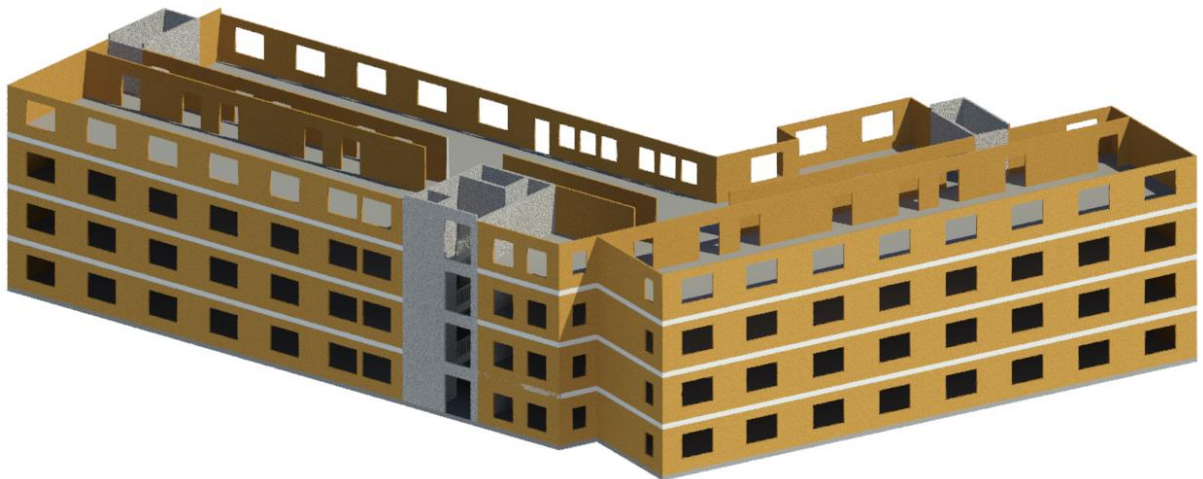


Hybridkonstruktioner i detaljplanelagt område



Joakim Östberg

Avdelningen för Konstruktionsteknik

Lunds Tekniska Högskola

Lunds Universitet, 2020

Avdelningen för Konstruktionsteknik
Lunds Tekniska Högskola
Box 118
221 00 LUND

Department of Structural Engineering
Lund Institute of Technology
Box 118
S-221 00 LUND
Sweden

Hybridkonstruktioner i detaljplanelagt område

Hybrid structures within detail planned area

Joakim Östberg

2020

Rapport TVBK-20/5278
ISRN: LUTVDG/TVBK-20/5278
ISSN 0349-4969

Examensarbete
Handledare: Docent Eva Frühwald Hansson
Juli 2020

Förord

Detta examensarbete var det avslutande momentet i civilingenjörsutbildningen Väg och Vatten på Lunds Tekniska Högskola och genomfördes våren 2020. Examinator var Docent Miklos Molnar på avdelningen för konstruktionsteknik.

Stort tack till mina handledare Docent Eva Frühwald Hansson, avdelningsföreståndare på avdelningen för konstruktionsteknik och Sara Thor, specialist på Skanska Teknik i Stockholm. Eran hjälp och vägledning var till stor hjälp genom arbetet.

Jag vill även tacka till min familj, min underbara fru Tove och min vän Peter för stödet genom studierna. Till sist, en hälsning till min lille son Ivar, som föddes den 23:e april denna vår.

Lund 2020

Joakim Östberg

Sammanfattning

Det är nödvändigt för alla branscher att arbeta aktivt för att minimera sin påverkan på klimatet, inte minst byggbranschen som står för en betydande del av Sveriges totala utsläpp. Utveckling för att framställa betong och stål med mer miljövänliga processer pågår, men för att uppnå resultat i tid och en långsiktig hållbarhet krävs det att vi utvecklar metoder för att använda de förnybara resurser som redan finns tillgängliga. Massiva, limmade träelement som utgör balkar, pelare och skivor är alternativ till bärande konstruktioner som har möjlighet att ersätta stål och betong. Att bygga bärande konstruktioner med enbart träelement har dock begränsningar eftersom det ofta ger grövre konstruktioner med kortare spännvidder vilket bland annat kan leda till sämre utnyttjande av byggrätten. I detaljplanelagt område, med begränsad bygghöjd och fasta yttermått, kan våningsantal och utnyttjande av byggnadens bruttoarea vara avgörande för projektets ekonomi och därigenom möjlighet att genomföras. För att möjliggöra användandet av trä i fler typer av projekt måste man hitta lösningar där varje material utnyttjas på bästa sätt. Genom att bygga hybridkonstruktioner där trä används tillsammans med andra miljömedvetna materialval är det möjligt att sänka klimatavtrycket medan den uthyrnings-/försäljningsbara arean blir större än för en stomme i enbart trä. Samverkansbjälklag i trä och betong är ett exempel på en lösning som ger bjälklaget större spännvidd vilket möjliggör en mer effektiv planlösning. Flera projekt med hybridkonstruktioner har tidigare byggts och detta arbete, som undersöker möjligheterna att bygga ett särskilt boende för äldre inom detaljplanelagt område, visar att det finns stora potential att bygga klimatsmarta byggnader med hjälp av hybridlösningar.

Nyckelord: Hybridstomme, Klimatdeklaration, Korslimmat trä, Samverkansbjälklag

Abstract

It is necessary for all industries to work actively to minimize their impact on the climate, including the construction industry, which accounts for a significant part of Sweden's total CO₂-emissions. Development to produce concrete and steel with more environmentally friendly processes is ongoing, but to lower emissions immediately and achieve long-term sustainability, we need to develop methods for using the renewable resources that are already available. Glued wood elements that make up beams, pillars and slabs are alternatives to load-bearing structures that can replace steel and concrete. But using wood as load bearing structure has its limitations, shorter span of slabs and bulkier structures can lead to poorly utilized floor plans. In areas where regulations limit the height and exterior dimensions of the building, the number of floors and utilization of the building's area can be a problem for the project's finances and feasibility. To enable the use of wood in multiple types of projects, solutions must be found where each material can be used in its best way. By building hybrid structures where wood is used in combination with other conscious material choices, it is possible to lower the climate footprint while the lettable area becomes higher than for a wood-only structure. Wood and concrete composite slabs are an example of a solution that gives the slab a greater span, enabling a solution with a more efficient floor plan. Several projects with hybrid structures have been built and this report, exploring the possibilities of building a special housing for the elderly a within regulated area, shows that there is great potential to build climate-smart buildings with hybrid solutions.

Keywords: Hybrid structure, Environmental Product Declaration, Cross laminated wood, Composite slabs

Förklaringar

CO₂e

Koldioxid, CO₂, är den vanligast förekommande växthusgasen, dvs gas i atmosfären som bidrar till växthuseffekten. Det finns flera olika, mer eller mindre vanligt förekommande, gaser som bidrar olika mycket till växthuseffekten, dessa gasers påverkan räknas vanligtvis om till CO₂e, koldioxidekvivalenter. Med koldioxidekvivalenter kan exempelvis påverkan från en tillverkningsprocess som släpper ut flera olika typer av växthusgaser summeras till ett värde som kan jämföras med andra processer.

Hybridkonstruktion

Definitionen för en hybridkonstruktion kan variera. Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH) är en organisation som ansvarar för officiella listor över världens högsta byggnader. CTBUH har regler för hur byggnader ska mätas och klassificeras, enligt deras definition delas byggnader in beroende på stommens material, huvudsakligen trä, stål, platsgjuten betong och prefabricerad betong. Byggnader med fler än ett material delas in i blandade konstruktioner och komposita konstruktioner. Blandade konstruktioner är stommar som exempelvis har de fyra första våningar i platsgjuten betong och sedan ett par våningar med trästomme ovanpå det. Komposit stomme är stomme där flera material samverkar på vardera plan, exempelvis träbjälklag i kombination med ett stålskelett och en stabiliserande kärna i betong. I detta arbete används definitionen för komposita stommar för hybridkonstruktioner och syftar i regel till träbaserade-hybridkonstruktioner, dvs ett av de bärande materialen är trä.

Innehåll

1	Inledning	3
1.1	Bakgrund	3
1.2	Övergripande mål och problemställningar	4
1.3	Disposition.....	4
1.4	Avgränsningar	4
2	Teori.....	7
2.1	Trä som stommaterial	7
2.1.1	Exempel på projekt med hybridstommar	8
2.2	Projektering för brandskydd	12
2.3	Projektering för akustik	15
2.4	Klimatdeklaration	16
3	Metod	19
3.1	Projektförutsättningar	19
3.2	Utformning av stomsystem.....	21
3.2.1	Bjälklag	23
3.2.2	Bärande väggar.....	26
3.2.3	Icke bärande väggar	27
3.2.4	Ytterväggar.....	28
3.3	Stomsystem 1: Trästomme	29
3.4	Stomsystem 2: Betongstomme	31
3.5	Stomsystem 3: Hybrid	33
4	Resultat och diskussion.....	35
5	Slutsats	42
6	Vidare studier.....	43
7	Referenser	44
	Bilaga 1: Beräkningar.....	48
	Laster	48
	Egentyngd	48
	Nyttig last.....	49
	Snölast.....	49
	Vindlast	50
	Lastkombinationer	52
	Dimensionskontroller, Stomalternativ 1	53

Dimensionskontroller, Stomalternativ 2.....	57
Dimensionskontroller, Stomalternativ 3.....	62
Bilaga 2: Sammanställning av Materialdata.....	70

1 Inledning

Sommaren 2018 uppmättes den högsta medeltemperaturen i Sverige sedan mätningarna startade år 1860 [1]. Det har fastslagits att den ovanligt höga temperaturen var en direkt följd av att jetströmmarna på norra halvklotet saktats ned när temperaturer kring Arktis ökat [2]. Jordens temperatur fortsätter att öka och forskare är överens om orsaken är de växthusgaser vi människor släpper ut i atmosfären. Sveriges klimatmål säger att landets nettoutsläpp ska vara noll senast år 2045 och därefter vara negativa [3]. Enligt en sammanställning av data från SCB som Boverket har gjort stod bygg- och fastighetssektorn år 2017 för utsläpp av 12,2 miljoner kgCO₂e, vilket motsvarade 19 procent av Sveriges totala utsläpp av växthusgaser det året. Dessutom bidrar Sverige till ökade utsläpp utomlands genom att importera material, inklusive import stod Sveriges byggverksamhet för 8,8 miljoner kgCO₂e internationellt [4].

För att nå negativa utsläppsnivåer räcker det alltså inte att minska användandet av fossila bränslen. Det överskott av CO₂ som släppts fri vid förbränning av fossila bränslen måste fångas in igen. För detta finns olika utvecklingsprojekt där CO₂ fångas in med hjälp av kemiska processer, antingen direkt ur luften, eller vid förbränningen hos den industri som använder fossila bränslen. Tekniken används ännu inte på stor skala och det råder fortfarande många oklarheter kring hur infångad CO₂ ska slutförvaras och hur miljöfarlig denna restprodukt är.

Ett naturligt sätt att fånga in CO₂ är att plantera träd. Träd använder energi från solen och CO₂ i luften för att tillverka sin biomassa, biogent bundet kol. Trä är en förnybar resurs och i alla europeiska länder ökar arealen skogsmark och volymen trä för varje år [5]. Träets egenskaper gör det till ett utmärkt material att bygga med och Sverige har en lång tradition att bygga hus i trä, framförallt enbostadshus. Vid byggnation av större hus har betong- och stålstommar länge varit förstahandsalternativet då krav på, framför allt, brandsäkerhet ej kunnat tillgodoses av större trästommar. Stora stadsbränder i historien har till och med gjort att höga hus i trä ej varit tillåtna i flera länder. Problemet med stål och betong är att tillverkningsprocessen är mycket energikrävande och släpper ut stora mängder CO₂. Efterfrågan att bygga med förnybara och hållbara material har lett till att intresset för byggnation i trä återigen ökat. Massiva trärelement så som balkar och pelare i limträ eller korslimmade träskivor har visat sig ha goda egenskaper vid brand vilket har öppnat upp möjligheten att återigen bygga höga trästommar fast på ett brandsäkert sätt. Sedan byggtekniken och lagstiftningar har kommit ikapp byggs idag flera projekt i enbart trä. Två exempel är Växjö kommunhus och Skellefteås kulturhus, i Skellefteå ingår ett hotell i 20 våningar.

1.1 Bakgrund

Trots tekniska framsteg och träets goda egenskaper är det inte helt okomplicerat att bygga stommar i trä. Trä har god hållfasthet, både böjning och tryck parallellt fibrerna, men låg egenvikt gör att träet betar sig annorlunda än betong och stål. Krav gällande ljud och vibrationer kan vara utmanande att tillgodose. Åtgärder i form av påbyggnader, uppfyllnad av tunga massor eller inklädnad av gips kan vara nödvändiga vilket ofta innebär att väggar och bjälklag har större dimensioner än motsvarande stål/betong-lösningar vilket får byggnaden att ta mer plats. I områden där byggrättens fotavtryck och höjd är strikt styrd av detaljplan kan detta innebära att en trästomme får färre våningsplan eller mindre boarea. Då areapriset för bostäder är mycket högt inom städer finns starka incitament för byggherrar att inte välja en trästomme för att maximera intäkterna. Men finns det fördelar att istället bygga trähybridstomme? Vad innebär

en trähybrid och vad ger det påverkan av klimatet jämför och användbar area jämfört med mer konventionella lösningar?

1.2 Övergripande mål och problemställningar

Detta arbete utgick från en planlösning för ett äldreboende där intresse, av miljömässiga skäl, funnits att bygga stomme av trä men där en sådan lösning ansågs ta för mycket plats på den begränsade byggrätten. Därför undersöks potentiella möjligheter med en hybridkonstruktion.

Målet med detta examensarbete var att:

- redogöra vad som menas med hybridstomme genom att titta på tidigare genomförda projekt,
- undersöka lämpligheten att använda hybridstomme i ett projekt med begränsad byggrätt,
- diskutera utformning genom att jämföra prestandan, tjocklek och miljöpåverkan av olika konstruktionselement, så som väggar och bjälklag,
- jämföra skillnaden i brukbar area och klimatavtryck genom att designa tre alternativa stomsystem för äldreboendet (trä, betong och en hybrid).

Syftet med rapporten är att den på ett inledande plan ska kunna identifiera potentiella fördelar med träbaserade hybridkonstruktioner och fungera som ett underlag för vidare projektering i projekt där sådan lösning är av intresse. Målet är även öka kunskaperna i hur utformningen av bärande konstruktioner samt medvetna materialval styr en byggnads klimatpåverkan.

1.3 Disposition

- Kapitel 2 – Teori, förklarar kortfattat fördelar och nackdelar med att använda trä som stommateriell, utforskar ämnet hybridkonstruktioner samt brand, akustik och klimatdeklarationer
- Kapitel 3 – Metod för genomförande av arbete, projektförutsättningar och genomförande
- Kapitel 4 – Resultat och diskussion
- Kapitel 5 – Slutsats
- Kapitel 6 – Vidare studier

1.4 Avgränsningar

Inom ramarna för ämnet hybridkonstruktioner ryms flertalet fördjupningar inom exempelvis akustik, samverkan i kompositelement, stabilitet, FEM-modellering, brand, vibrationer och mycket mer. Som nämndes i målformulering var syftet med detta arbete att på ett inledande plan identifiera potentiella fördelar med användandet av hybridkonstruktioner. Tanken var att jämförelser av klimatavtryck från byggdelar och stommar skulle motsvara den detaljeringsgrad som är nödvändigt för att fatta informerade beslut i ett tidigt skede av en projekteringsprocess. Detta innebar att ljud- och brandegenskaper samt u-värde hämtades från uträkningar i handböcker och från leverantörer. Lastnedräkning, dimensionskontroll av bärande element samt kontroll av stabilitet gjordes i vissa sektioner och tvärsnitt för att ge en rättvis uppfattning av mängden material i den bärande stommen samt verifiera systemets funktion. Detaljer som exempelvis raskopplingar, dragband och infästningar medräknades inte då den detaljeringsgraden hade varit för tidskrävande och dessa poster inte ansågs utgöra en betydande skillnad i utsläpp mellan de olika systemen. Det var viktigt att arbetet hölls till en

detaljeringsnivå som bidrag med relevant information och kunskap, i detta fall på en systemnivå. Det som projekterades var bjälklag, ytterväggar, bärande väggar samt avskiljande väggar som utgjorde brandcellsgräns eller ljudbarriär. Detta ansågs vara en rimlig nivå för att kunna dra slutsatser i skillnader mellan stomalternativen.

2 Teori

Eftersom olikheter i materialval inte enbart påverkar bärigheten i systemet utan även andra egenskaper så som stabilitet, ljud och brand definierades funktionskrav för byggnaden. Flera av dessa är tillämpningar av BBR [6] och EKS [7] men förtydliganden gjordes kring hur dessa uppfylldes samt ett antal antaganden och förenklingar. Syftet var inte att ta hänsyn till alla krav utan de som nämnvärt påverkade byggnadens utförande. Exempelvis räckte det inte med att byta ut en läggenhetsavskiljande betongvägg med en KL-trävägg med motsvarande bärande förmåga då även krav för brandsäkerhet och akustik måste uppfyllas. På så vis kunde hybridstommar jämföras som alternativ till mer konventionella lösningar. Detta kapitel inleder med att undersöka hur trä kan användas i olika typer av hybridkonstruktioner och beskriver sedan förutsättningarna för utformning av stommar med hänsyn till brand och ljud med fokus på boende för äldre i fyra våningar. Sist beskrivs livscykelanalys och klimatdeklarationer.

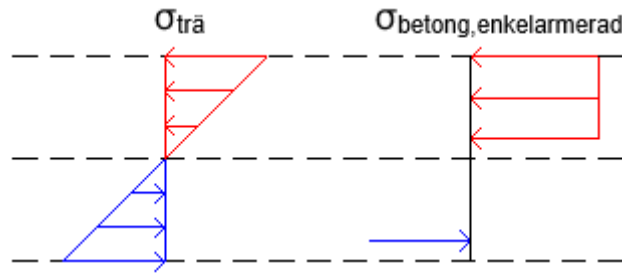
2.1 Trä som stommaterial

Trä som byggmaterial har flera fördelar, det är ett förnybart, formbart och starkt i förhållande till sin egenvikt. Genom att limma lager av brädor på varandra, (s.k. limträ) går det att tillverka massiva balkar, pelare, bågar och ramar till önskade dimensioner och former. Lager av brädor med 90° vridning mellan varje lager utgör skivor, så kallat korslimmat trä, som kan användas till väggar och bjälklag i bestämda mått med utskurna öppningar för fönster och dörrar. Eftersom trä är ett levande material kan det uppstå stora skillnader i egenskaper mellan olika brädor, genom att limma flera blir det en systemeffekt och variationen blir mindre i massiva träelement vilket ger en lägre osäkerhetsfaktor vid beräkningar [8]. Att ett material är starkt i förhållande till sin egenvikt kan vara en fördel vid större konstruktioner då egentyngheten är en stor del av lasten. Det finns olika sätt att illustrera detta, exempelvis är höjden på en rektangulär balk som bär upp sin egenvikt beroende av förhållandet mellan materialets styrka och densitet, f/ρ medan nedböjningen beror på förhållandet mellan styvhet och densitet E/ρ . Att trä är starkt kan jämföras med andra vanliga material så som betong och stål. Inom ett och samma material finns olika hållfasthetsklasser, hållfastheten är också beroende av belastningssätt men i Tabell 1 jämförs ungefärliga värden för de olika materialen.

Tabell 1 ungefärliga värden på materialsen styrka

Material	Hållfasthet f [MPa]	Elasticitets- modul E [GPa]	Densitet [kg/m ³]	f/ρ [kNm/kg]	E/ρ [MNm/kg]
Trä	25	10	430	58	23
Betong	30	30	2400	13	13
Stål	275	210	7800	35	27

Betong har exempelvis försumbar hållfasthet i drag och måste i normalfallet armeras med hjälp av stål medan trä kan användas i både tryck och drag, en idealiserad spänningsfördelning för en rektangulär balk illustrerar skillnaden i Figur 1.

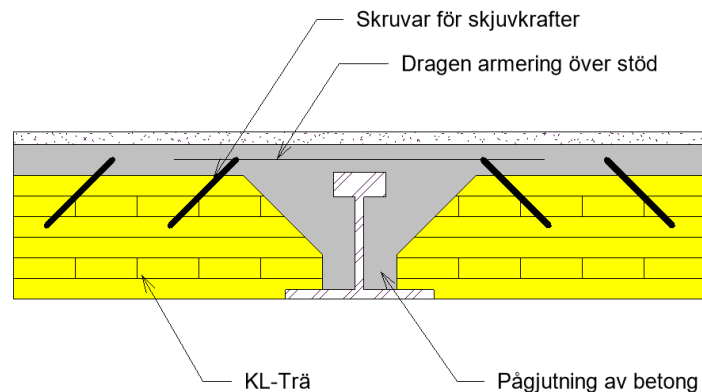


Figur 1. Idealiserad spänningsfördelning. Röd = tryck, Blå = Drag.

Den lätta egenvikten kan dock vara ett problem. Vid dimensionering av horisontalstabilisering kan vara svårt att motstå stjälpande krafter med enbart egentyngd. Lägre massa samt styvhet gör också att trä lättare sätts i svängning. För höga hus kan det betyda en obehaglig acceleration av vindlaster och för avskiljande konstruktioner en sämre ljudisoleringsförmåga. Vid brand brinner trä sakta, ca 0,5-1,0 mm/min [8], och har låg värmeledningsförmåga. Materialet innanför den förkolnande ytan behåller därför stor del av sina egenskaper och konstruktionen behåller sin bärande förmåga en längre tid. Trä räknas dock som bränsle och bidrar därmed till brand och kan behöva täckas eller behandlas beroende på byggnadens byggnadsklass, se kapitel 2.2. För att klara akustik och brand måste träkonstruktioner ofta kompletteras med andra material, exempelvis en pågjutning av betong, uppfyllnad av tunga massor eller påbyggnad av gips och avskiljande konstruktioner separeras med en invändig luftspalt. Allt detta sammantaget leder till att stommar av trä får större dimensioner och tar mer plats än en konventionell betongkonstruktion.

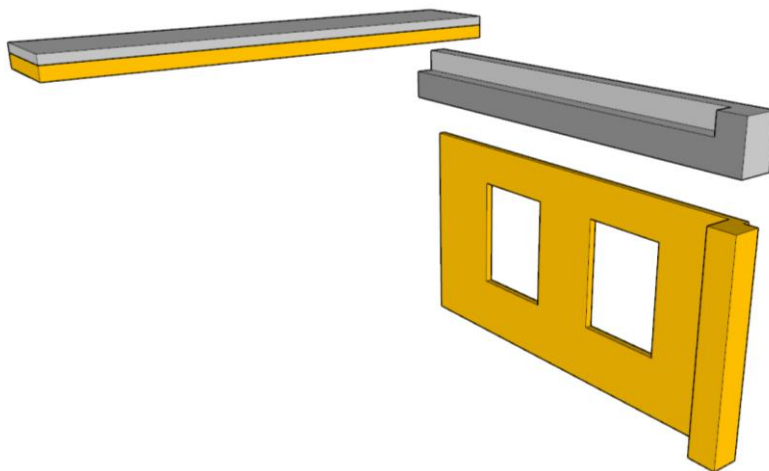
2.1.1 Exempel på projekt med hybridstommar

Så gott som alla stommar fungerar genom samverkan av flera än ett material. Ett vanligt exempel är en bärande konstruktion av pelare och balkar i stål med bjälklag och stabiliserande kärna av betong, detta är alltså i ordets bemärkelse en hybridkonstruktion. I detta arbete syftar hybridstommar på de lösningar där delar av bärverket byggs upp av KL-trä eller limträ, alltså träbaserade hybridkonstruktioner. Tanken är att trä ska användas där det gör bäst nytta. Förslag på sådan konstruktion finns i en rapport publicerad av AISC (American Institute of Steel Construction) 2017 där ett flerbostadshus, byggt i betong, jämfördes med samma planlösning och våningsantal konstruerat som en trä-stål hybrid [9]. I det nya förslaget användes stålpelare och stålbalkar tillsammans med massiva KL-träskivor som bjälklag, Figur 2. För att förbättra brand- och akustikegenskaperna gjordes en pågjutning av betong. För att utnyttja betongens tryckhållfasthet designades träskruvar för att överföra skjuvkrafter mellan trä och betong. På så vis är det möjligt att få materialen i bjälklaget att fungera som en komposit enhet (samverkanskonstruktion). För att minimera nedböjningen armerades betongen över stöd för att få draghållfasthet i bjälklagets överkant.



Figur 2. Principlösning i en hybridkonstruktion där stål, trä och betong används.

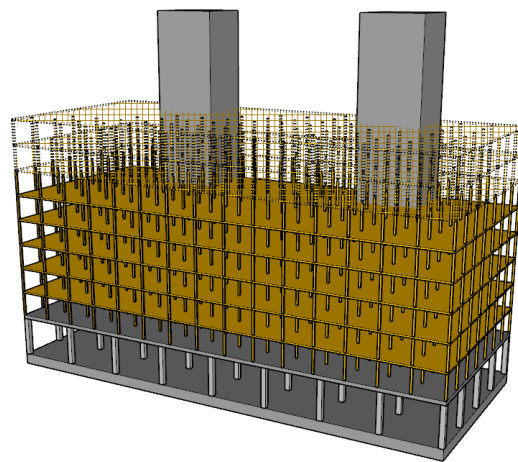
HoHo i Wien är ett exempel på en hybridkonstruktion där målet var att bygga miljövänligare genom att använda trä, vilket utgör ca 75% av stommens material [10]. Byggnaden är 84 m hög och inrymmer 24 våningar med bland annat restauranger, hotell, kontor och lägenheter. Den stabiliserande kärnan består av betong och bjälklagen är trä/betong-samverkansbjälklag med dimensionerna 2,4 m × 7 m. Genom att bygga bjälklag där trä och betongen samverkar utnyttjas bägge materialens egenskaper, trä i drag och betong i tryck. Betongen ger bjälklagen extra styvhet och massa vilket är fördelaktigt för stabilitet, akustik och betongen skyddar dessutom mot brand. Fasaderna är uppbyggda av pelare i trä som tar vertikalkrafter samt träskivor i KL-trä som ger extra stabilitet. På träpelarna ligger betongbalkar som används till upplag åt bjälklagen. Denna lösning låter vertikala krafter föras vidare genom betongen och undviker krafter vinkelrätt KL-trä i bjälklagen som annars kan bli ett problem vid höga byggnader. En av framgångsfaktorerna för projektet anses ha varit de begränsade antalet variationer av prefabricerade element som bygger upp hela stommen, se Figur 3.



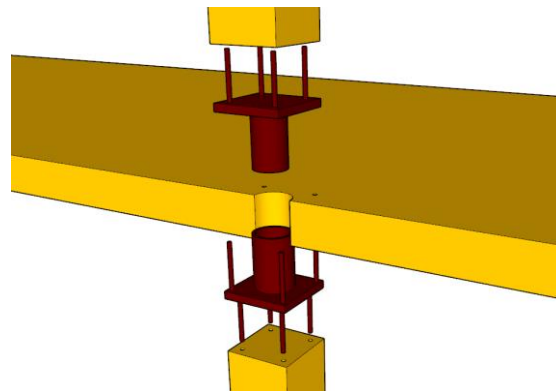
Figur 3. Princip för stommen i HoHo

En annan trä/betong hybrid är Brock Commons i Vancouver. Brock Commons är ett studentbonde med plats för 404 studenter. Enligt information från University of British Columbia undveks 679 ton av CO_2e genom att använda trä i stommen och 1753 ton CO_2 finns lagrat biogent bundet i trämassan [11]. Byggnaden är 18 våningar hög, den första våningen, som innehåller större lokaler för studier och samvaro, är byggd av betong och resterande är

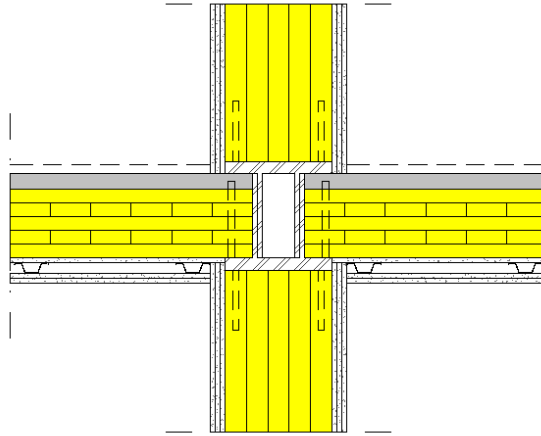
byggda i massivt trä. Hisschakt, gjutna i betong, sträcker sig till översta våningen och ger byggnaden horisontell stabilitet Figur 4. Bjälklagen är byggda som ett pelar-däck-system av KL-träplattor som stöds direkt av limträpelarna, de vilar alltså inte på balkar. För att undvika tryck vinkelrätt mot fibrerna användes genomgående kopplingar av stål för att föra tryckkrafterna från pelare till pelare, se Figur 5. Skarvarna mellan bjälklagselementen försköts och skruvades ihop med plywoodremsor för att bilda en homogen samverkande platta. Ovanpå bjälklaget gjöts 40 mm betong. Dragband av stål bultades fast ovanpå bjälklaget och förankrades i hisschakten för att överföra horisontella laster. Centrumavståndet mellan pelare varierade något men var ca 4 m i byggnadens längdriktning och 2,85 m parallellt med gavlarna. Pelarna hade varierande dimensioner från 265 mm × 215 mm till 265 mm × 265 mm. Pelarna byggdes in i de lägenhetsavskiljande väggarna. För att skydda träet mot brand och för att klara ljud och vibrationskrav täcktes allt trä med gips, Figur 6.



Figur 4. Pelardäcksystem med stabiliserande kärna av betong

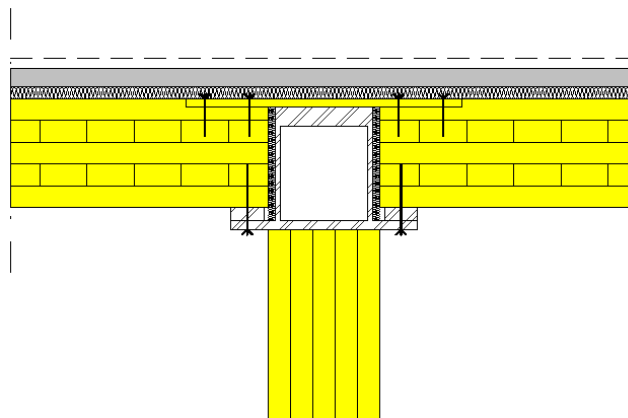


Figur 5. Princip för koppling av bjälklag för att förhindra genomstansning och tryck vinkelrätt fibrerna.



Figur 6. Inbyggnad av KL-trä

Ett svenskt exempel på en trä/stål-hybrid finns i Göteborg där Akademiska hus har låtit bygga kontorshuset, "A Working Lab", i anslutning till Chalmers campusområde, Johanneberg. Projektet var ett innovationsprojekt med ambitionerna att utmana branschen i vad som är möjligt att bygga med trä samt bidra med kunskap om hur den färdiga byggnaden presterade efter färdigställandet [12]. Stomsystemet är ett pelar/balk-system där massivt KL-trä ersätter de mer konventionella betongelementen i bjälklagen. Balkarna är tillverkade i stål för att hålla höjden på tvärsnittet till ett minimum, pelarna är byggda av limträ. Den begränsade byggnadshöjden i detaljplanen ledde till att bjälklagens höjd inte markant fick överstiga den för konventionella kontorsbyggnader, därför utvärderades flera olika typer av 75 mm tjocka överbyggnader på 230 mm KL-bjälklag och fyra olika överbyggnader användes i byggnaden. Mätningar i färdigställd byggnad har visat att bjälklagen klarade ljudklass B för kontor och vissa bjälklag klarade ljudklass C för bostäder [12], se 2.3. Trapphus och hisschakt i betong stabiliserar byggnaden, för att överföra horisontella krafter sammanfogades KL-trä över stöden och förankrades till stålbalkarna, Figur 7.



Figur 7. Princip för skivverkan i bjälklag, "A Working Lab", Göteborg.

2.2 Projektering för brandskydd

Eftersom brandrisk länge har varit en anledning till att stommar av trä inte varit aktuella för större byggnader är det viktigt att i detta avsnitt klargöra förutsättningarna för att projektet skulle uppfylla brandsäkerhetskraven, framförallt då trä ingår i stomsystemen. Förutsättningarna utgår främst från en byggnad i fyra våningar, avsedd för ett äldreboende. Krav på brandsäkerhet i en byggnad fokuserar främst på personskydd och regleras av PBL (Plan- och bygglagen) [13] och förtydligas i PBF (Plan- och byggförordningen) [14]. I PBF finns fem säkerhetsaspekter som ska beaktas för att en byggnad anses ha god säkerhet i händelse av brand, dessa är:

- Spridning av brand och rök inom byggnad
- Spridning av brand och rök mellan byggnader
- Utrymning för personer som befinner sig inom byggnaden
- Säkerhet för räddningspersonal som ska evakuera människor eller släcka brand
- Byggnadens bärighet

Hur de första fyra av dessa krav ska uppfyllas förtydligas i BBR kapitel 5 [6] och det femte kravet, som berör byggnadens bärande förmåga regleras i Eurocodes och EKS kapitel 1.1.2 [7]. För att avgöra vilka regler som gäller för brandskydd bestäms i första steget av projekteringen byggnadens verksamhetsklass (Vk). En byggnad kan innehålla en eller flera olika verksamhetsklasser och dessa beror på vad lokalerna inom byggnaden ska användas till. Verksamhetsklass 5, vårdmiljöer med mera, omfattar enligt BBR 5:215 [6] utrymmen med personer som har begränsad eller inga förutsättningar att sätta sig själva i säkerhet. Verksamhetsklass 5 är indelad i 5A, 5B, 5C, 5D. Särskild boendeform för äldre hamnar inom kategori 5B, se Tabell 2.

Tabell 2. Utdrag ur tabell 4.1 i Brandskyddshandboken #6 [15], beskrivning av verksamhetsklasser

Verksamhetsklass	Personer har kännedom om byggnaden och dess utrymningsmöjligheter	Personer kan till största delen utrymma på egen hand	Personerna kan förväntas vara vakna	Exempel på verksamhet
Vk5B	-	Nej	Nej	Särskilt boende för personer med vårdbehov

Utifrån skyddsbehovet bestäms Byggnadsklass (Br); byggnadsklass bestäms i en skala Br0-Br3 där Br0 har störst skyddsbehov. Skyddsbehovet bestäms med hänsyn till konsekvenserna av en eventuell brand i byggnaden. För att avgöra byggnadsklass undersöks byggnadens komplexitet, våningsantal osv, samt vilka verksamhetsklasser som förekommer i byggnaden. Enligt BBR 5:22 [6] ska byggnader med tre eller fler våningar samt byggnader i Vk5B ingå i Br1.

Hur byggnadsmaterial får användas, baserat på hur mycket det bidrar till brandspridningen, regleras också i regler för brandskydd. Byggnadsmaterial delas in i underkategorier enligt BBR

5:231 [6], se Tabell 3. Klass A2-E kombineras med tilläggsklasser som beror på rökintensitet och droppande partiklar vid brand, se Tabell 4. Obehandlat KL-trä har exempelvis klassen $D - s2, d0$ [16]. Det är viktigt att notera att material som har en klass sämre än $D - s2, d0$ bör, enligt de allmänna råden, bekläs så att de uppnår $K_210/B - s1, d0$. $K_210/B - s1, d0$ anger beklädnad som under minst 10 minuter förhindrar att materialet det skyddar antänds. Beklädnaden kan exempelvis bestå av skyddande lager av gips, vissa pendlade undertak eller annan brandskyddsbehandling. Råden anger även att byggnader i klass Br1 bör ha ytskikt i tak av brandteknisk klass B-s1,d0 fäst på material av A2-s1,d0 eller på beklädnad av $K_210/B - s1, d0$. På väggar är rådet brandteknisk klass C-s2,d0. Kemiskt brandskyddsbehandlat trä kan uppnå $B - s1, d0$ [15]. Detta var någonting som behöver beaktas vid val av trämaterial i stommen.

Tabell 3 Beskrivning av brandtekniska klasser [17]

Brandteknisk klass	Egenskaper	Exempel
A1	Obrännbar, ingen övertändning	Betong, mineralull
A2	Begränsat brännbar, ingen övertändning	Mineralull, gips med papper
B	Ingen övertändning	Brandhämmande spånskiva
C	Övertändning, något bidrag till brand	Tapet på gips
D	Övertändning, medelstort bidrag till brand	Trävirke
E	Övertändning, stort bidrag till brand	Brandhämmat EPS
F	Odefinierade egenskaper	-

Tabell 4 Tilläggsklasser enligt BBR 5:231

Tilläggsklass	Egenskaper
s1	Byggnadsdelen får avge mycket begränsad mängd med brandgaser
s2	Byggnadsdelen får avge begränsad mängd med brandgaser
s3	Inget krav på begränsad produktion av brandgaser
d0	Brinnande droppar eller partiklar får inte avges från byggnadsdelen
d1	Brinnande droppar eller partiklar får avges i begränsad mängd
d2	Inget krav på begränsning av brinnande droppar och partiklar

Prestandan vid brand, hos olika byggnadsdelar, klassificeras beroende på funktion. En pelare ska exempelvis kunna bära last utan att kollapsa och en vägg som ingår i en brandcell ska skydda mot spridning av värme och gaser. En bärande brandcellsvägg kan exempelvis ha egenskapen REI60 vilket innebär att den klarar krav för bärrighet (R), gastäthet (E) och värmeisolering (I) i 60 minuter enligt BBR 5:231 [6]. Det finns även fler beteckningar som beskriver andra egenskaper hos byggnadsdelar, som exempelvis gastäthet och strålning genom fönster (EW), detta beaktades ej i detta arbete utan det fokuserades främst på bärande element och avskiljande väggar.

Enligt BBR 5:546 [6] bör varje enskilt boende i Vk5B utgöra en egen brandcell samt förses med automatiskt släcksystem. Krav på avskiljande väggar i allmänhet bestäms för Br1 enligt BBR 5:531 [6] till EI60 då brandbelastningen är $f \leq 800 \text{ MJ/m}^2$ för Vk5B. För dimensionering av bärande konstruktioner vid brand bestäms brandsäkerhetsklass enligt EKS [7].

Brandsäkerhetsklassen anger konsekvensen av kollaps för enskild del i bärverket, se Tabell 5. Bärverket i detta projekt omfattas av brandsäkerhetsklass 4, se Tabell 6.

Tabell 5. Brandsäkerhetsklasser enligt EKS 11 tabell C-2

Brandsäkerhetsklass	Risk för personskada vid kollaps av byggnadsdelen
1	Mycket liten
2	Liten
3	Måttlig
4	Stor
5	Mycket stor

Tabell 6. Exempel på brandsäkerhetsklass 4, utdrag ur EKS 11 tabell C-3

Brandsäkerhetsklass	Exempel på byggnadsdelar i en Br1-byggnad
4	<ul style="list-style-type: none"> • Bärverk som tillhör byggnadens huvudsystem och som utgör regelväggar, pelare och balkar i byggnader med högst fyra våningsplan • Bärverk som tillhör byggnadens huvudsystem och som utgör bjälklag och massiva väggar i byggnader med högst åtta våningsplan • Stomstabiliserande bärverksdelar som är nödvändiga för byggnadens totalstabilitet i brandlastfallet i byggnader med högst fyra våningsplan • Balkong eller loftgång med gemensamt bärverk med andra balkonger eller loftgångar

För byggnader i Br1 och bärverk med brandsäkerhetsklass 4 i lokaler med brandbelastning $f \leq 800 \text{ MJ/m}^2$ ska bärande element uppfylla R60, se Tabell 7, dvs bibehålla sin bärande förmåga i 60 minuter vid händelse av brand.

Tabell 7. Brandteknisk klass för Br1-Br3 och Br0 utan utökad skyddsbehov, utdrag ur EKS 11 tabell C-7

Brandsäkerhetsklass	Brandteknisk klass vid belastning f [MJ/m^2]		
	$f \leq 800 \text{ MJ/m}^2$	$f \leq 1600 \text{ MJ/m}^2$	$f > 1600 \text{ MJ/m}^2$
4	R60	R120 (R90*)	R180 (R120*)

*Vid installation av automatisk vattensprinkleranläggning

Kraven för brandskydd lägger enligt BBR [6] stor vikt vid utformningen av byggnaden. Det kan vara antal utrymningsvägar, hur långa utrymningsvägarna är, uppsamlingsplatser. Vid verkligt projekt bör sakkunnig brandkonsult involveras i ett tidigt skede för att se till att byggnaden uppfyller lagar och regler. Det finns även bland annat krav på genomföringar av installationer, dörrar och fönster. Detta kontrollerades inte inom ramarna för detta arbete då arbetet utgick från de preliminära planlösningarna som fanns tillgängliga. Det som beaktades var brandcellsindelning, hållfasthet vid brand och krav på ytskikt eftersom detta gjorde störst påverkan av valet av byggnadsdelar.

2.3 Projektering för akustik

Buller är ett globalt hälsoproblem. Det är allmänt känt att kraftiga ljud kan orsaka hörselskador, men de största riskerna kan finnas i ljud som vi inte ens tänker på. Buller från biltrafik utgör den största bullerkällan i omgivningen och störande ljud från till exempel vägar, tåg eller flygtrafik kan försvåra sömnen. Bakgrundsbullret på ett kontor eller ljud från ett ventilationsdon kan orsaka koncentrationssvårigheter, trötthet och förhöjt blodtryck [18].

Valet av stomsystem påverkas i hög grad av förmågan att uppfylla rådande ljudkrav och därför togs detta i beaktande. För att bestämma vilken prestanda som eftersträvas bestäms ljudklass för den aktuella byggnaden. Ljudklasser för vårdlokaler, undervisningslokaler, dag- och fritidshem, kontor och hotell bestäms enligt svensk standard SS 25268 [19] och finns som klass A, B, C och D. D används enbart där bättre klass ej kan uppfyllas, exempelvis där antikvariska skäl förhindrar ändrande av byggnaden. Ljudklass C motsvarar minimikrav för ljudförhållanden enligt Boverket och är den nivå där mer än 80% av tillfrågade ej upplever sig störda enligt undersökningar. I många fall eftersträvas dock ljudklass B då detta i normalfallet anses vara en god ljudmiljö för alla boende [18]. Ljudklass A används för särskilda verksamheter som kräver mycket högklassig ljudmiljö.

Hur starkt ett ljud tillåts höras från ett utrymme till ett annat beror på ljudklassen, ljudisoleringen delas upp i stegljud och luftljud, se exempel i Tabell 8. Ljudisoleringen i en konstruktion beror på flertalet faktorer, bland annat genomföringar, detaljer vid anslutningar och planlösning. I ett verkligt projekt är det bör en akustikkonsult involveras i ett tidigt skede. Akustikkonsulten kan hjälpa till att avgöra vilken bullernivå som kan förekomma vid byggnadens fasader samt för att bedöma byggnadens akustiska prestanda och hjälpa till att vägleda vid val av detaljlösningar. Att åtgärda bullerproblem i en färdig byggnad är både dyrt och komplicerat och därför bör detta beaktas redan tidigt i projekteringskedet. Syftet med detta projekt var som tidigare nämnt att jämföra olika alternativa stomlösningar för att se om det fanns nytta med att gå vidare med en hybridlösning. Därför undersöktes inte detaljlösningar som knutpunkter, fönster, dörrar och installationer analytiskt utan på en övergripande nivå.

Tabell 8 Utdrag från tabell 7:21a BBR [6]

Typ av utrymme	Ljudskillnad $D_{nT,w}$ mellan utrymmen [dB]		Stegljudsnivå $L_{nT,w}$ mellan utrymmen [dB]	
	B	C	B	C
Mellan bostäder, utan direktförbindelse inom särskild boendeform för äldre	56	52	52	62
Från korridor med dörr till utrymme för sömn, vila eller daglig samvaro	40	40	52	62

I detta projekt tillgodosågs ljudkraven genom att principlösningar för de ingående konstruktionselement för olika stomtyper redovisades, se kapitel 3.2. Om ett stomalternativ skulle väljas för vidare projektering måste akustiken detaljprojekteras, med fördel med hjälp av etablerad programvara. Ljudklass B valdes för samtliga system.

2.4 Klimatdeklaration

Livscykelanalys, LCA, är en metod för att mäta en produkts totala miljöpåverkan under hela dess livslängd, från råvaruutvinning till förädling, frakt, användning och slutligen återvinning. En LCA tar inte enbart hänsyn till global uppvärmning från växthusgaser utan även försurning, påverkan av ozonlagret och användning av ändliga resurser samt miljögifter [20]. Syftet är att ge ett helhetsperspektiv av hur olika material- och produktval påverkar klimatet och kan vara användbar vid flera olika skeden i byggprocessen. Ur ett livscykelperspektiv är det möjligt att påvisa att en produkt som kräver mycket energi vid tillverkningen kan bli bättre ur miljösynpunkt om den är mer effektiv under drifttiden, på så vis undviks suboptimering där utsläpp riskerar att flytta från en fas till en annan. Med LCA kan olika alternativa lösningar vägas mot varandra och klimatförbättrande åtgärder identifieras tidigt i projekteringsfasen. För att underlaget ska vara användbart finnas det standarder som anger hur livscykelanalyser ska genomföras på ett enhetligt sätt, den svenska anpassningen är SS-EN 15978 [21]. En LCA ska delas in i tre olika skeden, A, B och C som sedan delas vidare in i underkategorier, så kallade moduler, se Tabell 9. Det finns även ett skede D som stäcker sig bortom byggnadens livscykel och tar hänsyn till möjligt återanvändande av material. Skede A omfattar uppförandet av en byggnad, A1-A3 redovisas ofta summerat och omfattar från utvinningen av råmaterial tills produkten lämnar fabriken, ”cradle-to-gate”. Modul A4 är klimatpåverkan från transporter mellan fabriken och byggarbetsplatsen, här inräknas även mellanlagring och omlastning mellan olika transportmedel. A5 är klimatpåverkan från byggarbetsplatsen, vilket kan vara materialspill, emballage, lyftkran, maskiner, byggvärme, platskontor osv. B1-B7 omfattar klimatpåverkan från att byggnaden tas i bruk tills den uttjänat sin tekniska livslängd, detta innebär bland annat energi- och vattenanvändning, reparationer och underhåll. C1-C4 är den fas när byggnaden tas ur bruk, ska rivras och materialerna ska tas om hand.

Tabell 9. Skeden och indelning i moduler för livscykelanalys av en byggnad. [20]

Livscykelinformation för byggnad														Övrigt		
Byggprocessen(Byggandet)					B 1-7 Driftskede							C 1-4 Slutskede			D	
A 1-3 Produktskede			A 4-5 Byggskede													
A1 – Råvaruförsörjning	A2 – Transport	A3 – Tillverkning	A4 – Transport	A5 – Bygg- och installationsprocess	B1 – Användning	B2 – Underhåll	B3 – Reparation	B4 – Utbyte	B5 – Ombyggnad	B6 – Driftenergi	B7 – Driftens vattenanvändning	C1 – Demontering, rivning	C2 – Transport	C3 – Restproduktionsbehandling	C4 – Bortskaffning	Potential för återanvändning och material- och energiåtervinning

Trots att en LCA är utmärkt för att få ett ordentligt grepp om en byggnads klimatpåverkan blir den snabbt väldigt omfattande. En byggnad består av flera olika material från flera olika tillverkare. Olika scenarion för drift, underhåll och rivning kan vara svåra att förutse i ett tidigt skede. Att sammanställa klimatpåverkan från alla ingående produkter är därför en komplex och ambitiös uppgift som är starkt beroende av den data finns tillgänglig. För att uppnå det långsiktiga målet, att sänka byggbranschens klimatavtryck genom att bygga miljövänliga hus, måste medvetenheten och kunskapen i hur design och materialval påverkar utsläppen av växthusgaser ökas. Boverket fick 2017 i uppdrag av regeringen att lämna förslag på utformningen av klimatdeklaration för en byggnad [22]. Rapporten innehåller förslag på en lag och den 1 januari 2022 avser regeringen införa krav på att alla byggherrar är skyldiga att upprätta klimatdeklarationer som redovisar klimatpåverkan från bärande konstruktioner, klimatskärm och innerväggar för nya byggnader eftersom dessa poster står för 80 – 90 procent av utsläppen under byggskedet. Klimatdeklarationer ska bygga på redan existerande standarder för livscykelanalys som beskrivits ovan men omfatta byggprocesskedet (A1-A5). Eftersom det är fler gaser än CO_2 som bidrar till växthuseffekten beräknas bidraget som koldioxidekvivalenter, kgCO_2e , alltså ekvivalent bidrag motsvarande viss mängd koldioxid. En klimatdeklaration kan antingen bygga på data från tillverkaren av materialet, en s.k. EPD (Environmental Product Declaration), som är specifik för en viss produkt, eller generiska data framtagen av Svenska Miljöinstitutet IVL, som är ett register med medelvärden av utsläpp för olika byggmaterial. Vilken typ av data som ska användas beror på vad den ska användas till. Det är rimligt att använda generisk data för att jämföra alternativ i ett tidigt skede för att senare använda EPD när beslut kring designen har fattats.

I detta arbete beräknades först klimatpåverkan med hjälp av generisk medelvärdesdata för att sedan även jämföras med produktspecifik data från tillverkare med låg klimatpåverkan. För att hitta de tillverkare som hade lägst klimatpåverkan sammanställdes en lista med EPD data, se Bilaga 2: Sammanställning av Materialdata, från flera olika tillverkare. Syftet var att se vilka eventuella skillnader det blev i klimatpåverkan mellan de olika konstruktionerna med medvetna val av leverantörer. För att jämföra utsläppen för olika stomalternativ användes data från skede A1-A3. A4 och A5 beaktades inte eftersom de hade byggt på antaganden kring transport och montage som ej bidragit med betydande, inbördes skillnad, mellan alternativen. Detta styrks i resultatet av ett omfattande SBUF projekt där livscykelanalyser genomfördes för fem olika typer av system. Variationen i skede A4-A5 är liten mellan de fem alternativen, se Tabell 10, här redovisat i $\text{CO}_2\text{e}/\text{m}^2 A_{temp}$ där A_{temp} är planets area innanför klimatskärmen [23]. Biogent bundet kol, alltså den mängden kol som bundits till träet under dess livstid ska inte redovisas i skede A1-A5 i en klimatdeklaration, så detta särredovisades i detta arbete.

Tabell 10. Jämförelse av utsläpp från transport och uppförande [23].

Stomsystem	A1-3 $\left[\frac{kgCO_2e}{m^2A_{temp}}\right]$	A4-5 $\left[\frac{kgCO_2e}{m^2A_{temp}}\right]$	Σ $\left[\frac{kgCO_2e}{m^2A_{temp}}\right]$
1) Platsgjuten betongstomme och yttervägg med kvarstannande form	279	53	331
2) Platsgjuten betongstomme med lätta utfackningsväggar i trä och stål	234	56	290
3) Prefabricerad betongstomme med bärande ytterväggar och håldäcksbjälklag	214	58	272
4) Volymelement i trä	176	47	223
5) Massiv stomme i KL-trä	167	56	223

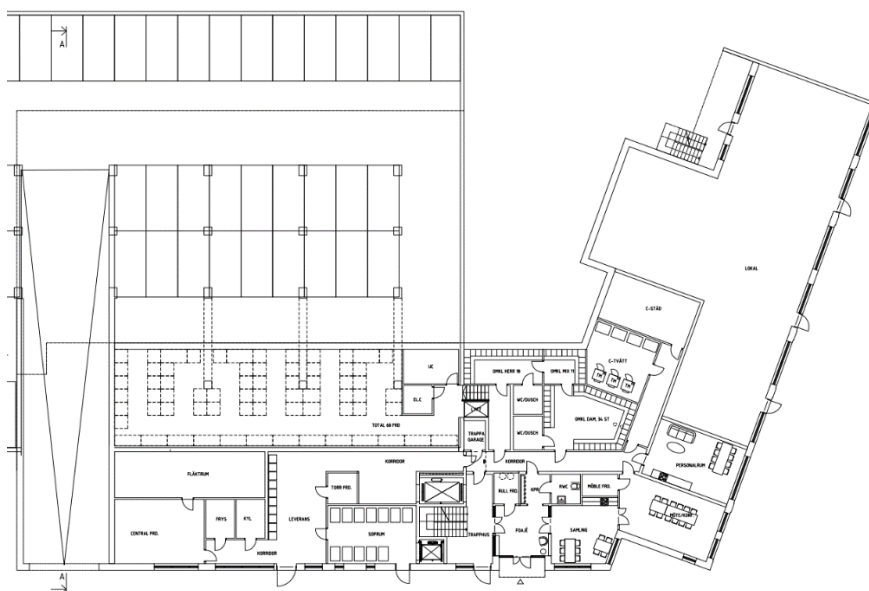
När kraven på klimatdeklarationer införs kommer det inte att finnas något gränsvärde för tillåtna utsläpp. Dock finns ett initiativ taget av regeringen inför klimatmötet i Paris 2015, Fossilfritt Sverige, som fungerar som en samarbetsplattform för företag, kommuner och övriga organisationer som är av uppfattning att Sverige ska bli världens första fossilfria välfärdsland [24]. Fossilfritt Sverige riktar sig till aktörer inom alla branscher. De som väljer att ansluta sig till Fossilfritt Sverige förbinder sig att uppvisa konkret minskning av växthusgaser. Inom ramarna för denna organisation har branschspecifika färdplaner upprättats som är en överenskommelse mellan anslutna aktörer i hur målen ska uppnås. Färdplanen för bygg- och anläggningssektorn har projektletts av Skanska Sverige. Några milstolpar i färdplanen anger att utsläppen av växthusgaser ska ha en tydligt minskande trend senast 2025 och att bygg- och anläggningssektorn senast 2030 ska ha halverat utsläppen av växthusgaser jämfört med 2015 [25]. För att följa planen och minska utsläppen av växthusgaser till noll år 2045 måste åtgärder alltså vidtas omgående.

3 Metod

För att undersöka eventuella fördelar med att använda en hybridkonstruktion jämfördes tre alternativa stomsystem (trä, betong och hybrid). För att resultaten skulle vara jämförbara definierades funktionskrav på dessa stomsystem. I detta kapitel redogörs hur de olika stommarna utformades och hur alternativen valdes.

3.1 Projektförutsättningar

SÄBO Sollentuna är ett egenutvecklat Skanskaprojekt med Skanska PUK (projektutveckling, kommersiellt) som byggherre. Byggnaden ska enligt detaljplanen inrymma publika lokaler på bottenplan, se Figur 8, samt tre våningar med vårdboende [26]. När detta examensarbete påbörjades var projekteringen i ett tidigt skede och tillgången till handlingar var begränsad samt de handlingar/utredningar som fanns tillgängliga var preliminära. Detta innebar att förutsättningar som förändrades under projektets gång ej togs i beaktning. Istället gjordes tidigt antaganden och förenklingar som var gällande för genomförandet av detta examensarbete. I en tidig utredning nekades förslaget att använda en stomme i KL-trä, en anledning var att planlösningen för plan 1, se Figur 8, har stora öppna ytor vilket inte passade en stomme i KL-trä, där korta spännvidder och flera stabiliserande väggar gynnas av upprepande planlösning ner till grunden. En annan anledning var att lägenhetsavskiljande väggar blev för tjocka för att få in rätt antal lägenheter för de boende på varje avdelning. För syftet med detta arbete, att övergripande undersöka användandet av hybridkonstruktioner, och med hänsyn till att planlösningarna var mycket preliminära fick bottenplan samma planlösning som plan 2 – 4, se Figur 9. Våningsplanet är typiskt för ett vårdboende med lägenheter fördelat på två flyglar och utrymmet mellan flyglarna nyttjas för gemensamma lokaler så som kök, matplats och tvättstuga. Yttermått och korridorbredder är strikt begränsande och ökade dimensioner på inner/ytterväggar leder därför till en minskade boarea inne i huset, se Figur 10.



Figur 8. Planlösning, plan 1

3.2 Utformning av stomsystem

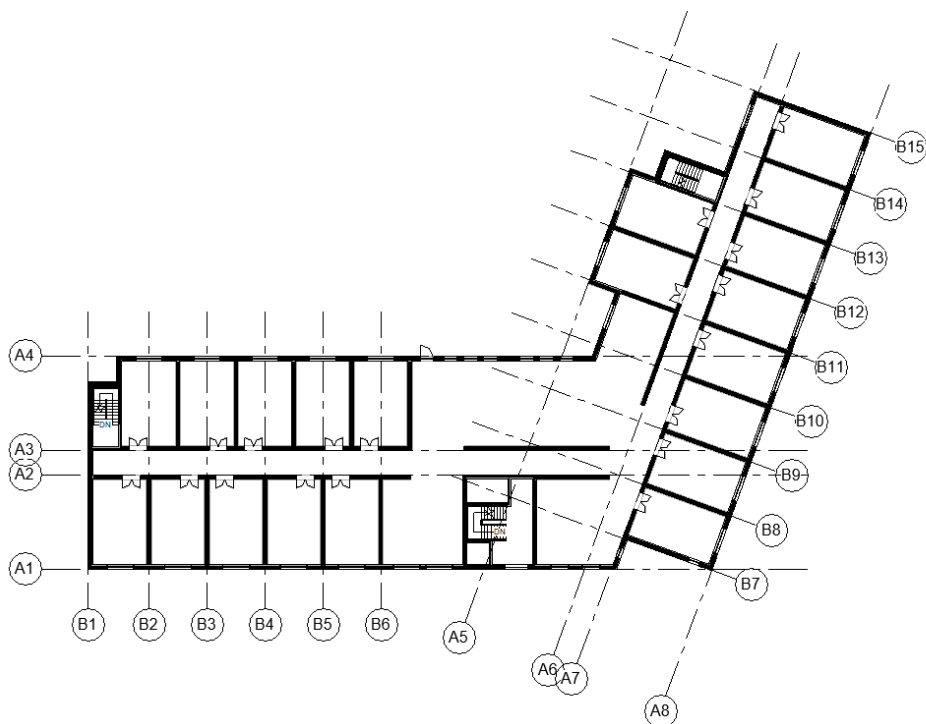
Planlösning, projektekonomi, tidplan, geografiskt läge, erfarenhet och traditioner är alla exempel på faktorer som måste vägas in vid valet av material och produktionsmetoder. Eftersom en universell lösning saknas för utformningen av ett stomsystem definierades funktionskrav för att uppnå motsvarande prestanda med olika metoder och på så sätt få jämförbara resultat. Valet av stommalternativ utgick främst från beprövade stommar för att se hur dessa kan anpassas till förutsättningarna i just detta projekt.

Sammanfattning av krav och regler för utformning:

- Ytermåtten på byggnaden är fasta mått och får ej överstigas.
- Korridorer ska ha en bredd på 2000 mm. Bredare korridorsväggar ger mindre yta inne i lägenheterna.
- Våningshöjderna är fasta 3300 mm, bjälklagens tjocklek styr därför rumshöjden.
- Alla lägenheter utgör egen brandcell
- Byggnadsdelar med bärande funktion ska uppfylla R60
- Byggnadsdelar med avskiljande funktion ska uppfylla EI60
- Innertak bör ha ytskikt B-s1,d0 fäst på material av A2-s1,d0 eller på beklädnad av $K_210/B - s1, d0$
- Väggar bör invändigt ha ytskikt med minsta brandtekniska klass C-s2,d0.
- Alla lägenhetsavskiljande väggar och bjälklag ska uppfylla ljudklass B
- Ytterväggar kan utföras som bärande eller icke bärande. Alla ytterväggskonstruktioner ska ha samma U-värde av $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- Maximala spännvidder ska eftersträvas för valda bjälklagselement.

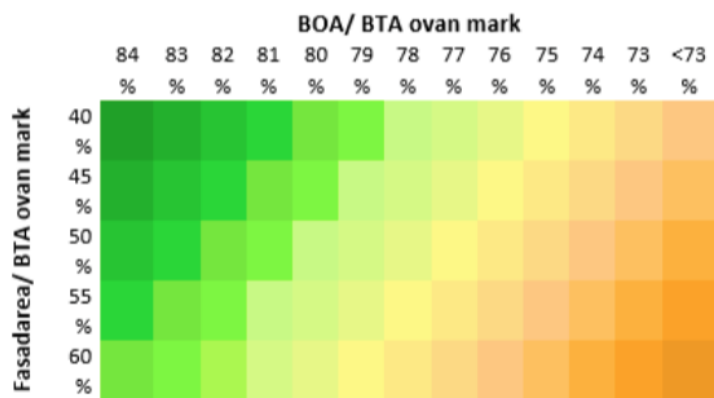
Med hänsyn till funktionskraven valdes ett antal konstruktionslösningar för stomsystemens bjälklag och väggar, dessa hämtades från olika handböcker och leverantörer. Konstruktionslösningarna var avsedda att klara krav för brand och ljud, dessa världens är dock ungefärliga då deras egenskaper påverkas av andra förutsättningar. Bärigheten vid brand påverkas till exempel av utnyttjandegraden av bärformågan och ljudegenskaper påverkas av hur övriga byggdelar ansluter till konstruktionen. Förenklad och översiktlig dimensionering gjordes på representativa bärande delar (Bilaga 1: Beräkningar). EPD för klimatpåverkan för de olika materialen som ingick sammanställdes för att få en uppfattning om tillgängliga data, för lista se i Bilaga 2: Sammanställning av Materialdata. Inledningsvis användes generiska medelvärdesdata från IVL hämtad via Byggsektorns Miljöberäkningsverktyg [27] för att beräkna miljöpåverkan av stomsystemen sedan genomfördes beräkningar med underlag från EPD, detta för att undersöka vilken skillnad miljömedvetna materialval gör. Klimatpåverkan och egenskaper för de olika vägg- och bjälklagstyperna sammanställdes, se nedan i detta kapitel.

Från planlösningen, Figur 9, upprättades ett rutnät av stomlinjer i programmet Revit [28], se Figur 11. Generiska väggar och bjälklag användes för att upprätta en 3D-modell och dess positioner låstes till stomlinjerna. Vagg- och bjälklagstyper lades in i modellen och det var möjligt att testa olika alternativa lösningar. Med schedules i Revit hämtades mängder som excelfiler som sedan kopplades till sammanställningen av materialdata för att beräkna klimatpåverkan från de olika alternativen. De väggar som inte har en bärande funktion medräknades enbart om de var nödvändiga för att bilda en brandcell eller avgränsning för ljud.

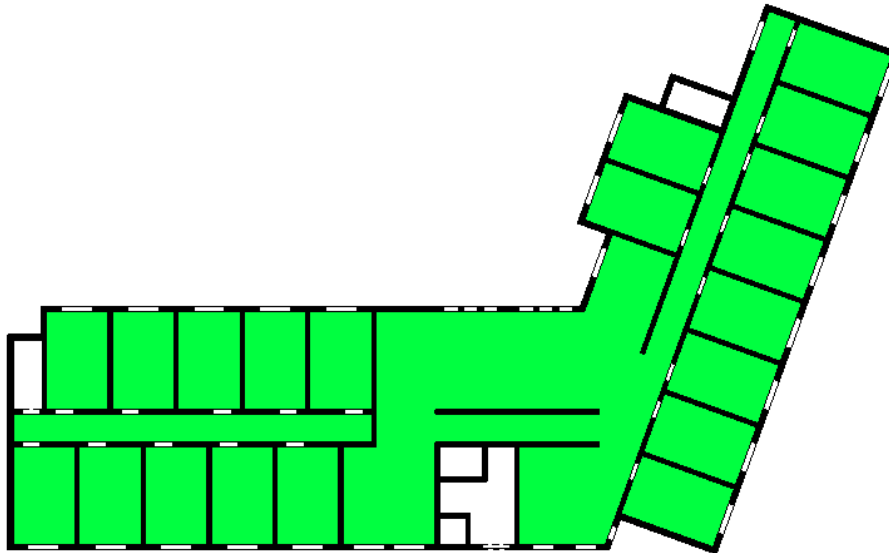


Figur 11. Fasta stomlinjer i Revit-modell

Revit användes även för att beräkna den tillgängliga golvarean för de olika alternativen. Det finns olika typer av nyckeltal som kan användas för exempelvis planering, projektering, hyressättning, taxering, värdering, planbestämmelser med mera. Det finns regler för mätning av area och volym hos byggnader som anges i den svenska standarden, SS 21054:2020 [29]. Ett vanligt effektivitetstal vid planering av bostäder är BOA/BTA, se Figur 12 där mer mörkgrön färg är mer effektiv användning. BTA är summan av arean för alla våningsplan mätt från omslutande byggnadsdelars utsida. BOA är utrymmen inrättade för boende, vanligtvis arean innanför omslutande byggnadsdelar minus övrig area, biarea och lokalarea, till dessa räknas bland annat gemensamma tvättstugor, entréer, trapphus, korridorer, utrymmen nödvändig för byggnadens drift så som installationsschakt, fläktrum osv. Eftersom effektivitetstalet är starkt knutet till utformningen av planlösningen, samt att underlaget i detta arbete var begränsat, beräknades och jämfördes den tillgängliga arean som byggnadens ytterarea minus stommens area och trapphus, se grön markering på Figur 13.



Figur 12. Effektivitetstal



Figur 13. Grönt = Arean som medräknades

3.2.1 Bjälklag

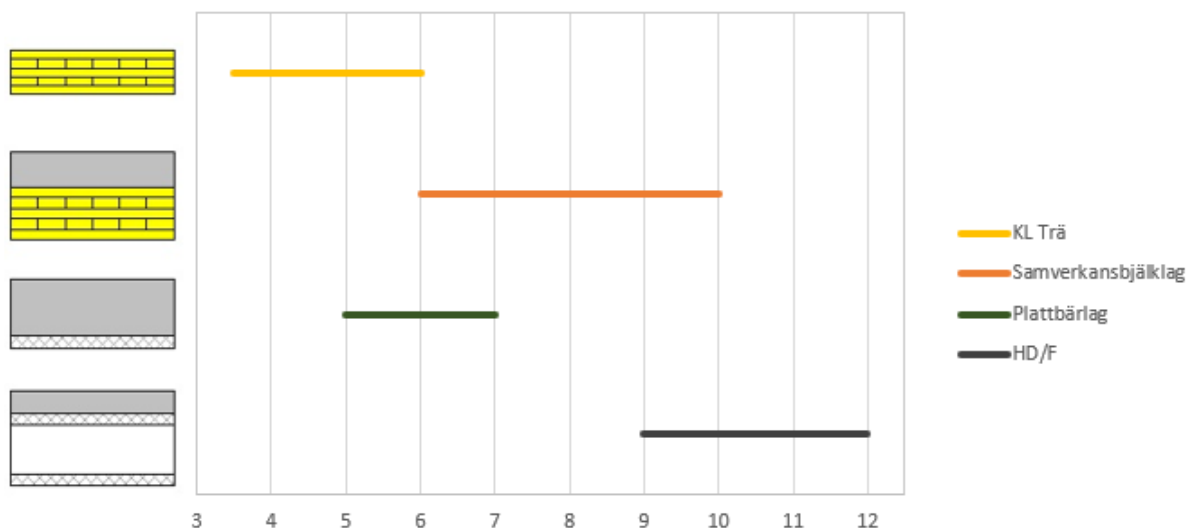
Valet av bjälklag hade stor betydelse för utformningen av den bärande konstruktionen. Spännvidden påverkade antalet upplag och deras placering. Maximala spännvidder eftersträvas för respektive att bjälklag så antalet kranlyft på arbetsplatsen minimeras, se sammanfattning i Figur 14.

Till betongstommen undersöktes två alternativ, plattbärlag och förspända håldäckselement. Plattbärlag levereras och monteras som en tunn betongskiva och är armerad i förväg, den kan vara slakarmerad eller förspänd, tjocklek är 45 – 120 mm. När skivan är på plats kan installationer monteras i bjälklaget och sedan gjuts betong till en total tjocklek på ca 250 mm [30]. Rekommenderad spännvidd för en ett slakarmerat plattbärlag är ca 5 – 7 m [31]. Plattbärlag kan användas i kombination med skalväggar som består av två tunna betongskivor med ett hålrum i mitten som fylls med betong.

Håldäckselement är förtillverkade betongelement med hålrum som minskar användandet av betong samt bjälklagets egentyngd. Håldäcken är armerad med förspänd armering i underkant och bär last i en riktning. När elementen är monterade armeras ändarna samman för att få elementen att fungera som en skiva och fogar gjuts för att överföra vertikala krafter mellan elementen. Rekommenderad spännvidd är 9 – 12 m [31].

Till stommen av trä valdes KL-trä som det huvudsakliga konstruktionsmaterialet. Tjockleken på element uppbyggda av fem lager trä varierar mellan 100 – 230 mm och rekommenderade spännvidder är 3,5 – 6 m för bostäder, lastkategori A [32].

Till hybridstommen valdes ett samverkansbjälklag av trä och betong. Materialen är sammanfogade med skjuvförbindare för att få bjälklaget att fungera som en komposit enhet där betongen tar står emot tryck och trä drag. Rekommenderad spännvidd är 6 – 12 m och den totala tjockleken kan preliminärt sättas till $\frac{l}{25}$ [8].


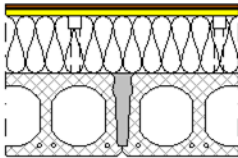
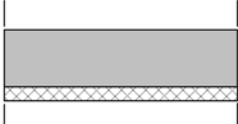
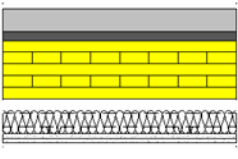
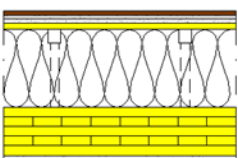
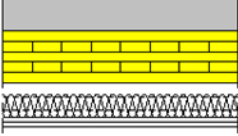


Figur 14. Lämpliga spännvidder för olika bjälklagstyper, [8,31,32].

För att klara ljudkraven och erbjuda en slät yta för ytskikt behövs oftast någon form av överbyggnad. I detta fall undersöktes ett uppstolpat golv samt pågjutning med betong eller flytspackel. Ett uppstolpat golv läggs på plåtreklar som vilar på ljuddämpande fjädersystem [33]. Under golvet finns utrymme för installationer.

Olika uppbyggnader sammanställdes, se Tabell 11. Brand- och ljudegenskaper för uppbyggnad av betongbjälklag hämtades från Skanska [31] och uppbyggnad av KL-trä-bjälklag från KL-trähandboken [8]. Egentyngd beräknades för ingående material och utsläpp av koldioxidekvivalenter med generiska data från IVL [27].

Tabell 11. Uppbyggnad av bjälklag, [8, 31].

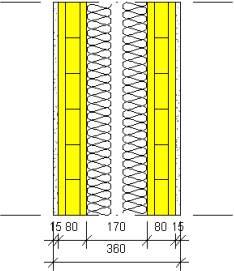
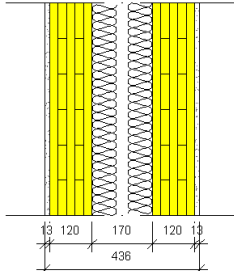
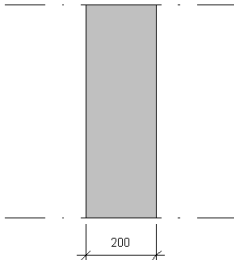
Bjälklag	t [mm]	Material	Tjocklek [mm]	Egentyngd [kN/m ²]	Utsläpp A1-A3 [kg CO ₂ e/m ²]	Brandklass	Ljudklass
	60 265	Avjämning HD/F 120/27	325	4,54	88,5	REI60	B
	22 200 265	Golvspån på uppstolpat golv Mineralull HD/F 120/27	487	3,78	85,7	REI60	B
	200 50	Betong Plattbärlag	250	6,19	88,4	REI60	B
	80 30 200 40 80 15 15	Betong Stegjudsmatta KL-trä Luftspalt Mineralull Pendlat undertak Brandgips Brandgips	460	2,99	48,9	REI60	B
	13 13 22 260 160 13	Golvgips Golvgips Golvspån på uppstolpat golv Mineralull KL-trä Gips	481	1,23	41,5	REI60	B
	120 Armering 180 80 15 15	Betong Armering KL-trä Pendlat undertak Isolering Brandgips Brandgips	450	3,89	71	REI60	B*

3.2.2 Bärande väggar

Två lösningar för bärande och stabiliserande lägenhetsavskiljande väggar beaktades, betong och KL-trä. En betongvägg med 200 mm tjocklek klarar i normalfallet ljud- och brandkrav utan ytterligare åtgärder om montaget är korrekt, dvs inga springor eller otäta genomföringar [31]. KL-träväggar utförs separerade med isolering och luftspalt samt kläs med gips för att klara brand- och ljudkrav.

Olika uppbyggnader sammanställdes se Tabell 12. Brand- och ljudegenskaper för uppbyggnad av betongbjälklag hämtades från Skanska [31] och uppbyggnad av KL-trä från KL-trähandboken [8]. Egentyngd beräknades för ingående material och utsläpp av koldioxidekvivalenter med generiska data från IVL [27].

Tabell 12. Bärande och stabiliserande lägenhetsavskiljande väggar, [8, 31].

Bärande väggkonstruktioner	t [mm]	Material	Tjocklek [mm]	Egentyngd [kN/m ²]	Utsläpp A1-A3 [kg CO ₂ e/m ²]	Brandklass	Ljudklass
		15 Brandgips 80 KL-Trä 70 Mineralull 30 Luftspalt 70 Mineralull 80 KL-Trä 15 Brandgips	360	0,93	22,6	REI60	B
		13 Gips 120 KL-Trä 70 Mineralull 30 Luftspalt 70 Mineralull 120 KL-Trä 13 Gips	436	1,23	26,3	REI60	B
		200 Betong	200	4,88	58,8	REI60	B

3.2.3 Icke bärande väggar

Lätta regelväggar kan byggas upp av antingen träreglar eller plåtreklar. Lager av skivmaterial kan kombineras för att få olika egenskaper. I Tabell 13 visas två uppbyggnader från tillverkare Knauf Danogips [34].

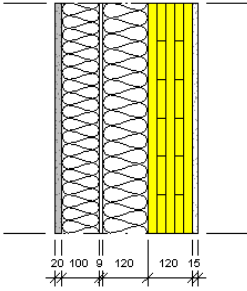
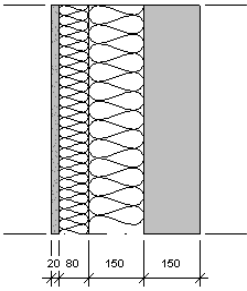
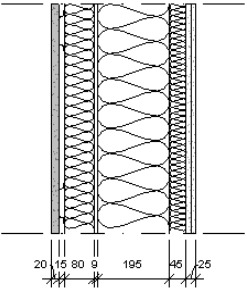
Tabell 13. Lätta mellanväggar [34]

Icke-bärande väggkonstruktioner	t [mm]	Material	Tjocklek [mm]	Egentyngd [kN/m ²]	Utsläpp A1-A3 [kg CO ₂ e/m ²]	Brandklass	Ljudklass
	12,5	Gips	229	0,53	27,2	EI60	B
	12,5	Gips					
	12	K-plywood					
	70	Mineralull					
		m. plåtregel					
	15	Luftspalt					
	70	Mineralull					
		m. plåtregel					
	12	K-plywood					
	12,5	Gips					
	12,5	Gips	94	0,36	12,8	EI60	B (mellan bostad och korridor)
	12	K-plywood					
	45	Mineralull					
		m. plåtregel					
	12	K-plywood					
	12,5	Gips					

3.2.4 Ytterväggar

Ytterväggar kan utföras som bärande eller icke, se Tabell 14. De olika systemen som valdes hade alla oventilerad putsfasad och u-värde $\approx 0,15 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Uppbyggnad för KL-träväggen och lätta regelväggen hämtades från tillverkare Isover ([35] [36]) och betongväggen från Skanska, [37].

Tabell 14. Bärande och icke-bärande ytterväggar [35,36,37].

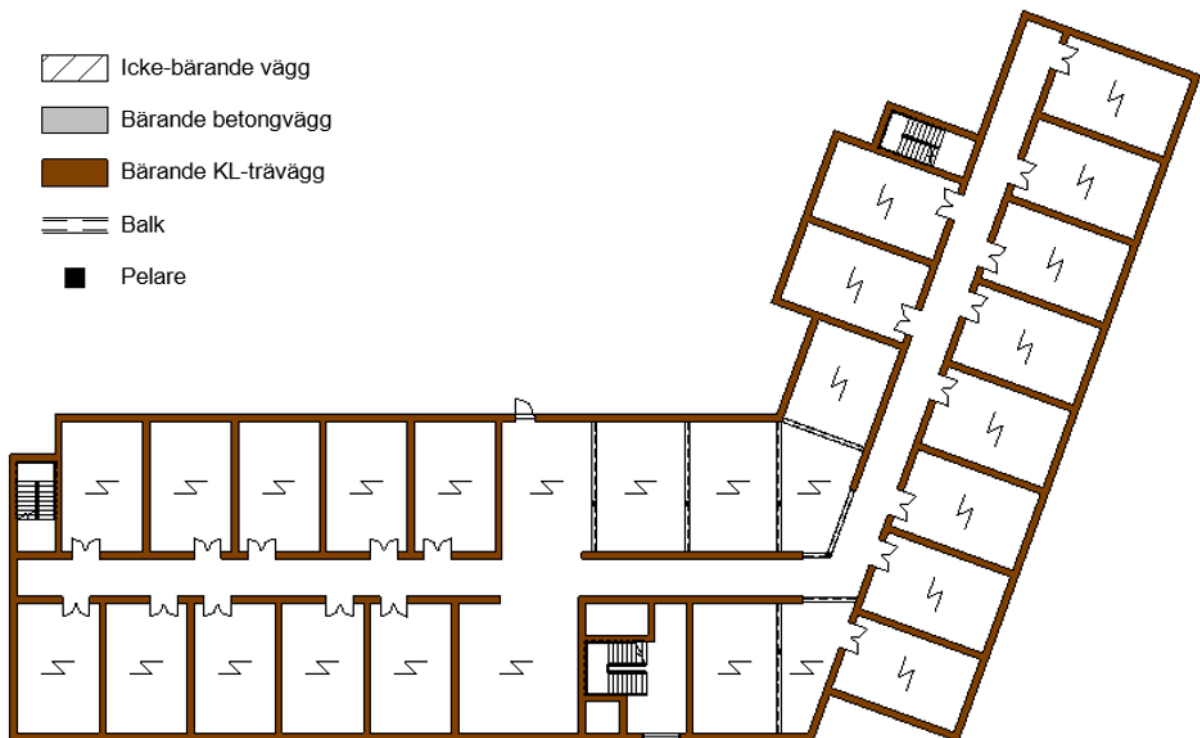
Bärande Ytterväggskonstruktioner	t [mm]	Material	Tjocklek [mm]	Egentyngd [kN/m ²]	Utsläpp A1-A3 [kg CO ₂ e/m ²]	U-värde [W/m ² °C]
	20 100 9 120 120 15	Fasadskiva Vindskiva Mineralull Träregel KL-Trä Brandgips	384	1,12	30,8	0,147
	20 80 150 150	Fasadskiva Mineralull Betong	400	4,06	60,6	0,135
Icke-bärande Ytterväggskonstruktioner	t [mm]	Material	Tjocklek [mm]	Egentyngd [kN/m ²]	Utsläpp A1-A3 [kg CO ₂ e/m ²]	U-värde [W/m ² °C]
	20 15 80 9 195 45 25	Puts Luftspalt Fasadskiva Vindskiva Mineralull m. plåregel Mineralull m. träregel Gips Gips	389	0,73	31,3	0,15

3.3 Stomsystem 1: Trästomme

I det första stomsystemet utformades alla bärande och avskiljande delar i KL-trä, se Figur 15, förutom komplettering med limträpelare och stålbalkar vid öppna ytor, se Figur 16. Bjälklaget av enbart KL-trä har en förhållandevis kort spännvidd och spänner därför enbart en lägenhetsbredd. Eftersom ytterväggarna med KL-trä har motsvarande klimatpåverkan som lätt utfackningsvägg valdes även dessa utformas med KL-trä och är en del av stomstabiliseringen tillsammans med bärande innerväggar.

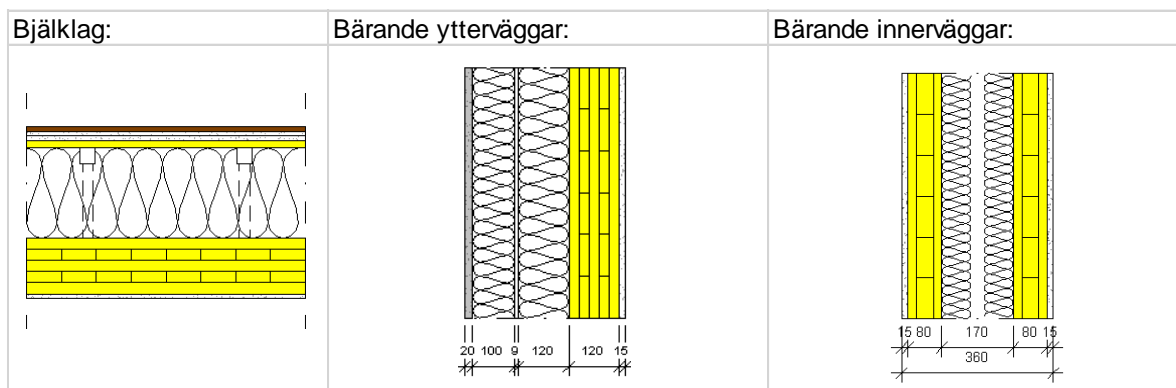


Figur 15 Bärande element i trästomme (transparent takbjälklag)



Figur 16. Bjälklag över plan, trästomme.

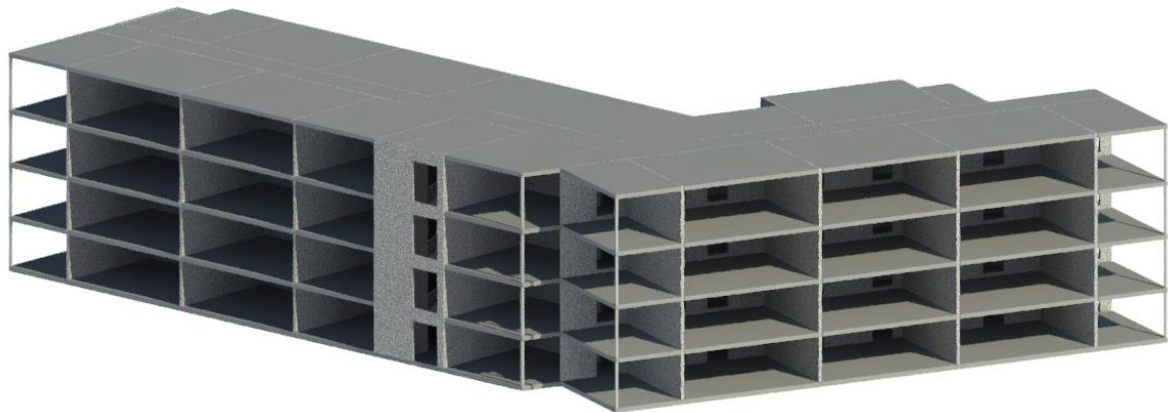
Dimensionskontroll av bjälklag, bärande lägenhetsavskiljande väggar och stålbealkar utfördes i representativa tvärsnitt, se Dimensionskontroller, Stomalternativ 1. Sammanfattning av byggdelar se Figur 17.



Figur 17. Uppbyggnad trästomme

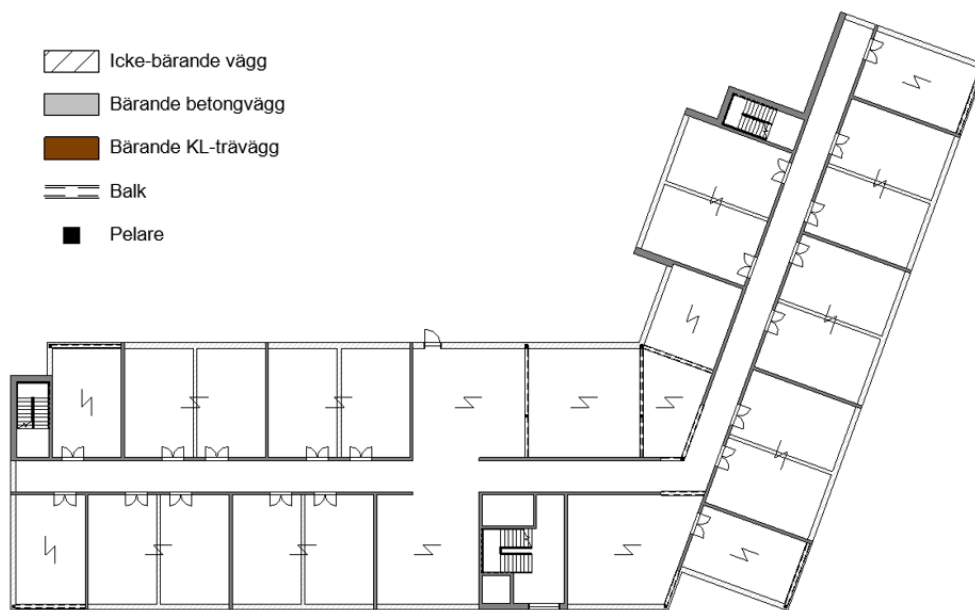
3.4 Stomsystem 2: Betongstomme

I stomsystem 2 utgjordes i huvudsak av betong. Förspända håldäckselement vilar på massiva betongväggar som i huvudsak utgör schakt, trapphus och lägenhetsavskiljande väggar, se Figur 18. Betongväggarna utgör även den stabiliserande delen av stomsystemet. Ytterväggar och öppna ytor kompletterades med balkar och pelare i stål som dimensionerades för brotts och bruksgränstillstånd i värst belastade tvärsnitt, se Dimensionskontroller, Stomalternativ 2 Bilaga 1: Beräkningar.



Figur 18 Bärande element, betongstomme

Bjälklag valdes mellan förspända, 265 mm tjocka, håldäckselement och slakarmerade plattbärlag. Eftersom plattbärlag har en förhållandevis kort spännvidd hade det alternativet inneburit fler bärande betongväggar. Att bygga alla lägenhetsavskiljande väggar i betong hade gett en stabil byggnad där brand- och ljudkrav mellan lägenheter enkelt uppnår goda egenskaper samt att väggarna inte hade tagit stort anspråk på tillgänglig golvarea. Eftersom målet med detta arbete var att jämföra alternativen ur en klimatsynpunkt valdes håldäckselementen vars spann var två lägenheters bredd. På så vis kunde varannan lägenhetsvägg byggas med lätta regelväggar och klimatpåverkan sänkas, se Figur 19 för placering av väggar. Vid jämförelse av bärande betongväggar och lätt regelvägg var differensen på 31,6 kg CO₂e/m² betongvägg ersatt av lätta regelväggar. De bärande betongväggarna var 200 mm tjocka, denna dimension valdes med hänsyn till att detta i normalfallet uppfyller brand- och ljudkrav [31].



Figur 19. Bjälklag över plan, betongstomme

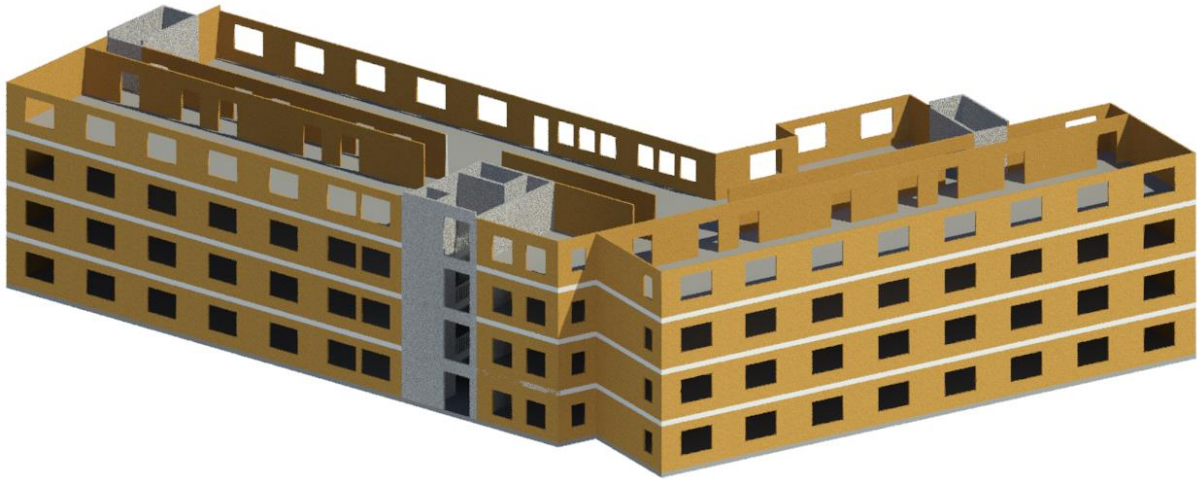
Uppstolpat golv gav en lägre klimatpåverkan än en pågjutning och ger även möjlighet till utrymmer för installationer. Ytterväggarna utformades som lätta utfackningsväggar då fasaderna ej utgjorde del av den bärande konstruktionen, förutom trapphus och schakt mot yttervägg, se sammanfattning av byggdelar Figur 20.

Bjälklag:	Bärande/lcke-bärande ytterväggar:	Bärande/lcke-bärande innerväggar:

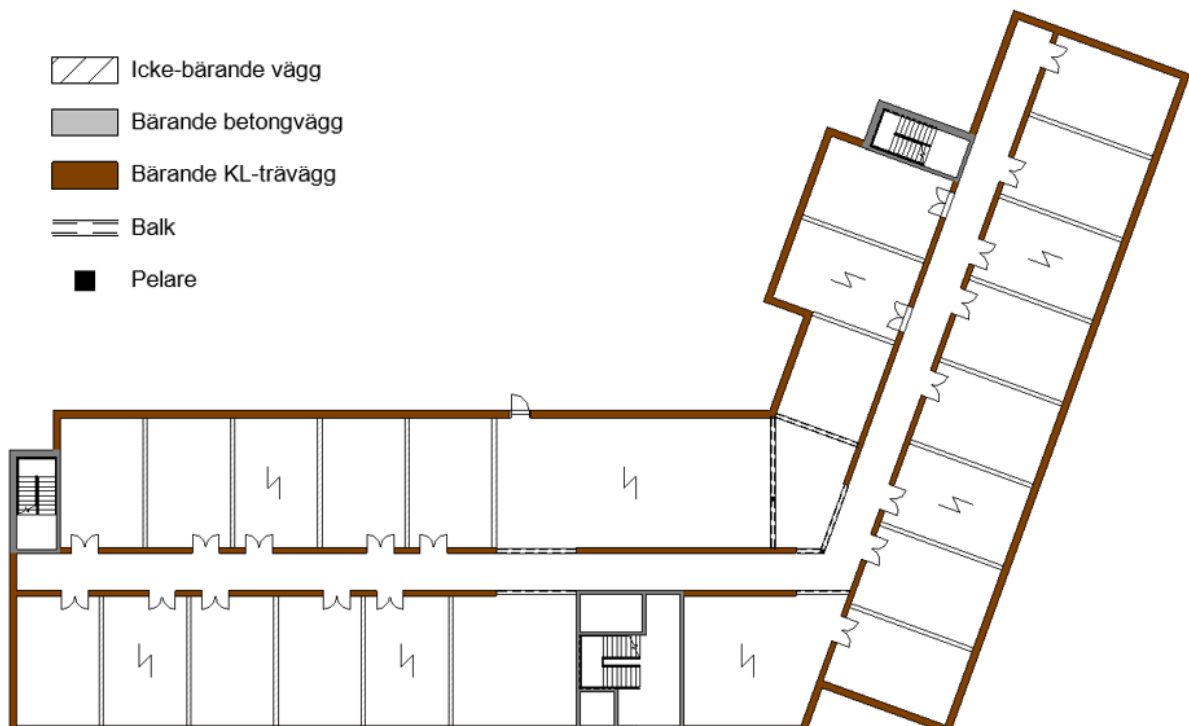
Figur 20. Uppbyggnad, betongstomme

3.5 Stomsystem 3: Hybrid

I kapitel 2.1.1 nämndes ett antal olika träbaserade hybridkonstruktioner med väldigt varierade utformningar, den utformningen som användes för att jämföra olika alternativ i detta arbete hade alltså kunnat utformas på flera sätt. Detta är alltså ett exempel på en möjlig design och andra alternativ hade varit tänkbara. Den träbaserade hybridstommen konstruerades som en trä-betong hybrid, se Figur 21. För att möjliggöra mer flexibla planlösningar användes samverkansbjälklag som har lägre klimatpåverkan än betongbjälklag och längre spännvidd än bjälklag av KL-trä. Bjälklagen spände mellan ytterväggar och korridorer, se Figur 22.

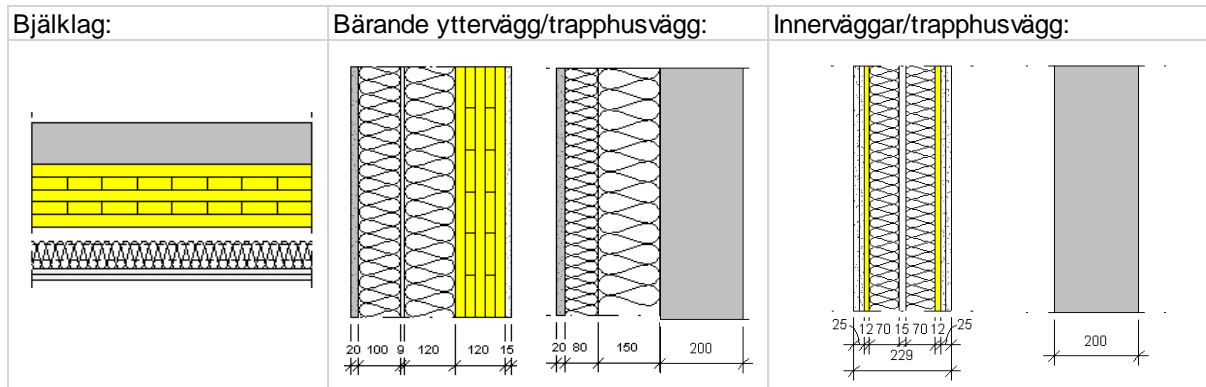


Figur 21. Bärande element i hybridstomme (transparent takbjälklag)



Figur 22. Bjälklag över plan, hybridstomme

Vertikala element utgjordes till största del av KL-trä och kontroller utfördes för väggar i fasad, samverkansbjälklag i brottgränstillstånd samt stabilitet, se Dimensionskontroller, Stomalternativ 3. Betongen på samverkansbjälklagen armeras och gjuts samman i skarvarna för att fungera som en skiva och för på så vis horisontella laster från fasader till trapphusen som är byggda av betong. Se använda byggdelar i Figur 23.



Figur 23. Uppbyggnad av hybridstomme

4 Resultat och diskussion

En byggnad utformas genom samarbete mellan flera discipliner. Konstruktörer, arkitekter, brandkonsulter, akustikkonsulter, installationsprojektörer, geotekniker med flera har alla sin roll i att se till att ett byggnadsprojekt blir så lyckat som möjligt. Att designa tre detaljerade stomsystem och beräkna hela deras livscykler ansågs varken genomförbart eller nödvändigt för att ta reda på eventuella fördelar och nackdelar med träbaserade hybridkonstruktioner med avseende på utnyttjande av bygggrätt och klimatpåverkan. Det är inte heller rimligt att detaljprojektera tre byggnader för att bygga en, förenklingar är nödvändiga för att kunna göra jämförelser och fatta informerade beslut i ett tidigt skede. Exempel på delar som ej medräknades i detta arbete är takkonstruktion, fönster, och installationer eftersom dessa hade gett liknande klimatpåverkan för de olika alternativen. Den procentuella skillnaden i klimatavtryck mellan de olika alternativen är alltså egentligen lägre om man räknar med allt material i hela byggnadernas livscykler, men de totala utsläppen för alla system är högre.

Det förhållandevis låga våningsantalet på byggnaden i detta arbete innebär att bärande väggar av KL-trä mycket väl klarar de vertikala tryckkrafter som uppstår. Vid jämförandet av olika konstruktionstyper påvisades det att det passade väl att använda bärande element av KL-trä i yttervägg då KL-trä har bättre U-värde än betong och totala konstruktionstjockleken inte skiljde avsevärt. En begränsning med trästommen är bjälklagens begränsade spännvidder, vid större längder finns det lösningar med inbyggda limträbalkar, liknande TT-kassetter, men detta ger grova bjälklagskonstruktioner som inte lämpar sig till byggnader med begränsad byggnadshöjd. Bjälklags korta spännvidder påverkade möjligheterna vid utformningen eftersom flera bärande delar krävdes vilket påverkade klimatavtryck och användbar area. Utveckling av beräkningsmetoder och tillverkning för samverkansbjälklag öppnar alltså stora möjligheter för byggnation med mer flexibla planlösningar vilket gör klimatsmarta alternativ tillgängligt på fler typer av projekt.

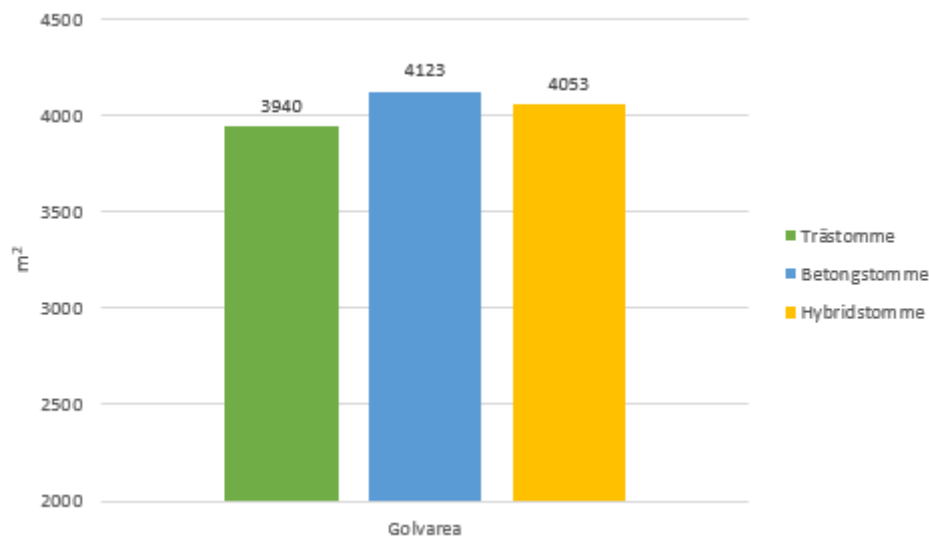
En stomme helt i betong kan kännas självklar då den enkelt uppfyller krav för ljud och brand, är stabil, kan uppföras snabbt och ger möjlighet att utnyttja stor del av byggnadens area. Genom tidigt göra klimatberäkningar lyfts frågan om hur byggnaden påverkar miljön och därför ersattes flera väggar i betongalternativet med lätta regelväggar.

Stomalternativ 3, hybrid, utformades i detta arbete som en trä-betong-hybrid. Ett krav vid utformningen var att stommens prestanda, med hänsyn till brand och ljud, skulle motsvara prestandan hos en mer traditionell betongstomme. Som tidigare nämnts hade utformningen av systemen kunnat lösas på oändligt antal sätt. I detta arbete förutsattes ljudklass B för bostäder, detta för att betongstommens prestanda skulle bli mer rättvist bedömt mot de övriga stommarna. Genom att se över vilka typer av ljudkrav som är nödvändigt för ett äldreboende kan det ha varit möjligt att göra hybridkonstruktionen till ett än mer attraktivt alternativ. För användandet av denna byggnad kan det ha varit rimligt att sätta ljudklassen till C istället för B och utformat stommen mer liknande den i ”AWL”, se 2.1.1, med KL-bjälklag som vilar på ett stålskelett, som påvisats uppnå ljudklass C för bostäder [12]. Denna alternativa lösning bör ha gett bättre utnyttjande av tillgänglig area och ännu lägre klimatpåverkan då uppbyggnaden av bjälklagen hade blivit betydligt enklare utan alla pågjutningar av betong. Andra typer av tänkbara lösningar för hybridstommen fanns såklart också. Målet för hybridkonstruktioner bör vara att välja material beroende på var de gör mest nytta.

Alla stomalternativ i detta arbete anpassades till exakt samma planlösning som var i ett mycket tidigt skede av projekteringen. Vid skarpt projekt, med alla inblandande discipliner närvarande, är det möjligt att planlösningen hade arbetats om för att bättre passa det enskilda stomsystemets förutsättningar.

Utnyttjande av area

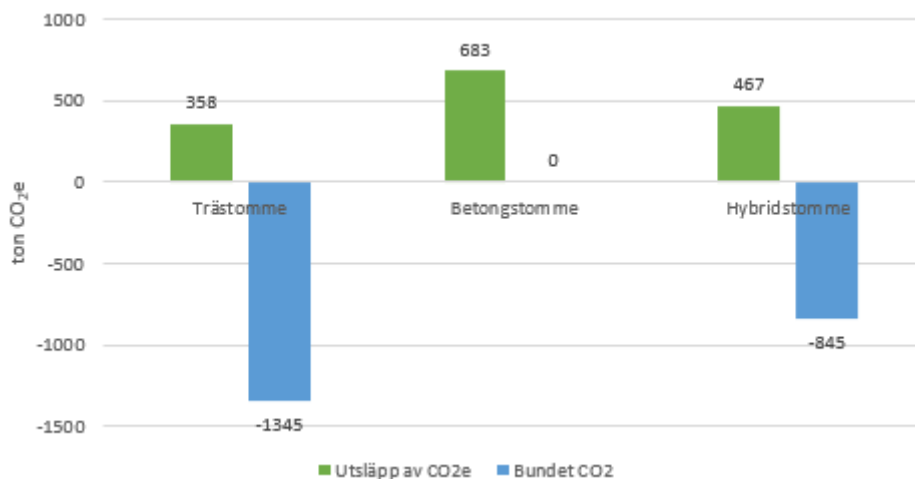
Förutom brist på erfarenhet och beprövade metoder är utnyttjande av area ett motiv för att inte använda stommar av trä då dom ofta tar anspråk på mer utrymme än andra konstruktioner, något som kan påverka projektets ekonomi och ibland möjlighet att genomföras. Efter att summerat tillgänglig area för samtliga stomsystem enligt 3.1, se Figur 24, går det att konstatera att skillnaden mellan stomalternativ 1 och 2 är 183 m². En skillnad på några procent kan verka liten, för att sätta detta i perspektiv kan en jämförelse göras med kvadratmeterpriset för bostäder i Sollentuna, som enligt Svensk Mäklarstatistik är 40137 kr/m² [38], vilket alltså skulle motsvara 7,3 miljoner kronor, en betydande del av vinsten för ett projekt av denna storlek. Tillgänglig area för stomsystem 3, blev 70 m² mindre än betongstommen men 113 m² större än KL-trä-stommen.



Figur 24. Tillgänglig area

Utsläpp av CO₂e

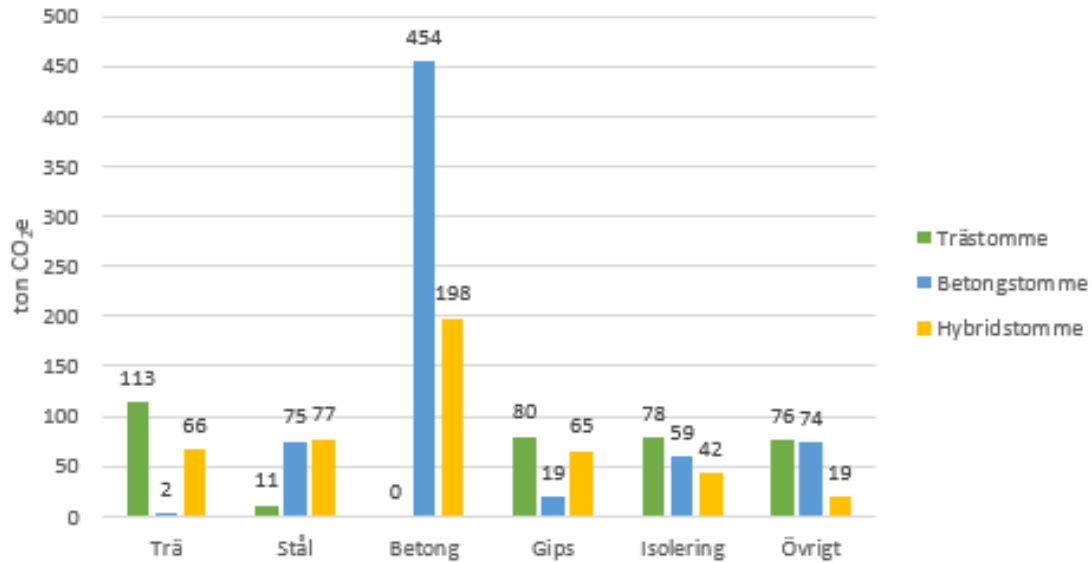
Från jämförelsen av olika uppbyggnader av väggar och bjälklag i kapitel 3.2.1-4 är det tydligt att byggnadsdelar med betong har betydligt större klimatpåverkan än dom med KL-trä. Trots påbyggnad av gips och isolering har lägenhetsavskiljande väggar av KL-trä, beräknat med generiska data, mindre än hälften så stor klimatpåverkan som betongväggarna har, se Tabell 12.



Figur 25. Totala utsläpp för stommar

Som tidigare framhållits i färdplan mot fossilfritt Sverige [25] som refererar till jämförelsen av fem olika stomsystem [23], är det möjligt att halvera klimatpåverkan av en stomkonstruktion genom att bygga stommar med trä istället för betong, något som stämde väl överens med resultatet i detta arbete. Figur 25 visar det totala utsläppet för de olika stomalternativen, där kan man avläsa att KL-trästommen hade 358 ton CO_2e , drygt 52% av betongstommens 683 ton CO_2e . Genom att kombinera KL-trä med betong sänktes klimatavtrycket med 216 ton CO_2e i förhållande till betongstommen, nästan 32 %, vilket är en betydande men ändå påtagligt sämre än den halveringen som en stomme i KL-trä ger om målet är att bygga klimatsmart.

Figur 26 visar utsläpp fördelat per material och där syns betongens betydande inverkan på både stomalternativ 2 och 3. Det är möjligt att stapeln för stål skulle varit högre för samtliga stommar då infästningar och andra detaljer låg utanför detaljeringsgraden för detta arbete. Mängden stål blev högre i hybridkonstruktionen än för betongkonstruktionen, detta tros bero på att alla massiva betongelement fick ett schablonmässigt armeringsinnehåll som särredovisades medan håldäckselementens påverkan hamnade under samma post. Även här är det värt att notera att den extra mängd gips och isolering som används i trästommen ger liten påverkan till totalen jämfört med betongen.



Figur 26. Utsläpp fördelat på material

För att bedöma rimligheten i detta arbete jämfördes resultatet med tidigare nämnd undersökning av fem olika stomsystem [23]. Eftersom tak och grund ej medräknats i de tre undersökta stomsystemen i detta arbete, då de ansågs ge liten inbördes skillnad i klimatpåverkan, adderades ett schablonvärde för att erhålla ett jämförbart resultat. I detta fall beräknades klimatpåverkan från en platta på mark bestående av 200 mm armerad betong, 300 mm cellplast, dränerande lager av makadam samt fiberduk till $95 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^2$. En takupbyggnad bestående av 410 mm mineralull samt tätskikt av papp beräknades till $19 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^2$. Totalt adderades $139 \text{ ton CO}_2\text{e}$ till vardera av de tre stomsystemen och mängden utsläpp beräknades per A_{temp} , se Tabell 15.

Tabell 15. A_{temp} beräknat inklusive tak och grund

System	Total utsläpp (inklusive tak + grund) [ton CO ₂ e]	A_{temp} [m ²]	Utsläpp per A_{temp} [kg CO ₂ e/m ²]
1. KL-trä	497	4568	108
2. Betong	822	4592	180
3. Hybrid	606	4568	133

Från de fem systemen i den jämförande rapporten valdes två stommar att jämföras med, KL-trä-stomme och prefabricerad betongstomme. Från KL-trä-stommen beräknades posterna KL-trä, betong, armering, gipsskivor, plåt och stål till $121 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^2 A_{temp}$ jämfört med $108 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^2 A_{temp}$ från stomsystem 1. Från Prefabricerade betongstommen beräknades betong, armering, isolering, gipsskivor, plåt och stål till $181 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^2 A_{temp}$ jämfört med $180 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^2 A_{temp}$. Likhetera i utsläppen tyder på en rimlighet i resultaten från detta arbete, dock bör det nämnas att detaljeringsgraderna i rapporterna skiljer sig avsevärt samt att det är olika typer av använde för byggnaderna.

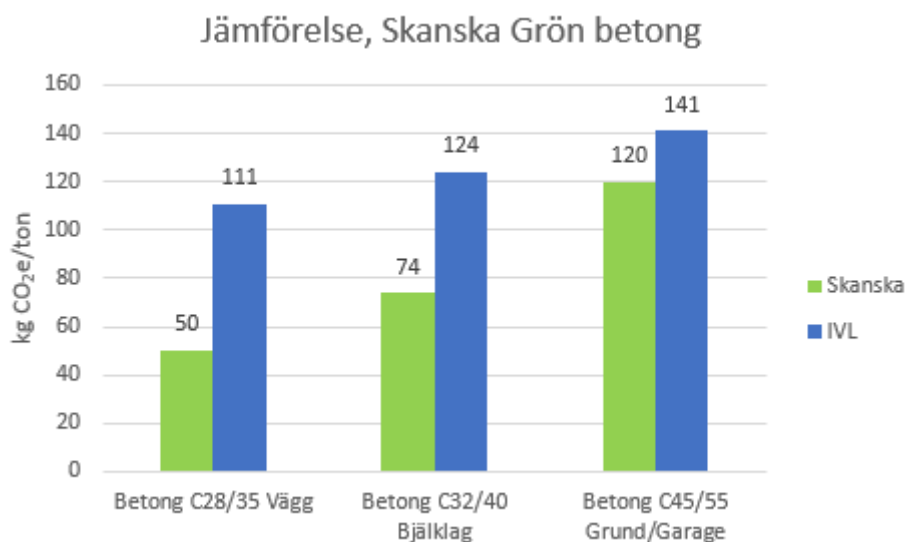
I figur Figur 25 redovisas även mängden biogent bundet kol, alltså det kolet som är upptaget till träets biomassa. Det bundna kolet ska inte redovisas i en klimatdeklaration utan är enbart med för att ge en uppfattning om potentialen att lagra koldioxid i trä. Det bör vara av intresse att naturen har en naturlig process att fånga in koldioxid från luften och lagra kolet enbart med hjälp av solens energi. Hur biogent bundet kol bör bedömas och redovisas kräver dock mer forskningen och kunskap för att förhindra en suboptimering där alla byggnader som använder trä i någon form kan få noll nettoutsläpp enligt klimatdeklarationerna. Om en stor del av de byggnadsmaterial vi använder kom från hållbart skogsbruk istället för att göra nya utsläpp till atmosfären kan bostadsbeståndet i framtiden utgöra en betydande kolsänka i ett större kretslopp, detta kräver dock att materialet kommer från hållbart skogsbruk, har tillräckligt lång livslängd och kan tas om hand på ett hållbart sätt i slutet av sin användning.

Utsläpp av CO₂e, medvetna materialval

Genom att göra en jämförelse av klimatpåverkan för olika byggnadsdelar och använda detta som en vägledning vid utformning påvisades nyttan av att göra medvetna val tidigt i en projekteringsprocess. Att använda trä är ett bra sätt att sänka klimatpåverkan, men om detta är målet bör inte enbart valet av material utan även leverantör beaktas. Klimatpåverkan från de olika stomalternativen beräknades även med leverantörer med låg klimatpåverkan för att undersöka hur hybridstommen då presterade i förhållande till de övriga stomalternativen.

Genom att jämföra klimatdeklarationer för olika material, se Bilaga 2: Sammanställning av Materialdata, blev det tydligt att inte bara materialval, utan även val av tillverkare, spelar stor roll för stomsystemets koldioxidutsläpp. Inom Skanska finns det exempel där medvetna val av tillverkare varit en del av miljöåtgärderna för att sänka ett projekts klimatpåverkan, i detta fall köp av armering från leverantören Celsa, som använder vattenkraft och stor del återvunnet stål. Celsas EPD [39] påvisar att tillverkningen deras av armeringsstål släpper ut 370 kg CO₂e/ton vilket kan jämföras med genomsnittet som enligt IVL är 521 kg CO₂e/ton eller med visst stål köpt från Polen som släpper ut 886 kg CO₂e/ton under skede A1-3 [40].

Som nämndes tidigare rapporten pågår det utveckling för att göra tillverkningsprocesserna bättre för betong och stål. Ett initiativ från Skanska för att minska utsläppen är Skanskas Gröna Betong. I grön betong har en andel av det traditionella portlandcementet ersatts med andra bindemedel. Enligt EPD för Skanskas gröna betong [41] anges den betydligt lägre klimatpåverkan än medelvärdet enligt IVL, se Figur 27.



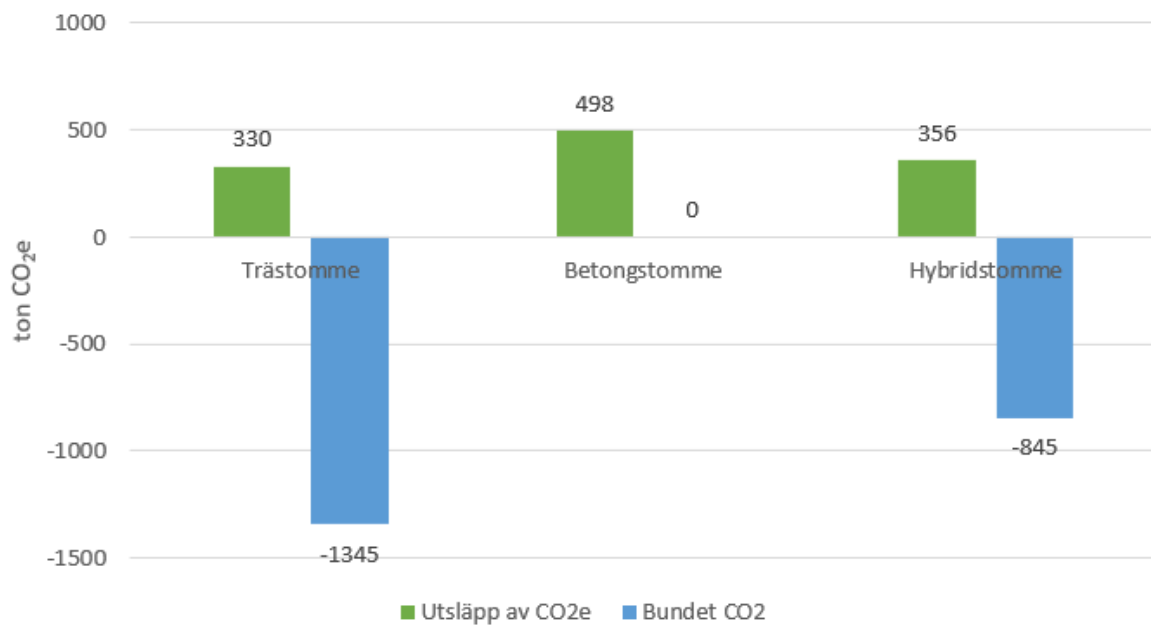
Figur 27. Jämförelse mellan EPD för Skanska Grön Betong och generisk data från IVL

För att kontrollera klimatpåverkan med aktiva klimatval valdes material från leverantörer med låg klimatpåverkan för de huvudsakliga stommaterialen, stål, trä och betong, se Tabell 16.

Tabell 16. Skillnad mellan generisk medelvärdesdata och ny data från miljödeklarerade produkter.

Material	Tillverkare	A1-A3 enligt EPD kgCO ₂ e/ton	A1-A3 enligt IVL kgCO ₂ e/ton
Betong	Skanska	Se Figur 27	Se Figur 27
KL-trä	Martinsons	106	140
Armeringsstål	Celsa	360	521
Håldäckselement	Contiga	126	183

I Figur 28 visas total klimatpåverkan från stommalternativ 1-3 när aktiva materialval gjordes. Här syns det att alla stommars klimatpåverkan har sänkts avsevärt samt att klimatpåverkan för stomalternativ 3, hybrid, nästan motsvarar den som för stomalternativ 1, KL-trästemmen. I kombination med klimatsmarta materialval är det alltså möjligt att nå samma resultat som en renodlad trästomme.



Figur 28. Totala utsläpp för stommar med aktiva materialval

5 Slutsats

Som nämnts tidigare saknas en universell lösning för ett stomsystem, vare sig det är byggt av betong eller trä finns flera tänkbara lösningar. Vid utvärderingen av resultatet är det därför värt att nämna att samtliga stomalternativ hade kunnat optimerats för att sänka den enskilda stommens klimatavtryck samt att det fanns en del förenklingar och antaganden vid utformningen. Detta arbete är och bör ses som en tidig undersökning av alternativa stomlösningar och resultatet bör främst användas för att jämföra de olika alternativen mot varandra. Fler studier och mer detaljerad projektering är nödvändig för mer exakta resultat.

Hur stomsystemet påverkar klimatet är någonting som bör utvärderas tidigt i varje projekt. Vilka mängder utsläpp olika lösningar av exempelvis väggar och bjälklag bidrar med är ett bra underlag för utformningen av de bärande konstruktionerna. Att minimera användandet av betong och prioritera trä har väldigt goda, miljömässiga effekter. Med generiska medelvärdesdata fick stomalternativ 1, KL-trä, drygt hälften så stor klimatpåverkan som stomalternativ 2, betong, men tappade flera kvadratmeter användbar area. I fallet med medelvärdesdata blev hybridkonstruktioner en typ av mellanväg, både med avseende på klimatpåverkan och utnyttjande av arean. Hybridkonstruktioner har stora möjligheter att sänka klimatpåverkan betydligt samtidigt som det är möjligt att optimera konstruktionen med hänsyn till användbar area men då bör även val av leverantörer ingå för att få bästa resultat, i detta fall uppnåddes ett resultat där hybridstommen motsvarade KL-trästommens klimatpåverkan. Användande av klimatdeklarerade byggmaterial främjar även den enskilde tillverkarens aktiva miljöarbete. Målet bör vara att använda trä i kombination med andra klimatsmarta lösningar. Att bygga en hybrid behöver alltså nödvändigtvis inte vara en mellanväg utan kan i kombination med miljömedvetna materialval ge stomlösningar som ur klimatsynpunkt är lika bra eller bättre än KL-trästommar och samtidigt ge större utnyttjande av byggrätten vilket är mycket fördelaktigt ekonomiskt.

När kraven på klimatdeklarationer införs 2022 kommer det inte att införas några gränsvärden för tillåtna utsläpp, dock har Boverket fått i uppdrag av regeringen att lägga fram en tidplan för just detta [42]. För att uppnå Sveriges klimatmål ska byggbranschens utsläpp ha en tydligt avtagande trend senast 2025 och en halvering av utsläppen 2030, enligt initiativet Fossilfritt Sverige [25]. Ett sätt att halvera utsläppen är alltså, som tidigare nämnts, att bygga stommar av trä, men de projekt som kan bygga störst uthyrnings/försäljningsbar area med minst klimatpåverkan bör rimligtvis vara de som har potential att bli mest lönsamma vilket innebär att användande av trä-hybridkonstruktioner kan vara viktig lösning för att tackla framtidens utmaningar.

6 Vidare studier

Att använda mer trä som stommaterial har flera fördelar, men ämnet är i stort behov av vidare studier. Pilotprojekt med hybridstommar, så som bland andra tidigare nämnd "A Working Lab" med flera, har stora möjligheter att driva utvecklingen mot miljömässigt hållbart byggande av hus genom att bidra med viktig kunskap och erfarenhet. Enbart vid användandet av massiva träelement finns flera frågeställningar, bland andra hur materialets akustik och brandegenskaper skiljer sig från en laborationsmiljö till det inbyggt i en verklig byggnad med olika springor, anslutningar och genomföringar osv. Fuktpromblem med trä är en fråga som inte heller tagits upp under denna rapport. Bör väderskydd användas under uppförandet eller räcker det med sanering efteråt? Gränssnitt mellan olika material, betong och trä exempelvis, med hänsyn till fukt samt täthet med hänsyn till ljud och brand. Finns det tillverkare av standardiserade lösningar för hybridkonstruktion, vad blir det för skillnad i pris och byggtid jämfört med andra alternativ? Det finns även utmaningar med klimatförbättrad betong främst kring torktider, frostmotstånd, tillgängligt råmaterial osv. Till sist, en väldigt stor och aktuell fråga om vi ska nå negativa utsläpp, hur ska biogent bundet kol värderas och redovisas i framtida klimatdeklarationer?

7 Referenser

- [1] "Sommar," 20 Januari 2020. [Online]. Available: <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/sommar-1.1084>.
- [2] "Svar på tal om klimatet," 21 Januari 2020. [Online]. Available: <https://www.naturskyddsforeningen.se/svar-pa-tal-om-klimatet>.
- [3] "Sveriges klimatmål och klimatpolitiska ramverk," 21 Januari 2020. [Online]. Available: <https://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhallet/Miljoarbete-i-Sverige/Uppdelat-efter-omrade/Klimat/Sveriges-klimatlag-och-klimatpolitiska-ramverk/>.
- [4] "Utsläpp av växthusgaser från bygg- och fastighetssektorn," 20 Januari 2020. [Online]. Available: <https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/miljoindikatorer---aktuell-status/vaxthusgaser/>.
- [5] Swedish Wood, Design of Timber Structures: Volume 1, Stockholm: Swedish forest industries federation, 2015.
- [6] Boverket, Boverkets byggregler (2011:6) – föreskrifter och allmänna råd, Karlskrona: Boverket, 2011.
- [7] Boverket, Boverkets konstruktionsregler, EKS 11, Karlskrona: Boverket, 2019.
- [8] Svenskt Trä, KL-Trähandbok Fakta och Projektering av KL-träkonstruktioner, Stockholm: Svenskt Trä, 2017.
- [9] Skidmore, Owings & Merrill LLP, "AISC Steel & Timber Research for High-Rise Residential Buildings," American Institute of Steel Construction, Chicago, 2017.
- [10] "Construction system," 28 Mars 2020. [Online]. Available: <http://www.hohowien.at/Projekt/Bau-System>.
- [11] "brock_commons_storyboards_0.pdf," 3 Mars 2020. [Online]. Available: https://www.naturallywood.com/sites/default/files/documents/resources/brock_commons_storyboards_0.pdf.
- [12] J. Henningsson, P. Hilmersson och K. Hedén, "A Working Lab - ett innovativt kontorshus i trä," *BYGG&TEKNIK*, vol. 111, nr 8, pp. 26-29, 2019.
- [13] Plan- och bygglag (2010:900), Stockholm: Finansdepartementet SPN BB, 2010.
- [14] Plan- och byggförordning (2011:338), Stockholm: Finansdepartementet SPN BB, 2011.
- [15] Bengt Dahlgren, Lunds universitet, Brandskyddslaget, Brandskyddshandboken #6 En handbok för projektering av brandskydd i byggnader, Lund: Lunds universitet, 2017.

- [16 "KL-trä ljud och brandegenskaper," 23 Februari 2020. [Online]. Available:
] <https://www.martinsons.se/sagade-travaror-och-byggprodukter/limtra-och-kl-tra-for-byggnadsobjekt/kl-tra/ljud-och-brandegenskaper/>.
- [17 "Isoleringsmaterial för byggisolering och brand," 23 Februari 2020. [Online]. Available:
] <https://www.rockwool.se/bra-att-veta/komfort-och-brandsakerhet/brandsakerhet/isolering-och-brand/>.
- [18 Boverket, "Bullerskydd i bostäder och lokaler," Boverket, Karlskorna, 2008.
]
- [19 Kommitén Lokaler, SS 25268:2007 Byggakustik - Ljudklassning av utrymmen i
] byggnader - Vårdlokaler, undervisningslokaler, dag- och fritidshem, kontor och hotell, Stockholm: Svenska institutet för standarder, 2018.
- [20 "Vägledning om LCA för byggnader," 24 Februari 2020. [Online]. Available:
] <https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/livscykelanalys/>.
- [21 Kommittén för hållbarhet hos byggnadsverk, SS-EN 15978:2011 Hållbarhet hos
] byggnadsverk - Värdering av byggnaders prestanda - Beräkningsmetod, Stockholm : Swedish Standards Institute, 2011.
- [22 Boverket, "Klimatdeklaration av byggnader, förslag på metod och regler. Slutrapport,"
] Boverket, Karskrona, 2018.
- [23 M. Erlandsson, T. Malmqvist, N. Francart och J. Kellner, "Minskad klimatpåverkan från
] flerbostadshus: LCA av fem byggsystem," Sveriges Byggindustrier, Stockholm, 2018.
- [24 "Information om initiativet," Fossilfritt Sverige, [Online]. Available: <http://fossilfritt-sverige.se/om-fossilfritt-sverige/>. [Använd 27 April 2020].
- [25 "Färdplan för fossilfri konkurrenskraft: Bygg- och Anläggningssektorn," Fossilfritt
] Sverige, 2018.
- [26 *Detaljplan för Mässområdet, Trollvägen 1 m fl, Tureberg*, Sollentuna: Sollentuna
] Kommun, 2019.
- [27 IVL Swedish Environmental Research Institute, "Byggsektorns Miljöberäkningsverktyg
] (Version 1.0.0.0221)," [Windows] Hämtad från: <https://www.ivl.se/sidor/vara-omraden/miljodata/byggsektorns-miljoberakningsverktyg/praktiska-verktygsfragor-och-installation.html>.
- [28 Autodesk, "Revit 2020 (Version 20.0.0.377)".
]
- [29 Kommittén för Areamätning, "SS 21054:2020 Area och volym för byggnader -
] Terminologi och mätning," Svenska institutet för standarder , Stockholm, 2020.

- [30 "Plattbärlag (PL)," Svensk Betong, [Online]. Available:
] <https://www.svenskbetong.se/bygga-med-betong/bygga-med-prefab/statik/plattbarlag-pl>.
] [Använd 18 Maj 2020].
- [31 Skanska Sverige AB, "Skanska Sveriges Botadsplattformar - Projekteringshandbok
] Arkitekt [Internt material]," 2019.
- [32 "Spännvidder KL-Trä | Martinsons," Martinsons, [Online]. Available:
] <https://martinsons.se/sagade-travaror-och-byggprodukter/limtra-och-kl-tra-for-byggnadsobjekt/kl-tra/spannvidder/>. [Använd 18 Maj 2020].
- [33 "Fördelar," Granab, [Online]. Available: <http://granab.se/fordelar/>. [Använd 18 Maj
] 2020].
- [34 "Solid Board / Classic Board - Arkiv," Knauf Danogips, [Online]. Available:
] <https://www.knauf.se/walltype/solid-board-classic-board/?parent=2641>. [Använd 18 Maj
] 2020].
- [35 "YK:23 Stål- och träregelvägg med oventilerad putsfasad [EI60] [53-58 dB]," Isover
] Saint-Gobian, [Online]. Available: <https://www.isover.se/solutions/yk23-stal-och-traregelvagg-med-oventilerad-putsfasad-ei60-53-58-db>. [Använd 18 Maj 2020].
- [36 "YM:21 Massivträvägg med oventilerad putsfasad [REI90] [54 dB]," Isover Saint-Gobain,
] [Online]. Available: <https://www.isover.se/solutions/ym21-massivtravagg-med-oventilerad-putsfasad-rei90-54-db>. [Använd 18 Maj 2020].
- [37 M. Larsson, M. Erlandsson, T. Malmqvist och J. Kellner, "Byggandets klimatpåverkan:
] Livscykelberäkning av klimatpåverkan för ett nyproducerat energieffektivt flerbostadshus
] med massiv stomme av trä," Sveriges Byggindustrier, Stockholm, 2016.
- [38 "Bostadspriser i Sollentuna," Svensk Mäklarstatistik, 6 Maj 2020. [Online]. Available:
] <https://www.maklarstatistik.se/omrade/riket/stockholms-lan/sollentuna/>.
- [39 IVL Svenska Miljöinstitutet, "S-P-00305," Celsa Steel Services, Halmstad, 2015.
]
- [40 IVL Svenska Miljöinstitutet, "NEPD-2082-939-EN," The Norwegian EPD Foundation,
] Oslo, 2020.
- [41 L. Dahlgren och N. Magnusson, "NEPD-1717-700-SE," Næringslivets Stiftelse for
] Miljødeklarasjoner, Oslo, 2019.
- [42 "Frågor och svar om klimatdeklarasjoner," Boverket, 20 Mars 2020. [Online]. Available:
] <https://www.boverket.se/sv/byggande/uppdrag/klimatdeklaration/om-klimatdeklarationer/>. [Använd 6 Maj 2020].

- [43 "KL-trä - formstabil starkt och enkel montering," 6 Februari 2020. [Online]. Available:
] <https://www.martinsons.se/sagade-travaror-och-byggprodukter/limtra-och-kl-tra-for-byggnadsobjekt/kl-tra/>.
- [44 Kommitén för Eurokoder, "SS-EN 1990 Eurokod - Grundläggande
] dimensioneringsregler för bärverk," Swedish Standards Institute, Stockholm, 2010.
- [45 K. Hedén och T. Sande Beiro, "Klimatberäkningar under byggskedet, A Working Lab,"
] Akademiska hus, 2019.

Bilaga 1: Beräkningar

Laster

I detta projekt användes Eurokoderna tillsammans med nationella valen i EKS11 som blev gällande från och med juli 2019.

- SS-EN 1990 Grundläggande dimensioneringsregler för bärverk
- SS-EN 1991 Laster

Tabell 17. Säkerhetsklasser

Konstruktionsdel	Säkerhetsklass	γ_d
Balkar, pelare, vertikala skivor	3	1,0
Bjälklagsskivor, pålar, utfackningsväggar, uppstolpat tak	2	0,91
Grundkonstruktioner	1	0,83

Egentyngd

Egentyngden för konstruktionsdelar räknades fram med hjälp av tungheten för ingående material enligt SS-EN 1991-1-1 (Bilaga A), se

Tabell 18.

Tabell 18. Tungheter enligt SS-EN 1991-1-1 (Bilaga A).

Material	Tunghet, γ [kN/m ³]
Armerad betong	25
Konstruktionsvirke C24	4,2
Stål	78
Gips	6,8
Putsbruk	15
Mineralull	0,3

Till egentyngden av bjälklag adderades en jämt utbredd last för permanenta laster från installationer och lätta väggar enligt Tabell 19.

Tabell 19. Övriga egentyngder

Permanent laster	q_k [kN/m ²]
Lätta innerväggar i vårdbostäder	0,5
Yttertakskonstruktion	0,5
Installationer i korridortak	1,0
Installationer i tak (övrigt)	0,25

Nyttig last

Variabla laster enligt EKS 11

Tabell 20, nyttig last, utdrag ur tabell C-1 EKS 11.

Lastkategori	Utbredd last, q_k [kN/m ²]	Koncentrerad last, Q_k [kN]
A: Bjälklag	2,0	2,0
A: Trappor	2,0	2,0
A: Balkonger	3,5	2,0
C1: Utrymmen med bord	2,5	3,0

Lastreducering:

Enligt SS-EN 1991-1-1, 6.3.1.2(10 och 11) kunde nyttig utbredd last, reduceras med hänsyn till area och antal våningar. Detta motiverades med att sannolikheten att hela ytor på flera våningsplan ska vara maxbelastad samtidigt minskar med ökat antal våningar och area.

Reducering med hänsyn till belastad area, α_A :

$$\alpha_A = \frac{5}{7}\psi_0 + \frac{A_0}{A} \leq 1,0$$

Där:

ψ_0 är 0,7 för lastkategori A och C.

$A_0 = 10 \text{ m}^2$

A är belastad area.

Reducering med hänsyn till antal våningar α_n :

$$\alpha_n = \frac{2 + (n - 2)\psi_0}{n}$$

Där:

n är antalet våningsplan av samma lastkategori ($n > 2$) ovanför de belastade bärverksdelarna

ψ_0 är 0,7 för lastkategori A och C.

Tabell 21. Lastreduktionsfaktor, nyttig last

Lastkategori	ψ_0	ψ_1	ψ_2
A	0,7	0,5	0,3
C	0,7	0,7	0,6

Snölast

Snölast enligt SS-EN 1991-1-3 och EKS11

$$S = S_k \cdot C_e \cdot C_t \cdot \mu_1$$

Där

Snözon 2,0:

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

Exponeringsfaktor, C_e , normal topografi:

$$C_e = 1,0$$

Termisk koefficient, C_t , normalt isolerat tak:

$$C_t = 1,0$$

Formfaktor, μ_1 , låglutande pulpettak ($\alpha \leq 30^\circ$):

$$\mu_1 = 0,8$$

Karaktäristisk snölast, S :

$$\Rightarrow S = 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,8 = 1,6 \text{ kN/m}^2$$

Tabell 22. Lastreduceringsfaktor, snölast

ψ_0	ψ_1	ψ_2
0,7	0,4	0,2

Ingen hänsyn togs till snödrift/snöficka

Vindlast

Utvändig vindlast beräknades enligt SS-EN 1991-1-4 och EKS11 som $w_e = q_p \cdot C_{pe,i}$

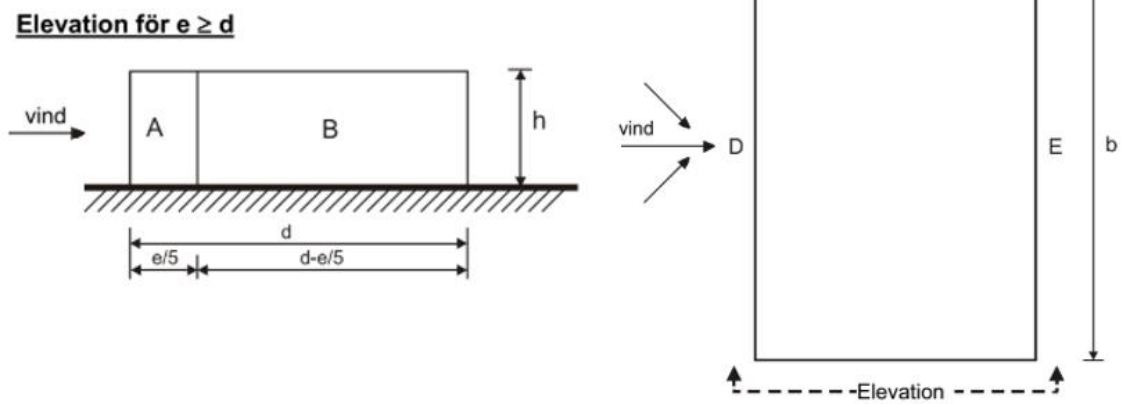
Referensvind medelvärde, $v_b = 24 \text{ m/s}$. Terrängtyp III. Eftersom $h < b$ beräknas vindlasten som en strimla, dvs konstant vindtryck över hela fasaden och referenshöjd, $z_e = h \approx 13,2 \text{ m}$

$$\Rightarrow q_p = 0,63 \text{ kN/m}^2$$

Formfaktor $C_{pe,10}$ används enligt EKS11 för global analys av hela byggnaden medan $C_{pe,1}$ används för infästningar och lättare delar så som utfackningsväggar. Se Tabell 23 och Figur 29 nedan.

Tabell 23. Formfaktor enligt Tabell 7.1 SS-EN 1991-1-4

Zon	A		B		C		D		E	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,5	



Figur 29. Zonindelning enligt figur 7.5 SS-EN 1991-1-4

För invändig vindlast används $c_{pi} = 0,2$ respektive $c_{pi} = -0,3$

Tabell 24. Lastreduceringsfaktor för vind

ψ_0	ψ_1	ψ_2
0,3	0,2	0,0

Lastkombinationer

Brottgränstillstånd

Dimensionerande last är högsta av:

6.10a

$$\gamma_d \cdot 1,35 \cdot G_k + \gamma_d \cdot 1,5 \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

6.10b

$$\gamma_d \cdot 1,2 \cdot G_k + \gamma_d \cdot 1,5 \cdot Q_{k,i} + \gamma_d \cdot 1,5 \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

Bruksgränstillstånd

Nedböjningen begränsas till $\frac{l}{300}$ för balkar och bjälklag

Korttidsdeformation (Karaktäristisk)

6.14b

$$1,0 \cdot G_k + 1,0 \cdot Q_{k,i} + \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

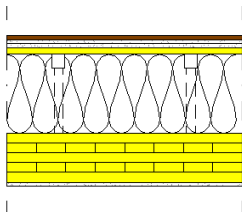
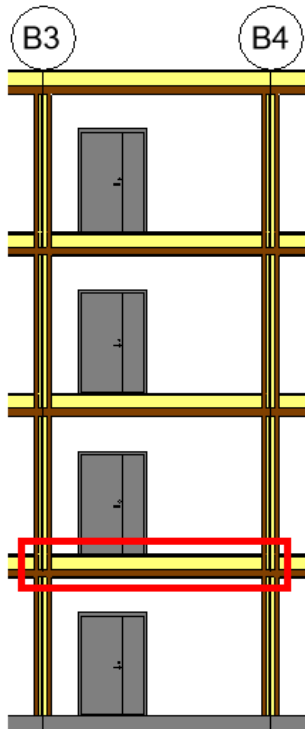
Långtidslast (Kvasi-permanent)

6.16b

$$1,0 \cdot G_k + 1,0 \cdot Q_{k,i} + \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

Dimensionskontroller, Stomalternativ 1

KL-Bjälklag, stommalternativ 1.



Beräkning av 1 m bred strimla av bjälklag i KL-trä med uppstolpat golv, fritt upplagd med moment kring styva axeln. Spännvidd: $l = 4,65$ m

C24	$f_{m,k} = 24$ MPa
	$f_{v,k} = 4$ MPa
	$\gamma_M = 1,25$
Serviceklass 1	$k_{mod} = 0,8$
Lastvaraktighet M	
Säkerhetsklass 2	$\gamma_d = 0,91$

Dimensionerande hållfasthet:

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{m,k}}{\gamma_M} = \frac{0,8 \cdot 24}{1,25} = 15,36 \text{ MPa}$$

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_M} = \frac{0,8 \cdot 4}{1,25} = 2,56 \text{ MPa}$$

Permanenta laster	[kN/m ²]
Egentyngd	1,25
Lätta väggar vårdbostäder	0,5
Installationer i tak	0,25
Σ	$g_k = 2,0$

Nyttiga laster	[kN/m ²]
Lastkategori A: Bjälklag	2,0
Σ	$q_k = 2,0$

Dimensionerande last:
Lastkombination 6.10.b

$$q_d = \gamma_d \cdot 1,2 \cdot g_k + \gamma_d \cdot 1,5 \cdot q_k$$

$$q_d = 0,91 \cdot 1,2 \cdot 2 + 0,91 \cdot 1,5 \cdot 2$$

$$q_d = 4,91 \text{ kN/m}$$

Moment:

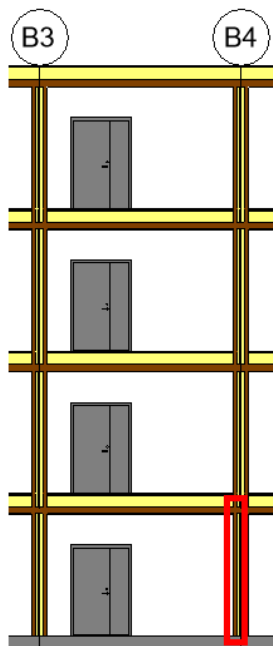
$$M_{Ed} = \frac{q_d \cdot l^2}{8} = \frac{4,91 \cdot 4,65^2}{8} = 13,28 \text{ kNm}$$

$$W_{erf} = \frac{M_{ed}}{f_{m,d}} = \frac{13,28 \cdot 10^3}{15,36 \cdot 10^6} = 8,64 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

Tvärkraft:

$$V_{Ed} = \frac{q_d \cdot l}{2} = \frac{4,91 \cdot 4,65}{2} = 11,42 \text{ kN}$$

KL-Vägg, stommalternativ 1



Permanent laster	[kN/m ²]	Area [m ²]	Antal plan	[kN/m]
Bärande innervägg	0,5	3	4	6
Bjälklag	1,6	2,325	4	14,9
Yttertaks konstruktion	0,5	2,325	1	1,2
Mellanvägg	0,5	2,325	3	3,5
Installationer	0,25	2,325	4	2,3
			Σ	27,9

Nyttiga laster	[kN/m ²]	Area [m ²]	Antal plan	[kN/m]
A1	2,0	2,325	3	14,0
Snölast	1,6	2,325	1	3,7

Reducering med hänsyn till antal våningar α_n :

$$\alpha_n = \frac{2 + (n - 2)\psi_0}{n}$$

$$\alpha_n = \frac{2 + (3 - 2) \cdot 0,7}{3}$$

$$\alpha_n = 0,9$$

Nyttig last som huvudlast: $k_{mod} = 0,8$

Säkerhetsklass 3: $\gamma_d = 1,0$

Lastkombination 6.10.a

$$F_d = \gamma_d \cdot 1,35 \cdot G_k + \gamma_d \cdot 1,5 \cdot (\psi_{0,A1} \cdot Q_{k,A1} \cdot \alpha_n + \psi_{0,S} \cdot Q_{k,S})$$
$$F_d = 1,0 \cdot 1,35 \cdot 27,9 + 1,0 \cdot 1,5 \cdot (0,7 \cdot 14,0 \cdot 0,9 + 0,7 \cdot 3,7)$$
$$F_d = 54,78 \text{ kN/m}$$

Lastkombination 6.10.b

$$F_d = \gamma_d \cdot 1,2 \cdot G_k + \gamma_d \cdot 1,5 \cdot Q_{k,A1} \cdot \alpha_n + \gamma_d \cdot 1,5 \cdot Q_{k,S} \cdot \psi_{0,S}$$
$$F_d = 1,0 \cdot 1,2 \cdot 27,9 + 1,0 \cdot 1,5 \cdot 14,0 \cdot 0,9 + 1,0 \cdot 1,5 \cdot 3,7 \cdot 0,7$$
$$F_d = 56,27 \text{ kN/m}$$

3 lager, KL-Trä, C24

$$t_1 = t_3 = 30 \text{ mm}$$

$$t_2 = 20 \text{ mm}$$

$$t_{tot} = 80 \text{ mm}$$

(1 m bred strimla)

$$A_{x,net} = 0,06 \text{ m}^2$$

$$I = 42,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$I_{ef} = 39,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

Reduktionsfaktor, k_c

$$i_{ef} = \sqrt{I_{ef}/A_{net}} = \sqrt{42,7 \cdot 10^{-6}/0,06} = 0,026 \text{ m}$$

$$\lambda = \frac{l_e}{i_{ef}} = \frac{3}{0,026} = 116,73$$

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{116,73}{\pi} \sqrt{\frac{21 \cdot 10^6}{7,4 \cdot 10^9}} = 1,98$$

$$k = 0,5 \cdot (1 + \beta_c(\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,1(1,98 - 0,3) + 1,98^2) = 2,54$$

$$k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} = \frac{1}{2,54 + \sqrt{2,54^2 - 1,98^2}} = 0,242$$

Normalkraft:

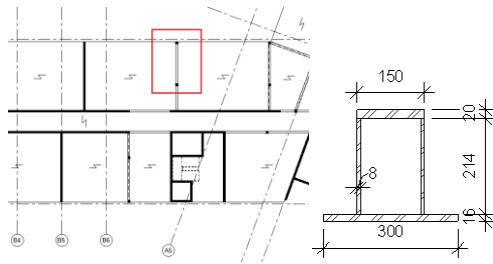
$$N_{c,0,Ed} = F_d \cdot 1 = 56,27 \cdot 1 = 56,27 \text{ kN}$$

$$N_{c,0,Rd} = f_{c,0,d} \cdot A \cdot k_c = \frac{21 \cdot 10^6 \cdot 0,8}{1,25} \cdot 0,06 \cdot 0,242 = 195,1 \text{ kN}$$

$$N_{c,0,Ed} = 56,27 < N_{c,0,Rd} = 195,1 \text{ OK!}$$

Dimensionskontroller, Stomalternativ 2

Stålbalk, stomalternativ 2



Spännvidd, $l = 4,5$ m

Längd HD/F, $b = 7,2$ m

Fritt upplagd balk

Säkerhetsklass 3: $\gamma_d = 1,0$

Stålsort S275:

$f_y = 275$ MPa

$\gamma_M = 1,0$

$\epsilon = 0,92$

$\eta = 1,2$

TK1

$I = 1,14 \cdot 10^{-4}$ m⁴

$W_{pl} = 1,06 \cdot 10^{-3}$ m³

Permanent laster	[kN/m²]	Area [m²/m]	[kN/m]
HD/F med uppstolpat golv	3,8	7,2	27,36
Stålbalk			1
Installationer i tak	0,25	7,2	1,8
Lätta innerväggar	0,5	7,2	3,6
		Σ	33,76
Nyttiga laster	[kN/m²]	Area [m²/m]	[kN/m]
C1	2,5	7,2	18
		Σ	18

Lastreducering mht areaeffekt, α_A :

$$\alpha_A = \frac{5}{7} \psi_0 + \frac{A_0}{A} \leq 1,0$$

$$\alpha_A = \frac{5}{7} 0,7 + \frac{10}{7,2 \cdot 4,5}$$

$$\alpha_A = 0,81$$

Dimensionerande last:

Lastkombination 6.10.a

$$q_d = \gamma_d \cdot 1,35 \cdot g_k + \gamma_d \cdot 1,5 \cdot \psi_0 \cdot q_k \cdot \alpha_A$$

$$q_d = 1,0 \cdot 1,35 \cdot 33,76 + 1,0 \cdot 1,5 \cdot 0,7 \cdot 18 \cdot 0,81$$

$$q_d = 60,89 \text{ kN/m}$$

Lastkombination 6.10.b

$$q_d = \gamma_d \cdot 1,2 \cdot g_k + \gamma_d \cdot 1,5 \cdot q_k \cdot \alpha_A$$

$$q_d = 1,0 \cdot 1,2 \cdot 33,76 + 1,0 \cdot 1,5 \cdot 18 \cdot 0,81$$

$$q_d = \mathbf{62,38 \text{ kN/m}}$$

Moment:

$$M_{Ed} = \frac{q_d \cdot l^2}{8}$$

$$M_{Ed} = \frac{62,38 \cdot 4,5^2}{8}$$

$$M_{Ed} = 157,9 \text{ kNm}$$

Tvårsnittsklass 1:

$$M_{pl,Rd} = W_{pl} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{pl,Rd} = 1,06 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{275 \cdot 10^6}{1,0}$$

$$M_{pl,Rd} = 291,25 \text{ kNm} > M_{Ed} = 157,09 \text{ kNm} \text{ OK!}$$

Tvärkraft:

$$V_{Ed} = \frac{q_d \cdot l}{2}$$

$$V_{Ed} = \frac{62,38 \cdot 4,5}{2}$$

$$V_{Ed} = 140,36$$

Lådtvårsnitt:

$$V_{pl,Rd} = \frac{\eta \sum (h_w t_w)}{\sqrt{3}} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{1,2 \cdot 3,488 \cdot 10^{-3} \cdot 275 \cdot 10^6}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{1,0}$$

$$V_{pl,Rd} = 664,55 \text{ kN} > V_{Ed} = 140,36 \text{ OK!}$$

Nedböjning:

Karaktäristisk last 6.14.b

$$q_d = 1,0 \cdot g_k + 1,0 \cdot q_k$$

$$q_d = 1,0 \cdot 33,76 + 1,0 \cdot 18$$

$$q_d = 51,76 \text{ kN/m}$$

Max nedböjning

$$w_{max} = \frac{l}{300}$$

$$w_{max} = \frac{4500}{300} = 15 \text{ mm}$$

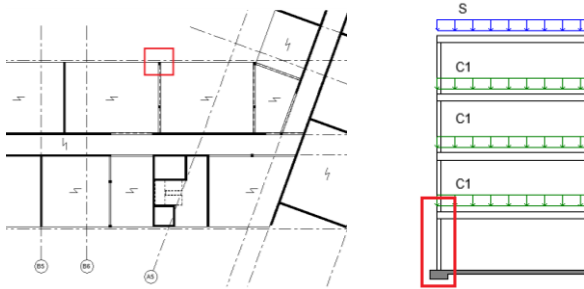
Fritt upplagd balk

$$w = \frac{5 \cdot q_d \cdot l^4}{384 \cdot E \cdot I}$$

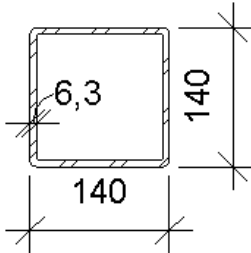
$$w = \frac{5 \cdot 51,76 \cdot 10^3 \cdot 4,5^4}{384 \cdot 2,1 \cdot 10^{11} \cdot 1,14 \cdot 10^{-4}}$$

$$w = 12 \text{ mm} < 15 \text{ mm} \text{ OK!}$$

Stålpelare, stomalternativ 2



Säkerhetsklass 3: $\gamma_d = 1,0$



Stålsort S275:

$$f_y = 275 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{M1} = 1,0$$

$$A = 3,33 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$I = 9,84 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

Permanenta laster	[kN/m ²]	Area [m ²]	Antal plan	[kN]
Utfackningsvägg	0,55	21,6	3	35,64
Bjälklag	3,8	16,2	4	246,24
Yttertaks konstruktion	0,5	16,2	1	8,1
Mellansvägg	0,5	16,2	3	24,3
Installationer	0,25	16,2	4	16,2
Balk			4	9
Pelare			4	12
			Σ	351,48
Nyttiga laster	[kN/m ²]	Area [m ²]	Antal plan	[kN]
C1	2,5	16,2	3	121,5
Snölast	1,6	16,2	1	35,92

Reducering med hänsyn till antal våningar α_n :

$$\alpha_n = \frac{2 + (n - 2)\psi_0}{n}$$

$$\alpha_n = \frac{2 + (3 - 2) \cdot 0,7}{3}$$

$$\alpha_n = 0,9$$

Lastkombination 6.10.a

$$Q_d = \gamma_d \cdot 1,35 \cdot G_k + \gamma_d \cdot 1,5 \cdot (\psi_{0,C1} \cdot Q_{k,C1} \cdot \alpha_n + \psi_{0,S} \cdot Q_{k,S})$$
$$Q_d = 1,0 \cdot 1,35 \cdot 351,48 + 1,0 \cdot 1,5 \cdot (0,7 \cdot 121,5 \cdot 0,9 + 0,6 \cdot 35,92)$$
$$Q_d = \mathbf{621,64 \text{ kN}}$$

Lastkombination 6.10.b

$$Q_d = \gamma_d \cdot 1,2 \cdot G_k + \gamma_d \cdot 1,5 \cdot Q_{k,C1} \cdot \alpha_n + \gamma_d \cdot 1,5 \cdot Q_{k,S} \cdot \psi_{0,S}$$
$$Q_d = 1,0 \cdot 1,2 \cdot 351,48 + 1,0 \cdot 1,5 \cdot 121,5 \cdot 0,9 + 1,0 \cdot 1,5 \cdot 35,92 \cdot 0,6$$
$$Q_d = 618,13 \text{ kN}$$

Risk för knäckning

Knäcklängd

$$L_{cr} = L \cdot \beta$$

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

Tröghetsradie

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

$$i = \sqrt{\frac{9,84 \cdot 10^{-6}}{3,33 \cdot 10^{-3}}} = 0,054 \text{ m}$$

Slankhetsparameter

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i \cdot \pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}}$$

$$\bar{\lambda} = \frac{3}{0,054 \cdot \pi} \sqrt{\frac{275 \cdot 10^6}{210 \cdot 10^9}} = 0,64$$

Reduktionsfaktor

Varmvalsat rör ger knäckningskurva, a, reduktionsfaktor blir:

$$\chi = 0,87$$

Bärförmåga

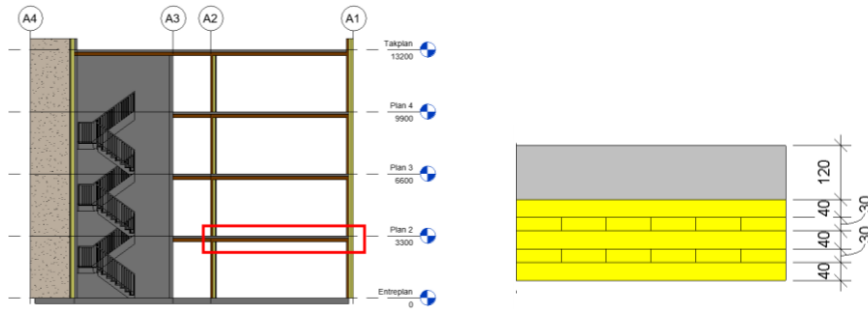
$$N_{Rd} = \chi \cdot A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$N_{Rd} = 0,87 \cdot 3,33 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{275 \cdot 10^6}{1,0}$$

$$N_{Rd} = 802,14 \text{ kN} > N_{Ed} = 621,64 \text{ kN} \quad \mathbf{OK!}$$

Dimensionskontroller, Stomalternativ 3

Bjälklag, stommalternativ 3



$$L = 7,2 \text{ m}$$

1 m bred strimla

Permanenta laster	[kN/m²]
Egentyngd	3,8
Lätta väggar vårdbostäder	0,5
Installationer i tak	0,25
Σ	4,55

Nyttiga laster	[kN/m²]
Lastkategori A: Bjälklag	2,0
Σ	2,0

Dimensionerande last:

Lastkombination 6.10.b

$$q_d = \gamma_d \cdot 1,2 \cdot g_k + \gamma_d \cdot 1,5 \cdot q_k$$

$$q_d = 1,0 \cdot 1,2 \cdot 4,55 + 1,0 \cdot 1,5 \cdot 2$$

$$q_d = 8,46 \text{ kN/m}$$

Moment:

$$M_{Ed} = \frac{q_d \cdot l^2}{8} = \frac{8,46 \cdot 7,2^2}{8} = 54,4 \text{ kNm}$$

Tvärfkraft:

$$V_{Ed} =$$

Virkesklass C24

Medellång last, serviceklass 1, $k_{mod} = 0,8$.

$$E_{0,05,trä} = 7,4 \text{ GPa}$$

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{m,k}}{\gamma_M} = \frac{0,8 \cdot 24}{1,25} = 15,36 \text{ MPa}$$

Betongklass C30/37

$$E_{cd} = 27,5 \text{ GPa}$$

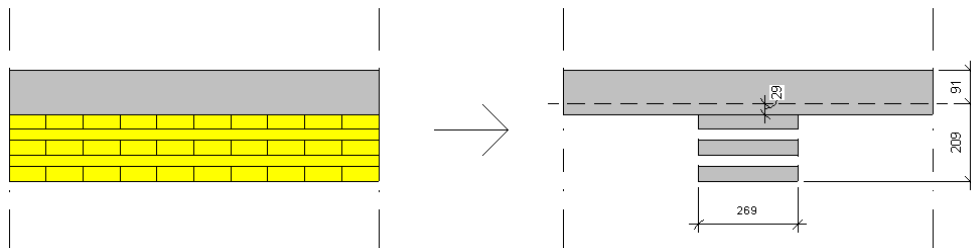
$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_C} = \frac{30}{1,5} = 20 \text{ MPa}$$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk0,05}}{\gamma_C} = \frac{2}{1,5} = 1,33 \text{ MPa}$$

Komposittvärsnitt:

$$n_0 = \frac{7,4}{27,5} = 0,269$$

Ekvivalent bjälklag i betong, antag full samverkan mellan trä och betong.



KL-Trä	$b_{eff,i}$	t_i [m]	Σt [m]	A_i [m ²]	z_i [m]	$A_i \cdot z_i$ [m ³]	I_i [m ⁴]
t_{btg}	1	0,12	0,12	0,12	0,06	0,0072	0,000265
t_1	0,269	0,04	0,16	0,010764	0,14	0,001507	2,64E-05
t_2	0	0,03	0,19	0	0,175	0	0
t_3	0,269	0,04	0,23	0,010764	0,21	0,00226	0,000152
t_4	0	0,03	0,26	0	0,245	0	0
t_5	0,269	0,04	0,3	0,010764	0,28	0,003014	0,000383
Σ				0,152291		0,013981	0,000826

Tyngdpunkt för ekvivalent betongtvärsnitt:

$$Z_{c.o.g} = \frac{\Sigma A_i \cdot z_i}{\Sigma A_i} = \frac{0,0139}{0,1523} = 0,091 \text{ m}$$

Yttroghetsmoment för ekvivalent betongtvärsnitt:

$$I_{ekv} = 8,26 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

Kontrollera max/min spänning samt spänning i gränsskikt mellan material:

$$Z_{max,tryck} = 0,091 \text{ m}$$

$$Z_{max,drag} = 0,3 - 0,091 = 0,209 \text{ m}$$

$$Z_{materialgräns} = 0,12 - 0,091 = 0,29 \text{ m}$$

$$\sigma_{ekv} = \frac{M_{Ed}}{I_{ekv}} \cdot z_i$$

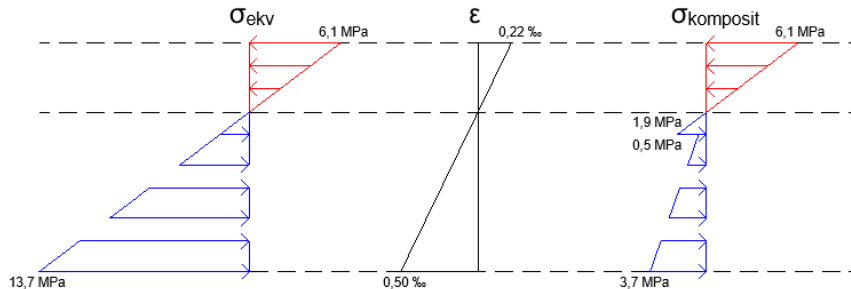
Plana tvärsnitt förblir plana, dvs töjningen är samma för ekvivalent betongtvärsnitt och komposittvärsnitt

$$\epsilon_{ekv} = \epsilon_{komposit} = \sigma_{ekv} \cdot E_{cd}$$

Sedan beräknas spänningarna för respektive material i komposittvärsnittet

$$\frac{\epsilon_{ekv}}{E_i} = \sigma_{komp}$$

	[m]		[Pa]			[Pa]
z ₁	0,091805	σ _{1,ekv}	6,05E+06	ε _{1,ekv}	2,20E-04	
z ₂	0,028195	σ _{2,ekv}	1,86E+06	ε _{2,ekv}	6,75E-05	σ _{2,komposit} 499,8E+3
z ₃	0,208195	σ _{3,ekv}	1,37E+07	ε _{3,ekv}	4,99E-04	σ _{3,komposit} 3,7E+6



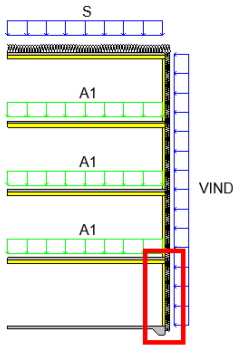
$$\sigma_{c,btg} = 6,1 \text{ MPa} < f_{cd} = 20 \text{ MPa} \text{ OK!}$$

$$\sigma_{t,btg} = 1,9 \text{ MPa} > f_{ctd} = 1,33 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{t,trä} = 3,7 \text{ MPa} < f_{m,d} = 15,36 \text{ MPa} \text{ OK!}$$

Liten del av betongens underkant riskerar att spricka men det är väldigt litet och tvärsnittet har gott om kapacitet kvar. Dessa beräkningar är grovt förenklade och antar full samverkan mellan materialen.

Yttervägg, stommalternativ 3



Permanenta laster	[kN/m ²]	Area [m ²]	Antal plan	[kN/m]
Yttervägg	1,1	3	4	13,2
Bjälklag	3,8	3,8	4	57,8
Yttertaks konstruktion	0,5	3,8	1	1,9
Mellanvägg	0,5	3,8	3	5,7
Installationer	0,25	3,8	4	3,8
			Σ	82,4

Nyttiga laster	[kN/m ²]	Area [m ²]	Antal plan	[kN/m]
A1	2,0	3,8	3	22,8
Snölast	1,6	3,8	1	6,1
			Σ	28,9

Reducering med hänsyn till antal våningar α_n :

$$\alpha_n = \frac{2 + (n - 2)\psi_0}{n}$$

$$\alpha_n = \frac{2 + (3 - 2) \cdot 0,7}{3}$$

$$\alpha_n = 0,9$$

Nyttig last som huvudlast: $k_{mod} = 0,8$

Säkerhetsklass 3: $\gamma_d = 1,0$

Lastkombination 6.10.a

$$F_d = \gamma_d \cdot 1,35 \cdot G_k + \gamma_d \cdot 1,5 \cdot (\psi_{0,A1} \cdot Q_{k,A1} \cdot \alpha_n + \psi_{0,S} \cdot Q_{k,S})$$

$$F_d = 1,0 \cdot 1,35 \cdot 82,4 + 1,0 \cdot 1,5 \cdot (0,7 \cdot 22,8 \cdot 0,9 + 0,7 \cdot 28,9)$$

$$F_d = \mathbf{163,13 \text{ kN/m}}$$

Lastkombination 6.10.b

$$F_d = \gamma_d \cdot 1,2 \cdot G_k + \gamma_d \cdot 1,5 \cdot Q_{k,A1} \cdot \alpha_n + \gamma_d \cdot 1,5 \cdot Q_{k,S} \cdot \psi_{0,S}$$

$$F_d = 1,0 \cdot 1,2 \cdot 82,4 + 1,0 \cdot 1,5 \cdot 22,8 \cdot 0,9 + 1,0 \cdot 1,5 \cdot 6,1 \cdot 0,7$$

$$F_d = 136,10 \text{ kN/m}$$

Vindlast:

$$q_d = \gamma_d \cdot 1,5 \cdot \psi_{0,v} \cdot q_{p,A1}(c_{pe,10} + c_{pi})$$

$$q_d = 1,0 \cdot 1,5 \cdot 0,3 \cdot 0,63(0,8 + 0,3)$$

$$q_d = 0,31 \text{ kN/m}$$

3 lager, KL-Trä, C24

$$t_1 = t_2 = t_3 = 40 \text{ mm}$$

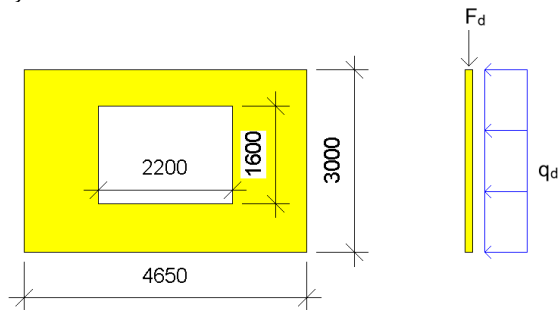
$$t_{tot} = 120 \text{ mm}$$

(1 m bred strimla)

$$A_{x,net} = 0,08 \text{ m}^2$$

$$I = 138,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$I_{ef} = 120,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$



$$F_d = 163,13 \text{ kN/m}$$

$$q_d = 0,31 \text{ kN/m}$$

Antag att lasten fördelar sig till området bredvid fönstret med fördelningsfaktor f_b

$$b_0 = 4,65 \text{ m}$$

$$b_{ef} = 2,45 \text{ m}$$

$$f_b = \frac{b_0}{b_{ef}} = \frac{4,65}{2,45} = 1,9$$

Kombinerat tryck och böjning

Reduktionsfaktor, k_c

$$i_{ef} = \sqrt{I_{ef}/A_{net}} = \sqrt{120,8 \cdot 10^{-6}/0,08} = 0,039 \text{ m}$$

$$\lambda = \frac{l_e}{i_{ef}} = \frac{3}{0,039} = 77,19$$

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{77,19}{\pi} \sqrt{\frac{21 \cdot 10^6}{7,4 \cdot 10^9}} = 1,309$$

$$k = 0,5 \cdot (1 + \beta_c(\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,1(1,309 - 0,3) + 1,309^2) = 1,407$$

$$k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} = \frac{1}{1,407 + \sqrt{1,407^2 - 1,309^2}} = 0,520$$

Normalkraft:

$$N_{c,0,Ed} = F_d \cdot f_b = 163,13 \cdot 1,9 = 309,37 \text{ kN}$$

$$N_{c,0,Rd} = f_{c,0,d} \cdot A \cdot k_c = \frac{21 \cdot 10^6 \cdot 0,8}{1,25} \cdot 0,08 \cdot 0,52 = 559,1 \text{ kN}$$

Böjande moment:

$$M_{Ed} = \frac{qd \cdot f_b \cdot l^2}{8} = \frac{0,31 \cdot 1,9 \cdot 3^2}{8} = 0,66 \text{ kNm}$$

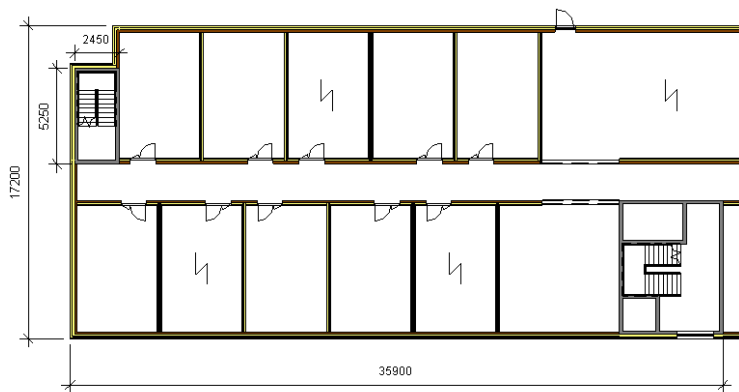
$$M_{Rd} = W_{Rd} \cdot f_{m,d} = \frac{120,8 \cdot 10^{-6}}{0,06} \cdot \frac{24 \cdot 10^6 \cdot 0,8}{1,25} = 30,9 \text{ kNm}$$

Utnyttjandegrad, kombinerat tryck och böjmoment:

$$\frac{M_{Rd}}{M_{Ed}} + \frac{N_{c,0,Ed}}{N_{c,0,Rd}} = \frac{30,9}{0,66} + \frac{309,37}{559,1} = 0,58 < 1,0 \text{ OK!}$$

Stabilitet, stommalternativ 3

För kontroll av stabilitet



Styvhet skiva, hela lagret av betong beräknas som en skiva.

$$\delta_{skiva} = \frac{L}{E_b \cdot t_b \cdot h_b} \left(\frac{L^2}{4 \cdot h_b^2} + \frac{3}{4} \right)$$

$$\delta_{skiva} = \frac{35,9}{25,83 \cdot 10^9 \cdot 0,12 \cdot 17,2} \left(\frac{35,9^2}{4 \cdot 17,2^2} + \frac{3}{4} \right)$$

$$\delta_{skiva} = 1,23 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

$$S_{skiva} = \frac{1}{1,23 \cdot 10^{-9}} = 8,13 \cdot 10^8$$

Styvhet skjuvvägg

$$\delta_{skjuvvägg} = \frac{H}{E_m \cdot t \cdot h} \left(\frac{4 \cdot H^2}{h^2} + 3 \right)$$

$$\delta_{skjuvvägg} = \frac{13,2}{27,5 \cdot 10^9 \cdot 0,4 \cdot 5,25} \left(\frac{4 \cdot 13,2^2}{5,25^2} + 3 \right)$$

$$\delta_{skjuvvägg} = 6,47 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

$$S_{skjuvvägg} = \frac{1}{6,47 \cdot 10^{-9}} = 1,54 \cdot 10^8$$

Lastfördelningen avgörs av C

$$C = \frac{S_{skiva}}{\delta_{skjuvvägg}} = \frac{8,13 \cdot 10^8}{1,54 \cdot 10^8} = 5,28$$

$5 < C < 10$ Vridning beaktas ej, lasten fördelas jämnt mellan trapphusen.

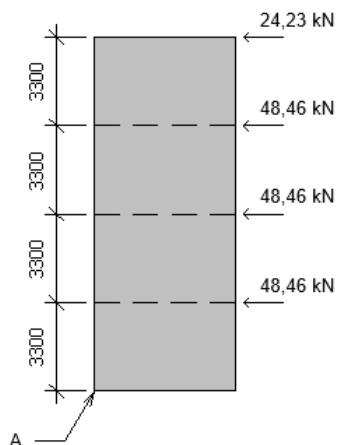
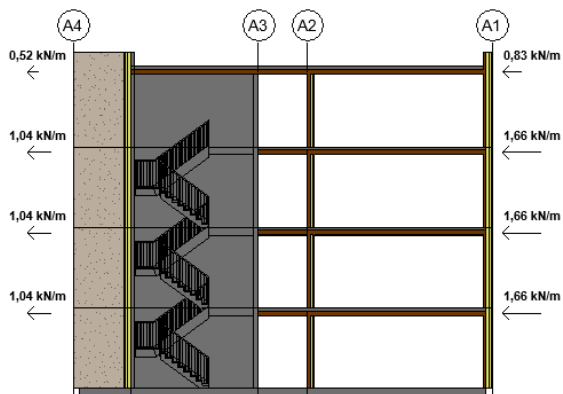
Vindtryck

$$W_{e,lovart} = q_k \cdot c_{pe,D} = 0,63 \cdot 0,8 = 0,504 \text{ kN/m}^2$$

$$W_{e,lä} = q_k \cdot c_{pe,E} = 0,63 \cdot (-0,5) = -0,315 \text{ kN/m}^2$$

Våningshöjden: 3,3 m

Halva lasten går till bjälklaget ovanför och halva till bjälklaget under.



Rotation kring A mht vind

$$M_{stjälpande,A} = 4 \cdot 3,3 \cdot 24,23 + 3 \cdot 3,3 \cdot 48,46 + 2 \cdot 3,3 \cdot 48,46 + 3,3 \cdot 48,46$$

$$M_{stjälpande,A} = 3,3 \cdot 8 \cdot 48,46 = 1279,34 \text{ kNm}$$

Egentyngd från trapphuset

$$M_{stabiliserande} = 0,2 \cdot 2 \cdot 13,2 \cdot 5 \cdot 25 + 0,4 \cdot 5 \cdot 13,2 \cdot 2,5 \cdot 25$$

$$M_{stabiliserande} = 660 + 1650 = 2310 \text{ kNm}$$

$$M_{stabiliserande} > M_{stjälpande,A} \text{ OK!}$$

Bilaga 2: Sammanställning av Materialdata

Tabell 25

Material	Tillverkare	A1-A3	A4	A5	Densitet [kg/m ³]	Produktionsland	Referens
		[kg CO ₂ e / ton]					
Armering							
Armeringsstål (klimatförbättrad)	Celsa Steel	360			7800	Sverige	S-P-00305
Armeringsstål Polen region 1	Skanska (Inköp)	886			7800	Polen	NEPD-2082-939-EN
Armeringsstål Polen region 2	Skanska (Inköp)	502			7800	Polen	NEPD-2083-939-EN
Armeringsstål Baltikum	Skanska (Inköp)	577			7800	Lettland & Litauen	NEPD-2084-939-EN
Armering, skrotbaserat (IVL LCR)	Generisk data	521			7800		BM
Betong							
Betong C28/35 (Grön väggbetong)	Skanska	50			2400		NEPD-1717-700-SE
Betong C32/40 (Grön bjälklagsbetong)	Skanska	74			2400		NEPD-1717-700-SE
Betong C45/55 (Grön garagebetong)	Skanska	120			2400		NEPD-1717-700-SE
Betong C25/30 vct 0.63 (klimatförbättrad)	Svensk Betong	93			2400		NEPD-1297-419-SE
Betong C30/37 vct 0.50	Svensk Betong	105			2400		NEPD-1296-419-SE
Betong C40/50-C50/60 (till HD/F bjl)	Svensk Betong	107			2400	Sverige	NEPD-1298-419-SE
Betong C30/37 vct 0.55	Byggindustrier AB	105			2400		NEPD-211-959-SE
Betong C45/55 vct 0.40	Byggindustrier AB	150			2400		NEPD-211-959-SE
Husbyggnadsbetong (vct 0,68, C25/30)	Generisk data	104			2400		BM
Husbyggnadsbetong (vct 0,55, C32/40)	Generisk data	124			2400		BM
Övrig armerad betongprefab, ospecificerad (C45/55, 5% arm.) (IVL LCR)	Generisk data	198			2400		BM
Betong förspännd							
HD/F hålbjälklag	UPB	247				Lettland	NEPD-397-280-EN
HD/F hålbjälklag	Contiga	126				Sverige	NEPD-1851-796-SE
HD/F hålbjälklag	Strängbetong AB	136				Sverige	NEPD-1713-696-SE
HD/F hålbjälklag (IVL LCR)	Generisk data	183					BM
Betong Prefabelement							
Väggelement, prefab	UPB	189			2570	Lettland	NEPD-401-280-EN
Väggelement, prefab	Contiga	149			2570	Sverige	NEPD-1852-796-SE
Väggelement, prefab	Strängbetong AB	163			2570	Sverige	NEPD-1960-867-SE
Fasad							
Fasad Puts	Weber	240			1600		NEPD-2024-895-EN
Fasad Puts	Generisk data	200			1600		BM
Gips							
Gipsskiva 12,5 mm	Knauf	219			712	Danmark	NEPD-354-246-EN
Gipsskiva 12,5 mm	Gyproc	189			720	Norge	NEPD-1260-406-EN
Gipsskiva, brand, 15,5 mm	Knauf	264			987	Danmark	NEPD-357-246-EN
Gipsskiva, brand, 15,4 mm	Gyproc	205			825	Norge	NEPD-1264-406-EN
Gipsskivor, kartonggipsskivor ospecificerad (IVL LCR)	Generisk data	272			900		BM
Gipsskivor, Brand	Generisk data	378			715		BM
Golv							
Uppreglat golvsystem, typ Granbab	Generisk data	680					BM
Golvjämning, flytspackel	Generisk data	220			1700		BM
Isolering							
Mineralull	Rockwool	1110			29	Norge & Danmark	NEPD-1762-738-EN
Mineralull	Paroc	1375			29	Sverige & Finland	NEPD-1976-873-EN
Mineralull	Isover	1118			29	Sverige	NEPD-2074-936-EN
Stenull (IVL RR)	Generisk data	1190			29		BM
Isolering Fasadskiva							
Fasadskiva	Isover	918			55		NEPD-1435-457-EN
Glasull Fasadskiva	Generisk Data	1150			55		BM
Plåttreglar							
Plåttreglar	Gyproc	2900			7800	Sverige	S-P-000782
Plåttreglar, elförzinkade (IVL LCR)	Generisk data	2427			7800		
Stål							
Prefabricerade stålkonstruktioner	UPB	2200				Lettland	NEPD-402-281-EN
Prefabricerade stålkonstruktioner	Contiga	2491				Sverige	NEPD-1928-851-SE
Prefabricerade stålkonstruktioner	Ruukki	2710				Finland	NEPD-324-204-EN
Trä KL							
KL-Trä	Martinsons	106			430	Sverige	NEPD-345-236-NO
Korslimmat trä (KL-trä av gran) (IVL LCR)	Generisk data	140			430		BM
Trä Limträ							
Plywood	Moelven	392			490	Sverige	NEPD-1579-604-SE
Plywoodskivor (IVL LCR)	Generisk data	204			500		BM
Trä Regel							
Furu/gran, hyvlad & sågad, 473 kg/m ³ u=16% (IVL LCR)	Generisk data	55			473		BM