HÅLLBARA MATERIALVAL I BYGGNADSINDUSTRIN

Egenskaper, fördelar och nackdelar hos olika byggmaterial med fokus på miljöperspektiv och hållbarhet

GABI KHAZZOUM

GEORGE ANICH

Akademin för ekonomi, samhälle och teknik

Kurs: Examensarbete, byggnadsteknik
Kurskod: BTA212
Ämne: Byggnadsteknik
Högskolepoäng: 15 hp
Program: Högskoleingenjörsprogrammet i byggnadsteknik

Handledare: Dana Twana
Examinator: Shaheda Akter
Uppdragsgivare: Mälardalens Högskola
Datum: 2025-11-19
E-post:
gkm21001@student.mdu.se
gah22001@student.mdu.se

ABSTRACT

Purpose: This study analyses and compares the most common construction materials in the Swedish construction industry (wood, concrete and steel) regarding to their environmental impact and technical properties. **Method:** The work is based on an extensive literature study, comparative analysis and life cycle assessment (LCA) of the materials. As part of the study, a hand calculation was also carried out for a garage made of wood, concrete and steel, in order to quantify and compare their climate impact. In order to be able to compare the environmental impact of the materials of the garage, One Click LCA was used. The study were reinforced by three case studies of real construction projects, each representing one of the materials. The analysis shows that wood generally has the lowest climate impact of the three materials, but requires special protection measures and greater technical understanding to achieve long-term sustainability. Concrete and steel have a higher climate impact but offer robust technical properties, and opportunities for improvement exist primarily through fossil-free production processes and material optimization. **Results:** The results of the calculations are consistent with literature study, showing that wood has the lowest climate impact, followed by concrete, then steel that have the highest impact. This confirms that Life Cycle Assessment (LCA) is an effective method for evaluating the environmental impact of construction materials. However, certain challenges remain in selecting materials, particularly due to the limited availability of comparable and reliable climate impact data across different construction materials. **Conclusion:** The conclusion is that material choice has a significant impact on the environmental footprint of buildings, but through early implementation of life cycle assessments and increased knowledge of material properties, more sustainable construction solutions can be achieved.

Keywords: Climate impact, Concrete, Construction materials, Environmental impact, Life cycle assessment (LCA), Steel, Wood

FÖRORD

Detta examensarbete markerar det avslutande momentet i Högskoleingenjörsprogrammet inom byggnadsteknik, 180 högskolepoäng, vid Mälardalens universitet. Arbetet har genomförts under vårterminen 2025 och har varit en viktig del i vår utveckling som ingenjörer.

Vi vill rikta ett stort tack till vår handledare Dana Twana för värdefull vägledning och kontinuerligt stöd genom hela processen.

Vi vill även rikta ett varmt tack till vår examinator Shaheda Tahmina Akter för hennes insiktsfulla kommentarer, vilket bidrog till att höja kvaliteten på vårt examensarbete.

Ett varmt tack riktas också till våra familjer och vänner som stöttat oss under hela studietiden.

Västerås i november 2025

Gabi Khazzoum och George Anich

SAMMANFATTNING

I takt med byggsektorn kontinuerliga tillväxt uppstår ett behöv till mer hållbara lösningar och miljövänlig användning av resurser och byggmaterial för att minska miljöavtrycket ursakat av branschen. Denna studie analyserar och jämför de vanligaste byggmaterialen inom den svenska byggbranschen (trä, betong och stål) med avseende på deras miljöpåverkan och tekniska egenskaper.

Metod: Arbetet bygger på en omfattande litteraturstudie, jämförande analys och livscykelanalys (LCA) av materialen. Som en del av studien genomfördes även en handberäkning för ett garage av trä, betong och stål, i syfte att kvantifiera och jämföra deras klimatpåverkan. För att kunna jämföra materialens miljöpåverkan av garaget användes One Click LCA vilket utför en livscykelanalys till vartenda material och kvantifierar materialet miljöavtryck genom hela livscykeln i form av koldioxidekvivalent, CO_2e. Resultaten förstärktes av tre fallstudier av verkliga byggprojekt, där var och en representerade ett av materialen.

Analysen visar att trä generellt sett har den lägsta klimatpåverkan av de tre materialen, men kräver särskilda skyddsåtgärder och större teknisk förståelse för att uppnå långsiktig hållbarhet. Betong och stål har högre klimatpåverkan men erbjuder robusta tekniska egenskaper och möjligheter till förbättring finns framför allt genom fossilfria produktionsprocesser och materialoptimering.

Resultaten av beräkningarna överensstämmer med litteraturstudien, som visar att trä har den lägsta klimatpåverkan, följt av betong och sedan stål som har den största påverkan. Detta bekräftar att livscykelanalys (LCA) är en effektiv metod för att utvärdera miljöpåverkan från byggmaterial. Dock vissa utmaningar kvarstår, särskilt när det gäller tillgången till jämförbara och tillförlitliga klimatdata mellan olika material.

I diskussionen diskuterades resultaten av materialens miljöpåverkan, deras egenskaper samt optimering av materialvalet. Det lyftes farm att det är svårt att avgöra det bästa materialvalet, eftersom olika byggnader har olika behov av material. Därefter diskuterades de metoder som användes i studien, med fokus på resultatens tillförlitlighet, eventuella felkällor och arbetets begränsningar.

Slutsatsen är att materialval har stor påverkan på byggnaders miljöavtryck även i mindre konstruktioner. Men genom tidig implementering av livscykelanalyser och ökad kunskap om materialens egenskaper kan mer hållbara bygglösningar uppnås.

Nyckelord: Betong, Klimatpåverkan, Konstruktionsmaterial, Livscykelanalys (LCA), Miljöpåverkan, Stål, Trä.

Deklaration: I arbetet har ChatGPT GPT-5 mini från OpenAI (2025) använts som stöd för språkgranskning, formulering av text, sökning efter relevanta källor samt för att ge inspiration och vägledning i utvecklingen av uppsatsens innehåll.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1. INLEDNING 1

1.1 Bakgrund 2

1.1.1 Tidigare studier/forskning 2
1.1.2 Studiens bidrag 3

1.2 Syfte 4

1.3 Frågeställningar 4

1.4 Avgränsning 4

2. METOD 5

2.1 Litteraturstudie 5

2.2 Fallstudie 6

2.3 Handberäkningar 7

2.5 Verktyg 7

2.5.1 Tekla structures 7
2.5.2 One Click LCA 7

2.6 Koppling mellan metoder 7

3. ÄMNESMÄSSIG REFERENSRAM 9

3.1 Livscykelanalys - verktyg för hållbara material 9

3.2 Trä som byggmaterial 10

3.2.1 Tekniska egenskaper hos trä 10
3.2.2 Miljö och hållbarhet hos trä 11
3.2.3 Livscykelanalys (LCA) av trä som byggmaterial 11

3.3 Betong som byggmaterial 14

3.3.1 Betong komponenter 14
3.3.1.1. Aggregaten komponent inom betong 14
3.3.2 Tekniska egenskaper hos betong 15
3.3.3 miljö och hållbarhet hos betong 16
3.3.4 Livscykelanalys (LCA) hos betong 18

3.4 Stål som byggmaterial 19

3.4.1 Stålproduktion 19

3.4.2 Tekniska egenskaper hos stål 20
3.4.3 miljö och hållbarhet hos stål 21
3.4.4 Livscykelanalys (LCA) hos stål 23

4. AKTUELL STUDIE 25

4.1 Utformning av garaget 25

4.2 Scenario 1: Trä som konstruktion material 26

4.3 Scenario 2: Betong som konstruktion material 27

4.4 Scenario 3: Stål som konstruktion material 28

4.5 Fallstudie: Trä, betong och stål i praktiken 29

4.5.1 Fallstudie – Cederhusen (Trä) 29
4.5.1.1. Bakgrund och projektbeskrivning 29
4.5.1.2. Tekniska egenskaper 30
4.5.1.3. Klimatpåverkan och livscykelanalys 30
4.5.1.4. Hållbarhet och Agenda 2030 30
4.5.1.5. Koppling till examensarbetets frågeställningar 31
4.5.2 Fallstudie - Norra Tornen (Betong) 31
4.5.2.1. Bakgrund och projektbeskrivning 31
4.5.2.2. Tekniska egenskaper 32
4.5.2.3. Klimatpåverkan och livscykelanalys 32
4.5.2.4. Hållbarhet och Agenda 2030 33
4.5.2.5. Koppling till examensarbetets frågeställningar 33
4.5.3 Fallstudie – Portlands Place (stål) 33
4.5.3.1. Bakgrund och urval 33
4.5.3.2. Projektbeskrivning 34
4.5.3.3. Tekniska egenskaper 34
4.5.3.4. Klimatpåverkan och livscykelanalys 35
4.5.3.5. Hållbarhet och Agenda 2030 35
4.5.3.6. Koppling till examensarbetets frågeställningar 35

5. RESULTAT 36

5.1 Fördelar & nackdelar hos olika konstruktionsmaterial 36

5.1.1 Analys av tekniska egenskaper för olika konstruktionsmaterial 36
5.1.2 Jämförelse av miljöpåverkan och hållbarhet mellan olika konstruktionsmaterial 37
5.1.2.1. Återanvändning & cirkularitet 38

5.2 Livscykelanalys och klimatpåverkan 38

5.2.1 Resultat från One Click LCA 40
5.2.2 Scenario 1 40
5.2.3 Scenario 2 40
5.2.4 Scenario 3 41
5.2.5 Sammanställning av resultat (3 scenarier) 41

5.3 Resultat från fallstudier **42**

5.4 Optimering av materialval utifrån livscykelperspektiv och digitala beslutsstöd **44**

6. DISKUSSION **46**

6.1 Hur påverkar materialvalet miljön? **46**

6.2 Fördelar och nackdelar med materialen **47**

6.3 Hur kan byggsektorn optimera sina materialval? **48**

6.4 Samband mellan fallstudier och scenariobaserade beräkningar för trä, betong och stål **49**

6.5 Metoddiskussion **50**

6.5.1 Litteraturstudie och datainsamling 50
6.5.2 Fallstudiernas roll 50
6.5.3 Handberäkningar som huvudmetod 50
6.5.4 Begränsningar och felkällor 50
6.5.5 Metodens tillförlitlighet 50

7. SLUTSATSER **51**

8. FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE **52**

REFERENSER **53**

BILAGA 1: FALL 1 TRÄ KONSTRUKTION BERÄKNINGAR **60**

BILAGA 2: FALL 2 BETONG KONSTRUKTION BERÄKNINGAR **64**

BILAGA 3: FALL 3 STÅL KONSTRUKTION BERÄKNINGAR **65**

FIGUR- OCH TABELLFÖRTECKNING

Figur 1 Utsläpp av växthusgaser inom bygg- och fastighetssektorn i Sverige (Boverket, 2025). 2
Figur 2 Schematisk beskrivning av hur högt respektive lågt fuktinnehåll påverkar träets nedböjning över tid (Svenskt Trä, 2019a). 11
Figur 3 Träprodukters kretslopp från fotosyntes till återvinning och energiutgivning (Svenskt Trä, 2015c) 13
Figur 4 Betong komponenter (Burström & Nilvér, 2018) 14
Figur 5 En ideal fördelning av kornstorlek i aggregat (Burström & Nilvér, 2018). 15
Figur 6 Minsta täckande betongskikt med hänsyn till beständighet för armering 17
Figur 7 Betong livscykel olika steg, (Svensk Betong, u.å.b). 19
Figur 8 Standardiserade korrosivitetsklasser. Korrosionshastigheten är i allmänhet högre i början av exponeringen, (Hirn, 2019). 22
Figur 9 Stål livscykel olika steg (Stålbyggnadsinstitutet, 2021) 24
Figur 10 En illustrativ modell av garaget har skapats i Tekla Structures. 25
Figur 11 Illustration av Cederhusen i Hagastaden, Stockholm. 29
Figur 12 Illustration av Norra Tornen i Vasagatan, Stockholm. 32
Figur 13 Illustration av Portland Place i East Village, London. 34
Figur 14 Föreslagna gränsvärdet för klimatpåverkan (Boverket, 2023) 42

Tabell 1 Scenario 1 träkonstruktion. 26
Tabell 2 Scenario 2 betongkonstruktion. 27
Tabell 3 Scenario 3 stålkonstruktion. 28
Tabell 4 jämförelseöversikt utifrån materialens egenskaper. 37
Tabell 5 jämförelseöversikt utifrån hållbarhets- och miljöperspektiv. 39
Tabell 6 Volym och koldioxidekvivalenta utsläpp (CO_2e) för olika byggdelar i ett garage i trä 40
Tabell 7 Volym och koldioxidekvivalenta utsläpp (CO_2e) för olika byggdelar i ett garage i betong 40
Tabell 8 Volym och koldioxidekvivalent utsläpp (CO_2e) för olika byggdelar i ett garage i stål 41
Tabell 9 Jämförelse mellan trä, betong och stål utifrån deras volym och koldioxidekvivalent utsläpp (CO_2e, i ton) 41
Tabell 10 jämförelseöversikt utifrån hållbarhets- och miljöperspektiv 42

BETECKNINGAR

Beteckning	Beskrivning	Enhet
g_k	Egentyngd	$\frac{kN}{m}$
M_{Ed}	Böjmoment	kNm
N_{Ed}	Normalkraft	kN
$Q_{w,k}$	Vindlast	$\frac{kN}{m}$
q	Lastkombination	$\frac{kN}{m}$
s_k	Snölast	$\frac{kN}{m}$
V_{Ed}	Tvärsnittkapacitet	kN

FÖRKORTNINGAR

Förkortning	Beskrivning
BTA	Bruttoarea
LCA	Livscykelanalys
MPa	Megapascal

DEFINITIONER

Definition	Beskrivning
Böjhållfasthet	Materialets förmåga att motstå brott
Draghållfasthet	Materialets förmåga att motstå krafter som försöker dra isär det
Elasticitetsmodulen	Ett mått på ett materials styvhet
Eurokod	Europeiska standarder för konstruktion och dimensionering av byggnader
Skjuvhållfasthet	Materialets förmåga att motstå krafter som verkar parallellt med materialets yta
Tryckhållfasthet	Materialets förmåga att motstå krafter som pressar ihop det

(Isaksson, Mårtensson & Thelandersson, 2020)

1. INLEDNING

Byggbranschen har en viktig roll i samhället, både genom att skapa byggnader och infrastruktur som människor använder varje dag, och genom att påverka miljön på olika sätt. Naturvårdsverket (2025) konstaterar att femtedel av växthusgasutsläpp i Sverige kommer från svenska byggnader. Materialen som används i byggandet har stor betydelse, inte bara för hur starka och hållbara konstruktionerna blir, utan också för hur mycket klimatpåverkan som uppstår under produktionen, transporten och användningen. Enligt naturvårdsverket har byggnadsbranschen utvecklat en färdplan för att nå nettoutsläpp 2045. I takt med att frågor om hållbarhet och miljö har blivit mer aktuella, ökar kraven på att bygga med hänsyn till framtiden.

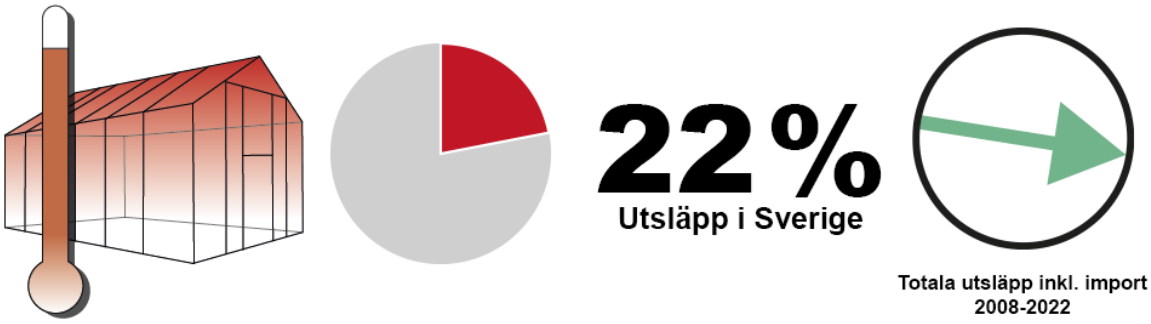
Idag pratar man alltmer om hur vi kan bygga på ett mer hållbart sätt. Det handlar bland annat om att välja byggmaterial som har låg miljöpåverkan, kan återanvändas eller återvinnas, och som håller länge utan att kräva mycket underhåll. Enligt Bribián, Capillo och Usón (2011) finns det olika åsikter om vilket material som egentligen är bäst ur ett livscykelanalysperspektiv. Trä anses ofta vara ett miljövänligt alternativ, men även betong och stål har fördelar beroende på hur och var de används. Därför är det inte alltid enkelt att veta vad som är det mest hållbara valet.

Szczepaniak (2023) påstår att många byggprojekt styrs fortfarande av kostnader, gamla arbetssätt och brist på tydlig information om materialens påverkan. Det kan göra att mer hållbara alternativ inte används, trots att de finns. För att kunna fatta bättre beslut krävs mer kunskap om hur olika material fungerar, både tekniskt och miljömässigt. Det gäller också att förstå hur valen som görs i början av ett byggprojekt påverkar hela byggnadens livscykel.

Det här examensarbetet undersöker hur olika byggmaterial används och vad deras fördelar och nackdelar är när det gäller hållbarhet och funktion. Fokus ligger på trä, betong och stål som är tre vanliga material i den svenska byggsektorn.

1.1 Bakgrund

I takt med att klimatförändringar blir allt mer påtagliga har hållbarhet blivit en avgörande fråga inom nästan alla delar av samhället och byggbranschen är inget undantag. Byggsektorn står för en stor del av världens koldioxidutsläpp, energianvändning och resursförbrukning. Enligt Boverket (2025) står bygg- och fastighetssektorn i Sverige för cirka 20 procent av de totala klimatutsläppen. Det handlar inte bara om utsläpp under själva byggnationen, utan också om påverkan från tillverkning av material, transport och rivning av byggnader. Därför blir det allt viktigare att tänka hållbart redan från början av ett byggprojekt.



Figur 1 Utsläpp av växthusgaser inom bygg- och fastighetssektorn i Sverige (Boverket, 2025).

Det material man väljer till en byggnad påverkar både dess miljöpåverkan och hur den fungerar över tid. Trä, betong och stål är tre av de vanligaste materialen i svensk byggproduktion, och de har alla olika egenskaper, fördelar och nackdelar. Enligt svenskt trä (u.å.) anses trä som ett klimatsmart alternativ eftersom det är ett förnybart material som lagrar koldioxid, samtidigt som det är lätt och relativt enkel att arbeta med. Betong och stål, däremot, enligt har mycket goda bärande egenskaper och är ofta nödvändiga i större eller mer komplicerade konstruktioner, men de är också kopplade till hög energianvändning och stora utsläpp vid tillverkning (Svensk Betong, u.å.; Stålbyggnadsinstitutet, 2009).

Att välja rätt material är inte en enkel uppgift. I verkligheten styrs besluten ofta av en kombination av faktorer, där ekonomi, funktion, hållfasthet, brandklassning och tillgång till material spelar in. Dessutom är det inte alltid tydligt vad som faktiskt är mest hållbart, eftersom olika material fungerar olika bra beroende på var och hur de används. Det finns också brister i kunskap, standardisering och vägledning som gör det svårt att jämföra material på ett rättvist sätt. Livscykelanalys (LCA) är ett verktyg som kan användas för att räkna ut den totala miljöpåverkan ett material har under hela sin livstid, från produktion och transport till användning och återvinning, men används fortfarande inte fullt ut i många projekt (Boverket, 2024a).

1.1.1 Tidigare studier/forskning

Bajwa et al. (2025) undersöker hur materialval påverkas av olika kriterier. En utmaning inom beslutfattande är att olika projekt har olika behov. Det som fungerar i ett småskaligt

bostadsprojekt kanske inte fungerar i en större offentlig byggnad. Därför är det viktigt att förstå att hållbarhet inte handlar om att hitta ett enda rätt material, utan om att väga samman flera faktorer som miljöpåverkan, funktion, ekonomi och återanvändbarhet. För att göra detta på ett bra sätt krävs bättre beslutsunderlag och mer tillgänglig kunskap.

Flera tidigare studier har jämfört klimatpåverkan och egenskaper hos olika byggmaterial. Rinne, Ilgın och Karjalainen, (2022) undersökte miljöpåverkan från en femvåningshybridlägenhetsbyggnad jämfört med motsvarande trä- och betongbyggnader som baserades på en helhetslivscykelanalys över 50 år i Finland med hjälp av programvaran One Click LCA. Det visades att träbyggnaden hade lägst klimatpåverkan i produktionsfasen (A1-A3), medan hybriden var mer fördelaktig än betong i vissa delmoment. I användningsfasen var klimatpåverkan högst för träbyggnaden, och i slutet av livscykeln hade betongbyggnaden lägst utsläpp, men trä blev mest fördelaktigt när återvinning inkluderades. Livscykelutsläpp från byggnadsinstallationer visade sig vara betydande.

En annan studie genfördes av Allan och Phillips (2021) som jämförde miljöpåverkan på en traditionell stålkonstruktion och en byggnad i massivträ i Nordamerika. Då omfattades livscykelanalysen i studiet hela byggnadens livslängd och tog även hänsyn till återanvändning och slutbehandling av materialen. Analysen utfördes enligt TRACI-metoden som är ett verktyg för minskning och bedömning av kemikalier och annan miljöpåverkan. Resultaten visade att massivträbyggnader hade lägre påverkan inom flera miljökategorier, där en minskning på 31–41 % uppnåddes jämfört med stål.

1.1.2 Studiens bidrag

Eftersom byggsektorn ständigt utvecklas, finns det ett tydligt behov av att undersöka och jämföra de vanligaste konstruktionsmaterialen i den svensk byggbranschen. Genom att analysera deras egenskaper, miljöpåverkan och användbarhet i olika typer av byggprojekt kan man få en bättre förståelse för hur framtidens hållbara byggande kan utformas. Denna typ av kunskap är viktig både för beslutsfattare, byggföretag och tekniska konsulter, men också för samhället i stort, eftersom byggsektorns val påverkar miljön under lång tid framöver.

Denna studie utforskar de vanligaste byggmaterial genom att jämföra trä, stål och betong utifrån ett klimatperspektiv samt deras funktionella egenskaper. Till skillnad från flera tidigare studier, som ofta har fokuserat på flerbostadshus eller generella byggnadstyper, undersöker denna studie ett mindre byggprojekt. Materialens fördelar och nackdelar kommer att analyseras och jämföras med hjälp av relevanta verktyg och programvaror.

1.2 Syfte

Syftet med arbetet är att identifiera och analysera de materialval som används inom den svenska byggindustrin med avseende på deras miljömässiga påverkan och funktionalitet.

1.3 Frågeställningar

1. Hur påverkas miljön av de vanligaste svenska materialvalen ur ett livscykelperspektiv?

2. Vilka är de främsta fördelarna och nackdelarna med trä, betong och stål som byggmaterial ur både ett miljömässigt och funktionellt perspektiv?

3. Hur kan beslutsfattare och aktörer inom byggsektorn optimera sina val av material för att främja hållbarhet och minimera negativ miljöpåverkan?

1.4 Avgränsning

Denna studie avgränsas till tre huvudsakliga konstruktionsmaterial trä, betong och stål inom den svenska byggnadsindustrin. Studien omfattar en jämförelse av dessa material utifrån två perspektiv: miljöpåverkan och funktionalitet, med hjälp av en förenklad livscykelanalys (LCA) under byggskedet. Den praktiska delen begränsas till handberäkningar för ett mindre garage, vilket inte täcker alla möjliga konstruktionssituationer. Fokus i studien ligger initialt på tillämpning av svenska byggnormer. Fallstudien för stål avgränsades till återvunnet stål, eftersom det sakandes tillgängliga data för en byggnad med konventionellt stål. Det ansågs att detta inte gjorde stor skillnad eftersom återvunnet stål har samma egenskaper som konventionellt stål.

2. METOD

Examensarbetet är baserad på en utförlig litteraturstudie och jämförelseanalys av tre byggmaterial med fokus på miljömässiga påverkan och funktionalitet. Datainsamlingen i denna studie bygger huvudsakligen på sekundärdata, som analys av tidigare examensarbete, forskning, rapporter och standarder för att besvara frågeställningarna. Utöver en aktuell studie utförs för ett enkelt hus garage genom handberäkning dimensionering med syftet att utföra en livscykelanalys av alla tre material och beakta deras miljömässiga påverkan. Dessutom förstärks arbetets resultat med tre fallstudier av reala byggnader till varje material.

De tre scenarier som ska undersökas:

Scenario 1: Ett enkelt hus garage med mått 5x7 meter byggt av träkonstruktion och väggar

Scenario 2: Ett enkelt hus garage med mått 5x7 meter byggt av betongkonstruktion och väggar

Scenario 3: Ett enkelt hus garage med mått 5x7 meter byggt av stålkonstruktion och väggar.

2.1 Litteraturstudie

Syftet med litteraturstudien är att genomföra en systematisk insamling och granskning av befintliga vetenskapliga artiklar och forskningsstudier för att jämföra tre olika byggmaterial. Datainsamlingen avgränsades till DIVA-portalen, Google Scholar och ScienceDirect för att säkerställa att endast vetenskapligt granskade och peer-reviewed källor inkluderades. Relevanta studier identifierades genom nyckelordsökningar med termer som "byggmaterial", "konstruktionsmaterial", "trä", "betong", "stål" samt "livscykelanalys". Sökningen genererade både svenska och engelska källor, vilket bidrar till en mer mångsidig och berikande databas för examensarbetet. Utöver vetenskaplig litteratur har även information hämtats från Boverkets byggregler (BBR) och miljöbalken för att belysa vilka regler och lagkrav som gäller för respektive byggmaterial. Detta steg var nödvändigt för att säkerställa att arbetet förhåller sig till gällande standarder och byggnormer inom byggbranschen.Efter att datan från litteraturstudien analyserats och bearbetats utförs en jämförelse mellan de olika materialen. Syftet är att identifiera styrkor och svagheter ur flera perspektiv, såsom användningsområden, materialegenskaper, miljöpåverkan samt hur materialen bidrar till nytta vid användning. Särskild vikt läggs vid att bedöma vilka material som har störst respektive minst miljöpåverkan, samt att undersöka resultaten från deras livscykelanalyser. Resultaten från jämförelsen kommer därefter att diskuteras och ligga till grund för de slutsatser som dras i syfte att besvara studiens frågeställningar.

2.2 Fallstudie

För att besvara examensarbetets frågeställningar har tre fallstudier genomförts. Fallstudierna har valts som metod för att ge konkreta och verklighetsförankrade exempel på hur materialen trä, betong och stål används i byggbranschen. Syftet är att undersöka hur materialval kan påverka miljön i olika typer av projekt. Metoden fallstudie lämpar sig väl för detta arbete eftersom den möjliggör en djupare analys av verkliga byggprojekt i deras specifika sammanhang. Varje fallstudie har analyserats utifrån tre gemensamma teman: tekniska förutsättningar, klimatpåverkan inklusive livscykelanalys (LCA), samt koppling till Agenda 2030. Dessa teman valdes för att spegla de centrala perspektiv som behandlas i examensarbetet: konstruktion, miljöpåverkan och hållbar utveckling.

De utvalda projekten är:

1- Cederhusen är ett bostadsprojekt i Hagastaden, Stockholm byggt med korslimmat trä. Enligt Trästad Sverige (u.å.) omfattar det fyra hus på upp till 13 våningar med totalt 234 lägenheter och lokaler i bottenplan. Projektet utvecklades av Folkhem i samarbete med bl.a. Veidekke, General Architecture och Bjerking. Det är Sveriges största bostadskvarter med stomme helt i korslimmat massivträ.
2- Norra Tornen är ett bostadsprojekt i Vasastan, Stockholm byggt med betong. Det är två höghus “Innovationen” (125 m, 36 våningar) och “Helix” (110 m, 33 våningar) enligt OMA (u.å.). Projektet ritades av OMA och utvecklades av Oscar Properties som rymmer över 300 lägenheter. Projektet är ett uppmärksammat exempel på modern höghusbebyggelse i betong med hög arkitektonisk och industriell standard.
3- Portlands Place är ett bostadsprojekt i East Village, London byggt med stål. Det är två höghus på 26 respektive 31 våningar och totalt 524 hyreslägenheter. Projektet, utvecklat av Greystar i samarbete med Hawkins\Brown, omfattar även två lägre byggnader och ett gemensamt våningsplan. Då användes återvunnen stål med syftet att kombinera hållbarhet, effektiv byggprocess och långsiktig flexibilitet.

För respektive projekt har data samlats in från offentliga rapporter, branschpublikationer, vetenskapliga artiklar och företagens egen dokumentation. Särskild vikt har lagts vid att använda källor som redovisar klimatdata enligt erkända LCA-metoder, i linje med modulerna A1–A5 enligt standarden EN 15978:2011. Denna metodik ligger till grund för både Boverkets klimatdeklarationssystem och de LCA-analyser som används i de utvalda fallstudierna (Bjerking, 2019; Malmqvist, Borgström, Brismark & Erlandsson, 2021).

2.3 Handberäkningar

Handberäkningar genomförs som ett delmoment av aktuell studie och är redovisas under rubriken bilagor. Syftet med handberäkningar är att kunna dimensionera garaget och säkerställa rimligheten i resultatet med tanken på materialens olika egenskaper och resursåtgång vid användning. Denna metod valdes för att fastställa volym mängden av de tre materialen som krävs för att bygga ett bilgarage. Resultatet från dessa beräkningar används därefter genom tillämpning av programvara för att analysera miljöpåverkan och på så sätt möjliggöra en rättvis jämförelse mellan olika materialalternativ.

2.4 Livscykelanalys (LCA)

Livscykelanalysen utföras med användning av One Click LCA software och program. Där baserat på resultatet från handberäknings delen, volym mängden av materialen som krävs vid varje scenario av aktuell studie är insatt i programmet, själva programmet utförs en total livscykelanalys baserat på standardiserat miljöproduktdeklaration och ger totalt koldioxidutsläpp från materialet livscykeln. Detta värde är redovisat i resultat delen och används för att jämföra miljöpåverkan till varje material. Metoden förstärker aktuell studiet genom noggrann och standardiserat beräkning av koldioxidutsläpp och därmed miljöpåverkan.

2.5 Verktyg

2.5.1 Tekla structures

Tekla 3D software och program används för att modellera och visualisera garaget utformning och konstruktion, samt skapa en tydlig representation av byggnadens geometri.

2.5.2 One Click LCA

One Click LCA software och program används för beräkningen av materialens miljöpåverkan vid dem tre olika scenarier som undersökes där programmet utför en livscykelanalys baserat på materialåtgången vid varje scenario.

2.6 Koppling mellan metoder

För att få en helhetsbild av studien används ovan nämnda metoder för att skapa en översiktlig jämförelse mellan materialens egenskaper och därigenom möjliggöra en rättvis bedömning av deras miljöpåverkan i ett mindre projekt.

Litteraturstudien genomförs för att samla in data om respektive materials egenskaper och miljöpåverkan. För att uppnå ett mer realistiskt resultat används redan färdigställda byggprojekt som fallstudier för varje material, vilka sedan jämförs med varandra. Därefter utförs ett egen studien om garage byggprojekt där handberäkningar används för att fastställa den mängd material som ska användas vid dimensioneringen av garaget. Dessa resultat ligger sedan till grund för beräkning av den totala koldioxidutsläpp genom användning av One Click LCA som utför en livscykelanalys till vartenda scenario och därmed kunna jämföra och analysera klimatpåverkan till varje material.

Genom koppling mellan metoder kan man undersöka och se resultatet på teoretiskt sätt, reala exemplar som är redan utförda samtidigt som en egen undersökning av i form av garage studien vilket ger ett rikt underlag för att jämföra de tre olika material och besvara frågeställningarna.

3. ÄMNESMÄSSIG REFERENSRAM

Den här ämnesmässiga referensramen syftar till att redogöra för den befintliga kunskapen inom området hållbart byggande med fokus på tre vanliga konstruktionsmaterial, trä, betong och stål. Referensramen baseras på aktuell forskning, myndighetsrapporter, branschdokument och examensarbeten. Fokus ligger på materialen ur ett livscykel-, miljö- och funktionalitetsperspektiv.

3.1 Livscykelanalys - verktyg för hållbara material

Livscykelanalys (LCA), enligt Boverket (2024), är ett vetenskapligt verktyg för att beräkna ett materials miljöpåverkan under hela dess livscykel, från råvaruutvinning till återvinning eller deponi. LCA används i ökande grad i byggbranschen som grund för klimatberäkningar och miljödeklarationer.

Erlandsson (2018) visar att LCA ger viktig information för mer hållbara materialval, men att användningen ännu inte är standard i alla projekt. För att öka användningen har Boverket infört krav på klimatdeklarationer vid nyproduktion. IVL:s anvisningar för LCA beräkningar (2025a) är ett viktigt stöd för branschen för att harmonisera metoder och datakällor.

Genomgången av litteratur och tidigare studier Rinne et al., (2022) och Allan och Phillips (2021) visar val av byggmaterial har stor påverkan på både klimat och funktion i byggprojekt. Trä lyfts fram som det mest klimatsmarta alternativet tack vare sina låga utsläpp och förnybara egenskaper, men dess användning begränsas ofta av tekniska krav och branschpraxis. Betong är robust och beprövat, men kopplat till mycket hög klimatpåverkan på grund av cementens produktion. Stål har goda konstruktiva egenskaper och hög återvinningsgrad, men är energikrävande att tillverka. Samtidigt visar studier att livscykelanalys och cirkulära principer används i varierande grad och att praktiska hinder kvarstår för ett mer hållbart byggande. Detta understryker behovet av fortsatt kunskapsutveckling, tydligare beslutsunderlag och en mer systematisk jämförelse mellan materialens egenskaper, miljöpåverkan och återanvändbarhet i olika typer av byggprojekt.

3.2 Trä som byggmaterial

Den här delen visar vilka tekniska och miljömässiga egenskaper trä, samt materialets livscykel. Trä, enligt Svenskt Trä (u.å.), är ett förnybart och biologiskt nedbrytbart material som historiskt sett varit centralt i svenskt byggande. I dag är intresset för trä högre än någonsin, särskilt i samband med ökade krav på klimatneutralt byggande. Trä lämpar sig väl för lättare byggnationer och används ofta i småhus, radhus och flervåningshus byggda med KL-trä. Fördelarna inkluderar också isolerings egenskaper, låg vikt, snabbmontering och estetisk flexibilitet.

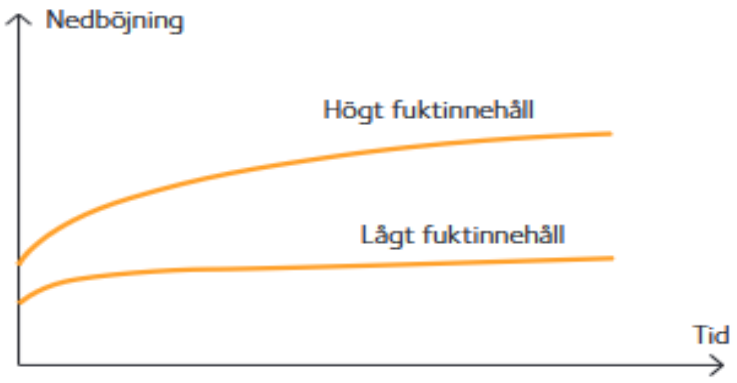
3.2.1 Tekniska egenskaper hos trä

Enligt Svenskt Trä (2019a) har trä ett högt förhållande mellan styrka och vikt. Vanligt konstruktionsvirke som används i Sverige är furu eller gran i hållfasthetsklass C24. Den tryckhållfasthet som anges i Eurokod 5 för C24 är cirka 21 MPa längs med fiberriktningen, medan draghållfastheten är cirka 13 MPa. Elasticitetsmodulen i samma riktning är cirka 11000 MPa. Detta innebär att materialet kan bära stora laster utan att deformeras alltför mycket. Densiteten är ungefär 420 kg/m^3, vilket innebär att trä är lättare än många andra byggmaterial, samtidigt som det fortfarande erbjuder god bärförmåga. Kombinationen av låg vikt och hög hållfasthet är särskilt värdefull i exempelvis flervåningshus i trä där lastnedföring är avgörande.

Det finns, enligt Svenskt Trä (2019a), många sätt att mäta och uttrycka hållfasthet i trä. Förutom tryck- och draghållfasthet längs och tvärs mot fiberriktningen, används även skjuvhållfasthet och böjhållfasthet. Böjhållfastheten för C24 ligger på cirka 24 MPa. Träets hållfasthet påverkas av flera faktorer, däribland fuktkvot, träslag, åldring och förekomst av defekter som kvistar eller sprickor. Därför sker klassificering enligt särskilda hållfasthetsklasser.

Enligt svenskt trä (2019a) används högre klasser som C30 eller C35 vid mer krävande konstruktioner, eller så utnyttjas limträ, som byggs upp av flera lameller av torkat virke som limmas ihop. Limträ har jämnare hållfasthet och tillverkas ofta i hållfasthetsklasser som GL28h eller GL32c, där böjhållfastheten kan överstiga 30 MPa. Eftersom träets egenskaper är väl dokumenterade i både standarder och byggpraxis kan det användas på ett säkert och förutsägbart sätt i bärande konstruktioner, inklusive bjälklag, pelare, takstolar och väggar.

Enligt Svenskt Trä (2021a) är krypning ett fenomen som innebär att trä deformeras över tid under konstant belastning. Denna deformation påverkas av faktorer som materialets fukthalt, belastningens varaktighet och omgivningens temperatur. Träets hygroskopiska egenskaper innebär att det absorberar och avger fukt beroende på den relativa luftfuktigheten (RF) i omgivningen. Hög RF ökar risken för krypning, medan låg RF minskar den. Figur 2 illustrerar hur nedböjningen i ett träelement påverkas av fuktinnehållet.



Figur 2 Schematisk beskrivning av hur högt respektive lågt fuktinnehåll påverkar träets nedböjning över tid (Svenskt Trä, 2019a).

3.2.2 Miljö och hållbarhet hos trä

Enligt Svenskt Trä (u.å.) är trä ett av de mest miljövänliga och hållbara byggmaterialen som används inom dagens byggindustri. Materialets miljömässiga fördelar grundar sig på att det är förnybart, fungerar som ett kolförråd, kräver förhållandevis låg energi vid tillverkning samt har goda möjligheter till återanvändning och energiutgivning. Med rätt dimensionering, skydd mot fukt och god teknisk utformning kan trä även uppnå lång livslängd i olika miljöer. Trä binder koldioxid under sin tillväxt genom fotosyntes. När trä används som byggmaterial lagras denna koldioxid i konstruktionen under hela dess livslängd, vilket bidrar till minskade nettoutsläpp av växthusgaser (Svenskt Trä, 2015a). Enligt Svenskt Trä används till stor del biobränslebaserad energi inom sågverksindustrin, vilket ytterligare reducerar utsläppen jämfört med energiintensiva material som betong och stål.

Enligt Svenskt Trä (2019) påverkas träkonstruktioners livslängd av fukt, UV-strålning och biologiska angrepp. Med rätt skydd, exempelvis luftning, avrinning och täckning av ändträ, kan trä hålla mycket länge. Eurokod 5 anger att bärande träkonstruktioner normalt kan uppnå en teknisk livslängd på 50 år eller mer, under förutsättning att skyddsåtgärder och rätt utformning tillämpas.

Trä, enligt Svenskt Trä (2015b), har goda förutsättningar för återbruk och återvinning. Virke kan demonteras och återanvändas i nya byggprojekt, eller bearbetas till skivmaterial som spånskivor och fiberskivor. Om återanvändning inte är möjlig, kan trä användas för energiutvinning med en verkningsgrad på cirka 4,5 kWh/kg torrt trä, vilket minskar behovet av fossila bränslen.

3.2.3 Livscykelanalys (LCA) av trä som byggmaterial

För att analysera träets klimatpåverkan under byggskedet har en livscykelanalys (LCA) genomförts, baserad på information från Svenskt Trä (2015) och referensvärden från KTH och Boverket (Malmqvist et al., 2021). Analysen följer standarden EN 15978:2011, där

miljöpåverkan delas in i modulerna A1–A5. Dessa omfattar råvaruutvinning, produktion, transport till byggplats och montering. Den funktionella enheten är 1 m² bruttoarea (BTA) stomme i KL-trä, vilket möjliggör jämförbarhet med andra byggmaterial.

A1-A3:Råvaruutgivning och produktion

Trä har förmågan att binda koldioxid under tillväxten, vilket gör det till ett naturligt kolförråd. Produktionsfasen inkluderar skogsbruk, avverkning, sågning och vidareförädling. Eftersom sågverk ofta drivs med biobränslebaserad energi är klimatpåverkan relativt låg. Enligt Svenskt Trä (2015) uppgår klimatpåverkan från dessa delmoment till cirka 80–120 kg CO_2e/m^2 BTA, beroende på transportavstånd och energimix.

A4: Transport till byggarbetsplats

Transport sker vanligtvis med lastbil. Denna fas bidrar med ytterligare cirka 5–15 kg CO_2e/m^2 BTA enligt Malmqvist et al. (2021).

A5: Montering på byggplats

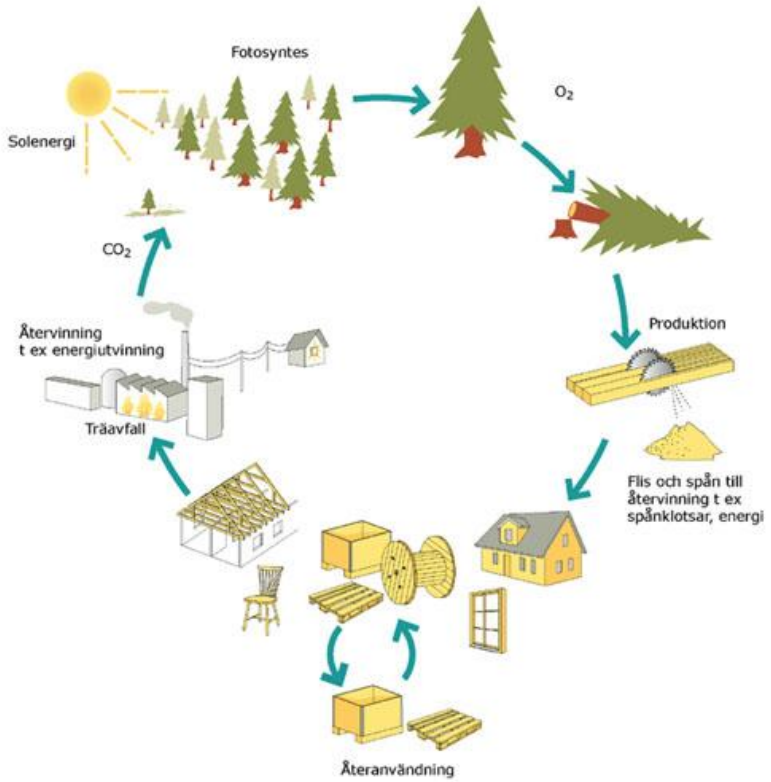
Prefabricerade träelement i KL-trä kräver begränsad energianvändning vid montering. Klimatpåverkan i denna fas uppgår till cirka 10–20 kg CO_2e/m^2 BTA (Malmqvist et al., 2021).

Total klimatpåverkan (A1-A5)

Den sammanlagda klimatpåverkan från byggskedet uppgår därmed till cirka 100–150 kg CO_2e/m^2 BTA. Detta är betydligt lägre än motsvarande värden för stommar i betong eller stål.

Träets biologiska kretslopp

Utöver den tekniska analysen enligt EN 15978 är det relevant att betrakta träets roll i det biologiska kretsloppet. Under tillväxten tar trä upp koldioxid, som lagras i materialet så länge det används i byggnaden. När byggnaden når slutet av sin livslängd kan träet återanvändas, återvinnas eller energi återvinnas genom förbränning. På så sätt ingår trä i ett cirkulärt flöde som stödjer resurseffektivitet och minskad klimatpåverkan även i slutfasen av livscykeln (Svenskt Trä, 2015).



Figur 3 Träprodukters kretslopp från fotosyntes till återvinning och energiutgivning (Svenskt Trä, 2015c).

Träets låga klimatpåverkan i modulerna A1–A5, tillsammans med dess roll i det biologiska kretsloppet, visar att materialet är mycket väl lämpat för hållbart byggande. Resultaten från denna LCA stöder arbetets syfte att undersöka hur materialval påverkar miljön och bidrar till uppfyllelsen av mål 9 och 12 i Agenda 2030 – hållbar industri, innovation och infrastruktur samt hållbar konsumtion och produktion.

3.3 Betong som byggmaterial

Betong, enligt Finja betong (u.å.), är det mest använda byggmaterialet i Sverige och globalt. Betong används i allt från bostäder till broar, tunnlar och industribyggnader. Enligt Svensk Betong (u.å.) I praktiken föredras betong ofta för dess stabilitet, ljudisolering, brandsäkerhet och enkelhet i gjutning. Dess höga massa bidrar till värmetröghet, vilket kan minska energibehovet i vissa byggnader. Dock innebär betongens tyngd och stelhet även längre byggtider, behov av kraftiga fundament och högre transportkostnader. Forskning och industriinitiativ, som exempelvis "klimatförbättrad betong", syftar till att sänka betongens klimatavtryck, men dessa lösningar är ännu inte fullt etablerade i branschen.

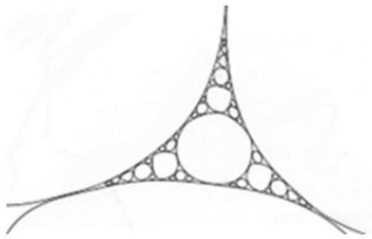
3.3.1 Betong komponenter

Enligt Svensk Betong (u.å.a) består betong av tre primära komponenter krossat berg (aggregat), bindemedel och vatten. Grus, sand och sten uppfyller ca 80% av betongen sammansättning. Cement används som bindemedel och uppfyller 14% av materialet där resten består av vatten och räknas till 6%.

Figur 4 Betong komponenter (Burström & Nilvér, 2018).

3.3.1.1.Aggregaten komponent inom betong

Gustavsson och Dahlberg (2024) beskriver att aggregaten inom betong kan delas baserat på vilken bergmaterial det är samt kornstorlek där korn storlekar sträcker sig från <0,001 mm upp till 64 mm. Denna variation på storleken är nödvändigt inom betongstruktur då mindre korn fyller tomrummens mellan dem större korn, vilken i sin tur minskar mängden cement som förbrukas och ger en mer hållfast struktur. Cementet fungerar som lim mellan aggregaten och håller de fast tillsammans denna funktion uppnås genom att blanda cementet oftast portlandcement vilken är ett hydrauliskt bindemedel med vatten. Detta skapar cement pasta och påbörjar en exoterm reaktion, under första timmen är cementpastan fortfarande formbar, efter 2–4 timmar börjar cementpastan riktigt stelnar.



Figur 5 En ideal fördelning av kornstorlek i aggregat (Burström & Nilvér, 2018).

Tillverkning av Portlandcement går genom att krossa och mala kalksten $CaCO_3$ tills den är fint pulver som sedan bränns i ugn med +1450℃ för att få bränd kalk genom nedanstående reaktionen vilket orsakar stora mängder koldioxidutsläpp, sedan blandas brändkalken med lera, skiffer och sand, krossas och malas igen till fint pulver och sätts in i ugnen igen för att få klinkermineral i form av små kulor som benämns cementklinker (Jönsson & Ekman, 2020).

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$$

3.3.2 Tekniska egenskaper hos betong

Hållfastheten och beständigheten, enligt Abdulal och Chamoun (2021), är två av de viktigaste egenskaper som betong kan erbjudes, där materialet hållfasthet bestäms till en stor del av förhållandet mellan vatten och cement vilket uttrycks som vattencement talet (VCT). En annan faktor som kan påverkas betong hållfastheten är aggregatens kornstorleksfördelning, därför genom optimering av aggregatens kornstorleksfördelning kan porositetens inom materialet minskas och högre hållfasthet uppnås.

$$VCT = {}^{Vatten}/_{cement}$$

Därefter kan visa tillsatsmedel användas vid behöv av särskilda egenskaper för att tillföra eller optimera ett befinnande egenskap, detta kan användas i låga temperaturförhållanden där luftporbildande medeltillsats till betong vilket främjar frostbeständighet genom att mikroskopiska bubblor tillåta vattnet bli is utan att orsaka sprickor i betongen. Andra tillsatsmedel kan vara silikastoft eller flygaska, I detta fall kan vattencement talet räknas med hänsyn till tillsatsmedel (Abdulal & Chamoun, 2021).

$$VCT = {}^{Vatten}/_{(cement + FA \times k)}$$

Där FA är flygaska räknats i kilogramenhet och k är deras effektivitetsfaktorer.

Enligt Abdulbaki och Chaouche (2015), En annan egenskap som betongen är känd för är dess tryckhållfasthet vilket innebär att materialet kan tåla store grader av tryck, men den är inte lika tåligt när den utsatt för dragkrafter. Vid vissa situationer kan tryckhållfasthet vara 13 gånger större som i hållfasthetsklass C25/30 där betonger kan tåla endast 1,8 MPa medan tryckhållfastheten kan gå upp till 25 MPa. Denna stora skillnad mellan hållfasthet vid dessa två krafter kan kompenseras genom armeringen av betong, vilket innebär att implementera

stål inuti betongen där konstruktionen kan utsatt för stora dragkrafter. Genom kombinationen av betongens tryckhållfasthet och stål draghållfasthet blir strukturen alltmer kraftigt och svårare att deformeras.

Enligt Isaksson et al. (2020), Krypning och krympning inom betong kan bero på olika faktorer såsom omgivningens fuktighet, bärverksdelens dimensioner och betongens sammansättning. Krypningen kan även påverkas av betongens mognad vid belastning tillfället samt av lastens storlek och varaktighet.

3.3.3 miljö och hållbarhet hos betong

Svensk Betong (u.å.) beskriver att betong är en av de mest byggnadsmaterial använts i dagens samhälle, den ger bra möjligheter för återvinning samtidigt koldioxidbindning förmåga, ändå så står materialet för 4% av Sveriges koldioxidutsläpp. (Svenskt Näringsliv, 2023). Där 90% av koldioxidutsläppen sker i produktion skedet vid tillverkning av rå material som cement, vanligtvis Portlandcement. 5–8% vid transport och 1–5% vid tillverkning av materialet i fabrikerna. Trots teknikutveckling och nya recept med alternativa bindemedel som slagg eller flygaska, är betongens klimatpåverkan fortsatt hög.

Under sin livslängd går betongen igenom en kemisk reaktion som kallas karbonatisering, där kalciumhydroxid $CaOH_2$ i betongen reagerar koldioxid CO_2 från luften och bilder kalciumkarbonat $CaCO_3$.

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$$

Denna reaktion är naturligt driven och motverkar koldioxidutsläppen vid produktion skedet i ca 15-20%. Samtidigt så har betongen förmågan att lagra båda värme och kyla ur sin omgivning och ge upp denna lagring senare vilket minskar behovet av extern uppvärmning såsom kylning, med andra ord mindre energiförbrukning och mindre klimatpåverkan (Svensk Betong, u.å.).

Naturskyddsföreningen (2022) beskriver att varje toncement som tillverkas producerar ca 700–800 kilogram koldioxid, detta är uppdelat till 66% av kalksten och 33% av fossilbränsle som används för att förbrinna stenen och utföra processen. Ändå så är betongen använts i dagenssamhälle kraftigt, där enbart i Sverige året 2020 används 2,8 miljoner toncement vilket orsakade 1,9 miljoner tonkoldioxid utsläpp. Samtidigt så är Sverige inte det enda landet som tillverkas cement, i dagsläge tillverkas hela värden 4,8 miljarder toncement årligen vilket motsvarar 2,7 miljarder tonkoldioxid utsläpp årligen. Detta räknas till 8% av världen koldioxidutsläpp.

Betongen består av naturliga material vilket gör det återvinningsbar på hög nivå, nästan hela materialet kan återvinnas och används igen så att bara minimala mängder deponeras. Ur ett cirkulär perspektiv denna återvinning av materialet minskar förbruk av berg naturliga resurser, där betongen som återvinnas kan används som bärlager och fyllnadsmaterial vid tillverkning av ny betong (Svensk Betong, u.å.a).

Enligt Svensk Betong (u.å.), den höga beständigheten hos betong ger materialet en lång livslängd tack vare dess kemiska och fysikaliska egenskaper, betongen tål fuktighet och möglar inte men vid ingjutning av armering inom betong bör fuktighet och salthaltig miljö beaktas då stål kan rosta. Samtidigt så är materialet obrännbart och håller sina egenskaper även vid brand i närheten vilken är väsentligt båda för materialet livslängd och ur säkerhetsperspektiv då betongen börjar först bryts ner vid 300 ℃ vilket eliminerar risken att stommen kollapsar vid en vanlig brand.

Ändå så klassificeras livslängden till betongen inom tre klasser L100 (100 år), L50 (50 år) och L20 (20 år). Dessa klasser används främst vid bestämning av minsta tillåtna täckande skiktet i enlighet med exponering klass enligt följande figur från SS-EN 1992 Eurokod 2: Betongkonstruktioner. (Eurocode Software AB, u.å.).

Exponeringsklass	Max vct_{ekv}	L 100	L 50	L 20
X0	–	–	–	–
XC1	0,90	15	10	10
	0,60	10	10	10
XC2	0,60	25	20	15
	0,55	20	15	10
	0,50	15	10	10
XC3, XC4	0,55	25	20	15
	0,50	20	15	10
XS1, XD1	0,45	30	25	15
	0,40	25	20	15
XD2	0,45	40	30	25
	0,40	35	30	20
	0,35	30	25	20
XD3	0,40	45	35	25
	0,35	40	30	25
XS2[1)]	0,45	50	40	30
	0,40	45	35	25
	0,35	40	30	25
XS3[1)]	0,40	45	35	25
	0,35	40	30	25

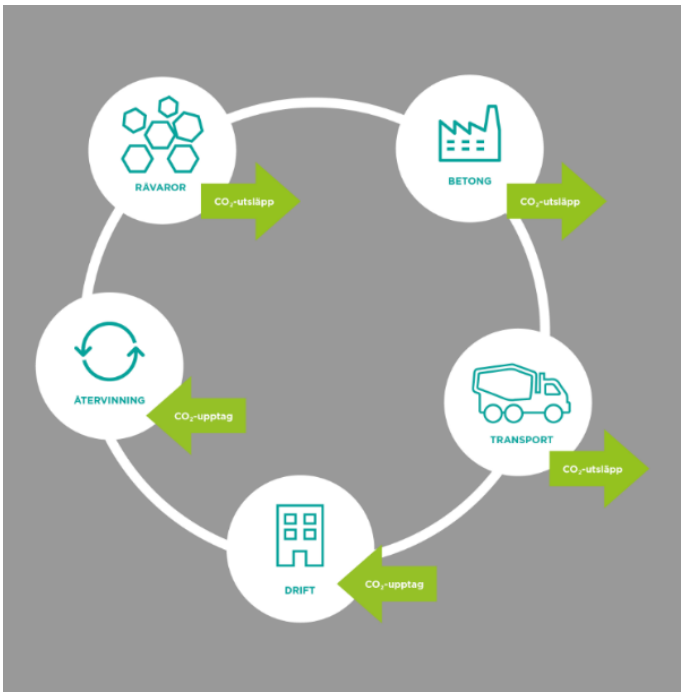
1) Angivna täckande betongskikt gäller för en kloridkoncentration i havet av högst 1,0 % (ostkusten). För högre kloridkoncentrationer kan särskilda värden på minsta täckande betongskikt anges i varje enskilt fall.

Figur 6 Minsta täckande betongskikt med hänsyn till beständighet för armering

3.3.4 Livscykelanalys (LCA) hos betong

Betong livscykel kan delas in i fem olika steg enligt Svensk Betong (u.å.b):

1- Råvaror materialutvinning och bearbetning: i denna steg förbereds råvaror som kan inkludera volymmättningar och separation av aggregat baserat på kornstorlek genom maskvidd för att kunna optimera kornfördelning såsom utvinning av kalkcement genom en kemisk process vilket är nödvändigt för betong hårdnade genom sitt hydraulisk egenskap. Redan i första steget släpps 90% av koldioxid orsakat av betongtillverkning.
2- Betong tillverkning av rå varor sker i andra steg där alla råvaror blandas och bearbetas tillsammans med specifika mängder för en högre kvalitet och produceras två olika former av betong. Det ena kallas för prefabricerad betong där betong utformas och hårdnas i fabriken innan transporten, det andra kallas för platsgjuten betong där betongen blandas och bearbetas men hårdnas inte utan försvaras och transporteras för att sedan blir gjuten på plats efter behovet. Detta steg orsakar 1–5% av koldioxidutsläpp ursakat av betongtillverkning.
3- Transport av betong efter materialets tillverkning i fabrikerna, betong är tung och därför används särskilda lastbilar för att transportera materialet vilket släpper koldioxid i sin tur, samtidigt så krävs särskilda betongbilar med roteraggregat vars uppgift är att undvika betong hårdnade innan den gjuts på platsen.
4- Drift steg, efter betongen har gjutit på platsen och hårdnade efter önskemål är den redo och slut tillverkade. I denna fas fortsätter en naturlig kemisk reaktion mellan betongen och luften i sin omgivning där betongen uppta koldioxid från luften och därför medverkar mellan 15–20% av koldioxid utsläppts i produktion skedde.
5- Efter att betongen har använts genom sin livslängd eller för andra orsaker behövde materialen rivas så återvinnas betongen igen nästan fullständigt och används i nya betongproduktion som fyllnadsmaterial vilket minskar naturliga resurser förbruk.



Figur 7 Betong livscykel olika steg, (Svensk Betong, u.å.b).

Materialutvinning och bearbetning steg står för 90% av koldioxidutsläpp inom betong-tillverkning, detta gör denna steg den viktigaste ur Eng. Global Warming Potential (GWP) perspektiv inom materialet livscykel. Koldioxidutsläpp orsakas av två delar inom stegen, 69% procent tillhör kalcinering vid cement-produktion och 31% tillhör användning av fossilt bränsle inom processen, (Sjunnesson, 2005).

3.4 Stål som byggmaterial

Stål, enligt Stålbyggnadsinstitutet (2009), är ett av de mest hållfasta byggmaterialen och används i konstruktioner där stora spännvidder, höga laster eller smidig montering krävs. Vanliga användningsområden är broar, hallar, höghus och stommar till prefabricerade modulsystem. Stålets största tekniska fördelar är dess draghållfasthet, flexibilitet och hållbarhet. Under de senaste åren har dock användningsområdet utökats, och stål har blivit ett alltmer populärt val även som fasad- och beklädnadsmaterial inom modern stadsarkitektur. Där spelar det en viktig roll inte bara ur konstruktionssynpunkt, utan även som ett designmässigt och funktionellt inslag. Jernkontoret (2023), om stål tillverkas med fossilfri energi och återvinns effektivt, kan det på sikt få en betydligt lägre klimatpåverkan. Projekt som HYBRIT i Sverige visar på en möjlig framtid där stålproduktion blir i stort sett utsläppsfri.

3.4.1 Stålproduktion

Det finns huvudsakligen två metoder för att producera stål idag enligt New Steel Construction (2017): Masugn (BOS) och ljusbågsugn (EAF). Den förstnämnda metoden, BOS, står för cirka 70 % av världens stålproduktion.

I Basic Oxygen Steelmaking (BOS)-metoden produceras smält järn i en masugn genom att använda järnmalm, kokskol och skrotstål. Denna metallblandning upphettas till cirka 1500 °C och smälts under en period på omkring 15 minuter för att omvandlas till stål. Under processen blåses högrenat syre in i den smälta blandningen. Syret reagerar med kol och andra oönskade ämnen, vilket gör att de oxiderar och skiljs bort från metallen. Oxidationsreaktionerna genererar värme, och temperaturen hålls konstant genom att tillsätta skrot, vilket bidrar till att reglera temperaturen och sammansättningen, sedan hälls det färdiga stålet i gjutformar. Den slutliga kolhalten i stålet efter raffineringen är vanligtvis omkring 0,04 %. Under gjutningsprocessen kan också olika legeringstillsatser införas för att justera stålets sammansättning och ge det specifika egenskaper.

3.4.2 Tekniska egenskaper hos stål

Enligt Metallkompetens (u.å.) består stål av en metallisk legering av järn (Fe) och en liten mängd kol (C), oftast mellan 0,1 och 2 viktprocent. Denna kombination som ger stålet dess grundläggande styrka och hållfasthet. Man kan modifiera stålets mikrostruktur genom att tillsätta olika legeringselement såsom molybden, mangan, krom eller nickel för att skapa olika stålsorter därmed anpassa dess egenskaper för olika användningsområden. Invex AB (2024) beskirver att den vanligaste typen av konstruktionsstål som används för pelare och balkar är S355 som är en stålsort som kännetecknas av sin höga seghet. Denna egenskap innebär att stålet kan absorbera stora mängder energi innan ett brott uppstår, vilket är avgörande i konstruktioner där säkerhet och tålighet mot dynamiska laster är viktiga faktorer. Enligt BE Group Sverige AB (2016) är stål i allmänhet lätt att svetsa och bearbeta, vilket förenklar både konstruktion och tillverkning. Svetsbarheten kan dock påverkas av stålets kemiska sammansättning – framför allt av kolhalten. En lägre kolhalt förbättrar svetsbarheten och minskar risken för sprickbildning i svetsfogarna, vilket är särskilt viktigt vid sammanfogning av bärande delar i större stålkonstruktioner.

Stål har förmågan att motstå betydande dragkrafter utan att brista, vilket främst beror på dess höga draghållfasthet. Dock varierar denna egenskap beroende på stålsort. Enligt Eurocode 3 sträcker sig sträckgränsen från cirka 235 MPa för S235-stål till upp mot 460 MPa för S460-stål. Cadoni, Forni, Gieleta, et al. (2018) undersökte det mekaniska beteendet hos konstruktionsstålet S355 under både drag- och tryckbelastning över ett brett spektrum av töjningshastigheter. Studien visade att sträckgränsen generellt är högre vid dragprov jämfört med tryckprov. Vid en töjningshastighet på 10^3 s^{-1} var draghållfastheten cirka 40 % högre än den maximala tryckhållfastheten.

Elf och Cederth (2013) påpekar att stål har hög värmeledningsförmåga och värms därför snabbt upp vid brand, vilket leder till att hållfasthet och elasticitetsmodul minskar. Detta försämrar stålkonstruktionens bärförmåga och kan i värsta fall orsaka kollaps. Vid cirka 450 °C uppstår krypfenomen i stålet att en gradvis plastisk töjning eller förlängning sker. Stål kan brandskyddas effektivt genom att byggas in i väggar eller bjälklag, där omgivande material bidrar till skyddet. Detta minskar behovet av extra isolering och kan sänka

kostnaderna. Alternativt kan stål isoleras med skivmaterial, brandskyddsfärg eller sprutisolering.

3.4.3 miljö och hållbarhet hos stål

Olmez, Dilek, Karanfil och Yetis (2016) påstår att den största energiförbrukande tillverkningsindustrin i världen är järn- och stålindustrin (ISI) och att den har en betydande roll i världsekonomin. Stål är starkt kopplad till resursbevarande, energieffektivisering och minskning av utsläpp eftersom produktionen av stål är mycket energikrävande. Den största utmaningen för stålindustrin är att minska koldioxidutsläppen från tillverkningsprocessen för att minska dess miljöpåverkan.

DiGiovanni, Hisseine, och Awolayo (2024) beskriver att stål som material binder inte aktivt med koldioxid under sin livslängd. Däremot har restprodukter från stålindustrin, särskilt stålslagg, visat potential att fungera som koldioxidminskande genom en process som kallas karbonatisering. I denna kemiska reaktion reagerar kalcium- och magnesiumföreningar i slaggen med atmosfärisk eller industriell koldioxid för att bilda stabila karbonater, såsom kalciumkarbonat ($CaCO_3$) och magnesiumkarbonat ($MgCO_3$). Dessa mineraler kan permanent lagra koldioxid i fast form.

Stålproduktion genererar mer koldioxid per kilo än både betong och trä. Å andra sidan är stål det mest återvunna materialet i världen. Efter återvinning behåller stålet sina ursprungliga egenskaper, vilket innebär att en stålbalk kan smältas ner och bli till en ny balk med samma kvalitet “up-cycling”. Stål kan till och med uppgraderas genom återvinning, vilket innebär att det kan få högre hållfasthetsegenskaper. I Sverige är cirkulationstiden för stål cirka 35 år, och återvinningskvoten ligger på över 90%. Kvoten beräknas som insamlat skrot dividerat med tillgängligt skrot och förluster (Brynhildsen, 2020; Ali & Mohamed, 2021).

Enligt Fossilfritt Sverige (2018) är järn- och stålindustrin en av de största utsläppskällorna inom industrisektorn. I Sverige motsvarar järn- och stålproduktionen knappt 5,5 miljoner ton CO_2 per år, där cirka 85 % av dessa utsläpp uppstår vid reduktionen av järnmalm med kol i masugnar. Som tidigare nämnts är stål helt återvinningsbart, och återvunnet skrot står globalt för omkring 40 % av ståltillverkningen. I Sverige återanvänds cirka 80 % av ståltillverkningens restprodukter som råmaterial eller säljs vidare (Jernkontoret, 2024). För att minska utsläppen investerar branschen i teknik som använder fossilfri vätgas för järnframställningen, vilket kan minska koldioxidutsläppen med upp till 93 % jämfört med traditionella masugnar (Energimyndigheten, 2024). Enligt stålbranschens färdplan ska all svensk stålproduktion vara fossilfri senast år 2045 (Fossilfritt Sverige, 2018).

Stål påverkas av korrosion när det utsätts för fukt och syre. Korrosion, enligt Ali och Mohamed (2021), är en nedbrytningsprocess där fukt och föroreningar ökar rostbildning som kan försämra stålet bärförmåga. Vid max 60% luftfuktighet sker ingen korrosion, om inte metallytan är smutsig och bibehåller fukt samtidigt. I miljöer med över 80% luftfuktighet kan rostskyddsbehandling användas, vilket ökar stålets kostnad. För att säkerställa stålets tekniska livslängd är skyddsåtgärder och regelbundet underhåll avgörande. Valet av

korrosionsskydd baseras på korrosivitetsklass (t.ex. C1–C5 enligt ISO 12944) samt den förväntade livslängden hos konstruktionen. Enligt Hirn (2019) är det ofta ekonomiskt fördelaktigt att från början välja ett underhållsfritt skyddssystem vid krav på lång livslängd. För en konstruktion med en önskad livslängd på 30 år kan återkommande ommålningar bli betydligt dyrare än ett inledande, underhållsfritt zinkskikt. Varmförzinkade stålstommar kan, under gynnsamma förhållanden, klara sig i många decennier utan behov av underhåll. Med rätt korrosionsskydd kan stålbyggnader därför dimensioneras för en livslängd på 50 till 100 år innan väsentlig rost behöver åtgärdas.

Korro-sivitets-klass	Massförlust per ytenhet samt tjockleksreduktion (Ettårig exponering[1])			
	Stål		Zink	
	Massförlust (g/m²)	Tjockleksreduktion (µm)	Massförlust (g/m²)	Tjockleksreduktion (µm)
C1	≤ 10	≤ 1,3	≤ 0,7	≤ 0,1
C2	> 10 till 200	> 1,3 till 25	> 0,7 till 5	> 0,1 till 0,7
C3	> 200 till 400	> 25 till 50	> 5 till 15	> 0,7 till 2,1
C4	> 400 till 650	> 50 till 80	> 15 till 30	> 2,1 till 4,2
C5	> 650 till 1500	> 80 till 200	> 30 till 60	> 4,2 till 8,4
CX	> 1500 till 5500	> 200 till 700	> 60 till 180	> 8,4 till 25

Figur 8 Standardiserade korrosivitetsklasser. Korrosionshastigheten är i allmänhet högre i början av exponeringen, (Hirn, 2019).

3.4.4 Livscykelanalys (LCA) hos stål

Stål livscykel kan delas in i fem olika steg:

1. Utvinning av råmaterial

Stål tillverkas främst av järnmalm, koks och kalksten. Malmbrytning i dagbrott kräver stora markingrepp, vilket förstör habitat och fragmenterar landskap. Gruvor förbrukar mycket vatten, som ofta förorenas med kemikalier och gruvslam, vilket hotar ekosystem och grundvatten. Infrastruktur som vägar, järnväg och kraftledningar byggs för att nå avlägsna gruvor som ökar miljöpåverkan ytterligare (UK Green Building Council, u.å.). Enligt Institute of Materials, Minerals and Mining (2023) släpper Kolbrytning för koks dessutom ut stora mängder metan med 12 miljoner ton – motsvarande cirka 990 miljoner ton CO_2 år 2021.

2. Tillverkning

Masugn (BOS) processen, som baseras på järnmalm och kol, är mycket energiintensiv och en av de största källorna till utsläpp inom stålindustrin. För att producera ett ton råstål släpps i genomsnitt cirka 1,9 ton koldioxid (CO_2) ut, främst från kolförbränningen i masugnen. Dessutom bildas luftföroreningar såsom Kvävedioxid NO_x och Svaveldioxid SO_2 vid kolförbränning. Ljusbågsugnar (EAF) använder huvudsakligen återvunnet stålskrot och el som energikälla, vilket gör dem betydligt mindre klimatbelastande än masugn-BOS-processen. I genomsnitt uppgår utsläppen till endast cirka 0,36 ton CO_2 per ton producerat stål (Fan & Friedmann, 2021).

3. Transport och distribution

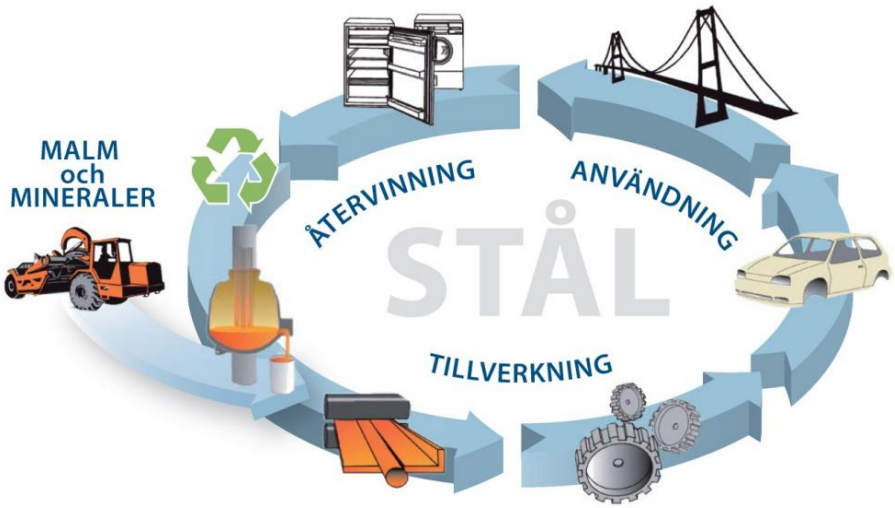
Råvaror och färdiga stålprodukter transporteras ofta långa sträckor med båt, tåg och lastbil från gruvor till stålverk, och vidare till slutanvändare. Trots de långa avstånden är transportens klimatpåverkan relativt liten jämfört med utsläppen från själva stålproduktionen (Stålbyggnadsinstitutet, 2025).

4. Användning

Stål har en lång livslängd och används i många produkter som bilar, byggnader, broar och maskiner. Med rätt underhåll kan stålkonstruktioner hålla i 50–100 år, och den genomsnittliga livslängden för stålprodukter är cirka 40 år (Ali & Mohamed, 2021).

5. Återvinning

Stål kan smältas ner och återvinnas för att tillverka nya stålprodukter utan att förlora sin kvalitet (Ali & Mohamed, 2021).



Figur 9 Stål livscykel olika steg (Stålbyggnadsinstitutet, 2021) .

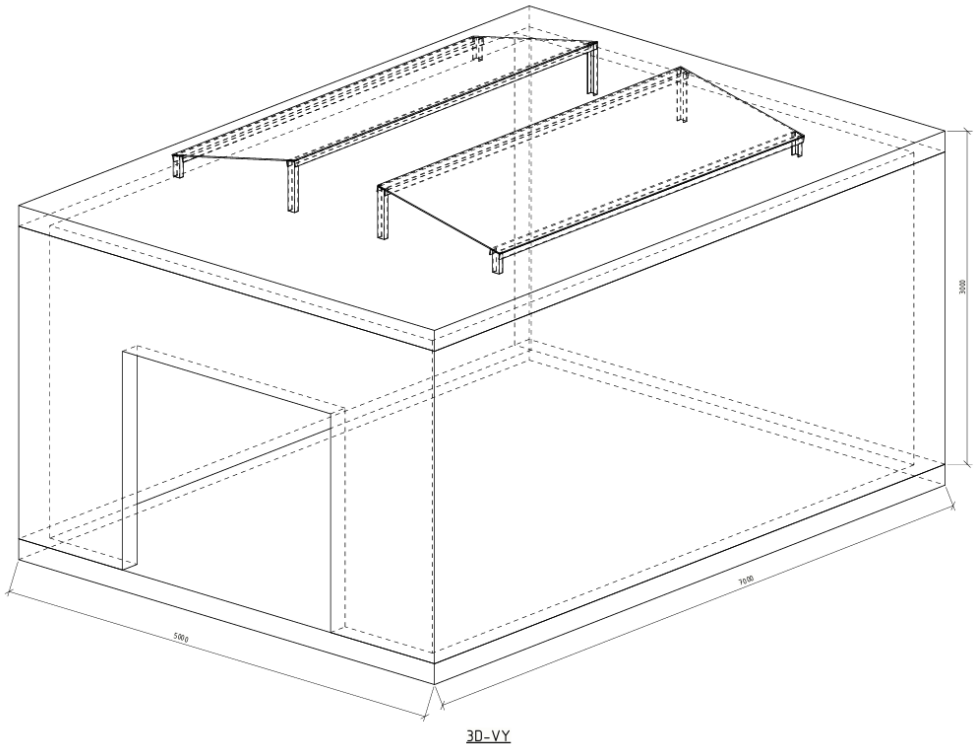
4. AKTUELL STUDIE

I denna kapitlet presenteras garaget med de tre olika scenarier som studiet tar, visas resultatet från deras dimensioneringen samt alla tre fallstudier.

4.1 Utformning av garaget

I denna aktuella studie utformas ett enkelt garage som tillhör ett hus med dimensioner till en bil, i garaget arean tas hänsyn till utökad tillgänglighet med tanken på möjligheten till användning av åldrarna eller en person med behov till rullstol, samtidigt en plats till el laddning station, förråd plats till fyra bildäck och bord för arbetssats vid behov. garaget är 7 meter lång, 5 meter bredd och 3 meter höjd. Taket till garaget ät platt och dimensionerad med tanken på att solceller ska monteras för el produktion möjlighet.

Ingången till garaget är genom bildörren som är en sladd dör för att minska belastningen på konstruktion. Garaget är modellerat för att byggas i Västerås staden, Sätra områden.



Figur 10 En illustrativ modell av garaget har skapats i Tekla Structures.

4.2 Scenario 1: Trä som konstruktion material

I detta scenario användes limträ som konstruktion material för garaget där pelarna, balkarna och yttre väggar består av trä. Där båda tak och yttre väggar är beklädnad med 10 cm tjocka träplattor. Med tanken på att garaget modellerat till Västerås staden, hämtades snö zon från Lundqvist Trävaru, (u.å.), och vindlast från Svenskt trä (2021) till hjälp av dimensionering, samtidigt tas hänsyn till konstruktionen egen last och belastning från solceller. Dessa laster presenteras i tabellen 1 nedan.

Tabell 1 Scenario 1 träkonstruktion.

Belastning typ	**kraft**	**enhet**
Takplatta	0,5	kN/m^2
Snölast	2	kN/m^2
vindlast	0,8	kN/m^2
solceller	0,5	kN/m^2
balk	0,2	kN/m

Dimensionering beräkningar till scenario 1 baserades med 3 pelare på vardera lång sida av garaget med CC avstånd = 3,5 m. Detta för att båda minska storleks mått på pelarna och underlätta monteringen på dem. En känslighet analys var utförd med idén att ha bara fyra pelare vid varje kant av garaget vilket visade behov till samma trävolym som används vid sex pelare med tanken på att de fyra pelare skulle behöva större dimensioner. Syftet med denna känslighet analys var att se minimering möjlighet på materialvolym använt i konstruktionen och därmed minska miljöpåverkan.

Dimensioneringen av garagekonstruktionen beräknades för hand, se Bilaga 1. Resultatet visade behov till limträpelare med mått 270x90 mm samt limträbalkar med mått 450x90 mm.

4.3 Scenario 2: Betong som konstruktion material

I andra scenario användes betong som konstruktion material för garaget där pelarna, balkarna, yttre väggar och taket består av betong. Med tanken på att garaget yttre väggar är inte bärande utan bara beklädande till garaget konstruktion så var måttet på väggarna och taket bestämt till 100 mm. Därefter hade garaget samma snö zon, vind zon som användes vid dimensionering av scenario 1, samtidigt tas hänsyn till konstruktionen egen last och belastning från solceller. Dessa laster presenteras i tabellen 2 nedan.

Tabell 2 Scenario 2 betongkonstruktion.

Belastning typ	**kraft**	**enhet**
Takpanel	2	kN/m^2
Snölast	2	kN/m^2
vindlast	0,8	kN/m^2
solceller	0,5	kN/m^2
balk	1	kN/m

Dimensionering beräkningar till scenario 2 baserades med 4 pelare, en vid vardera kanten av garaget med CC avstånd = 5 m vid bredden och CC avstånd = 7 m vid lång sidan av garaget. Detta är på grund av att betongen kan tåla större tryckkrafter än trä utan att få deformation. Tanken med detta är att utnyttja materialet funktion samtidigt som studera dess miljöpåverkan för att främja en rättvis jämförelse mellan de olika material.

Dimensioneringen av garagekonstruktionen beräknades för hand, se Bilaga 2. Resultatet visade behov till betongbalkar med mått 220x100 mm dock efter en konsult av konstruktör var den minsta mått tillåten enligt Eurokod 220x200 mm och med detta borde pelarna ha samma dimensioner; 200x200mm. I måttet till betongens pelare och balkar tog hänsyn också till armeringen som behövs för att förstärka draghållfastheten till materialet. Detta lad till en över dimensionering av garaget konstruktion dock enligt lagen måste denna regel följas vilket medförde mer realistiskt aspekt till studien.

4.4 Scenario 3: Stål som konstruktion material

I tredje scenario användes stål som konstruktion material för garaget där pelarna, balkarna, yttre väggar och taket består av stål. Där båda tak och yttre väggar är beklädnad med 3mm tjocka stålplattor. Därefter hade garaget samma snö zon, vind zon som användes vid dimensionering av scenario 1 & 2, samtidigt tas hänsyn till konstruktionen egen last och belastning från solceller. Dessa laster presenteras i tabellen 3 nedan.

Tabell 3 Scenario 3 stålkonstruktion.

Belastning typ	**kraft**	**enhet**
Takplatta	0,24	kN/m^2
Snölast	2	kN/m^2
vindlast	0,8	kN/m^2
solceller	0,5	kN/m^2
balk	0,2	kN/m

Liknande till scenario 2 dimensionering beräkningar till scenario 3 baserades med 4 pelare, en vid vardera kanten av garaget med CC avstånd = 5 m vid bredden och CC avstånd = 7 m vid lång sidan av garaget. Detta är på grund av att stål liknande till betong kan tåla större tryckkrafter än trä utan att få deformation.

Dimensioneringen av garagekonstruktionen beräknades för hand, se Bilaga 3. Resultatet visade behov till pelare med mått VKR 80x80x6,3 mm samt balkar HEA140, S355 med mått 133x140 mm, 8,5 mm tjocklek på flänsar och 5,5 mm tjocklek på liv.

4.5 Fallstudie: Trä, betong och stål i praktiken

För att besvara examensarbetets syfte och frågeställningar analyseras tre utvalda byggprojekt där materialen trä, betong och stål har använts som primära stommaterial i flerbostadshus i höghusform. Varje fallstudie belyser tekniska egenskaper, klimatpåverkan genom livscykelanalys (LCA), samt koppling till mål i agenda 2030. Projekten är valda utifrån att de representerar aktuella byggmetoder, är väldokumenterade och möjliga att jämföra på ett sakligt och metodiskt sätt.

4.5.1 Fallstudie – Cederhusen (Trä)

4.5.1.1.Bakgrund och projektbeskrivning

Cederhusen är ett flerbostadsprojekt som uppfördes i Hagastaden i Centrala Stockholm mellan 2019 och 2022. Projektet, enligt Trästad Sverige (u.å.), består av fyra bostadshus i upp till 13 våningar med totalt 234 lägenheter samt lokaler i bottenvåningen. Det utvecklades av Folkhem i samarbete med bland andra Veidekke, General Architecture och teknikkonsulten Bjerking. Det som gör Cederhusen särskilt intressant är att det är Sveriges största bostadskvarter byggt helt i massivträ, där hela stommen utgörs av korslimmat trä.

Enligt Bjerking (2019) uppfördes Byggnaderna ovanpå tre befintliga trafik- och infrastrukturtunnlar, vilket innebar att den totala vikten från byggnaden behövde hållas låg. Träets låga densitet jämfört med betong möjliggjorde detta utan att förstärka underliggande strukturer. Dessutom bidrog läget i en tät innerstad till krav på låg ljudnivå, kort byggtid och effektiv logistik, faktorer som ytterligare motiverade valet av KL-trä och prefabricering som byggmetod.

Figur 11 Illustration av Cederhusen i Hagastaden, Stockholm.

4.5.1.2.Tekniska egenskaper

Stommen i Cederhusen består helt av KL-trä, inklusive bärande väggar, pelare och bjälklag. KL-trä tillverkas genom att träskikt limmas samman med korsvis orienterade fiber, vilket ger en stark och formstabil konstruktionsprodukt. Alla stomdelar tillverkades i fabrik i Österrike och transporterades till byggplatsen i Stockholm. På plats kunde ett våningsplan resas på tre till fyra dagar tack vare den höga graden av prefabricering och det genomarbetade montagesystemet (Trästad Sverige, u.å.; Bejerking, 2019).

Utöver bärande funktion har konstruktionen anpassats till svenska krav på brandsäkerhet, ljudisolering och fuktskydd. Exempelvis användes gipsbaserade skivor som brandskydd och flytande golv mellan lägenheter för att begränsa stegljud. Samtliga installationer planerades noggrant för att undvika onödiga ingrepp i trästommen. En kontrollerad byggtakt och väderskydd vid montage reducerade risken för fuktproblem.

4.5.1.3.Klimatpåverkan och livscykelanalys

En livscykelanalys (LCA) av projektet genomfördes av Bjerking enligt den europeiska standarden EN 15978. Resultatet visade att klimatpåverkan från modulerna A1-A5 (råmaterialutgivning till färdig byggprodukt) uppgick till cirka 170 kg CO2e/m2 BTA. Det är betydligt lägre än jämförbara projekt i betong eller stål, där värden ofta ligger mellan 450–650 kg CO2e/m2 BTA (Malmqvist et al., 2021).

Klimatbesparingen uppnås genom flera faktorer. Dels binder träkoldioxid under sin tillväxttid, vilket räknas som negativt utsläpp i livscykelanalysen. Dels kräver tillverkning och bearbetning av trä betydligt mindre energi än produktion av cement eller stål. Transport- och monteringsutsläppen minskade också tack vare lättare komponenter och effektiv logistik. Spillmaterial från produktionen kunde återvinnas till biobränsle, vilket ytterligare stärker projektets klimatprofil (Bjerking, 2019).

Inför upphandlingen genomförde konsultbolaget Bjerking även en särskild klimatberäkning enligt Boverkets metod för klimatdeklarationer. Analysen visade att valet av träleverantör med låg klimatpåverkan kunde minska de totala utsläppen med cirka 500 ton CO2e, vilket motsvarar de genomsnittliga årliga utsläppen från 70 svenskar (Bjerking, 2019). Detta visar hur viktiga leverantörsval är för att uppnå god klimatprestanda redan i projekteringsskedet.

4.5.1.4.Hållbarhet och Agenda 2030

Cederhusen är i linje med flera av målen i Agenda 2030. Mål 9 (hållbar industri och innovation) stöds genom användning av modern träbyggteknik i höghusformat. Mål 11 (hållbara städer och samhällen) främjas genom att projektet integreras i en tät stadsmiljö, där det ersätter mer klimatintensiva lösningar. Framför allt uppfyller projektet mål 13 (bekämpa klimatförändringarna) genom sin låga klimatpåverkan och sitt biobaserade materialval (FN, 2015).

Cederhusen är också ett exempel på cirkulär resursanvändning. KL-trä är både förnybart och återvinningsbart, och byggsystemet möjliggör framtida demontering och återbruk. Kombinationen av teknisk kvalitet, industriell produktion och låg miljöpåverkan visar på hur trä kan användas för att skapa hållbara bostäder i framtidens städer.

4.5.1.5.Koppling till examensarbetets frågeställningar

Fallstudien om Cederhusen visar tydligt hur trä som konstruktionsmaterial kan användas i höga flerbostadshus med god teknisk, funktionell och miljömässig prestanda. Genom att studera byggsystemet, prefabriceringen och de anpassningar som gjorts för brandsäkerhet, ljud och fukt, besvaras frågeställningen om vilka tekniska lösningar som krävs vid användning av trä som stommaterial i höga flerbostadshus. Klimatdata från livscykelanalysen ger ett underlag för att analysera hur trä påverkar byggnadens totala klimatpåverkan jämfört med andra materialval, vilket knyter an till frågan om miljöpåverkan. Dessutom visar projektet hur tidiga beslut om material, upphandling och industriell produktion kan bidra till att uppfylla flera av målen i Agenda 2030, vilket besvarar frågan om hur byggsektorn kan bidra till ett mer hållbart samhälle.

4.5.2 Fallstudie - Norra Tornen (Betong)

4.5.2.1.Bakgrund och projektbeskrivning

Norra Tornen är ett bostadsprojekt i Vasastan i Stockholm som består av två höghus enligt ArchDaily (2018): Innovationen (125 meter, 36 våningar) och Helix (110 meter, 33 våningar). Projektet ritades av den nederländska arkitektbyrån OMA och utvecklades av Oscar Properties. Byggnaderna färdigställdes mellan 2018 och 2020 och innehåller sammanlagt över 300 lägenheter. Norra Tornen är ett av Sveriges mest uppmärksammade exempel på modern höghusbebyggelse i betong, med både arkitektonisk ambition och industriell byggmetod.

Figur 12 Illustration av Norra Tornen i Vasagatan, Stockholm.

4.5.2.2. Tekniska egenskaper

Stommen i Norra Tornen, enligt StruSoft (2019), består av platsgjuten betong i kärnstrukturen och prefabricerade betongelement för fasader och bjälklag. De tydligt utskjutande balkongmodulerna, som är en del av byggnadens uttryck, tillverkades i fabrik och monterades på plats. Den modulära uppbyggnaden möjliggjorde en snabb och effektiv byggprocess samt god repetitionsgrad i produktionen. Betongens höga tryckhållfasthet och stabilitet gjorde det möjligt att bygga i stor skala utan att kompromissa med bärighet, ljudisolering eller brandskydd.

Projektet använde digitala beräkningsverktyg, bland annat finita elementmetoden (FEM), för att optimera dimensioneringen av betongelement och minska materialåtgång. Detta visar hur traditionella byggmaterial kan kombineras med modern teknik för att skapa effektiva och stabila lösningar för höga bostadshus.

4.5.2.3. Klimatpåverkan och livscykelanalys

Det finns ingen offentlig livscykelanalys (LCA) specifikt för Norra Tornen. För att ge en uppskattning har referensvärden från en studie vid Kungliga Tekniska högskolan använts (Malmqvist et al., 2021). Enligt denna studie uppgår klimatpåverkan i byggskedet (moduler A1–A5) för en platsgjuten betongstomme i flerbostadshus till cirka 153 kg CO_2e per kvadratmeter BTA, medan prefabricerad betong kan ge något högre värden, omkring 168 kg CO_2e/m^2 BTA.

En stor del av dessa utsläpp kommer från tillverkningen av cement, som är det huvudsakliga bindemedlet i betong och en mycket energiintensiv process. Trots att prefabricering i Norra Tornen kan ha minskat materialspill och förbättrat logistik, har klimatförbättrad betong eller återvunnen ballast inte använts i någon större utsträckning enligt tillgänglig dokumentation.

Därför bedöms det att projektets klimatpåverkan sannolikt ligger nära, eller något över, referensvärdena för platsgjuten betong. Norra Tornen fungerar därmed som ett representativt exempel på klimatpåverkan från ett modernt höghus i betong utan särskilda klimatåtgärder – och illustrerar behovet av att utveckla och tillämpa mer hållbara lösningar i framtidens betongbyggande.

4.5.2.4.Hållbarhet och Agenda 2030

Norra Tornen bidrar till mål 11 (hållbara städer och samhällen) genom att förtäta ett redan stadsnära område med bostäder och därmed minska behovet av ny byggande i stadens ytterområden. Projektet visar också hur industriell byggande i betong kan integreras i stadsmiljö med hög arkitektonisk kvalitet, vilket kopplar till mål 9 (hållbar industri och innovation). Samtidigt belyser projektet en av byggbranschens största utmaningar, att minska klimatpåverkan från betong, vilket gör det relevant för mål 13 (bekämpa klimatförändringarna) (FN, 2015).

4.5.2.5.Koppling till examensarbetets frågeställningar

Fallstudien om Norra Tornen visar hur betong används som stommaterial i höga bostadshus och vilka tekniska lösningar som krävs för att uppnå stabilitet, brandskydd och god bygglogistik. Projektet belyser också klimatpåverkan från betong och vikten av att utveckla mer hållbara alternativ. Genom att studera Norra Tornen får man ett konkret exempel på både möjligheterna och begränsningarna med betong som byggmaterial i relation till miljöpåverkan, teknisk funktion och hållbar samhällsutveckling.

4.5.3 Fallstudie – Portlands Place (stål)

4.5.3.1.Bakgrund och urval

Inget flerbostadshus i Sverige har kunnat identifieras där stål används som huvudsakligt stommaterial och där en tillgänglig livscykelanalys (LCA) finns. För att ändå kunna jämföra trä, betong och stål inom ramen för examensarbetets syfte har det valts Portlands Place i London som en internationell referens. Likt Cederhusen och Norra Tornen är det två flerbostadshus, och det finns tillgängliga klimatdata och teknisk dokumentation som gör projektet relevant för vår jämförelse. Även om byggnaden är uppförd i ett annat klimat än de svenska exemplen, är analysen av stommaterialets miljöpåverkan baserad på standardiserade LCA-data enligt EN 15978. Därför bedöms jämförbarheten vara tillräcklig.

4.5.3.2.Projektbeskrivning

Portlands Place är ett nyproducerat bostadsprojekt i East Village, London England, som består av två höghus med 26 respektive 31 våningar. Tillsammans innehåller byggnaderna 524 hyreslägenheter. Projektet omfattar även två lägre bostadshus på 10 våningar och ett sammanbindande våningsplan på tionde våningen som fungerar som gemensamt utrymme. Projektet utvecklades av fastighetsbolaget Greystar i samarbete med arkitektkontoret Hawkins\Brown. Syftet med projektet var att kombinera hållbarhet, effektiv byggprocess och långsiktig flexibilitet. Konstruktionen bygger på ett system av prefabricerade stålramar i kombination med betongbjälklag, vilket möjliggjorde snabb montering och god anpassningsbarhet. Stommen monterades med en takt på cirka en våning per vecka, vilket bidrog till kortare byggtid (Arslan, Sharples, Mohammadpourkarbasi, & Khan-Fitzgerald, 2023).

Figur 13 Illustration av Portland Place i East Village, London.

4.5.3.3.Tekniska egenskaper

Stommen består av pelare och balkar i stål som tillverkats i fabrik och monterats på plats som en ramstruktur. Bjälklagen utgörs av prefabricerade betongelement som vilar på stålet. Lösningen ger god flexibilitet i planlösningen eftersom få bärande innerväggar behövs. Den höga graden av prefabricering bidrog till minskad byggtid, färre transporter och mer kontroll över kvaliteten.

Stål har hög hållfasthet i förhållande till sin vikt, vilket gör det särskilt lämpat för höga byggnader där stabilitet och lastnedföring är viktiga faktorer. Digitala verktyg användes för att optimera dimensioneringen och minska materialåtgången, vilket är ett exempel på hur teknik kan stödja både ekonomi och miljöprestanda i byggprojekt (Arslan et al., 2023).

4.5.3.4.Klimatpåverkan och livscykelanalys

En livscykelanalys (LCA) enligt EN 15978 visar att klimatpåverkan från byggskedet (modulerna A1–A5) uppgick till cirka 475 kg CO2e/m2 BTA (Arslan et al., 2023). I denna siffra ingår materialproduktion, transporter, montage och byggplatsarbete. För att minska utsläppen användes återvunnet stål i stor omfattning, vilket har lägre klimatpåverkan än nytillverkat stål.

Trots att stålproduktion är energikrävande, har materialet stor potential för återanvändning. I Portlands Place utformades stommen för att kunna demonteras och återbrukas i framtiden, vilket stärker projektets cirkulära profil. På så sätt kombineras ett klimatmässigt belastande material med strategier för återvinning och långsiktig resurseffektivitet.

4.5.3.5.Hållbarhet och Agenda 2030

Projektet anknyter till flera mål i Agenda 2030. Mål 9 (hållbar industri, innovation och infrastruktur) uppfylls genom digital projektering och prefabricering. Mål 11 (hållbara städer och samhällen) berörs genom att projektet bidrar till bostadsförsörjning i en urban miljö. Genom användningen av återvunnet stål och konstruktion för demontering stödjer projektet även mål 12 (hållbar konsumtion och produktion) samt mål 13 (bekämpa klimatförändringarna) (FN, 2015).

4.5.3.6.Koppling till examensarbetets frågeställningar

Fallstudien om Portlands Place visar hur stål kan användas som stommaterial i flerbostadshus och vilka tekniska lösningar som krävs för att uppnå god funktion, stabilitet och flexibilitet. Projektet bidrar med viktiga insikter om klimatpåverkan från stål, och hur den kan reduceras genom återvinning och cirkulär design. Genom detta besvarar fallstudien examensarbetets frågor om materialens tekniska och miljömässiga egenskaper samt deras roll i ett hållbart byggande.

5. RESULTAT

5.1 Fördelar & nackdelar hos olika konstruktionsmaterial

5.1.1 Analys av tekniska egenskaper för olika konstruktionsmaterial

Vid jämförelse mellan materialen när det gäller hållfastheten och beständigheten har trä enligt Svenskt Trä (u.å.) ett gynnsamt förhållande mellan lågvikten och hög styrka. Dessutom har trä isolering och ljudabsorption förmåga. Dock för att hålla beständigheten måste skydd tekniker implementeras på grund av materialet fuktkänslighet, brand och biologisk nedbrytning risker. Ändå offrar träet nyttigt hållfasthet med möjligheten till förbättrad tekniker som limträ och KL-trä. Tillskillnad så är betongen mycket tyngre än trä, dock materialet offrar bättre beständighet mot fukt, brand och biologiska nedbrytning. Betongen är formbart i form av gjutning vilket ger möjligheten till olika konstruktion förmer utan att begränsa hållfastheten (Gustavsson & Dahlberg, 2024). Ändå så är materialet känsligt mot sprickor när den utsatt för dragkrafter, vilket kan försvaga sin hållfasthet därför är det oftast kopplat till armering med stål vilket ger materialet bättre hållfasthet men kan blir mer fuktkänslig om armeringen är inte skyddat rätt (Abdulbaki & Mammar Chaouche, 2015). Åt andra hand offrar stål även bättre formbarhet förmåga än betong samt genom svetsbarhets kan sprickor beständighet ökar vilket möjliggör större stålkonstruktioner och bärande förmåga. Materialet hög seghet ger den abilitet att lagra stora mängder energi innan ett brott träffas (BE Group Sverige AB, 2016). Med detta sagt så är stål beständighet förmåga mot fuktighet och särskilt salt haltiga miljöer svag och kan orsaka korrosion (Ali & Mohamed, 2021).

När det gäller drag och tryckhållfasthet visar trä enligt Svenskt Trä (2019a) ett gott drag och tryckhållfasthet förmåga med tanken på hållfasthetklass C24 där tryckhållfasthet motsvarar 21 MPa och draghållfasthet 13 MPa, men denna egenskap är också beroende av fiberriktningen. Materialet drag och tryckförhållande är också beroende av fuktkvot, träslag, åldring och förekomst av defekter som kvistar eller sprickor. Därför är det nödvändigt att klassificera trä som i exempel C30 eller C35. Betongen åt andra hand offrar enligt Abdulbaki och Chaouche (2015) bättre tryckhållfasthet som i hållfasthetklass C25/30 med 25 MPa vilket motsvarar 19% högre tryckhållfasthet än C24 i trä men betongen draghållfasthet är betydligt svagare med bara 1,8 MPa vilket ger C24 klass inom trä 722% bättre draghållfasthet. Stål offrar de bästa resultat när det gäller draghållfasthet med en span mellan 235 MPa för S235-stål till upp mot 460 MPa för S460-stål. Där tryckhållfast samtidigt så materialets egenskaper påverkas inte lika mycket som trä med tanken på kraftriktlinje.

Tabell 4 jämförelseöversikt utifrån materialens egenskaper.

Egenskap	Trä	Betong	Stål
Tekniska egenskaper	Lätt, isolerande, flexibelt	Tungt, formbart, termiskt stabilt	Mycket formbart, starkt, svetsbart
Hållfasthet & beständighet	God hållfasthet, fuktkänsligt	Hög beständighet, sprickrisk	Mycket hög, kräver korrosionsskydd
Tryckhållfasthet	Ca 21 MPa (C24)	25–30 MPa (C25/30)	Upp till 460 MPa (S460)
Draghållfasthet	Ca 13 MPa (C24)	Ca 1,8 MPa (C25/30), kräver armering	Mycket hög (t.ex. 355–460 MPa)

Valet av material som används i bärande konstruktioner är avgörande för byggnadens säkerhet och funktion över tid. Viktiga faktorer att beakta är hur material beter sig i brand och hur de påverkas av långsiktiga krypeffekter. När man jämför de tre konstruktionsmaterialen blir det tydligt att inget enskilt material är bättre när det gäller krypning, krympning och deformation. Trä har goda brandegenskaper i form av kontrollerad förkolning, men är känslig för fukt och långvarig krypning. Betong erbjuder en god balans mellan brandmotstånd och långsiktig stabilitet, men den kan drabbas av sprickbildning och spjälkning. Stål är mycket starkt och dimensionsstabilt men kräver omfattande brandskyddsåtgärder.

5.1.2 Jämförelse av miljöpåverkan och hållbarhet mellan olika konstruktionsmaterial

Båda trä och betong har koldioxidbindning egenskap under deras livscykel dock nivån och processen skiljer sig. Enligt Svenskt Trä (u.å.) trä koldioxid bindning börjar tidigt i materialet livscykel som en bio material med fotosyntes processen under träd livslängd som lagrar koldioxid inne i materialet och stoppar efter trädet är sågat. Medan enligt Svensk Betong (u.å.), betong koldioxidbindning börjar efter materialet produktion i form av naturligt driven kemisk process som fortsätter för resten av materialet livslängd dock betong bidrar till betydligt högre koldioxid utsläpp tidigt i materialet livscykel vid produktionen av cement som råvara där 90% av materialet koldioxid utsläpp sker. Till skillnaden så har stål ingen koldioxidbindning under sin livscykel samt orsakar mer koldioxidutsläpp vid produktion än båda trä och betong (Brynhildsen, 2020; Ali & Mohamed, 2021), dock materialet rest produkter ger möjligheten till koldioxidbindning i form av koldioxidsänkor genom karbonatisering process (DiGiovanni et al., 2024).

Inom hållbarhet och teknisk livslängd visade betongen starkhet där materialet kan tåla fukt väldigt bra, materialet brinner inte och kräver minimalt underhållning med en klassificerad livslängd upp till 100 år (Svensk Betong, u.å.a). Till skillnad från trä som kan påverkas av fuktighet kraftigt, samt att materialet är brännbart vilket måste beaktas vid användning (Svenskt Trä, 2019). Stål är också känslig till fuktighet och salthaltiga miljöer vilket kan orsaka korrosion och minska livslängden kraftigt (Ali & Mohamed, 2021). dock visa skydd tekniker kan utföras för att minimera skador på båda material och ge båda trä och stål en livslängdspan mellan 50–100 år. Ändå, så är betong oftast armerad med stål och därför måste fuktighet och salthaltiga miljöer beaktas för att undvika korrosion i armeringen.

5.1.2.1.Återanvändning & cirkularitet

Alla tre material visade bra möjligheter och resultat ur återanvändning och cirkularitet perspektiv dock stål accelererade i detta fält med tanken på att materialet kan återvinnas och återanvändas till 100% procent samtidigt hålla dess egenskaper med möjligheten till uppgraderingar (Brynhildsen, 2020; Ali & Mohamed, 2021). betong kunde återvinnas genom att använda materialet i ny betongproduktion som fyllande material och därmed minska naturliga resurser förbrukning (Svensk Betong, u.å.a). På liknande sätt så återanvänds trä vid produktion av nya fast mindre belastade träskivor som spånskivor och fiberskivor dock till slut materialet kan inte återanvänds längre som byggmaterial utan återanvänds i form av bränsle och dess livscykel tar slut (Svenskt Trä, 2015b).

5.2 Livscykelanalys och klimatpåverkan

När man analyserar byggmaterial ur ett livscykelperspektiv framträder tydliga skillnader i miljöpåverkan, energiförbrukning och återvinningspotential. Varje material har specifika styrkor och svagheter beroende på vilket livscykelstadium som analyseras.

I det första steget (utvinningen av råvaror) varierar klimatets inverkan kraftigt. Trä är det mest miljövänliga alternativet eftersom det absorberar koldioxid under tillväxten och fungerar som ett naturligt kolförråd (Svenskt Trä, 2015). Betong har en mycket högre klimatpåverkan än trä, främst på grund av betongtillverkning, som står för 90% av koldioxidutsläpp hos betong (Svensk Betong, u.å.b). I detta skede har stål den största negativa inverkan. Detta beror på gruvdrift, markpåverkan och den kolförbränning som krävs vid utvinningen av råjärn, vilket leder till omfattande utsläpp av koldioxid och andra växthusgaser (UK Green Building Council, u.å.).

I tillverkningsfasen skiljer sig byggmaterialen tydligt vid energiförbrukande och klimatpåverkan. Tillverkningen av träprodukter är energieffektiv och klimatvänlig jämfört med betong och stål, eftersom biobränslen ofta används vilket minskar fossila utsläpp (Svenskt Trä, 2015). Däremot är betongproduktionen mer komplex och innebär blandning och bearbetning av flera olika råvaror. Betongens klimatpåverkan beror i huvudsak på

cementtillverkningen. Genom att minska cementandelen i betongblandningen kan koldioxidutsläppen reduceras med upp till 35 % jämfört med traditionell betong, som innehåller en högre andel cement (Svensk Betong, u.å.b). När det gäller ståltillverkning är denna den mest energikrävande och klimatpåverkande, särskilt vid masugnsprocessen där stora mängder koldioxid och andra föroreningar släpps ut (Fan & Friedmann, 2021).

I transportskedet varierar klimatpåverkan mellan olika material, men är mindre än i de andra livscykelnsteg. Trä har den lägsta klimatpåverkan under transport, främst på grund av sin låga vikt och att den inte kräver specialtransport (Malmqvist et al. 2021). Stål transporteras ofta över långa sträckor, men tack vare hög materialdensitet är klimatpåverkan fortfarande relativt låg i transportskedet. Betong har däremot den högsta klimatpåverkan under transport. Detta beror dels på dess höga vikt, dels på att den måste transporteras i specialfordon för att förhindra att materialet hårdnar under transporten. Dessa fordon (betongbilar) har hög bränsleförbrukning, vilket leder till ökade utsläpp (Svensk Betong, u.å.b).

I bruksfasen är trä det mest klimatvänliga materialet tack vare dess förmåga att fortsätta lagra koldioxid under hela byggnadens livstid (Svenskt Trä, 2015). Betong har en måttlig klimatpåverkan, eftersom en naturlig kemisk process (karbonatisering) gör att den långsamt absorberar en del av koldioxid i luften (Svensk Betong, u.å.b). Stål har ingen direkt klimatfördel i denna fas, men dess långa livslängd gör att det sällan behöver bytas ut, vilket ger en indirekt miljöfördel på lång sikt.

Tabell 5 jämförelseöversikt utifrån hållbarhets- och miljöperspektiv.

Aspekt	Trä	Betong	Stål
Förnybart material	Ja	Nej	Nej
Koldioxidbindning	Ja (växande träd & lagring)	Viss karbonatisering	Nej
Klimatpåverkan produktion	Låg	Mycket hög (cement)	Hög (masugn), låg (Ljusbågsugn)
Återvinningsbarhet	Hög (material & energi)	Delvis (fyllnadsmaterial)	Mycket hög
Energiförbrukning	Låg	Medel–hög	Hög
Livslängd i byggnader	50–100 år (om skyddas mot fukt)	50–100 år	50–100 år

5.2.1 Resultat från One Click LCA

För att se miljöpåverkan från varje scenario i aktuell studien kalkylerades volymen till materialåtgång, därefter använts One Click LCA programmet med generiska data för att utföra en livscykelanalys och beräkna koldioxidutsläpp ursakat av materialet där livslängden till garaget är beräknat att hålla 50 år. Resultatet från One Click LCA simuleringen redovisas i tabellerna nedan.

5.2.2 Scenario 1

Tabell 6 Volym och koldioxidekvivalenta utsläpp (CO_2e) för olika byggdelar i ett garage i trä

Garage del	Material utgång volym (m^3)	Koldioxidekvivalent utsläpp (ton)	Koldioxidekvivalent utsläpp i kg CO_2e/m^2
Beklädning (tak/väggar)	4,395	0,87	24,86
pelare	0,4374	0,042	1,2
balkar	0,6075	0,067	1,91
Totalt:	5,4399	0,979	27,97

5.2.3 Scenario 2

Tabell 7 Volym och koldioxidekvivalenta utsläpp (CO_2e) för olika byggdelar i ett garage i betong

Garage del	Material utgång volym (m^3)	Koldioxidekvivalent utsläpp (ton)	Koldioxidekvivalent utsläpp i kg CO_2e/m^2
Beklädning (tak/väggar)	9,725	3,59	102,57
pelare	0,48	0,37	10,57
balkar	0,4	0,31	8,86
Totalt:	10,805	4,27	122

5.2.4 Scenario 3

Tabell 8 Volym och koldioxidekvivalent utsläpp (CO_2e) för olika byggdelar i ett garage i stål

Garage del	Material utgång volym (m^3)	Koldioxidekvivalent utsläpp (ton)	Koldioxidekvivalent utsläpp i kg CO_2e/m^2
Beklädning (tak/väggar)	0,3	7,9	225,71
pelare	0,0223	0,46	13,14
balkar	0,04	0,29	8,29
Totalt:	0,3623	8,65	247,14

5.2.5 Sammanställning av resultat (3 scenarier)

Tabell 9 Jämförelse mellan trä, betong och stål utifrån deras volym och koldioxidekvivalent utsläpp (CO_2e, i ton)

	Trä	Betong	Stål
Volym (m^3)	5,4399	10,805	0,3623
Koldioxidekvivalent utsläpp (ton)	0,979	4,27	8,65
Koldioxidekvivalent utsläpp i kg CO_2e/m^2	27,97	122	247,14

5.3 Resultat från fallstudier

Enligt Boverkets slutrapport (2023) är det föreslagna gränsvärdet för klimatpåverkan i byggskedet (A1–A5) för nya flerbostadshus 375 kg CO_2e per m² BTA. Detta värde används i denna studie som jämförelsegrund i utvärderingen av fallstudiernas klimatpåverkan.

	Byggnadstyp	Gränsvärde (kg $CO2_e/m^2$ BTA)
Grupp 1	Flerbostadshus	375
	Kontor	385
	Utbildning exklusive förskola	380
	Förskola	330
	Småhus	180
	Specialbostad	385
Grupp 2	Övriga byggnader	460

Figur 14 14Föreslagna gränsvärdet för klimatpåverkan (Boverket, 2023).

För att sätta resultaten i kontext redovisas nedan referensvärden för klimatpåverkan från olika byggnadstyper enligt Boverkets rapport och KTH (Malmqvist et al., 2021).

Tabell 10 jämförelseöversikt utifrån hållbarhets- och miljöperspektiv

Byggnadstyp	Klimatpåverkan (kg CO2e/m2 BTA)
Småhus	Ca 310-315
Flerbostadshus	Ca 305-310
Kontor	Ca 340-345
Förskolor	Ca 310-320
Skolor	Ca 360-365

Dessa siffror visar att nybyggnation generellt orsakar betydande klimatpåverkan. När det jämförs med tre fallstudier framträder tydliga skillnader beroende på stommaterial.

Cederhusen, som är uppfört i KL-trä, visar en klimatpåverkan från byggskedet (A1–A5) på cirka 170 kg CO_2e/m^2 BTA. Det är betydligt lägre än både Boverkets referensvärde för flerbostadshus (305–345 kg CO_2e/m^2 BTA) och de övriga fallstudierna. Den låga påverkan beror på träets naturliga koldioxidinlagring, låg energianvändning vid produktion samt effektiv prefabricering.

Norra Tornen, som har en stomme i platsgjuten betong med prefabricerade bjälklag och fasader, saknar offentlig livscykelanalys. För att ge en rimlig uppskattning har KTH:s referensvärden använts, där klimatpåverkan i byggskedet (A1–A5) för platsgjuten

betongstomme uppgår till cirka 153 kg CO_2e/m^2 BTA, och något högre för prefab-betong, cirka 168 kg CO_2e/m^2 BTA (Malmqvist et al., 2021). Eftersom projektet inte har använt klimatförbättrad betong eller återvunnen ballast i större utsträckning, antas utsläppen ligga nära eller något över dessa värden.

Portlands Place, där stål används som huvudsakligt stommaterial, uppvisar enligt en vetenskaplig livscykelanalys en klimatpåverkan på cirka 475 kg CO_2e/m^2 BTA (Arslan et al., 2023). Det är högre än trä, men lägre än för många andra stålbyggnader. Detta beror på att en stor andel återvunnet stål har använts, och att konstruktionen är demonterbar och kan återbrukas i framtiden – vilket stärker projektets cirkulära profil.

Utöver klimatpåverkan visar fallstudierna även på olika strategier för hållbar utveckling. Cederhusen kombinerar låg klimatpåverkan med industriell träproduktion och urban förtätning. Norra Tornen visar hur prefabricerad betong kan användas effektivt i en stadsmiljö, men också vilka miljöutmaningar som finns kvar. Portlands Place integrerar cirkulärt tänkande genom återvunnet stål och möjligheten till demontering, vilket skapar långsiktig resurseffektivitet.

Sammanfattningsvis visar jämförelsen att materialval har avgörande betydelse för både klimatpåverkan och långsiktig hållbarhet. Resultaten understryker vikten av livscykelbaserade beslut, återbruk, digital projektering och strategiska materialval för att byggandet ska bidra till målen i Agenda 2030.

5.4 Optimering av materialval utifrån livscykelperspektiv och digitala beslutsstöd

Materialval i byggprojekt kan optimeras enligt Schenk och Amiri (2022) genom att utgå från livscykelperspektiv snarare än enbart kostnad eller tekniska egenskaper. Det visade i genomgång av trä-, betong- och stålkonstruktioner att olika material belastar energianvändningen på olika sätt under hela livscykeln. Det första steget i optimeringen är att identifiera och analysera byggdelar där material med lägre livscykelenergi kan ersätta mer energikrävande alternativ om materialets egenskaper uppfyller kraven. Ett annat perspektiv som lyftes fram i artikeln är att materialval inte bör ses isolerat, utan i relation till andra faktorer såsom funktionella krav, möjligheter till återbruk, hållbarhet samt lokala klimatförutsättningar. Därmed kan livscykelanalysen användas som ett beslutsstöd för att se hur materialen påverkar byggnadens totala energiprofil. Flera designalternativ kan också jämföras tidigt i projekteringen genom att modellera olika materialscenarier. På så sätt kan man identifiera den lösningen som minimerar energianvändningen över hela livscykeln, samtidigt uppfylla byggnadens funktionella och strukturella krav (Schenk och Amiri, 2022).

One Click LCA resultatet från aktuel studiet visade en tidlig lägre miljöpåverkan vid användning av trä i jämförelse med betong och stål igenom alla byggnadsdelar, det vill säga med tanken på pelarna, balkarna samt beklädning i form av tak och väggar. Dock det visade sig att den största delen av miljö påverkan vid varje scenario undersökt ursakat av beklädningen, 24,86 kg CO2e/m2 i trä scenario, 102,57 kg CO2e/m2 i betong scenario och 225,71 kg CO2e/m2 i stål scenario. Med tanken på att beklädningen av fasaden i denna aktuel studie är inte bärande detta ger en marginal för förbättringar utan att minska byggnadens beständighet och därmed sitt ända mål och funktionalitet. Detta kan uppnås genom implementering av material kombination mellan trä och andra material vid behov av bärande konstruktion av betong eller stål och därmed minska miljö påverkan genom optimering av materialval till varje byggnadsdel.

Byggaktörer kan tidigt i projekteringsfasen optimera sina materialval för att främja hållbarhet och minska miljöpåverkan genom att använda livscykelanalyser (LCA). Webbaserade verktyget One Click LCA, enligt Arab et al. (2025), gör det möjligt för aktörer att identifiera material med hög miljöpåverkan redan under planerings- och designskedet. På så sätt kan alternativa materiallösningar jämföra innan byggstart och förebygga beslut som skulle leda till höga koldioxidutsläpp. Som tidigare nämnts i detta arbete beräknar One Click LCA materialens livscykelpåverkan, inklusive utsläpp kopplade till produktion, transport, installation, användning. Arab et al. (2025) visar i sina resultat att betong och stål i grundscenariot har betydande miljöpåverkan, med hög halt av koldioxid och betydande effekter på global uppvärmning, Ozonskiktets nedbrytning och andra miljöaspekter. Genom att använda webbaserade verktyg som One Click LCA, som ger ett objektivt och vetenskapligt underlag för materialval, kan byggaktörer prioritera material med låg klimatpåverkan. Detta inkluderar exempelvis förnybara material som trä, återvunnet stål eller betong med optimerad sammansättning för att minska klimatpåverkan (Arab et al.,2025).

Yu et al. (2022) undersöker digitala beslutsstödsystem och ICT-baserade verktyg som kan hjälpa beslutsfattare och andra aktörer att optimera sina materialval genom att integrera data om materialens miljöprestanda, resurseffektivitet och grad av cirkularitet. Aktörer kan få ett mer heltäckande underlag för att jämföra olika material och deras livscykelpåverkan genom att kombinera information från LCA-databaser, BIM-modeller och cirkulära materialflöden. Detta möjliggör i sin tur en enklare identifiering av material med god potential för återbruk, hög återvinningsgrad och låg klimatpåverkan. Det finns också möjlighet för digtala verktyg att stödja beslutfattare i att utvärdera scenarier för cirkulära strategier som återvunna material, återanvända kompoenter och demontering. Det finns också möjlighet för digitala verktyg att stödja beslutsfattare i att utvärdera scenarier för cirkulära strategier till exampel återvunnet material, återanvändning av komponenter och demontering. Dessa systematiska och datadrivna metoder ger aktörer möjlighet att fatta mer informerade beslut och välja material som uppfyller tekniska krav och minimerar resursanvändning samt miljöpåverkan. Sådan digitalisering är viktig för att leda byggbranschen till en mer cirkulär och hållbar materialhantering. För att optimera materialvalet användes i detta arbete både handberäkningar och verktyget One Click LCA, vilka var avgörande för att identifiera det mest klimatvänliga alternativet. Resultaten visar att trä var det mest hållbara materialet av de tre undersökta materialen för ett bilgarage enligt One Click LCA. Både handberäkningar och resultat från One Click LCA indikerar att tidiga analyser gör det möjligt att ersätta mer resurskrävande material med alternativ som uppfyller samma krav men har lägre klimatpåverkan.

6. DISKUSSION

I det här kapitlet diskuteras resultaten från studiet i relation till syftet, frågeställningarna och aktuellstudie samt i slutet diskuteras metodvalen. Resultaten förklaras, jämförs med andra studier och reflekteras över metod och hur tillförlitliga resultaten är.

6.1 Hur påverkar materialvalet miljön?

Resultat visar att byggmaterial påverkar klimatet olika mycket under byggskedet (A1-A5). Trä har lägst klimatpåverkan, ofta mellan 100 och 150 kg CO2e/m2 BTA. Det beror på att trä är ett förnybart material som binder koldioxid när det växer och att det krävs lite energi att tillverka. Betong har mycket högre utsläpp, cirka 600–650 kg CO2e/m2. Nästan alla utsläpp kommer från cementtillverkningen. Materialet har förmåga till koldioxidbindning över hela sin livslängd men inte tillräckligt för att motstå den höga koldioxidutsläppen. Vilket gör materialet miljömässigt belastande, detta visades i fallstudien Norra tornen där även klimatförbättrad betong som används i moderna byggnader orsakar fortfarande högt koldioxidutsläpp. Stål har olika klimatpåverkan beroende på hur det tillverkas. Stål från masugn kan ge upp till 900 kg CO2e/m2, medan stål från elugn med återvunnet skrot kan ligga på cirka 300–500 kg CO2e/m2. Studien visade att stål hade störst miljöpåverkan ur ett livscykelperspektiv jämfört med trä och betong.

Fallstudien visade dessutom att användning av återvunnet stål inte hade någon större betydelse för att minska påverkan, eftersom stål ändå hade den största miljöpåverkan. Däremot låg miljöpåverkan för trä och betong nära varandra. Stål har stor initial energiförbrukning i början av sin livscykel Dock stål hade den högst cirkularitet och återanvändning möjligheten vilket kan vara av stor nytta på långsikt särskilt med dagens höga befolkningsökning och branschens expansion för att möta behovet. Resultatet från One Click LCA stämmer väl med andra studier. Det visar att LCA är ett bra sätt att förstå hur olika material påverkar miljön. Men det finns också utmaningar, eftersom inte alla material har lika lättillgängliga och jämförbara klimatdata. Därefter visade resultatet från aktuell studien stora skillnader med avseende på ekvivalent koldioxidutsläpp där trä utsläpp var lägst med 27,97 kg CO2e/m2 (0,979 ton), betong 122 kg CO2e/m2 (4,27 ton) detta medför 436% ökning jämfört med trä fallet och stål 247,14 kg CO2e/m2 (8,65 ton) vilket innebär 884% jämfört med trä fallet. När dessa resultat jämförs med det föreslagna gränsvärdet för klimatpåverkan i byggskedet för småhus (180 kg CO_2e/m^2) enligt Boverkets slutrapport (2023), visar det att både trä och betong ligger under gränsvärdet. Detta innebär att dessa materialval är godtagbara ur klimatperspektiv. Däremot är resultatet för stål betydligt högre än gränsvärdet. Detta visar att stål inte är det mest lämpliga materialvalet för denna typ av byggnad ur klimatperspektiv.

Man bör också ta hänsyn till att den aktuella studien behandlade ett enkelt garage till en villa, där kunde man se tydliga skillnader i miljöpåverkan. Med tanke på hur enorm byggbranschen är kan utsläppen minskas mer om användningen av trä implementeras i

större utsträckning i byggnation på internationell nivå. Det var tidligt att trä är den mest miljömässig smart alternativ med tanken på att materialet orsakar betydligt mindre koldioxidutsläpp jämförande med betong och stål, sin förmåga att fånga koldioxid och fungera som förråd under sitt livslängden var en fördel i livscykelanalysen. Fallstudien ceder husen i Stockholm var en verklig betoning av hur materialet kan användas i flerbostadshus med goda bärförmåga till KL-trä samtidigt minska klimatpåverkan i jämförande med betongkonstruktioner med upp till 50%.

6.2 Fördelar och nackdelar med materialen

Trä, betong och stål har olika egenskaper som påverkar både klimat och funktion. Trä är lätt och enkel att bygga med, den offrar bättre förhållande mellan tryck och draghållfasthet än betongen vilket gör det lämpligt visa typer av byggnadskonstruktioner som bostäder men materialet är känsligt och behöver skyddas mot fukt och brand. Kl-trä har dock förbättrad dessa svagheter genom skiktlimning och brandskydd. Samtidigt så kan materialet få bättre potential genom bra projektering för att uppnå sitt full hållfasthet förmåga där belastning går på fiberriktning och bättre skydd ifall omkretsmiljö hade hög fuktighet. Betong är starkt, brandsäkert och tål fukt bra. Det används ofta i bostäder, infrastruktur och fundament. Materialet har bra formbarhet vilket kan vara av nytta vid komplexa konstruktioner särskilt att materialet har god tryckhållbarhet. Nackdelen är materialet svag draghållfasthet vilket måste nästan alltid förstärkas med stål. Betongen har högt koldioxidutsläpp och på grund av armeringen blir betongkonstruktioner hög klimatpåverkan ännu större. Studien fokus var på vartenda material i sig själv, dess egenskaper och miljöpåverkan dock i verkligheten kommer betong och armeringen nästan kopplat till varandra. Materialet är tungt och att det tar tid att torka. Samtidigt måste armeringen implementeras rätt och skyddas så att inga korrosion inträffar och draghållfastheten försvagas vilket kan leda till deformation i konstruktionen, stora renoveringar och dyra kostnader. Stål är starkt och erbjuder båda högt drag och tryckhållfasthet, lätt att montera och kan återanvändas totalt samtidigt hålla sina egenskaper med även möjlighet till egenskapsuppgraderingar. Men materialet är känsligt för fuktiga och salthaltiga miljöer kräver rostskydd och brandskydd. Nyproducerat stål ger höga utsläpp och kräver hög initial energi. Fallstudien Portlands Place har provat stålets möjlighet till snabb montering och tålighet till stora spänning krafter. Sammantaget är det svårt att avgöra vilket material som är bäst ur ett tekniskt perspektiv, eftersom varje material har sina fördelar och nackdelar. Med tanke på att denna studie utgick från ett bilgarage var resultatet relativt okomplicerat att jämföra mellan materialen. Det var möjligt att Utvärdera varje materials tekniska egenskaper på ett tydligt sätt, eftersom projektet har enkla konstruktionsskarv och en begränsad omfattning. Alla tre materialen (trä, betong och stål) är användbara i denna typ av konstruktion som gör det möjligt att välja det mest lämpliga alternativet utifrån klimatpåverkan och hållfasthet. Valet av material måste därför anpassas till projektets specifika krav och ändamål.

6.3 Hur kan byggsektorn optimera sina materialval?

Optimering av materialval handlar om att främja hållbarhet och minska miljöpåverkan. För beslutfattare och aktörer ska kunna göra detta på ett effektivit sätt behöver livscykelanalyser (LCA) användas tidigt i projekteringfasen. LCA kan hjälpa beslutfattare och aktörer med att bedöma miljöpåverkan så att man kan jämföra olika material på ett rättvist och objektivt sätt. Med hjälp av webbaserade verktyg kan man på ett enkelt och effektivt sätt jämföra resultaten över hela livscykeln och prioritera materialet med lågt koldioxidavtryck. I denna studie användes One Click LCA för att jämföra de olika materialen och identifiera det mest hållbara materialval. Denna studie visade att trä var det mest hållbara materialet av de tre valda material för ett bilgarage. Det är viktigt att notera att resultatet kan variera beroende på byggnadens typ, användning och projektets specifika krav.

Resultatet från One Click LCA visade i detta aktuell studie också en möjlighet för förbättringar vid användning behov av betong eller stål som bärande konstruktion material, där trä skulle kunna användas för icke bärande byggnadsdelar och därmed minska miljö påverkan för byggnadens. Beklädningen av garaget i form av tak och väggar ansvarade för en enorm del av garaget fotavtryck vid alla scenarier, vilket reflekterar hur viktigt det är att optimera material valet till denna byggnadsdel. Resultatet var endast möjligt genom beräkningen av varje byggnadsdel miljö påverkan för sig själv, det vill säga pelare, balkar och beklädningen. Vilket styrker hur viktig implementering av LCA i tidigt skede av projektering processen är.

Materialval kan också optimeras genom att främja material med låg klimatpåverkan. Valet av material kan variera beroende av projektets specifika behov. Trä är ett exempel på ett förnybart och hållbart material som kan användas för olika byggprojekt utan att påverka projektet ändamål. För betong kan klimatpåverkan minskas genom att optimera blandning och använda cement med låg klimatpåverkan, såsom flygaska betong. Medan för stål kan man välja återvunnen stål om möjligt eller välja stål med låg koldioxidutsläpp vid produktion som till exempel ljusbågsugn. Även materialens livslängd, möjligheten till återbruk, och deras påverkan under användningstiden bör vägas in. Man kan även ta hänsyn till material som är lätta att demontera, återanvända eller återvinna bidrar också till en mer cirkulär ekonomi och minskar avfall i framtiden. Strategiskt tänkande kan också optimera materialvalet, eftersom inget enskilt material är bäst i alla aspekter. Genom att kombinera olika material på ett genomtänkt sätt kan man utnyttja deras egenskaper för att uppnå de önskade målen. Samverkan mellan aktörer och beslutsfattare är nödvändig för att optimera materialvalet fullt ut. Genom tydliga klimatmål, strategiskt tänkande och effektiv användning av programvaror kan man nå fram till det bästa materialvalet, där kombineras tekniska egenskaper, låg miljöpåverkan och långsiktig hållbarhet.

6.4 Samband mellan fallstudier och scenariobaserade beräkningar för trä, betong och stål

Kopplingen mellan fallstudier och resultatet från beräkningar är att resultat från fallstudier kan användas som jämförelsematerial för den egenstudien. För att få en helhetsbild av byggmaterialens miljöpåverkan och tekniska egenskaper utgör dessa resultat en central del av analysen. Dessa metoder skapar ett samband mellan beräkning, teori och praktik, vilket stärker slutsatser och validitet. Idén med garagestudien är att visa den kvantitativa delen av studiet, där beräkningar och mätbara resultat jämfördes. Däremot fallstudierna visade kvalitativa delen och fungerade som exempel på verkliga tillämpningar, vilket möjliggjorde en jämförelse mellan fiktiva modeller och praktiken. Cederhusen, Norra Tornen och Portlands Place tillförde kontextuell förklarning till studiet och LCA resultatet.

Fallstudierna visade att trä är det bästa materialvalet ur miljöperspektiv, följt av betong och därefter stål. Detta skapar en tydlig likhet mellan fallstudierna och egenstudien. De låga koldioxidutsläppen för trä i garagestudien scenario 1 kan förklaras av den låga energiintensiteten inom sågverksindustrin, vilket resonerades och påvisades i fallstudien Cederhusen. Resultatet för betong i scenario 2 i garagestudien återspeglades i fallstudien Norra Tornen, där utsläppen från cementproduktion och bindemedel tydligt framkom. I garagestudien visade scenario 3 för stål betydligt högre koldioxidutsläpp, vilket kan kopplas till de energiintensiva processerna inom stålproduktion. Detta återspeglades i fallstudien Portland Place, där en stor andel återvunnet stål användes, vilket inte visade någon betydande skillnad jämfört med scenario 3. Detta visar att de kvantitativa resultaten från garagestudien inte är isolerade, utan påverkas av samma materialfaktorer som fallstudierna illustrerar.

Medan garagestudien identifierar mängden på material och kvantifierar miljöpåverkan, har fallstudierna analyserat arkitektoniska val, praktiska begränsningar och verkliga sammanhang som påverkar resultaten. Denna koppling visar hur teoretiska modeller kan justeras baserat på verkliga förhållanden och hur observationer i fallstudier kan inspirera till nya beräkningsscenarier. I slutet skapades ett dynamiskt flöde mellan beräkningar, teori och praktik, där varje metod både förstärker och validerar den andra.

6.5 Metoddiskussion

6.5.1 Litteraturstudie och datainsamling

Litteraturstudien utgjorde den huvudsakliga delen av datainsamlingen. Där valdes det relevanta källor som är baserat på peer-reviewed artiklar och rapporter som ökar studiens trovärdighet och stärker arbetets vetenskapliga grund. Detta visade sig efter datainsamlingen, där litteraturstudien bidrog till att göra resultaten mer rimliga.

6.5.2 Fallstudiernas roll

Tre fallstudier baserade på verkliga byggprojekt inkluderades till arbetet för att öka den praktiska relevansen. Denna metod bidrog med konkreta exempel på materialens användning i verkliga konstruktioner och gjorde det därmed möjligt att koppla de teoretiska beräkningarna till praktiska tillämpningar. Detta förbättrade förståelsen för hur resultaten kan användas i verkliga sammanhang.

6.5.3 Handberäkningar som huvudmetod

Handberäkningar valdes för att stärka resultatens tillförlitlighet. Genom att använda handberäkningar kunde resultaten baseras på objektiva och kvantitativa data. Räkneexempel bidrog till att säkerställa rimlighet och praktisk användbarhet vid dimensionering av garagebyggnad.

6.5.4 Begränsningar och felkällor

Trots metodens fördelar finns vissa begränsningar. Det uppstår alltid en risk för uppskattningsfel när det gäller handberäkning, särskilt vid beräkning av materialmängder, vilket kan påverka LCA-resultaten. Beräkningarna förenklar dessutom verkligheten och tar inte alltid hänsyn till alla konstruktionstekniska detaljer. Detta kan begränsa möjligheterna att generalisera resultaten till andra byggprojekt och påverka studiens noggrannhet.

6.5.5 Metodens tillförlitlighet

Metodvalen bedöms vara lämpliga för studiens syfte och frågeställningar. Metoderna bidrog till att skapa objektiva och tekniskt baserade resultat. Resultaten bör tolkas med viss försiktighet när de överförs till andra projekt eller sammanhang eftersom förenklingar och potentiella beräkningsfel kan påverka precisionen.

7. SLUTSATSER

Det här examensarbetet har undersökt hur olika byggmaterial (trä, betong och stål) påverkar miljön ur ett livscykelperspektiv samt att analysera deras tekniska egenskaper och potential för optimering inom byggsektorn. Genom litteraturstudie, fallstudier och handberäkningar i form av scenariobaserade LCA-analyser har resultaten kunnat jämföras och bedömas både teoretiskt och praktiskt.

Resultaten visar tydligt att trä har den lägsta klimatpåverkan under byggskedet, följt av betong och därefter stål, som hade den högsta miljöbelastningen. Detta bekräftades av den aktuella studien för garagebyggnaden. Resultatet från One Click för garaget visade att trä och betong ligger under Boverkets föreslagna gränsvärden för småhus, medan stål överstiger gränsen. Därmed framstår trä som det mest klimatvänliga alternativet.

När det gäller tekniska egenskaper har Alla tre materialen olika styrkor och svagheter. Trä är lätt, förnybart och har god hållfasthet, men kräver fukt- och brandskydd. Betong är starkt, formbart och brandsäkert, men har hög klimatpåverkan på grund av cementproduktionen och kräver armering på grund av sin låga draghållfasthet. Stål har hög hållfasthet, kan återanvändas effektivt och ger möjlighet för snabb montering, men tillverkningen är energiintensiv och kräver rost- och brandskydd. Därför bör materialvalet anpassas till projektets specifika krav och behov.

Optimering av materialval kan ske genom att använda webbaserade verktyg och strategiskt tänkande. LCA bör användas tidigt i projekteringen för att objektivt jämföra material och välja alternativ med lågt koldioxidutsläpp. Att beräkna miljöpåverkan för varje byggnadsdel, såsom pelare, balkar och beklädnad, är viktigt för att identifiera var klimatnytta kan maximeras. Man bör också ta hänsyn till återbruk, demontering, livslängd och cirkulär ekonomi. Genom strategisk kombination av olika material och samverkan mellan aktörer kan man uppnå både teknisk funktion, låg klimatpåverkan och långsiktig hållbarhet.

Sammanfattningsvis visar examensarbetet att materialval har stor betydelse för en byggnads klimatavtryck, även i mindre konstruktioner som ett garage. Trä utgör den mest hållbara lösningen. Betong har potential att förbättras genom materialoptimering. Medan stål har fortfarande hög klimatpåverkan även med återvinning och modern produktion.

8. FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE

För framtida studier kan det vara relevant att omfatta de ekonomiska aspekterna och de sociala effekterna av olika materialval, såsom kostnadseffektivitet, påverkan på arbetsmarknaden och användarupplevelse, för att uppnå en helhetsbild av hållbarheten hos olika materialval. Man kan även analysera fler byggnadstyper och större projekt, för att se hur materialval påverkar klimatavtrycket i olika skala.

REFERENSER

Abdulal, H., & Chamoun, G. (2021). *Jämförelse av KL-trä och Grön betong för ytterväggar med avseende på LCA och LCC* (Dissertation). Hämtad från https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-306419

Abdulbaki, M., & Mammar Chaouche, A. (2015). *Användning av flygaska i vattenbyggnadsbetong* (Dissertation). Hämtad från https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-174181

Ali, T., & Mohamed, A. (2021). *Jämförelsestudie mellan olika typer av stommar av betong, stål och trä* (Dissertation). Hämtad från https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-302967

Allan, K., & Phillips, A. R. (2021). *Comparative Cradle-to-Grave Life Cycle Assessment of Low and Mid-Rise Mass Timber Buildings with Equivalent Structural Steel Alternatives*. Sustainability, 13(6), 3401. https://doi.org/10.3390/su13063401

Arab, B., Abdel Raouf, M., Rahal, A., Mostafa, M., & AbouZeid, M. N. (2025). Life cycle assessment for construction materials of an industrial building using web-based software "OneClick LCA". Discover Sustainability, 6(1), 615–627. https://doi.org/10.1007/s43621-025-01466-5

ArchDaily. (2018). *Norra Tornen / OMA | Reinier de Graaf*. Hämtad från: https://www.archdaily.com/905500/norra-tornen-oma-reinier-de-graaf

Arslan, D., Sharples, S., Mohammadpourkarbasi, H., & Khan-Fitzgerald, R. (2023). *Carbon Analysis, Life Cycle Assessment, and Prefabrication: A Case Study of a High-Rise Residential Built-to-Rent Development in the UK*. Energies, 16(2), 973. https://doi.org/10.3390/en16020973

Bajwa, A. U. R., Siriwardana, C., Shahzad, W., & Naeem, M. A. (2025). *Material selection in the construction industry: A systematic literature review on multi-criteria decision making*. Environment Systems and Decisions, 45, Article 8. https://doi.org/10.1007/s10669-025-10001-w

BE Group Sverige AB. (2016). *Byggstålshandboken* (Utgåva oktober 2016). Hämtad från: https://www.begroup.se/storage/9A19F538948B1D3F406053FC922BAB55CF88E97F3F1BE804B4A5A757C1D4B29E/df96bb95a69848b28898ff128687ae3b/pdf/media/ede80f10d305418f9b4e8b537afb6917/BE_Byggstalshandboken_okt_2016.pdf

Bjerking. (15 maj 2019). *LCA-rapport Cederhusen*. Hämtad från: https://bjerking.se/download/18.2d3591ec184eb39b78a1096/1670424484912/lca-rapport-cederhusen_enkelsidor_utskrift_bilaga.pdf

Bjerking. (2025). *Livscykelanalyser och klimatberäkningar*. Hämtad från: https://bjerking.se/vara-tjanster/teknikomrade/livscykelanalyser-och-klimatberakningar

Boverket. (2023). *Slutrapport – Gränsvärde för byggnaders klimatpåverkan*. Hämtad från: https://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2023/slutrapport-gransvarde-for-byggnaders-klimatpaverkan.pdf

Boverket. (3 juli 2024). *Introduktion till livscykelanalys (LCA)*. Hämtad från: https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/livscykelanalys/introduktion-till-livscykelanalys-lca/

Boverket. (3 juli 2024a). *Vägledning om LCA för byggnader*. Hämtad från: https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/livscykelanalys/

Boverket (2025). *Utsläpp av växthusgaser från bygg- och fastighetssektorn*. Hämtad från:https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/miljoindikatorer---aktuell-status/vaxthusgaser/

Brynhildsen, H. (2020). *Advantages of steel as a building material from a sustainability perspective* (Examensarbete för masterexamen, Chalmers University of Technology). Chalmers Open Digital Repository. Hämtad från: https://odr.chalmers.se/handle/20.500.12380/301795

Burström, P.G. & Nilvér, K. (2018). *Byggnadsmaterial (3)*. Lund: Studentlitteratur.

Cadoni, E., Forni, D., Gieleta, R. et al. (2018). *Tensile and compressive behaviour of S355 mild steel in a wide range of strain rates*. Eur. Phys. J. Spec. Top. 227, 29–43. Hämtad från: https://doi.org/10.1140/epjst/e2018-00113-4

DiGiovanni, C., Hisseine, O. A., & Awolayo, A. N. (2024). *Carbon dioxide sequestration through steel slag carbonation: Review of mechanisms, process parameters, and cleaner upcycling pathways*. Journal of CO2 Utilization, 81, 102736-. https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102736

Driessen, E., & Grönlund, E. (2024). *Circular concrete scenarios and their environmental impacts: A life cycle assessment modelled after a Swedish city*. Journal of Cleaner Production, 485, Article 144348. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144348

Elf, A., & Cederth, K. (2013). *Brandskydd av stålkonstruktioner: Lathund för brandskyddsdimensionering av stålprofiler* (Dissertation). Hämtad från https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:mdh:diva-24228

Energimyndigheten. (2024, oktober 3). *Energimyndigheten ger 1,2 miljarder i stöd till Stegra (H2 Green Steel)*. Hämtad från: https://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2024/energimyndigheten-ger-12-miljarder-i-stod-till-stegra-h2-green-steel/

Erlandsson, M. (2018). *LCA-baserade miljökrav i byggandet*. Hämtad från IVL Svenska Miljöinstitutet website: https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ivl:diva-5

Eurocode Software AB. (u.å.). *Eurokod 2: Dimensionering av betongkonstruktioner – Del 1-1: Allmänna regler och regler för byggnader*. Hämtad från: https://www.eurocodesoftware.se/kurs/eurokod_revA/pdf/Eurokod_2_Betong.pdf

Fan, Z., & Friedmann, J. (8 mars 2021). *Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy*. Columbia University SIPA, Center on Global Energy Policy. Hämtad från: https://www.energypolicy.columbia.edu/publications/low-carbon-production-iron-steel-technology-options-economic-assessment-and-policy/

Finja Betong. (u. å.). *Vad är betong?*.Hämtad från: https://www.finja.se/faq/vad-ar-betong

FN. (2015). *Globala målen för hållbar utveckling*. Hämtad från: https://fn.se/globala-malen-for-hallbar-utveckling/

Gustavsson, E., & Dahlberg, A. (2024). *Jämförelser av tryckhållfasthet och uttorkning av betong med lägre klimatpåverkan* (Dissertation). Hämtad från https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:hig:diva-44599

Hansols, A., & Hagström, F. (2023). *Återbruk av konstruktionsvirke till KL-trä: Vilka faktorer kan påverka producenterna att inte återanvända material inom produktion av KL-trä?* (Dissertation). Hämtad från https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:du-46558

Hirn, A. (2019). *Handbok i varmförzinkning* (8:e uppl.). Nordic Galvanizers. Hämtad från: https://nordicgalvanizers.com/wp-content/uploads/2020/01/NG_Handbok-1.pdf

Institute of Materials, Minerals and Mining. (16 oktober 2023). *Double the climate impact of methane from metallurgical coal in steel production*. Hämtad från https://www.iom3.org/resource/double-the-climate-impact-of-methane-from-metallurgical-coal-in-steel-production.html

Invex AB. (26 februari 2024). *Allmänna konstruktionsstål, nyckeln till hållbara och starka konstruktioner*. Hämtad från: https://invexmetal.com/2024/02/konstruktionsstal-varianter-och-allmanna-anvandningsomraden/

Isaksson, T., Mårtensson, A., & Thelandersson, S. (2020). *Byggkonstruktion* (Fjärde upplagan). Studentlitteratur.

IVL Svenska Miljöinstitutet. (22 januari 2025). *Klimatåtgärder i byggsektorn*. IVL Svenska Miljöinstitutet. Hämtad från: https://www.ivl.se/om-oss/forskning-och-utveckling/forskningens-samhallsnytta/klimatatgarder-i-byggsektorn

IVL Svenska Miljöinstitutet. (14 maj 2025a). *Anvisningar för LCA-beräkning av byggprojekt*. Hämtad från: https://www.ivl.se/vart-erbjudande/vara-omraden/hallbart-samhallsbyggande/anvisningar-lca-berakning-byggprojekt.html

Jernkontoret. (5 april 2023). *HYBRIT – fossilfri stålproduktion*. Hämtad från: https://www.jernkontoret.se/sv/vision-2050/koldioxidfri-stalproduktion

Jernkontoret. (29 januari 2024). *Restprodukter*. Hämtad från: https://www.jernkontoret.se/sv/stalindustrin/tillverkning-anvandning-atervinning/restprodukter/

Jönsson, K.-O., & Ekman, L. (2020). *Betongens klimatpåverkan: En studie om betongens klimatpåverkan och byggbranschens syn på materialet* [Examensarbete, Lunds tekniska högskola]. Lund University Publications. https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordOId=9016791&fileOId=9016796

Lundqvist Trävaru. (u.å.). *Snözoner*. hämtad från: https://www.lundqvisttravaru.se/byggsystem/snozoner/

Malmqvist, T., Borgström, S., Brismark, J., & Erlandsson, M. (2021). *Referensvärden för klimatpåverkan vid uppförande av byggnader*. Hämtad från KTH Royal Institute of Technology website: https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-307065

Metallkompetens. (u.å.). *Stålets definitioner och indelningar*. Hämtad från: https://www.metallkompetens.se/handbok/1-historia-grundlaggande-metallurgi/1-historia-grundlaggande-metallurgi/stalets-definitioner-och-indelningar/

Naturskyddsföreningen. (7 februari 2022). *Cement, klimat och miljö*. Hämtad från: https://www.naturskyddsforeningen.se/faktablad/cement-klimat-och-miljo/

Naturvårdsverket. (6 februari 2025). *Klimatet och bygg- och fastighetssektorn*. Hämtad från: https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/klimatomstallningen/omraden/klimatet-och-bygg--och-fastighetssektorn/

New Steel Construction. (7 September 2017). *An introduction to steelmaking*. Hämtad från: https://www.newsteelconstruction.com/wp/an-introduction-to-steelmaking/

Olmez, G. M., Dilek, F. B., Karanfil, T., & Yetis, U. (2016). *The environmental impacts of iron and steel industry: a life cycle assessment study*. Journal of Cleaner Production, 130, 195–201. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.139

OMA. (u.å.). *Norra Tornen*. Hämtad från: https://www.oma.com/projects/norra-tornen

Rinne, R., Ilgın, H. E., & Karjalainen, M. (2022). *Comparative Study on Life-Cycle Assessment and Carbon Footprint of Hybrid, Concrete and Timber Apartment*

Buildings in Finland. International journal of environmental research and public health, 19(2), 774. Hämtad från: https://doi.org/10.3390/ijerph19020774

Schenk, D., & Amiri, A. (2022). *Life cycle energy analysis of residential wooden buildings versus concrete and steel buildings: A review*. Frontiers in Built Environment, 8. https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.975071

Sjunnesson, J. (2005). *Livscykelanalys av betong* (Examensarbete, 20 p). Lunds Tekniska Högskola, Lunds universitet. Hämtad från https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordOId=4468239&fileOId=4469176

SSAB. (8 november 2023). *Introducing the world's first building with fossil-free steel*. Hämtad från: https://www.ssab.com/en/news/2023/11/introducing-the-worlds-first-building-with-fossilfree-steel

Stockholms stad. (7 juni 2023). *Cederhusen är Årets Stockholmsbyggnad 2023*. Hämtad från: https://via.tt.se/pressmeddelande/3350159/cederhusen-ar-arets-stockholmsbyggnad-2023

StruSoft. (8 maj 2019). *Advanced structural load analysis – Norra Tornen*. Hämtad från: https://strusoft.com/blog/case-studies/advanced-structural-load-analysis-norra-tornen/

Stålbyggnadsinstitutet. (12 oktober 2009). *Stålets egenskaper*. Hämtad från: https://media.sbi.se/2019/11/Stalets_egenskaper.pdf

Stålbyggnadsinstitutet. (28 december 2021). *Hållbart byggande*. Hämtad från: https://www.sbi.se/hallbart-byggande/

Stålbyggnadsinstitutet. (1 februari 2025). *Stål – cirkulärt & återbrukbart*. Hämtad från: https://www.sbi.se/stal-cirkulart-aterbrukbart/

Svensk Betong. (u.å.). *Betongens egenskaper*. Hämtad från: https://www.svenskbetong.se/om-betong/platsgjutet/betongens-egenskaper

Svensk Betong. (u.å.a). *Naturligt material*. Hämtad från: https://www.svenskbetong.se/om-betong/fakta-egenskaper/naturligt-material

Svensk Betong. (u.å.b). *Betongens klimatpåverkan*. Hämtad från: https://www.svenskbetong.se/hallbarhet/betong-och-klimat

Svenskt Näringsliv. (u.å.). *Cementindustrin*. Hämtad från: https://www.svensktnaringsliv.se/ageranu_gamla-3587tyyv8n/cementindustrin_1196084.html

Svenskt Trä. (u.å.). *Materialet trä*. TräGuiden. Hämtad från: https://www.traguiden.se/om-tra/materialet-tra/

Svenskt Trä. (20 augusti 2015). *Sju jämförande analyser*. TräGuiden. Hämtad från: https://www.traguiden.se/om-tra/miljo/lca/lca/sju-jamforande-analyser/

Svenskt Trä. (20 augusti 2015a). *Träprodukter lagrar kol*. TräGuiden. Hämtad från: https://www.traguiden.se/om-tra/miljo/miljoeffekter/miljoeffekter/traprodukter-lagrar-kol/

Svenskt Trä. (20 augusti 2015b). *Tillverkning av träprodukter*. TräGuiden. Hämtad från: https://www.traguiden.se/om-tra/miljo/miljoeffekter/miljoeffekter/tillverkning-av-traprodukter/

Svenskt Trä. (20 augusti 2015c). *Träprodukters kretslopp*. TräGuiden. Hämtad från: https://www.traguiden.se/om-tra/miljo/miljoeffekter/miljoeffekter/traprodukters-kretslopp/

Svenskt Trä. (2019). *Dimensionering av träkonstruktioner – Del 1: Projektering av träkonstruktioner*. Hämtad från: https://www.svenskttra.se/siteassets/5-publikationer/pdfer/dimensionering-av-trakonstruktioner1-2019.pdf

Svenskt Trä. (2019a). *Dimensionering av träkonstruktioner – Del 2: Regler och formler enligt Eurokod 5* (Utgåva 3:2019). Hämtad från: https://www.svenskttra.se/siteassets/5-publikationer/pdfer/dimensionering-av-trakonstruktioner2-2019.pdf

Svenskt Trä. (2 november 2021). *1.3.3 Vindlast*. TräGuiden. Hämtad från: https://www.traguiden.se/konstruktion/takstolshandboken/bakgrund/1.3-laster-och-lastfall/1.3.3-vindlast/

Svenskt Trä. (15 juni 2021a). *Inverkan på de mekaniska egenskaperna för trä*. TräGuiden. Hämtad från: https://www.traguiden.se/om-tra/materialet-tra/traets-egenskaper-och-kvalitet/mekaniska-egenskaper1/inverkan-pa-de/

Szczepaniak, E. (2023). *Hållbart byggande : Utmaningar och möjligheter* (Dissertation). Hämtad från https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:mau:diva-64192

Trästad Sverige. (u.å.). *Cederhusen, Stockholm*. Hämtad från: https://www.trastad.se/projekt/cederhusen-stockholm/

UK Green Building Council. (u.å.). *Iron ore*. Hämtad från: https://ukgbc.org/our-work/topics/embodied-ecological-impacts/iron-ore/

Yu, Y., Yazan, D. M., Junjan, V., & Iacob, M.-E. (2022). *Circular economy in the construction industry: A review of decision support tools based on Information & Communication Technologies*. Journal of Cleaner Production, 349, Article 131335. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131335

Zabalza Bribián, I., Valero Capilla, A., & Aranda Usón, A. (2011). *Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and*

evaluation of the eco-efficiency improvement potential. Building and Environment, 46(5), 1133–1140. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.002

BILAGA 1: FALL 1 TRÄ KONSTRUKTION BERÄKNINGAR

Balken är av limträ, hållfasthetsklass GL30c

Säkerhetsklass 3 γ_d = 1

Klimatklass 1

Partialkoefficient för permanent last γ_g = 1,2

Partialkoefficient för snölast γ_s = 1,5

Partialkoefficient för limträ γ_m = 1,25

cc-avstånd för primärbalkar (m) = 3

Laster

Limträbalk

$$g_{k,beam} = 0{,}2\ KN/m$$

Limträpelare

$$g_{k,column} = 0{,}5\ KN/m$$

Övrig permanent last

$$G_{k,2} = 1\ KN/m^2$$

$$g_{k,2} = G_{k,2} \cdot i \cdot 1{,}1 = 1 \cdot 3{,}5 \cdot 1{,}1 = 3{,}85\ KN/m^2$$

Snölast

$$S_k = 2{,}0\ KN/m^2$$

$$s_k = S_k \cdot i \cdot \mu \cdot 1{,}1 = 2 \cdot 3{,}5 \cdot 0{,}98 \cdot 1{,}1 = 7{,}546\ KN/m$$

Vindlast

$$Q_{w,k} = 0{,}6\ KN/m^2$$

$$q_{w,k,pos} = Q_{w,k} \cdot i \cdot C_{e,pos} = 0{,}6 \cdot 3{,}5 \cdot 0{,}75 = 2{,}1\ KN/m$$

$$q_{w,k,neg} = Q_{w,k} \cdot i \cdot C_{e,neg} = 0{,}6 \cdot 3{,}5 \cdot 0{,}4 = 1{,}12\ KN/m$$

$$q_{w,k,int} = Q_{w,k} \cdot i \cdot C_{int} = 0{,}6 \cdot 3{,}5 \cdot 0{,}35 = 0{,}98\ KN/m$$

Lastkombinationer

Kombination 1 (snölast huvudlast $k_{mod} = 0{,}8$)

$$q_{ver1} = \gamma_d \cdot [\gamma_g \cdot (g_{k.beam} + g_{k.2}) + \gamma_q \cdot s_k] = 1 \cdot [1{,}2 \cdot (0{,}2 + 3{,}85) + 1{,}5 \cdot 7{,}546] = 16{,}179\ KN/m$$

$$q_{w,p,1} = \gamma_d \cdot \gamma_q \cdot q_{w,k,pos} \cdot \psi_{0,W} = 1 \cdot 1{,}5 \cdot 2{,}1 \cdot 0{,}3 = 0{,}945$$

$$q_{w,n,1} = \gamma_d \cdot \gamma_q \cdot q_{w,k,neg} \cdot \psi_{0,W} = 1 \cdot 1{,}5 \cdot 1{,}12 \cdot 0{,}3 = 0{,}504$$

$$q_{w,i,1} = \gamma_d \cdot \gamma_q \cdot q_{w,k,int} \cdot \psi_{0,W} = 1 \cdot 1{,}5 \cdot 0{,}98 \cdot 0{,}3 = 0{,}441$$

Kombination 2 (vindlast huvudlast $k_{mod} = 0{,}9$)

$$q_{ver2} = \gamma_d \cdot [\gamma_g \cdot (g_{k.beam} + g_{k.2}) + \gamma_q \cdot \psi_{0,S} \cdot s_k] = 1 \cdot [1{,}2 \cdot (0{,}2 + 3{,}85) + 1{,}5 \cdot 0{,}6 \cdot 7{,}546] = 11{,}6514\ KN/m$$

$$q_{w,p,2} = \gamma_d \cdot \gamma_q \cdot q_{w,k,pos} = 1 \cdot 1{,}5 \cdot 2{,}1 = 3{,}15$$

$$q_{w,n,2} = \gamma_d \cdot \gamma_q \cdot q_{w,k,neg} = 1 \cdot 1{,}5 \cdot 1{,}12 = 1{,}68$$

$$q_{w,i,2} = \gamma_d \cdot \gamma_q \cdot q_{w,k,int} = 1 \cdot 1{,}5 \cdot 0{,}98 = 1{,}47$$

Brottgränstillstånd (balk)

Tryck vinkelrätt fiberna

$$N_{ED} = q_{dll} \cdot {}^{l_{tot}}/_{2} = 16{,}179 \cdot {}^{5}/_{2} = 40{,}4475\ KN$$

$$\sigma_{c.90,d} = {}^{N_{ed}}/_{b \cdot l_{support}} = {}^{40{,}4475}/_{2} = 1{,}498056\ MPa$$

Kontroll

$${}^{\sigma_{c.90,d}}/_{f_{c.90,d} \cdot k_{c.90}} = {}^{1{,}498056}/_{2{,}5 \cdot 1{,}75} = 0{,}342413\ < 1\ OK$$

Skjuvning

$$V_{ED} = q_{dll} \cdot {}^{l_{tot}}/_{2} = 16{,}179 \cdot {}^{5}/_{2} = 40{,}4475\ KN$$

$$V_{red} = {}^{2 \cdot V_{ED}}/_{l_{tot}} \cdot \left({}^{l_{tot}}/_{2} - {}^{b_{support}}/_{2} - h\right) = {}^{2 \cdot 40{,}4475}/_{5} \cdot \left({}^{5}/_{2} - {}^{b_{support}}/_{2} - 3\right) =$$

30,98279 KN

$$\tau = {}^{3 \cdot V_{red}}/_{2 \cdot b \cdot h} = {}^{3 \cdot 30{,}98279}/_{2 \cdot b \cdot h} = 1{,}147511\ MPa$$

Kontroll

$${}^{\tau}/_{f_{v,d} \cdot k_{cr}} = {}^{1{,}147511}/_{2{,}24 \cdot 0{,}86} = 0{,}595676\ < 1\ OK$$

Böjmoment

$$M_{ED} = q_{dll} \cdot {l_{tot}}^2/_8 = 16{,}179 \cdot {}^{25}/_8 = 50{,}55938\ KNm$$

$$\sigma_{m,d} = {}^{6 \cdot M_{ED}}/_{b \cdot h^2} = {}^{6 \cdot 50{,}55938}/_{b \cdot h^2} = 16{,}64506$$

Kontroll

$${}^{\sigma_{m,d}}/_{f_{m,d} \cdot k_h} = {}^{16{,}64506}/_{19{,}2 \cdot 1{,}06} = 0{,}825648\ < 1\ OK$$

Brottgränstillstånd (balk)

Skjuvning

$$V_{windwar,2} = R_A = 12{,}639375\ kN$$

$$\tau_{d,2} = {}^{3 \cdot V_{windwar}}/_{2 \cdot (b_{col} \cdot h_{col}) \cdot k_r} = {}^{3 \cdot 12639{,}375}/_{2 \cdot (b_{col} \cdot h_{col}) \cdot 0{,}8} = 0{,}975260417$$

Kontroll

$$f_{v,d,2} = {}^{f_{v,k} \cdot k_{mod,2}}/_{\gamma_M} = {}^{3{,}5 \cdot 0{,}9}/_{1{,}25} = 2{,}52\ MPa$$

$${}^{\tau_{d,2}}/_{k_{cr} \cdot f_{v,d,2}} = {}^{0{,}975260417}/_{0{,}86 \cdot 2{,}52} = 0{,}450009421\ < 1\ OK$$

Kombinerad böjning och tryck vid pelarfot

$$M_{d,2} = \left({}^{5 \cdot q_{w,p,2}}/_{16} + {}^{3 \cdot q_{w,n,2}}/_{16}\right) \cdot {l_{col}}^2 + {}^1/_2 \cdot F_{w,p} \cdot l_{col} + {}^{q_{w,i,2}}/_8 \cdot {l_{col}}^2$$
$$= \left({}^{5 \cdot 3{,}15}/_{16} + {}^{3 \cdot 1{,}68}/_{16}\right) \cdot 9 + {}^1/_2 \cdot 2{,}52 \cdot 3 + {}^{1{,}47}/_8 \cdot 9 = 17{,}128125$$

$$F_{v,2} = q_{ver,2} \cdot {}^{l_{tot}}/_2 + \gamma_g \cdot g_{k,column} \cdot l_{col} = 11{,}6541 \cdot {}^3/_2 + 1{,}2 \cdot 0{,}5 \cdot 3 = 42{,}5799$$

$$\sigma_{c,0,d,2} = {}^{F_{v,2}}/_{k_r \cdot b_{col} \cdot h_{col}} = {}^{42{,}5799}/_{0{,}8 \cdot 90 \cdot 270} = 2{,}190324074$$

$$\sigma_{m,d,2} = {}^{6 \cdot M_{d,2}}/_{b_{col} \cdot {h_{col}}^2} = {}^{6 \cdot 17{,}128125}/_{90 \cdot 270^2} = 15{,}66358025$$

Kontroll

$$f_{m,d,2} = {}^{k_h \cdot f_{m,k} \cdot k_{mod,2}}/_{\gamma_M} = {}^{1{,}05 \cdot 30 \cdot 0{,}9}/_{1{,}25} = 22{,}68$$

$$f_{c,0,d,2} = {}^{f_{c,0,k} \cdot k_{mod,2}}/_{\gamma_M} = {}^{24{,}5 \cdot 0{,}9}/_{1{,}25} = 17{,}64$$

$${}^{\sigma_{m,d,2}}/_{f_{m,d,2}} + \left({}^{\sigma_{c,0,d,2}}/_{f_{c,0,d,2}}\right)^2 = {}^{15{,}66358025}/_{22{,}68} + \left({}^{2{,}190324074}/_{17{,}64}\right)^2 = 0{,}70605175$$

Stabilitetetskontroll för samtidig böjning och tryck

$$\sigma_{c,0,d,2} = {F_{v,2}}/{k_r \cdot b_{col} \cdot h_{col}} = {42{,}5799}/{0{,}8 \cdot 90 \cdot 270} = 2{,}190324074$$

$$\sigma_{m,d,2} = {6 \cdot M_{d,2}}/{b_{col} \cdot {h_{col}}^2} = {6 \cdot 17{,}128125}/{90 \cdot 270^2} = 15{,}66358025$$

Kring y-axeln (utknäckning i z-riktning)

Knäcklängd: $l_{0,y} = 2{,}25 \cdot 3 = 6{,}75\ m$

Kritisk Eulerspänning:

$$\sigma_{cr,y} = {\pi^2 \cdot E_{0,05} \cdot I_y}/{b_{col} \cdot h_{col} \cdot {l_{0,y}}^2} = {\pi^2 \cdot 10800 \cdot \frac{90 \cdot 270^3}{12}}/{90 \cdot 270 \cdot 6570^2}$$
$$= 14{,}197824\ MPa$$

Relativit slankhetstal: $\lambda_{rel,y} = \sqrt{{f_{c,0,k}}/{\sigma_{cr,y}}} = \sqrt{{24{,}5}/{14{,}197824}} = 1{,}313627247$

Faktor k:

$$k_y = {1}/{2}\left[1 + \beta_c \cdot \left(\lambda_{rel,y} - 0{,}3\right) + {\lambda_{rel,y}}^2\right]$$
$$= {1}/{2}\left[1 + 0{,}1 \cdot (1{,}313627247 - 0{,}3) + 1{,}313627247^2\right] = 1{,}413489635$$

Reduktionsfaktor vid knäckning

$$k_{c,y} = {1}/{k_y + \sqrt{{k_y}^2 - {\lambda_{rel,y}}^2}} = {1}/{1{,}413489635 + \sqrt{1{,}413489635^2 - 1{,}313627247^2}}$$
$$= 0{,}516702875$$

Kontroll

$${\sigma_{c,0,d,2}}/{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d,2}} + {\sigma_{m,d,2}}/{f_{m,d,2}} = {2{,}190324074}/{0{,}516702875 \cdot 17{,}64} +$$
$${15{,}66358025}/{22{,}68} = 0{,}930942431 < 1\ OK$$

BILAGA 2: FALL 2 BETONG KONSTRUKTION BERÄKNINGAR

Balken är av Betong, hållfasthetsklass C8/10

Dragarmeringen B500BT

Säkerhetsklass 3 γ_d = 1

Klimatklass XC2

Partialkoefficient för egen last γ_g = 1,2

Partialkoefficient för snölast γ_s = 1,5

cc-avstånd för primärbalkar (m) = 7

$$\varepsilon_{sy} = {f_{yd}}/{E_s} = {435\ MPa}/{200\ GPa} = 0{,}002175$$

Dimensionerande last i brottgränstillstånd

$$q_{Ed} = \gamma_d \cdot 1.2 \cdot G_k + \gamma_d \cdot 1{,}5 \cdot Q_k = 1 \cdot 1.2 \cdot 4{,}5 + 1 \cdot 1{,}5 \cdot 7 = 12{,}6$$

Yttre dimensionerande moment mitt i balken

$$M_{Ed} = {q_{Ed} \cdot L^2}/{8} = {12{,}6 \cdot 5^2}/{8} = 39{,}375\ kNm$$

$$\varepsilon_s \geq \varepsilon_{sy} \Longrightarrow \sigma_s = f_{yd}$$

$$X_{bal} = {\varepsilon_{cu} E_s d}/{f_{yd} + \varepsilon_{cu} E_s} = {0{,}0035 \cdot 200GPa \cdot d}/{435MPa + 0{,}0035 \cdot 200GPa} = 0{,}00160661d$$

$$A_{s,bal} = 0{,}8 \cdot X_{bal} \cdot b\, {f_{cd}}/{f_{yd}} = 0{,}8 \cdot 0{,}00160661 \cdot 0{,}1\, {8}/{435} = 2{,}36375E - 06\text{d}$$

$$M_{Ed} = A_s \cdot f_{yd} \cdot (d - 0{,}4x)$$

$$d^2 = 0{,}03832$$

$$d = 0{,}1958\ \text{m}$$

BILAGA 3: FALL 3 STÅL KONSTRUKTION BERÄKNINGAR

Balken är HEA140

Ståltyp är S355

Laster

Egentyngd

Ytlast:

$$G_k = 1{,}0\frac{kN}{m^2}$$

Linjelast:

$$g_k = \frac{5}{2} \cdot 1{,}0 = 2{,}5\frac{kN}{m}$$

Snölast

Ytlast:

$$s = \mu_i C_e C_t s_k = 0{,}8 \cdot 1{,}0 \cdot 1{,}0 \cdot 2{,}0 = 1{,}6\ \frac{kN}{m^2}$$

Linjelast:

$$s = 1{,}6\ \frac{kN}{m^2} \cdot \frac{5}{2} m = 4\frac{kN}{m}$$

Vindlast

$$w_e = q_p(z_e) c_{pe,10} = 0{,}49 \cdot 0{,}2 \approx 0{,}1\frac{kN}{m^2}$$

Linjelast

$$w = (w_e + w_i) \cdot \frac{5}{2} m = (0{,}1 + 0{,}15) \cdot 2{,}5 = 0{,}625\ \frac{kN}{m^2}$$

Lastkombinationer (Balk)

Snölast som huvudlast

$$q_{Ed} = \gamma_d \cdot 1{,}2 \cdot g_k + \gamma_d \cdot 1{,}5 \cdot s + \gamma_d \cdot 1{,}5 \cdot \psi_0 \cdot w$$
$$= 1{,}0 \cdot 1{,}2 \cdot 2{,}5 + 1{,}0 \cdot 1{,}5 \cdot 4 + 1{,}0 \cdot 1{,}5 \cdot 0{,}3 \cdot 0{,}625 = 9{,}28\frac{kN}{m}$$

Moment (Balk)

$$M_{Ed} = \frac{q_{Ed}L^2}{8} = \frac{9{,}225 \cdot 7^2}{8} = 56{,}5kNm$$

$$V_{Ed} = \frac{q_{Ed}L}{2} = \frac{9{,}225 \cdot 7}{8} = 32{,}3\ kN$$

Dimensionering av balk (HEA140, S355)

Kontroll av tvärsnittklass

$$\varepsilon = 0{,}81$$

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon \rightarrow \frac{c}{t} = \frac{133 - 8{,}5 \cdot 2 - 12 \cdot 2}{5{,}5} = 16{,}7 \leq 72\varepsilon = 58{,}3$$

$$liv \rightarrow TK1$$

$$\frac{c}{t} \leq 9\varepsilon \rightarrow \frac{c}{t} = \frac{140 - 5{,}5 - 12 \cdot 2}{2 \cdot 8{,}5} = 6{,}5 \leq 9\varepsilon = 7{,}25$$

$$fläns \rightarrow TK1$$

Momentkapacitet för balk (HEA140, S355)

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl}f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{173 \cdot 10^{-6} \cdot 355 \cdot 10^3}{1{,}0} = 61{,}4kNm$$

Kontroll

$$M_{c,Rd} = 61{,}4kNm > M_{Ed} = 56{,}5\ kNm \rightarrow OK!$$

Tvärsnittkapacitet för balk (HEA140, S355)

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\gamma_{M0\sqrt{3}}} = \frac{1012{,}75 \cdot 10^{-6} \cdot 355 \cdot 10^3}{1{,}0 \cdot \sqrt{3}} = 207kN$$

Där $A_v = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2_r)t_f = 3142 - 2 \cdot 140 \cdot 8{,}5 + (5{,}5 + 2 \cdot 12) \cdot 8{,}5 = 1012{,}75\ mm^2$

Kontroll

$$V_{pl,Rd} = 207kN > V_{Ed} = 32{,}3\ kN \rightarrow OK!$$

Tryckkraftkapacitet för pelare VKR 80x80x6,3

$$L_{cr} = \beta L = 1{,}0 \cdot 3{,}0 = 3{,}0\ m$$

$$i = \sqrt{\left(\frac{I}{A}\right)} = \sqrt{\left(\frac{1{,}62 \cdot 10^6}{1810}\right)} = 29{,}91\ mm \approx 0{,}03\ m$$

$$\lambda = \frac{L_{cr}}{i\pi} \cdot \sqrt{\left(\frac{fy}{E}\right)} = \frac{3}{0{,}03\pi} \cdot \sqrt{\left(\frac{355}{210000}\right)} = 1{,}309$$

$$\phi = 0{,}5(1 + \alpha(\lambda - 0{,}2) + \lambda^2) = 0{,}5(1 + 0{,}21(1{,}309 - 0{,}2) + 1{,}309^2) = 1{,}473$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{(\phi^2 - \lambda^2)}} = \frac{1}{1{,}473 + \sqrt{(1{,}473^2 - 1{,}309^2)}} = 0{,}466$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot f_y \cdot A}{\gamma_{M1}} = \frac{0{,}446 \cdot 355 \cdot 10^3 \cdot 1810 \cdot 10^{-6}}{1{,}0} \approx 300\ kN$$

Kontroll

$$N_{b,Rd} = 300\ kN > N_{Ed} = 32{,}3\ kN \rightarrow OK!$$

Vind på pelare:

$$\frac{h}{d} = \frac{3}{5} = 0{,}6$$

$$e = \min \quad (b = 7m;\ 2h = 6m) \rightarrow e = 6m > d$$

$$\frac{e}{5} = \frac{6}{5} = 1{,}2m$$

Vindlast på pelare från zon D:

$$w = (w_e + w_i) \cdot \frac{7}{2} m = (0{,}49 \cdot 0{,}76 + 0{,}49 \cdot 0{,}2) \cdot 3{,}5 = 1{,}65 \frac{kN}{m}$$

Vindlast på pelare från zon (A och B):

$$w_e = q_p(z_e) c_{pe,10} = 0{,}49 \cdot \left(\frac{0{,}8 + 1{,}2}{2}\right) \cdot \frac{5}{2} \approx 1{,}225 \frac{kN}{m}$$

$$q_{Ed} = \gamma_d \cdot 1{,}5 \cdot w = 1{,}0 \cdot 1{,}5 \cdot 1{,}65 = 2{,}5\ \frac{kN}{m}$$

Momentkapacitet för pelare VKR 80x80x6,3

$$M_{Ed} = \frac{q_{Ed} L^2}{8} = \frac{2{,}5 \cdot 3^2}{8} = 2{,}82 kNm$$

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{49{,}7 \cdot 10^{-6} \cdot 355 \cdot 10^3}{1{,}0} = 17{,}65 kNm$$

Kontroll

$$M_{c,Rd} = 17{,}65kNm > M_{Ed} = 2{,}82\ kNm \rightarrow OK!$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\gamma_{M0\sqrt{3}}} = \frac{905 \cdot 10^{-6} \cdot 355 \cdot 10^3}{1{,}0 \cdot \sqrt{3}} = 185{,}5kN$$

Där $b = h$

$$A_v = \frac{Ah}{b+h} = \frac{Ah}{2h} = \frac{A}{2} = \frac{1810 \cdot 10^{-6}}{2} = 905 \cdot 10^{-6}m^2$$

Kontroll

$$V_{pl,Rd} = 185{,}5kN > V_{Ed} = \frac{qL}{2} = \frac{2{,}5 \cdot 3}{2} = 3{,}75\ kN \rightarrow OK!$$

Mälardalens universitet

Box 883, 721 23 Västerås **Tfn:** 021-10 13 00
Box 325, 631 05 Eskilstuna **Tfn:** 016-15 36 00
E-post: info@mdu.se **Webb:** www.mdu.se