



UPPSALA
UNIVERSITET

ISRN UTH-INGUTB-EX-B-2023/021-SE

Examensarbete 15 hp

Juni 2023

Hållbara klimatskärmar med hampa och cellglas - En fallstudie

Nikolaj Lopdrup Pedersen



UPPSALA
UNIVERSITET

Sustainable building envelopes of cellular glass and hemp insulations

- A case study.

Nikolaj Lopdrup Pedersen

Abstract

Human activity is the primary cause of climate change, particularly through the emission of greenhouse gases. The construction industry is one of the sectors that significantly contributes to the increasing amount of greenhouse gases in the atmosphere, and sustainable building materials can be part of the solution to this problem. This report analyzes the climate impact and cost of constructing building envelopes using materials of hemp and cellular glass compared to conventional ones from a life cycle perspective. The study includes a case study of a single-family house *Hällebo*. The focus of the study is the life cycle analysis of the production stage (A1-A3) and the end of life stage (C1-C4). The study demonstrates that building envelopes of hemp and cellular glass contribute to a lower level of climate impact compared to those made from conventional building materials. It also indicates that building envelopes of hemp and cellular glass can be more expensive alternatives than conventional ones, but the cost may vary depending on the specific conventional materials chosen. Furthermore, the study highlights the significant role of biogenic carbon storage in hemp cultivation in reducing overall climate impact. The rapid growth characteristics of hemp enable it to absorb substantial amounts of carbon dioxide through photosynthesis during the growth phase. If carbon storage is included in the assessment, the climate impact of climate barriers decreases significantly. The choice of materials in a climate barrier should be based on prioritized aspects in the specific context and the trade-off between climate impact and cost considerations.

Teknisk-naturvetenskapliga fakulteten

Uppsala universitet, Utgivningsort Uppsala

Handledare: Niklas Holmquist Ämnesgranskare: Farshid Shadram

Examinator: Galyna Venzhego

SAMMANFATTNING

Mänsklig aktivitet utgör den primära orsaken till klimatförändringarna, särskilt genom utsläpp av växthusgaser. Byggbranschen är en av de branscher som bidrar betydligt till den ökande mängden växthusgaser i atmosfären och hållbara byggmaterial kan vara en del av lösningen på detta problem. Denna rapport analyserar klimatpåverkan och kostnader vid konstruktion av klimatskärmar med byggmaterial av hampa och cellglas i jämförelse med konventionella byggmaterial ur ett livscykelperspektiv. Studien inkluderar en fallstudie med livscykelanalys (LCA) och livscykelkostnadsanalys (LCC) av enbostads- huset *Hällebol*. Fokus i studien ligger på LCA av produktskedet (A1-A3) samt slutskedet (C1-C4). Studien visar att klimatskärmar tillverkade av hampa och cellglas bidrar till en lägre nivå av klimatpåverkan jämfört med klimatskärmar tillverkade av konventionella byggmaterial. Studien visar också att klimatskärmar med hampa och cellglas kan vara dyrare alternativ än konventionella klimatskärmar, men att kostnaden kan variera beroende på de specifika konventionella material som väljs. Studien framhäver vidare den betydande roll som kollagring i hampodling spelar för att minska den totala klimatpåverkan. Hampans snabbväxande egenskaper gör att den kan absorbera betydande mängder koldioxid genom fotosyntes under tillväxtfasen. Om kolbindning inkluderas i bedömningen minskar klimatpåverkan av klimatskärmar betydligt. Valet av material i en klimatskärm bör grundas på prioriterade aspekter i den specifika kontexten och avvägningen mellan klimatpåverkan och kostnadsaspekter.

Nyckelord: byggmaterial, cellglas, fotosyntes, hampa, hampafiber, hampakalk, hampodling, hållbara byggmaterial, hållbarhet, isolering, klimatförändringar, klimatpåverkan, klimatskärmar, koldioxid, kollagring, livscykelanalys, livscykelkostnadsanalys, återvinning, växthusgaser

FÖRORD

Detta examensarbete har genomförts av Nikolaj Lopdrup Pedersen vid Institutionen för samhällsbyggnad och industriell teknik på Uppsala universitet. Arbetet är det avslutande momentet på Högskoleingenjörsprogrammet i byggt teknik och omfattar 15 högskolepoäng. Arbetet genomfördes i samarbete med företaget Evia AB och på deras projekt *Hälleboll* på Orust. Arbetet har varit en inspirerande och lärorik process där jag har fått möjlighet att förbättra mina kunskaper inom ett ämne som är både intressant och högaktuellt i branschen.

Jag vill rikta ett varmt tack till företaget Evia AB, och särskilt till min handledare Niklas Holmquist samt Henning Eliasson, för deras värdefulla bidrag till projektet. Tack vare deras engagemang, underlag till fallstudien och besvarande av frågor, har det varit möjligt att genomföra detta spännande examensarbete.

Jag vill också tacka min ämnesgranskare, Farshid Shadram vid Institutionen för samhällsbyggnad och industriell teknik på Uppsala universitet, för hans kunniga handledning och stöd under arbetets gång. Hans erfarenhet inom ämnet har hjälpt till att forma och utveckla rapportens innehåll.

Uppsala, juni 2023
Nikolaj Lopdrup Pedersen

INNEHÅLL

1	INTRODUKTION	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Problembeskrivning	1
1.3	Syfte	2
1.4	Frågeställningar	2
1.5	Avgränsningar	2
2	TEORI	4
2.1	Hållbarhetsvärdering	4
2.1.1	Livscykelanalys (LCA)	4
2.1.2	Livscykelkostnader (LCC)	6
2.2	Prefabricerade byggelement	6
2.3	Värmeisolering	7
2.3.1	Konventionella isoleringsmaterial	7
2.3.2	Cellglas	8
2.3.3	Hampa	8
2.4	Stål	10
2.5	Betong	11
3	METOD	12
3.1	Litteraturstudie	12
3.2	LCA- och LCC-analys för fallstudien	12
3.3	Metodöversikt	14
3.4	Validitet och reliabilitet	15
3.5	Etiska ställningstaganden	15
4	FALLSTUDIE - Hällebol	16
4.1	Data – Hällebol	16
4.1.1	Grundkonstruktion	17
4.1.2	Ytterväggar	19
4.1.3	Takkonstruktion	20
4.2	Data - Konventionella konstruktioner	20
4.2.1	Grundkonstruktion	21
4.2.2	Ytterväggar	21
4.2.3	Takkonstruktion	23
5	RESULTAT OCH ANALYS	25
5.1	Resultat av LCA	25
5.2	Resultat av LCC	29
6	DISKUSSION	32
6.1	Huvudresultat	32
6.2	Livscykelanalys (LCA)	32
6.3	Livskostnadsanalys (LCC)	34
6.4	Avvägning av LCA och LCC	35
7	SLUTSATSER	37

7.1	Begränsningar	37
7.2	Förslag på fortsatt forskning	38
8	REFERENSER	39

TABELLER

Tabell 1: Skeden i en byggnads livscykel	5
Tabell 2: Ingående material i Hällebols grundkonstruktion.	19
Tabell 3: Ingående material i Hällebols ytterväggar.	19
Tabell 4: Ingående material i Hällebols takkonstruktion.....	20
Tabell 5: Ingående material i KU1 och KU2s grundkonstruktion.....	21
Tabell 6: Ingående material i KU1s ytterväggar.	22
Tabell 7: Ingående material i KU1s ytterväggar.	23
Tabell 8: Ingående material i KU1 och KU2s takkonstruktion.	24

FIGURER

Figur 1: En översikt över de metoder som använts i arbetet.	14
Figur 2: Illustration av Hällebols fasader.	16
Figur 3: Evias grundelement byggd med Koljern-teknik	17
Figur 4: Hällebols grundkonstruktion med prefabricerade cellglaselement.	18
Figur 5: Hällebols grundkonstruktion sedd uppifrån.	18
Figur 6: Hällebols ytterväggar.	19
Figur 7: Hällebols takkonstruktion.	20
Figur 8: KU1 och KU2s grundkonstruktion.	21
Figur 9: KU1s ytterväggskonstruktion.	22
Figur 10: KU2s ytterväggskonstruktion.	23
Figur 11: KU1 och KU2s takkonstruktion.	24
Figur 12: Klimatpåverkan.	26
Figur 13: Procentuell fördelning av klimatpåverkan.	26
Figur 14: Klimatpåverkan fördelad på konstruktionsdelar.	28
Figur 15: Klimatpåverkan fördelad på ingående material.	29
Figur 16: Samlade materialkostnader för respektive klimatskärm.	30
Figur 17: Materialkostnader för respektive klimatskärm.	31

TERMINOLOGI

CO₂e	Koldioxidekvivalenter. Mått enhet som används för att kvantifiera och jämföra olika växthusgaser baserat på deras klimatpåverkan i förhållande till koldioxid (CO ₂). Det innebär att andra växthusgaser omvandlas till en ekvivalent mängd CO ₂ baserat på deras uppvärmningseffekt.
EPD	Miljövarudeklaration (Environmental product declaration). En miljövarudeklaration för en byggprodukt beskriver produktens miljöpåverkan utifrån ett livscykelperspektiv.
GWP	Global warming potential (Global uppvärmningspotential) Växthusgaser har olika stor effekt på den globala uppvärmningen och för att kunna jämföra dem räknas de alla om till koldioxidekvivalenter (CO ₂ e).
Inbyggd energi	Inbyggd energi avser den totala mängden energi som är kopplad till produktionen, transporten, installationen och slutbehandlingen av ett material under hela dess livscykel.
Inbyggd klimatpåverkan	Inbyggd klimatpåverkan avser den totala mängden klimatpåverkan som är kopplad till produktionen, transporten, installationen och slutbehandlingen av ett material under hela dess livscykel.
Klimatskärm	En byggnads klimatskärm är dess golv, tak, ytterväggar, fönster och dörrar som utgör gränsen mot omgivningen.
LCA	Livscykelanalys. Metod för att beräkna miljöpåverkan under en produkts hela livscykel.
LCC	Livscykelkostnader. Metod för att beräkna kostnader under en produkts hela livscykel.
Platta på mark	Platta på mark är en vanlig och relativt enkel grundläggning med en betongkonstruktion direkt på mark utan underliggande utrymme.
U-värde	Värmegenomgångskoefficient. Värdet beskriver en konstruktions isoleringsförmåga och anges i enheten W/m ² K.
λ-värde	Värmeledningsförmåga. Värdet beskriver ett materials värmeledningsförmåga och anges i enheten W/mK.

1 INTRODUKTION

I detta kapitel presenteras bakgrunden för examensarbetet, dess syfte och frågeställningar. Dessutom identifieras och redovisas de avgränsningar som gäller för examensarbetet.

1.1 Bakgrund

Global uppvärmning har de senaste decennierna blivit en väsentlig miljöfråga världen över. De negativa effekterna av temperaturökningarna inkluderar extremt väder, stigande havsnivåer och förlust av biologisk mångfald (European Union, u.å.). År 2021 fastställde FN:s klimatpanel, IPCC, att mänsklig aktivitet är den främsta orsaken till klimatförändringarna, framför allt genom utsläpp av växthusgaser (Masson-Delmotte m.fl., 2021). Den globala temperaturen har ökat med ungefär 1,1 °C jämfört med perioden 1850-1900 och förväntas fortsätta att stiga under de kommande årtiondena (ibid.). För att minska utsläppen trädde det internationella klimatavtal, Parisavtalet, i kraft år 2016. Avtalet slår fast att den globala temperaturökningen bör begränsas till 2 °C, med strävan att begränsa den till 1,5 °C. För att uppnå dessa mål bör fokuset främst ligga på att minska utsläppen av växthusgaser (UNDP, u.å.).

Byggbranschen är en av de branscher som bidrar betydligt till den ökande mängden växthusgaser i atmosfären. Under 2018 ansvarade bygg- och anläggningssektorn för 39 % av energi- och processrelaterade koldioxidutsläpp, varav 11 % uppstod från tillverkning av byggmaterial (IEA, 2019). Hållbar design av byggnader och innovativa byggmaterial och lösningar har därför blivit en alltmer viktig fråga. Många nya lösningar har redan utvecklats och inkluderar bland annat mer energieffektiva byggmaterial, system och tekniker som är mer miljövänliga under tillverkningen samt byggmaterial som omfattar återbruk och återanvändning. Trots det finns det fortfarande ett stort behov av att främja innovation och utveckling inom byggsektorn för att minska kommande byggnaders klimatpåverkan och samtidigt uppfylla grundläggande funktioner såsom funktionalitet, hållfasthet, bärformåga, inomhusmiljö och livslängd.

1.2 Problembeskrivning

För att möta efterfrågan på hållbara produkter och lösningar, samt bidra till en hållbar omställning inom byggbranschen, utvecklar det svenska företaget Evia AB innovativa prefabricerade byggmaterial baserade på en kombination av välkända material och nya tekniker. I detta arbete studeras tidigare forskning om klimatpåverkan relaterad till byggmaterial med hampa och cellglas samt konventionella alternativ. Dessutom studeras en

klimatskärm som Evia ska tillverka för uppbyggnad av ett enbostadshus på den svenska skärgårdsön Orust, norr om Göteborg. Husets grund byggs med en av Evia patenterad teknik och består av cellglas och lättmetallbalkar. Husets ytterväggar och takkonstruktion består av trä- och hampaprodukter. Ytterväggarna prefabriceras medan takkonstruktionen byggs på plats. Hampa är en snabbväxande och koldioxidabsorberande växt som via sin kollagring kan bidra till hållbara byggmaterial. (Ip & Miller, 2012)

1.3 Syfte

Examensarbetets syfte är att bidra med kunskap om klimatpåverkan relaterad till tillverkning av byggmaterial med hampa och cellglas samt konventionella alternativ. Arbetet syftar även till att jämföra skillnader i klimatpåverkan och livscykelkostnader för en klimatskärm som byggs av byggmaterial med hampa och cellglas, och en klimatskärm som byggs av konventionella byggmaterial med liknande isoleringsförmåga. Dessutom syftar arbetet till att undersöka hur stor betydelse kollagring har för klimatpåverkan relaterad till byggmaterial med hampa. Genom en litteraturstudie samt en fallstudie med livscykelanalys (LCA) och livscykelkostnadsanalys (LCC) ska rapporten bidra med svar på huruvida klimatskärmar med hampakalk och cellglas är fördelaktigt ur ett klimat- och kostnadsperspektiv.

1.4 Frågeställningar

- F1 Hur skiljer sig klimatpåverkan mellan en klimatskärm med hampaisolering och cellglas jämfört med en klimatskärm med konventionella byggmaterial?
- F2 Hur skiljer sig materialkostnader mellan en klimatskärm med hampaisolering och cellglas jämfört med en klimatskärm med konventionella byggmaterial?

1.5 Avgränsningar

Detta examensarbete beaktar produktskedet (A1-A3), vilket inkluderar råvaruförsörjning, transport och tillverkning av byggmaterialen samt slutskedet (C1-C4), vilket inkluderar demontering och rivning, transport, restproduktsbehandling och bortskaffning. Däremot exkluderas påverkan från användningsskedet (B1-B7), det vill säga driften under byggnadens livslängd. I de analyser som utförs inkluderas klimatskärmarna grundkonstruktion, ytterväggar och takkonstruktion, medan fönster och dörrar exkluderas från studien. Materialen som undersöks kan i princip jämföras med vilka byggmaterial som helst, men i denna rapport jämförs de med välkända konventionella byggmaterial såsom betong,

cellplast och mineralull. Studien tar inte hänsyn till eventuella skillnader i byggmaterialens livslängd och utelämnar faktorer som inte är direkt relaterade till byggmaterialens klimatpåverkan och livscykelkostnader, såsom återbruk, materialspill, bärförmåga, beständighet, fukttransport, brandskydd, estetik, anpassningsbarhet och inomhusmiljö. I LCC-analysen beaktas endast materialkostnader baserade på allmänna marknadspriser. Kostnader relaterade till prefabriceringsprocesser, arbete på byggplatsen och övriga kostnader exkluderas från analysen. Eftersom U-värdeberäkningar görs för varje konstruktionsdel och de tre utformningarna har liknande isoleringsförmåga, tas ingen hänsyn till driftskostnader. Detta innebär också att osäkerheter avseende framtida räntor och inflation inte beaktats, då de inte påverkar byggmaterialens nuvarande marknadskostnader.

2 TEORI

I detta kapitel presenteras teorin som är baserad på den genomförda litteraturstudien för arbetet. Utifrån tidigare forskningsresultat förklaras teorin bakom livscykelanalyser, livscykelkostnadsanalyser, klimatpåverkan av produkter med hampa och cellglas samt konventionella byggmaterial som ingår i fallstudien.

2.1 Hållbarhetsvärdering

Under slutet av 1980-talet publicerades FN-rapporten "Vår gemensamma framtid", även känd som Brundtlandrapporten. I denna rapport fastställdes begreppet hållbar utveckling som "en utveckling som tillgodoser dagens behov utan att äventyra kommande generationers möjligheter att tillgodose sina behov" (Lunds universitet, 2020). Hållbar utveckling brukar vanligtvis definieras utifrån tre samverkande aspekter: ekologisk, social och ekonomisk hållbarhet. Genom att dessa aspekter växelverkar och stödjer varandra förväntas de bidra till en hållbar utveckling (ibid.). I denna rapport utforskas de miljömässiga och ekonomiska hållbarhetsaspekterna vid användning av hampa och cellglas som byggmaterial för klimatskärmar.

2.1.1 Livscykelanalys (LCA)

Livscykelanalys (LCA) är en analysmetod som ger en omfattande översikt över de miljömässiga aspekterna av en produkt eller process genom dess livscykel från *vagga till grav*. (Curran, 2015). Med *vagga till grav* menas att alla viktiga steg i en produkts livscykel ingår i analysen. Dessa inkluderar utvinning av råvaror från miljön (jord, vatten, luft), tillverkning av material och de slutliga produkterna, deras användning och avfallshantering eller återvinning. Dessutom inkluderas all transport som sker mellan dessa steg (Klöppfer, 2014).

LCA-analyser har utförts i flera nordamerikanska och europeiska länder sedan 1970-talet, men det var först 1993 som standardriktlinjer för hur LCA-analyser skall utföras (*A code of Practice*) publicerades av Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) (Klöppfer, 2006). År 1997 publicerades den första ISO 14040-standarden av International Organization for Standardization (ISO). Sedan dess har ytterligare standarder i ISO 14040-serien publicerats, vilka fortfarande är giltiga (Klöppfer, 2014).

Grunden för att jämföra produkter och processer i en LCA-analys är den så kallade *funktionella enheten*. Den funktionella enheten beskriver kvantitativt funktionen av de produktsystem som ska jämföras. Vid genomförandet av LCA-analyser är det vanligt att försumma små skillnader mellan produkter (till exempel estetiska skillnader) om de inte har

någon eller endast en mindre inverkan på klimatpåverkan i produktsystemet (Klöpffer, 2014).

I en LCA-analys delas en byggnads livscykel in i produktskedet (A1-A3), byggproduktionsskedet (A4-A5), användningsskedet (B1-B7) och slutskedet (C1-C4), vilka visas i tabell 1. Produktskedet omfattar produktion av alla byggprodukter och resurser som kommer att användas. Byggproduktionsskedet omfattar byggprodukternas transport till byggarbetsplatsen och byggnadens färdigställande. Användningsskedet omfattar alla processer för att underhålla, reparera och driva byggnaden. Slutskedet omfattar processer för att riva och ta bort byggnadsdelarna till återanvändning, återvinning eller deponering när byggnaden inte längre används (Boverket, 2019).

Tabell 1: Skeden i en byggnads livscykel (Boverket, 2019)

A1-5 Byggskede		
A1-3 Produktskede	A1	Råvaruförsörjning
	A2	Transport
	A3	Tillverkning
A4-5 Byggproduktionsskede	A4	Transport
	A5	Bygg- och installationsprocess
B1-7 Användningsskede	B1	Användning
	B2	Underhåll
	B3	Reparation
	B4	Utbyte
	B5	Ombyggnad
	B6	Driftsenergi
	B7	Driftens vattenanvändning
C1-5 Slutskede	C1	Demontering, rivning
	C2	Transport
	C3	Restproduksbehandling
	C4	Bortskaffning
D Fördelar och belastningar utanför systemgränsen		

Tidigare var uppfattningen att driften av byggnader stod för majoriteten av den totala energianvändningen, medan den inbyggda energin hade ett begränsat bidrag (Chau m.fl., 2015). Detta berodde främst på att byggnader har en relativt lång livslängd och att de under denna tid förbrukar stora mängder energi för drift. Nya studier visar dock att den kontinuerliga tillkomst av nya material, nya processer och teknologier, samt introduktionen av lågenergihus och nollenergihus leder till att andelen inbyggd energi gradvis

ökar (Li m.fl., 2020). Det är därför viktigt att analysera en byggnads energianvändning och klimatpåverkan ur ett livscykelperspektiv.

2.1.2 Livscykelkostnader (LCC)

Livscykelkostnader är en ekonomisk utvärderingsteknik som används för att utvärdera olika investeringsalternativ genom att beakta kostnader och besparingar kopplade till varje investeringsalternativ under en given analysperiod (Dwaikat & Ali, 2018). Inom byggsektorn tillämpas denna metod för att jämföra olika designalternativ för byggnader eller system och beakta livscykelkostnader samt de besparingar som kan uppnås genom respektive alternativ. Ursprunget till konceptet om livscykelkostnader är inte fullständigt dokumenterat, men det finns uppgifter som hävdar att det amerikanska försvarsdepartementet först började använda LCC-analyser under mitten av 1960-talet i samband med inköp av militär utrustning (ibid.). Efter introduktionen av konceptet *green building* i början av 1990-talet har flera betonat behovet av att inkludera en helhetsbedömning av kostnader, från vagga till grav. Denna utveckling har varit avgörande för att erkänna LCC-analyser som en metod för att bedöma hållbarhet och för att ta hänsyn till den ekonomiska dimensionen av hållbar utveckling (ibid.).

Vid strategiska beslut om investeringar i byggnader är ett långsiktigt perspektiv nödvändigt, eftersom byggnader är produkter med lång livslängd och befinner sig på en stabil marknad (Offentliga fastigheter, 2022). I projekt där långsiktighet eftersträvas behöver kostnader under hela livslängden beaktas. I ett projekts förstudie kan det vara utmanande att erhålla detaljerade siffror för de framtida driftskostnaderna, men genom att tidigt inkludera livscykelperspektivet i byggprojekten ökar möjligheten att kunna genomföra hållbara investeringar. Investeringar i byggnader kan få stor betydelse under en lång tid. Att bygga hållbart kan medföra högre kostnader vid investeringstillfället, men om framtida underhålls- och driftskostnader beaktas kan en helhetsbedömning göras. Detta kan innebära att en större investeringsbudget krävs, men kan medföra lönsamhet på längre sikt samt ekonomiska och miljömässiga fördelar under driftskedet (ibid.).

2.2 Prefabricerade byggelement

Prefabricering är en alternativ konstruktionsmetod som flyttar byggnadsprocessen från byggarbetsplatsen till en kontrollerad fabriksmiljö. Denna växande konstruktionsteknik har potentiella fördelar som minskad projekttid, minimering av byggavfall, lägre kostnader och bättre hållbarhet (Jin m.fl., 2018). Tidigare forskning har undersökt ekonomiska, miljömässiga, tekniska och estetiska aspekter av prefabricerade byggelement jämfört med konventionella byggelement (ibid.). Teng m.fl. (2018) visar i sin studie att det är svårt att entydigt dra slutsatser om i vilken utsträckning prefabricering kan bidra till att minska byggnadens koldioxidutsläpp. Den miljömässiga fördelen av prefabricering varierar

mycket mellan de byggnaderna som studerades. Enligt studien beror variationen på 12 variabler: livslängd, livscykelstadium, geografisk omfattning, klimatzon, LCA-metod, forskningsmetod, analysenhet, utsläppskälla, byggnadstypologi, täthetsgräns, byggmaterial och prefabriceringsgrad. Om det tas hänsyn till dessa variabler i analysen minskar variationen i koldioxidutsläppen. Teng m.fl. (2018) drar slutsatserna att den genomsnittliga minskningen av koldioxidutsläpp genom prefabricering för de analyserade byggnaderna är 15,6 % för inbyggd klimatpåverkan och 3,2 % i driftsfasen, men att prefabricering inte nödvändigtvis leder till minskade koldioxidutsläpp och att de identifierade variablerna bör beaktas vid framtida forskning och praxis.

2.3 Värmeisolering

2.3.1 Konventionella isoleringsmaterial

Mineralull är ett oorganisk isoleringsmaterial, det vanligaste isoleringsmaterialet i byggnader, och det tillverkas vanligtvis av smält glas- eller stenull som spinns till fina fibrer (Bengt Strandberg & Fredrik Lavén, 2021; Fuchsl m.fl., 2022). Det används huvudsakligen som isolering i väggar, tak och mellanbjälklag för att förhindra värmeförlust. Cellplast är ett organiskt icke-förnybart isoleringsmaterial och är också en vanlig typ av isoleringsmaterial (Fuchsl m.fl., 2022). Cellplast omfattar både expanderad polystyren (EPS) och extruderad polystyren (XPS), och används huvudsakligen för att isolera byggnadsdelar som utsätts för fukt och markkontakt. EPS tillverkas genom att smälta små polystyrenkulor som sedan expanderas under värme och tryck för att bilda block. Efter lagring sågas blocken till skivor. XPS framställs genom att komprimera polystyrenkulor med gas under högt tryck, vilket sedan expanderar när trycket minskar och bildar slutna celler. XPS är oftast dyrare än EPS men har bättre styrka och fuktresistens (Bengt Strandberg & Fredrik Lavén, 2021). Cellulosafiberisolering är en annan vanligt förekommande typ av isoleringsmaterial. Cellulosafiberisolering framställs huvudsakligen genom att malda pappersfibrer behandlas med oorganiska tillsatser. Dessa tillsatser har egenskaper som fungerar som brandskyddsmedel och motverkar tillväxt av mögel. Källmaterialet till cellulosafibrerna är vanligtvis återvunnet tidningspapper (Lopez Hurtado m.fl., 2016).

De största klimatpåverkningarna vid tillverkning av oorganiska material som stenull och glasull kommer från produktionsfasen, särskilt den energikrävande smält- och fiberbildningsprocessen för glas och stenmaterial (Fuchsl m.fl., 2022), men också bindemedel och tillsatser kan ha negativ påverkan (Lopez Hurtado m.fl., 2016). De största påverkningarna vid tillverkning av organiska icke-förnybara material såsom cellplast kommer från råmaterialen. Enligt Gomes m.fl. (2020) kan upp till 90 % av GWP (Global warming potential) för tillverkning av EPS komma från råmaterial. Medan studierna av oorganiska

och organiska icke-förnybara material är mer överensstämmande, finns det större skillnader i studier av förnybara byggmaterial som cellulosa från återvunnet papper eller träfiber. För dessa material kan tillsatser, bindemedel samt värme- och elförbrukning vara den största påverkan. Variationerna kan tillskrivas olika tillverkningsmetoder och system (Füchsl m.fl., 2022).

2.3.2 Cellglas

Cellglas är ett oorganiskt isoleringsmaterial med en sluten cellstruktur. Cellglas består av glas, kalciumfluorid, natriumkarbonat, järnoxid, manganoxid, natriumsulfat och natriumnitrat som smälts vid 1400 °C. Därefter utsätts materialet för hög temperatur i ugn, glödgas i en lång tunnel där temperaturen successivt sänks och slutligen skärs till skivor (Gellert, 2010). Tillverkningsmetoden bevarar den kemiska stabiliteten hos oorganiskt glas och ger cellglas egenskaper såsom hög tryckhållfasthet, låg densitet, skydd mot mögel, obrännbarhet, ingen vattenabsorption, vatten- och vattenånggenomtränglighet samt låg värmeledningsförmåga (ibid.). Dessa egenskaper gör cellglas lämpligt som isolering i en klimatskärm, särskilt i grundelement där egenskaper som skydd mot mögel och vattenabsorption är av stor betydelse. Tidigare forskning visar att grundkonstruktioner där cellglas kombineras med stål kan minska en grundsklimatpåverkan med 50-70 % jämfört med en konventionell grundkonstruktion med betong och cellplast (Anderzon & Wilhelmsson, 2021; Johansson, 2021; Rydin & Olsson, 2019).

2.3.3 Hampa

Hampa är en växt som har haft många användningsområden under de senaste tusentals åren. Genom åren har människor använt växtens fibrer för att tillverka rep, textilier, dukar, papper, byggmaterial och andra produkter, medan växtens olja har använts för mat, medicin, färg och lack. Hampa med högt innehåll av den psykoaktiva komponenten tetrahydrocannabinol har dessutom använts som rusmedel. Trots att industrihampa kommer från samma växt, *Cannabis sativa*, innehåller den en betydligt mindre andel tetrahydrocannabinol (mellan 0,05 och 1 %), och kan därför inte användas som rusmedel. I de flesta länder som producerar industrihampa kontrolleras det idag att hampa har tillräckligt lågt innehåll av tetrahydrocannabinol (Decorte, 2011). År 2021 fanns det cirka 75 sorter av hampa på EU:s växtsortsdatabas som odlas eller kan odlas i EU (Manian m.fl., 2021).

Hampa är en extremt tålig gröda som vanligtvis planteras på våren och skördas på sensommaren. Under denna period kan plantan växa till mellan 1-6 meter i höjd beroende på sort och odlingspraxis (Ip & Miller, 2012; Manian m.fl., 2021). Eftersom det är en snabbväxande planta kan den konkurrera ut ogräs och kräver därför generellt sett låga nivåer av herbicidanvändning. Efter torkning pressas hampstjälkarna till balar och lagras tills de ska bearbetas. I bearbetningsprocessen separeras fibrerna från den träiga kärnan. För hampa som odlas för fiberproduktion, och därför skördas före fröbildning, kan 1 hektar

ge mellan 5 och 15 ton torr växt, beroende på odlingsplatsens förhållanden och jordbruksmetoder (Ip & Miller, 2012; Zampori m.fl., 2013). Av denna mängd utgör den inre träiga kärnan, kallad hampaskävor, 75 % av växten och används bland annat till byggmaterialet hampakalk. Fibrerna utgör 20 %, medan damm utgör 5 % (Ip & Miller, 2012). Efter skörden lämnas ungefär 20 % av växtens totala massa på fältet för att användas som gödsel till nästa gröda. Dessa består huvudsakligen av rötter, blad och skävorna (Florentin m.fl., 2017; Ip & Miller, 2012). Utsläppen av koldioxid per kg tillverkade hampaskävor varierar mellan 0,085 och 0,19 kg, men under växtfasen binder hampaplantan mellan 1,5-2,1 kg koldioxid per kg tillverkade hampaskävor genom fotosyntes (Florentin m.fl., 2017; Shea m.fl., 2012).

Ett av användningsområdena för hampa inom byggmaterial är i form av hampakalk. Hampakalk är ett biobaserat material som med sin låga densitet har en låg värmeledningsförmåga. Dess porösa struktur möjliggör också att mildra variationer i omgivningens värme och fuktighet (Shea m.fl., 2012). Hampakalk tillverkas genom att kombinera hampans skävor med ett bindemedel (Bošković & Radivojević, 2023). Huvudinnehållet i hampakalks bindemedel är kalk. Kalken tillverkas genom att värma kalciumkarbonat i en ugn vid cirka 900 °C, vilket resulterar i bildandet av bränd kalk (kalciumoxid). Produktionen av 1 kg bränd kalk kräver cirka 1,7 kg kalksten och resulterar i utsläpp av cirka 0,7 kg koldioxid. När bränd kalk blandas med vatten bildas släckt kalk (kalciumhydroxid), som sedan används i bindemedlet. Under byggnadens livstid karbonatiseras den släckta kalken genom att den långsamt absorberar koldioxid från atmosfären och återbildas till kalciumkarbonat. Upp till 90 % av den koldioxid som släpps ut vid tillverkningen kan karbonatiseras (Ip & Miller, 2012), och enligt Moletti m.fl., (2023), kan karbonatiseringen dessutom förbättrar hampakalkens hygrotermiska prestanda. Eftersom koldioxid binds både genom fotosyntes när hampan växer och genom karbonatisering av kalken, är hampakalk ett koldioxidnegativt material. Detta innebär att mer koldioxid absorberas än vad som släpps ut under dess produktion och användning. (Florentin m.fl., 2017). Ett annat användningsområde för hampa inom byggbranschen är vid tillverkning av hampafiberisolering. I stället för hampaskävorna från hampans inre träiga kärna, som används i hampakalk, används hampans fibrer för att tillverka till exempel hampafiberskivor. Hampans långa och starka fibrer sitter som distinkta buntar som omger den träiga kärnan och växer i en riktning parallellt med växtens vertikala axel (Manian m.fl., 2021). Hampafiber har goda isolerande egenskaper och hampafiberisoleringen är biologiskt nedbrytbar och återvinningsbar (Zampori m.fl., 2013).

Essaghouri (2023) jämförde klimatpåverkan från tre olika typer av ytterväggar genom en fallstudie. Den ena ytterväggen bestod av en trästomme och hampakalk, medan de andra två bestod av dubbelt ihålligt lertegel respektive ett kompositmaterial, båda isolerade med polystyrenisolering. Fallstudien visade att ytterväggen med hampakalk hade den minsta

klimatpåverkan av de tre alternativen, främst på grund av att hampans förmåga att absorbera koldioxid från atmosfären när den växer. Under driftsfasen var klimatpåverkningen i princip lika för de tre väggsystemen eftersom de alla hade samma U-värde på 0,19 W/m²·K (Essaghouri m.fl., 2023).

I en annan studie undersökte Ip och Miller (2012) klimatpåverkan relaterad till byggandet av en yttervägg med trästomme och hampakalk. Beräkningarna gjordes på en funktionell enhet på 1 kvadratmeter vägg med en tjocklek på 0,3 meter och utan någon väggbehandling. Studien visade att de totala växthusgasutsläppen som uppstår under odling och tillverkning av denna funktionella enhet motsvarar 46,63 kg CO₂e, medan koldioxiden som binds för hampa motsvarar 45,82 kg CO₂e och för trä 8,34 kg CO₂e, vilket innebär att utsläppen för odling och tillverkning ger ett nettoutsläpp på -7,53 kg CO₂e. Dessutom bidrog karbonatiseringen av kalken i bindemedlet med en bindning av 28,55 kg CO₂e. Den totala nettoklimatpåverkan i livscykeln från den funktionella enheten var således -36,08 kg CO₂e (Ibid.).

Florentin m.fl. (2017) undersökte koldioxidutsläppen relaterade till transporten av hampakalk. Studien visade att klimatpåverkan relaterade till transportererna av hampakalkens råmaterial var förhållandevis låg. I studien transporterades hampa från Frankrike till Israel och transporten hade endast en marginell påverkan. Om dock hampa och NHL (naturlig hydratiserad kalk) producerades lokalt skulle transportrelaterade utsläpp minska ytterligare och inte ha en betydande klimatpåverkan (ibid.).

2.4 Stål

Stål anses vara en av de mest miljöbelastande materialen per viktenhet och står för cirka 7 % av alla människoskapade koldioxidutsläpp (Bhaskar m.fl., 2022; Holappa, 2020; Minunno m.fl., 2021). Koldioxidutsläpp från stål varierar emellertid betydligt. Enligt Minunno et al (2021) varierar utsläppen från 0,34 till 4,55 kgCO₂e/kg tillverkat stål. Orsakerna till denna variation kan tillskrivas geografiska skillnader och produktionsmetoder (Holappa, 2020; Minunno m.fl., 2021). Möjliga lösningar för att minska koldioxidutsläppen relaterade till stålproduktionen inkluderar att installera den bästa tillgängliga teknik i befintliga integrerade stålverk, använda effektiv värmeåtervinning samt övergå från fossila energikällor som kol, koks, olja och naturgas till fossilfria energikällor (Bhaskar m.fl., 2022; Holappa, 2020). Stål är dessutom världens mest återvunna material och det uppskattas att upp till 90 % återvinns vid slutet av dess livscykel. Återvinning av stål har historiskt sett begränsats av tillgången på skrot. Studier visar dock att det globala utbudet av uttjänt skrot förväntas öka kraftigt, vilket kan möjliggöra att framtida tillväxt i efterfrågan på stål kan tillgodoses genom återanvändning (Daehn m.fl., 2017; Pauliuk m.fl., 2013).

2.5 Betong

Betong är det mest använda byggmaterialet i världen och den genomsnittliga förbrukningen av betong är cirka 1 ton per år per levande människa (Flower & Sanjayan, 2007). Det har rapporterats att cementindustrin är ansvarig för 5 % av de globala människoskapade koldioxidutsläppen (ibid.). På grund av den stora användningen har växthusgasutsläpp per ton tillverkad betong stor global påverkan och även små minskningar kan ha en betydande global påverkan. De grundläggande beståndsdelarna i betong är cement, vatten, fin ballast och grov ballast. Portlandcement är den primära källan till koldioxidutsläpp i typiska betongblandningar och står för 74-81 % av de totala utsläppen vid tillverkning av betong. Kalk är den primära råvaran i portlandcement. Som vid tillverkning av kalk för hampakalk frigörs en betydande mängd koldioxid genom den kemiska reaktionen vid nedbrytningen av kalksten och energiförbrukningen vid höga ugnstemperaturer (Flower & Sanjayan, 2007; Pade & Guimaraes, 2007). Till skillnad från hampakalk är det dock endast en liten andel, mindre än 8 % av den koldioxid som frigörs vid tillverkningen, som absorberas under betongens användning (Lee m.fl., 2013; Yang m.fl., 2014). För att öka kollagringen behöver betongen krossas. Dessutom betraktas karbonatisering av betong ofta som en försämring av materialet eftersom den leder till korrosion av armeringsstålet i betongen. För många betongkonstruktioner som är utsatta för aggressiva miljöförhållanden, är betongen därför utformad för att undvika karbonatisering (Pade & Guimaraes, 2007). Den näst största källan till koldioxidutsläpp är grov ballast, som står för 13-20 % av de totala utsläppen. Majoriteten av utsläppen från produktionen av grov ballast kommer från elektricitet, som står för cirka 80 %. Sprängning, utgrävning, transport och hantering står för mindre än 25 %. Utsläppen från sprängmedlen är mycket höga, men bidrar med mycket små mängder (<0,25 %) till produktionen av grov ballast, eftersom bara små mängder används. Produktionen av fin ballast genererar 30-40 % av utsläppen jämfört med produktionen av grova aggregat. Fin ballast genererar mindre koldioxidutsläpp eftersom de inte krossas. Utsläppen från tillsatsmedel är försumbara (Flower & Sanjayan, 2007).

Det finns också andra komponenter i betongtillverkning som är ansvariga för växthusgasutsläpp och som behöver beaktas. Andra cementartade komponenter som används inkluderar masugnsslagg, en biprodukt av stålindustrin, och flygaska, en biprodukt vid förbränning av kol. Dessa två material används vanligtvis för att ersätta en del av cementen i en betongblandning. Användningen av vatten i betong leder till minimala koldioxidutsläpp. Det är således framför allt cement, grova och fina aggregat, masugnsslagg och flygaska som bidrar till betongs klimatpåverkan (ibid.).

3 METOD

I detta kapitel presenteras undersökningsmetod och datainsamlingsmetod för arbetet samt programvaror, som använts under arbetet, beskrivs. Dessutom beskrivs hur validitet och reliabilitet har säkrats i arbetet samt vilka etiska aspekter som övervägts.

Arbetet inleddes med en litteraturstudie där teori och tidigare forskning analyserades för att ge en överblick över och grundlig förståelse för forskningsproblemet samt de material som ingår i fallstudien och deras klimatpåverkan. Därefter genomfördes en fallstudie där en livscykelanalys (LCA) och livscykelkostnadsanalys (LCC) genomfördes av ett enbostadshus klimatskärm som konstrueras med cellglas och hampaisolering. Husets klimatpåverkan och kostnader jämfördes med ett motsvarande enbostadshus som konstruerats med konventionella material.

3.1 Litteraturstudie

Litteraturstudien inleddes med en sökning efter relevant forskning, det vill säga vetenskapliga artiklar och böcker som avhandlar egenskaperna hos cellglas och hampa. Litteraturen samlades in från de vetenskapliga sökmotorerna Google Scholar och Elsevier ScienceDirect. Studiens fokus var att samla in information och forskningsresultat om tillverkningsprocessen och klimatpåverkan från cellglas och hampakalk. För att ge en förståelse av hur dessa material skiljer sig från konventionella byggmaterial, ur ett klimatperspektiv, studerades även konventionella byggmaterial såsom betong och mineralull. I litteraturstudien undersöktes också klimatpåverkan relaterad till prefabricerade byggelement jämfört med icke-prefabricerade byggelement. Genom att först genomföra en noggrann litteraturstudie var det möjligt att utgå från en gedigen kunskapsbas och på så sätt göra en mer välgrundad fallstudie. En fördel med att samla data genom en grundlig litteraturstudie är att det ger en evidensbaserad grund för vidare diskussion och slutsatser. En nackdel kan dock vara att det är tids- och resurskrävande att genomföra.

3.2 LCA- och LCC-analys för fallstudien

Litteraturstudien utgjorde en viktig grund för fallstudien där en LCA- och LCC-analys genomfördes för enbostadshuset *Hällebol*. För insamlingen av data till fallstudien användes information från tillverkaren Evia i form av ritningar och modeller om *Hällebol*. Först mättes alla mängder av respektive byggmaterial upp utifrån byggritningar, beskrivningar samt en 3D-modell i programvaran Trimble Connect, som är en molnbaserad plattform för samarbete och informationshantering inom bygg- och anläggningsindustrin. Genom användning av både 2D-ritningar och en 3D-modell möjliggjordes insamling och analys

av mängddata på ett effektivt och noggrant sätt. All mängddata beräknades som handberäkningar och sammanställdes i Excel. Detta gjordes för att kunna analysera och jämföra data på ett mer strukturerat sätt och enklare kunna verifiera datan. Därefter gjordes U-värdeberäkningar av byggkonstruktionerna i Hällebols klimatskärm för att bedöma konstruktionernas värmeisoleringsförmåga. Dessa beräkningar gjordes som handberäkningar i Excel. Sedan utformades konstruktioner till två alternativa klimatskärmar. När konstruktionerna utformades låg fokus på att materialen skulle ha liknande värmeisoleringsförmåga, men att de till skillnad från Hällebol skulle vara konventionella, såsom betong, lättbetong, cellplast och mineralull. Utformningarna konstruerades med hjälp av relevant litteratur. Utifrån U-värdeberäkningar för Hällebols utformning genomfördes även U-värdeberäkningar för de konventionella utformningarna. På så vis bestämdes tjockleken på de olika skikten i de konventionella utformningarna så att de hade samma driftsenergiebehov som Hällebols utformning, och på så sätt var jämförbara. Därefter matades alla material och mängder in i programvaran OneClickLCA, en programvara som används för att utföra LCA- och LCC-analyser inom bygg- och fastighetsbranschen, för att beräkna klimatskärmarernas klimatpåverkan och kostnader. Företaget bakom OneClickLCA tillhandahöll en licens till programvaran för att genomföra detta arbete. För att analysera kollagringen hos hampamaterialen i Hällebol, studerades EPD:arna (Environmental Product Declarations) för hampaprodukterna. Datat verifierades genom att jämföra med datat från litteraturstudien och liknande EPD:ar. Resultaten av beräkningarna kunde sedan analyseras och diskuteras, och slutsatser kunde dras. Livscykelkostandsanalysen baserades på allmänna marknadspriser för de respektive byggmaterialen. Marknadspriserna baserades på programvaran OneClickLCAs materialdatabas.

Metod för beräkning av värmegenomgångskoefficient

Värmegenomgångskoefficienten (U-värden) i denna rapport har beräknats enligt ekvation 1 (Carl-Eric Hagentoft, 2017). Värmegenomgångskoefficienten definieras som den värmemängd som per tidsenhet passerar genom en ytenhet av konstruktionen då skillnaden i lufttemperatur på ömse sidor av konstruktionen är en grad. Mer information om beräkning av U-värde finns i boken *Byggnadsfysik – så fungerar hus* (Carl-Eric Hagentoft, 2017).

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_{i=1}^N \frac{d_i}{\lambda_i} + R_{se}} \quad (1)$$

- där U = Värmegenomgångskoefficient (U-värde) [W/m²K]
 R_{si} = Värmeövergångsmotståndet för insida [m²K/W]
 R_{se} = Värmeövergångsmotståndet för utsida [m²K/W]
 d_i = Materialets tjocklek [m]

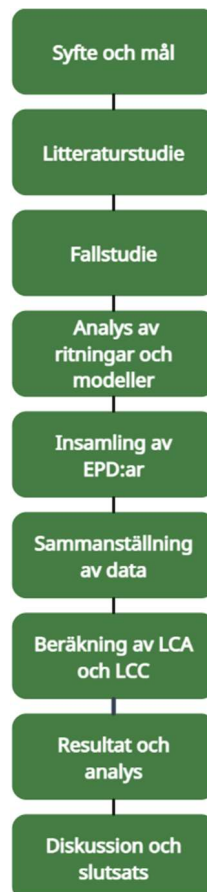
$$\lambda_i = \text{Materialets } [\text{W/m}\cdot\text{K}]$$

Värmeövergångsmotstånd räknas enligt följande europastandard (Carl-Eric Hagentoft, 2017):

$$\begin{aligned} R_{se} &= 0,04 \text{ m}^2 \text{ K/W} && \text{gäller alltid} \\ R_{si} &= 0,10 \text{ m}^2 \text{ K/W} && \text{gäller tak} \\ R_{si} &= 0,13 \text{ m}^2 \text{ K/W} && \text{gäller väggar} \\ R_{si} &= 0,17 \text{ m}^2 \text{ K/W} && \text{gäller golv} \end{aligned}$$

3.3 Metodöversikt

I Figur 1 visas en översikt över de metoder som använts i arbetet.



Figur 1: En översikt över de metoder som använts i arbetet.

3.4 Validitet och reliabilitet

Validiteten i fallstudien säkerställdes genom att verifiera att alla materials värmeledningsförmåga var rimliga. Det gjordes med hjälp av Boverkets klimatdatabas och dessutom valdes de konventionella utformningarna utifrån relevant litteratur. U-värdeberäkningarna gjordes för att säkra liknande värmeisoleringsförmåga. Mängder av varje byggmaterial mättes upp utifrån byggritningar, beskrivningar och modeller som sedan sammanställdes. Handberäkningar har verifierats genom att utföra kontrollberäkningar. Resultaten kontrollerades sedan genom att jämföra med tidigare studier.

3.5 Etiska ställningstaganden

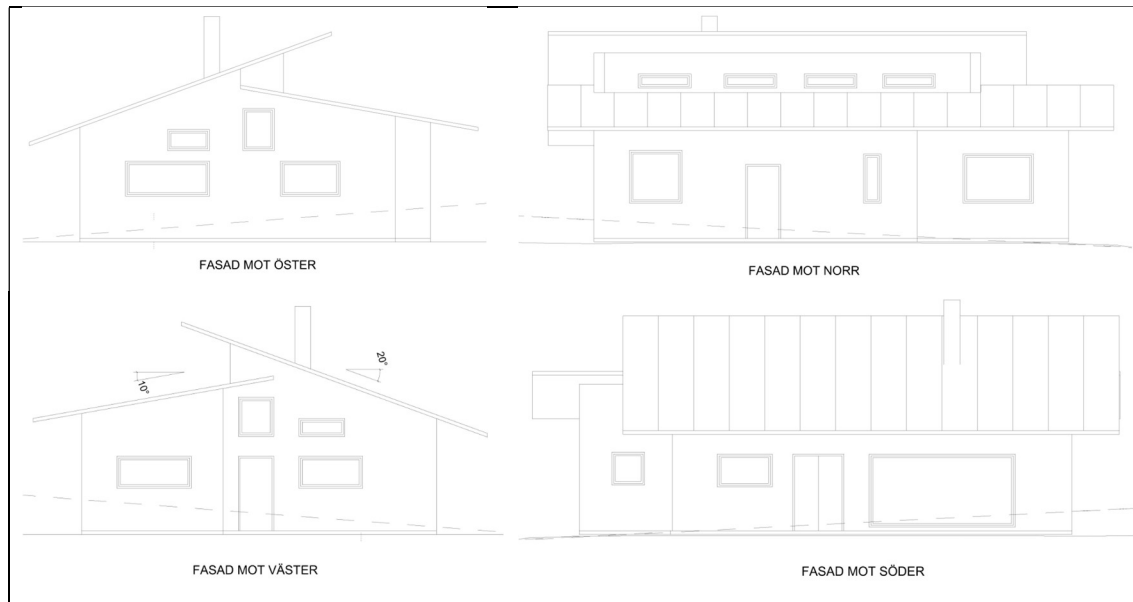
För att säkerställa objektiviteten i detta examensarbete har endast tillförlitlig och uppdaterad litteratur erhållits från pålitliga källor användes för att undvika felaktig information och att arbetet påverkas av personliga preferenser. Vidare har en stor vikt lagts vid att säkerställa att alla material som har använts i undersökningen har dokumenterats på ett korrekt sätt. Därigenom har det säkerställts att all data är korrekt och pålitlig. Slutligen har alla referenser i rapporten dokumenterats noggrant för att undvika plagiering.

4 FALLSTUDIE - Hällebol

I detta kapitel redovisas data och uppbyggnad för de konstruktioner som ingår i fallstudien. Fallstudien omfattar en livscykelanalys (LCA) och en livscykelkostnadsanalys (LCC), som baseras på byggandet av enbostadshuset Hällebol. I fallstudien jämförs Hällebols klimatskärm med två konventionella klimatskärmar, som benämns Konventionell utformning 1 (KU1) och Konventionell utformning 2 (KU2). Alla klimatskärmar inkluderar grundkonstruktion, ytterväggar och takkonstruktion.

4.1 Data – Hällebol

Hällebol är en fristående enplansvilla med en bruttoarea på 109 kvadratmeter som byggs på skärgårdsön Orust i Sverige. Vid tillverkningen av Hällebol ligger fokus på att minimera klimatpåverkan genom att använda innovativa byggmaterial, såsom cellglas i grunden och hampaisolering i ytterväggar och tak. Huset konstrueras med en prefabricerad grund och prefabricerade ytterväggar medan takkonstruktionen byggs på plats. Figur 2 visar en illustration av Hällebols fasader.

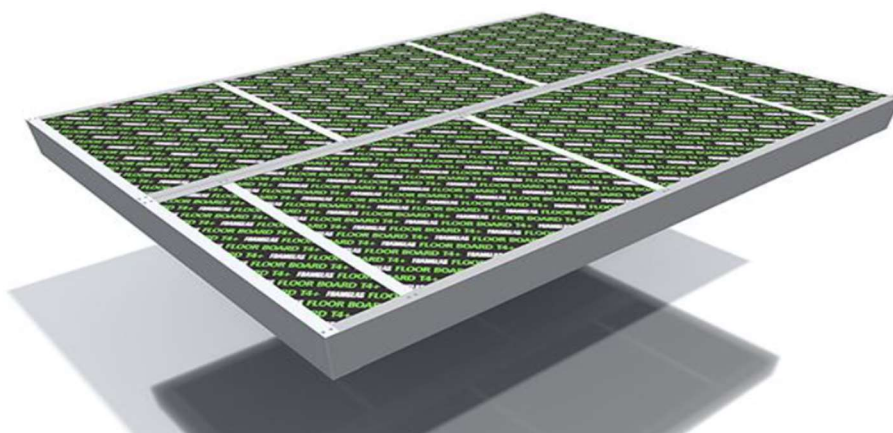


Figur 2: Illustration av Hällebols fasader.

I följande avsnitt beskrivs konstruktionsdelarna i Hällebols klimatskärm.

4.1.1 Grundkonstruktion

Hällebols grundkonstruktion byggs med en patenterad byggnadsteknik som är illustrerad i Figur 3. Tekniken kombinerar lättmetallbalkar med cellglasisolering. Grunden prefabriceras av tillverkaren Evia. Enligt Evia är grunden cirkulär i sin kretsloppsanvändning eftersom den är tillverkad av delvis återvunnet glas och är både demonterbar och återanvändbar. Tekniken kan enligt tillverkaren användas för grunder under hus, väggelement, utfackningsväggar, fribärande terrasser och fribärande takelement (Koljern Nordic, n.d.). I Hällebols klimatskärm används elementen dock endast för grundkonstruktionen. Lättmetallbalkar i grundelementen är tillverkad av stål. Det används cirka 6-7 kg galvaniserat stål per kvadratmeter (Koljern Nordic, n.d.). I grundelementen används cellglas av varumärket Foamglas som innehåller cirka 60 % återvunnet material (Owens Corning, n.d.). Evia uppger att de använder cirka 29 kg cellglas per kvadratmeter grundkonstruktion (Koljern Nordic, n.d.).

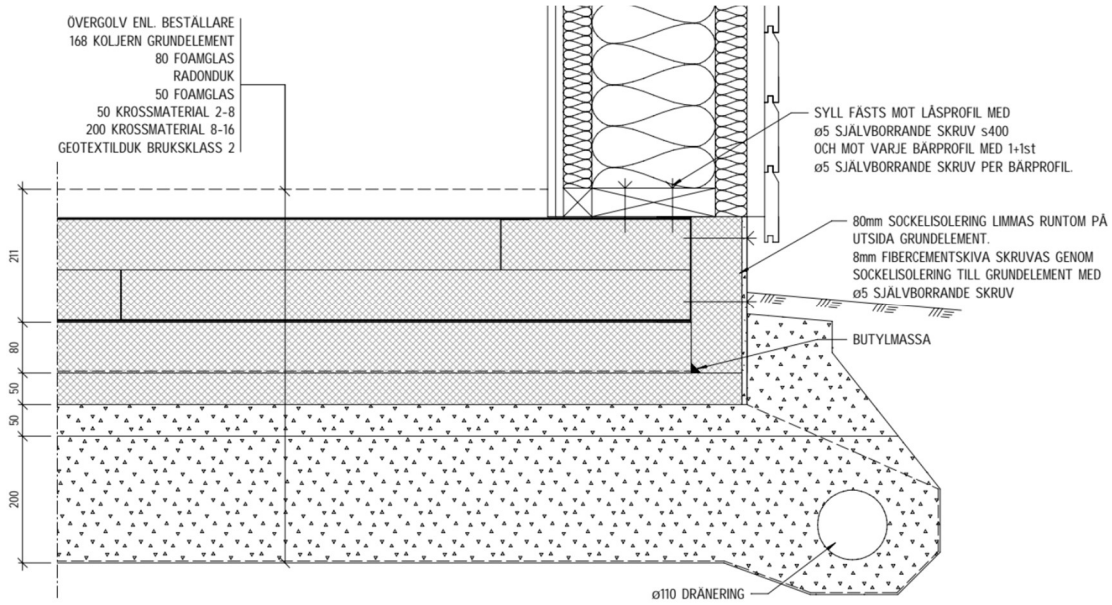


Figur 3: Evias grundelement byggd med Koljern-teknik (Koljern Nordic, u.a.).

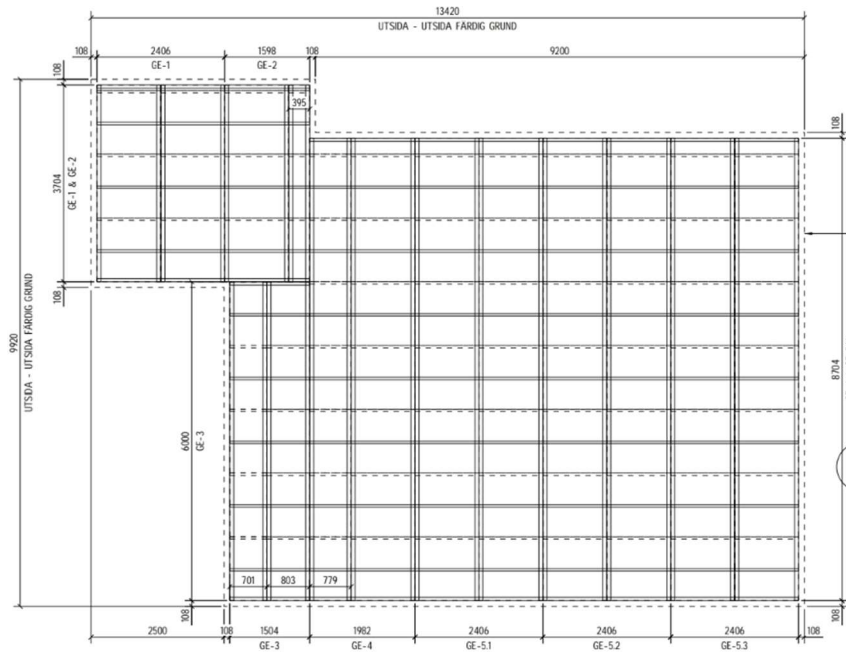
Hällebols grundkonstruktionen är uppbyggd enligt Figur 4. En geotextilduk placeras i botten av konstruktionen. Två lager av makadam i olika fraktioner placeras ovanpå geotextilduken. 200 mm krossmaterial med fraktionerna 8-16 mm och 50 mm krossmaterial med fraktionerna 2-8 mm. Två cellglasskivor placeras på krossmaterialet, en med en tjocklek på 50 mm och en med en tjocklek på 80 mm. En radonduk monteras mellan dessa två skivor. Därefter placeras prefabricerade grundelement på toppen av cellglasskivorna. Varje grundelement består av två skivor av cellglas med en tjocklek på 80 mm samt lättmetallbalkar med en tjocklek på 1,5 mm. Totalt sju grundelement installeras bredvid varandra i denna grundkonstruktion. Slutligen monteras en 36 mm tjock träfiberskiva samt parkettgolv. Den streckade linjen runt grundkonstruktionen i Figur 5 visar hela grundens area, inklusive 100 mm sockelisolering av cellglas och en 8 mm fibercement-

Examensarbete i byggt teknik: Hållbara klimatskärmar med hampa och cellglas– En fallstudie

skiva som monteras på utsidan av grundkonstruktionen. Endast cellglas, stål samt träfiberskiva inkluderas i LCA- och LCC-analysen. Dessa material redovisas i tabell 2. Grundkonstruktionens U-värde är 0,11 W/m²K.



Figur 4: Hällebols grundkonstruktion med prefabricerade cellglaselement.



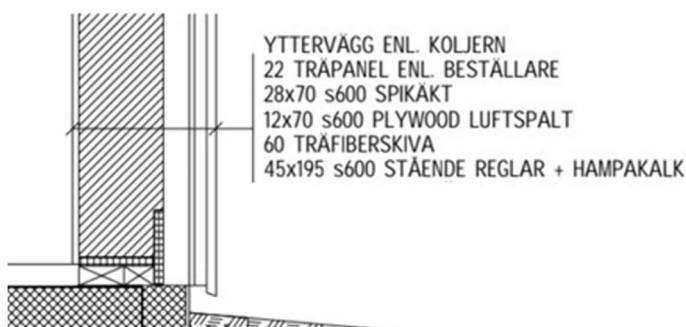
Figur 5: Hällebols grundkonstruktion sedd uppifrån.

Tabell 2: Ingående material i Hällebols grundkonstruktion.

Material	Tjocklek [mm]	Mängd [m ³]	λ [W/mK]	GWP (A1-A3) [kg CO ₂ e/kg]
Cellglas	290	31,4	0,036	1,23
Lättmetallbalkar	1,5	0,094	-	2,79
Träfiberskiva	36	3,9	0,042	1,47

4.1.2 Ytterväggar

Ytterväggarna i Hällebols klimatskärm är uppbyggda enligt Figur 6. Det innersta skiktet består av stående reglar med en tjocklek på 195 mm och ett avstånd på 600 mm. Mellanrummen mellan reglarna fylls med 195 mm hampakalk. På skiktet med reglar och hampakalk monteras en 60 mm tjock träfiberskiva. Utanpå träfiberskivan finns en luftspalt och spikläkt på vilka träpanel monteras. Ytterväggarna byggs utan beklädnad på insidan, men det är möjligt att i efterhand klä in dem med puts eller annat material. I LCA- och LCC-analysen exkluderas fasadmateri al. Materialen som inkluderas i analyserna redovisas i tabell 3. Ytterväggarnas U-värde är 0,24 W/m²K.



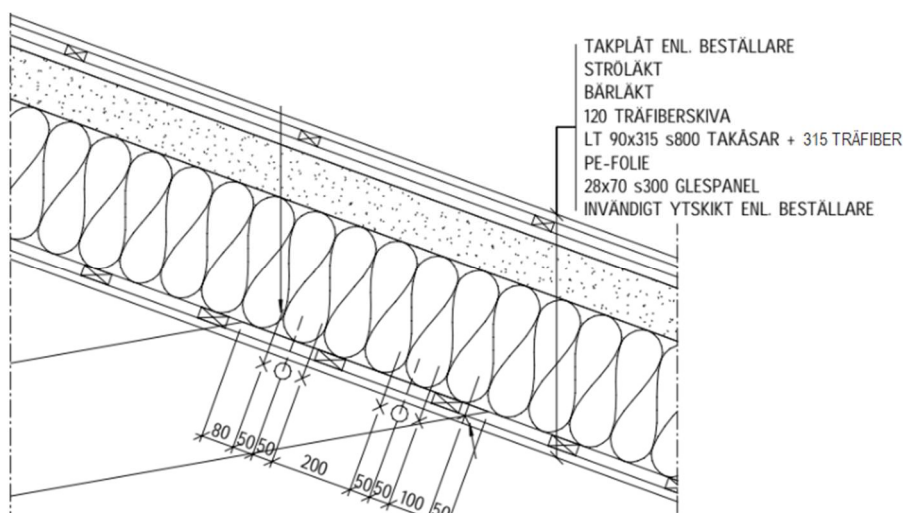
Figur 6: Hällebols ytterväggar med trästomme och hampakalk samt träfiberisolering.

Tabell 3: Ingående material i Hällebols ytterväggar.

Material	Tjocklek [mm]	Mängd [m ³]	λ [W/mK]	GWP (A1-A3) [kg CO ₂ e/kg]
Träreglar	195	5,4	0,14	0,06
Hampakalk	195	20,0	0,076	0,22
Träfiberskiva	60	7,2	0,04	0,55

4.1.3 Takkonstruktion

Takkonstruktionen i Hällebols klimatskärm är uppbyggd enligt Figur 7. Konstruktionen består av limträbalkar med ett avstånd på 600 mm. På insidan monteras en 20 mm tjock träskiva. Mellan limträbalkarna monteras en tunn träskiva följt av en fuktspärr och 315 mm hampafiberisolering. Därefter monteras en träfiberskiva med en tjocklek på 120 mm, följt av en luftspalt innan taket avslutas med en integrerad solcellstakbeläggning. I LCA- och LCC-analysen exkluderas solcellstaket och dessa har därför beräknats utan någon ytterligare takbeläggning. Materialen som inkluderas i analyserna redovisas i tabell 4. Takkonstruktionens U-värde är 0,10 W/m²K.



Figur 7: Hällebols takkonstruktion med hampafiberisolering och träfiberisolering.

Tabell 4: Ingående material i Hällebols takkonstruktion

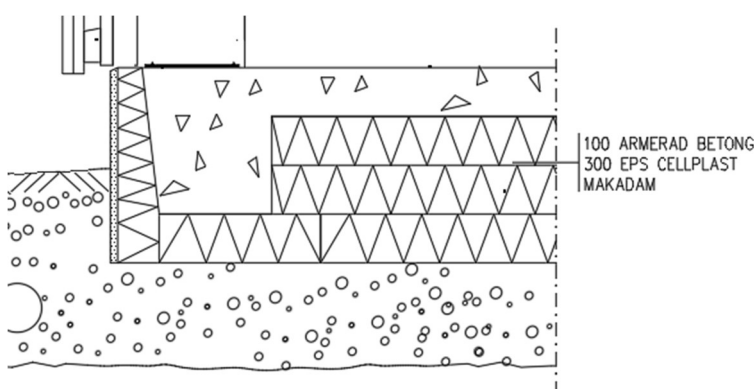
Material	Tjocklek [mm]	Mängd [m ³]	λ [W/mK]	GWP (A1-A3) [kg CO ₂ e/kg]
Limträbalkar	315	8,0	0,14	0,09
Hampafiberskiva	315	53,5	0,04	0,62
Träfiberskiva	120	23,5	0,04	0,55
Träskiva	20	3,9	0,14	0,06

4.2 Data - Konventionella konstruktioner

I följande avsnitt beskrivs konstruktionsdelarna i de två konventionella klimatskärmar som används som jämförelsebas. Dessa benämns Konventionell utformning 1 (KU1) och Konventionell utformning 2 (KU2).

4.2.1 Grundkonstruktion

Grundkonstruktionerna i de två konventionella utformningar, KU1 och KU2, är identiska och är uppbyggd enligt Figur 8. Grundkonstruktionerna är uppförda som *platta på mark*, där den nedre delen byggs enligt samma princip som Hällebols grundkonstruktion med användning av en geotextilduk och olika fraktioner av krossmaterial. Därefter placeras isolering av 300 mm cellplast ovanpå, följt av 100 mm armerad betong (300 mm vid sockeln). Dessutom isoleras sockelns kant med 100 mm cellplast. Beräkningarna har gjorts med 80 kg armeringsjärn per kubikmeter betong, vilket motsvarar cirka 8 kg armering per kvadratmeter. Materialen som inkluderas i analyserna redovisas i tabell 5. Uvärdet för KU1 och KU2s grundkonstruktion är detsamma som för Hällebols grundkonstruktion, vilket är 0,11 W/m²K.



Figur 8: KU1 och KU2s grundkonstruktion med betong och cellglas.

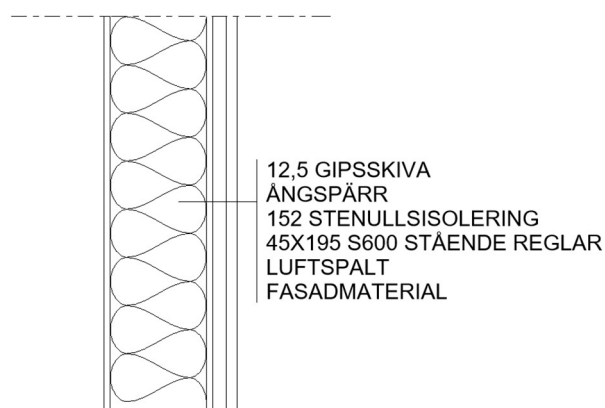
Tabell 5: Ingående material i KU1 och KU2s grundkonstruktion.

Material	Tjocklek [mm]	Mängd	λ [W/mK]	GWP (A1-A3) [kg CO ₂ e/kg]
Betong	100	15,1 m ³	1,5	0,10
EPS isolering	300	34,1 m ³	0,038	2,95
Armeringsjärn	-	871,8 kg	-	1,04

4.2.2 Ytterväggar

Ytterväggarna i KU1 är konstruerade enligt illustrationen i Figur 9. Dessa består av stående regler med en tjocklek på 195 mm och ett avstånd på 600 mm, vilket överensstämmer med Hällebols ytterväggar (enligt avsnitt 4.1.2). Utrymmet mellan reglarna fylls med 152 mm stenullsisolering. På insidan monteras en 12,5 mm tjock gipsskiva. På utsidan monteras fasadmateriäl, vilket dock inte ingår i LCA- och LCC-analysen. Stenullsisoleringens tjocklek grundar sig på U-värdet för Hällebols ytterväggar. I praktiken kan det antas att hela utrymmet hade isolerats, vilket skulle leda till en ökad materialförbrukning.

Materialen som inkluderas i LCA- och LCC-analysen redovisas i tabell 6. U-värdet för KU1s ytterväggar är detsamma som för Hällebols ytterväggar, vilket är 0,24 W/m²K.

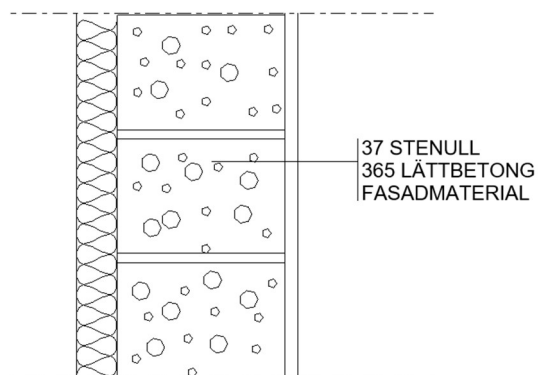


Figur 9: KU1s ytterväggskonstruktion med träreglar och stenullsisolering.

Tabell 6: Ingående material i KU1s ytterväggar.

Material	Tjocklek [mm]	Mängd [m ³]	λ [W/mK]	GWP (A1-A3) [kg CO ₂ e/kg]
Träreglar	195	5,4	0,14	0,06
Stenull	152	15,7	0,037	1,22
Gips	12,5	1,5	0,25	0,23
Ångspärr	0,2	0,024	-	2,16

Ytterväggarna i KU2 är konstruerade enligt illustrationen i Figur 10. De består av 365 mm tjocka lättbetongblock som isoleras med 37 mm stenull. På utsidan monteras fasadmateriell, vilket dock inte ingår i LCA- och LCC-analysen. Ytterväggarna är konstruerade utan beklädnad på insidan, på samma sätt som Hällebol. Konstruktionen är inspirerad av Isover (u.d.). Materialen som inkluderas i LCA- och LCC-analysen redovisas i tabell 7. U-värdet för KU2s ytterväggar är detsamma som för KU1s och Hällebols ytterväggar, vilket är 0,24 W/m²K.



Figur 10: KU2s ytterväggskonstruktion med lättbetong och stenullsisolering.

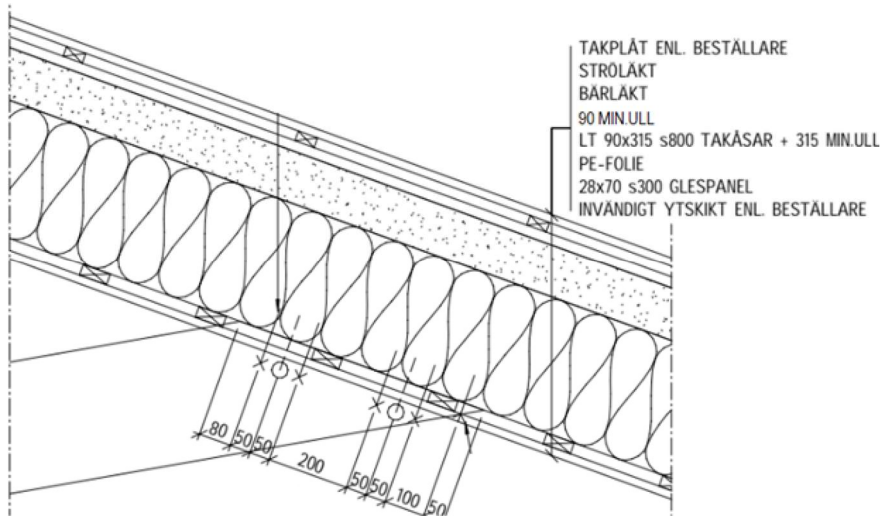
Tabell 7: Ingående material i KU1s ytterväggar.

Material	Tjocklek [mm]	Mängd [m ³]	λ [W/mK]	GWP (A1-A3) [kg CO ₂ e/kg]
Lättbetong	365	43,6	0,12	0,17
Stenull	37	4,4	0,037	1,22

4.2.3 Takkonstruktion

Takkonstruktionerna i de två konventionella utformningar, KU1 och KU2, är identiska med varandra och konstrueras enligt Figur 11, det vill säga på ett liknande sätt som Hällebols takkonstruktion (enligt avsnitt 4.1.3). Istället för isolering med hampa- och träfiber, isoleras takkonstruktionerna i KU1 och KU2 med stenull. Stenullsisoleringen har en tjocklek på 315 mm mellan balkarna och kompletteras med ytterligare 90 mm ovanpå. Materialen som inkluderas i LCA- och LCC-analysen redovisas i tabell 8. U-värdet för KU1 och KU2s takkonstruktion är detsamma som för Hällebols takkonstruktion, vilket är 0,10 W/m²K.

Examensarbete i byggt teknik: Hållbara klimatskärmar med hampa och cellglas– En fallstudie



Figur 11: KU1 och KU2s takkonstruktion med limträbalkar och stenullsisolering.

Tabell 8: Ingående material i KU1 och KU2s takkonstruktion.

Material	Tjocklek [mm]	Mängd [m ³]	λ [W/mK]	GWP (A1-A3) [kg CO ₂ e/kg]
Limträbalkar	315	8,0	0,14	0,09
Stenull	315+90	71,1	0,037	1,22
Träskiva	20	3,9	0,14	0,06

5 RESULTAT OCH ANALYS

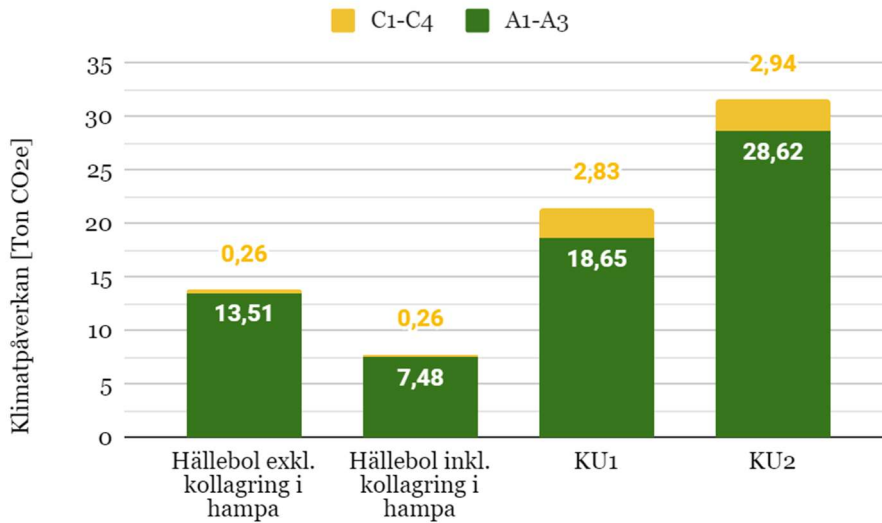
I detta kapitel presenteras och analyseras resultaten från arbetet utifrån tabeller och diagram. Först presenteras resultaten av livscykelanalysen (LCA) och därefter resultaten av livscykelkostnadsanalysen (LCC).

5.1 Resultat av LCA

Diagrammet i Figur 12 ger en övergripande översikt över klimatpåverkan, uttryckt i koldioxidekvivalenter, för produktskedet (A1-A3) och slutskedet (C1-C4). Produktskedet avser råvaruförsörjning, transport och tillverkning av byggmaterialen i de tre utformningarna, medan slutskedet avser demontering och rivning, transport, restproduktsbehandling och bortskaffning av byggmaterialen. I diagrammet visas även klimatpåverkanen för Hällebols klimatskärm när kollagringen i hampan (i hampakalk och hampafiber) inkluderas. Det bör noteras att enligt ISO-standarder bör kollagring exkluderas i LCA-analyser (Hoxha m.fl., 2020). Detta beror på att allt kol som lagras under A1-A3 faserna kommer att frigöras under C1-C4 faserna. Eftersom hampa är en snabbväxande planta (Ip & Miller, 2012) kan det ändå vara relevant att beakta kollagringen av hampa.

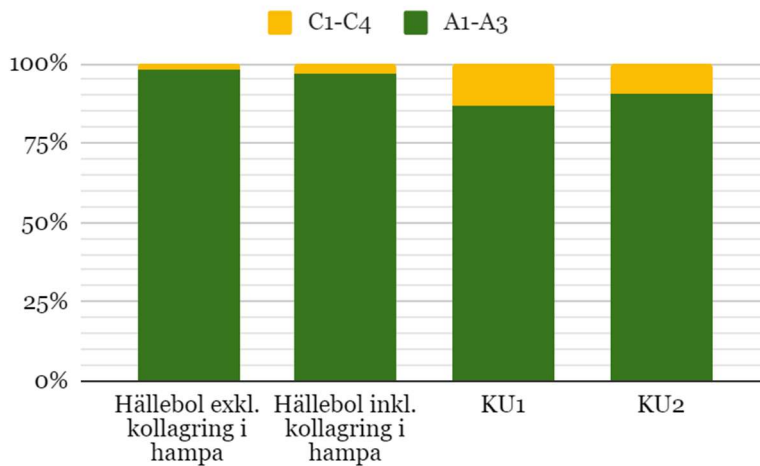
Som Figur 12 visar finns det en betydande skillnad i klimatpåverkan mellan de tre utformningarna. Denna skillnad gäller framför allt i produktskedet (A1-A3) men är också tydlig i slutskedet (C1-C4). Hällebols klimatskärm visar sig ha den lägsta klimatpåverkan i produktskedet, med en uppskattad klimatpåverkan på cirka 13,5 ton CO_{2e} exklusive kollagring av hampa och cirka 7,5 ton CO_{2e} inklusive kollagring. KU1 och KU2 resulterar i en klimatpåverkan i produktskedet på cirka 18,6 ton CO_{2e} respektive 28,6 ton CO_{2e}, vilket innebär att KU1 har 38 % större klimatpåverkan än Hällebol exklusive kollagring i hampan, medan KU2 har 112 % större klimatpåverkan än Hällebol exklusive kollagring i hampan. I slutskedet har Hällebol den minsta klimatpåverkan på 260 kg CO_{2e}, vilket är lägst bland de tre utformningarna. KU1 och KU2 har en klimatpåverkan på 2,83 ton CO_{2e} respektive 2,94 ton CO_{2e} i slutskedet.

Sammantaget leder KU1 till cirka 56 % större klimatpåverkan än Hällebol exklusive kollagring i hampan, och cirka 177 % större klimatpåverkan än Hällebol inklusive kollagring. KU2 leder till cirka 129 % större total klimatpåverkan än Hällebol exklusive kollagring i hampan, och cirka 307 % större total klimatpåverkan än Hällebol inklusive kollagring.



Figur 12: Klimatpåverkan i produktskede (A1-A3) och slutskede (C1-C4) för Hällebol, inklusive och exklusive kollagring, samt KU1 och KU2.

I Figur 13 visas de procentuella bidragen av koldioxidekvivalenter från produktskedet (A1-A3) och slutskedet (C1-C4). Det framgår att slutskedet endast bidrar med en liten andel, 1,9 %, av Hällebols totala klimatpåverkan, medan slutskedet bidrar med 13,2 % av KU1s totala klimatpåverkan och 9,3 % av KU2s totala klimatpåverkan.



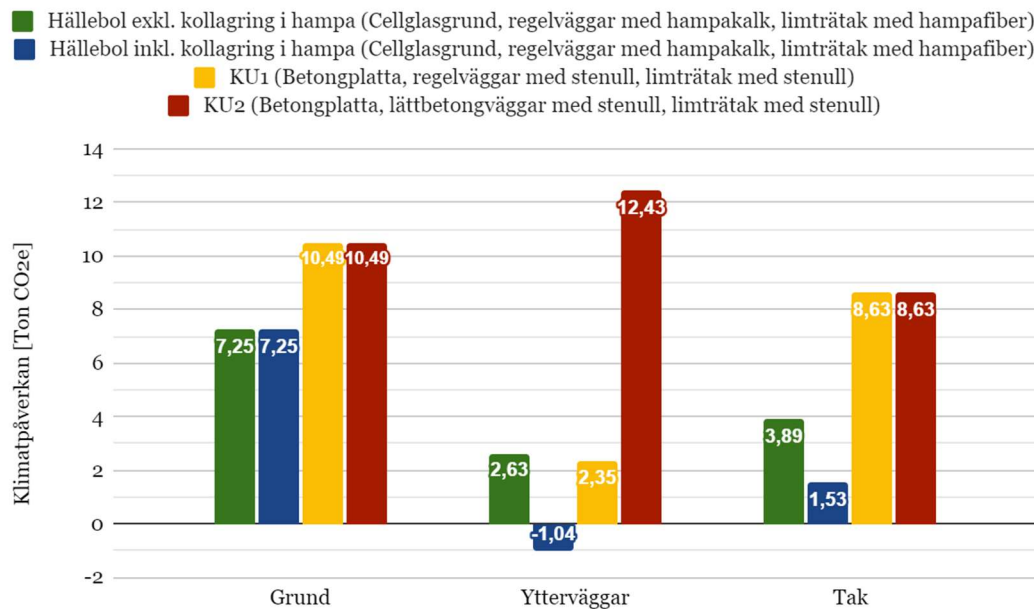
Figur 13: Procentuell fördelning av klimatpåverkan i produktskede (A1-A3) och slutskede (C1-C4) för Hällebol, inklusive och exklusive kollagring, samt KU1 och KU2.

Diagrammet i Figur 14 presenterar fördelningen av klimatpåverkan i både produktskedet och slutskedet för de respektive konstruktionerna i varje utformning. Som det framgår av

figuren leder Hällebols grund med cellglas och stål till en betydligt mindre klimatpåverkan än en konventionell grund med betong och cellplast, som finns i utformningarna KU1 och KU2. Hällebols grund med cellglas och stål resulterar i en klimatpåverkan på cirka 7,3 ton CO₂e, medan en betonggrund med liknande isoleringsförmåga resulterar i en klimatpåverkan på cirka 10,5 ton CO₂e. Det innebär att cellglassgrundens klimatpåverkan är 31 % mindre än betonggrundens klimatpåverkan. Eftersom grunden i Hällebol inte innehåller hampamaterial finns det ingen skillnad i klimatpåverkan om kollagring i hampa inkluderas eller inte.

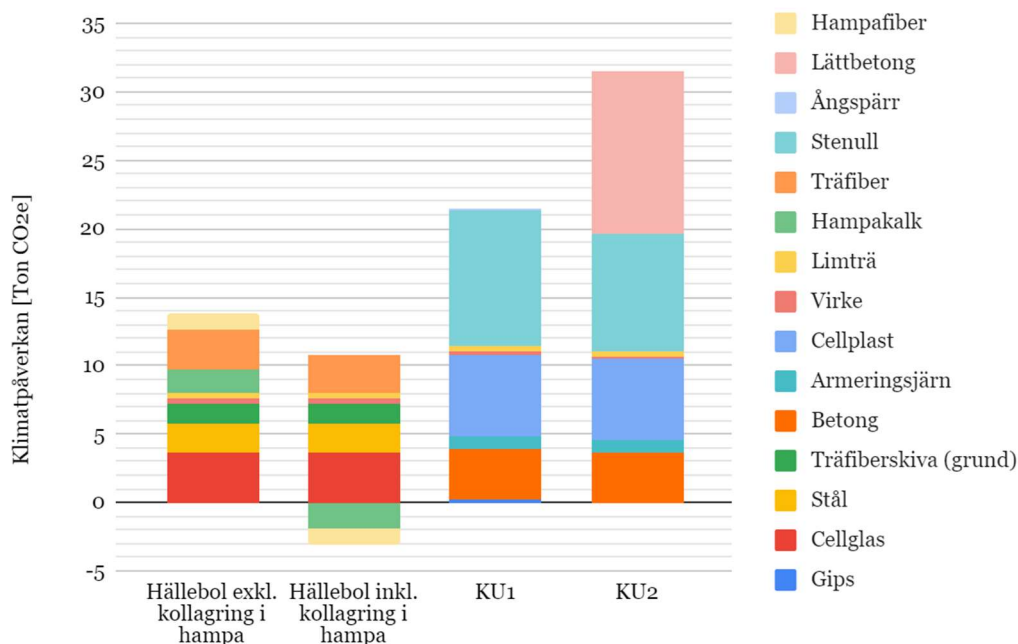
Figur 14 visar en betydande skillnad mellan de tre utformningarnas konstruktionsdelar. Ytterväggarna i KU2, som består av lättbetong och stenull, resulterar i den högsta klimatpåverkan av de tre ytterväggskonstruktionerna. Dess klimatpåverkan uppgår till cirka 11,9 ton CO₂e. Ytterväggarna i KU1 med trästomme och stenull leder till en klimatpåverkan på cirka 2,4 ton CO₂e. Vid en exkludering av kollagringen i hampa, i enlighet med ISO-standarderna, resulterar Hällebols ytterväggar, med trästomme och hampakalk, i en klimatpåverkan på cirka 2,6 ton CO₂e. Inkluderas däremot hampans kollagring blir deras klimatpåverkan cirka -1,0 ton CO₂e. Detta innebär att ytterväggarna blir koldioxidnegativa, det vill säga att de binder mer koldioxid än de släpper ut under sin livscykel.

En jämförelse av takkonstruktionerna mellan de tre utformningarna visar betydande skillnader i klimatpåverkan. Takkonstruktionerna i KU1 och KU2, som inkluderar stenullsisolering, resulterar i en klimatpåverkan som är cirka 122 % större än Hällebols takkonstruktion med hampa- och träfiberisolering. Klimatpåverkan för KU1 och KU2 uppgår till cirka 8,6 ton CO₂e, medan Hällebols takkonstruktion leder till en klimatpåverkan på cirka 3,9 ton CO₂e om kollagring exkluderas. Om kollagringen i hampafibern å andra sidan inkluderas resulterar Hällebols takkonstruktion i en klimatpåverkan på cirka 1,5 ton CO₂e.



Figur 14: Klimatpåverkan i produktskede och slutskede fördelad på konstruktionsdelar.

I Figur 15 visas samtliga ingående materialens individuella bidrag till den totala klimatpåverkan för varje utformning. För KU1 är det framför allt stenullsisoleringen i ytterväggar och tak, samt cellplast och betong, som påverkar klimatskärmens totala klimatpåverkan. För KU2 bidrar utöver stenullsisolering, betong och cellplast även lättbetongen i ytterväggarna med en betydande klimatpåverkan. För Hällebol utgör cellglaset i grundkonstruktionen en betydande del av klimatpåverkan. Vid inkludering av kollagring i hampa kan det observeras att hampakalk och hampafiber ger upphov till en negativ klimatpåverkan, vilket leder till en mindre total klimatpåverkan för Hällebol.



Figur 15: Klimatpåverkan i produktskede och slutskede fördelad på ingående material.

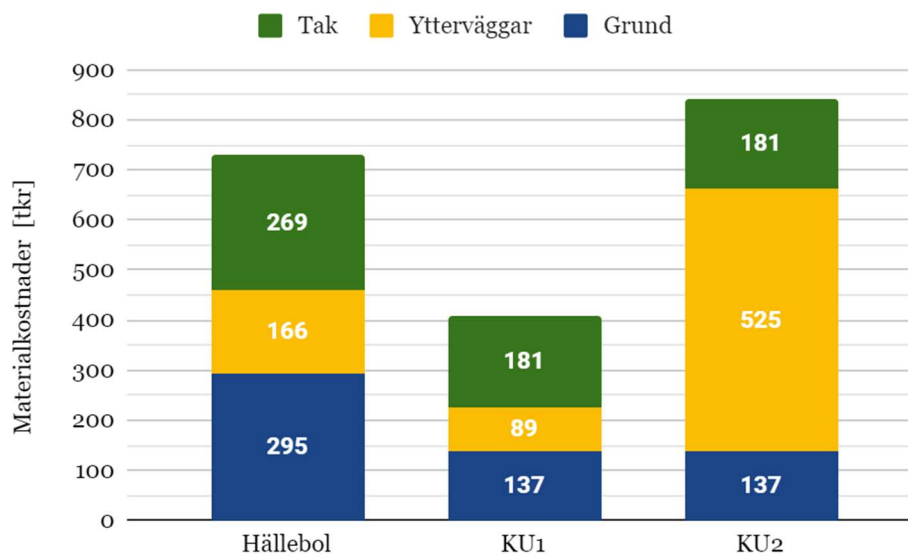
5.2 Resultat av LCC

I diagrammet i Figur 16 presenteras en översikt av resultaten från LCC-analysen. LCC-analysen är baserad på allmänna materialpriser. Det bör noteras att kostnaderna för att färdigställa prefabricerade byggdelar och genomföra byggarbete på plats inte är inkluderat i denna analys.

Materialkostnaderna för Hällebols klimatskärm uppgår till totalt 729 000 kr. Av dessa kostnader utgör 40 % kostnaden för cellglasgrunden, 23 % utgör kostnader för ytterväggarna med hampakalk, och 37 % utgör kostnader för takkonstruktionen med hampa- och träfiberisolering.

KU1 uppvisar den lägsta nivån av materialkostnader jämfört med de andra två klimatskärmarna. Materialkostnaderna för KU1 uppgår till totalt 408 000 kr, varav 34 % utgör kostnader för betongplattan med cellplastisolering, 22 % utgör kostnader för ytterväggarna med träreglar och stenullsisolering, och 44 % utgör kostnader för takkonstruktionen med limträbalkar och stenullsisolering.

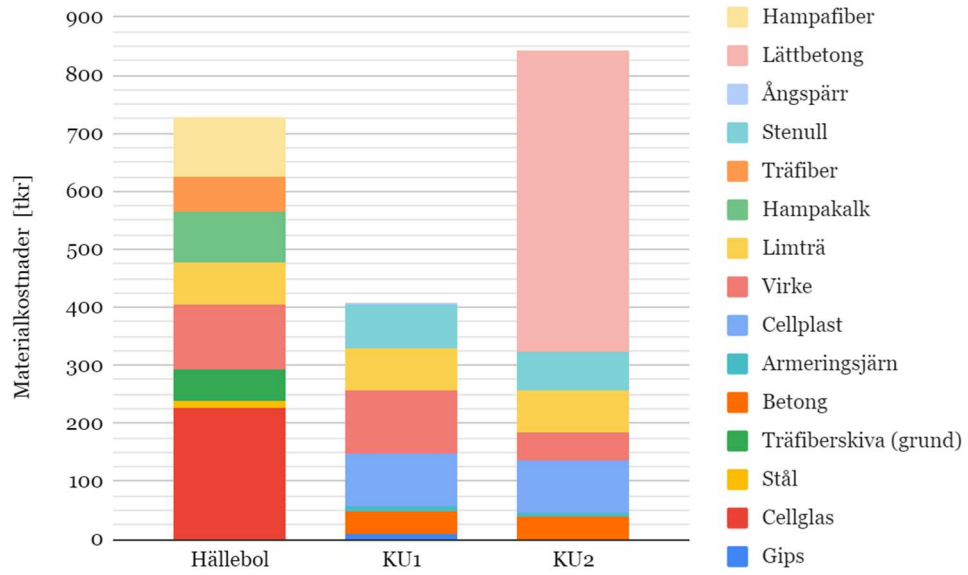
KU2 har de högsta materialkostnaderna, totalt 843 000 kr, där ytterväggarna utgör cirka 62 % av de totala materialkostnaderna, medan betonggrunden och takkonstruktionen bidrar med de återstående 38 % av materialkostnaderna. Grundkonstruktionerna och takkonstruktionen i KU1 och KU2 är identiska och har därför samma kostnader.



Figur 16: Samlade materialkostnader för respektive klimatskärm.

I Figur 17 visas kostnaderna för samtliga ingående material i respektive utformning. För Hällebol utgör materialkostnaderna för cellglas i grundkonstruktionen den största enskilda kostnaden, motsvarande cirka 226 000 kr. I KU1 utgör materialkostnaderna för cellplasten i grundkonstruktionen samt virket till trästommen den största andelen av klimatskärmens totala kostnader. För KU2 är det materialkostnaderna för lättbetongen som bidrar till den största andelen av de totala kostnaderna för klimatskärm.

Examensarbete i byggt teknik: Hållbara klimatskärmar med hampa och cellglas– En fallstudie



Figur 17: Materialkostnader för respektive klimatskärm.

6 DISKUSSION

I detta kapitel diskuteras resultaten av livscykelanalysen (LCA) och livscykelkostnadsanalysen (LCC) i relation till den genomförda litteraturstudien. Diskussionen inleds med arbetets huvudresultat efterföljt av en djupare diskussion av livscykelanalysen och livscykelkostnadsanalysen. Slutligen görs en avvägning av de två analyserna.

6.1 Huvudresultat

Syftet med denna studie var att undersöka hur klimatpåverkan och kostnader skiljer sig mellan en klimatskärm med hampaisolering och cellglas jämfört med en klimatskärm med konventionella byggmaterial. Litteraturstudien tillsammans med LCA-analysen visar en betydande skillnad i klimatpåverkan beroende på vilka byggmaterial som används i en byggnads klimatskärm. Hällebols klimatskärm med hampaisolering och cellglas leder till en samlad klimatpåverkan i produktskede (A1-A3) och slutskede (C1-C4) på cirka 13,8 ton CO₂e, medan de två konventionella klimatskärmar leder till en klimatpåverkan på cirka 21,5 ton respektive cirka 31,5 ton CO₂e. Studien visar således att en klimatskärm med hampaisolering och cellglas kan vara fördelaktig ur ett klimatperspektiv. Dessutom visar studien att om hampans kollagring inkluderas i beräkningen minimeras resultatet av klimatskärmens klimatpåverkan ytterligare. Hällebols klimatskärmens klimatpåverkan är inklusive kollagring cirka 7,5 ton CO₂e. Resultatet av LCC-analysen visar att det också finns en betydande skillnad i materialkostnader beroende på vilka byggmaterial som används i en byggnads klimatskärm. Hällebols samlade materialkostnader uppgår till cirka 729 000 kronor, medan materialkostnaderna för de två konventionella klimatskärmar uppgår till cirka 408 000 kronor respektive 843 000 kronor. Det finns således både billigare och dyrare konventionella alternativ jämfört med en klimatskärm med hampaisolering och cellglas.

6.2 Livscykelanalys (LCA)

Resultaten visar en betydande skillnad mellan de två grundkonstruktionerna där en cellglassgrund medför en 31 % lägre klimatpåverkan jämfört med en konventionell betonggrund. Skillnaden är något mindre än de tidigare forskningsresultaten som har rapporterat minskningar på 50-70 % i klimatpåverkan vid användning av cellglassgrund. Denna avvikelse kan delvis förklaras genom skillnaderna i jämförelsemetodik och val av material. Dessutom bidrar också användningen av en träfiberskiva ovanpå cellglassgrunden i denna specifika studie till en ökad klimatpåverkan. Enligt resultaten är cellglas det material som bidrar med den största andelen koldioxidekvivalenter i Hällebols klimatskärm. Detta kan

bero på den höga energiförbrukningen och de höga temperaturer som krävs för att producera cellglas, enligt Gellert (2010). En annan faktor är att det krävs en relativt stor mängd cellglas i grundkonstruktionen. Stål har en hög global uppvärmningspotential, men utgör en mindre andel av klimatskärmens klimatpåverkan eftersom mängden stål är betydligt mindre än mängden cellglas. Enligt beräkningarna kan det således ur ett klimatperspektiv vara fördelaktigt att minimera mängden stål i cellglasgrunden så mycket det är möjligt, utan att kompromissa med grundens övriga egenskaper. Den högre klimatpåverkan hos den konventionella betonggrunden kan bero på användningen av armeringsjärn och portlandcement i betongen, vilket enligt den genomförda litteraturstudien bidrar till en betydande klimatpåverkan (Flower & Sanjayan, 2007). Sammantaget visar resultaten att det ur ett klimatperspektiv är fördelaktigt att välja en cellglasgrund istället för en konventionell betongplatta.

Enligt resultaten finns en betydande skillnad i klimatpåverkan för ytterväggarna i de tre olika klimatskärmarna. Det är dock väsentligt om kollagring i hampa inkluderas i beräkningen eller inte. Den studerade ytterväggskonstruktion med trästomme och hampakalk, i Hällebol, leder till en samlad klimatpåverkan som är cirka 12 % större än KU1s ytterväggskonstruktion med trästomme och stenullsisolering, och cirka 79 % mindre än KU2s ytterväggskonstruktionen med lättbetong och stenull, när kollagring i hampan exkluderas. I lättbetongväggen är det framför allt lättbetongen som leder till en hög klimatpåverkan. Lättbetong bör således undvikas ur ett klimatperspektiv.

Resultaten visar att ytterväggar med hampakalk inte är ett bättre alternativ ur ett klimatperspektiv än konventionella ytterväggar om kollagring i hampan exkluderas i beräkningen, vilket är normen enligt ISO-standarderna. Enligt ISO-standarderna bör inte kollagring inkluderas i LCA-analyser eftersom den lagrade koldioxiden frigörs till atmosfären om materialen bränns efter användning. Aspekter som livslängd och vad som görs med materialen efter användning är därför särskilt viktiga för kollagrande byggmaterial. Tidigare forskning har dock visat att påverkan från hampans kollagring har stor effekt och att hampa är en snabbväxande planta (Ip & Miller, 2012; Manian m.fl., 2021). LCA-analyser visar att klimatpåverkan för Hällebols ytterväggar med hampakalk är negativ om kollagringen i hampan inkluderas i beräkningen (se Figur 14). Detta gäller även om endast kollagringen i hampan, och inte karbonatisering av kalken i bindemedlet, inkluderades i beräkningen. Om kollagringen genom karbonatisering av kalken också inkluderas skulle klimatpåverkan minska ytterligare. Resultaten visar att hampans kollagring isolerat sett är större än klimatpåverkan relaterad till kalken i bindemedlet. Detta stämmer överens med tidigare forskning av Ip och Miller (2012), som i sin studie visade att nettoklimatpåverkan av en vägg med hampakalk var koldioxidnegativ, samt Essaghouri m.fl. (2023) som visade att en yttervägg med hampakalk var det bästa alternativet, ur ett klimatperspektiv, jämfört med två konventionella ytterväggskonstruktioner. Den negativa

nettoklimatpåverkan innebär således att hampakalkväggen i denna fallstudie visar samma tendens som tidigare forskning, den har en gynnsam inverkan på klimatet. Eftersom hampa är en snabbväxande planta och att den därmed binder stora mängder koldioxid på relativt kort tid, kan det vara väsentligt att beakta den koldioxidnegativa effekten, som kollagringen har, när byggmaterial väljs till en klimatskärm.

En takkonstruktion med hampafiberisolering är enligt resultatet ett bättre alternativ än en konventionell takkonstruktion med stenullsisolering ur ett klimatperspektiv. Hällebols takkonstruktion leder till en samlad klimatpåverkan som är cirka 55 % mindre än den konventionella takkonstruktionen i KU1 och KU2, när hampans kollagring exkluderas. Detta kan bero på en energikrävande tillverkningsprocess samt klimatpåverkan från bindemedel och tillsatser (Füchsl m.fl., 2022; Lopez Hurtado m.fl., 2016). Även i detta resultat är hampans kollagring exkluderat. Om kollagring inkluderas reduceras Hällebols takkonstruktions klimatpåverkanen cirka 82 % mindre än den konventionella takkonstruktionen i KU1 och KU2. Takkonstruktionen med hampa är, i motsättning till ytterväggarna med hampa, inte koldioxidnegativ. Detta beror på takkonstruktionens övriga ingående material. Förutom den koldioxidnegativa hampafiberisolering innehåller den också en träfiberskiva på 120 mm som bidrar till den samlade klimatpåverkan. Oavsett om kollagring inkluderas eller inte kan en takkonstruktion med hampaisolering vara ett bättre alternativ än en takkonstruktion med konventionell isolering ur ett klimatperspektiv.

Resultaten av LCA-analysen visar således att en klimatskärm med cellglas och hampaisolering, ur ett klimatperspektiv, är ett bättre alternativ än de två studerade konventionella klimatskärmarerna. Hampaisolering visar sig särskilt effektivt om kollagring beaktas. Resultaten visar också att hampaisolering har mindre klimatpåverkan än cellglas. Det är dock viktigt att beakta användningsområden för respektive material. Även om hampaisolering, enligt resultaten, leder till mindre klimatpåverkan än cellglas, har cellglas egenskaper såsom hög tryckhållfasthet och ingen vattenabsorption (Gellert, 2010), vilka är viktiga egenskaper för en grund. Cellglasgrunden bör således jämföras med traditionella betonggrunder och inte med hampa.

6.3 Livskostnadsanalys (LCC)

Resultaten av den utförda LCC-analysen visar att det finns betydande skillnader i materialkostnaderna mellan de tre utformningarna som analyserats i fallstudien, och att vissa material bör undvikas ur ett kostnadsperspektiv. Hällebols klimatskärm med hampaisolering och cellglas leder till cirka 79 % högre materialkostnader än en konventionell klimatskärm med betongplatta, trästomme och stenullsisolering, som i KU1, men cirka 14 % lägre materialkostnader jämfört med en konventionell klimatskärm med betongplatta,

lättbetongväggar och stenullsisolering, som i KU2. Enligt analysen uppskattas materialkostnaderna för Hällebols grundkonstruktion vara ungefär dubbelt så höga som materialkostnaderna för en konventionell betongplatta. Det är framför allt cellglas som bidrar till den höga kostnaden för Hällebols grundkonstruktion. Ett lägre marknadspris för cellglas skulle sänka de totala materialkostnaderna i Hällebols klimatskärm. Det bör dessutom noteras att det endast är materialkostnaderna som har beaktats i analysen. Kostnaderna till byggprocess på plats och prefabrikation kan leda till andra resultat.

Hällebols ytterväggar med trästomme och hampakalk medför, enligt resultaten, materialkostnader som är 85 % högre än KU1s ytterväggar med trästomme och stenullsisolering, men 68 % lägre än KU2s ytterväggar med lättbetong. Särskilt lättbetongen i ytterväggarna bidrar till höga materialkostnader. Det bör dock noteras att bärförmågan hos lättbetongkonstruktionen inte jämfördes med de två alternativen med trästomme. Det är möjligt att tjockleken på lättbetongskiktet kan minskas och ändå uppnå samma bärförmåga, vilket skulle minska både klimatpåverkan och materialkostnader. Skillnaden mellan ytterväggarna med hampakalk respektive stenullsisoleringen kan till största delen förklaras av de låga materialpriser på stenull. En möjlig orsak kan vara att konventionella byggmaterial är väletablerade och det finns ett stort utbud av tillverkare på marknaden. Ökad konkurrens kan vara en faktor som bidrar till att marknadspriserna på dessa byggmaterial är lägre, vilket på sikt även skulle kunna sänka priset på hampakalk om materialets användning blir utbredd.

Hällebols takkonstruktion med limträbalkar och hampa- samt träfiberisolering medför materialkostnader som är 49 % högre än en liknande takkonstruktion med stenullsisolering. Även här kan skillnaden förklaras med de låga materialpriser på stenullsisoleringen.

Resultaten av LCC-analysen visar således att en klimatskärm med cellglas och hampaisolering både kan vara ett billigare och ett dyrare alternativ än de två studerade konventionella klimatskärmar, beroende på vilken som det jämförs med. Kostnaderna för hållbara material kan vara högre än konventionella material i dagsläget, men de kan minska över tid genom innovation och förbättringar i produktionsprocesser. Det kan därför vara värt att överväga den långsiktiga potentialen för kostnadsreduktion och skalbarhet hos hållbara alternativ. Det bör noteras att LCC-analysen endast har inkluderat materialkostnader baserat på marknadspriser och att de samlade kostnaderna därför kan skilja sig.

6.4 Avvägning av LCA och LCC

En avvägning och prioritering av klimatpåverkan och kostnader är nödvändig i varje individuellt projekt. En klimatskärm som använder hampaisolering och cellglas, såsom

Hällebols, är överlägsen konventionella klimatskärmar som KU1 och KU2 ur ett klimatperspektiv, men dess materialkostnader kan vara både lägre och högre än dessa. Vid ekonomiska begränsningar kan det övervägas att inkludera de material som är mest effektiva ur både klimat- och kostnadsperspektiv. En möjlighet att optimera KU1 är att ersätta stenullsisolering med hampaisolering, då detta ger betydande klimatmässiga fördelar i förhållande till materialkostnaden. Om låg klimatpåverkan är den högsta prioriteringen bör istället en klimatskärm med både hampaisolering och cellglasgrund väljas. KU2 har både den största klimatpåverkan och de högsta materialkostnaderna och bör varken väljas ur ett klimat- eller kostnadsperspektiv utifrån denna studie. Sammanfattningsvis visar denna studie att konventionella byggmaterial i vissa fall kan utgöra ett mer kostnadseffektivt alternativ vid konstruktion av klimatskärmar i jämförelse med byggmaterial baserade på hampa och cellglas. Emellertid bör den betydande klimatmässiga fördelen med att välja hampa och cellglas som byggmaterial beaktas, och vid materialvalet bör det övervägas vilka aspekter som är mest prioriterade i den individuella kontexten.

7 SLUTSATSER

I detta kapitel sammanställs studiens slutsatser. Dessutom beskrivs studiens begränsningar och förslag till fortsatt forskning inom området.

Sammanfattningsvis visar denna kombinerade fall- och litteraturstudie, att en klimatskärm med hampaisolering och cellglas är bättre än en konventionell klimatskärm ur ett klimatperspektiv men att den kan vara ett dyrare alternativ. Studiens livscykelanalys visar att en cellglasgrund minskar klimatpåverkan med 31 % jämfört med en konventionell betonggrund. Vidare visar studien att den studerade ytterväggskonstruktion med trästomme och hampakalk leder till en samlad klimatpåverkan som är 12 % större än en ytterväggskonstruktion med trästomme och stenullsisolering, och 79 % mindre än en ytterväggskonstruktion med lättbetong och stenull. Studien identifierade även att hampas kollagring kan spela en betydande roll i den totala klimatpåverkan. Om kollagring inkluderas är ytterväggskonstruktionen med hampakalk koldioxidnegativ. Det studerade taket med hampafiberisolering minskar klimatpåverkan med 55 % respektive 82 %, om hampans kollagring exkluderas respektive inkluderas, jämfört med om taket hade isolerats med stenull. Slutligen visar studiens livscykelkostnadsanalys att en klimatskärm tillverkad av byggmaterial med hampaisolering och cellglas leder till 79 % högre respektive 14 % lägre materialkostnader jämfört med klimatskärmar med betongplatta, trästomme och stenullsisolering respektive betongplatta, lättbetongväggar och stenullsisolering.

7.1 Begränsningar

Fallstudien är baserad på konventionella konstruktioner och U-värdeberäkningar för att göra klimatskärmar jämförbara, vilket innebär att de verkliga klimatpåverkningar och kostnader kan skilja sig från resultaten i denna studie. Egenskaper såsom livslängd, möjlighet till återbruk, materialspill, bärförmåga, beständighet, fukttransport, brandskydd, estetik, anpassningsbarhet och inomhusmiljö har endast delvis beaktats i denna studie. För att kunna göra mer precisa jämförelser och bedöma klimatpåverkan och kostnader på ett mer heltäckande sätt bör dessa egenskaper tas i beaktande. Genom att inkludera dessa faktorer kan en mer omfattande och exakt analys utföras av olika klimatskärmar och deras påverkan på klimatet och kostnaderna. U-värdeberäkningarna av konstruktionerna är dessutom beräknade som ett U-värde för varje konstruktion, men eftersom alla konstruktioner inte är homogent uppbyggda, kan värmegenomgången variera i konstruktionerna.

Endast materialkostnader baserade på marknadspriser i programvaran OneClickLCAs materialdatabas har inkluderats i LCC-analysen. Det bör noteras att priserna kan variera över tid och att det även är viktigt att beakta kostnaderna för prefabricering och/eller

byggprocess på plats samt att ta hänsyn till livslängd, underhåll, spillmaterial från byggarbetsplatsen, byggtid och risker relaterade till väderförhållanden för att erhålla en mer heltäckande jämförelse av klimatskärmens totala kostnader. Det är möjligt att ett material med högre initialt marknadspris kan vara mer kostnadseffektivt när dessa faktorer beaktas.

7.2 Förslag på fortsatt forskning

- Inkludera materialens förväntade livslängd. Utforska hur olika byggmaterial förändras och nedbryts över tid. Utvärdera hur dessa förändringar påverkar deras värmeisolerande egenskaper och därmed deras klimatpåverkan och vilken betydelse det har för materialets livstid.
- Inkludera egenskaper såsom möjlighet till återbruk, materialspill, bärformåga, beständighet, fukttransport, brandskydd, estetik, anpassningsbarhet och inomhusmiljö för att kunna jämföra olika utformningar mer detaljerat.
- Flera studier som inkluderades i detta arbete betonar permeabiliteten hos hampakalk. Denna aspekt inkluderades inte i denna studie, men det kan vara relevant att undersöka närmare. Genom att utforska permeabiliteten hos hampakalk och dess påverkan på byggnadens prestanda och inomhusmiljö kan man få en bättre förståelse för dess användbarhet och andra användningsområden inom byggindustrin.
- Utvärdera tillgängliga gröna energiteknologier, såsom solenergi, biomassa, geotermisk energi eller avancerade värmepumpsystem, som kan användas vid högtemperatur-tilverkning av material som till exempel smältning av metall, keramik eller glasproduktion.
- Undersöka olika tekniker och metoder för att lagra koldioxid. Utvärdera hur olika byggmaterial kan fungera som kollagringsenheter genom att absorbera och lagra koldioxid under sin livscykel.
- Undersöka växttiden för olika biomaterial och deras förmåga att binda koldioxid under tillväxtfasen. Genom att jämföra olika materialens växttid kan man bedöma deras potential att fungera som koldioxidlagringsalternativ.

8 REFERENSER

- Anderzon, A., & Wilhelmsson, Å. (2021). *Byggmaterialens klimatpåverkan och framtida förbättringar av flerfamiljshus i byggskedet*. <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-447793>
- Bengt Strandberg & Fredrik Lavén. (2021). *Bygga hus: Illustrerad bygglära* (4:e uppl.). Studentlitteratur.
- Bhaskar, A., Abhishek, R., Assadi, M., & Somehesaraei, H. N. (2022). Decarbonizing primary steel production: Techno-economic assessment of a hydrogen based green steel production plant in Norway. *Journal of Cleaner Production*, 350, 131339. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131339>
- Bošković, I., & Radivojević, A. (2023). Life cycle greenhouse gas emissions of hemp-lime concrete wall constructions in Serbia: The impact of carbon sequestration, transport, waste production and end of life biogenic carbon emission. *Journal of Building Engineering*, 66, 105908. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.105908>
- Boverket. (2019, februari 20). *Introduktion till livscykelanalys (LCA)*. Boverket. <https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/livscykelanalys/introduktion-till-livscykelanalys-lca/>
- Carl-Eric Hagentoft. (2017). *Byggnadsfysik: Så fungerar hus* (Upplaga 1). Studentlitteratur.
- Chau, C. K., Leung, T. M., & Ng, W. Y. (2015). A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings. *Applied Energy*, 143, 395–413. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.023>
- Curran, M. A. (2015). *Life Cycle Assessment Student Handbook*. John Wiley & Sons, Incorporated. <http://ebookcentral.proquest.com/lib/uu/detail.action?docID=4911663>
- Daehn, K. E., Cabrera Serrenho, A., & Allwood, J. M. (2017). How Will Copper Contamination Constrain Future Global Steel Recycling? *Environmental Science & Technology*, 51(11), 6599–6606. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00997>
- Decorte, T. (2011). Fibre hemp and marihuana: Assessing the differences between distinct varieties. *Working Paper Series on Policing*, 38, 1–16.

- Dwaikat, L. N., & Ali, K. N. (2018). Green buildings life cycle cost analysis and life cycle budget development: Practical applications. *Journal of Building Engineering*, *18*, 303–311. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.03.015>
- Essaghouri, L., Mao, R., & Li, X. (2023). Environmental benefits of using hempcrete walls in residential construction: An LCA-based comparative case study in Morocco. *Environmental Impact Assessment Review*, *100*, 107085. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107085>
- European Union. (u.å.). *Consequences of climate change*. European Union. Hämtad 28 april 2023, från https://climate.ec.europa.eu/climate-change/consequences-climate-change_en
- Florentin, Y., Pearlmutter, D., Givoni, B., & Gal, E. (2017). A life-cycle energy and carbon analysis of hemp-lime bio-composite building materials. *Energy and Buildings*, *156*, 293–305. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.097>
- Flower, D. J. M., & Sanjayan, J. G. (2007). Green house gas emissions due to concrete manufacture. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *12*(5), 282–288. <https://doi.org/10.1065/lca2007.05.327>
- Füchsl, S., Rheude, F., & Röder, H. (2022). Life cycle assessment (LCA) of thermal insulation materials: A critical review. *Cleaner Materials*, *5*, 100119. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100119>
- Gellert, R. (2010). 8—Inorganic mineral materials for insulation in buildings **This chapter is dedicated to Dr Walter F. Cammerer on the occasion of his 90th birthday. I M. R. Hall (Red.), *Materials for Energy Efficiency and Thermal Comfort in Buildings* (s. 193–228). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845699277.2.193>
- Holappa, L. (2020). A General Vision for Reduction of Energy Consumption and CO2 Emissions from the Steel Industry. *Metals*, *10*(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/met10091117>
- Hoxha, E., Passer, A., Saade, M. R. M., Trigaux, D., Shuttleworth, A., Pittau, F., Allacker, K., & Habert, G. (2020). Biogenic carbon in buildings: A critical overview of LCA methods. *Buildings and Cities*, *1*(1), 504–524. <https://doi.org/10.5334/bc.46>

- IEA. (2019). *Global Status Report for Buildings and Construction 2019*. <https://www.iea.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2019>
- Ip, K., & Miller, A. (2012). Life cycle greenhouse gas emissions of hemp–lime wall constructions in the UK. *Resources, Conservation and Recycling*, 69, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.09.001>
- Jin, R., Gao, S., Cheshmehzangi, A., & Aboagye-Nimo, E. (2018). A holistic review of off-site construction literature published between 2008 and 2018. *Journal of Cleaner Production*, 202, 1202–1219. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.195>
- Johansson, E. (2021). *Cheaper but better: An investigation of the interrelation between building costs, life cycle costs, energy use, climate footprint and architectural qualities, of a small rental villa in Sweden*. <https://hdl.handle.net/20.500.12380/303601>
- Klöpffer, W. (Red.). (2014). *Background and Future Prospects in Life Cycle Assessment*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-8697-3>
- Lee, S., Park, W., & Lee, H. (2013). Life cycle CO2 assessment method for concrete using CO2 balance and suggestion to decrease LCCO2 of concrete in South-Korean apartment. *Energy and Buildings*, 58, 93–102. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.034>
- Li, C. Z., Lai, X., Xiao, B., Tam, V. W. Y., Guo, S., & Zhao, Y. (2020). A holistic review on life cycle energy of buildings: An analysis from 2009 to 2019. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110372. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110372>
- Lopez Hurtado, P., Rouilly, A., Vandenbossche, V., & Raynaud, C. (2016). A review on the properties of cellulose fibre insulation. *Building and Environment*, 96, 170–177. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.09.031>
- Lunds universitet. (2020). Vad är hållbarhet?. [<https://www.hallbarhet.lu.se/forskning/vad-ar-hallbar-het#:~:text=Det%20ena%20perspektivet%20var%20att,av%20de%20andra%20tv%C3%A5%20h%C3%A5llbarhetskomponenterna.>]. <https://www.hallbarhet.lu.se/forskning/vad-ar-hallbarhet>

- Manian, A. P., Cordin, M., & Pham, T. (2021). Extraction of cellulose fibers from flax and hemp: A review. *Cellulose*, 28(13), 8275–8294. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04051-x>
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, Ö., Yu, R., & Zhou, B. (Red.). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Minunno, R., O’Grady, T., Morrison, G. M., & Gruner, R. L. (2021). Investigating the embodied energy and carbon of buildings: A systematic literature review and meta-analysis of life cycle assessments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 110935. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110935>
- Moletti, C., Aversa, P., Losini, A. E., Dotelli, G., Woloszyn, M., & Luprano, V. A. M. (2023). Hygrothermal behaviour of hemp-lime walls: The effect of binder carbonation over time. *Building and Environment*, 233, 110129. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110129>
- Offentliga fastigheter. (2022). *LCA och LCC i tidiga skeden*. Offentliga fastigheter.
- Pade, C., & Guimaraes, M. (2007). The CO₂ uptake of concrete in a 100 year perspective. *Cement and Concrete Research*, 37(9), 1348–1356. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.06.009>
- Pauliuk, S., Milford, R. L., Müller, D. B., & Allwood, J. M. (2013). The Steel Scrap Age. *Environmental Science & Technology*, 47(7), 3448–3454. <https://doi.org/10.1021/es303149z>
- Rydin, S., & Olsson, S. (2019). *En jämförelse av koldioxidutsläpp i en byggnads klimatskal beroende på val av isoleringsmaterial*. <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:hj:diva-45519>
- Shea, A., Lawrence, M., & Walker, P. (2012). Hygrothermal performance of an experimental hemp–lime building. *Construction and Building Materials*, 36, 270–275. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.123>

Examensarbete i byggt teknik: Hållbara klimatskärmar med hampa och cellglas– En fallstudie

UNDP. (u.å.). Mål 13: Bekämpa klimatförändringarna. *Globala målen*. Hämtad 06 april 2023, från <https://www.globalamalen.se/om-globala-malen/mal-13-bekampa-klimatforandringarna/>

Yang, K.-H., Seo, E.-A., & Tae, S.-H. (2014). Carbonation and CO₂ uptake of concrete. *Environmental Impact Assessment Review*, 46, 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2014.01.004>

Zampori, L., Dotelli, G., & Vernelli, V. (2013). Life cycle assessment of hemp cultivation and use of hemp-based thermal insulator materials in buildings. *Environmental science & technology*, 47(13), 7413–7420.