiumsprofiler og bruk av FS-sveiste aluminiums paneler i en brukonstruksjon slik denne rapporten referer til, vil forhold som innvirker på kvaliteten av et varmekstrudert emne til en ekstrudert profil i aluminium bli nærmere omhandlet.

I prinsippet benyttes 3 ulike prosesser ved ekstrudering, direkte og indirekte ekstrudering slik vist på skisse i Figur 6 Direkte og indirekte ekstrudering (fritt etter Kalpakjian). I tillegg benyttes det en prosess kalt hydrostatisk ekstrudering der selve stampelet, rent prinsipielt, i en ekstruderingsmaskin for direkte ekstrudering er erstattes av en væske som deretter påtrykkes et stempel der kraften overføres til emnet, fra stampelet via væsken (Kalpakjian, 2014).



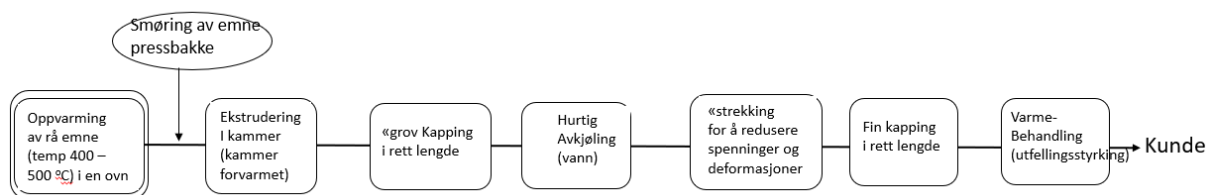
Figur 6 Direkte og indirekte ekstrudering (fritt etter Kalpakjian)

Ved direkte ekstrudering er emnet plassert i et kammer / container og ved hjelp av en sylinder presset gjennom en form. Formen kan ha ulike utforminger avhengig av hvilke ønsker man har til profilen. Ved indirekte ekstrudering er de formen som presses inn i emnet og danner den endelige profilen. Prosessen er mye benyttet, særlig ved bruk på høfaste stål og rustbestandige stål for å redusere slitasjen mellom kammer og emne da det er ingen relativ bevegelse mellom kammer og

emne slik det er ved direkte ekstrudering (Kalpakjian, 2014). For aluminium og aluminiumslegeringer i de kvalitetene som vurderes i denne oppgaven er det i dag direkte ekstrudering som benyttes.

I tillegg skiller vi mellom kald og varmekstrudering. Kaldekstrudering benyttes typisk på mindre deler som fremstilles av ren-aluminium som aluminiums bokser for drikke, aluminiums tuber for pålegg mm, der man i tillegg til et produkt ønsker en styrke økning gjennom kalddeformasjon av metallet. Kaldekstrudering, gir i motsetning til varmekstrudering, bedre dimensjonsnøyaktighet, bedre overflate og ingen dannelse av oksider. Kaldekstrudering gir mulighet til mindre komplekse deler/ ekstruderte produkter enn hva varmekstrudering gir (Nieto, 2010). I tillegg krever kaldekstrudering, særlig ved større dimensjoner betydelig kraftigere presser, grunnet større motstand i emnet, for å kunne fremstille like produkter enn hva varm ekstrudering krever.

Varmekstrudering er den prosessen som er mest benyttet og er enerådende ved fremstilling av profiler i kvalitetene Al6063 og Al6082 (ASM International, 1993). Prosessen tar utgangspunkt i at emnet varmes opp, typisk til temperaturer på om lag 60-75% av smeltetemperaturen til aluminium, det vil si mellom 400 og 500 °C (Hydro as, u.d.). Prosessen med ekstrudering er tatt ut fra (Hydro as, u.d.) og kort skissert i Figur 7 Skissert fremstilling av profil fra råemne (Hydro asa) .



Figur 7 Skissert fremstilling av profil fra råemne (Hydro asa)

En viktig forutsetning for å få et godt resultat ved ekstrudering er på sikre at metallet i ekstruderingsprosessen flyter på en slik måte at egenskapene ivaretas. Materialet flyter langs etter ekstruderingsretningen og vil derfor ha en langsgående gitterstruktur som også er ønskelig (Kalpakjian, 2014). Forstyrres eller hindres denne material flyten kan det resulteres i både indre defekter i materialet og overflatedefekter. Et annet forhold som må vurderes er eventuelle oksideringer forårsaket av oppvarmingen av metallet før ekstrudering noe som kan gi utfordringer knyttet til at oksidene påvirker metallens flyt og egenskapene i overflaten til materialet.

Under og før ekstrudering av aluminiumslegeringer kan det oppstå forhold som indirekte og direkte gir defekter som påvirker de mekaniske egenskapene og kvaliteten på produktet. Typisk er mikrosprekker i overflaten dersom temperaturen er for høy, friksjon eller ekstruderingshastigheten

er for stor. Feil ekstruderings hastighet kan intergranulære ³⁴ defekter som igjen kan påvirke egenskaper som styrke og levetiden på en konstruksjon som utsettes for utmatting.

Det er 4 forhold (Nanninga, 2008) som innvirker på utmattings egenskapene på ekstruderte hulprofiler ; mikrostrukturen etter ekstrudering (kornstørrelse, størrelsesvariasjoner i korn, utfellingenes struktur og utfellingens størrelse),

3.5.2 Standard krav til ekstruderte profiler

Toleranser på ekstruderte profiler er gitt i NS-EN 755-9:2016 (Norge, 2016). I denne standarden skilles det mellom ulike kvaliteter definert inn i 2 grupper relatert til hvor vanskelig³⁵ disse er å produsere. Kvalitet Al6063 tilhører gruppe 1 og AL6083 tilhører gruppe 2.

I det følgende er noen av de toleransedata som ansees viktig for FS-sveising av profiler tatt ut fra (Hydro Aluminium Profiler) data som samsvarer med NS-EN 755-9:2016.

Tabell 1 Noen aktuelle dimensjonstoleranser

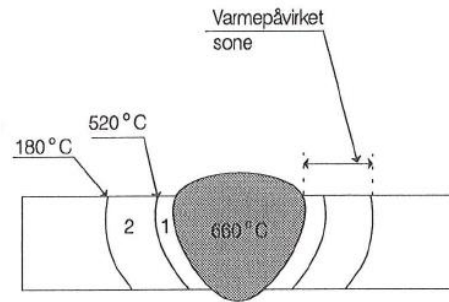
Dimensjon	Gruppe 1	Gruppe 2
Tykkelsestoleranse	+/- 0.45 mm	+/- 0.55 mm
Lengdetoleranse	+ 20mm	+20 mm
Vridningstoleranse	1.5 mm / meter	1.5 mm / meter
Vinkeltoleranse	3,5 mm	3,5 mm

3.6 Sammenføyning av aluminium og aluminiumslegeringer

Når det gjelder sammenføyning av aluminium, enten der er ved pressevisning eller smeltesveising er det en del definisjoner og forhold som har betydning for resultat og utførelse av sammenføyningen. En viktig definisjon knyttet til sveising av aluminium er det vi kaller varmpåvirkede sone. Dette er den sonen ved siden av selve sveisens om utsettes for en varmecycle som påvirker egenskapene til aluminiumskvalitete. Dette er skissert i figur Figur 8 Sveiesmetall og varmpåvirket sone i aluminium.

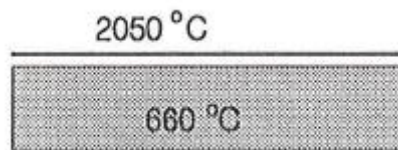
³⁴ Mellom korngransene i motsetning til tanskrystallinske defekter som er gjennom kornene i metallet

³⁵ Vanskelig i denne sammenhengen viser til kravene knyttet til same type profil som skal ekstruderes i relasjon til ulike kvaliteter.



Figur 8 Sveiesmetall og varmpåvirket sone i aluminium

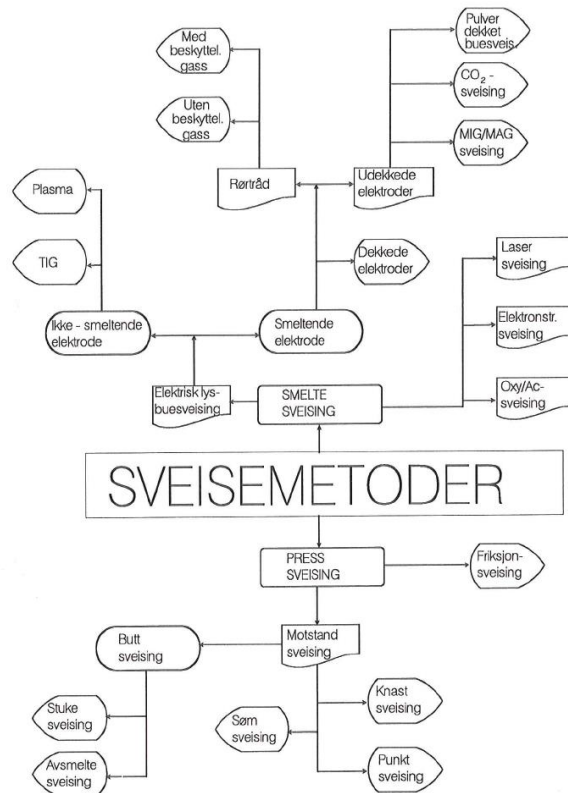
Aluminium har i tillegg et oksidbelegg på overflaten av metallet som med smeltesveisemetoder må fjernes fysisk før og under sveisingen. Dette skyldes at dette har en smeltetemperatur på ca 2050 °C mens grunnmaterialet har en smelte temperatur på rundt 660 °C, se skjematisk fremstilling i figur 20. Dersom dette ikke fjernes kan det medføre sveisefeil si det smeltede metallet.



Figur 20 Okisbelegg på overlaten av aluminium (Gudbrandsen)

3.6.1 Sammenføyningsprosesser

Vi skiller mellom 2 grupper av sveisemetoder, smeltesveising og press sveising. En oversikt over de typiske smeltesveisemetodene og pressveisemetodene er vis i Figur 21 Inndeling av typiske sveisemetoder (Gudbrandsen)



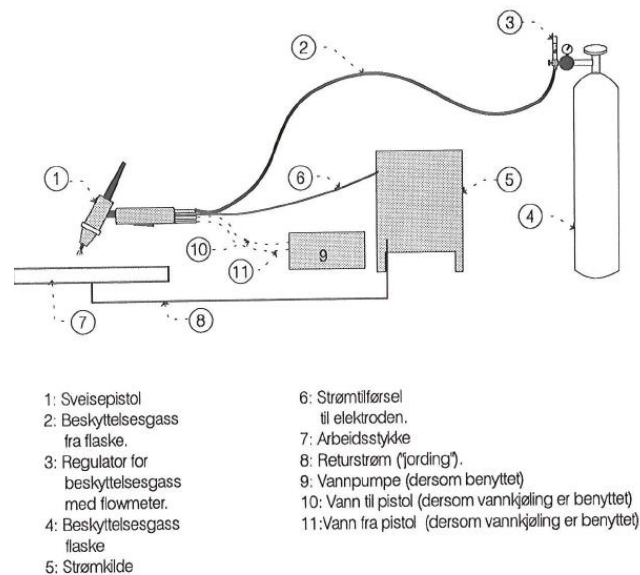
Figur 21 Inndeling av typiske sveisemetoder (Gudbrandsen)

FS-sveisning som omhandles i denne rapporten tilhører under gruppen av press sveising (Weman, 2012). Pressveisemetoder er definert som sveisemetoder der tilstrekkelig ytre kraft er påført metallet slik at det mer eller mindre oppstår en plastisk deformasjon mellom begge flatene som skal sammenføres, typisk prosesser som gjøres uten tilførsel av ekstra metall. Lysbuesveisning er metoder der et metall, uten å påføre ytre krefter til materialet, smelter opp de flatene som skal sammenføres. Ofte benytter man et tilsettematerial som smeltes ned i sammenføyning mellom materialene (Weman, 2012).

For å ha et grunnlag, både når det gjelder økonomi og kvalitet på sveiset forbindelser med FS-sveisning til andre sammenføyingsmetoder er de 2 smeltesveisemetodene, MIG og TIG, som har størst anvendelse ved sveising av aluminium og aluminium legeringer i Norge prinsipielt omhandlet.

3.6.2 TIG sveising

TIG³⁶ sveising er en sveisemetode der en lysbue som smelter metallet dannes mellom en ikke smeltende elektrode(wolframlegering) og metallet som skal sveise. Metodens prinsipp er vist i Figur 9 Prinsipp med TIG sveising (Gudbrandsen) .



Figur 9 Prinsipp med TIG sveising (Gudbrandsen)

Både det smeltende metallet som dannes når lysbuen er tent er beskyttet av en ikke aktiv gass (inert gass), typisk argon som ledes til smeltebadet gjennom en gassdyse på enden av sveisepistolen. Metoden kan sveise med eller uten tilsett materiale. Benyttes tilsett materiale må det manuell, som en tråd, føres inn i smeltebadet som oppstår mellom elektroden og materialet som skal sveises (Weman, 2012).

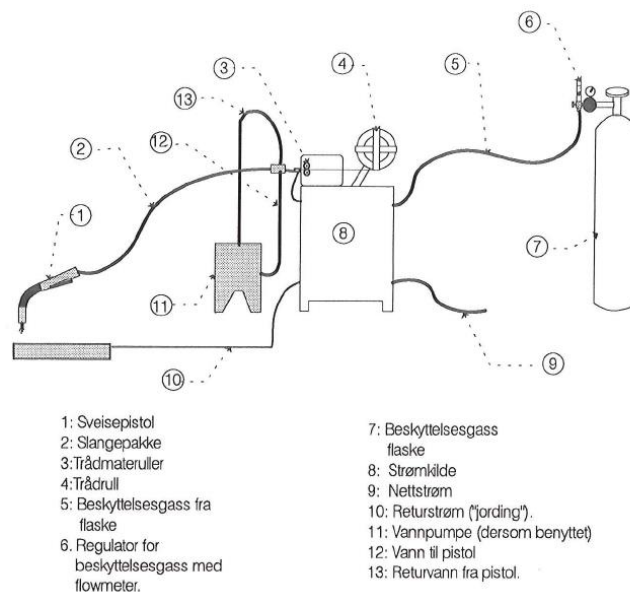
Både sveisehastighet og parametrene (Strøm og spenning) som benyttes ved sveising kan registreres. Siden det kun er smeltingen av materialet forårsaket av strøm og spenning og hastigheten sveisepistolen beveger seg fremover i sveisefugen, som gir varme til smeltingen, kan man benytte disse verdiene til å beregne varmetilførselen. Disse data kan igjen benyttes til å beregne utbredelsen av den varmepåvirkede sonen ved sveising.

I tillegg kan disse data også benyttes til økonomiske beregninger knytte til produksjonstid etc for sammenføring av bestem konstruksjonsdetalj.

³⁶ TIG- Tungsten Inert Gas

3.6.4 MIG sveising

MIG³⁷ sveising er en sveismetode der lysbuen dannes mellom en smeltende elektrode og metallet som skal sveises (Weman, 2012). Metodens prinsipp er vist i figur 23 (Gudbrandsen).



Figur 103 Prinsipp med MIG sveising (Gudbrandsen)

Både lysbuen og det smeltede metallet er beskyttet av en inaktiv gass (Argon) under sveiseprosessen. Ulike teknikker³⁸ for overførsel av smeltet metall fra tilsett tråden til sveisen kan benyttes. De ulike sveise parameterne som strøm, spenning og sveisehastighet kan avleses slik at varmetilførselen, dvs hvor mye varme som tilsettes smeltebadet, kan beregnes. Dette kan igjen benyttes til å beregne bredden av den varmpåvirkede sonen og hvilke temperaturer og den tid ulike sonene har vært eksponert for under sveisingen.

Metoden er den sveisemetoden som i størst grad i Norge i dag benyttes for sveising av aluminium. Data som strøm, spenning og sveisehastighet sammen med sveisetrådens data, kan benyttes til å beregne kostanden med bruk av metoden for hver meter sveis som sveises (Gudbrandsen, Kostnadsberegning av sveiste konstruksjoner, 2002).

³⁷ MIG-Metal Inert Gas

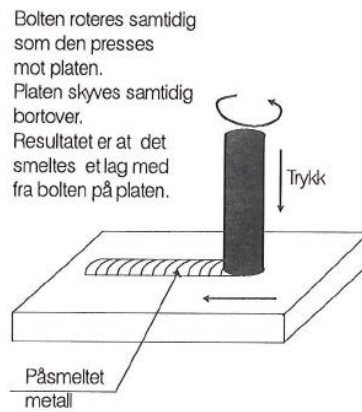
³⁸ Kortbue, spray-bue og puls-spray-bue. For ytterligere informasjon henvises det til Weland.

3.7 Friction Stir Welding

Siden FS-sveising er en grunnleggende forutsetning for å benytte aluminium i hengebroer slik beskrevet i rapporten til Olsen (DR.TECHN. Olav Olsen, 2020) blir denne sveisemetoden relativt detaljert gjennomgått både med hensyn på prinsipp, funksjon og de ulike parameter som danner grunnlag for kvaliteten på en FS-sveist forbindelse.

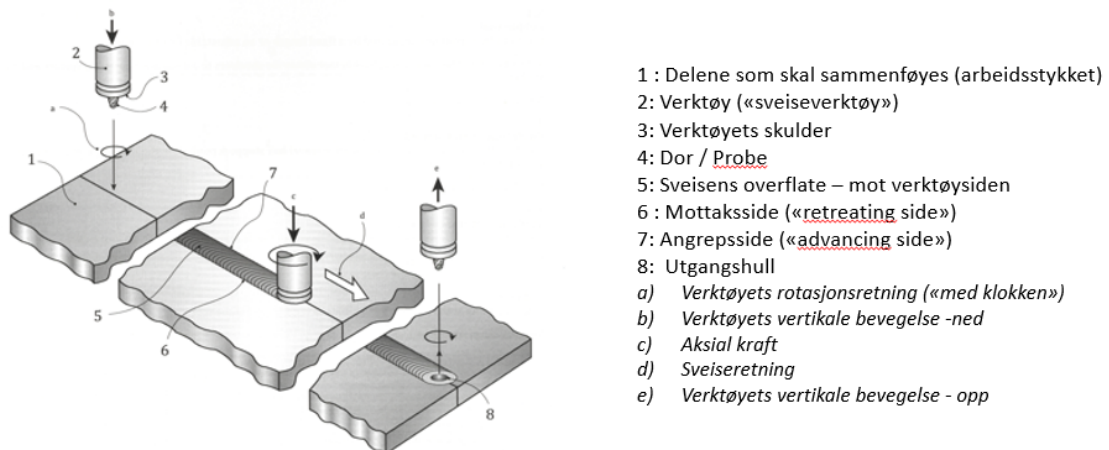
FSW (Friction Stir Welding)³⁹ ble utviklet og patentert på "the welding Institute" i England i 1991 (Mishra & Komarasamy, 2016) og patentert frem til 2015. Metoden er relativt ny og finner stadig nye anvendelse. FS-sveising er en sammenføyningsmetode som ikke smelter materialet under sveisingen noe som gjør at det er en metode som har gitt nye muligheter for sammenføring av mange ulike typer materialer (ESAB, 2012). Frem til nå har den hatt sin største anvendelse innen romfarts og flyindustrien og en del tilfeller i forbindelse med bilindustrien. FS-sveising ble opprinnelig benyttet for å sammenføre aluminiumslegeringer grunnet de fordelene metoden viste seg å ha ved at den var mindre følsom for forurensninger, mindre deformasjoner og bedre styrke og utmatningsstyrke sammenliknet med smeltesveising (ERASMUS Project E+ 2017-1-SK01-KA202-035415, 2017). Metoden har særlig anvendelse for sveising av aluminiums kvaliteter i gruppe 2xxx og 7xxx som er vanskelig sveisbar med lysbuesveising. På grunn av ønsket om lettere produkter innen transport på veier, jernbane, vann og luft der aluminium som materiale gir bedre økonomi og mindre utslipp av klimagasser grunnet redusert drivstoff forbruk innen transport sammenliknet med bruk av stål i tilsvarende transport, har det vært et betydelig fokus på utvikling og bruk av FS-sveising til bruk innen disse områdene. (ERASMUS Project E+ 2017-1-SK01-KA202-035415, 2017) .

FS-sveising tilhører en gruppe av friksjonsveiseprosesser er en diffusjonssveiseprosess og er en fellesbetegnelse på ulike prosesser der man benytter en ytre kraft som medfører en plastisk deformasjon av metallene som skal sammenføres slik det prinsipielt er vist i Figur 11 Prinsipp med "tradisjonell" friksjonsveising (Gudbrandsen) med det resultat at det blir en sveis uten at metallet er smeltet.



Figur 11 Prinsipp med "tradisjonell" frikjonsveising (Gudbrandsen)

FS-sveising er en relativt ung sveisemetode sammenliknet med de tradisjonelle smeltesveisemetodene og tilgjengelig kunnskap om metoden er derfor noe begrenset i forhold til den kunnskap som i dag finnes innen lysbuesveising. Metodens prinsipp er vis på 25.



Figur 12 Prinsipp med friksjonssveising (Figur fra NS-EN ISO 25239-1:2020)

Prinsippet for FS-sveising er prosessen starter ved at maskinen starter med å rotere dor'en (proben). Baksiden av fugen som skal sveise må ha en ikke smeltende backing (plate) tett opp under sveisen for å unngå at metallet under sveising synker når sveisingen igangsettes (alternativt at baksiden i

profilen utformes slik at det oppvarmede og plastiske materialet under sammenføyningsprosessen ikke siger ut)

Dor'en som ikke forbrukes i prosessen trykkes, mens den roterer, sakte inn i arbeidsstykket midt i sammenføyning mellom materialene som skal sveises. Materialene som skal sammenføyes må være nøye og fasy holdt sammen under hele prosessen. Når dor'en trenger inn mellom materialene som skal sammenføyes, øker temperaturen på både dor og området like rundt dor. Etter hvert som dor'en trenger inn i fugen øker temperaturen, og materialet blir plastisk. Inntrykket av dor'en i fugen er ferdig når verktøyets skulder er i kontakt med overflaten på materialet. Lokal oppvarming forårsaket av dor'ens rotasjon og friksjon mellom verktøyets skulder gjør at metallet, på grunn av temperaturøkningen, mykner. Friksjonen mellom verktøyets skulder og materialet utvikler mer varme enn overflaten på dor'en som befinner seg inne i fugen, men det er dor'en som skaper deformasjon i metallet gjennom rotasjonen noe som igjen øker temperaturen. Etterhvert reduseres den aksiale kraften ettersom metallet når kritisk temperatur for plastisitet. Når verktøyet har nådd sin dybde fører maskinen den roterende dor'en langs fugen. Verktøyets skulder hindrer metallet i å flyte over overflaten på materialene noe som gjør at oversiden av sveisen flukter med overflaten på materialene som sveises. Når det roterende verktøyet kommer til slutten av sveisen, trekkes verktøyet ut (ERASMUS Project E+ 2017-1-SK01-KA202-035415, 2017).

Ved sveising med FS-sveising vil man ha ulike varmepåvirkning på delene som sveises sammen basert på rotasjonsretningen på dor og fremføring slik det er skissert i figur 26 .

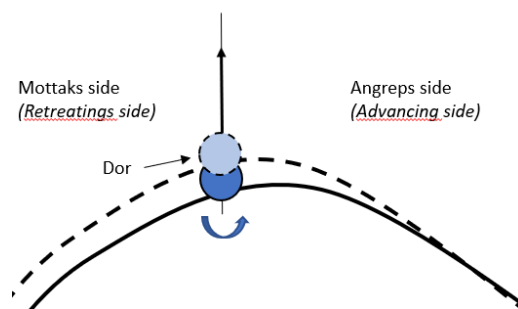


Figure 261 Prinsipp med varmefordeling lang en FS-Sveis

Variasjon i varmepåvirkning kan innvirke på egenskapene i den varmepåvirkede sonen på begge materialene og da særlig utmattingsegenskapene til aluminiumslegeringer (Jordan, Rao, Aamaro, & Allison, 2019). Dette skyldes at, i tillegg til eventuelle feil i overflaten, så vil mikrostrukturen i den plastiske sonen og den varmepåvirkede sonen, dannet under sveiseprosessen, ha betydelig innvirkning på utmattingsegenskapene. Både mulige makro feil og endringer i mikrostruktur påvirker

utmattingssegenskapene som et resultat av betingelsene under sveising. Dette inkluderer design av dor, dybden dor'en presses ned i overflaten, hvor lenge dor'en blir "stående i ro", vinkel mellom dor'ens skulder og grunnmaterialet, fremføringshastighet i kombinasjon med rotasjonshastighet og sammenføynings stabilitet under hele prosessen (Jordan, Rao, Amaro, & Allison, 2019).

Kvaliteten på en FS-sveist forbindelse er avhengig av nøyaktigheten i sammenstilling av delene før sveising og som skal FS-sveises. For å holde delene sammen under sveiseprosessen kreves det en jigg med tilhørende klammer / holdesystem som skal sikre at det ikke oppstår noe avstand (gap) mellom delene under hele sammenføyningsprosessen. Delene som skal sveises må være parallelle slik at overflaten mot dor under prosessen blir lik for begge materialene. Variasjoner større enn 0.1mm gir fare for feil i sveiseforbindelsen. (ERASMUS Project E+ 2017-1-SK01-KA202-035415, 2017). Kreftene som er nødvendig for å holde materialet på plass under FS-sveisingen er avhengig av materialet eller legeringen som skal sveises, dor (probe), geometri på delen, fugetype og sveisutførelsen.

Jigg / holdesystemet bør alltid tilpasse det aktuelle formål og aktuell geometri. Er det planlagt bruk av serieproduksjon kreves det hydrauliske eller pneumatiske sylindere for å holde delene på plass og for å redusere tiden det tar for å bytte fra en del til en annen ("set-up time"). Bruk av utstyr til serieproduksjon må forsvares gjennom en økonomisk vurdering da utstyr for serieproduksjon ved FS-sveising typisk medfører betydelige investeringer (ERASMUS Project E+ 2017-1-SK01-KA202-035415, 2017).

Når man sveiser med FS-sveising vil det både ved start av sveisingen og ved avslutningen av sveisingen av rette produkter være et "krater" eller nøkkelhull som må fjernes før komponenten tas i bruk (ESAB, 2012).

3.8 Kost-nytte vurderinger

I vurderingen knyttet til bruk av aluminium i stedet for stål skal vurderingen omfatte en drøfting knyttet til både bærekraft og økonomi. Sentralt i en økonomisk vurdering vil være en kost-nytte-vurdering.

En kost-nytte-vurdering er ikke en endelig analyse, men en prosess som skal bidra til å bedre grunnlaget for en beslutning (Mishan, 2021). En "god" kost-nytte vurdering må ifølge Mishan m.fl. omfatte 7 grunnleggende spørsmål:

- Hvem er målgruppe for analysen
- Hva er fordelene og hva er kostnadene

- Hvordan skal fordeler og ulemper måles
- Hva er nåverdien av kost-nytte vurderingene
- Er der egenkapital som må vurderes
- Hvordan ivareta usikkerheter
- Hva slags kriterier legges til grunn for beslutninger?

For hver av disse spørsmålene må det knyttes en transparent vurdering til de forhold som ligger til grunn for de valg man tar (Mishan, 2021).

Målgruppen for analysen kan i det mest omfattende være samfunnet som helhet. Dersom man ser på en kost-nytte-vurdering basert på egen virksomhet må en vurdere om det er aksjonærenes (eiernes) økonomiske interesse som skal være avgjørende, eller om det er investeringens betydning for det samfunn bedriften eksisterer i som er viktig (Mishan, 2021). Tradisjonelle kost-nytte vurderinger har vært basert på om en investering kan tilbakebetale seg i løpet av en gitt periode, ofte referert til som tilbakebetalingsmetoden ("*paybackmetoden*"). Denne typen vurderinger må for en virksomhet ofte ligge til grunn for å i det hele tatt kunne forestå en investering med egne midler. Vil ikke en investering forsvares eller tilbakebetales vil typisk eiere og bank være lite villig til å stå bak investeringene. Dersom investeringene kan bidra til andre fordeler, eksempelvis ved at man bidrar til mindre utslipp, man skaper flere lokale arbeidsplasser osv, hvordan skal dette måles? Eller i motsatt fall, dersom en investering bedrer økonomien i en virksomhet men bidrar til økt utslipp av miljøgasser og/eller redusert lokal sysselsetting, hvordan skal dette tas med i en kost-nytte-vurdering?

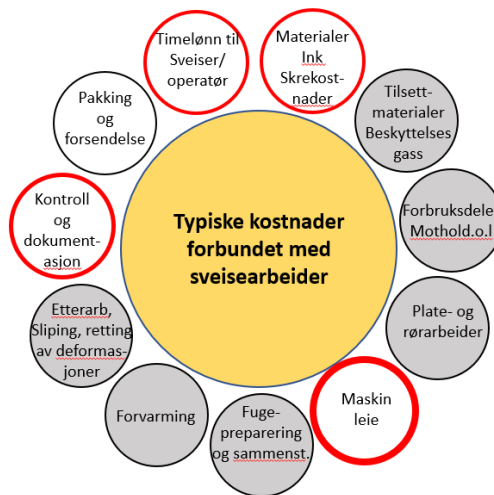
Som kjøper av et produkt, hvilke kostnader skal tas med og hvilke fordeler skal vurderes når man tar en beslutning om kjøp av et produkt. Vi eksempelvis investering i en bru har fordeler i dag, i morgen om 50 eller 100 år og for hvem?

Dette er ifølge Mishan m.fl , eksempel på noen grunnleggende spørsmål man må stille seg når man vurderer kost-nytte knyttet til investeringer , det være seg som kjøper eller som produsent i teknologi for produksjon.

3.8.1 Kostnader forbundet med sveisearbeider

Siden en del av vurderingen er knyttet til produksjon av FS-sveiste paneler vil valg av metode baseres på, i tillegg til de materialtekniske egenskapene, en sammenlikning med kostnader for metoder som

typisk benyttes i dag for sveising av aluminium. En skjematisk fremtilling gitt i Figur 27 Typiske kostnader forbundet med lysbuesveising (fritt etter Gudbrandsen), viser en skisse over kostnader direkte knyttet til lysbuesveising (Gudbrandsen, Kostnadsberegning av sveiste konstruksjoner, 2002).



Figur 27 Typiske kostnader forbundet med lysbuesveising (fritt etter Gudbrandsen)

I figuren er alle de kostnader som er forbundet med lysbuesveising og som ikke er forbundet med FS-sveising skyggelagt. Maskinleie er definert som den kostand knyttet til den investeringen og det nødvendige vedlikehold som er knytte til investeringen over en gitt definert periode som man vurderer investeringen å vare (Gudbrandsen, Kostnadsberegning av sveiste konstruksjoner, 2002). En kostnad som ikke er medtatt for FS-sveising er arbeidsoperasjonen knyttet til kapping av start-stop.

3.9 Bærekraft

Når man definerer bærekraft er det et begrep som er vanskelig å definere siden det stadig er under utvikling (Young, 2015). For å ivareta bærekraftbegrepet har man i dag ikke bare med miljø i bærekraftprinsippet, men også forhold som økonomi og sosiale- samfunnsmessige forhold (Crane) der følgende 3 grunnleggende begrep er inkludert ⁴⁰:

- Å leve på jorden har miljømessige begrensninger

⁴⁰ Referanse er gitt til upublisert rapport fra Nord Universitet- det samme gjelder fri oversettelse av definisjonen fra WCED

- Mennesker har ansvar for å forhindre eller rydde opp i forurensinger
- Økonomien, miljøet og samfunnet er integrert og gjensidig avhengig av hverandre.

Som en generell (og universell) forståelse av bærekraft er rapporten fra "World Commission On Environment and Development (WCED) også kjent som Brundtland Rapporten akseptert som en definisjon av bærekraft (Crane). Denne sier (fritt oversatt):

"Bærekraftig utvikling er utvikling som møter dagens behov uten at det går ut over fremtidige generasjoner til å møte deres egne behov".

Skal man følge definisjonen på bærekraft kan bærekraft defineres som den "optimale" sammenheng mellom miljø, økonomi og sosiale forhold slik den er skissert i Figure 28 Prinsipp for bærekraft, modifisert etter Crane & Dirk) ⁴¹.

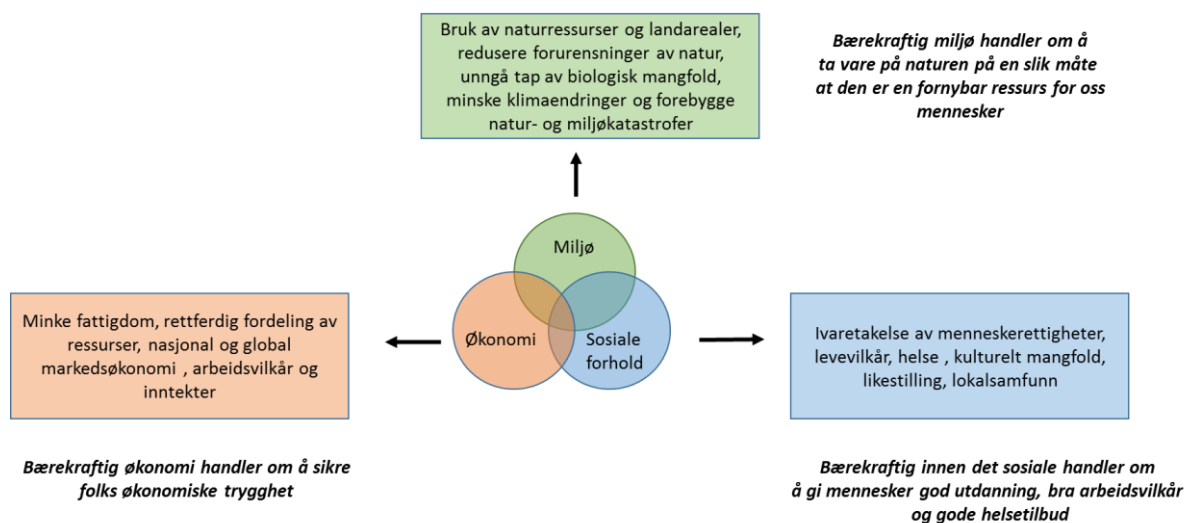


Figure 28 Prinsipp for bærekraft, modifisert etter Crane & Dirk)

I prosjektet Langenuen vurderes også en aluminiumbru ha være en mer bærekraftig enn tilsvarende bru i stål. En vurdering av bærekraft basert på definisjonen gitt i denne rapporten må derfor inkludere de 3 "pilarer" som definerer en bærekraftig produksjon og et bærekraftig innkjøp knyttet henholdsvis til produsent og til kunde (kjøper av bru).

⁴¹ Figur hentet fra upublisert rapport, Nord universitet ved Gudbrandsen

4 CASE- studie Langenuen

Formålet med denne oppgaven er å svare på hovedspørsmålet i forskningen. Som et grunnlag for dette ble det utarbeidet underspørsmål som skulle støtte opp omkring et svar på hovedspørsmålet med forskningen, er FS-sveising av ekstruderte aluminiumsprofiler til paneler for bruk i brukonstruksjoner lønnsomt og bærekraftig..

5.1 Hvilke forutsetninger lå til grunn for oppgaven

Ved oppstart av oppgaven forelå det rapporter fra Statens vegvesen, fra konsultentselskap som hadde vurderte aluminium i kvalitet AL6082-T6 som skulle FS-sveises (DR.TECHN. Olav Olsen, 2020) . I tillegg forelå det noe informasjon gjengitt i møtereferater og noen modelleringer og animasjoner som viste mulig produksjonslinje for paneler og sammenstilling av bruseksjoner. Kort oppsummert vedrørende forutsetninger så var førsteinntrykket at disse ga et godt grunnlag for oppgaven der det kunne legges fokus i det videre arbeid knyttet til kost-nytte -vurderinger og bærekraft.

Basert på tilgjengelig informasjon ved start av arbeidet med oppgaven, hadde jeg oppfattet det slik at kunnskapen vedrørende FS-sveising var godt kjent da man i prosjektet hvor aluminium er vurdert hadde valgt FS-sveising som sammenføyningsprosess for ekstruderte aluminiumsprofiler i aluminiumslegeringen AL6082-T6.

Jeg var tidlig i kontakt med både leverandører av maskiner og produsenter av FS sveiste produkter i aluminium. Mine spørsmål var rettet må å skaffe informasjon knyttet til kapasiteter, tider og kvaliteter på FS-sveiste profiler som var vurdert til Langenuen.

Basert på samtaler og Teams møter med aktuelle ressurser så avdekket jeg relativt raskt at for å skaffe underlag for kost-nytte beregninger måtte det skaffes mer kunnskap omkring FS-sveise prosessen og forhold av betydning for bruk av prosessen.

Som en av produsentene av maskiner opplyste under en samtale "*så er det en misoppfatning at FS-sveising er en prosess som enkelt kan implementeres i en produksjonslinje. Hver enkelt forbindelse, geometri og tykkelse som skal FS-sveises krever sitt individuelle oppsett og oppspenning*".

Uttalelsen fra en som i dag produserer FS-sveiste paneler til skipsindustrien (mindre profiler enn vurdert her og i AL6063) er at "*standardkrav når det gjelder dimensjoner på profiler er alt for grove til at vi kan FS-sveise disse. For FS-sveising må vi stille mye strengere krav til både rett het, tykkelse og*

vriding enn hva standarden gir mulighet for. Det vi vil slite med dersom toleransene er for grove er at vårt utstyr ikke er dimensjonert for å klare oppgaven med å presse sammen delene som skal sveises under oppstilling og under selve sveisingen".

Her må det anmerkes at selv om jeg har forsøkt å finne informasjon i prosjektet vedrørende det grunnlag som lå til grunn for valg av FS-sveising, har det ikke lyktes meg å skaffe denne informasjonen i dette prosjektet.

Om dette skyldes ønske om å holde denne informasjonen intern eller den ikke forefinnes er usikkert, men dette medførte at fokus i oppgaven måtte knyttes til FS-sveisingen som prosess og hvordan og om den kunne benyttes for sveising av profiler til Langenuen.

Jeg tok en beslutning om at siden jeg ikke fant noe underlag for vurderingen om bruk av FS-sveising av disse store ekstruderte profilene i AL6982-T6, så fantes den ikke. Dette medførte også at jeg måtte gå tilbake til utgangspunktet, se på hovedspørsmålet med oppgaven og omformulere tilleggsspørsmålene med det formål å få et mulig grunnlag for å svare på hovedspørsmålet, eller i et annet scenaria, avdekke mulige forhold som må avklares før spørsmålet endelig kan besvares.

5.1.1 Kvantitative spørsmål

Tilbakemeldingen på de kvantitative spørsmålene knyttet til sveisehastigheter, leveransevolum, priser for ekstruderte profiler, FS-sveiste panelet, m.m, var av en slik art at de ikke kunne benyttes i reelle beregninger knyttet til kost-nytte-vurderinger. På maskinsiden var det variasjon, fra samme leverandør, på et vurderinger som varierte på over 100 mill (!) der han tok utgangspunkt i usikkerhet knyttet til AL6083 i disse dimensjoner. Egne erfaringer på litt større, men fortsatt mindre profiler var knyttet til FS-sveising i aluminium kvaliteten AL6063.

Størrelse på presse for 15 meters lange ekstruderte profiler ville også være avhengig av toleransen på profilene som skulle sveises, større toleranser ville kreve mye større og kraftige jigger.

Fra prosjektdeltakerne (bedriftene) ble det også vurdert usikkerheter knyttet til mulig fremtidig volum og mulige andre dimensjoner noe som medførte at grunnlaget for en vurdering av potensial for FS-sveiste forbindelser: her er uttalelsen fra en av produsentene av maskin viktig å ha i bakgrunnen- *Hver enkelt forbindelse, geometri og tykkelse som skal FS-sveises krever sitt individuelle oppsett og oppspenning.* Det vil i praksis si at man ikke kan lage en enkelt maskin som kan generaliserer for mange ulike bruksområder / dimensjoner.

5.2 Krav til ekstruderte aluminiumsprofiler som skulle sveises

Som opplyst av flere av intervjuobjektene, både leverandører av FS-sveisemaskiner og av FS-sveiste paneler så er grunnlaget for en god sveis at delene som skal sammenføres holdes sammen i sammenføyningsflatene med et jevnt trykk fra oppstart av sveising til sveisingen er ferdig, se kapittel 3.7.

Toleransene til ekstruderte aluminiumsprofiler er angitt i egen standard (se kapittel 3.5.2), der alle 3 produsenter av FS-sveise profiler som var ekstrudert viste til at toleransene var for grove til at profiler som skulle benyttes for FS-sveising måtte ha betydelig strengere krav. For dobbeltsidig sveising som er vurdert i dette prosjektet stilles disse kravene til sammenstilling av profilene på begge sammenføyningene som skal sveises. Hvor nøyaktig kravene skulle være ble ikke oppgitt, men det var samme svar fra alle 3, "betydelig" strengere krav. Inntrykket er også at krav til maskin / jigg for å holde sammen profilene under sveisingen øker, dvs kraftigere jigg dersom krav til toleransene øker.

En forutsetning for et godt resultat ved FS-sveising er at skulderen, se kapittel 3.7, treffer overflaten på begge materialene med samme kraft slik at den varmen som utvikles på grunn friksjonen, er lik på begge materialene. Variasjon i tykkelse på overflaten må enten fjernes eller jiggen må utformes slik at den "klarar" å trykke overflatene på profilene slik at de blir på samme linje (akse) over hele sveiseforbindelsens lengde. Baksiden av sveisen er ikke vurdert men det opplyses fra produsenter at det er viktig at baksiden ikke utformes eller får et forhold som gjør at roten kan danne grunnlag for sprekkvekst på utmattingsbelastede FS-sveiste forbindelser.

Et annet forhold som litteraturen viser til er at avkjølingsforløpet etter varmekstrudering kan ha stor betydning (Nanninga, 2008) da kvaliteten Al6082 er mer følsom for avkjølingsforløpet enn Al6082. Dette ble også fremhevet under intervju med en av intervjuobjektene som mente at kompliserte geometrier i kvalitet Al6082 ville være mer kritisk med hensyn på å få hele materialet, gjennom hele tykkelsen, raskt nok avkjølt til at legeringselementene blir fastlåst i strukturen før utharding. Manglende avkjølingshastighet med derpå utharding kunne skape ulik struktur og sammensetning gjennom tykkelsen både relatert til godstykkelse og utfellingenes størrelse og form. Selv om Nanninga nevner noen av disse forholdene har jeg ikke funnet eksakt litteratur eller annen informasjon som kan bekrefte eller avkreftede denne observasjonen. Intervjuobjektene som hadde erfaring med Al6063 hadde ikke samme "bekymringene" knyttet til Al6063 da denne materialkvaliteten tåler relativt mye saktere avkjøling enn Al6082 grunnet det noe lavere

legeringsinnholdet før det er usikkerhet knyttet til om legeringselementene er løst i strukturen etter avkjøling.

Det er også observert at overflateegenskaper på ekstruderte aluminiumsprofiler kan ha stor betydning for utmattingsegenskapene til ekstruderte aluminiumsprofiler. Ekstruderingsprosessen gjør at materialet flyter i lengderetningen, se kapittel 3.5.1, noe som gjør at strukturen i lengderetningen blir "fiberaktig". Når metallet går gjennom formen utsettes den for høy belastning noe som gjør at temperaturen, særlig i overflaten øker. Resultatene, opplyst av en profil leverandør, kan gi ulike egenskaper i overflaten, uttrykt som bland annet ruhet.

I profilkatalogen til Hydal (Hydro Aluminium Profiler) ser man at det er ulike krav til overflate når det gjelder kvalitet Al6063 i forhold til Al6082 der Al6082 har de "dårligste" egenskapene. Det er ikke avklart om dette skyldes prosessen som benyttes eller om det ene og alene er forårsaket av de ulike egenskapene til metallene, selv ved temperatur for varmekstrudering.

Det er ikke funnet noen konkrete rapporter som vurderer om forskjell i ruhet, eksempelvis mellom disse 2 kvalitetene, vil ha større betydning for levetiden.

Det finnes litteratur knyttet til aluminiumsprofiler i 7xxx serien (Mishra & Komarasamy, 2016) at overflateegenskapene etter varmekstrudering, ikke bare ruhet men også mikrostrukturen, kan ha en negativ effekt på materialets egenskaper etter FS-sveising. Dette er heller ikke verifisert eller diskutert av objektene som har vært intervjuet da ingen av disse hadde større erfaringer i FS-sveising av godstykker i Al6082-T6.

Mishra viser til at egenskapene også påvirkes ulikt i forhold til hvilke side man får den høyeste og den laveste oppvarmingen i sveiseforbindelsen, se kap. 3.7.

5.3 Hva innvirker på kvaliteten på en FS-sveist forbindelse

I forbindelse med krav til sveisingen ble det i intervjuene av bedrifter som FS-sveiser i dag og leverandører av mFS-sveise maskiner spurt om hva som var de viktigste faktorene som på virket kvaliteten ved sveising. Utdrag fra disse er knyttet til følgende forhold. Sammenstilling og toleranse på sammenstillingen. En av produsentene opplyste at "*vi har fått levert profiler som har blitt satt inn i FS-sveisemaskinen som ikke har hatt de rette toleranser. Under sveisingen har resultatet vært at siden det ikke har vært en jevnt trykk på flatene, så har doren skjært ut med det resultat at vi har fått feil i sveisen. For å unngå dette har vi innført en egen sjekk av hver enkelt profil før den settes inn i maskinen*".

En annen leverandør opplyste at god kvalitetssjekk på dor før hver enkelt FS-sveis var avgjørende, ble verktøyet slitt ville man ikke oppnå en fullverdig sveis. I tillegg var utformingen og valg av dor viktig (det ble opplyst at det fantes mange ulike dor-utforminger) og at den optimale dor'en var valgt til materialet som skulle sveises og den maskin som ble benyttet.

I litteraturen viser det i tillegg til de operatør/ praktiske erfaringer til at selve dor og skulder på dor har betydning, vinkel doren treffer overflaten på materialet på", dorens hastighet og hastighet som den trykkes ned i materialet og fremføringshastighet når man sveiser.

En annen faktor som direkte på virker resultater og kapasiteter er muligheten til å benytte vannkjølte dor'er som kan innvirke på resultatet ,levetid på dor og produksjonskapasitet.

For kvalitet Al6083-T6 i de aktuelle tykkelser i dette prosjektet finne begrenset tilgjengelig informasjon om forhold knyttet til FS-sveiseprosessen som innvirker på resultatet.

I følge NS-EN-ISO 25239-4: 2020, spesifisering og godkjenning av sveiseprosedyrer, er en prosedyre kun gyldig for den aktuelle maskin, den samme ledelse og den samme forbindelse og hva jeg tolker samme godstykkelse og material, slik at det ikke gis muligheter for noen endringer av disse uten at en ny prosedyre må sveises opp og testes.

5.2.1 Varmetilførsel ved sveising

Et underspørsmål vedrørende FS-sveising var om det fantes noen måte å beregne hvordan varmen som ble introdusert kunne beregnes. Det finne noen leverandører eks ESAB (ESAB, 2012) som har utarbeidet eb formel der de beregner varmetilførsel. Men i følge de vi har intervjuet er det ikke noen gode beregningsverktøy da det er såp mange faktorer (i motsetning til lysbue sveising) som vil innvirke på resultatet. Beregningene hensyntar rotasjonshastighet, aktuell bestemt dor, fremføringshastighet men ivaretar ikke hvordan hardheten i et material og varmetilførselen som funksjon av tykkelse og fremdrift endrer seg slik at verdiene kan benyttes for å beregne hva effekten på varmesyklusen vil være for den varmepåvirkede sonen i metallet..

Det er ikke funnet noen beregningsgrunnlag som kan generaliseres eller benyttes for FS-sveising av hverken Al 6063-T6 eller Al6082-T6.

5.3 Hvilke kriterier ligger til grunn for valg av metode og materialvalg

Kriterier for valg av metode er knyttet til de erfaringer de som benytter metoden har i dag er at FS-sveising er, når den utføres rett, en "fantastisk" sveismetode. Metoden krever ikke tilsettsmaterialer, ingen spesiell fuge preparering, gir ingen avgass og resultater viser at i forhold til lysbuesveising vil en korrekt FS-sveis forbindelse ha bedre egenskaper. Dette er knyttet til styrke og utmattingsegenskaper. I følge en av produsentene av FS-sveiste paneler i aluminium ble overflaten av sveisen, p grunn av måten skulderen på dor'en jobbet mot verktøyet "*fantastisk bra*". For tynnere materialer i ulike aluminiums kvaliteter har metoden vist seg å produsere feilfrie sveiser noe blant annet romfartsindustrien har satt pris på. Innenfor dette segmentet benyttes metoden til sveising av blant annet drivstofftankene til romraketter (opplyst av en av intervjuobjektene).

Når det gjelder valg av aluminium kvaliteten AL6082-T6 er jeg opplyst at kvaliteten ble valgt på grunn av materialets høyere flytegrense, se kapittel 3.2. Ved et høyere styrke / vekt forhold vil man kunne dimensjonere en konstruksjon i kvalitet AL6082-T6 med mindre materialforbruk enn AL6063-T6. Det må vektlegges at selv om flytegrensen er høyere er E-modulen for disse materialene den samme, se kapittel 3.1.1. Det betyr at, når man belaster eksempelvis en lik bjelke i disse materialkvalitetene, inntil man når flytegrensen for material AL6063-T6 så utsettes materialene for den samme tøyningen (nebøyningen), se kapittel 3.2. Belaster man over flytegrensen to 6063-T6 vil materialet deformeres, mens kvaliteten AL6082-T6 vil få en enda større nedbøyning inntil man når flytegrensen også for AL6082-T6. Det betyr at dimensjonerer man med bruk av AL6082-T6 vil man også dimensjonere for større nedbøyning i en konstruksjon.

I litteraturen skiller man på aluminium mellom to typer av utmatting den ene basert på spenningsvariasjoner, den andre basert på variasjoner i tøyning. Det er ikke funnet noen utmattingskurver som viser at den styrke økningen som man tar høyde for i en statisk beregning har samme effekt i en dynamisk beregning der man hensyntar varierende belastning på en konstruksjon. Det er også å forvente at med høyere flytegrense så vil også spennings amplitude, dvs forskjellen mellom maks og minimumsspenning øk. Tilsvarende vil det være for amplituden når det gjelder variasjon i tøyning.

Fra leverandører av ekstruderte aluminiumsprofiler og sveising av disse var det en som viste til gode resultater knyttet til selve sveisingen. En annen leverandør mente at utfra egne beregninger ville kvaliteten AL6063-T6 være fordelaktig når konstruksjonen skulle dimensjoneres mot utmatting.

Aluminium som vist til, se kapittel 3.3, er tilnærmet vedlikeholdsfri da materialet dekkes av et passivt oksidskikt på overflaten. Resultater fra blant annet Erga (Erga, 2017) viser at aluminium i brodekke på eldre bruer ikke har korrodert etter mange års drift.

I motsetning til stål har aluminium god seighet til lave temperaturer og litteraturen viser at selv ved temperaturer godt under -100 °C bibeholde aluminiumslegeringene god slagseighet.

I rapporten fra Erga basert på en vurdering av tilstanden på en del bruer der aluminium er benyttet er det avdekket sprekke dannelse i mange av elementene og platene mellom bærebjelkene der de har konkludert med at dette sannsynligvis skyldes utmatting.

Fra leverandører av aluminiums profiler får vi opplyst at profilene lages med mellom 70 og 100% re-sirkulert aluminium. Hydral opplyser (Hydro Aluminium Profiler) at de benytter 70% resirkulert aluminium i de profiler de produserer.

5.4 Hvilke kostander er forbundet med fremstilling av profiler

Utgangspunktet for dette spørsmålet var for å ha et underlag for en kost-nytte-vurdering. Ingen av de forespurte produsentene av ekstruderte aluminiumsprofiler vill opplyse om pris for ekstruderte profiler beregnet for FS-sveising. Tilbakemelding var at dette var avhengig av volum, leveringstid og den generelle prisen i markedet på aluminium.

Det ble også forespurt om det var forskjell i pris på varmekstruderte profiler i kvalitet Al6063-T6 og Al6082-T6. den ene produsenten opplyste at det var minimale forskjeller mens en annen opplyste at det kunne være betydelig forskjell dersom volumet var stort. Det ble ikke mulig å få konkrete tall eller forholdstall knyttet til dette, men det må antas at legeringene vil variere i pris grunnet fremstillingsmetoden både når det gjelder kraft ved ekstrudering, temperaturstyring og kontroll med avkjølingen.

Når det gjelder fremstilling av ekstruderte profiler synes det som om det er "noe" usikkerhet knyttet til pris da krav til toleranse, kontroll på temperatur og avkjølingshastighet vil innvirke betydelig på pris pr kg. I tillegg vil eventuelt behov (og mulighet) til strekking og retting av profilene slik at de er egnet for FS-sveising være en avgjørende faktor.

5.5 Hvilke kostnader er forbundet med fremstilling av paneler

En vurdering skulle også inkludere mulige kostnader for produksjon av paneler basert på FS-sveising. Selv om noen av aktørene produserte mindre paneler med FS-sveising var det ikke mulig å skaffe tilveie noe informasjon eller kunnskap som kunne inngå i en vurdering knyttet til eventuell egen produksjon av paneler eller innkjøp av paneler som skal inngå i en brokonstruksjon.

5.6 Hvordan vil valg av aluminium innvirke på bærekraft i forhold til stål

Det skulle i prosjektet også vurderes om bærekraft kunne være et incitament for valg av aluminium i stedet for stål.

Tar et utgangspunkt i produksjon av 1 tonn material fra malm går det med 138.1 GJ ($1,38 \cdot 10^{11}$ J) for å produsere ett tonn aluminium mens det går med $2,25 \cdot 10^9$ Joule for å produsere ett tonn stål. Dersom man benytter resirkulert aluminium oppnår man et energiforbruk på mellom 8 og $10 \cdot 10^9$ J / tonn aluminium. Selv med resirkulert aluminium så vil energiforbruket være høyere enn for stål (som typisk også har 40-100% resirkulert der det benyttes 40% av energien i forhold til fremstilling fra malm. (Grafland, 2020)

Intervjuobjektene viste til at de benyttet 70-100 resirkulert aluminium i sin produksjon. En vurdering i forhold til bærekraft vil også måtte involvere hele levetiden til konstruksjonen.

For aluminium vil en ikke forvente vedlikehold i form av maling og annen overflatebehandling i levetiden av bruken.

6 Diskusjon

Opprinnelig, ved start av arbeidet med oppgaven, hadde jeg oppfattet det slik at kunnskapen vedrørende FS-sveising var godt kjent da man i prosjektet hvor aluminium er vurdert hadde valgt FS-sveising som sammenføyningsprosess for ekstruderte aluminiumsprofiler i aluminiumslegeringen Al6082-T6.

Ut ifra de resultatene oppgaven viser til synes det som om valg av prosess mer er basert på et ønske uten at man har tatt betraktninger og drøftinger knyttet til både krav til metoden og de krav som stilles til de ekstruderte emnene for et godt resultat ved FS-sveising.

Litteraturen, selv om den ikke omhandler de godstykkelser og eksakt de kvaliteter som er planlagt benyttet i prosjektet viser til en rekke forhold knyttet til utmatting som både kan påvikre utmattingsegenskapene til en ekstrudert profil og til FS-sveiste paneler.

Jeg har ikke funnet gode beskrivelser av den planlagte varmekstruderingen for de aktuelle dimensjoner. Ut i fra det som er avdekket på andre kvaliteter og andre godstykkelser har ekstrudering parameter, dvs temperatur og hastighet gjennom formen stor betydning for egenskapene både i lengderetningen og på tvers. I prosjektet er det vurdert 2 konsepter der panelene enten plasseres i lengderetning av kjørebanen eller på tvers. Hensyn til utmattingsegenskapene på tvers av de ekstruderte profilene bør tas.

Etter min oppfatning er det manglende sammenheng og informasjon knyttet til aktuell prosess for varmekstrudering og definerte utmattings egenskaper. Vil samme effekt som eksempelvis for kvaliteter testet innenfor 7XXX serien (Mishra & Komarasamy, 2016) være fremhevende for disse to kvalitetene i 6xxx serien, bør det etableres en sammenheng mellom aktuelle utmattingskurve og prosess parameter for ekstruderingen. Design av form som benyttes for ekstrudering av AL6083 bør også ivareta best mulig materialtransport gjennom formen. Hvorvidt dette kan generaliseres for ulike ekstruderingsverk er usikkert.

Krav til toleranser på de ferdig ekstruderte profilene må også avklares i detalj og hvordan disse da vil påvirke fremstillingen av de ekstruderte profiler. Dersom de ikke kan rettes i ettertid, må prosessparameter ved ekstrudering endres med hensyn på hastighet, temperatur og kjøling etter ekstrudering.

Når det gjelder FS-sveiste forbindelser synes det som om at det er enighet, både hos produsenter og i litteraturen, at den statiske styrken på en god FS-sveis har bedre styrke enn en tilsvarende sveis ved lysbues buesveising.

Basert på innhentet informasjon og litteraturundersøkelser er jeg helt overbevist om at FS-sveising er en metode som kan gi meget gode resultater, men de forhold som direkte og indirekte innvirker på kvaliteten og egenskapene til en FS-sveist forbindelse må avklares.

Basert på en vurdering av de resultater som er skaffet gjennom prosjektet er det for meg helt klart at hele konstruksjonen selv om den dimensjoneres med basis i styrke må ha hovedfokus på dimensjonering mot utmatting. Jeg er uskikker, basert på den kunnskap som er etablert i prosjektet om valg basert på en sammenlikning av flytegrense mellom Al60603-T6 og 6082-T6 er optimalt. Dette støttes også opp av en av de største leverandørene av større FS-sveiste paneler i aluminium

som har stilt spørsmål med det valg som er gjort siden de i dag benytter AL6063-T6 i sine paneler til fartøy og mindre brukonstruksjoner.

Når det gjelder bærekraft ble det ikke foretatt noen nærmere undersøkelse knyttet til dette da vurdering av bærekraft må baseres seg på en totalvurdering av hvordan en investering i en bru i aluminium vil innvirke på de tre pilarene, sosiale forhold, økonomi og miljø i et perspektiv over hele briens levetid. Besparelse på miljøet gjennom mindre vedlikehold (maling etc), letter konstruksjon, lokale arbeidsplasser og verdiskapning, transport etc vil være forhold som måtte knyttes inn i en total vurdering. Her vil en kost-nytte-vurdering basert på at målgruppen er samfunnet (og verden) for øvrig som er grunnlaget for analysen

8 Konklusjon (1-2 sider)

Den korte konklusjonen er at prosjektet ikke kan svare på hovedspørsmålet med oppgaven.

Undersøkelsen har vist at det er manglende informasjon knyttet til det materialvalg som er gjort, valg av FS-sveisemetode og de krav som stilles til ekstruderte profiler i aluminium.

Det har ikke vært mulig å skaffe økonomiske data som var anvendbar i en kost-nytte vurdering knyttet til en produksjonslinje for FS-panelere i kvalitet AL6082-T6.

Når det gjelder bærekraft baseres konklusjonen på litteratur tilgjengelig og det konkluderes med, at dersom FS sveisemetoden kan gjennomføres, vil det når hele bærekraftsprinsippet legges til grunn være mer gunstig å bygge broen i aluminium enn stål.

8.1 Forslag til videre arbeider

Forslagene til videre arbeider baseres på det som er funnet av kunnskap inkludert rapporter, forskninger, innhentet informasjon fra leverandører av FS-sveisutrustning, leverandører av aluminiumsprofiler og produsenter som benytter FS-sveing i sin produksjon, enten til egne produkter eller fremstilling av paneler .o.l fra ekstruderte profiler. Produsenter av paneler produserer det av andre kvaliteter og andre dimensjoner enn hva som foreløpig er vurdert i Langenuien prosjektet.

8.1.1 FS-sveising

Det bør etableres en bredere og mer spesifikk kunnskap om prosessen, dens variable og krav til utførelse enn det som ble avdekket i prosjektet. FS-sveising knyttet til sveising av større godstykkelser i aluminium.

8.1.2 Utmattingssegenskaper på tykkveggede profiler

Da det synes som basert på resultater u rapoorten at utmattingsegenskapene på større varmekstruderte profiler i Al6083-T6 (og 6063-T6) er påvirket av parametrene under varmekstruidering og utformiunbgen på formen anbefales det å gjennomføre forsøk med større deler i kombinasjon med undersøkelse av mikrostruktur

8.1.3 Dimensjonsnøyaktighet

Avklare, gjennom forsøk maksimal avvik i toleranser som kan tillates for FS-sveising av større tykkelser i aluminium.

Litteraturliste