

Hållbara byggmaterial: fallstudie på byggskivor av återvunnet avfall

Gina Hvarfvenius & Sebastian Lind | Avdelningen för
Brandteknik | LTH | LUNDS UNIVERSITET



**Hållbara byggmaterial: fallstudie på byggskivor av återvunnet
avfall**

Gina Hvarfvenius & Sebastian Lind

Lund 2023

Titel:

Hållbara byggmaterial: fallstudie på byggskivor av återvunnet avfall

Title:

Sustainable building materials: A case study of wall materials made from recycled waste

Författare/Author:

Gina Hvarfvenius och Sebastian Lind

Report 5682

ISRN: LUTVDG/TVBB--5682—SE

Antal sidor/Number of pages: 56 (including appendix)

Illustrationer/Illustrations: Gina Hvarfvenius och Sebastian Lind om inte annat anges. Andra illustrationer har fått godkänt av ansvariga att användas i rapporten.

Sökord:

Återvinning, Livscykel, Hållbarhet, Byggskivor, Byggnadsmaterial,

Keywords:

Euroclass, ConeTools, Sustainability, Green Building Materials, Reaction to Fire, Circular Economy, Upcycling, Reuse, LCA

Abstract:

The construction sector is a large contributor to carbon dioxide emissions each year, and if the Swedish target for carbon dioxide emissions is to be reached by 2045, something must be done. This case study investigates if there are any sustainable building materials on the market which is made from recycled materials. If that is the case, do these materials reach a satisfactory level of fire safety?

The result of this case study indicates that the fire safety of building materials made from recycled materials does not have a high level of fire safety. In order to increase the area of use, of the wall material, more research, development, and testing are needed.

© Copyright: Division of Fire Safety Engineering, Faculty of Engineering, Lund University, Lund 2023

Avdelningen för Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2023.

Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

www.brand.lth.se
Telefon: 046 - 222 73 60

Division of Fire Safety Engineering
Faculty of Engineering
Lund University
P.O. Box 118
SE-221 00 Lund
Sweden

www.brand.lth.se
Telephone: +46 46 222 73 60

Förord

Examensarbetet fullbordar nu den 3,5 års utbildning på Brandingenjörsprogrammet på avdelningen för brandteknik vid Lunds Tekniska Högskola. Vi vill därför tacka våra fantastiska handledare Margaret McNamee, för din rådgivning och entusiasm i vårt arbete, och Joakim Åström, för din kunskap och goda handledning vid laborationerna. Utan er hjälp hade arbetet inte blivit vad det blev.

Dessutom vill vi tacka Robert McNamee och Patrik Van Hees för deras bidrag av sakkunnighet gällande analys av konresultat och mjukvaran ConeTools. Ett tack skall även utdelas till Tobias, Max och alla på Recoma för provbitar och samarbetet. Tack RISE för licensutlåning av ert mjukvaruprogram ConeTools.

Sist men inte minst vill vi tacka våra fina opponenter Rebecca Wigervall och Emilia Wretman, för värdefulla kommentarer och den konstruktiva kritik som gjort arbetet bättre.

Lund, 2023

Gina Hvarfvenius & Sebastian Lind

Summary

The world today faces an incredible challenge regarding climate changes. According to Sweden's climate goals for the year 2045, Sweden must be completely carbon dioxide neutral. This means that in a quarter of a century, Sweden must change to having zero net carbon dioxide emissions. Major changes will be required to achieve this goal. An industry that has major challenges ahead of it is the construction industry. In 2018, the construction industry accounted for approximately one-fifth of Sweden's total emissions of carbon dioxide equivalents. For the climate goals in the construction industry, major investments are required to improve how we build and what materials we use. Despite the urgency the industry is facing, the safety that today's building materials provide must not be compromised. This report intends to explore this dilemma based on these two questions:

- Are there wall materials created from recycled waste that have a high level of fire safety?
- What fire classification can a wall material made from recycled waste achieve today?

Recoma is a company that produces a new type of wall material that consists of recycled food packaging. This material is the type of sustainable development that is required for Sweden to meet the environmental goals that have been set, especially for the construction industry. As these wallboards contain plastic, cardboard, and aluminium, it creates a strong wallboard, but where the fire-technical aspects are not satisfactory according to requirements from BBR.

The report consists of a literature study that aims to gain an understanding of today's building materials and to explore if there are wall materials made from recycled waste. The second part is a case study on Recoma that intends to make a deeper analysis of the wall material's properties. This is partly done through experiments where the building board's fire-technical surface layer class is obtained and then compared to the European standard classifications for wall materials which is called Eurocode.

The surface layer class for a durable material such as the boards of the case study resulted in class D. This does not fall within the framework of a high level of fire safety. The poor class leads to a limited field of use. The material can only be used for personal use and in villas. Conclusions from the work indicate that only improving the main fire classification in EN 13501 does not necessarily lead to a wider area of use in the construction industry. All fire classification in EN 13501 (main and additional) must be improved to obtain a higher level of fire safety for materials.

Sammanfattning

Världen står idag inför en otrolig utmaning. Enligt Sveriges klimatmål för år 2045 ska Sverige vara helt koldioxidneutrala. Detta betyder att på ett kvarts sekel ska Sverige ställa om till att ha noll nettokoldioxidutsläpp. Det kommer att krävas stora förändringar för att detta mål ska nås. En bransch som har stora utmaningar framför sig är byggbranschen. 2018 stod byggbranschen för cirka en femtedel av Sveriges totala utsläpp av koldioxidekvivalenter. För att nå klimatmålen inom byggbranschen krävs stora satsningar för att förbättra hur vi bygger och vad vi bygger av. Trots den brådskan som branschen står inför får den säkerhet som dagens byggmaterial ger inte rubbas på. Denna rapport ämnar utforska hur miljövänliga byggnadsmaterial kan nå samma nivå som de konventionella byggmaterialen utifrån dessa två frågeställningar:

- Finns det byggnadsmaterial som skapats av återvunnet avfall som har en hög brandsäkerhet?
- Vilken brandteknisk klass kan ett byggnadsmaterial av återvunnet avfall uppnå idag?

Recoma är ett företag som producerar en ny typ av byggskena som består av återvunna livsmedelsförpackningar. Detta material är den typ av hållbar utveckling som krävs för att Sverige ska klara miljömålen som är satta, speciellt för byggbranschens räkning. Då dessa skivor innehåller plast, kartong och aluminium skapar det en hållfast väggskena, men där de brandtekniska aspekterna inte är tillfredställande enligt krav från BBR.

Rapporten består av en litteraturstudie som ämnar att få förståelse kring dagens byggmaterial samt att utforska om det finns material som framställs på återvunnet avfall. Den andra delen är en fallstudie på Recomas skivmaterial som ämnar att göra en djupare analys på byggskenans egenskaper. Detta utförs dels genom experiment där byggskenans brandtekniska ytskiktclass fås fram uttryckt i den europeiska standarden Eurocode.

Ytskiktclassen för ett hållbart material såsom fallstudiens skivor resulterade i klass D vilket inte faller inom ramarna för en hög brandsäkerhet. Den klassen leder till ett begränsat användningsområde då materialets endast kan användas för eget bruk och i villor. Slutsatser från arbetet tyder på att enbart förbättring av huvudklassen för ytskikt inte nödvändigtvis leder till ett större användningsområde inom byggbranschen. Alla ytskiktclasser (huvud och tilläggs) i byggnadsmaterialet måste förbättras för att få en högre brandsäkerhet.

Nomenklatur

Förkortningar

E	Energi [J]
FIGRA	Brandutvecklingshastighet [kW/s]
HRR	Heat Release Rate – är förkortningen för effektutveckling [kW/m ²]
LDPE	Lågdensitetspolyeten
m	Massa [kg]
Δh_c	Förbränningsvärme [kJ/kg]
RCT	Room Corner Test
SBI	Single Burning Item
t	Tid [s]
THR	Total förbränningsvärme
χ	Förbränningseffektivitet [-]

Förklaringar

Hållbart	Hållbarhet baseras på tre dimensioner (aspekter): sociala, miljömässiga och ekonomiska. När dessa tre uppfylls inom olika sektorer, exempelvis utveckling eller byggande, anses det var hållbart (LU, 2020).
Konekalorimeter	En testmetod enligt ISO-5660 standard som används för att ta reda på materials brandtekniska egenskaper utifrån HRR, tid till antändning, massavbrinning och rökproduktion.
Koldioxidekvivalenter (CO ₂ e)	Olika växthusgaser har olika påverkan på den globala uppvärmningen. För att kunna sammanställa klimatpåverkan av material och produkter används koldioxidekvivalenter. Den anger hur mycket ett ämne bidrar till växthuseffekten uttryckt i hur stor mängd koldioxid som hade gett samma resultat.

Recycling	Omvandla (av avfall) till användbart material, (definitionen på detta kan tolkas både som återbruk och återvinning på svenska.)
Upcycling	Återanvända eller återvinning så att det som skapas eller produceras blir av högre värde en ursprungsprodukt. Exempelvis oanvända och återvunna tidningspapper som om produceras till golvsivor.
Återbruk	Produkter eller material från tidigare byggnader kan återanvändas genom så lite bearbetning som möjligt.
Återvinning	Bearbetning av avfall, produkt eller material, där ny produktion av använt material används till tillverkning av nya produkter och material.
Ytskiktssklass	Är en brandteknisk klassificering för olika typer av byggnadsmaterials för deras brandegenskaper.
Övertändning	Även kallad flashover på engelska, är då brandeffekten utvecklas väldigt snabbt och övergår till en fullt utvecklad rumsbrand. En fullt utvecklad rumsbrand är när allt brännbart i rummet brinner.

Innehållsförteckning

1. Inledning	1
1.1. Bakgrund.....	1
1.2. Syfte	4
1.3. Mål	4
1.4. Frågeställningar.....	5
1.5. Antaganden och avgränsningar	5
1.6. Rapportens disposition.....	5
2. Teori.....	6
2.1. Vad är hållbarhet?	6
2.2. Från linjärt till cirkulärt.....	6
2.3. Livscykel tänkande	8
2.4. Lagar och regler	9
2.5. Återvinning och återbruk	9
2.6. Hållbara byggprodukter	10
2.7. Återbruk och återvinning med godkända brandtekniska egenskaper.....	12
2.8. Ytskikt klassning enligt BBR	13
2.9. Byggnadsklasser och verksamhetsklasser.....	14
2.10. Europeiska och svenska standarder	15
2.10.1. ISO 5660 – konkalorimetermetoden	15
2.10.2. ConeTools – Mjukvara för prediktion av materials ytskikt enligt EN 13501	16
2.10.3. FIGRA – Fire Growth Rate.....	16
2.10.4. CE-märkning.....	16
3. Metod	17
3.1. Genomförande.....	17
3.2. Litteraturstudie	18
4. Fallstudie.....	20
4.1. Recomas väggskivor – en hållbar lösning.....	20
4.2. Materialval i fallstudien	22
4.3. Brandegenskaper hos komponentmaterialen i Recomas byggskiva	23
4.3.1. Aluminium	23
4.3.2. Polyeten (LDPE).....	23
4.3.3. Kartong	24
4.4. Experiment.....	24
4.5. Genomförande av experiment.....	25

5.	Resultat	27
5.1.	Resultat från Konkallorimetern.....	27
5.2.	Resultat från ConeTools.....	28
6.	Diskussion.....	30
6.1.	Ytskiktssklass för ett material av återvunna livsmedelsförpackningar.....	30
6.2.	Spridning av resultaten mellan försöken med 25 kW/m ² och 40 kW/m ²	31
6.3.	Basicskivans effektminskning efter 10 sekunder	31
6.4.	Skillnader i antändningstid.....	33
6.5.	Alternativ för att öka Euroklassen utan att ändra materialkompositionen	34
6.6.	Finns det miljövinster med material av återvunna livsmedelsförpackningar	35
6.6.1.	Materialtypsperspektiv	35
6.6.2.	Systemtypsperspektiv.....	37
6.7.	Begränsningar i forskningsmetod	39
7.	Slutsats	40
8.	Framtida forskning.....	41
9.	Referenser	42
	Appendix.....	A
	Prover enligt ISO 5660-1	A
	Resultat från Konkallorimeterns experiment enligt ISO 5660.....	A
	Resultat från ConeTools, ett mjukvaruprogram för prediktion av brandteknisk huvudklass för ytskikt.....	D
	Teoretiska beräkningar av energi.....	E
	Handberäkningar av ConeTools resultat och ekvationer från ConeTools.	J

1. Inledning

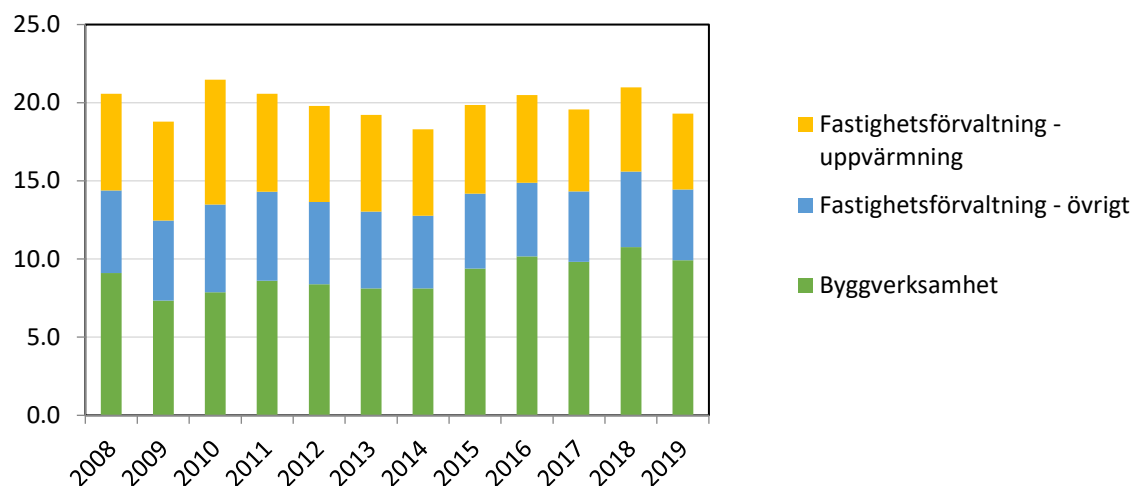
1.1. Bakgrund

Miljödebatten genomsyrar stora delar av vårt samhälle. Den globala uppvärmningen är ett verkligt hot som få motsätter sig. Glaciärer smälter, torka breder ut sig, samt ökade havsnivåer och översvämningar är bara några få effekter av människans oansvariga handlande. Studier från FN:s klimatpanel IPCC visar att från 1850-talet till och med 2020-talet har vår globala genomsnittliga yttemperatur ökat med cirka 1°C (Ipcc, 2021). Denna temperaturökning kan tyckas vara liten, men enligt IPCC teoretiseras det att vissa områden kan exempelvis utsättas för svår torka dubbelt så ofta på en 10-årsperiod (jämfört med 1850–1900 talet) om temperaturökningen endast är 1,5 °C. Denna temperaturökning på 1,5 °C kommer att uppnås redan under åren 2021–2040 (Ipcc, 2021). Om ingen förändring görs kommer vår värld i framtiden inte se ut som den gör nu.

För att stoppa denna utveckling har flera avtal skrivits under åren. Av dessa är Parisavtalet det senaste och är påskrivet av Sverige samt 193 andra länder. Några av detta avtals huvudpunkter är att *”Hålla ökningen av den globala uppvärmningen väl under 2 grader, med sikte på att inte överstiga 1,5 grader”* (Naturskyddsföreningen, 2021a) samt att var 5e år ska parterna stämma av hur klimatarbetet går samt göra nya mål om landet inte uppnått sitt nuvarande mål. Tanken är att målen ska bli tuffare för varje år som går. Då parterna i avtalet har olika ekonomiska förutsättningar innebär detta också att de länder som har goda ekonomiska förutsättningar ska visa goda exempel på klimatomställningen och göra omställningen snabbare. Alla parter som skrivit på detta avtal vill på något sätt förhindra den globala uppvärmningen, men hur kan dessa mål uppnås? För att uppnå målen har Sverige tagit fram nationella klimatplaner. När det gäller koldioxidutsläpp har Sverige fyra etappmål där kulminationen är att Sverige ska vara koldioxidneutralt år 2045 och därefter lagra mer koldioxid än vad som släpps ut. År 2022 utsläppsmängden cirka 35 % lägre än referensåret 1990 vilket innebär att 2020-målet på 40 % inte uppnåddes. Som följd av detta kommer nästa mål 2030 på 63 % bli svårare att uppnå (Boberg, 2022).

För att de svenska miljömålen ska kunna uppnås måste stora delar av samhället ställas om till att vara grönare. Många delar av samhället har redan börjat ställa om och intresset för att leva miljövänligt har aldrig varit större. Industrin av miljövänlig transport i form av eldrivna fordon tillsammans med utfasningen av fossila bränslen är lämpligt exempel på den gröna omställningen.

Miljoner ton CO₂e



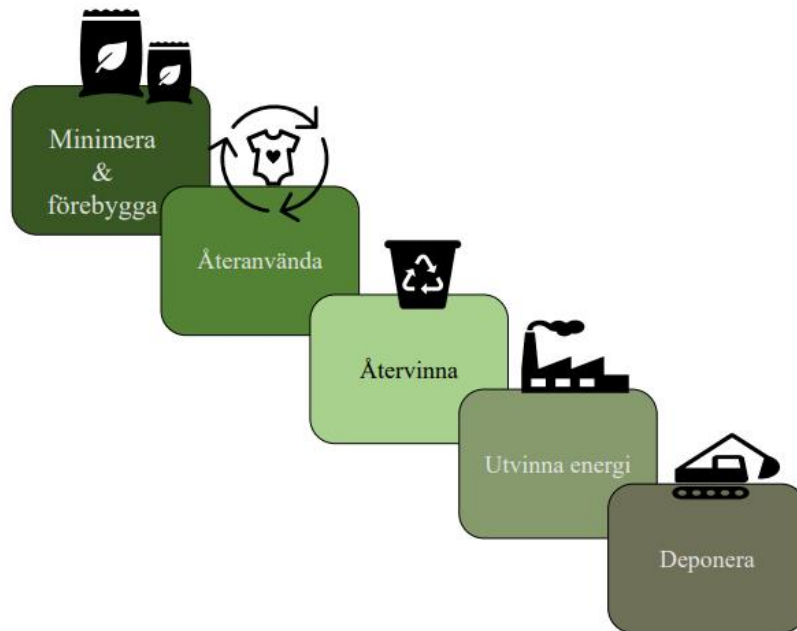
Figur 1 , Bygg och fastighetssektorn innehåller byggverksamhet, fastighetsförvaltning- övrigt samt fastighetsförvaltning – uppvärmning (Boverket, 2021b)

En sektor som står för en stor del av Sveriges utsläpp är Bygg och fastighetssektorn. Idag står Sverige för ungefär 46 miljoner ton inhemska koldioxidkvivalenter varav 21 % av dessa kommer från bygg och fastighetssektorn. Denna sektors inhemska utsläpp har under åren 1993 till 2019 minskat från 21,6 miljoner ton CO₂e till 11,7 miljoner ton, vilket är en minskning på ungefär 54 %. Denna utveckling är mycket positiv och ett steg i rätt riktning, dock visar denna data endast de totala utsläppen från sektorn i Sverige. Faktum är att dessa totala utsläppsminskningar kommer nästan enbart från utsläppsminskningen från uppvärmning av fastigheter. Utsläppen från byggande och renovering har inte minskat, utan är ungefär på samma nivå som 1993 dvs. cirka 6,5 miljoner ton CO₂e/år. (Boverket, 2021b). Om utländska utsläpp i form av varor som importerats till Sverige räknas med, utgör bygg och renovering ungefär 50 % av bygg och fastighetssektorns totala utsläpp (se Figur 1). Detta är en betydande del av Sveriges årliga utsläpp och som under årens lopp inte verkar sjunka. För att Sveriges klimatmål ska uppnås, krävs det alltså att byggbranschen måste göra stora omställningar. Men hur kan Sverige göra nybyggnadssektorn mer miljövänlig?

Ett tankesätt är att optimera återvinning och avfall av alla sektorers material i Sverige. Detta följer grundtanken i avfallstrappan eller avfallshierarkin som den även kallas. Ett direktiv från EU som nu är antaget i den svenska miljöbalken (Naturskyddsföreningen, 2021b; Naturvårdsverket, 2022b) styr avfallshanteringen så att mängden avfall som inte återvinns minimeras och återanvänds på bästa sätt. Figur 2, Förenklad beskrivning av avfallshierarkin.

visas en förenklad bild över hur hanteringen ser ut idag, i första hand prioriterar att förebygga uppkomsten av avfall. Enligt Avfall Sverige bör samhället ändra konsumtionsmönster även via förbättring av produktionsmetoder (Avfall-Sverige, 2022). Efter att minimera och förebygga avfall, visar nästkommande steg att avfall som uppkommer främst ska återanvändas i mån av möjlighet.

Alternativt återvinns på ett korrekt sätt om återbruk inte är möjligt. Därefter förbränns det återvunna materialet i kraftverk för att omvandla det till värme och energi som samhället sen kan ta del av. Sista trappsteget är deponi av de avfall som inte förbränns eller återanvänds. Det innebär att slutgiltigt avfall som inte kan hanteras på något annat sätt slängs i dagsläget på en deponistation (soptipp) vilket avslutar användningsmöjligheterna för material som landar där. Exempel på material som deponeras idag är gips och klinker. Detta steg undviks gärna då det inte bara försämrar klimatet utan också miljön (Avfall-Sverige, 2022).



Figur 2, Förenklad beskrivning av avfallshierarkin.

Genom hållbart byggande strävas det efter att i så lång utsträckning som möjligt återvinna och återanvända material som redan producerats och finns inom byggsektorn. Enligt EU parlamentets råd och direktiv upphör återvunnet material att vara avfall när följande uppfylls (Miljödepartementet, 2018);

- Ämnet eller föremål ska användas för specifika ändamål
- Det ska finnas en marknad för eller efterfrågan på de nyskapade föremålen.
- Ämnen eller föremål ska uppfylla de tekniska kraven för ändamålet och befintlig lagstiftning samt normer för produkten
- Användningen av ämnet eller föremålet kommer inte att leda till allmänt negativa följder för människors hälsa eller miljön.

Dessa villkor står skrivna i miljöbalken (1998:808) sedan 2020. Returpapper och förpackningsavfall måste exempelvis sorteras och lämnas in till ett godkänt retursystem. Detta i enlighet med förordningen (2005:220) om retursystem för plastflaskor och metallburkar. Detta förhindrar att inte vem som helst kan ta hand om avfall och återvinna det, detta utifrån säkerhet av både miljömässiga själ och människors hälsa (Miljödeparatamentet, 2018).

Förutom dessa lagar som på olika sätt försöker underlätta återvinning finns frivilliga system som premiera ett hållbart byggande, t ex olika märkningssystem för gröna byggnader (Ekdahl, 2021). Det finns dock en stor utmaning gällande gröna produkter, återbruk och återvunna material inom hållbart byggande, då det finns osäkerheter kring om dessa produkter klarar dagens brandklassningar. Dessa osäkerheter och bristande kunskaper leder aktörer till att inte väljer de hållbara alternativen (McNamee et al., 2021). Då forskning kring återbruk och återvinning succesivt ökar saknas det undersökningar kring hur produkter ska brandklassas då de kan ha förändrats efter återvinningsprocessen. När innovativa byggnadsmaterial som både är återvinningsbara och hållbara utvecklas krävs vidare undersökning. För att kunna konkurrera med konventionella byggprodukter måste det säkerställas att nya material och produkter klarar de brandtekniska kraven.

1.2. Syfte

Projektet syftar till att utöka förståelsen om vad som krävs för omställning till ett mer brandsäkert och hållbart byggande i framtiden.

1.3. Mål

Målet med projektet är att undersöka och belysa möjligheterna till att bygga mer hållbart genom att använda material som kan ersätta dagens konventionella material. Detta genom att utreda vilka brandtekniska klassningar som hållbara byggnadsmaterial erhåller i dagsläget. För att konkretisera forskningsfrågorna belyses detta med hjälp av en verklig fallstudie med väggmaterial producerad av återvunnet material.

1.4. Frågeställningar

Det lyder ingen tvekan om att utvecklingen går mer och mer åt att hitta hållbara lösningar som bidrar till en miljövänligare tillvaro, speciellt inom byggbranschen (Andrea, 2022). Osäkerheter kring hållbart byggande och vad det innebär är dock fortfarande omfattande. Frågor som innefattar påverkan av hållbart byggandes möjlighet att uppnå dagens brandkrav och vart rimliga systemgränser sätts för att klassificera material som hållbara, har dagens forskning inte hunnit ikapp jämfört med utvecklingens hastighet. Dessa frågor undersöks i denna rapport:

- Finns det byggnadsmaterial som skapats av återvunnet avfall som har en hög brandsäkerhet?
- Vilken brandteknisk klass kan ett byggnadsmaterial av återvunnet avfall uppnå idag?

1.5. Antaganden och avgränsningar

Rapporten behandlar stora frågor angående hållbart byggande där indelningen av arbetet har medfört vissa avgränsningar. Då arbetet är indelat i en litteraturundersökning och fallstudie som baseras på ett fåtal material kommer inte alla aspekter av hållbart byggande att utredas i denna rapport. De avgränsningar som gjorts är följande;

- Fokus är på brandegenskaperna och inte andra frågor (t ex hållfasthet eller akustik)
- Fallstudie genomförs på väggmaterial tillverkad av återvunnet material från endast ett företag (Recoma). Information som presenteras om materialen kommer från företaget.
- Tilläggsklasser för byggnadsmaterials ytskikt kommer inte att undersökas då detta kräver en annan testmetod än den som används i denna rapport. Dock diskuteras tilläggsklasserna.
- Inom begreppet hållbarhet finns tre dimensioner miljö, ekonomi och sociala. I denna studie kommer endast miljöaspekten att diskuteras.

1.6. Rapportens disposition

Arbetet har grovt följt 2 delar, för att underlätta har en samanställning av rapportens disposition gjorts:

Första delen: Litteraturstudie och fallstudie

Kapitel som ingår i denna del är 2 Teori, 3 Metod och 4 Fallstudie

Andra delen: Analys av resultat

Kapitel som ingår i denna del är 5 Resultat, 6 Diskussion, 7 Slutsats och 8 Fortsatt Forskning

2. Teori

I dagens samhälle finns ett flertal trender som driver utvecklingen av hållbara produkter och material till hållbart byggande. I detta kapitel sammanställs resultaten av litteraturstudien från dessa väsentliga trender och tillhörande bestämmelser som driver utvecklingen baserat på den litteraturgenomlysning som ingått i arbetet.

2.1. Vad är hållbarhet?

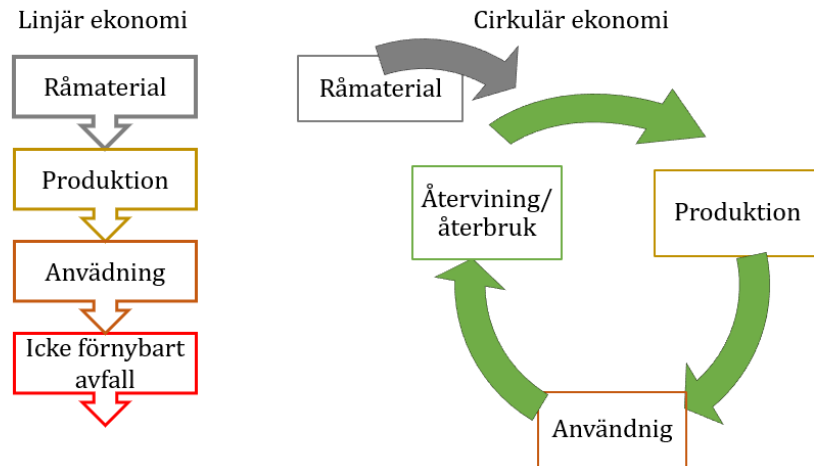
Begreppet hållbarhet appliceras på material, processer eller byggnader då tre dimensioner miljömässig(ekologisk), ekonomisk och social (hållbarhet) stödjer och samspelar med varandra. Hållbar utveckling har blivit en övergripande princip inom den svenska politiken, för att få goda sociala förutsättningar utan att människans tillvaro och förverkligande i samhället utmanar ekosystemens funktioner. När dessa tre uppfyller satta mål eller reglementen, beaktas processen eller materialet som hållbart (LU, 2020).

Komplexiteten av begreppet hållbarhet kan inte benämnas på vad som helst, då det inte går att uppnå bestående hållbarhet utan att ta hänsyn till de delar som ingår. Alltså kan inget mål nås på en bekostnad av ett annat. Framgång krävs inom alla tre områdena för att målen ska uppnås (Naturvårdsverket, 2022a).

2.2. Från linjärt till cirkulärt

Cirkulär ekonomi är ett koncept som samhället går mer mot. Cirkulär ekonomi är motsatsen till en linjär ekonomi, vilket kan sammanfattas med begreppet ”slit och släng-samhälle”. Figur 3 visar linjär och cirkulär ekonomi schematiskt. Den linjära ekonomin är ett koncept som präglade västvärlden under en mycket lång tid (Naturskyddsföreningen, 2021c). Det finns två stora problem med en linjär ekonomi;

- Det första är att uttag av naturresurser som används till produktion av olika produkter sprids ut i samhället, efter användandet av dessa produkter förlorar de sitt ekonomiska värde. Det som anses värdelösa efter en eller ett fåtal användningar slängs och hamnar oftast på fel ställen, såsom i naturen där de tex. kan förstöra ekosystem. (Naturskyddsföreningen, 2021c).
- Det andra är att de produkter som blir till avfall förlorar sitt värde. Dessa produkter som blir till avfall skulle dessutom kunna användas på nytt då det ofta fortfarande finns värdefulla material i dem (Naturskyddsföreningen, 2021c).



Figur 3 , Simpel illustration av linjär ekonomi och cirkulär ekonomi

Den linjära byggnadsekonomi har sin bakgrund i den industriella revolutionen då naturens resurser effektivt utvanns och skapade produkter som konsumerades för enskilda syften, utan att tänka på återvinningsmöjligheter. Därefter deponerades produkterna när ändamålet för dem uppfylldes (Vigren Skogseid, 2019). Till skillnad från de byggnadsprodukter och material som ingår i den cirkulära byggnadsekonomin, som strävar efter att optimera system och materialflöde som främjar slutna kretslopp, förbrukar den linjära ekonomin material och utarmar naturen på ett ohållbart sätt.

Byggsektorn går i gamla fotspår än idag med motiveringen att det är en gammalmodig bransch där fokus alltid legat på att reducera kostnaderna. Inställningen gentemot att återbruka och återvinna material är allmänt skeptiskt, då efterfrågan på att återbruka material är liten (Persson, 2015). Kostnaderna för nya produkter är oftast lägre än att återvinna eller återbruka från äldre byggnader. Detta leder till att material deponeras och fortsättandet av den linjära arbetsmodell hellre än att byggindustrin som anpassar sig och implementerar den cirkulära byggnadsekonomin (Persson, 2015)

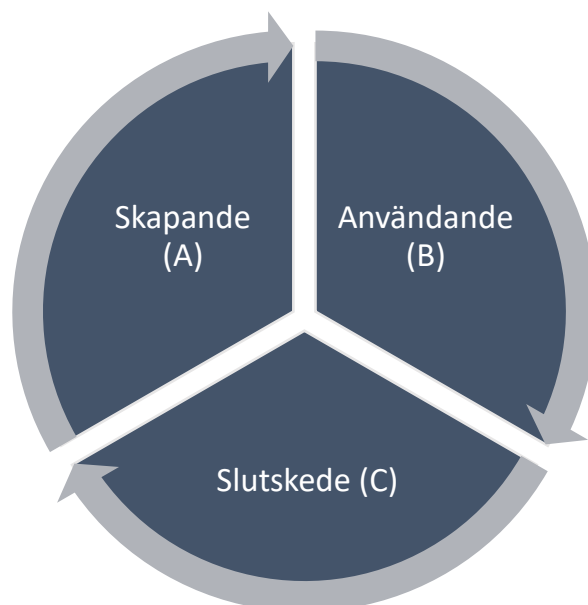
En cirkulär ekonomi präglas av att så mycket som möjligt ska återanvändas på något sätt. Återbruka, renovera och återvinna är nyckelorden. Tanken är att detta ska leda till mindre skräp i naturen, mindre oanvända produkter som bara ligger, mindre exploatering av naturresurser samt att öka värdet hos produkter som inte går att använda längre (Naturskyddsföreningen, 2021c).

Stora hinder som byggbranschen stöter på när övergången från linjärt till cirkulärt ska implementeras är hantering och sortering av avfall, kvalitetsgarantier och de avfallsdirektiv som styr återvinning dagsläget (Ahlm, 2018; Vigren Skogseid, 2019). Detta leder till att direktiven inte kan säkerställa en resurseffektiv samt hållbar återvinning. Trots detta finns det goda möjligheter för Sverige att förbättra den selektiva rivningen då den bedöms ha stor potential för material som redan har fungerande återvinningsprocesser enligt en IVL rapport från 2018 (Ahlm, 2018).

2.3. Livscykel tänkande

Livscykel tänkande (LCT) har tagit större plats i dagens samhälle på flera fronter. Med hjälp av denna metod skiftar fokus från de traditionella linjära produktion och framställning av produkter inom miljö, sociala och ekonomiska till att beakta dessa processer ur ett livscykel perspektiv. Inriktningen på detta fokuserar på att minska miljöpåverkan som produkter bidrar till under dess livscykel, allt från enskilda produkter till större mer komplexa system. Detta kan vara inom produktionsfasen men även under användande och fullbordan för produkten (LCI, 2022). För att lyckas med att reducera miljöpåverkan är ett alternativ att återvinna och återbruka material samt produkter innan de hamnar på deponistationer eller förbränns. Detta leder i sin tur till att det återvunna materialet kan ingå i ny produktion (LCI, 2022). Andra viktiga begrepp inom LCT är cirkulärt tänkande (cirkulär ekonomi) och livscykelanalys (LCA).

LCA är en metod vars syfte är att redovisa och exempelvis bedöma miljöpåverkan hos en produkt eller (mest relevant för denna rapport) - en byggprocess. En livscykelanalys bedöms ofta kvantitativt och kan då redovisa exempelvis hur mycket koldioxidekvivalenter (CO_2e) produkten ger upphov till under sin livscykel. Idén med livscykelanalys är att hela produktens/byggnadens livscykel analyseras, från "vaggan till graven" (se figur 4)(SLU, 2022).



Figur 4 Schematisk bild av livscykel.

En livscykel delas upp i 3 delar:

- A. *Skapande* innehåller alla processer som har gjorts för att skapa produkten. Dvs råvaruförsörjningen, tillverkningen, transporter samt eventuell montering.
- B. *Användande* processen är den del som förhoppningsvis är produktens längsta. Denna innehåller processer såsom användning, underhåll, reparation, utbyte, ombyggnad och drift.

- C. *Slutskedet* är den process där produkten avslutar sin livscykel. Detta innebär processer såsom demontering/ rivning av en byggnad, transport, restproduktionsbehandling och bortskaffning. I en linjärekonomi går mycket till avfall medan i en cirkulärekonomi kan detta utgöra källa till nytt material eller produkter.

En av de stora fördelarna med LCA är att varje process av livscykeln analyseras. Detta ger en mycket bra förståelse för vilka delar av livscykeln som ger störst klimatpåverkan och hur en optimering av produkten kan ske på effektivast sätt.

När det gäller Lag (2021:787) om klimatdeklaration för byggnader (Finansdepartementet, 2021), krävs endast en analys av (A) byggskedet enligt lag (se figur 5), men att göra en LCA på hela byggnadens livscykel är naturligtvis ännu bättre (Boverket, 2022).



Figur 5 beskriver Bygg och produktions-skedet (A) hos en byggnad.

2.4. Lagar och regler

Ett sätt att minska klimatpåverkan av byggsektorn är genom lagstiftning och regler, inklusive frivilliga initiativ. Ett nytt initiativ som syftar till att minska utsläppen i byggprocessen är den nya lagen om klimatdeklaration. Den första januari 2022 kom denna nya lag som säger att alla nya byggnader måste klimatdeklareras. Syftet med denna lag är att på sikt sänka klimatpåverkan i byggskedet. För tillfället innehåller lagen inga gränsvärden för hur mycket klimatpåverkan en byggnad får göra i byggskedet, utan ska vara ett verktyg till att beräkna klimatpåverkan och på så sätt underlätta för byggherren att vidta åtgärder som gör byggnadsprocessen mer miljövänlig (Boverket, 2021a). Boverket har dock kommit med ett förslag om att skärpa denna lag år 2027 till att det ska finnas maximala gränsvärden för uppförande av byggnader. Dessa gränsvärden planeras att skärpas med tiden i syfte att klimatmålet 2045 skall kunna uppnås (Boverket, 2020c). Att kunna beräkna och sänka utsläppen från byggnadsskedet kommer bli viktigare med tidens gång då det är mycket troligt att utsläppen från uppvärmning av byggnader kommer att sjunka ännu mer (Boverket, 2019)

2.5. Återvinning och återbruk

Två centrala begrepp inom cirkulär ekonomi är återvinning och återbruk. Dessa två begrepp är inte samma sak, men kan ibland vara svårt att urskilja från varandra. Begreppen definieras i början av rapporten men en mer utförlig beskrivning återges här.

Återvinning är en typ av avfallshantering som syftar till att återanvända material till produktion av nya produkter eller material. Ett exempel av detta är återvinningen av papper. Returpapper är papper som har brutits ned och sedan skapats på nytt till papper igen (McNamee et al., 2021).

Återbruk är också en typ av avfallshantering, men här ligger fokus på att återanvända produkten eller materialet genom ett minimum av bearbetning. Ett exempel av detta är att ta dörrar från ett gammalt hus, renovera dem och sätta in dem i ett nytt hus. Minimum av bearbetning betyder i detta fall att renovera och laga dörren för att den ska kunna användas igen. Om dörren istället hade blivit isärskruvad och dörrens komponenter hade använts till att laga en annan dörr, hade detta varit återvinning. Ett annat exempel av skillnaden mellan återbruk och återvinning är att: krossa betongrester och sedan använda det till att bygga vägar, jämfört med att flytta ett betongelement från ett rivningsobjekt till ett nybygge. Det första är återvinning och det sistnämnda är återbruk (McNamee, 2021).

2.6. Hållbara byggprodukter

Traditionellt har byggindustrin valt att använda byggprodukter och material baserat på framför allt egenskaper såsom hållfasthet och kostnad snarare än miljöpåverkan. Detta beror till stor del på kulturen kring byggnadsbranschen, där det ekonomiska intresset alltid kommit före miljövänliga alternativ. Generellt sett har det varit billigare att köpa nyproducerade byggmaterial än att återvinna eller återbruka. Produkter såsom betong och gips är ledande exempel på sådana material. Problemet med dessa material är att de inte alltid är särskilt miljövänliga. Betong är ett fantastiskt byggmaterial som har många goda egenskaper. Det är mycket beständigt, god isolationsförmåga, brinner inte och har en mycket hög hållfasthet. Tillverkningen kan dock ha ett högt miljöpris (Walach, 2021). Endast den kemiska processen vid skapandet av 1000 kg cement orsakar utsläpp på ungefär 700–800 kg koldioxid. Därtill tillkommer det utsläpp från upphettningsprocessen samt transport. Med en så dålig tillverkningsprocess är det inte konstigt att betongindustrin står för ungefär 8 % av världens koldioxidutsläpp (Naturskyddsföreningen, 2022). Det finns flera initiativ för att skapa ”grön” betong som ska vara bättre miljömässigt, men mycket ytterligare forskning behövs (Skanska, 2022).

Ett annat material är gipsskivor. Gipsväggar har goda isolerande egenskaper, är nästan obrännbara och ger väggar en slät yta. Problemen med gipsskivor är dock att de inte heller är särskilt miljövänliga. Till skillnad från betong släpper gips inte ut någon koldioxid i den kemiska processen. Dock krävs det stora mängder vatten och värme för att skapa gipsskivorna. Enligt en Liu et al. (2020) ger gipsväggar en miljöpåverkan på ca 360 g CO_{2e} per kg gipsvägg (Liu et al., 2020). Ett annat problem med gips är att stora mängder spill skapas vid byggen. Detta spill går inte att kompostera eller förbrännas, då giftiga sulfider kan läcka ut i grundvattnet eller vid förbränning ut i atmosfären. Gipsskivor är dock återvinningsbara, men kräver då lika stor mängd energi för att återvinna, som det gör att skapa skivan

av råmaterial. Detta betyder att det nästan inte finns några energibesparingar att hämta från återvinning (Jiménez Rivero et al., 2016).

Återbruk av byggnadsmaterial och produkter har använts inom historien. Ett exempel av detta är under 1600 talet när Påve Urban VIII använde roms Colosseum som ett stenbrott för egen vinning där han återbrukande marmorstenen till hans palats (Le Pavec et al., 2021). Detta har sedan utvecklats genom seklerna fram till vår moderna tid till att mer och mer återanvända produkter från rivningsobjekt eller andra sektorer. Ytterligare exempel på att återanvända samma material ett flertal gånger är produkter från trämassor, så som papper. De kan återvinnas ett par gånger men ju mer det återvinner pappret desto sämre blir kvalitén av den nya produkten (National Council of Air and Stream Improvement, 2011) vilket innebär att det endast går att återvinna detta material ett begränsat antal gånger.

I Köpenhamn har det byggts ett område där hållbart byggande varit i fokus. Projektets fokus har utgått från upcycling av byggnadsmaterial. Återanvända glas av olika storlekar och krossad betong från tidigare rivna byggnader och kärnkraften har, bland annat, används vid byggprocessen. Projektet lyckades bygga en villa med hållbart material för endast 1,7 miljoner danska kr vilket ledde till att fler aktörer fick upp intresset för denna typ av byggande (Kvint, 2019). Dessa initiativ sker allt oftare i dagens byggande då folk vill bidra till en minskning av begränsade naturresurser och deponeringsmaterial. Trots det växande intresset av cirkulär ekonomi och hållbart byggnadsmaterial har det inte använts inom huvuddelen av nybyggnadsprojekten (Eberhardt et al., 2022). Dock är detta relativt nytt och är under utveckling vilket kan göra det svårt att implementera. Detta kan vara en förklaring till varför den osammanhängande användningen av hållbart byggande har uppstått inom byggbranschen (Eberhardt et al., 2022).

Redan 2001 startades en undersökning kring användningen av kartong och pappförpackningar där fokus låg på hållbart byggande och återvinning. *The Corrugated Cardboard Pod* testade att använda uppskuren wellpapp och kartong som sedan pressats till stora block för att användas som byggmaterial (Hebel et al., 2014). Dock utvecklades aldrig detta i någon större utsträckning då de främst var ett forskningsprojekt för att se om det var möjligt att bygga med återvunnen kartong. Gällande brandsäkerhet togs det inte in i beaktning för projektet då de främst var ett forskningsprojekt och resultaten från det skulle inte direkt appliceras till boendestrukturer eller liknande, utan att undersöka materialet vidare.

Ett ytterligare exempel där återvinning av material som sedan framställts till byggnadsprodukt var forskningsprojektet PHZ2 i Tyskland. PHZ2 upptäckte att stora mängder kartong och papper, runt 16 miljoner ton av material per år, återvinns genom att komprimera dem till balar (Hebel et al., 2014). Dessa balar visade sig vara staplingsbara till höga höjder utan externa regler för att stödja upp dem. PHZ2 projektet byggde därigenom en byggnad med dessa balar som grunden för konstruktionen.

Detta innovativa sätt att använda återvunnet material på var inte bara estetiskt tilltalade utan även kostnadseffektivt, då kostanden var 40% lägre än om den hade byggts med konventionella material (Hebel et al., 2014). Då myndigheten och skaparna inte gick vidare med att brandsäkra projektet ledde det till att byggnaden brann ner till grunden 2011 (Hebel et al., 2014).

2.7. Återbruk och återvinning med godkända brandtekniska egenskaper

För att uppnå klimatdeklarationen jobbar myndigheter som Boverket med att ta fram nya krav för byggnadsdelar, exempelvis fasad, stommar och innerväggar, så att de implementerar de nya klimatkraven. Detta gäller inte bara de cirkulära och miljömässiga aspekterna kring byggnadsdelarna utan även brandkraven på dem. De kan angå allt från brandtekniska klasser, bärande stommar eller ytskiktsskav. Boverkets Byggregler, BBR kapitel 5, är det regelverk som redogör för kravnivåer som skall uppfyllas för att säkerställa ett tillfredställande och säkert brandskydd (Boverket, 2020b). Genom dimensionering av brandskydd kan föreskrifterna uppfyllas genom två tillvägagångssätt;

- Förenklad dimensionering – när de allmänna råden i föreskrifterna följs.
- Analytisk dimensionering – då brandskyddet kan utformas på andra sätt genom analys så att föreskrifternas krav ändå uppfylls.

Då egenskaper hos brandtekniska kravnivåer blir allt hårdare med tiden leder de till att äldre byggnadsprodukter inte klarar dagens föreskrifter. Exempelvis är röktäthet på dörrar mot en utrymningsväg krav i BBR 19 (Wetterqvist, 2021). Tidigare har detta krav inte funnits och därmed har äldre dörrar inte designats för detta, vilket ledet till att de kanske inte kan återbrukas i nya byggnadsprojekt. Utmaningen blir då att uppfylla kravnivåerna för återvunna eller återbrukade produkter enligt förenklad dimensionering. I allmänhet görs analytisk dimensionering för att säkerställa de brandtekniska egenskaperna. Då det är svårt att hitta kvalitativa värden på utformning av analytisk dimensionering blir bedömningarna desto svårare. Detta blir inte bara en tidskrävande samt dyr dimensionering utan medför även signifikanta projektrisker. Ska hållbarhet beaktas som en faktor gällande produkters brandtekniska egenskaper krävs det att regelverket delvis revideras (Wetterqvist, 2021).

2.8. Ytskiktssklassning enligt BBR

Material och ytskiktssklasser är reglerade i europeiska standarder för brandmotstånd och brandpåverkan, dessa standardkravnivåer bestämmer sedan länderna inom EU själva och i Sverige har Boverket satt kraven för byggprodukters brandklassning. Brandklassningen som krävs för ytskikt består av olika huvudklasser, A till E, där tilläggsklasser förekommer om materialet utvecklar brinnande droppar eller rökproduktion (Boverket, 2020b). Byggproduktens bidragande till brandutveckling testas genom standardiserade rumsbrandtester. Exempel på ett sådant test är SBI metod (EN 13823)(Sundström, 2001), dessa produkter hamnar då i en klass. Tabell 1 och Tabell 2 nedan visar vilka klasser som finns för material och produkter i BBR.

Tabell 1, Huvudklasser för byggprodukters ur BBR, boverkets byggregler (2011:6)(Sundström, 2001)

Ytskiktssklass (huvudklass)	Tilläggsklass (underklasser)	SBI-gränser	Exempel på material och byggprodukt	Brandegenskaper vid rumsbrandtest
A1	-	-	Betong	Ingen övertändning
A2/B	s och d	FIGRA \leq 120 W/s THR ₆₀₀ \leq 7.5MJ	Obehandlad gipsskiva	Ingen övertändning
C	s och d	FIGRA \leq 250 W/s THR ₆₀₀ \leq 15MJ	Tapetserad gipsskiva	Övertändning med tändkälla > 100 kW
D	s och d	FIGRA \leq 750 W/s	Obehandlad träpanel	Övertändning
E	d2		Cellplaster	

Tabell 2, Tillägsklasser för byggprodukter ur BBR, boverkets byggregler (2011:6)(Sundström, 2001)

Tillägsklasser	Förtydligande
s1	Byggnadsdelen får avge mycket begränsad mängd brandgaser
s2	Byggnadsdelen får avge begränsad mängd brandgaser
s3	Inget krav på begränsad brandgas produktion
d0	Brinnande droppar eller partiklar får inte förekomma
d1	Brinnande droppar eller partiklar får avges i begränsad mängd
d2	Inget krav på begränsning av brinnande droppar eller partiklar

Klass A och B är produkter som inte tillför alls eller tillför ytterst lite till brandutvecklingen. Produkter och material som kan bidra till att rummet övertänds under ett visst tidsspann är C och D, medan klassen E är för de produkter som leder till mycket snabb övertändning. Tillägsklasserna kombineras endast med A2-D (Boverket, 2020b).

2.9. Byggnadsklasser och verksamhetsklasser

Byggnadsklasser är klasser som delar upp byggnader efter olika skyddsbehov. Skyddsbehoven bedöms efter troliga brandförlopp, byggnadens komplexitet och möjliga konsekvenser av en brand. En byggnad kan innehålla flera verksamhetsklasser, men kan endast ha en byggnadsklass (Boverket, 2020a).

Det finns fyra byggnadsklasser:

- Br0: byggnader med mycket stort skyddsbehov
- Br1: Byggnader med stort skyddsbehov
- Br2: Byggnader med måttligt skyddsbehov
- Br3: Byggnader med litet skyddsbehov

Verksamhetsklasser är klasser som delar upp lokaler efter fyra faktorer:

- Om personer kan förväntas ha kännedom om byggnaden
- Om personer kan förväntas vara vakna
- Om personer kan förväntas utrymma på egen hand
- Om det finns stor risk för brand

Generellt sett finns det 6 verksamhetsklasser:

- Vk 1 - Industri/kontor
- Vk 2 – Samlingslokaler

- Vk 3 – Bostäder
- Vk 4 – Hotell
- Vk 5 – Vårdmiljöer
- Vk 6 – Lokaler med hög risk för uppkomst av brand tex träindustri.

Tabell 3, Godkänd brandteknisk klass på ytskikt i olika byggnadsklasser och verksamhetsklasser.

Byggnadsklass	Lägst brandteknisk ytskiktssklass allmänna utrymmen	Väggar och utrymningsvägar
Br1	C-s2,d0	B-s1,d0
Br2	D-s2,d0	B-s1,d0
Br3	D-s2,d0	För Vk4 och Vk5 – C-s2,d0 För gemensamma väggar s2,d0 För Vk6 B-s1,d0

Tabell 3 visar vilken brandteknisk klass som krävs för att en byggnad ska vara godkänd enligt BBR vid förenklad dimensionering. Beroende på vilken byggnadsklass och verksamhet som bedrivs i byggnaden skiljer sig lägsta ytskiktssklassen för utrymmena något.

2.10. Europeiska och svenska standarder

Standarder för byggprodukter är gemensamma dokumenterade lösningar som utvecklas av aktörer inom industrin, samhället och näringslivet. Detta för att sätta en gemensam nivå för att undvika missförstånd mellan länders processer och produktion som i sin tur leder till en säkrare och mer effektiv verksamhet. Genom olika europeiska klassifikationer säkerställs byggnaders brandsäkerhet med hjälp av provning och beräkningsstandarder för byggprodukter. De europeiska standarderna ges ut av CEN – europeiska standardorganisationen (SIS, 2022).

Klassificering av byggnadsprodukter gällande de brandtekniska egenskaperna och brandklassning samlas i standarden EN 13501. Denna

Dessa brandklasser baseras på resultat från två provningsmetoder, EN ISO 11925-1 och EN 13823. Utöver dessa provmetoder används även ISO 9705, som är en storskalig testmetod för väggar och taks ytskikt i hörn, och ISO 5660, som bland annat mäter HRR (ISO, 2015)

2.10.1. ISO 5660 – konkalorimetermetoden

Enligt ISO 5660 provning utsätts provkroppar med dimensionerna 100 mm x 100 mm för konstant värmestrålning. När ytan av provkroppen värms upp börjar pyrolysgaser att avges som antingen självantänder provkroppen eller antänds via en gniständare. När antändning skett samlas alla

brandgaser upp i en huv och genom mätning av syrgashalt i röken kan effektutvecklingen beräknas (RISE, 2022a).

2.10.2. ConeTools – Mjukvara för prediktion av materials ytskikt enligt EN 13501

ConeTools är en mjukvara som har utvecklats av det svenska forskningsinstitutet RISE. Detta utvecklingsverktyg predikterar Euroklass för ett materials ytskikt i SBI och RCT baserat på resultat från konkalorimetern. Med hjälp av resultaten från konkalorimetern, antändningstiden och den totala effektutvecklingen, ges en god förutsägelse från en liten testkropp till vad som kan förvänta att ett fullskaligt test resultat blir (RISE, 2022b). Programmet förutser även FIGRA- och THR-parametrar för respektive provkropp. Programmet är baserat på en korrelation mellan experiment som har gjorts i både konkalorimeter samt storskaliga tester.

2.10.3. FIGRA – Fire Growth Rate

Klassificeringsparametern FIGRA (Fire Growth Rate) används för att utvärdera material och produkters brandegenskaper som en del av verifiering för CE-märkning. FIGRA är även huvudparametern för klassificering av byggnadsprodukter inom Euroclassnings-systemet vid brandbeteende hos materials ytskikt (Sundström, 2007). FIGRA definieras som en tillväxthastighet och beräknas genom att dividera den maximala effektutvecklingen (HRR_{max}) med tiden det tar för materialet nå den maximala effektutvecklingen (Östman & Tsantaridis, 2006).

$$FIGRA = \frac{HRR_{max}}{t_{max}}$$

Ekvation 1, FIGRA beräknings ekvation

HRR_{max} : maximalt uppnådda energimängd [kW/s]

t_{max} : tiden till den maximala energimängden uppnåddes. [s]

FIGRA-värdet för ett material tillsammans med THR (total heat release) förutses materialets resultat i ett SBI-test. De framtagna klassificerings gränserna för FIGRA jämförs sedan mot gränsvärden för att klassificera materialets ytskiktsklass, se Tabell 3 och Tabell 4 (Sundström, 2007).

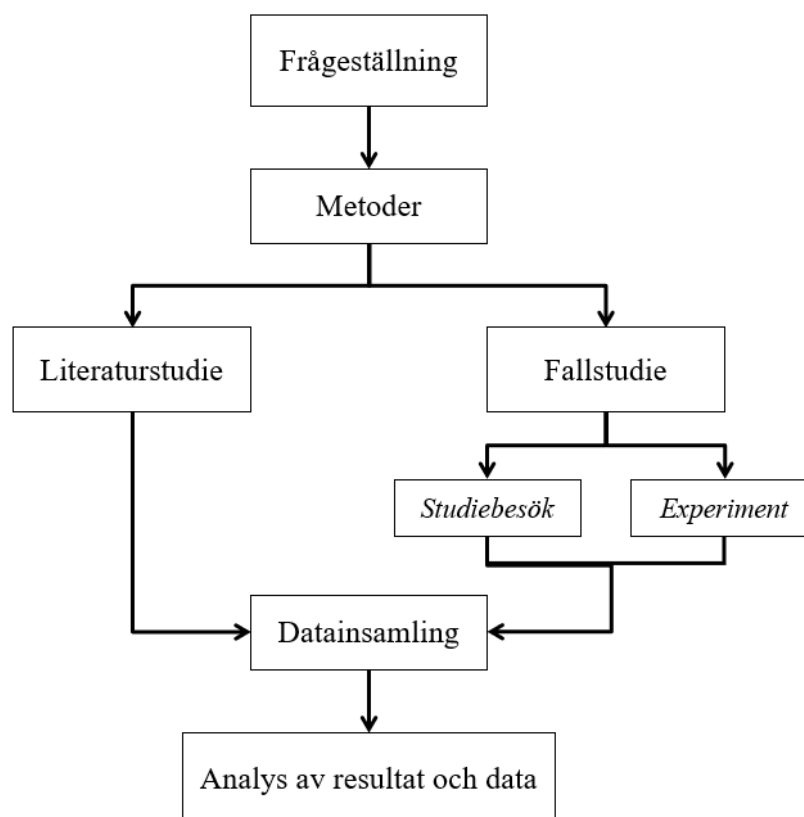
2.10.4. CE-märkning

CE-märkning ges på produkter som en försäkring från tillverkaren att produkten uppfyller de krav som föreligger enligt de föreskrifter och bestämmelser för enskilda användningsområden. Inom EU är det krav på att byggprodukter ska vara CE-märkta för att kunna säljas inom EU (SIS, 2022). CE-märkningens underlag för brandklassning ska vara enligt EN 13501-1 (RISE).

3. Metod

3.1. Genomförande

Arbetsgången för denna rapport består av två delar. Inledningsvis bestämdes en frågeställning sedan utvecklas arbetet i en litteraturstudie och en fallstudie. Avslutningsvis sammanställs allt för att analyseras och utvärderas i resultat och diskussionsavsnitt. Figur 6 visar ett flödesschema på hur processen av arbetet har utförts. Slutligen formuleras en slutsats samt förslag på fortsatt forskning.



Figur 6 Illustration av flödesschema för arbetsmetod

3.2. Litteraturstudie

Det huvudsakliga syftet med litteraturstudien var att söka fakta om information som finns gällande återvinning och återbruk inom byggbranschen idag, vad hållbara byggmaterial är, varför det behövs och vilken tidigare forskning som gjorts på brandbeständigheten hos hållbara material. Då rapporten inte bara baseras på litteraturstudier utan även på en fallstudie, kommer litteraturstudien användas till största del i bakgrunden av rapporten, till teorin och som jämförelseunderlag till diskussionspunkter till fallstudiens resultat.

Sökningarna gjordes till en början breda med hjälp av sökord, se Tabell 4 nedan. Under arbetets gång växte förståelsen för ämnet och på så sätt blev sökningarna mer nischade. Därefter tillkom mer relevanta sökord som kombinerades i olika former. Databaserna som användes för att hitta rapporter, vetenskapliga artiklar, och examensarbeten var LUBSearch, Google och Google Scholar. Ytterligare kompletterades litteraturen med hjälp av underlag från handledare och Lunds universitetsbibliotek.

Tabell 4, visar sökord i olika databaser som använts till litteraturstudien.

Databas	Sökord
LUBSearch	Sustainable, Building Materials, Recycling, Upcycling, Recycling benefits, Recycling waste, Building components, CO ₂ environmental problems with drywall, EN standards, fire, guidelines, Standardization, flame retardant, Återvinning, Byggnadsmaterial, Återbruk, Byggmaterial, cirkulär ekonomi, Sveriges utsläpp av växthusgaser, Globala temperaturökningen, Byggindustrin CO ₂ -utsläpp, ISO, svenska byggstandarder standarder
Google	Sustainable, Building Materials, Recycling, Upcycling, Recycling benefits, Recycling waste, Building components, CO ₂ environmental problems with drywall, UL Class A Fire Barrier, UL723, ASTM E84, Heat of combustion aluminum and oxygen, Burning characteristics of polyethylene, Life cycle assessment, Energy savings gypsum board recycling Återvinning, Byggnadsmaterial, Återbruk, Byggmaterial, Avfallstrappa och avfallshierarkin, cirkulär ekonomi, Sveriges utsläpp av växthusgaser, Globala temperaturökningen, Parisavtalet, Sveriges miljömål, Byggindustrin CO ₂ -utsläpp, klimatdeklaration
Google Scholar	Sustainable, Building Materials, Recycling, Upcycling, Recycling benefits, Recycling waste, Building components, CO ₂ environmental problems with drywall, fire, guidelines, Standardization

	Återvinning, Byggnadsmaterial, Återbruk, Byggmaterial, Avfallstrappa och avfallshierarkin, cirkulär ekonomi, Sveriges utsläpp av växthusgaser, Globala temperaturökningen, Parisavtalet, Sveriges miljömål, Byggindustrin CO ₂ -utsläpp, klimatdeklaration
--	---

Detta resulterade i >500 träffar. Dessa avgränsades genom att välja ut litteratur från senast 2010, endast svenska och engelska artiklar samt de som inriktade sig åt att återanvända material inte bara återvinna dem. I de fall då abstrakten eller sammanfattningen var relevant lästes litteraturen mer noggrant. Detta medförde att ett tiotal publikationer som ansågs särskilt intressanta användes som underlag i rapporten.

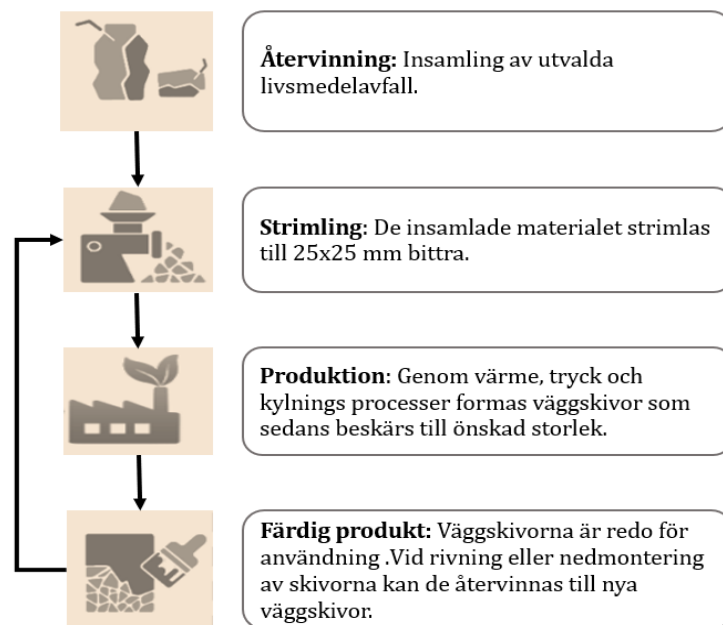
En intressant aspekt är att 100-tals publikationer /träffar kan hittas angående cirkulär ekonomi, återbruk av material, byggnadsprodukter, återvinning och återanvändning inom hållbart byggande. Men genom att söka i kombination med brand (fire) resulterar det endast i ett fåtal träffar. Detta pekar på att kunskaperna i dagsläget är otillräckliga om hur hållbart byggande genom återvinning och återbruk påverkas av att dessa produkter eller material har tillhörande brandkrav och behövs undersökas och utredas mer.

4. Fallstudie

Denna fallstudie undersöker om det finns byggnadsmaterial som skapats av återvunnet avfall som även besitter tolererbara brandtekniska egenskaper för att användas inom byggbranschen idag. Detta genom att genomföra standardiserade tester på byggnadsmaterial som redan finns på den svenska marknaden, samt genom att samarbeta med företaget Recoma.

4.1. Recomas väggskivor – en hållbar lösning

Recoma är ett nytt företag som bildades år 2021. Det är ett företag som inriktar sig på att skapa hållbara byggnadsmaterial i form av väggskivor. Idén med dessa väggskivor är att de ska vara ett miljövänligt alternativ till de konventionella byggskivorna såsom gips och OSB. Enligt Recomas egna LCA visar det sig att skivan de utvecklat har cirka 90 % lägre utsläpp än en gipsskiva och cirka 85 % lägre än en OSB-skiva (Stihl, 2022). Detta uppnås genom att Recomas byggskivor skapas av återvunna livsmedelsförpackningar såsom mjölkförpackningar. Dessa förpackningar innehåller kartong, LDPE-plast och aluminium. Denna ”up-cycling” process av återvunna livsmedelsförpackningar kräver inga bindemedel, då skapandet av byggskivorna sker genom tryck och värme. Det som binder ihop skivan är LDPE-plast som redan finns i förpackningarna i form av plastdetaljer såsom skruvkorkar eller lock. Ytskikten läggs till på skivorna och varierar mellan LDPE-plast (Design) och papper (Basic). Dessa ytskiktmaterial kommer inte från livsmedelsförpackningarna men består ändå av återvunnet LDPE och papper. Detta betyder att 100% av skivan består av återvunnet material samt att Recoma i sin tur inte producerar några restprodukter. Detta har en positiv påverkan på produktionsdelen av produktens livscykel, se produktions-cykeln i Figur 7 nedan. Dessa byggskivor medför grönt byggande då ca 4 miljoner kg av förpackningar blir omhändertagna från deponi och förbränning, som annars hade medfört onödiga koldioxidutsläpp (Recoma, 2021).



Figur 7 Produktionscykel (livscykel) för Recomas väggskivor, illustrationerna i figuren är tagna ur Recomas Environmental Product Declaration 2022

Först strimlas råmaterialet (livsmedelsförpackningar) sönder till 25 x 25 mm stora bitar. Det tillsätts LDPE till blandningen om halten LDPE i livsmedelsavfallet är för låg, likaså om tillsätts respektive ämne om aluminiumhalten eller kartonghalten är för låg. Därefter pressas dessa ihop till skivor genom cykler av hög värme och tryck samt kylning. Under pressningsprocessen läggs ett tunt lager av ytskiktmaterial till för att få en slätare yta. Detta ytskikt består antingen av LDPE eller papper. Därefter sågas skivorna upp till rätt storlek. Eventuellt spill från sågning eller byggspill kan helt enkelt matas in i strimlaren igen, och på så sätt återvinnas. Skivans process är alltså cyklisk och kan teoretiskt sett återvinnas oändligt många gånger. Med Recomas produkt bidrar de inte bara till ett mer cirkulära byggande utan hanterar även avfall och minskar koldioxidutsläpp inom byggbranschen. Då detta kan vara framtidens byggskivor behöver de vara mer hållbart gröna. För att säkerställa att byggnader är säkra för både entreprenörer och innehavare av byggnaden finns det krav från myndigheter som måste uppfyllas (Boverket, 2020b).

Idag används skivorna mestadels som innerväggar. I byggnader som inte kräver en speciell brandklass kan Recomas produkt ersätta både gips och OSB, då skivan har en hög hållfasthet och en relativt slät yta. Den stora begränsningen med denna skiva är att den inte kan ersätta gipsskivor när en viss brandteknisk ytskiktssklass krävs. Vanligtvis används gips för att brandklassa väggar då det tillhör ytskiktssklass A2 och är nästan helt obrännbart. Recomas skiva har en ytskiktssklass på D-s1, d1, vilket är egenskaper som liknar obehandlad träpanel (Recoma, 2022a). Detta gör att Recomas skiva inte lämpar sig till Br1-3 byggnader. Men om denna ytskiktssklass hade kunnat höjas till C eller B, hade Recomas skiva kunnat användas till en stor andel byggnader och kan då bli ett nytt standardmaterial inom byggindustrin.

4.2. Materialval i fallstudien

Produkterna som valts för studie är Recomas Basic och Design varianter. Skillnaden mellan dessa två är att Basic har ett ytskikt av papp medan Design har ett ytskikt som består av LDPE-plast på framsidan och papp på baksidan. Syftet med plasten på framsidan är rent estetiskt, då ett snyggt mönster av de återvunna kartongerna syns genom plasten (se Figur 8).



Figur 8, visar designskivan till vänster och basicskivan till höger



Figur 9, visar den glasfiberbäddad skivan till vänster och den fanerbäddad skivan till höger.

Utöver dessa två varianter av skivan har det utvecklats två varianter till (se Figur 9). Av dessa två är den första en fanerbäddad variant, där syftet är att vara mer estetiskt tilltalande. Den andra varianten kommer från en av Recomas amerikanska motsvarigheter Kelly Green Products. Denna skiva har utvecklats specifikt för att vara en brandbeständig skiva som kan användas för yttertak. Skillnaden på denna skiva är att denna skiva har beklänts med en glasfibernatta i stället för papp. Detta gör att ytskiktet får en mycket hög brandklassning (UL Class A Fire Barrier), vilket är den högsta klassen enligt flamspridningstesten UL723 och ASTM E84 (Coatings, 2022). Det finns ingen standardiserad översättningstabell för ASTM E84 och EN 13501-1, men enligt vissa produkter som är testade med båda standarderna kan Class A ungefär jämföras med Euroklass A2/B (Primacoustic, 2022). Problemet med denna sorts skiva är att den inte kan återvinnas på samma sätt som Recomas skiva kan och blir därför ointressant för Recoma att producera och saluföra i Sverige i dagsläge.

4.3. Brandegenskaper hos komponentmaterialen i Recomas byggskiva

I denna del kommer brandegenskaperna hos komponentmaterialen i Recomas byggskiva utredas individuellt. Detta görs för att få en förståelse kring komponenterna för att därefter få en fingervisning om hur Recomas byggskiva skulle kunna reagera vid brand. Enligt Recoma själva innehåller skivan cirka 65–75 % kartong, 25–35 % polyeten (LDPE) och 1–5 % aluminium (Recoma, 2022b).

4.3.1. Aluminium

Aluminium är en silverfärgad oädel metall som har en relativt låg densitet. Ämnet har en god värmeledningsförmåga och har en smälttemperatur på 660 °C. Aluminium oxideras lätt i luft och bildar en tunn skyddande hinna av aluminiumoxid (Al_2O_3) på ytan. Aluminium brinner generellt inte vid låga temperaturer, men kan brinna vid mycket höga temperaturer och har en förbränningsentalpi på cirka 31,1 MJ/kg. Förbränningstemperaturen för aluminium i rent syre är inte helt klargjord, men ligger på ett intervall på cirka 660 till 1000 °C (GROSSE & CONWAY, 1957). Enligt Grosses rapporters egna klassningssystem är aluminium ett klass två material, vilket betyder att förbränningstemperaturen är högre än smälttemperaturen. I en typisk rumsbrand kan det övre brandgaslagret uppnå temperaturer uppemot 900 °C (Bengtsson & Karlsson, 2013). Detta betyder att i fallet av en rumsbrand, skulle tekniskt sett en förbränning av aluminium kunna ske. Dock förutsätter detta att rummet förbränns i 100 % syre, vilket inte sker i en vanlig rumsbrand. Förbränning av aluminium i luft sker med största sannolikhet vid en högre temperatur än i rent syre. Enligt en artikel förbränns aluminium i luft vid temperaturer runt 2000 °C (Chase, 2022). Om aluminium förbränns vid 2000 °C, skulle detta betyda att aluminium inte förbränns vid en typisk rumsbrand. Detta betyder i sin tur att det aluminium som finns i Recomas material med största sannolikhet inte kommer att förbrännas och bidrar därav inte till en snabbare förbränning av skivan.

4.3.2. Polyeten (LDPE)

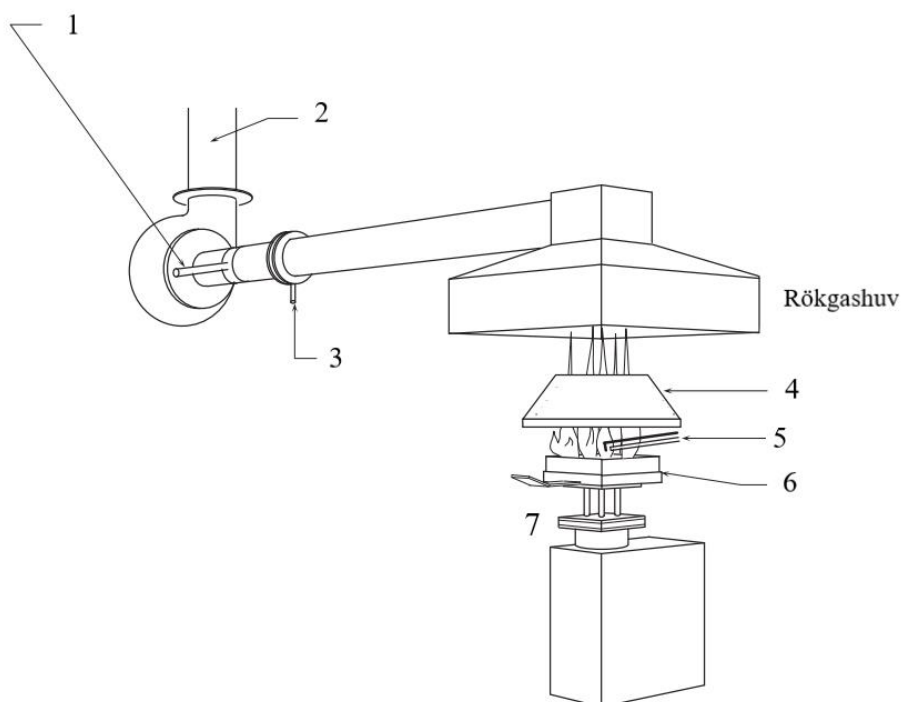
Polyeten är en typ av termoplast som endast består av kolväten. Low-Density Polyethylene (LDPE) är en lågdensitetsvariant av polyetenplast. LDPE är mjuk samt har en tät cellstruktur, vilket betyder att den inte släpper igenom vatten eller luft (Ronca, 2017). Polyeten har en smälttemperatur runt 110–120 °C och brinner relativt långsamt (i förhållande till andra materiel, så som trä). Ämnet har en flampunkt på cirka 221 °C och en termisk tändpunkt på cirka 432 °C (ISCO-PIPE, 1987). PE har en förbränningsentalpi (ΔH_c^0) på 43,6 (MJ/kg) (Karlsson & Quintiere, 2000). De 25–35 % av LDPE i Recomas material kommer med största sannolikhet att förbrännas och bidra till den totala brandeffekten.

4.3.3. Kartong

Kartong är ett cellulosabaserat pappersmaterial. Kartong är ett samlingsnamn för många olika sorters tjockare pappersprodukter. Skillnaden mellan papper och kartong kan ibland vara svår att särskilja. En tumregel är att kartong ofta består av flera olika skikt och har ofta en ytvikt över 150 g/m^2 (Skogsindustrierna, 2022). I detta fall är kartongen av en tunnare typ som används till livsmedelsförpackningar såsom mjölkförpackningar. Enligt en amerikansk studie har kartong en förbränningsentalpi på cirka $16,2 \text{ MJ/kg}$ (Agarwal et al., 2014). Flampunkten för kartong är cirka $258 \text{ }^\circ\text{C}$ och den termiska tändpunkten är cirka $427 \text{ }^\circ\text{C}$ (TIS-GDV, 2022). Då dessa två temperaturer ligger långt under en typisk rumsbrandstemperatur är det mycket sannolikt att Recomas material kommer att brinna och bidra till den totala brandeffekten.

4.4. Experiment

Som en del av fallstudien, utförs tester på skivmaterialet enligt ISO 5660, för att undersöka brandtekniska egenskaper hos olika material, genomfördes systematisk provning. För detta arbete genomfördes testning genom att använda en konkalorimeter (ISO, 2015). Metoden är effektiv då småskaliga provkroppar utsätts för värmestrålning och ger en stor mängd mätdata som kan analyseras. En annan fördel med denna metod är att den kan snabbt användas som ett screening-verktyg för att fastställa vilken materialtyp som bör utföras som fullskaliga tester. Mätdata innefattar effektutveckling, massavbrinning, rökproduktion och tid till antändning. Idag är testmetoden välanvänd runt om i världen på grund av dess stora användningsområde (Van Hees et al., 2010).



Figur 10 konkalorimeter och dess delar: 1-Laser röknätare, 2-Flödesmätare av temperatur och tryck, 3-Gasprovs mätare, 4-Värmare (konen), 5-Gnisttändare, 6-Provkropp, 7-Våg (anpassade efter RISE) (Van Hees et al., 2010).

Resultatet från mätdata används till modellering av större brandförlopp istället för att utföra fullskalig provning med ISO 9705 Room Corner Test (RCT)(ISO, 2016). Vilket är en fullskalig brandprovningssmetod som används för att få fram en brandteknisk ytskiktssklass. Medelstora provningar utförs med EN 13823 Single Burning Item (SBI) tester (ISO, 2016), som är en brandprovningssmetod där provningen utvärderar byggprodukters brandegenskaper. Där modellering med ConeTools predikterar vilka resultat förmodligen skulle fås från storskalig eller medelskalig testning. Utöver det används konkalorimetern för både produktutvecklingen och produktkontroll. Då det är en kostnadseffektiv metod där en liten mängd material testas men en stor mängd data fås ut av testet (RISE, 2022a).

4.5. Genomförande av experiment

I detta arbete användes provkroppar av storleken 100 x100 mm² som placerades i en hållare med ett galler ovanpå, som ställdes på vågen i konkalorimeter. Där utsattes provkroppen för en förbestämmd värmestrålning och en gnisttändare fördes in samtidigt som provkroppen exponerades för värmestrålningen. Vid antändning fördes gnisttändaren bort från provkroppen. Testerna utfördes enligt ISO 5660–1-standard och datainsamling för varje test påbörjades minst 60 sekunder innan provkroppen placerades på vågen. När alla flammor slocknat på provkroppen antecknades tiden och testet avslutades. Varje provkropp konditionerades, vägdes och mättes före testerna. Konditioneringen gjordes i en medeltemperatur på 21,9 °C och en relativ luftfuktighet på cirka 42,3. Skillnader mellan

provkropparnas tjocklek beror på materialets heterogena sammansättning och ska egentligen vara 12 mm tjockt. Efter utförandet av testerna vägdes provkropparna igen för att mäta massförlusten. Totalt utfördes 20 tester, se Tabell 4. Resultaten från testerna användes sedan i ConeTools för att prediktera vilken ytskiktssklass materialet skulle få om det testades i SBI eller RCT.

Då metoden kräver att materialen kvarstår i minst 600 s för att få godkända mätvärden enligt standarden förekom osäkerheter angående om materialet skulle brinna upp för snabbt (dvs innan 600). Vid diskussion med handledare och sakkunnig angående programmets begränsningar samt om materialets sammansättning (mycket plast), bestämdes det att en lägre strålningsnivå på 25 kW/m² skulle garantera godkända mätvärden och en högre nivå (40 kW/m²) skulle användas som jämförelse. Detta för att garantera godkända testresultat.

Tabell 5, information om alla provkroppar samt strålningsnivån de utsatts för i konkalorimetern. Teckenförklaring: D-Designskivor, B-Basicskivor, G-Gipsskivor

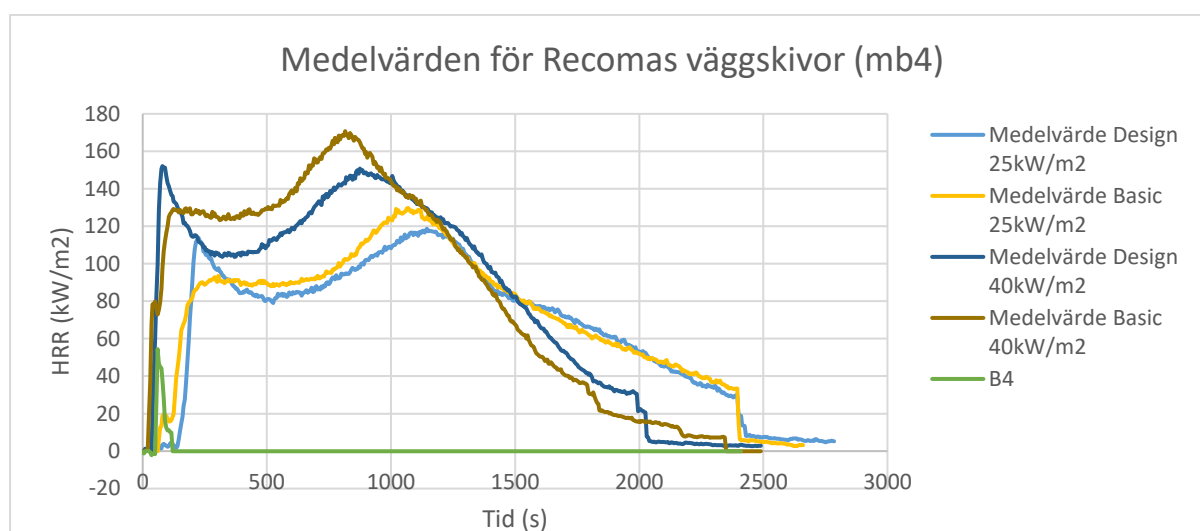
Provkropp	Massa (g)	Storlek (mm ³)	Strålning (kW/m ²)
G1	95.3	100x100x12	25
G3	92.7	100x100x12	40
D1	99	100x100x11	40
D2	102.4	100x100x11	40
D3	93.1	100x100x11	40
D4	97.7	100x100x11	25
D5	101.8	100x100x11.5	25
D6	101.1	100x100x11.5	25
D7	84.2	100x100x11	25
D8	105.8	100x100x11	40
D10	82.1	100x100x12	40
B1	116.6	100x100x11.5	40
B2	100.4	100x100x12	40
B3	98.1	100x100x11	25
B4	110.4	100x100x11	25
B5	110	100x100x11	25
B6	108.8	100x100x11	25
B7	100.3	100x100x11	25
B8	98.6	100x100x11	40
B9	110.9	100x100x11	40

5. Resultat

Kapitlet Resultat presenterar grafer och tabeller med de sammanfattade resultaten från konförsöken och ConeTools. Genomförandet återfinns i metodkapitlet samt analys av resultaten finns i diskussionen.

5.1. Resultat från Konkalorimetern

Nedan presenteras en sammanställning baserat på representativa HRR resultat från utförd fallstudie. De försök som har samma förutsättningar har slagits ihop till ett medelvärde för att samla data till en enda kurva. Resultat för samtliga HRR-kurvor finns i Appendix (se figur 15-19).



Figur 11, grafen visar HRR-kurvor från fallstudiens experiment.

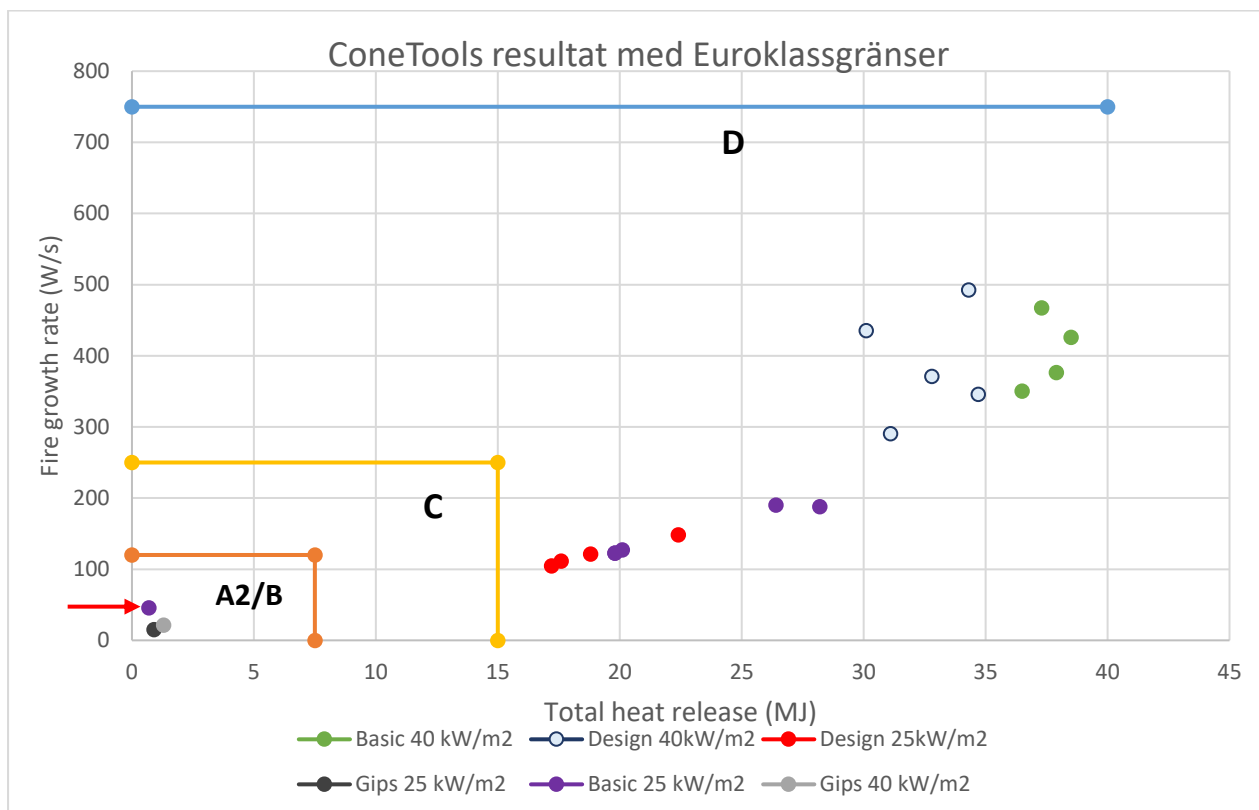
Figur 11 visar effektutvecklingskurvorna för experimenten. Exempelvis har alla designskivor som utsatts för 25 kW/m² slagits ihop till en medelvärdeskurva. Medelvärden är gjort per tidssteg.

Figur 11 visar att skivornas ytskikt påverkar provkropparna olika gentemot varandra genom hela brandförloppet. Men förhåller sig likvärdigt mellan samma skivsort. Alltså framgår mönster mellan Design 25 kW/m² och 40 kW/m² då kurvorna har likande form, skillnaden är att 40 kW/m² uppnår en högre effektutveckling. Desamma gäller för Basic skivorna. Design skivorna har en tydlig högsta HRR topp i början av brandförloppet. Denna topp på HRR överstiger ej där efter. Medan Basic skivorna har sin högsta HRR topp innan effektutvecklingen avtar.

Medelvärdet för Basic 25 kW/m² utelämnar resultatet från testet B4 då den är ett extremvärde och har en stor avvikelse från de övriga testerna i denna kategori (se kapitel 6.3). Anledningen till att B4 utesluts ur medelvärdeskurvan är att resultatet från detta test kommer påverkat medelvärdet för hela kurvan (Basic 25 kW/m²) drastiskt och göra den blir missvisande. Observera att B4 inte utesluts ur datahanteringen i övrigt utan bara i Figur 11 medelvärdeskurva för Basic-värden vid 25 kW/m².

5.2. Resultat från ConeTools

I Figur 12 visas resultaten för varje test som gjorts. Även gränserna för A2/B, C och D-klasserna visas i figuren. Då Eurocode-ytskiktssklasserna baseras på både fire growth rate (FIGRA) och total heat release (THR), presenteras resultaten av experimenten i förhållande till dessa egenskaper. Detta gör det lätt att se om ett material/försök är nära eller långt ifrån att uppfylla kraven för en önskad ytskiktssklass. I vänstra hörnet av grafen i Figur 12 syns outlier B4 med likvärdigt resultat för gips (se röd på i figuren). Gipsens tester hamnar inom klassning A2/B i figur 12.



Figur 12, grafen visar resultatet från ConeTools-approximationerna.

I Tabell 6 redovisas en sammanställning av medelvärde för antändningstider för de olika strålningsnivåerna från kontesterna.

Tabell 6, visar medelvärden för Basicskivorna och Designskivorna i respektive strålningseffekt. Kvoten är tiden för Basic dividerat med Design.

Medelvärde för antändning	Tid (s)	Standardavvikelse (+ -)
Basic 25 kW/m²	89.2	35.1
Design 25 kW/m²	155.0	13.0
Kvot för 25 kW/m²	0.6	
Basic 40 kW/m²	23.5	2.5
Design 40 kW/m²	39.6	8.4
Kvot för 40 kW/m²	0.6	

6. Diskussion

6.1. Ytskiktssklass för ett material av återvunna livsmedelsförpackningar

Resultaten i Figur 12 visar tydligt att materialet hamnar i den brandtekniska ytskiktssklassen D. Vissa av resultaten gränsar till området vid ytskiktssklass C. Huvudklasserna i standarder för byggnadsmaterial besvara frågan hur snabbt och hur mycket energi ett material besitter. Medan tilläggsklasserna bedömer materialets rökproduktion och egenskaper för brinnande droppar. För att material skall förändra sin användningspotential krävs inte bara att materialet ökar i den brandtekniska huvudklassen (A2/B, C eller D) utan även att tilläggsklasserna förbättras. De tester som utförts har endast utrett om det funnits potential för förbättrad huvudklass samt att fastställa vilken huvudklass en skiva tillverkad av ett återvunnet avfallsmaterial kan uppnå. För att undersöka huruvida materialet verkligen kan ändra sin klass behövs tester enligt EN-13823 standarden (SBI) därför att bara öka huvudklassen inte tar hand om otillräckliga brandtekniska tilläggsklasser. I BBR finns olika krav för att utforma ett tillfredställande säkert brandskydd utifrån förenklad dimensionering. Kriterierna för ytskiktssklasser kan ses i Tabell 1 och Tabell 2 i teorikapitlet. Då BBR kräver att alla delar i ytskiktssklassen ska uppnå lägsta nivåer, krävs information om underklasser för att utreda användningsområdet för materialen fullständigt. Förenklat betyder detta att material kan förbättras från D-s1,d1 till C-s1,d1, men eftersom tilläggsklassen för dem måste uppnå lägsta godtagbara nivå kan de inte användas i sådana utrymmen som kräver exempelvis d0 i dropp. För att vidareutveckla materialets klassning bör droppklassen undersökas vidare som ett första steg vilket inte kan göras enbart med konkalorimetern.

Vart kan då en väggskiva av ett återvunnet material av livsmedelsförpackningar användas enligt BBR idag? Utifrån resultaten finns det begränsat användningsområde för den typ av material inom byggbranschen då den inte uppnår tillräckligt höga brandtekniska egenskaper. I dagsläget kan inte materialet användas när det ställs ett brandtekniskt krav från BBR. De testade skivorna kan i sin nuvarande utformning användas i hemmabyggen, innerväggar i villor och allmänt eget bruk av materialet, då villor ingår i byggnadsklassen Br3. Ett mer invecklat svar är att materialet inte ska användas i Br3 klassade byggnader om det inte förses med en högre brandteknisk skyddande yta.

Materialet kan användas inom fler byggnadstyper om förenklad dimensioneringen frångås och användning av andra tekniska tillämpningar som påvisar att materialet är säkert för att användas i andra byggnads- och verksamhetsklasser. Men detta kräver analytisk dimensionering med både beräkningar och djupgående riskbedömningar.

6.2. Spridning av resultaten mellan försöken med 25 kW/m² och 40 kW/m²

Under utförandet av testerna uppmärksammades det förhållandevis tidigt att materialet har vissa skillnader där det kommer till extern strålningspåverkan. Både mellan de olika skivorna (Design och Basic) men även mellan provkropparna av samma skivsort. Detta resultat var inte oväntat då skivorna är heterogena i sin sammansättning. Detta återspeglar resultatet för ConeTools i Figur 12 och för HRR kurvorna i Figur 15 till Figur 19 i appendix.

Då ConeTools är en mjukvara som använder resultaten från testerna för att ta fram teoretiska predikteringar för storskaliga tester, ser vi även här skillnad i resultaten beroende på vilken strålningsnivå som användes under testet. Vanligtvis borde inte en sådan stor spridning ske då programmets avsikt är att korrigera de olika parametrarna. Det finns en gruppering för 25 kW/m² och en för 40 kW/m². Båda grupperingarna hamnar inom klassningen för den brandtekniska ytskiktsskissen D (se Figur 12).

Resultatet i Figur 12 visar tydligt att testerna som gjordes med 40 kW/m² har THR och FIGRA-värden som är systematiskt högre än testerna som gjordes med 25 kW/m². En förklaring till detta beteende kan vara att ConeTools framför allt är framtagen till att skala upp tester som görs i 50 kW/m² till SBI och RCT. Då ConeTools är kalibrerat för 50 kW/m² ger andra effekter en sämre prediktion vid större avvikelser från detta kalibrerade värdet. Vid samtal med en av ConeTools skapare (Patrick Van Hees), indikerar han att detta är en begränsning med programmet. Detta skulle i så fall tyda på att resultaten på testerna som är utförda på 40 kW/m² är något mer tillförlitliga än de som gjorts på 25 kW/m² för att prediktera ytskiktsskissen. Dessutom har handberäkningar av resultatet från konkalorimetern verifierat denna tes/observation då det sker viss spridning mellan vad konens resultat ger i ConeTools beräkningar (se Appendix Tabell 12).

Vidare diskuterades resultaten från konen och ConeTools med sakkunnig och handledare angående strålningsnivåerna som valts. I efterhand är det tydligt att utförda tester på en strålningsnivå av 50 kW/m² hade bidragit till mer valida resultat från ConeTools, samt att materialet hade klarat av kravnivån (600 sekunder) för standarden i ISO-5660.

6.3. Basicskivans effektminskning efter 10 sekunder

En intressant observation som gjordes under försöken var att basicskivorna med 25 kW/m² strålning hade svårt att ha en fortsatt kontinuerlig förbränning. När ytskiktet av papper väl fattade eld brann det i ungefär 10 till 20 sekunder, sedan sjönk brandeffekten. I de flesta av fallen ökade brandeffekten igen efter ett tag, men i ett av testerna (B4) slocknade branden helt vilket orsakade att ConeTools allokerade en mycket bra brandklass till materialet vid det specifika testet (se Figur 12). Anledningen till denna effektminskning i det tidiga stadiet är inte helt känd. Då detta fenomen inte observerades i designskivorna som har ett ytskikt av LDPE, kan det förutsättas att det är pappret på basicskivan som

ligger till grund för detta. Tre teorier till varför skivan hade svårt att ha en kontinuerlig förbränning igång (som delvis konvergerar) är:

1. Pappret bildar ett skyddande sot/ask-lager efter förbränning, vilket gör att kartongen inte värms upp och kan därför inte antändas tillräckligt för att förbränningen ska komma igång snabbt.
2. Pappret innehåller ämnen såsom lera som är oantändliga. Detta gör att endast den lättantändliga cellulosan antänder. Vid förbränning sjunker andelen antändliga ämnen i pappret och på detta sätt minskar effekten. När cellulosan har brunnit upp finns endast de icke antändliga ämnena kvar i pappret. I de flesta av fallen har tillräckligt mycket energi transporterats in i kartongen under och på så sätt också börjat brinna. I ett av fallen kan det vara att cellulosan brunnit upp så snabbt att energin inte har kunnat transporteras till kartongen för att fortsätta förbränningen. Det återstående oantändliga ämnena bildar ett isolerande lager som transporterar bort strålningsenergin från konvärmaren som skulle ha absorberats av kartongen.
3. Att materialet är inhomogent vilket innebär en större möjlighet att mindre prov tagna från större skivor uppvisar avvikande brandbeteende, vilket inte är representativt för hela skivan. Genom att utföra fler prover eller genomförande av storskaliga prover kan detta undersökas ytterligare.

Ett definitivt svar på detta beteende är mycket svårt att komma till botten med då det finns såpass lite data vilket gör det svårt att verifiera teorierna. För att verifiera dessa krävs ytterligare tester där basicskivans ytskiktetsbeteende specifikt mäts, observeras och där tester genomförs med eller utan det skyddande skiktet.

6.4. Skillnader i antändningstid

En intressant upptäckt som gjordes under experimenten var att designskivorna generellt tog cirka 40 % längre tid att antända än basicskivorna (se Tabell 6). Detta beror på att plasten på designskivorna uppenbarligen kräver mer energi för att antända. Denna större energimängd kan bero på flera faktorer:

- **Fasövergångar.** För att plasten på designskivan ska kunna utveckla pyrolysgaser och antändas krävs det att plasten först smälter. Polyeten har förvisso en relativt låg smältpunkt, men att både göra fasövergången från fast fas till vätskefas och sedan från vätskefas till gas krävs det en mycket stor mängd energi. För att pappret på basicskivan ska kunna ge pyrolysgaser krävs endast en fasövergång – från fast fas till gas. Generellt sett är det fasövergångar som den största energiförlusten görs.
- **Värmetransporten** kan skilja sig stort mellan materialen. Papper har exempelvis en mycket låg värmekonduktivitet på cirka 0,05, medan LDPE har en något högre på 0,33 (ToolBox, 2003). Detta skulle kunna betyda att plasten transporterar bort en större andel energi genom konduktion. När det gäller den infallande strålningen från konvärmaren reagerar de två materialen relativt olika. Då pappret är ett matt material antas det att dess reflektans är lägre än plastens glatta yta. Detta betyder att en större andel av konvärmarens strålning reflekteras bort från plasten än vad det gör hos pappret. Något som försvårar uppskattningen ännu mer är att plastens värmetransporterande egenskaper förändras när den smälter. I slutändan är den totala värmetransporten med största sannolikhet högre hos plasten, dock hur stor skillnad den gör jämfört med fasövergångar mm. är mycket svårt att uppskatta.

Skillnaden är antagligen en komplex kombination av brandkemi och fysikaliska fenomen. Detta gör det mycket svårt att helt redogöra varför antändningstiden var så mycket längre på designskivorna. Dock ger de två punkterna en delvis förklaring till fenomenet.

6.5. Alternativ för att öka Euroklassen utan att ändra materialkompositionen

För att skivorna som har testats ska kunna uppnå en högre ytskiktssklass måste FIGRA-värdet och THR-värdet minska. Av dessa två faktorer är THR den viktigaste då samtliga tester kräver ett lägre THR-värde (se Figur 12). Det finns många sätt att minska energimängden i materialet. Några av dessa skulle kunna vara att:

Minska tjockleken på skivan. Mängden energi minskar helt enkelt genom att mängden material per ytenhet minskar.

Den tunnaste skivan som Recoma kan tillverka är 9 mm tjock. Om de testade skivornas tjocklek hade minskats till 9 mm skulle THR-värdet sjunka. Den teoretiska THR som fås ut av dessa beräkningar visar att testerna D5, D6 och D7 hade hamnat under 15 MJ (se Tabell 10). Detta betyder att de hade kunnat få Euroklassen C. Vidare provning behövs för att kunna utreda denna fråga närmare.

Öka andelen aluminium i materialet. Genom att öka andelen av det material i skivan som inte brinner, sjunker den totala energimängden. Då Recoma helst inte vill blanda i andra material än de som redan finns i skivan, kan det vara ett alternativ att öka mängden aluminium. Dock finns en gräns på hur mycket aluminium som kan blandas in, då en för hög andel aluminium gör att tillverkningsprocessen blir svårare eller omöjlig.

Om aluminiummängden skulle öka från cirka 5 % till 10 % hade den totala energimängden sjunkit med cirka 10 % (se stycket om Teoretiska beräkningar av energi i Appendix). För testet som ligger närmast gränsen för Euroklass C (D6) hade en sänkning med 10 % gett en THR på cirka 15,8 MJ. Då gränsen för Euroklass C ligger på 15 MJ, räcker det alltså inte att endast ändra andelen aluminium. Detta förutsätter att mängden aluminium kan öka med 5 procentandelar, vilket i verkligheten kanske inte är möjligt.

Både öka andelen aluminium och att ha tunnare skivor. Om dessa två tillvägagångssätt hade kombinerats så hade testerna D5, B3, D6, B7 och D7 understigit 15 MJ (se Tabell 11).

De tester som understigit 15 MJ efter åtgärder garanterar inte att skrivmaterialet i stort blir godkänt för C-klassen efter åtgärder, då osäkerheterna mellan teori och experimentella data är för stora. Dock är de bra fingervisningar på hur nära materialet ligger för att uppnå C-klassen. Att göra en mer djupgående undersökning på detta rekommenderas starkt om det önskas att höja Euroklassen på skivorna.

6.6. Finns det miljövinster med material av återvunna livsmedelsförpackningar

I denna del kommer diskussionen handla om miljövinster som görs om konventionella skivmaterial såsom gips skulle bytas ut till ett skivmaterial som liknar skivorna i fallstudien. De potentiella miljövinster kan analyseras från olika synvinklar:

- Utifrån ett materialtypsperspektiv där ett material jämförs mot ett annat. Jämförelsen görs endast på de tekniska data (såsom ”reaction to fire”) som materialen besitter samt livscykelanalys på en skiva.
- Utifrån ett mindre systemperspektiv såsom ett hus.

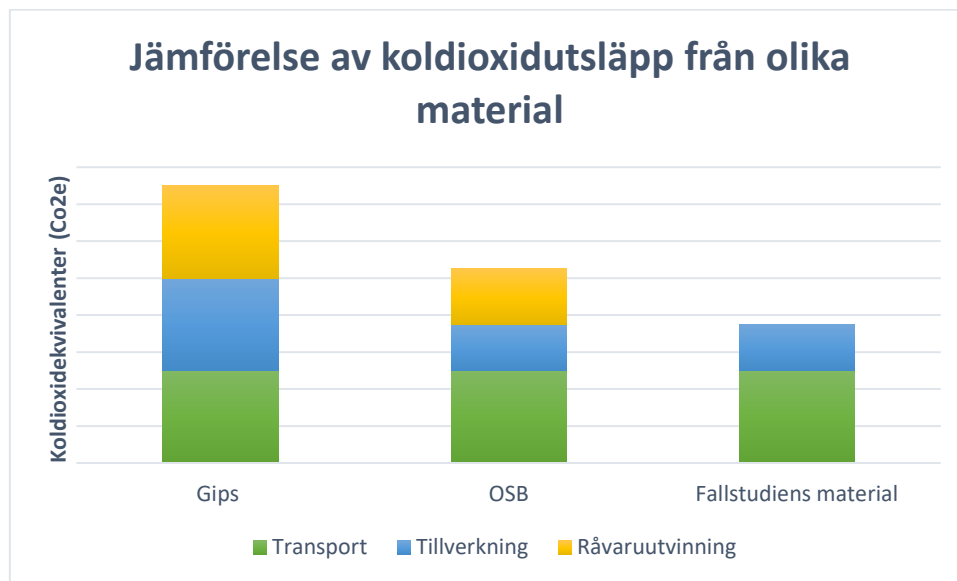
6.6.1. Materialtypsperspektiv

När det gäller materialtypsperspektiv jämförs framför allt mängden koldioxidkvivalenter som ett material släpper ut i sin livscykel. Detta innefattar hela tillverkningsprocessen, användning och slutskedesprocessen. Att uppskatta ett materials totala bidrag av koldioxidkvivalenter är mycket svårt. För att få en helt korrekt kvantitativ bedömning krävs det att samtliga faktorer beaktas som påverkar koldioxidemissioner. Detta är utanför rapportens omfattning. Bedömningen baseras främst på vilka kategorier av koldioxidutsläpp som de olika skivmaterialens tillverkningsprocesser bidrar till.

För att göra en enkel kvalitativ analys av dessa utsläppsmängder har en illustration av detta gjorts (se figur 13). För att rita figuren har vi antagit att storleksordningen av CO₂ utsläpp är:

- Likvärdig för transport av produkterna.
- Likvärdig mellan OSB och fallstudiens material för tillverkningen av materialen. För gips finns LCA som indikerar på att de bidrar med en större mängd än andra byggnadsmaterial.
- Skilda varandra gällande råvaruutvinning. Enligt Recoma har de inte några utsläpp i denna kategori, medan gips och OSB enligt avger utsläpp vid produktion och jämförs mot varandra därefter. Enligt Ruuska avger gips en större mängd totala koldioxidutsläpp än OSB (Ruuska, 2013). Detta betyder att stapeln för gips i figur 13 måste vara högre än den för OSB.

Det är viktigt att notera att dessa antaganden är mycket grova men de ger ett basis för en enkel jämförelse utan att göra regelrätta LCA beräkningar och baserar sig grovt på litteraturundersökningar (Ruuska, 2013).



Figur 13, Grafisk representation av koldioxidutsläpp.

Gips bidrar med utsläpp till kategorierna transport, tillverkning samt råvaruutvinning. Detta beror på att råmaterialet utvinns i detta fall från ett gipsbrott. Därefter transporteras materialet till fabriken och kan då påbörja tillverkningen av skivorna. Slutligen måste de färdiga skivorna transporteras till grosshandlaren.

OSB-skivor bidrar med utsläpp till kategorierna transport, tillverkning samt råvaruutvinning. Råvaruutvinningsutsläppen kan dock antas vara mindre jämfört med gips, då OSB tillverkas av trä som är en förnybar källa. Att utvinna virke från träd är en process som anses vara mindre miljökostsamt än den gruvverksamhet som sker för att utvinna gips (Quintana et al., 2018). Först måste råmaterialet samlas in från huggna träd, därefter transporteras virket till fabriken där det finfördelas och sedan limmas ihop till färdiga OSB-skivor.

Fallstudiens materials livscykel påbörjas när råmaterial hämtas från återvinningscentralen. Därefter transporteras råmaterialet (avfallet) till fabriken där de producerar väggskevorna. Restprodukten som skivan skapas av hade i vanliga fall förbränts och bidragit till koldioxid i atmosfären. Men om produkten binds i skivan, kan det på så sätt fördröja koldioxidhalterna i atmosfären. Råvaruutvinningen i detta fall blir att transportera råmaterialet från återvinningscentralen till fabriken och kan därför räknas till kategorin transportutsläpp i Figur 13. Fallstudiens byggskevorna faller då endast inom kategorierna transport och tillverkning.

Gips får det högsta approximerade värdet i jämförelsen. När det gäller fallstudiens material och OSB ligger de närmare varandra, dock visar Figur 13 att fallstudiens material har den lägsta totala utsläppsmängden. Detta beror framför allt på att fallstudiens material inte bidrar med råvaruutvinningsutsläpp. För att utreda mer exakta värden på materialens koldioxidutsläpp krävs en djupare numerisk utredning. Ur ett brandskydds-perspektiv har fallstudiens skiva en sämre

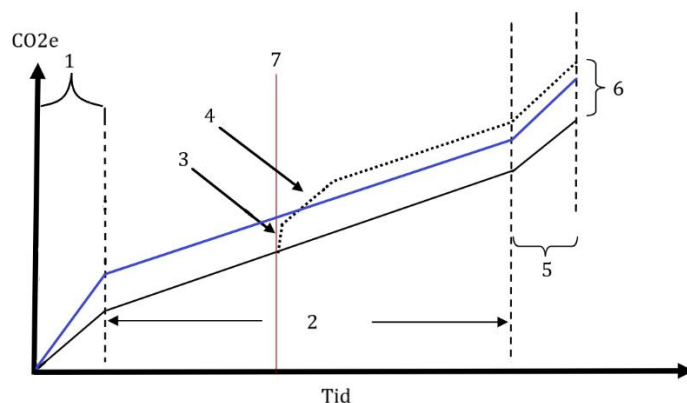
brandteknisk ytskiktssklassning (D-s1-d1) än OSB-skivan som har en klassning D-s1-d0. Gipset har en klassning på A2/B vilket helt klart är det bästa av alternativen. Det går därför att ifrågasätta om det är mer värt att använda ett miljövänligare material men som har sämre brandtekniska egenskaper, eller tvärt om. Denna fråga ligger något utanför materialtypsperspektivet och kommer därför diskuteras i systemperspektivet.

6.6.2. Systemtypsperspektiv

I frågan om ett mindre systemperspektiv med ett material som anses hållbart och skapat utifrån återvunna livsmedelsförpackningar, är det intressant att se hur hållbarheten förändras vid påverkan av brand. Då dessa återvunna eller till och med återbrukade material inte testats i samma utsträckning som ett konventionellt byggnadsmaterial, är det svårt att göra numeriska bedömningar och jämförelser. Men däremot går det att göra en grafisk representation av resultaten och observationerna av fallstudien i form av ett diagram för gips och fallstudiens material. Där jämförs den miljömässiga aspekten inom hållbarhet för skivorna.

I Figur 14 jämförts (ej numeriskt) materialens livscykel under byggnationen av ett hus. Den svarta linjen representerar fallstudiens material och den blå linjen gips. I figuren undersöks miljöpåverkan av materialen i form av koldioxidutsläpp över tid, där första delen av grafen (1) utgör produktionen av materialet, transport och byggnation av ett hus. Den blå linjen har en brantare lutning i denna del då gipset har en större miljömässig produktionskostnad. Under utnyttjandet av byggnaden (2) finns ingen skillnad mellan materialens koldioxidutsläpp. Detta beror inte på materialens utsläpp i sig, utan utsläpp genom exempelvis uppvärmning av huset. Vid demontering (5) av byggnaden sker en ökning av utsläpp för båda materialen. Om inga oförväntade skador eller händelser påverkar byggnaden resulterar det i att fallstudiens material har bidraget med en lägre utsläppshalt än vad gipset har. Skillnaden i detta fall kan antas vara lika stort procentuellt som mellan materialen, vilket visas i kapitel 6.6.1 (se figur 13). Dock existerar det alltid en risk för brand när det gäller byggnader. Om det inträffar en brand (7) förändras resultatet. Vid brandpåverkan kommer fallstudiens material att förbrännas fullständigt, om inte tidig släckning sker. Vilket medför att en total ombyggnation krävs (3)(4). Detta representerar den svarta streckade linjen i figur 14. Vid liknande brandpåverkan för gipset kommer mildare skador på byggnaden att ske, vilket inte medför en ombyggnation. Dock bör de gipsskivor som exponerats av branden bytas ut, men detta kräver ingen ombyggnation utan endast

ersättning. Därav sker ingen skillnad gällande brandpåverkan för gipset i figur 14. Resultatet av en brand medför att fallstudiens totala koldioxidutsläpp ökar.



Figur 14 Grafisk illustration av miljöpåverkan hos två material under en byggnads hela livscykel baserat på Zorek alt. Teckenbeskrivning: 1. Produktion och byggskede, 2. Användandet, 3. Brandpåverkan, 4. Ombyggnation, 5. Demontering, 6. Koldioxidutsläpps ökning vid brand, 7. Brand inträffar

Detta tankesätt är taget från *Environmental Impact of Automatic Fire Sprinklers* där de gjorde en liknande jämförelse för sprinklers inverkan vid brand och dess miljöpåverkan (Wieczorek et al., 2010). Vid jämförelse mellan dessa tre resultat (6) går det att dra slutsatsen att ett hållbart material är en bra lösning gällande koldioxidutsläpp än vad gips är, detta förutsätter dock att inga oförutsedda händelser sker. Att en brand inträffar förändrar denna vinst i koldioxidutsläpp. Då ett hus byggs av material med högre brandsäkerhet bidrar det med en högre utsläppsmängd, men de lönar sig då större ombyggnationer på byggnaden inte krävs. I fallet med ett hållbart material som fallstudien bidrar det med ett lägre initialt utsläpp, dock vid brand kommer ombyggnationen att leda till ytterligare utsläpp. Där genom försvinner vinsten av de miljövänligt låga koldioxidutsläppen. Genom att utveckla och förbättra fallstudien material så att de besitter en högre brandsäkerhet, tyder resultatet på att i längden fås ett lägre koldioxidutsläpp. Även om den initiala utsläppen (1) blir något större.

Hållbara material som minskar miljöpåverkan är absolut ett steg i rätt riktning gällande hållbar utveckling. Dock avfärdas ofta dessa material, detta kan bero på många faktorer men en av dem är kraven för brandsäkerheten. Är det då inte rimligt att offra en liten del av materialets miljövinna på att öka säkerheten för exempelvis brandpåverkan? På längre sikt undviks ombyggnation och materialet kan även användas i större utsträckning.

6.7. Begränsningar i forskningsmetod

Då resultaten från fallstudien tyder på oklarheter gällande tillförlitligheten hos ConeTools kalibrering vid lägre strålningsnivåer, har vi kommit fram till att det finns förbättringsmöjligheter vid användning av metoden ISO 5660. Detta beror delvis på hur materialet uppförde sig vid brandpåverkan och hur ConeTools kan användas.

Detta leder till att Fallstudiens upplägg/utförande som användes kan utvecklas för att få fram mer konkreta svar i testmodellen som ConeTools lättare kan prediktera resultaten från. För det första borde vi undersökt tre strålningsnivåer istället för endast två. Dessa strålningsnivåer bör då ligga närmre den strålningsnivån som ConeTools är designat för. Förslagsvis är dessa:

- 35kW/m²
- 40kW/m²
- 50kW/m²

Till följd av detta borde spridningen vara mindre i resultatet och tydligare indikera vart materialet ligger inom den brandtekniska huvudklassen (D eller annan klass). Vi valde att inte genomföra undersökningen på 50 kW/m² då informationen om materialets brandpåverkan inte fanns tillräckligt och vi inte ville ha ogiltiga testresultat. För att ett testresultat ska vara godkänt måste materialet kunna undersökas för brandpåverkan/strålning i minst 10 minuter. Efter utförandet av fallstudien vet vi nu att materialet har god potential att utstå/klara kon-tester med denna strålningsintensitet.

Ytterligare förbättringspotentialer finns gällande att utöka antal provkroppar som testas. Inte bara för att få mer validerade resultat för varje strålningsnivå utan även för att minimera effekten av avvikelser i testerna, som det skedde med en basic provkropp under utföranden för detta arbete (Figur 12). Genom att öka antal provkroppar från 20 till 60 stycken anses då resonabelt om ytterligare en strålningsnivå ska granskas. Den ökande mängden provkroppar ger då ett tiotal av provkroppar för varje strålningsnivåer och skivtyp.

Slutligen utfördes fallstudien genom att placera provkropparna i ett horisontellt läge under konen. För att till fullo undersöka materialets egenskaper vid brand skulle det vara av intresse att utföra samma provningsmetod och dessutom med vertikala provkroppar.

Då ISO5660 standarden även inkluderar vertikal provning på material hade ytterligare observationer av materialet kunnat upptas om utförandet även inkluderat detta. Kanske skulle materialets egenskaper, i form av tilläggsklasser, kunnat bidra med ytterligare indikeringar i exempelvis dropp (d) vid ett sådant utförande.

7. Slutsats

Från resultatet i både konkalorimetern och ConeTools går det att utläsa att byggnadsmaterial av återvunnet avfall inte besitter en hög brandsäkerhet. Hållbarheten hos materialet i fallstudien är en positiv egenskap som beaktats utifrån de miljömässiga kraven inom hållbarhet i detta arbete, men då materialet är baserat på livsmedelsförpackningar ses resultatet att de inte besitter en hög brandsäkerhet inte vara helt överraskande. Detta är dock utifrån de resultat som predikterats. Vid noggrannare granskning påvisas det att det finns spridning i resultatet baserat utifrån testets strålningsintensitet. Detta indikerar att endast produktutveckling, så som att öka andelen aluminium och minska materialmängden, inte räcker för att uppnå en bättre brandsäkerhet. Annan produktutveckling krävs, som exempelvis tillsatser av mindre brandfarligt material, för att få en högre brandsäkerhet.

När det gäller den andra forskningsfrågan så var ingångspunkten att fallstudiens material hade brandtekniska ytskiktssklassen D-s1-d1. Resultaten från testerna visar att den initiala huvudklassen för materialets ytskikt stämde mycket väl med resultatet från fallstudien. Samtliga skivor utom en fick klassningen D. Några av testresultaten hamnar nära gränsen för Euroklassen C. För att kunna uppnå denna klass skulle en kombination av att göra skivan tunnare och/eller att öka andelen aluminium i skivan krävas.

8. Framtida forskning

Alldeles för lite forskning har skett inom ämnet hållbara byggprodukter gällande de brandtekniska aspekterna. Inga regelverk eller tillhandahållsätt finns att utgå från, vilket gör det svår för både konsumenter och företag att övergå från konventionella material till mer miljövänliga alternativ.

Nedan kommer förslag på ytterligare forskning som är intressanta att gå vidare med:

- Jämföra miljövänliga byggnadsmaterial med liknande nya produkter som finns inom byggbranschen idag.
- Undersöka ämnen som kan öka brandbeständigheten hos Recomas skiva utan att göra skivan mindre miljövänlig eller återvinningsbar?
 - Utveckla Recomas vision för framtiden och hur de vill ersätta gipsskivor i byggbranschen
- Undersöka om återbrukade byggprodukters brandbeständighet är tillfredställande utan att göra en analytisk dimensionering för brandskyddet. Detta antingen genom att förtydliga eller utöka BBRs regelverks gällande återbrukade produkter.
- Undersöka brandmotståndet hos hållbara byggprodukter utifrån standarden EN 13501-2.

9. Referenser

- Agarwal, G., Liu, G., & Lattimer, B. (2014). Pyrolysis and Oxidation of Cardboard. *Fire Safety Science*, 11, 124-137. <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.11-124>
- Andrea, P. (2022). *Om hållbart Byggande*. Hållbart Byggande. Retrieved Oktober 2022 from <https://hallbartbyggande.com/om-oss/>
- Avfall-Sverige. (2022). *Så styrs avfallet*. Avfall Sverige. Retrieved September 2022 from www.avfallsverige.se/fakta-statistik/sa-styrs-avfallet/
- Bengtsson, L.-G., & Karlsson, B. (2013). *Inomhusbrand* (Vol. Inomhusbrand). MSB. <https://doi.org/https://rib.msb.se/filer/pdf/27264.pdf>
- Boberg, P. (2022). *Utsläpp av växthusgaser till år 2030*. Sveriges Miljömål. Retrieved September 2022 from <https://www.sverigesmiljomal.se/etappmalen/utslapp-av-vaxthusgaser-till-ar-2030/>
- Boverket. (2019). *Introduktion till livscykelanalys (LCA)*. Boverket. Retrieved September 2022 from <https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/livscykelanalys/introduktion-till-livscykelanalys-lca/>
- Boverket. (2020a). *Indelning i byggnadsklass och verksamhetsklasser*. Boverket. Retrieved 01-02 from <https://www.boverket.se/sv/PBL-kunskapsbanken/regler-om-byggande/boverkets-byggregler/brandskydd/byggnadsklass-och-verksamhetsklasser/>
- Boverket. (2020b). *Om Boverkets byggregler, BBR*. Boverket. Retrieved September 2022 from www.boverket.se/sv/byggande/regler-for-byggande/om-boverkets-byggregler-bbr/
- Boverket. (2020c). *Utveckling av regler om klimatdeklaration av byggnader*. Boverket. Retrieved September 2022 from <https://www.boverket.se/sv/om-boverket/publicerat-av-boverket/publikationer/2020/utveckling-av-regler-om-klimatdeklaration-av-byggnader/>
- Boverket. (2021a). *Syftet med att klimatdeklarera byggnader*. Boverket. Retrieved September 2022 from <https://www.boverket.se/sv/klimatdeklaration/om-klimatdeklaration/syfte/>
- Boverket. (2021b). *Utsläpp av växthusgaser från bygg- och fastighetssektorn*. Boverket. Retrieved September 2022 from <https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/miljoindikatorer---aktuell-status/vaxthusgaser/>
- Boverket. (2022). *Klimatdeklarationens omfattning*. Boverket. Retrieved September 2022 from <https://www.boverket.se/sv/klimatdeklaration/gor-sa-har/omfattning/>
- Chase. (2022). *Is Aluminium Flammable*. Firefighter Insider. Retrieved Oktober 2022 from <https://firefighterinsider.com/aluminum-flammable/>
- Coatings, F. C. (2022). *Fire Retardant Classifications*. Flame Control Coatings. Retrieved September 2022 from <https://flamecontrol.ca/fire-retardant-coating/classifications/>
- Eberhardt, L. C. M., Birkved, M., & Birgisdottir, H. (2022). Building design and construction strategies for a circular economy. *Architectural Engineering and Design Management*, 18(2), 93-113. <https://doi.org/10.1080/17452007.2020.1781588>
- Ekdahl, C. (2021). Brandrisker med hållbara byggnader-en litteraturstudie. *LUTVDG/TVBB*, 75. <https://www.lu.se/lup/publication/9036043>
- Lag (2021:787) om klimatdeklaration för byggnader, (2021). https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/lag-2021787-om-klimatdeklaration-for-byggnader_sfs-2021-787
- GROSSE, A. V., & CONWAY, J. B. (1957). Combustion of Metals in Oxygen. *Industrial and Engineering Chemistry*, 50(4), 10. <https://doi.org/10.1021/ie50580a040>
- Hebel, D. E., Wisniewska, M. H., & Heisel, F. (2014). *Building from waste. recovered materials in architecture and construction*. Brikhäuser Verlag GmbH. <https://doi.org/10.1515/9783038213758>
- Ippc. (2021). Summary for Policymakers. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth*

- Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 3–32). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- ISCO-PIPE. (1987). *Burning Characteristics of Polyethylene*. Driscopipe. Retrieved Oktober 2022 from <https://isco-pipe.com/wp-content/uploads/2019/02/burning-characteristics-of-polyethylene.pdf>
- ISO. (2015). *ISO 5660-1:2015 Reaction-to-fire tests*. International Organization for Standardization. Retrieved Oktober 2022 from <https://www.iso.org/standard/57957.html>
- ISO. (2016). *ISO 9705-1:2016 Reaction to fire tests*. International Organization for Standardization. Retrieved Oktober 2022 from <https://www.iso.org/standard/59895.html>
- Jiménez Rivero, A., Sathre, R., & García Navarro, J. (2016). Life cycle energy and material flow implications of gypsum plasterboard recycling in the European Union. *Resources, Conservation and Recycling*, 108, 171-181. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.01.014>
- Karlsson, B., & Quintiere, J. G. (2000). *Enclosure fire dynamics*. CRC Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/b22214>
- Kvint, A. (2019). Så kan återbruk bli en affärsidé. (Swedish) [Article]. *Arkitektur*(5), 32-39. <https://ludwig.lub.lu.se/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=ip,uid&db=asu&AN=138402249&site=eds-live&scope=site>
- LCI. (2022). *What is Life Cycle Thinking?* Life Cycle Initiative. Retrieved Oktober 2022 from <https://www.lifecycleinitiative.org/starting-life-cycle-thinking/what-is-life-cycle-thinking/>
- Le Pavec, A., Zerhouni, S., Leduc, N., Kuzmenko, K., & Brocato, M. (2021). Friction magazine: The upcycling of manufacture for structural design. In *International Journal of Space Structures* (Vol. 36, pp. 281-293). Country of Publication: USA.: SAGE Publications.
- Liu, Y., Wang, L., Kang, Y., Fang, J., & Liu, J. (2020). *Facing climate change: Environmental evaluation of gypsum-like CO2 utilization Mg-based materials*. IOP Publishing. Retrieved September 2022 from <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/612/1/012069>
- LU. (2020). *Hållbarhetsform*. Lunds Universitet. Retrieved September 2022 from <https://www.hallbarhet.lu.se/forskning/vad-ar-hallbarhet>
- McNamee, Göras, T., Lundh, K., Blomqvist, P., & Blomqvist, S. (2021). Hållbar hantering av byggavfall-återbruk av brandklassade produkter. In (pp. 86). Lund, Sweden: Lund: SBUF och Brandforsk.
- McNamee, M. (2021). *HÅLLBAR HANTERING AV BYGGAVFALL* (- återbruk av brandklassade produkter, Issue. <https://vpp.sbuf.se/Public/Documents/ProjectDocuments/9841bb5e-3e1b-4295-9daa-ed79f524dc67/FinalReport/SBUF%2014009%20Slutrapport%20H%C3%A5llbar%20hantering%20av%20byggavfall%20C3%A5terbruk%20av%20brandklassade%20produkter.pdf>
- Miljöbalk (1998:808), Kap 15 (2018). https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/miljobalk-1998808_sfs-1998-808
- National Council of Air and Stream Improvement, I. (2011). *Summary of the literature on the treatment of paper and paper packaging products recycling in life cycle assessment. Technical Bulletin No (985)*. <https://www.ncasi.org/wp-content/uploads/2019/02/tb985.pdf>
- Naturskyddsföreningen. (2021a). 7 Frågor om Parisavtalet. Retrieved September 2022, from <https://www.naturskyddsforeningen.se/artiklar/7-fragor-om-parisavtalet/>
- Naturskyddsföreningen. (2021b). *Avfallstrappan*. Naturskyddsföreningen. Retrieved September 2022 from www.naturskyddsforeningen.se/faktablad/avfallstrappan/
- Naturskyddsföreningen. (2021c). *Vad menas med cirkulär ekonomi?* Naturskyddsföreningen. Retrieved September 2022 from <https://www.naturskyddsforeningen.se/artiklar/vad-menas-med-cirkular-ekonomi/>
- Naturskyddsföreningen. (2022). *Cement, klimat och miljö*. Naturskyddsföreningen. Retrieved September 2022 from <https://www.naturskyddsforeningen.se/faktablad/cement-klimat-och-miljo/>

- Naturvårdsverket. (2022a). *Agenda 2030 och globala hållbarhetsmålen*. Naturvårdsverket. Retrieved September 2022 from <https://www.naturvardsverket.se/om-miljoarbetet/agenda-2030-och-globala-hallbarhetsmalen/>
- Naturvårdsverket. (2022b). *Avfall i Sverige 2020*. In (pp. 48). Bromma, Sweden: Naturvårdsverket.
- Primacoustic. (2022). *Primacoustic Fire tests*. Primacoustic. Retrieved November 2022 from <https://www.primacoustic.com/fire-tests/>
- Quintana, A., Alba, J., del Rey, R., & Guillén-Guillamón, I. (2018). Comparative Life Cycle Assessment of gypsum plasterboard and a new kind of bio-based epoxy composite containing different natural fibers. *Journal of Cleaner Production*, 185, 408-420. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.042>
- Recoma. (2021). *Hållbarhetsarbete*. Recoma. Retrieved September 2022 from <https://recoma.se/home/miljo>
- Recoma. (2022a). *Environmental Product Declaration*. EPD HUB. Retrieved September 2022 from https://recoma.se/onewebmedia/EPD_RECOMA%20PackWall.pdf
- Recoma. (2022b). *Tekniskt Specifikation*. Recoma. Retrieved September 2022 from <https://recoma.se/onewebmedia/Teknisk%20Spec%202022.pdf>
- RISE. (2022a). *Brandprovning enligt ISO 5660-1*. RESEARCH INSTITUTES OF SWEDEN. Retrieved October 2022 from <https://www.ri.se/sv/vad-vi-gor/tjanster/brandprovning-enligt-iso-5660-1>
- RISE. (2022b). *ConeTools-Verktyg för preditering av Eurokalss enligt EN 13501-1*. RISE Research Institutes of Sweden. Retrieved September 2022 from www.ri.se/sv/vad-vi-gor/tjanster/conetools-verktyg-for-preditering-av-euroklass-enligt-en-13501-1
- Ronca, S. (2017). Chapter 10 - Polyethylene. In M. Gilbert (Ed.), *Brydson's Plastics Materials (Eighth Edition)* (pp. 247-278). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35824-8.00010-4>
- Ruuska, A. (2013). *Carbon footprint for building products-ECO2 data for materials and products with the focus on wooden building products*. V. T. R. C. o. Finland. <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2013/T115.pdf>
- SIS. (2022). *EU och standarder*. Svenska institutet för standarder. Retrieved September 2022 from www.sis.se/standarder/vad-ar-en-standard/
- Skanska. (2022). *Grön betong - för en hållbar framtid*. Skanska. Retrieved November 2022 from <https://www.skanska.se/4a47b2/siteassets/vart-erbjudande/produkter-och-tjanster/betong/gron-betong/produktblad-gron-betong.pdf>
- Skogsindustrierna. (2022). *Papper och kartong till böcker, förpackningar och tidningar*. Skogsindustrierna. Retrieved October 2022 from <https://www.skogsindustrierna.se/om-skogsindustrin/produkter/produkter-fran-svenska-pappersbruk/>
- SLU, S. L. (2022). *Vad är livscykelanalys?* Sveriges lantbruksuniversitet. Retrieved September 2022 from <https://www.slu.se/institutioner/energi-teknik/forskning/lca/vadar/>
- Stihl, T. (2022). *Intervju av Recoma* [Interview]. Sebastian Lind, Gina Hvarfvenius.
- Sundström, B. (2001). *Euroclass i svensk byggnorm.-Jämförelse mellan svenska och europeiska brandklasser för byggprodukter*. Sveriges provnings- och forskningsinstitut. SP. <https://doi.org/0000-0001-7226-0969>
- Sundström, B. (2007). The Development of a European Fire Classification System for Building Products In *Fire Safety Engineering and Systems Safety* (pp. 130). Sweden: Fire Safety Engineering and Systems Safety.
- TIS-GDV. (2022). *Corrugated Board*. German insurance Association. Retrieved October 2022 from https://www.tis-gdv.de/tis_e/ware/papier/wellpapp/wellpapp-htm/
- ToolBox, E. (2003). *Solids, Liquids and Gases - Thermal Conductivities*. Engineers Toolbox. Retrieved November 2022 from https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html

- Van Hees, P., Andersson, P., Hjøhlman, M., Wenne, N., & Hassan, M. A. (2010). Use of the Cone Calorimeter and ConeTools software for development of innovative intumescent graphite systems [Artikel]. *Fire and Materials*, 34(7), 367-384. <https://doi.org/10.1002/fam.1032>
- Wałach, D. (2021). Analysis of Factors Affecting the Environmental Impact of Concrete Structures., 204. Retrieved November 2022, from <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/1/204>
- Wetterqvist, C. (2021). ÅTERBRUK AV PRODUKTER MED BRANDTEKNISKA EGENSKAPER. SBR Svenska Byggingenjörers Riskförbund. Retrieved September 2022 from www.husbyggaren.se/aterbruk-av-produkter-med-brandtekniska-egenskaper/
- Wieczorek, C. J., Ditch, B., Bill, R. G., & Robert, G. (2010). *Environmental impact of automatic fire sprinklers*. FM Global Johnston, RI, USA. <https://doi.org/10.1007/s10694-010-0191-8>
- Östman, B., & Tsantaridis, L. (2006). *InnoFireWood-Innovative eco-efficient high fire performance wood products for demanding applications* (State of the art, Project Report: Inno Fire Wood, Issue. http://virtual.vtt.fi/virtual/innofirewood/finalreport/sp_rapp_2006_30_innofirewood.pdf

Appendix

Nedan samlas allt resultat från den utförda fallstudien på Recomas skivmaterial, appendixet inkluderar även handberäkningar och grunddata från materialet.

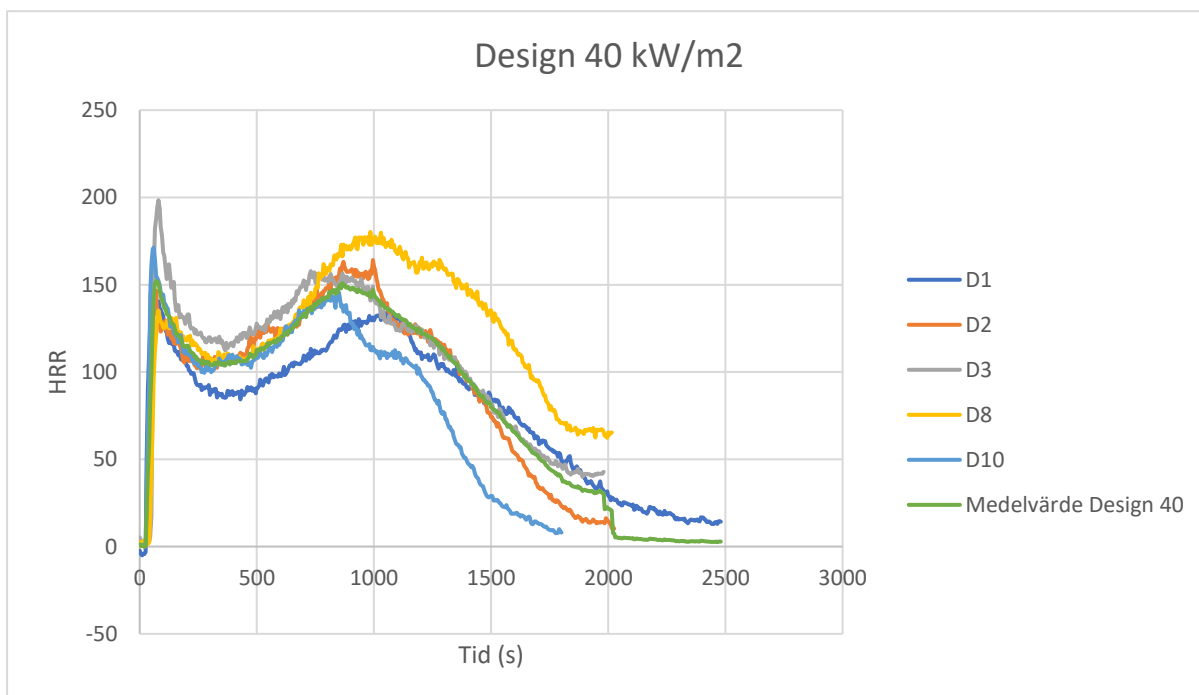
Prover enligt ISO 5660-1

Testkropparna som användes konditionerades i godkända förhållanden enligt ISO-standarden.

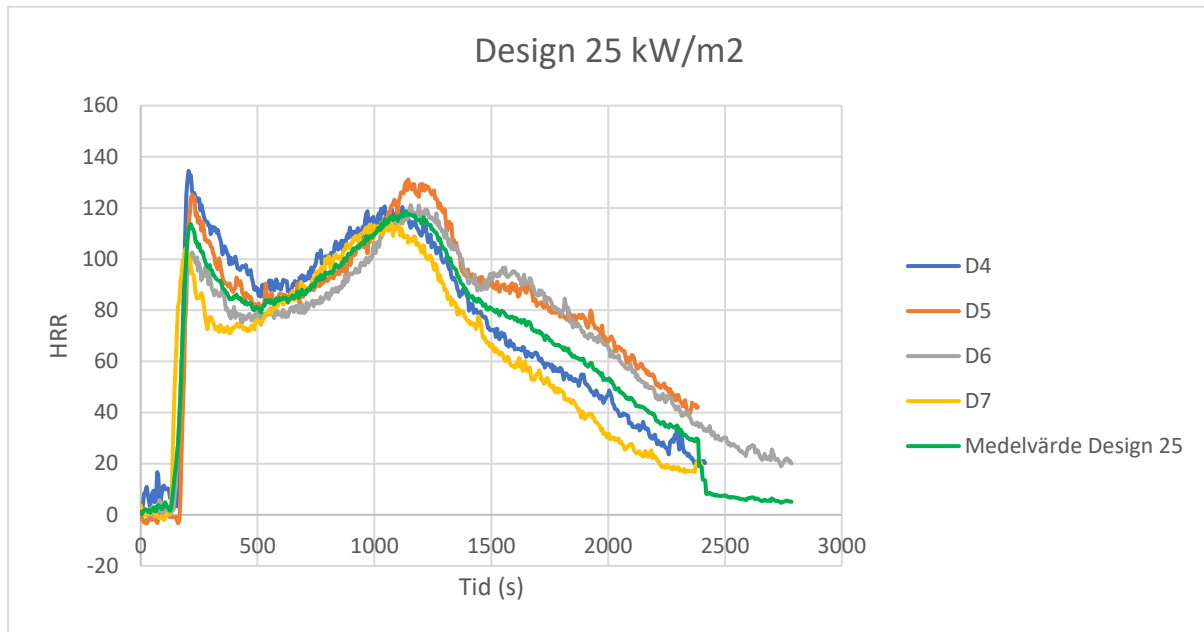
Tabell 7, provkropparnas konditioneringsdata

Konditioneringsparametrar	Datum	Temperatur	Fuktkvot
Startdatum för konditionering	4/10-2022	22.4	46.4
Provdag 1	12/10-2022	22.1	38.8
Provdag 2	13/10-2022	21.7	42.6
Provdag 3	14/10-2022	21.8	45.5

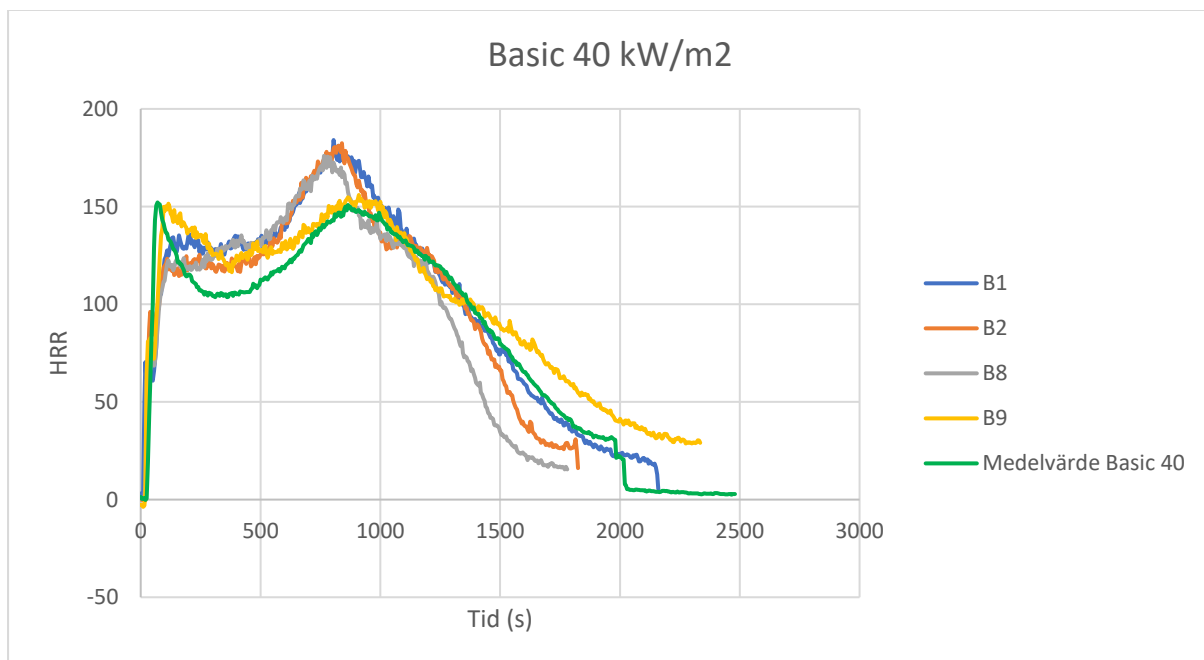
Resultat från Konkalorimeterns experiment enligt ISO 5660



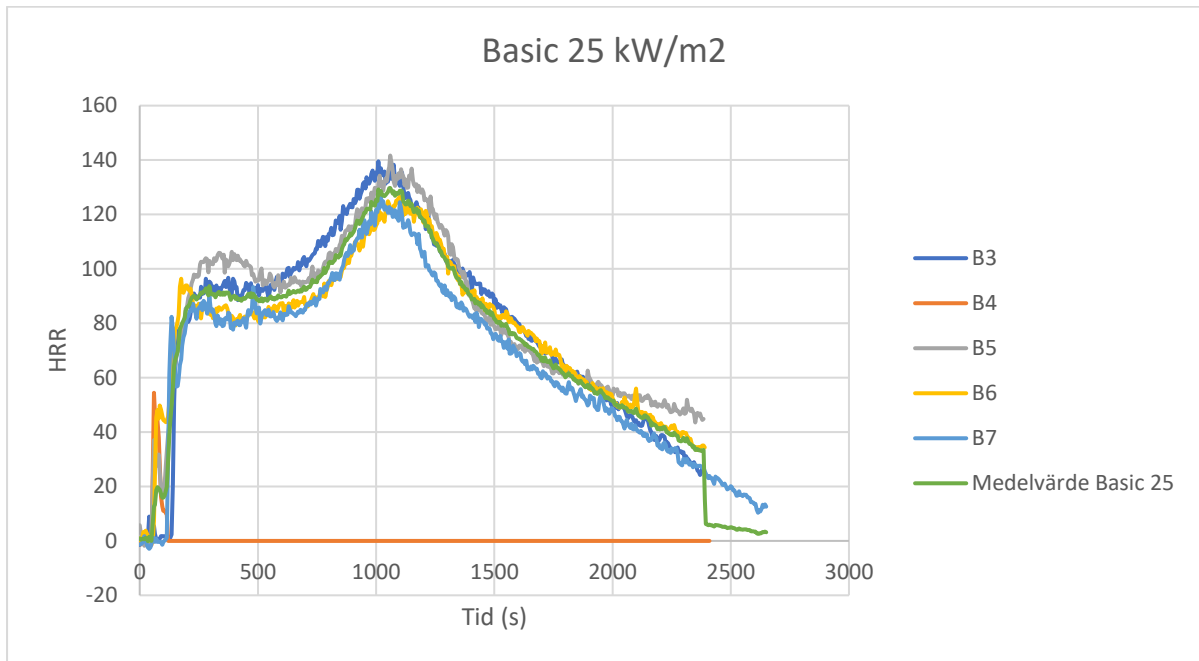
Figur 15, grafen visar HRR-resultatet från fallstudie experimenten för skrivmaterialen Design vid en strålningspåverkan av 40 kW/m²



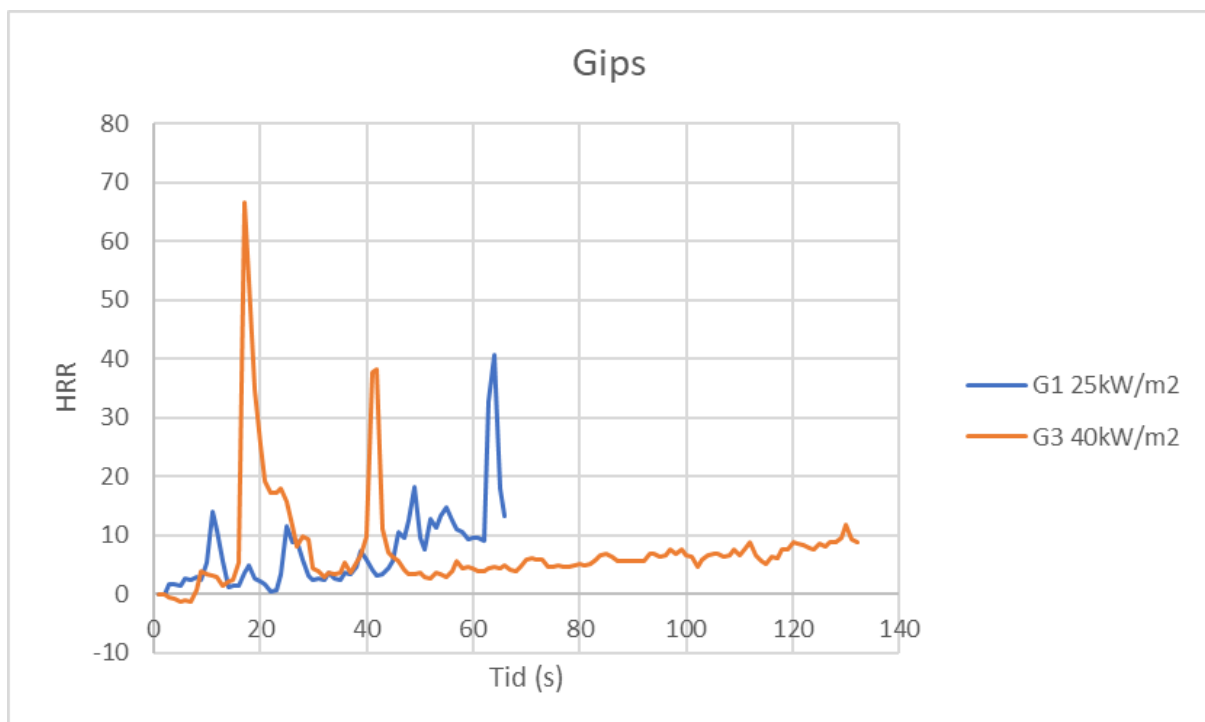
Figur 16, grafen visar HRR-resultatet från fallstudie experimenten för skrivmaterialen Design vid en strålningspåverkan av 25 kW/m²



Figur 17, grafen visar HRR-resultatet från fallstudie experimenten för skrivmaterialen Basic vid en strålningspåverkan av 40 kW/m²

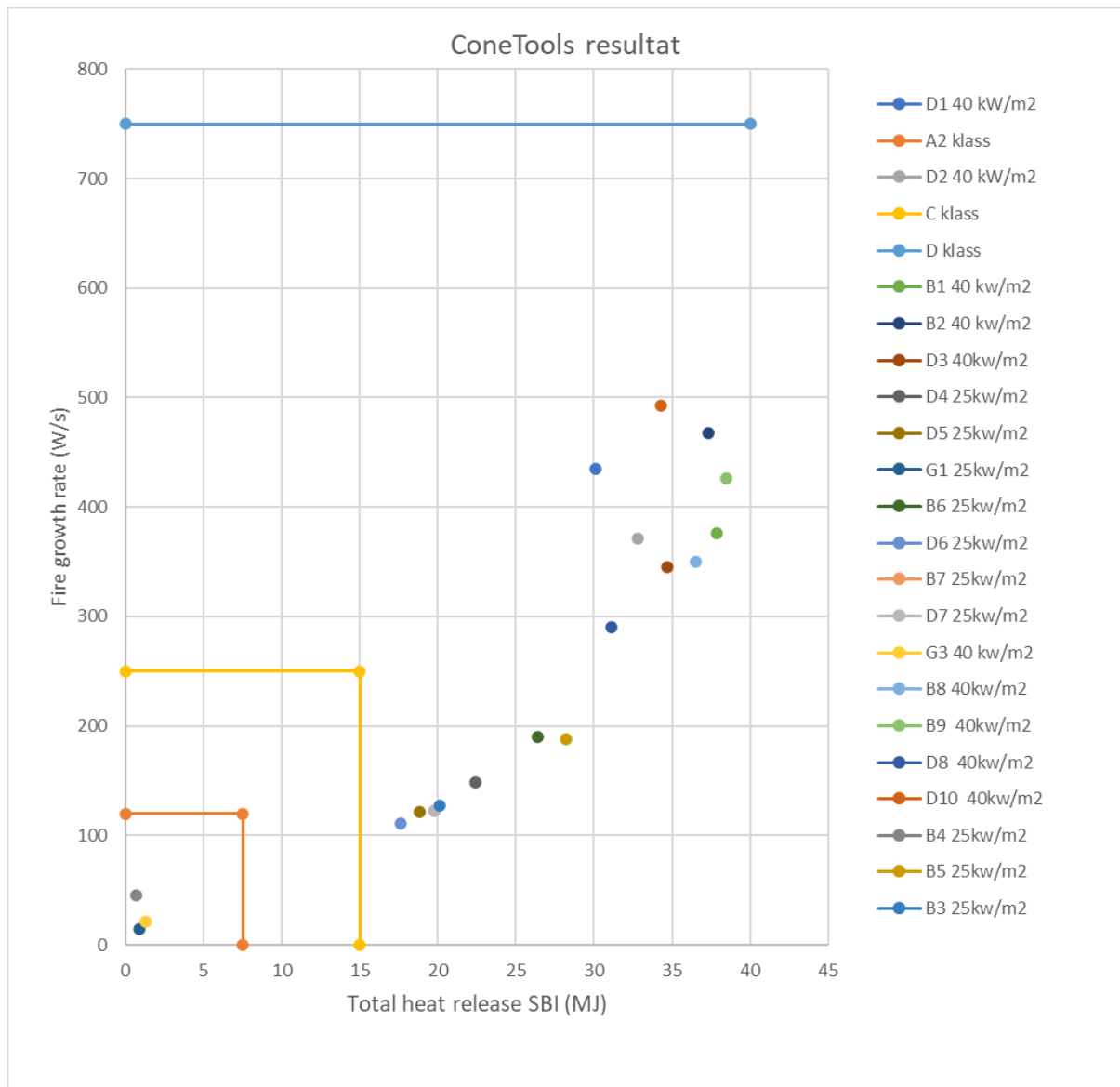


Figur 18, grafen visar HRR-resultatet från fallstudie experimenten för skrivmaterialen Basic vid en strålningspåverkan av 25 kW/m²



Figur 19, grafen visar HRR-resultatet från provkroppar av gipsskivor med strålningspåverkan av 40-och 25 kW/m²

Resultat från ConeTools, ett mjukvaruprogram för prediktion av brandteknisk huvudklass för ytskikt.



Figur 20, grafen redogör alla fallstudiens provkroppars resultat när de beräknats i ConeTools.

Teoretiska beräkningar av energi

Ändring av andelen aluminium

I denna del approximeras det ut hur mycket energi ConeTools-resultaten hade haft om andelen aluminium hade ökat från 5 % till 10 %. Detta görs genom att först räkna ut ett teoretiskt energiinnehåll för både standard (5 %) och den modifierade skivan (10 %). För att veta hur mycket mindre energi den modifierade skivan innehåller jämfört med standard, divideras dem med varandra så en kvot fås ut. Denna kvot multipliceras sedan med vardera ConeTools-tests THR-värde för att få ut hur mycket energi en modifierad skiva hade innehållit.

Ekvation för energimängd:

$$E = m \times \Delta h_c \times \chi$$

där

E , är den totala energimängden i materialet

m , är den totala massan

Δh_c , är förbränningsentalpin för komponentmaterialet

χ , är komponentmaterialets förbränningseffektivitet (antas vara 0,7 för samtliga material då information saknas)

Den totala energimängden fås ut genom att addera komponenternas totala energier med varandra:

$$E_{Tot} = E_{LDPE} + E_{Kartong} + [E_{Aluminium} = 0]$$

$E_{Aluminium}$ sätts till 0 då det antas att den inte kommer att bidra nämnvärt till den totala energiutvecklingen.

Standard (dvs 5 % aluminium) beräkning med maximal energimängd. Dvs med högsta andel LDPE (30 %) och lägsta andel kartong (65 %). Detta pga. förbränningsentalpin är högre för LDPE. Resultaten visas i Tabell 8.

Tabell 8, visar den totala energimängden för standardskivan, med 5 % aluminium

Standard	Andel	Vikt (kg)	Energi (MJ)
Kartong	0.65	0.065	0.7371
LDPE	0.3	0.03	0.9156
Aluminium	0.05	0.005	0
Total	1		1.6527

Modifierad (dvs 10 % aluminium) beräkning med minimal energimängd. Dvs med lägsta tillåtna andelar kartong (65 %) och LDPE (25 %). Resultaten visas i Tabell 9.

Tabell 9, visar den totala energimängden för den modifierade skivan, med 10 % aluminium

Modifierad	Andel	Vikt (kg)	Energi (MJ)
Kartong	0.65	0.065	0.7371
LDPE	0.25	0.025	0.763
Aluminium	0.1	0.01	0
Total	1		1.5001

Därefter beräknas den procentuella energiminskningen ut:

$$N = \frac{E_{\text{Modifierad}}}{E_{\text{Standard}}} = 0,9076$$

Den procentuella energiminskningen är alltså cirka 10 %. Därefter kan denna procentuella energiminskning multipliceras med den totala energimängden (THR) av resultaten från ConeTools. Den totala energin för ett modifierat ConeTools-test (D6 i detta fall) blir då:

$$THR_{D6,Modifierad} = THR_{D6} \times 0.9$$

THR för D6 blir då 15,84 MJ. Detta är högre än 15 MJ, vilket betyder att Euroklassen C inte nås (dock mycket nära). Testet D6 används som representativt då detta test har det lägsta icke modifierade THR-värde. Dvs om detta värde inte når under 15 MJ, klarar inget annat test det.

Ändring av tjocklek

Om en tjockleksförändring skulle ske av skivorna, skulle massan sjunka förutsatt att densiteten är densamma. Detta i sin tur skulle betyda att den totala energimängden minskar. De flesta skivorna har en tjocklek på cirka 11 mm, dock gäller detta inte riktigt alla skivor.

$$Kvot = \frac{Tjocklek_{9mm}}{Tjocklek_{Enligt\ test}}$$

$$THR_{9mm} = Kvot \times THR_{Enligt\ test}$$

Tabell 10, visar varje tests THR om skivan var 9 mm tjock. De grönmarkerade testerna är de tester som understeg 15 MJ.

Testnamn:	Tjocklek (mm)	Kvot	THR enligt test (MJ)	THR om tjockleken var 9 mm (MJ)
D1	11	0.82	30.1	24.6
D2	11	0.82	32.8	26.8
B1	11.5	0.78	37.9	29.6
B2	12	0.75	37.3	27.9
D3	11	0.82	34.7	28.3

D4	11	0.82	22.4	18.3
D5	11.5	0.78	18.8	14.7
B3	11	0.82	20.1	16.4
B4	11	0.82	0.7	0.5
B5	11	0.82	28.2	23.0
B6	11	0.82	26.4	21.6
D6	11.5	0.78	17.6	13.7
B7	11	0.82	19.8	16.2
D7	11	0.82	17.2	14.0
B8	11	0.82	36.5	29.8
B9	11	0.82	38.5	31.5
D8	11	0.82	31.1	25.4
D10	12	0.75	34.3	25.7

Tabell 10 visar på skivornas tjocklek, den procentuella skillnaden om skivan var 9 mm tjock, THR för testet i konkalorimetern samt en teoretisk THR om testet var 9 mm tjockt. Tabellen visar också att testerna D5, B4, D6 och D7 understiger 15 MJ. Detta betyder att dessa tester skulle kunna ges en lägre Euroklass om de var 9 mm tjocka. B4 bortses från att ges en lägre klass då testet redan har klassen A2.

Kombination av 10 % aluminium och en 9 mm skiva

Tabell 11, visar en kombination av en skiva med 9 mm tjocklek samt 10 % aluminium. De grönmarkerade testerna är de tester som understiger 15 MJ. B4 är det test som slocknade mycket tidigt.

Testnamn:	THR om tjockleken var 9 mm (MJ)	THR kombination 9mm och 10 % aluminium (MJ)
D1	24.6	22.1
D2	26.8	24.1
B1	29.6	26.6
B2	27.9	25.1
D3	28.3	25.5
D4	18.3	16.4
D5	14.7	13.2
B3	16.4	14.8
B4	0.5	0.5
B5	23.0	20.7
B6	21.6	19.4
D6	13.7	12.3
B7	16.2	14.58

D7	14.0	12.6
B8	29.8	26.8
B9	31.5	28.35
D8	25.4	22.9
D10	25.7	23.1

Tabellen visar att testerna D5, B3, B4, D6, B7 och D7 understiger 15 MJ. Detta betyder att dessa tester skulle kunna ges en lägre Euroklass om de var 9 mm tjocka och hade 10 % aluminium. B4 bortses från att ges en lägre klass då testet redan har klassen A2.

Handberäkningar av ConeTools resultat och ekvationer från ConeTools.

I Tabell 12 har det sammanställts resultat från handberäkna värden från ConeTools ekvationer. Detta för att se och varför resultaten från fallstudien spridning kommer ifrån. De använda ekvationerna för dessa resultat är:

$$SBI_{Flux} = Cone_{Flux} \times \frac{t_{ignCone}}{t_{ignCorr}}$$

Där strålningspåverkan ur ett SBI-test togs fram, sedan användes de värdena för att ta fram:

$$HRR_{Corr} = HRR_{Cone} \times \left(\frac{SBI_{Flux}}{Cone_{Flux}} \right)^{0.5}$$

Tabell 12. Sammanställt resultat från handberäkningar av ConeTools ekvationer

Provkroppar	$t_{ignCone}$	$t_{ignCorr}$	HRR_{Cone}	$Cone_{Flux}$	SBI_{Flux}	HRR_{Corr}
D1	32	31	142.4	40.0	41.3	144.7
D2	35	36	146.6	40.0	38.9	144.6
D3	54	52	198.40	40.0	41.5	202.2
D4	164	174	134.9	25.0	23.5	130.5
D5	171	184	131.1	25.0	23.2	126.4

D6	146	170	121.1	25.0	21.4	112.2
D7	139	146	115.8	25.0	23.8	112.9
D8	44	47	180.2	40.0	37.4	174.4
D10	33	33	171.3	40.0	40.0	171.3
B1	23	15	182.4	40.0	61.3	227.9
B2	20	18	139.5	40.0	44.4	192.3
B3	141	145	54.5	25.0	24.3	137.5
B4	59	60	141.6	25.0	24.6	53.9
B5	59	60	126.5	25.0	24.6	140.4
B6	65	124	126.4	25.0	13.1	91.5
B7	122	124	126.0	25.0	24.6	125.3
B8	24	24	176.0	40.0	40.0	176.0
B9	27	24	155.9	40.0	45.0	165.4