

Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2022 30 stp
Fakultet for realfag og teknologi

Utvikling av et bærekraftig modulbasert byggesystem; ombruk av restmaterialer og vurdering av klimagassutslipp

Johanne Kolstad

Frode Anker Røsstad

Byggeteknikk og arkitektur

◆◆ Forord

Denne oppgaven er levert som et mastergradsprosjekt i byggteknikk og arkitektur ved Norges miljø og biovitenskapelige universitet (NMBU), fakultet for realfag og teknologi (REALTEK). Arbeidet ble utført i samarbeid med selskapet Omtre AS. Den praktiske delen av arbeidet fant sted i et snekkerverksted i Gamle Mossevei 40 på Ås. Prosjektet ble finansiert av Innovasjon Norge prosjektnummer ilhcta1u77k0.

Vi vil takke professor Thomas K. Thiis ved REALTEK NMBU for interessante og lærerike diskusjoner og for at vi fikk bli en del av fagfeltet. Videre vil vi takke Kristine Nore og Ivar Ragnhildstveit ved Omtre AS for godt samarbeid og veiledning i det praktiske arbeidet. Takk til Hans Falang, eier ved Buskerud Biobrensel DA, og til verksted-innehaver Erik Lund i gamle Mossevei 40. Takk til Anette McLeod for veiledning i skriveprosessen og til Eivind Fonnaas Nilsen for grafisk veiledning. Dere har alle bidratt til å gjøre perioden spennende og veldig lærerik.

Takk til øvrige ved REALTEK NMBU for at dere har vært behjelpelige og hyggelige under hele perioden.

Omtre AS har igangsatt en patenteringsprosess for å sikre seg rettighetene til produktet KLB. Informasjon om produktet som kommer frem i denne masteroppgaven er derfor underlagt taushetsplikt.

NMBU - Norges miljø og biovitenskapelige universitet

Fakultet for realfag og teknologi

Master i byggteknikk og arkitektur

15. mai 2022



Johanne Kolstad



Frode Anker Røsstad

◆◆ Sammendrag

Med mål om å begrense avfallsmengden i byggebransjen, har vi i denne oppgaven samarbeidet med selskapet Omtre AS i utvikling av et byggesystem som lages av restmaterialer etter produksjon av krysslimt tre (KL-tre). Byggesystemet har fått navnet KL-blokk, forkortet til KLB, og består av mindre byggeblokker av KL-tre som holdes sammen av trebaserte sammenføyningsmetoder. Byggesystemets potensiale ble først utforsket gjennom en konseptutviklingsfase bestående av skisse- og designarbeid, bygging av en modell (skala 1:3), og oppføring av en pilotvegg (skala 1:1). Det endelige designet for KLB ble så fastsatt på bakgrunn av erfaringer og observasjoner gjort under konseptutviklingsfasen. Systemet er i hovedsak produsert av KL-tre, og har derfor mange felles egenskaper med dette materialet. I tillegg har KLB egenskaper som kan gjøre det mer attraktivt, blant annet en rask og enkel byggeteknikk. Prinsippet med å oppføre konstruksjoner av blokker er allerede godt anvendt, derfor sammenliknet vi produksjonen av KLB og produktet i seg selv med andre liknende modulbaserte byggesystemer på det europeiske markedet. Sammenlikningen viste et potensiale for redusert energibruk og miljøutslipp dersom produsentene revurderer materialvalg og produksjonsteknikk for disse. For å gjøre kvantitative vurderinger av klimagassutslipp for KLB-systemet undersøkte vi ulike veggkonstruksjoner. Det var først interessant å sammenlikne KLB laget av ombrukte eller resirkulerte materialer med KLB laget av nye materialer. Vi valgte så ut fem typer lastbærende veggkonstruksjoner som på ulike måter er sammenliknbare med KLB. Disse var en vegg av TEWO elementer, bindingsverksvegg i tre med mineralullisolasjon og gips, Leca blokkvegg, vegg av KL-tre og vegg av Stavneblokka. En livsløpsvurdering, eller LCA modell, ble laget for de syv veggdesignene ved å bruke One Click LCA programvare. LCA var i henhold til krav fra EN-15978 og NS 3720, som dekker et «vugge til grav» system. I tillegg undersøkte vi «vugge til vugge» perspektivet som produsenter i dag må ta stilling til ved design av nye produkter. Livsløpsvurderingen ga et sammenlikningsgrunnlag for den totale miljøpåvirkningen gjennom byggemetodenes livssyklus. Å ombruke byggematerialer gir en stor fordel i et klimaperspektiv, og er et skritt i riktig retning mot en mer sirkulær byggebransje.

◆◆ Abstract

With the ambition of limiting the amount of waste from the building industry, we have in this study collaborated with the corporation Omtre in developing a modular building system based on waste material from the production of Cross Laminated Timber (CLT). The building system is named CL-block, with short name CLB, and consists of small building blocks of CLT which are held together by different types of wood joinery. The potential of the building system was first studied in a conceptual phase, which included sketching and design work, building a model (scale 1:3), and building an in-scale pilot wall. The final design of the building system was based on observations and experiences made throughout the course of the conceptual phase. The system is mainly produced of CLT, and for this reason it shares several properties with traditional CLT, however CLB also has additional properties which could make it more attractive, such as a quick and easy method of assembly. The principle of modular construction using blocks is already widely used, we therefore compared the production of CLB and the product itself to similar building systems found on the European market. The comparison showed a potential for improving energy efficiency and reducing environmental emissions if manufacturers revised their choices of materials and production techniques. To perform quantitative evaluations of the greenhouse gas emissions of the CLB system, we investigated different wall construction methods. Firstly, it was interesting to compare CLB based on reused materials with CLB based on new materials. We further picked five different types of load-bearing wall constructions which in different ways were comparable to a CLB wall. These were a wall of TEWO elements, a wood-frame construction wall with mineral wool insulation and gypsum wall cladding, a Leca block wall, a wall of CLT, and a wall made the Stavne block. A Life Cycle Analysis, or LCA model, was made for the seven wall types using the One Click LCA software tool. The LCA was done according to the EN-15978 and NS-3720 standards, which cover the system «Cradle to Grave». In addition, we investigated the «Cradle to Cradle» perspective that manufacturers should consider when designing new products. The Life Cycle Analysis gave a basis of comparison for the total environmental impact throughout the life span of the building techniques. In a climate perspective, to reuse building materials is greatly advantageous, and this is an important step towards a more circular building industry.

◆◆ Figurliste

Figur 1-1. Masteroppgaven...	2	Figur 3-10. Pall med ferdig formatererte KLB.	33
Figur 2-1. Illustrasjon av prosessene (Boye, 2019)...	4	Figur 3-11. Fresing av doble skyvesinker...	34
Figur 2-2. Overforbruksdagen (Earth Overshoot Day, 2022)...	5	Figur 3-12. Enkel skyvesink...	34
Figur 2-3. Avfallshierarkiet (LOOP, 2021)...	6	Figur 3-13. Topp- og bunnsvill under montering...	34
Figur 2-4. En trecelle og vannmengde (Schmidt, 2006)...	8	Figur 3-14. Formateringsprosessen for KLB...	35
Figur 2-5. Relativ krymping (Tronstad & Steiner, 2008)...	8	Figur 3-15. Demonstrasjonsvegger av KLB...	36
Figur 2-6. Fingerskjøt (Gustavsen, 2022)...	10	Figur 3-16. Parallellvegg med sinkskjøter i senter av blokkene.	37
Figur 2-7. Tverrsnitt av trevirket (DCI Engineers, 2017)...	10	Figur 3-17. En standard KLB snittes og settes sammen...	37
Figur 2-8. Livsløpet til et produkt (lca.no, 2022)...	14	Figur 3-18. Øverste rad monteres...	38
Figur 2-9. Faser i en livsløpsvurdering (SINTEF, 2014a)...	15	Figur 3-19. Spesialblokker...	38
Figur 2-10. Fastsetting av produktsystem (SINTEF, 2014b)...	16	Figur 3-20. Ferdig montert hjørnevegg...	38
Figur 2-11. Detalj av TEWO element (SINTEF, 2017)...	23	Figur 3-21. Monteringsprosessen...	39
Figur 2-12. Speedblock standardblokk...	24	Figur 3-22. Horisontalsnitt...	40
Figur 2-13. Detaljtegning av STEKO (OIB, 2019)...	25	Figur 3-23. Horisontalsnitt...	40
Figur 2-14. STEKO Standardmoduler...	25	Figur 4-1. Ulike veggkonstruksjoner/design...	41
Figur 2-15. Stavneblokka (Bramslev & Baarnes, 2012)...	26	Figur 5-1. Målsatte detaljer for spor i KLB...	45
Figur 3-1. Skisse brukt i Omtre AS sin søknad...	28	Figur 5-2. Komponenter i KLB-systemet...	46
Figur 3-2. Modell av byggeblokkssystemet i målestokk 1:3...	29	Figur 5-3. Vegger av KLB med spesialtilpassede blokker...	48
Figur 3-3. Modell av byggeblokkssystemet i målestokk 1:3...	29	Figur 5-4. KLB-EL blokk...	48
Figur 3-4. Skisse av KLB laget i Shapr3D...	30	Figur 5-5. KLB-vegg i 2D (venstre) og 3D (høyre) perspektiv...	49
Figur 3-5. Tilskjæring...	30	Figur 6-1. LCA beregnede totale klimagassutslipp ...	51
Figur 3-6. Vinkelrett sagejigg...	31	Figur 6-2. Oversikt over de ulike veggdesignene prosentvis fordelt i påvirkningskategorier (Tabell 6-3)...	53
Figur 3-7. Fres brukt til å produsere notsporene i blokkene...	32	Figur 6-4. Oversikt over prosentvis fordeling av klimagassutslipp (i kg CO ₂ e) for veggdesignene...	55
Figur 3-8. Sinksporet freses ut på enden av blokkene...	32	Figur 6-5. Klimagassutslipp for veggdesign i "vugge til vugge" system...	56
Figur 3-9. Kantfresing med en Festool OF1010 overhåndsfres med et 45° fresestål. Avbildet: Johanne Kolstad.	33		

◆◆ Tabelliste

Tabell 2-1. Mengde CO ₂ (i kg) som bindes per m ³ trelast av bjørk, furu og gran (Trefokus, 2013).	7
Tabell 2-2. Livsløpsfaser i henhold til EN standard (Norgips, 2020)...	18
Tabell 3-1 Oversikt over KLB av ulike lengder til bygging av pilotvegg, samt ekstra KLB i tilfelle tap under arbeidet.	31
Tabell 4-1. Oversikt over komponent, EPD, andel EPD og materialetetthet for veggdesignene <i>KLB ombruk</i> , <i>KLB ny</i> , <i>TEWO</i> , <i>Tre</i> , <i>Leca</i> , <i>KL-tre</i> og <i>Stavne</i> ...	42
Tabell 4-2. Beregnet klimagassutslipp for transport av KLB materialer.	43
Tabell 4-3. Beregning av klimagassutslipp for produksjonen av KLB.	44
Tabell 5-1. Oversikt over volum og vekt for KLB-standardblokker. Vekt er beregnet ut volumet og en tetthet på 460 kg/m ³ .	45
Tabell 6-1. Livsløpsfaser i henhold til EN standard (Norgips, 2020)...	50
Tabell 6-2. LCA beregnede totale klimagassutslipp i kg CO ₂ e for veggdesignene <i>KLB ombruk</i> , <i>KLB ny</i> , <i>TEWO</i> , <i>Tre</i> , <i>Leca</i> , <i>KL-tre</i> og <i>Stavne</i> , og medberegnete livsløpsfaser i henhold til EN-15978 krav. De ulike fasene er hentet fra Tabell 6-1.	51
Tabell 6-3. Resultatkategorier for forurensingspotensiale i en LCA rapport, der analysen er gjort i henhold til EN-15978 (One Click LCA Ltd, 2021).	52
Tabell 6-4. Totale klimagassutslipp i kg CO ₂ e for veggdesignene <i>KLB ombruk</i> , <i>KLB ny</i> , <i>TEWO</i> , <i>Tre</i> , <i>Leca</i> , <i>KL-tre</i> og <i>Stavne</i> , og medberegnete livsløpsfaser i henhold til NS 3720 krav. De ulike fasene er hentet fra Tabell 6-1.	55
Tabell 6-5. Totale klimagassutslipp i kg CO ₂ e for veggdesignene <i>KLB ombruk</i> , <i>KLB ny</i> , <i>TEWO</i> , <i>Tre</i> , <i>Leca</i> , <i>KL-tre</i> og <i>Stavne</i> , og alle livsløpsfaser. Fasene er ifølge Tabell 6-1.	56

◆◆ Innholdsfortegnelse

Forord	I	2.9.4 Sertifisering	21
Sammendrag	II	2.10 Modulbaserte byggesystemer i tre	23
Abstract	III	3 Utvikling av KLB-konsept	27
Figurliste	IV	3.1 KLB Designfase	27
Tabelliste	V	3.1.1 Skisse/design	28
1 Innledning	1	3.1.2 Modell	29
2 Teori	3	3.2 Pilotvegg	30
2.1 Byggebransjens klimapåvirkning	3	3.2.1 Formatering	30
2.2 Sirkulærøkonomi og ressurstilgang	4	3.2.2 Montering	36
2.3 Avfall og materialutnyttelse	5	3.3 Beregning av varmegjennomgang	40
2.4 Miljø og skogbruk	7	4 Metode for livsløpsvurdering	41
2.5 Tre som byggemateriale	7	4.1 Veggkonstruksjoner og material-sammensetning	41
2.5.1 Utvikling av tre som byggemateriale	9	4.2 Livsløpsvurderingen	43
2.5.2 Krysslimt tre (KL-tre)	9	5 Resultater KLB	45
2.5.3 Modulbaserte byggesystemer av tre	12	5.1 Byggesystemet KLB	45
2.6 Tegneprogrammet Shapr3D	12	5.2 KLB sammenliknet med andre modulbaserte byggesystemer	49
2.7 Varmegjennomgang	13	5.3 Varmegjennomgang for KLB	49
2.8 Livsløpsvurdering (LCA)	14	6 Resultater livsløpsvurdering	50
2.8.1 Forutsetninger for livsløpsvurdering	14	6.1 LCA i henhold til EN-15978 krav	50
2.8.2 Miljøvaredeklarasjoner (EPD)	17	6.2 Klimagassutslipp i henhold til NS 3720 krav	54
2.8.3 Livsløpsfaser	17	6.3 Fra «vugge til vugge»	55
2.8.4 One Click LCA	19	7 Diskusjon	57
2.9 Lover, sertifisering og teknisk godkjenning	20	8 Konklusjon	63
2.9.1 Norsk standard og eurokoder	20	Referanser	64
2.9.2 Teknisk Godkjenning	21	Vedlegg	66
2.9.3 Europeisk teknisk bedømmelse (ETA)	21		

1 INNLEDNING

Menneskers overdrevne, og økende, bruk av økologiske ressurser fører til at jorden vår tappes for større andeler naturlige ressurser enn den klarer å regenerere hvert år. Samtidig øker mengden avfall vi mennesker produserer. Begge disse prosessene bidrar til økte klimagassutslipp og truer plante- og dyreliv. Det blir stadig viktigere at verdensøkonomien endres fra å være lineær til å bli sirkulær og at bevisstheten rundt å ta vare på ressursene som allerede er i omløp øker.

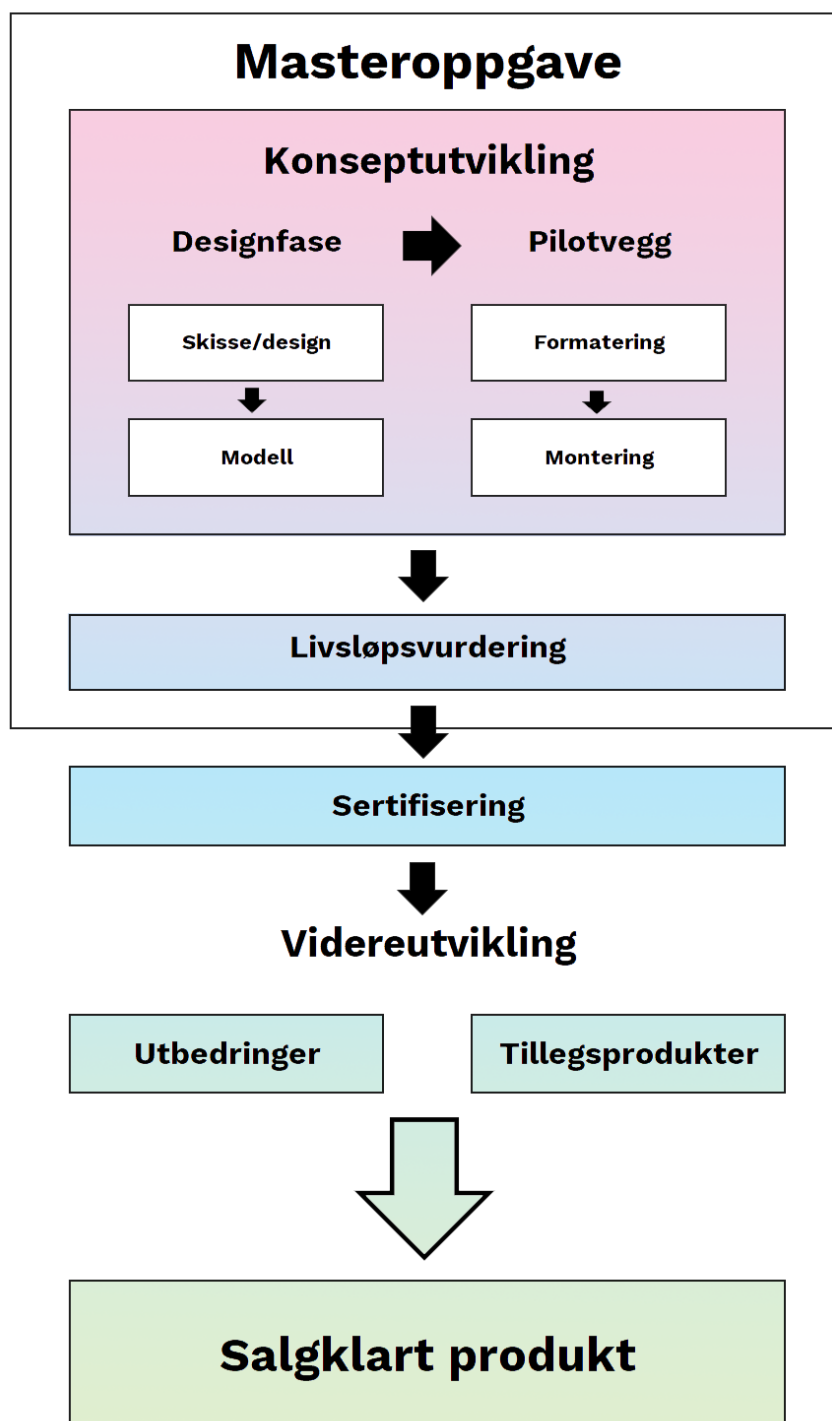
I denne masteroppgaven ligger et utviklingsprosjekt gjennomført av NMBU-studentene Johanne Kolstad og Frode Anker Røsstad i samarbeid med selskapet Omtre AS. Omtre AS operer innen sirkulære verdikjeder i byggenæringen og jobber blant annet med å utvikle løsninger som kan bidra til å holde treprodukter i verdikjeden så lenge som mulig. I lys av behovet for økt sirkularitet i byggebransjen, ble ideen om å benytte restmaterialer som råvare til et nytt byggesystem unnfanget. Avkapp fra fabrikken Splitkon AS, som er markedsledende produsent av krysslimt tre (KL-tre) i Norge, ble valgt som hovedressurs i arbeidet, som ble gjennomført med følgende problemstilling:

Hvordan kan restmaterialer fra produksjon av KL-tre brukes som ressurs til et enkelt og lett håndterbart byggesystem og bidra til å redusere globale klimagassutslipp?

Utviklingsprosjektet resulterte i et innovativt modulbasert byggesystem av KL-tre blokker navngitt KL-blokker, forkortet til KLB. Etter skissering av design i en designsfase (Figur 1-1), ble det laget en modell i skala 1:3 som la grunnlag for videreutvikling av enkelte deler i systemet. I neste fase (Figur 1-1) ble KLB brukt til å bygge en pilotovegg i skala 1:1. Erfaringer fra disse prosessene ble så brukt til å justere og ferdigstille designet til KLB-systemet. Videre i masterarbeidet ble KLB og andre mer tradisjonelle byggemetoder vurdert i en livsløpsvurdering (Figur 1-1), for å utforske deres totale klimagassutslipp gjennom et livsløp. Byggesystemet KLB ble også sammenliknet med andre liknende modulbaserte byggesystemer av tre, og ulike aspekter ved systemene ble diskutert.

Før KLB-systemet kan settes i produksjon og selges på det europeiske markedet, må det godkjennes for bruk. I oppgaven ser vi også på fremgangsmåter for sertifisering og undersøker hvilke egenskaper som må dokumenteres for at det skal fremligge en offisiell godkjenning. Til slutt gjør vi oss noen tanker rundt fremtidsutsiktene til KLB.

Figur 1-1. Masteroppgaven kan overordnet deles inn i to hoveddeler: konseptutvikling for det nye byggeproduktet og livsløpsvurdering for produktet. Først ble en designfase gjennomført med ideutvikling gjennom skisse/design, og deretter produksjon av en modell i målestokk 1:3. Videre ble det bygget en pilotvegg av produktet i målestokk 1:1. Byggefasen bestod av formatering og tilpassinger frem mot montering. Etter konseptutviklingen ga livsløpsvurderingen et bilde av det nye produktets miljøpåvirkning. Byggeproduktet kan så videreutvikles og etter hvert ferdigstilles for markedet i et trinn der sertifiseringer og tekniske godkjenninger tillegges. På dette stadiet er det også nyttig og viktig å gå igjennom erfaringer fra arbeidet og vurdere eventuelle utbedringer og utvikling av tilleggsprodukter som kan presenteres sammen med salgsklart ferdig produkt.



2 TEORI

2.1 Byggebransjens klimapåvirkning

FNs klimaprogram la i 2020 frem en løsning på den globale klimakrisen. Løsningen presenterer seks forskjellige utslippssektorer som til sammen kan kutte CO₂-utslipp tilstrekkelig til at målsetningene i den internasjonale Parisavtalen oppnås. Avtalen etablerer et mål om å begrense global oppvarming med minst 1,5 °C. De seks sektorene er: 1) Jordbruk og matproduksjon, 2) Energibruk, 3) Industri, 4) Transport, 5) Skoger og arealbruk, og 6) Bygninger, byer og konstruksjoner (UNEP, 2021).

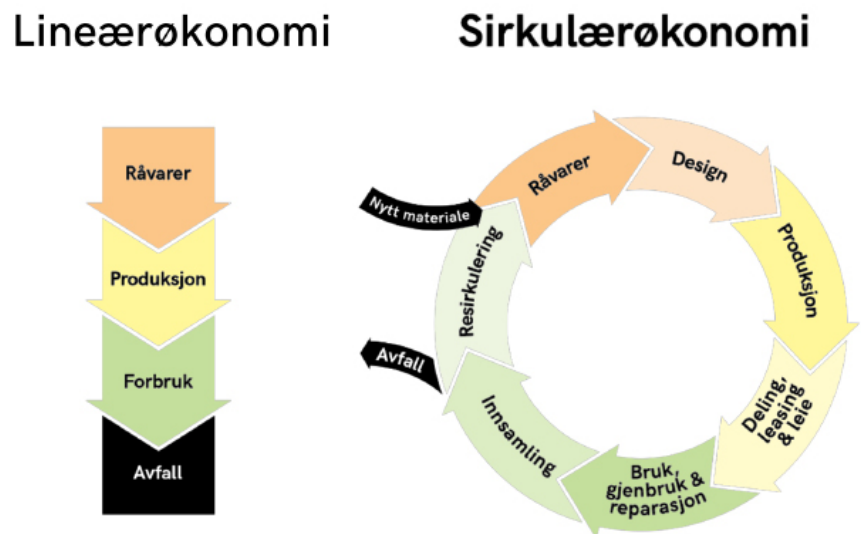
Bygningsindustrien er ansvarlig for store deler av globale klimautslipp og blir ofte omtalt som «40 %-industrien» (Bygg21, 2018). FNs klimaprogram bekrefter i sin «Globale statusrapport for klimaet» fra 2021 at 37 % av globale CO₂-utslipp kommer fra bygnings- og konstruksjonssektoren (UNEP, 2021). Den stadig økende verdensbefolkningen og andelen mennesker som lever utenfor ekstrem fattigdom fører til krav om flere bygninger (FN-sambandet, 2020; FN-sambandet, 2021). For å oppfylle behovet for nye bygg og samtidig kutte utslippene må byggesektoren gjennomgå store endringer og utvikling de neste tiårene.

Grønn Byggallianse i Norge presenterer i sin «Klimakur for bygg og eiendom» fem konkrete tiltak som kan kutte utslipp i byggesektoren. Blant disse er prinsippene om å rive mindre, å ombruke flere materialer og å velge løsninger og byggevarer som gir lavere utslipp i et livsløpsperspektiv (Bygg21, 2018). Stål og betong har unike strukturelle egenskaper, men produksjonen av disse materialene er ekstremt energikrevende. Globalt står disse to materialene for 21 % av verdens klimagassutslipp, der den største delen er fra konstruksjoner. Likevel er armert betong det mest brukte materialet til oppføring av bolig- og industribygg i de fleste deler av verden (UNEP, 2018).

2.2 Sirkulærøkonomi og ressurstilgang

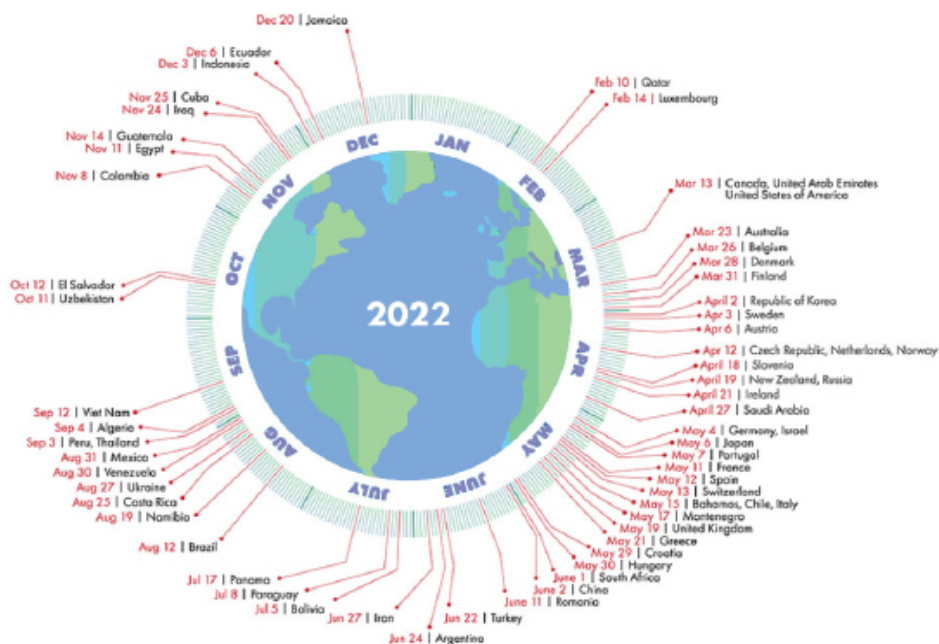
Verdens naturressurser er under et stort press, og for å hindre irreversible endringer i klimaet må naturen og miljøet brukes mer effektivt slik at behovet for nye materialer reduseres (Ekins et al., 2019). I en sirkulær økonomi må produktene vare så lenge som mulig, og de må repareres, oppgraderes og gjenbrukes i høyest mulig grad, slik at verdiene i disse holdes i næringskjeden så lenge som praktisk og økonomisk mulig. Når direkte ombruk av produktet ikke lenger er mulig bør de ulike komponentene produktet består av gjenvinnes og brukes som råvarer i en ny produksjonslinje (Klima- og miljødepartementet, 2021). Den tradisjonelle markedsøkonomien har vært karakterisert som lineær, der produksjon og varer følger en rett linje fra råstoff, til produksjon, konsum og til slutt avfall (Nilsen, 2022). I en slik lineær økonomi blir overskudds- eller restmaterialer behandlet som avfall, noe som gjør at andelen avfall øker i takt med forbruket. I en sirkulær økonomi blir avfall i stedet anvendt som ressurser til nye materialer, og ofte gjenbrukt flere ganger. Dette medfører at andelen råvarer som må tas fra jordas ressurslager reduseres. Figur 2-1 viser en illustrasjon av fasene i en lineær og sirkulær økonomi.

Figur 2-1 Illustrasjon av prosessene i en lineær og sirkulær økonomi (Boye, 2019). I en lineærøkonomi (til venstre) går råvarer (oransje pil) gjennom en produksjonsfase (gul), og etter ferdig forbruk (grønn) blir dette kastet som avfall (sort). I en sirkulærøkonomi (til høyre) blir råvarer designet (rosa) og produsert (gul) for å tåle mer, eller for å kunne ombrukes, og forbruksfasen bygger på flere har nytte av hvert produkt (lysegul) før det gjenbrukes eller repareres (grønn), samles inn (lys grønn) og resirkuleres (lys blå) og mesteparten går inn i en ny livssyklus. I den sirkulære økonomien kreves mindre nytt materiale og det produseres mindre avfall sammenliknet med lineærøkonomien.



For å tydeliggjøre menneskenes ekstravagante ressursbruk markerer overforbruksdagen, «Earth Overshoot Day», at menneskers krav til økologiske ressurser og tjenester overskrider andelen jorda har kapasitet til å regenerere i løpet av et år. Beregninger viser at overforbruksdagen i 1970 falt på 30. desember, i 2021 var datoen fremskyndet til 29. juli. Forbruket varierer over hele verden, det kan derfor beregnes hvilken dag overforbruksdagen vil falle på for ulike land. Dersom hele jordas befolkning hadde levd som i det norske velferdssamfunnet ville dagen i 2022 kommet allerede 12. april (Global Footprint Network, 2022). Figur 2-2 illustrerer variasjonen i forbruk for mange av verdens land, ved å plassere de enkelte landene og deres respektive dato for overforbruksdagen i et årshjul.

Figur 2-2 «Country Overshoot Day», overforbruksdagen i 2022 for ulike land i verden plassert på et årshjul (Earth Overshoot Day, 2022).



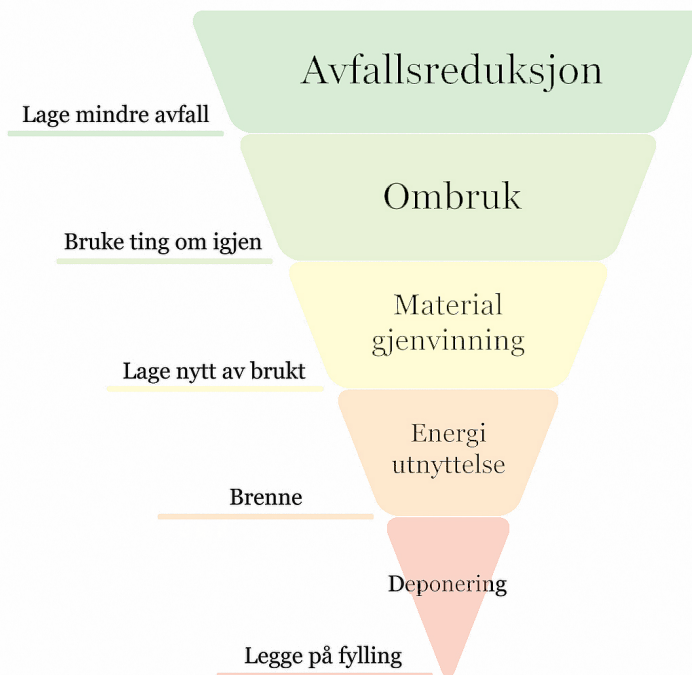
I bygge-, anleggs-, og eiendomsnæringen (BAE-næringen) er det en økende vektlegging på sirkulære og klimavennlige bygg. Det viktigste for å redusere ressursbruken, utslippene og avfallet i næringen er å forebygge gjennom bedre vedlikehold og økt ombruk av eksisterende bygg og areal, samt mer materialeffektiv bygging av konstruksjoner som varer lenger (Klima- og miljødepartementet, 2021).

Futurebuilt er et innovasjonsprogram med målsetning å vise at det er mulig å utvikle en bærekraftig og attraktiv nullutslippsby, gjennom blant annet forbildeprosjekter av enkeltbygg eller byområder. I programmet defineres sirkulære bygg som «Et bygg som legger til rette for ressursutnyttelse på høyest mulig nivå, og består av minst 50 % ombrukte og ombrukbare materialer og komponenter» (FutureBuilt, 2019). Et av de mest ambisiøse sirkulærprosjektene innen byggebransjen er Kristian Augusts gate 13 i Oslo, der et eksisterende kontorbygg ble rehabilitert med nytt på- og tilbygg. Prosjektet ble gjennomført med mellom 89 og 98 % lavere klimautslipp for de ombrukte elementene og 70 % lavere utslipp for bygget i sin helhet (dibk, 2021).

2.3 Avfall og materialutnyttelse

Overgangen fra lineær til sirkulær økonomi avhenger av menneskers tilnærming til avfall. Avfallshierarkiet angir nivåer for håndtering av avfall. Figur 2-3 viser de ulike nivåene i avfallshierarkiet, også kjent som avfallspyramiden. Den illustrerer prioriteringene i avfallspolitikken i Norge og EU sitt rammedirektiv for avfall. Målsettingen er at mest mulig avfall skal behandles nær toppen av hierarkiet med avfallsreduksjon, ombruk og materialgjenvinning (LOOP, 2021).

Figur 2-3. Avfallshierarkiet. Ulike nivåer for håndtering av avfall der målet er at mest avfall behandles så nærme toppen av pyramiden som mulig (LOOP, 2021).



Ifølge rapporten «Samfunnsøkonomisk analyse av redusert avfall i byggebransjen» utført på vegne av Direktoratet for byggkvalitet i 2020 (Ibenholt et al., 2020), er byggenæringen en av enkeltstående næringer som genererer størst andel av Norges samlede avfall, og andelen har økt de siste årene. For å redusere klimagassutslippene må bransjen, i tråd med avfallshierarkiet, i større grad redusere avfallet, øke ombruket og øke materialgjenvinningsgraden. Ifølge rapporten er avfallskutt både bedrifts- og samfunnsøkonomisk. I tillegg er avfallskutt mer lønnsomt enn ombruk og materialgjenvinning, mye grunnet regelverk og et lovverk som må utvikles i samråd med byggenæringen fordi det i mange tilfeller dessverre begrenser gjenbruk av byggevarer.

I 2020 ble det registrert 267 tusen tonn treavfall fra byggeaktivitet i Norge, hvorav 251 tusen tonn av dette blir benyttet til energiutnyttelse. Så mye som 110 tusen tonn av treavfallet kommer fra nybygging, resten av avfallet kommer fra riving og rehabilitering. En stor andel av avfallet som kommer fra nybygging kommer direkte fra produksjon av treprodukter (SSB, 2020).

For å redusere utslipp fra avfallssektoren i bygg og eiendomsbransjen må det innføres tiltak for å redusere avfall, og tiltak for gjenvinne materialer framfor å forbrenne og deretter benytte systemer for karbonfangst på avfallsanleggene (Bygg21, 2018).

I bygge- og eiendomsbransjen er det store muligheter for økt ombruk. For å få til dette må byggevarer designes for å ombrukes, og det må bygges på måter som tillater demontering og gjenbruk av materialer, for eksempel ved bruk av modulbaserte løsninger (Klima- og miljødepartementet, 2021).

2.4 Miljø og skogbruk

Tre er et biologisk materiale og et fornybart materiale, forutsatt at det kommer fra en bærekraftig forvaltet skogsdrift. Gjennom fotosyntesen tar trær opp CO₂ fra omgivelsene, lagrer karbon og frigir oksygen. Når trær hugges og omgjøres til byggematerialer vil karbonet forbli lagret i produktene (Trefokus, 2013). Tabell 2-1 viser en oversikt over mengden CO₂ bundet opp per m³ trelast for treslagene bjørk, furu og gran, trelast som benyttes mye i Norge.

Tabell 2-1. Mengde CO₂ (i kg) som bindes per m³ trelast av bjørk, furu og gran (Trefokus, 2013).

Treslag	kgCO ₂ /m ³
Bjørk	920
Furu	810
Gran	700

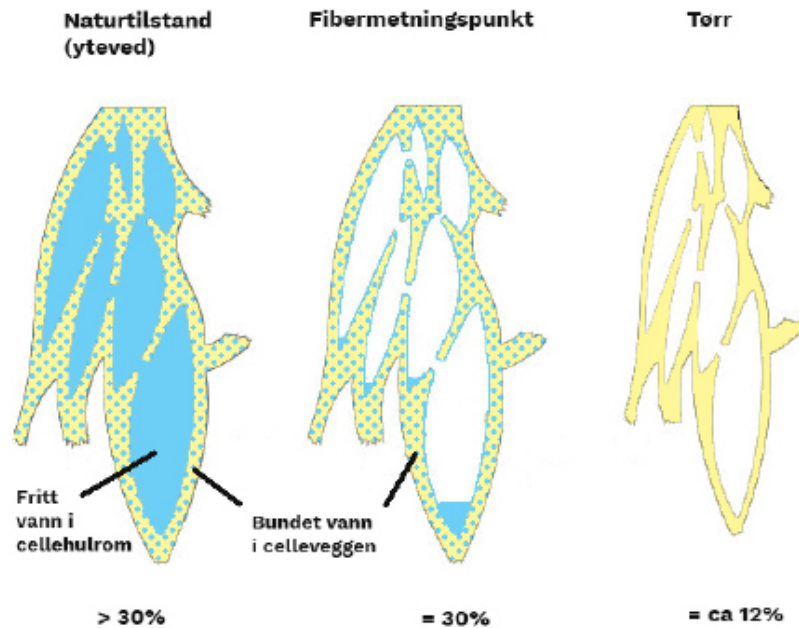
Bruk av tre som konstruksjonsmateriale bidrar til å redusere globale CO₂-utslipp. Dette er fordi karbon fra omgivelsene tas opp av trær gjennom fotosyntesen og lagres helt til treet brytes ned (Lang, 2019). I tillegg kan trær erstatte andre materialer som er mer CO₂-krevende å produsere, som betong, mur og stål (Byggeindustrien, 2013).

For å utnytte treet sine gode egenskaper bør driften av skogen gjennomføres på bærekraftig vis slik at det er tilstrekkelig med ressurser og tilvekst. Norges årlige skogsavvirkning for salg/industriformål viser hvor intensivt skogbruket drives. Tilveksten indikerer potensialet for fremtidig tilgang på tømmer. Dersom avvirkningen ikke overskrider tilveksten over tid sikres et bærekraftig skogbruk. I perioden 2016 – 2020 var brutto tilvekst uten bark på 21,1 mill m³ mens skogavvirkningen uten bark bare var på 13,7 mill m³. Altså tilsvarte avvirkningen kun 65 % av nettotilveksten, noe som medførte at Norges skoger i denne perioden vokste med ca. 7,8 mill m³ per år (Svensson & Dalen, 2021).

2.5 Tre som byggemateriale

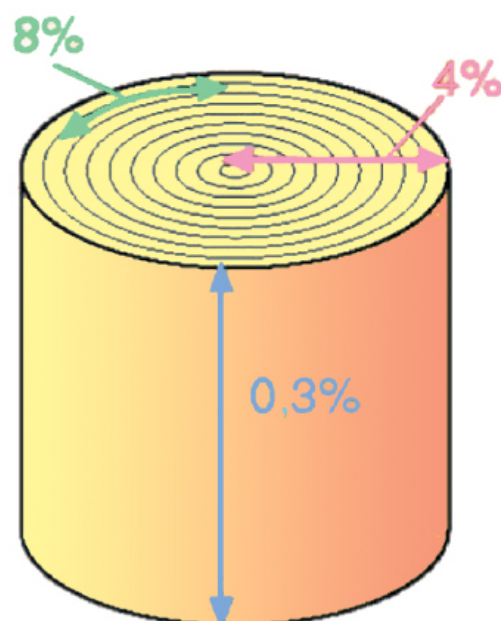
Tre er et hygroskopisk materiale, som betyr at det tar opp og gir fra seg fuktighet i takt med relativ fuktighet i lufta rundt. Cellene i tre består av tomrom omringet av cellevegger av flere sjikt. Når tre tar til seg fuktighet fylles først celleveggen med vann, og når celleveggen har tatt opp all fuktighet den har kapasitet til er fibermetningspunktet nådd. Etter dette fylles hulrommet i midten av cellen. Prosessen er illustrert i Figur 2-4. Når tre cellene tar til seg fuktighet utvides trematerialet, mens når omgivelsene blir tørrere frigir cellene i treet fuktighet og materialvolumet minker. Disse fenomenene kalles henholdsvis svelling og krymping.

Figur 2-4. En trecelle og vannmengde ved forskjellig luftfuktighet vist i tre ulike faser. Celleveggen er vist i gul farge, fritt vann i cellehulrom er vist i lys blått, bundet vann som blå prikker. Trefuktighet er oppgitt i prosent under hver fase (Schmidt, 2006).



Krymping og svelling foregår i forskjellig grad avhengig av orientering på fibre. En trecelle krymper mest langs årringene, i tangentiell retning. For gran og furu vil krympingen tangentielt være på ca. 8 %. På tvers av årringene, i radiell retning, krymper trevirket omtrent halvparten av tangentiell retning og da ca. 4 %. I lengderetning utgjør krympingen kun 0,3 %. Figur 2-5 illustrerer krympingen i de forskjellige retningene fra fibermetningspunktet til tørt virke, noe som for gran og furu gir en total volumkrymping på 12 % (Tronstad & Steiner, 2008). Ved produksjon av trebaserte produkter er det svært viktig med et stabilt klima gjennom formatteringsprosessen for at deformeringer og påfølgende utfordringer ved montering av produktet unngås.

Figur 2-5. Relativ krymping i ulike retninger for gran og furu. 4 % i radiell retning (rosa pil), 8 % i tangentiell retning (grønn pil) og 0,3 % i aksiell retning (blå pil) (Tronstad & Steiner, 2008).



I tillegg til å ha gode strukturelle og mekaniske egenskaper er det vist at tre påvirker mennesker positivt på et psykologisk plan (Demattè et al., 2018). Mennesker føler seg mer komfortable og fylles med flere positive følelser når de er omgitt av tre fremfor murpuss, gips eller andre monotone overflater.

2.5.1 Utvikling av tre som byggemateriale

Tre har tradisjonelt vært et viktig byggemateriale i Norge. Over hele landet finnes det konstruksjoner i tre som ble oppført i middelalderen som er bevart frem til i dag. Mest kjent er stavkirkene og vikingskipene (Brudevoll, 2018; Tschudi-Madsen, 2022). I tillegg er Norge er et av landene i verden som har bevart flest tømmerhus (Berg, 1997). I de første laftekonstruksjonene ble det brukt hele stokker, men mot slutten av 1700-tallet ble vegger av reisverk introdusert som en ny byggemetode. Reisverksbyggene var materialbesparende i forhold til laftekonstruksjonene og hadde fordeler med tanke på krymping og svelling, da lastens tyngdepåvirkning påføres parallelt med fiberretningen der treet har størst styrke (Flatland, 2007). I 1941 ble det tillatt å bruke bindingsverk med stendere av 2 x 4 tommer (ca. 50 x 100 mm) med senteravstand på 2 fot (ca. 60 cm) (Gunnarsjaa & Rygh, 2021). Denne byggemetoden ble svært populær fra begynnelsen av 1950-tallet da moderne isolasjonsmaterialer som mineralull kom på markedet, og i dag er den en vanlig byggeteknikk for norske bolighus (Edvardsen & Ramstad, 2014).

I senere tid førte ingeniørkunnskap og ny teknologi til utviklingen av massivtre (Evans & Flæte, 2009). Massivtre er planker eller lameller av tre som er festet sammen ved bruk av spiker, skruer, lim, tredybler eller stålstag. Massivtre utnytter treet's egenskaper bedre enn tradisjonelt bindingsverk og kan benyttes der man tidligere brukte syntetiske byggematerialer som betong, stål og murverk (FPInnovations, 2019).

2.5.2 Krysslimt tre (KL-tre)

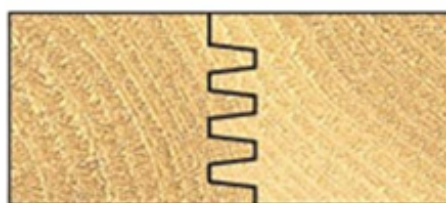
Krysslimt tre (KL-tre) er et av byggematerialene som faller under paraplybetegnelsen massivtre. KL-tre består av flere lag med planker som limes sammen til store elementer, noe som gir et svært stivt, sterkt og samtidig lett materiale (Treteknisk, 2013). Bruken av KL-tre har økt betraktelig de siste 20 årene (Lier & Aasheim, 2020).

KL-tre produseres i store paneler. Størrelsen avhenger av produksjonsstedets dimensjonering og maskinell kapasitet. Normalt er panelene mellom 1 og 3 m brede og 16 m lange, men enkelte steder kan elementer produseres i opp til 4,8 m bredder og 30 m lengder (Gustafsson et al., 2019). Panelenes tykkelser er normalt mellom 80 og 300 mm, og består av 3, 5, 7 eller 9 sjikt. Sjiktene kalles lameller. Tykkelsene og fasthetsklassen på lamellene kan variere og bestemmes av elementets funksjon og eventuelle krav til belastning,

stivhet, brannmotstand, vibrasjon eller varmegjennomgangsmotstand (Treteknisk, 2013). I prinsippet kan krysslimte elementer bygges opp med så mange sjikt som nødvendig. Splitkon AS er markedsledende leverandør av massive trekonstruksjoner i Norge. Selskapet leverer KL-tre i mange dimensjoner, blant annet 120 mm tykkelse, som produseres med 3 eller 5 lameller. Lamellbreddene er de samme for alle 120 mm tykke elementer. For 3-lags er alle lamellene 40 mm tykke, og for 5-lags er yttersjiktene 30 mm tykke, mens de tre indre sjiktene er 20 mm hver (SINTEF, 2019).

KL-tre panelene produseres av trelast som vanligvis kommer ferdig tørket og styrkeklassifisert fra et sagbruk til fabrikken. Først blir disse fingerskjøtt til passende lengder ved at utfreste «fingre» som passer i hverandre i enden av virkesstykker påføres lim, før emnet settes under press til limet har herdet (Figur 2-6).

Figur 2-6. Fingerskjøt (Gustavsen, 2022). Utfreste «fingre» passer i hverandre i enden av to virkesstykker.



Ønsket antall emner blir deretter lagt ut over en stor flate og lim påføres på oversiden før emnene presses sammen med over- og underliggende lag med emner. Som vist i Figur 2-7, tverrsnitt av et KL-tre element, er alle lagene rotert 90° i forhold til hverandre før liming. I noen produksjoner blir lamellene også limt kant i kant i yttersjiktene. Dette kalles kantliming og gir tettere elementer med lavere innbrenningshastighet (Treteknisk, 2013).

Figur 2-7. Tverrsnitt av trevirkets fiberretning i KL-tre (DCI Engineers, 2017). Pilene indikerer fiberretning.



Når panelene er ferdig limt og presset videreføres disse til en CNC maskin som skjærer rette kanter og skjærer ut hull til blant annet tekniske installasjoner. I denne prosessen blir åpninger for dører og vinduer også skjært ut (Gustafsson et al., 2019).

I produksjonen av KL-tre blir de sterkeste bordene brukt i sjiktene hvor spenningene og belastningen er størst. I sjiktene der belastningen er lavere kan materialer med lavere styrkekarakteristikk benyttes (Gustafsson et al., 2019). I Norge benyttes standardiserte fasthetsklasser for konstruksjonsvirke merket med bokstaven C og et påfølgende tall som angir karakteristisk bøyespennning oppgitt i N/mm² (Newton per kvadratmillimeter) (SINTEF, 2015). I et element som skal anvendes som etasjeskiller brukes normalt lameller med fasthetsklasse C24 eller C30 i de ytterste sjiktene. I de indre sjiktene kan tre med lavere fasthetsklasser benyttes, som C18 eller C14. Dette er fordi etasjeskillere og andre dekkeelementer vil få størst belastning i de ytterste sjiktene. Å redusere styrken til indre sjikt vil derfor ha svært liten betydning for den totale bøyestivheten til elementet (Treteknisk, 2013). At produksjonen muliggjør bruk av flere fasthetsklasser er en av fordelene med KL-tre. Ressurser fra deler av treet som tradisjonelt ville gått direkte til produksjon av biovarme eller andre prosesser som fjerner trevirke fra sirkulærkjeden, utnyttes her på en mer bærekraftig måte.

KL-tre har mange liknende egenskaper med andre treprodukter. På grunn av treet ortotropiske egenskaper, det at treet i seg selv ikke har jevne mekaniske og termiske egenskaper i alle retninger, vil styrken til et KL-tre element avhenge av vinkelen mellom kraftretning og fiberretning. Med en større andel fibre parallelt med kraftpåføringen vil elementet være sterkere. Styrken avhenger også av fuktighet. Ved økt fuktighet senkes styrken. Styrken reduseres også med tid under konstant kraftpåføring som tyngdebelastning, og den kan variere fra element til element (Gustafsson et al., 2019). Tettheten til KL-tre avhenger av treslaget det er bygd opp av. Harde treslag som eik og ask har større tetthet enn lettere mer porøse treslag. Som eneste leverandør av KL-tre i Norge bruker Splitkon gran og furu til sin produksjon (Splitkon, 2020). Dette er relativt lette og porøse treslag (SINTEF, 2019). KL-TRE fra Splitkon har en tetthet på 460 kg/m³ i henhold til bedriftens miljødeklarasjon. Varmeledningsevnen til KL-tre er 0,13 W/mK (Watt per meter Kelvin) (Gustafsson et al., 2019).

Avkapp som produseres når åpninger til dører, vinduer, trappeganger og andre kanaler skjæres ut varierer i størrelse, men er gjerne flere kvadratmeter i store. Mengden avkapp for et enkelt prosjekt kommer an på det ferdige prosjektets design og utførelse. Særlig for bygg der fasader skal inneholde mange vinduer med en dynamisk plassering, eller ved oppsetting av veggelementer til en korridor med mange dører tett på hverandre, så kan andelen avkapp bli store. Det er også endel produksjonssvinn i form av kapp fra fingerskjøting og sagflis fra overflatebehandling. Andelen avfall fra produksjonen av KL-tre estimeres til mellom 15 % og 20 % av massen trevirke som ankommer en produksjonsfabrikk (Nore, 2022). Splitkon AS leverer om lag 1500 og 2000 m³ avkapp til Buskerud Biobrensel DA årlig for produksjon av pellets (Falang, 2022).

2.5.3 Modulbaserte byggesystemer av tre

Modulbaserte byggesystemer av tre består av fabrikkproduserte bygningskomponenter eller moduler som transporteres til og oppføres på en byggeplass. Begrepet omhandler dermed alt fra store KL-tre elementer til små byggeklosser i systemer som kan håndteres av en eller flere personer. Modulbaserte byggesystemer har mange fordeler sammenliknet med tradisjonell byggeteknikker, blant annet er oppføringsprosessen raskere og anses å være tryggere, den har større forutsigbarhet i forhold til fremdrift, stiller krav til færre arbeidere på byggeplass, generer mindre avfall og har ofte et mindre klimaavtrykk (Ferdous et al., 2019). Enkelte av disse byggesystemene kan oppføres uten mekaniske festemidler som skruer og lim, noe som åpner for enkel demontering og gjenbruk av komponenter.

Arbeidsmiljøloven §4-4(2) sier at det skal legges til rette for å unngå tunge løft i arbeidet, og arbeidstilsynet anbefaler derfor at enkeltløft på mer enn 25 kg unngås (Arbeidstilsynet, 2022; Lovdata, 2006). Flere eksisterende modulbaserte byggesystemer består av hovedkomponenter som veier mindre enn 25 kg (STEKO, 2022; TEWO, 2022).

2.6 Tegneprogrammet Shapr3D

Shapr3D er et 3D-modelleringsverktøy lansert i 2016 for blant annet industrielle designere, ingeniører og produsenter. Shapr3Ds utdanningslisens er gratis for studenter, lærere og fakultetsmedlemmer ved akkrediterte utdanningsinstitusjoner. Programmet tillater brukeren å tegne former med høy presisjon i et todimensjonalt (2D) perspektiv og derfra trekke volumer ut av 2D-figurene. Volumene kan redigeres i både 2D og 3D, og tilpasses etter de mål og vinkler brukeren ønsker. Programmet kan også brukes til å produsere detaljerte tegninger av et enkelt objekt eller forskjellige objekter sammensatt. Tegningene kan målsettes og redigeres i programmet, og eksporteres i forskjellige dokumentformater slik som PDF (Portable Document Format) som er blitt det mest vanlige formatet for utveksling av dokumenter på en pålitelig måte uavhengig av programvare, maskinvare og operativsystemer. Et annet format er DWG (AutoCAD Drawing Database-fil) som er kompatible med mange 3D-tegne- og CAD-programmer (Computer Aided Design - dataassistert konstruksjon). Volumer fra Shapr3D kan eksporteres direkte til 3D-scanner, eller eksporteres som 3D-modeller til andre CAD-programmer, for eksempel for implementering i bygningsfysiske simuleringer (Shapr3D, 2021).

2.7 Varmegjennomgang

Varmekonduktiviteten eller varmeledningsevne, videre betegnet som λ eller λ -verdi, er avhengig av et materiales evne til å lede varme. Høyere λ -verdi gir bedre varmeledningsevne (Thue, 2016). Varmemotstand R (1) angir forholdet mellom tykkelsen til et materialsjikt og materialets varmeledningsevne og sier noe om størrelsen på varmestrømmen gjennom materialet.

$$R = \frac{d}{\lambda} \left[\frac{m^2K}{W} \right] \quad (1)$$

Varmegjennomgangskoeffisienten eller U -verdi angir hvor mye varme som vil strømme per areal ved konstant temperaturforskjell mellom varm og kald side av en bygningsdel i en konstruksjon per tidsenhet, målt i watt (W), (2) (SINTEF, 2020). Det er altså et mål på hvor lett eller vanskelig bygningsdelen slipper gjennom varme. En høy U -verdi betyr at bygningsdelen har en dårlig varmemotstand og leder varme godt, noe for eksempel en kuldebro vil gjøre. U -verdien kan beregnes ved hjelp av beregnet varmemotstand R .

$$U = \frac{1}{R} \left[\frac{W}{m^2K} \right] \quad (2)$$

En konstruksjon består som oftest av flere sjikt som har ulik varmemotstand, og det er viktig at alle varmeovergangsmotstander er med i beregningen av konstruksjonens totale U -verdi (3) (Edvardsen & Ramstad, 2014). En total varmemotstand for en konstruksjon, R_{TOT} , er summen av varmemotstanden til hvert enkelt sjikt som konstruksjonen er bygd opp av, der R_{si} representerer varmetapet ved overgangen mellom innvendig luft og konstruksjonen og R_{se} representerer varmetapet ved overgangen mellom konstruksjonen og utvendig luft.

$$U_{TOT} = \frac{1}{R_{TOT}} = \frac{1}{R_{si} + R_1 + R_2 \dots + R_{se}} \quad (3)$$

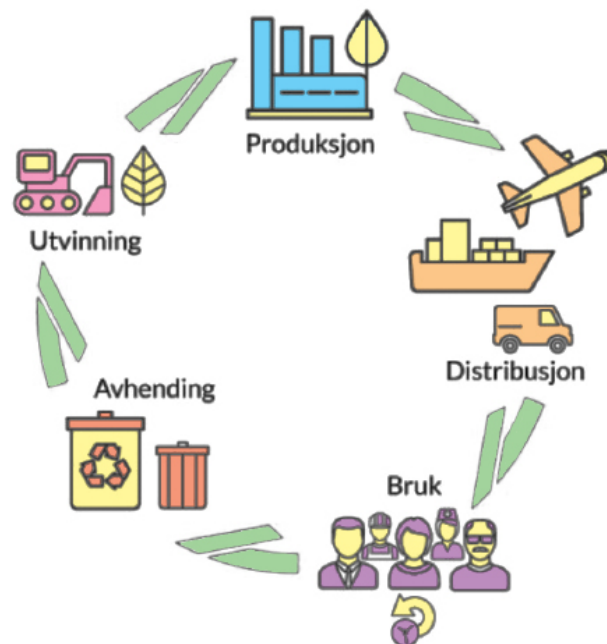
Byggteknisk forskrift (TEK 17) beskriver i delen som omhandler Energi (kapittel 14) hvilke tekniske krav til energieffektivitet som stilles til bygninger i Norge (dibk, 2017). For yttervegger, som del av et småhus eller en boligblokk, kan kravene oppfylles som et alternativ til det totale kravet «Krav til energieffektivitet» (§ 14-2) med U -verdi mindre eller lik $0,18 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ (Watt per kvadratmeter kelvin). I «Minimumskrav til energieffektivitet» (§ 14-3) stilles det minimumskrav til at yttervegger i alle bygninger, unntatt boligbygning og fritidsbolig med laftede yttervegger, skal ha U -verdi mindre eller lik $0,22 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

2.8 Livsløpsvurdering (LCA)

2.8.1 Forutsetninger for livsløpsvurdering

LCA, som er en forkortelse for Life Cycle Assessment, er en livsløpsvurdering eller livssyklusanalyse, en systematisk analyse med klart definerte mål, systemgrenser og forutsetninger (Nestaas & Grønmo, 2020). LCA brukes som et verktøy til å vurdere miljøkonsekvenser i form av klimagassutslipp til et produkt eller en aktivitet. Klimagassutslipp måles i CO₂-ekvivalenter (CO₂e), der de ulike klimagassene virker med ulik styrke (Dramstad et al., 2015). Ved omregning er hver av klimagassene vektet ut fra deres globale oppvarmingspotensial i et hundreårsperspektiv. Her er potensialet til CO₂ satt til 1, mens for eksempel potensialet til metan (CH₄) er på 25, lystgass (N₂O) på 298, og ulike perfluorkarbon (PFK) gasser med svært høye verdier (CF₄ på 7 390 og C₂F₆ på 12 200) (Miljødirektoratet, 2019). Vurderingen bygger på en standardisert metode som tar for seg alle fasene av et produkts livsløp, fra uttak av råmaterialer, produksjon, distribusjon, bruk, gjenbruk, vedlikehold, resirkulering, helt frem til endelig kassering (Nestaas & Grønmo, 2020). Figur 2-8 viser en illustrasjon av et produkts livsløp.

Figur 2-8. Livsløpet til et produkt (lca.no, 2022). Livsløpet begynner med produksjon av ferdige produkter eller komponenter som skal settes sammen, disse blir distribuert til aktuelt sted, før de går gjennom en bruksfase. Etter bruk blir relevant avfallsbehandling utført og ressurser utvinnes slik at disse kan gå inn i en ny produksjon, i tråd med sirkulære prinsipper.

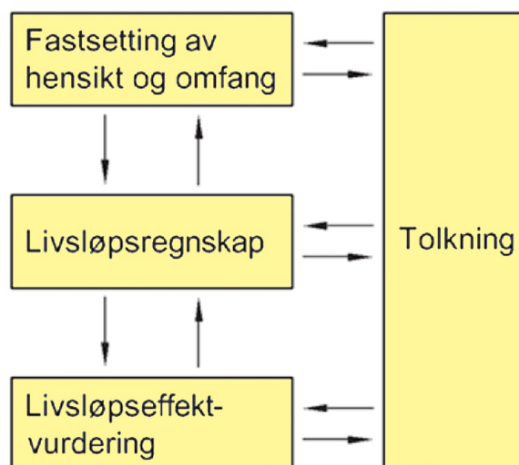


I tillegg til hovedmaterialene selve produktet opprinnelig er laget av, blir også tilleggsmaterialer og energikilder som brukes til produksjon, transport og vedlikehold undersøkt og tatt hensyn til i beregningene (lca.no, 2022). Gjennom en LCA av et produkt gis et innblikk i hvilke negative miljøkonsekvenser som er mest fremtredende og hvor i livsløpet disse oppstår. Kunnskapen om negative miljøkonsekvenser kan så brukes til å effektivisere ressursbruken og å gjøre produktene grønnere og mer bærekraftige. Resultatene fra en LCA brukes ofte som grunnlag i opprettelsen av en miljødeklarasjon (NORSUS, 2022).

De generelle standardene som utgjør det overordnede rammeverket for livsløpsanalyser er standardene NS-ISO 14040:2006 «Miljøstyring-Livsløpsvurdering-Prinsipper og rammeverk» (StandardNorge, 2006a) og NS-ISO 14044:2006 «Miljøstyring-Livsløpsvurderinger-Krav og retningslinjer» (StandardNorge 2006b).

I følge NS-ISO 14040 skal en LCA inneholde fastsetting av hensikt og omfang, livsløpsregnskap, livsløpseffektvurdering og tolkning (Figur 2-9).

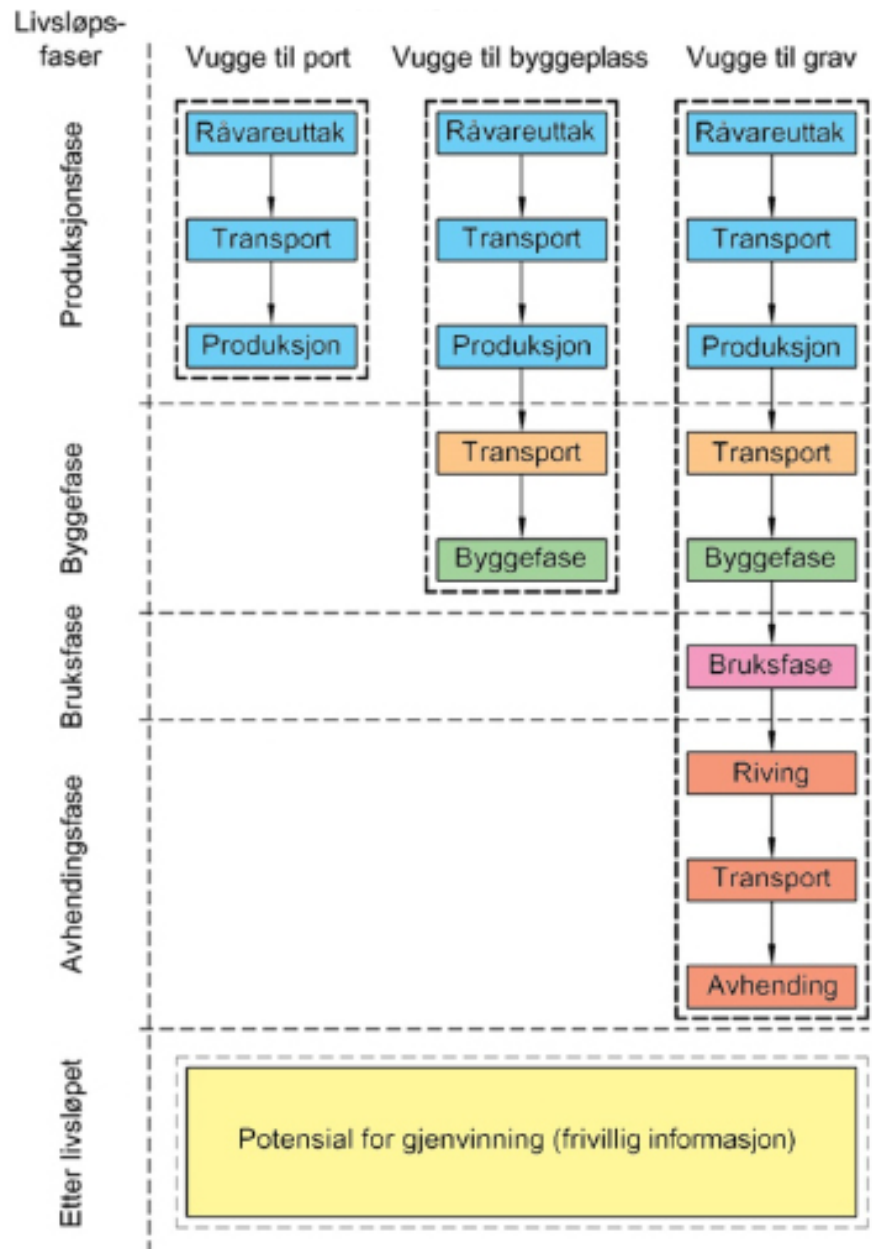
Figur 2-9. Faser i en livsløpsvurdering (Life Cycle Assessment - LCA) (SINTEF, 2014a). Fasene inkluderer fastsetting av hensikt og omfang, livsløpsregnskap, livsløpseffektvurdering og tolkning.



Hensikt og omfang skal angis tydelig og svare til den planlagte anvendelsen. Fastsetting av hensikt skal omfatte bruken av vurderingen som gjøres og definere målgruppen den rettes mot. For eksempel kan hensikten være å utarbeide en miljøvaredeklarasjon for et bestemt treprodukt i byggebransjen. I fastsetting av omfang skal flere punkter beskrives.

Det er ikke selve produktet som blir vurdert i en LCA, men produktsystemet som en modell av et livsløp (SINTEF, 2014a). Produktsystemet må derfor defineres. I en såkalt «vugge til grav» analyse ser man på hele produktets livsløp, det vil si at man tar med både elementene som inngår i produktet når det lages og avfallsproduktene man får til slutt. Analysen «fra vugge til grav» benyttes når bygg eller produkter vurderes i sin helhet. I komplekse prosesser er det vanlig å analysere bare noen deler av livsløpet, som i «vugge til byggeplass» eller «vugge til port» analyser. De tre nevnte systemene er vist i Figur 2-10. I modelleringen samles prosesser med bestemte funksjoner, og systemgrenser bestemmer hvilke funksjoner som faller innenfor hver enkelt prosess og hvilke som faller utenfor. De som faller utenfor tas ikke med i livsløpsvurderingen. For eksempel systemet «fra vugge til byggeplass» inneholder på lik linje med «fra vugge til port» og «fra vugge til grav» alle prosesser fra råvarer og utvinning av råvarene, til oppføring av ferdig bygg, mens faser som bruk, rivning og avfallshåndtering ikke er tatt med.

Figur 2-10. Fastsetting av produksystem for byggevarer (SINTEF, 2014b). Tre systemer «fra vugge til port», «fra vugge til byggeplass» og «fra vugge til grav» er vist med fasene disse inneholder. Stiplet linje angir systemgrense.



I livsløpsregnskapsfasen kvantifiseres alle material- og energistrømmer inn og ut av produktets livssyklus. Dette omfatter datainnsamling og beregningsmetoder som tallfester mengder av materialer og energi som går med til å lage produktet, samt andelen avfall og utslipp som genereres i forbindelse med sluttbehandling av produktet (SINTEF, 2014a). Det samles inn data for alle prosessene innenfor systemgrensen som er satt. Livsløpsregnskapet bygger på en iterativ prosess, noe som medfører at endringer av datainnsamlingsprosedyren kan forekomme etter hvert som data samles inn og kunnskapen om systemet øker. I hver prosess samles data innen inngangsfaktorer i form av energi, råmaterialer, hjelpematerialer og andre fysiske inngangsfaktorer. Det samles data for produkter, biprodukter og avfall. Videre samles det data for utslipp til luft, vann og jord, og andre miljøaspekter som anses viktige i vurderingen. Til slutt vurderes og dokumenteres begrensinger ved innsamling av data i en studierapport (Norsk Standard, 2006a).

I livsløpseffektvurderingsfasen blir miljømessige konsekvensene av forbruk av energi, materialer og ulike utslipp synliggjort (SINTEF, 2014a). Data fra livsløpsregnskapsfasen legges til grunn. Energibruken omregnes til utslipp, mens ressursbruk og utslipp tilordnes en eller flere effekt-kategorier. Utslipet omregnes deretter til en felles faktor som er lik for hver effektkategori (Norsk Standard, 2006b).

Etter gjennomført livsløpseffektvurdering gis en sum av miljøpåvirkningene for alle prosessene i et produktsystem. I en tolkningsfase blir så et sammendrag av resultatene fra livsløpsregnskapsfasen og livsløpseffektvurderingsfasen opprettet (SINTEF, 2014a). Tolkningen må sees i sammenheng med hensikten av vurderingen. Resultatet av tolkningsfasen er en rapport der konklusjonen av vurderingen presenteres, og det gis forklaringer av begrensinger og anbefalinger basert på resultatene. I rapporten skal det blant annet fremkomme hensikt og omfang med analysen, om den er utført etter bestemte standarder, og metodiske valg av for systemgrenser og resultater bør oppgis (Norsk Standard, 2006a).

2.8.2 Miljøvaredeklarasjoner (EPD)

En LCA kan brukes som grunnlag til å utvikle en EPD, som er en forkortelse for Environmental Product Declaration, en miljødeklarasjon. Ifølge EPD-Norge er dette «et kortfattet dokument som oppsummerer miljøprofilen til en komponent, et ferdig produkt eller en tjeneste på en standardisert og objektiv måte» (epd-norge, 2022).

Det er standardiserte metoder for å utvikle en EPD, metodene spesifiseres i ISO 14025 «Environmental labels and Declarations Type III». En type 3 miljømerking skiller seg fra type 1 og 2 ved at den tar hensyn til helheten produktet blir en del av, og ikke bare undersøker miljøstatusen til det enkelte produktet. Den standardiserte metoden muliggjør sammenlikning av et produkt med et annet. I tillegg kan flere EPDer legges sammen og gi en komplett miljøprofil til et produkt bestående av mange komponenter, for eksempel for en bygning (epd-norge, 2019).

EPDer gir et regnskap der ressursforbruk og potensiell miljøpåvirkning er kartlagt i forskjellige livsfaser, som igjen deles inn i steg. Alle fasene fra råvare til produksjon, installasjon, bruk og resirkulering eller avfallshåndtering er tatt med (SINTEF, 2014b).

2.8.3 Livsløpssfaser

Tabell 2-2 viser livsløpsfaser for en bygning med forskjellige perioder i byggets levetid. Hver av fasene kan videre deles inn i underfaser. I det europeiske markedet defineres en bygnings livsløpsfaser ifølge standardene EN 15978 og EN 15804. som kan inkluderes som rammeverk i både LCAer og EPDer.

Tabell 2-2. Livsløpsfaser i henhold til EN standard (Norgips, 2020). Produktfase inkluderer: (A1) Råmaterialer, (A2) Transport, (A3) Tilvirkning. Konstruksjon fase inkluderer: (A4) Transport, (A5) Konstruksjon installasjon. Bruksfase tar for seg: (B1) Bruk (B2) Vedlikehold, (B3) Reparasjon, (B4) Utskiftninger, (B5) Renovering, (B6) Operativ energibruk, (B7) operativ vannbruk. Slutfase inkluderer: (C1) Demontering, (C2) Transport, (C3) Avfallsbehandling, (C4) Avfall til sluttbehandling. Etter endt levetid fase omfatter: (D) Gjenbruks-, gjenvinnings- og/ eller resirkuleringspotensiale.

Produktfase			Konstruksjon fase		Bruksfase							Slutfase				Etter endt levetid
Råmaterialer	Transport	Tilvirkning	Transport	Konstruksjon installasjon	Bruk	Vedlikehold	Reparasjon	Utskiftninger	Renovering	Operasjonell energibruk	Operasjonell vannbruk	Demontering	Transport	Avfallsbehandling	Avfall til sluttbehandling	Gjenbruk-gjenvinnings-resirkuleringspotensiale
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D

Standarder som benyttes i LCA definerer hvilke livsløpsfaser som må tas med i vurderingen. Følges for eksempel EN 15804 så er bare produktfasen (Tabell 2-2, A1-A3) pålagt, mens andre faser er valgfrie, som konstruksjon fase, bruksfase og slutfase (Tabell 2-2, henholdsvis A4-5, B1-7 og C1-4). I bygningsnivåberegninger i henhold til EN 15978 er derimot hele poenget at alle relevante påvirkninger gjennom hele bygningens levetid tas hensyn til, og her tas derfor alle fasene med i en LCA. Ulike sertifiseringer og beregningssystemer kan begrense faser som tas med.

For å se mer inngående på de ulike fasene, eller modulene, i henhold til EN standard, så vil produktfase (Tabell 2-2, A1-A3) inkludere utvinning og prosessering av råvarer, prosessering av sekundært materiale som resirkuleringsprosesser, transport til produsenten, og deretter tilvirkning. Fasen inkluderer levering av alle materialer, produkter og energi, samt avfallsbehandling frem til slutten av avfallstilstanden eller deponering av endelige rester i produktstadiet. Vurderingen tar kun hensyn til bygningen og bygningsdeler, ikke inventar som møbler, apparater og annet. Konstruksjonens installasjonsfase (Tabell 2-2, A4-A5) tar for seg transport til byggeplassen og installasjon i bygningen, og inkluderer alle påvirkninger og aspekter knyttet til eventuelle tap under dette byggeprosessediet (dvs. produksjon, transport og avfallsbehandling og avhending av tapte produkter og materialer). Bruksfase (Tabell 2-2, B1-B7) omfatter bruk av det installerte produktet, vedlikehold, reparasjon, utskifting, og renovering av produktet. I tillegg kommer operativ energibruk som drift av varmesystem og andre bygningsrelaterte installerte tjenester, operativ vannbruk og tilveiebringelse og transport av alle materialer, produkter, samt energi- og vannforsyning, avfallsbehandling frem til slutt-avfallstilstand eller deponering av endelige rester i denne delen av bruksstadiet. Tilleggsinformasjon utover bygningens livssyklus i form av en etter endt livstidsfase (Tabell 2-2, D) kan også legges til, som tar for seg gjenbruks-, gjenvinnings- og/eller resirkuleringspotensiale uttrykt som nettoeffekter og -fordeler. For byggevarer betyr dette at fordeler og byrder ved avhending etter riving kan tas i betraktning. Bruken av etter endt levetidsfase er i samsvar med en «vugge til vugge» tilnærming, eksempelvis at et produkt kan gjenbrukes etter en slutfase (One Click LCA Ltd, 2021). Resultatene fra en LCA kategoriseres, og presenteres på bakgrunn av flere typer forurensningspotensiale.

2.8.4 One Click LCA

Et viktig anvendelsesområde for LCA er å vurdere ulike alternativer i forhold til miljøbelastning. Målet er at vurderingen skal gjøre det mulig å ta velbegrunnede avgjørelser basert på en helhetlig vurdering så langt det er mulig. En slik vurdering kan bli veldig kompleks, når hele livsløpet til et produkt inngår og alle elementer som utgjør en miljøbelastning skal vurderes. Spesialisert programvare med en voksende database over ulike miljøbelastninger er utviklet til dette formålet (Dramstad et al., 2015).

One Click LCA er en livsløpsvurderings-programvare utviklet av det finske selskapet Bionova Ltd. i 2011. Selskapets målsetning er at karbon innen byggebransjen skal betraktes på samme måte som kostnader, ved å måles, rapporteres og reduseres. One Click LCA skal bidra til å minimere klimagassutslipp forbundet med byggeprosessen og gjennom et byggs levetid. I programmet gjøres livsløpsvurderinger (LCA), og livsløpskostnader (Life Cycle Costs - LCC), karbonavtrykk og andre miljøpåvirkninger fra produkter kan beregnes (One Click LCA Ltd, 2021). Programvaren gjør det enklere for byggebransjen å redusere utslipp, ved hurtig og presist tilby oversikt over karbonutslipp, kostnader og sirkulærindeks, er kompatibel med internasjonale og europeiske standarder, og har flere sertifikasjonsordninger innebygd i sin database, blant annet BREEAM og LEED (One Click LCA, 2021).

Av standardene som finnes i programmets database er det i Norge mest aktuelt å bruke «Beregningsverktøy for bygninger LCA, EN 15978» og «Byggets livssyklusvurdering i henhold til NS 3720 – Metode for klimagassberegninger for bygninger». Disse dekker systemet «fra vugge til grav» med separerte rapporter i et byggs produksjonsfase, konstruksjonsfase, bruksfase og slutfase (One Click LCA Ltd, 2021). One Click LCA programmet tillater også ulike spesifiseringer, for eksempel kan brukeren spesifisere opphav for et bestemt produkt og velge at dette er av et resirkulert materiale. Dette vil da tas hensyn til i beregningene for systemet og gjøre disse mer treffende. Spesifikt ved valget resirkulert materiale ser programmet da bort fra produksjonsfasen og bruksfasen.

2.9 Lover, sertifisering og teknisk godkjenning

For at produkter og konstruksjoner skal produseres med tilstrekkelig kvalitet, stiller myndighetene krav til produkters egenskaper og dokumentasjon av disse. I Norge bestemmer Plan- og bygningsloven hvordan landets arealer skal brukes og reguleres, og loven gir hjemmel til blant annet Byggeteknisk forskrift, forkortet til TEK, og Forskrift for dokumentasjon av byggevarer, forkortet til DOK (Lovdata, 2008).

TEK inneholder tekniske krav til byggverk, og angir minimumsverdien av egenskaper et byggverk må ha for å oppføres lovlig i Norge, mens DOK inneholder regler for dokumentasjon og omsetning av byggevarer (dibk, 2016; dibk, 2017). Gjennom EØS-avtalen innlemmes også EUs byggevareforordning i DOK. Forskriftens hensikt er å sørge for fri handel av byggevarer mellom EØS-landene, der de viktigste virkemidlene er å innføre harmoniserte standarder, tekniske bedømmelses- og kontrollorganer, systemer for vurdering og verifikasjon av byggevarers egenskaper, samt å benytte ytelseserklæring og CE-merking (SINTEF, 2022a).

2.9.1 Norsk standard og eurokoder

I byggebransjen anvendes standarder til planlegging, prosjektering, utførelse og verifikasjon av bygg- og anleggskonstruksjoner (Standard Norge, 2022b). Standard Norge er den eneste organisasjonen som kan bestemme og utgi Norsk Standard. Organisasjonen er medlem i den europeiske standardiseringsorganisasjonen (CEN - fra fransk. Comité Européen de Normalisation) og den internasjonale standardiseringsorganisasjonen, ISO. Gjennom medlemskapet i CEN forpliktes Standard Norge til å fastsette alle europeiske standarder som norske standarder, internasjonale standarder kan utgis som norsk standard hvis det vurderes som hensiktsmessig (Standard Norge, 2021b). En harmonisert standard er en Europeisk standard utviklet av en godkjent europeisk standardiseringsorganisasjon, for eksempel CEN, og skal vise at et produkt, en tjeneste eller prosess følger aktuelle lover i Europa (European Commission, 2022).

Eurokodene er en serie standarder som inneholder krav til prosjekteringer av bygninger og dokumentasjon av produkters egenskaper til konstruksjonsformål. Eurokodene er felles for Europa (Standard Norge, 2022b). For å ta hensyn til ulike krav til sikkerhet, bestandighet, ressursbruk og klimatiske og geografiske forhold legger Eurokodene til rette for at de enkelte land kan innlemme egne parametere, som utgis i et nasjonalt tillegg, eller nasjonalt annekse, til hver av eurokodene (Standard Norge, 2021a).

2.9.2 Teknisk Godkjenning

For å åpne opp for fri handel av byggevarer i EØS-land merkes produkter som dekkes av en harmonisert standard med CE-merket. CE-merket er en garanti for forbruker eller distributør at produktet oppfyller alle krav til tekniske spesifikasjoner. Et produkt med korrekt CE-merking har fri markedsadgang i EØS-området (Standard Norge, 2022a). I DOK heter det at alle byggevarer som dekkes av en harmonisert standard skal CE-merkes (dibk, 2016).

CE-merket er kun et delvis kvalitetsstempel, da det ikke omfatter de enkelte lands krav til byggverk. Et CE-merket produkt har altså dokumenterte tekniske egenskaper, men de forskjellige byggeforskriftene i europeiske land kan ha andre krav til byggverket i sin helhet (dibk, 2016). SINTEF teknisk godkjenning angir at produktet også innfrir alle krav i den norske byggetekniske forskriften TEK17. En SINTEF Teknisk Godkjenning er derfor en tilleggsdokumentasjon, og mange produsenter velger å ha med dette som ekstra forsikring til sine kunder om at et produkt faller under alle krav som stilles byggevarer i Norge. Det må foreligge en CE-merking før en Sintef Teknisk godkjenning kan publiseres (SINTEF, 2022c).

2.9.3 Europeisk teknisk bedømmelse (ETA)

For produkter som ikke eller bare delvis dekkes av en harmonisert standard, kan en Europeisk teknisk bedømmelse, European Technical Assessment, forkortet til ETA, utarbeides for å gi en uavhengig vurdering av viktige karakteristikk og egenskaper, slik at produktet kan CE-merkes (SINTEF, 2022b). Å utarbeide en ETA for et produkt som ikke dekkes av harmoniserte standarder er frivillig, men dersom en ETA er gjennomført er det obligatorisk å CE-merke produktet (SINTEF, 2022a). En ETA utføres på grunnlag av et Europeisk bedømmelsesdokument, European Assessment Document, forkortet til EAD, som hovedsakelig inneholder en oversikt over produktegenskapene som er aktuelle å ta med i en CE-merking, og hvordan disse skal bestemmes eller kontrolleres. Både EAD og ETA utarbeides av et uavhengig organ, som er medlem i den Europeiske organisasjonen for teknisk godkjenning, European Organization for Technical Approval (EOTA). I Norge er SINTEF utnevnt av myndighetene som bedømmelsesorgan (SINTEF, 2022a).

2.9.4 Sertifisering

Modulbaserte byggesystemer i tre dekkes ikke av harmoniserte standarder, og må derfor få utarbeidet en ETA for å godkjennes som byggesystem. En ETA for denne typen byggesystem kan utskrives på grunnlag av EAD 130087 – 00 – 0204 «Modular Construction Systems», forkortet til EAD 0204.

EAD 0204 gjelder for modulbaserte byggesystemer i tre, som i dokumentet defineres som et trebasert byggesett som kan brukes til å oppføre lastbærende vegger i bygninger. Byggesettet skal bestå av industrielt produserte og standardiserte moduler. Videre beskriver dokumentet tiltenkt bruk for byggesystemet, og hvor langt livsløp det skal dimensjoneres for. Her kommer det blant annet frem at et byggesystem bedømt etter EAD 0204 kan oppføres i to etasjer og loft over bakkeplan, der etasjene ikke er høyere enn 3 m, og at yttervegger skal kles med en ventilert fasade for å beskytte mot det utvendige klimaet.

I tillegg til informasjon om produktets bruk skal en EAD inneholde oversikt over karakteristiske egenskaper, og kriterier for bedømmelse av disse (EOTA, 2022). Egenskapene deles inn i seks hovedpunkter:

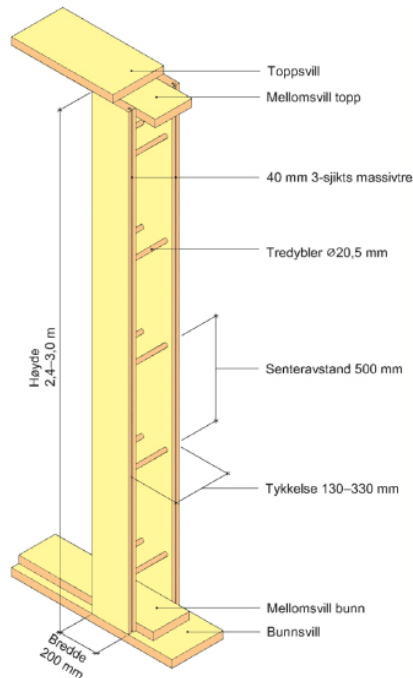
1. Mekanisk motstandsevne
2. Sikkerhet ved brann
3. Hygiene, helse og miljø
4. Sikkerhet og tilgjengelighet ved bruk
5. Beskyttelse mot lyd
6. Energiøkonomi og varmebevaring

Under disse punktene er det i henhold til EAD 0204 hele 19 kriterier som må dokumenteres (EOTA, 2017). SINTEF utfører tester på tre av disse punktene og dekker fem av de 19 kriteriene (Ramstad, 2022). Under første punkt som gjelder mekanisk motstandsdevne, kan SINTEF utføre testene «Racking strength and stiffness», «Impact: moment – normal force» og «Impact resistance». Under fjerde punkt som gjelder sikkerhet og tilgjengelighet ved bruk, kan SINTEF utføre testen «Air Permeability». Under femte punkt omhandlende beskyttelse mot lyd, kan testen «Airbourne sound insulation» utføres. Av de resterende 14 kriteriene kan 12 godkjennes uten spesifikke tester, her kreves kun referanser til aktuelle standarder. For kriteriene under punktene omhandlende sikkerhet ved brann må det gjøres branntekniske evalueringer i et brannlaboratorium.

2.10 Modulbaserte byggesystemer i tre

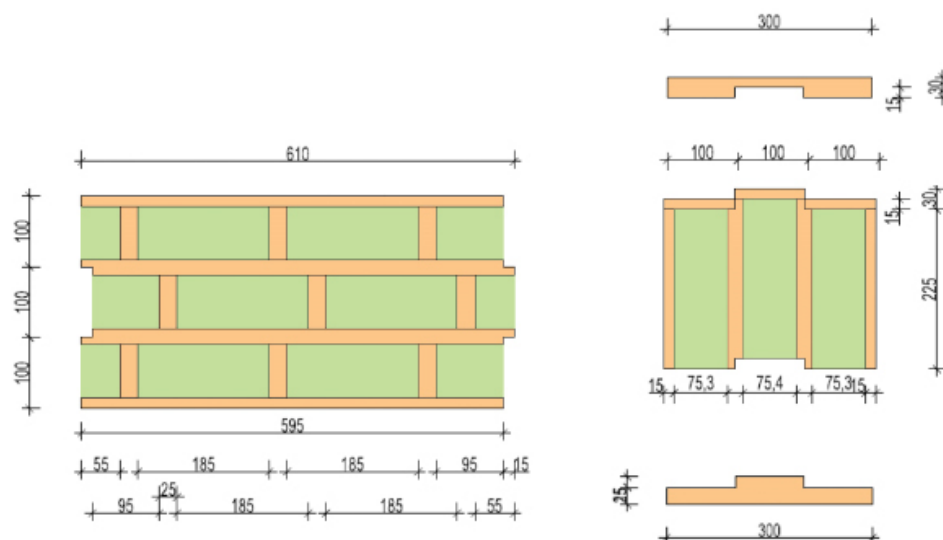
TEWO (Figur 2-11) er et produkt utviklet av det norske selskapet Termowood som ble etablert i 2007 (TEWO, 2022). Dette er et byggesystem basert på et konstruksjonselement med innersjikt og yttersjikt av 40 mm eller 60 mm KL-tre av gran. Produsenten har kalt platene KL3 ettersom disse består av tre lamellsjikt. Platene er koblet sammen ved hjelp av innlimte dybler (rundstokk av bøk), og mellom det indre og ytre sjiktet er det et isolasjonsfelt. Bredden på KL3 modulene er på 200 mm, mens tykkelsen varierer fra 130 mm til 330 mm og lengden kan leveres opp til 3000 mm. Et element på 3 m veier ca. 25 kg. En konstruksjon av TEWO kan bygges med inntil tre etasjer uten ekstra forsterkninger. Vindsperre monteres utvendig. Fuktsperre innvendig er ikke nødvendig i rom med normal fuktighet. Ved etablering av skjult elektrisk anlegg i et bygg, kan TEWO levere elementer med ferdige bokser og trekkerør for elektrisk installasjon. Elementene monteres vertikalt ved å først montere en topp og bunnsvill og deretter skyve inn elementene fra siden langs svillene til samtlige elementer i vegg er på plass. Deretter strammes elementene sammen med en stropp før de skrues fast. TEWO tilfredsstiller dagens energikrav (TEK17/passivhus) og kan leveres for U-verdier fra 0,12 til 0,25 W/m²K. Produktet har en SINTEF Teknisk Godkjenning (SINTEF, 2017).

Figur 2-11. Detalj av TEWO element (SINTEF, 2017). Bunn- og toppsvill har også en mellomsvill for innfesting av elementene. Et element består av 40 mm 3-sjikts massivtre som danner elementets synlige overflater. Et element er 130 - 330 mm tykt, 200 mm bredt og 2,4 - 3,0 m høyt. Tredybler har en diameter på 20,5 mm og er plassert med en senteravstand på 500 mm.



SPEED BLOCK modular construction system, med kortnavn Speedblock, er et trebasert lastbærende byggesystem for veggkonstruksjoner som ble laget av den italienske produsenten Roman Terzer i 2017 (ETA Danmark, 2017). Systemet består av standardiserte moduler/blokker som er industrielt produsert. Disse er bygd opp av formaterte MFP (Multi Functional Panel) plater som er limt og stiftet sammen, og vekten til en standardblokk er estimert til 7,3 kg med mineralull som isolasjonsmateriale (Figur 2-12).

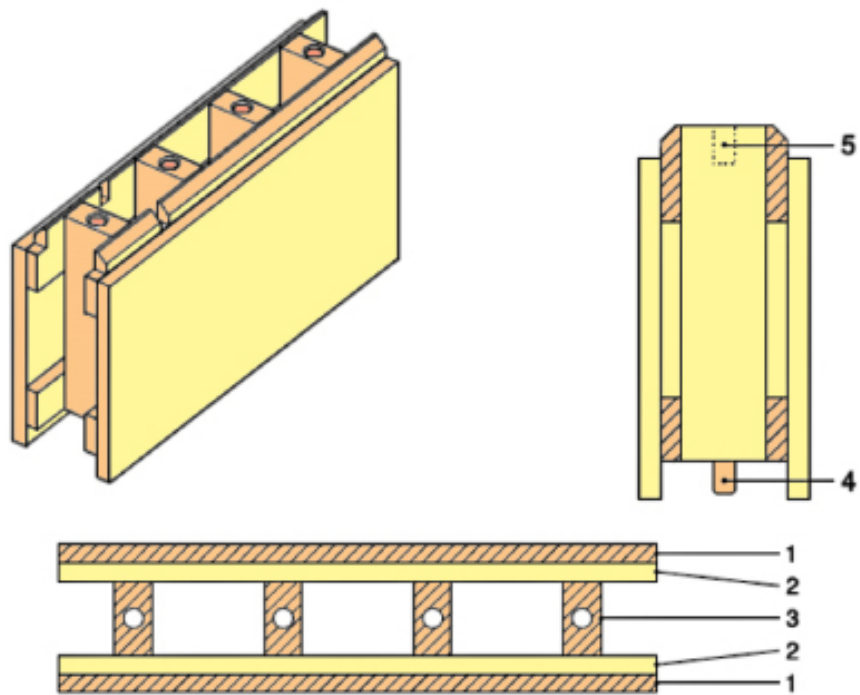
Figur 2-12. Speedblock standardblokk 240 mm x 300 mm x 600 mm (høyde x tykkelse x lengde) (ETA Danmark, 2017). Blokken er bygd opp av MFP-plater med isolasjon mellom platene. Topp- og bunnsvill er av samme materiale.



Under oppføring festes blokkene sammen med lim og mekaniske festemidler som stålvingler, skruer og stifter. Systemet kan brukes til å bygge hus på to etasjer og loft, der hver etasje ikke bør overskride 3 m i høyde. En 300 mm tykk vegg bestående av kun Speedblock har en U-verdi på 0,15 W/m²K. I tillegg til produktets standardblokk produseres start- og avslutningsblokker, halvblokker, ulike typer hjørneblokker, spesialblokker til dør eller vindusåpninger og sviller til topp, bunn og hjørner i tillegg til spesialbraketter for innfestning mot ulike overflater. Speedblock har godkjenningen ETA-17/0905 som er basert på EAD 0204 (EOTA, 2017).

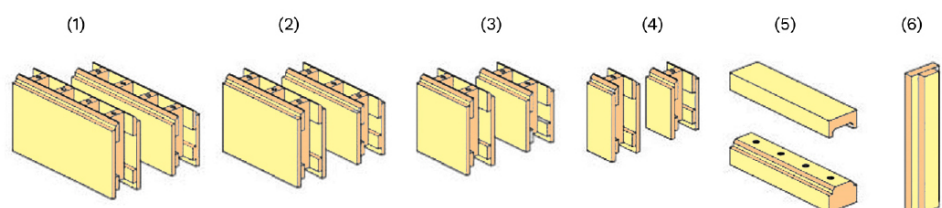
STEKO® Holz-Bausystem (STEKO) er et modulbasert byggesystem som ble utviklet i Sveits i 1997 av professor Anton Steurer og Arkitekt Joseph Kolb (STEKO, 2022). STEKO byggeblokker bestående av fem lag med gran som er limt sammen (OIB, 2019). Fiberretningen i de ulike lagene i blokken er vendt 90°. Blokkene stables på hverandre og festes i spor som er utformet i designet. Det er ikke behov for mekaniske festemidler, men i hver av blokkenes avstandsklosser er det forboret et 22 mm hull, slik at dybler kan føres ned og videre forsterke sammenføyingen mellom blokkene (Figur 2-13).

Figur 2-13. Detaljtegning av STEKO (OIB, 2019). Blokkens overflate: 20 mm plate av gran (1). Horizontal forsterkning av gran (2). Avstandsklosser 40 x 80 mm plassert med 160 mm senteravstand (3). 20 mm dybel (4). 22 mm hull til dybel (5).



Systemet har en standardblokk som er en firedelt modul på 6,5 kg som måler 640 mm i lengden og 320 mm eller 240 mm i høyden (Figur 2-13). Bredden er 160 mm for alle komponentdeler. I tillegg til modulen som er delt i fire avstandsklosser så er det også tilgjengelig moduler med tre, to og ett felt, med lengder på henholdsvis 480, 320 og 160 mm og samme bredde. Systemet har også en topp- og bunnsvill på 80 mm tykkelse og endedecksel for synlig avslutning av vegg mot hjørne, dør eller vindu (Figur 2-14).

Figur 2-14. STEKO Standardmoduler av 160 mm tykkelse og 240 eller 320 mm høyde, med lengder av 640 mm (1), 480 mm (2), 320 mm (3) og 160 mm (STEKO, 2022). Topp- og bunnsvill (5) og endedecksel (6).

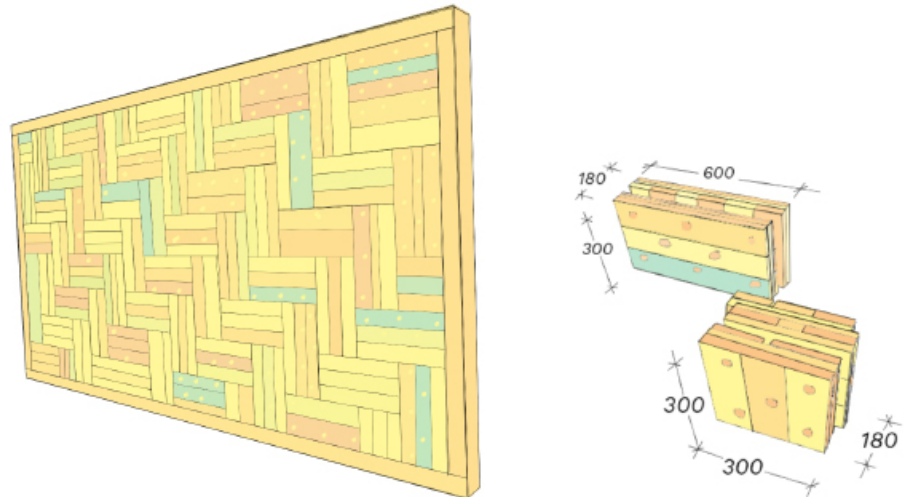


Sammensetning av standardmodulene gjør at systemet kan konstrueres med et horisontalt 160 mm rutenett og et vertikalt 80 mm rutenett. I tillegg kan blokker leveres på spesialmål. Hjørnene konstrueres ved at radene vekselvis overlapper hverandre og skaper en flettet hjørnekonstruksjon. Byggesystemet kan brukes som bærende konstruksjon i bygg opp til 3 etasjer, der hver etasje ikke bør overskride 3.04 m høyde. Med celluloseisolasjonsmateriale kan veggene få en U-verdi på 0,42 W/m²K. For konstruksjoner med strenge krav til lydreduksjon kan blokkene i innervegger fylles med sand. STEKO har godkjenningen ETA-13/0645 som er basert på EAD 130087-00-02014 (EOTA, 2017).

Stavneblokka er en byggesystem basert på gjenvunnet tre. Prototypen «klimablokken» ble utviklet av arkitekt Bjørn Berge og redesignet av Gaia Trondheim i samarbeid med Stavne Rebygg bergingsanlegg i Trondheim (fourthdoor, 2022). Byggesystemet tar sikte på karbonreduksjon ved å adressere materialbruk med lav innvirkning samt livssyklusdesign og karbonlagring. Stavneblokka er laget av krysslagte bord festet med tre-dybler og består av to typer blokker som vises til høyre i Figur 2-15.

Figur 2-15. Stavneblokka (Bramslev & Baarnes, 2012).

Venstre: En vegg bygget av 60 Stavneblokker stablet i «fiskebeinsmønster». Høyre: de to ulike blokktypene, lengst fremme: liten blokk 180 x 300 x 300 mm, bak: stor blokk 180 x 300 x 600 mm og (tykkelse x høyde x lengde).



Stavneblokka består av 98,3 % resirkulert tre, veier 15 kg og har dimensjonene 180 x 300 x 600 mm (Bramslev & Baarnes, 2012). For å montere en vegg av blokkene må det konstrueres en ramme av tre som vist til venstre i Figur 2-15. Rammen er laget av nytt trevirke. Dyblene er laget av kosteskaft av nytt trevirke. Det er gjort en klimagassberegning av Stavneblokka etter systematikk fra EPD-standarden NS-EN 15804. Som utslippsfaktor for nytt trevirke er det benyttet verdier fra EPD til interiørtré i beregningene av klimagassutslipp.

3 **UTVIKLING AV KLB-KONSEPT**

3.1 KLB Designfase

Oppstartsvis ble det i mars 2021 foretatt et besøk til Buskerud Biobrensel DA i Vikersund, der NMBU-studentene og representanter fra Omtre AS møtte eieren av virksomheten. Buskerud Biobrensel DA ble etablert i 2003 under bransjen «saging, høvling og impregnering av tre» og driver i dag hovedsaklig med mottak av treavfall som omgjøres til pellets for forbrenningsformål. Treavfallet kvernes først til flis, før det tørkes og deretter presses til pellets under høyt trykk. Avkapp etter KL-tre produksjon hos Splitkon AS blir fraktet til Buskerud Biobrensel DA hvor det kappes i mindre biter, for så å gjennomgå denne prosessen og gjøres om til pellets. Observasjoner ved biobrenselvirksomheten ga grunnlag for diskusjoner om å benytte avkappet av KL-tre på en mer bærekraftig måte inn i en produksjonslinje av blokker til et nytt modulbasert byggesystem. Observasjonene førte også til konkrete forslag til blokkenes tykkelse og dimensjoner. Biobrenselvirksomheten mottar elementer av KL-tre med varierende tykkelse og dimensjoner, men under besøket ble det observert en overvekt av 120 mm tykke elementer som var tilnærmet kvadratiske med lengder og bredder mellom 2-2,5 m.

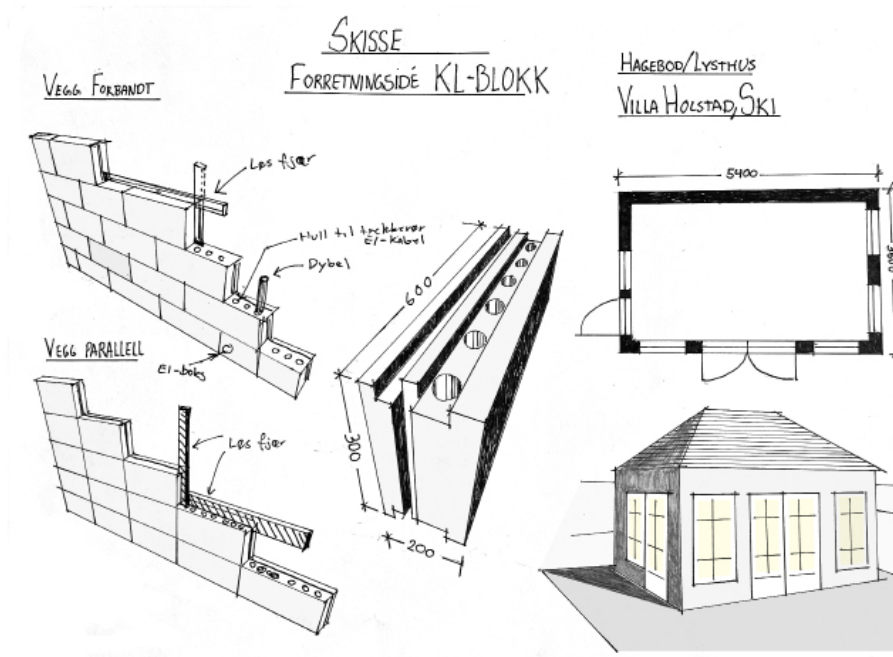
Det ble besluttet at avkappet fra Splitkon hadde et stort potensiale som ressursmateriale, og at dette skulle brukes i utviklingen av det nye byggeproduktet av typen byggeblokk/modulbasert byggesystem. Videre ble det satt flere målsetninger for designet av det ferdige produktet. Designet skulle utnytte så stor del av ressursmaterialet som mulig. Byggesystemet skulle være enkelt å bygge med og hver blokk kunne håndteres av én person. Systemet skulle kunne oppføres med et minimalt forbruk av metalliske festemidler, som muliggjør enklere demontering og ombruk av bygningskomponentene.

3.1.1 Skisse/design

Designutvikling og skissering ble utført av NMBU-studentene. Andre modulbaserte byggesystemer som TEWO, Speedblock, STEKO og Stavneblokka ble benyttet som inspirasjon i utviklingsarbeidet. Under designutviklingen ble forskjellige metoder for sammenføring og utforming av blokkene vurdert. I arbeidet var programmet Shapr3D (versjon 4.5) et viktig verktøy for å animere enkeltkomponenter og for å simulere forbindelser.

Arbeidet med forskjellige designvarianter resulterte i en skisse (Figur 3-1) som Omtre AS brukte i en søknad om økonomisk støtte fra Innovasjon Norge for videreutvikling av prosjektet. Produktet ble navngitt KL-blokk, forkortet til KLB.

Figur 3-1. Skisse brukt i Omtre AS sin søknad om økonomisk støtte fra Innovasjon Norge for utvikling av nytt blokkbasert byggesystem. Forslag til to forskjellige konstruksjonsmåter, forbandt- og parallellstabledet (venstre), for å sette opp en vegg av blokkene. Løs fjær, dybel, hull til trekkrør for el-kabel og el-boks er indikert med piler. Blokk med mål i mm (senter). Forslag til byggeprosjekt hagebod/lysthus hvor blokk byggesystemet benyttes (høyre).



Skissen tok for seg hvordan blokkene kan utformes med målsatte dimensjoner, horisontale spor og vertikale spor. Den viste to ulike måter å montere blokkene for å sette opp en vegg, forbandt- og parallellstabledet stil. Viktige detaljer i vegger, som løs fjær, dybel, hull til trekkrør for el-kabel og for el-boks ble nevnt. Både løs fjær og dybel er sammenføyingsmekanismer. En løs fjær fungerer sammen med en not eller et notspor. To deler med notspor kan sammenføyes ved å montere en løs fjær i notsporet. En dybel er en mekanisme for sammenføyning i form av en rundstokk som passer i forborrede hull. I skissen (Figur 3-1) var hullene designet slik at disse kunne benyttes som trekkerør for el-kabel i tillegg til hull for dybler. Skissen viser også et forslag til design av en hagebod/lysthus i KLB.

3.1.2 Modell

Som siste del i designfasen og som viktig innhold i søknaden om økonomiske midler til utvikling av det nye byggesystemet, ble det produsert en forenklet modell i målestokk 1:3 (Figur 3-2). Til produksjon av modellen ble det benyttet 48 x 98 mm konstruksjonsvirke. Modellen demonstrerte faktisk utførelse av blokkene og de to måtene å sette opp vegger, forbandt og parallell, som vist i skissen. Modellen demonstrerte også løse fjærer og notspor benyttet for sammenføring horisontalt mellom blokkene. I tillegg ble enkel og dobbel skyvesink demonstrert, noe som ikke er vist i skissen. En skyvesink har tilnærmet lik funksjon som en løs fjær og notspor, men her er både sinken og sinksporet skråstilt slik at sinken kan skyves på plass parallelt i sporet og hindrer ortogonale bevegelser. Den doble skyvesinken låser da endene av blokkene sammen og den enkle skyvesinken monteres på en flate slik at sinksporet på enden av blokkene kan låses til denne flaten.

Figur 3-2. Modell av byggeblokkssystemet i målestokk 1:3 for forbandtstabled vegg (venstre) og parallellstabled vegg (høyre).



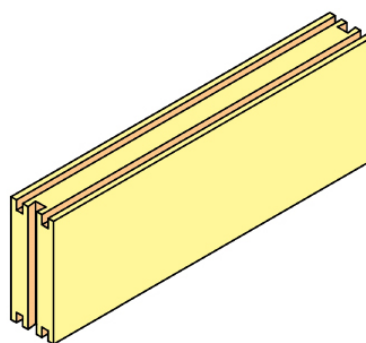
Det ble også laget 1:3 modeller som demonstrerte hjørneoverganger mellom vegger, og som viste en veggåpning (Figur 3-3). Den enkle skyvesinken ble montert på den ene veggflaten (venstre vegg på begge bilder i Figur 3-3) for å låse sinksporet i enden av blokkene i den motstående veggen til denne veggflaten. Modellen ble laget uten perforeringer til elektrisk anlegg.

Figur 3-3. Modell av byggeblokkssystemet i målestokk 1:3 som demonstrerer overgang mellom vegger (venstre) og en veggåpning ment for en dør (høyre).



Modellen av det nye byggesystemet ble så undersøkt grundig og det ble utarbeidet noen forbedringer. Sinkspor i blokkenes ender, som i modellen var plassert nærmest den ene siden, ble sentrerte. Det ble lagt til enda et spor på blokkenes topp- og bunnside slik at den da fikk to notspor i topp og bunn fordelt med lik avstand fra begge yttersider. Bredden på sporene ble satt til 18 mm for blokk i full målestokk (1:1), for å gi mulighet til å bruke et av sporene som kanal for 16 mm rørføring i horisontal retning ved behov. Utbedringene ble innlemmet i designet av KL-blokkene i Shapr3D. Oppdaterte tegninger ble så hentet ut av programmet (Figur 3-4) og brukt i neste fase av konseptutviklingen.

Figur 3-4. Skisse av KLB laget i Shapr3D. Utbedring med to notspor i topp og bunn fordelt med lik avstand fra begge yttersider og sinkspor sentrert på endene.



3.2 Pilotvegg

3.2.1 Formatering

I den neste delen av konseptutviklingen ble det satt opp en pilotvegg i full målestokk (1:1). En formateringsfase ble igangsatt allerede ved Buskerud Biobrensel DA, der restavfall av KL-tre fra Splitkon AS ble kappet til mindre elementer. Store KL-tre elementer på rundt 2 x 2,5 m med 120 mm tykkelse av tre og fem lameller, ble sagt i mindre strimler ved bruk av en Mafell 185e sirkelsag og tilhørende styreskinne (Figur 3-5).

Figur 3-5. Tilskjæring. KL-tre restmaterialer blir sagt i strimler med bredde på 300 mm. Avbildet: Johanne Kolstad (venstre) og Ivar Ragnhildstvedt (høyre).



Videre ble KL-tre med varierende lengder stablet på til sammen 5 paller, totalt 77 strimler som utgjorde 151,8 løpemeter, og hadde tykkelse 120 mm og bredde 300 mm.

Pallene med KL-tre ble fraktet til et snekkerverksted der videre formatering og oppføringen av pilotveggen ble gjennomført. I en produksjonslinje vil tilskjæringer og utfresinger programmeres til å være spesifikke og gjøres i få operasjoner. Slike muligheter hadde vi ikke i utviklingen av KLB og i flere tilfeller måtte det derfor flere operasjoner til, særlig i utforming av spor. Pilotveggen besto av to vegger med et 90° hjørne og en døråpning. Beregninger for ulike KLB, antall og dimensjon, ble gjort etter Shapr3D tegninger. Tabell 3-1 viser en oversikt over KLB til veggen og totalt antall KLB som ble produsert. Det ble produsert et overskudd av KLB som skulle ta høyde for eventuelle tap p.g.a. skader eller annet uforutsett under formateringsarbeidet, og for å ha KLB til demonstrering av byggesystemet ved senere anledninger.

Tabell 3-1 Oversikt over KLB av ulike lengder til bygging av pilotvegg, samt ekstra KLB i tilfelle tap under arbeidet.

Lengder [mm]	Antall benyttet i pilot- vegg [stk]	Antall produsert [stk]
300	12	20
400	1	2
600	6	10
900	55	60
1600	1	2

Strimlene ble delt med presise vinkelrette kutt i lengdene 300, 400, 600, 900 og 1600 mm på en sagejigg med Mafellsag og avstandsklosser, der styreskinnen var fastsatt på et bord (Figur 3-6).

Figur 3-6. Vinkelrett sagejigg for kapping av lengder før videre formatering av blokkene. Avstandsklosser ble brukt til å sette riktige lengder.



Felder KFS-37 kombimaskin (fres/bordsag) ble benyttet til å frese ut notspor på over- og undersiden. Notsporene ble frest i to operasjoner per spor for alle blokkene, først fire spor på 10 mm, deretter ble fresestålet hevet 8 mm og freseprosessen gjentatt slik at hvert notspor fikk riktig bredde på 18 mm (Figur 3-7).

Figur 3-7. Fres med automatisk innmatingsanlegg ble brukt til å produsere notsporene i blokkene. Avbildet: Frode Anker Røsstad.



Etter utfresing av langsgående spor på topp- og bunnsiden av alle klossene, ble endesporene frest ut (Figur 3-8). For utformingen med skrå sider måtte det freses i tre omganger for hvert spor, først et enkelt rektangulært spor, deretter ble aksene til fresen vinklet 7° og den ene skråsiden frest ut med et fresestål der kniven var slipt til 7° slik at bunnen i sporet ble parallell med kanten. Til slutt ble blokken rotert 180° og ført gjennom fresen slik at sporet fikk formen med 7° skråprofil på begge sider.

Figur 3-8. Sinksporet freses ut på enden av blokkene. Avbildet: Frode Anker Røsstad.



Aller sist ble ytterkanten faset av på den ene siden med en håndholdt Festool OF1010 overhåndsfres med et 45° fresestål (Figur 3-9). Å fase av kanten, som vil si å skråskjære hjørnene, beskytter kanten mot oppflising i tillegg til at den lager en dekorativ profil i overgangen mellom blokkene.

Figur 3-9. Kantfresing med en Festool OF1010 overhåndsfres med et 45° fresestål. Avbildet: Johanne Kolstad.



Da alle blokkene var ferdig formatert ble samtlige stablet etter størrelse (Figur 3-10).

Figur 3-10. Pall med ferdig formatterte KLB.



Til pilotveggen ble doble skyvesinker produsert av 36 x 48 mm lekter av gran. I lektenes langsider ble det frest fire 7° spor med et skråstillt rett fresestål som ga en timeglassform. De doble skyvesinkene ble så kappet i 450 mm og 300 mm lengder med en Makita LS1219L kapp- og gjærsag. Figur 3-11 viser produksjonen av skyvesinker og de ferdige skyvesinker kappet og stabled.

Figur 3-11. Fresing av doble skyvesinker (venstre). Ferdig formaterte doble skyvesinker (høyre).



Det ble produsert enkle skyvesinker til ender og hjørner etter samme konsept som de doble, men for enkle var utgangspunktet en nedskåret lekt på 36 x 24 mm og det ble frest kun to spor med bordfresen (Figur 3-12).

Figur 3-12. Enkel skyvesink. Ferdig freste fulle lengder klare til å kappes til mindre lengder.



Veggens bunn og toppsviller ble laget av 18 mm kryssfiner (Figur 3-13). Disse var 120 mm brede, tilsvarende tykkelsen på veggen. På den ene siden var det skrudd fast to 24 mm høye fjærer av 18 mm kryssfiner, slik at blokkene kunne plasseres på bunnsvillen og sporene i bunn av blokkene passet med fjærene på bunnsvillen.

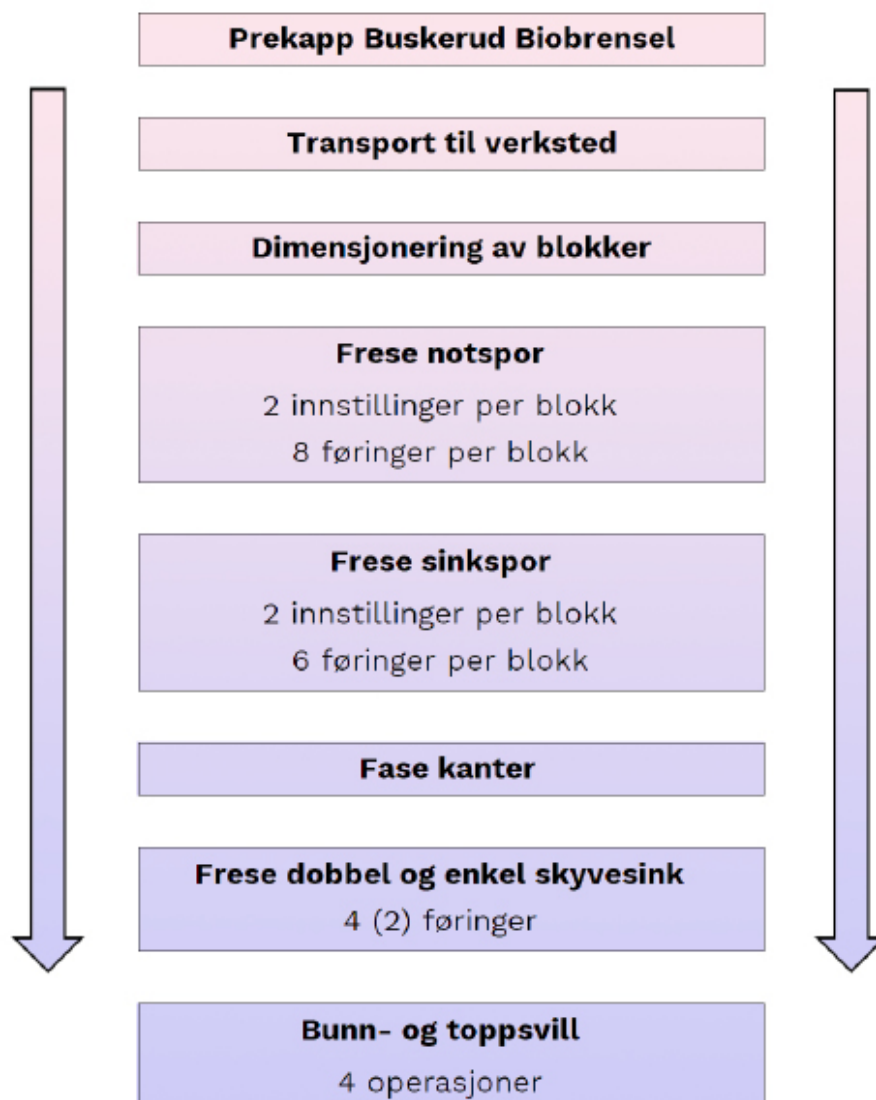
Figur 3-13. Topp- og bunnsvill under montering. Løse fjærer av kryssfiner ble skrudd fast i en 120 mm bred kryssfinerplate.



Det ble produsert endestolper av 48 x 123 mm konstruksjonsvirke. Disse ble klosset ut fra de eksisterende veggene til de sto i lodd, og deretter festet til veggen med skruer.

Formateringsprosessen, oppsummert i Figur 3-14, viser de ulike praktiske operasjonene som ble utført fra start til monteringsklart produkt.

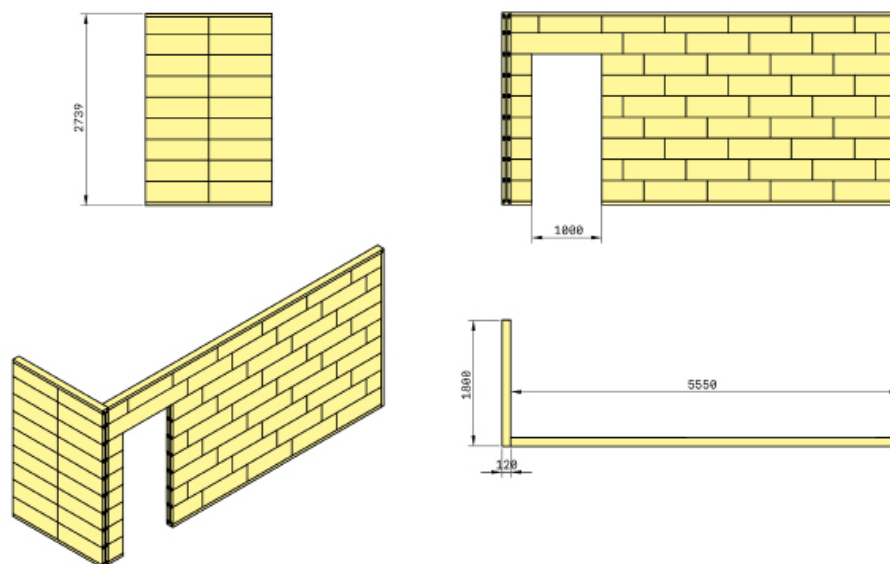
Figur 3-14. Formateringsprosessen for KLB. Pilene viser retning for prosessens steg. Materialene ble prekappet ved Buskerud Biobrensel DA og deretter transportert til snekkerverkstedet. Blokkene ble dimensjonert, og deretter ble det frest ut notspor og sinkspor før kantene på blokkens innside ble faset. Til slutt ble det produsert dobbel og enkel skyvesink og topp- og bunnsvill.



3.2.2 Montering

Pilotveggen ble satt opp som en L-vegg i 90° som bestod av en kortvegg på 1800 mm og en langvegg på 5550 mm (Figur 3-15). L-veggen ble plassert mellom to eksisterende innervegger med funksjon å dele opp et større rom i to. Veggene ble bygget fra gulv til bjelkelag mellom første og andre etasje i bygningen.

Figur 3-15. Demonstrasjonsvegger av KLB som ble oppført i pilotprosjektet.

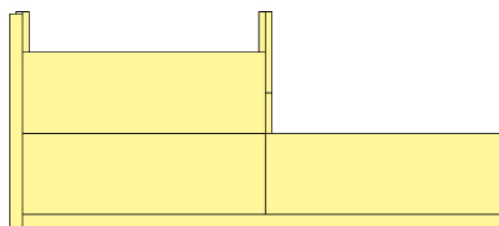


Pilotveggen ble oppført på et støpt betonggulv med lokale ujevnheter, og et laservater ble brukt for å utføre opprettingstiltak. Bunnsvillen ble nivellert over asfaltapp direkte på betonggulv, noen steder flere lag asfaltapp. Det ble borret hull gjennom svill ned i betonggulv og satt ned betonganker. Fra bunnsvillen ble det loddet og montert endestolper mot eksisterende vegger. Endestolpene ble klosset ut fra veggene for å stå i lodd. Toppsvillen ble montert fast med skruer mot bjelkelaget i lodd over bunnsvillen. Nederst på endestolpene mot sokkelen ble 450 mm enkle skyvesinker skrudd fast i endestolpen for feste av den første blokken på bunnsvillen mot vegg.

Kortveggen ble parallellstabled med kontinuerlige vertikale blokkskjøter fra gulv til tak. Langveggen ble oppført i forband stil med blokkskjøter forskjøvet 300 mm for hver høyde. Den parallellstabledede veggene ble oppført først, med unntak av siste blokk på øverste rad mot hjørnet av veggene. En KLB-900 ble tredd ovenfra og ned rundt den enkle skyvesinken festet til endestolpen og presset ned slik at fjærene fra sokkelen passet i notsporene på undersiden av blokken. Neste KLB-900 ble plassert mot den første og sammenføyet med en 450 mm dobbel skyvesink. En 450 mm enkel skyvesink ble senket ned i det neste sinksporet og markerte enden på parallellveggen. For andre rad ble en 300 mm enkel endesink festet til endestolpen som videreføring av den første sinken, og to løse fjærer av 1800 mm ble plassert i notsporene på oversiden av blokkene. Andre rad ble deretter bygd etter samme prinsipp, ved å tre blokkene ned på skyvesinkene og med fjærer

inn i notsporene. Med 450 mm skyvesinker på første rad og 300 mm på de neste radene, endte skjøtene på skyvesinkene midt mellom de horisontale blokkskjøtene. Figur 3-16 viser de tre først blokkene i parallellveggen.

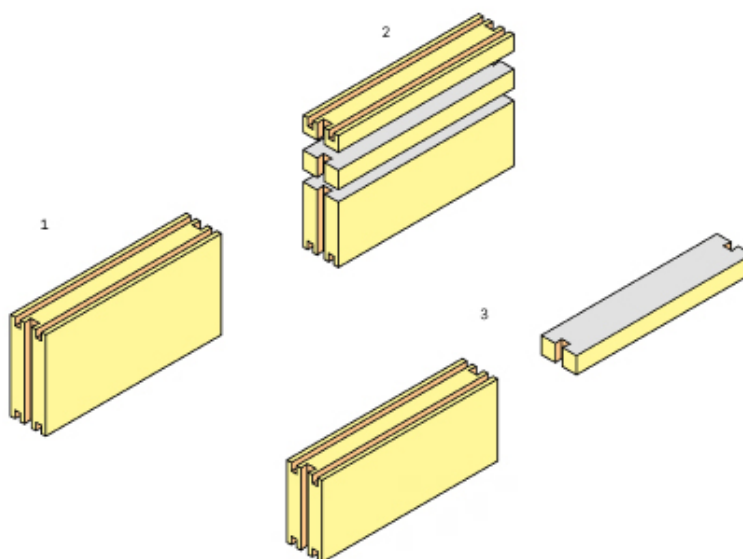
Figur 3-16. Parallellvegg med sinkskjøter i senter av blokkene.



Påfølgende rader ble oppført på samme måte til og med den nest øverste rad. Her ble det ikke lenger mulig å tre skyvesinker ned i sinksporene på grunn av høyden mellom tak og KLB-veggen. Blokkene på den øverste raden ble derfor skjøvet inn fra siden og holdt i riktig posisjon av fjærene fra blokkene under og fra toppsvillen over.

Takhøyden i rommet der pilotveggen skulle oppføres var ikke forenelig med høyden på vegger i KLB-systemet. En standard KLB ble derfor snittet i to på langs og overskuddshøyden kuttet bort. Deretter ble de to delene limt og skrudd sammen til en blokk med riktig høyde (Figur 3-17).

Figur 3-17. En standard KLB snittes og settes sammen til en ny blokk med tilpasset høyde. Blokken blir snittet i to på langs, og overskuddshøyden blir kuttet bort. Deretter blir de to delene skrudd sammen til en ny blokk med riktig høyde.



Langveggen som ble bygget forband ble oppført etter samme prinsipp, men her var alle skyvesinkene 300 mm og fulgte blokkhøydene. Den første raden startet med en KLB-900 og fortsatt med disse så langt det passet frem mot døråpningen. Neste rad startet med KLB-300, raden over KLB-600 og den neste igjen KLB-900, slik at de vertikale skjøtene ble forskjøvet 300 mm for hver rad. KLB-900 ble brukt til å bygge den største delen av veggen, KLB-600 og KLB-300 ble kun brukt som start og slutt av en rad for å få riktig forskyving av blokkene. Mellom hjørnet og døråpningen var veggen kun 300 mm. Denne delen ble derfor bygget opp av KLB-300 parallellstabet.

Som i den parallellstabilede veggen måtte blokkene i den øverste raden skyves inn fra enden av veggen (Figur 3-18).

Figur 3-18. Øverste rad monteres mot tak ved at den skyves på plass fra enden av veggen.



Etter montering av øverste rad i langveggen kunne den siste blokken i kortveggen skyves på plass og veggen ferdigstilles.

Lysåpningen til døren var 1000 mm bred. Det ble produsert en spesialblokk over åpningen på 1600 mm, og en 400 mm blokk til å avslutte øverste rad (Figur 3-19).

Figur 3-19. Spesialblokker: 1600 mm blokk (rosa), lenger enn en standard KLB, til bæring over dør. 400 mm blokk (blå), kortere enn standard KLB, for å avslutte øverste rad.



På den fjerde raden i langveggen ble to av blokkene tilpasset veggbokser (Figur 3-20), Elko multiboks 1 m over gulvet, for skjult elektrisk anlegg. En 73 mm hullsag, stemjern og hammer ble benyttet til å sage ut riktig størrelse på hullet og fjerne trevirket i midten. Hullene for trekkerøret over veggboksene ble borret ut ved bruk av en 18V Makita drill med 18 mm spiralbor. Det ble trukket 16 mm rør fra boksen opp til bjelkelaget for tilkobling til det eksisterende elektriske anlegget.

Figur 3-20. Ferdig montert hjørnevegg med døråpning og skjult elektrisk anlegg oppført i snekkerverkstedet.



Monteringsprosessen, oppsummert i Figur 3-21, viser de ulike praktiske operasjonene som ble utført fra monteringsklart produkt til ferdig pilotvegg.

Figur 3-21. Monteringsprosessen fra ferdig monterbart KLB produkt til ferdig pilotvegg. Pilene viser retning for prosessens steg. Først ble bunn- og toppsvill rettet opp og montert, etterfulgt av montering av stolper mot eksisterende vegger. Blokkene ble stablet fra bunn- til toppsvill, hull til trekkerør og bokser ble tatt ut underveis, det ble gjort tilpassing av øverste rad, og pilotveggen ble så ferdigstilt.

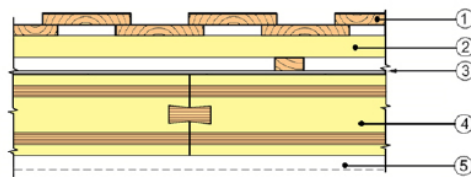


3.3 Beregning av varmegjennomgang

Ved utarbeiding av en ETA for et modulbasert byggesystem på bakgrunn av EAD 130087-00-0204 «Modular Construction systems» kreves dokumentasjon på systemets egenskaper for varmemotstand. Det ble utført beregninger for KLB uten isolasjon og for KLB med isolasjon, for å vurdere om KLB-systemet innfrir TEK17 krav til U-verdi for yttervegger (dibk, 2017).

Figur 3-22 illustrerer oppbygging av en ferdig vegg uten isolasjon. Denne består av KLB med utvendig vindsperre og lufttet kledning. For å finne total varmemotstand (R_{TOT}) ble de forskjellige sjiktene motstand lagt sammen. Beregninger ble gjort i Excel (Microsoft Excel, versjon 2203).

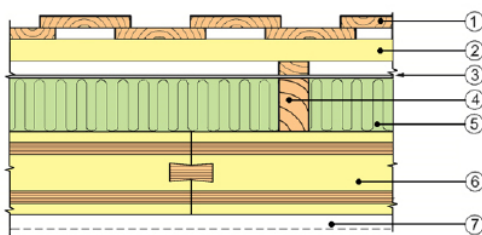
Figur 3-22. Horisontal-snitt. Utvendig kledning (1), utlekting av kledning (2), vindsperreduk (3), KLB (4) og eventuell innvendig kledning (5).



For KLB ble det tatt utgangspunkt i varmeledningsevnen (λ -verdi), oppgitt i Watt per meter Kelvin (W/mK), til KL-tre på 0,13 W/mK (Gustafsson et al., 2019). λ -verdien til KL-tre ble deretter multiplisert med tykkelsen på 120 mm for å finne sjiktets varmemotstand (R-verdi), oppgitt i kvadratmeter Kelvin per Watt (m^2K/W). Vindsperreduken i beregningene har en varmemotstand på 0,030 m^2K/W og for ventilert kledning og utvendig varmemotstand (R_{se}) benyttes en standardisert R-verdi på 0,13 m^2K/W (Edwardsen & Ramstad, 2014).

Figur 3-23 illustrerer oppbygging av ferdig vegg basert på KLB med utvendig isolasjon, vindsperre og lufttet kledning. For denne bygge-metoden vil isolasjonssjiktet, som ble satt til 198 mm, utgjøre et tillegg i varmemotstanden. λ -verdien til isolasjonen er satt til 0,038 W/mK lik verdien for hunton trefiberisolasjon (Hunton, 2019). I beregningene er λ -verdien 0,12 W/mK for trevirket benyttet til utlektingen i isolasjonssjiktet (Edwardsen & Ramstad, 2014). λ -verdiene til komponentene i isolasjonssjiktet ble multiplisert med isolasjonstykkelsen på 198 mm for å gi varmemotstand, R. I dette sjiktet er prosentvis fordeling av materialer satt til 12 % trevirke og 88 % isolasjon, verdiene baseres på senteravstand på 600 mm og stenderbredde 48 mm.

Figur 3-23. Horisontal-snitt. Utvendig kledning (1), utlekting av kledning (2), utlekting til isolasjon (4), isolasjon (5), vindsperreduk (3), KLB (6) og eventuell innvendig kledning (7).



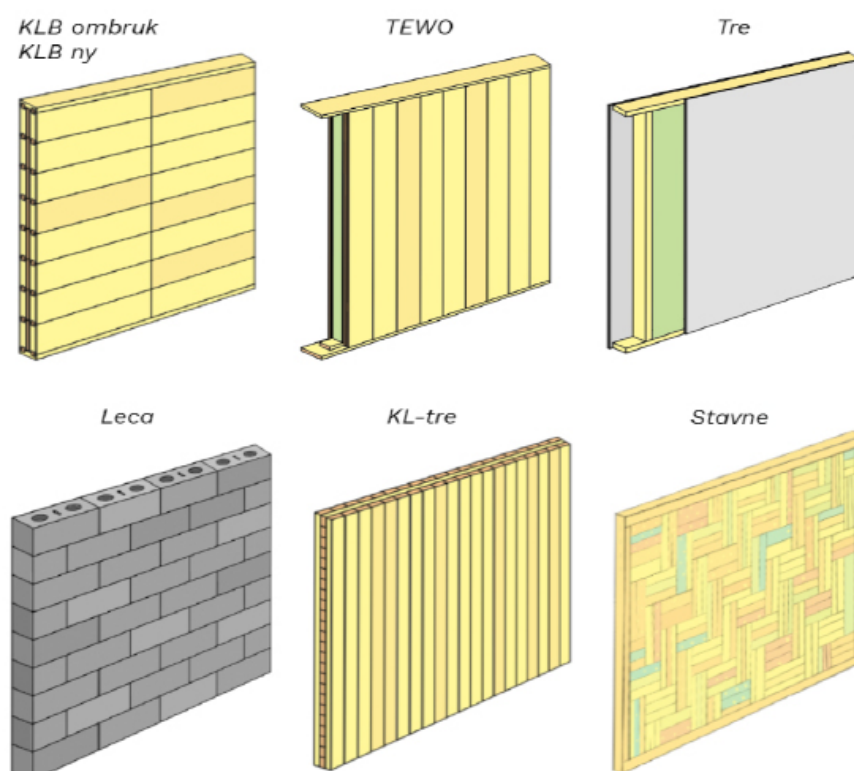
Beregninger av totale R-verdi og varmegjennomgangskoeffisienten (U-verdi) for KLB, med og uten utvendig isolasjon, er vist i Vedlegg [V1](#).

4 METODE FOR LIVSLØPSVURDERING

4.1 Veggkonstruksjoner og material-sammensetning

For å gjøre kvantitative vurderinger av klimagassutslipp for KLB-systemet undersøkte vi til sammen syv veggkonstruksjoner (Figur 4-1). Det var først interessant å sammenlikne KLB laget av ombrukte eller resirkulerte materialer (*KLB ombruk*) med KLB laget av nye materialer (*KLB ny*). Vi valgte så ut fem typer lastbærende veggkonstruksjoner som på ulike måter er sammenliknbare med KLB. Disse var en vegg av TEWO elementer (*TEWO*), bindingsverksvegg i tre med mineralullisolasjon og gips (*Tre*), Leca blokkvegg (*Leca*), vegg av KL-tre (*KL-tre*) og vegg av Stavneblokka (*Stavne*).

Figur 4-1. Ulike veggkonstruksjoner/design. Fra venstre øverst: *KLB ombruk*/*KLB ny*, *TEWO* og *Tre*. Fra venstre nederst: *Leca*, *KL-tre* og *Stavne*.



Veggkonstruksjonene, også betegnet som veggdesign, består av komponenter av forskjellige typer materialer og produkter, og de har forskjellig standardiserte dimensjoner og oppbygning.

KLB ombruk/ny består av en sammensetning av konstruksjonsvirke til topp- og bunnsvill (Treindustrien, 2015a), kryssfiner til løs fjær og skyvesink (Moelven, 2018), og KL-tre som utgjør KLB-900 delen av veggen (Splitkon, 2020). *TEWO* består kun av *TEWO* elementer (Termowood, 2016), *Tre* består av en sammensetning av konstruksjonsvirke til bindingsverk, mineralull som isolasjonsmateriale (Glava, 2019), og gips på begge sider av veggen (Norgips, 2020). *Leca* består kun av Lecablokker (Leca, 2015), og *KL-tre* består kun av KL-tre. For veggkonstruksjonen *Stavne* (Treindustrien, 2015b), beregnet vi mengde heltrepanel av gran som ga tilnærmet like verdier som den verdien presentert for «interiørtre» i rapporten «Klimagassutslipp for Stavneblokka» (Bramslev & Baarnes, 2012).

For beregning av prosentvis materialsammensetning for *KLB ombruk/ny*, ble det tatt utgangspunkt i en vegg bestående av 72 stk KLB-900 med topp- og bunnsvill, som ga veggareal på 20,13 m² og volum på 2,42 m³. Den prosentvise sammensetningen ble så overført til andel av ulike EPDer. Det totale volumet av en vegg med samme areal ble også beregnet for designet *Tre*, som på lik linje med *KLB ombruk/ny* består av en prosentvis sammensetning av ulike EPDer. Vedlegg [V2](#) viser beregninger for prosentvis materialsammensetning for disse tre designene utført i Excel (Microsoft Excel, versjon 2203). Tabell 4-1 presenterer sammensetningen for alle de syv veggdesignene med EPD per komponent, andel EPD og materialetetthet per komponent. Sistnevnte ble beregnet fra andel EPD og tetthet oppgitt i hver EPD. I tillegg er det indikert om en komponent er laget av ombrukt eller resirkulert materiale eller ikke. For *Stavne* er komponenten resirkulert trevirke det samme som «interiørtre» nevnt over.

Tabell 4-1. Oversikt over komponent, EPD, andel EPD og materialetetthet for veggdesignene *KLB ombruk*, *KLB ny*, *TEWO*, *Tre*, *Leca*, *KL-tre* og *Stavne*. EPD for ulike komponenter er vektet i andel (i %) per 1 m³ vegg. Beregninger for vektningen for *KLB ombruk/ny* og *Tre* er vist i Vedlegg (V2). Materialetetthet per komponent er beregnet fra prosentandelen og tetthet oppgitt i aktuell EPD. Komponent laget av ombrukt eller resirkulert materiale (Ombruk) er merket med grønn hake for «JA» og rødt kryss for «NEI».

Design	Komponent	EPD nr	Tetthet [kg/m ³]	Andel [%]	Ombruk
<i>KLB ombruk</i>	Vegg		460,78	100,0%	
	Blokk	NEPD-2042-902-NO	460,00	93,1%	✓
	Løs fjær og skyvesink	NEPD-1579-604-EN	489,70	3,7%	✗
	Topp- og bunnsvill	NEPD-307-179-EN	450,00	3,2%	✗
<i>KLB ny</i>	Vegg		460,78	100,0%	
	Blokk	NEPD-2042-902-NO	460,00	93,1%	✗
	Løs fjær og skyvesink	NEPD-1579-604-EN	489,70	3,7%	✗
	Topp- og bunnsvill	NEPD-307-179-EN	450,00	3,2%	✗
<i>TEWO</i>	Vegg	NEPD-1210-379-NO	151,67	100,0%	✗
<i>Tre</i>	Vegg		203,47	100,0%	
	Overflate	NEPD-2135-966-EN	733,34	20,3%	✗
	Isolasjon	NEPD-1696-683-EN	17,50	70,3%	✗
	Sviller og stendere	NEPD-307-179-EN	450,00	9,4%	✗
<i>Leca</i>	Vegg	NEPD-2804-1505-EN	705,00	100,0%	✗
<i>KL-tre</i>	Vegg	NEPD-2042-902-NO	460,00	100,0%	✗
<i>Stavne</i>	Vegg		-	100,0%	
	Resirkulert trevirke		-	89,3%	✓
	Dybler og treramme	NEPD-308-179-EN	420,00	10,7%	✗

4.2 Livsløpsvurderingen

En livsløpsvurdering, eller LCA modell, i henhold til krav fra EN-15978 og NS 3720 ble laget for de syv veggdesignene *KLB ombruk*, *KLB ny*, *TEWO*, *Tre*, *Leca*, *KL-tre* og *Stavne* ved å bruke One Click LCA programvare for livsløpsvurderinger (One Click LCA LTD, versjon: 0.2.4)

I One Click LCA ble analysen utført som følger: Det ble opprettet et prosjekt for en bygning kalt KLB. De syv designene, ble etablert under punktet «Designfase». Blant tilgjengelige verktøy valgte vi «Beregningsverktøy for bygninger LCA, EN – 15978» og «Byggets livssyklusvurdering i henhold til NS 3720 – Metode for klimagassberegninger for bygninger». Videre valgte vi modelleringsmetoden «End of life calculation method» og alternativet «Use EPD EOL scenario» som tillater brukeren å gjøre justeringer. For modelleringen må følgende prosjektinformasjon fylles ut for hvert design: energiforbruk, beregningsperiode, bygningsareal og bygningsmaterialer. Energiforbruk ble satt til 0 kWh/år for alle designene ettersom dette er ment for en komplett bygning i drift gjennom et livsløp og ikke relevant i vårt prosjekt. Beregningsperioden ble satt til 60 år og bygningsarealet til 1 m². Under bygningsmaterialer ble det så under punktet «Søylor og bærende vertikale strukturer» lagt til eksisterende EPDer med eventuell vektning per komponent ifølge Tabell 4-1. Det ble valgt en funksjonell enhet på 1 m³ for alle design, og indikert om komponenten var av ombruksmateriell.

Avkapp/svinn ble satt til 0 % for *KLB ombruk*, *KLB ny*, *TEWO* og *KL-tre* ettersom det ikke er forventet svinn i konstruksjonsfasen for disse. For *Tre* og *Leca* ble det benyttet verdier for svinn foreslått i One Click LCA fra EPDene for komponentene designene består av. Disse var på 16,7 % for konstruksjonsvirke, 12,5 % for gips og 8 % for mineralull og 7,5 % for *Leca*. Svinnprosenten til heltrepanelen benyttet til beregningene av *Stavne* ble satt til 25 % slik at verdier i konstruksjonsfasen samsvarte med rapporten «Klimagassutslipp for Stavneblokka» (Bramslev & Baarnes, 2012).

For de to KLB designene ble det gjort en beregning for transportutslipp ved materialefrakt fra Buskerud Biobrensel DA til snekkerverkstedet (Tabell 4-2). Utslippsverdier ble hentet fra Miljødirektoratet (Miljødirektoratet, 2020).

Tabell 4-2. Beregnet klimagassutslipp for transport av KLB materialer.

Varebil (diesel)	0,19	kg CO ₂ e/km
Avstand	93,00	km
SUM	17,39	kg CO ₂ e

For å beregne samlet klimagassutslipp i KLB produksjonsfasen, tok vi utgangspunkt i totalt volum KL-tre materialer på 5,46 m³ og brukte omregningsverdi i kilowatt-time på 0,0287 kg CO₂e/kWh hentet fra One Click LCA (One Click LCA Ltd, 2021).

Tabell 4-3. Beregning av klimagassutslipp for produksjonen av KLB.

<i>Utstyr</i>	<i>Ytelse (W)</i>	<i>tid (timer)</i>	<i>kWh</i>	<i>Klimagassutslipp kg CO₂e</i>	<i>Klimagassutslipp kg CO₂e/m³</i>
Transport				17,39	3,18
Mafell 185e sirkelsag	3000	1,2	3,60	0,10	0,02
Felder KFS-37 kombimaskin	4000	6,0	24,00	0,69	0,13
Festool OF1010 overhåndsfres	110	0,1	0,01	0,00	0,01
Totalt klimagassutslipp produksjon					3,34

Beregnet klimagassutslipp på 3,34 kg CO₂e/m³ for produksjonen av KLB ble så lagt til som et eget punkt under bygningsmaterialer sammen med EPDer for *KLB ombruk* og *KLB ny*.

5 RESULTATER KLB

5.1 Byggesystemet KLB

Konseptutviklingsprosjektet ga et komplett byggeblokkssystem laget hovedsaklig av avkapp fra KL-tre, og vi kalte det derfor for KLB-systemet. Komponentene i KLB-systemet er blokker av ulike dimensjoner, løse fjærer for horisontale blokksammenføyninger, doble skyvesinker for vertikale låsende blokksammenføyninger, skyvesinker for innfesting mot hjørne- og endestolper, bunn- og toppsviller og enkelte spesialprodukter.

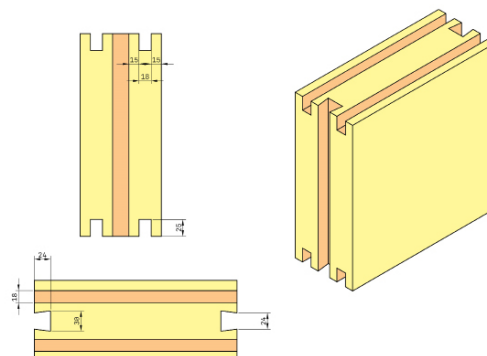
KLB-900, -600 og -300 er standardblokkene i systemet. Disse er 300 mm høye, 120 mm tykke og lengdene er henholdsvis 900, 600 og 300 mm. KLB-900 er hovedbyggeblokk, og KLB-600 og KLB-300 brukes som avslutning mot hjørner, ender eller åpninger. I tillegg til de tre nevnte lengdene kan KLB også enkelt produseres i spesiallengder. Blokkene er designet med spor til sammenføyning. Tabell 5-1 viser KLB-standardblokker med volum og vekt.

Tabell 5-1. Oversikt over volum og vekt for KLB-standardblokker. Vekt er beregnet ut volumet og en tetthet på 460 kg/m³.

Modul	Volum [m ³]	Vekt [kg]
KLB-900	0,03	13,8
KLB-600	0,02	9,2
KLB-300	0,01	4,6

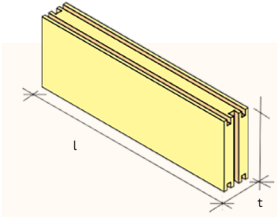
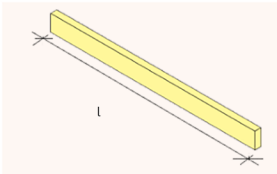
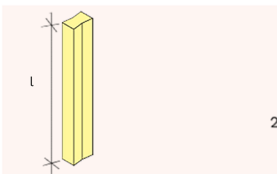
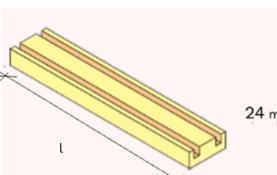
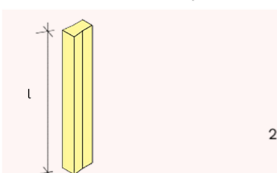

Sporene er like for alle blokker, slik at blokker av ulike lengder kan festes til hverandre til en ønsket total lengde. På under- og oversiden av hver blokk er det frest ut to langsgående, rektangulære notspor som er 18 mm brede og 25 mm dype, plassert 15 mm fra hver ytterkant, som vist i Figur 5-1.

Figur 5-1. Målsatte detaljer for spor i KLB-900, -600 og -300 standardblokker.



I begge ender av hver blokk er det et sinkspor. Sinksporet, som er vinklet og bredere i bunnen, er designet for at en dobbel skyvesink kan skyves inn for å låse to og to blokker sammen. Sinksporets dybde er 24 mm, bredden er 24 mm på det smaleste og 30 mm på det bredeste (Figur 5-1). Blokkene er laget av 120 mm KL-tre bestående av 3 eller 5 lameller. Bordene i ytterlamellene, som hadde liggende fibre under pilotprosjektet, delaminerte seg hvor lamellskjøten var nærme kanten og kom i konflikt med notsporet. Dette førte til at det ble valgt å endre til stående fibre i ytterlamellen for blokkene i KLB-systemet.

Figur 5-2. Komponenter i KLB-systemet. KLB standard-blokk, Løs fjær, skyvesink, topp- og bunnsvill, enkel skyvesink og endestolpe presentert med informasjon om dimensjoner, materialer og bruksområde.

	Komponent	Dimensjoner t x h x l	Materiale	Funksjon
	KLB	120 x 300 x 900 120 x 300 x 600 120 x 300 x 300	KL-tre	Hovedkomponent To notspor i topp/bunn og sinkspor i endene
	Løs fjær	18 x 48 x løpende	Kryssfiner	Sammenføyningskomponent. Monteres i notspor mellom KLB eller Topp- og bunnsvill
	Dobbelt skyvesink	30 x 48 x 300 30 x 48 x 450 30 x 48 x løpende	Kryssfiner	Sammenføyningskomponent. Monteres i sinkspor mellom KLB.
	Topp- og bunnsvill	48 x 120 x løpende	Konstruksjonsvirke	Topp og bunn komponent. Avsutting mot gulv og tak. To notspor
	Enkel skyvesink	30 x 48 x 300 30 x 48 x 450 30 x 48 x løpende	Kryssfiner	Sammenføyningskomponent. Monteres i sinkspor mellom KLB eller mot Endestolpe.
	Endestolpe	48 x 120 x løpende	Konstruksjonsvirke	Endekomponent. Monteres mot vegg eller mot hjørne. Ett notspor

Løs fjær er en av sammenføyningskomponentene i KLB-systemet (Figur 5-2, rad 2). Den er produsert av 18 mm kryssfinér av gran og har en høyde på 48 mm. Lengden på den løse fjæra tilpasses på byggeplass (løpende), men fra fabrikk er denne 2440 mm tilsvarende lengden på en standard kryssfinerplate.

KLB-systemets doble skyvesink (Figur 5-2, rad 3) er en annen sammenføyningskomponent. Denne skal låse blokkene til hverandre og hindre sideveis bevegelse. Den ble først produsert heltre av gran (demonstrert i pilotveggen), men ble utbedret ved å produseres av 30 mm kryssfiner for få økt styrkekapasitet, passende tykkelse, og for å oppnå høyere formstabilitet. Den doble skyvesinken er 48 mm bred og har høyder på 300 mm og 450 mm. Komponenten er timeglassformet og sidene er frest til 7°. På det smaleste punktet i senter er tverrsnittet 24 mm bredt, mens det på endene er 30 mm bredt.

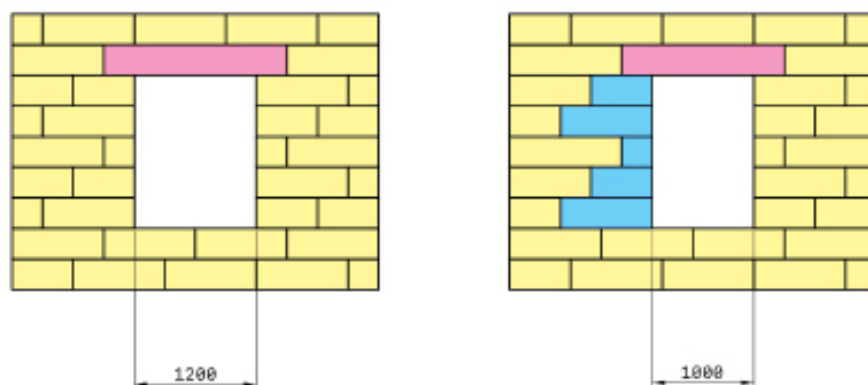
Topp- og bunnsvill (Figur 5-2, rad 4) er for avslutning mot gulv og tak. Disse ble først laget av 18 mm kryssfiner (demonstrert i pilotveggen), for så å utbedres ved å produseres av konstruksjonsvirke C24 på 48 x 123 mm som er høvlet i bredden til 48 x 120 mm. Lengdene på svillene kuttet etter lengdene på veggmodulene som skal oppføres. Svillen har to spor på den ene siden, som hvert er 18 mm bredt, 25 mm dypt og plassert 15 mm fra hver ytterkant, slik at de passer med notsporene på topp og bunn i blokkene.

Enkel skyvesink er en tredje sammnenføyningskomponent i systemet (Figur 5-2, rad 5). Denne har samme form som den doble skyvesinken på den ene halvdel, hvor det smaleste punktet i senter har et tverrsnitt på 24 mm og sidene vinkles med 7°, slik at tykkelsen øker til 30 mm ved enden. Den andre halvdel har rektangulær form, 24 mm bred og 24 mm dyp. Under oppføring av pilotveggen ble enkle skyvesinker uten den rektangulære halvdel montert direkte på eksisterende konstruksjon. Enkel skyvesink ble også utbedret fra heltre gran til kryssfiner etter arbeidet med pilotveggen. Den utgjorde da mindre masse og ble mindre sårbar for ødeleggende sprekke-dannelser. Den rektangulære formen på den ene siden tillater komponenten å føres direkte inn i et rett spor i endestolpen, slik at veggene bygges i lodd i hele høyden. Standard lengde på enkel skyvesink er 300 mm og 450 mm.

I KLB-systemet benyttes endestolper (Figur 5-2, rad 6) for å avslutte en vegg, dette kan være mot en eksisterende vegg, et hjørne, eller utover i rommet for en frittstående vegg. Endestolpene er produsert av konstruksjonsvirke C24 (48 x 123 mm som høvles til 48 x 120 mm) med et sentrert langsgående notspor. Den rektangulære delen av den enkle skyvesinken blir skjøvet inn i et notspor på endestolpen og kan låses fra siden med skruer. For å få sammenføyingen kun trebasert kan det borres hull og bankes inn treplugger som kappes i flukt med ytterflaten.

KLB-systemet gir føringer for veggdimensjoner da systemet er basert på blokker med hele lengder og høyder som følger intervaller på 300 mm. Bygges det mot eksisterende konstruksjoner eller med dør-, vindu, lysåpning eller annet, kan det bli behov for spesialtilpassede blokker. Eksempel på en løsning med spesialtilpassede blokker i bredden er illustrert i Figur 5-3.

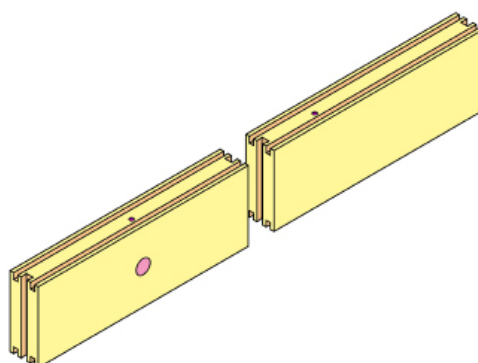
Figur 5-3. Vegger av KLB med spesialtilpassede blokker i bredden. Spesialblokk (lilla) benyttet over åpning på 1200 mm (venstre). Spesialblokker (blå) benyttes til å danne åpning på 1000 mm som ikke følger systemets standardlengder med intervaller på 300 mm.



Dersom det skal bygges lysåpninger med høyder som ikke følger 300 mm intervallene til KLB, kan blokkene i en eller to rader spesialtilpasses slik at ønsket høyde oppnås. Alternativt kan en topp- eller bunnsvill med lengde lik bredden på åpningen høvles til riktig høyde og plasseres i topp og/eller bunn av lysåpningen.

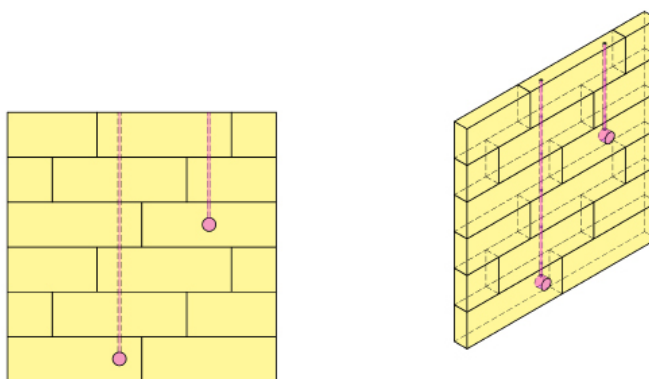
KLB-EL er en spesialtilpasset blokk med hull til veggbokser (kontaktstøpsel, bryter, dimmer eller annet) på den ene av blokkens sider, dette blir da blokkens fremside. Dimensjonene på hullene varierer etter type veggbox, ledningsdimensjon, antall ledninger og antall brytere. De mest brukte veggboxene passer i et hull som er 73 mm i diameter og 60 mm dype. Hullene plasseres slik at de ikke kommer i konflikt med skjøtene mellom blokker, utover dette kan de plasseres etter ønsket høyde og bredde. Fra veggboxshullet går et mindre gjennomgående hull til toppen og/eller bunnen av blokka som er ment for 16 mm trekkerør til ledninger. Siden det gjennomgående hullet på 18 mm i KLB-EL i pilotveggen var trangt for monteringen av trekkerør, ble dette endret til 22 mm. KLB-R er blokker som kun har 22 mm gjennomgående hull for videreføring av trekkerør fra KLB-EL. Hullene borres i utgangspunktet ut på fabrikk, dette kan også utføres på byggeplass før oppføring. Figur 5-4 viser KLB-EL for veggboks og KLB-R for trekkerør.

Figur 5-4. KLB-EL blokk (venstre) med hull til veggboks og rørføring (rosa sirkel på blokkens fremside), og KLB-R blokk (høyre) med hull til rørføring.



I Figur 5-5 demonstreres en praktisk løsning for en KLB-vegg som har to veggbokser i ulik høyde og trekkerør som går opp mot tak. I denne vegggen kan brukeren for eksempel ha en stikkontakt og en lysbryter med skjult elektrisk rørføring.

Figur 5-5. KLB-vegg i 2D (venstre) og 3D (høyre) perspektiv, med KLB-EL (rosa sirkel) for veggbokser til elektrisk anlegg og KLB-R for videreføring av trekkerør (stiplet linje) til skjult rørføring.



5.2 KLB sammenliknet med andre modulbaserte byggesystemer

Vi gjorde en sammenlikning mellom KLB og de fire modulbaserte byggesystemene TEWO, Speedblock, STEKO og Stavneblokka, som har liknende komponenter og konstruksjonsmetode. Vedlegg [V3](#) lister de viktigste egenskapene til disse fem ulike modulbaserte byggesystemene.

KLB, STEKO og Stavneblokka er systemer som kun består av komponenter av rent trevirke. TEWO og Speedblock produseres med en sammensetning av tre og isolasjonsmateriale, mens STEKO er ment å fylles med et isolasjonsmateriale på byggeplass. For STEKO kan også elektrisk anlegg enkelt etableres på byggeplass etter at veggene er montert ved å trekke rør i de hule blokkene før fylling med isolasjon. TEWO skiller seg fra de andre i at produktet kommer i ulike tykkelser fra 130 til 330 mm og lengder mellom 2400 mm og 3000 mm. TEWO oppgir at vekten er < 25 kg. Dersom den største TEWO blokken (330 x 200 x 3000) veier 25 kg vil den minste TEWO blokken (130 x 200 x 2400) ha en vekt på 7,8 kg. Standardblokken til STEKO er den letteste blant byggeblokkene med en vekt på 6,5 kg, Speedblock er litt tyngre med 7,3 kg, og KLB veier 13,8 kg som er 1,2 kg lettere enn Stavneblokka på 15 kg.

5.3 Varmegjennomgang for KLB

Beregningene for varmeisolerende evne og energieffektivitet for KLB yttervegger (Vedlegg [V1](#)) viser at en yttervegg kun bestående av KLB med vindsperrerduk og luftet utvendig kledning har en sammenlagt varmemotstand, R-verdi, på 1,213 m²K/W og varmegjennomgangskoeffisienten, U-verdien, er 0,824 W/m²K. Ved å isolere denne vegggen utvendig med 198 mm trefiberisolasjon blir den totale R-verdien 5,589 m²K/W, som gir en U-verdi på 0,176 W/m²K.

6 RESULTATER

LIVSLØPSVURDERING

Livsløpsvurderingen, eller LCA modellen, laget for de syv veggdesignene *KLB ombruk*, *KLB ny*, *TEWO*, *Tre*, *Leca*, *KL-tre* og *Stavne* ved å bruke One Click LCA programvaren, er her presentert først i henhold til EN-15978 krav og deretter i henhold til NS 3720 krav. Til sammen dekker disse et «vugge til grav» system. Til slutt presenterer vi «vugge til vugge» perspektivet som produsenter i dag må ta stilling til ved design av nye produkter.

6.1 LCA i henhold til EN-15978 krav

Livsløpsfasene som er inkludert i de ulike designenes miljøvaredeklarasjoner er presentert i Tabell 6-1.

Tabell 6-1. Livsløpsfaser i henhold til EN standard (Norgips, 2020). Produktfase (blå farge) inkluderer: (A1) Råmaterialer, (A2) Transport, (A3) Tilvirkning. Konstruksjon fase inkluderer: (A4) Transport (oransje farge), (A5) Konstruksjon installasjon (grønn farge). Bruksfase (grå farge) tar for seg: (B1) Bruk (B2) Vedlikehold, (B3) Reparasjon, (B4) Utskiftninger, (B5) Renovering, (B6) Operativ energibruk, (B7) operativ vannbruk. Sluttfase (rød farge) inkluderer: (C1) Demontering, (C2) Transport, (C3) Avfallsbehandling, (C4) Avfall til sluttbehandling. Etter endt levetid fase omfatter: (D) Gjenbruks-, gjenvinnings- og/eller resirkuleringspotensiale (gul farge).

Produktfase			Konstruksjon fase		Bruksfase							Sluttfase				Etter endt levetid
Råmaterialer	Transport	Tilvirkning	Transport	Konstruksjon installasjon	Bruk	Vedlikehold	Reparasjon	Utskiftninger	Renovering	Operasjonell energibruk	Operasjonell vannbruk	Demontering	Transport	Avfallsbehandling	Avfall til sluttbehandling	Gjenbruk-gjenvinnings-resirkulering potensiale
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D

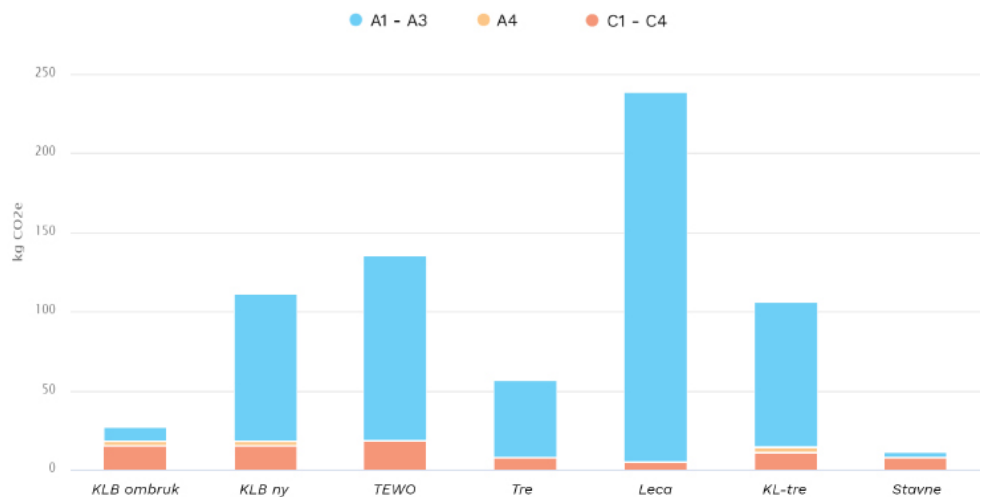
Totale klimagassutslipp for 1 m³ av de ulike veggdesignene, gjennom et livsløp på 60 år, i henhold til EN-15978 krav er vist i Tabell 6-2. For *KLB ombruk* er totalt utslipp beregnet til 30,3 kg CO₂e, som er det nest laveste totale utslippet. Designet *Stavne* har lavest totalt utslipp beregnet til 11,0 kg CO₂e. Av alle designene har *Leca* det største totale utslippet på 238,4 kg CO₂e, etterfulgt av *TEWO* med 135,2 kg CO₂e. For *KLB ny* er totalt utslipp beregnet til 114,4 kg CO₂e, for *KL-tre* 105,7 kg CO₂e og for *Tre* er utslippet beregnet til 56,4 kg CO₂e.

Tabell 6-2. LCA-beregnete totale klimagassutslipp i kg CO₂e for veggdesignene *KLB ombruk*, *KLB ny*, *TEWO*, *Tre*, *Leca*, *KL-tre* og *Stavne*, og medberegnete livsløpsfaser i henhold til EN-15978 krav. De ulike fasene er hentet fra Tabell 6-1.

Faser		<i>KLB ombruk</i>	<i>KLB ny</i>	<i>TEWO</i>	<i>Tre</i>	<i>Leca</i>	<i>KL-tre</i>	<i>Stavne</i>
Produktfase	A1-A3	10,7	94,8	116,6	48,5	234,2	90,3	3,1
Transport	A4	2,3	2,3	0,8	0,6	1,9	2,3	0,1
Slutfase	C1-C4	17,4	17,4	17,8	7,2	2,3	13,2	7,9
Total		30,3	114,4	135,2	56,4	238,4	105,7	11,0

I Figur 6-1 er samme totale klimagassutslipp illustrert i et søylediagram der de inkluderte fasene er representert med ulike farger. I produktfasen (Tabell 6-1, A1-A3, blå del av søylene i Figur 6-1) gir *Stavne* lavest utslipp med 3,1 kg CO₂e. *Leca* gir størst utslipp på 234,2 kg CO₂e, etterfulgt av *TEWO* med 116,6 kg CO₂e. For *KLB ny* og *KL-tre* er utslippene relativt like med henholdsvis 94,8 og 90,3 kg CO₂e, mens den for *Tre* er 48,5 kg CO₂e. *KLB ombruk* har nest lavest utslipp i produktfasen med 10,7 kg CO₂e.

Figur 6-1. LCA-beregnete totale klimagassutslipp i kg CO₂e i ulike livsløpsfaser i henhold til EN-15978 krav. Fra venstre til høyre vises søyler for designene *KLB ombruk*, *KLB ny*, *TEWO*, *Tre*, *Leca*, *KL-tre* og *Stavne*. Produktfase (A1-A3) vises i blått. Transport (A4) vises i oransje. Slutfase (C1-C4) vises i rødt. Felt uten farge (A5, B1-B7, D) er ikke medberegnet i denne vurderingen.



I transportfasen (Tabell 6-1, A4, oransje del av søylene i Figur 6-1) produserer *KLB ombruk*, *KLB ny* og *KL-tre* like store utslipp på 2,3 kg CO₂e. *Leca*, *TEWO* og *Tre* har lavere transportutslipp på 1,9, 0,8 og 0,6 kg CO₂e. *Stavne* har det laveste transportutslippet på 0,1 kg CO₂e.

TEWO, *KLB ny* og *KLB ombruk* har størst utslipp slutfasen (Tabell 6-1, C1-C2, rød del av søylene i Figur 6-1) på henholdsvis 17,8, 17,4 og 17,4 kg CO₂e. Med noe lavere utslipp følger *KL-tre* på 13,2 kg CO₂e, videre viser *Stavne* og *Tre* enda lavere utslippsverdier for disse fasene med henholdsvis 7,9 og 7,2 kg CO₂e. *Leca* har det laveste utslippet i slutfasen med 2,3 kg CO₂e.

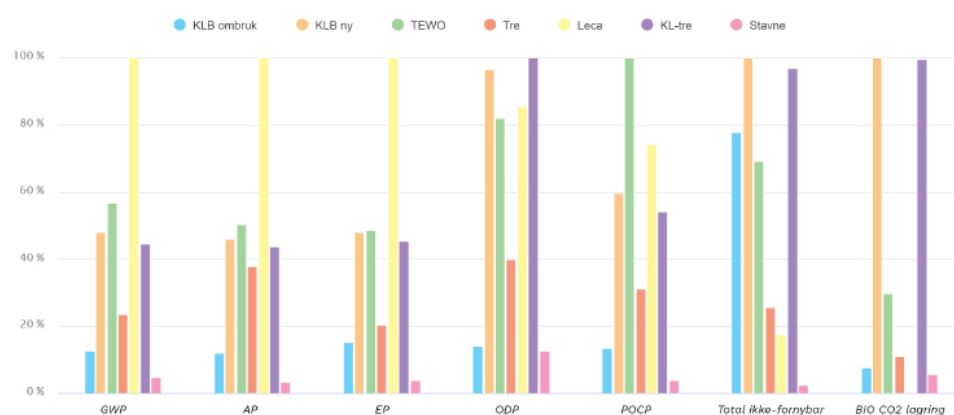
Tabell 6-3 lister de ulike forurensningskategoriene med tilhørende kortnavn som brukes i en LCA rapport. Forurensningskategorier betegnes også som påvirkningskategorier,

Tabell 6-3. Resultat-kategorier for forurensingspotensiale i en LCA rapport, der analysen er gjort i henhold til EN-15978 (One Click LCA Ltd, 2021).

<i>Resultat output</i>	<i>Enhet</i>	<i>Forklaring</i>
GWP - Global Warming Potential	kg CO ₂ e	Globalt oppvarmingspotensial eller klimagassutslipp er et mål på oppvarmings-effekten som drivhusgassene har på atmosfæren. GWP-verdiene benyttes til å regne om utslipp til CO ₂ e. Bokstaven «e» i den kjemiske formelen står for ekvivalenter.
AP - Acidification	kg SO ₂ e	Forsurningspotensial for kilder på land og vann; Når forsurende stoffer reagerer med vann og faller som «sur nedbør», fører dette til skade på vannøkosystemene.
EP - Eutrophication	kg PO ₄ ³⁻ e	Overgjødslingspotensial; beskriver effekten av å tilføre mineralnæringsstoffer til jord eller vann, som får visse arter til å dominere et økosystem, kompromittere overlevelsen til andre arter og noen ganger resulterer i at hele dyrepopulasjoner dør ut.
ODP - Ozone Depletion Potential	kg CFC11e	Potensiale for nedbryting av stratosfærisk ozon. Beskriver virkningen av stoffer i atmosfæren som bryter ned ozonlaget, som absorberer og hindrer skadelige solenergi-UV-stråler fra å nå jordens overflate.
POCP - Photochemical Ozone Creation Potential	C ₂ H ₄ e	Potensiale for fotokjemisk oksidantdannning. Nedbryting av det stratosfæriske ozonlaget som beskytter flora og fauna mot solens skadelige UV-A og UV-B stråling.
Total ikke-fornybar - Total use of primary energy ex. raw materials	MJ	Summen av ikke-fornybar primærenergi unntatt ikke-fornybare primærenergiressurser brukt som råstoff, og bruk av fornybar primærenergi unntatt fornybare primærenergiressurser brukt som råstoff Abiotisk uttømmingspotensial for fossile ressurser (ADPE).
Bio-CO₂ lagring -Biogent karbonlagringspotensial	kg CO ₂ e bio	Biogent karbon sekvestrert i materialer (i tilfelle A1-A3) eller i voksende vegetasjon (i tilfelle B1), uttrykt som CO ₂ -ekvivalent. Dette biogene karbonet kan eller kan ikke bli bevart etter eiendelens levetid avhengig av slutten av levetiden for nevnte materialer. Denne påvirkningskategorien er atskilt fra regnskapet for det fossile GWP.

Figur 6-2 viser sammenlikningen av de syv ulike veggdesignene prosentvis fordelt i forhold til hverandre per påvirkningskategori.

Figur 6-2. Oversikt over de ulike veggdesignene prosentvis fordelt i påvirkningskategorier (Tabell 6-3). LCA er i henhold til EN-15978 krav. Søylene viser veggdesign med høyeste måling innen hver påvirkningskategori som 100 %. *KLB ombruk* (blå søyle), *KLB ny* (oransje søyle), *TEWO* (grønn søyle), *Tre* (rød søyle), *Leca* (gul søyle), *KL-tre* (lilla søyle) og *Stavne* (rosa søyle).



Søylene til venstre i Figur 6-2 illustrerer det globale oppvarmingspotensialet til hvert av veggdesignene som en prosentandel av designet med høyest verdi på denne målingen. *Leca* har høyest GWP-verdi og vises derfor som 100 %. I forhold til *Leca* har *TEWO* et utslipp som er 43 % lavere med en score på 57 %, etterfulgt av *KLB ny* med 52 % og *KL-tre* med 56 % lavere utslipp, og en score på henholdsvis 48 % og 44 %. Videre følger *Tre* og *KLB ombruk* med utslippsreduksjoner på henholdsvis 76 % og 87 % og score på 24 % og 13 %. I forhold til *Leca* har *Stavne* et utslipp på kun 5 %. Dette er det laveste utslippet av alle designene.

Neste gruppe med søyler i Figur 6-2 viser en prosentvis sammenlikning av potensial for forsuring av kilder på land og vann. *Leca* vises også i denne sammenlikningen som 100 % med 1,23 kg SO₂e. Videre, i avtagende rekkefølge, kommer *TEWO* med 50 %, som tilsvarer 0,62 kg SO₂e, *KLB ny* med 46 % og 0,57 kg SO₂e, *KL-tre* med 44 % som utgjør 0,54 kg SO₂e, og *Tre* med 38 % som utgjør 0,47 kg SO₂e og *KLB ombruk* med 12 % som utgjør 0,15 kg SO₂e. *Stavne* har igjen best resultat, med et potensiale for forsuring av land og vann på kun 3 % av potensialet til *Leca*, dette utgjør 0,04 kg SO₂e.

Den tredje gruppen med søyler i Figur 6-2 viser en prosentvis sammenlikning av de ulike designenes overgjødslingspotensial. *Leca* har størst overgjødslingspotensial og vises i denne sammenlikningen som 100 %, dette utgjør 0,22 kg PO₄³⁻e. *TEWO* og *KLB ny* har det nest største overgjødslingspotensialet, begge med 48 % av det fra *Leca*. Andelen fra *TEWO* og *KLB ny* utgjør 0,11 kg PO₄³⁻e for hver av produktene. *KL-tre* har et overgjødslingspotensiale tilsvarende 45 % av det fra *Leca*. Dette utgjør også 0,11 kg PO₄³⁻e. Potensialet for *Tre* er på 20 % av *Leca*, med 0,05 kg PO₄³⁻e, *KLB ombruk* har 15 % og 0,03 kg PO₄³⁻e, og det minste overgjødslingspotensialet er for *Stavne* 4 % av *Leca*, og utgjør bare 0,01 kg PO₄³⁻e.

Videre viser den fjerde gruppen med søyler i Figur 6-2 en prosentvis sammenlikning av de ulike veggdesignenes potensiale for nedbryting av stratosfærisk ozon. *KL-tre* har størst potensiale og vises her som 100 %, dette utgjør $1,36 \times 10^{-5}$ kg CFC11e. I avtagende rekkefølge kommer *KLB ny* med 97 % av dette, *Leca* med 85 %, *TEWO* med 82 %, *Tre* med 40 %, *KLB ombruk* med 14 % og til slutt *Stavne* med det minste potensiale for nedbryting av stratosfærisk ozon med bare 12 %, som utgjør $1,69 \times 10^{-6}$ kg CFC11e.

Den femte gruppen med søyler i Figur 6-2 viser en prosentvis sammenlikning av de ulike veggdesignenes potensial for fotokjemisk oksidantdannelse. *TEWO* har størst potensiale og vises i denne sammenlikningen som 100 % med en verdi på 0,07 kg C_2H_4e . I avtagende rekkefølge følger *Leca* med 74 % som er 0,05 kg C_2H_4e , *KLB ny* med 59 % som utgjør 0,04 kg C_2H_4e , *KL-tre* med 54 % og 0,04 kg C_2H_4e , *Tre* med 8 % og 0,02 kg C_2H_4e , *KLB ombruk* med 13 % og 0,01 kg C_2H_4e , og *Stavne* med minst potensiale for fotokjemisk oksidantdannelse med bare 4 % som utgjør 0,003 kg C_2H_4e .

Den sjette gruppen søyler i Figur 6-2 viser en prosentvis sammenlikning av de ulike veggdesignenes sum av ikke-fornybar primærenergi (unntatt ikke-fornybare primærenergiressurser brukt som råstoff). *KLB ny* har størst sum på 16414 MJ som i denne sammenlikningen er 100 %. *KL-tre* har den nest høyeste verdien i denne målingen, med 94 %. Dette utgjør 15905 MJ. Videre har *KLB ombruk* en andel på 78 % som utgjør 12728 MJ, *TEWO* 31 % som utgjør 11343 MJ, og *Tre* 25 % som utgjør 4183 MJ. De to designene med lavest ikke-fornybar primærenergi er *Leca* med 17 %, og *Stavne* med 2 %, prosentandeler som henholdsvis tilsvarer 2865 MJ og 365 MJ.

Den siste sammenlikningen som vises i Figur 6-2 (søylene til høyre i figuren) er de forskjellige veggdesignenes biogene karbonlagring. De største verdiene er fra *KLB ny* som derfor utgjør 100 %, med en lagring på 691 kg CO_2e bio. Videre følger de andre trebaserte designene *KL-tre* med 99 % tilsvarende lagring på 687 kg CO_2e bio, *TEWO* med 30 % som utgjør 205 kg CO_2e bio, *Tre* med 11 % som utgjør 77 kg CO_2e bio, *KLB ombruk* med 7 % som utgjør 51 kg CO_2e bio og *Stavne* med 6 % som utgjør 38 kg CO_2e bio. *Leca* har ingen lagring av biogent karbon.

6.2 Klimagassutslipp i henhold til NS 3720 krav

Tabell 6-4 viser en oversikt over de ulike veggdesignenes totale klimagassutslipp i henhold til krav fra NS 3720. Her medberegnes også konstruksjonsfasen (Tabell 6-1, A5) som ikke er representert ifølge EN-15978. *Leca* har størst utslipp i denne fasen på 17,9 kg CO_2e som gir et totalutslipp på 256,3 kg CO_2e . Utslippene for *Tre* og *Stavne* er 6,9 og 0,8 kg CO_2e mens for de resterende designene, *KLB ombruk*, *KLB ny*, *TEWO* og *KL-tre* er utslippene i denne fasen null. Totalutslippene til *Tre*, *Leca* og *Stavne* blir henholdsvis 63,3, 256,3 og 11,8 kg CO_2e .

Tabell 6-4. Totale klima-gassutslipp i kg CO₂e for veggdesignene *KLB ombruk*, *KLB ny*, *TEWO*, *Tre*, *Leca*, *KL-tre* og *Stavne*, og medberegnete livsløpsfaser i henhold til NS 3720 krav. De ulike fasene er hentet fra Tabell 6-1.

Faser		<i>KLB ombruk</i>	<i>KLB ny</i>	<i>TEWO</i>	<i>Tre</i>	<i>Leca</i>	<i>KL-tre</i>	<i>Stavne</i>
Produktfase	A1-A3	10,7	94,8	116,6	48,5	234,2	90,3	3,1
Transport	A4	2,3	2,3	0,8	0,6	1,9	2,3	0,1
Konstruksjon	A5	0,0	0,0	0,0	6,9	17,9	0,0	0,8
Installasjon								
Slutfase	C1-C4	17,4	17,4	17,8	7,2	2,3	13,2	7,9
Total		30,3	114,4	135,2	63,3	256,3	105,7	11,8

Figur 6-4 viser en prosentvis fordeling av livsløpsstadiene i hvert veggdesign. For *KLB ombruk* og *Stavne* er det slutfasen (Tabell 6-1, C1-C4) som er fasen med størst andel av utslipp, mens det for de resterende designene er produktfasen som viser størst andel av utslipp (Tabell 6-1, A1-A3).

Figur 6-4. Oversikt over prosentvis fordeling av klima-gassutslipp (i kg CO₂e) for veggdesignene *KLB ombruk*, *KLB ny*, *TEWO*, *Tre*, *Leca*, *KL-tre*, og *Stavne*, innen de ulike livsløpsfasene. Produktfase (A1-A3) vises i blått. Transport (A4) vises i oransje. Konstruksjon (A5) vises i grønn. Slutfase (C1-C4) vises i brunt. Felt uten farge (B1-B7, D) er ikke medberegnet i denne vurderingen.



6.3 Fra «vugge til vugge»

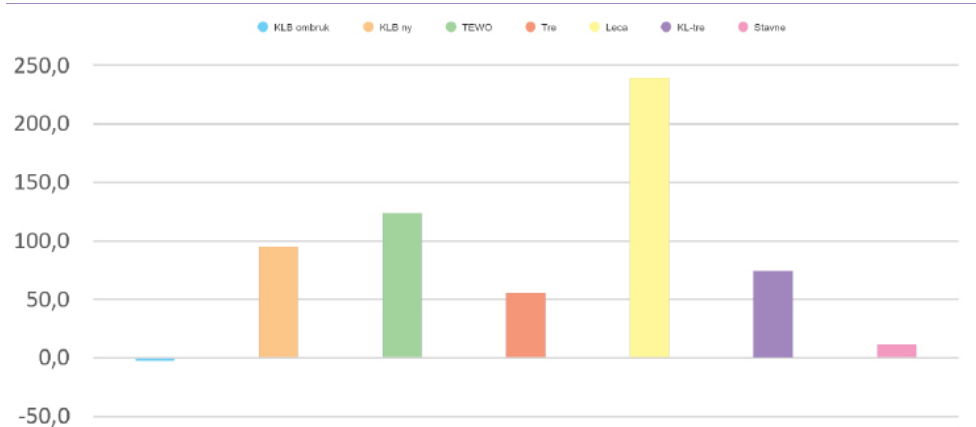
Et mål for *KLB ombruk* var å utvikle et produkt som representerer sirkulærøkonomi, der materialer som ellers ville blitt brukt til energigjenvinning, heller ombrukes. I Tabell 6-5 er alle livsløpsfaser medberegnet, ifølge et «vugge til vugge» perspektiv. Dette inkluderer Bruksfase og Etter endt levetidsfase (Tabell 6-1, B1-B7, D) som ikke tas med ifølge krav fra EN-15978 og NS 3720. Alle verdier i bruksfasen er null. I fasen Etter endt levetid (D), som tar hensyn til eventuelle gevinster i form av karbonlagring (vises som negative klimagassutslipp), har *KLB ombruk* og *KLB ny* størst gevinst med -31,7 kg CO₂e. I stigende rekkefølge gir *KL-tre* -30,3 kg CO₂e, *Leca* -17,3 kg CO₂e, *TEWO* -11,3 kg CO₂e og *Tre* -7,9 kg CO₂e. *Stavne* har ingen gevinster i form av karbonlagring.

Tabell 6-5. Totale klimagassutslipp i kg CO₂e for veggdesignene *KLB ombruk*, *KLB ny*, *TEWO*, *Tre*, *Leca*, *KL-tre* og *Stavne*, og alle livsløpsfaser. Fasene er ifølge Tabell 6-1.

Faser		<i>KLB ombruk</i>	<i>KLB ny</i>	<i>TEWO</i>	<i>Tre</i>	<i>Leca</i>	<i>KL-tre</i>	<i>Stavne</i>
Produktfase	A1-A3	10,7	94,8	116,6	48,5	234,2	90,3	3,1
Transport	A4	2,3	2,3	0,8	0,6	1,9	2,3	0,1
Konstruksjon	A5	0,0	0,0	0,0	6,9	17,9	0,0	0,8
Installasjon								
Bruksfase	B1-B7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Slutfase	C1-C4	17,4	17,4	17,8	7,2	2,3	13,2	7,9
Etter endt levetid	D	-31,7	-31,7	-11,3	-7,9	-17,3	-30,3	0,0
Total		-1,4	82,7	123,9	55,4	239,0	75,4	11,8

Figur 6-5 viser en grafisk fremstilling av totale klimagassutslipp fra «vugge til vugge». *KLB ombruk* viser lavest totale klimagassutslipp med en verdi på -1,4 kg CO₂e, etterfulgt av *Stavne* med et utslipp på 11,8 kg CO₂e og *Tre* med 55,4 kg CO₂e. *KL-tre*, *KLB ny* og *TEWO* har utslipp på henholdsvis 75,4, 82,7 og 123,9 kg CO₂e. *Leca* har størst utslipp på 239 kg CO₂e når alle fasene medberegnes.

Figur 6-5. Klimagassutslipp for veggdesign i «vugge til vugge» system. *KLB ombruk* (blå søyle), *KLB ny* (oransje søyle), *TEWO* (grønn søyle), *Tre* (rød søyle), *Leca* (gul søyle), *KL-tre* (lilla søyle), og *Stavne* (rosa søyle).



7 DISKUSJON

Omstillingen fra lineær til sirkulær økonomi er en viktig prosess for å redusere globale klimagassutslipp i fremtiden. Den handler i stor grad om menneskers tilnærming til verdens avfallsmengder, og det er avgjørende at vi benytter ressursene som finnes i dem. Ved utviklingen av byggesystemet KLB har vi sammen med Omtre AS funnet en løsning som kan bidra til å holde et treprodukt lenger i verdikjeden. KLB-systemet som først ble designet digitalt, utviklet gjennom en modell i skala 1:3 og videreutviklet etter oppføring av en pilotvegg i full størrelse, består av ombrukbare komponenter og lages av ressurser som ellers ville blitt avfall fra KL-tre produksjon. I dag har Omtre AS allerede satt i gang etableringsarbeid med en produksjonslinje for KLB-systemet. Etter gjennomføring av demonstrasjonsprosjekter planlegges det å investere i en større linje som kan håndtere økende etterspørsel. Fra erfaringene vi har gjort oss med kapping, formatering og spesialisering av ulike blokker til pilotveggen vi satte opp, er det klart at produksjonen kan utføres i enkle prosesser. Den fremtidige produksjonen kan baseres på høy grad av automatisering. Ressursene som ligger i restematerialer fra den vel-etablerte KL-tre produksjonslinjen hos Splitkon AS vil ved produksjon av KLB bli bedre utnyttet enn ved omgjøring til pellets for forbrenningsformål og energigjenvinning.

Det trinnvise arbeidet i konseptutviklingen av KLB ga et sluttprodukt som kan gjennomgå nødvendige tester og settes i produksjon. Standardblokken KLB-900, hovedbyggeblokken som utgjør den største delen i en vegg, ble dimensjonert slik at den er liten nok til å håndteres uten behov for hjelpemidler, men stor nok til å dekke et areal som gjør byggetiden effektiv. Med en vekt på 13,8 kg er den forholdsvis enkel å jobbe med og den er godt under maksimalkrav for vekt som bør håndteres manuelt og repetitivt. Det er også rom for at det kan utvikles tykkere blokker (opp til 200 mm) med samme høyde og lengde som vil veie mindre enn terskelen på 25 kg. Tilfeller av uønsket delaminering av det ytterste sjiktet i forbindelse med utfresing av spor i blokker der lamellskjøten havnet nær toppen eller bunnen av blokken kan unngås ved å formattere blokkene med stående fiberretning i ytterlamellen. Da vil ikke lamellskjøten komme i konflikt med det vertikale sinksporet som er sentrert i blokken. Stående fiberretning i yttersjiktet vil samtidig øke blokkenes vertikale trykkapasitet, fordi dette gir flere lameller med vertikal vedretning.

Den doble skyvesinken gjør at blokkene låses sammen. Vi lagde denne av lekter av heltre gran da vi bygde pilotveggen men kom frem til at dersom denne heller var laget av kryssfiner kunne tykkelsen reduseres. Dette vil forenkle maskineringen i tillegg til å gi en mer formstabil dobbel skyvesink med høyere styrkeegenskaper. Ved å produsere en topp- og bunnsvill av konstruksjonsvirke istedenfor av kryssfiner, slik at svillene har identiske spor med blokkene, vil produksjonen bli mer effektiv fordi maskininnstillinger for sporene i svillene blir like som for sporene i blokkene. Svillene vil også ha mer masse slik at det er enklere å forankre de løse fjærene med treplugg eller skruer for å gi veggen økt skjærkapasitet. Større dimensjon på svillene vil også bidra til at oppretting blir enklere, fordi sviller av 48 mm konstruksjonsvirke er stivere enn 18 mm sviller av kryssfiner. Den enkle skyvesinken som ble benyttet til pilotveggen stod frem som et svakt ledd i KLB-systemet, vi vurderte derfor at det var behov for forbedrede endesinker. For å løse dette ble det innført endestolper med samme utvendige dimensjoner som svillene og et enkelt sentrert rett notspor, slik at en ny enkel skyvesink skyves inn og låses med skruer eller treplugg fra siden, fremfor å skrues fast på veggen. Vi erfarte også at det mellom den nest øverste blokkraden og eksisterende takkonstruksjon ikke var mulig å skyve blokker eller sinker på plass vertikalt. I slike situasjoner kan den nye endesinken bli nyttig, fordi den kan føres på plass i blokken før blokken skyves inn i øverste rad fra siden. Som for endestolpen vil det være en fordel å bruke skruer eller treplugg for å låse sammen blokkene i denne raden dersom det er krav til styrkeegenskaper.

I pilotveggen ble høyden til alle blokkene i øverste rad justert. Det måtte også produseres blokker med andre lengder enn standardblokkene for bæring over dør og for at veggen skulle avsluttes med ønsket lengde. KLB-systemet følger standardiserte mål som ikke alltid vil passe med foretrukne mål for en planlagt konstruksjon. I motsetning til andre modulbaserte byggesystemer der hver enkelt modul består av flere forskjellige sammensatte komponenter, vil spesialblokker i KLB-systemet kunne produseres i en produksjonslinje med få og enkle prosesser. Å produsere spesialblokker vil derfor kun kreve en justering i sage- og/eller freseinstillinger i produksjonslinja. Produksjon av enkelte spesialblokker vil trolig være like effektivt og sannsynligvis mer lønnsomt fremfor å implementere flere enn de tre standarddimensjonene i KLB-systemet.

I sammenlikning med de fire modulbaserte byggesystemene TEWO, Speedblock, STEKO og Stavneblokka, fremstår produksjonene av TEWO og Speedblock som langt mer komplisert enn for KLB fordi de innebærer flere ulike materialer og mange deler som skal formateres, monteres og limes (ETA Danmark, 2017; SINTEF, 2017). For STEKO, selv om denne kun består av trevirke, må forskjellige komponenter også monteres sammen på fabrikk (OIB, 2019). Stavneblokka er resultat av

en komplisert og ressurskrevende produksjonsteknikk, mye fordi de fleste delene av produksjonen bygger på manuelt arbeid, blant annet utplukking av råvarer fra avfallsmottak, rensing av trevirket for skruer, spikre og andre urenheter, samt sortering etter tykkelse. KLB, med sine frese- og sageoperasjoner, kan derfor beskrives å ha en veldig effektiv og enkel produksjonsprosess sammenliknet med de andre produktene. Bygningsfysisk har TEWO og Speedblock en fordel med at de er ferdig isolerte. Dette gir mindre arbeid med etterisolering på selve byggeplassen for å oppnå tilfredsstillende U-verdier for yttervegg. At TEWO kommer i ulike tykkelser fra 130 til 330 mm, gir mulighet for at veggens U-verdi kan tilpasses etter behov. KLB, Stavneblokka og STEKO må etterisoleres utvendig for å oppnå krav til U-verdi. En fordel med KLB ovenfor STEKO er at produktet ikke må fylles med et isolasjonsmateriale på byggeplass, da dette krever egne maskiner for innblåsing, men på den andre siden vil STEKO ha en fordel når det stilles strenge krav til lydreduksjon av innervegger fordi denne kan fylles med sand. STEKO har også en annen fordel med at elektrisk anlegg enkelt kan etableres på byggeplass etter at veggene er montert ved å trekke rør i de hule blokkene før de fylles med isolasjon. For KLB må dette planlegges og helst utføres på fabrikk, men med riktig verktøy er dette også relativt enkelt å utføre underveis i byggeprosessen. Stavneblokkene er massive som KLB, det er dermed grunnlag for å anta at hull for rørføring til elektrisk anlegg kan borres gjennom blokkene så lenge man unngår å kutte dyblene som holder blokkene sammen. For TEWO og Speedblock, som kommer ferdig isolerte, er det også gjennomførbart å trekke rør til elektrisk på byggeplass, men det kreves mer arbeid.

STEKO og Stavneblokka fremstår nærmest KLB. Stavneblokka som også produseres av avfallsvirke, kan også spesialtilpasses, men fordi blokkene produseres i en spesialform, antar vi at slike former må produseres for hvert spesialmål. Prosessen blir da langt mer komplisert enn for KLB. I tillegg, som nevnt over, vil Stavneblokka kreve omfattende manuelt forarbeid med sortering, fjerning av stål som spiker og skruer, før formatering og montering. Selv om STEKO har flere standardkomponenter enn KLB og Stavneblokka, som gir større fleksibilitet uten at det er nødvendig med spesialtilpassede elementer, er produksjonen til KLB, som nevnt, langt enklere, inkludert for KLB spesialblokker.

Alle de fem byggesystemene har tre som hovedkomponent og kan stå ubehandlet etter oppføring. Eksponeringen av det naturlige tre-materialet gjør at konstruksjonene som oppføres oppleves fine å se på og gir en god følelse å oppholde seg rundt (Demattè et al., 2018). For både KLB og Stavneblokka tilfører ombruksmaterialene et eget uttrykk i farger og tekstur fra tidligere bruk, noe som gir veggene et røft og interessant utseende.

En livsløpsvurdering for KLB og andre byggemetoder i form av ulike veggkonstruksjoner, eller design, ga et godt sammenlikningsgrunnlag for de forskjellige metodenes miljøstatus. Trehus i bindingsverk er den mest brukte metoden for boligbygging i Norge. I dag er den samme byggemetoden også vanlig for hytter, garasjer, boder og liknende, samt innervegger og lettvegger i bygg der den bærende konstruksjonen består av betong eller stål. Ifølge livsløpsvurderingen har bindingsverksvegger i tre et utslipp på 56,4 kg CO₂e/m³, dette er 26,1 kg CO₂e/m³ større enn utslippet for en tilsvarende vegg av KLB av ombrukte materialer (*KLB ombruk*), med andre ord utgjør klimagassutslippene fra *KLB ombruk* kun 54 % av utslippet fra vegger i bindingsverk. For konstruksjoner som de overnevnte, der bindingsverksvegger er en populær byggemetode, kan utslippene i beste fall halveres ved å benytte KLB av ombrukte materialer fremfor bindingsverk. Dette viser et potensiale for *KLB ombruk* som klimabesparende byggemetode for denne typen konstruksjoner.

Livsløpsvurderingen viste et høyere totalt utslipp for en vegg av TEWO elementer enn for *KLB ombruk* med en differanse er på 104,9 kg CO₂e/m³. TEWO sin produktfase utgjør den største delen av differansen. Altså gjør KLB sin effektive og enkle produksjonslinje at produktet får bedre verdier i et klimaperspektiv i forhold til et tilsvarende produkt. Det er dermed grunn til å si at den effektive produksjonen av KLB er en viktig faktor for det lave klimagassutslippet sammenliknet med TEWO.

I forhold til en vegg av Leca byggeblokker har *KLB ombruk* mye lavere utslipp. I et livsløpsperspektiv slipper Leca ut 238,4 kg CO₂e/m³ der *KLB ombruk* bare slipper ut 30,3 kg CO₂e/m³. Dette indikerer at store mengder klimagassutslipp kunne vært spart dersom vegger som bygges av Leca hadde blitt oppført ved bruk av *KLB ombruk*.

En vegg av KL-tre har lavere livssyklusutslipp enn en vegg av KLB av nye materialer. Differansen på 8,7 kg CO₂e/m³ fordeler seg på produksjonsfasen og sluttfasen. I produksjonsfasen blir KL-tre videreforedlet til KLB, og produksjonen fra sammenføyingskomponentene tas i betraktning, slik at totalutslippet øker noe. I sluttfasen må den samme mengden KL-tre behandles, men for KLB kommer tillegget for avhending av sammenføyingskomponentene. Den totale differansen i utslippet er likevel nokså liten, slik at å benytte seg av KLB av nye materialer ikke ville medføre for store forskjeller i et klimaperspektiv. Det er i denne sammenheng viktig å understreke at KLB ikke er utviklet som en konkurrent til KL-tre, men som et produkt som bidrar til å gjøre materialet enda mer klimavennlig. Med den økende bevisstheten på bruk av mer miljøvennlige byggematerialer, vil produksjonen og oppføringen av bygg i KL-tre trolig fortsette å øke. Dette vil føre til en større strøm av avkapp fra fabrikkene, altså at en større andel foredlede kvalitetsprodukter blir kvernet opp og presset til pellets. KLB tilbyr bransjen et godt alternativ fremfor forbrenning av ressursene i KL-tre,

og åpner opp for en mer miljøvennlig produksjonsøkning, ved å ta vare på og utnytte enda større deler av ressursene som går inn i KL-tre fabrikkene.

Stavneblokka er det eneste produktet som viser lavere utslipp enn *KLB ombruk*. Utslippsfaktorene og verdiene for Stavneblokka er hentet fra rapporten «Klimagassregnskap for Stavneblokka» (Bramslev & Baarnes, 2012). Det er likevel viktig å merke seg at resultatene fra livsløpsvurderingen vi har gjort av Stavneblokka kan skille seg fra verdiene som ville kommet frem hvis det ble utviklet en EPD for produktet. Dette betyr at våre verdier for Stavneblokka kan være høyere eller lavere sammenliknet med verdiene i en EPD. At Stavneblokka og *KLB ombruk* har lavest utslipp, understreker at ombruk av ressurser blir svært viktig for å kutte globale utslipp tilstrekkelig til å oppnå nasjonale og internasjonale klimamål i fremtiden.

Det er naturlig å anta at en produksjonslinje for KLB-systemet vil lokaliseres med nærhet eller direkte tilknytning til en fabrikk som produserer KL-tre. Produktfasen vil da stå uten transportutslipp. Dette vil forbedre utslippsverdiene for KLB av både nye og ombrukte materialer ytterligere i forhold til dem vi har sett på her. Vekting og oppbygning av ulike EPDer er identisk for disse, og eneste forskjell er at andelen KL-tre i *KLB ombruk* ble definert som ombrukte materialer i livsløpsvurderingen. De praktiske følgene av dette er at produktfasen og konstruksjons-/installasjonsfasen uteblir fra beregningene av krysslimt tre for *KLB ombruk*. I analysen «vugge til grav» ga dette *KLB ombruk* sammenliknet med KLB av nye materialer en utslippsreduksjon på 73 %, og klimagassutslipp på henholdsvis 29 og 123 kg CO₂e/m³. Denne utslippsreduksjonen baserer seg på antagelsen om at KLB er produsert av KL-tre restavfall, altså avfall. Vi stiller spørsmål til denne tilnærmingen fordi en livsløpsvurdering av et ombrukt materiale muligens heller burde baseres på et produkt som har vært oppført, gått igjennom og fullført et livsløp, i dette tilfellet på 60 år, og deretter blitt revet ved livsløpets slutt, noe som ikke er tilfellet for avfallet fra KL-tre produksjon. Å kalle KLB produsert av avfallet fra Buskerud Biobrensel for KLB av nye materialer vil heller ikke bli helt riktig, da denne definisjonen tilsier at KL-tre produseres kun for å videreføres til KLB. Å finne riktig kategori for KLB som produkt av restmateriale etter produksjonen av KL-tre vil være viktig for fremtidig KLB-produksjon. Uansett vil det å produsere KLB redusere avfallsmengden fra KL-tre produksjon, og dermed også redusere klimagassutslipp. At kategoriseringen av materialene er utfordrende, tyder på at metodene for livssyklusvurdering etter krav fra EN-15978 og NS-3720 i One Click LCA programvaren har forbedringspotensiale i forhold til gjenbruk og ombruk.

Varmegjennomgangsberegninger for en ytterveggkonstruksjon av KLB viser at ved å benytte 198 mm utvendig isolasjon vil vi oppnå kravene i TEK 17 om en varmegjennomgangskoeffisient (U-verdi) lavere enn 0,18 W/m²K (dibk, 2017). I vår beregning ble det benyttet konstruksjonsvirke

til utlekting, her kunne det vært aktuelt å bruke eksempelvis I-bjelker med steg av trefiberplater som har lavere varmeledningsevne (λ -verdi) for å senke konstruksjonen U-verdi ytterligere (SINTEF, 2018). Sammen med en Isolasjonstype som også har en lavere λ -verdi, vil dette kunne redusere tykkelsen til Isolasjonssjiktet. I beregningene av KLB sjiktet ble det benyttet λ -verdi for KL-tre (Gustafsson et al., 2019). Til tross for at KLB består av blokker som er skjøtet sammen, er det rimelig å anta at dersom konstruksjonen er korrekt oppført er denne verdien tilnærmet lik KL-tre for KLB systemet.

For at *KLB ombruk* skal kunne omsettes på markedet vil det være aktuelt å utarbeide en ETA for produktet. Fordelen med en ETA er at dokumentasjonen er gjeldende for hele Europa, og at den automatisk fører til CE-merking, som er en nødvendighet i forbindelse med godkjenning for salg i og utenfor Norge. Problemet med CE-merking generelt er at dette bare er en delvis sertifiseringsmetode, og at det for byggeprodukter i Norge også må foreligge dokumentasjon på at alle krav fra den norske Plan og bygningsloven er innfridd. En godkjenning som angir dette er en SINTEF teknisk godkjenning, som i likhet med en ETA utarbeides av SINTEF. En ETA for KLB bør utarbeides på bakgrunn av «Modular Construction System EAD 130087-00-02014». Dette dokumentet ble brukt som grunnlag til ETA for både STEKO og Speedblock. KLB bygger på de samme oppføringsprinsippene som Speedblock og STEKO, og skal benyttes i tilsvarende bygg på opptil 2 etasjer og loft.

8 KONKLUSJON

Sammen med Omtre AS har vi utviklet en løsning som kan bidra til å holde et treprodukt lenger i verdikjeden. Restmaterialer fra en stor og veletablert KL-tre produksjonslinje utnyttes i produksjonen av et nytt og bærekraftig modulbasert byggesystem. Byggesystemet KLB er et eksempel på et nytt produkt som representerer sirkulærøkonomi, der materialer som ellers ville blitt brukt til energigjenvinning heller ombrukes og benyttes i bygging av vegger, inner- eller yttervegger, og til bygging av små eller store bygninger, gjerne flere ganger. Byggesystemet består av lett håndterbare komponenter som kan sammenføres på en enkel og effektiv måte til en ferdig konstruksjon, og komponentene kan demonteres og ombrukes. Produksjonsprosessen består i tillegg kun av enkle operasjoner som kan implementeres i en automatisert linje, og spesialtilpasninger av komponentene kan gjøres med enkle justeringer.

Livsløpsvurdering ga kunnskap om miljømessige konsekvenser knyttet til KLB av ombrukte materialer som i fremtidig produksjon kan gi produktet konkurransefortrinn. I «vugge til vugge» perspektivet som produsenter i dag må ta stilling til, viste beregninger for vegg av KLB av ombrukte materialer lavest totale klimagassutslipp sammenliknet med flere andre typer lastbærende veggkonstruksjoner. At produksjonen av KLB og produktet i seg selv sammenliknet med andre modulbaserte byggesystemer på det europeiske markedet, viste frem et potensiale for redusert energibruk og miljøutslipp dersom materialvalg og produksjonsteknikk revurderes, kan forhåpentligvis inspirere til mer sirkulærøkonomisk tankegang hos produsentene.

Vi håper KLB-systemet vil komme i produksjon, inn på det europeiske markedet, og stå frem blant foregangsprodukter innen bærekraft. Det nødvendige neste steget for KLB er etableringen av en automatisert produksjonslinje, der løsningene vi har utviklet testes og eventuelt videreutvikles. Tilleggsprodukter for takkonstruksjoner og bjelkelag kan designes, utvikles, produseres parallelt og passe sammen med KLB-systemet. Flere KLB demokonstruksjoner bør settes opp, og tekniske tester på mekanisk motstandsevne, lyd- og fukttegenskaper må utføres for å tilføre produktet nødvendige godkjenninger og sertifiseringer.

◆◆ Referanser

- Arbeidstilsynet. (2022). Tungt arbeid. Tilgjengelig fra: <https://www.arbeidstilsynet.no/tema/ergonomi/manuelt-arbeid/tungt-arbeid/>.
- Berg, A. (1997). Arne Berg: et utvalg av hans artikler om bygningshistorie samlet i anledning hans 80-års dag. Øvre Ervik: Alvheim & Eide akademisk forl. ISBN 8290359616.).
- Boye, E. (2019). Sirkulær framtid – om skiftet fra lineær til sirkulær økonomi. Framtiden i våre hender.
- Bramslev, K. & Baarnes, S. (2012). Klimagassregnskap for Stavneblokka.
- Brudevoll, B. A. (2018). vikingskip. I: leksikon, S. n. (red.). snl.no. Tilgjengelig fra: <http://snl.no/stavneblokka> (lest 25.mars).
- Bygg21. (2018). Bygg- og eiendomssektorens betydning for klimagassutslipp. Etter oppdrag fra Kommunal- og moderniseringsdepartementet.
- Byggeindustrien. (2013). Tre vs betong igjen. bygg.no: Byggeindustrien. Tilgjengelig fra: <https://www.bygg.no/tre-vs-betong-igjen/103646/> (lest 26.mars).
- DCI Engineers. (2017). Mass Timber – Why Wood You?: HOUSING ACTION COALITION.
- Demattè, M., Zucco, L., Gesualdo M. Roncato, S., Gatto, P., Paulon, E., Cavalli, R. & Zanetti, M. (2018). New insights into the psychological dimension of wood–human interaction. *European Journal of Wood and Wood Products*, 76 (4): 1093-1100. doi: 10.1007/s00107-018-1315-y.
- dibk. (2016). Forskrift om dokumentasjon av byggevarer (DOK): Direktoratet for byggkvalitet.
- dibk. (2017). Byggteknisk forskrift (TEK17): Direktoratet for byggkvalitet.
- dibk. (2021). Kristian Augusts gate 13. Tilgjengelig fra: <https://dibk.no/statens-pris-for-byggkvalitet/nominerte-2021/kristian-augusts-gate-13/>.
- Dramstad, W., Timmermann, V., Gobakken, L. R., Lange, H. & Dibdiakova, J. (2015). Livsløpsanalyser (LCA). Fakta fra Skog og landskap (09).
- Earth Overshoot Day. (2022). Country Overshoot Days. Tilgjengelig fra: <https://www.overshoot-day.org/newsroom/country-overshoot-days/> (lest 19.april).
- Edvardsen, K. I. & Ramstad, T. Ø. (2014). Trehus. "Trehusboka" - håndbok for trehusbygging i Norge: SINTEF Byggforsk.
- Ekins, P., Domenech, T., Drummond, P. B., R. Hughes, N. & Lotti, L. (2019). The Circular Economy: What, Why, How and Where. 82.
- EOTA. (2017). MODULAR CONSTRUCTION SYSTEM.
- EOTA. (2022). What is an ETA? I: (EOTA), T. E. O. f. T. A. (red.). Tilgjengelig fra: <https://www.eota.eu/what-is-an-eta> (lest 18.april).
- epd-norge. (2019). General Programme Instructions for The Norwegian EPD Foundation: The Norwegian EPD Foundation.
- epd-norge. (2022). Hva er en EPD?: The Norwegian EPD Foundation. Tilgjengelig fra: <https://www.epd-norge.no/hva-er-en-epd/>.
- ETA Danmark. (2017). ETAssessment 17/0905 SPEED BLOCK modular construction system.
- European Commission. (2022). Harmonised Standards. Tilgjengelig fra: https://ec.europa.eu/growth/single-market/european-standards/harmonised-standards_en.
- Evans, F. G. & Flæte, P. O. (2009). Fokus på tre, Nr.2, Treslag og holdbarhet. Norsk Treteknisk Institutt.
- Falang, H. (2022). Personlig kommunikasjon (16.april 2022).
- Ferdous, W., Bai, Y., Duc Ngo, T., Manalo, A. & Mendis, P. (2019). New advancements, challenges and opportunities of multi-storey modular buildings – A state-of-the-art review. 183.
- Flatland, R. (2007). Nr. 42 Tradisjonsbaserte byggemetoder: Norsk Treteknisk Institutt, TreFokus AS.
- FN-sambandet. (2020). Fattigdom: FN-Sambandet, United nations association of Norway. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/tema/fattigdom/fattigdom> (lest 26.mars).
- FN-sambandet. (2021). Befolkning, migrasjon og urbanisering: FN-Sambandet, United nations association of Norway. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/tema/fattigdom/befolkning> (lest 26.mars).
- fourthdoor. (2022). Stavneblokka – Upcycled timber bricks for the Future. Tilgjengelig fra: http://www.fourthdoor.co.uk/unstructured/unstructured_08/stavneblokka.php (lest 18.april).
- FPIinnovations. (2019). Canadian CLT Handbook, 2019 Edition. Volume I.
- FutureBuilt. (2019). FutureBuilt kriterier for sirkulære bygg.
- Glava, A. (2019). Glava glassull, NEPD-1696-683-EN. Global Footprint Network. (2022). Earth Overshoot Day. Tilgjengelig fra: <https://www.overshootday.org/about-earth-overshoot-day/> (lest 25. Mars).
- Gunnarsjaa, A. & Rygh, P. (2021). livsløpsanalyse. Store norske leksikon: snl.no. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/bindingsverk> (lest 29.mars).
- Gustafsson, A., Crocetti, R., Just, A., Landel, P., Olsson, J., Poulsett, A., Silverheim, M. & Ostman, B. (2019). The CLT Handbook. Stockholm: Skogsindustrierna, Svenskt Trä.
- Gustavsen, A. (2022). Fingerskjøt Fresestål Ø39,7 mm T=8. gustavsen.no: Gustavsen AS.
- Hunton. (2019). YTELSESERKLÆRING Hunton trefiberisolasjon.
- Ibenholt, K., Frisell, M. M., Gobakken, L. R., Hegnes, A. W. & Walbækken, M. M. (2020). Samfunnsøkonomisk analyse av redusert avfall i byggebransjen.

- Klima- og miljødepartementet. (2021). Nasjonal strategi for ein grøn, sirkulær økonomi.
- Lang, Å. (2019). Skal bedre klimaet med bygg i tre: Norges Skogeierforbund. Tilgjengelig fra: <https://www.skog.no/skal-bedre-klimaet-med-bygg-i-tre/> (lest 26.mars).
- lca.no. (2022). Hva er LCA? Tilgjengelig fra: <https://lca.no/hva-er-lca/> (lest 27.mars).
- Leca, I. (2015). Leca Universalblokk 15 cm, NEPD-2804-1505-EN.
- Lier, B. & Aasheim, P. A. (2020). Markedsanalyse KL-tre markedet i Norge 2020 -2030. TreBruk.
- LOOP, -. S. f. K. o. G. (2021). avfallshierarki I: leksikon, S. n. (red.). snl.no. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/avfallshierarki>.
- Lovdata. (2006). Arbeidsmiljøloven.
- Lovdata. (2008). Plan- og bygningsloven – pbl.
- Miljødirektoratet. (2019). Tabell for omregning til CO2-ekvivalenter. Tilgjengelig fra: <https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/klima/for-myndigheter/kutte-utslipp-av-klimagasser/klima-og-energiplanlegging/tabell-for-omregning-av-co2-ekvivalenter/> (lest 9.mai).
- Miljødirektoratet. (2020). Tabeller for omregning fra energivare til utslipp. Tilgjengelig fra: <https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/klima/for-myndigheter/kutte-utslipp-av-klimagasser/klima-og-energiplanlegging/tabeller-for-omregning-fra-energivarer-til-kwh/> (lest 5.mai).
- Moelven, I. A. (2018). Vänerply kryssfinér av gran., NEPD-1579-604-EN.
- Nestaas, I. & Grønmo, S. (2020). livsløpsanalyse. Store norske leksikon: snl.no. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/livsl%C3%B8psanalyse> (lest 27.mars).
- Nilsen, H. R. (2022). sirkulær økonomi Store norske leksikon snl.no. Tilgjengelig fra: https://snl.no/sirkul%C3%A6r_%C3%B8konomi (lest 2.mai).
- Nore, K. (2022). Personlig kommunikasjon (5.april 2022).
- Norgips, N. A. (2020). Norgips Standard type A (STD). Norsk Standard. (2006a). Miljøstyring Livsløpsvurdering Krav og retningslinjer (ISO 14044:2006): Standard Norge.
- Norsk Standard. (2006b). Miljøstyring Livsløpsvurdering Prinsipper og rammeverk (ISO 14040:2006): Standard Norge.
- NORSUS. (2022). Om livsløpsvurdering – LCA (Life Cycle Assessment). Tilgjengelig fra: <https://norsus.no/om-livsløpsvurdering/> (lest 27.mars).
- OIB. (2019). ETA-13/0645 STEKO Holz-Bausysteme AG.
- One Click LCA Ltd. (2021). One click LCA. Tilgjengelig fra: <https://www.oneclicklca.com/> (lest 1/7).
- Ramstad, T. (2022). Personlig kommunikasjon (3.februar 2022).
- Schmidt, U. (2006). WOODSENSE: PREDICTING WOOD MOVEMENT. Issue 13 of Woodcraft Magazine utg. Tilgjengelig fra: https://www.woodcraft.com/blog_entries/woodsense-wood-movement (lest 24.april).
- Shapr3D. (2021). About Shapr3D. Tilgjengelig fra: <https://www.shapr3d.com/company/about-shapr3d>.
- SINTEF, b. (2014a). Livsløpsvurdering (LCA) av byggevarer og bygninger. Innføring og begreper. 470.101: SINTEF.
- SINTEF, b. (2014b). Miljødeklarasjoner (EPD) av byggevarer. 470.103: SINTEF.
- SINTEF, b. (2015). TreLast.Typer og egenskaper. 571.524: SINTEF.
- SINTEF, b. (2020). Varmekonduktivitet og varmemotstand for bygningsmaterialer. 471.010: SINTEF.
- SINTEF, C. (2022a). CE-merking av byggevarer. Tilgjengelig fra: <https://www.sintefcertification.no/portalpage/index/70> (lest 18.april).
- SINTEF, C. (2022b). Europeisk teknisk bedømmelse. Tilgjengelig fra: <https://www.sintefcertification.no/PortalPage/Index/58> (lest 27.mars).
- SINTEF, C. (2022c). SINTEF Teknisk Godkjenning (TG). Tilgjengelig fra: <https://www.sintefcertification.no/portalpage/index/56#Hva> (lest 27.mars).
- SINTEF, T. G. (2017). Teknisk Godkjenning Terwood element. 20534: SINTEF.
- SINTEF, T. G. (2018). Teknisk Godkjenning Hunton I-bjelken. 20381: SINTEF.
- SINTEF, T. G. (2019). Teknisk Godkjenning Splitkon krysslimt tre. 20712: SINTEF.
- Splitkon, A. (2020). Krysslimt tre, NEPD-2042-902-NO.
- SSB. (2020). Avfall fra byggeaktivitet 2020. Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/natur-og-miljo/avfall/statistikk/avfall-fra-byggeaktivitet> (lest 28. Januar).
- Standard Norge. (2021a). Nasjonale tillegg: Standard Norge. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/fagomrader/bygg-anlegg-og-eiendom/eurokoder1/> (lest 27.mars).
- Standard Norge. (2021b). Norsk Standard: Standard Norge. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/standardisering/norsk-standard/> (lest 27.mars).
- Standard Norge. (2022a). CE-merking: Standard Norge. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/standardisering/ce-merking/> (lest 27.mars).
- Standard Norge. (2022b). Eurokoder: Standard Norge. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/fagomrader/bygg-anlegg-og-eiendom/eurokoder1/> (lest 27.mars).
- STEKO. (2022). An idea. A house. A wooden brick.: STEKO Holz-Bausysteme AG. Tilgjengelig fra: <https://www.steko.ch/en/metanavigation/home/> (lest 21.april).
- Svensson, A. & Dalen, L. S. (2021). BÆREKRAFTIG SKOGBRUK I NORGE. NORSK INSTITUTT FOR BIOØKONOMI.
- Termowood, A. (2016). TermoElement (TEWO), NEPD-1210-379-NO.
- TEWO. (2022). Hva er TEWO? Tilgjengelig fra: <https://tewo.no/hva-er-tewo> (lest 20.April).
- Thue, J. V. (2016). Bygningsfysikk: Fagbokforlaget.
- Trefokus. (2013). Treindustriens lille grønne.
- Treindustrien. (2015a). Sawn dried timber of spruce or pine, NEPD-307-179-EN.
- Treindustrien. (2015b). Structural timber of spruce and pine, NEPD-308-179-EN.
- Treteknisk. (2013). Håndbok, Hefte 1, Generelt - bygge med
- Massivtreelementer: Norsk Treteknisk Institutt.
- Tronstad, S. & Steiner, Y. (2008). Fokus på tre, Nr. 33, Rett trelast. Norsk Treteknisk Institutt.,
- Tschudi-Madsen, S. (2022). stavkirke. I: leksikon, S. n. (red.). snl.no. Tilgjengelig fra: <http://snl.no/stavkirke> (lest 25.mars).
- UNEP, U. N. E. P. (2018). 2018 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi.
- UNEP, U. N. E. P. (2021). 2021 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi.

◆◆ Vedlegg

V1

Beregning av varmegjennomgang

KLB ombruk/ny

<i>Sjikt</i>	<i>d</i>	<i>λ</i>	<i>R</i>
Ventilert kledning og utvendig varmemotstand (R_{se})			0,130
Vindsperreduk			0,030
KL-tre	0,120	0,130	0,923
Innvendig varmeovergangsmotstand (R_{si})			0,130
$R_{tot} =$	1,213		
U-verdi = $1/R_{tot} =$	0,824		

<i>Sjikt</i>	<i>Isolasjonsfelt</i>			<i>Stenderfelt</i>	
	<i>d</i>	<i>λ</i>	<i>R</i>	<i>λ</i>	<i>R</i>
Ventilert kledning og utvendig varmemotstand (R_{se})			0,130		0,130
Vindsperreduk			0,030		0,030
Isolasjon	0,198	0,038	5,211	-	-
Utlekting for isolasjonsfelt	0,198	-	-	0,120	1,650
KL-tre	0,120	0,130	0,923		0,923
Innvendig varmeovergangsmotstand (R_{si})			0,130		0,130
			$R_{isol}: 6,424$	$R_{tre}: 2,863$	
$R_{tot} = 0,88 \cdot R_{isol} + 0,12 \cdot R_{tre}$			5,589		
U-verdi = $1/R_{tot} =$			0,179		

$d =$ Materialsjiktets tykkelse [m]

$\lambda =$ Varmekonduktivitet

$R =$ Varmemotstand

V2

Beregningsgrunnlag LCA

KLB ombruk/ny

Bygget av 72 blokker med topp og bunnsvill. Alle blokkene er 120x300x900mm (KLB900).

Veggen består av 8 blokker i lengden og 9 blokker i høyden

Topp og bunnsvill har lengde på 7200mm

Dette gir 20,13 m² veggareal til sammenlikning med andre konstruksjoner med samme veggareal og tilnærmet lik tykkelse

Tykkelsen på veggene til sammenlikning varierer noe grunnet ulike produkters dimensjoner

Tykkelse [m]	0,12
Areal [m ²]	20,13
Volum [m ³]	2,41574 100%

	Lengde	mm ³	m ³	antall	[m ³]
Blokk base CLT (før spor)	900	32400000	0,032400	72	2,33
- Notspor i horisontal retning	900	777600	0,000778		
- Sinkspor i Vertikal retning	300	389808	0,000390		
Blokk CLT	900	31232592	0,031233	72	2,25
Løs fær dobbel 900	900	777600	0,000778	80	0,06
Skyvesink 300	300	389808	0,000390	72	0,03
Bunnsvill Base	900	5184000	0,005184		
Toppsvill Base	900	5184000	0,005184		
Bunn/topp sammenlagt (minus notspor)	900	9590400	0,009590	8	0,08
		m ³	%		
18mm løs fjær horisontal dobbel		0,06221	2,5751%		
30mm skyvesink		0,02807	1,1618%		
Krysslimt tre		2,24875	93,0871%		
Vänerply kryssfinér av gran sammenlagt		0,09027	3,7369%		
48x120 C24 konstruksjonsvirke Topp-/bunnsvill		0,07672	3,1760%		

Tre

Bindingsverkvegg med stenderverk av tre (48X98), 100mm isolasjon og 2 lag 12,5mm gips

Tykkelse [m]	0,123
Areal [m ²]	20,13
Volum [m ³]	2,47599 100%

	høyde	bredde	lengde	antall	m ³	%
Topp-/bunnsvill	48	98	7200	2,00	0,0677376	2,7358%
Stendere	48	98	2700	13,00	0,1651104	6,6685%
Gips 13mm 2 lag	12,5	2796	7200	2,00	0,50328	20,3264%
100 mm isolasjon		100			1,739862	70,2693%
Høvellast av gran eller furu (total 48X98)						9,4042%

V3

Sammenlikning av modulbaserte byggesystemer

Egenskaper	KL B	TEWO	Speedblock	STEKO	Stavneblokk
Materialer	KL-tre, kryssfiner og konstruksjonsvirke av gran	Høvlet trevirke gran, rundstokk bøk, lim, mineralull	MFP (Multi Function Panel), lim, sifter mineralull	Høvlet trevirke gran, rundstokk av løvtre	Resirkulert trevirke, rundstokk furu, konstruksjonsvirke
Fabrikkproduksjon	Preproduksjon NEI	KL-tre elementer	NEI	NEI	Preparere resirkulerte materialer
	Maskinering KL-tre, kryssfiner	KL-tre, rundstokk, mineralull	MFP, mineralull	Høvlet trevirke, rundstokk	Resirkulert trevirke, rundstokk
	Montering på fabrikk NEI	Lime sammen elementer	Stifte og lime sammen elementer	Lime sammen elementer	Montere elementer med dybler
Størrelse standardkomponenter	Tykkelse [mm] 120	130 - 330	300	160	180
	Høyde [mm] 300	2400 - 3000	240 (120)	320 (240)	300
	Lengde [mm] 900 (600, 300)	200	600	640 (480, 320, 160)	600 (300)
Monteringsretning	Vertikal	Horisontal	Vertikal	Vertikal	Vertikal
Vekt (standardkomponent)	[kg] 13,8	<25kg	7,3	6,5	15
U-verdi for standardblokk uten utvendig etterisolasjon (*etterisolert kjerne)	U-verdi [W/m² K] fra 0,824	fra 0,12 til 0,25	0,15	0,42*	-
Potensiale for skult elektrisk anlegg	JA	JA	JA	JA	-
Teknisk godkjenning	NEI	SINTEFF Teknisk Godkjenning	ETA	ETA	NEI
Kilder	-	(SINTEFF,2017;TEWO,2020;Ternowood,2022)	(Speedblock, 2016;ETA Danmark, 2017)	(OIB,2019;STEKO,2022)	(Bramslev & Baarnes,2012;forthdoo r,2022)



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway