



Kunnskap for en bedre verden

Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet i Gjøvik

Avdeling for teknologi, økonomi og ledelse

Ingeniørfag-bygg

BACHELOROPPGAVE:

**EN SAMMENLIKNING AV
BUEKONSTRUKSJONER I HALLER**

Forfattere: Karzan Reshid, Kenneth Slaatsveen og Sindre T. Sørensen

Dato: 16.05.2016

Sammendrag

Tittel: En sammenlikning av buekonstruksjoner i haller		Dato: 16.05.2016
Deltakere: Reshid, Karzan Slaatsveen, Kenneth Sørensen, Sindre T.		
Veileder: Egenes, Jan Steinar		
Oppdragsgiver: Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet i Gjøvik		
Stikkord: Buekonstruksjoner, sammenlikning, stål, tre, miljø, økonomi		
Antall sider: 51	Antall vedlegg: 3	Publiseringsavtale inngått: ja
<p>Kort sammendrag av bacheloroppgaven:</p> <p>Denne studien omhandler en sammenlikning av bueformede tre- og stålkonstruksjoner, med den hensikt å kartlegge de miljøpåkjenningene som medfølger, samt økonomiske forhold og energikrav. Med bakgrunn i de miljø- og klimautfordringer vi står ovenfor i dagens samfunn, anses oppgaven som nyttig og relevant. Oppgaven bygger på fire ulike buekonstruksjoner, med 3 forskjellig spennlengder, lokalisert i 2 kommuner. Med dette oppnås en solid plattform for sammenlikning, hvor det blir sett på hvilken type buekonstruksjon som er mest gunstig avhengig av lastsituasjon, materiale og spennlengde.</p> <p>Dimensjoneringsverktøyet Focus Konstruksjon har blitt brukt for å fastsette tverrsnittene. Det har blitt lagt vekt på å oppnå tilnærmet lik utnyttelsesgrad for å øke nøyaktigheten til sammenlikningsgrunnlaget. EPD-er har blitt gransket nøye for å kartlegge miljøpåkjenninger og energibehov. Dataene er blitt plassert oversiktlig i tabeller for å gjøre analysearbeidet mer effektivt.</p> <p>Under utarbeidelsen har det blitt mottatt god støtte fra aktører innen produksjon av materialer, både med hensyn på beregninger og avgrensninger, samt innhenting av materialkostnader til de ulike buekonstruksjonene. Disse kostnadene har dannet grunnlaget for økonomivurderingen i oppgaven.</p> <p>Generelt ser man at trekonstruksjoner kommer bedre ut enn stål, med tanke på miljøpåvirkninger. Tre er mindre kostnadseffektivt enn stål, og skaper større utfordringer når man trenger store buekonstruksjoner som skal bære de tyngste lastene. Stål har også den fordel som gjør det gjenbrukbart, og kan derfor fungere bærende i nye konstruksjoner etter endt funksjonstid i nåværende buekonstruksjoner. Tre fungerer kun som en energikilde i form av oppvarming og elektrisitet etter endt levetid.</p>		

Abstract

Title: A comparison of arch-constructions in halls		Dato: 16.05.2016
Participants: Reshid, Karzan Slaatsveen, Kenneth Sørensen, Sindre T.		
Supervisor: Egenes, Jan Steinar		
Employer: Norwegian University of Science and Technology in Gjøvik		
Keywords: Arch-constructions, comparison, steel, timber, environment, economics		
Number of pages: 51	Number of appendix: 3	Availability: Open
<p>Short description of the bachelor thesis:</p> <p>The following report intends to compare and examine the environmental differences, as well as the economic aspects of arch-constructions made of steel and gluelaminated timber. The report will also be focused towards energy requirements.</p> <p>Given the environmental and climate challenges we face in today's society, the thesis is to be considered to be highly relevant, and intends to help contractors to make smart choices regarding building materials. The study is based on four different structures, each one with three different spanlengths and located in two different areas in Norway. These specifications, will together create a solid platform for comparing which alternative is the most reasonable to use, depending on loads and spanlengths.</p> <p>Focus Konstruksjon has been used as the analytical program to determine the cross sections of the constructions. It has been focused on achieving approximately equal utilization to get one accurate basis for comparison. In order to determine the environmental stresses, public EPDs have been studied carefully, to create a proper understanding for the pros and cons. The data is straightforward placed in tables in order to make analysis jobs more efficient.</p> <p>During the thesis, two manufacturers have put in a good effort in order to help out with the calculations and, as well as obtaining raw material costs to the various structures. These costs have formed the basis comparison regarding economic differences.</p> <p>In general, wooden structures are in terms of environmental impacts better off than steel. However, wood is less cost effective and generates greater challenges when heavy loads occur. Steel also has the advantage that makes it re-usable, and can therefore act bearing in new constructions after office in current structures. Timber serves only as an energy source in form of heating and electricity, after its lifetime ended</p>		

Forord

Oppgaven gjennomføres som en avsluttende del av en treårig bachelorutdannelse innen bygningsingeniørfaget, ved NTNU i Gjøvik.

Oppgaven ble valgt med bakgrunn i interesse og nysgjerrighet etter å lære mer om stål- og trekonstruksjon, spesielt buer, da dette er et tema som til nå har vært uberørt i det ordinære utdanningsløpet.

Forfatterne ønsker å bruke anledningen til å takke Guri Krigsvoll, ved NTNU i Gjøvik for god veiledning under miljøarbeidet i oppgaven, samt Jørn Rismoen, ved Armec AS for nyttige tips under prosjektering av stålkonstruksjoner og prislister. Gruppen ønsker også å rette en stor takk til Moelven Limtre AS, for veiledning under dimensjonering av limtre og prisoverslag på trekonstruksjoner. Til slutt vil forfatterne takke veilederen Jan Steinar Egenes.

Gruppens tre medlemmer har i stor grad bidratt med en likeverdige innsats under hele oppgaven.

Gjøvik, 16.05.2016



Karzan Reshid



Kenneth Slaatsveen



Sindre T. Sørensen

Innhold

Sammendrag	i
Abstract	ii
Forord	iii
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn for prosjekt.....	1
1.2 Målsetting	1
1.3 Problemstilling	2
1.4 Avgrensninger	2
1.5 Andre studier	5
2 Metode og utførelse	7
2.1 Metode.....	7
2.1.1 Valg av metode	7
2.1.2 Feilkilder.....	8
2.1.3 Validitet og reliabilitet.....	8
2.2 Utførelse	9
3 Teori	12
3.1 Buer	12
3.2 Limtre	12
3.2.1 Produksjon av limtre.....	12
3.2.2 Materialeegenskaper – limtre	14
3.3 Stål.....	14
3.3.1 Produksjon av stål.....	14
3.3.2 Materialeegenskaper – stål	15
3.4 Miljøpåvirkning.....	15
3.4.1 Generelt.....	15
3.4.2 Miljøindikatorene	16
3.4.3 Limtre miljø	17
3.4.4 Stål miljø.....	18
4 Resultat og analyse.....	19
4.1 Økonomi.....	19
4.2 Miljøbelastning.....	21

4.3	Energi	31
5	Diskusjon	34
5.1	Diskusjon av metode og utførelse	34
5.2	Diskusjon av resultat	34
5.2.1	Økonomi	34
5.2.2	Miljø	35
5.2.3	Energi.....	35
5.3	Oppsummering	36
5.4	Forslag til videre arbeid.....	37
6	Litteraturliste	38
	Vedlegg A – Tverrsnitt, bjelkehøyde og egenvekt	I
	Vedlegg B - Utnyttelsesgrader	III
	Vedlegg C - Kostnadsoversikt.....	IV

Figuroversikt

Figur 1.1: Bæresystem.....	1
Figur 1.2: Konstruksjon A.....	2
Figur 1.3: Konstruksjon B.....	2
Figur 1.4: Konstruksjon C.....	3
Figur 1.5: Konstruksjon D.....	3
Figur 1.6: Lastsituasjon 1.....	4
Figur 1.7: Lastsituasjon 2.....	4
Figur 1.8: Lastsituasjon 3.....	5
Figur 2.1: Variabler.....	8
Figur 2.2: Arbeidsprosess.....	10
Figur 3.1: Livssyklus (Gjengitt med tillatelse av Limtre foreningens medlemmer).....	13
Figur 4.1: Materialkostnader Sandnes.....	19
Figur 4.2: Materialkostnader Lenvik.....	19
Figur 4.3: GWP Sandnes.....	21
Figur 4.4: GWP Lenvik.....	21
Figur 4.5: ODP Sandnes.....	22
Figur 4.6: ODP Lenvik.....	22
Figur 4.7: POCP Sandnes.....	23
Figur 4.8: POCP Lenvik.....	23
Figur 4.9: AP Sandnes.....	24
Figur 4.10: AP Lenvik.....	24
Figur 4.11: EP Sandnes.....	25
Figur 4.12: EP Lenvik.....	25
Figur 4.13: GWP pr. kg.....	27
Figur 4.14: ODP pr. kg.....	27
Figur 4.15: POCP pr. kg.....	28
Figur 4.16: AP pr. kg.....	28
Figur 4.17: EP pr. kg.....	29
Figur 4.18: GWP Sandnes klimagassregnskap.....	30
Figur 4.19: GWP Lenvik klimagassregnskap.....	30
Figur 4.20: Ikke-fornybar energiforbruk Sandnes.....	31
Figur 4.21: Ikke-fornybar energiforbruk Lenvik.....	31
Figur 4.22: Forhold mellom ikke-fornybar og fornybar energi.....	32

Tabelloversikt

Tabell A 1: Tverrsnittsdata for Sandnes 50 meter spenn	I
Tabell A 2: Tverrsnittsdata for Lenvik 50 meter spenn	I
Tabell A 3: Tverrsnittsdata for Sandnes 75 meter spenn	I
Tabell A 4: Tverrsnittsdata for Lenvik 75 meter spenn	I
Tabell A 5: Tverrsnittsdata for Sandnes 100 meter spenn	I
Tabell A 6: Tverrsnittsdata for Lenvik 100 meter spenn	II
Tabell B 1: Utnyttelsesgrader	III
Tabell C 1: Kostnadsoversikt fra Armec AS.....	IV

Formelloversikt

Formel 1: Krumningsradius	9
---------------------------------	---

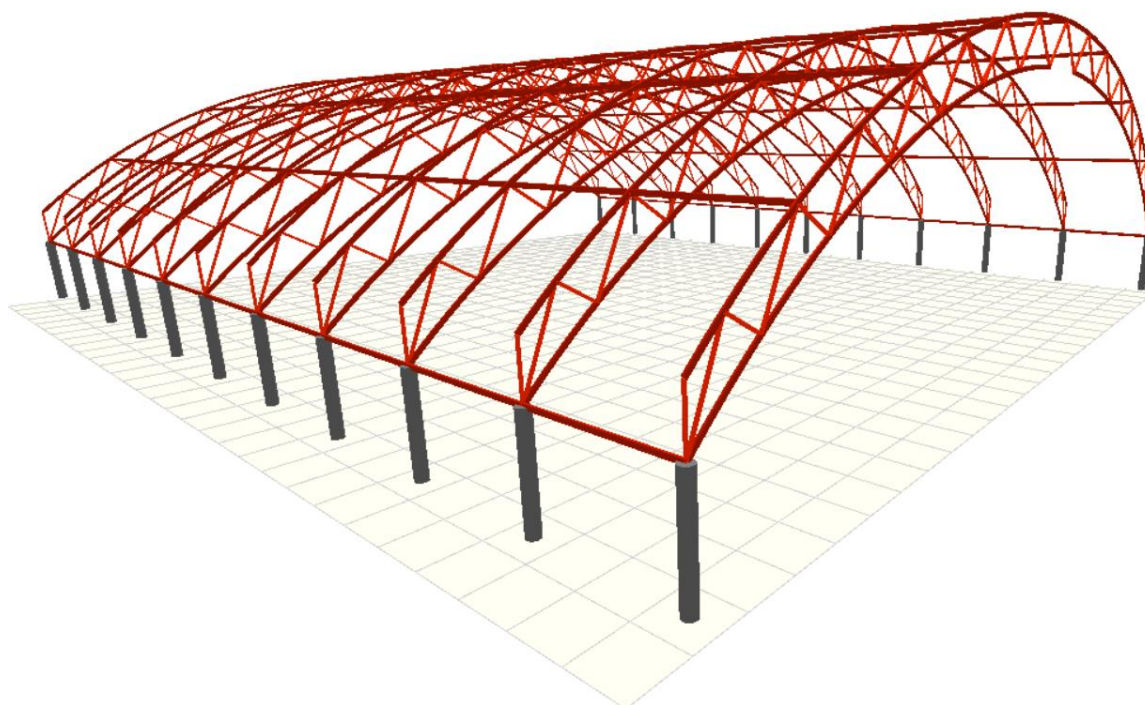
Definisjoner og ordforklaringer

Bjelkehøyde:	Avstand mellom over- og undergurt
Pilhøyde:	Høyde fra bunnlinje ved opplager og opp til bunnen av undergurt i toppunktet
Teknisk levetid:	Byggets estimerte levetid i denne oppgave er fastsatt til 60 år.
Klima	Gjennomsnittlig vær bearbeidet av enkeltobservasjoner over en tidsperiode. Klimaendring som følge av skadelig utslipp
Miljø:	Begrepet miljø i denne oppgaven er rettet mot menneskeskapt miljøforurensning som bidrar med negativ effekt på natur og klima på verdensbasis

1 Innledning

1.1 Bakgrunn for prosjekt

Buekonstruksjoner har i de siste tiårene blitt brukt i økt grad i hallkonstruksjoner. Med bakgrunn i økt fokus på miljø er det interessant å se hvilke typer buekonstruksjoner som er mest miljøvennlige og fører til lavest mulig kostnad. Oppgaven består av å sammenlikne buekonstruksjoner av stål og limtre, to materialer med vidt forskjellige egenskaper. Limtre er et lett og fornybart materiale som blir produsert av lokale råmaterialer. Stål er et tyngre materiale med gode bæreegenskaper og mer fleksibilitet i produksjon. Med bakgrunn i våre forhåndskunnskaper vet vi at stål og limtre har konstruksjonsmessige ulemper og fordeler, under gjennomføringen av oppgaven skal forskjeller innen miljø og økonomi belyses. Leverandører er også interessert i å presentere sine produkter på best mulig måte, spesielt med hensyn på miljø. Figur 1.1 viser et tenkt bæresystem av buekonstruksjoner. I rapporten er én bue tatt ut og dimensjonert.



Figur 1.1: Bæresystem

1.2 Målsetting

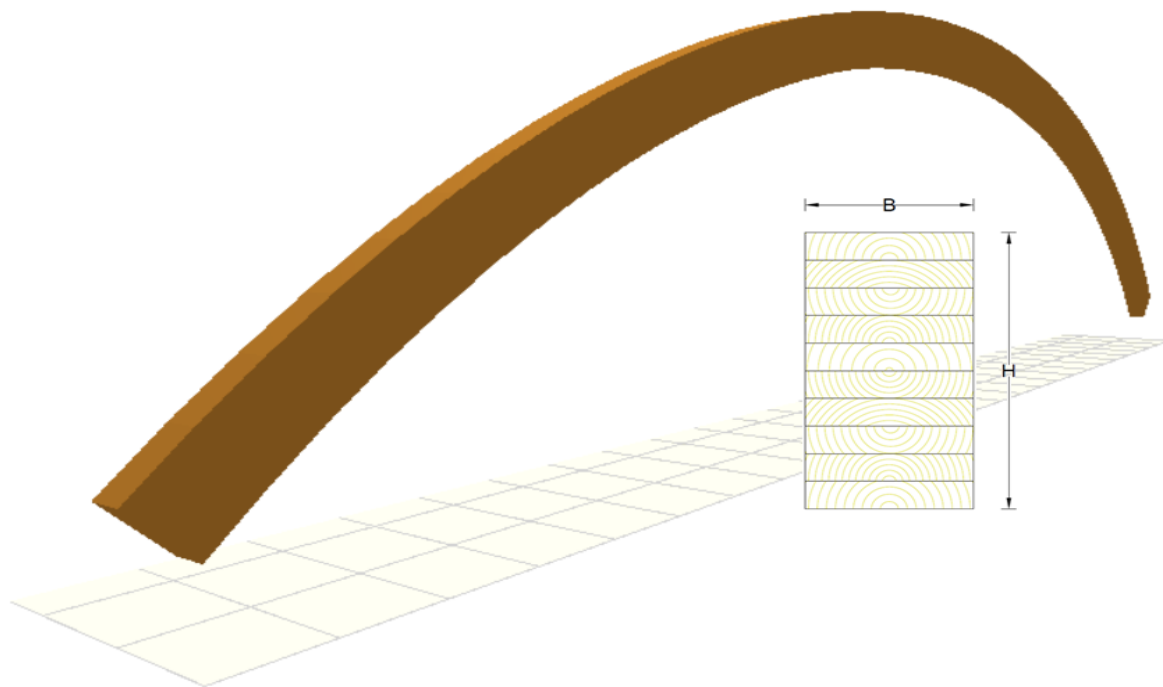
Målsettingen for prosjektet er å belyse forskjeller mellom stål og tre med fokus på økonomi, miljøbelastninger og energiforbruk, gitt at materialene skal bære samme laster. Hovedmålet er å se om det er mulig å spare penger og redusere miljøbelastninger, avhengig av materialvalg.

1.3 Problemstilling

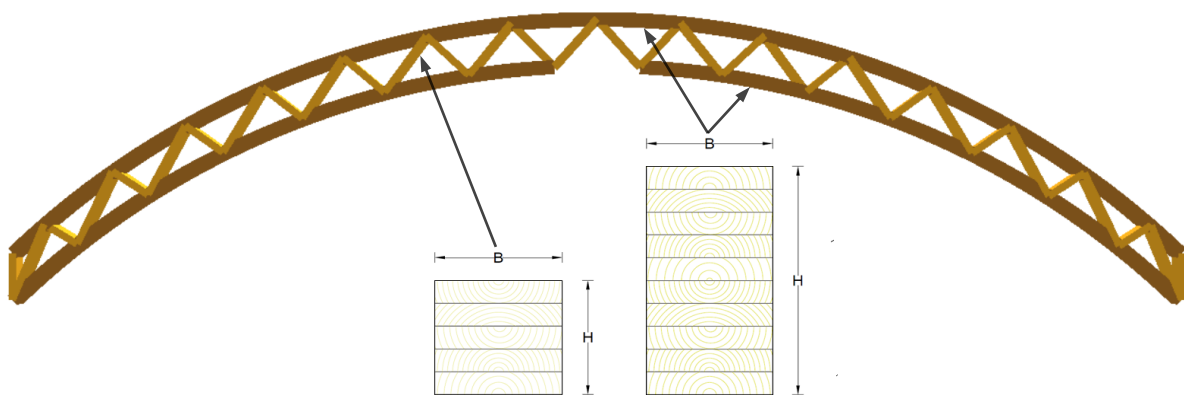
«Sammenlikning og vurdering av ulike buekonstruksjoner av stål og tre med bakgrunn i økonomi, miljø og energi»

1.4 Avgrensninger

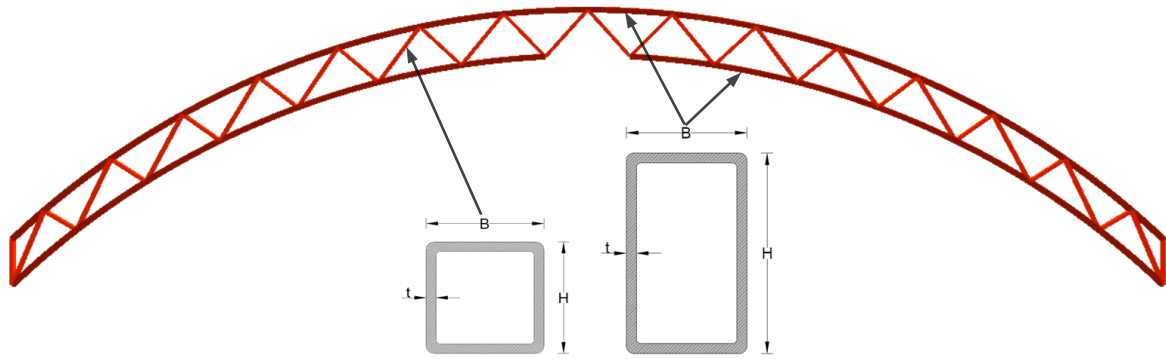
Massivbuen, det 2-dimensjonale fagverk av tre, det 2-dimensjonale fagverk av stål og det 3-dimensjonale fagverk av stål, blir heretter referert til som henholdsvis A, B, C og D, som vist på Figur 1.2 - Figur 1.5.



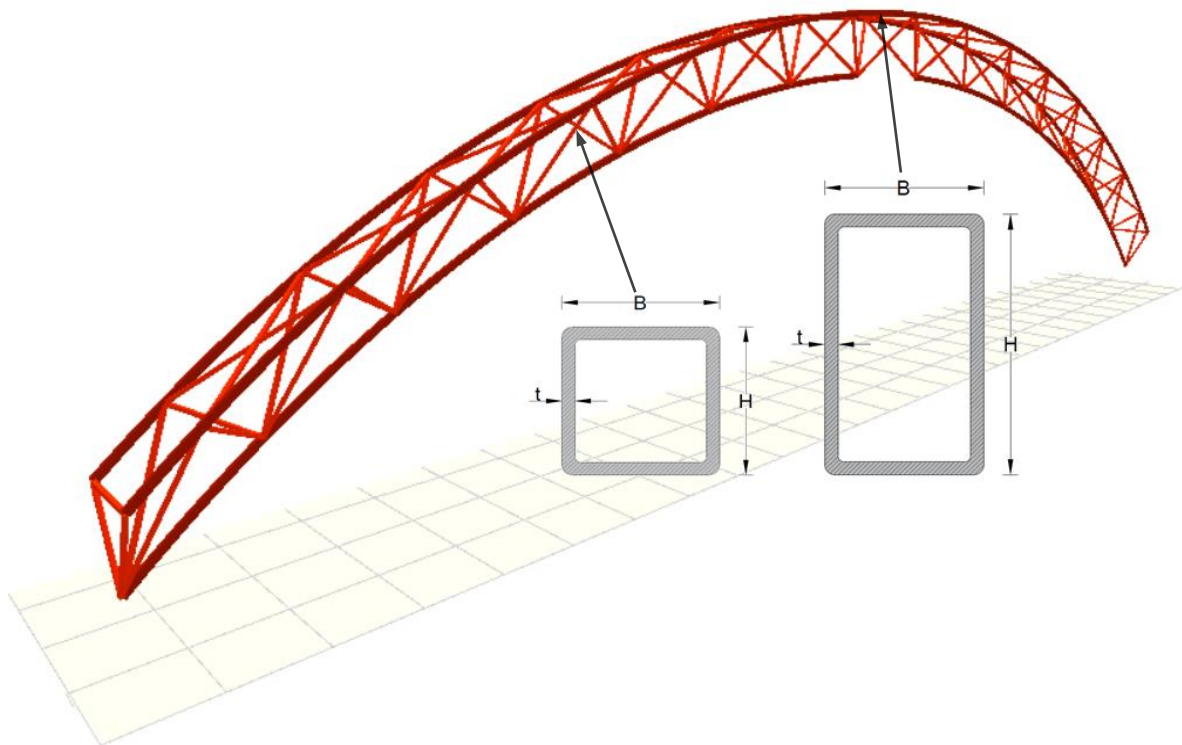
Figur 1.2: Konstruksjon A



Figur 1.3: Konstruksjon B



Figur 1.4: Konstruksjon C



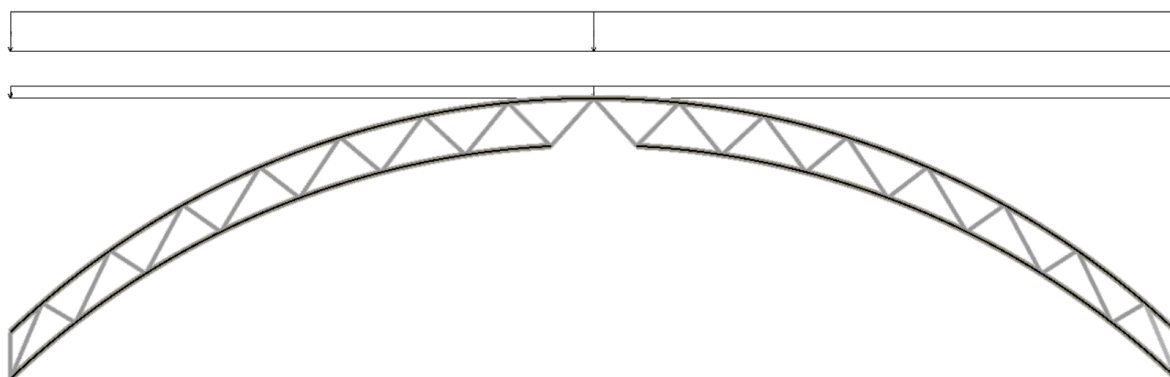
Figur 1.5: Konstruksjon D

Spennlengdene begrenses til 50 , 75 og 100 meter, disse er valgt med bakgrunn i hallers store spenn. Pilhøydene for de respektive spennlengdene er henholdsvis 10, 15 og 20 meter.

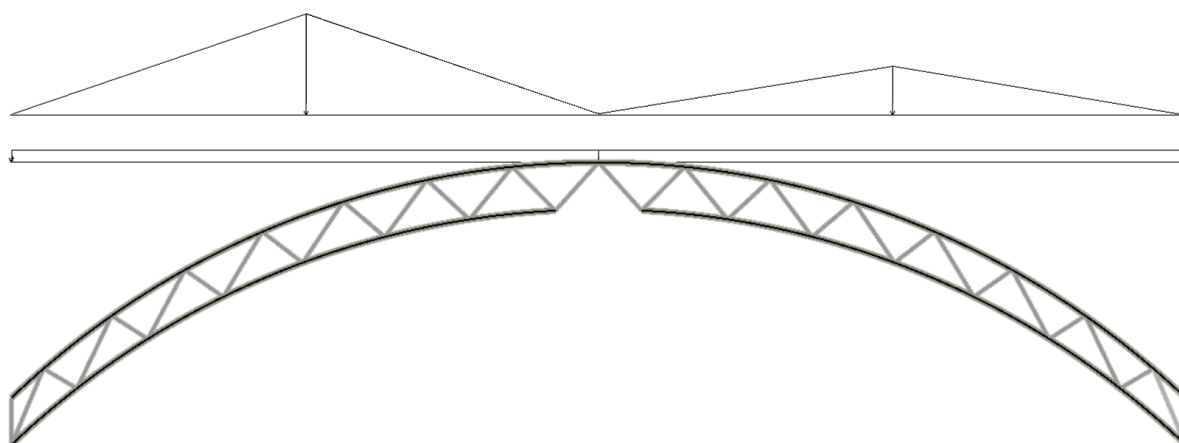
Senteravstanden ble valgt til 6 meter, basert på anbefalinger fra Moelven Limtre AS og Armec AS. Denne senteravstanden avhenger ikke av buen i seg selv, men heller bæringen av takelementene imellom buene. Det er gjort et bevisst valg å ikke dimensjonere knutepunkt,

forbindelser, avstivning og fundamenter i oppgaven. Dette er en prosess som er for tidkrevende og mer komplisert enn omfanget til oppgaven.

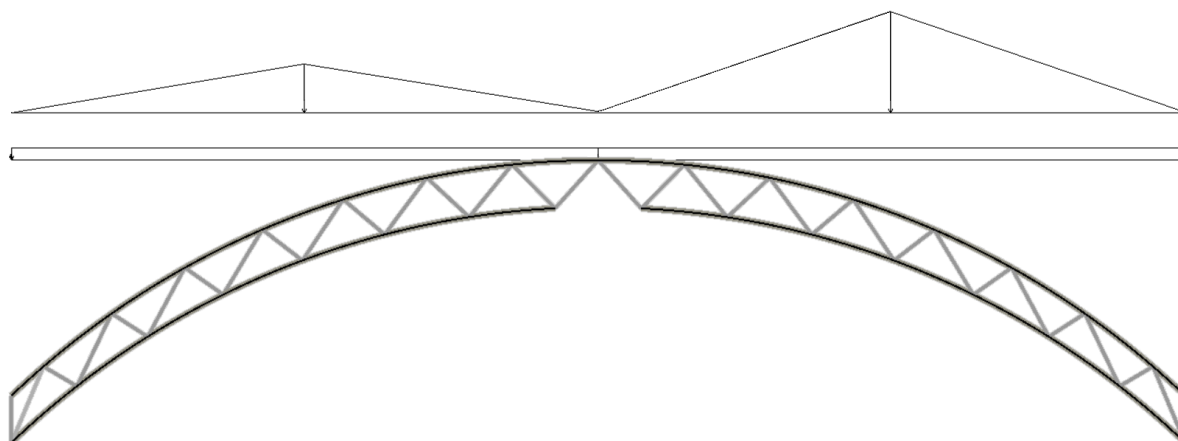
De forskjellige lastsituasjonene er begrenset for ikke å skape for mye arbeidsmengde innen beregningene og vurderingene vi kunne ta. I henhold til (CEN, 2008a) er de dimensjonerende lastsituasjonene for tre-ledd buer jevnt fordelt snø over hele taket og skjevfordelt trekantlast av snø. I tillegg til naturlaster har vi funnet en egenlast for takelementene satt på buene som en horisontalprojeksjon, med verdi 1,8 kN/m. Se Figur 1.6 - Figur 1.8, for en grafisk fremstilling av disse. Vind har dermed blitt sett bort ifra, siden maksimal snø og vind er en usannsynlig kombinasjon av laster. Seismiske laster, brann og bruksgrense har ikke blitt vurdert under oppgaven.



Figur 1.6: Lastsituasjon 1



Figur 1.7: Lastsituasjon 2



Figur 1.8: Lastsituasjon 3

De aktuelle hallene er tenkt plassert i Lenvik i Troms og Sandnes i Rogaland og snølastene er hentet fra de to lokasjonene. Bakgrunnen for dette valget kommer av stor forskjell i verdien til snølastene. Dette gjør det mulig å se om det er forskjeller i bæreevnen til materialene avhengig av lastens størrelse. Bruddformelen anvendt er 6.10(b) (CEN, 2016) og formfaktorene for snø er hentet fra NS-EN 1991 (CEN, 2016).

Den økonomiske sammenlikningen er avgrenset til material-, transport- og monteringskostnader, med hovedvekt på materialkostnader. Miljøindikatorerne valgt er GWP, ODP, POCP, AP, EP. Indikatorernes verdi er hentet fra produksjons-, installasjons-, slutt- og gjenvinningsfasen. Disse fasene betegnes henholdsvis som A1-A3, A4-A5, C1-C4 og D. Energi avgrenses til energiforbruket under de samme fasene. Ikke-fornybar energi blir direkte koblet opp mot GWP.

1.5 Andre studier

Andre studier som prøver å sammenlikne tre mot stål har blitt gjennomgått. Vi har ikke evnet å finne andre oppgaver som spesifikt omhandler samme problematikken, men det er verdt å se om de følger samme trendene som rapporten.

Ifølge studien (PR Newswire, 2013), vil stål som står ute og blir påvirket av vær og vind være mer bærekraftig enn tre, siden utbyttingsraten blir betraktelig høyere for tre.

Buekonstruksjonene utarbeidet i rapporten er derimot innendørs og skal være beskyttet mot dette, derfor vil levetiden for konstruksjonene kunne bli like. Dette fører til at grunnlaget deres for å si at stål er mer bærekraftig enn tre ikke gjelder rapporten, men det viser at det er viktig at arbeidet blir gjennomført ordentlig og at treet beskyttes.

En annen studie (Huff mfl., 2005) har undersøkt miljøbelastningen til produksjonen av ståldører og forsterkede dører av tre. Denne studien viser at ståldørene påvirker miljøet negativt i større grad. Energibehovet for stål er betraktelig høyere og dette er en mulig årsak til de høye utslippene.

2 Metode og utførelse

2.1 Metode

2.1.1 Valg av metode

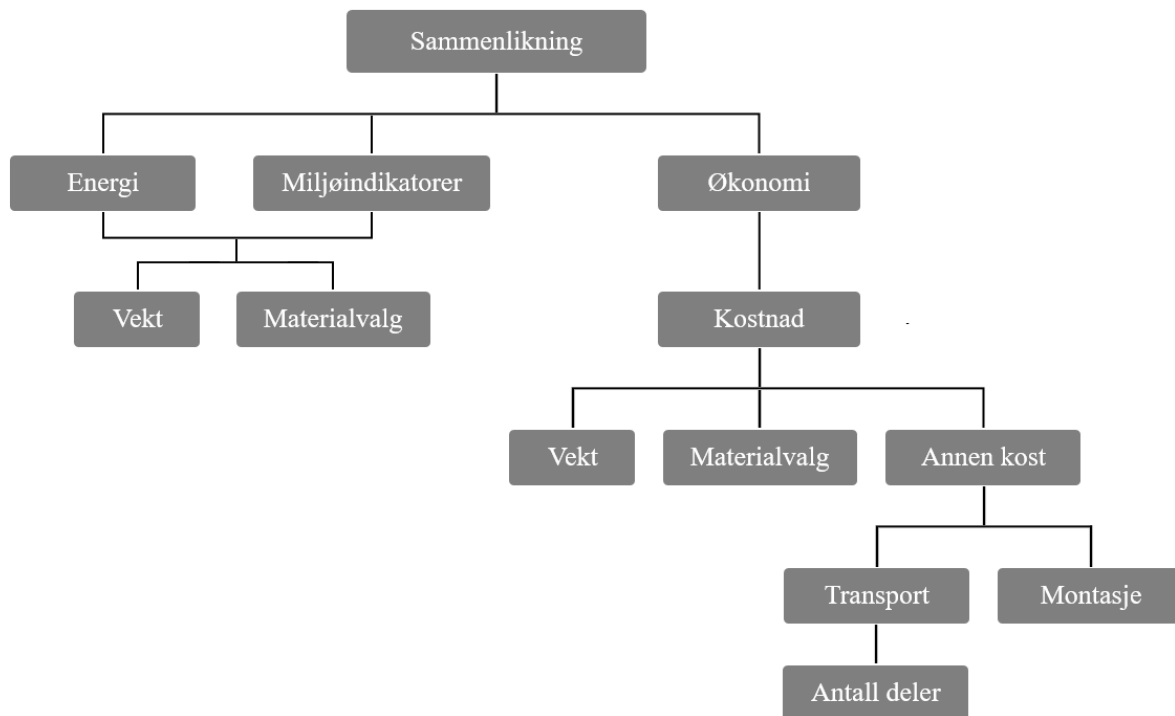
Valget av metoden er en kritisk vurdering man må gjennomføre for å sørge for at problemstillingen faktisk blir mulig å undersøke og enhver problemstilling må ha en tilpasset metode (Jacobsen, 2015).

En eksplorativ studie er en utforskende metode som er ønskelig om man vil oppnå forståelse for de aktuelle undersøkelsesobjektene. Etter gjennomføringen av en eksplorativ studie er det mulig å danne en hypotese og trekke slutninger basert på resultatene. I oppstarten av en eksplorativ studie er det naturlig å prøve å finne sekundærdata, som er data samlet inn av andre. Primærdata er data man selv genererer og samles inn om ønskelig eller nødvendig (Gripsrud, Olsson og Silkoset, 2010).

For å kunne besvare problemstillingen er det valgt en eksplorativ studie som metode. Dette gjorde det mulig å sammenlikne buekonstruksjoner av stål og tre, med hensyn på et sett utvalgte undersøkelsesobjekter og deres variabler. Med bakgrunn i mangel av eksisterende sekundærdata har innsamling av primærdata vært nødvendig. Dimensjoneringen av buekonstruksjonene er et naturlig utgangspunkt, da dette danner grunnlaget for alle objektene problemstillingen ønsker å belyse. Undersøkelsesobjektene som skal sammenliknes er miljø, økonomi og energi.

En litteraturstudie ble gjennomført for å kunne dimensjonere buekonstruksjonene og sammenlikne undersøkelsesobjektene. ISO 14025, 14044, 21930 og NS-EN 15804 ble gjennomgått for å forstå bakgrunnen til de miljødeklarasjonene som skulle anvendes til sammenlikningen av belastningen buekonstruksjonene påfører miljøet. ISO er en omfattende samling av standarder som benyttes av bedrifter og lovverk verden over. NS-EN er også et anerkjent standardverk. ISO 14025 og 14044 er generelle lovverk som ligger bak ISO 219304 og NS-EN 15804. De to sistnevnte er spesifikt rettet mot bygg. Valget av miljøindikatorer er gjort med bakgrunn i kunnskapen innhentet fra disse.

Figur 2.1 under beskriver oppbygningen av undersøkelsesobjektene og deres variabler.



Figur 2.1: Variabler

2.1.2 Feilkilder

En mulig feilkilde er selve dimensjoneringen av buekonstruksjonen i analyseprogrammet. Det er mange input som må registreres i analyseprogrammet før dimensjoneringen gjennomføres og egenvekten hentes ut. Her kan det gjøres feil og for å sikre kvaliteten av dataen har vi ofte jobbet to sammen.

En annen kritisk fase er innsamlingen av verdiene til de valgte variablene. Det er mange tall fra tabeller som er anvendt i oppgaven, og både feilregistrering og feiltolkning kan inntreffe.

2.1.3 Validitet og reliabilitet

Når man snakker om validitet dreier det seg om å vurdere hvorvidt man har målt det man har til hensikt å måle (Gripsrud, Olsson og Silkoset, 2010). Validitet er et begrep godt egnet for studier som bygger på tall, siden det er enkelt å vurdere hvorvidt tallene beskriver det man i utgangspunktet er interessert i å måle (Halvorsen, 2008).

EPD-ene innehar høy validitet siden de inneholder konkrete verdier som beskriver relevant miljøbelastning og energiforbruk.

Begrepet reliabilitet dreier seg om målefeilen til dataen. Hvis dataen har høy reliabilitet er det liten sjans for tilfeldig målefeil og en ny gjennomføring vil gi tilnærmet samme resultat (Halvorsen, 2008).

Dimensjoneringen anses å ha høy reliabilitet, siden et anerkjent dimensjoneringsverktøy har blitt anvendt. Reliabiliteten til EPD-ene er ikke fullstendig tilfredsstillende, fordi det er vanskelig å påstå at verdiene er generiske nok. Det kan da oppstå målefeil i form av at miljøbelastningene og energiforbruket ikke blir generelle nok. Det samme gjelder kostnadsinformasjonen, siden den heller ikke er generisk nok.

2.2 Utførelse

I forkant av dimensjonering, ble det bestemt hvilke materialer og konstruksjonstyper gruppen skulle undersøke i oppgaven. Dette for å danne en plattform til videre arbeid for bestemmelse av buekonstruksjonens spennlengde og høyde. Til dimensjonering og statiske beregninger har gruppen benyttet seg av analyseprogrammet Focus Konstruksjon. Fremstilling av tverrsnittsfigurer har blitt gjennomført i tegneprogrammet AutoCAD.

3 generelle fagverk ble modellert med ulike spennlengder og påført lik snø- og egenlast som et grunnlag uavhengig av materiale. Det ble deretter modellert duplikater og materialvalget kunne fritt justeres med tilhørende materialvekt som dannet konstruksjon B og C.

Konstruksjon D ble også bygget opp av de generelle fagverkene, massivbuen ble modellert direkte som en tre-ledd-bue i programmet. Fagverkene har blitt modellert med ulike bjelkehøyder, de lengre spennene måtte utføres med høyere bjelkehøyder for å øke kapasiteten, disse er presentert sammen med egenvektene og tverrsnittensdataen i Tabell A 1 - Tabell A 6.

Pilhøydene er utarbeidet som et forhold mellom seg selv og spennlengdene, dette forholdet er basert på informasjon hentet fra Limtreboka (Bell og Liven, 2015) og er 0,2. I Focus Konstruksjon ble buene modellert ved hjelp av en krumningsradius beregnet ut ifra Formel 1: Krumningsradius (Bell og Liven, 2015), hvor l og f er henholdsvis spennlengde og pilhøyde.

$$R = \left(\frac{l^2 + 4 \cdot f^2}{8 \cdot f} \right)$$

Formel 1: Krumningsradius

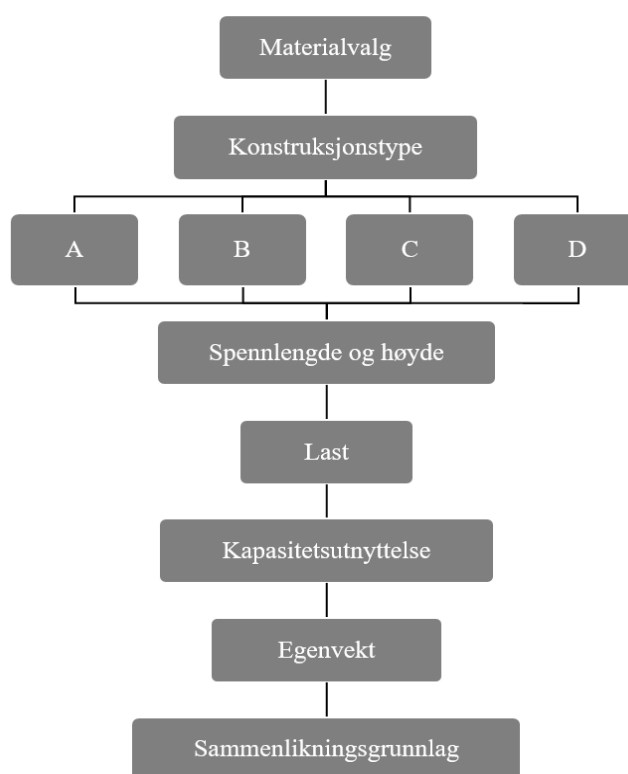
Knekk lengden av gurtene har blitt definert som avstanden mellom avstivningen. Avstivningen er også representert som et opplager i den retningen vinden ville virket.

Buekonstruksjonene er videre simulert med forskjellige tverrsnitt i analyseprogrammet slik at lavest mulig tverrsnitt og tilnærmet lik kapasitetsutnyttelse oppnås. Dette resulterer i materialmengden hver buekonstruksjon trenger for å inneha samme bæreevne.

Utnyttelsesgradene presenteres i Tabell B 1.

I henhold til Focus Konstruksjon ble de kritiske kontrollene for konstruksjon A i Lenvik og Sandnes henholdsvis, EC5 - 6.4.3(6.53) Saltaksbjelker, krumme bjelker og saltaksbjelker med krum underside og EC5 – 6.3.2(6.23) Søyler utsatt for trykk eller kombinasjon av trykk og bøyning. Konstruksjon B ble kritisk kontrollert mot EC5 – 6.3.2(6.23) og 6.3.2(6.24) i henholdsvis Lenvik og Sandnes (CEN, 2010). Stålkonstruksjonene C og D ble kritisk kontrollert mot EC3 – 6.3.3(6.62) for både Lenvik og Sandnes (CEN, 2008b).

Dette danner et sammenlikningsgrunnlag for objektene økonomi, miljø og energi. Figur 2.2 viser grafisk fremstilling av arbeidsprosessen ved dimensjoneringen av buekonstruksjonene.



Figur 2.2: Arbeidsprosess

For å belyse forskjellen mellom stål og tre, er buekonstruksjonenes totale vekt tatt i betraktning for beregning av kostnader, miljøbelastninger og energiforbruk. Microsoft Excel har blitt benyttet til all beregning og fremstilling av diagrammer og tabeller.

Kostnadsanalysen er gjennomført ved å innhente kostnadsinformasjon fra leverandører.

Transport- og montasjekostnad presenteres i Tabell C 1.

For å kartlegge energiforbruket og miljøpåvirkningen i forbindelse med produksjon, transport og utførelse av de relevante buekonstruksjonene, har det blitt tatt i bruk EPD-er for tre og stål. Disse er utarbeidet for henholdsvis Moelven Limtre AS og Skanska AS Norge og verifisert av en nøytral tredjepart, godkjent av EPD-Norge.

3 Teori

3.1 Buer

Buekonstruksjoner utføres vanligvis parabel- eller sirkelformet. I enkelte tilfeller, hvor man for eksempel ønsker å skape mer rom og øke takhøyden, kan mer eliptiske buer være et alternativ. Buens forhold mellom pilhøyden og spennlengden bør ligge mellom 0,15-0,30. Med lave buer kan det oppstå store horisontale krefter som må tas opp av oppleggene. Derfor må grunnforholdene og oppleggene vurderes nøye. Dersom grunnforholdene ikke er i stand til å ta opp kreftene, kan det være lurt å ha en høyere pilhøyde for å begrense størrelsen på kreftene, eventuelt kan man også ta i bruk strekkbånd som går mellom oppleggene (Bell og Liven, 2015).

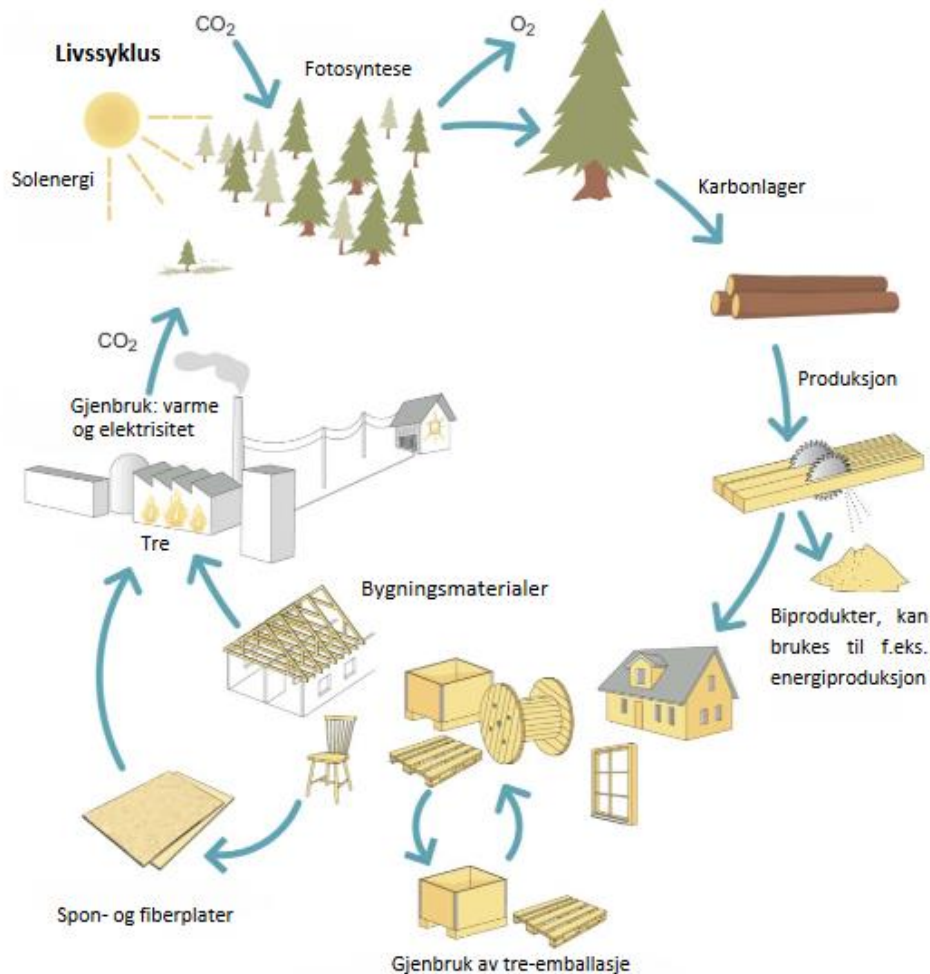
Tre-ledd bue er den mest anvendelige buekonstruksjonen. Den konstrueres med et ledd i midten av spennet for å gjøre den statisk bestemt og er dermed ikke like sensitiv for setninger og fuktinnhold som den statisk ubestemte to-ledd buen (Bell og Liven, 2015).

Det er ønskelig å ha en buekonstruksjon med så lave momenter som mulig, dette avgjør ofte hvilke form buen skal inneha. Dagens nasjonale tillegg til snølaststandard, krever at buer skal dimensjoneres med trekantformet snølast på hver side av buen, noe som skaper ekstreme bøyemomenter. Det mest kritiske snittet for en bue ligger i fjerdedels-punktet, hvor de største bøyemomentene oppstår. Da buer ofte er slanke konstruksjoner, er det svært viktig å kontrollere for knekking ut av planet (Bell og Liven, 2015).

3.2 Limtre

3.2.1 Produksjon av limtre

Limtre utvinnes fra tømmer skåret ut som lameller, før disse limes sammen med et syntetisk lim. Normalt brukes gran i produksjonen i nordlige land, foruten konstruksjoner som utsettes for et fuktig klima. Det brukes i slike tilfeller impregnert furu, ettersom furuens porer ikke lukker seg ved trevirkets død egner den seg bedre for impregnering enn gran (Evans, 2008). Rektangulære tverrsnitt produseres vanligvis med lamelltykkelser på 45mm når det anvendes gran, og 33mm for furu. Etter at lamellene er produsert, tørkes de ned til 6-15% fuktighet, innen de limes sammen. Dette blir gjort for å unngå at treet tørker og trekker seg sammen etter at det er limt, da dette kan resultere i sprekke-dannelser og ett svekket materiale (Bell og Liven, 2015).



Figur 3.1: Livssyklus (Gjengitt med tillatelse av Limtre foreningens medlemmer)

Det produseres i dag to typer limtre, homogent limtre og kombinert limtre. Homogent limtre betegnes ved lik styrkeklasse i alle lameller. Dette er dog ikke den mest bærekraftige måten å produsere materialet på, ettersom trevirke av lavere styrkeklasse forkastes og trevirket blir derfor ikke fullt utnyttet. Den mer konvensjonelle måten å utføre produksjonen på er kombinert limtre. Her brukes det en høyere styrkeklasse i de ytterste lamellsjiktene, for å bevare en høy styrke hvor de største bøyespenningene opptrer, samtidig som man får bedre utnyttelse av tømmeret som blir hugget (Bell og Liven, 2015).

For å oppnå ønsket lengde på bjelken eller buen, skjæres det inn V-formede hakk i lamellenes ender, slik at de passer sammen med neste lamell, denne metoden kalles «fingerskjøting». Av lim brukes det i dag ett sterkt og bestandig MUF-lim (melamin-resorcinol-formaldehyd), som er godkjent for alle klimaklasser. Limet vil være nokså lyst etter påføring, men vil med tiden mørkne noe, derfor brukes det ofte et lysere melamin-lim i fingerskjøtene, av estetiske hensyn (Bell og Liven, 2015).

3.2.2 Materialeegenskaper – limtre

Limtre har svært høy styrke i forhold til dets egenvekt, og egner seg dermed for buekonstruksjoner som krever store spennlengder og laster (Bell og Liven, 2015). Limtreet er i tillegg til å være et estetisk pent materiale, også lett å bearbeide til unike former og fasonger.

Limtre som produseres i dag skal merkes etter fasthetsklasser angitt i NS-EN14080.

Fasthetsklassene strekker seg fra GL20c, som den svakeste blant kombinert limtre, til GL36c, som er den sterkeste. Hver av klassene har spesifiserte krav til de ulike fasthetsegenskapene, eksempelvis bøye-, strekk-, og trykkfasthet. Kvaliteten på trevirke som brukes til å produsere limtreet avgjør hvilken kvalitet det ferdige produktet får, og hvilken fasthetsklasse det tilhører (Bell og Liven, 2015).

3.3 Stål

3.3.1 Produksjon av stål

Reduksjonstrinnet er det første stadiet i produksjon av stål, hvor en kjemisk prosess mellom jermalm, koks og kalkstein produserer råjern. Råjernet er forurenset av forskjellige elementer, dette fører til at det har dårlige fasthetsegenskaper og egner seg svært lite som konstruksjonsstål. Oksydasjonstrinnet reduserer mengden karbon i råjernet, dette blir gjort ved å tilføre oksygen i det flytende råjernet. Denne prosessen gjør det mulig å produsere lastbærende stål (Larsen, 2010).

Under utstøpningsfasen blir stålet støpt til blokker som kan vales til forskjellige profiler og plater. I moderne stålverk blir denne fasen hoppet over og man sender stålet direkte fra deoksydasjonstrinnet til valsen. Ved tilsetning av varierte stoffer under deoksydasjonstrinnet får man stål med forskjellige egenskaper. Den vanligste metoden for konstruksjonsstål er å anvende ferromangan og ferrosilisium. Dette reduserer karbonmengden betraktelig og de få porene som eventuelt dannes spres jevnt utover blokkens volum (Larsen, 2010).

Den kjemiske sammensetningen av stålet påvirker dets mekaniske egenskaper, derfor regulerer internasjonale regelverk dette. For konstruksjonsstål finner man kravene i NS-EN 10025 del 2 (Larsen, 2010).

Mangan og Silisium som blir anvendt i produksjonen av konstruksjonsstål har flere positive virkninger på stålet. Mangan øker fasthet og sveisbarhet, Silisium øker hardhet, strekkfasthet og bruddfasthet (Larsen, 2010).

Avhengig av materialets legeringsinnhold kan man endre dets egenskaper ved mekanisk og termisk behandling, dette fører til en endret struktur av materialet. De ulike metodene man kan bearbeide stålet på skaper forskjellige fordeler, eksempelvis kan normalisering av stål øke strekkfastheten og duktiliteten, seigherding av stål får derimot redusert fasthet, men økt duktilitet og slagseighet (Larsen, 2010).

For buekonstruksjoner i stål kan det være gunstig å velge Mangan, fordi man avhenger av å kunne sveise fagverkene sammen.

3.3.2 Materialelegenskaper – stål

Ved bestilling av konstruksjonsstål må fasthetsklasse og stål kvalitet fastsettes, hvor fasthetsklasse angir flytespenning og stål kvalitet viser til stålets kjemiske sammensetning, termisk og mekanisk bearbeiding, samt slagseighet. De vanligste fasthetsklassene brukt som byggemateriale har en flytespenning på 235-460 N/mm². Høyfaste stål har flytespenning opp til 960 N/mm². Disse to ulike klassene leveres etter henholdsvis NS-EN 10025-1 til 10025-4 og NS-EN 10025-6 (Larsen, 2010).

Stål kan bli gitt ved betegnelsen S XXX YY ZZ, hvor S betegner konstruksjonsstål, XXX gir fasthetsklasse, YY gir stål kvalitet/slagseighet og ZZ gir leveringstilstand. De viktigste parametere for stål er flytespenningen f_y , strekkfastheten f_u og bruddforlengelsen δ_5 . Disse bestemmes i henhold til NS-EN 10002-2, ved hjelp av prøvestaver og strekktesting (Larsen, 2010).

3.4 Miljøpåvirkning

3.4.1 Generelt

Miljø har fått økt oppmerksomhet og fokus det siste tiåret, med påvirkning av klimaet og CO₂-utslipp i front. De fleste klimaforskere er enige om at årsaken til den globale oppvarmingen er menneskets utvidelse av drivhuseffekten, og dette skaper en økende bekymring for klimaeffekter i dag og de nærmeste tiårene fremover. Verden har blitt om lag 0,8 grader varmere siden førindustriell tid, og oppvarmingen ventes å fortsette (Klima- og energiseksjonen, 2014).

Jorden virker som et naturlig drivhus, med drivhusgasser som går i syklus og har en balansert konsentrasjon i atmosfæren. De klimagassene ansett som mest kritiske av de mennesket slipper ut er CO₂, lystgass og metan. Økende menneskeskapt CO₂-utslipp forårsaker ubalanse

som fører til økt drivhuseffekt. Dette kan føre til høyere gjennomsnittstemperatur og klimaendring (Bjerknessenteret for klimaforskning, 2015).

Forskere i FNs klimapanel konkluderer med at den globale temperaturen ikke må være 2 grader høyere i 2100 enn den var under førindustriell tid. Dersom økningen overstiger vil det oppstå ukontrollerte klimaendringer. Det er varierte meninger i samfunnet den dag i dag, og man burde være kritisk til kildene sine, blant annet til temperaturmålinger gjennomført i 1850. Temperaturøkningen burde bremses og under et klimatoppmøte i Paris ved utgangen av 2015 ble det inngått en historisk klimaavtale som skal gjelde fra 2020. Her ble verdens land enige om å jobbe for å begrense videre temperaturøkning (FN sambandet, 2015).

Som følge av global oppvarming etableres internasjonale klimaavtaler Norge må forholde seg til. Dette fører til stadig strengere krav til miljøvennlige materialer i byggesektoren, ettersom byggenæringen bidrar til det nasjonale CO₂-utslippet. Hvilke byggematerialer som er mest miljøvennlig kan være vanskelig å svare på, da det er en rekke faktorer som spiller inn. Materialets miljøbelastninger påløper i tidligfase som råvare og fortsetter til materialet er bærekraftig avfallsbehandlet etter endt levetid, og må dermed vurderes over hele livsløpet.

3.4.2 Miljøindikatorene

GWP, Global Warming Potential, er en verdi basert på gassenes evne til å absorbere varme i forhold til karbondioksid (CO₂), og måleenheten for GWP er av den grunn kg CO₂ ekvivalent. Verdien av GWP kan også brukes som en beregning for å definere den klimatiske virkningen utslipp av klimagasser har på global oppvarming over ulike tidsperioder, vanligvis 20, 100 eller 500 år (Global greenhouse warming, 2016).

ODP, Ozone Depletion Potential, måler stoffets evne til å bryte ned gasser i stratosfæren, også kalt ozonlaget. Dette laget er livsviktig for oss siden det absorberer farlig ultrafiolett stråling fra sola. Små doser av slik stråling virker positivt på biologiske systemer, store doser vil derimot føre til skader på mennesker og påvirke plantelivet (Forskning.no, 2002). ODP-verdien indikerer potensialet et stoff har til å ødelegge ozongass, sammenliknet med potensialet av triklorflourmetan (KFK11). Måleenheten for OPD er kg CFC11-ekvivalent (Stiftelsen Returgass).

POCP, Photochemical Ozone Creation Potential, beskriver potensialet for dannelse av troposfærisk ozon sammensatt av forurensede stoffer. POCP er definert som endringen i gjennomsnittlig ozon (O₃) når et bestemt stoff er redusert i forhold til endringen i

gjennomsnittlig ozon når eten er redusert. Måleenhet for POCP er kg C₂H₄ ekvivalent. Ozon har en beskyttende rolle i atmosfæren, men i troposfæren og nær bakken kan det være helseskadelig (Beck mfl., 1999).

AP, Acidification Potential, forteller oss om den forsurende effekten på land og vann av stoffer som slippes ut i luften. AP-verdien er definert som stoffets potensielle syredannelse sammenliknet med svoveldioksid (SO₂) og har måleenhet kg SO₂ ekvivalent. SO₂ og NO_x slippes ut fra forbrenningsprosesser, og kan falle ned som sur nedbør (Brown mfl., 2015). Den sure nedbøren kan føre til overgjødning av økologi, helseplager og forurening av ferskvann (Miljødirektoratet, 2015).

EP, Eutrophication Potential, tar for seg overgjødning. Eutrofiering oppstår i hovedsak av økt tilførsel av nitrogen (N) og fosfor (P) som resulterer i overdreven vekst av ugress, planteorganismer og økt algeoppblomstring. I vann og vassdrag kan algeoppblomstring over lengre tid skape mangel på oksygen i vann som fiskebestanden og andre arter er avhengig av (Miljødirektoratet, 2014). EP-verdien forteller stoffets potensial for eutrofiering sammenliknet med 1 kg fosfat (PO₄₃). Måleenheten for EP er kg PO₄₃ ekvivalenter (Brown mfl., 2015).

Alle indikatorene blir påvirket av flere utslippsstoffer, men måles opp mot de valgte stoffenes påvirkning.

3.4.3 Limtre miljø

Tre har den egenskapen at det er i stand til å oppta CO₂ fra luften, slik at den renses. Når limtre anvendes som byggemateriale, vil det fortsette å binde CO₂ så lenge det er i bruk og blir vedlikeholdt riktig. Etter endt levetid og det er på tide å bryte ned materialet, vil CO₂ som var tatt opp i treet frigjøres for så å bli tatt opp av levende trær i skogsfelt.

Under produksjonen av limtre ved landets fabrikker brukes ofte eget biobrensel, som stammer fra fabrikkens egne avfallsprodukter. Dette fører til en mer miljøvennlig produksjon. (Splitkon AS, 2015). Under produksjonen er det også et fokus på å utnytte alt treet og ikke la noe gå til spille. Halvparten av trestammen blir utvunnet til materialer, resten blir biprodukter som sagspon og flis. Disse brukes til oppvarming av produksjonslokaler for å sikre tørking av produktene (Svanæs, 2004).

Det tar mellom 70 og 120 år før ny skog blir hogstmoden (Miljødirektoratet, 2011). Så lenge vi planter nye trær etter hogst og holder avvirkingen lavere enn naturlig tilvekst, vil skogen i

et langsiktig perspektiv være en fornybar og klimanøytral ressurs for byggebransjen (Svanæs, 2004).

Ettersom tre er en av jordas naturlige karbonlagre, har produsenter et ansvar for at hogsten ikke overskrider treets naturlige tilvekst. Til nå har ikke dette vært noe problem, da tilveksten i Nord-Europa har vært positiv og i Norge har tilveksten vært om lag dobbel så stor som tilvirkningen (Svanæs, 2004). Dette indikerer at vi kan ta i bruk enda mer trevirke som byggemateriale, samt øke eksporten av materialer og dra økonomisk vinning fra dette (Miljødirektoratet, 2011).

3.4.4 Stål miljø

Stålforbundet (Teknisk Komité, 2009) har satt opp en liste med 20 gode grunner til å bygge med stål med tanke på miljøet. Hovedpunktene deres bunner i at stål er et lett og uorganisk materiale som gjør det enkelt å transportere, montere og resirkulere. Dette er viktige elementer som bidrar til å gjøre byggeplassen mer sikker og ryddig. Hvis man sørger for at stålkonstruksjonene er konstruert effektivt med hensyn på ikke bare montering, men også demontering er det veldig lett å gjenbruke stålkomponenter, hvilket vil redusere behovet for stålproduksjon. I tillegg er stålkonstruksjoner veldig tilpassningsdyktig i form av at det enkelt kan endres etter nye funksjonskrav.

Stålets bestandighet fører til lite vedlikehold, som igjen reduserer dets påvirkning på miljøet under levetiden. I tillegg er det et materiale som blir lite påvirket av miljøet rundt seg.

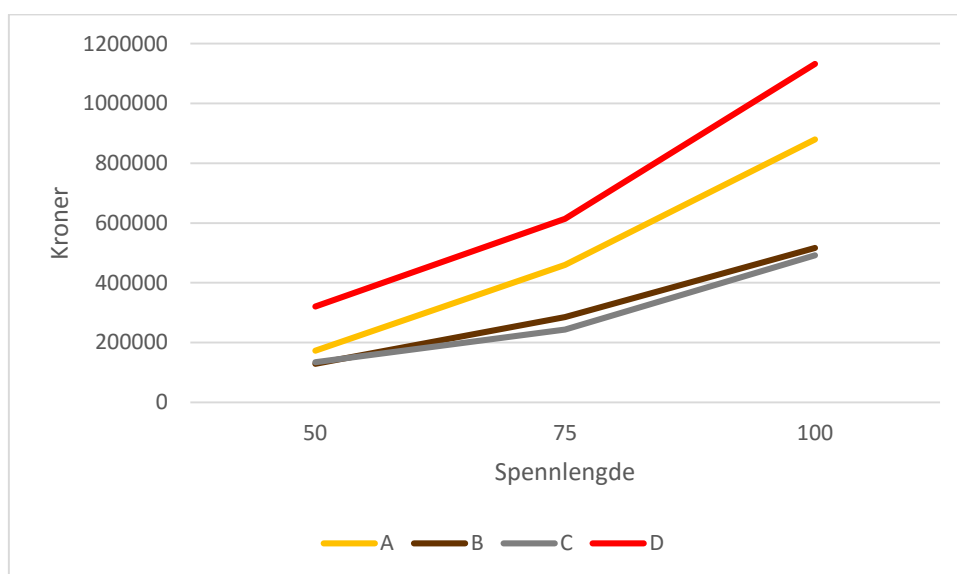
Stål er ifølge (Teknisk Komité, 2009) 100% resirkulerbart, dette forårsaker lavere uttak av naturressurser og reduserer dermed CO₂-utslipp. Stål er faktisk «multisirkulerbart», som betyr at det kan gjenvinnes med like god kvalitet.

Stålproduksjon krever store mengder energibruk i form av oppvarming av råjernet under produksjonen. Under den tidligere nevnte reduksjonsprosessen benyttes det store mengder kull for å oppnå høye nok temperaturer. Kull brukes også aktivt videre i prosessen for å oppnå tilstrekkelig oppvarming av stålet under valsingen og varmebehandling for å bestemme eller påvirke stålets endelige egenskaper (Holm, 2013).

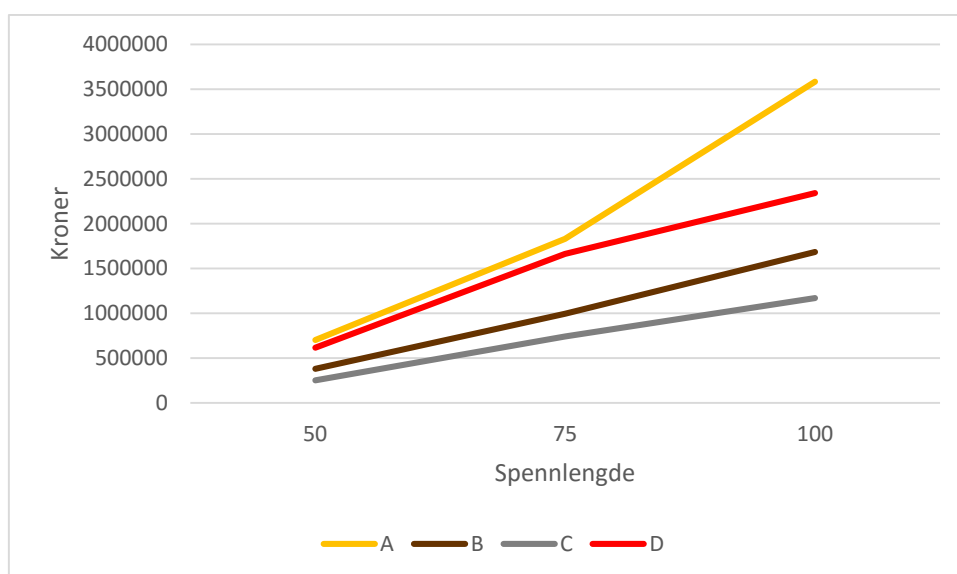
4 Resultat og analyse

4.1 Økonomi

Materialkostnadene ble satt til 25 kr/kg og 16 000 kr/m³ for henholdsvis stål og tre. Prisen pr. kg limtre med en estimert densitet på 470 kg/m³ blir 34 kr/kg, 36% dyrere enn stål. Under i Figur 4.1 og Figur 4.2, er de totale materialkostnadene for de forskjellige buekonstruksjonene og spennene vist. Vil minne om at A, B, C og D representerer de forskjellige konstruksjonene i disse grafene. Henholdsvis er A, B, C og D massivbuen, det 2-dimensjonale fagverket av tre, det 2-dimensjonale fagverket av stål og det 3-dimensjonale fagverket av stål.



Figur 4.1: Materialkostnader Sandnes



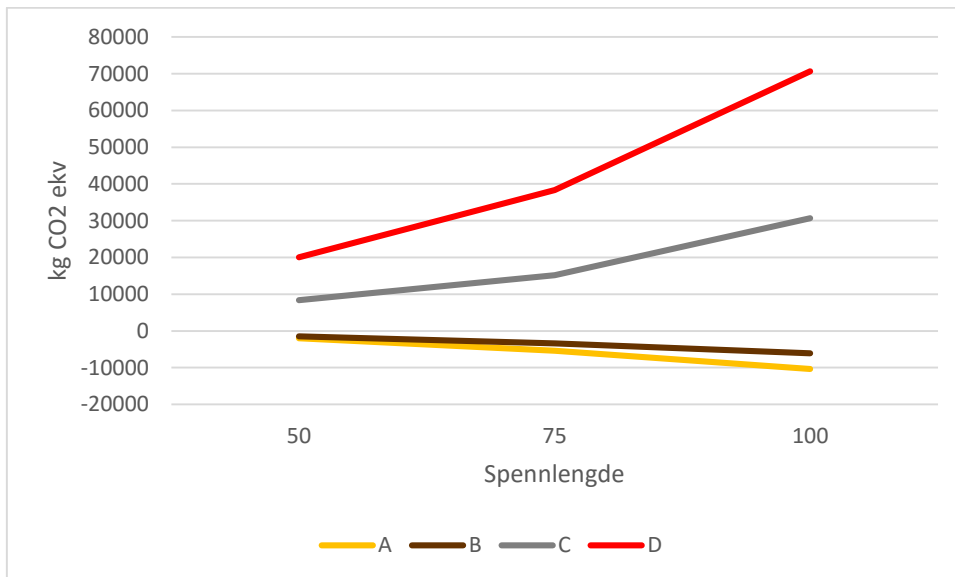
Figur 4.2: Materialkostnader Lenvik

Det fremstår fra Figur 4.1 og Figur 4.2 at buekonstruksjon C er det billigste alternativet for både Sandnes og Lenvik og for samtlige spennlengder. Buekonstruksjon D og A er henholdsvis dyrest for Sandnes og Lenvik og for samtlige spennlengder. De andre kostnadene er unnlatt å være med i de grafiske fremstillingene, siden disse er låst i forhold til spennlengdene og ikke materialvalg. Materialkostnadene forårsaker variasjonene i totalkostnaden som er interessant.

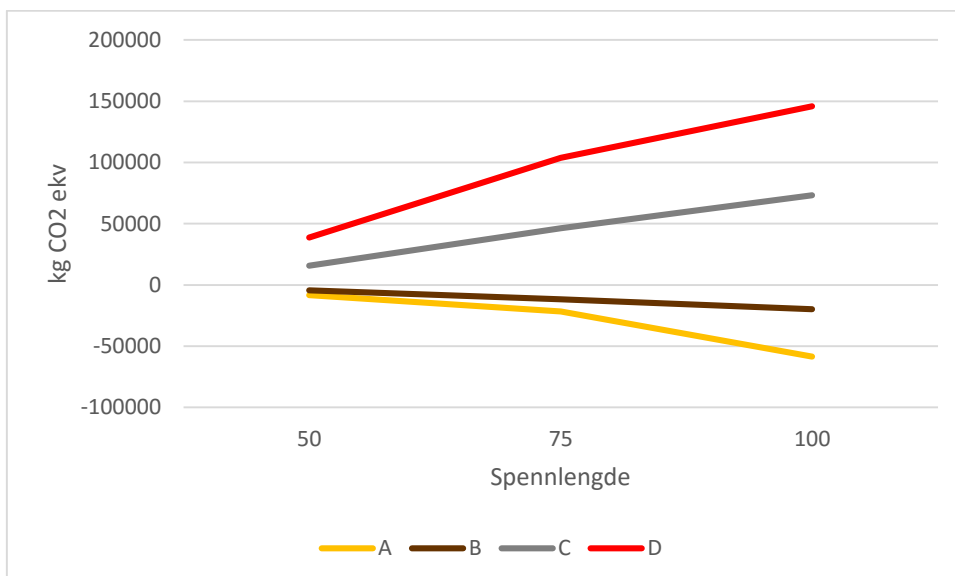
Variasjon av transport- og montasjekostnad kan oppstå og påvirke resultatene. Variasjonene kan komme av plassering av hallene i forhold til hvor buekonstruksjonene leveres fra og form for transport.

4.2 Miljøbelastning

Under i Figur 4.3 - Figur 4.12 presenteres mengden utslipp for de valgte miljøindikatorerne for de forskjellige buekonstruksjonene og spennlengdene. Vil minne om at A, B, C og D representerer de forskjellige buekonstruksjonene i disse grafene. Henholdsvis er A, B, C og D massivbuen, det 2-dimensjonale fagverket av tre, det 2-dimensjonale fagverket av stål og det 3-dimensjonale fagverket av stål.

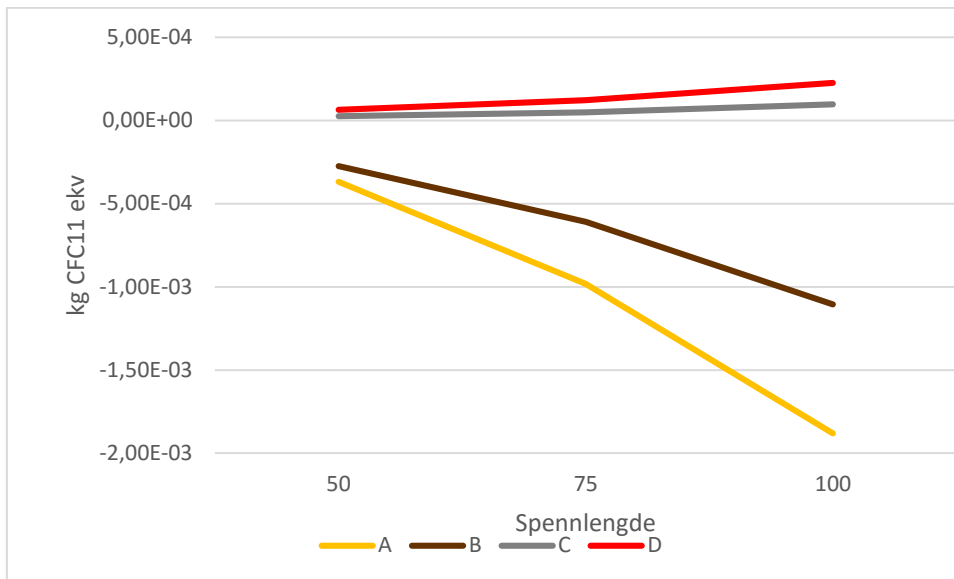


Figur 4.3: GWP Sandnes

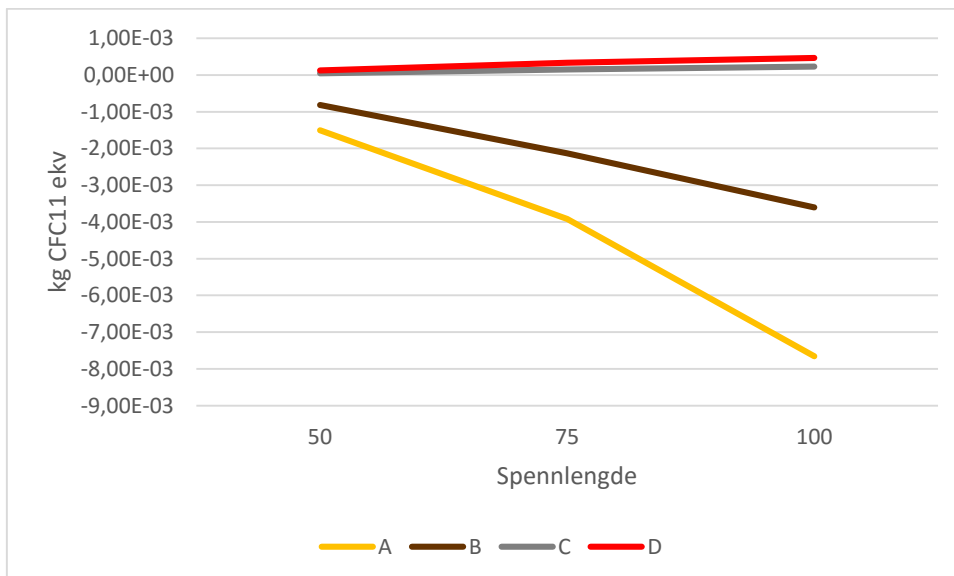


Figur 4.4: GWP Lenvik

Figur 4.3 og Figur 4.4 beskriver utslippene av GWP, dette er miljøindikatoren som består av stoffer som påvirker den globale oppvarmingen.

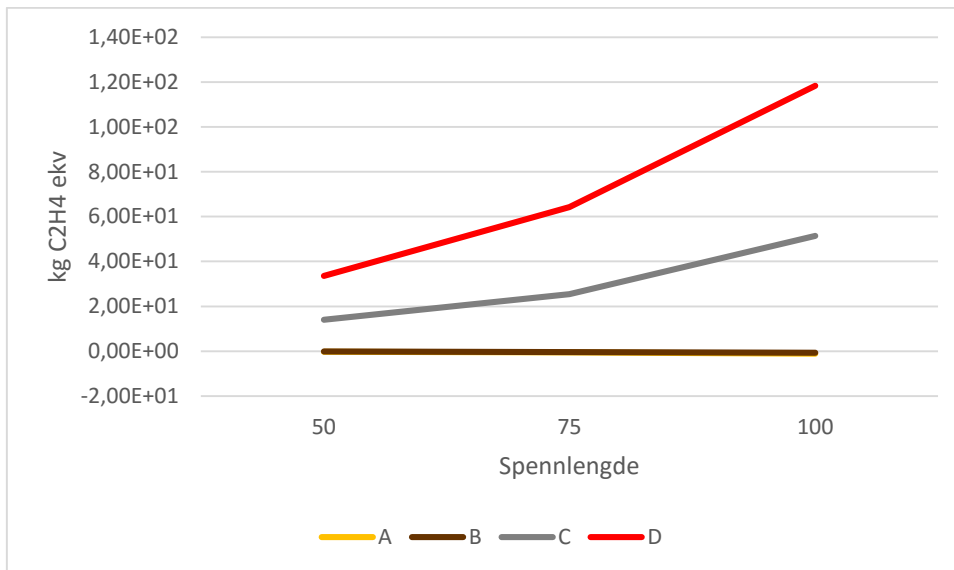


Figur 4.5: ODP Sandnes

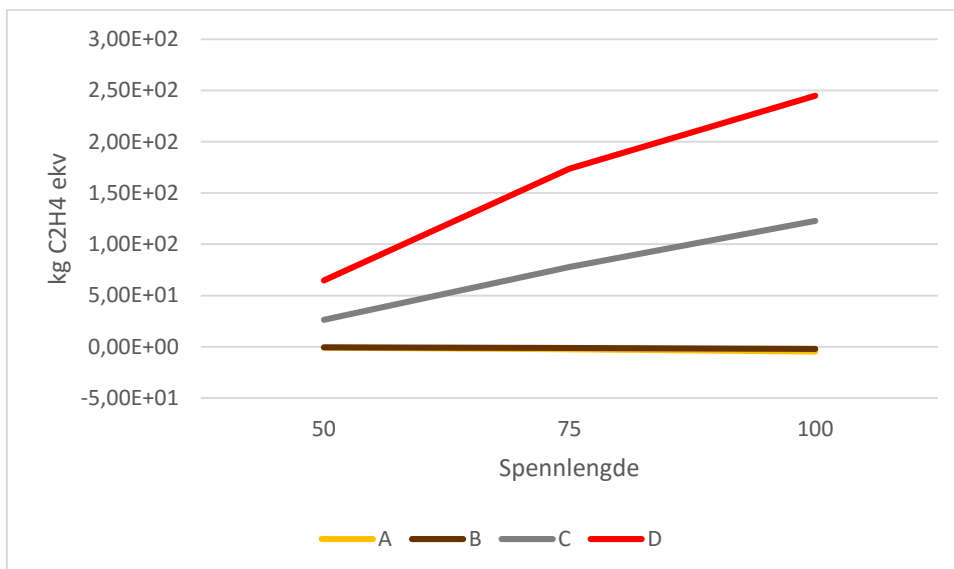


Figur 4.6: ODP Lenvik

Figur 4.5 og Figur 4.6 beskriver utslippene av ODP, miljøindikatoren som beskriver potensialet noen stoffer har til å bryte ned ozonlaget, som beskytter oss mot stråling fra solen.

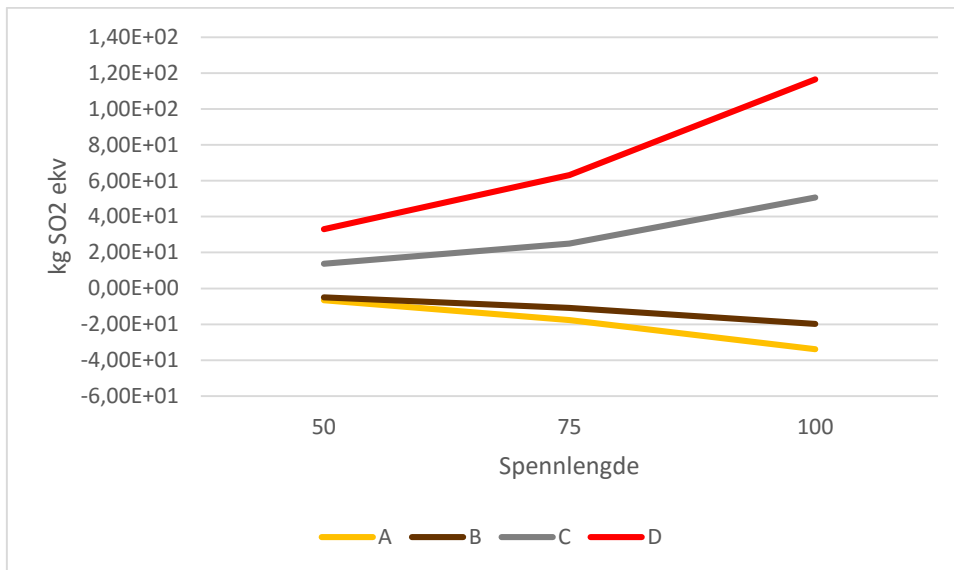


Figur 4.7: POCP Sandnes

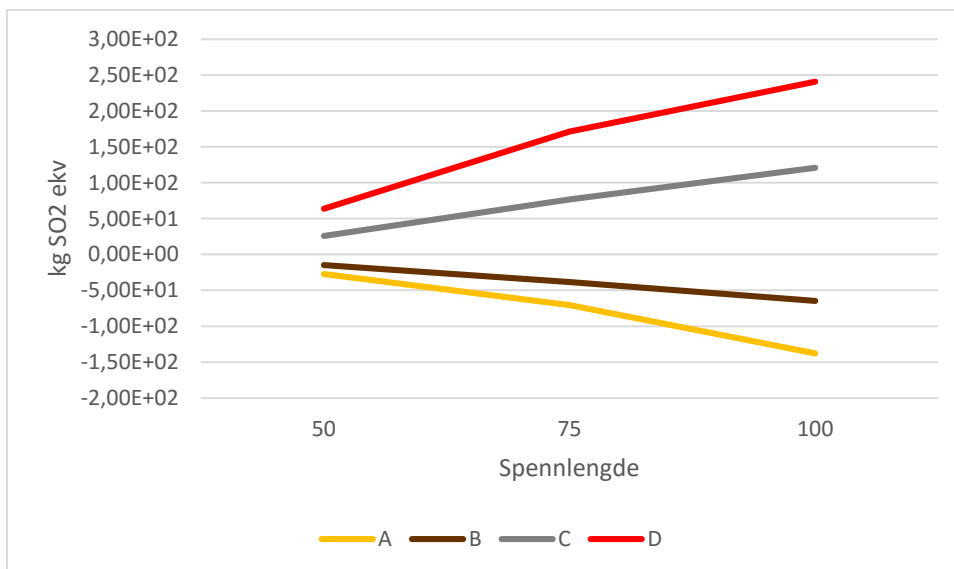


Figur 4.8: POCP Lenvik

Figur 4.7 og Figur 4.8 beskriver utslippene av POCP, miljøindikatoren som beskriver utslippene av stoffer som danner helseskadelig ozon nært bakken, i form av for eksempel smog i byer.

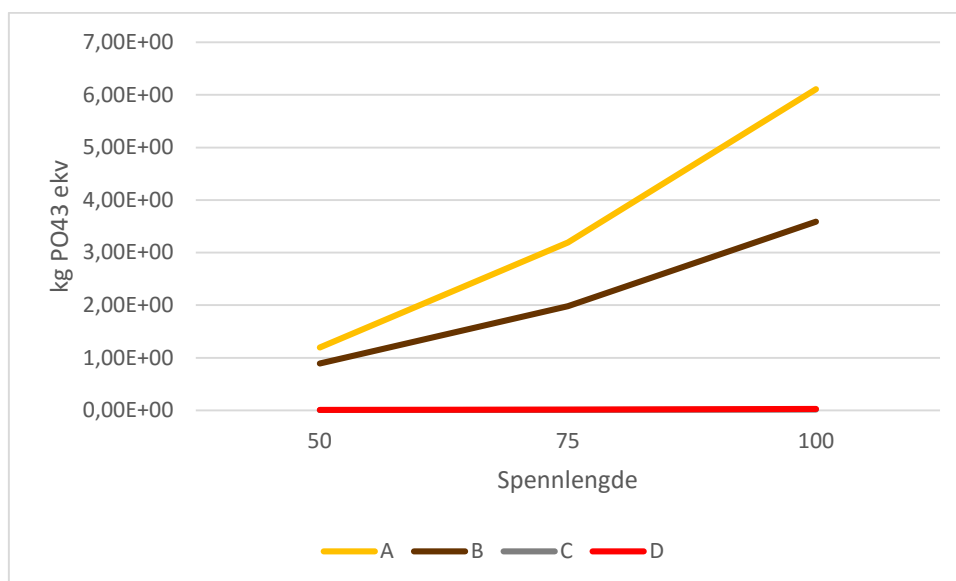


Figur 4.9: AP Sandnes

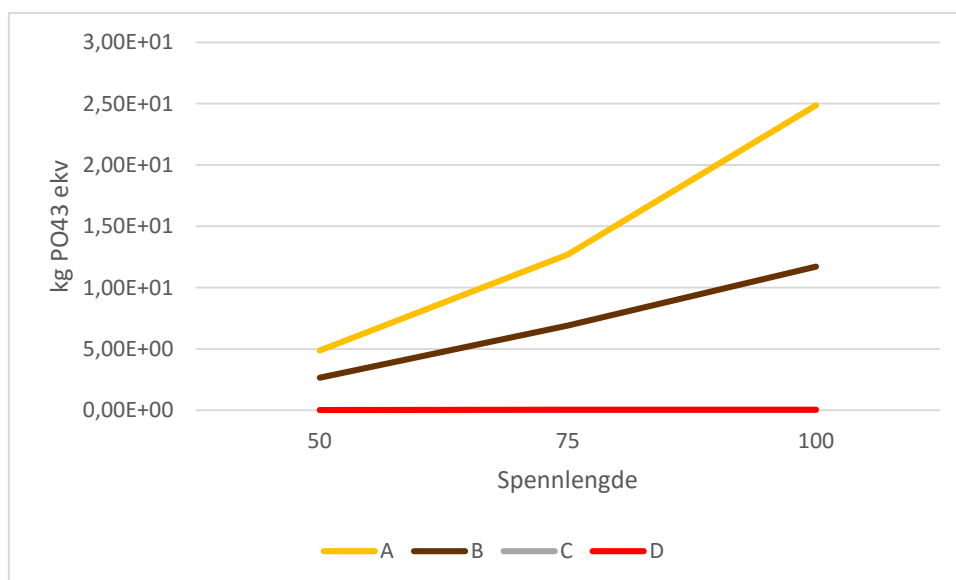


Figur 4.10: AP Lenvik

Figur 4.9 og Figur 4.10 beskriver utslippene av AP, miljøindikatoren som beskriver den forsurende effekten noen stoffer har på land og vann.



Figur 4.11: EP Sandnes



Figur 4.12: EP Lenvik

Figur 4.11 og Figur 4.12 beskriver utslippene av EP, miljøindikatoren som beskriver overgjødning, som kan forårsake økt tilvekst av uønsket alger i vann og ugress.

Figur 4.3 - Figur 4.12 viser tydelig at for buekonstruksjoner og de gitte forutsetningene, er limtre i hovedsak bedre for miljøet enn stål, men for én indikator har stål lavere utslipp enn tre.

Verdiene i de grafiske fremstillingene i Figur 4.3 - Figur 4.12, baserer seg på fasene A1-3, A4-A5, C1-C4 og D, og er som tidligere nevnt hentet fra EPD-ene til Skanska AS (EPD-Norge, 2014c) og Moelven Limtre AS (EPD-Norge, 2015). Disse fasene beskriver henholdsvis produksjons-, installasjons-, slutt- og gjenvinningsfasen. For å kunne trekke mer

generelle slutninger analyseres disse EPD-ene og sammenliknes opp mot andre leverandørers EPD-er.

Under gjennomgangen av EPD-ene ble det funnet variasjoner for de verdiene anvendt og derfor ble det viktig å finne forskjeller i oppbygningen og forutsetningene i de ulike EPD-ene. De alternative EPD-ene for stål har blitt hentet fra leverandørene AK Mekaniske AS (EPD-Norge, 2014a) og EMV Construction AS (EPD-Norge, 2014b).

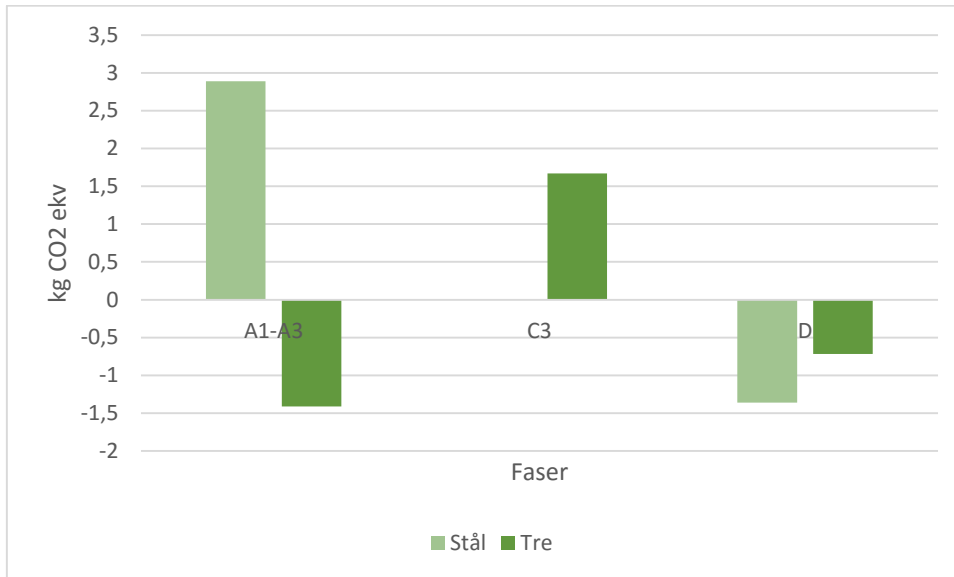
EPD-ene for stål har svært få variasjoner. Mengden jomfruelig stål, elektrisitetsmiksen, et begrep som beskriver hvor energiforbruket for produksjonen kommer fra, og de geografiske forutsetningene er likt. Mengden jomfruelig stål er en kritisk faktor for sammenlikningen, det kommer frem fra EPD-ene at alle benytter 87% jomfruelig og 13% gjenvunnet. Det er gunstig for sammenlikningen at disse korresponderer, i tillegg til at de da beskriver et scenario som ikke kan bli stort verre. EPD-en fra Skanska anses som et konservativt valg siden den har større utslippspotensiale for samtlige miljøindikatorer enn de to andre. En mulig grunn til dette er et høyere forbruk av ikke-fornybar energi.

Én annen EPD for limtrebjelker, fra Sør laminering AS (EPD-Norge, 2014d), kunne sammenliknes mot EPD-en til Moelven Limtre, hvor Moelvens EPD har en mer gunstig verdi for miljøindikatorerne. Denne variasjonen kan komme av flere grunner, blant annet er det en variasjon i datakvaliteten. EPD-en fra Moelven har hentet sin data fra Ecoinvent 3.1 og Sør laminering AS har hentet fra Ecoinvent v2.2, en eldre versjon. I gjenvinningsfasen henter Moelven ut omtrent dobbelt så mye gevinst. Sør laminerings verdier er basert på tall fra 2008, og Moelven sine verdier baserer seg på et gjennomsnitt fra 2013 laget av Statistisk sentralbyrå.

Den store gevinsten kommer i form av erstatning av termisk energi hvor Moelven Limtre sin EPD påstår at gjenvinningen erstatter 4643 MJ, sammenliknet med Sør laminering som erstatter bare 2606 MJ. Erstatningen av elektrisk energi er fortsatt relativt lik. Moelven anvender mer fornybar-energi i sin totale energibruk under produksjonsfasen og dette kan være en grunn til at deres GWP-tall er bedre under produksjonsfasen. Klimagassutslippet fra bruk av elektrisitet i produksjonsfasen under det norske tillegget varierer også, Sør laminerings EPD påstår at dem slipper ut 0,0117 kg CO₂ ekv/MJ, mens Moelven slipper ut 0,0063 kg CO₂ ekv/MJ.

Figur 4.13 - Figur 4.17 tydeliggjør forskjellen mellom belastningen for miljøindikatorerne pr. kg produkt under fasene A1 - A3 og D. Disse fasene er naturlige å trekke frem for

sammenlikningen, siden det er de fasene som påvirker utslippene mest. For GWP må fasen C3 også være med. Verdiene baserer seg på EPD-ene fra Skanska og Moelven Limtre.

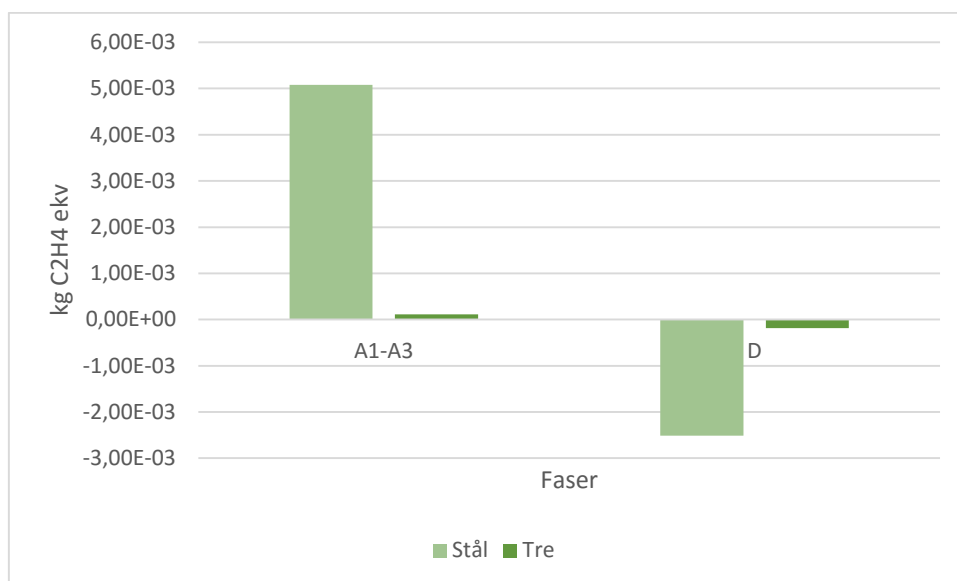


Figur 4.13: GWP pr. kg

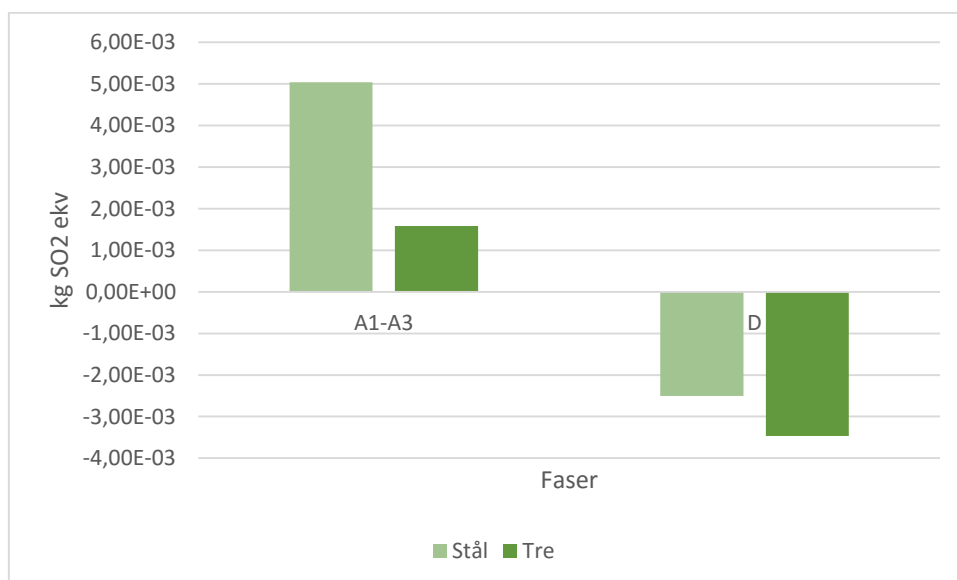
Figur 4.13 beskriver potensialet én kg med stål og tre har til å påvirke den globale oppvarming i de forskjellige fasene. Det kommer tydelig frem at produksjonsfasen er den mest kritiske fasen for utslippene for stål. Tre har et negativt bidrag i produksjonsfasen, noe som kan virke rart, men dette kommer av opplagringen av CO₂, og utslippet for denne opplagringen blir vist i fase C3. Denne opplagringen er en egenskap stål ikke innehar, derfor er den ikke representert som en søyle her. Gjenvinnbarheten av stål er bedre enn tre.



Figur 4.14: ODP pr. kg

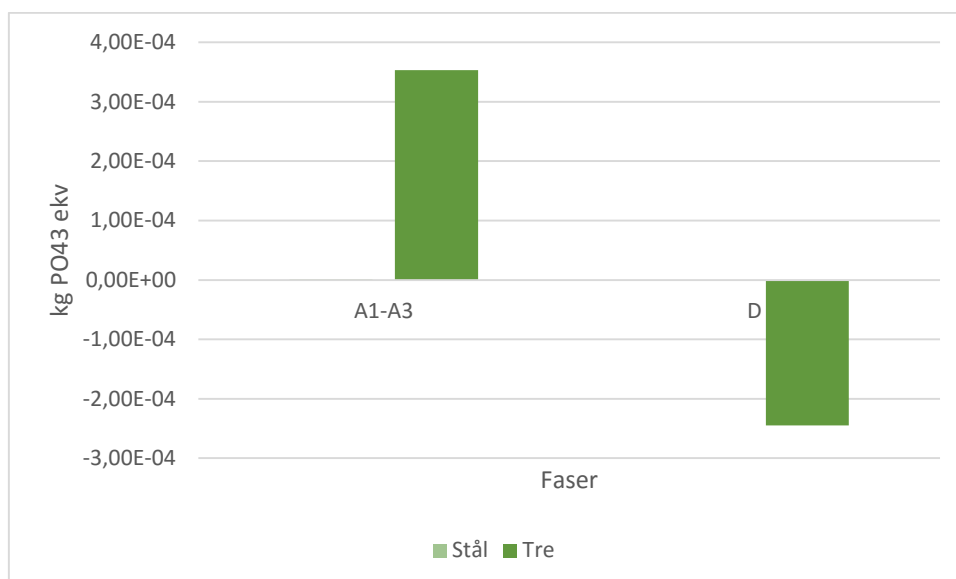


Figur 4.15: POCP pr. kg



Figur 4.16: AP pr. kg

Figur 4.14 - Figur 4.16 viser at stål totalt resulterer i høyere utslipp pr. kg produkt produsert. For ODP har stål faktisk lavere utslipp i produksjonsfasen, men på grunn av gjenvinningsfasen får tre et bedre resultat totalt sett.



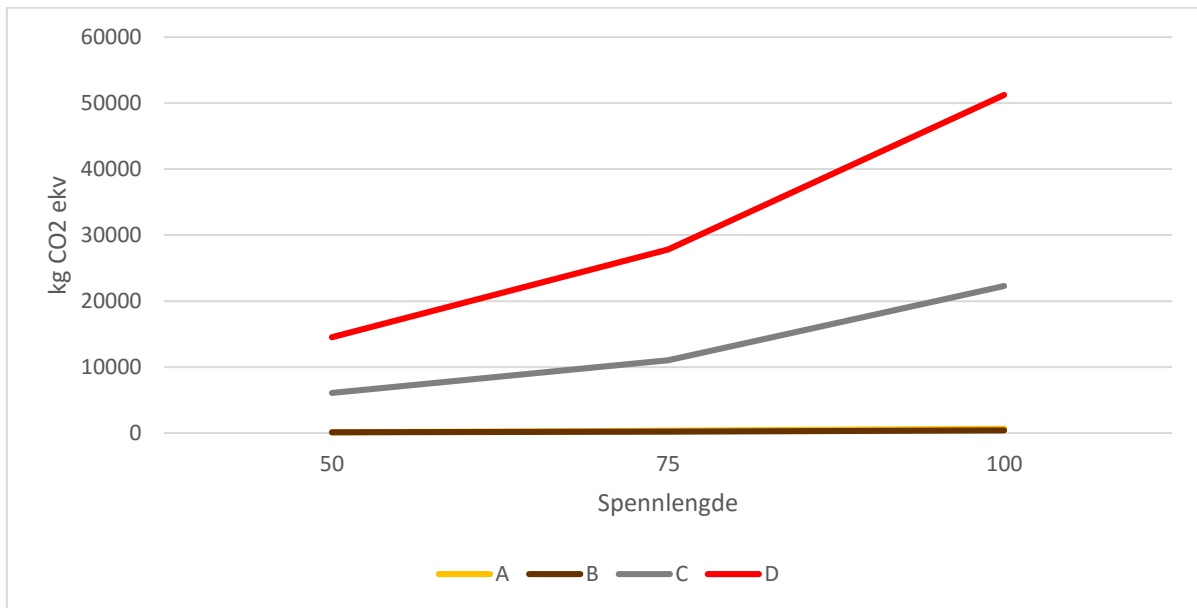
Figur 4.17: EP pr. kg

Figur 4.17 viser utslipp av EP pr. kg stål og tre, stål har tilnærmet 0 utslipp av dette og derfor er søylene ikke synlige.

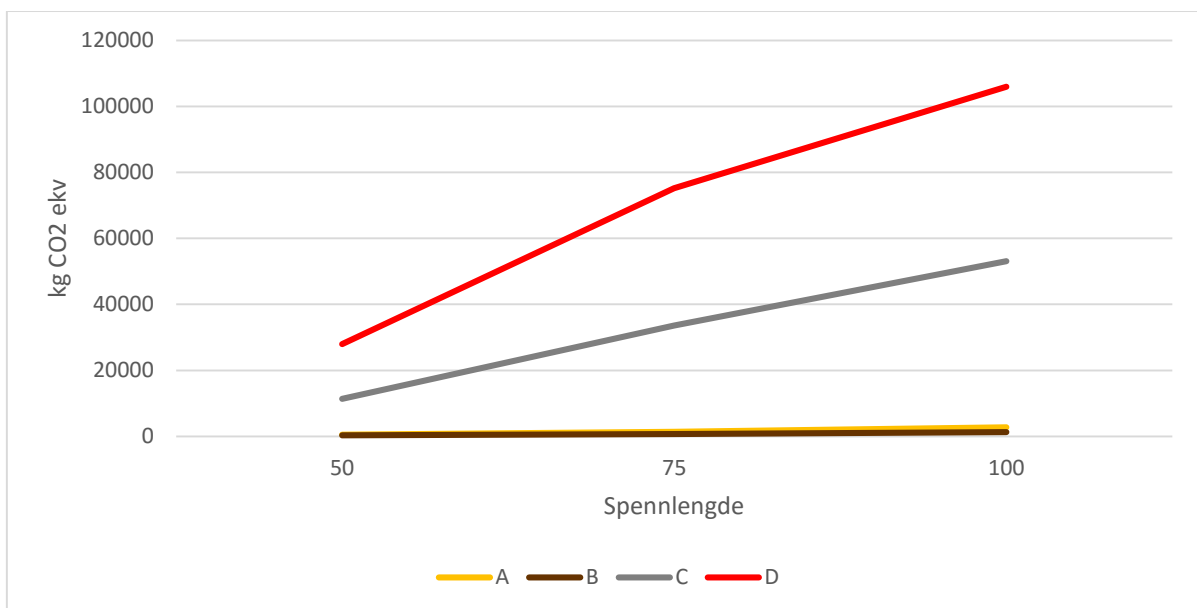
Figur 4.13 - Figur 4.17 illustrerer til dels hvordan de to materialene er sammenliknet mot hverandre, men man kan ikke direkte sammenlikne utslippene pr. kg uten å ta buekonstruksjonenes egenvekt i betraktning.

Egenvekten av buekonstruksjonene B og C er relativt lik for de samme spennene og lastene. For ett spenn og lokasjon er stålkonstruksjonen C 7% lettere enn trekonstruksjonen B. For ingen av utslippene er stål bare 7% verre pr. kg, derfor vil tilfellene hvor C er lettere enn B fortsatt føre til høyere utslipp for buekonstruksjonene av stål. Konstruksjon A og D er derimot tyngre konstruksjoner som vil føre til høyere utslipp uansett.

Under i Figur 4.18 og Figur 4.19 er utslippene for GWP basert på Statsbygg sin klimagassregnskapskalkulator presentert.



Figur 4.18: GWP Sandnes klimagassregnskap

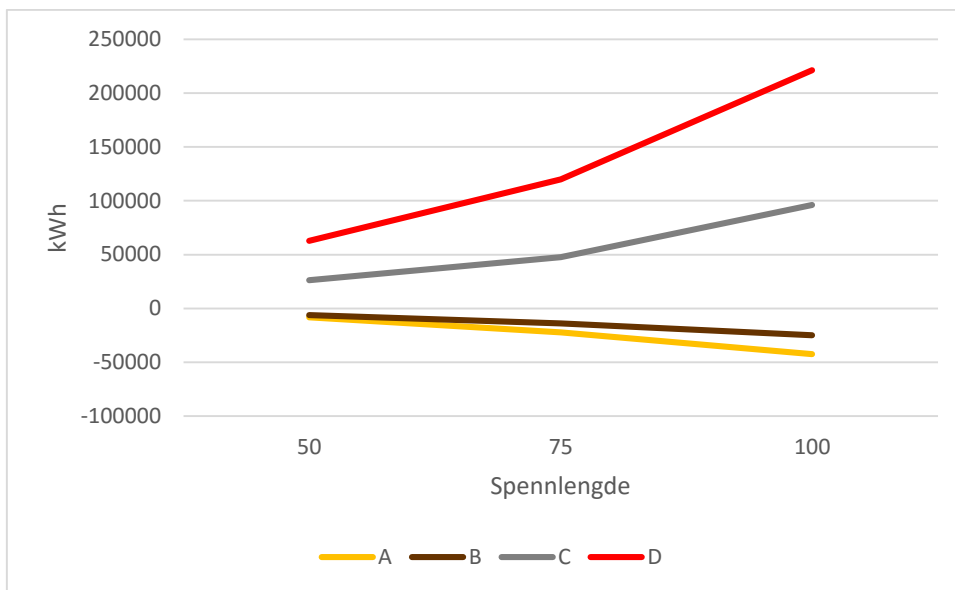


Figur 4.19: GWP Lenvik klimagassregnskap

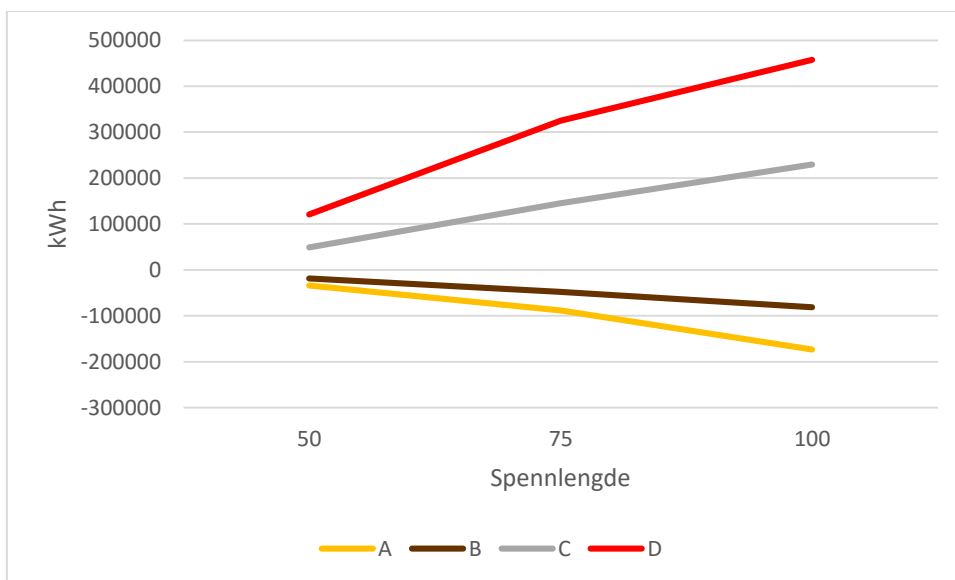
I motsetning til grafene i Figur 4.3 og Figur 4.4 er disse grafene kun basert på produksjonsfasen, A1-A3. Vedlikehold og utskiftning ville også vært kalkulert inn hvis levetiden for bygget var satt under 60 år. Deres faktorer baserer seg på LCA-faktorer for klimagasser og følger standarden NS 15978. Grafene viser allikevel til samme trend som grafene basert på EPD-ene gjør, at buekonstruksjoner av limtre har lavere utslipp for GWP enn stål.

4.3 Energi

I de offentlige EPD-ene er energiforbruket oppgitt som MJ/m³ for limtreproduktene, mens for stål er forbruket oppgitt som MJ/kg. For å etablere et fullverdig sammenlikningsgrunnlag har det derfor blitt regnet ut hvor mange kWh som kreves for å ferdigstille hver buekonstruksjon ut fra deres respektive egenvekter. Resultatene fra beregningene er grafisk fremstilt under i Figur 4.20 og Figur 4.21.



Figur 4.20: Ikke-fornybar energiforbruk Sandnes



Figur 4.21: Ikke-fornybar energiforbruk Lenvik

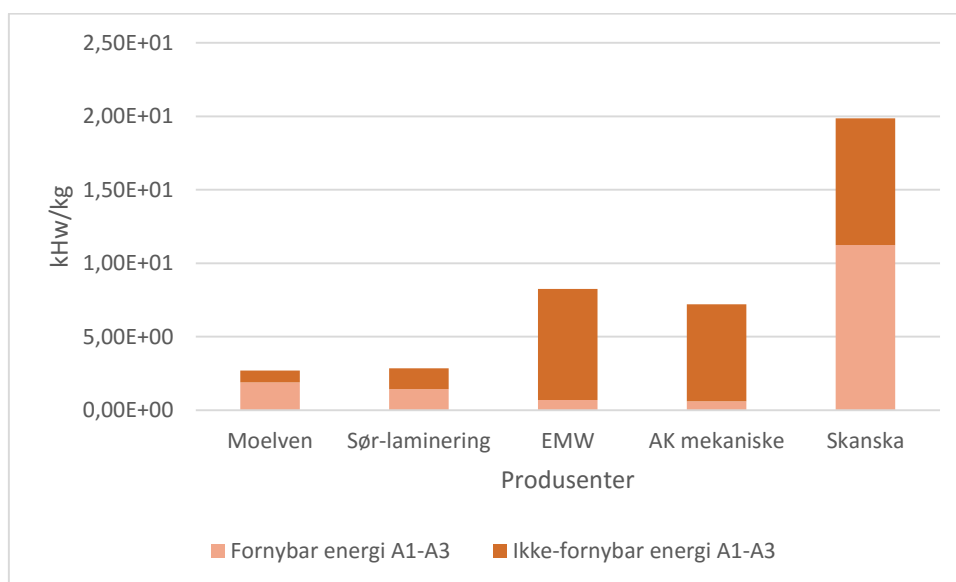
Figur 4.20 og Figur 4.21 viser at stål anvender mer ikke-fornybar energi enn limtre for produksjon av buekonstruksjonene. Stålkonstruksjonenes forbruk øker i takt med spennlengden buekonstruksjonen skal ha. Trekonstruksjonenes forbruk synker slakt ettersom

spennet økes. Trekonstruksjonenes negative stigningsgrad skyldes gjenvinnbarheten til materialet. Man vil etter endt levetid kunne bruke treet som en energikilde, det vil derfor slå positivt ut under ett livsløpsperspektiv. Dersom man kun ser på produksjonsfasen, vil stålets energibruk øke betraktelig fortere enn treet. Man kan se en klar sammenheng mellom bruken av ikke-fornybar energi og utslippspotensialet av GWP.

Konstruksjon D er forøvrig den største energityven blant de ulike variantene. Denne type buekonstruksjon kan ha den dobbelte stålmengden som buekonstruksjon C, det krever dermed mer ressurser og energi for å kunne produsere den. Den innehar derimot et selvavstivende system grunnet skråstag mellom de to overgurtene og egner seg dermed godt til store spenn.

For å sammenlikne forskjellene på produksjon av ett kg med stål mot limtre, kan man se på hvor mange kWh det trengs for å produsere hver av dem og forholdet mellom fornybar og ikke-fornybar energi som brukes.

Produsentene av limtre bruker like under 3 kWh for å produsere ett kg ferdig produkt, mens produsenter av stålkonstruksjoner oppgir at det brukes mellom 7-8 kWh for ett kg produkt. Skanska AS skiller seg ut ved bruk av energi. I EPD-en utarbeidet for Skanskas stålprodukter er den fornybare energibruken særdeles større enn konkurrentenes, dette er vist i Figur 4.22 under.



Figur 4.22: Forhold mellom ikke-fornybar og fornybar energi

Forskjellen i bruk av ikke-fornybar energibruk er derimot tilnærmet lik hos stålprodusentene. Limtreprodusenten Sør-laminering bruker omtrent det dobbelte av ikke-fornybare energikilder

enn hva Moelven gjør under sin produksjon. Totalforbruket er tilnærmet likt hos begge produsenter. Man kan også se at det totale energiforbruket er lavere for limtre enn stål.

Det kan knyttes en direkte sammenheng mellom bruken av ikke-fornybare energikilder og utslippene av CO₂ hos produsentene. Dette kan sees fra Figur 4.20 og Figur 4.21 som viser bruken av ikke-fornybar energi og Figur 4.3 og Figur 4.4 som viser utslippet av GWP. Ved å belyse forholdet mellom GWP og energibruk i produksjonsfasen for begge materialene, finner man at stål fra Skanska produserer 0,0432 kg CO₂-ekv/kWh, sammenliknet med Moelvens limtre som produserer 0,0228kg CO₂-ekv/kWh. Dette tilsier at stålet under produksjonsfasen produserer nærmere dobbelt så mye kg CO₂-ekvivalenter. Dette vil også ha den virkningen at hvis man endret forbruket av ikke-fornybar energi til fornybar energi har stål et høyere potensial til å redusere sine utslipp pr. kWh.

5 Diskusjon

5.1 Diskusjon av metode og utførelse

En eksplorativ studie er blitt valgt på grunn av at det har blitt gjennomført lite forskning på samme området. En positiv side ved dette metodevalget er at vi får undersøkt akkurat det vi vil sammenlikne og det åpner for muligheten til å trekke slutninger. En annen mulig framgangsmåte hadde vært å sammenlikne allerede eksisterende buekonstruksjoner.

Ved å dimensjonere 4 forskjellige buekonstruksjoner for ulike spennlengder og laster har vi dannet et grunnlag for å sammenlikne de valgte undersøkelsesobjektene. Studien er veldig etterprøvable i form av at man kan lett dimensjonere de samme buekonstruksjonene og vurdere hvorvidt de valgte egenvektene er realistiske. Samtlige EPD-er anvendt i sammenlikningen er åpne for alle, dermed kan beregningene for miljøbelastningene og energiforbruket gjennomføres av andre.

Egenvekt og kapasitetsutnyttelsene er tallene som ble hentet ut fra dimensjoneringen og anvendt videre i sammenlikningen. En viss variasjon av kapasitetsutnyttelser har oppstått og er uunngåelig. For å forsterke metoden kunne det vært hensiktsmessig å danne en faktor som tok hensyn til denne variasjonen.

Kostnadsanalysen har blitt gjennomført med informasjon gitt av én leverandør for hvert materiale, sett i ettertid hadde det dannet et bedre sammenlikningsgrunnlag om vi sørget for innhenting av kostnadsinformasjon hos flere leverandører. Dimensjonering av fundamenter og avstivning kunne økt graden av reliabilitet for kostnadsanalysen.

Buekonstruksjonens miljøbelastninger og energiforbruk har blitt sammenliknet med bakgrunn i 2 EPD-er. Dette kan kritiseres og for å gjøre studien enda mer reliabel hadde det vært gunstig å sammenlikne med bakgrunn i flere EPD-er. På en annen side er det blitt gjennomført en enkel analyse av andre EPD-er og sammenliknet opp mot de anvendt i rapporten og sørget for at det har vært like forutsetninger og relativt like utslipp.

5.2 Diskusjon av resultat

5.2.1 Økonomi

Variabelen økonomi viser seg ved første øyekast å være en enkel variabel å sammenlikne. Det kommer tydelig frem i oppgaven at materialkostnadene er lavere for konstruksjoner av stål enn for buekonstruksjoner av tre.

Markedet vil kunne ha både dyrere og billigere alternativer for både stål og tre. Om et billigere alternativ skulle finnes må man være kritisk til dette og vurdere hva den lavere kostnaden kommer av. Eksempelvis leverer Armec AS hele kjeden for produktet og kan dermed ha effektivisert sin prosess og være billigere av den grunn uten å ofre kvaliteten til produktet. Andre leverandører kan eventuelt være dyrere, noe som vil føre til en mer gunstig kostnadsanalyse for limtre sammenliknet med stål.

Transportkostnaden er i denne oppgaven ikke sentral, men vil ha en større påvirkningskraft i det virkelige liv. Limtreprodusenter er sjeldnere enn stålprodusenter, og med dette kan transportkostnaden variere i større grad for limtreprodusentene. Materialkostnaden varierer fra å representere 55% - 94% av totalkostnaden av buekonstruksjonene. Med dette vil variasjon av transportkostnaden være mer kritisk for noen av buekonstruksjonene.

5.2.2 Miljø

Miljø har vært en utfordrende variabel å vurdere, fordi det er vrient å finne generiske tall for de valgte indikatorene. Generelle slutninger har vært vanskelig å trekke med bakgrunn i dette. En nøye gjennomgang av andre EPD-er og sammenlikning av disse har gjort det mulig å argumentere for at limtre ser ut til å være mer miljøvennlig sammenliknet med stål i en buekonstruksjon. På den andre siden er gjenvinningsfasen kritisk for limtreets gunstige utfall. Derfor er det viktig at verdiene for gjenvinningsfasen, som EPD-ene presenterer, samsvarer med virkeligheten.

To mulige scenarioer som er viktig å trekke frem er overbruk av enten limtre eller stål. Overbruk av limtre kan føre til at man må hente ut for mye trevirke som kan føre til redusert karbonlagring. Det kan også lede til at man må gå utenfor det lokale markedet for å hente ut råvarer og øke utslippspotensialet for limtre.

Det andre mulige scenarioet kan medføre høyere forbruk av stål enn det som gjenvinnes og lede til større behov for produksjon. Høyere produksjon krever mer energi og øker utslippspotensialet, og fordelene man ser ved gjenvinning vil kunne bli redusert.

Med dette kan vi si at det er viktig å ha en balanse i bruken av både stål og limtre.

5.2.3 Energi

Under selve produksjonsfasen viser resultatene at produsentene av limtre bruker mindre enn halvparten av energien stålprodusentene bruker. Dette slår også ut i tilnærmet samme grad på

CO₂ -utslippene hos produsentene. Dette kan begrunnes i den høye temperaturen stål krever under tilvirkningen.

Under resultatinnhentingen av energiforbruket til hver enkelt konstruksjon, har både produksjonsfasen og gjenvinningsfasen blitt tatt i betraktning. Gjenvinningsfasen er av relevans for en sammenlikning av energibruk, fordi begge materiale har en gevinst under denne fasen.

Tre har den egenskapen at det kan anvendes til energibruk etter endt levetid, så vel som avfallsproduktene som skapes under produksjonen. Biproduktene skaper en «gratis» energikilde for driften av produksjonen og lokaler, dette gjenspeiles i de lave utslippene.

I motsetning til tre som gjenvinnes som en energikilde, gjenvinnes stål i form av nye materialer. Stål krever store mengder varme under tilvirkningen av produkter, noe som er svært energioppslukende. Gjenvinningen gjennomføres ved omsmelting og reduserer denne energibruken. Det er likevel bemerkelsesverdig at kun 13% gjenvunnet stål blir tatt i bruk for nye stålprodukter. En mulig årsak til dette kan være at det ikke gjenvinnes nok i forhold til etterspørsel. Derfor er det uoppnåelig å ta i bruk 100% gjenvunnet stål.

Det er av interesse å se hvor mye energiforbruket hadde blitt redusert ved økt bruk av gjenvunnet stål.

5.3 Oppsummering

Oppgavens mål var å sammenlikne forskjellige typer buekonstruksjoner av stål og tre. Disse er vurdert i forhold til variablene miljø, energi og økonomi. Problematikken i oppgaven er sammensatt og det gir ingen enkel slutning på hva som er det optimale valget til enhver situasjon. Derimot belyser rapporten essensielle poenger.

Generelt sett er det i dagens marked mindre miljøbelastning ved produksjon av limtre enn med stål. På den andre siden er stål et materiale med lavere produksjonskostnad. Når man antar at buekonstruksjonene innehar samme bæreevne, vil det altså være en kundes preferanse som avgjør hvilket materiale som er det optimale valget.

Det er tidligere beskrevet hvordan stål i teorien kunne vært mer miljøvennlig, da dette sannsynligvis er 100% gjenvinnbart. Det er også potensiale for at stål kan produseres via fornybar energi og derav bli mer miljøvennlig. I dagens verden vil det være sannsynlig at dette påvirker kostnaden til produktet. Hvis man kunne endret til miljøvennligere

produksjonsmetoder uten økte kostnader, ville dette totalt sett jevnet ut tilbudet. Limtre har den motsatte problemstillingen og må jobbe mot å redusere kostnadene ved produksjon.

I et etisk perspektiv er det bra å velge de mest miljøvennlige alternativene

På bakgrunn av dette anbefaler vi buekonstruksjonen B, som i henhold til resultatene er både det mest miljøvennlige og et økonomisk fornuftig valg i forhold til de andre buekonstruksjonene for samtlige spennlengder og størrelse av last.

5.4 Forslag til videre arbeid

- Finne en måte å produsere stål med mer fornybar energi uten å heve kostnadene
- Bedre produksjonsmetoden for limtre for å redusere kostnadene

6 Litteraturliste

- Beck, J. P., Koffi, B., Krzyzanowski, M., European Environment, A. og European, C. (1999) *Tropospheric ozone in the European Union: the consolidated report*. Office for Official Publications of the European Communities ; Bernan Associates [distributor]. [Online]. Tilgjengelig fra: <http://www.eea.europa.eu/publications/TOP08-98/page004.html> (Hentet: 10.02.16).
- Bell, K. og Liven, H. (2015) *Limtreboka*. Norsk Limtreprodusenters Forening.
- Bjerknessenteret for klimaforskning (2015) *Drivhuseffekten og jordens klima*. Tilgjengelig fra <http://www.bjerknes.uib.no/artikler/fns-klimapanel/drivhuseffekten> (Hentet: 11.02.16).
- Brown, N., Budavari, Z., Cai, X., Krigsvoll, G., Malmqvist, T. P., Bruno, Staller, H., Szalay, Z., Tritthart, W., Wetzel, C. og Zabalza, I. (2015) *Indicators and weighting systems, including normalisation of environmental profiles*, LoRe-LCA-WP5-D5.1.
- CEN (2008a) *NS-EN 1991-1-3: Eurokode 1: Laster på konstruksjoner - Del 1-3: Allmenne laster - Snølaster* Lyssaker: Den europeiske standardiseringsorganisasjonen.
- CEN (2008b) *NS-EN 1993-1-1: Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner - Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger* Lyssaker: Den europeiske standardiseringsorganisasjonen.
- CEN (2010) *NS-EN 1995-1-1: Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner - Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger*. Lyssaker: Den europeiske standardiseringsorganisasjonen.
- CEN (2016) *NS-EN 1990: Eurokode: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner* Lyssaker: Den europeiske standardiseringsorganisasjonen.
- EPD-Norge (2014a) *Hot finished structural hollow sections (HFSHS)*, AK Mekaniske AS, 00237E. Oslo.
- EPD-Norge (2014b) *Hot finished structural hollow sections (HFSHS)*, EMV Construction AS, 00228E. Oslo.

- EPD-Norge (2014c) *Hot finished structural hollow sections (HFSHS)*, Skanska Norge AS, 00241E. Oslo.
- EPD-Norge (2014d) *Standard Limtrebjelke, Sør laminering AS*, NEPD00263N. Oslo.
- EPD-Norge (2015) *Standard Limtrebjelke, Moelven Limtre AS*, NEPD-336-222-NO Oslo.
- Evans, F. (2008) *Trykkimpregnering*. Fokus på tre,
<http://www.treteknisk.no/resources/filer/publikasjoner/fokus-pa-tre/Fokus-nr-21.pdf>
 TreFokus AS, Treteknisk.
- FN sambandet (2015) *Hva er togradersmålet?* Tilgjengelig fra
<http://www.fn.no/Tema/Klima/Hva-er-togradesmaalet> (Hentet: 16.02.16).
- Forskning.no (2002) *Hva er ozonlaget?* Forskning.no. Tilgjengelig fra
<http://forskning.no/forurensning-klimate/2008/02/hva-er-ozonlaget> (Hentet: 23.02.16).
- Global greenhouse warming (2016) *Global warming potential*. Tilgjengelig fra
<http://www.global-greenhouse-warming.com/global-warming-potential.html> (Hentet: 10.02.16).
- Gripsrud, G., Olsson, U. H. og Silkoset, R. (2010) *Metode og dataanalyse: beslutningsstøtte for bedrifter ved bruk av JMP 2*. utg. Kristiansand: Høyskoleforlaget.
- Halvorsen, K. (2008) *Å forske på samfunnet: en innføring i samfunnsvitenskapelig metode*. Oslo: Cappelen Damm.
- Holm, M. (2013) *IronArc*. Tilgjengelig fra <http://www.tu.no/artikler/ny-metode-for-jernutvinning-kan-halvere-co2-utslipp/233065> (Hentet: 25.02.16).
- Huff, M., Lynn, K., Ross, R. og Stockhausen, J. (2005) *Comparing energy use and environmental emissions of reinforced wood doors and steel doors*.
- Jacobsen, D. I. (2015) *Hvordan gjennomføre undersøkelser?: Innføring i samfunnsvitenskapelig metode 2*. utg. Kristiansand: Høyskoleforlaget.

- Klima- og energiseksjonen (2014) *Klimaendringer*. Oslo: Klima- og energiseksjonen.
 Tilgjengelig fra <https://www.regjeringen.no/no/tema/klima-og-miljo/klima/innsiktsartikler-klima/klimaendringer/id2076641/> (Hentet: 22.02.16).
- Larsen, P. K. (2010) *Dimensjonering av stålkonstruksjoner*. Trondheim: Akademika forlag.
- Miljødirektoratet (2011) *Anvendelse av skogen i et klimaperspektiv*. Tilgjengelig fra http://www.miljodirektoratet.no/no/Nyheter/Nyheter/Old-klif/2011/Februar/Anvendelse_av_skogen_i_et_klimaperspektiv/ (Hentet: 03.03.16).
- Miljødirektoratet (2014) *Overgjødsling*. Oslo: Tilgjengelig fra <http://www.miljostatus.no/tema/hav-og-kyst/overgjodsling/> (Hentet: 14.04.16).
- Miljødirektoratet (2015) *Sur nedbør*. Tilgjengelig fra <http://www.miljostatus.no/tema/luftforurensning/sur-nedbor/> (Hentet: 18.02.16).
- PR Newswire (2013) *New Life Cycle Assessment Study Shows Replacing Wood Utility Poles With Steel Significantly Lowers Key Environmental Impacts*. Tilgjengelig fra <http://search.proquest.com/docview/1418178310?OpenUrlRefId=info%3Axri%2Fsid%3Aprimo&accountid=12870> (Hentet: 03.05.16).
- Splitkon AS (2015) *Hva er det egentlig å ikke like med tre?* Tilgjengelig fra <http://www.splitkon.no/nyheter/generelle-nyheter/2015/november/hva-er-det-egentlig-aa-ikke-like-med-tre/> (Hentet: 15.04.16).
- Stiftelsen Returgass ODP. Tilgjengelig fra <http://www.returgass.no/regelverk-miljo/ozonlaget/odp/> (Hentet: 23.03.16).
- Svanæs, J. (2004) *Tre og miljø*. Fokus på tre, <http://www.trefokus.no/resources/filer/fokus-pa-tre/8-Tre-og-miljo.pdf> Treindustrien, TreFokus AS, Treteknisk.
- Teknisk Komité (2009) *20 gode miljøgrunner for å bygge i stål*. Oslo.

Vedlegg A – Tverrsnitt, bjelkehøyde og egenvekt

Tabell A 1: Tverrsnittsdata for Sandnes 50 meter spenn

	A	B	C	D
Overgurt	270x810	180x315	200x100x10	200x100x6,3
Undergurt		180x315	200x100x10	200x100x6,3
Stav		180x180	100x100x4	100x100x10,0
Bjelkehøyde (m)		2	1	1
Totalvekt (kg)	5064	3778	5364	12834

Tabell A 2: Tverrsnittsdata for Lenvik 50 meter spenn

	A	B	C	D
Overgurt	600x1485	315x540	250x150x12,5	250x150x12,5
Undergurt		315x540	250x150x12,5	250x150x12,5
Stav		315x315	150x150x6,3	150x150x10,0
Bjelkehøyde (m)		2	2	2
Totalvekt (kg)	20631	11203	10084	24733

Tabell A 3: Tverrsnittsdata for Sandnes 75 meter spenn

	A	B	C	D
Overgurt	360x1080	225x360	200x120x10	200x120x8,0
Undergurt		225x360	200x120x10	200x120x8,0
Stav		225x225	120x120x5	120x120x10,0
Bjelkehøyde (m)		2	2	2
Totalvekt (kg)	13504	8377	9742	24548

Tabell A 4: Tverrsnittsdata for Lenvik 75 meter spenn

	A	B	C	D
Overgurt	675x2295	405x675	350x250x14,2	300x200x14,2
Undergurt		405x675	350x250x14,2	300x200x14,2
Stav		405x405	250x250x10	200x200x16,0
Bjelkehøyde (m)		2,5	2	2
Totalvekt (kg)	53804	29238	29705	66445

Tabell A 5: Tverrsnittsdata for Sandnes 100 meter spenn

	A	B	C	D
Overgurt	400x1395	225x495	200x120x12,5	250x150x10,0
Undergurt		225x495	200x120x12,5	250x150x10,0
Stav		225x225	120x120x10	150x150x10,0
Bjelkehøyde (m)		3	3	3
Totalvekt (kg)	25841	15175	19681	45276

Tabell A 6: Tverrsnittsdata for Lenvik 100 meter spenn

	A	B	C	D
Overgurt	765x2970	405x900	350x250x16	450x250x14,2
Undergurt		405x900	350x250x16	450x250x14,2
Stav		405x405	250x250x10	250x250x10,0
Bjelkehøyde (m)		3	3	3
Totalvekt (kg)	105217	49508	46863	93566

Vedlegg B - Utnyttelsesgrader

Tabell B 1: Utnyttelsesgrader

Lokasjon/Spenn	A	B	C	D
Sandnes 50 m	95%	92%	95%	97%
Lenvik 50 m	92%	93%	98,7%	89%
Sandnes 75 m	88%	96%	95%	99%
Lenvik 75 m	94%	91%	90%	91%
Sandnes 100 m	84%	88%	84%	86%
Lenvik 100 m	96%	99%	99%	91%

Vedlegg C - Kostnadsoversikt

Tabell C 1: Kostnadsoversikt fra Armec AS

Kategori	Kostnad
Dagtransport pr. del	8000,-
Nattransport pr. del	50 000,-
Kran	40 000,-
Opprigging kran pr. stk	15 000,-
Montering	20 000,-