



CHALMERS

Jämförelse mellan träbjälklag, betongbjälklag och samverkansbjälklag

För- och nackdelar, höjd, kostnad och miljöpåverkan

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet samhällsbyggnadsteknik

ISA KOLLBERG

**INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK
AVDELNING FÖR KONSTRUKTIONSTEKNIK**

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2021
www.chalmers.se

EXAMENSARBETE ACEX20

Jämförelse mellan träbjälklag, betongbjälklag och samverkansbjälklag

För- och nackdelar, höjd, kostnad och miljöpåverkan

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

ISA KOLLBERG

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för konstruktionsteknik

Lättviktskonstruktioner

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2021

Jämförelse mellan träbjälklag, betongbjälklag och samverkansbjälklag
För- och nackdelar, höjd, kostnad och miljöpåverkan
Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Samhällsbyggnadsteknik
ISA KOLLBERG

© ISA KOLLBERG, 2021

Examensarbete ACEX20
Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Chalmers tekniska högskola 2021

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för konstruktionsteknik
Lättviktskonstruktioner
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Telefon: 031-772 10 00

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Göteborg 2021

Jämförelse mellan träbjälklag, betongbjälklag och samverkansbjälklag

För- och nackdelar, höjd, kostnad och miljöpåverkan

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Samhällsbyggnadsteknik*

ISA KOLLBERG

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för konstruktionsteknik
Lättviktskonstruktioner
Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

Byggbranschen står inför en stor omställning för att göra produktionen av byggnader mer hållbar. En möjlighet att förändra byggsektorns utsläpp av framförallt koldioxid är materialval. Syftet med den här rapporten är att undersöka om och hur samverkansbjälklag kan vara med i omställningen och bidra till lägre koldioxidutsläpp och samtidigt klara av längre spännvidder. För att undersöka det här dimensioneras och jämförs tre olika bjälklag: KL-träbjälklag, betongbjälklag och samverkansbjälklag. De olika parametrar som jämförs är höjd, nedböjning, miljöpåverkan och kostnad. Materialens olika för- och nackdelar kommer också redogöras med hjälp av en litteraturstudie. Resultatet av dimensioneringen visar hur de olika bjälklagens höjder förhåller sig till varandra för spännvidderna 3 till 10 m. Det visar också hur stor nedböjningen blir för de olika höjderna. Diagram för miljöpåverkan visas också i resultatet. De visar utsläpp och upptag av koldioxid, samt skillnaden mellan utsläpp och upptag. Slutligen visas kostnaden för respektive bjälklag, materialkostnad, arbetskostnad och totala kostnaden.

Arbetets slutsats är att samverkansbjälklaget inte ger lägre total höjd för spännvidderna 3 till 10 m. Eftersom tanken med arbetet var att visa att samverkansbjälklag kan ha mindre dimensioner och samtidigt klara av längre spännvidder uppnåddes inte det här målet med den valda metoden. Anledningen till att samverkansbjälklagets dimensioner är större än KL-träbjälklagets beror troligtvis på att KL-träbjälklaget inte var dimensionerat på rätt sätt och att brandmotstånd inte har beräknats för KL-träbjälklaget (och inte heller för samverkansbjälklaget) och resultatet ger därför inte en rättvis bild av hur dimensioneringen ser ut i verkligheten. Trots att resultatet inte blev som det var tänkt visar beräkningen av miljöpåverkan att vid tillverkningen av betong frigörs stora mängder koldioxid. Det är något som måste tas på allvar och byggbranschen borde ta ansvar och undersöka miljövänligare alternativ. Resultatet visar också att vid användning av samverkansbjälklag tar träet upp mer koldioxid under tillväxten än vad som frigörs vid tillverkningen av betongen i bjälklaget. Vid dimensionering av brandmotstånd kommer KL-träskiktets höjd troligtvis ökas och mer trä kommer behövas vilket leder till att ännu mer koldioxid tas upp.

Nyckelord: KL-trä, betong, samverkan, bjälklag, jämförelse, koldioxid, miljöpåverkan, skjuvförbindare, kostnad, nedböjning

Comparison of cross-laminated timber slabs, concrete slabs and timber-concrete composite slabs

Advantages and disadvantages, height, costs and environmental impact

*Degree Project in the Engineering Program
Civil and Environmental Engineering*

ISA KOLLBERG

Department of Architecture and Civil Engineering
Division of Structural Engineering
Group for Light-Weight Structures
Chalmers University of Technology

ABSTRACT

The construction industry is facing a major readjustment to make the production of buildings more sustainable. An opportunity to change the construction sector's emissions, of mainly carbon dioxide, is the choice of materials. The purpose of this thesis is to investigate if and how timber-concrete composite (TCC) slabs can be a part of the transition and contribute to lower carbon dioxide emissions, and at the same time cope with longer spans. To investigate this, three different slabs are dimensioned and compared: cross-laminated timber (CLT) slabs, concrete slabs, and TCC slabs. The different parameters that are compared are height, deflection, environmental impact, and costs. The various advantages and disadvantages of the materials will also be described with the help of a literature study. The result of the dimensioning shows how the heights of the different slabs relate to each other for the spans of 3 to 10 meters. It also shows how large the deflection will be for the different heights. Diagrams for environmental impacts are also shown in the results. They show the emission and uptake of carbon dioxide, as well as the difference between emissions and uptake. Finally, the cost for each slab is shown, material costs, labor costs, and total costs.

The work's conclusion is that the evaluated solutions of TCC slab does not give a lower total height for the spans of 3 to 10 meters. Since the idea of the work was to show that TCC slabs can have smaller dimensions, this objective was not reached with the studied configurations. The reason why the dimensions of the TCC slab are larger than those of the CLT slabs is probably due to the fact that it was not properly optimized, Fire resistance has not been calculated for the CLT slab (nor for the TCC slab) and the result, therefore, does not give a fair picture of what the dimensions look like in reality. Despite the fact that the result did not turn out as intended, the calculation of the environmental impact shows that large amounts of carbon dioxide are released during the production of concrete. This is something that must be taken seriously, and the construction industry should take responsibility and investigate more environmentally friendly alternatives. The results also show that when using CCT slabs, the timber absorbs more carbon dioxide during growth than is released during the production of the concrete in the slab. When considering fire resistance in the dimensioning, the height of CLT layers will probably increase and more timber will be needed, which leads to even more carbon dioxide is being absorbed.

Key words: CLT, concrete, TCC, floor, slab, comparison, carbon dioxide, environmental impact, shear connectors, costs, deflection

Innehåll

| | |
|---|-----|
| SAMMANFATTNING | I |
| ABSTRACT | II |
| INNEHÅLL | III |
| FÖRORD | V |
| BETECKNINGAR | VI |
| | |
| 1. INTRODUKTION | 1 |
| 1.1 Bakgrund | 1 |
| 1.2 Syfte | 1 |
| 1.3 Metod | 1 |
| 1.4 Avgränsningar | 2 |
| | |
| 2. MATERIALEN | 3 |
| 2.1 Trä | 3 |
| 2.1.1 Varianter på bjälklag | 3 |
| 2.1.2 Miljöpåverkan | 4 |
| 2.2 Betong | 5 |
| 2.2.1 Varianter på bjälklag | 5 |
| 2.2.2 Miljöpåverkan | 5 |
| 2.3 Samverkan | 6 |
| 2.3.1 Varianter på bjälklag | 6 |
| 2.3.2 Miljöpåverkan | 8 |
| 2.4 Kostnad för de olika bjälklagen | 8 |
| | |
| 3. DIMENSIONERING | 9 |
| 3.1 Gemensamma värden | 9 |
| 3.1.1 Last | 9 |
| 3.1.2 Bredd på bjälklaget | 9 |
| 3.1.3 Spännvidd | 9 |
| 3.1.4 Dimensionerande moment | 9 |
| 3.1.5 Maximal nedböjning | 9 |
| 3.2 Träbjälklag: KL-trä | 10 |
| 3.2.1 Materialegenskaper | 11 |
| 3.2.2 Höjd baserat på lastbärande kapacitet | 13 |
| 3.2.3 Höjd baserat på nedböjning | 13 |
| 3.3 Betongbjälklag: plattbärlag | 14 |
| 3.3.1 Materialegenskaper | 15 |
| 3.3.2 Antal armeringsstänger baserat på lastbärande kapacitet | 16 |
| 3.3.3 Justering av höjd med hänsyn till tvärsnittets momentkapacitet och sprickmoment | 16 |

| | | |
|-------|---------------------------------------|----|
| 3.3.4 | Kontroll av täckande betongskikt | 18 |
| 3.3.5 | Nedböjning | 19 |
| 3.4 | Samverkansbjälklag: KL-trä och betong | 20 |
| 3.4.1 | Beräkningsgång | 20 |
| 3.4.2 | Samverkan | 20 |
| 4. | ANALYS OCH RESULTAT | 22 |
| 4.1 | Höjd | 22 |
| 4.2 | Nedböjning | 24 |
| 4.3 | Egentyngd | 24 |
| 4.4 | Miljöpåverkan | 26 |
| 4.5 | Kostnad | 28 |
| 5. | DISKUSSION | 31 |
| 5.1 | Litteratordiskussion | 31 |
| 5.2 | Resultatdiskussion | 31 |
| 6. | SLUTSATS | 34 |
| 7. | REFERENSER | 36 |
| 8. | BILAGA 1 | 39 |

Förord

Det här är mitt avslutande examensarbete i min högskoleingenjörsutbildning inom Samhällsbyggnadsteknik på Chalmers Tekniska Högskola. Examensarbetet omfattar 15 högskolepoäng och den här rapporten är resultatet av mitt arbete.

Först och främst vill jag tacka min mentor Emil Hagman, som jag haft genom mentorskapsprogrammet VENTOR under 2020/21, för inspirerade samtal om idéer när examensarbetet var i startgroparna. Jag vill även tacka Linda Cusumano för tips och inspiration i det inledande arbetet och hjälp med litteratur. Till sist vill jag tacka min examinator och handledare Robert Jockwer för allt stöd och all hjälp under arbetets gång.

Göteborg juni 2021

Isa Kollberg

Beteckningar

Latinska versaler

| | |
|--------------------|---|
| Q_d | Dimensionerande moment (lastbärande kapacitet) |
| A_b | Betongens area |
| A_s | Armeringens totala area |
| A_{si} | En armeringsstångs area |
| A_t | KL-träets area |
| E_{cm} | Betongens elasticitetsmodul |
| $E_{cm}(\infty)$ | Betongens elasticitetsmodul påverkad av långtidseffekter |
| E_{mean} | Träets medelelasticitetsmodul |
| E_t | KL-träets elasticitetsmodul påverkad av långtidseffekter |
| $(EI)_{ef}$ | Effektiv böjstyvhets för fler än ett skikt |
| $G_{9090,mean}$ | KL-träets medelrullskjuvmodul |
| $G_{9090}(\infty)$ | KL-träets rullskjuvmodul påverkad av långtidseffekter |
| G_{mean} | KL-träets skjuvmodul medelvärde |
| I | Yttröghetsmoment |
| I_b | Betongens yttröghetsmoment |
| I_{ef} | Effektivt yttröghetsmoment |
| I_I | Yttröghetsmoment i stadium I |
| L | Bjälklagets längd (spännvidd) |
| M_{cr} | Sprickmoment |
| M_d | Dimensionerande moment för armering (lastbärande kapacitet) |
| M_{Ed} | Dimensionerande moment (lastbärande kapacitet) |
| M_{Rd} | Momentkapacitet för armeringen |
| K_b | Förskjutningsmodul för betong i brukgränstillstånd |

Latinska gemena

| | |
|---------------|---|
| a | Avstånd från skiktets mittpunkt till den mekaniska mittpunkten |
| b | Bjälklagets bredd |
| c_{min} | minsta tillåtna värde på täckande betongskikt |
| $c_{min,b}$ | minsta tillåtna värde på täckande betongskikt med hänsyn till vidhäftning |
| $c_{min,dur}$ | minsta tillåtna värde på täckande betongskikt med hänsyn till korrosionsskydd |
| c_{nom} | nominellt värde på täckande betongskikt |
| d | avstånd från övre kant på betongbjälklag till draget armeringslager |
| d_g | största tillåtna nominella kornstorlek för ballast |
| e_i | bredd som behövs för att få plats med armeringslager |
| f_{cd} | dimensionerande tryckhållfasthet betong |
| f_{cd} | dimensionerande tryckhållfasthet betong |
| f_{ck} | karaktäristisk tryckhållfasthet betong |
| f_{cd} | dimensionerande tryckhållfasthet betong |
| f_{cm} | medeltryckhållfasthet betong |
| f_{ctm} | medelvärde för betongens draghållfasthet (vid ren dragning) |
| $f_{ctm,fl}$ | böjdraghållfasthet |
| f_d | dimensionerande hållfasthetsvärde |
| f_k | karaktäristiskt hållfasthetsvärde |
| f_{mk} | böjhållfasthet KL-trä |
| f_{vk} | skjuvhållfasthet betong |
| f_{yd} | dimensionerande värde draghållfasthet för armering |
| f_{yk} | karaktäristiskt värde draghållfasthet för armering |
| g_k | permanent last |

| | |
|------------------------------|--|
| h | höjd |
| h_b | betongens höjd i samverkansbjälklag |
| h_{TOT} | total höjd för samverkansbjälklag |
| k_1 | koefficient, nationell parameter |
| k_2 | koefficient, nationell parameter |
| k_{def} | omräkningsfaktor vid långtidseffekter, krypning |
| k_{mod} | omräkningsfaktor som beror av lastens varaktighet och fuktkvot |
| n | antal armeringsstänger |
| q_k | jämnt fördelad variabel last |
| $\left(\frac{1}{r}\right)_s$ | krökning på grund av krypning |
| s_b | avstånd från betongskiktets tyngdpunkt till den mekaniska tyngdpunkten |
| t_i | tjocklek på skikt i KL-trä |
| x_b | tyngdpunkt för betongskiktet |
| x_t | tyngdpunkt för KL-trä |
| x_{TP} | mekanisk tyngdpunkt |
| w | nedböjning |
| w_{fin} | slutlig nedböjning |
| $w_{fin,s}$ | slutlig nedböjning på grund av krympning |
| w_{inst} | momentan nedböjning |
| z | koordinat placerad i tvärsnittets centrum |
| z_h | inre hävarm |
| Δc_{dev} | tolerans, måttavvikelse för täckande betongskikt |

Grekiska gemena

γ_b gammavärde för betong

| | |
|--------------------|---------------------------------|
| γ_C | partialkoefficient för betong |
| γ_M | partialkoefficient för trä |
| γ_i | gammavärde för KL-träskikt |
| γ_S | partialkoefficient för armering |
| ε_{cs} | slutligt krympmått |
| ρ_{mean} | medeldensitet |
| σ | spänning |
| σ_{cr} | sprickspänning |
| φ | kryptal |

Övriga

| | |
|---------------|--|
| \emptyset | armeringens diameter |
| \emptyset_0 | ekvivalent diameter för buntade armeringsstänger |
| \emptyset_b | tvärarmeringens diameter |

Förkortningar

| | |
|-----|-----------------------------------|
| CLT | cross-laminated timber |
| KL | korslimmat |
| RH | Relativ fuktighet |
| SIS | Svenska institutet för standarder |
| TCC | timber-concrete composite |
| WSP | Analys- och teknikkonsultföretag |

1. Introduktion

1.1 Bakgrund

Byggbranschen står inför en stor omställning för att göra produktionen av byggnader mer hållbar. 2018 svarade bygg- och fastighetssektorn för 21 % av Sveriges totala utsläpp av växthusgaser (Boverket, 2021). Det finns olika tänkbara områden att förändra för att minska miljöpåverkan från byggnader. I en artikel från Naturvårdsverket (2020) sammanställer de några: material, transport, energi och uppvärmning samt avfall och byggbehov. De tänkbara åtgärderna avseende material omfattar bl.a. att byta ut material mot mer hållbara alternativ (Naturvårdsverket, 2020). Byggnader består av många olika delar och en stor andel av byggnadens material går åt till stomsystem. Stomsystemet kan bestå av trä, betong eller stål och oftast används fler än ett material. Eftersom tillverkningen av råvarorna i betong (cement) och stål (järnmalm) bidrar till stora utsläpp av koldioxid väljer fler och fler företag, beställare och entreprenörer att bygga byggnader av trä för att bl.a. minska miljöpåverkan (Svenskt trä, 2018). Däremot finns det nackdelar med trästomme. Höga träbyggnader är lätta och kan börja svaja, brandrisken är större och restaurering av byggnaden är svårare, akustik-kraven kan vara svåra att uppnå i en träbyggnad, antalet våningar begränsas eftersom träkomponenter behöver större dimensioner för att klara av lika stor last som betong eller stål och dessutom uppnå brandkrav. En av komponenterna som påverkar byggnadens totala höjd är bjälklag. Om bjälklaget har mindre tvärsnitt kanske ytterligare en våning kan läggas till. Men som sagt krävs större dimensioner av trä jämfört med betong eller stål.

Ett alternativ till både träbjälklag och betongbjälklag är samverkansbjälklag. I början av 20-talet användes samverkansbjälklag för första gången i Europa (Dahlin & Jarefalk, 2020). I brist på stål till armering användes trä istället. Ett samverkansbjälklag är alltså ett bjälklag som består av trä i underkant, eftersom trä har hög draghållfasthet, och består av betong i överkant, eftersom betong har hög tryckhållfasthet. Det bör teoretiskt sett leda till att bjälklagets dimension kan minskas, i jämförelse med rent träbjälklag. Men hur påverkas andra parametrar såsom lastbärande kapacitet, kostnad, miljöpåverkan och nedböjningar?

1.2 Syfte

Projektets syfte är att jämföra material på bjälklag. Ett bestående av trä, ett av betong och ett som är kombinerat betong och trä. Det görs för att framförallt undersöka om och hur samverkansbjälklag kan dimensioneras med mindre dimensioner än KL-träbjälklag. Samt undersöka hur stor miljöpåverkan är jämfört med betongbjälklag och hur mycket respektive bjälklag kostar att tillverka och montera.

1.3 Metod

1. En litteraturstudie ska göras för att undersöka hur ett bjälklag av trä kombineras med betong. Litteraturstudien ska ta fram för- och nackdelar, lastbärande kapacitet, mittnedböjning, kostnadsberäkning samt miljöavtryck. Litteraturstudien ska även omfatta betong och trä där samma parametrar ska tas fram.

2. Dimensionering av bjälklagen. Utgå från en bestämd last, en bestämd bredd och ett bestämt spännviddsspänn. Ta fram ett betongbjälklag, ett träbjälklag och ett samverkansbjälklag som klarar lasten och nedböjningskrav. Analysera hur mycket material som krävs för att klara av lasten, hur stor nedböjningen blir, hur mycket det kostar att tillverka och montera det här materialet och hur stor miljöpåverkan tillverkningen av materialet har.
3. De fyra balkarna jämförs avseende dessa parametrar: dimensioner, mittnedböjning, miljöpåverkan och kostnad. Slutsatser dras och eventuella idéer till framtiden tas fram.

1.4 Avgränsningar

Vid dimensionering av KL-träbjälklaget kommer konstruktionsvirke C24 användas då det är en av klasserna som används vid tillverkning av KL-trä (Svenskt trä, 2017). Problematiken som uppstår med akustik i trähus kommer inte att undersökas.

Betongbjälklaget kommer att beräknas som en balk. Det här görs för att förenkla beräkningen och betrakta bjälklaget som en balk där lasten bärs i en riktning, dvs den kortaste (bredden). Bjälklaget kommer endast ha ett lager armering där armeringen kommer ha samma kvalitet och diameter. Beräkningarna kommer göras med betongklass C30/37. Väljer exponeringsklass XC1 då bjälklaget kommer vara inomhus med låg luftfuktighet (Svenska institutet för standarder, 2016). Väljer klass N och RH är 50 % p.g.a. att bjälklaget kommer befinna sig i uppvärmd inomhusmiljö (Al-Emrani, Engström, Johansson, & Johansson, 2013).

Vid dimensionering av samverkansbjälklaget kommer KL-träet vara konstruktionsvirke C24 och betongen kommer vara av betongklass C30/37.

För nedböjningen antas att rekommenderat gränsvärde på nedböjning av alla bjälklag är liknande som för träbalkar. Se avsnitt 3.1.5.

Bjälklaget som kommer dimensioneras är avsett att vara ett lägenhetsskiljande bjälklag i bostäder.

2. Materialen

I det här kapitlet redovisas litteraturstudien som gjorts för de olika materialen. Bland annat nämns för- och nackdelar, olika varianter på bjälklag för respektive material samt beslut om vilket bjälklag som kommer dimensioneras. Dessutom undersöks kostnad och miljöpåverkan för varje material.

2.1 Trä

Trä som byggmaterial har många fördelar, bland annat är det lätt och det har hög hållfastighet i förhållande till sin vikt, vikten gör det också enklare att transportera materialet och det minskar transportkostnader, det har hög prefabriceringsgrad samtidigt som det är enkelt att bearbeta på plats, isoleringsförmågan är god och det är förnybart (Svenskt trä, 2017).

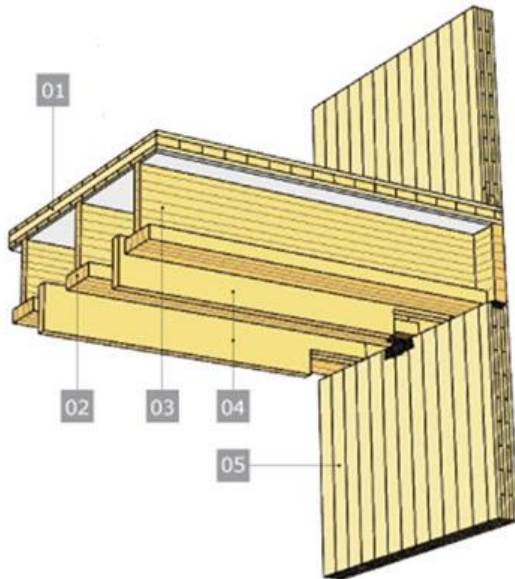
Vikten är inte enbart en fördel då det blir problem när träbyggnader är höga, nämligen att konstruktioner kan börja svaja av vinden (Stening & Wall, 2017). Dessutom är trä fukt känsligt vilket kan leda till röt- och insektsangrepp samt vid brand är det större risk, jämfört med betong- eller stålstomme, att bärande stomdelar i trä förstörs och byggnaden kollapsar innan människor utrymt. Det kan också vara svårt att uppnå akustiska krav i träbyggnader.

Träkonstruktioner måste kunna motstå en fullt utvecklad brand och fortfarande uppfylla bärförmåga (R), integritet (E) och isolering (I). Konstruktionen måste dessutom uppfylla dessa funktionskrav i en viss tid, t.ex. 30 minuter (Svenskt trä, 2003). Trots att trä är känsligt mot brand finns det stor potential till att uppfylla REI 90 eller högre (Svenskt trä, 2003).

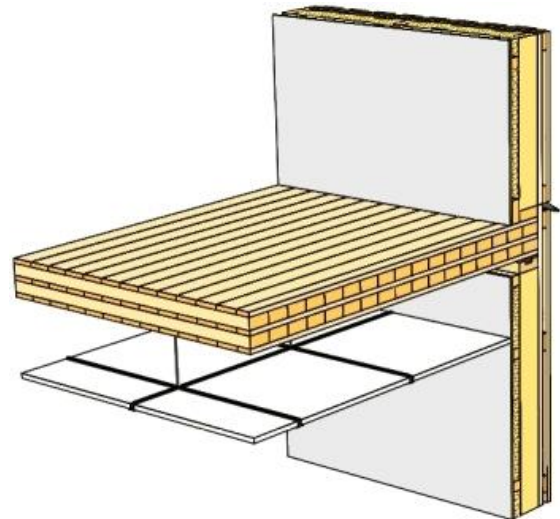
2.1.1 Varianter på bjälklag

Det finns många olika varianter av träbjälklag. Vilket som används beror på dels på var i byggnaden det ska vara och vad bjälklaget ska klara av. Är det ett bottenbjälklag över uteluftsventilerad eller inneluftsventilerad kryppgrund, ett källarbjälklag, ett lägenhetsskiljande eller icke lägenhetsskiljande mellanbjälklag, ett vindsbjälklag, ett takbjälklag eller ett terrassbjälklag? Oavsett vilket av dessa bjälklag det rör sig om kan konstruktionsvirke eller limträ användas (Svenskt trä, u.d.). Andra typer av bärande träkonstruktion kan vara lättbalk eller massivträ (Svenskt trä, u.d.). I Figur 1-3 nedan visas tre exempel på hur ett träbjälklag kan vara uppbyggt.

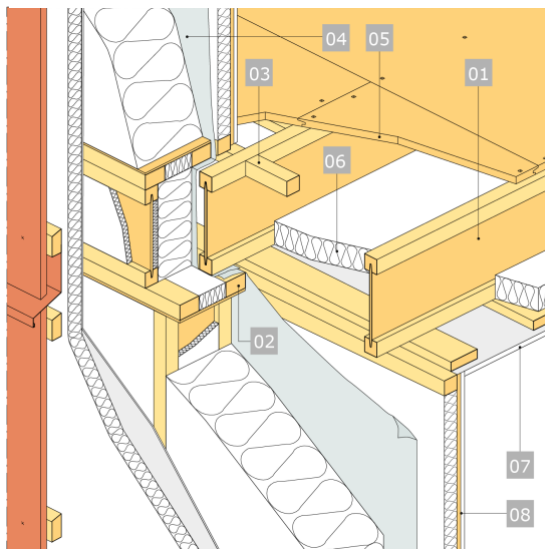
I den här uppsatsen kommer KL-träbjälklag vara huvudfokus. Korslimmat trä (KL-trä) är som namnet antyder limmade brädor som korsvis lagt bildar ett starkare byggmaterial än de enskilda brädorna hade varit för sig själv (Svenskt trä, 2017). KL-träbjälklag består av ett antal skikt och skiktjocklekar och kompletteras oftast med lager, antingen ovanpå eller undertill eller både och, för att klara ljud- och brandkrav (Svenskt trä, 2017). Bjälklagen kan prefabriceras och eftersom trä har relativt låg vikt ger det montage- och transportfördelar (Svenskt trä, 2017).



Figur 1 KL-träskiva, bärverk i limträ för undertak samt underfläns av limträ. Svenskt trä (u.d.). Publiceras med medgivande av upphovsrättsinnehavaren.



Figur 2 KL-träbjälklag med pendlat undertak. Svenskt trä (u.d.). Publiceras med medgivande av upphovsrättsinnehavaren.



Figur 3 Golvbjälklag med lättbalk. Svenskt trä (u.d.). Publiceras med medgivande av upphovsrättsinnehavaren.

2.1.2 Miljöpåverkan

Trä som material är förnybart så länge solen lyser. När träd växer omvandlas koldioxid från atmosfären till biomassa genom fotosyntesen och i ett naturligt kretslopp frigörs koldioxiden när träd dör och förmultnar eller vid skogsbränder (Svenskt trä, 2003). Den delen av skogen som utvinns för att tillverka träprodukter behåller koldioxiden ända tills produkterna gjort sitt och förbränns, då kan energi utvinnas ur förbränningen. I Sverige brukas skogen enligt principen att avverkningen

av skogen inte ska överskrida tillväxten (Svenskt trä, 2017). Rent konkret innebär principen att för varje träd som avverkas planteras två nya (Svenska skogen, u.d.). Det tillåter att skogens kretslopp fortsätter om och om igen.

KL-trätillverkningen är en energisnål process som, genom biprodukter (sågspån och trärester), bidrar med att producera energi (Svenskt trä, 2017). Enligt Träguiden (Svenskt trä, 2017) binder limträ över 700 kg CO₂/m³ vid tillväxten. Medan vid förmultning eller förbränning frigörs ca 0,1-0,2 kg CO₂/kg material (Johansson, 2019). För att lättare jämföra är utsläppet ca 42-84 kg CO₂/m³, om medeldensiteten är 420 kg/m³, se Tabell 3.1.

2.2 Betong

Betong har många fördelar och stora variationsmöjligheter. Fördelarna är bland annat hög tryckhållfasthet, brandsäkert och att ljudkraven är lätta att uppnå. En sak som både är en fördel och nackdel är att betong är tungt. Det gör sig bra för ljuddämpning och lufttätet, men dessvärre gör tungheten att transporten är svårare och blir dyrare. Andra nackdelar är låg draghållfasthet och det faktum att betong inte är förnybart, det är däremot 100 % återvinningsbart (Svensk betong, u.å). Återvinning kan bland annat vara att betongen krossas och används som ballast i ny betong (Svensk betong, u.d.).

2.2.1 Varianter på bjälklag

De olika varianterna av betongbjälklag är TT-plattor, håldäck, massiva plattor och plattbärlag (Svensk betong, 2017). I den här uppsatsen kommer massiva plattor vara huvudfokus. I massiva plattor är armeringen antingen slak eller spänd och bredden är vanligtvis upp till 3,1 m (Svensk betong, u.d.).

2.2.2 Miljöpåverkan

Den råvaran i betong som bidrar mest till betongens totala utsläpp är cement. Cement tillverkas av kalksten och fungerar som bindemedel i betong. Kalkstenen hettas upp och det är under upphettningen som koldioxid, CO₂, frigörs genom en process som heter kalcinering. Dessutom bildas CO₂ vid upphettningen då fossila bränslen används (Stripple, Sternhufvud, & Skårman, 2005).

Betongens utsläpp av CO₂ per kubikmeter redovisas i en rapport från Svensk betong (2017). För standardbetong är utsläppen 251 kg CO₂/m³ medan för klimatförbättrad betong är utsläppen 218 kg CO₂/m³. Med klimatförbättrad menas betong som har 15 procent lägre klimatpåverkan (Svensk betong, 2017). Minskningen beror på utvecklingen av cement, effektivare användning av energi och användning av biobränslen istället för fossila bränslen (Svensk betong, 2017). I en rapport gjord av WSP på uppdrag av Naturvårdsverket har de tagit fram åtgärder för klimatförbättrad betong där de bland annat föreslår alternativa bindemedel, receptoptimering, operativa förbättringar, alternativa bränslen i cementugnar, karbonatisering, cirkularitetsåtgärder och alternativa material (Balian, Pädam, Uppenberg, & Wadström, 2021). Med dessa åtgärder bedöms utsläppen minska med ca 40 % (Balian, Pädam, Uppenberg, & Wadström, 2021).

Utöver att det frigörs koldioxid när cement tillverkas, startar en kemisk process direkt när den färdiga betongen kommer i kontakt med luften, karbonatisering, vilket innebär att koldioxid binds i betongen (Andersson, Gustafsson, Ljungkrantz, & Stripple, 2018). Det är en långsam process men den pågår under hela betongkonstruktionens livslängd och det gäller även återanvänd betong, som t.ex. betongkross (Andersson, Gustafsson, Ljungkrantz, & Stripple, 2018). Det genomsnittliga upptaget av koldioxid är 23% av koldioxiden som frigörs vid tillverkningen av cement, den procenten inkluderar hela betongens livslängd och även återanvändning (Andersson, Gustafsson, Ljungkrantz, & Stripple, 2018).

2.3 Samverkan

Samverkan mellan byggnadsmaterial sker mer eller mindre i många sammanhang. Till exempel är betong tillsammans med armering en samverkanskonstruktion. I den här rapporten ska det dock fokuseras på samverkan mellan betong och trä i bjälklag. Teoretiskt sett går det ut på att underdelen av bjälklaget är trä och tar dragkrafterna som uppstår och den övre delen består av betong och tar tryckkrafterna som uppstår (Svenskt trä, 2017).

De fördelar som det här ger jämfört ett rent träbjälklag är ökad böjstyvhet, ökad lastbärande kapacitet, lättare att uppnå ljud- och brandkrav samt mindre känslighet mot vibrationer (Dias, Schänzlin, & Dietsch, 2018). Nackdelar med att använda samverkansbjälklag jämfört med ett bjälklag av enbart trä är att fukt från betongen kommer i kontakt med KL-träet, dessutom blir byggtiden längre om betongen gjuts på byggplatsen. Betongen har lägre böjstyvhet och högre krypning när betongen härdar och därför kan det vara bra att stötta upp konstruktionen för att undvika större momentan nedböjning under härdningen (Lukaszewska, 2009).

Fördelar jämfört med ett rent betongbjälklag är mindre volym betong vilket leder till lättare transporter samt lättare egentyngd, ökad användning av förnybara material och därav mindre koldioxidutsläpp (Dias, Schänzlin, & Dietsch, 2018). Nackdelen med att använda samverkansbjälklag (trä istället för armering) är att tvärsnittet blir större eftersom trä har sämre draghållfasthet än stål och behöver större dimensioner för att klara av samma last (Dias, Schänzlin, & Dietsch, 2018).

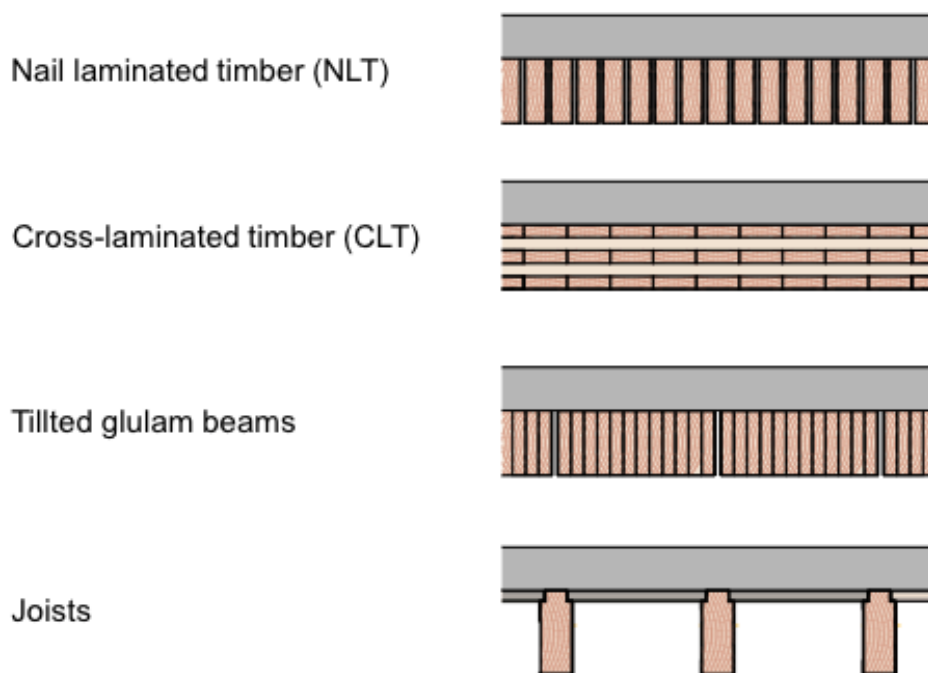
2.3.1 Varianter på bjälklag

Precis som för träbjälklag och betongbjälklag finns det olika varianter av samverkansbjälklag, se Figur 4. Det bjälklaget som kommer att dimensioneras är den andra varianten som visas i figuren, där trädelen av skiktet består av KL-trä.

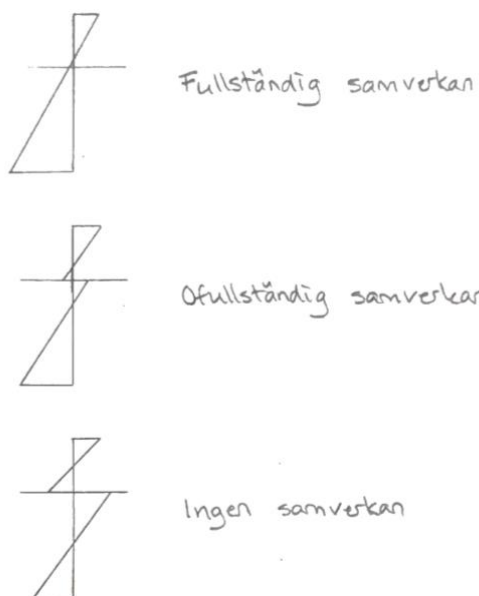
För att samverkansbjälklag ska ge det resultat som eftersträvas krävs någon typ av skjuförbindare. Skjuförbindarens uppgift är att föra över krafter mellan materialen. Om töjningsfördelningen i tvärsnittet studeras syns antingen två neutrala lager, ett i varje material, eller ett neutralt lager. Vid två neutrala lager finns det ingen samverkan och vid ett neutralt lager är det fullständig samverkan mellan materialen, se Figur 5. Fullständig samverkan är dock svårt att uppnå och det förekommer oftast en ofullständig samverkan (Lukaszewska, 2009). Olika typer av förbindare och hur samverkan beräknas beskrivs i avsnitt 3.4.2.

Vid tillverkning av samverkansbjälklag prefabriceras KL-träskiktet och betongen kan antingen gutas på plats eller också prefabriceras. Vid gjutning på plats placeras KL-träskiktet först och används som form för betongen.

Cross-sections



Figur 4 Olika varianter på samverkansbjälklag. Bild av Konrad Merz www.mkp-ing.com.



Figur 5 Töjningsfördelningen i samverkansbjälklagets tvärsnitt. Författarens egen bild.

2.3.2 Miljöpåverkan

Då samverkansbjälklaget består av trä och betong och dessa materials miljöpåverkan har beskrivits i tidigare avsnitt kommer de siffrorna att appliceras på samverkansbjälklaget också.

2.4 Kostnad för de olika bjälklagen

Kostnadsuppskattningar för tillverkning och montering av bjälklagen är svårt att göra. Det är många faktorer som ska spela in. För att kunna göra någon typ av jämförelse har Wikells Sektionsfakta NYB (2020) använts. Det är ett kalkylsystem för nybyggnadsprojekt. I Wikells Sektionsfakta NYB (2020) har de utöver priser också med arbetstiden varje enhetsskikt tar. Bjälklagen består av olika enhetsskikt, t.ex. består betongbjälklaget av direktslipad yta vid gjutning, självkompakterande betong, armering och elementluckform (det visas tydligare i Tabell 4.1). De har alltså med hur lång arbetstid varje enhetsskikt behöver. Det är en effektiv arbetstid som inkluderar färdigställandet av enhetsskiktet, grovstädning, mindre störningar, passnings-/anslutningsarbete till fullt färdigt arbete. Det är därför totalkostnaden kan inkludera arbetskostnaden. De baserar arbetskostnaden på en arbetslön som är 212 kr i timmen. De har också med ett omkostnadspåslag på 272 % av arbetslönen.

3. Dimensionering

I det här avsnittet beskrivs ekvationer och metoder för att dimensionera de olika bjälklagen.

3.1 Gemensamma värden

För att kunna jämföra bjälklagen bestämdes vissa gemensamma värden för att samtliga bjälklag ska ha samma förutsättningar. För varje dimensionering visas figurer på de olika bjälklagen som har använts i beräkningarna.

3.1.1 Last

Den nyttiga lasten, q_k , som är en variabel last bestämdes till 2 kN/m². Det motsvarar lasten som kan tänkas vara utbredd på bjälklaget i bostäder (Boverket, 2019).

Dessutom belastas bjälklaget med en permanent last, egentyngden, g_k . Denna last varierar beroende på material. Eftersom materialen har olika densitet.

Den dimensionerande lasten beräknades som:

$$Q_d = (1,35 * g_k + 1,5 * q_k) * b \quad (1)$$

3.1.2 Bredd på bjälklaget

Bredden på samtliga bjälklag bestämdes till 0,6 m, b. Denna bredd är inte normen för de bjälklag som ska dimensioneras men för att göra en rättvis bedömning valdes en relativt smal bredd.

3.1.3 Spännvidd

För samtliga bjälklag kommer spännvidderna 3-10 m, L, att jämföras.

3.1.4 Dimensionerande moment

Det dimensionerande momentet beräknas på samma sätt för samtliga bjälklag:

$$M_{Ed} = \frac{Q_d * L^2}{8} \quad (2)$$

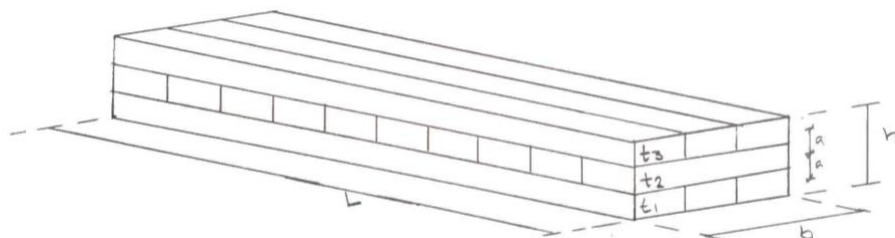
3.1.5 Maximal nedböjning

Enligt Eurokod 5 (Svenska institutet för standarder, 2005) är rekommenderade gränsvärden för slutlig nedböjning på träbalkar (i det här fallet betraktas bjälklag, men antas att det är liknande rekommendation för bjälklag samt för resterande av materialen) på två upplag. Det gränsvärdet är satt som ett krav för maximal nedböjning för att bjälklagen ska anses klara lasten.

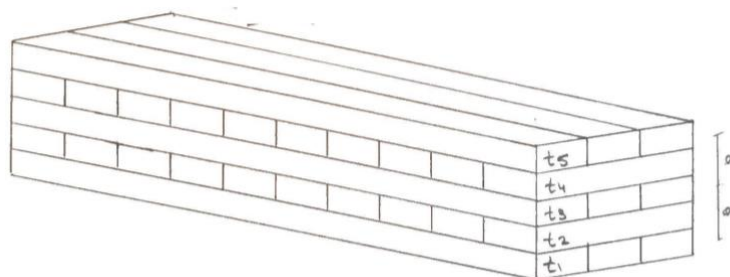
$$w = \frac{L}{300} \quad (3)$$

3.2 Träbjälklag: KL-trä

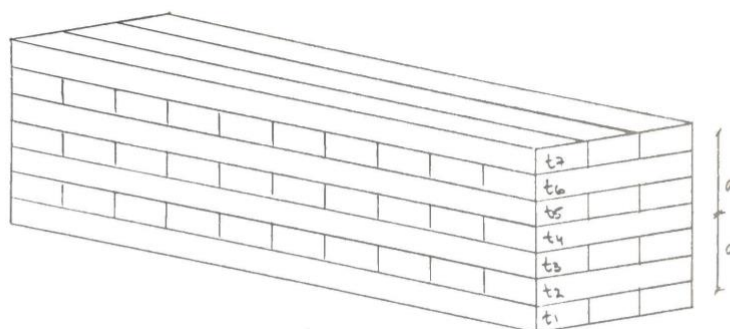
Dimensioneringen av KL-träbjälklaget har skett enligt Svenska institutet för standarder, Eurokod 5 (2004). I tabellerna kan flera värden redovisas och värdet som använts i dimensioneringen har markerats med mörkare bakgrund.



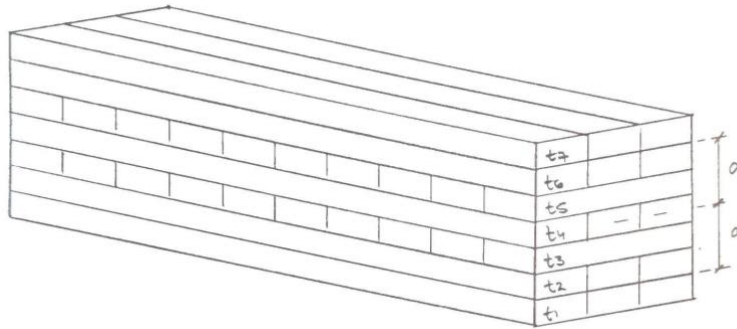
Figur 6 KL-träbjälklag med 3 skikt, där ojämna skikt är lagt längs med längden på bjälklaget och jämna skikt är lagt tvärs längden på bjälklaget. Höjden, h och längden, L , varierar medan bredden, b , är konstant. Detsamma gäller för följande KL-träbjälklag i Figur 7-10. Författarens egen bild.



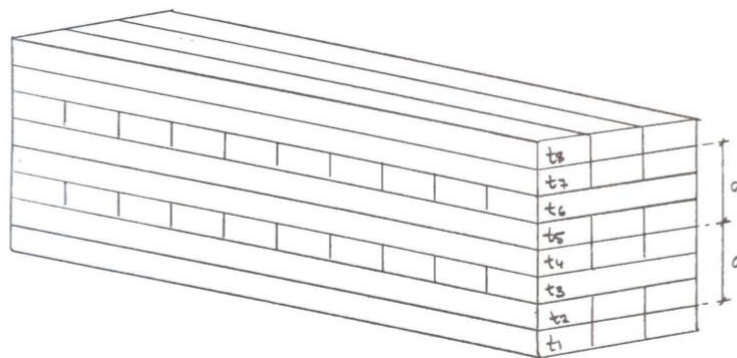
Figur 7 KL-träbjälklag med 5 skikt, där ojämna skikt är lagt längs med längden på bjälklaget och jämna skikt är lagt tvärs längden på bjälklaget. Författarens egen bild.



Figur 8 KL-träbjälklag med 7 skikt, där udda skikt är lagt längs med längden på bjälklaget och jämna skikt är lagt tvärs längden på bjälklaget. Författarens egen bild.



Figur 9 KL-träbjälklag med 7 skikt, där skikt 1, 2, 4, 6 och 7 är lagt längs med längden på bjälklaget och skikt 3 och 5 är lagt tvärs längden på bjälklaget. Skikt 1 och 2 antas vara ett skikt i beräkningarna, detsamma gäller skikt 6 och 7. Författarens egen bild.



Figur 10 KL-träbjälklag med 8 skikt, där skikt 1, 2, 4, 5, 7 och 8 är lagt längs med längden på bjälklaget och skikt 3 och 6 är lagt tvärs med längden på bjälklaget. Författarens egen bild.

3.2.1 Materialegenskaper

Följande avsnitt behandlar materialegenskaper som kommer att användas i beräkningarna. Som tidigare nämnts kommer KL-träbjälklaget bestå av konstruktionsvirke C24.

Tabell 3.1 Materialegenskaper för konstruktionsvirke C24 (Utdrag ur Svenskt trä:s webbplats, Materialegenskaper för KL-trä (2017)).

| Hållfasthetsvärden [MPa] | | |
|--------------------------------------|-----------------|--------|
| Böjning parallellt fibrerna | f_{mk} | 24 |
| Skjuvning | f_{vk} | 2,5 |
| Styvhetsvärden [MPa] | | |
| Skjuvmodul medelvärde | G_{mean} | 690 |
| Rullskjuvmodul medelvärde | $G_{9090,mean}$ | 50 |
| Elasticitetsmodul medelvärde | E_{mean} | 11 000 |
| Densitetsvärden [kg/m ³] | | |
| Medeldensitet | ρ_{mean} | 420 |

För att beräkna dimensionerande hållfastheten används:

$$f_{md} = k_{mod} * \frac{f_{mk}}{\gamma_M} \quad (4)$$

Där k_{mod} är en korrektionsfaktor som tar hänsyn till inverkan av lastvarighet och fuktkvot. γ_M är en partialkoefficient för materialet och rekommenderat värde är 1,25 för limträ.

För att ta fram k_{mod} måste varaktigheten på lasten avgöras samt undersöka byggnadens klimatklass. Det görs enligt Eurokod 5 på följande vis (Svenska institutet för standarder, 2004).

Tabell 3.2 Klimatklass (den klimatklassen som är gråmarkerad är den som har använts i dimensioneringen)

| | |
|---------------|--|
| Klimatklass 1 | Relativ fuktighet som överskrider 65% endast några få veckor per år. |
| Klimatklass 2 | Relativ fuktighet som överskrider 85% endast några få veckor per år. |
| Klimatklass 3 | Förhållanden som ger högre fuktkvot än klimatklass 2. |

Tabell 3.3 Lasters varaktighet (den lastvaraktighetsklassen som är gråmarkerad är den som har använts i dimensioneringen)

| Lastvaraktighetsklass | Varaktighet | Exempel |
|-----------------------|---------------------|------------------------------|
| Permanent | >10 år | Egentyngd |
| Långtid | 6 mån – 10 år | Lagrat gods |
| Medellång | 1 vecka – 6 månader | Nyttig last på bjälklag, snö |
| Korttid | <1 vecka | Snö, vind |
| Momentan | | Olycka |

Tabell 3.4 Värden på k_{mod} (det värdet på k_{mod} som är gråmarkerad är det som har använts i dimensioneringen)

| Material | Klimat-klass | Varaktighet | | | | |
|----------|--------------|-------------|---------|-----------|---------|----------|
| | | Permanent | Långtid | Medellång | Korttid | Momentan |
| Limträ | 1 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,1 |
| | 2 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,1 |
| | 3 | 0,5 | 0,55 | 0,65 | 0,7 | 0,9 |

För att ta hänsyn till deformationer på grund av långtidslast används en omräkningsfaktor k_{def} . Denna omräkningsfaktor beaktar krypning och det är fuktkvoten som påverkar, därav väljs k_{def} utifrån klimatklass.

Tabell 3.5 Värden på k_{def} (det värdet på k_{def} som är gråmarkerad är det som har använts i dimensioneringen)

| Material | Klimatklass | | |
|----------|-------------|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 |
| Limträ | 0,6 | 0,8 | 2,0 |

3.2.2 Höjd baserat på lastbärande kapacitet

En teoretisk modell används för att beräkna spänningsfördelningen i bjälklaget.

$$\sigma = \frac{M_{Ed}}{I} * z \quad (5)$$

Maximal spänning förekommer längst ner i tvärsnittet, dvs $z = h/2$. För ett rektangulärt tvärsnitt är tröghetsmomentet:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (6)$$

Det kan skrivas om som:

$$\frac{z}{I} = \frac{\frac{h}{2}}{\frac{b \cdot h^3}{12}} = \frac{12 \cdot h}{2 \cdot b \cdot h^3} = \frac{6}{b \cdot h^2} \quad (7)$$

För att ta reda på minsta möjliga höjd som ska klara av dragspänningarna sätts $\sigma(z) = f_{md}$, därefter bryts höjden ur och ekvationen beror då på lastbärande kapacitet och bredden.

$$H = \sqrt{\frac{6 \cdot M_{Ed}}{b \cdot f_{md}}} \quad (8)$$

3.2.3 Höjd baserat på nedböjning

Som tidigare sagts består KL-trä av ett antal skikt och dessa skikt kan ha olika höjd beroende på vilket resultat som ska uppnås. Vanligtvis består bjälklaget av tre till sju skikt (Svenskt trä).

För att undersöka vilka höjder som krävs för de olika skikten baseras försöken på KL-trä tillverkningsföretaget KLH:s (2020) standardiserade dimensioner i deras Cross-Laminated-Timber-broschyr. Dessa försök gjordes med ekvationerna som beskrivs i avsnitt 3.2.3.1 och höjderna provades fram för att se vilka kombinationer av höjder som klarade av nedböjningskravet för respektive spännvidd.

Momentan nedböjningen beräknas med elementarfall för upplag på två stöd.

$$w_{inst} = \frac{5 \cdot Q_d \cdot L^4}{384 \cdot E_{mean} \cdot I_{ef}} \quad (9)$$

Slutlig nedböjning med beaktande av krympning:

$$w_{fin} = w_{inst} * (1 + k_{def}) \quad (10)$$

Eftersom KL-trä består av flera skikt måste hänsyn tas till samverkan mellan skikten. Det kan göras genom olika metoder men här används gammametoden. I ekvation 1 används ett effektivt yttröghetsmoment, I_{ef} , för att beräkna nedböjningen.

Det effektiva yttröghetsmomentet är:

$$I_{ef} = \sum_{i=1} \left(\frac{b * t_i^3}{12} + \gamma_i * b * t_i * a_i^2 \right) \quad (11)$$

Där a är avståndet från skiktens tyngdpunkt till tyngdpunkten för hela bjälklaget (se Figur 6-10) samt att i representerar de skikt som går längs med bjälklaget. De skikt som går tvärs bjälklaget behöver inte beräknas (Svenskt trä, 2017).

Gamma, γ , beräknas:

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 * E_i * t_i * t_{i+1}}{L^2 * G_{9090}}} \quad (12)$$

där t_i = skiktets tjocklek
 \pm = + för första skiktet underifrån, - för sista skiktet räknat underifrån

I Figur 6-10 visas skiktens tjocklek och numrering för att underlätta beräkningen ut gamma-värdet.

3.3 Betongbjälklag: plattbärlag

Dimensioneringen av betongbjälklaget har skett genom att betrakta bjälklaget som en balk som är 0,6 m bred, b . Det görs för att förenkla beräkningen och för att kunna anta att bjälklaget endast bär lasten i en riktning.



Figur 11 Betongbjälklag där höjden, h , och spännvidden, L , varierar. Författarens egen bild.

3.3.1 Materialegenskaper

Tabell 3.6 Hållfasthets- och deformationsegenskaper för betongklass C30/37 (Svenska institutet för standarder, 2005)

| Karaktäristisk hållfasthet | | |
|-----------------------------------|------------------------------------|------|
| Tryckhållfasthet | f_{ck} [MPa] | 30 |
| Medeltryckhållfasthet | f_{cm} [MPa] | 37 |
| Densitetsvärden | | |
| Medeldensitet | ρ_{mean} [kg/m ³] | 2350 |
| Kryptal | | |
| | φ | 2 |

För att beräkna dimensionerande hållfasthet används:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (13)$$

Där γ_c är en partialkoefficient för betong och sätts till 1,5.

Elasticitetsmodulen beräknas enligt:

$$E_{cm} = 22 * \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3} \quad (14)$$

Tabell 3.7 Armering B500B

| Karaktäristisk hållfasthet | | |
|-----------------------------------|----------------|-----|
| Flytgräns | f_{yk} [MPa] | 500 |
| Elasticitetsmodul | | |
| | E_s [GPa] | 200 |

För att beräkna dimensionerande hållfasthet används för armeringen:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (15)$$

Där γ_s är en partialkoefficient för armeringsstål och sätts till 1,15.

Tabell 3.8 Exponeringsklass (Utdrag ur Betong - Fordringar, egenskaper, tillverkning och överensstämmelse (Svenska institutet för standarder, 2016)) (den exponeringsklassen på som är gråmarkerad är den som har använts i dimensioneringen)

| Beteckning av klass | Beskrivning av miljö | Exempel (informativa) där exponeringsklasser kan förekomma |
|---|--|--|
| Ingen risk för korrosion eller angrepp | | |
| X0 | För betong utan armering eller ingjuten metall: alla exponeringar utom där frysning/upptining, nötning eller kemiskt angrepp förekommer. | Betong inomhus med mycket låg luftfuktighet |

| | | |
|---|--|---|
| | För betong med armering eller ingjuten metall: mycket torr | |
| Korrosion orsakad av karbonatisering | | |
| När betong med armering eller annan ingjuten metall är utsatt för luft och fuktighet, ska exponeringen indelas enligt följande: | | |
| XC1 | Torr eller ständigt våt | Betong inomhus med låg luftfuktighet Betong med ständigt stående under vatten |
| XC2 | Våt, sällan torr | Betongytor utsatta för långvarig kontakt med vatten Många grundläggningar |
| XC3 | Måttlig fuktighet | Betong inomhus med måttlig eller hög luftfuktighet Utvändig betong skyddad mot regn |
| XC4 | Omväxlande våt och torr | Betongytor utsatta för kontakt med vatten, vilka inte hänförs till exponeringsklass XC2 |

3.3.2 Antal armeringsstänger baserat på lastbärande kapacitet

Det dimensionerande momentet för armeringen beräknas enligt:

$$M_d = f_{yd} * A_s * 0,9 * d \quad (16)$$

$$A_s = \frac{M_{Ed}}{f_{yd} * 0,9 * d} \quad (17)$$

Där $d = h - 75$ mm och är avståndet från övre kant på betongbjälklag till placeringen av draget armeringslager. Antar att armeringen ligger 75 mm från underkant.

$$A_{si} = \frac{\pi * \phi^2}{4} \quad (18)$$

Antal stänger som krävs:

$$n = \frac{A_s}{A_{si}} \quad (19)$$

3.3.3 Justering av höjd med hänsyn till tvärsnittets momentkapacitet och sprickmoment

Tvärsnittets momentkapacitet beror på armeringens dimensionerande draghållfasthet, mängden armering och armeringens kvalitet samt den inre hävarmen mellan kraftparet.

Momentkapacitet:

$$M_{Rd} = f_{yd} * A_s * z_h \quad (20)$$

där $z_h = 0,9 * d$ (är den inre hävarmen)

Om tvärsnittets momentkapacitet är mindre än sprickmomentet finns det risk för sprött brott (armeringen slits av när betongen spricker). För att undvika sprött brott studeras ekvationen och beslut om att antingen öka mängden armering, öka armeringens diameter, öka höjden (för att hävarmen ska bli längre) eller välja en starkare armering behöver tas.

För att beräkna sprickmomentet används Naviers formel:

$$\sigma_{cr} = \frac{M_{cr}}{I_I} * (h - x_{TP}) \quad (21)$$

Sprickmomentet bryts ut ur Naviers formel:

$$M_{cr} = \frac{\sigma_{cr} * I_I}{(h - x_{TP})} \quad (22)$$

Bjälklaget dimensioneras i bruksgränstillstånd och ska befinna sig i Stadium 1, det vill säga tvärsnittet ska vara osprucket. Det görs genom att anta att tvärsnittet befinner sig i stadium 1 och att ren böjning förekommer, det vill säga armeringens bidrag försummas (Al-Emrani, Engström, Johansson, & Johansson, Bärande konstruktioner, del 1, 2013).

Då armeringens bidrag ska försummas beaktas endast betongens yttröghetsmoment:

$$I_I = I_b = \frac{b * h^3}{12} \quad (23)$$

Resterande värden i ekvation 22 är:

$$\begin{aligned} \sigma_{cr} &= f_{ctm,fl} \\ f_{ctm,fl} &= \text{medelbøjdraghållfastheten för betong vid 28 dygn} \\ x_{TP} &= \frac{h}{2} \quad (\text{p.g.a. armeringen försummas}) \end{aligned}$$

Medelbøjdraghållfastheten bestäms enligt Eurokod 2 (Svenska institutet för standarder, 2005) som betongens medelbøjdraghållfasthet vid 28 dygn.

$$f_{ctm} = 0,3 * f_{ck}^{2/3} \quad \text{för } \leq C50/60 \quad (24)$$

Därefter beräknas bøjdraghållfastheten enligt Eurokod 2 (Svenska institutet för standarder, 2005).

$$f_{ctm,fl} = k * f_{ctm} \quad (25)$$

$$\text{där } k = 1,6 - \frac{h}{1000} \geq 1,0 \quad (\text{med } h \text{ i mm})$$

Som sagt jämförs tvärsnittets momentkapacitet med sprickmomentet och det avgör om armeringens area, höjden på bjälklaget eller styrkan på armeringen behöver ökas eller inte.

3.3.4 Kontroll av täckande betongskikt

För att se om de planerade antal stänger får plats i ett lager i bjälklaget beräknas det täckande betongskiktet.

Beräkning av täckande betongskikt görs genom nominellt mått, c_{nom} .

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} \quad (26)$$

där $\Delta c_{dev} = 10 \text{ mm}$

Där c_{min} är minimimått och Δc_{dev} är en tolerans. Minimimåttet är det största värdet med hänsyn till armeringens vidhäftning $c_{min,b}$ och korrosionsskydd $c_{min,dur}$.

För armeringens vidhäftning bestäms minimimåttet genom:

$$\begin{aligned} c_{min,b} &= \emptyset && \text{för separata stänger} \\ c_{min,b} &= \emptyset_0 && \text{för buntade stänger, } \emptyset_0 = \text{ekvivalent diameter} \\ &&& \text{för buntade stänger} \end{aligned}$$

För armeringens korrosionsskydd bestäms minimimåttet genom att ta hänsyn till exponeringsklass, konstruktionsklass samt livslängd.

Tabell 3.9 Minsta täckande betongskikt, $c_{min,dur}$ med hänsyn till korrosionsskydd. Hänsyn bör tas till byggnadens livslängd. Byggnadskonstruktioner med livlängdsklasserna L100, L50 eller L20 förväntas ha en livslängd på 100, 50 respektive 20 år (Utdrag ur Boverkets konstruktionsregler, EKS 11 (2019)) (det värdet på som är gråmarkerad är det som har använts i dimensioneringen)

| Exponeringsklass | Max vct _{ekv} | L100 | L50 | L20 |
|------------------|------------------------|------|-----|-----|
| X0 | - | - | - | - |
| XC1 | 0,9 | 15 | 10 | 10 |
| | 0,6 | 10 | 10 | 10 |
| XC2 | 0,6 | 25 | 20 | 15 |
| | 0,55 | 20 | 15 | 10 |
| | 0,5 | 15 | 10 | 10 |
| XC3, XC4 | 0,55 | 25 | 20 | 15 |
| | 0,5 | 20 | 15 | 10 |

Därefter kan avståndet från kant till armering beräknas genom:

$$e_1 = c_{nom} + \emptyset_b + \frac{\emptyset}{2} \quad (27)$$

där \emptyset_b är tvärarmeringens diameter.

Avståndet mellan stänger ska också beräknas och enligt Eurokod 2 (Svenska institutet för standarder, 2005) bestäms minsta fria avstånd mellan parallella stänger som

$$\max(k_1 * \emptyset, d_g + k_2, 20 \text{ mm}) \quad (28)$$

där d_g = största stenstorlek i ballasten
 k_1 är en nationell parameter och rekommenderat värde är 1,0
 k_2 är en nationell parameter och rekommenderat värde är 5 mm

Dessa värden används för att avgöra om den beräknade armeringen får plats eller inte. Om armeringen inte får plats måste höjden ökas eller armeringsmängden minskas.

3.3.5 Nedböjning

Den totala nedböjningen beräknas genom att addera nedböjning på grund av last och krökning på grund av krympning (Al-Emrani, Engström, Johansson, & Johansson, Bärande konstruktioner, del 1, 2013).

Nedböjning på grund av last beräknas på samma sätt som i avsnitt 3.2.3.1 genom ekvation 9.

Krökning på grund av krympning:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_s = \frac{\Delta\varepsilon_{cs}}{h} \quad (29)$$

där $\Delta\varepsilon_{cs}$ betraktar ojämn krympning

$$\Delta\varepsilon_{cs} = 0,5 * \varepsilon_{cs} \quad (30)$$

ε_{cs} är slutligt krympmått och beror på tvärsnittets storlek, omgivningens relativa fuktighet och ett grundvärde för uttorkningskrympning samt slutligt värde på autogen krympning.

En osprucken konstruktion ger en krökningsfördelning i form av en rektangel (Al-Emrani, Engström, Johansson, & Johansson, 2014). För att beräkna nedböjning på grund av krympning utnyttjas det. Det är arean av rektangeln som utnyttjas då krökningen betraktas som rektangelns höjd och spännvidden är längden av rektangeln (Al-Emrani, Engström, Johansson, & Johansson, Bärande konstruktioner, del 2, 2014). Eftersom lasten är jämnt utbredd över två upplag kommer den maximala nedböjningen vara i mitten av spännvidden. Nedböjningen beräknas genom att multiplicera halva arean (för att maximala nedböjningen är i mitten) med hävarmen som räknas från ena änden av bjälklaget till tyngdpunkten av arean (Al-Emrani, Engström, Johansson, & Johansson, Bärande konstruktioner, del 2, 2014).

Nedböjning på grund av krympning beräknas som:

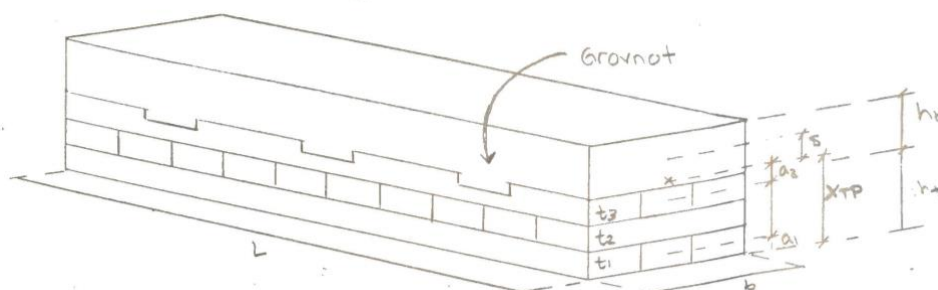
$$w_{fin,s} = \frac{L}{2} * \left(\frac{1}{r}\right)_s * \frac{1}{2} * \frac{L}{2} \quad (31)$$

Slutlig nedböjning

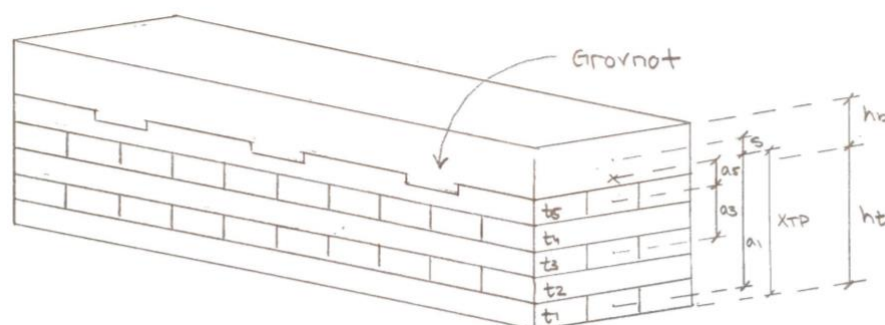
$$w_{fin} = w_{inst} + w_{fin,s} \quad (32)$$

3.4 Samverkansbjälklag: KL-trä och betong

Vid dimensionering av samverkansbjälklaget baserades beräkningarna på samma betongklass som i betongbjälklaget och samma konstruktionsvirke som i KL-träbjälklaget. De materialegenskaper som nämnt i tidigare kapitel kommer därför användas även i dessa beräkningar.



Figur 12 Samverkansbjälklag med ett övre skikt av betong och följande 3 skikt är av KL-trä. Höjden för betongen, h_b , och KL-träet, h_t , samt längden, L , varierar medan bredden, b , är konstant. Detsamma gäller för följande samverkansbjälklag i Figur 13. Författarens egen bild.



Figur 13 Samverkansbjälklag med ett övre skikt av betong och följande 5 skikt är av KL-trä. Författarens egen bild.

3.4.1 Beräkningsgång

Enligt Svenskt trä:s KL-trähandbok kan den totala höjden samt betongens höjd beräknas preliminärt enligt nedan (2017).

$$h_{tot} \approx \frac{L}{20} \quad (33)$$

$$h_b \approx 0,4 * h_{tot} \quad (34)$$

3.4.2 Samverkan

Samverkan mellan trä-skikten görs på samma sätt som i avsnitt 3.2.3.1 med gammametoden. Betongens samverkan med KL-träet beräknas också med gammametoden men ekvationen skiljer sig något från ekvation 12 enligt Eurokod 5 (Svenska institutet för standarder, 2004). Hur stor samverkan som förekommer beror på vilken sorts förbindare som används (Dahlin & Jarefalk, 2020). Gamma-värdet som beräknas genom ekvation 35 kan variera mellan 0 och 1. Det är styvheten hos

förbindaren som avgör hur stor samverkan som förekommer, alltså hur nära 1 gammavärdet är. På så sätt finns det kanske en möjlighet att optimera förbindaren så att gammavärdet blir ungefär lika med 1. Förbindare som kan användas är bland annat grovnot (urtag i KL-bjälklagets ovansida) och skjuvförband med antingen hålplåt eller speciella skruvar (Svenskt trä, 2017). I dimensioneringen kommer grovnot användas och dess K_b -värde är 500 000 kN/m och det värdet som används i bruksgränstillstånd (KLH Massivholz GmbH, 2019).

$$\gamma_b = \frac{1}{1 + \pi^2 * E_{cm} * A_b * \frac{s}{K_b * L^2}} \quad (35)$$

där A_b = betongens area
 s = avståndet från tvärsnittets mekaniska tyngdpunkt till betongens tyngdpunkt.
 K_b = beror på vilken typ av förbindare som används

Mekaniska tyngdpunkten beräknas enligt följande:

$$x_{TP} = \frac{E_{mean} * A_t * x_t + E_{cm} * A_b * x_b}{E_{mean} * A_t + E_{cm} * A_b} \quad (36)$$

där x_t = avståndet från träets nederkant till mittpunkten av KL-träet
 x_b = avståndet från träets nederkant till mittpunkten av betongen
 A_t = KL-träets totala area
 A_b = betongens area

Därefter beräknas den effektiva böjstyvheten enligt Eurokod 5 (Svenska institutet för standarder, 2004).

$$(EI)_{ef} = \sum (E_i * I_i + \gamma_i * E_i * A_i * a_i^2) \quad (37)$$

Den momentana nedböjningen beräknas på samma sätt som i avsnitt 3.2.3.1 med elementarfall.

Nedböjningen beroende på långtidseffekter måste därefter beräknas för att veta den slutliga nedböjningen (Dahlin & Jarefalk, 2020). Då beaktas krympning och krypning genom k_{def} respektive φ på de här sätten:

$$E_t(\infty) = \frac{E_{mean}}{1 + k_{def}} \quad (38)$$

$$G_{9090}(\infty) = \frac{G_{9090,mean}}{1 + k_{def}} \quad (39)$$

$$E_{cm}(\infty) = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi} \quad (40)$$

Alla gammavärden och den mekaniska tyngdpunkten måste därför beräknas på nytt, en ny effektiv böjstyvhet beräknas och nedböjningen beräknas på samma sätt som i avsnitt 3.2.3.1 med elementarfall.

4. Analys och resultat

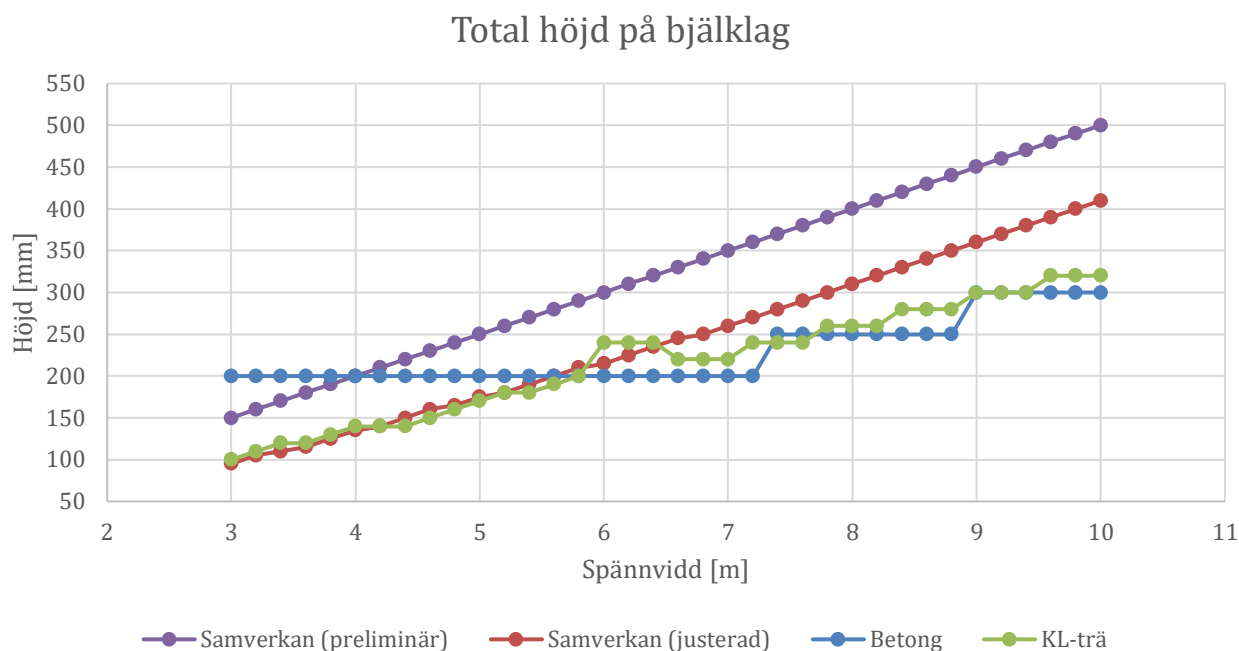
Efter att beräkningar gjorts på de beskrivna sätten från tidigare avsnitt presenteras resultatet i det här kapitlet. Resultaten redovisas i diagram och analyseras.

4.1 Höjd

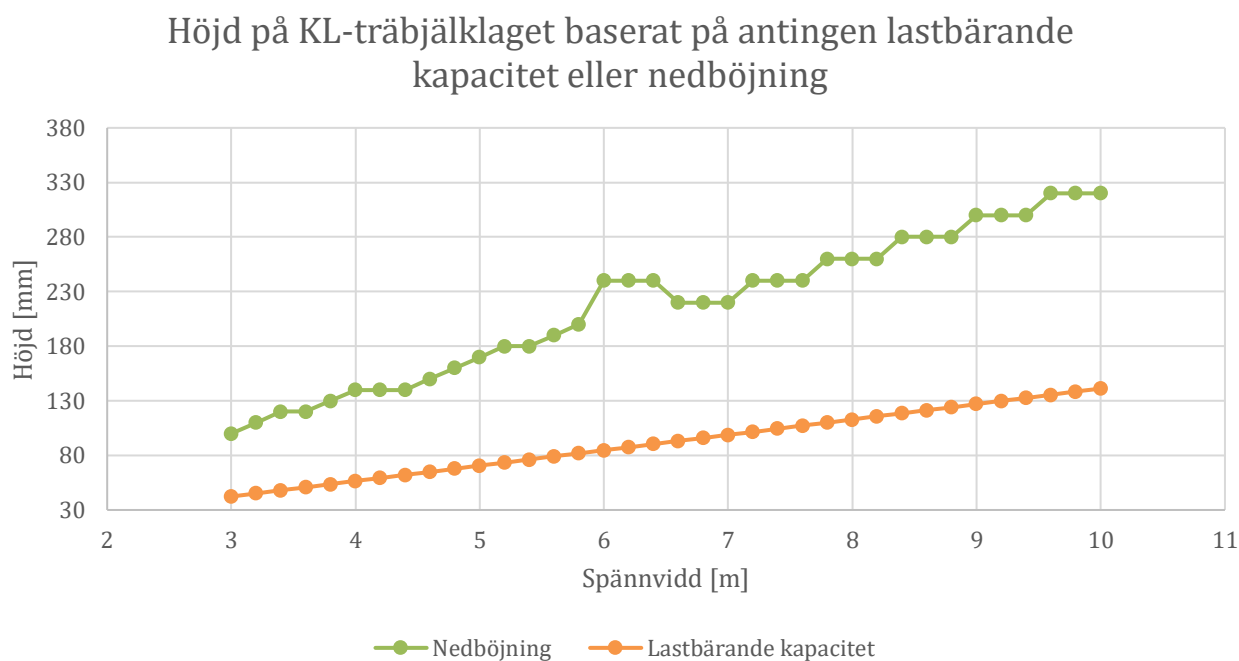
Den preliminära höjden för samverkansbjälklaget visas som den lila linjen i Figur 14, den linjen är linjär eftersom den baseras på ekvation 32. Den preliminära höjden gav väldigt liten nedböjning, se diagram i Figur 16. Av den anledningen minskades höjden och visas som den röda linjen i Figur 14. Höjden minskades till den höjd som precis klarar nedböjningskravet (se avsnitt 3.1.5).

Betongbjälklaget slutliga höjd visas som den blåa linjen i Figur 14. Den går i tre etapper, 200, 250 och 300 mm. Vid beräkningen började höjden på 200 mm. Mängden armering som behövs för att klara av det dimensionerande momentet beräknades och tillsammans med beräkningar för täckande betongskikt insågs det att armeringen inte fick plats i ett lager för spännvidderna 7,6 till 10 m. Dessutom beräknades sprickmomentet för betongen och momentkapaciteten i armeringen. För spännvidderna 3 till 3,6 m var momentkapaciteten mindre än sprickmomentet och det skulle ha inneburit att sprött brott hade inträffat vid pålastning (dock bara vid större pålastning än den dimensionerande lasten). Mängden armering ökades därför för spännvidden 3 till 3,6 m och höjden ökades till 250 mm för spännvidderna 7,6 m och uppåt. Det här upprepades tills momentkapaciteten var högre än sprickmomentet för alla spännvidder och tills armeringsmängden fick plats i ett lager. Därefter beräknades nedböjningen och det visade sig att nedböjningen för spännvidd 7,4 m inte klarade kravet och höjden ökades då till 250 mm.

Träbjälklagets höjd visas som den gröna linjen i Figur 14. Höjden varierar mellan 100 och 320 mm och består av 3 till 8 skikt (se Figur 6-10). Höjden för träbjälklaget beräknades till att börja med baserat på det dimensionerande momentet och en godtycklig höjd valdes av KLH:s (2020) standardiserade höjder i deras Cross-Laminated-Timber-broschyr. Därefter beräknades nedböjningen för att se om höjderna för respektive spännvidd klarar av nedböjningskravet. Beräkningarna visade att nedböjningen var betydligt högre än nedböjningskravet, därför justerades höjden så att kravet precis klarades. I Figur 15 visas skillnaden på höjd baserat på lastbärande kapacitet och justeringen som klarar nedböjningskravet.



Figur 14 Diagram som beskriver den totala höjden på respektive bjälklag för en given spännvidd med acceptabel nedböjning, se avsnitt 3.1.5.



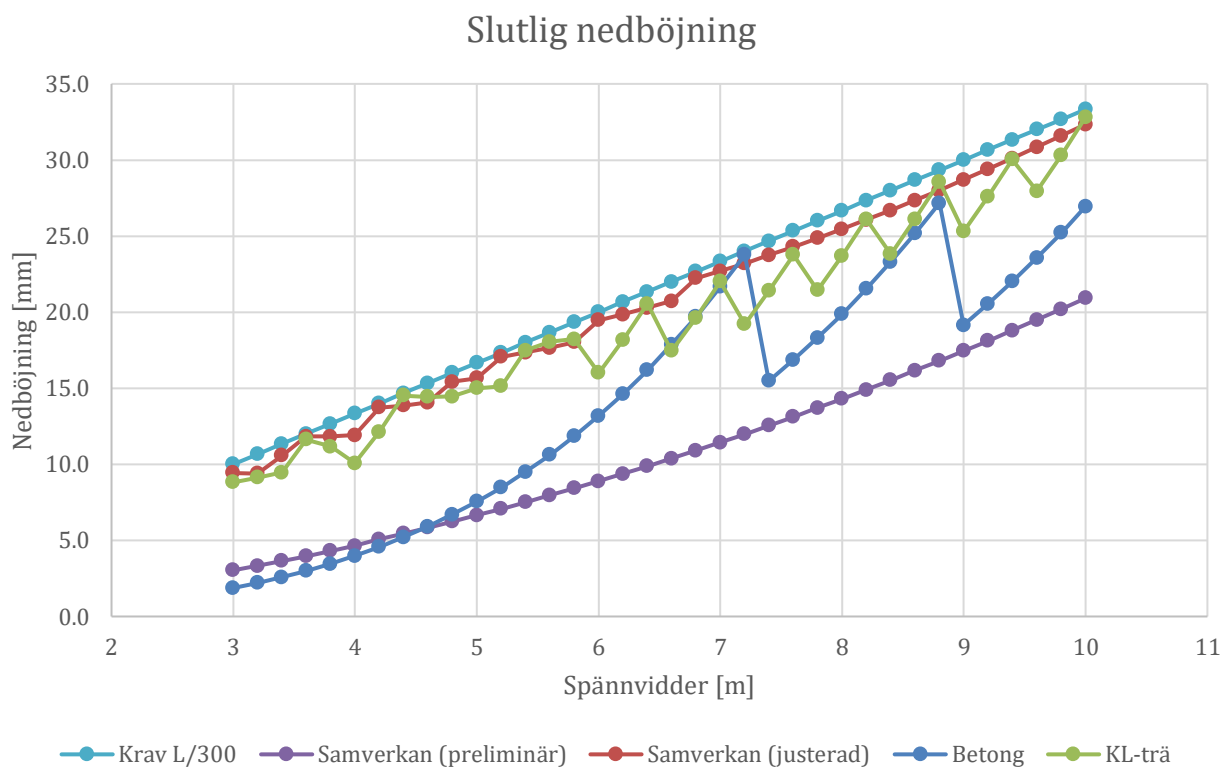
Figur 15 Diagram som beskriver höjden för KL-träbjälklag baserat på antingen lastbärande kapacitet eller nedböjning. Den blå kurvan representerar höjden som fås av att applicera ekvation 32 medan den lila kurvan representerar höjden där nedböjningskravet har tagits i beaktning (se avsnitt 3.1.5).

4.2 Nedböjning

Samverkansbjälklagets nedböjning för den preliminära höjden visas som den lila linjen i Figur 16. Som nämndes i tidigare avsnitt (4.1) blir denna höjd inte effektiv med hänsyn till nedböjning. Nedböjningen för den justerade höjden visas som den röda linjen i Figur 16.

Betongbjälklagets nedböjning visas som den blåa linjen i Figur 16. Betongbjälklaget klarar nedböjningskravet med stor marginal förutom vid 7,2 m. Det är precis innan höjden ökas till 250 mm och för att göra marginalen större hade höjden kunnat ökas till 250 mm vid 7,2 m istället för 7,4 m.

KL-träbjälklagets nedböjning visas som den gröna linjen i Figur 16. Linjen är väldigt ojämn och det är för att tjockleken på skikten har optimerats så att de precis klarar nedböjningskravet. De gånger som nedböjningen hastigt minskar är då höjden ökas (t.ex. vid 4 m), om samma höjd klarar nästa spannvidd så ökar nedböjningen (t.ex. vid 4,2m).



Figur 16 Diagrammet visar slutlig nedböjning. Den turkosa linjen representerar maximal tillåten nedböjning.

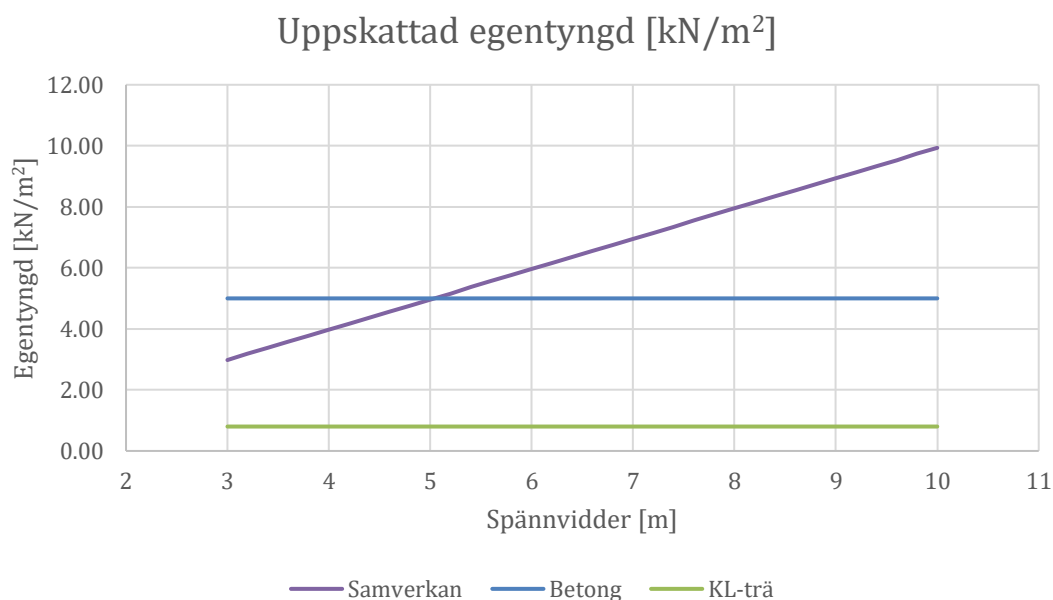
4.3 Egentyngd

I avsnitt 3.1.1 nämndes det att bjälklagen har en permanent last, en egentyngd, och att denna last varierar beroende på material på bjälklagen. För att kunna dimensionera de olika bjälklagen krävdes en uppskattning av egentyngden, eftersom bjälklagen behöver klara av att bära både egentyngd och nyttig last.

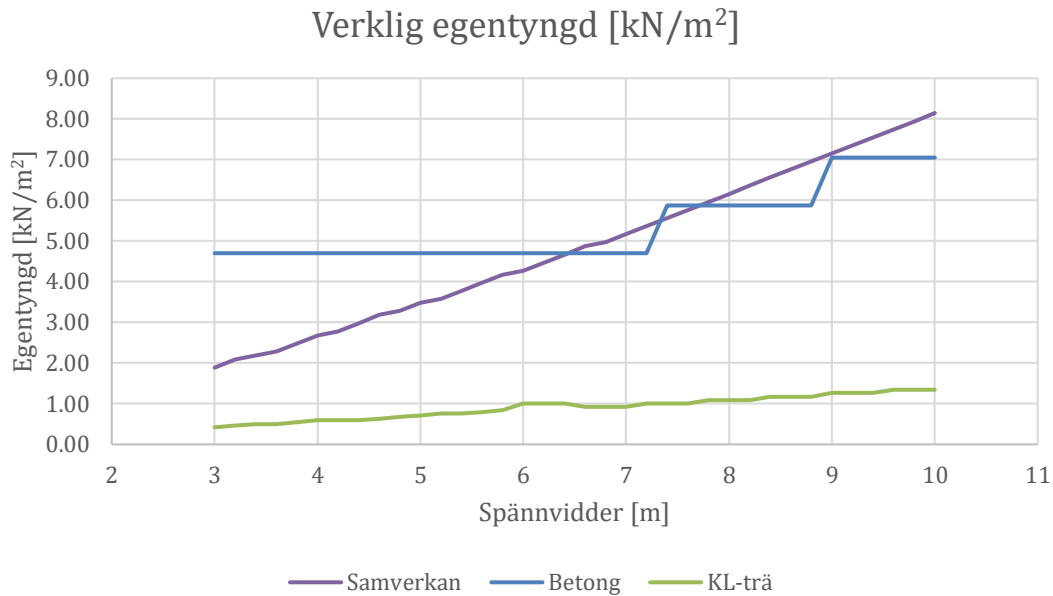
I Figur 17 visas den uppskattade egentyngden för de tre bjälklagen. För KL-träet och betongen uppskattades en bestämd egenvikt för alla spannvidder, även fast volymen av bjälklaget ändrades. Men för samverkansbjälklaget räknades egentyngden ut baserat på den preliminära höjden.

När dimensioneringen för betong- och KL-träbjälklaget var gjord beräknades den verkliga egentyngden ut. För samverkansbjälklaget beräknades den verkliga egentyngden ut baserat på den justerade höjden som precis klarade kravet på nedböjning.

För KL-träbjälklaget uppskattades egentyngden till $0,8 \text{ kN/m}^2$. Den uppskattningen visade sig vara relativt rimlig då den verkliga egentyngden är mellan $0,42\text{-}1,34 \text{ kN/m}^2$, se Figur 18. För betongbjälklaget uppskattades egentyngden till 5 kN/m^2 . Det hade kanske varit att föredra att höja den uppskattade egentyngden eftersom den verkliga egentyngden är mellan $4,7\text{-}7,1 \text{ kN/m}^2$, men eftersom det dimensionerade momentet är överdimensionerat kan det antas att bjälklaget klarar av den verkliga egentyngden. Efter att samverkansbjälklagets höjd justerats minskades egentyngden till ca $1\text{-}5 \text{ kN/m}^2$ istället för $1,8\text{-}5,8 \text{ kN/m}^2$.



Figur 17 Uppskattad egentyngd där justering p.g.a. nedböjning för samverkansbjälklaget inte är gjord.

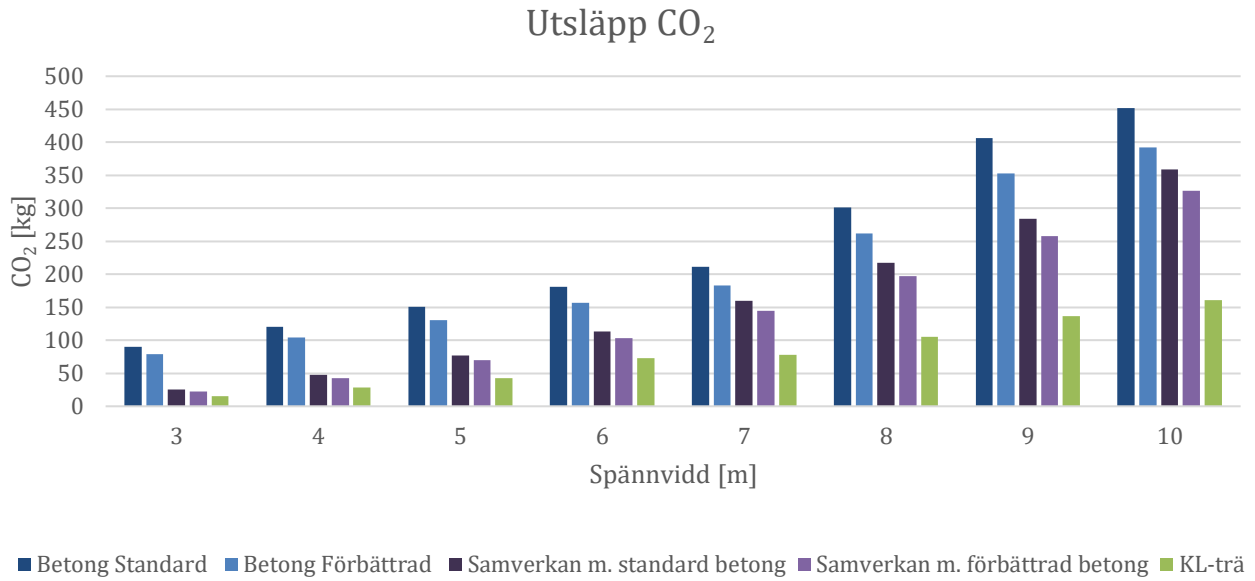


Figur 18 Verklig egentyngd där justering p.g.a. nedböjning för samverkansbjälklaget är gjord.

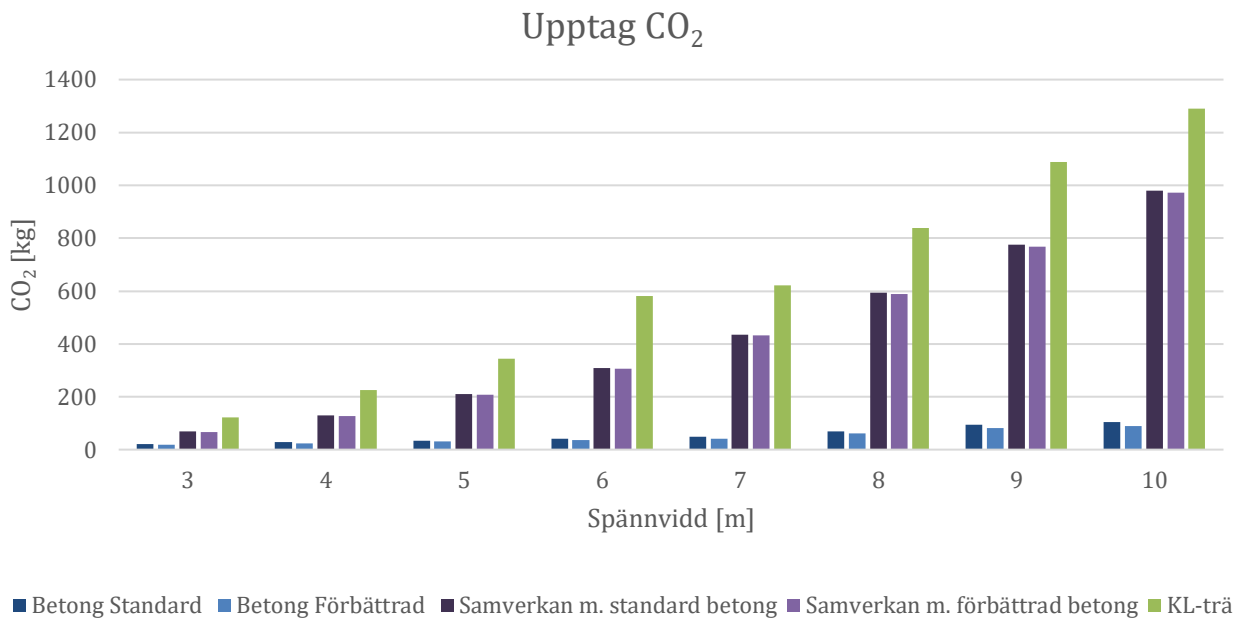
4.4 Miljöpåverkan

I Figur 19 visas hur stort utsläppet av koldioxid är för respektive bjälklag. Den betongen med standardcement har störst utsläpp och KL-träbjälklaget har minst utsläpp. Att det visade sig vara så stor skillnad för de respektive materialen var väntat då diagrammen baseras på värden som presenterats i kapitel 2 för respektive bjälklag. I det kapitlet nämns det att utsläppet för trä är ca 42-84 kg CO₂/m³ medan utsläppet för betong är ca 218-251 kg CO₂/m³. För samverkansbjälklaget har utsläppet för respektive material multiplicerats med volymen för materialet. Det är bjälklaget med justerad höjd som har beräknats för både utsläpp och upptag av koldioxid.

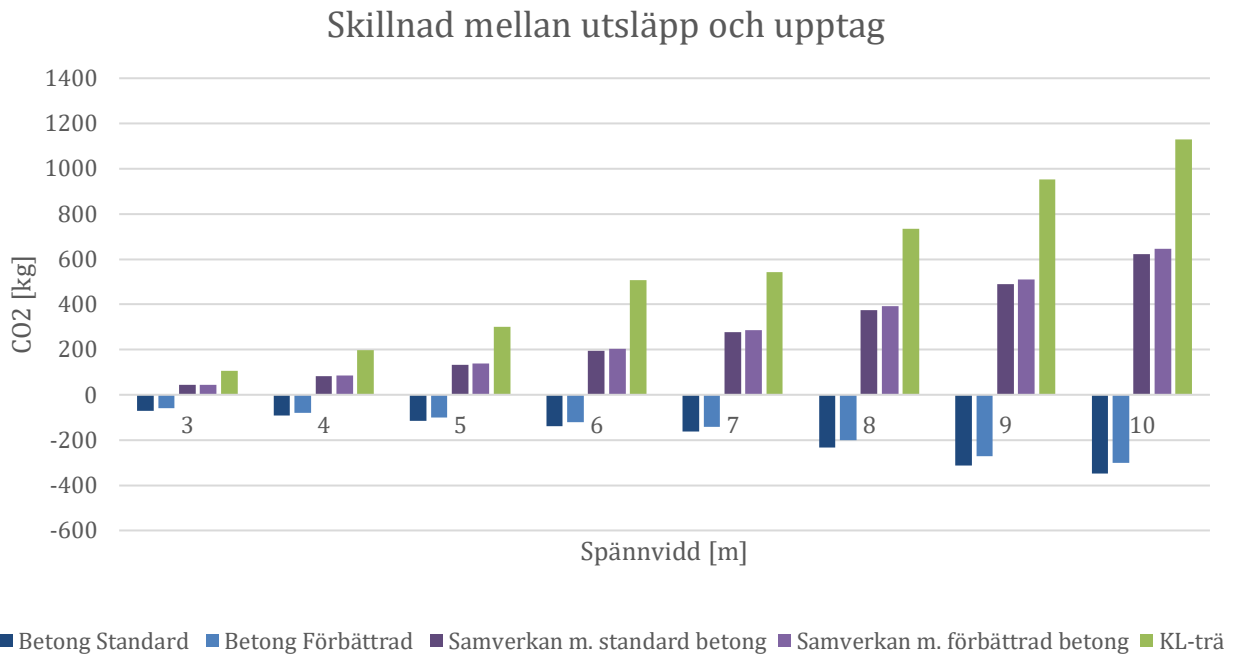
I Figur 20 visas upptaget av koldioxid för varje bjälklag. Där visas det att det är stor skillnad på upptag för trä jämfört med betong. För att tydligare visa skillnaden mellan utsläpp och upptag gjordes ett diagram, Figur 21, där upptaget har subtraherats från utsläppet. Där syns det att upptaget är större än utsläppet för samtliga spännvidder för KL-träbjälklagen och samverkansbjälklagen.



Figur 19 Utsläpp av CO₂ baserat på värden från kapitel 2 och höjder för respektive material.



Figur 20 Upptag av CO₂ baserat på värden från kapitel 2 och höjder för respektive material.



Figur 21 Skillnad mellan utsläpp och upptag. Värdena från Figur 19 har subtraherats från Figur 20 och visar utsläpp (negativt) och upptag (positivt).

4.5 Kostnad

Som tidigare nämnts, i avsnitt 2.4, har kostnadsberäkningarna gjorts utifrån kostnader och arbetstider i Wikells Sektionskostnader NYB (2020). Boken innehåller inte uppgifter om KL-träbjälklag utan det finns enbart bjälklag med träbalk som exempel. Däremot finns uppgifter om en limträbalk och för att kunna jämföra med de andra materialen användes materialkostnaden för limträbalken. Limträbalken är 90x405 mm och materialet kostar 265 kr/m (Wikells Byggberäkningar AB, 2020). Den här materialkostnaden beräknades om till enheten kr/m³ för att appliceras på KL-träbjälklaget. Eftersom tiden för montering av en limträbalk inte är detsamma som för ett KL-träbjälklag har tiden uppskattats från arbetstiden av andra typer av bjälklag med träbalkar. De bjälklag med träbalkar som tagits i beaktning är bjälklag som har isolering och brandklass REI60. Dessa bjälklag tar 1,52-1,65 h/m att installera på plats. Däremot är det rimligt att dessa bjälklag har blivit byggda på plats medan KL-träbjälklagen prefabriceras och det kan därför antas att det går lite snabbare att tillverka/montera KL-träbjälklagen. Uppskattningen gjordes att det tar ca 1,30 h/m.

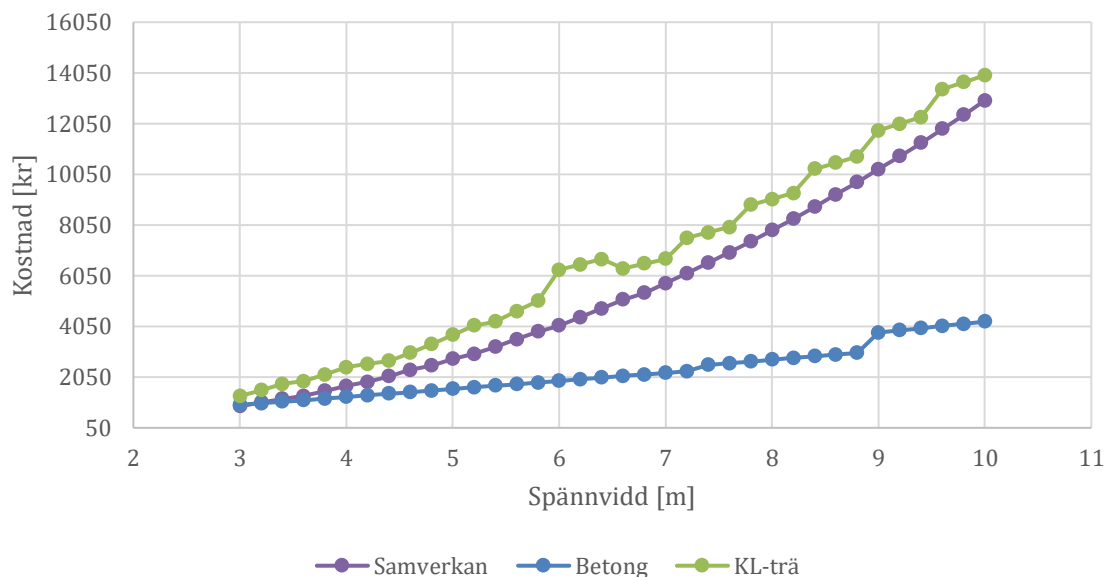
För betongbjälklaget fanns det många olika exempel, bl.a. rent betongbjälklag, betongbjälklag med isolering och betongbjälklag med stegljudsisolering, samtliga bjälklag innehöll armering (Wikells Byggberäkningar AB, 2020). I beräkningen och jämförelsen användes endast rena betongbjälklag med armering. I Tabell 4.1 visas de olika enhetsskikten och deras kostnader för respektive höjd. Tabellen är baserad på Wikells Sektionskostnader NYB (2020) men med vissa justeringar. T.ex. har tiden för den självkompakterande betongen justerats så att den ökar med 0,02 h/m för varje höjd.

Tabell 4.1 Kostnader och arbetstid för de olika höjderna av betongbjälklaget (Baserat på kostnader och arbetstid från Wikells Sektionskostnader NYB (2020))

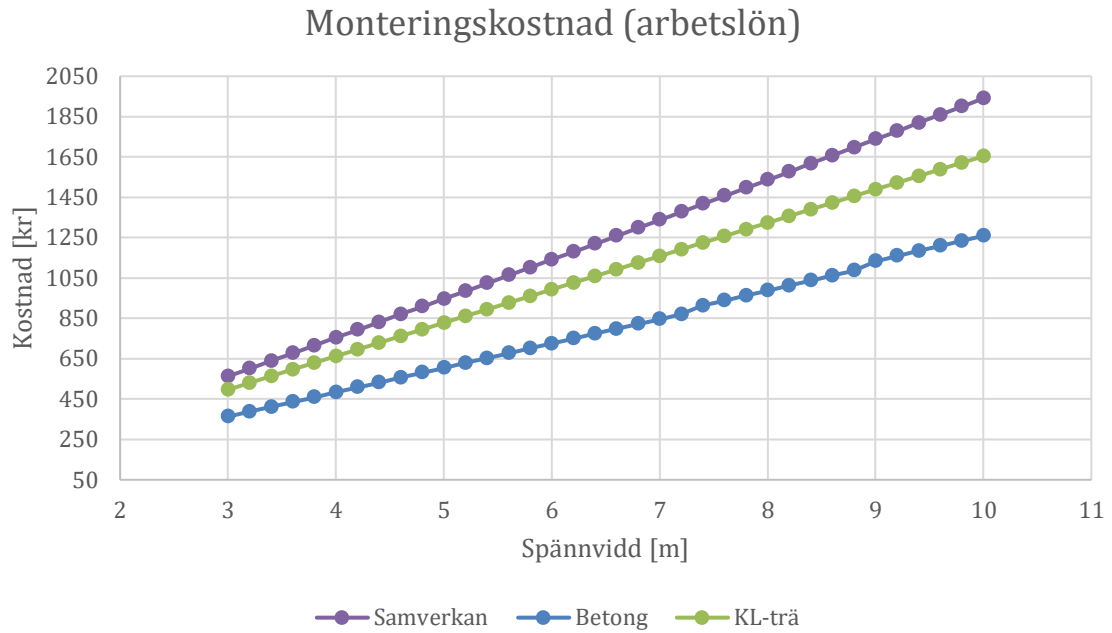
| Enhetsskikt | Kostnad [kr/m ²] | | | Tid [h/m ²] | | |
|-------------------------------|------------------------------|------------|------------|-------------------------|-------------|-------------|
| | Höjd på betong [mm] | | | Höjd på betong [mm] | | |
| | 200 | 250 | 300 | 200 | 250 | 300 |
| Direktslipad yta vid gjutning | - | - | - | 0,16 | 0,16 | 0,16 |
| Självkompakterande betong | 348 | 386 | 522 | 0,08 | 0,10 | 0,12 |
| Armering | 126 | 126 | 126 | 0,36 | 0,36 | 0,36 |
| Elementluckform, slät | 54 | 58 | 58 | 0,35 | 0,35 | 0,35 |
| Totalt | 528 | 570 | 706 | 0,95 | 0,97 | 0,99 |

För samverkansbjälklaget har kostnaderna använts på samma sätt som utsläppsberäkningarna, d.v.s. genom att addera materialkostnaderna för varje enskilt material till en total materialkostnad. Eftersom höjden för betongskiktet aldrig överstiger 200 mm används materialkostnader för 200 mm från Tabell 4.1. Uppskattningen av arbetstiden är svår. Utifrån Tabell 4.1 är det vissa enhetsskikt som inte kommer förekomma i samverkansbjälklaget, de är armering och elementluckform (eftersom betongen gjuts ovanpå KL-träet och därför agerar KL-träet som form). Tiden för självkompakterande betong delas med höjden 200 mm för att få enheten h/m/mm och kan därefter beräknas för de olika höjderna i samverkansbjälklaget. KL-träet i samverkansbjälklaget är svårt att uppskatta. Men uppskattas precis som KL-träbjälklaget vara ca 1,3 h/m.

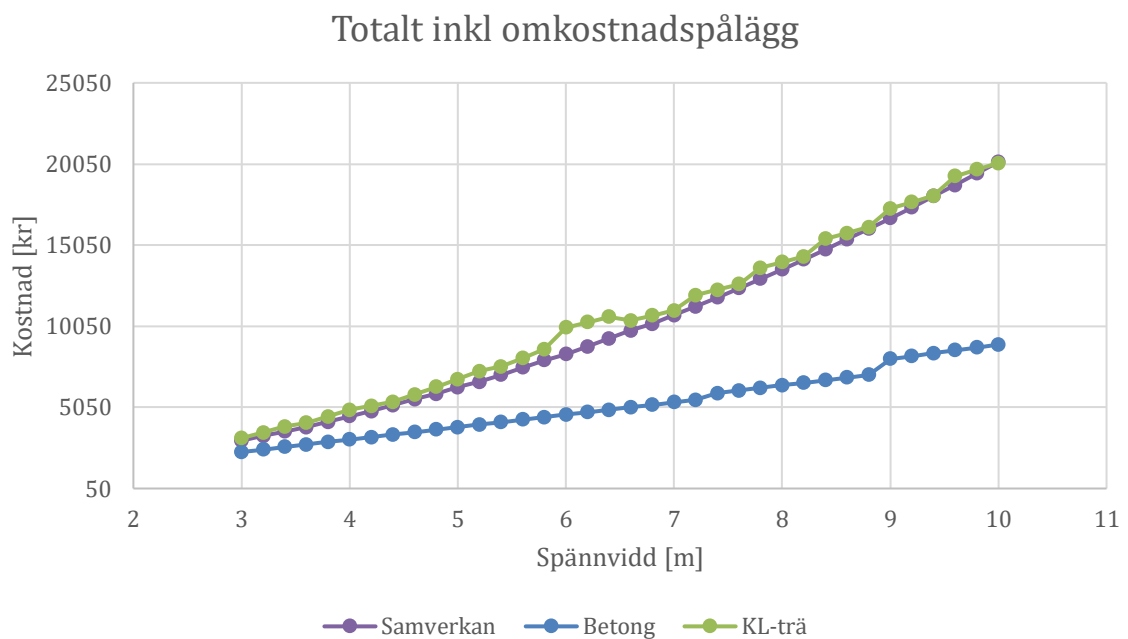
Materialkostnad



Figur 22 Materialkostnaden för de olika bjälklagen.



Figur 23 *Monteringskostnad som beror av arbetslön (212 kr/h).*



Figur 24 *Total kostnad inkl. omkostnadspålägg (272 % av arbetslönen). Den totala kostnaden består av materialkostnad, monteringskostnad och omkostnadspålägg.*

5. Diskussion

I det här kapitlet diskuteras litteratur och resultat. Syftet med arbetet var att jämföra tre bjälklag, ta fram för- och nackdelar, mittnedböjning, miljöpåverkan och kostnad för att tillverka bjälklagen. Anledningen till att det här arbetet tog den här riktningen var för att samverkansbjälklag är så intressant och i teorin är det ett fantastisk alternativt bjälklag som har möjlighet att minska utsläppet av koldioxid.

5.1 Litteratordiskussion

Den mest använda källan i litteraturstudien är Svenskt trä som kan vara en partisk källa då Svenskt trä är en del av branschorganisationen Skogsindustrierna och automatiskt förespråkar trä. Beslutet om att använda Svenskt trä som källa grundar sig i att de i deras beräkningar och exempel hänvisar till Svenska institutet för standarder (SIS). För betongbjälklaget används Svensk betong som källa och den kan också ses som partisk.

5.2 Resultatdiskussion

Dimensionsberäkningen visar att vid kontroll av lastbärande kapacitet kan KL-trä konkurrera med betongbjälklag avseende nedböjning, se i Figur 14. Vid kortare spännvidder sparas till och med höjd vid användning av KL-trä jämfört med betong, brytpunkten är vid 5,8 m. Betongbjälklaget hade däremot säkert klarat av att ha ännu mindre höjd men enligt Svensk betong (u.d.) tillverkas det inte mindre höjder i massiva bjälklagsplattor. Men med hänsyn till brandmotstånd klarar KL-träbjälklaget förmodligen inte av att motstå brand i 60 min, då det inte har beräknats enligt SIS, Eurokod 5: Dimensionering av träkonstruktioner - Del 1-2: Allmänt - Brandteknisk dimensionering (2004). Den standarden innefattar dock inte metoder för att beräkna brandmotstånd hos KL-trä (Svenskt trä, 2017). Men hade beräkningar gjorts utifrån en metod som finns i KL-trähandboken (Svenskt trä, 2017) hade höjden förmodligen behövt ökas. Det var något som diskuterades att göra inledningsvis men glömdes bort att kontrollera. Det hade definitivt förändrat resultaten eftersom volymen hade ökat, både egentyngd och miljöpåverkan beror av volymen. Resultatet för nedböjningen hade också ändrats då böjstyvheten hade ökat vid större tjocklekar på skikten. Eftersom betong som material har högt brandmotstånd hade höjden på betongbjälklaget förmodligen varit oförändrad om brand hade varit en faktor som undersöktes. För samverkansbjälklaget hade beräkningen av brandmotstånd troligtvis ändrat resultatet även om samverkansbjälklaget har den fördelen att det har bättre brandmotstånd jämfört med KL-träbjälklag (Lukaszewska, 2009). Eftersom övre lagret är av betong är det kanske tillräckligt för att skapa en brandcell för den våningen över bjälklaget, frågan är om de dimensionerande KL-träskikten i det här fallet hade klarat av att motstå brand som kommer underifrån. Men som nämnts i avsnitt 2.1 kompletteras oftast KL-trä med lager för att klara av både ljudkrav och brandkrav.

Att resultatet inte blev som det var tänkt kan göra att det blir en osäkerhet kring om samverkansbjälklag verkligen är ett alternativ till betongbjälklag. Men bara för att resultaten i det här arbetet bl.a. visar att KL-träbjälklagen har lägre höjd än samverkansbjälklaget betyder det inte att en optimering av dimensioneringen och andra avgränsningar inte kan ge ett annorlunda resultat. Till exempel kan olika varianter av bjälklagen ge olika resultat, se avsnitt 2.1.1, 2.2.1 och 2.3.1 för exempel

på vilka olika varianter det finns för träbjälklag, betongbjälklag och samverkansbjälklag.

Eftersom betongbjälklaget dimensionerades som en balk, för att förenkla arbetet och beräkningen, hade resultatet kanske sett annorlunda ut. I betongbjälklag bärs lasten i flera riktningar och det kanske hade påverkat nedböjningen. Men volymen hade troligtvis inte varit annorlunda då de höjder som användes i beräkningen är höjder som används i praktiken.

Dimensioneringen av samverkansbjälklaget hade kunnat optimerats mer. Vid den preliminära höjden bestod höjden av 40 % betong och resterade 60 % av KL-trä. För att förenkla beräkningen delades KL-trähöjden med antalet skikt (3 eller 5). Det här gjorde att skikten inte hade de standardiserade tjocklekarna som användes vid dimensioneringen av KL-träbjälklaget. T.ex. för spännvidden 3 m har de tre skikten höjden 19 mm. Om arbetet gjorts om hade det kanske varit en faktor som borde justeras. Men i samråd med examinator togs beslutet att det inte påverkar resultatet i så stor utsträckning.

Den justerande höjden för samverkansbjälklaget har samma värde som KL-träbjälklaget från 3 till 6,6 m, därefter ökar höjden mer för samverkansbjälklaget än för KL-träbjälklaget. Det visar att för kortare spännvidder än 6,6 m är det inte nödvändigt att ha samverkansbjälklag, då räcker det med KL-träbjälklag. Egentligen är det inte nödvändigt att ha samverkansbjälklag för någon av spännvidderna 3 till 10 m om strävan är att minska den totala höjden på byggnaden. Som sagts hade resultatet förändrats om brandmotstånd hade beräknats. Då hade större skiktjocklekar behövts för de kortare bjälklagen och de standardiserade dimensioner i KLH:s (2020) broschyr hade kanske bara räckt till 7 m spännvidd. Då hade KL-träbjälklaget inte haft några dimensioner för de längre spännvidderna. Spännviddsspannet hade också kunnat ökas för att på riktigt visa hur långa spännvidder samverkansbjälklaget klarar av. Enligt KL-trähandboken (Svenskt trä, 2017) är samverkansbjälklaget lämpligt för spännvidderna 6 till 12 m.

I avsnitt 4.2 visas miljöpåverkan för respektive material. Där syns det tydligt att koldioxidutsläppen för betongbjälklagen är betydligt högre än för KL-träbjälklagen. Som t.ex. för 10 m spännvidd är utsläppet för betong (standard) 458 kg CO₂ medan för KL-trä är utsläppet 161 kg CO₂. Det är en skillnad på 297 kg. För samverkansbjälklaget (med standardbetong) är utsläppet 359 kg CO₂, det är nästan 100 kg mindre än betongens utsläpp.

Vidare i avsnitt 4.2 visas upptaget av koldioxid. Där syns det å andra sidan att koldioxidupptaget för KL-trä är betydligt mycket högre än betongen. Spännvidden 10 m blir återigen ett exempel där KL-trä tar upp 1290 kg CO₂ under tillväxten medan betongen (standard) tar upp 104 kg CO₂ under sin livstid. Samverkansbjälklaget (med standardbetong) tar upp 980 kg CO₂ under KL-träets tillväxt och under betongens livstid.

Kostnaden för respektive bjälklag var väldigt svåruppskattad. En möjlighet till att förenkla den beräkningen hade kunnat vara att ta kontakt med tillverkare och fråga om tillverkningskostnader och monteringskostnader. Dessa intervjuer hade troligtvis gett en bättre bild av vad totala kostnader skulle bli än uppskattningarna som använts.

Resultatet som uppskattningarna gav visar i avsnitt 4.5 att den totala kostnaden för KL-träbjälklag och samverkansbjälklag är ungefär lika stor för samtliga spannvidder, medan betongbjälklaget har en kostnad som ligger mellan 2 300 och 8 900 kr. För lägre spannvidder är skillnaden mellan de tre bjälklagen inte så stor men både KL-träbjälklagets och samverkansbjälklagets kostnader ökar snabbare än betongbjälklaget. Eftersom egentygnden skiljer sig så mycket för de olika bjälklagen, se Figur 18, hade det varit intressant att undersöka transportkostnader också.

Det som jag tycker är viktigast att ta med sig från det här arbetet är utsläppen som visas i Figur 19. Det är viktigare än någonsin att se över vad byggbranschen kan göra för att minska utsläppen. En orsak till utsläppen är användningen av betong, som sagt är betong ett väldigt bra byggmaterial p.g.a. alla fördelar. Men den stora nackdelen är utsläppen. Vid användning av KL-träbjälklag eller samverkansbjälklag istället för betongbjälklag måste höjden på bjälklaget ökas, vilket påverkar slutliga höjden på byggnaden med följd av mindre antal våningar, men det är kanske något som får kompromissas för att minska utsläppen av växthusgaser.

6. Slutsats

I det här kapitlet kommer slutsatser fastställas och förslag på vidare forskning föreslås.

KL-trä, för- och nackdelar:

Fördelar:

- Lätt
- Hög hållfasthet i förhållande till sin vikt
- Enklare och billigare transporter
- Hög prefabriceringsgrad men också enkelt att bearbeta på plats
- God isoleringsförmåga
- Förnybart

Nackdelar:

- Lätt, byggnaderna kan böja svaja
- Fuktkänsligt, risk för röt- och insektsangrepp
- Sämre brandmotstånd
- Svårt att uppnå akustiska krav

Betong, för- och nackdelar:

Fördelar:

- Hög tryckhållfasthet
- Brandsäkert
- Enkelt att uppnå ljudkrav
- Tungt (stabiliserar byggnaden, ljuddämpande och lufttäthet)
- Återvinningsbart

Nackdelar:

- Tungt (leder till svårare och dyrare transporter)
- Inte förnybart (höga utsläpp av koldioxid)

Samverkansbjälklag

Fördelar jämfört med KL-träbjälklag:

- Ökad böjstyvhet
- Ökad lastbärande kapacitet
- Enklare att uppnå ljud- och brandkrav
- Mindre känslig mot vibrationer

Nackdelar jämfört med KL-träbjälklag:

- Fukt kommer i kontakt med KL-trä
- Längre byggtid om betongen gjuts på plats
- Behöver stötta upp betongen för att undvika högre momentan nedböjning

Fördelar jämfört med betongbjälklag:

- Mindre volym av betong
- Lättare egentyngd och enklare transporter

- Ökad användning av förnybara material, mindre utsläpp av koldioxid

Nackdelar jämfört med betongbjälklag:

- Då KL-trä agerar som armering ger det större tvärsnitt

Slutsats av resultatet:

- Den totala höjden för KL-träbjälklag och betongbjälklag är ungefär lika stora
- Samverkansbjälklaget ger inte lägre total höjd för spännvidderna 3 till 10 m
- Nedböjningskravet går att uppnå om höjden ökas
- Utsläppen för betongbjälklaget är betydligt högre än för KL-träbjälklaget
- Vid användning av samverkansbjälklaget tas det upp mer koldioxid än vad det frigörs
- Den totala kostnaden för samverkansbjälklaget och träbjälklaget är ungefär lika stor
- Den totala kostnaden för betongbjälklaget är lägre än de andra materialen

Förslag till vidare forskning

Om arbetet hade gjorts om hade optimering av dimensioneringen varit viktig att göra. Alltså beräkning av brandmotståndet och undersökning hur mycket högre bjälklagen hade behövt vara för att klara t.ex. R60.

I vidare forskning hade det varit intressant att ta med transportkostnader och jämföra dessa. Eftersom materialen väger så olika och det påverkar transportkostnaden kan det vara en ytterligare parameter att ta hänsyn till. Dessutom kan transporterens utsläpp också inkluderas i miljöpåverkan. För att få bättre uppfattning gällande kostnader för vad respektive bjälklag kostar är det lämpligt i vidare forskning att ta kontakt med tillverkare av bjälklagen. Beräkningarna i dimensioneringen som gjorts i detta arbete har varit handberäkningar, i vidare forskning kan finita elementmetoden användas för att kanske utöka parametrar att jämföra och optimera bjälklagen ytterligare genom att t.ex. använda olika materialklasser för olika spännvidder.

7. Referenser

- Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., & Johansson, P. (2013). *Bärande konstruktioner, del 1*. Chalmers tekniska högskola.
- Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., & Johansson, P. (2014). *Bärande konstruktioner, del 2*. Chalmers tekniska högskola.
- Andersson, R., Gustafsson, T., Ljungkrantz, C., & Stripple, H. (2018). *CO2 uptake in cement-containing products*. IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd.
<https://www.ivl.se/download/18.34244ba71728fcb3f3f8f9/1591705289370/B2309.pdf>.
- Balian, D., Pädam, S., Uppenbergs, S., & Wadström, E. (2021). *Klimatneutral betong genom kravställning*. (Rapportnummer 6967). Naturvårdsverket.
<http://www.naturvardsverket.se/Documents/publ-filer/6900/978-91-620-6967-4.pdf?pid=28150>.
- Boverket. (2019). *Boverkets konstruktionsregler, EKS 11*. Hämtat från <https://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2019/eks-11.pdf>
- Boverket. (2021). *Utsläpp av växthusgaser från bygg- och fastighetssektorn*. Hämtat från <https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/miljoindikatorer---aktuell-status/vaxthusgaser/>
- Dahlin, E., & Jarefalk, L. (2020). *Multikriterieanalys av samverkanskonstruktioner*. (Kandidatuppsats, Tekniska högskolan i Jönköping) Hämtat från DiVA: <http://hj.diva-portal.org/smash/get/diva2:1459032/FULLTEXT01.pdf>
- Dias, A., Schänzlin, J., & Dietsch, P. (2018). *Design of timber-concrete composite structures*. A state-of-the-art report by COST Action FP1402 / WG 4.
https://webarchiv.typo3.tum.de/TUM/costfp1402/fileadmin/w00btl/www/All_Members/Dias_A._Schaenzlin_J._Dietsch_P._Design_of_Timber-Concrete_Composite_Structures.pdf.
- Johansson, E. (2019). *Utsläpp och lagring av koldioxid*. (Kandidatuppsats, Uppsala Universitet) Hämtat från DiVA: <https://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1348229/FULLTEXT01.pdf>
- KLH Massivholz GmbH. (2019). *Timber Concrete Composites*. Hämtat från <https://www.klh.at/wp-content/uploads/2019/10/klh-timber-concrete-composites-1.pdf>
- KLH Massivholz GmbH. (2020). *Cross-Laminated Timber*. Hämtat från <https://www.klh.at/wp-content/uploads/2019/10/cross-laminated-timber-122020.pdf>
- Lukaszewska, E. (2009). *Development of Prefabricated Timber-Concrete Composite Floors*. (Doktorsavhandling, Luleå tekniska universitet) Hämtat från DiVA: <http://ltu.diva-portal.org/smash/get/diva2:991048/FULLTEXT01.pdf>
- Naturvårdsverket. (2020). *Bygg- och fastighetssektorns klimatpåverkan*. Hämtat från <https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Klimat-och-luft/Klimat/Tre-satt-att-berakna-klimatpaverkande-utslapp/Bygg--och-fastighetssektorns-klimatpaverkan/>
- Stening, E., & Wall, E. (2017). *Utmaningar med att projektera höga trähus*. (Kandidatuppsats, Örebro universitet) Hämtat från DiVA: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1151368/FULLTEXT01.pdf>
- Stripple, H., Sternhufvud, C., & Skårman, T. (2005). *Utredning om möjligheter att minska utsläppen av fossil koldioxid från mineralindustrin*. (Rapportnummer B1651). IVL Svenska Miljöinstitutet.

- <https://www.ivl.se/download/18.34244ba71728fcb3f3f6ee/1591704430415/B1651.pdf>.
- Svensk betong. (u.d.). *Återvinning*. Hämtat från <https://www.svenskbetong.se/bygga-med-betong/bygga-med-platsgjutet/hallbart-byggande/bestandighet-och-livslangd-2>
- Svensk betong. (2017). *Betong och klimat*. Hämtat från Svensk betong: <https://www.svenskbetong.se/klimatrapport>
- Svensk betong. (2017). *Statik*. Hämtat från Svensk betong: <https://www.svenskbetong.se/bygga-med-betong/bygga-med-prefab/statik>
- Svensk betong. (u.d.). *Massiva bjälklagsplattor (RD & RD/F)*. Hämtat från <https://www.svenskbetong.se/bygga-med-betong/bygga-med-prefab/statik/massiva-bjalklagsplattor-rd-rd-f>
- Svenska institutet för standarder. (2004). *Eurokod 5: dimensionering av träkonstruktioner - Del 1-1: Allmänt - Gemensamma regler och regler för byggnader*. (SS-EN 1995-1-1:2004), <https://www.sis.se/>.
- Svenska institutet för standarder. (2004). *Eurokod 5: Dimensionering av träkonstruktioner - Del 1-2: Allmänt - Brandteknisk dimensionering*. (SS-EN 1995-1-2:2004). <https://www.sis.se/>.
- Svenska institutet för standarder. (2005). *Eurokod 2: Dimensionering av betongkonstruktioner - Del 1-1: Allmänna regler och regler för byggnader*. (SS-EN 1992-1-1:2005), <https://www.sis.se/>.
- Svenska institutet för standarder. (2016). *Betong - Fordringar, egenskaper, tillverkning och överensstämmelse*. (SS-EN206:2013+A1:2016), <https://www.sis.se/>.
- Svenska skogen. (u.d.). *Grönt är skönt och bra för klimatet*. Hämtat från <https://www.svenskaskogen.nu/#gront-ar-skont>
- Svenskt trä. (2003). *Brandklasser för material och konstruktioner*. Hämtat från Träguiden: <https://www.traguiden.se/om-tra/byggyfysik/brandsakerhet/brandklasser-for-material-och-konstruktioner/>
- Svenskt trä. (2003). *Träprodukters kretslopp*. Hämtat från Träguiden: <https://www.traguiden.se/om-tra/miljo/miljoeffekter/miljoeffekter/traprodukters-kretslopp/>
- Svenskt trä. (2017). *Effektiva tvärsnittsvärden*. Hämtat från Träguiden: <https://www.traguiden.se/konstruktion/kl-trakonstruktioner/dimensionering-av-kl-trakonstruktioner/3.3-kl-tradimensionering-enligt-balkteori/3.3.4-effektiva-tvarsnittsvarden/>
- Svenskt trä. (2017). *KL-trä i kretslopp*. Hämtat från Träguiden: <https://www.traguiden.se/konstruktion/kl-trakonstruktioner/kl-tra-som-konstruktionsmaterial/1.4-kl-tra-i-kretsloppet/kl-tra-i-kretsloppet/>
- Svenskt trä. (2017). *KL-trähandbok, fakta och projektering av KL-träkonstruktioner*. Hämtat från <https://www.svensktra.se/siteassets/5-publikationer/pdfer/svt-kl-trahandbok-2017.pdf>
- Svenskt trä. (2017). *Limträ och miljö*. Hämtat från Träguiden: <https://www.traguiden.se/konstruktion/limtrakonstruktioner/fakta-om-limtra/fakta-om-limtra/limtra-och-miljon/inledning/?previousState=1000>
- Svenskt trä. (2017). *Materialegenskaper för KL-trä*. Hämtat från Träguiden: <https://www.traguiden.se/konstruktion/kl-trakonstruktioner/dimensionering-av-kl-trakonstruktioner/3.2-materialegenskaper-for-kl-tra/materialegenskaper-for-kl-tra/>

- Svenskt trä. (2017). *Plattbjälklag*. Hämtat från Träguiden:
<https://www.traguiden.se/konstruktion/kl-trakonstruktioner/bjalklag/5.1-bjalklag---oversikt/5.1.1-plattbjalklag/?previousState=1000000>
- Svenskt trä. (2018). *Fler vill bygga i trä*. Hämtat från <https://www.svensktra.se/om-oss/aktuellt/2018/10/fler-vill-bygga-i-tra/>
- Svenskt trä. (u.d.). *Bjälklag*. Hämtat från Träguiden:
<https://www.traguiden.se/konstruktion/konstruktionsexempel/bjalklag/>
- Wikells Byggberäkningar AB. (2020). *Wikells sektionsfakta NYB*. Wikells Byggberäkningar AB.

8. Bilaga 1

Beräkningsexempel för spännvidd 6 m

Gemensamma värden:

| | |
|----------------------------|-----|
| q_k [kN/m ²] | 2 |
| b [m] | 0,6 |
| L [m] | 6 |
| Arbetslön [kr/h] | 212 |
| Omkostnadspålägg [%] | 272 |

KL-träbjälklag:

| Ekv. | Förklaring | Variabel | Värde |
|---|----------------------------|-----------------------------|-------------|
| | Egentyngd | g_k [kN/m ²] | 0,8 |
| | | k_{mod} | 0,8 |
| | | γ_M | 1,25 |
| | | k_{mod} | 0,6 |
| (1) | | Q_d [kN/m] | 2,448 |
| (2) | | M_{Ed} [kNm] | 11,02 |
| (4) | | f_{md} [MPa] | 15,36 |
| Höjd baserat på lastbärande kapacitet | | | |
| (8) | | h [mm] | 84,7 |
| Höjd baserat på nedböjningskrav (föregående spännvidd klarade nedböjningskravet med dessa skiktjocklekar) | | | |
| | Antal skikt | n | 5 |
| | Skiktjocklekar | t_1 [mm] | 40 |
| | | t_2 [mm] | 40 |
| | | t_3 [mm] | 40 |
| | | t_4 [mm] | 40 |
| | | t_5 [mm] | 40 |
| | Total höjd | h [mm] | 200 |
| (12) | | $\gamma_1 = \gamma_5$ | 0,912 |
| | Se Figur 7 | a_1 [mm] | 80 |
| (11) | Effektivt yttröghetsmoment | I_{ef} [mm ⁴] | 292 966 400 |
| (9) | Momentan nedböjning | w_{inst} [mm] | 12,82 |
| (10) | Slutlig nedböjning | w_{fin} [mm] | 20,5 |
| (3) | Nedböjningskrav | w [mm] | 20 |
| Nedböjningskravet klarade inte (ökar till 7 skikt) | | | |
| | Antal skikt | n | 7 |
| | Skiktjocklekar | t_1 [mm] | 30 |
| | | t_2 [mm] | 40 |
| | | t_3 [mm] | 30 |
| | | t_4 [mm] | 40 |
| | | t_5 [mm] | 30 |

| | | | |
|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------|
| | | t_6 [mm] | 40 |
| | | t_7 [mm] | 30 |
| | Total höjd | h [mm] | 240 |
| (12) | Gammavärde | $\gamma_1 = \gamma_7$ | 0,9325 |
| | Se Figur 8 | a_1 [mm] | 105 |
| (11) | Effektivt yttröghetsmoment | I_{ef} [mm ⁴] | 375512342 |
| (9) | Momentan nedböjning | w_{inst} [mm] | 10,0 |
| (10) | Slutlig nedböjning | w_{fin} [mm] | 16,0 |
| (3) | Nedböjningskrav | w [mm] | 20 |
| Nedböjningskravet klarades. | | | |
| | Egentyngd (per m bredd och längd) | [kN/m ²] | 1,008 |
| | Utsläpp | [kg CO ₂] | 72,6 |
| | Upptag | [kg CO ₂] | 580,6 |
| Materialkostnad | | | |
| | Limträbalk (90x405 mm) | [kr/m] | 265 |
| | "Omvandling till KL-trä" | [kr/m ³] | 7270,23 |
| | Tid | [h/m] | 1,3 |
| | Total materialkostnad | [kr] | 6281,50 |
| | Tillverkning/montering | [kr] | 992,16 |
| | Omkostnadspålägg | [kr] | 2698,68 |
| | Total kostnad | [kr] | 9972,32 |

Betongbjälklag:

| Ekv. | Förklaring | Variabel | Värde |
|---|--------------------------------------|----------------------------|----------------------|
| | | g_k [kN/m ²] | 5 |
| | | γ_c | 1,5 |
| | | γ_s | 1,15 |
| | Vald höjd | h [mm] | 200 |
| | Armeringsdiameter | \emptyset [mm] | 8 |
| (18) | | A_{si} [m ²] | $5,03 \cdot 10^{-5}$ |
| (1) | | Q_d [kN/m] | 5,85 |
| (2) | | M_{Ed} [kNm] | 26,33 |
| (13) | Dimensionerande hållfasthet betong | f_{cd} [MPa] | 20 |
| (14) | Elasticitetsmodul | E_{cm} [MPa] | 32,58 |
| (15) | Dimensionerande hållfasthet armering | f_{yd} [MPa] | 435 |
| Antal armeringsstänger baserat på lastbärande kapacitet | | | |
| (17) | | A_s [m ²] | $5,4 \cdot 10^{-4}$ |
| (19) | Antal stänger | n | $10,71 \approx 11$ |

| | | | |
|---|--|------------------------------|----------------------|
| | | | |
| Justering av höjd med hänsyn till tvärsnittets momentkapacitet och sprickmoment | | | |
| (20) | | M_{Rd} [kNm] | 36,3 |
| (21) | | M_{cr} [kNm] | 16,2 |
| | OK med hänsyn till att $M_{Rd} < M_{cr}$ | | |
| Kontroll av täckande betongskikt | | | |
| (26) | | c_{nom} [mm] | 20 |
| (27) | Kantavstånd | e_1 [mm] | 32 |
| (28) | Avstånd mellan stänger | | 33 |
| | ”bredd” | [mm] | 394 < 600 OK! |
| Nedböjning | | | |
| (9) | Momentan nedböjning | w_{inst} [mm] | 7,58 |
| (28) | | $\Delta\varepsilon_{cs}$ | $2,49 \cdot 10^{-4}$ |
| (29) | | $\left(\frac{1}{r}\right)_s$ | $1,24 \cdot 10^{-3}$ |
| (31) | Slutlig nedböjning pga krympning | $w_{fin,s}$ [mm] | 5,6 |
| (32) | Slutlig nedböjning | w_{fin} [mm] | 13,18 |
| (3) | Nedböjningskrav | w [mm] | 20 |
| | | | |
| | Egentyngd (per bredd och längd) | [kN/m ²] | 4,7 |
| | | | |
| | Utsläpp (standard) | CO ₂ [kg] | 181 |
| | Utsläpp (förbättrad) | CO ₂ [kg] | 157 |
| | Upptag (standard) | CO ₂ [kg] | 41,6 |
| | Upptag (förbättrad) | CO ₂ [kg] | 36,1 |
| | | | |
| | Materialkostnad | [kr] | 1900,80 |
| | Tid | [h/m ²] | 0,95 |
| | Tillverkning/montering | [kr] | 725,04 |
| | Omkostnadspålägg | [kr] | 1972,11 |
| | Total kostnad | [kr] | 4597,95 |

Samverkansbjälklag:

| Ekv. | Förklaring | Variabel | Värde |
|------|--------------------------------|----------------------|---------|
| | | K_b [kN/m] | 500 000 |
| (33) | Total preliminär höjd | h_{tot} [mm] | 300 |
| (34) | Betongens höjd | h_b [mm] | 120 |
| | Träets höjd | h_t [mm] | 180 |
| | Träskiktens höjd | t [mm] | 36 |
| | Antal skikt | n | 5 |
| | Massa betong (per m spännvidd) | [kg/m ²] | 169,2 |
| | Massa trä (per m spännvidd) | [kg/m ²] | 45,4 |
| | Total egentyngd | [kN/m ²] | 2,146 |

| | | | |
|--|---------------------------------|--------------------------|----------------------|
| | Dimensionerande last | Q_d [kN/m] | 4,697 |
| | Dimensionerande moment | M_{Ed} [kNm] | 21,13 |
| | Area betong | A_b [m ²] | 0,072 |
| | Area enskilt träskikt | A_t [m ²] | 0,0216 |
| | Tröghetsmoment betong | I_b [m ⁴] | $8,64 \cdot 10^{-5}$ |
| | Tröghetsmoment enskilt träskikt | I_t [m ⁴] | $2,33 \cdot 10^{-6}$ |
| (36) | Mekanisk tyngdpunkt | x_{TP} [m] | 0,1898 |
| | Se Figur 13 | s [m] | 0,05 |
| (35) | Gammavärde betong | γ_b | 0,939 |
| (12) | Gammavärde träskikt | $\gamma_1 = \gamma_5$ | 0,9275 |
| | | γ_3 | 1 |
| | Se Figur 13 | a_1 [m] | 0,1718 |
| | | a_3 [m] | 0,0998 |
| | | a_5 [m] | 0,0278 |
| (37) | Effektiv böjstyvhets | $(EI)_{ef}$ | $1,75 \cdot 10^7$ |
| (9) | Momentan nedböjning | w_{inst} [mm] | 4,52 |
| Beräkning slutlig nedböjning | | | |
| (38) | | $E_t(\infty)$ [GPa] | 6,88 |
| (39) | | $G_{9090}(\infty)$ [MPa] | 31,25 |
| (40) | | $E_{cm}(\infty)$ [GPa] | 10,9 |
| (36) | Mekanisk tyngdpunkt | x_{TP} [m] | 0,1672 |
| | Se Figur 13 | s [m] | 0,073 |
| (35) | Gammavärde betong | γ_b | 0,9695 |
| (12) | Gammavärde träskikt | $\gamma_1 = \gamma_5$ | 0,9275 |
| | | γ_3 | 1 |
| | Se Figur 13 | a_1 [m] | 0,1492 |
| | | a_3 [m] | 0,0772 |
| | | a_5 [m] | 0,0052 |
| (37) | Effektiv böjstyvhets | $(EI)_{ef}$ | $8,91 \cdot 10^6$ |
| (9) | Slutlig nedböjning | w_{fin} [mm] | 8,89 |
| (3) | Nedböjningskrav | w [mm] | 20 |
| Justering av höjd för att öka nedböjningen gav följande värden | | | |
| (33) | Total höjd | h_{tot} [mm] | 215 |
| (34) | Betongens höjd | h_b [mm] | 86 |
| | Träets höjd | h_t [mm] | 129 |
| | Träskiktens höjd | t [mm] | 26 |
| | Antal skikt | n | 5 |
| | Massa betong (per m spännvidd) | [kg/m ²] | 202,1 |
| | Massa trä (per m spännvidd) | [kg/m ²] | 54,2 |
| | Total egentyngd | [kN/m ²] | 2,563 |
| | Dimensionerande last | Q_d [kN/m] | 3,876 |
| | Dimensionerande moment | M_{Ed} [kNm] | 17,44 |

| | | | |
|------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|----------------------|
| | Area betong | A_b [m ²] | 0,0516 |
| | Area enskilt träskikt | A_t [m ²] | 0,0155 |
| | Tröghetsmoment betong | I_b [m ⁴] | $3,18 \cdot 10^{-5}$ |
| | Tröghetsmoment enskilt träskikt | I_t [m ⁴] | $8,59 \cdot 10^{-7}$ |
| (36) | Mekanisk tyngdpunkt | x_{TP} [m] | 0,1360 |
| | Se Figur 8 | s [m] | 0,036 |
| (35) | Gammavärde betong | γ_b | 0,9746 |
| (12) | Gammavärde träskikt | $\gamma_1 = \gamma_5$ | 0,9614 |
| | | γ_3 | 1 |
| | Se Figur 13 | a_1 [m] | 0,1231 |
| | | a_3 [m] | 0,0715 |
| | | a_5 [m] | 0,0199 |
| (37) | Effektiv böjstyvhet | $(EI)_{ef}$ | $6,52 \cdot 10^6$ |
| (9) | Momentan nedböjning | w_{inst} [mm] | 10,03 |
| Beräkning slutlig nedböjning | | | |
| (38) | | $E_t(\infty)$ [GPa] | 6,88 |
| (39) | | $G_{9090}(\infty)$ [MPa] | 31,25 |
| (40) | | $E_{cm}(\infty)$ [GPa] | 10,9 |
| (36) | Mekanisk tyngdpunkt | x_{TP} [m] | 0,1199 |
| | Se Figur 13 | s [m] | 0,052 |
| (35) | Gammavärde betong | γ_b | 0,9875 |
| (12) | Gammavärde träskikt | $\gamma_1 = \gamma_5$ | 0,9614 |
| | | γ_3 | 1 |
| | Se Figur 13 | a_1 [m] | 0,1070 |
| | | a_3 [m] | 0,0554 |
| | | a_5 [m] | 0,0038 |
| (37) | Effektiv böjstyvhet | $(EI)_{ef}$ | $3,36 \cdot 10^6$ |
| (9) | Slutlig nedböjning | w_{fin} [mm] | 19,46 |
| (3) | Nedböjningskrav | w [mm] | 20 |
| | | | |
| | Totalt utsläpp (m. standardbetong) | CO ₂ [kg] | 113,0 |
| | Totalt utsläpp (m. förbättrad betong) | CO ₂ [kg] | 102,8 |
| | Totalt upptag (m. standardbetong) | CO ₂ [kg] | 308,3 |
| | Totalt upptag (m. förbättrad betong) | CO ₂ [kg] | 306,0 |
| | | | |
| | Materialkostnad | [kr] | 4078,96 |
| | Tid trä | [h/m ²] | 1,3 |
| | Tid slipning | [h/m ²] | 0,16 |
| | Tid härdning | [h/m ² /mm] | 0,0004 |
| | Total tid | [h/m ²] | 1,49 |

| | | | |
|--|------------------------|------|---------|
| | Tillverkning/montering | [kr] | 1140,53 |
| | Omkostnadspålägg | [kr] | 3102,23 |
| | Total kostnad | [kr] | 8321,72 |

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH
SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2021
www.chalmers.se



CHALMERS