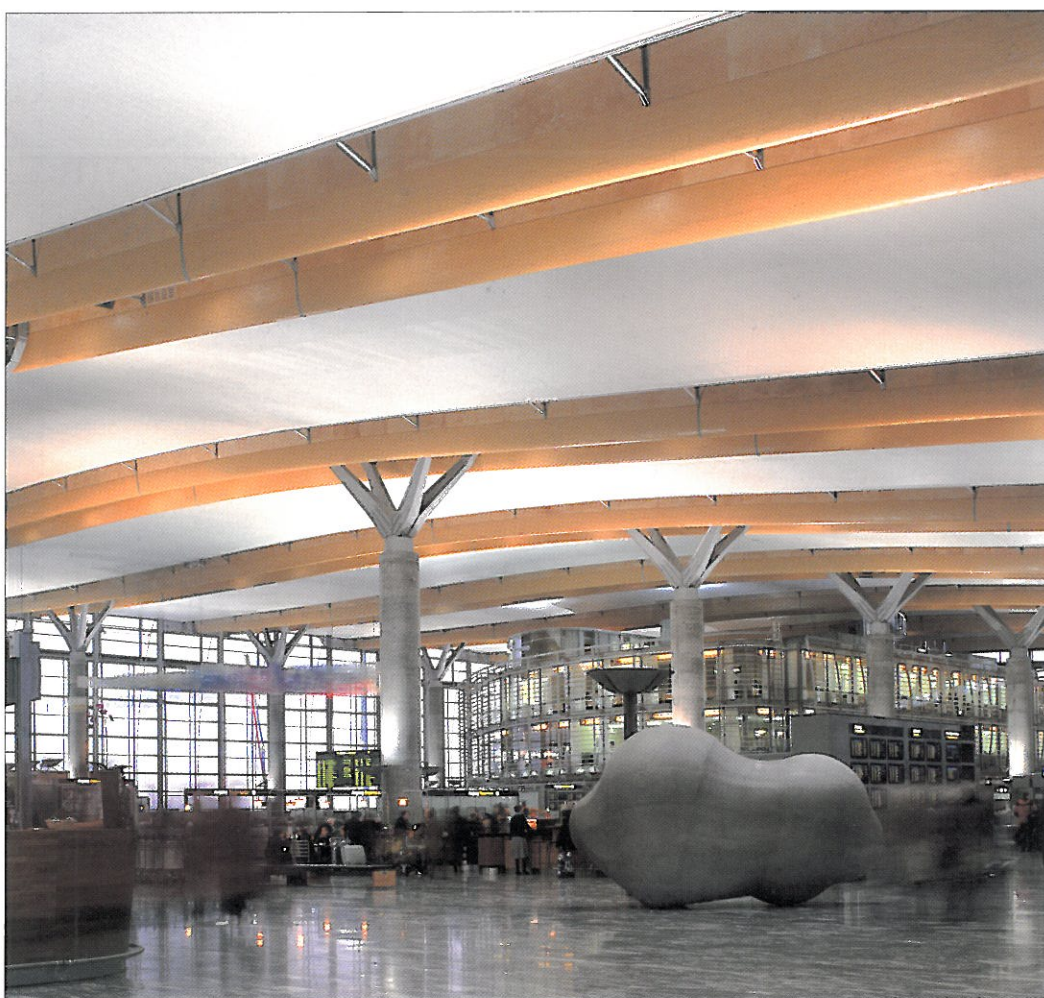


**Limtre eller stål?  
En analyse av energiforbruk, klimagassutslipp og  
kostnadseffektivitet**



Ann Kristin Petersen og Birger Solberg

## Rapport fra skogforskningen

- ✓ **Rapport fra skogforskningen** inneholder førstegangs publiserte artikler beregnet på norske og nordiske lesere
- ✓ Tabell- og figurtekster skrives på norsk
- ✓ Sammendrag skrives på norsk
- ✓ Engelske manuskripter eller omfattende arbeider med mye grunn-data kan publiseres i en underserie - *Supplement*.

Norsk institutt for skogforskning (Skogforsk) er utgiver av serien, i et samarbeid med Institutt for skogfag, NLH.

Tilrettelegging av manus for trykking, ajourhold av abonnenter, innkreving av abonnementsavgift, distribusjon av heftene og lagerhold skjer på Skogforsk. Bestilling av abonnement og enkelt-eksemplar av seriene skjer til Skogforsk.

Redaktør for serien er forskningsdirektør Bjørn R. Langerud, Skogforsk

En forfatterinstruks er tatt inn på siste omslagsside.

Layout og sats: Skogforsk

ISBN 82-7169-994-6  
ISSN 0803-2858

Norsk institutt for skogforskning (Skogforsk)  
Høgskoleveien 12,  
1432 Ås

Tlf.: 64 94 90 00  
Fax: 64 94 29 80  
E-post: skogforsk @ skogforsk.no  
Internett: <http://www.skogforsk.no/>

Forsiden: Fra Gardermoen  
Foto: Moelven Service AS

**Limtre eller stål?  
En analyse av energiforbruk, klimagassutslipp og  
kostnadseffektivitet**

Ann Kristin Petersen og Birger Solberg

---

Institutt for skogfag  
Norges landbrukshøgskole  
Boks 5044, 1430 Ås

## Forord

Dette arbeidet er en del av prosjektet "Skog og klima", finansiert av Det norske skogselskap, Utviklingsfondet for skogbruket og Norges Forskningsråd. Prosjektleder har vært Birger Solberg. Asbjørn Svendsrud (NLH) og Knut Fjulsrud (Trelastindustriens landsforening) har lest manuskriptet og kommet med gode forslag og kommentarer. Vi ønsker også å takke alle som har bidratt med data underveis, spesielt Åge Holmestad (Møelven Limtre), Bjørn Lund (Reinertsen Engineering AS), Tor Kristensen (Norsk Treteknisk Institutt), ansatte ved Oslo Lufthavn AS, Jan Ellef Søyland (Aviaplan), Tore Kleffelgård (SFT), Forestia Sokna, Forestia Våler, Marit Røer Ellefsen (Dyno Industrier), Kjell Løvold (Norfolier), Henriette Undrum (Statoil Forskningscenter), Linda Sygna (CICERO), Bjørn Von Hafenbraedl (Fundia Profiler AS), Helen Axelsson (Jernkontoret), og Joakim Widman (Stålbygnadsinstituttet).

Ås, 2001

Ann Kristin Petersen og Birger Solberg

## Sammendrag

PETERSEN, A. K. OG SOLBERG, B. 2002. Limtre eller stål? En analyse av energiforbruk, klimagassutslipp og kostnadseffektivitet. Rapport fra skogforskningen 1/02:1-60

Denne rapporten analyserer hvilke effekter trevirke har som substitutt til stål med hensyn til å minske utslippet av klimagassene CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> og N<sub>2</sub>O. Limtre dragerne i terminalbygningen på Gardermoen er brukt som et case. I planleggingen av dette bygget ble både løsninger i limtre og stål vurdert, slik at gode tekniske data foreligger. Konkret er problemstillingen knyttet til følgende spørsmål:

- Hva er energiforbruket over livsløpet til limtre og stål?
- Hva er klimagassutslippet over livsløpet til limtre og stål?
- Hvor store klimagassutslipp kan spares ved at limtre substituerer stål, og hva koster dette?

Analysen benytter tradisjonell LCI (life cycle inventory) og investeringsteori. Det siste innebærer at en tar hensyn til på hvilket tidspunkt klimagassutslipp/binding og kostnader inntreffer. Livsløpsanalysen for limtre er basert på data samlet inn for den spesifikke limtrekonstruksjonen på Gardermoen, mens energiforbruk og klimagassutslipp over livsløpet til stål er fra tidligere litteratur. Kostnads- og mengdedata er fra ingeniørfirmaet som planla bygningen.

Funksjonell enhet i analysen er 1 m<sup>2</sup> takflate, og levetida til bygningen er satt til 50 år. Energiforbruk og klimagassutslipp fra råvareutvinning, produksjon og avfallshåndtering er kvantifisert, mens trinnene bygging, bruk og riving er ansett for å være like for de to materialene. Ulike alternativer for systemgrenser til natur, produksjon og avfallshåndtering er vurdert både for limtre og for stål. I tillegg er det foretatt følsomhetsanalyser for energiforbruk og klimagassutslipp over livsløpet til limtre for å undersøke hvilke av faktorene som har størst betydning. I

*Rapport fra skogforskningen*

kostnadseffektivitetsanalysen ble det satt opp et basis-scenarie, og deretter ble forutsetningene for systemgrenser til natur, produksjon og avfallshåndtering endret en for en. I denne delen av analysen er det undersøkt hvor store klimagassutslipp som unngås hvis man bruker limtre i stedet for stål, hva dette koster og hvor store klimagassutslipp som unngås per m<sup>3</sup> trelast som går inn i limtreproduksjon.

Valg av forutsetninger har stor betydning for resultatet. Det er imidlertid klart at det trengs om lag dobbelt så mye energi til å framstille stål som til å framstille limtre. Over halvparten av energien brukt til å framstille limtre er bioenergi, mens det ikke brukes noe bioenergi i framstillingen av stål. Dette er hovedårsaken til at framstilling av limtre forårsaker kun en femdel av klimagassutslippene som framstilling av stål forårsaker. Den andre grunnen til dette er at kull brukes som reduksjonsagent i stålproduksjon, slik at det avgis store CO<sub>2</sub>-utslipp til luft. Dersom stålet framstilles av malm, er forskjellen i energiforbruk og klimagassutslipp mellom framstilling av limtre og stål enda større.

Avfallshåndteringen kan være enten veldig fordelaktig eller veldig ufordelaktig for limtre. Forbrenning med utnyttelse av energien er fordelaktig, mens deponering er ufordelaktig p.g.a. metanutslipp. Valg av diskonteringsrente er viktig fordi metanutslippet vil finne sted over lang tid. Deponering er ikke et sannsynlig utfall hvis følgene av den globale oppvarmingen viser seg å være alvorlige. En annen forutsetning som har stor betydning, er CO<sub>2</sub>-binding på frigitt skogareal. Usikkerheten i datamaterialet har liten betydning. I alle tilfeller kan ikke limtre være mer enn 1-6% dyrere enn stål før prisen per tonn sparte klimagassutslipp blir høyere enn dagens CO<sub>2</sub>-avgift på bensin.

Nøkkelord: Energiforbruk, klimagassutslipp, kostnadseffektivitet, limtre, stål, substitusjon, LCA

*Key words: Greenhouse gas emissions, life cycle assessment, cost-efficiency, substitution, wood, steel*

## Innhold

1 Innledning.....	5
2 Metode.....	6
2.1 Beregningsmetodikk.....	6
2.2 Forutsetninger.....	10
2.2.1 Energiforbruk og klimagassutslipp over livsløpet.....	10
2.2.2 Kostnader.....	14
2.2.3 Kostnadseffektivitet – oversikt over alternativer som er vurdert.....	16
3 Resultat.....	17
3.1 Energiforbruk og klimagassutslipp over livsløpet.....	17
3.1.1 Limtre.....	17
3.1.1.1 Energiforbruk med de mest sannsynlige estimatene.....	17
3.1.1.2 Klimagassutslipp med de mest sannsynlige estimatene.....	21
3.1.2 Stål.....	26
3.1.2.1 Energiforbruk.....	26
3.1.2.2 Klimagassutslipp.....	27
3.2 Kostnadseffektivitetsanalyser.....	28
3.2.1 Kontantstrømmer i basis-scenariet.....	28
3.2.2 Sparte klimagassutslipp på grunn av substitusjon.....	30
3.2.3 Pris på sparte klimagassutslipp.....	30
3.2.4 Maksimal prisforskjell sammenlignet med CO <sub>2</sub> -avgiften på bensin..	31
3.2.5 Tonn CO <sub>2</sub> -ekvivalenter spart per m <sup>3</sup> trelast til limtreproduksjon.....	32
4 Diskusjon.....	33
4.1 Energiforbruk og klimagassutslipp over livsløpet.....	33
4.1.1 Limtre.....	33
4.1.2 Stål.....	35
4.2 Kostnadseffektivitetsanalyser.....	36
5 Konklusjon.....	38
English summary.....	39
6 Litteratur.....	40
Vedlegg 1. Energiinnhold, virkningsgrader og utslippsfaktorer.....	43
Vedlegg 2. Forutsetninger brukt i livsløpsanalyse for limtre.....	45
Vedlegg 3. Forutsetninger brukt i livsløpsanalyse av stål.....	51
Vedlegg 4. Fullstendige følsomhetsanalyser, limtre.....	54

## 1 Innledning

I de siste årene har det blitt mer og mer oppmerksomhet rundt temaet drivhuseffekt og ulike tiltak for å bremse denne. I denne sammenheng har det vært fokusert på skog og skogbruk fordi skogen er en del av karbonsyklusen og et av jordas store karbonlagre. I tillegg er produkter i trevirke mindre energikrevende å framstille enn konkurrerende produkter, og energien i dem kan utnyttes etter bruk. Skogen har altså både en direkte og en indirekte effekt i klimasammenheng. Den direkte effekten er karbonbinding i skog og den indirekte effekten er at klimagassutslipp kan unngås dersom trevirke brukes i stedet for mer forurensende materialer. Formålet med denne undersøkelsen har vært å se på substitusjonseffektene og kostnadseffektiviteten av dem.

Skogens betydning som karbonlager i Norge har vært undersøkt i flere tidligere undersøkelser. Kostnadseffektivitet av karbonlagring ved ulike skjøtselalternativer har vært undersøkt i Lunnan et al. (1991) og Hoen & Solberg (1994). Solberg (1997) sammenlignet prisen på karbonlagring i skog med CO<sub>2</sub>-avgiften på fossile brensler. Ingen av de nevnte undersøkelsene har inkludert substitusjonseffektene av bruk av treprodukter i de kvantitative analysene, selv om de er beskrevet kvalitativt. En mer generell beskrivelse av skogbrukets rolle i klimasammenheng er gitt i Landbruksdepartementet (1997) og ECON (1995). I disse undersøkelsene er også substitusjonseffektene diskutert.

Trevirke har tre fordeler sammenlignet med andre materialer. For det første er det en fornybar ressurs, og forbrenning av trevirke forårsaker derfor ikke noe netto klimagassutslipp så lenge skogarealet tømmeret hentes fra forvaltes på en bærekraftig måte. For det andre kan selve framstillingen av trelastprodukter forbruke mindre fossil energi enn konkurrerende materialer. Framstillingen krever ikke industriell bruk av fossilt brensel, slik som for eksempel reduksjonsagenter i stålproduksjon.

For å kunne sammenlignes må produktene bli betraktet over hele livsløpet. De må også ha samme funksjon, det vil si oppfylle de samme tekniske kravene. I tidligere undersøkelser har man stort sett konsentrert seg om beregningsmetodikken (Erlandsson 1996), eller om framstillingsfasen (Mørkved & Opdal 1990, Fossdal 1995, NTI 1997abc, Engelbertsson 1997). I de undersøkelsene der miljøpåvirkninger fra avfallshåndtering er vurdert, er de vektet likt med utslipp fra framstilling selv om de skjer til ulike tidspunkt (Jönsson et al. 1995, Engberg & Eriksson 1998, Jarnehammar 1998, Künniger & Richter 1998).

Når man sammenligner alternative produkter er det også viktig å ta kostnadene med i betraktning. På den måten kan man finne ut hvilke produkter det er mest kostnadseffektivt å substituere med tre.

Temaet for denne undersøkelsen er den indirekte effekten trevirke har i klimasammenheng som substitutt for stål. Formålet er å se på hvor stor denne effekten er, hvor stor usikkerheten er og å vurdere dette opp mot eventuelle merkostnader. Det er som et case tatt utgangspunkt i limtretragerne i terminalbygningen på Gardermoen. Opprinnelig var det planlagt en konstruksjon i stål, og det er foretatt en sammenligning mellom denne stålkonstruksjonen og den limtrekonstruksjonen som ble valgt.

Det er svært mange forutsetninger i en livsløpsanalyse. I denne rapporten har vi konsentrert oss om usikkerhet i forutsetninger og hva ulike forutsetninger vedrørende produksjon og systemgrenser betyr for resultatet.

Konkret er problemstillingen knyttet til følgende spørsmål:

- Hva er energiforbruket over livsløpet til limtre og stål?
- Hva er klimagassutslippet over livsløpet til limtre og stål?
- Hvor store klimagassutslipp kan spares ved at limtre substituerer stål, og hva koster dette?

Med klimagasser mener vi CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> og N<sub>2</sub>O. Undersøkelsen tar ikke opp andre miljøpåvirkninger knyttet til produktene. Det er gjennomført en enkel livsløpsanalyse for limtre. Denne er brukt videre i en sammenligning mellom limtre og stål i bærebjelkene på Gardermoen.

Metodikken er beskrevet i kap. 2.1. Deretter følger de viktigste forutsetningene og alternativene i kap. 2.2, mens en detaljert beskrivelse av datamaterialet er gitt i vedlegg 1, 2 og 3. Resultatkapitlet er delt opp i resultat fra livsløpsanalysen av limtre, resultat fra livsløpsanalysen av stål og en sammenligning av energiforbruk og klimagassutslipp over livsløpet til konstruksjonene.

## 2 Metode

### 2.1 Beregningsmetodikk

Livsløpsanalyse er brukt for å kartlegge forbruk av energi og utslipp av klimagasser i løpet av produktens levetid. Denne metoden er beskrevet i blant annet SETAC (1993), Nordic Council of Ministers (1995) og i Erlandsson (1996). Prinsippet bak denne metodikken er å kartlegge hvordan produktene påvirker miljøet i løpet av sin livstid. Dataene for limtre er samlet inn spesielt for denne analysen, dels ved litteraturstudium og direkte fra bedrifter, mens data for stål er hentet fra tidligere litteratur.

Bruksfasen kan strekke seg over flere tiår, ofte 50 år eller mer. I denne fasen ser man på oppvarming, renhold og vedlikehold, avhengig av hvilken funksjon man studerer.

For bygningsmaterialer vil livsløpet normalt bestå av 6 faser, se figur 1. I tillegg kommer transport, både mellom og fasene og innen hver fase. Man tenker seg dette livsløpet som et teknisk system omgitt av naturen. Tankegangen bygger på å beskrive alle faktorer som går fra naturen og inn i systemet, og alle faktorer som går fra systemet og ut i naturen. Input kan være elektrisk energi, diesel, emballasje og ulike tilsetningsstoffer. Ideelt sett skal alle materialer og ressurser som brukes i løpet av livsløpet følges tilbake til "vuggen", det vil si til og med råvareutvinning. Av praktiske årsaker er det vanlig å se bort fra materialer/ressurser som betyr mindre enn 1% i det samlede resultatet. I noen tilfeller er det heller ikke mulig å fremskaffe fullstendige data.

Output skal ideelt sett bare bestå av utslipp til luft, vann eller jord. Man skal altså følge alt avfall/biprodukter som oppstår underveis fram til de igjen forsvinner ut i naturen. Det er vanlig å forutsette at biprodukter forlater systemet, mens energiforbruk og utslipp knyttet til avfall medregnes innen systemet. Definisjonen på



biprodukt er i denne sammenhengen avfall som går videre som råstoff i annen produksjon.

Det tekniske systemet må avgrenses geografisk, det vil si at man må angi i hvilket land de ulike fasene i livsløpet foregår, eventuelt hvilke bedrifter datamaterialet er hentet fra. Dette har betydning for hvor overførbare resultatene er til tilsvarende produkter andre steder. For eksempel har kvaliteten på teknologien betydning for utslipp og energiforbruk. Hvilke ressurser som brukes til energiproduksjon vil også variere for ulike bedrifter og i ulike land.

Det er også en tidsdimensjon i livsløpet, se figur 1. Hvor start og slutt settes i livsløpet er viktig både for produkter fra fornybare ressurser og for produkter som kan resirkuleres. For et fornybart produkt som trevirke, som binder CO<sub>2</sub> gjennom veksten, har dette betydning for hvordan utslipp av CO<sub>2</sub> og skogarealet behandles i analysen. Stål resirkuleres i stor grad, det vil si at det har flere livsløp. Stål som benyttes i dag kan være en blanding av stål som er i første livsløp og stål som er i senere livsløp.

En investering er en oppofrelse av goder på et gitt tidspunkt for å få økte goder på et senere tidspunkt (med goder menes her både materielle goder og miljøgoder). Kalkulasjonsrentefoten uttrykker avkastningskravet en slik marginal investering må oppfylle for å bidra til økt godeoppnåelse. Klimagassutslippene skjer på ulike tidspunkt i livsløpet til et bygningsmateriale, og medfører at en må ta stilling til hvordan utslipp i dag vektlegges i forhold til utslipp på et senere tidspunkt. Utslippene representerer kostnader (miljøkostnader) på lik linje med investerings- og produksjonskostnader. Under forutsetning av at en bestemt fysisk mengde klimagass (for eksempel ett tonn CO<sub>2</sub>) gir samme skade (dvs. samme kostnad) uansett på hvilken tidspunkt den kommer, vil en tillegge denne mengden utslipp mindre verdi jo lengre inn i framtida det kommer, og reduksjonen i verdi over tid tilsvarer kalkulasjonsrentefoten som kostnadene diskonteres med. Nyten av en reduksjon i klimagassutslipp vil på samme måte måtte diskonteres. Denne nytten har vi estimert i tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter.

Kostnadseffektivitet er et mål på hvor stor nytte som oppnås sett i forhold til kostnadene som må brukes for å oppnå denne nytten. I denne analysen er kostnadseffektivitet (E) definert som antall kroner det koster å unngå utslipp av ett tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter, og beregnet ut i fra følgende formler:

$$E = \frac{DK_{\text{lim tre}} - DK_{\text{stål}}}{DU_{\text{stål}} - DU_{\text{lim tre}}} \quad (1)$$

$$DK_{\text{lim tre}} = \sum_{t=0}^n K_{t,\text{lim tre}} (1+p)^{-t} \quad (2)$$

$$DK_{\text{stål}} = \sum_{t=0}^n K_{t,\text{stål}} (1+p)^{-t} \quad (3)$$

$$DU_{\text{stål}} = \sum_{t=0}^n U_{t,\text{stål}} (1+p)^{-t} \quad (4)$$

$$DU_{\text{limtre}} = \sum_{t=0}^n U_{t,\text{limtre}} (1+p)^{-t} \quad (5)$$

der

E = kostnadseffektivitet (antall kroner per tonn redusert utslipp av CO<sub>2</sub>-ekvivalenter)

DK<sub>limtre</sub> = diskonterte kostnader for limtrekonstruksjonen

DK<sub>stål</sub> = diskonterte kostnader for stålkonstruksjonen

DU<sub>stål</sub> = diskonterte klimagassutslipp over livsløpet til stålkonstruksjonen

DU<sub>limtre</sub> = diskonterte klimagassutslipp over livsløpet til limtrekonstruksjonen

K<sub>t, limtre</sub> = kostnad i år t for limtrekonstruksjonen

K<sub>t, stål</sub> = kostnad i år t for stålkonstruksjonen

U<sub>t, limtre</sub> = klimagassutslipp i år t for limtrekonstruksjonen

U<sub>t, stål</sub> = klimagassutslipp i år t for stålkonstruksjonen

p = diskonteringsrente

n = antall år analysen dekker (antall år er satt til 200 i denne analysen, siden det er tilstrekkelig for å dekke alle klimagassutslippene ved en eventuell nedbrytning av limtre på fylling)

Det er satt opp et basis-scenarie med visse forutsetninger om produksjon og systemgrenser. Deretter er disse forutsetningene endret for å undersøke hva de betyr.

Enheten man studerer når man sammenligner ulike materialer, kalles funksjonell enhet. Det er viktig at denne enheten fyller samme funksjon. Dette innebærer at man må benytte de mengdene av materialene som oppfyller denne funksjonen, og at det av og til er nødvendig å inkludere flere materialer. I sammenlignende livsløpsanalyser kan man se bort fra faktorer og faser som er like for begge produktene. I denne undersøkelsen er den funksjonelle enheten 1 m<sup>2</sup> takflate. Bygging, bruk og riving er forutsatt å være lik for de to konstruksjonene, og er derfor ikke tatt med i analysen (se vedlegg 2). Trinnene som er kvantifisert er derfor råvareutvinning, produksjon og avfallshåndtering. Levetida for terminalbygningen er satt til 50 år, som er vanlig i denne typen analyser. Det innebærer at råvareutvinning, framstilling og bygging skjer i år null, mens avfallsbehandlingen skjer i år 50.

De ulike klimagassene har forskjellig levetid i atmosfæren og bidrar med ulik styrke til drivhuseffekten. For å kunne sammenligne de ulike gassene måler man gassene sitt bidrag til klimaeffekter via strålingspådrivet. GWP, globalt oppvarmingspotensial, er en fysisk indeks for akkumulert oppvarmingseffekt i et spesifisert tidsrom, for en enhet av den aktuelle gassen sammenlignet med utslipp av en enhet CO<sub>2</sub>. CO<sub>2</sub> brukes altså som referanse-gass, og antall CO<sub>2</sub>-ekvivalenter finnes ved å multiplisere med GWP-verdien (MD 1995).

GWP er svært følsomt for valg av tidshorisont. For å få konsistens i denne analysen er det valgt å bruke DGWP, diskontert globalt oppvarmingspotensial. Med DGWP diskonterer man strålingspådrivet over en uendelig tidshorisont og

sammenligner gassene på grunnlag av dette (Sygna et al. 1999). Verdiene for diskontert globalt oppvarmingspotensial er vist i vedlegg 1.

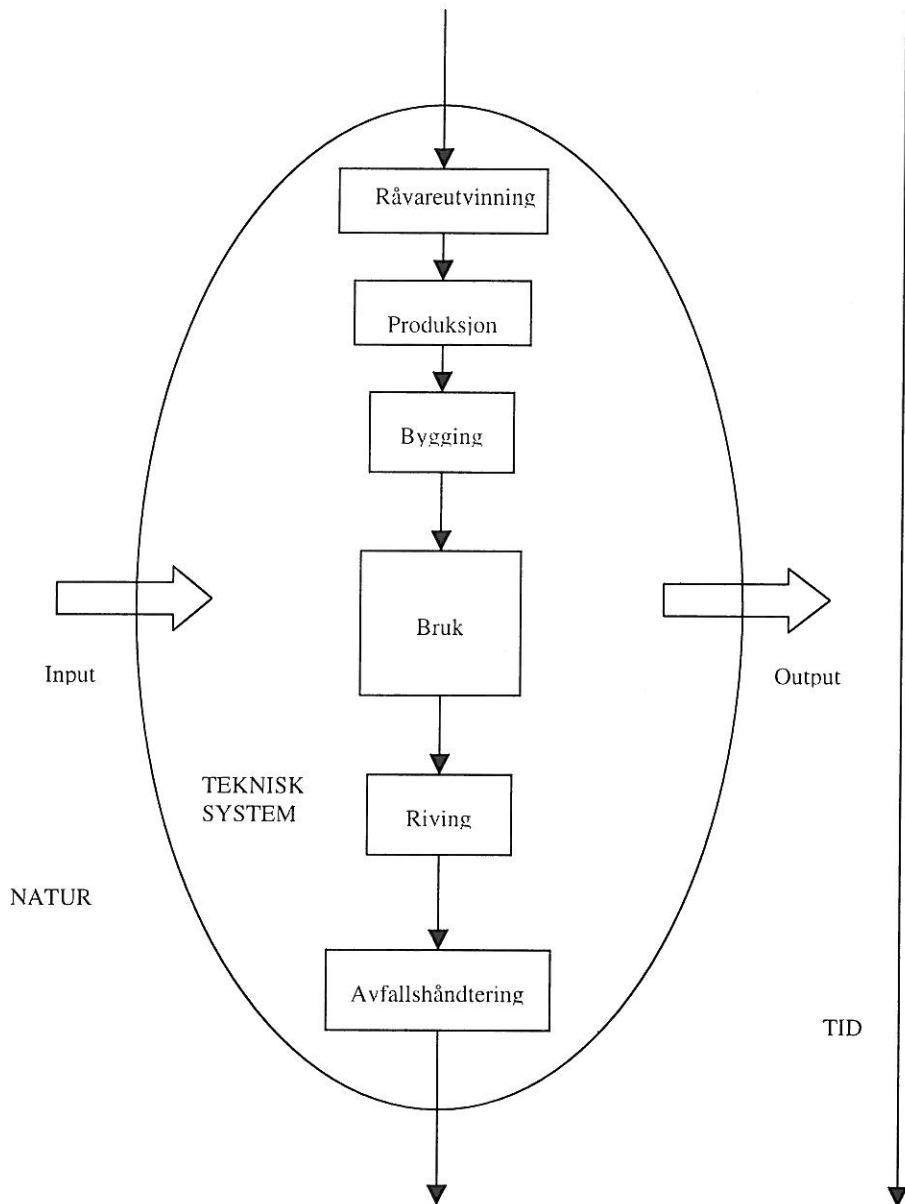


Fig. 1. Oversikt over det tekniske systemets grenser i en livsløpsanalyse.

## 2.2 Forutsetninger

### 2.2.1 Energiforbruk og klimagassutslipp over livsløpet

#### Limtre

Limtrebjelkene kommer fra bedriften Moelven Limtre AS, som kjøper trelast fra Forestia Sokna og Forestia Våler. Dataene for limtre er basert på opplysninger fra disse tre bedriftene. Råstoffet er gran. På begge sagbrukene brukes barken i egne barkfyringsanlegg, og dette dekker mye av energien til tørking av trelast og oppvarming av bygninger. Også Moelven Limtre har et flisfyringsanlegg som brukes til oppvarming av lokaler.

Det er laget et flytskjema, figur 2, over det tekniske systemet. Her er det vist hvilke prosesser som er inventert og hvor grensene mot naturen er satt. Geografisk er systemet avgrenset til å gjelde limtre fra Moelven Limtre AS. Det er ikke tatt hensyn til den energien som trengs for å lage produksjonsmidlene. En detaljert beskrivelse av forutsetninger og beregninger er gitt i vedlegg 2.

Det er sett på tre ulike alternativ for avfallshåndtering:

- Forbrenning der energien utnyttes og erstatter energi fra forbrenning av olje
- Forbrenning der energien utnyttes og 70% av energien erstatter vannkraft, 30% erstatter olje. Basert på tall for dagens energiforsyning i Norge (SSB 1999a)
- Deponering på hardpakket fylling

Ved forbrenning skjer utslippene momentant. Det er sett bort fra andre utslipp enn CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub> fra forbrenning av trevirke fordi slike utslipp sannsynligvis vil bli små etter hvert som den nye teknologien (vedovner og forbrenningsanlegg) kommer inn. For vedovner og større forbrenningsanlegg for ved er det brukt en gjennomsnittlig virkningsgrad og for olje en gjennomsnittlig virkningsgrad for villakjeler og større forbrenningsanlegg. Med olje menes fyringsolje. Utslippsfaktorer for klimagasser fra forbrenning er vist i vedlegg 1. Dagens energiforsyning til industri og oppvarming (alt utenom transport) er basert på om lag 30% olje og 70% vannkraftbasert elektrisitet (SSB 1999a).

Utslipp fra nedbrytning av trevirke skjer over mange år. På ei fylling vil karbonet i treet omdannes til CH<sub>4</sub> på grunn av oksygenunderskudd. CH<sub>4</sub> er en sterkere drivhusgass enn CO<sub>2</sub>. Utslippene av CH<sub>4</sub> er høyest de første årene for så å avta etter hvert som mengden karbon blir mindre. Nedbrytningen ved deponering er forutsatt å være fullstendig etter 150 år fra det tidspunktet limtreet deponeres. De årlige metanutslippene er basert på et metanpotensial på 168 kg og en halveringstid på 11 år (Jensen, Williksen & Bartnes 1999). Dette er nærmere beskrevet i vedlegg 2. Utslippene fra nedbrytning er diskontert på samme måte som de andre utslippene, slik det er beskrevet i likning (1) i kap. 2.1.

Det er foretatt tre følsomhetsanalyser. Først er det satt inn henholdsvis høyeste og laveste estimat for hver enkelt forutsetning for å undersøke hvor mye usikkerheten i den enkelte forutsetning betyr for resultatet. Deretter er høyeste estimat satt inn for alle forutsetninger samtidig, og det samme gjøres for laveste estimat. Øvre og nedre estimat er ekstremverdier som i gjennomsnitt ikke vil bli realisert, men på denne måten får vi fram hele variasjonsområdet til resultatet. Til

slutt er alle forutsetninger først økt med 10% deretter redusert med 10% for å få et uttrykk for betydningen av hver av forutsetningene.

Da tømmeret til limtretragerne ble hogd, ble samtidig et visst areal frigitt til ny skogproduksjon. På dette arealet vil skogen forynges, vokse og binde CO<sub>2</sub> som karbon i veden. På tidspunktet hvor limtretragerne rives, vil nye trær stå klare til å hogges. Dette er argumentet for at karbonbindingen på det frigitte skogarealet bør være med i regnskapet. I første omgang er ikke CO<sub>2</sub>-bindingen på skogarealet som gir virke til limtre tatt med i analysen. I et eget underkapittel er det imidlertid undersøkt hvilken virkning denne forutsetningen har. Et skogbestand vokser etter en s-formet kurve. I denne analysen har vi forutsatt lineær vekst, det vil si at samme mengde CO<sub>2</sub> bindes hvert år. Det er altså to alternativ for karbonbinding i skog:

- Karbonbinding på skogarealet som gir virke til limtretragerne er ikke tatt med i beregningene
- Karbonbinding på skogarealet som gir virke til limtretragerne er inkludert i beregningene

Når tømmer hogges, blir det værende igjen kvist, toppender, stubber og røtter i skogen. Karbonsyklusen i jordbunnen blir også endret og det avgis CO<sub>2</sub> fra jorda. Mindre enn halvparten av tømmeret som ble hogd inngår i limtretragerne. Resten utgjøres av flis på sagbruk og limtrefabrikk, og dette går til papir- og sponplateindustrien. Hele treet kan heller ikke brukes til skurtømmer. Deler av treet vil ikke oppfylle kvalitetskravene og blir solgt som massevirke. Under forutsetning av at tømmeret ville blitt hogd uansett, selv om ikke limtretragerne ble bygd, ser vi bort fra disse utslippene på hogstflatene. En annen begrunnelse for å gjøre dette er at karbon fra hogstavfall og jordbunn ble bundet tidligere, og så lenge skogen som helhet er i balanse er nettoutsippet null.

Vi har regnet med at mengden karbon i limtretragerne bindes på det frigitte skogarealet i løpet av limtretragerens brukstid. Bare en del av tømmeret som hogges blir til ferdig limtre, og derfor kan bare samme mengde karbon som er i limtreet godskrives limtre. I følge NTI (1997b) frigis 867 kg CO<sub>2</sub> fra forbrenning av 1 fm<sup>3</sup> flis med fuktighet 11%. Denne karbonbindingen er brukt i analysen.

### Stål

Data fra stålindustrien er vanskelig tilgjengelige, og det er derfor valgt å bruke tall fra Björklund et al. (1996) sin livsløpsanalyse av stål- og betongkonstruksjoner i bygninger.

Figur 3 viser et flytskjema over livsløpet til stålkonstruksjonen, samt hvilke faser og faktorer som er inkludert i analysen. En fullstendig oversikt over forutsetningene i livsløpsanalysen er gitt i vedlegg 3. Her tas det utgangspunkt i nummereringen i flytskjemaet i figur 3, slik at alle faser beskrives punkt for punkt. Utslippsfaktorer, virkningsgrader og energiinnhold står i vedlegg 1.

Som figur 3 viser, kan stål enten produseres fra malm eller fra skrapjern. Både energiforbruk og klimagassutslipp er mye høyere fra malmbasert enn fra skrapjernbasert produksjon. De forutsetninger man gjør i forhold til dette, er derfor meget viktige for resultatet. I Norge produseres bare armeringsjern, og ikke stål av en slik kvalitet at det kan brukes i bærende konstruksjoner.

Vi har sett på to alternativer for hvordan stål i en bærebjelke i terminalbygget på Gardermoen kan være produsert:

- Konstruksjonen importeres fra Sverige. Det innebærer at produksjonen er 100% malmbasert
- Konstruksjonen importeres fra en vilkårlig produsent i verdensmarkedet. Det vil si at skrapjernandelen er ukjent. Siden om lag 50% av alt stål på verdensmarkedet er fra skrap, har vi brukt gjennomsnittet av energiforbruket og klimagassutslippene fra malmbasert og skrapjernbasert produksjon i dette alternativet

Tilsvarende er det sett på to alternativ for hva som skjer med stålbjeldene etter at terminalbygningen rives:

- Stålkonstruksjonen sendes til Fundias anlegg i Mo i Rana hvor den smeltes om og blir til armeringsjern. I dette alternativet vil konstruksjonen kun erstatte annet skrapjern, og det spares ikke noe energi eller utslipp
- Stålkonstruksjonen selges til en vilkårlig produsent på verdensmarkedet og går inn i produksjon av nytt stål som erstatning for malm. I dette alternativet vil energi og utslipp spares fordi skrapbasert stålproduksjon er mindre energikrevende og forårsaker mindre utslipp enn malmbasert

Som nevnt ovenfor har vi sett på to alternativer for hvor stålet i en konstruksjon tilsvarende limtretragerne ville blitt produsert, i Sverige eller på verdensmarkedet. I Sverige kommer størsteparten av elektrisiteten fra vann- og kjernekraftverk, som ikke virker inn på drivhuseffekten. Stål kjøpt på verdensmarkedet kan imidlertid være produsert i land hvor elektrisitet fremstilles fra fossile brensler. For å se i hvilken grad dette kan virke inn på resultatet, er det sett på et avvik fra basis-scenariet der elektrisitet er forutsatt å komme fra kullkraft:

- Klimagassutslipp fra produksjon av elektrisitet er ikke inkludert i beregningene
- Elektrisitet i stålproduksjon blir produsert av kull

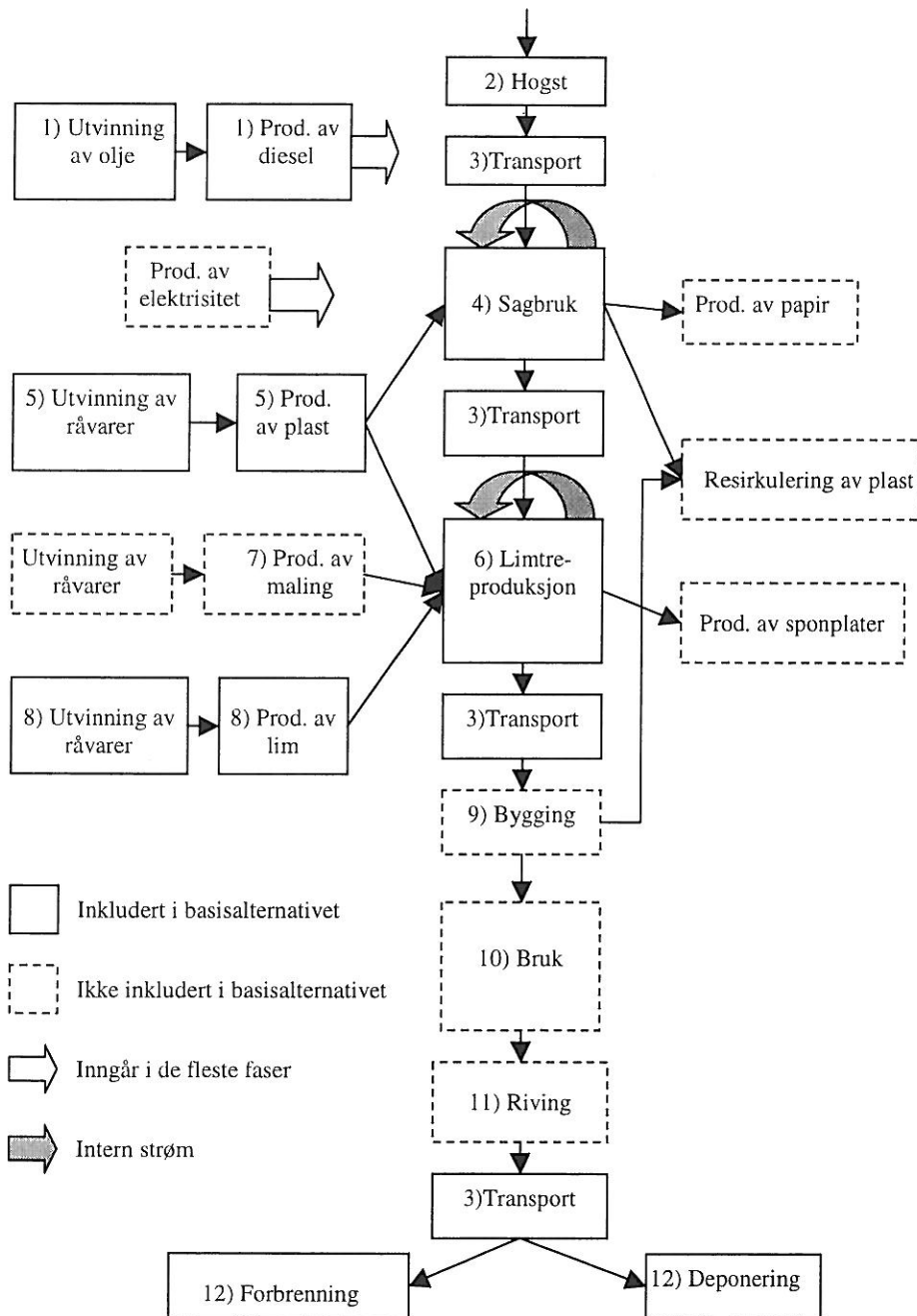


Fig. 2. Flytskjema som viser livsløpet til limtredegerne på Gardermoen, samt systemgrenser.

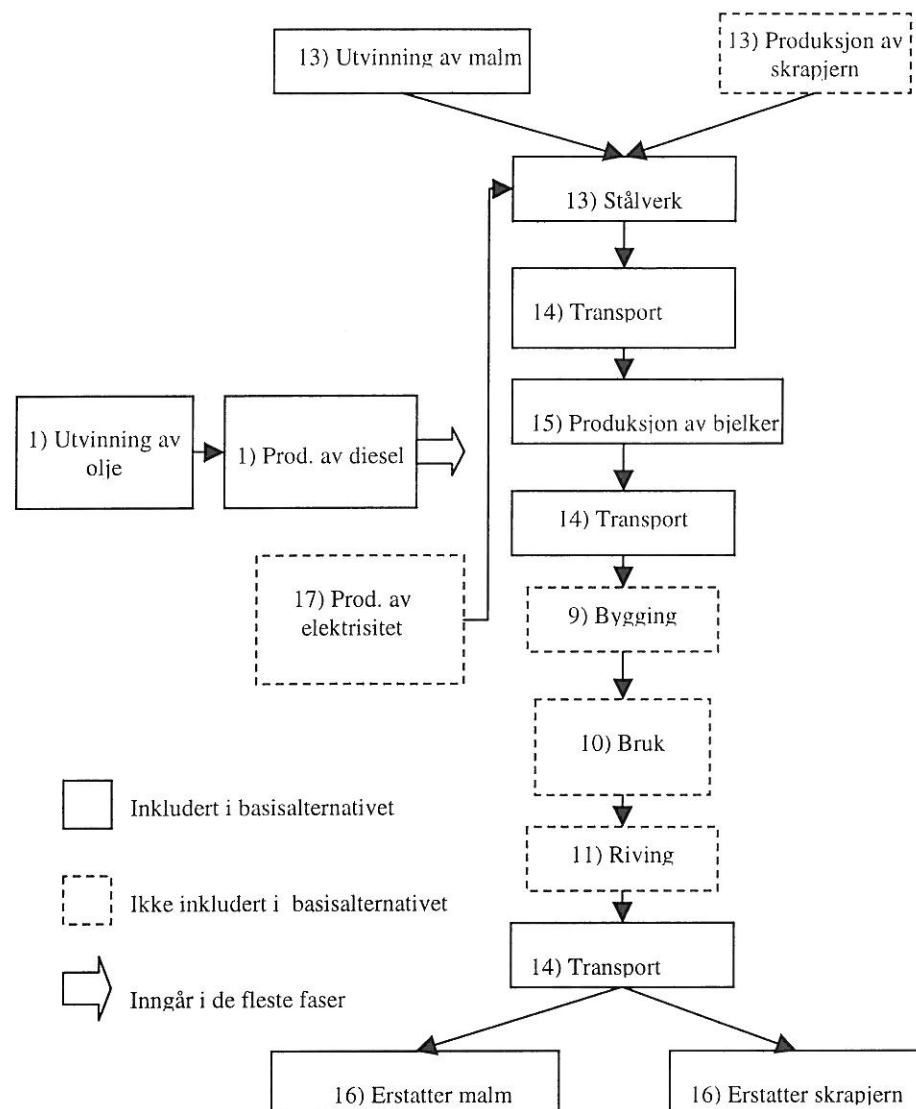


Fig. 3. Flytskjema som viser livsløpet til en stålkonstruksjon, samt ulike alternativer og systemgrenser.

### 2.2.2 Kostnader

#### *Investering – framstilling fram til ferdig bygning*

Prisen på alternativene i stål ble i 1994 beregnet til å være fra 1.117 kr til 1.155 kr per m<sup>2</sup> takflate (Reinertsen Engineering AS 1994). For limtre var prisen fra 835-1.097 kr per m<sup>2</sup> takflate. Disse prisene inkluderte alle kostnader knyttet til framstilling, transport og bygging.



Hovedårsakene til at limtre ble valgt i terminalbygningen på Gardermoen, var arkitektoniske og estetiske hensyn. Etter hvert påløp det en del ekstra kostnader, både på grunn av tilfeldige hendelser og arkitektoniske endringer. Konstruksjonen ble derfor dyrere enn først beregnet. Det samme ville normalt også skjedd om man hadde valgt et alternativ i stål, slik at det er realistisk å forutsette at prisforskjellen i alle tilfelle ville blitt den samme også i virkeligheten (Reinertsen Engineering AS, pers. medd.).

I følge Moelven Limtre er prisforskjellen mellom stål og limtre sjelden over 10 - 20 %, og den kan gå begge veier. Generelt er det slik at limtre ofte er mest prisgunstig i kompliserte konstruksjoner, for eksempel limtretragerne på Gardermoen. For enkle konstruksjoner med mange like elementer er stål vanligvis rimeligst.

#### *Transport*

Kostnader til transport i prosessen fram til terminalbygningen står ferdig er innbakt i prisen på de ferdig oppsatte bærebjelkene. Transporten som gjenstår er da frakt av materialene til sted for avfallshåndtering. Transportkostnaden avhenger av transportavstand, men også av hvilket transportmiddel som benyttes. Transportavstanden er i flere tilfeller ukjent, jmfør vedlegg 2 punkt 3 og vedlegg 3 punkt 14, og det samme gjelder transportmiddel. Med utgangspunkt i en dieselpriis på 10 kroner per liter vil frakt med bil av stål tilsvarende 1 m<sup>2</sup> takflate fra Gardermoen til Mo i Rana utgjøre under 1% av investeringskostnaden. Transport med jernbane vil være enda rimeligere. I analysen er det på bakgrunn av dette sett bort fra transportkostnader knyttet til frakt av materialene til sted for avfallshåndtering.

#### *Avfallsbehandling*

Kostnaden til riving blir høyere når materialene skal sorteres og sendes til resirkulering eller biobrenselanlegg. Denne kostnaden er sannsynligvis generelt lik for stål og limtre i terminalbygningen, og er ikke med i analysen.

Salg av skrapjern gir inntekt, men i tråd med resonnementet for klimagassutslipp og energiforbruk over livsløpet går skrapjern inn i ny produksjon enten som erstatning for annet skrapjern eller for malm. Hvis skrapjernet brukes som erstatning for annet skrapjern, blir det ingen spesielle inntekter eller kostnader. Hvis skrapjernet erstatter malm i produksjon av nytt stål er det også sett bort fra eventuell inntekt/kostnad, selv om det vanligvis er om lag 10% billigere å produsere stål fra skrapjern enn fra malm (Fundia Profiler AS, pers.medd.). Denne forutsetningen er gjort fordi skrapjernesprisen i perioder kan være så høy at malmbasert produksjon er billigere. Prisen på skrapjern fluktuerte mye mer enn malmprisen fordi skrapjern kjøpes på spotmarkedet mens malm kjøpes på årskontrakter med jevn pris.

Energi fra trevirke i biobrenselanlegg er per i dag billigere enn energi fra olje og vannkraft (NYTEK 1996). Man vil derfor med dagens priser spare penger hvis trevirke forbrennes i slike anlegg og energien erstatter annen energi fra vannkraft eller olje. Dette beløpet vil med dagens priser være fra 3% til 9% av prisen på bærebjelker i stål, avhengig av hvilke virkningsgrader man antar. Siden dette aspektet vil komplisere analysen betraktelig, samtidig som forandringen i nåverdi vil være liten, er det sett bort fra inntekt fra salg av limtre til brensel.

### 2.2.3 Kostnadseffektivitet – oversikt over alternativer som er vurdert

I kapitlet kostnadseffektivitet er bærebjelkene i stål og limtre sammenlignet med hensyn på klimagasser. Det er beregnet hvor store klimagassutslipp som unngås hvis man bruker limtre i stedet for stål, hvor mye dette kan koste samt hvor store klimagassutslipp som unngås per m<sup>3</sup> trelast som går inn i limtreproduksjon.

Som det går fram av kap. 2.2.1 er det mange alternativer som må vurderes når man skal beregne klimagassutslipp over livsløpet til både stål og limtre. Disse alternativene gjelder systemgrenser mot naturen, produksjon og avfallshåndtering. I tabell 1 er det vist en oversikt over de alternativene som er vurdert i analysen.

Tabell 1. Oversikt over de ulike alternativene for systemgrenser til naturen, produksjon og avfallshåndtering som er undersøkt i kostnadseffektivitetsanalysen.

Forutsetning	Alternativ	Nr.
Avfallshåndtering av limtre	Forbrenning, energien erstatter olje	A1
	Forbrenning, energien erstatter dagens energi	A2
	Deponering	A3
Estimat, framstilling av limtre	Laveste	B1
	Mest sannsynlige	B2
	Høyeste	B3
Estimat, avf.håndt. av limtre	Laveste	C1
	Mest sannsynlige	C2
	Høyeste	C3
Karbonbinding på skogareal	Ikke inkludert	D1
	Inkludert	D2
Framstilling av stål	Gjennomsnitt av skrap- og malmbasert	E1
	100% malmbasert	E2
Avfallshåndtering av stål	Resirkuleres, stålet erstatter annet skrapjern	F1
	Resirkuleres, stålet erstatter malm	F2
Prod. av elektrisitet i stålprod.	Ikke inkludert/vannkraftbasert	G1
	Kullkraftbasert	G2
DGWP	Samme verdi som rentekrav	H1
	0% i alle alternativ	H2

Det er satt opp et basis-scenarie, og deretter er forutsetningene endret en for en. Det er brukt fem ulike rentekrav i beregningene, 0, 2, 4, 6 og 8%. Korresponderende verdier for diskontert globalt oppvarmingspotensial, DGWP, er brukt for å vekte klimagassene til CO<sub>2</sub>-ekvivalenter. I basis-scenariet er det forutsatt at løsningen i limtre var 1% dyrere enn løsningen i stål, jmfør kap.2.2.2. Alternativene brukt for å beregne klimagassutslipp over livsløpet til materialene er for øvrig:

- Avfallshåndtering av limtre: A2
- Estimat for framstilling av limtre: B2
- Estimat for avfallshåndtering av limtre: C2
- Karbonbinding på skogareal: D1
- Framstilling av stål: E1
- Avfallshåndtering av stål: F1
- Produksjon av elektrisitet brukt i framstilling av stål: G1

### 3 Resultat

#### 3.1 Energiforbruk og klimagassutslipp over livsløpet

##### 3.1.1 Limtre

##### 3.1.1.1 Energiforbruk med de mest sannsynlige estimatene

Energiforbruk over livsløpet til limtre dragerne er vist i figur 4 og er delt inn i:

- energiforbruk til framstilling
- energiforbruk/spart energi ved de tre ulike måtene å behandle limtreet på etter at bygningen rives

Der energiforbruket er negativt, betyr det at man sparer energi ved å bruke limtre. Dette skyldes at når limtreet brennes, kan energien som frigjøres erstatte annen energi.

Det samlede energiforbruket for limtre dragerne per m<sup>2</sup> takflate ferdig montert er 140 kWh. Over halvparten av denne energien kommer fra bruk av bark i energiproduksjonen på sagbrukene. Av figur 4 kan man også se at det er mulig å spare mer energi enn hva som trengs til framstilling, dersom limtreet brennes når det har tjent sin funksjon. Både alternativet der energien fra forbrenning erstatter olje og der den erstatter vannkraft og olje gir større besparelse av energi enn det framstillingen forårsaker.

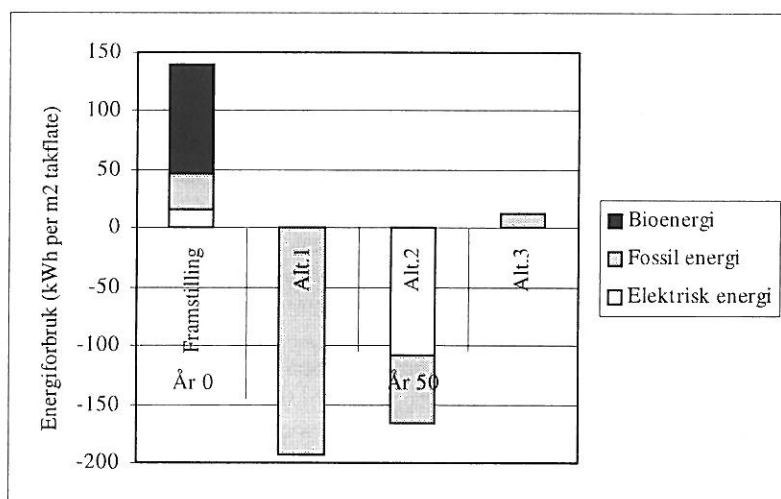


Fig.4. Energiforbruk over livsløpet til limtre (kWh per m<sup>3</sup> limtre). Søylen i år 0 viser energiforbruket fra hogst til bygging, mens de tre søylene for år 50 viser energiforbruket ved de ulike alternativene for avfallsbehandling. Alt.1 forutsetter at limtreet brennes og at energien erstatter energi fra olje. Alt.2 forutsetter at limtreet brennes og at energien erstatter energi delvis fra vannkraft og olje. Alt.3 forutsetter at limtreet deponeres.

I figur 5 er det tatt utgangspunkt i energiforbruket i år null, det vil si energi til selve framstillingen av limtre dragerne. Figuren viser hvor stor andel av energiforbruket hver av prosessene hogst, transport osv. står for. Størst er forbruket av energi på sagbruket, dernest i limtreproduksjonen. Lim og plast er til sammen

opphav til 10% av energiforbruket. 6% av energien går med til transport, og bare 3% til hogst og framkjøring av tømmer. Precombustion, det vil si utvinning av olje og raffinering av drivstoff, utgjør 3%.

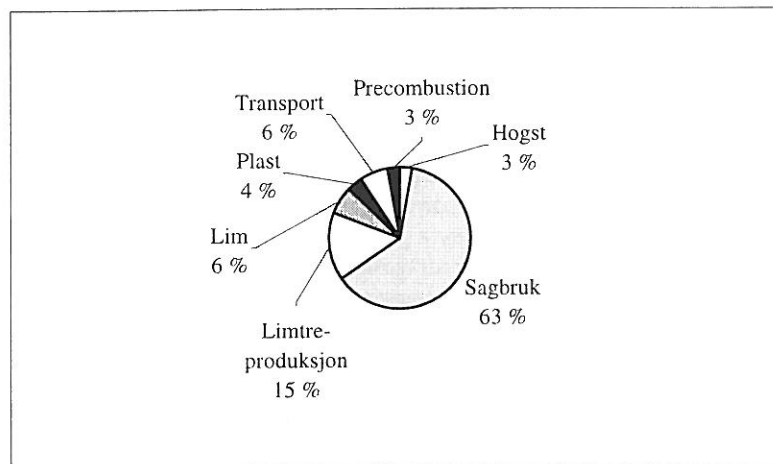


Fig. 5. Andel av energiforbruket som skyldes de ulike trinnene i framstillingsprosessen av limtredegerne.

#### *Følsomhetsanalyser*

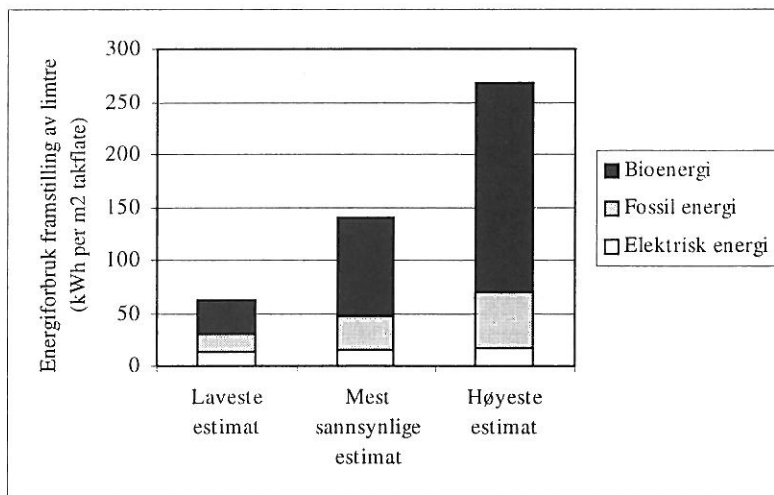
I neste steg i analysen har vi undersøkt hvilke forutsetninger som har størst innvirkning på resultatet. Alle forutsetninger er endret en for en for å se hvor stor endring dette ga. I tabell 2 er de forutsetningene som ga mer enn 1% utslag i energiforbruk ved framstilling av limtre listet opp. Det mest sannsynlige estimatet, eller basisalternativet, er angitt. Deretter er laveste og høyeste estimat for forutsetningen vist, fulgt av prosentvis endring i resultatet som følge av denne variasjonen. Til slutt er det vist hvor mye resultatet endres i prosent, dersom forutsetningene endres med 10%.

Tabell 2 viser at det er usikkerheten i brennverdien for bark og mengden bark som blir innfyrt (gitt ved barkvolumprosenten) som gir størst endring i energiforbruket til framstilling av limtre. Dette understrekes hvis man ser på hvordan fordelingen mellom elektrisitet, fossil energi og bioenergi er hvis man bruker laveste, mest sannsynlige og høyeste estimat for alle forutsetninger. Denne fordelingen er vist i figur 6, og som man kan se er det mengden bioenergi som forandres mest. Sammenlignet med den prosentvise variasjonen i forutsetningene er endringen i resultat lav for alle forutsetninger, bortsett fra for barkvolumprosent og brennverdi. Når en og en forutsetning reduseres/økes med 10% forandres resultatet med mindre eller lik 10%. Estimat av usikkerhet i beregningene for deponering og forbrenning er vist i vedlegg 4.

Tabell 2. Følsomhetsanalyse for energiforbruk fra framstilling av limtre\*.

Forutsetning	Reell variasjon i forutsetning			Variasjon i forutsetning i prosent		Endring i resultat i prosent		Endring i resultat i prosent når forutsetning endres med $\pm 10\%$	
	min	basis	max	min	max	min	max	-10%	+10%
Transportavstand inn til sagbruk i km	10	50	100	-80	100	-2	2	0	0
Dieselforbruk i liter/km	0,35	0,45	0,55	-22	22	-2	2	-1	1
Barkvolumprosent	8	11,5	15	-30	30	-16	18	-6	6
Brennverdi bark i kWh/fm <sup>3</sup>	720	1395	2070	-48	48	-25	25	-5	5
Dieselforbruk på sagbruk i liter/m <sup>3</sup> trelast	1,0	2,3	3,2	-57	39	-2	1	0	0
Skurutbytte sagbruk 2 i prosent	44,6	47,6	51,2	-6	8	2	-2	3	0
Returlass	nei	halvt	ja			2	-2	0	0
Forbruk av trelast per m <sup>3</sup> ferdig limtre	1,3	1,35	1,4	-4	4	3	0	-3	4
Andel trelast intern brensel i limtreprod.	0,04	0,09	0,16	-56	78	-9	15	-2	2
Limforbruk per m <sup>3</sup> limtre i kg	8	10	13	-20	30	-1	2	-1	1
Forbruk av plast per m <sup>3</sup> limtre i kg	0,5	1,7	2,9	-71	71	-2	2	0	0
m <sup>3</sup> limtre per m <sup>2</sup> takflate	0,13	0,14	0,15	-7	7	-7	7	-10	10

\*En og en forutsetning er endret fra basisverdi til henholdsvis minimums- og maksimumsverdi og den prosentvise endringen i resultatet er beregnet. Forutsetninger som ga endring mindre enn 1% er utelatt i tabellen. Fullstendig følsomhetsanalyse er vist i vedlegg 4.

Fig. 6. Framstilling av limtre, variasjon i energiforbruk fordelt på energikilde (kWh per m<sup>2</sup> takflate).

Tabell 3 viser hvordan energiforbruket vil variere hvis man bruker henholdsvis laveste estimat og høyeste estimat for alle forutsetningene. Dette er altså lavest mulige og høyest mulige resultat. De laveste og høyeste estimatene er ekstremer resultat som har liten sannsynlighet for å inntreffe i virkeligheten, men de illustrerer mulighetsrommet. Energiforbruket ved framstilling av limtredegrerne kan variere mellom 60 og 270 kWh per m<sup>2</sup> takflate. Når det gjelder hva som blir gjort med limtredegrerne etter at terminalbygningen er revet, viser avfallshåndtering 1 (A1) og avfallshåndtering 2 (A2) betydelig variasjon, men ikke over 100%.

Tabell 3. Oversikt over utfallsrommet for energiforbruk for framstilling og ulike alternativ for avfallsbehandling for limtre per m<sup>2</sup> takflate.

År		Energiforbruk i kWh			Endring i resultat i prosent	
		Laveste estimat	Mest sannsynlige estimat	Høyeste estimat		
0	Framstilling	63	140	267	-55	92
50	Energi fra limtre substituerer olje	-345	-193	-93	-79	52
	Energi fra limtre subst. olje og vannkraft	-260	-166	-87	-57	48
	Limtre deponeres	3	12	21	-78	78

I tabell 4 er alle forutsetninger økt/reduisert med 10% samtidig for å få et uttrykk for hvor følsomt resultatet er for usikkerhet i datamaterialet. Endringene er vist separat for framstilling og de ulike alternativene for avfallsbehandling. Både en økning i alle forutsetninger på 10% og en reduksjon gir en prosentvis endring i klimagassutslippet som er større enn 10%.

Tabell 4. Prosentvis endring i energiforbruk av at alle forutsetninger i analysen økes/redueres med 10% samtidig.

År		Prosentvis endring i resultat når alle forutsetninger reduseres med 10%	Prosentvis endring i resultat når alle forutsetninger økes med 10%
		0	Framstilling
50	Energi fra limtre substituerer olje	-19	21
	Energi fra limtre subst. olje og vannkraft	-24	29
	Limtre deponeres	-29	35

### 3.1.1.2 Klimagassutslipp med de mest sannsynlige estimatene

Figur 7 viser klimagassutslipp over livsløpet til limtre. Tiden er vist langs x-aksen, mens klimagassutslipp er vist langs y-aksen. Der utslippene er negative, vil det si at man sparer utslipp. Framstilling, det vil si alle trinn fra hogst til ferdig bygning, skjer i år 0. Det er forutsatt at terminalbygningen rives i år 50. Hva som blir gjort med limtreet etter dette, er det vist 3 alternativer for:

- Limtreet brennes, energien erstatter olje
- Limtreet brennes, 70% av energien erstatter vannkraft og 30% erstatter olje, dvs. den samme fordelingen som det er mellom olje og vannkraft i dag.
- Deponering.

Utslippene fra deponering skjer ikke momentant og i form av  $\text{CO}_2$  som ved forbrenning, men som  $\text{CH}_4$  og over en lang tidsperiode. For å vekte klimagassene til  $\text{CO}_2$ -ekvivalenter er det i figuren brukt DGWP, diskontert globalt oppvarmingspotensial, på 0%. Det er de mest sannsynlige estimatene for forutsetningene som er brukt i denne oversikten.

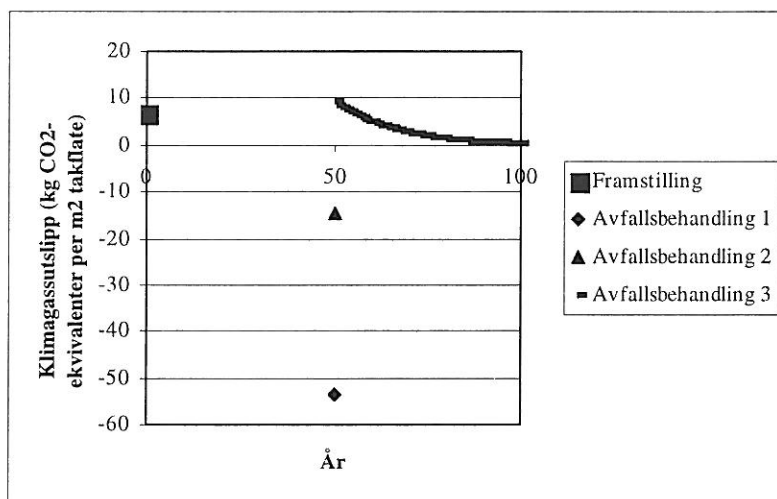


Fig. 7. Klimagassutslipp over livsløpet til limtre. Avfallsbehandling 1 er forbrenning der energien erstatter olje. Avfallsbehandling 2 er forbrenning der energien erstatter 70% vannkraft og 30% olje. Avfallsbehandling 3 er deponering. Beregning av  $\text{CO}_2$ -ekvivalenter er gjort ut i fra DGWP, diskontert globalt oppvarmingspotensial, på 0%. Utslipp fra forbrenning skjer momentant mens utslipp fra nedbrytning skjer gradvis og over flere år.

Som det går fram av figur 7, vil framstillingen av limtreet, det vil si fra hogst til ferdig bygning, gi et utslipp på 7 kg  $\text{CO}_2$ -ekvivalenter. For avfallsbehandling er alternativ 1 det beste. Hvis limtreet utnyttes til brensel og energien erstatter olje kan man spare 54 kg  $\text{CO}_2$ -ekvivalenter. Det dårligste alternativet for avfallsbehandling er deponering. Her er utslippene av  $\text{CO}_2$ -ekvivalenter opp i 10 kg de første årene, for så gradvis å avta etter hvert som nedbrytningen går sin gang. Generelt kan man si at klimagassutslippene fra framstillingen er lave, mens avfallsbehandling både kan gi svært store besparelser og utslipp avhengig av hvilket alternativ som velges.

Hvis man ser nærmere på klimagassutslippene fra framstilling av limtre, ser man at transport står for om lag en tredjedel av klimagassutslippet (se figur 8). Videre står produksjon av trelast for 28% av utslippene, mens hogst og framkjøring av tømmer er opphav til 14% av utslippene. Limet i limtreet forårsaker 12% av de samlede utslippene. Precombustion, det vil si utvinning av olje og raffinering av diesel, utgjør 3%.

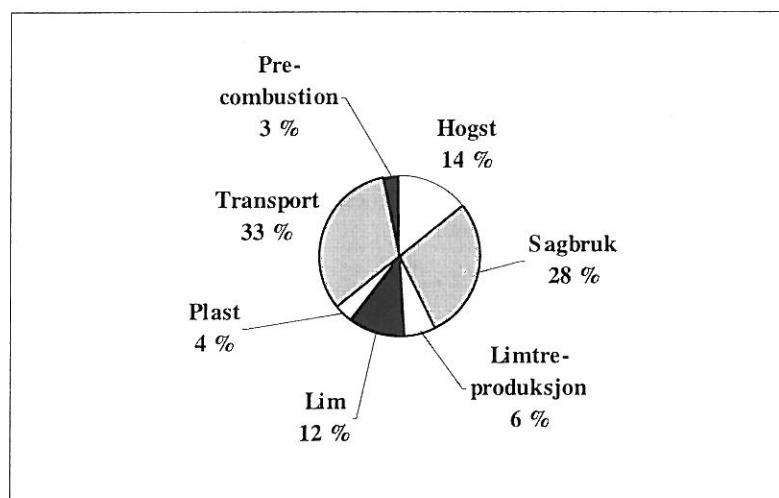


Fig. 8. Klimagassutslipp ved framstilling av limtre fordelt på de ulike trinnene i produksjonen. CO<sub>2</sub>-ekvivalenter er beregnet med et diskontert globalt oppvarmingspotensial på 0%.

#### Følsomhetsanalyser

Det er en viss usikkerhet i datamaterialet analysen bygger på. For de fleste av dataene er det oppgitt et laveste og høyeste anslag. I figur 7 er det de mest sannsynlige verdiene som er brukt. Tabell 5 viser de forutsetningene som er årsak til den største usikkerheten i resultatet. Alle forutsetningene er endret en for en for å se hvor stor prosentvis endring dette ga i resultatet. Tabellen viser også hvor mye resultatet endres når de uavhengige variablene reduseres/økes med 10%. Bare de forutsetningene som betydde mer enn 1%, er vist i tabell 5. Den fullstendige følsomhetsanalysen er vist i vedlegg 4. Usikkerhet i resultatene for de ulike avfallshåndteringene er også vist i vedlegg 4.

Tabell 5 viser at det er transportavstand inn til sagbruk og dieselforbruk på sagbruk som slår ut mest. Dieselforbruk ved biltransport, og om det blir kjørt med returlast eller ikke, forårsaker 8% usikkerhet i resultatet. Sammenlignet med den prosentvise variasjonen i forutsetningene er endringene i resultatet lave. Når de forutsatte størrelser reduseres/ økes med 10% endres resultatet med mindre eller lik 10%. For noen av de forutsatte størrelser vil en økning innebære reduserte utslipp, for eksempel dess større nyttelast bilene kan kjøre med, jo mindre klimagassutslipp.

Hvis man setter inn laveste estimat for alle forutsetningene, finner man laveste mulige verdi for klimagassutslippet over livsløpet til limtre. På samme måte finner man høyest mulige verdi hvis man setter inn høyeste estimat for alle forutsetninger.



Resultatet fra en slik følsomhetsanalyse er vist i tabell 6. Tabellen viser lavest mulige, mest sannsynlige og høyest mulige klimagassutslipp for framstilling av limtretragerne, samt for de tre alternativene for hva som blir gjort med limtreet når terminalbygningen rives. Forskjellen mellom mest sannsynlige og laveste/høyeste estimat er også vist i prosent. Variasjonsområdet man kommer fram til med denne metoden, beskriver utfallsrommet mellom lavest mulige og høyest mulige klimagassutslipp. Alle avvikene er mindre eller lik det mest sannsynlige utslippet, eller sagt på en annen måte, usikkerheten i klimagassutslipp er for alle trinn i livsløpet mindre eller lik 100%.

Tabell 5. Følsomhetsanalyse for utslipp av klimagasser fra framstilling av limtretragerne\*.

Forutsetning	Reell variasjon i forutsetning			Variasjon i forutsetning i prosent		Endring i resultat i prosent		Endring i resultat i prosent når forutsetning endres med ±10%	
	min	basis	max	min	max	min	max	-10%	+10%
Andel avv, med hogstmaskin og lassbærer	0	0,4	1	-100	150		1	-	-
Andel avv, med motorsag og lassbærer	0	0,3	1	-100	233	-5		-	-
Andel avv, med motorsag og traktor	0	0,3	1	-100	233		3	-	-
Transportavstand inn til sagbruk i km	10	50	100	-80	100	-8	10	-1	1
Dieselforbruk i liter/km	0,35	0,45	0,55	-22	22	-8	8	-3	3
Nyttelast i tonn	25	27,5	30	-9	9	3	-3	4	-3
Barkvolumprosent	8	11,5	15	-30	30	-4	4	-1	1
Brennverdi bark i kWh/fm <sup>3</sup>	720	1395	2070	-48	48	-5	5	-1	1
Dieselforbruk på sagbruk i liter/m <sup>3</sup> trelast	1,0	2,3	3,2	-57	39	-10	7	-2	2
Returlass	nei	halvt	ja			-8	8	-2	2
Forbruk av trelast per m <sup>3</sup> ferdig limtre	1,3	1,35	1,4	-4	4	0	4	-6	6
Dieselforbruk i kWh/m <sup>3</sup> ferdig limtre	0	4	11	-100	175	-3	5	0	0
Andel trelast intern brensel i limtreprod.	0,04	0,09	0,16	-56	78	-2	3	0	0
Limforbruk per m <sup>3</sup> limtre i kg	8	10	13	-20	30	-2	4	-1	1
Forbruk av plast per m <sup>3</sup> limtre i kg	0,5	1,7	2,9	-71	71	-3	3	0	0
m <sup>3</sup> limtre per m <sup>2</sup> takflate	0,13	0,14	0,15	-7	7	-7	7	-10	10

\*En og en forutsetning er endret fra basisverdi til henholdsvis minimums- og maksimumsverdi og den prosentvise endringen i resultatet er beregnet. Forutsetninger som ga endring mindre enn 1% er utelatt i tabellen. Fullstendig følsomhetsanalyse er vist i vedlegg 4.

Tabell 6. Oversikt over variasjonsområdet for klimagassutslipp for framstilling og ulike alternativ for avfallsbehandling for limtre per m<sup>2</sup> takflate.

År		Klimagassutslipp i kg CO <sub>2</sub> -ekvivalenter			Endring i resultat i prosent
		Laveste estimat	Mest sannsynlige estimat	Laveste estimat	
0	Framstilling	3	7	12	-49 77
50	Energi fra limtre substituerer olje	-97	-54	-27	-80 52
	Energi fra limtre subst. olje og vannkraft	-27	-15	-7	-80 53
	Limtre deponeres	96	150	213	-30 30

En siste følsomhetsanalyse går ut på å øke/reducere alle forutsetninger med 10%. På denne måten får man et uttrykk for hvor følsomt det samlede resultatet er for usikkerhet i datamaterialet. Disse endringene er vist i tabell 7. Resultatene viser at både en økning av alle forutsetninger og en reduksjon av alle forutsetninger på 10% gir endring i resultatet større enn 10%. En økning i alle forutsetninger gir ikke samme prosentvise utslag som en tilsvarende reduksjon.

Tabell 7. Prosentvis endring i klimagassutslipp av at alle forutsetninger økes/reduceres med 10%.

År		Prosentvis endring i resultat når alle forutsetninger reduseres med 10%	Prosentvis endring i resultat når alle forutsetninger økes med 10%
		0	Framstilling
50	Energi fra limtre substituerer olje	-19	21
	Energi fra limtre subst. olje og vannkraft	-18	19
	Limtre deponeres	-27	33

#### Diskonterte klimagassutslipp (DK)

I det følgende brukes benevnelsen DK for diskonterte klimagassutslipp. Tabell 8 viser DK over livsløpet til limtre med ulike scenarier for avfallshåndtering og rentekrav, beregnet som vist i likning (1) i kap.2.1. Negativt tall betyr at klimagassutslipp unngås. Forskjellen mellom de ulike avfallshåndteringene er størst med lavt rentekrav for så å konvergere med økende rentekrav. DK i alternativet der energien fra limtreet utnyttes til å erstatte olje, er negativ ved lavt rentekrav for så å øke med økende rentekrav. Der energien fra limtreet erstatter vannkraft og olje etter dagens fordeling øker også summen med økende rentekrav, men økningen er ikke så stor. For alternativet der limtreet deponeres er DK høye ved lav rentefot men avtar med økende rentefot. Se også figur 7 som viser klimagassutslipp over livsløpet.

Tabell 8. Diskonterte klimagassutslipp (DK) over livsløpet til limtre med ulike avfallshåndteringer og rentekrav.

Avfallshåndtering	Rentefot	Diskonterte klimagassutslipp i kg CO <sub>2</sub> -ekvivalenter per m <sup>2</sup> takflate				
		0%	2%	4%	6%	8%
Energi fra limtre substituerer olje (A1)		-47	-10	3	8	10
Energi fra limtre substituerer olje og vannkraft (A2)		-8	4	8	10	11
Limtre deponeres (A3)		157	126	61	31	19

*Endring i diskonterte klimagassutslipp (DK) av å regne med skogarealet i analysen*

Figur 9 tilsvarer figur 7, bortsett fra at CO<sub>2</sub> som bindes på skogarealet som ble frigitt da tømmeret til limtre dragerne ble hogd, er tatt med. Denne bindingen utgjør 2,4 kg per år og vises så vidt som en strek under x-aksen. Avfallsbehandling 1 er forbrenning der energien erstatter olje. Avfallsbehandling 2 er forbrenning der energien erstatter 70% vannkraft og 30% olje. Avfallsbehandling 3 er deponering. Beregning av CO<sub>2</sub>-ekvivalenter er gjort ut i fra verdier for DGWP, diskontert globalt oppvarmingspotensial, ved 0% diskonteringsrente. Utslipp fra forbrenning skjer momentant mens utslipp fra nedbrytning og binding skjer gradvis og over flere år.

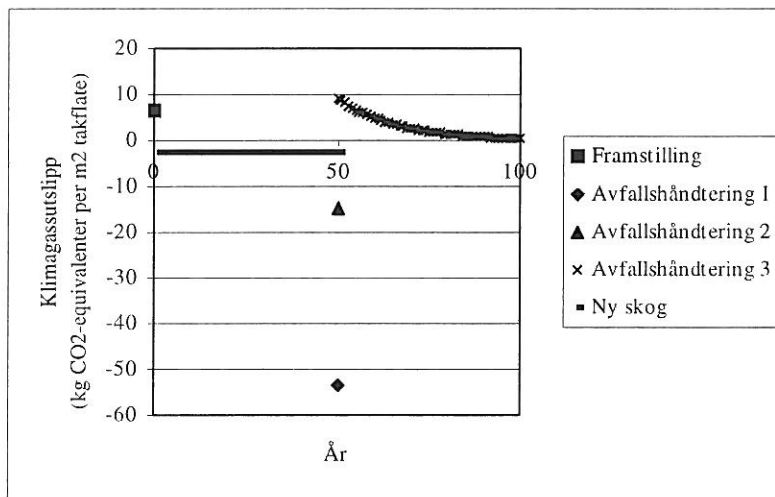


Fig.9. Klimagassutslipp over livsløpet til limtre når skogen som vokser opp på arealet som frigjøres når tømmeret til limtre dragerne ble hogd, regnes med.

Avfallsbehandling 1 er forbrenning der energien erstatter olje.

Avfallsbehandling 2 er forbrenning der energien erstatter 70% vannkraft og 30% olje. Avfallsbehandling 3 er deponering. Beregning av CO<sub>2</sub>-ekvivalenter er gjort ut i fra verdier for DGWP (diskontert globalt oppvarmingspotensial) ved 0% diskonteringsrente, jmf. vedlegg 1. Utslipp fra forbrenning skjer momentant mens utslipp fra nedbrytning skjer gradvis og over flere år.

Tabell 9 viser DK over livsløpet til limtre ved de tre ulike alternativene for avfallshåndtering, når karbonbindingen på det frigitte skogarealet regnes med. Hvis man sammenligner med tabell 8 ser man at både forholdet mellom de ulike avfallshåndteringene og forandringen i DK med ulike rentekrav er like. Men

størrelsen på utslippene er betydelig lavere når karbonbindingen i skogen regnes med.

Tabell 9. Diskonterte klimagassutslipp (DK) over livsløpet til limtre for ulike avfallshåndteringer og rentekrav når karbonbinding på det frigitte skogarealet regnes med.

Avfallshåndtering	Rentefot	Diskonterte klimagassutslipp i kg CO <sub>2</sub> -ekvivalenter per m <sup>2</sup> takflate				
		0%	2%	4%	6%	8%
Energi fra limtre substituerer olje (A1)		-168	-87	-49	-30	-20
Energi fra limtre substituerer vannkraft og olje (A2)		-129	-72	-44	-28	-19
Limtre deponeres (A3)		35	50	9	-8	-11

### 3.1.2 Stål

#### 3.1.2.1 Energiforbruk

Som vi ser av figur 10, er det mer energikrevende å framstille stål fra malm enn delvis fra skrap. En stor andel av energien er fra fossilt brensel, blant annet brukes kull som reduksjonsagent i selve stålproduksjonen. I år 50 vil det verken forbrukes eller spares energi hvis stålet i bærebjelkene erstatter annet skrapjern i produksjonen av nytt stål. Erstatte det derimot malm, spares mye energi for malmbasert produksjon er mye mer energikrevende enn skrapjernbasert. Det brukes ikke noe bioenergi i noen av alternativene for stål.

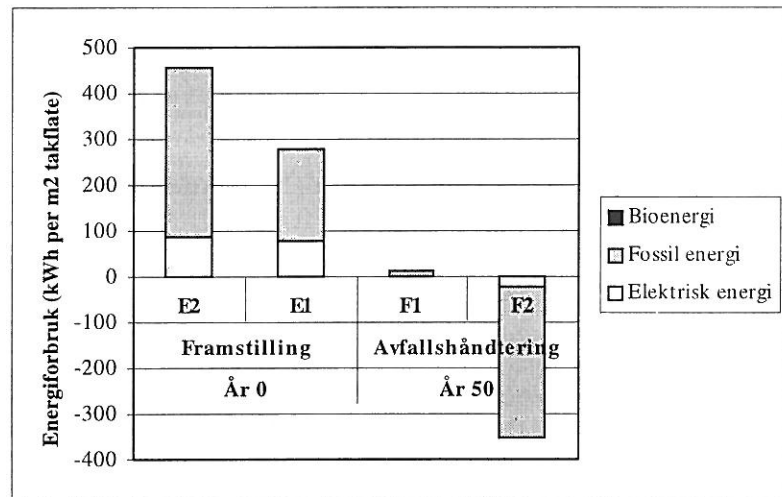


Fig.10. Energiforbruk over livsløpet til stål. Alternativ E2 og E1 for framstilling i år 0 refererer til at stålet er produsert fra henholdsvis 100% malm og 50% malm. Alternativ F1 og F2 i år 50 er at skrapjernet erstatter annet skrapjern, eller at skrapjernet erstatter malm.

#### Følsomhetsanalyse

Det er ikke foretatt noen følsomhetsanalyse for energiforbruk i den litteraturen vi har hatt tilgjengelig om stålproduksjon.

### 3.1.2.2 Klimagassutslipp

Figur 11 viser klimagassutslipp over livsløpet til stål i bærebjelker i terminalbygningen på Gardermoen. Bildet er det samme som for energiforbruk, fordi det er forbruk av fossil energi som er opphav til klimagassutslipp. Av figur 10 går det fram at mesteparten av energien er fra fossilt brensel.

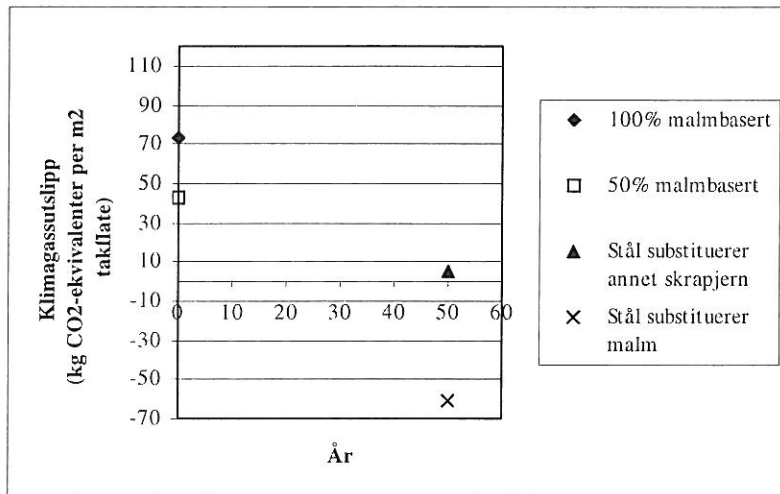


Fig.11. Klimagassutslipp over livsløpet til stål. CO<sub>2</sub>-ekvivalenter er i figuren beregnet med diskontert globalt oppvarmingspotensial på 0%.

#### Følsomhetsanalyse

Det er ikke foretatt noen følsomhetsanalyse for klimagassutslipp i den litteraturen vi har hatt tilgjengelig om stålproduksjon.

#### Diskonterte klimagassutslipp (DK) over livsløpet til stål

Tabell 10 viser DK over livsløpet til stål med ulike forutsetninger for framstilling og avfallshåndtering, samt ulike rentekrav. I scenariene hvor produksjonen er 100% malmbasert ser man av tabellen at DK over livsløpet er høyere enn der produksjonen er 50% malmbasert. Forskjellen mellom de ulike avfallshåndteringene er stor med lave rentekrav, for så å konvergere med økende rentekrav.

Tabell 10. Diskonterte klimagassutslipp (DK) over livsløpet til stål med ulike forutsetninger for framstilling, avfallshåndtering og rentekrav.

Framstilling	Avfallshåndtering	Diskonterte klimagassutslipp i kg CO <sub>2</sub> -ekvivalenter per m <sup>2</sup> takflate				
		Rentekrav				
		0%	2%	4%	6%	8%
100% malmbasert (E2)	Stål erstatter skrapjern (F1)	80	85	88	91	93
100% malmbasert (E2)	Stål erstatter malm (F2)	14	56	74	82	86
50% malmbasert (E1)	Stål erstatter skrapjern (F1)	49	52	54	55	56
50% malmbasert (E1)	Stål erstatter malm (F2)	-16	23	39	46	49

#### Elektrisitetsproduksjon fra kull

Tabell 11 viser DK over livsløpet til stål dersom elektrisiteten kom fra kull. Som ventet blir DK høyere med denne forutsetningen enn hva den var i tabell 10. DK øker med om lag 20 kg i alle alternativ. Ellers er mønsteret det samme som i tabell 10.

Tabell 11. Diskonterte klimagassutslipp (DK) over livsløpet til stål med ulike forutsetninger for framstilling, avfallshåndtering og rentekrav når elektrisiteten er forutsatt å komme fra kullfyrte kraftverk.

Framstilling	Avfallshåndtering	Diskonterte klimagassutslipp i kg CO <sub>2</sub> -ekvivalenter per m <sup>2</sup> takflate				
		Rentekrav				
		0%	2%	4%	6%	8%
100% malmbasert (E2)	Stål erstatter skrapjern (F1)	106	108	110	112	114
100% malmbasert (E2)	Stål erstatter malm (F2)	34	80	99	108	112
50% malmbasert (E1)	Stål erstatter skrapjern (F1)	73	72	73	74	74
50% malmbasert (E1)	Stål erstatter malm (F2)	1	44	61	69	73

### 3.2 Kostnadseffektivitetsanalyser

#### 3.2.1 Kontantstrømmer i basis-scenariet

Figur 12 viser en sammenligning av energiforbruket over livsløpet til limtre og stål i basis-scenariet. Det trengs om lag dobbelt så mye energi til framstilling av stål som til framstilling av limtre. I år 50 kan mye energi spares ved å utnytte energien i limtreet. Stål forårsaker på den andre siden et lite energiforbruk på grunn av transport til stedet for omsmelting.

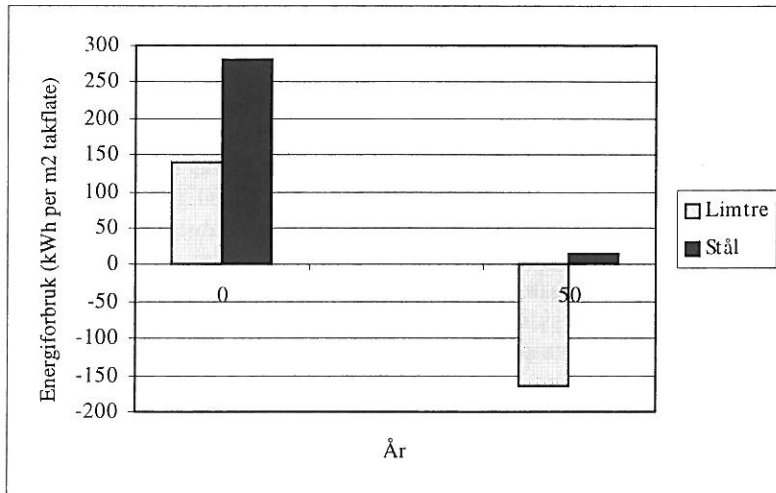


Fig.12. Energiforbruk over livsløpet til limtre og stål i basis-scenariet.

Figur 13 viser at stål gir 5 ganger større klimagassutslipp enn limtre i år 0. Klimagassutslippet fra limtre i år 50 er i figur 13 negativt. Det skyldes at når limtreet brukes som brensel, og energien delvis erstatter energi fra olje, spares klimagassutslipp fra forbrenning av olje. Klimagassutslippet fra stål i år 50 kommer fra transport til stedet skrapjern smeltes om til armeringsjern.

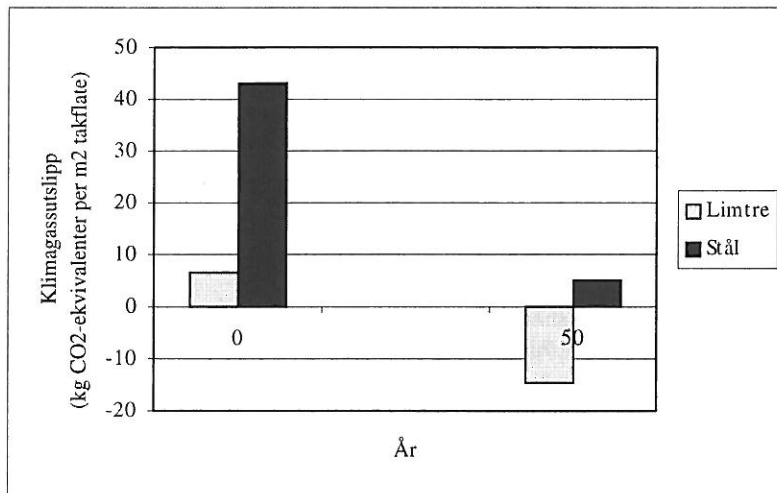


Fig.13. Klimagassutslipp over livsløpet for bærebjelke i henholdsvis limtre og stål i basisalternativet. CO<sub>2</sub>-ekvivalenter er i figuren beregnet med diskontert globalt oppvarmingspotensial på 0%.

En løsning i stål ville kostet om lag 1136 kroner per m<sup>2</sup> takflate ferdig bygd (Reinertsen Engineering AS 1994). I basisalternativet er det valgt å undersøke et

tilfelle hvor en konstruksjon i limtre ville være 1% dyrere, det vil si 11 kroner dyrere per m<sup>2</sup> takflate.

### 3.2.2 Sparte klimagassutslipp på grunn av substitusjon

Tabell 12 viser sparte klimagassutslipp (differanse i DK) når limtre substituerer stål i bærebjelkene i terminalbygningen på Gardermoen. I basis-scenariet er sparte utslipp fra 45-57 kg per m<sup>2</sup> takflate avhengig av rentekrav. Sammenlignet med basis-scenariet øker differansen i DK når energien i limtreet substituerer olje og karbonbinding i ny skog inkluderes. Sparte klimagassutslipp øker også når framstillingen av stål er 100% malmbasert eller hvis kullbasert elektrisitet brukes i framstillingen. På den andre siden reduseres differansen i DK hvis limtreet deponeres eller hvis stålet substituerer malm etter bruk. Negativt tall vil si at stål er et bedre alternativ enn limtre. Om laveste eller høyeste estimat for framstilling og avfallshåndtering av limtre benyttes i stedet for det mest sannsynlige estimatet gir ikke dette særlig utslag. Hvis verdiene for diskontert globalt oppvarmingspotensiale for 0% brukes i alle alternativ, forandres heller ikke resultatet vesentlig.

Tabell 12. Sparte klimagassutslipp ved substitusjon mellom stål og limtre (kg diskonterte CO<sub>2</sub>-ekvivalenter per m<sup>2</sup> takflate). Forutsetninger i basis-scenariet er endret en for en.

Endring fra basis-scenarie		Sparte klimagassutslipp (kg diskonterte CO <sub>2</sub> -ekvivalenter per m <sup>2</sup> takflate)				
		Rentefot p.a.				
		0%	2%	4%	6%	8%
	Basis-scenarie	57	48	45	45	45
A1	Energi fra limtre substituerer olje	96	62	51	47	46
A3	Limtre blir deponert	-107	-74	-7	24	37
E2	Framstilling av stål 100% malmbasert	88	81	80	81	82
F2	Stålskrap substituerer malm i år 50	-8	19	31	36	39
D2	Karbonbinding i ny skog inkludert	179	124	98	83	75
G2	Kullbasert elektrisitet i stålproduksjon	81	68	65	64	64
B1	Limtre, laveste estimat framstilling	61	52	51	51	51
B3	Limtre, høyeste estimat framstilling	52	41	37	36	35
C1	Limtre, laveste estimat avfallshåndtering	70	52	47	46	45
C3	Limtre, høyeste estimat avfallshåndtering	50	46	45	45	45
H2	DGWP 0% i alle forutsetninger	57	48	45	43	43

### 3.2.3 Pris på sparte klimagassutslipp

Tabell 13 viser prisen på sparte klimagassutslipp ved substitusjon mellom limtre og stål når det er forutsatt at limtre er 1% dyrere enn stål. Basis-scenariet er vist først, deretter resultater når forutsetningene i basis-scenariet er endret en for en. Ellers følger resultatene i tabell 13 det samme mønsteret som i tabell 12.



Tabell 13. Pris per tonn sparte klimagassutslipp (NOK per tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter).  
Forutsetninger i basis-scenariet er endret en for en.

Endring fra basis- scenarie		Pris på sparte klimagassutslipp (NOK per tonn CO <sub>2</sub> -ekvivalenter)				
		Rentefot p.a.				
		0%	2%	4%	6%	8%
	<b>Basis-scenarie</b>	198	238	250	252	252
A1	Energi fra limtre substituerer olje	118	182	223	241	247
A3	Limtre blir deponert	-106	-153	-1539	466	305
E2	Framstilling av stål 100% malmbasert	129	141	142	140	139
F2	Stålskrap substituerer malm	-1395	613	368	313	294
D2	Karbonbinding i ny skog inkludert	64	92	116	136	152
G2	Kullbasert elektrisitet i stålproduksjon	141	167	176	178	179
B1	Limtre, laveste estimat framstilling	187	218	224	224	222
B3	Limtre, høyeste estimat framstilling	217	279	306	318	323
C1	Limtre, laveste estimat avfallshåndtering	163	219	242	249	251
C3	Limtre, høyeste estimat avfallshåndtering	228	250	254	253	252
H2	DGWP 0% i alle forutsetninger	198	236	254	261	264

### 3.2.4 Maksimal prisforskjell sammenlignet med CO<sub>2</sub>-avgiften på bensin

I tabell 14 er det beregnet hvor mye dyrere enn stål limtre kan være før prisen på sparte utslipp blir lik den norske CO<sub>2</sub>-avgiften på bensin, 406 kr per tonn CO<sub>2</sub> (MD 2000). Som det går fram av tabellen kan ikke limtre være mer enn noen prosent dyrere før prisen på å spare klimagassutslipp ved denne substitusjonen blir høyere enn bensinavgiften. Endringene for ulike rentekrav og forutsetninger følger samme mønster som differansen i DK mellom limtre og stål i tabell 12 og prisen på sparte klimagassutslipp i tabell 13.

Tabell 14. Maksimal prisforskjell mellom stål og limtre (i prosent), før prisen på sparte utslipp blir lik CO<sub>2</sub>-avgiften på bensin. Forutsetninger i basis-scenariet er endret en for en.

Endring fra basis-scenarie		Maksimal prisforskjell i prosent				
		Rentefot p.a.				
		0%	2%	4%	6%	8%
	Basis-scenarie	2	2	2	2	2
A1	Energi fra limtre substituerer olje	3	2	2	2	2
A3	Limtre blir deponert	-4	-3	0	1	1
E2	Framstilling av stål 100% malmbasert	3	3	3	3	3
F2	Stålskrapp substituerer malm	0	1	1	1	1
D2	Karbonbinding i ny skog inkludert	6	4	3	3	3
G2	Kullbasert elektrisitet i stålproduksjon	3	2	2	2	2
B1	Limtre, laveste estimat framstilling	2	2	2	2	2
B3	Limtre, høyeste estimat framstilling	2	1	1	1	1
C1	Limtre, laveste estimat avfallshåndtering	2	2	2	2	2
C3	Limtre, høyeste estimat avfallshåndtering	2	2	2	2	2
H2	DGWP 0% i alle forutsetninger	2	2	2	2	2

### 3.2.5 Tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter spart per m<sup>3</sup> trelast til limtreproduksjon

Tabell 15 viser hvor mange tonn diskonterte CO<sub>2</sub>-ekvivalenter som spares ved substitusjonen per m<sup>3</sup> trelast som går til limtreproduksjon. I basis-scenariet spares 0,245-0,312 tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter avhengig av valg av rentefot. Ellers varierer besparelsen fra å være negativ, det vil si at stål er et bedre alternativ, til 0,971 tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter.

Tabell 15. Differanse i diskonterte klimagassutslipp (DK) mellom stål og limtre per m<sup>3</sup> trelast som går inn i limtreproduksjon. Vist for basis-scenariet, og for ulike avvik fra basis-scenariet.

Endring fra basis-scenarie		Antall tonn CO <sub>2</sub> -ekvivalenter spart per m <sup>3</sup> trelast som går inn i produksjon av limtrebjelker				
		Rentefot				
		0%	2%	4%	6%	8%
	Basis-scenarie	0,312	0,260	0,247	0,245	0,245
A1	Energi fra limtre substituerer olje	0,523	0,339	0,277	0,256	0,250
A3	Limtre blir deponert	-0,583	-0,404	-0,040	0,132	0,202
E2	Framstilling av stål 100% malmbasert	0,477	0,438	0,435	0,439	0,444
F2	Stålskrapp substituerer malm	-0,044	0,101	0,168	0,197	0,210
D2	Karbonbinding i ny skog inkludert	0,971	0,674	0,530	0,452	0,406
G2	Kullbasert elektrisitet i stålproduksjon	0,438	0,369	0,350	0,346	0,345
B1	Limtre, laveste estimat framstilling	0,329	0,283	0,275	0,275	0,278
B3	Limtre, høyeste estimat framstilling	0,284	0,221	0,202	0,194	0,191
C1	Limtre, laveste estimat avfallshåndtering	0,378	0,281	0,254	0,247	0,246
C3	Limtre, høyeste estimat avfallshåndtering	0,270	0,247	0,243	0,243	0,245
H2	DGWP 0% i alle forutsetninger	0,312	0,261	0,243	0,236	0,233

## 4 Diskusjon

### 4.1 Energiforbruk og klimagassutslipp over livsløpet

#### 4.1.1 Limtre

##### Energiforbruk

I denne undersøkelsen er samlet energiforbruk til framstilling av 1 m<sup>3</sup> limtre 997 kWh. Mørkved & Opdal (1990) kom fram til et resultat på 1053 kWh/m<sup>3</sup>, Björklund & Tillman (1997) brukte 778 kWh/m<sup>3</sup> (fra Träteck) og NTI (1997a) kom fram til 860 kWh/m<sup>3</sup> limtre. Størrelsesorden på resultatet for energiforbruk i denne undersøkelsen stemmer derfor overens med tidligere undersøkelser.

Som man kan se av figur 4 er over halvparten av energien som brukes til å framstille limtre bioenergi. Ved å brenne limtreet og utnytte energien kan man spare mye energi, mer enn det som trengs til framstilling. Man skulle tro at man sparte samme energimengde ved forbrenning uansett hvilken energibærer limtreet substituerer. Figur 4 viser at man sparer mer energi når energien i limtreet erstatter kun olje enn når 70% erstatter vannkraft og 30% erstatter olje. Dette skyldes at det er den effektive energien som er beregnet, det vil si at varmetapet er inkludert. For olje og trevirke er det regnet med et varmetap, men ikke for vannkraft. Derfor vil det spares mer energi når energien fra limtreet erstatter olje enn når den erstatter vannkraft. Ved deponering forbrukes litt energi til drift av maskiner. Sammenlignet med de to alternative avfallshåndteringene der energien i limtreet utnyttet er deponering helt klart et dårlig alternativ.

Figur 5 viser at 63% av energien til framstilling av limtre brukes på sagbruket. Dette skyldes at tørking av trelast er en energikrevende prosess. Ellers går det fram av figur 5 at det var riktig å ta med precombustion siden den utgjør mer enn 1%.

##### Følsomhetsanalyser

Det er usikkerheten i brennverdien til bark og mengden bark som blir innfyrt som gir størst endring i resultatet. Dette er realistisk fordi det er kjent at det er stor usikkerhet knyttet til barkfyringsanleggene på sagbrukene. Det samme gjelder for innfyrt mengde i flisfyringsanlegget på limtrefabrikken. Ellers er det ingen av forutsetningene som gir stor endring i resultatet. Forskjellen mellom laveste, mest sannsynlige og høyeste estimat er både for framstilling og alle avfallshåndteringene mindre enn 100%.

Når alle forutsetningene økes med 10% endres resultatet mer enn 10%. Det samme gjelder når alle forutsetninger reduseres med 10%. Endringen er større når alle forutsetningene økes med 10% enn når de reduseres med 10%. Dette kommer av at enkelte av sammenhengene i kalkylen ikke er lineære. Dette kommer også fram i den første følsomhetsanalysen der en og en forutsetning er endret hver for seg.

Både barkvolumprosent og forbruk av trelast per m<sup>3</sup> ferdig limtre gir større endring i resultat når de økes enn når de reduseres med samme verdi. Barkvolumprosenten brukes til å beregne årlig produksjon på sagbrukene målt i tømmer med bark. Denne sammenhengen er ikke lineær. Siden årlig produksjon i tømmer med bark videre brukes til å beregne forbruk av bioenergi per m<sup>3</sup> trelast, endres resultatet mer når barkvolumprosenten økes enn når den reduseres.

### **Klimagassutslipp**

I denne undersøkelsen er utslipp av klimagassene CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> og N<sub>2</sub>O fra framstilling av 1 m<sup>3</sup> limtre 47 kg CO<sub>2</sub>-ekvivalenter (med DGWP på 0%). I Björklund & Tillman (1997) har de brukt tall fra Trätek på 41 kg CO<sub>2</sub> per m<sup>3</sup> limtre. NTI (1997a) fant at utslippet av CO<sub>2</sub> fra sagbruk og limtrefabrikk var 9 kg/m<sup>3</sup>, noe som stemmer godt med resultatet fra denne undersøkelsen.

Framstilling av limtre forårsaker små klimagassutslipp. Men avfallshåndteringa kan enten gi store utslipp eller store besparelser. På deponier vil karbonet i treet omdannes til CH<sub>4</sub> på grunn av oksygenunderskudd. CH<sub>4</sub> er en sterkere drivhusgass enn CO<sub>2</sub>. Utslippene av CH<sub>4</sub> er høyest de første årene for så å avta ettersom mengden karbon blir mindre. Størrelsen på dette utslippet er stor i forhold til utslippet fra framstillingen.

De to alternativene for avfallshåndtering der limtre blir brent og energien brukt til å substituere annen energi, bidrar begge til å redusere klimagassutslippene. Netto klimagassutslipp unngås i disse to alternativene. Hvor stor mengde drivhusgasser som spares, avhenger av hvor mye olje som substitueres. Forbrenning av olje forårsaker klimagassutslipp, mens vannkraft ikke har noen effekt i klimasammenheng.

Hvis man ser på hvordan de ulike trinnene i framstillingen av limtre bidrar til klimagassutslippene, så er utslippene mye jevnere fordelt på hvert trinn enn hva som er tilfelle for energiforbruk. Transport står for en tredjedel av klimagassutslippene. Dette skyldes klimagassutslipp fra diesel. Produksjonen av trelast forårsaker omtrent like store utslipp. Her er utslippet delvis CH<sub>4</sub> fra barkfyringsanlegget og klimagassutslipp fra bruk av diesel til intern transport. Precombustion, det vil si utvinning av olje og raffinering av diesel, utgjør 3% av klimagassutslippet fra framstilling, det er derfor klart at dette leddet bør være med i en slik analyse.

### *Følsomhetsanalyser*

Flere forutsetninger knyttet til transport gir en endring i resultat på 8-10%. Dette henger sammen med at transport står for en tredjedel av samlet klimagassutslipp fra framstilling. Likeledes gir dieselforbruk på sagbruket opp til 10% endring i resultatet. Sammenlignet med den prosentvise variasjonen i forutsetningene er endringene i resultatet små.

Når alle forutsetninger reduseres med 10%, reduseres resultatet mer enn 10% fordi de fleste av faktorene virker i samme retning. Det samme gjelder når alle forutsetninger økes med 10%. For trinnet framstilling, og alle alternativene for avfallshåndtering, endres resultatet mer når alle forutsetningene økes med 10% enn når de reduseres med 10%. Dette skyldes ikke-lineære sammenhenger i kalkylen.

### *Diskonterte klimagassutslipp (DK)*

I det følgende brukes DK for diskonterte klimagassutslipp. I scenariet hvor limtreet deponeres er som ventet DK høy ved lavt rentekrav. Den avtar med økende rentekrav siden klimagassutslippet fra deponeringen tillegges lavere verdi etter hvert som utslipp i framtida tillegges mindre vekt.

Scenariet der energi fra limtreet erstatter vannkraft og olje er jevnt i DK, men øker svakt fra å være negativt til å bli positivt når rentefoten øker. Siden man sparer klimagassutslipp når limtreet forbrennes og energien delvis erstatter olje i år 50, er

det som forventet at DK øker svakt når denne fordelen tillegges mindre vekt. De tre alternativene for avfallshåndtering konvergerer med økende rentekrav fordi utslipp fra avfallshåndtering tillegges mindre vekt og det bare er dagens utslipp som har betydning.

DK er negativ med rentekrav på 0 og 2% når energien i limtreet brukes til å erstatte olje. Dette er fordi klimagassutslipp fra forbrenning av olje spares på denne måten. DK er veldig høy ved lave rentekrav når limtreet deponeres på grunn av CH<sub>4</sub>-utslippene fra nedbrytningen av virket.

For alternativet der 70% av energien fra limtreet erstatter vannkraft og 30% erstatter olje, øker DK litt med økende rentekrav. Sparte utslipp fra forbrenning av olje er mindre i dette alternativet, siden vannkraft ikke forårsaker klimagassutslipp. Avfallshåndteringen gir derfor ikke så stort utslag.

Fra figur 7 går det fram at klimagassutslipp fra framstilling av limtre er 7 kg per m<sup>2</sup> takflate, beregnet med diskontert globalt oppvarmingspotensial for 0%. For 4, 6 og 8% rentekrav ser vi i tabell 8 at DK i alternativet der energien i limtreet erstatter vannkraft og olje er høyere enn dette. Siden man sparer en viss mengde klimagassutslipp med denne avfallshåndteringen, skulle man vente at DK konvergerer mot utslippet fra framstilling med økende rentekrav. Det at DK for høye rentekrav er høyere enn utslippet fra framstilling, skyldes vektingsfaktorene brukt til å beregne CO<sub>2</sub>-ekvivalenter. I denne analysen er det brukt diskontert globalt oppvarmingspotensial til dette formålet. Disse vektingsfaktorene øker med økende rentekrav (se vedlegg 1). Det vil si at utslipp av CH<sub>4</sub> og N<sub>2</sub>O får større betydning i forhold til utslipp av CO<sub>2</sub> etter hvert som rentekravet øker. I analysen betyr dette at antall CO<sub>2</sub>-ekvivalenter beregnet fra utslipp av de tre gassene øker med økende rentekrav.

*Endring i diskonterte klimagassutslipp (DK) av å regne med skogarealet i analysen*  
Karbonbindingen på skogarealet som ble frigitt da tømmeret til limtredragerne ble hogd, er liten det enkelte år, men høy samlet sett. Dette vises godt, særlig for lave rentekrav. Ved 0% rentekrav vektlegges alle år likt og all karbonbinding regnes med. Etersom rentekravet økes får karbonbinding fram i tid mindre betydning og den diskonterte verdien av bindinga går ned.

I de to alternativene hvor limtreet forbrennes og energien erstatter annen energi (A1 og A2) sparer man klimagassutslipp ved alle rentekrav. Det vil si at å bruke limtre fjerner klimagasser fra atmosfæren hvis limtreet blir brukt som brensel etter at bygningen rives, uansett hvordan man verdsetter klimagassutslipp i dag i forhold til utslipp i framtida. Alternativet der limtreet deponeres etter bruk har også mye lavere DK når karbonbindingen i skogen regnes med. Et avvik fra tabell 8 i alternativet hvor limtreet deponeres, er at DK over livsløpet er høyere med et rentekrav på 2% enn med et rentekrav på 0%. Dette kommer av at med et rentekrav på 2% avtar den diskonterte verdien av karbonbindingen i skogen mer enn den diskonterte verdien av klimagassutslippene fra deponeringen.

#### 4.1.2 Stål

Energiforbruket fra 100% malmbasert produksjon er mye høyere enn når 50% av stålet er fra malmbasert produksjon og 50% er fra stålbasert produksjon. Spesielt er andelen fossil energi større, noe som skyldes at kull brukes som reduksjonsagent i

malmbasert produksjon. Av samme grunn spares mye fossil energi ved å substituere malm med skrapjern i år 50. Klimagassutslippene forårsakes av bruk av fossil energi og følger derfor det samme mønsteret.

Det viste seg å være vanskelig å finne ut om stålkonstruksjonen ville vært av en type stål som blir framstilt av malm eller en type som kan framstilles av skrapjern. Likevel har vi fått en god oversikt over variasjonsområdet i energiforbruk og klimagassutslipp over livsløpet til stål i denne analysen.

#### *Diskonterte klimagassutslipp (DK) over livsløpet til stål*

DK fra 100% malmbasert produksjon er høyere enn for 50% malmbasert produksjon fordi å produsere stål fra malm forårsaker større klimagassutslipp enn å produsere stål fra skrapjern.

Scenariene hvor stålet går inn og erstatter malm i år 50, skiller seg fra scenariene der skrapjernet erstatter annet skrapjern ved at de øker mer med økende rentekrav. Når skrapjernet erstatter malm, spares store utslipp fordi malmbasert produksjon gir større klimagassutslipp enn skrapjernbasert stålproduksjon. Ved lave rentekrav vektlegges dette sparte utslippet høyere enn ved høye rentekrav, der bare dagens utslipp har betydning. Derfor stiger DK etter hvert som rentekravet øker.

I scenariene hvor skrapjernet erstatter annet skrapjern er det et lite klimagassutslipp i år 50 (se fig.11). Derfor skulle man vente at DK over livsløpet økte svakt med økende rentekrav. DK øker med økende rentekrav, men økningen kan ikke bare forklares med klimagassutslippet fra avfallshåndteringen. Den skyldes også vektingsfaktorene brukt til å beregne CO<sub>2</sub>-ekvivalenter som øker med økende rentekrav.

Med et høyt rentekrav har eventuelle klimagassutslipp i år 50 liten betydning for DK over livsløpet, dette kommer klart fram i tabell 10 siden scenariene der forutsetningene for framstilling er like konvergerer mot samme verdi etter hvert som rentekravet økes.

#### *Elektrisitetsproduksjon fra kull*

Når elektrisitetsproduksjonen er forutsatt å være kullbasert, øker selvsagt DK fordi forbrenning av kull forårsaker klimagassutslipp. Endringene når forutsetningene endres, følger samme mønster som når det er sett bort fra klimagassutslipp fra elektrisitetsproduksjon.

## **4.2 Kostnadseffektivitetsanalyser**

### *Kontantstrømmer for basis-scenariet*

Som det går fram av figur 12, trengs det om lag dobbelt så mye energi til å framstille stål som til å framstille limtre. I tillegg vet vi at over halvparten av energien brukt til å framstille limtre, er bioenergi, mens det ikke brukes noe bioenergi i framstillingen av stål. Dette er med og forklarer hvorfor framstilling av limtre forårsaker mye mindre klimagassutslipp enn framstilling av stål. Den andre grunnen er at kull brukes som reduksjonsagent i stålproduksjon, slik at det avgis store CO<sub>2</sub>-utslipp til luft.

### *Sparte klimagassutslipp på grunn av substitusjon*

I basis-scenariet avtar differansen i DK mellom limtre og stål med økende rentekrav. Det er fordi avfallshåndteringen av stål forårsaker et lite nettoutslipp og avfallshåndteringen av limtre gir et negativt utslipp.

Når avfallshåndteringen av limtre forandres slik at all energien fra forbrenning substituerer olje, øker differansen i DK mellom limtre og stål. Hvis avfallshåndteringen endres til deponering, blir differansen negativ med rentekrav på 0, 2 og 4%. Det betyr at stål er et bedre alternativ enn limtre. Differansen er positiv med rentekrav på 6 og 8%, men er likevel lavere enn i basis-scenariet. Deponering er altså et dårlig alternativ for limtre. Det samme mønsteret vises når avfallshåndteringen av stål endres slik at skrapjernet erstatter malm i produksjonen av nytt stål. For alle endringer av avfallshåndtering konvergerer differansen i DK mot basis-scenariet med økende rentekrav fordi framtidige utslipp tillegges mindre vekt.

Dersom stål er produsert av 100% malm eller at elektrisiteten brukt i stålproduksjon er fra kull, skulle man forvente at differansen i DK minket med økende rentekrav, slik som i basis-scenariet, fordi endringen i utslipp er i år null. Av tabell 12 kan vi se at det bare er scenariet der elektrisiteten i stålproduksjon er kullbasert som har et slikt forløp. I scenariet der stålet er fra malmbasert produksjon øker differansen i DK med økende rentekrav. Dette skyldes at en del av klimagassutslippet fra malmbasert produksjon er metan, og vektingsfaktorene brukt til å beregne CO<sub>2</sub>-ekvivalenter øker med økende rentekrav.

Utslippsfaktorene fra kullbasert elektrisitetsproduksjon er norske og representerer sannsynligvis best tilgjengelige teknologi. Det er derfor mulig at denne faktoren er undervurdert i forhold til hva den vil være hos en vilkårlig produsent på verdensmarkedet.

Når karbonbinding i skog trekkes inn, blir det betydelig mer gunstig å bruke limtre med hensyn til netto klimagassutslipp. Selv om mengden CO<sub>2</sub> som fjernes fra atmosfæren ett år er liten, er den kumulative effekten stor i en periode på 50 år. Effekten er størst ved lave rentekrav. Da er flere av årene med karbonbinding tillagt vekt. Derfor synker differansen i klimagassutslipp mellom limtre og stål med økende rentekrav.

Når laveste og høyeste estimat for klimagassutslipp fra framstilling av limtre settes inn, forandres resultatet, men ikke på langt nær så mye som når forutsetningene om produksjon, systemgrenser og avfallshåndtering forandres. At DGWP, diskontert globalt oppvarmingspotensiale, for 0% brukes til å vekte klimagassene til CO<sub>2</sub>-ekvivalenter ved alle rentekrav har enda mindre betydning. Usikkerheten i klimagassutslipp over livsløpet har altså ingen stor innvirkning på resultatet.

### *Pris på sparte utslipp*

Kostnaden men å bruke limtre er konstant for alle forutsetninger, derfor er forandringene i differanse i klimagassutslipp og pris avhengig av ulike rentekrav og forutsetninger. Det framgår av tabell 13 at ved vår forutsetning om 1% høyere pris for limtre sammenlignet med stål, er prisen generelt høy sammenlignet med den norske CO<sub>2</sub>-avgiften på bensin (406 NOK per tonn CO<sub>2</sub>). Som forklart i kap.2.2.2. er prisforskjellen mellom limtre og stål 10-20% og kan slå begge veier avhengig av hvor kompliserte konstruksjonene er. Prisen på sparte klimagassutslipp ved å erstatte

stål med limtre trenger derfor ikke være høy. I terminalbygningen på Gardermoen var for eksempel limtre billigere enn stål.

Når avfallshåndteringen av limtre endres til deponering, skiller prisen seg ut for 4% rentekrav, se tabell 13. Med 0 og 2% rentekrav er prisen negativ for denne endringen fra basis-scenariet, det er den også med rentekrav på 4% men absoluttverdien er mye høyere. Med et rentekrav på 6 og 8% er prisen positiv. At prisen beregnet med et rentekrav på 4% skiller seg ut, skyldes at differansen i DK mellom limtre og stål er tilnærmet lik null. Prisen beregnes med likning (2) i kap. 2.1. Av denne likninga framgår at prisen blir svært høy når differansen i DK mellom limtre og stål er tilnærmet null.

I basis-scenariet forårsaker stål klimagassutslipp i år 50, mens man med limtre sparer utslipp. Med et rentekrav på 0% vektlegges det som skjer i framtida, og som altså er fordelaktig for limtre, like høyt som klimagassutslipp i dag. Derfor er prisen per tonn spart klimagassutslipp lavest med rentekrav på 0% i basis-scenariet.

Ved rentekrav 0% skiller scenariet der skrapjern erstatter malm i år 50 seg ut ved at prisen på sparte klimagassutslipp er negativ. Sparte utslipp fra å erstatte malm med skrapjern i år 50 er høyere enn utslippene fra framstilling. Derfor blir prisen per spart tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter negativ, det vil si at stål er et bedre alternativ enn limtre.

*Antall tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter som spares per m<sup>3</sup> trelast som går inn i limtreproduksjon*

Dette avhenger av rentefot og forutsetninger på samme måte som for differansen i DK mellom limtre og stål og pris per tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter.

## 5 Konklusjon

I terminalbygningen på Gardermoen ville framstillingen av bærebjelker i stål kreve dobbelt så mye energi som framstillingen av bjelker i limtre. Avfallshåndtering av begge materialene krever enten energi, eller gir energi. Forskjellen i energiforbruk i et livsløpsperspektiv avhenger derfor av hvordan materialene blir håndtert etter at bygningen rives.

Framstilling av limtre dragerne forårsaker en femtedel av klimagassutslippene framstilling av stål bjelker ville forårsaket. Denne forskjellen ville vært større dersom stålet kom fra malmbasert produksjon. Det brukes mye bioenergi i framstillingen av limtre, noe som er med og forklarer den store forskjellen i klimagassutslipp. Avfallshåndtering av limtre kan enten bidra til å unngå klimagassutslipp ved at limtreet brennes og energien erstatter olje, eller forårsake store klimagassutslipp i form av metan hvis det blir lagt på avfallsplass. Det siste alternativet er imidlertid ikke sannsynlig dersom det fortsatt drives en politikk for å motvirke utslipp av klimagasser.

Forutsetninger vedrørende systemgrenser til naturen, produksjon og avfallshåndtering har stor betydning for resultatet. De forutsetningene som har størst betydning er hvordan CO<sub>2</sub>-binding på det frigitte skogarealet behandles, avfallshåndtering av materialene og om stål er fra skrapjernsbasert eller malmbasert produksjon. Siden avfallshåndteringen har mye å si, er valg av diskonteringsrente viktig. Usikkerheten i datamaterialet betyr lite i forhold til disse forutsetningene.



Bærekonstruksjoner i limtre er vanligvis i området  $\pm 20\%$  av prisen for tilsvarende konstruksjoner i stål. Resultatene viser at limtre ikke kan være mer enn 1-6% dyrere enn stål før dette blir en dyr måte å spare klimagassutslipp på i forhold til dagens miljøavgift på bensin.

## English summary

Laminated wood or steel? Energy consumption, greenhouse gas emissions, and cost-efficiency

This article compares the use of glulam beams at the new airport outside Oslo with an alternative solution in steel in order to (1) make an inventory of greenhouse gas (GHG) emissions over the life-cycle of glulam and of steel, (2) calculate the avoided GHG emissions and the cost of the substitution, (3) analyse which factors have the strongest influence on the results.

The methodology used is life-cycle inventory combined with economic investment theory, the latter implying that both costs and GHG emissions are discounted. GHG emissions from manufacturing and future waste handling of the beams are quantified, while the emissions in connection with the actual building construction, use, and demolition are assumed equal for the two alternatives and thus not included in the analysis. Life-cycle inventory data for glulam are collected specifically for this study, while the corresponding data for steel are from previous literature. Compared to previous analyses of substitution between steel and glulam related to greenhouse gas emissions, this article brings in four new methodological elements: combining traditional life-cycle analysis with economic costs, considering explicitly the emissions' points in time, integrating the three GHGs CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O, and using DGWP (discounted global warming potential).

Functional unit is 1 m<sup>2</sup> roof area, and the life of the building is assumed to be 50 years. Quantified phases in the life cycle are manufacturing and waste handling, remaining phases like use and demolition are assumed equal for the two materials. Various system boundaries to nature, as well as assumptions about production and waste handling are analysed.

The total energy consumption in manufacturing of steel beams is 2-3 times higher and the use of fossil fuel 6-12 times higher than the manufacturing of glulam beams. Manufacturing of steel in the most likely scenario gives 5 times higher GHG emissions compared to manufacturing of glulam beams. Waste handling of glulam can either be very favourable or unfavourable compared to steel depending on the glulam being landfilled or burned for energy production. Another assumption that substantially affects the results over the life cycle, is carbon fixation on the forestland that is regenerated after harvesting. Origin and destination of steel are also important due to whether the production is scrap-based or ore-based, and which energy sources are used for producing the electricity consumed by the steel industry. The uncertainty in the inventory data for glulam do not influence the results much compared to changes in the main assumptions.

The glulam construction can not be more than 1-6% more expensive than steel before the price per ton avoided greenhouse gas emissions becomes high compared to the present Norwegian CO<sub>2</sub>-tax on gasoline. In the most likely scenario not including carbon fixation on forestland, 0.24-0.31 tons of GHG emission per m<sup>3</sup>

input of sawn wood in glulam production is avoided by using glulam instead of steel, whereas this figure increases to 0.40-0.97 tons per m<sup>3</sup> if carbon fixation on forestland is included. Using DGWP does not significantly influence the results of the analysis.

## 6 Litteratur

- Andersen, S. Ø. 1993: Livscyklus-baseret bygningsprojektering. Energi- og miljøanalysemodel, beregningsværktøj og database. SBI-Rapport 224. Statens Byggeforskningsinstitut.
- Axelsson, U., A. Jarnehammar, K.-O. Widell, P. Jernberg & G. Jansson 1999: Livscykelanalys av färg. Livscykelanalys av färger för användning inom områdena industriell behandling av trä, industriell behandling av metall och måleri. IVL Rapport B 1338-A. Institutet för Vatten- og Luftvårdsforskning.
- Björklund, T. & A.-M. Tillman 1997: LCA of Building Frame Structures. Environmental Impact over the Life Cycle of Wooden and Concrete Frames. Report 1997:2. Technical Environmental Planning. Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden.
- Björklund, T., Å. Jönsson & A.-M. Tillman 1996: LCA of Building Frame Structures. Environmental Impact over the Life Cycle of Concrete and Steel Frames. Report 1996:8. Technical Environmental Planning. Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden.
- Dyno Technology Centre 1999: Life Cycle Inventory S-199. Notat.
- ECON 1995: Klimamessige virkninger av økt bruk av trevirke. Rapport 342/95.
- Engberg, P. & E. Eriksson 1998: LCA av sliprar – en jämförande livscykelanalys av betong- og träsliper. 1998:2. CIT Ekologik. Chalmers Industriteknikk.
- Engelbertsson, T. 1997: Livscykelvärdering av alternativa takkonstruksjoner i bandyhall. Examensarbete 73, Stålbyggnad 1997. Kungliga tekniska högskolan, Institutionen för byggkonstruktion.
- Erlandsson, M. 1996: Methodology for Environmental Assessment of Wood-Based Products. General and specific questions related to the life cycle inventory. Rapport 1 96080 70. Träteck.
- Fitje, A. 1989: Tremåling. Landbruksforlaget.
- Fossdal, S. 1995: Energi- og miljøregnskap for bygg. Fremstilling av byggematerialer. Regnskap for boliger og kontorbygg. Byggeforsk. Norges byggeforskningsinstitut. Prosjektrapport 173-1995.
- Heje/Nygaard 1998: Norsk skoghåndbok.
- Hoen, H.F. & B. Solberg 1994: Potential and Economic Efficiency of Carbon Sequestration in Forest Biomass Through Silvicultural Management. Forest Science, Vol.40, No.3, pp.429-451.
- Holtskog, S. & K.Rypdal 1997: Energibruk og utslipp til luft fra transport i Norge. Rapporter 97/7. Statistisk sentralbyrå.
- IISI, International Iron and Steel Institute, 1999: Policy statement. United Nations Framework Convention on Climate Change.
- Jarnehammar, A. 1998: Jämförande livscykelanalys – bjälklag och ytterväggar. Rapport P 9812095. Träteck.

- Jensen, J.E.F., T. Williksen & J. Bartnes 1999: Beregningsmodell for utslipp av metangass fra norske deponier- historiske og framtidige utslippsmengder. Rapport 99:16. SFT.
- Jönsson, Å., T. Svensson & A.-M. Tillman 1995: Life-cycle assessment of flooring materials. A comparison of linoleum, vinyl flooring and solid-pine flooring. Report A5:1995. Swedish Council for Building Research.
- Künniger, T. & K. Richter 1998: Comparative Life Cycle Assessment of Swiss Railroad Sleepers. Paper prepared for The International Research Group on Wood Preservation.
- Landbruksdepartementet 1997: Skog og klima. Skog og treprodukters potensiale for å motvirke klimaendringer. Rapport fra en arbeidsgruppe oppnevnt av Landbruksdepartementet.
- Lunnan, A., S. Navrud, P. K. Rørstad, K. Simensen & B. Solberg 1991: Skog og skogproduksjon i Norge som virkemiddel mot CO<sub>2</sub>-opphopning i atmosfæren. Aktuelt fra skogforsk. Nr.6.
- Marutzky, R. & E. Schriever 1986: Emissionen bei der Verbrennung von Holzspanplattenresten. Holz als Roh- und Werkstoff 44: 185-191.
- MD, Miljøverndepartementet, 1995: Om norsk politikk mot klimaendringer og utslipp av nitrogenoksider (NO<sub>x</sub>). Stortingsmelding nr 41.
- MD, Miljøverndepartementet, 2000: Et kvotesystem for klimagasser. Norges offentlige utredninger 2000:1.
- Moen, K. R. 1990: Skognytting. Landbruksforlaget.
- Mørkved, K. & T. Opdal 1990: Energiressurs - Regnskap for trevirke som bygningsmateriale. Oppdragsrapport.
- Nordic Council of Ministers 1995: Nordic Guidelines on Life-Cycle Assessment. Nord 1995:20.
- Norfolier as & co 1999: Notat.
- NTI, Norsk Treteknisk Institutt, 1997a: Miljødeklarasjon av treindustriens produkter. Hovedrapport. Rapport nr 37.
- NTI, Norsk Treteknisk Institutt, 1997b: Miljødeklarasjon av treindustriens produkter. Bilag til hovedrapport. Rapport nr 37.
- NTI, Norsk Treteknisk Institutt, 1997c: Miljødeklarasjon av treindustriens produkter. Sammenfatning med miljødeklarasjoner. Rapport nr 37.
- NYTEK 1996: Nye fornybare energikilder. Norges forskningsråd i samarbeid med Norges vassdrags- og energiverk.
- Raknes, E. 1995: Langtidsbestandighet av lim for bærende trekonstruksjoner. Resultater etter 30 års eksponering (sluttrapport). Rapport 28. Norsk treteknisk institutt.
- Reinertsen Engineering AS 1994: Vurdering av alternative takkonstruksjoner i stål og limtre. 2006-B-RA-0038. (Ikke fullt tilgjengelig).
- Rypdal, K. 1993: Anthropogenic emissions of the greenhouse gases CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O in Norway. A documentation of methods of estimation, activity data and emission factors. Rapport 93/24. Statistisk sentralbyrå.
- Sagen, A. 1994: Produksjon av limtre. Norges Trelastskole Stiftelse. TO-forlaget.
- Sandberg, E. 1990: Energibruk og energibalanser i trelastindustrien : erfaring fra forsøk ved Trysil-Tre 82/83.

- SETAC, Society of Environmental Toxicology and Chemistry, 1993: Guidelines for Life-Cycle Assessment. A «Code of Practice».
- SFT 1994: Greenhouse gas emissions in Norway. Inventories and estimation methods. Report 94:02.
- SFT 1996: Utslipp ved håndtering av kommunalt avfall. Rapport nr. 16.
- Solberg, B. 1997: Forest biomass as carbon sink - economic value and forest management/policy. Economics of Carbon Sequestration in Forestry. Edited by R.A. Sedjo, R.N. Sampson & J. Wisniewski. s.323-333.
- SSB, Statistisk sentralbyrå, 1999a: Statistisk årbok.
- SSB, Statistisk sentralbyrå, 1999b: Naturressurser og miljø 1999.
- Sygna, L., J. S. Fuglestvedt & A. Aaheim 1999: Metoder for å samanlikne utslipp av klimagassar - GWP-konseptet og alternative metoder. Working paper 1999:11. CICERO.
- Tillman, A.-M., H. Baumann, E. Eriksson & T. Rydberg 1991: Livscykelanalyser for forpackningsmaterial. Beräkning av miljöbelastning. Bilagedel til forpackningsutredningens slutbetänkande. Statens offentliga utredningar nr.77. Miljödepartementet. Sverige.
- Transportbrukernes fellesorganisasjon 1998: Avvirkning og uttransport fra skogen. Transport og miljø i skognæringen. Rapport 3.

## Vedlegg 1. Energiinnhold, virkningsgrader og utslippsfaktorer

Dette vedlegget viser forutsetninger som er brukt i alle analysene. Det gjelder energiinnhold i drivstoff og trevirke, virkningsgrader og utslippsfaktorer ved forbrenning, samt diskontert globalt oppvarmingspotensiale.

### Energiinnhold

Tabell V.1.1 viser energiinnhold for diesel, bensin og trevirke, samt tetthet for diesel og bensin.

Tabell V.1.1. Energiinnhold og tetthet for ulike brensler.

	Kilde	Energiinnhold	Tetthet ved 15°C
Diesel	SSB 1999b	36,2 MJ per liter	0,84 kg per liter
Bensin	SSB 1999b	32,5 MJ per liter	0,74 kg per liter
Gran, tørket trelast		2000 kWh per m <sup>3</sup>	
Bark	Sandberg 1990	718-2070 kWh per fm <sup>3 1)</sup>	

<sup>1)</sup>Beregnet ut i fra gjennomsnittlig løsmasseprosent, fuktighet og brennverdi for fersk og lagret bark.

### Virkningsgrader

Tabell V.1.2 viser vanlige virkningsgrader ved forbrenning for ulike brensler og teknologier. Ut i fra dette er virkningsgraden ved forbrenning av trevirke satt til 30-80% i analysen, mens virkningsgraden ved forbrenning av olje er satt til 65-90%. I de mest sannsynlige estimatene er det brukt gjennomsnitt.

Tabell V.1.2. Vanlige virkningsgrader ved forbrenning (Heje & Nygaard 1998)<sup>1)</sup>.

Olje i villakjel	65-80%
Olje i større forbrenningsanlegg	90%
Kull i større forbrenningsanlegg	90%
Skogbrensel og torv i større forbrenningsanlegg	80%
Ved i vedovn	30-70%
Ved i villakjel	40-75%
Flisfyrte sentralvarmeanlegg	60-75%

<sup>1)</sup>Tap ved overføring av varmen kommer i tillegg.

### Utslippskoeffisienter

For forbrenning av flytende brennstoff og kull finnes det internasjonalt aksepterte utslippsfaktorer for CO<sub>2</sub> som beskriver det gjennomsnittlige karboninnholdet (Rypdal 1993). Ved forbrenning av trevirke beregnes vanligvis ikke CO<sub>2</sub>-utslipp fordi de forutsetter at en tilsvarende mengde CO<sub>2</sub> bindes i skogen gjennom tilveksten. Denne tilnærmingen er også anbefalt av IPCC. Utslipp av CH<sub>4</sub> og N<sub>2</sub>O fra forbrenning er teknologiavhengig (SFT, pers. medd.). Kunnskapen om disse utslippsfaktorene er begrenset (Rypdal 1993). En oversikt over utslippsfaktorer som er brukt i beregningene er gitt i tabell V.1.3. Der det foreligger flere verdier er de nyeste valgt. Verdiene for utslipp fra tungtransport er gjennomsnittstall for tungtransport i Norge. I tillegg er metanutslipp fra forbrenning av biomasse 0,3 kg/GJ (ECON 1995).

Tabell V.1.3. Utslipp av CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> og N<sub>2</sub>O i kg per tonn brensel.

Brensel	Teknologi	Kilde	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
Diesel	Lastebiler, nyttelast 11 tonn eller mer	Holtskog & Rypdal 1997	3170	0,04	0,44
	Jernbane	Rypdal 1993	3170	0,1	0,2
Fyringsolje	Kjeler i industrien	Rypdal 1993	3170	0,1	0,6

*Diskontert globalt oppvarmingspotensial, DGWP*

Tabell V.1.4 viser verdier for diskontert globalt oppvarmingspotensiale, DGWP, ved ulike rentekrav. DGWP er en vektingsfaktor, og strålingspådrivet fra CO<sub>2</sub> brukes som basis. Som man ser av tabell V.1.4 øker DGWP for både CH<sub>4</sub> og N<sub>2</sub>O med økende rentefot, men økningen er mye større for CH<sub>4</sub>. Dette skyldes at CH<sub>4</sub> har kort levetid i atmosfæren sammenlignet med CO<sub>2</sub>. Med et høy diskonteringsrente vil strålingspådrivet fra CH<sub>4</sub> være mye høyere enn fra CO<sub>2</sub>.

Tabell V.1.4. Diskontert globalt oppvarmingspotensial for ulike renteføtter (Sygna et al. 1999).

Rentefot	DGWP for CH <sub>4</sub>	DGWP for N <sub>2</sub> O
0%	11,6	270,1
2%	32,6	315,1
4%	46,9	324,1
6%	57,2	327,9
8%	64,9	330,1

## Vedlegg 2. Forutsetninger brukt i livsløpsanalyse for limtre

I dette vedlegget er forutsetningene brukt i livsløpsanalysen for limtre i kap.2.2.1. beskrevet i detalj. Det er tatt utgangspunkt i nummereringen i flytskjemaet i figur 2, og hver fase/prosess er beskrevet for seg. Mer generelle forutsetninger som energiinnhold, virkningsgrader og utslippsfaktorer er oppgitt i vedlegg 1. Den funksjonelle enheten i analysen, 1 m<sup>2</sup> takflate, tilsvarer 0,14 m<sup>3</sup> limtre (Reinertsen Engineering AS 1994).

### 1. Utvinning av olje og produksjon av diesel (precombustion)

Fra Statoil ble det oppgitt at for diesel er energiforbruket til utvinning av olje, raffinering og transport til bensinstasjon 0,06 MJ per MJ diesel. Utslipet av CO<sub>2</sub> er 3,3 g per MJ diesel. Tillman et al. (1991) kom fram til et energiforbruk på ≈0,07 MJ per MJ diesel, og 3,992 g CO<sub>2</sub> per MJ diesel. Det ble valgt å bruke tallene fra Statoil fordi disse er de nyeste. Siden diesel og fyringsolje er ganske like, er disse tallene også brukt for fyringsolje (Statoil, pers.medd.).

### 2. Hogst og terrengtransport

For hogst og terrengtransport kan man tenke seg tre alternativ som vil gi ulike drivstofforbruk:

1. Avvirkning med hogstmaskin og framkjøring med lastbærer
2. Avvirkning med motorsag og framkjøring med lastbærer
3. Avvirkning med motorsag og framkjøring med landbrukstraktor

Tall for forbruk av diesel og bensin til hogst og framkjøring av tømmer er hentet fra Transportbrukernes Fellesorganisasjon (1998) og er gjengitt i tabell V.2.1. Forestia Sokna ligger i Buskerud, og Forestia Våler ligger i Hedmark. I følge Heje/Nygaard (1998) blir henholdsvis 68% og 77% av hogsten utført av entreprenør i disse fylkene. 65% og 76% av tømmeret blir transportert med lassbærer fram til vei. I analysen er det derfor forutsatt at 40% av tømmeret blir hogd med hogstmaskin og transportert med lassbærer, mens 30% blir hogd med motorsag og transportert med lassbærer.

Tabell V.2.1. Diesel- og bensinforbruk for hogst og terrengtransport (Transportbrukernes Fellesorganisasjon 1998).

	Brukt i analysen	Variasjon
Hogstmaskin	1,1 liter diesel per m <sup>3</sup>	1,0-1,4 liter per m <sup>3</sup>
Lassbærer	1,0 liter diesel per m <sup>3</sup>	0,9-1,2 liter per m <sup>3</sup>
Landbrukstraktor	2,0 liter diesel per m <sup>3</sup>	1,65-2,0 liter per m <sup>3</sup>
Motorsag	0,275 liter bensin per m <sup>3</sup>	0,1-0,5 liter per m <sup>3</sup>

### 3. Transport

Mørkved & Opdal (1990) anslår drivstofforbruket til å være 4,5 liter per mil. Fossdal (1995) oppgir et drivstofforbruk på 4-5 liter per mil for en lastebil på denne størrelsen pluss et merforbruk på 0,25-0,75 liter per mil med en henger. Holtskog & Rypdal (1997) bruker et drivstofforbruk på 4,8 liter per mil for lastebiler med nyttelast 13,0 tonn eller over. SSB (1999b) oppgir et forbruk på 3,2 liter per mil for

tung godstrafikk. Dette tallet er et gjennomsnitt av alle teknologier og kjøremåter og er fra 1997. Drivstofforbruket vil være mindre når bilen kjører tom. Forbruket av diesel per mil avhenger altså av om bilen har returlass eller ikke. I analysen har vi benyttet et drivstofforbruk på 4,5 liter per mil, med en variasjon på 3,5-5,5 liter per mil.

En lastebil kan transportere 25-30 tonn (Mørkved & Opdal 1990). Rådensiteten for gran er 800 kg per m<sup>3</sup> (Heje/Nygaard 1998). Vanlig tørket trelast av granvirke veier 550 kg per m<sup>3</sup>. Fuktigheten på trelast som skal brukes til limtre skal ligge mellom 8 og 15% (Sagen 1994).

All transport skjer med bil. For tømmerbiler må man regne drivstofforbruk både på tur og returtransporter siden de ikke har returlass. For transport av ferdige produkter kan man anta at det er en realitet med «halvt» returlass. Det er gjort i denne analysen.

#### *Transport inn til sagbruk*

Forestia Våler henter tømmeret sitt innen en radius på 100 km. Forestia Sokna kjøper mesteparten av tømmeret fra Vestviken skogeierforening, og transportavstanden antas å være den samme som hos Forestia Våler.

#### *Transport til limtrefabrikk*

Avstanden mellom Sokna og Moelv er 140 km. Avstanden mellom Braskereidfoss og Moelv er 100 km.

#### *Transport til Gardermoen*

Avstanden er 130 km.

#### *Transport til sted for avfallshåndtering*

Ukjent, men antas å være liten.

### **4. Sagbruk**

Opplysninger om produksjonen hos de to sagbrukene er gjengitt i tabell V.2.2. Det er forutsatt at hele skurutbyttet ved sagbrukene brukes til limtre, det vil si at det er av samme kvalitet. Det er også antatt at Moelven limtre AS kjøper like mye fra hvert av sagbrukene. Siden det var vanskelig for sagbrukene å anslå forbruk av diesel til intern transport er det brukt tall fra NTI (1997a) for dette. I denne rapporten kom de fram til at det ble brukt fra 1,0 til 3,2 liter diesel per m<sup>3</sup> ferdig trelast, med et gjennomsnitt på 2,3 liter.

Tabell V.2.2. Skurutbytte, årlig produksjon og elektrisitetsforbruk hos Forestia Sokna og Forestia Våler.

	<b>Forestia Sokna</b>	<b>Forestia Våler</b>
Skurutbytte	46% (45-47%)	47,6% (44,6-51,2%)
Årlig produksjon	138.000 m <sup>3</sup> trelast (137.000-139.000 m <sup>3</sup> )	320.000 m <sup>3</sup> heltømmer (319.000-321.000 m <sup>3</sup> )
Årlig forbruk av elektrisk strøm	14,7 GWh (14,6-14,8 GWh)	11,9 millioner kWh (11,8-12,0 mill. kWh)



Energimengden fra barkfyringsanleggene beregnes ut i fra barkvolumprosent og brennverdi. Barkvolumprosenten ligger for gran mellom 8-15% (Fitje 1989). Brennverdien for bark varierer ifølge Sandberg (1990) fra 718-2070 kWh per  $\text{fm}^3$ , beregnet ut i fra gjennomsnittlig fastmasseprosent, fuktighet og gjennomsnittlig brennverdi for fersk og lagret bark. Som mest sannsynlige estimat er gjennomsnittet av disse verdiene brukt. Energi fra barkfyringsanlegg belastes i sin helhet trelast fordi denne energien brukes til tørking. Klimagassutslipp fra forbrenning av biomasse i energiproduksjon er 0,3 kg  $\text{CH}_4$  per GJ (ECON 1995). Energiforbruk og utslipp på sagbruket er gjennomsnittstall for alle trinnene i produksjonen.

Flis brukes enten i barkfyringsanlegget eller selges til papirindustrien. I produksjonstrinn hvor man får biprodukter, allokeres energiforbruk og utslipp mellom produktene. Med biprodukter menes produkter som går videre som innsatsfaktorer i annen produksjon. Allokeringen skjer etter volum. Det allokeres ingen miljøbelastning til bark og flis som brukes til intern brensel.

### 5. Produksjon av plast

Både på sagbrukene og ved frakt/oppbevaring av ferdig limtre blir det brukt en del plast som beskyttelse mot fuktighet og tilsmussing. Den typen plast som brukes i bæreposer, polyetylen low density krympefolie (PELD), er representativ for trelastindustrien (Norfolier as & co, pers. medd.). Energiforbruket og utslipp av  $\text{CO}_2$  ved framstilling av 1 kg slik plast er gjengitt i tabell V.2.3. Krympefolie kan gjenvinnes med et energiforbruk på cirka 4 MJ per kg (Norfolier as & co 1999).

Tabell V.2.3. Energiforbruk og utslipp av  $\text{CO}_2$  ved framstilling av 1 kg PELD (polyetylen low density ) krympefolie.

Kilde	El. (MJ)	Fossil t (MJ)	Bio. (MJ)	Totalt (MJ)	$\text{CO}_2$ (kg)	Kommentar
Tillman et.al (1991)	11,53	60,9	0	72,43	1,023	Fossil energi er inklusive feedstock
Norfolier as & co (1999)	-	-	-	27,9		Ekklusive feedstock, som utgjør 44 MJ

Det er antatt at platen etter bruk går videre som råstoff i gjenvinningsindustrien, det vil si at den forlater systemet og videre energiforbruk og klimagassutslipp utelates. I følge NTI (1997a) brukte limtreprodusentene i snitt 1,7 kg plast per  $\text{m}^3$  limtre, og forbruket varierte mellom 0,5 kg og 2,9 kg.

### 6. Produksjon av limtre

Hos Moelven Limtre er den årlige produksjonen på 19.000  $\text{m}^3$  ferdig limtre, og det årlige forbruket av trelast er 25.000  $\text{m}^3$ . Forholdet mellom trelast og ferdig limtre er 1,3-1,4, og dette er brukt til å beskrive usikkerheten. Årlig strømforbruk er i overkant av 2 millioner kWh. I denne analysen er det antatt at årlig strømforbruk er 2,3 millioner kWh, med en variasjon på 2,0-2,5 millioner kWh. De bruker litt flis til oppvarming, resten blir solgt til Forestia Braskereidfoss (Moelven Limtre, pers. medd.). Energimengden fra forbrenning av flis beregnes ut fra andelen av innkjøpt trelast som går til intern brensel og brennverdi. Brennverdien for flis er antatt å være den samme som for tørket trelast, se tabell V.1.1 i vedlegg 1. Andelen flis som brukes til oppvarming er antatt å være 9% av innkjøpt trelast med en variasjon på 4-

16% ut i fra NTI (1997a). Klimagassutslipp fra forbrenning av biomasse i energiproduksjon er 0,3 kg CH<sub>4</sub> per GJ (ECON 1995). Det brukes ikke fyringsolje til oppvarming av lokalene, forbrenning av flis varmer opp hele anlegget om vinteren.

Siden det var vanskelig for produsenten å anslå mengden diesel brukt til intern transport er det brukt tall fra NTI (1997a) for dette. NTI samlet inn datamateriale fra 4 norske limtreprodusenter i 1997. I gjennomsnitt brukte disse produsentene 4 liter diesel per m<sup>3</sup> ferdig limtre, men dieselforbruket varierte mellom 0-11 liter.

I produksjonstrinn hvor man får biprodukter allokeres energiforbruk og utslipp mellom produktene. Med biprodukter menes produkter som selges videre som innsatsfaktorer i annen produksjon. Allokeringen skjer etter volum. Det er ikke korrigert for krymping. Det allokeres ingen miljøbelastning til flis som brukes til intern brensel. Energiforbruk og utslipp er gjennomsnittstall for alle prosessene i limtreproduksjonen.

### 7. Produksjon av maling

Limtretragerne ble overflatebehandlet med en gulvlakk tilsatt pigment på innvendige konstruksjoner og en vanlig oljebeis på utvendige konstruksjoner. Fossdal (1995) oppgir et energiforbruk på 12,6 MJ per kg for oljebasert maling. Utslippene av CO<sub>2</sub> til luft fra produksjon av 1 kg maling er 1,365 kg (Fossdal 1995). Det brukes så liten mengde maling, slik at både energiforbruk og CO<sub>2</sub>-utslipp utgjør mindre enn 1% av det samlede energiforbruket/klimagassutslippet. Tilsvarende fant Axelsson et al. (1999) at det er vektandelen malingen utgjør som har betydning for virkning på drivhuseffekten. Stål blir normalt også malt (Björklund et al. 1996), slik at forskjellen mellom de to alternativene er liten.

### 8. Produksjon av lim

I følge Moelven Limtre bruker de 8-10 kg lim per m<sup>3</sup> ferdig limtre. NTI (1997a) fant at gjennomsnittsförbruket var på 13 kg per m<sup>3</sup> limtre, slik at variasjonen er 8-13 kg med mest sannsynlig estimat på 10 kg. Det ble brukt ulike typer lim i de forskjellige delene av limtretragerne, men i hovedsak ble fenol-resorsinol limet Dynosol S-199 fra Dyno Industrier brukt (Moelven Limtre AS, pers. medd.). For denne limtypen har produsenten utført en delvis livsløpsanalyse. Denne er gjengitt i tabell V.2.4. Transportavstanden mellom fabrikk på Lillestrøm og Moelv er 140 km. Det er forutsatt at transporten skjer med bil.

Tabell V.2.4. Delvis livsløpsanalyse for limet Dynosol S-199 (Dyno Technology Centre 1999). Funksjonell enhet er 1 tonn lim inklusive herder. Data fra leverandører av etanol og resorsinol, samt utslipp til luft fra fenol i lagertank mangler.

	Enhet	Råvarer	Transport	Produksjon	Sum
Elektrisk strøm	kWh	17		232	249
Energi fra olje	kWh	59	653	1116	1828
Energi fra gass	kWh	3648			3648
Sum	kWh	3724	653	1348	5725
Utslipp av CO <sub>2</sub>	kg	184,182	51,035	311,579	546,796

## 9. Bygging

Andersen (1993) har funnet at ved kranløft brukes 11 MJ per tonn. Vekten av en konstruksjon i limtre og en i stål er omtrent den samme. Björklund et al. (1996) sammenlignet bærende konstruksjoner i stål og betong. I studien fra 1997 kom Björklund et al. med en rapport der de sammenlignet to av de samme betongkonstruksjonene med en tilsvarende konstruksjon i tre. De tok for seg hele reisverket i en bygning med flere etasjer, ikke bare bæresystemet. De kom fram til det samme energiforbruket på byggeplassen for løsningen i tre og løsningen i stål. På bakgrunn av dette er det valgt å se bort fra energiforbruket på byggeplassen i denne undersøkelsen, siden formålet er å finne forskjeller mellom de to materialene.

## 10. Bruk/anvendelse

Limtre har lang fysisk levetid. En undersøkelse som er gjort av Raknes (1995) viser at resorcinol- og fenolresorcinollim har god langtidsbestandighet både innen- og utendørs. Levetiden avhenger av bruk, eller eventuelt av bygningens funksjonelle levetid. Limtre dragerne krever ikke vedlikehold, og oppvarming er ikke en del av funksjonen de skal fylle.

## 11. Riving

Energiforbruk, og dermed utslipp av klimagasser, er antatt å være lik for konstruksjonen i limtre og konstruksjonen i stål.

## 12. Avfallshåndtering

### *Forbrenning med utnyttelse av energien*

Det er sett bort i fra utslipp fra limet i limtreet på bakgrunn av en undersøkelse av Marutzky & Schriever (1986). De undersøkte utslipp fra forbrenning av sponplaterester, og så blant annet på sponplater limt med fenol-formaldehyd-lim som er samme limtype som brukes i limtre. Konklusjonen var at ved gode forbrenningsbetingelser, det vil si høy temperatur og nok oksygen, ville det ikke være noen skadelige utslipp. Til sammenligning består sponplater av 8-10% lim (Moen 1990), mens innholdet av lim i limtre er cirka 2% vektprosent (NTI 1997c).

Det er forutsatt at limtreet forbrennes fullstendig under tilstrekkelig tilgang på oksygen. Ved fullstendig forbrenning omdannes trevirke til energi, aske, karbondioksid og vann (Marutzky & Schriever 1986). I tradisjonelle vedovner er temperaturen for lav til at forbrenningen blir fullstendig. I tillegg er ikke oksygentilførselen stor nok. Dette fører til at det dannes karbonmonoksid og andre skadelige stoffer. Det er nå utviklet nye ovner som gir god forbrenning også ved lav varmelast, såkalte katalysatorovner og tokammerovner (NYTEK 1996). Det er derfor sett bort fra andre utslipp enn CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub>-utslippet beskrevet i vedlegg 1.

Virkningsgrader og energiinnhold, samt utslipp ved forbrenning for trevirke og fyringsolje er vist i tabell V.1.1 og V.1.2 i vedlegg 1.

### *Deponering*

Ved deponering vil nedbrytningen delvis foregå under anaerobe forhold og karbon vil frigjøres som CH<sub>4</sub>. Jensen et al. (1999) kom fram til en halveringstid for trevirke på 11 år. Det teoretiske metanpotensialet er 168 kg/tonn (Jensen et al. 1999). Usikkerheten i disse bergningene er på ±30%. Forbruk av diesel på avfallsplass er

100-800 MJ per tonn avfall (SFT 1996). Forbruk av elektrisitet er 0,01 kWh per tonn avfall (SFT 1996).

### Vedlegg 3. Forutsetninger brukt i livsløpsanalyse av stål

I dette vedlegget er forutsetningene brukt i livsløpsanalysen for stål i kap.2.2.1. beskrevet i detalj. Det er tatt utgangspunkt i nummereringen i flytskjemaet i figur 3, og hver fase/prosess er beskrevet for seg. Punkt 9, 10 og 11 er felles for livsløpsanalysene for limtre og stål og finnes i vedlegg 2. Mer generelle forutsetninger som energiinnhold, virkningsgrader og utslippsfaktorer står i vedlegg 1. Den funksjonelle enheten i analysen, 1 m<sup>2</sup> takflate, tilsvarer 60 kg stål (Reinertsen Engineering AS 1994).

#### 13. Framstilling av stål

Energiforbruk og klimagassutslipp er svært forskjellig avhengig av om produksjonen er basert på malm eller skrapjern, se tabell V.3.1. Det første problemet er derfor å finne ut om bærebjelker i stål ville kommet fra malmbasert eller skrapjernbasert produksjon. På verdensmarkedet kommer i dag om lag 50% av alt stål fra skrapjern (Stålbygnadsinstituttet, pers.medd.).

I Norge produseres bare armeringsstål fra skrapjern, alt høykvalitetstål importeres. På bakgrunn av dette har vi sett på to alternativer. Det første er at stålet produseres i Sverige, fra malm. Det andre er at stålet kjøpes på verdensmarkedet og at energiforbruk og klimagassutslipp fra framstilling er et gjennomsnitt av malmbasert og skrapjernbasert produksjon.

Kull brukes som reduksjonsmiddel i produksjonen av jern fra jernmalm, brennverdien til dette er medregnet (Björklund et al. 1996). Det er også fra denne prosessen at mesteparten av CO<sub>2</sub>-utslippene kommer (IISI 1999). Energiforbruk og klimagassutslipp ved produksjon av 1 kg stål er gjengitt i tabell V.3.1. I analysen er precombustion for diesel og olje inkludert, se punkt 1 i vedlegg 2.

Tabell V.3.1. Energiforbruk (MJ) og utslipp av CO<sub>2</sub> (g) per kg ferdig produsert stål i plater (Björklund et al. 1996). Tallene inkluderer ikke energiforbruk og klimagassutslipp fra produksjon av elektrisitet og gjelder stål produsert i Sverige.

	Elektrisk energi (MJ)	Fossil energi (MJ)	Sum (MJ)	CO <sub>2</sub> (gram)	CH <sub>4</sub> (gram)
Skrapjernbasert stålproduksjon	2,06	2,0963	4,1563	214	0,0639
Malmbasert stålproduksjon	3,29	21,98606	25,27606	1180	4,04

#### 14. Transport

For transport med bil er de samme forutsetningene som i punkt 3 gjort. Det vil si at drivstofforbruket er 3,5-5,5 liter per mil og at nyttelasten 25-30 tonn. De samme forutsetningene er også gjort for returlass.

For jernbanetransport er det viktig om togene er drevet med elektrisitet eller diesel. I analysen er det brukt gjennomsnitt av energiforbrukstallene i tabell V.3.2. For dieseldrevne tog er utslippsfaktorene i tabell V.1.3 i vedlegg 1 brukt for å beregne klimagassutslippene. Dersom det ikke er spesifisert om togene er elektrisk drevne eller dieseldrevne er det brukt et gjennomsnitt av de to.

Tabell V.3.2. Energiforbruk ved transport med jernbane.

Kilde	Elektrisk drevne tog (MJ/tonnkm)	Dieseldrevne tog (MJ/tonnkm)
Fossdal 1995	0,25	0,62
Holtskog & Rypdal 1997	0,51	1,10

*Transportavstander*

Avstanden fra stålverk til produksjonssted for framstilling av søyler og bjelker er i Sverige 250 km. Denne transporten skjer med jernbane. Den samme avstanden og transportmetoden mellom stålverk og sted for videreforedling er brukt for stålbjelker produsert andre steder. Transportavstand og transportmiddel fra produksjonssted til Gardermoen er ukjent.

Avstand til sorterings- og fragmenteringsanlegg for metallavfall er ukjent. Vi antar at dette skjer på samme sted som omsmelting. Dersom bjelkene går til produksjon av armeringsjern etter bruk er det forutsatt at dette skjer i Mo i Rana. Avstanden fra Gardermoen til Mo i Rana er 980 km, og frakten foregår med dieseldrevet jernbane. Hvis skrapjernet selges på verdensmarkedet, er transportavstand og transportmiddel ukjent.

**15. Framstilling av bjelker**

I det første alternativet der stålet produseres i Sverige har vi antatt at det videreforedles til bjelker i Kalmar, hos en av de største produsentene i Sverige. Dette er det samme som Björklund et al. (1996) antok. I følge Björklund et al. (1996) trengs det 2,0 MJ elektrisitet per kg for å produsere konstruksjoner av stålplater, og dette er inkludert i analysen.

I det andre alternativet er både eksakt produksjonssted for stålplater og produksjonssted for konstruksjoner ukjent. Energiforbruket for framstilling av konstruksjoner i stål er også i dette alternativet antatt å være det samme som i Björklund et al. (1996).

**16. Avfallsbehandling**

Stål kan gjenbrukes, resirkuleres eller deponeres (Stålbyggnadsinstituttet, pers.medd). Det er billigere å framstille stål fra skrapjern enn fra malm, og skrapjern er ettertraktet i markedet. Skrapjernet må først sorteres og kuttes opp til håndterbare størrelser. Energiforbruket ved denne operasjonen er 0,046 MJ/kg skrapjern, og all energi er antatt å være elektrisk (Björklund et al. 1996). Det er sett på to alternativer for avfallsbehandling:

- Skrapjernet sendes til Fundias anlegg i Mo i Rana som framstiller armeringsjern av skrapjern, det vil si at skrapjernet fra Gardermoen kun erstatter annet skrapjern.
- Skrapjernet sendes ut på verdensmarkedet og erstatter malm som råstoff i produksjonen av nytt stål.

**17. Produksjon av elektrisitet**

Produksjon av elektrisitet forårsaker også utslipp, og det er et visst overføringstap som kan betraktes som energiforbruk. For varmekraft fra olje, kull eller kjernekraft er det vanlig med en virkningsgrad på 25-30% (Mørkved & Opdal 1990). Det vil si

at det forbrukes 3,3-4,0 enheter primærenergi for hver enhet elektrisk kraft. Utslippsfaktorer for produksjon av elektrisitet er gitt i tabell V.3.3. Verken vannkraft eller atomkraft forårsaker klimagassutslipp, selv om slik kraftproduksjon kan ha andre negative effekter.

Tabell V.3.3. Utslippsfaktorer ved forbrenning av biomasse, naturgass, fyringsolje og kull i energiproduksjon. Norske tall. Kg gass per produsert GJ. (SFT 1994).

	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
Biomasse	-	0,3	0
Naturgass	57,8	0,02	0
Fyringsolje	72,4	0,01	0,01
Kull	82,7	0	0

**Vedlegg 4. Fullstendige følsomhetsanalyser, limtre**

Dette vedlegget viser de fullstendige følsomhetsanalysene for energiforbruk og klimagassutslipp over livsløpet til limtre. Følsomhetsanalysen for energiforbruk ved framstilling av limtre er vist i tabell V.4.1. Følsomhetsanalysen for klimagassutslipp ved framstilling av limtre er vist i tabell V.4.5. Usikkerheten i alternativet der limtreet brennes og energien erstatter olje er vist i tabell V.4.2 og V.4.6. Usikkerheten i alternativet der limtreet brennes og 70% av energien erstatter olje og 30% erstatter vannkraft er vist i tabell V.4.3 og V.4.7. Usikkerheten i alternativet der limtreet deponeres er vist i tabell V.4.4 og V.4.8.



Tabell V.4.1. Fullstendig følsomhetsanalyse for energiforbruk fra framstilling av limtre.  
En og en forutsetning er endret.

Forutsetning	Reell variasjon i forutsetning			Variasjon i forutsetning i prosent		Endring i resultat i prosent		Endring i resultat i prosent når forutsetning endres med ±10%	
	min	basis	max	min	max	min	max	-10%	+10%
Drivstofforbruk hogstmaskin i liter/m <sup>3</sup>		1	1,4		40		0	0	0
Drivstofforbruk lassbærer i liter/m <sup>3</sup>	0,9	1	1,2	-10	20	0	0	0	0
Drivstofforbruk landbr.traktor i liter/m <sup>3</sup>	1,65	2		-18		0	0	0	0
Drivstofforbruk motorsag i liter/m <sup>3</sup>	0,1	0,275	0,5	-64	82	0	0	0	0
Andel avv. med hogstmaskin og lassbærer	0	0,4	1	-100	150		0	-	-
Andel avv. med motorsag og lassbærer	0	0,3	1	-100	233		-1	-	-
Andel avv. med motorsag og traktor	0	0,3	1	-100	233		1	-	-
Transportavstand inn til sagbruk i km	10	50	100	-80	100	-2	2	0	0
Dieselforbruk i liter/km	0,35	0,45	0,55	-22	22	-2	2	-1	1
Nyttelast i tonn	25	27,5	30	-9	9	1	-1	1	-1
Barkvolumprosent	8	11,5	15	-30	30	-16	18	-6	6
Brennverdi bark i kWh/fm <sup>3</sup>	720	1395	2070	-48	48	-25	25	-5	5
Dieselforbruk på sagbruk i liter/m <sup>3</sup> trelast	1,0	2,3	3,2	-57	39	-2	1	0	0
Skurutbytte sagbruk 1 i prosent	45	46	47	-2	2	1	0	3	-2
Årlig strømforbruk sagbruk 1 i GWh	14,6	14,7	14,8	1	1	0	0	0	0
Årlig prod. sagbruk 1 i 1000m <sup>3</sup> tømmer	137	138	139	1	1	0	0	0	0
Skurutbytte sagbruk 2 i prosent	44,6	47,6	51,2	-6	8	2	-2	3	0
Årlig strømforbruk sagbruk 2 i GWh	11,8	11,9	12,0	-1	1	0	0	0	0
Årlig prod. sagbruk 2 i 1000m <sup>3</sup> tømmer	319	320	321	0	0	0	0	0	0
Returlass	nei	halvt	ja			2	-2	0	0
Forbruk av trelast per m <sup>3</sup> ferdig limtre	1,3	1,35	1,4	-4	4	3	0	-3	4
Årlig produksjon av limtre								5	-4
Årlig el.forbruk i limtreprod. i mill. kWh	2	2,3	2,5	-13	9	-1	0	-1	1
Dieselforbruk i kWh/m <sup>3</sup> ferdig limtre	0	4	11	-100	175	0	1	0	0
Andel trelast intern brensel i limtreprod.	0,04	0,09	0,16	-56	78	-9	15	-2	2
Limforbruk per m <sup>3</sup> limtre i kg	8	10	13	-20	30	-1	2	-1	1
El. energi framstilling lim i kWh/kg	-	0,249	-					0	0
Fossil energi framstilling lim i kWh/kg	-	5,476	-					-1	1
CO <sub>2</sub> -utslipp framstilling lim i kg/kg lim	-	0,547	-					0	0
Forbruk av plast per m <sup>3</sup> limtre i kg	0,5	1,7	2,9	-71	71	-2	2	0	0
El. energi framstilling plast i MJ/kg	-	11,53	-					0	0
Fossil energi framstilling plast i MJ/kg	-	60,9	-					0	0
CO <sub>2</sub> -utslipp framstilling plast i kg/kg plast	-	1,023	-					0	0
m <sup>3</sup> limtre per m <sup>2</sup> takflate	0,13	0,14	0,15	-7	7	-7	7	-10	10

Tabell V.4.2. Følsomhetsanalyse for energiforbruk ved avfallshåndtering 1, limtreet brennes og energien erstatter energi fra olje.

Forutsetning	Reell variasjon i forutsetning			Variasjon i forutsetning i prosent		Endring i resultat i prosent		Endring i resultat i prosent når forutsetning endres med $\pm 10\%$	
	min	basis	max	min	max	min	max	-10%	+10%
Brennverdi limtre i kWh per m <sup>3</sup>	1900	2000	2100	-5	5	-5	5	-10	10
Virkningsgrad ved forbrenning av olje	0,65	0,80	0,90	-19	13	-11	23	11	-9
Virkningsgrad ved forbrenning av tre	0,30	0,55	0,80	-45	45	-45	45	-10	10

Tabell V.4.3. Følsomhetsanalyse for energiforbruk ved avfallshåndtering 2, limtreet brennes og 70% av energien erstatter energi fra vannkraft, 30% av energien erstatter energi fra olje.

Forutsetning	Reell variasjon i forutsetning			Variasjon i forutsetning i prosent		Endring i resultat i prosent		Endring i resultat i prosent når forutsetning endres med $\pm 10\%$	
	min	basis	max	min	max	min	max	-10%	+10%
Brennverdi limtre i kWh per m <sup>3</sup>	1900	2000	2100	-5	5	-5	5	-10	10
Virkningsgrad ved forbrenning av olje	0,65	0,80	0,90	-19	13	-13	28	13	-10
Virkningsgrad ved forbrenning av tre	0,30	0,55	0,80	-45	45	-45	45	-10	10

Tabell V.4.4. Følsomhetsanalyse for energiforbruk ved avfallshåndtering 3, limtreet deponeres.

Forutsetning	Reell variasjon i forutsetning			Variasjon i forutsetning i prosent		Endring i resultat i prosent		Endring i resultat i prosent når forutsetning endres med $\pm 10\%$	
	min	basis	max	min	max	min	max	-10%	+10%
Densitet limtre i $\text{kg/m}^3$	500	550	600	-9	9	-9	9	-10	10
Dieselforbruk deponi i MJ/tonn avfall	100	450	800	-78	78	-78	78	-10	10
El.forbruk deponi i kWh/tonn avfall	-	1	-	-	-	-	-	0	0
Metanpotensiale i kg/tonn treavfall	118	168	218	-30	30	0	0	0	0

Tabell V.4.5. Fullstendig følsomhetsanalyse for utslipp av klimagasser i år 0, det vil si fra framstilling av limtredegerne. En og en forutsetning er endret fra basisverdi til henholdsvis minimums- og maksimumsverdi og den prosentvise endringen i resultatet er beregnet.

Forutsetning	Reell variasjon i forutsetning			Variasjon i forutsetning i prosent		Endring i resultat i prosent		Endring i resultat i prosent når forutsetning endres med ±10%	
	min	basis	max	min	max	min	max	-10%	+10%
Drivstofforbruk hogstmaskin i liter/m <sup>3</sup>		1	1,4		40		0	0	0
Drivstofforbruk lassbærer i liter/m <sup>3</sup>	0,9	1	1,2	-10	20	0	1	0	0
Drivstofforbruk landbr.traktor i liter/m <sup>3</sup>	1,65	2		-18		0		0	0
Drivstofforbruk motorsag i liter/m <sup>3</sup>	0,1	0,275	0,5	-64	82	1	1	0	0
Andel avv. med hogstmaskin og lassbærer	0	0,4	1	-100	150		1	-	-
Andel avv. med motorsag og lassbærer	0	0,3	1	-100	233	-5		-	-
Andel avv. med motorsag og traktor	0	0,3	1	-100	233		3	-	-
Transportavstand inn til sagbruk i km	10	50	100	-80	100	-8	10	-1	1
Dieselforbruk i liter/km	0,35	0,45	0,55	-22	22	-8	8	-3	3
Nyttelast i tonn	25	27,5	30	-9	9	3	-3	4	-3
Barkvolumprosent	8	11,5	15	-30	30	-4	4	-1	1
Brennverdi bark i kWh/fm <sup>3</sup>	720	1395	2070	-48	48	-5	5	-1	1
Dieselforbruk på sagbruk i liter/m <sup>3</sup> trelast	1,0	2,3	3,2	-57	39	-10	7	-2	2
Skurutbytte sagbruk 1 i prosent	45	46	47	-2	2	0	0	1	0
Årlig strømforbruk sagbruk 1 i GWh	14,6	14,7	14,8	1	1	0	0	0	0
Årlig prod. sagbruk 1 i 1000m <sup>3</sup> tømmer	137	138	139	1	1	0	0	0	0
Skurutbytte sagbruk 2 i prosent	44,6	47,6	51,2	-6	8	0	0	1	0
Årlig strømforbruk sagbruk 2 i GWh	11,8	11,9	12,0	-1	1	0	0	0	0
Årlig prod. sagbruk 2 i 1000m <sup>3</sup> tømmer	319	320	321	0	0	0	0	0	0
Returlass	nei	halvt	ja			-8	8	-2	2
Forbruk av trelast per m <sup>3</sup> ferdig limtre	1,3	1,35	1,4	-4	4	0	4	-6	6
Årlig produksjon av limtre								7	-6
Årlig el.forbruk i limtreprod. i mill. kWh	2	2,3	2,5	-13	9	0	0	0	0
Dieselforbruk i kWh/m <sup>3</sup> ferdig limtre	0	4	11	-100	175	-2	3	0	0
Andel trelast intern brensel i limtreprod.	0,04	0,09	0,16	-56	78	-3	5	0	0
Limforbruk per m <sup>3</sup> limtre i kg	8	10	13	-20	30	-2	4	-1	1
El, energi framstilling lim i kWh/kg	-	0,249	-					0	0
Fossil energi framstilling lim i kWh/kg	-	5,476	-					0	0
CO <sub>2</sub> -utslipp framstilling lim i kg/kg lim	-	0,547	-					-1	1
Forbruk av plast per m <sup>3</sup> limtre i kg	0,5	1,7	2,9	-71	71	-3	3	0	0
El, energi framstilling plast i MJ/kg	-	11,53	-					0	0
Fossil energi framstilling plast i MJ/kg	-	60,9	-					0	0
CO <sub>2</sub> -utslipp framstilling plast i kg/kg plast	-	1,023	-					0	0
m <sup>3</sup> limtre per m <sup>2</sup> takflate	0,13	0,14	0,15	-7	7	-7	7	-10	10

Tabell V.4.6. Følsomhetsanalyse for klimagassutslipp/sparte klimagassutslipp ved avfallshåndtering 1, limtreet brennes og energien erstatter energi fra olje.

Forutsetning	Reell variasjon i forutsetning			Variasjon i forutsetning i prosent		Endring i resultat i prosent		Endring i resultat i prosent når forutsetning endres med ±10%	
	min	basis	max	min	max	min	max	-10%	+10%
Brennverdi limtre i kWh per m <sup>3</sup>	1900	2000	2100	-5	5	-5	5	10	-10
Virkningsgrad ved forbrenning av olje	0,65	0,80	0,90	-19	13	-11	23	-9	12
Virkningsgrad ved forbrenning av tre	0,30	0,55	0,80	-45	45	-45	45	10	-10

Tabell V.4.7. Følsomhetsanalyse for klimagassutslipp/sparte klimagassutslipp ved avfallshåndtering 2, limtreet brennes og 70% av energien erstatter energi fra vannkraft, 30% av energien erstatter energi fra olje.

Forutsetning	Reell variasjon i forutsetning			Variasjon i forutsetning i prosent		Endring i resultat i prosent		Endring i resultat i prosent når forutsetning endres med ±10%	
	min	basis	max	min	max	min	max	-10%	+10%
Brennverdi limtre i kWh per m <sup>3</sup>	1900	2000	2100	-5	5	-5	5	10	-10
Virkningsgrad ved forbrenning av olje	0,65	0,80	0,90	-19	13	-18	38	-15	18
Virkningsgrad ved forbrenning av tre	0,30	0,55	0,80	-45	45	-45	45	10	-10

Tabell V.4.8. Følsomhetsanalyse for klimagassutslipp ved avfallshåndtering 3, limtreet deponeres.

Forutsetning	Reell variasjon i forutsetning		Variasjon i forutsetning i prosent		Endring i resultat i prosent		Endring i resultat i prosent når forutsetning endres med $\pm 10\%$		
	min	basis	max	min	max	min	max	-10%	+10%
Densitet limtre i $\text{kg/m}^3$	500	550	600	-9	9	-9	9	10	-10
Dieselforbruk deponi i MJ/tonn avfall	100	450	800	-78	78	0	0	0	0
El.forbruk deponi i kWh/tonn avfall	-	1	-	-	-	-	-	0	0
Metanpotensiale i kg/tonn treavfall	118	168	218	-30	30	-30	30	10	-10