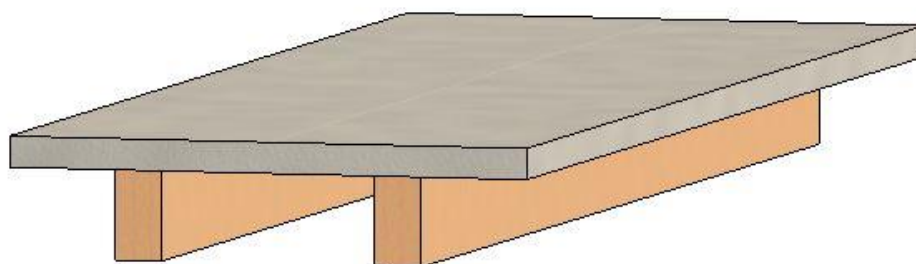




CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



En kostnads-/nyttobedömning av trä-betong-kompositbjälklag i byggnader

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet samhällsbyggnadsteknik

Jesper Johansson
Sebastian Urbath

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK
AVDELNING FÖR KONSTRUKTIONSTEKNIK

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Gothenburg, Sweden 2022
www.chalmers.se

EXAMENSARBETE ACEX20

A cost/benefit evaluation of timber-concrete-composite floors in buildings

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

Jesper Johansson

Sebastian Urbath

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för konstruktionsteknik

Lättviktskonstruktioner

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2022

A cost/benefit evaluation of timber-concrete-composite floors in buildings

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

Jesper Johansson

Sebastian Urbath

© JESPER JOHANSSON, 2022

© SEBASTIAN URBATH, 2022

Examensarbete ACEX20

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Chalmers tekniska högskola 2022

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 2022

A cost/benefit evaluation of timber-concrete-composite floors in buildings

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

Jesper Johansson

Sebastian Urbath

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för konstruktionsteknik

Lättviktskonstruktioner

Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

Under en längre tid har välbeprövade byggmetoder dominerat byggbranschen, därmed har utvecklingen av nya byggtekniker hämmats. Under de senaste decennierna har materialvalen för byggbranschen i Sverige främst varit stål, betong och trä. Dessa material har sina fördelar och nackdelar, därmed används det material som anses ha flest fördelar i den typ av konstruktion som ska byggas. Under senare tid har träkonstruktioner kommit att bli mer populärt då dessa ger konstruktioner lägre klimatavtryck. Trä är dock ett material som har begränsningar med dess hållfasthetsaspekter, så som låg vikt och böjstyvhet vilket leder till problem med nedböjning och vibrationer. För att begränsa ett högt klimatavtryck men samtidigt behålla fördelar som finns hos betongkonstruktioner har det forskats mycket om trä-betongkompositbyggelement. Dessa element behåller en stor del av betongens positiva hållfasthetsegenskaper, och samtidigt har ett lägre klimatavtryck då inte lika stor mängd betong behövs som i en ren betongkonstruktion. Syftet med denna rapport är att undersöka huruvida fördelarna med trä-betongkompositbjälklag är så pass stora att det är gynnsamt för byggbolag att börja använda sig av dessa tekniker, i stället för de klassiska beprövade men klimatsvaga byggteknikerna. De faktorer som kommer att granskas och jämföras är höjd, kostnad, miljöpåverkan och den karakteristiska hållfastheten hos bjälklagen. Resultatet visar att det finns stora fördelar med att använda sig av trä-betongkompositbjälklag. Denna typ av bjälklag är miljövänligare än betongbjälklag samt klarar av längre spännvidder och är lägre än ett KLT-bjälklag. Det visar sig även att trä-betongkompositbjälklaget har en miljöpåverkan som inte är mycket högre än vad ett KLT-bjälklag har, då betong också används i dessa bjälklag för både tyngd och akustiska skäl. Den slutsats som framförs är att samverkanbjälklag har en stor potential att bli ett alternativ till KLT-bjälklag om mer forskning och applicering utförs inom området.

Nyckelord: Limträbalk, Hållfasthetsklass, Komposit, Trä-betong-kompositgolvsystem, Kostnadskalkyler, LCA, Hållfasthetsberäkningar, NCC, Samverkanbjälklag

A cost/benefit evaluation of timber-concrete-composite floors in buildings

Degree Project in the Engineering Programme

Civil and Environmental Engineering

Jesper Johansson

Sebastian Urbath

Department of Architecture and Civil Engineering

Division of construction technology

Research Group Name

Chalmers University of Technology

ABSTRACT

During a long period of time, well-proven construction methods have dominated the construction industry, thus the development of new construction techniques has been hampered. In recent decades, the material choices for the construction industry in Sweden have mainly been steel, concrete, and wood. These materials have their advantages and disadvantages, thus using the material that is considered having the greatest advantages in the type of construction to be built. In recent times, wooden constructions have become more popular as these give const a lower carbon footprint. However, wood is a material that has major limitations when one considers aspects such as low stiffness and weight which result in problems with deflection and vibrations. In order to limit the climate footprint but at the same time retain the advantages that exist in concrete structures, much research has been done on wood concrete composite building elements. These building elements retain a large part of the positive strength properties of concrete, and at the same time has a lower carbon footprint because, not as much concrete will be used as in a pure concrete structure. The purpose of this thesis is to explore whether the benefits of wood concrete composite floor systems are so great that it is favorable for construction companies to start using these techniques, instead of the classic proven but climate-weak construction techniques. The aspects that will be examined and compared are height, cost, environmental impact, and the strength of the floor systems. The results show that there are great advantages to use wood concrete composite floor systems. This type of floor system is more environmentally friendly than concrete floor systems, can handle longer spans and is thinner than a CLT floor system. It also turns out that the wood concrete composite floor system has an environmental impact that is not much higher than what a CLT floor system has, thus concrete also is used in these floor systems for both weight and acoustic purposes. The conclusion that is presented is that composite floor systems have a great potential to become an alternative to CLT floor systems, if more research and application is carried out in this area.

Key words: Glued laminated timber, Timber-concrete-floor systems, Composite floor systems, NCC

Innehållsförteckning

	I
	II
	III
FÖRORD	VI
BETECKNINGAR	VII
1. INTRODUKTION	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	2
1.3 Metod	2
1.4 Avgränsningar	2
2. TRÄ-BETONGKOMPOSITBJÄLKLAG	4
2.1 Benämningar	4
2.2 Vanliga typer av bjälklag i Sverige	4
2.3 Kompositsamverkan	5
2.4 Generella mått för bjälklaget	6
2.5 Utformningen av NCC:s bjälklag	6
2.6 VÅRA DESIGNFÖRSLAG	7
2.6.1 TCC-bjälklag	9
2.6.2 NLT-bjälklag	9
2.6.3 Optimerat TCC-bjälklag	10
2.6.4 Optimerat NLT-bjälklag	10
3. DIMENSIONERING	11
3.1 Indata för materialen	11
3.1.1 Betong 30/37	11
3.1.2 Limträ GL30c	11
3.1.3 Konstruktionsvirke 30c	11
3.1.4 KLT 30c	12
3.1.5 Generella värden för trä	12
3.2 Dimensionerande värden	13
3.2.1 Betong	14
3.2.2 Trä	14
3.2.3 Laster	15
3.3 Samverkan	16
3.3.1 Grovnot som skjuvförbindare	17
3.3.2 Skruv som skjuvförbindare	18
3.3.3 Beräkning av tvärsnittets ytcentrum	19
3.3.4 Beräkning av samverkan enligt gamma-metoden	20
	III

3.4	Påverkan	20
3.5	Vibrationer	21
3.5.1	Eigenfrekvens	22
3.5.2	Impulshastighetsrepons	22
3.5.3	Nedböjning på grund av punklastkriteriet	22
3.5.4	Vertikal topphastighet	23
3.6	Nedböjning	23
3.7	Brandsäkerhet	24
3.7.1	Reducerad tvärsnittsarea för träet	25
3.7.2	Nya variabler vid fall av brand	26
3.7.3	Betongens påverkan	26
3.8	Vart brister konstruktionen	26
3.8.1	TCC	26
3.8.2	NLT	27
3.9	Resultat för våra designförslag	28
3.9.1	Optimerade versioner	29
4.	KOSTNADSKALKYLER	30
4.1	Materialkostnader	30
4.2	Bjälklagskostnader	30
4.2.1	NCC	30
4.2.2	TCC Skruv	30
4.2.3	TCC Grovnot	31
4.2.4	NLT Skruv	31
4.2.5	NLT Grovnot	31
4.2.6	TCC Skruv Optimerad	31
4.2.7	NLT Skruv Optimerad	31
4.2.8	Utvärdering	32
5.	MILJÖPÅVERKANANALYS	33
5.1	NCC	33
5.2	TCC Skruv	33
5.3	TCC Grovnot	34
5.4	NLT Skruv	34
5.5	NLT Grovnot	34
5.6	TCC optimerad	35
5.7	NLT optimerad	35
5.8	Utvärdering	36
6.	DISKUSSION	37
6.1	Jämförelse	38
6.2	Materialval	38

6.3	Slutsats	39
7.	REFERENSER	40

Förord

Detta är ett examensarbete som omfattar 15 högskolepoäng och skrivs på institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik på avdelningen konstruktionsteknik, under forskargruppen lättviktskonstruktioner. Detta examensarbete är utfört i samarbete med NCC i Göteborg. Arbetet är utfört och skrivet under våren 2022.

Vi vill härmed också framföra ett formellt tack till vår handledare Arshad Abosh på NCC och vår examinator Robert Jockwer på Chalmers Tekniska Högskola, för informativa möten och vägledning under arbetets gång.

Göteborg Maj 2022
Jesper Johansson & Sebastian Urbath
Chalmers Tekniska Högskola
Samhällsbyggnadsteknik

Beteckningar

Latinska versaler

A	tvärsnittsytta
B	bredd
E	elasticitetsmodul
E_{cm}	betongens elasticitetsmodul
E_d	elasticitetsmodulens dimensioneringsvärde
$E_{d,mean}$	elasticitetsmodulens medelvärde
E_{mean}	medelvärde elasticitetsmodul
EI	böjstyvhet
EI_{ef}	effektiv böjstyvhet
$E_{0,mean}$	elasticitetsmodul
F_c	kraft som påverkar skruv i tcc
$F_{c,notch,capacity}$	momentkraft som grovnot klarar av
F_{Rk}	kraftbärande kapacitet för varje skruvpar
F_t	kraft som påverkar skruv i tcc
$F_{V,notch,capacity}$	tvärkraft som grovnot klarar av
$F_{ax,\alpha,Rk}$	karakteristisk kraftkapacitet för skruvpar
G	koordinat placerad i tvärsnittets centrum
G_{mean}	Skjuvmodul
I	yttröghetsmoment
K_{ser}	skjuvmodul
L	längd, spännvidd
L_{ref}	längd på bjälklag
L_{tot}	totala längden
M	moment
M_{Ed}	dimensionerande moment
V	tvärkraft
V_d	dimensionerande tvärkraft
V_{Ed}	tvärkraftskapacitet

Latinska gemena

b	bredd
b_{ef}	effektiv bredd
b_N	bredd av grovnot
d_{ef}	inbränningsdjup
$d_{char,n}$	verkligt inbränningsdjup
d_0	extra säkerhet för att kompensera för den försämrade hållfastheten
f_1	egenfrekvens
f_{cd}	dimensionerad tryckhållfasthet betong
f_{cm}	medeltryckhållfasthet betong
f_d	dimensionerad hållfasthet
f_{md}	dimensionerad böjhållfasthet KLT
$f_{m,k}$	karakteristikböjhållfasthet KLT
f_{vd}	dimensionerad skjuvhållfasthet trä
$f_{v,k}$	dimensionerad skjuvhållfasthet betong
f_{ck}	karakteristisk tryckhållfasthet för betong

$f_{ctk,0,05}$	karakteristisk draghållfasthet ur 5%-fraktilen för betong
$f_{c,0,k}$	karakteristisk tryckhållfasthet för trä
f_{ctd}	dimensionerande draghållfasthet vid olycksfall
g	gravitationskonstanten
h	höjd
h_{ef}	effektiv höjd
h_N	djupet av grovnot
k_a	faktor
k_{mod}	modifieringsfaktor
k_{def}	deformationsfaktor
k_h	höjdfaktor
kr	svenska kronor
l_{ef}	längd av skruv
m	koordinat placerad i tvärsnittets centrum
q_{egen}	last på grund av egenvikt
q_{perm}	permanent last
$q_{d,ULS}$	last vid ultimate limit state
q_{var}	varierande last
$q_{d,SLS}$	last vid serviceability limit state
q_d	distribuerad last
s	avstånd mellan grovnoter
t	tid i minuter
v	impulshastighet
w	nedböjning
w_{inst}	initial nedböjning
w_{bend}^q	nedböjning på grund av böjmoment
w_{shear}^q	nedböjning på grund av skjuvmoment
w_{fin}	slutgiltig nedböjning
w_{creep}	nedböjning på grund av krypning
$w_{inst,max}$	maximal tillåten initial nedböjning
$w_{fin,max}$	maximal tillåten slutgiltig nedböjning
w_{ef}	böjstyvhet
z	koordinat placerad i tvärsnittets centrum
z_i	koordinat av undersökt del i bjälklaget, avstånd från z_{na}
z_{na}	tvärsnittets ytcentrum

Grekiska gemena

α	vinkel
α_{cc}	hållfasthetsreduktionsfaktor
β_n	variabel som anger brand hastigheten för ett material
γ_c	partialkoefficient vid olyckslast
γ_d	partialkoefficient
γ_M	partialkoefficient, säkerhetsfaktor
γ_q	partialkoefficient
σ_d	böjspänning, tryckspänning

σ_i	böjspänning i specifik position i bjälklaget
ϕ	kryptal
τ_{conn}	tvärkraft i en enskild förbindare
τ_d	skjuvspänning
ρ_{mean}	densitet
$\rho_{mean,btg}$	densitet för betong
$\rho_{mean,trä}$	densitet för trä

Förkortningar

BBR	Boverkets byggregler
HDF	Håldäck
KLT	Korslimmat trä
LCA	Livscykelanalys
NLT	Nail laminated timber
TCC	Timber concrete composite
SLS	Serviceability Limit State
ULS	Ultimate Limit State

1. Introduktion

1.1 Bakgrund

Trots att trä är ett av Sveriges äldsta använda byggmaterial, har man under de senaste decennierna valt att istället bygga högre konstruktioner i andra material. Nu vänder trenden och höga träkonstruktioner blir alltmer vanligt i Sverige. Detta har till viss del påverkats på grund av att den Europeiska unionen har ändrat standarden för träkonstruktioner, från en lag som tidigare hindrade byggherrar från att upprätta hus med fler än två våningar i trä (RISE, u.d.).

Detta medför allt fler utmaningar då branschen normaliserats kring de föråldrade lagarna. Man valde därför tidigare att bygga med främst betong och stål, då dessa material har en högre tolerans för långa spann och balkarna kan konstrueras med låg profil.

I synnerhet i höga trähus är ett av många återkommande problem att vikten på byggnaderna blir för låg eftersom att trä är ett mycket lättare material än både stål och betong. När en konstruktion blir för lätt, kan det uppstå problem med svajningar delvis på grund av vindbelastningar. I projekteringen av världens högsta trähus, det Norska Mjøstårnet, har konstruktörerna valt att bygga de tre översta bjälklagen i betong med enda syfte att tynga ner byggnaden (Derome, 2020). De bärande elementen är fortfarande helt i trä, men det visar ändå på en av de många fördelar som man kan åstadkomma av att kombinera betong med träkonstruktioner.

Träbyggnader har även svårare att nå de akustiska kraven som har standardiserats enligt regelverket Boverkets Byggregler. Detta eftersom ljudvågor färdas längre i träkonstruktioner än i exempelvis stål och betongkonstruktioner. Idag använder man sig av en lösning genom att ljudisolera byggnaden med en pågjutning av betong ovanpå bjälklaget.

Detta betyder att betongen i de flesta av dagens träkonstruktioner har som enda uppgift att tynga ner och ljudisolera byggnaderna. Vilket bidrar till ett slöseri på byggmaterial, både av betong och trä. Eftersom detta medför att man måste överdimensionera träbjälklag för att klara den ytterligare lasten som betongen medför, samt ett slöseri av betongens fördelaktiga hållfasthetsegenskaper.

En teknik som har kommit att bli mer vanlig i Schweiz och Österrike är träkompositbjälklag. Detta är ett kompositbjälklag som består av trä och betong, som använder betongens egenskaper att ta emot tryckkrafter och träts egenskaper att stå emot dragkrafter. Detta bidrar till att man kan använda mindre betong samt slankare träkonstruktioner än en byggnad helt i trä. Vilket medför att byggnaden blir både mer platseffektiv och miljövänligare då inte lika mycket betong används.

Fler aktörer på den svenska marknaden har kommit att bli mer intresserade av denna teknik då det finns stor potential i konstruktionen. Ett av detta byggföretagen är NCC som bland annat är huvudentreprenör för bygget av västlänken i Göteborg.

1.2 Syfte

Examensarbetets syfte är att framföra en utredning kring ett okommersiellt samverkankompositbjälklag. Denna utredning kommer att granska eventuella fördelar och nackdelar som kompositbjälklag kan medföra vid husbyggnationer. Utredningen kommer att jämföra dessa bjälklag med ett något mer kommersiellt KLT bjälklag som NCC använder i en nuvarande byggproduktion. De framtagna samverkansbjälklagen ska undersökas om de kan vara alternativa förslag för NCC:s lösning. Analysen kommer att bestå av aspekter kring höjd, tyngd, hållfasthet, miljöpåverkan och kostnad. Frågeställningen är utformad kring huruvida denna teknik är gynnsam utifrån de analyserade aspekterna.

1.3 Metod

En utredning kring i huruvida en omställning till TCC och NLT-bjälklag kommer bidra med ett gynnsamt utfall vid konstruktion av träbyggnader kommer utföras. Utredningen kommer att utföras med assistans från handledare på NCC och Chalmers tekniska högskola. Handledarna kommer att assistera med hållfasthetsberäkningar, kostnadskalkyler samt beräkningar av koldioxidutsläpp.

Under första steget kommer dimensionering av tre olika typer av samverkanbjälklag att utföras. Varianterna kommer att dimensioneras med olika tekniker, där ett är en replika av NCC:s bjälklag där limträbalk samverkar med KLT. De övriga är designade med ett par olika typer av skjuvförbindare som skapar samverkan mellan trä och betong.

Därefter kommer kostnadsberäkningar att utföras. Dessa kommer endast att vara fokuserade på material och arbetskostnader. Kostnadskalkylerna kommer att redovisa kostnaden för varje bjälklagselement och kostnaden per kvadratmeter bjälklag.

Till sist kommer en miljöpåverkananalys att utföras. Denna analys kommer att redovisa utsläpp i koldioxidekvivalenter per kvadratmeter bjälklag.

Slutligen kommer en jämförelse att presenteras. Denna jämförelse kommer att bestå av för och nackdelar med de olika designerna. Därefter kommer ett samverkansbjälklag att presenteras som en alternativ lösning till NCC:s design. Denna rekommendation kommer att vara baserad på bjälklagets höjd, tyngd, hållfasthet, kostnadseffektivitet och miljöpåverkan.

1.4 Avgränsningar

Eftersom TCC är ett brett ämne har avgränsningar gjorts, därmed har alla bjälklagstyper satts till samma dimensioner när det gäller bredd och längd. Detta för att även ge en rättvis jämförelse. Enbart höjden kommer att variera på bjälklagen.

De två förslagen på samverkansbjälklag som behandlas i rapporten använder sig av antingen limträbalk eller NLT för trädelen av konstruktionen. KLT analyseras enbart i NCC:s konstruktion där det samverkar med limträbalkar, alltså trä-trä. Det hade även varit en intressant jämförelse med KLT som ett samverkansbjälklag mellan trä-

betong. Men denna typ har valt att överses då det redan finns betydligt mer kunskap kring den.

Bjälklagen kommer att dimensioneras utifrån brandsäkerhets, nedböjnings och vibrationskrav. Men det kan komma att krävas ytterligare kontroll av bjälklagens akustiska egenskaper, exempelvis flanktransmission.

De rådande oroligheterna i Europa har haft en stor påverkan på både priser och leveranser av material, vilket har medfört att priset på materialen har ökat markant. Därav kommer kostnadskalkylen att utgå från hur priserna låg innan oroligheterna. Kostnadskalkylen kommer endast vara inriktad på material och arbetskostnader med värden angivna av NCC.

Eftersom Livscykelanalyser kan bli väldigt omfattande kommer det endast att presenteras en mindre omfattande miljöpåverkananalys, där koldioxidavtrycket varje bjälklagselement är skyldigt till utgår från steg A1-A5 i en LCA.

2. Trä-betongkompositbjälklag

Trä-betongkompositbjälklag är en relativt ovanlig teknik att använda sig av i Sverige. Under den senaste tiden har aktörerna på den svenska marknaden fått upp ögonen för tekniken, eftersom den börjar att bli mer vanlig i delar av södra Europa.

TCC kan ha många olika skepnader beroende på vilka egenskaper man vill få ut från bjälklaget. Gemensamt för konstruktionerna är att de använder sig av betong i det övre skiktet. Det finns olika tillvägagångssätt för att få materialen att samverka, man kan till exempel använda sig av grovnoter, skruvar eller epoxylim som skjuvförbindare mellan betongen och träet. Det finns flera olika alternativ av trä att använda sig av i konstruktionen, där limträ och kl-trä är vanliga. Det finns även en annan liknande teknik som heter Nail Laminated Timber (NLT), där man använder konstruktionsvirke som fästs samman av spik för att ge en homogen konstruktion.

Trä och betong kompositbjälklag är en teknik som utnyttjar vardera materials bästa egenskaper, betong är ett material som har väldigt goda egenskaper att ta emot tryckkrafter (Betongindustri, u.d.). Medan trä är ett material som har mycket goda egenskaper att stå emot dragkrafter (Svenskt Trä, 2021).

En av utmaningarna med dimensionering av trä-betongkompositbjälklag är samverkansgraden mellan betongen och träet. Det är fördelaktigt att samverka mellan dessa är så hög som möjligt då tekniken går ut på att materialen ska dela på krafterna som uppstår i konstruktionen, men samtidigt kan denna samverkan bidra med problem i sig och konstruktionen inte klarar av att hantera de skjuvkrafter som uppstår i förbindelsen. Se Kapitel 3.3 Samverkan.

2.1 Benämningar

I denna rapport skrivs det mycket om TCC ”Timber Concrete Composite” detta är ett vedertaget uttryck för samverkanskonstruktioner innehållande betong och trä. Designförslaget med limträbalk och betong kommer i denna rapport även att benämnas vid förkortningen TCC för enkelhetens skull, se Kapitel 2.7.1. Den andra samverkanskonstruktionen som tas upp har en träkonstruktion av NLT och kommer för enkelhetens skull att bara benämnas vid detta för hela samverkanskonstruktionen, se Kapitel 2.7.2.

2.2 Vanliga bjälklagstyper i Sverige

Beroende på vilken typ av byggnad som byggs används olika typer av bjälklag, i Sverige är det vanligaste betongbjälklaget håldäck även benämnt HDF-bjälklag. Detta är ett ihåligt förspänt betongbjälklag som är mycket effektivt då det kräver mindre betong och armering än solida betongbjälklag (Byggelement, u.d.). Denna typ av bjälklag är vikeffektivt och klarar långa spännvidder upp emot 18 meter, vilket medför möjligheter till flexibla planlösningar. HDF-bjälklag är även ett prefabricerat bjälklag, vilket ger möjlighet till stora variationer och en högre effektivitet under konstruktion av byggnader. Den största nackdelen med HDF är att dessa bjälklag enbart är tillverkade i betong och stål vilket har en relativt hög klimatpåverkan.



Figur 2.1 Visualisering av ett HDF-bjälklag (Strängbetong, u.d.). Publiceras med medgivande av upphovsrättsinnehavaren.



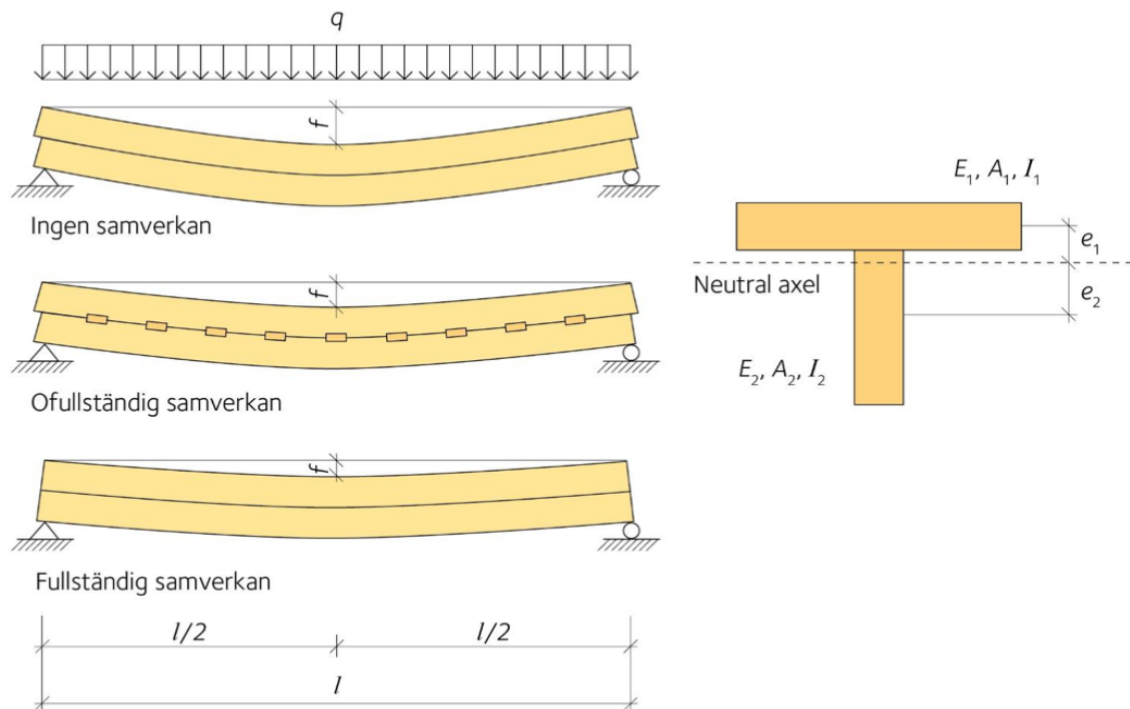
Figur 2.2 Visualisering av ett KLT-bjälklag (Martinsons, 2022). Publiceras med medgivande av upphovsrättsinnehavaren.

För träkonstruktioner är standarden att använda sig av ett bjälklag bestående av korslimmat trä. Korslimningen ger trä bättre egenskaper då man minimerar risken med svaga punkter i kvistar och liknande. Detta material klarar av en spännvidd på ungefär 7,4 meter om det inte förstärks med limträbalkar, detta är betydligt kortare än HDF bjälklagets 18 meter, vilket medför att det inte är lika effektivt att använda sig av.

2.3 Kompositsamverkan

Kompositsamverkan är två eller flera material i en och samma konstruktion som samverkar tillsammans. För att uppnå samverkan mellan materialen krävs en förbindare som överför krafter även benämnt som skjuvförbindare. I ett TCC bjälklag kan denna skjuvförbindare antingen vara mekanisk eller kemisk. Dessa skjuvförbindare är mycket viktiga då det är dessa som påverkar samverkansgraden i materialen. Om samverkansgraden skulle bli för låg fungerar inte materialen som en komposit med varandra, i stället blir det översta materialet i konstruktionen en last för det underliggande att bära. De mekaniska skjuvförbindarna kan till exempel vara skruvar som förs in i materialen eller grovnoter, medan kemiska skjuvförbindare kan exempelvis vara epoxilim (Ingvarsson, Gustafsson, 2015).

Mekanisk samverkan fungerar i regel sämre än kemisk samverkan, vid kemisk samverkan kan man anta full samverkan eftersom inga större förskjutningar i förbandet kommer att ske. Vid mekanisk samverkan, ger grovnot större samverkan än skruvar. Grovnotar medför dock vissa risker, vid en händelse av ett eventuellt brott kommer ett sprött brott att uppstå. Vilket man helst undviker i konstruktioner då dessa kan komma utan förvarning.



Figur 2.3 Visualisering av de olika typer av samverkan som kan ske mellan två enskilda komponenter i ett bjälklag (Svenskt trä, 2021). Publiceras med medgivande av upphovsrättsinnehavaren.

2.4 Generella mått för bjälklaget

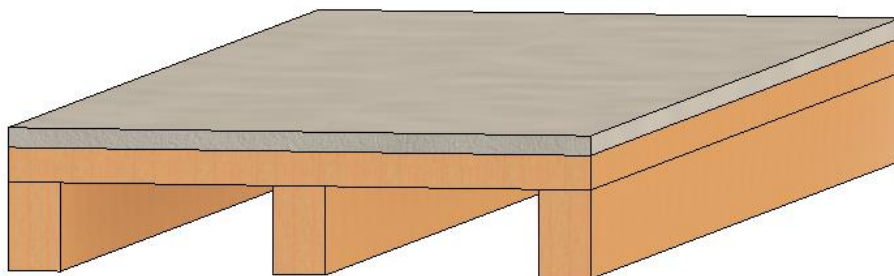
Grunderna för detta arbete är taget från en ej offentliggjord nyproduktion som NCC ska konstruera. Projektet är ett kontorshus konstruerat i trä som kommer att bli fem våningar högt. Detta projekt har lagt grunden för de dimensioner som använts vid dimensioneringen av kompositbjälklagen.

Kontorshus bör vara flexibla då eventuella hyresgäster värdesätter anpassningsbara lokaler till sina verksamheter. Därav används modulmått för att uppfylla dessa krav. 2,4m är ett av standardmått och det är det som används i NCC:s projekt. Alla bjälklag som analyseras i denna rapport utgår även från samma mått, med en bredd på 2,4m för att enkelt kunna jämföras. Husets bredd kommer att utformas efter 2 moduler med måtten 6,6m och en modul med måttet 4,8m. I denna rapport analyseras bjälklaget av längd 6,6m då den längsta spännvidden blir dimensionerande.

2.5 Utformningen av NCC:s bjälklag

Kontorshuset som är projekterat kommer att fokusera på konstrueras med ett bjälklag enligt Figur 2.4. Konstruktionen består av en KLT skiva, tre limträbalkar, en 80 millimeter hög betongpågjutning samt två stegljudsmattor. Träkonstruktionen är produceras genom prefabricering där man på fabrik limmar och skruvar ihop limträbalkarna med KLT skivan. Limmet som används heter MUF och är ett av de vanligaste på marknaden, förr var det vanligt att använda sig av epoxilim då det är ett mycket starkt lim som ger hög samverkan mellan de hoplimmade materialen (Svenskt trä, 2016). Detta används dock inte längre då det är mycket giftigt och kan ha fördömande konsekvenser om det skulle komma ut i naturen.

Betongen i konstruktionen är platsgjuten och har ingen konstruktionsmässig samverkan med resten av bjälklaget. Anledningen till användning av betong i konstruktionen är på grund av vikt och akustiska skäl.



Figur 2.4 NCC:s bjälklag. Författarens egen bild.

Beståndsdelar:

- Icke samverkande betongpågjutning, höjd 80mm
- 2st stegljudsmattor, höjd 25mm/matta
- KL-trä, höjd 140mm
- 3st limträbalkar, höjd 360mm, bredd 215mm.

Total höjd: 630mm

2.6 Våra Designförslag

Kompositkonstruktioner som är designade med samverkan utformas med en något mindre volym material, då man i detta fall kan ta hänsyn till betongens hållfasthetsegenskaper. Figur 2.5 visualiserar samverkansbjälklagets höjd jämfört med NCC:s något mer traditionella konstruktion, man kan se en relativt tydlig skillnad mellan de olika typerna.

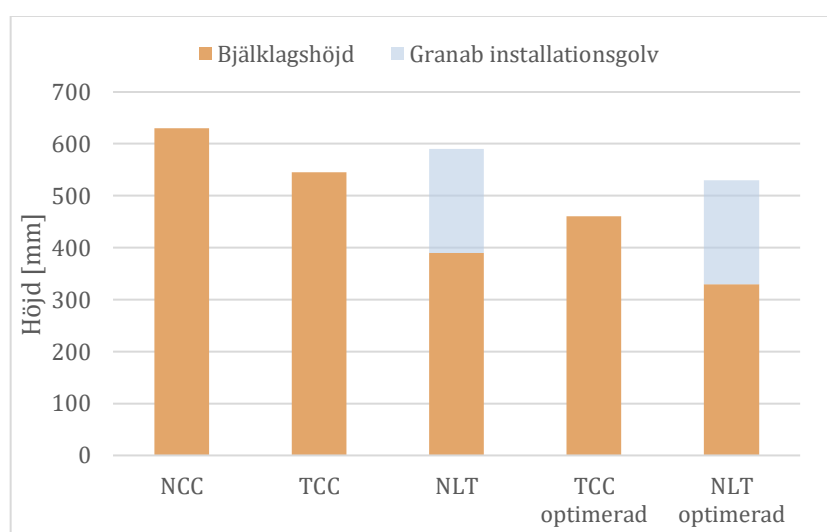
Vid utformning av NLT-konstruktioner bör installationsutrymmen tas i beaktning. TCC-konstruktioner har ett utrymme mellan limträbalkarna, vilket kan användas till installationer. Detta medför då att höjden på bjälklaget inte påverkas av installationer. Eftersom konstruktionen på ett NLT-bjälklag inte har något fritt utrymme kommer det bli nödvändigt att montera ett installationsgolv för att tillgodose detta. Detta tillägg förändrar inte bjälklagets hållfasthetsegenskaper nämnvärt, men bör redovisas i bjälklagets totala höjd vilket kan observeras i Figur 2.5.

Övriga skillnader mellan NCC:s träkonstruktion och samverkansbjälklagen är att TCC och NLT-bjälklagen är utformade utan stegljudsmattor. Speciellt de optimerade TCC

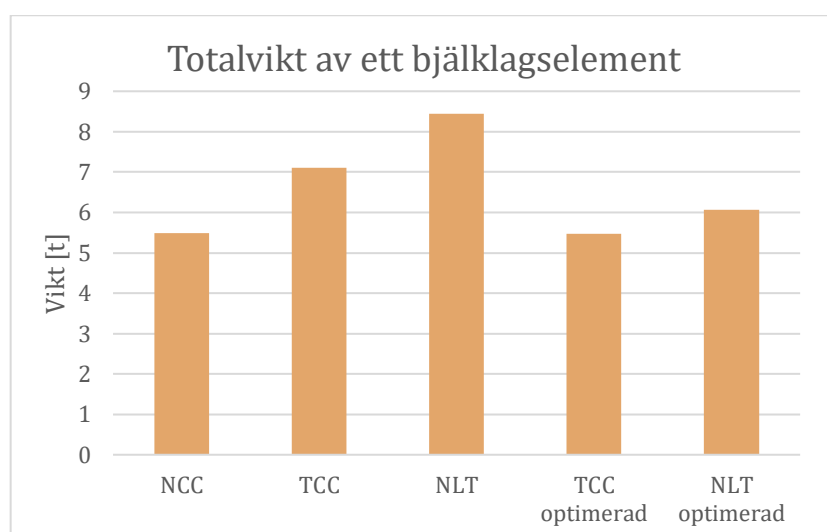
och NLT-bjälklagen hade med fördel designats med stegljudsmattor för att tillföra extra säkerhet. Att utrusta ett bjälklag med stegljudsmattor medför en ökad höjd, men det är inte en särskilt stor uppoffring när man tar dess fördelar i beaktning.

Det dimensionerade TCC-bjälklaget klarar kraven för vibrationer bra och lägger sig runt gränsvärdet för klass A, vilket är den högsta klassen med avseende på vibrationer (Talja, Toratti, 2006). På grund av den delvis större mängd betong som används i dessa konstruktioner, blir dem mer motståndskraftiga mot vibrationer. Ytterligare information om detta kan ses i Kapitel 3.5.3.

I Figur 2.6 beskrivs även hur vikten skiljer sig mellan NCC:s bjälklag och samverkanskonstruktionerna. Mest till följd av den större volym betong som används i samverkanskonstruktionerna. En tyngre konstruktion klarar akustiska krav bättre och blir stabilare i slutändan (Hansson, Hervén, 2011).

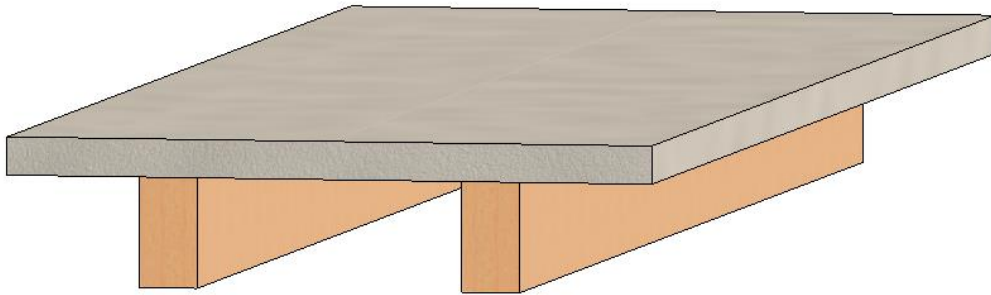


Figur 2.5 Höjd på de undersökta bjälklags varianterna. Installationsgolvshöjd: 200mm. Författarens egen bild.



Figur 2.6 Tyngd i ton på de undersökta bjälklags varianterna. Författarens egen bild.

2.6.1 TCC-bjälklag



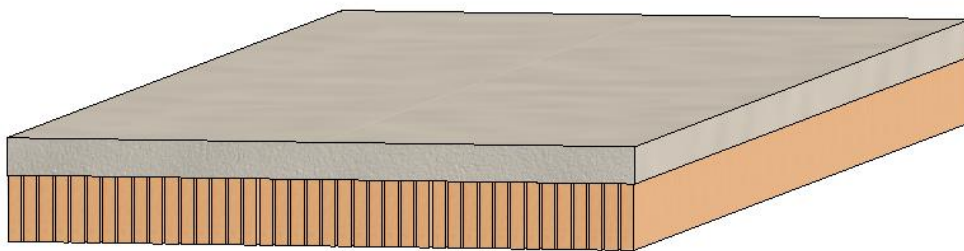
Figur 2.7 TCC bjälklag. Författarens egen bild.

Beståndsdelar:

- Samverkande betongpågjutning, höjd 140mm
- 2st limträbalkar, höjd 405mm, bredd 215mm.

Total höjd: 545mm

2.6.2 NLT-bjälklag



Figur 2.8 NLT bjälklag. Författarens egen bild.

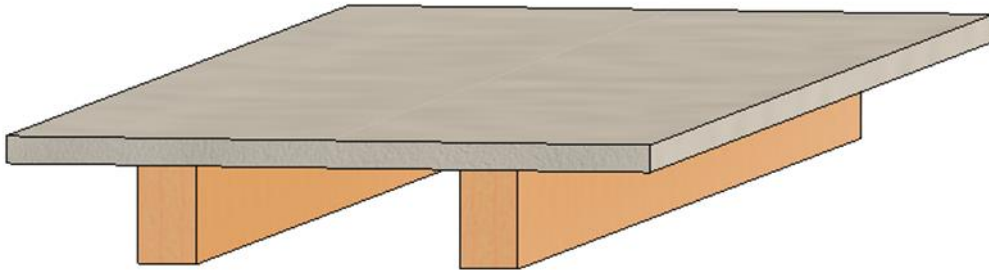
Beståndsdelar:

- Samverkande betongpågjutning, höjd 140mm
- Konstruktionsvirke, höjd 250mm

Total höjd: 390mm

2.6.3 Optimerat TCC-bjälklag

Dessa versioner kan använda sig av mindre material tack vara ett lägre antaget gränsvärde för nedböjning.



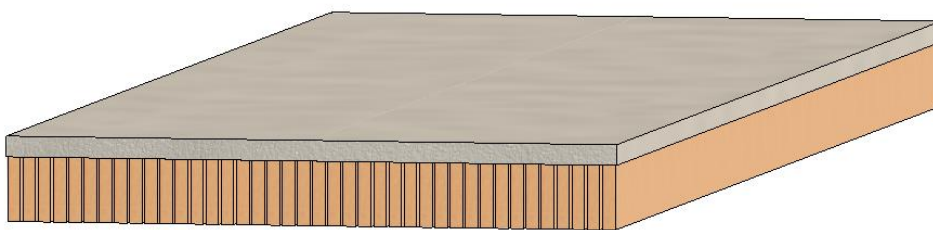
Figur 2.9 Optimerat TCC bjälklag. Författarens egen bild.

Beståndsdelar:

- Samverkande betongpågjutning, höjd 100mm
- 2st limträbalkar, höjd 360mm, bredd 215mm.

Total höjd: 460mm

2.6.4 Optimerat NLT-bjälklag



Figur 2.10 Optimerat NLT bjälklag. Författarens egen bild.

Beståndsdelar:

- Samverkande betongpågjutning, höjd 80mm
- Konstruktionsvirke, höjd 250mm

Total höjd: 330mm

3. Dimensionering

Under detta kapitel kommer beräkningsgången som lagt grund för framtagandet av samverkanbjälklagen att redovisas. Dessa beräkningar behandlar nedböjning, akustik, skjuvkrafter, brandklasser, samverkan, laster, böjmoment, vibrationer.

3.1 Indata för materialen

3.1.1 Betong 30/37

Tabell 3.1 Karakteristiska hållfasthetsvärden för betong 30/37 (Al-Emrani, Engström, Johansson, Johansson, 2019).

Tryckhållfasthet f_{ck}	30 MPa
Draghållfasthet $f_{ctk,0,05}$	2,0 MPa
Densitet ρ_{mean}	2500 kg/m ³
Kryptal ϕ	2,0

Hållfasthetsreduktionsfaktor α_{cc}	1,0
Partialkoefficient γ_c	1,5

Den betong som används i konstruktionerna är armerad med ett tunt armeringsnät, detta för att bidra till stabilitet och förenkla tillverkningsprocessen.

Fördelarna med samverkansbjälklag vid dimensionering är att betongen endast är utformad till att ta tryckspänningar. Detta gör att beräkningarna kan förenklas något då armeringen bidrar med sina strukturella egenskaper först vid olycksfall. Eftersom betongen ensamt klarar av de tryckspänningar som den utsätts för kommer beräkningar kring armering att uteslutas.

3.1.2 Limträ GL30c

Tabell 3.2 Karakteristiska hållfasthetsvärden för limträbalk GL30c (Svenskt trä, 2019).

Böjning parallellt med fibrerna $f_{m,k}$	30 MPa
Tryck parallellt med fibrerna $f_{c,0,k}$	24,5 MPa
Längsskjuvning $f_{v,k}$	3,5 MPa
Elasticitetsmodul $E_{0,mean}$	13000 MPa
Skjuvmodul G_{mean}	650 MPa
Densitet ρ_{mean}	430 kg/m ³

3.1.3 Konstruktionsvirke 30c

Konstruktionsvirket som används som underlag för beräkningar tar sina dimensioner från Svenskt trä (2018) där alla NLT bjälklag baseras på dimensionen 50x250mm. Bredden 250mm är relevant för hållfasthetsberäkningarna då virket ställs på höjden så att $h_2 = 250\text{mm}$ och bredden sätts till hela bjälklagsbredden. Vid beräkning innebär detta $b_2 = 1200\text{mm}$. Virkets tjocklek 50mm blir först relevant vid

kostnadsberäkningarna då prisuppgifterna utgivna av NCC anges i löpmeter, se kapitel 4.

Tabell 3.3 Karakteristiska hållfasthetsvärden för konstruktionsvirke 30c (Svenskt trä, 2019).

Böjning parallellt med fibrerna $f_{m,k}$	30 MPa
Tryck parallellt med fibrerna $f_{c,0,k}$	24 MPa
Längsskjuvning $f_{v,k}$	4,0 MPa
Elasticitetsmodul $E_{0,mean}$	12000 MPa
Skjuvmodul G_{mean}	750 MPa
Densitet ρ_{mean}	460 kg/m ³

3.1.4 KLT 30c

KL-träskivan används enbart i den ursprungliga konstruktionen framtagen av NCC. Den är i denna beräkning uppbyggd av virke med samma klass som NLT bjälklaget för att ge en korrekt jämförelse, alltså konstruktionsvirke 30c.

Tabell 3.4 Karakteristiska hållfasthetsvärden för KLT 30c (Svenskt trä, 2017).

Böjning parallellt med fibrerna $f_{m,k}$	30 MPa
Tryck parallellt med fibrerna $f_{c,0,k}$	24 MPa
Längsskjuvning $f_{v,k}$	4,0 MPa
Elasticitetsmodul $E_{0,mean}$	12000 MPa
Densitet ρ_{mean}	460 kg/m ³

3.1.5 Generella värden för trä

Värdena som ses över i detta kapitel är gemensamma för alla bjälklagskonstruktioner då de beror av lasternas karaktär och bjälklagets position som är samma för alla versioner.

Tabell 3.5 Klimatklasser med avseende på träkonstruktioner.

Klimatklass	Relativ fuktighet	Konstruktionens belägenhet
1	≤ 65	Inomhus. Uppvärmad miljö merparten av tiden.
2	≤ 85	Inomhus. Inte nödvändigtvis uppvärmd, men till viss del ventilerade och säkra för fukt.
3	≥ 85	Utomhus. Exponerade emot yttre omständigheter.

Bjälklaget befinner sig inomhus i skyddad miljö, därav:

Klimatklass

1

Tabell 3.6 Lastvaraktighet.

Last	Varaktighet	Exempel
Permanent	> 10 år	Egentyngd
Lång	6 månader – 10 år	Den bundna lastdelen av nyttig last av inredning och personer
Medellång	1 vecka – 6 månader	Den fria lastdelen av nyttig last av inredning och personer. Snölast med vanligt värde
Kort	Mindre än 1 vecka	Vindlast. Snölast med karakteristiskt värde. Enstaka koncentrerad last på yttertak
Momentan		Olyckslast

Bjälklaget utsätts för en kontorslast vilket ger en medellång lastvaraktighet där k_{mod} kan hämtas ur Tabell 3.7 nedan (Boverket, 2019).

Tabell 3.7 k_{mod} beroende av lastvaraktighet.

Klimatklass	Permanent	Lång	Medellång	Kort	Momentan
1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
3	0,60	0,55	0,65	0,90	0,90

Klimatklass 1, samt medellång last ger:

Omräkningsfaktor k_{mod} 0,80

Tabell 3.8 k_{def} beroende av klimatklass.

Klimatklass	1	2	3
Konstruktionsvirke	0,60	0,80	2,00
Limträ	0,60	0,80	2,00
KLT (under 7 lager)	0,85	1,1	-

Klimatklass 1 ger:

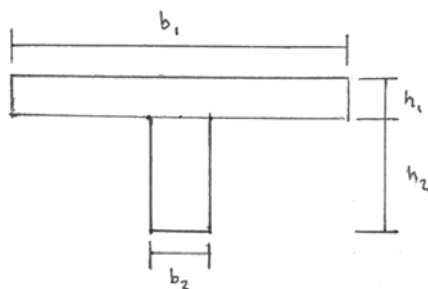
Omräkningsfaktor k_{def} 0,60

Partialkoefficient γ_M 1,25

3.2 Dimensionerande värden

Som tidigare nämnt i kapitel två så består konstruktionen utav ett bjälklag som är 6,6 meter långt och 2,4 meter brett. Eftersom TCC-konstruktionen är uppbyggd utav två bärande limträbalkar så delas konstruktionen upp på två delar så att beräkningarna

endast sker på en limträbalk med tillhörande betong. Designen med NLT beräknas på samma vis, alltså som ett bjälklag med längden 6,6 meter och bredden 1,2 meter.



Figur 3.1 Illustration av tvärsnitt använt för beräkning. Författarens egen bild.

Där b_1 och h_1 alltid anger bredd och höjd av betongen, b_2 och h_2 anger alltid bredd och höjd av träet.

3.2.1 Betong

Dimensionerande tryckhållfasthet:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} * \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (1)$$

Elasticitetsmodulen vid långvarig last tar hänsyn till krypning i materialitet vilket bidrar till ett betydligt lägre värde än den initiala elasticitetsmodulen. Eftersom detta värde leder till större påfrestningar på konstruktionen kommer det att användas som det dimensionerande värdet i följande beräkningar (Dias, Schänzlin, Dietsch, 2018). För betongskiktet beräknas det enligt:

$$E_d = \frac{E_{cm}}{1 + \phi} \quad (2)$$

3.2.2 Trä

Dimensionerande böjhållfasthet:

$$f_{md} = k_{mod} * \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} \quad (3)$$

Dimensionerande tryckhållfasthet:

$$f_{cod} = k_{mod} * \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} \quad (4)$$

Dimensionerande skjuvhållfasthet:

$$f_{vd} = k_{mod} * \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} \quad (5)$$

Elasticitetsmodul vid långvarig last:

$$E_{d,mean} = \frac{E_{mean}}{1 + k_{def}} \quad (6)$$

För låga höjder av balkar i trä kan man ofta tillgodose extra hållfasthet för böjning, detta sker genom att multiplicera $f_{m,k}$ med en omräkningsfaktor k_h (Al-Emrani, Engström, Johansson, Johansson, 2019). I detta projekt är det enbart limträbalkarna som uppfyller detta krav och denna faktor beräknas enligt:

$$k_h = \min \left\{ \left(\frac{600}{h} \right)^{0,1} \right. \\ \left. 1,1 \right\} \quad (7)$$

3.2.3 Laster

I ett hus som detta är det ett antal laster som spelar in. Den första att ta i beaktning är egenvikten för materialen och beräknas enligt ekvationen nedan. Där $g = 9,82 \text{ m/s}^2$.

$$q_{egen} = g * (b_1 * h_1 * \rho_{mean,btg} + b_2 * h_2 * \rho_{mean,trä}) \quad (8)$$

De permanenta laster som påverkar bjälklaget betecknas q_{perm} och är summan av följande två laster (Boverket, 2019):

Installationer	0,3 kN/m ²
Skiljeväggar	0,5 kN/m ²

Variabel last är den last som påverkar under begränsade tidsperioder. I fallet av en kontorsbyggnad kommer det exempelvis under arbetstid att vara en högre belastning på bjälklaget, denna betecknas q_{var} och är hämtad från Boverket (2019).

Kontorslast q_{var}	2,5 kN/m ²
-----------------------	-----------------------

ULS "Ultimate Limit State" beräknas för att vara dimensioneringsunderlag för vårt bjälklag. Denna last är den som bidrar till vilket böjmoment samt vilken skjuvning konstruktionen utsätts för (Svenskt trä, 2016).

$$q_{d,ULS} = \gamma_g * \gamma_d * (q_{egen} + q_{perm}) + \gamma_d * \gamma_q * q_{var} \quad (9)$$

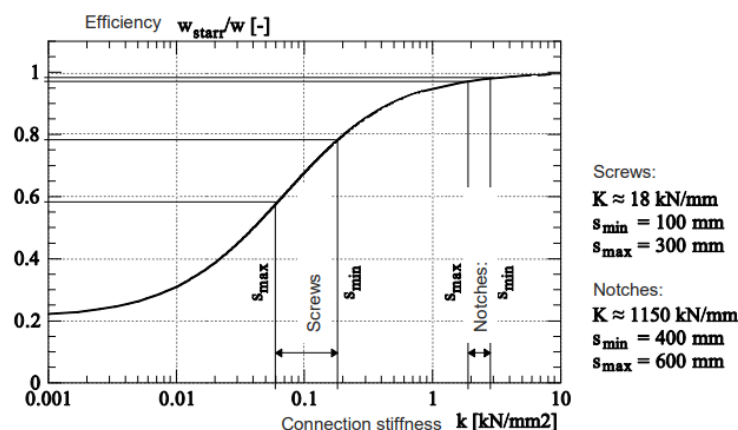
SLS "Serviceability Limit State" är den last bjälklaget blir utsatt för under normala förhållanden. Ligger som underlag för beräkningen av vilken nedböjning vår konstruktion kommer att utsättas för (Svenskt trä, 2016).

$$q_{d,SLS} = q_{egen} + q_{perm} + q_{var} \quad (10)$$

3.3 Samverkan

I denna rapport behandlas två vanliga sätt att fästa samverkansbjälklagen. För att se en tydligare skillnad mellan resultaten analyseras metoder som har tydliga konstruktionsmässiga skillnader. De typer som presenteras är skruvförbindare och grovnotsförbindare. I Figur 3.1 kan man se en visualisering över hur styvheten i förbindaren förhåller sig till graden av samverkan konstruktionen får.

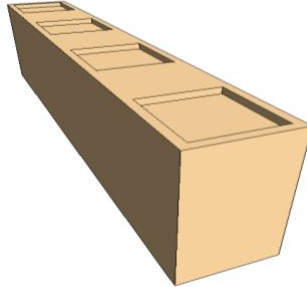
Bjälklaget NCC designat samverkar mellan limträbalkarna och kl-träskivan. Detta sker genom att kl-träet skruvas fast och även använder sig av lim i förbindaren. När en konstruktion limmas på detta vis kan man anta full samverkan, alltså ett gamma-värde på 1 och räkna med båda trä-skiktens hela effektiva böjstyvhet.



Figur 3.1 Illustration av vilken grad av samverkan man kan förvänta sig av de två analyserade skjuvförbindarna (Jockwer, 2021).1

3.3.1 Grovnot som skjuvförbindare

Egenskaperna som sticker ut hos denna skjuvförbindare är den höga samverkan man kan uppnå. Detta bidrar i sin tur till att mycket kraft kan överföras vid samverkan, men samtidigt leder det även till att konstruktionen i händelse av brott får ett sprött brott.



Figur 3.2 Grovnot i TCC-konstruktion. Varje urtag har längd 200mm, bredd 195mm och djup 20mm. Författarens egen bild.

Avståndet s som används vid beräkning är längden på en grovnot samt trät mellan grovnoterna. Detta värde är framtaget vid kontroll av skjuvspänningar som uppstår i förbindelsen mellan betong och trä.

Avstånd s 400mm

Djup h_N 20mm

Bredden b_N beräknas utifrån bredden på träkonstruktionen vilket i NLT fallet avser hela bredden b_2 . I fallet med limträbalk blir grovnoten något smalare än bredden b_2 då vi vill ha 20mm trä på vardera sida av urtaget för att förenkla vid produktion.

$$b_N = b_2 - 40 \quad (11)$$

Typiskt värde för skjuvmodul med grovnot (Jockwer, 2021).

Skjuvmodul K_{ser} 1000 kN/mm

Skjuvmodulen används senare för att räkna ut koefficienten k [N/mm²] som används i gamma-metoden för att räkna ut graden av samverkan som förbindaren bidrar till.

$$k = \frac{K_{ser}}{s} \quad (12)$$

Den kraftbärande kapaciteten för varje förbindare måste tas fram. Denna kontrolleras sedan emot den faktiska kraften som förbindaren utsätts för i ekvation 30. Kapaciteten fås genom att undersöka hur mycket tryck tvärsnittsarean av varje vertikal vägg i längsgående led en grovnot klarar att motstå. Där b_N är bredden på grovnoten.

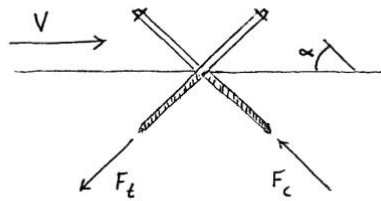
$$F_{c,notch,capacity} = f_{cd} * b_N * h_N \quad (13)$$

Tvärkraftkapaciteten som träet i området mellan grovnoterna utsätts för, även denna kontrolleras mot ekvation 30:

$$F_{V,notch,capacity} = s * 2 * f_{vd} * b_N \quad (14)$$

3.3.2 Skruv som skjuvförbindare

Förbindarskraven som behandlas i denna rapport är SFS VB av typen VB-48-7,5x100 som är en skruv speciellt designad för TCC konstruktioner (SFS, 2020). Indata för beräkningar är hämtade från Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt, 2013).



Figur 3.3 Illustration av infästningen av ett skruvpar.
Författarens egen bild.

Kraften som varje enskild skruv blir påverkad av:

$$F_t = F_c = \frac{V}{\sqrt{2}} \quad (15)$$

Där avståndet s mellan skruvparen är bestämt utifrån kraften varje skruvpar blir utsatt för, se ekvation 30. Samt skruvparets kapacitet, ekvation 17.

Avstånd s	200mm
Längd av skruv l_{ef}	100mm
Vinkel av skruv α	$\pm 45^\circ$

Beroenden på skruvens placering får vi av $\alpha = \pm 45^\circ$

Faktorn k_a	1,414
---------------	-------

Vinkeln α ger oss även skjuvmodulen K_{ser} angiven i N/mm.

$$K_{ser} = 240 * l_{ef} \quad (16)$$

Skjuvmodulen K_{ser} används på samma sätt som för grovnot för att räkna ut k [N/mm²] för samverkans beräkningarna.

Den kraftbärande kapaciteten för varje skruvpar betecknas F_{Rk} och anges i N. Värdet 13000 används endast om $F_{ax,\alpha,Rk} > 13000$ N, vilket är brottgränsen för skruven (DIBt, 2013).

$$F_{Rk} = k_a * \min \left\{ \begin{matrix} F_{ax,\alpha,Rk} \\ 13000 \end{matrix} \right. \quad (17)$$

Karakteristisk kraftkapacitet för skruvparet betecknas $F_{ax,\alpha,Rk}$, även denna anges i N och beräknas enligt följande ekvation för konstruktioner med mjukt trä. Där ρ_{mean} är träs densitet.

$$F_{ax,\alpha,Rk} = 90 * l_{ef} * \left(\frac{\rho_{mean}}{350} \right)^{0,8} \quad (18)$$

3.3.3 Beräkning av tvärsnittets ytcentrum

För att konstruktionen ska leva upp till sin potential är det fördelaktigt att betongen i bjälklaget enbart tar tryckspänningar. Detta innebär att ytcentrumet z_{na} behöver vara beläget i trädelen av konstruktionen.

Beräknas enligt:

$$z_{na} = \frac{E_{d,mean,1} * A_1 * z_1 + E_{d,mean,2} * A_2 * z_2}{E_{d,mean,1} * A_1 + E_{d,mean,2} * A_2} = \frac{\Sigma EAz}{\Sigma EA} \quad (19)$$

Där z för båda materialen är mätt från underkant av konstruktionen enligt följande ekvationer. Där z_1 anger betongskiktet och z_2 anger träet.

$$z_1 = h_2 + \frac{h_1}{2} \quad (20)$$

$$z_2 = \frac{h_2}{2} \quad (21)$$

I Tabell 3.9 nedan visas ett exempel taget från vår TCC konstruktion bestående av limträbalk med pågjuten betong. z_{na} lägger sig strax under överkanten av limträbalken, vilket borde vara optimalt med tanke på materialens egenskaper.

Tabell 3.9 Exempel på kontroll av z för TCC med grovnot från Kapitel 2.6.1.

	part	h	b	A	E_{mean}	EA	z	EAz
Betong	1	140	1200	168000	11000	1,85E+09	475	8,78E+11
Limträ	2	405	215	87075	8125	7,07E+08	202,5	1,43E+11
	$\Sigma =$	545			$\Sigma =$	2,56E+09	$\Sigma =$	1,02E+12
							$z_{na} =$	399,6

3.3.4 Beräkning av samverkan enligt gamma-metoden

Samverkan enligt gamma-metoden kommer resultera i ett värde mellan 0 & 1, där 0 inte ger någon samverkan och där 1 ger fullständig samverkan. Här redogörs hur tydlig påverkan de olika typerna av förbindare kommer att bidra med. Där grovnoter ger ett högt gammavärde och skruv ger ett betydligt lägre värde.

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 * E_d * A_1}{k * L_{ref}^2}} \quad (22)$$

Denna beräkning är gjord med långvarig last, något som är en viktig dimensionerande faktor (Dias, Schänzlin, Dietsch, 2018).

Effektiv böjstyvhet beräknas för hela konstruktionen och används för att ta reda på hur de dimensionerande krafterna sprider sig genom konstruktionen, se även kapitel 2.3. När grad av samverkan tas i beaktning fås en något lägre effektiv böjstyvhet än om man hade adderat båda materialens individuella böjstyvhet. Se exempel i Tabell 3.10 där vi kan tillgodoräkna ca 85% av betongens böjstyvhet tack vara samverkan.

$$(E * I)_{ef} = E_1 * I_1 + E_2 * I_2 + \gamma_1 * E_1 * A_1 * z_1^2 + E_2 * A_2 * z_2^2 \quad (23)$$

Alla balkar har rektangulära tvärsnitt därav beräknas tröghetsmomentet enligt:

$$I = \frac{b * h^3}{12} \quad (24)$$

Tabell 3.10 Exempel, beräkning av effektiv böjstyvhet samt grad av samverkan. TCC med grovnot från Kapitel 2.6.1.

EA(z _{na} -z)	EA(z _{na} -z) ²	Ebh ³ /12	Σ EI	γ	Σ E _I ef
-1,39E+11	1,05E+13	3,02E+12	1,35E+13	0,856542644	1,20E+13
1,39E+11	2,75E+13	9,67E+12	3,71E+13	1	3,71E+13
		Σ =	5,07E+13	Σ =	4,92E+13

3.4 Påverkan

Följande ekvationer är hämtade ur limträhandbok del 3 av Svenskt trä (2016).

Böjmoment:

$$M_{Ed} = q_d * \frac{L_{tot}^2}{8} \quad (25)$$

Tvärkraft:

$$V = q_d * \frac{L_{tot}}{2} \quad (26)$$

Maximal tvärkraft i limträbalken:

$$\tau_d = \frac{V_d * E_{d,mean} * S_f}{EI_{tot} * b_2} \quad (27)$$

Där:

$$E_i * S_f = \sum E_i * b_2 * t_i * a_i \quad (28)$$

Tvärkraft i en enskild förbindare:

$$\tau_{conn} = \frac{\gamma_1 * E_1 * A_1 * e_1 * V_{Ed}}{(E * I)_{ef} * b_1} \quad (29)$$

Kraften som kommer att påverka en förbindare. Denna kontrolleras mot gränsvärdet av vad våra förbindare klarar utstå.

$$F = \frac{\gamma_1 * E_1 * A_1 * e_1 * s * V_{Ed}}{(E * I)_{ef}} \quad (30)$$

Spänningarna som konstruktionen utsätts för jämförs mot de dimensionerande hållfasthetsvärdena för vardera material och har beräknats enligt:

$$\sigma_i = \frac{M}{(E * I)_{ef}} * E_{d,mean} * z_i \quad (31)$$

Där z_i är avståndet från z_{na} till undersökt del av konstruktionen.

3.5 Vibrationer

Med avseende på vibrationer kontrolleras bjälklagen efter tre kriterier. Den första är egenfrekvensen. Om den uppfyller kravet räcker det med två ytterligare kontroller. En kontroll av impulshastighetsrespons samt kontroll av punktlastkriteriet. Dessa beräkningar är utförda med den effektiva böjstyvheten $(E * I)_{ef}$ alltså vid ett scenario av långvarig last.

3.5.1 Egenfrekvens

Ett problem som lätt kan uppstå i dessa typer av konstruktioner är vibrationer som beror på egenfrekvensen. Det är främst låga frekvenser som är problematiska, $f_1 < 8$ Hz. Enligt Ohlsson (1991) kommer konstruktioner i detta spann behöva mer omfattande kontroller för att säkerställa ett bra resultat. Därför designas lättviktskonstruktioner efter $f_1 > 8$ Hz för att klassas som högfrekvensbjälklag. För att räkna ut den lägsta egenfrekvensen på det samverkande bjälklaget används formeln nedan:

$$f_1 = \frac{\pi}{2 * L^2} \sqrt{\frac{(E * I)_{ef}}{m}} \quad (32)$$

3.5.2 Impulshastighetsrepons

Impulshastighetsresponsen har som krav att ligga under värdet $b^{(f_1 \zeta - 1)}$ där $b=100$ m/(Ns²) och $\zeta = 0,01$. (Svenskt trä, 2019)

$$v \leq b^{(f_1 \zeta - 1)} \quad (33)$$

De frekvenser som tas hänsyn till bjälklaget ligger mellan 8–40 Hz. Då frekvenser som överskrider detta spann inte anses relevanta kan vi använda oss av följande ekvation (Ohlsson, 1991)

$$v = \frac{4(0,4 + 0,6n_{40})}{mBl + 200} \quad (34)$$

Där:

$$n_{40} = \left[\left(\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right) \left(\frac{B}{l} \right)^4 \left(\frac{(EI)_l}{(EI)_B} \right) \right]^{0,25} \quad (35)$$

3.5.3 Nedböjning på grund av punklastkriteriet

Metoden som används är att kontrollera hur bjälklagets nedböjning påverkas om man tillför en punktlast på $P = 1$ kN. I detta fall är det maximala gränsvärdet för nedböjningen satt till $w = 1,5$ mm (Svenskt trä, 2019). Detta är enligt Talja och Toratti (2006) det effektivaste sättet att kontrollera ett bjälklags tolerans mot vibrationer, då metoden visar sig simulera hur konstruktionen sedan kommer att reagera på fotsteg i bruksstadiet.

$$w = \frac{P * L^3}{48 * (EI)_{ef}} \quad (36)$$

Det finns ett antal klasser att förhålla sig till med anknytning till punktlastkriteriet, de sträcker sig från A-E. Klass A och B behandlar vibrationer som kan uppfattas emellan lägenheter, därför är främst dessa relevanta och kan ses i Tabell 3.11 nedan.

Tabell 3.11 Gränsvärden för punktlastnedböjning då $P = 1$ kN (Talja och Toratti, 2006).

Klass	Nedböjning w [mm]	Vibrationernas karaktär
A	$\leq 0,12$	Normal klass för vibrationer överförda från en annan lägenhet.
B	$\leq 0,25$	Lägre klass för vibrationer överförda från en annan lägenhet.

3.5.4 Vertikal topphastighet

När bjälklag designas utifrån vibrationer kan de även behöva testas för vertikal topphastighet. Kraven för dessa kan ses i Tabell 3.12 nedan. Enligt Talja och Toratti (2006) är detta enbart nödvändigt för lågfrekvensbjälklag. Detta leder till att bjälklagen framtagna i denna rapport inte nödvändigtvis behöver kontrolleras enligt dessa kriterier då de klassas som högfrekvensbjälklag.

Tabell 3.12 Gränsvärden för vertikal topphastighet (Talja och Toratti, 2006).

Klass	Vertikal topphastighet [m/s^2]
A	$\leq 0,03$
B	$\leq 0,05$

3.6 Nedböjning

Deformationer i träkonstruktioner i synnerhet är oundvikliga. Därför behöver nedböjningen kontrolleras. Det finns flera typer av nedböjningar som ett bjälklag blir utsatt för och det första man behandlar är den initiala nedböjningen som anger hur konstruktionen påverkas från ögonblicket den blir belastad. Detta är en kombination av effekten böjmomentet och skjuvmomentet har på bjälklaget (Svenskt trä, 2016)

$$w_{inst} = w_{bend}^q + w_{shear}^q \quad (37)$$

Nedböjning på grund av böjmoment:

$$w_{bend}^q = \frac{5 * q_{d,SLs} * L^4}{384 * (E * I)_{ef}} \quad (38)$$

Nedböjning på grund av skjuvmoment:

$$w_{shear}^q = \left(1 + 0,96 * \left(\frac{E}{G} \right) * \left(\frac{h}{L} \right)^2 \right) * w_{bend}^q \quad (39)$$

Nedböjningen i träkonstruktioner kommer över tid att bli större. Detta för att trä är ett komplext material som påverkas mycket av bland annat fukt som bidrar till krypning i materialet. Därför blir den slutgiltiga nedböjningen w_{fin} summan av den initiala nedböjningen samt nedböjning på grund av krypning (Svenskt trä, 2019).

$$w_{fin} = w_{inst} + w_{creep} \quad (40)$$

Där nedböjning på grund av krypning beräknas enligt:

$$w_{creep} = w_{inst} * k_{def} \quad (41)$$

Max tillåten initial nedböjning $w_{inst,max}$ anger hur många millimeter man kan tillåta bjälklaget att svikta. Exempel på gränsvärden för detta ligger i spannet $L/300 - L/500$ (Svenskt trä, 2019). Det striktare gränsvärdet ger en maximal nedböjning på 13,20mm enligt:

$$w_{inst,max} = \frac{L}{500} \quad (42)$$

Max tillåten slutlig nedböjning följer samma princip men gränsvärdena i detta spann ligger i stället inom $L/150 - L/300$. Det striktare gränsvärdet är i detta fall en maximal nedböjning på 22mm enligt:

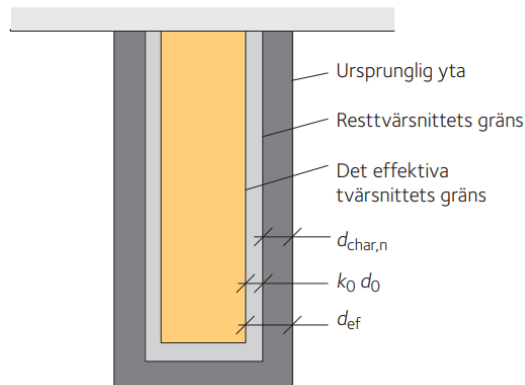
$$w_{fin,max} = \frac{L}{300} \quad (43)$$

3.7 Brandsäkerhet

Originaldesignen av byggnaden är konstruerad efter brandsäkerhetsklass 5 då det vid fall av brand skulle kunna uppstå mycket stora skador om bjälklaget brister (Boverket, 2019). Det innebär att konstruktionen vid normal brandbelastning måste klara minst R90, alltså fullt utvecklad brand i 90 minuter. Designförslaget med NLT klarar på grund av dess mycket kompaktare konstruktion en mycket högre brandbelastning än detta krav, se även kapitel 5 för vidare diskussion.

3.7.1 Reducerad tvärsnittsarea för träet

Beräkning av reducerad tvärsnittsarea angripen från 3 sidor då betongen skyddar överkant av träkonstruktionen.



Figur 3.3 Inbränningsdjup i limträbalk. (Svenskt trä, 2019). Publiceras med medgivande av upphovsrättsinnehavaren.

Ny höjd och bredd beräknas enligt:

$$h_{ef} = h - d_{ef} \quad (44)$$

$$b_{ef} = b - 2 * d_{ef} \quad (45)$$

Inbränningsdjupet d_{ef} beräknas enligt:

$$d_{ef} = d_{char,n} + d_0 \quad (46)$$

Där d_{char} är det verkliga inbränningsdjupet av branden och $d_0 = 7\text{mm}$ är en extra säkerhet för att kompensera för den minskade hållfastheten (Svenskt trä, 2016).

$$d_{char,n} = \beta_n * t \quad (47)$$

Där β_n mm/min anger hur snabbt materialet brinner och t är tiden i minuter.

Tabell 3.13 Inbränningsdjup per tidsenhet för olika typer av trä (Svenskt trä, 2016).

Typ	β_n [mm/min]
Limträ	0,70
Konstruktionsvirke	0,80

Böjstyvhet:

$$w_{ef} = \frac{b_{ef} * (h_{ef})^2}{6} \quad (48)$$

3.7.2 Nya variabler vid fall av brand

När man dimensionerar efter ett olycksfall vid brand kan man även ta hänsyn till extra hållfasthet i det kvarstående träet. Enligt Europastandard görs detta genom att säkerhetsfaktorn γ_M sänks till 1,0. k_{mod} höjs till 1,0. Samt att man kan anta en ökad hållfasthet i materialet med en faktor på 1,15 för limträ och kl trä. För konstruktionsvirke gäller en faktor på 1,25 (Svenskt trä, 2016)

3.7.3 Betongens påverkan

I fallet av brand bör det tas hänsyn till vissa skillnader jämfört med hållfasthetsberäkningarna i normalfall. På grund utav den reducerade tvärsnittsarean i träet kommer dragspänningar att uppstå i underkant av betongen. Eftersom detta är ett undantagsfall kan man även anta en lägre säkerhetsfaktor (Al-Emrani, Engström, Johansson, Johansson, 2019).

Partialkoefficient vid olyckslast $\gamma_c = 1,2$

Karakteristisk draghållfasthet $f_{ctk0,05} = 2,0\text{MPa}$ tas i detta fall ifrån 5% fraktilen för extra säkerhet då denna konstruktion kan uppvisa kritiska problem vid dragspänning. (Al-Emrani, Engström, Johansson, Johansson, 2019).

Dimensionerande draghållfasthet vid olycksfall:

$$f_{cta} = \alpha_{cc} * \frac{f_{ctk0,05}}{\gamma_c} \quad (49)$$

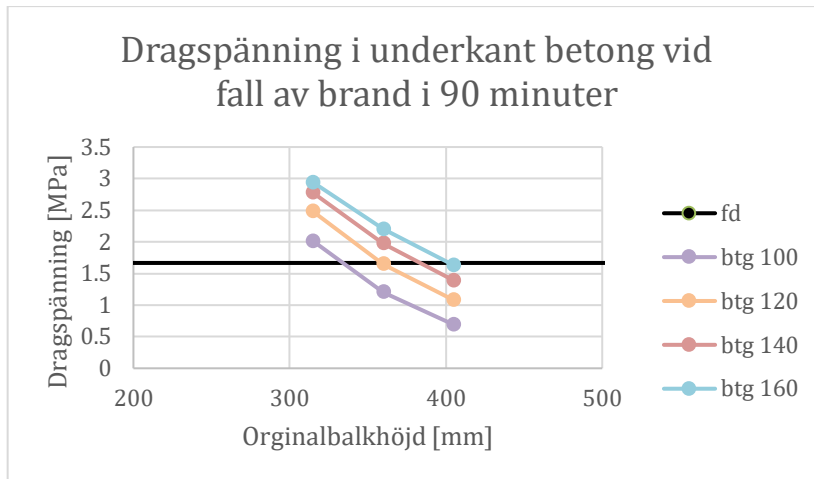
3.8 Vart brister konstruktionen

På grund av bjälklagens olika konstruktionsmässiga karaktär så kommer det vara olika problem som avgör dess dimensioner. Såklart är det flera faktorer som spelar in i varje fall men detta kapitel försöker ta fasta på det mest kritiska problemet för varje samverkanskonstruktion.

3.8.1 TCC

När kontroller utförts på hållfasthetsegenskaperna av denna konstruktion kan man se enligt våra modeller att konstruktionen främst kommer att brista vid fall av brand. Detta på grund av att träets minskade tvärsnittsarea förflyttar ytcentrumet z_{na} upp i betongen vilket leder till dragspänningar som överskrider betongens dimensionerande draghållfasthet.

Denna jämförelse är enbart gjord på limträbalken av bredd 215mm då den är att föredra för att åstadkomma högsta möjliga hållfasthet med en så låg konstruktion som möjligt. 215mm är den bredaste standardiserade limträbalken (Svensk trä, 2019).

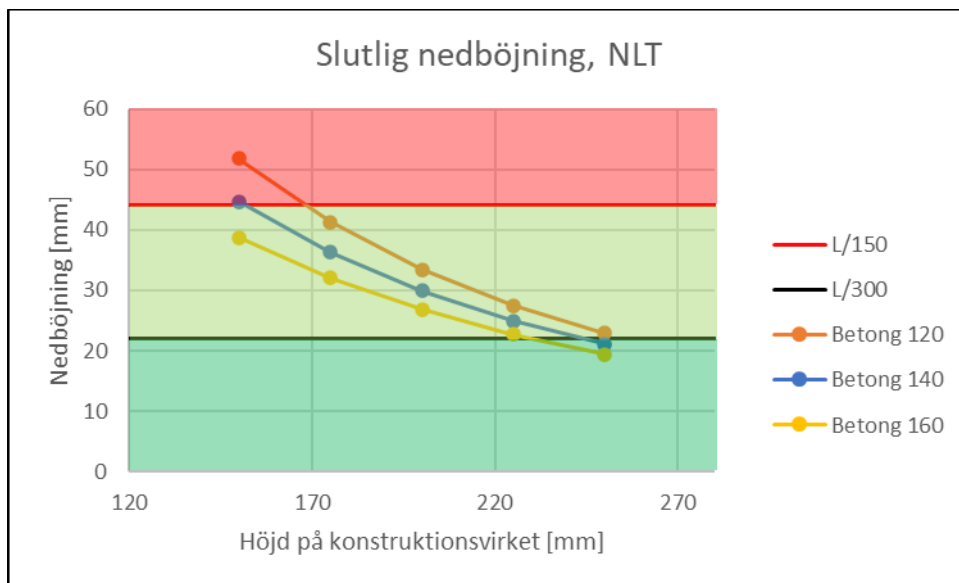


Figur 3.4 Val av rimlig dimension på limträbalk till samverkanskonstruktionen. Författarens egen bild.

3.8.2 NLT

Vid tester av vilka dimensioner som kommer att fungera bäst vid användning av NLT bjälklag, syns det tydligt att denna typ av konstruktions största problem är att uppfylla kravet på nedböjning. Detta på grund av att det är den konstruktion som bygger lägst på höjden. Det kan även ses som en tydlig fördel med detta bjälklag. Nedan följer några kontroller som utförts på olika dimensioner av detta bjälklag.

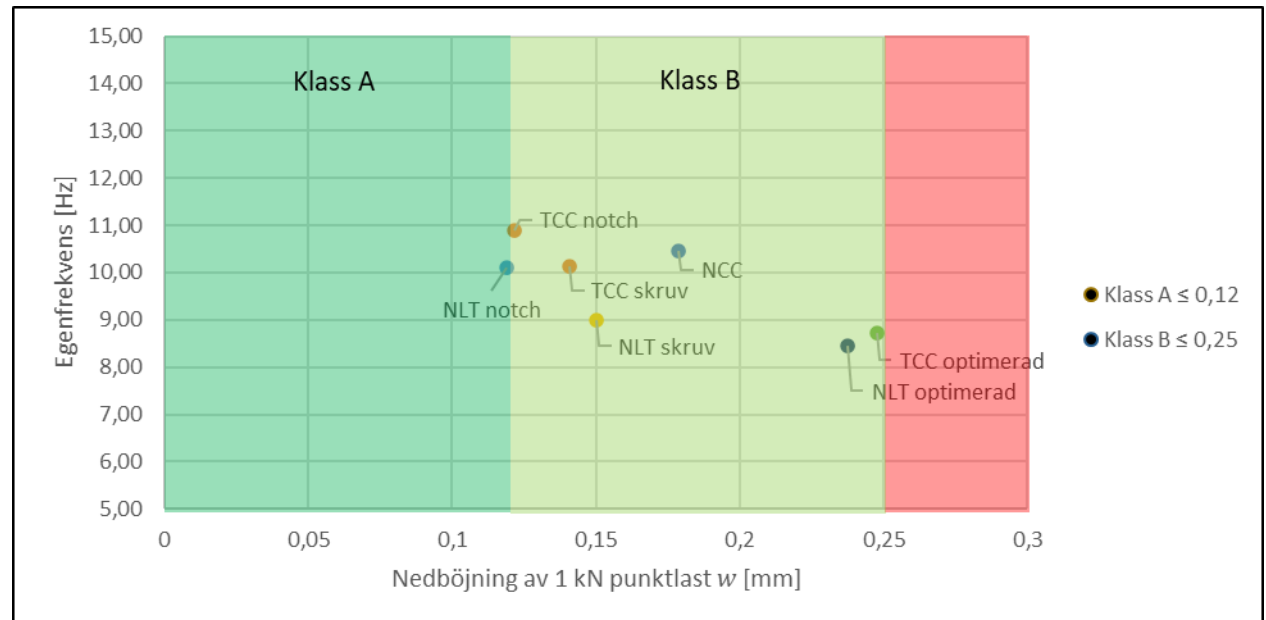
Eftersom målet är att följa de striktare gränsvärdena för nedböjning kan vi se att versionen med betong $h_1 = 140\text{mm}$ och konstruktionsvirke $h_2 = 250\text{mm}$ precis uppfyller kraven för slutlig nedböjning. Om man hade velat använda sig av en konstruktion med lägre trädimension är nästa version att lägga sig på dessa gränsvärden $h_1 = 170$ och $h_2 = 225$.



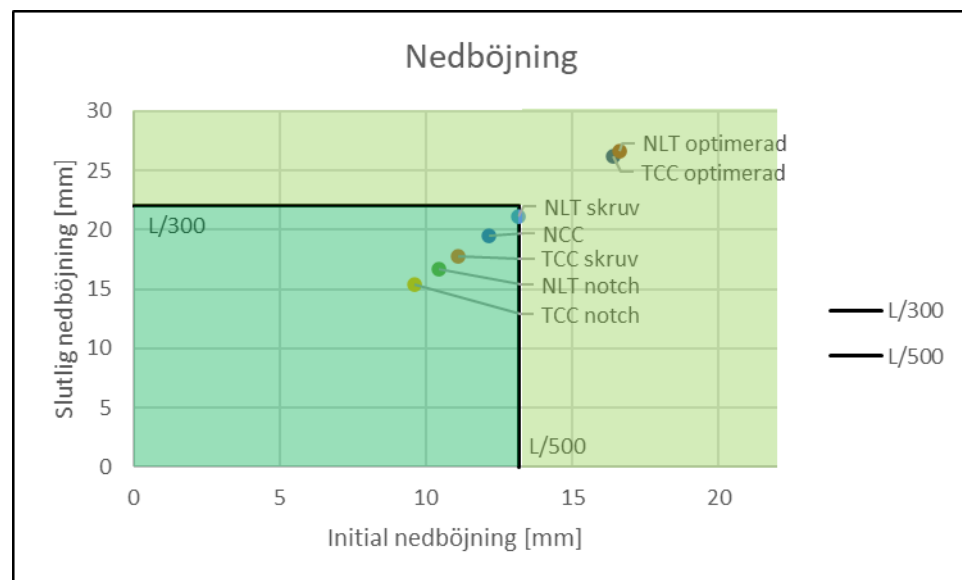
Figur 3.5 Slutlig nedböjning av NLT bjälklag med skruvförbindare. Författarens egen bild.

3.9 Resultat för våra designförslag

Hur bjälklagen klarar att motstå vibrationer samt nedböjning har varit bland de tydligaste faktorerna som bidragit till dimensioneringen av bjälklaget. När man bygger lätta konstruktioner med trä är det en utmaning att uppnå höga egenfrekvenser. Figur 13 nedan försöker att sammanfatta hur väl de olika bjälklagen står emot vibrationer, där en hög egenfrekvens samt låg nedböjning är fördelaktigt.



Figur 3.6 Bjälklagens klassificering med avseende på punktlastkriteriet jämfört med dess egenfrekvens. Författarens egen bild.



Figur 3.7 Jämförelse av bjälklagens initiala och slutgiltiga nedböjning. Där mörkgrönt område indikerar de striktaste kraven för nedböjning. Författarens egen bild.

Bjälklag i trä begränsas också av mer hållfasthetsmässiga parametrar som tvärkraft och böjmoment. Men som diskuterat i kapitel 3.8 är det inte på grund av dessa parametrar konstruktionen brister. Tabell 3.14, 3.15 och 3.16 nedan är tänkta att med

hjälp av utnyttjandegraden ge en insyn i hur överdimensionerade konstruktionerna är i dessa aspekter.

Tabell 3.14 Maximal skjuvspänning som bjälklaget blir utsatt för. Uppstår i trädelen av konstruktionen.

Bjälklag	Skjuvspänning τ_d [MPa]	Dimensionerade skjuvhållfasthet f_{vd} [MPa]	Utnyttjandegrad [%]
NCC	0,49	2,24	21,7%
TCC grovnot	0,53	2,24	23,6%
TCC skruv	0,61	2,24	27,2%
NLT grovnot	0,15	2,56	5,9%
NLT skruv	0,19	2,56	7,4%
TCC optimerad	0,65	2,24	28,9%
NLT optimerad	0,17	2,56	6,7%

Tabell 3.15 Maximal dragspänning i bjälklaget (underkant trä).

Bjälklag	Böjspänning σ_d [MPa]	Dimensionerade draghållfasthet f_{md} [MPa]	Utnyttjandegrad [%]
NCC	4,74	20,21	23,48%
TCC grovnot	4,36	19,97	21,8%
TCC skruv	5,04	19,97	25,2%
NLT grovnot	2,34	19,20	12,2%
NLT skruv	2,95	19,20	15,4%
TCC optimerad	6,36	20,21	31,5%
NLT optimerad	3,17	19,20	16,5%

Tabell 3.16 Maximal tryckspänning i bjälklaget (överkant betong, i NCC:s fall överkant KLT).

Bjälklag	Tryckspänning σ_d [MPa]	Dimensionerade tryckhållfasthet f_{cd} [MPa]	Utnyttjandegrad [%]
NCC	1,81	15,36	11,76%
TCC grovnot	2,15	16,67	12,88%
TCC skruv	2,48	16,67	14,90%
NLT grovnot	2,86	16,67	17,14%
NLT skruv	3,60	16,67	21,61%
TCC optimerad	3,19	16,67	19,12%
NLT optimerad	3,98	16,67	23,88%

3.9.1 Optimerade versioner

I fallet av de optimerade konstruktionerna kan man anta att de blir lite mer riskfyllda att producera. Här görs avkall på kvalitén på bjälklaget. Ändringar vi tillåtit i dessa fall är framförallt kopplade till nedböjning. Vi har tillåtit användning av det lägsta rekommenderade gränsvärdet för nedböjning. Alltså $w_{inst} = L/300$ och $w_{fin} = L/150$. Detta gör att något mindre volymer material kan användas.

4. Kostnadskalkyler

Kostnaderna har beräknats i samarbete med NCC teknik där de har tagit fram inköpspriser från dagens marknad. Priserna för material är inte exakta utan bidrar mer som en jämförelse av bjälklagstyperna. Skruvförbindelsen pris är medräknad i kalkylen och är hämtad från SFS (2020).

4.1 Materialkostnader

Tabell 4.1 Materialkostnader.

Material	Arbetskostnad [kr]	Materialkostnad
Betong inkl. 10kg armering	(30% av materialkostnad)	5555 [kr/m ³]
Limträ	(30% av materialkostnad)	15 000 [kr/m ³]
KLT	(Inkluderat i materialkostnad)	1 500 [kr/m ³]
Konstruktionsvirke	40 [kr/löpmeter]	90 [kr/löpmeter]
SFS VB Skruv	(30% av materialkostnad)	15.48 [kr/st]

4.2 Bjälklagskostnader

Dessa kostnadskalkyler redovisar individuella kostnader för material, arbete samt totalkostnad för varje typ av bjälklagselement.

4.2.1 NCC

Tabell 4.2 Kostnad för NCC:s bjälklag.

Material	Arbetskostnad [kr]	Materialkostnad [kr]
Betong	2 112	7 039
KLT	Inkluderat i materialkostnad	23 760
Limträbalk	6 896	22 988
=	9 008	53 787
TOT		62 795

4.2.2 TCC Skruv

Tabell 4.3 Kostnad för TCC-bjälklag med skruv som skjuvförbindare.

Material	Arbetskostnad [kr]	Materialkostnad [kr]
Betong	3 696	12 319
Limträ	5 172	17 241
SFS VB Skruv	613.00	2 043
=	9 481	31 603
TOT:		41 084

4.2.3 TCC Grovnot

Tabell 4.4 Kostnad för TCC-bjälklag med grovnot som skjuvförbindare.

Material	Arbetskostnad [kr]	Materialkostnad [kr]
Betong	3 695	12 319
Limträ	5 172	17 241
=	8 868	29 560
TOT:		38 427

4.2.4 NLT Skruv

Tabell 4.5 Kostnad för NLT-bjälklag med skruv som skjuvförbindare.

Material	Arbetskostnad [kr]	Materialkostnad [kr]
Betong	3 696	12 319
Konstruktionsvirke	6 336	14 256
SFS VB Skruv	1 226	4 087
=	11 258	30 661
TOT:		41 919

4.2.5 NLT Grovnot

Tabell 4.6 Kostnad för NLT-bjälklag med grovnot som skjuvförbindare.

Material	Arbetskostnad [kr]	Materialkostnad [kr]
Betong	3 696	12 319
Konstruktionsvirke	6 336	14 256
=	10 032	26 575
TOT:		36 606

4.2.6 TCC Skruv Optimerad

Tabell 4.7 Kostnad för optimerat TCC-bjälklag med skruv som skjuvförbindare.

Material	Arbetskostnad [kr]	Materialkostnad [kr]
Betong	2 639	8 799
Limträ	4 598	15 325
SFS VB Skruv	613	2 043
=	7 851	26 167
TOT:		34 017

4.2.7 NLT Skruv Optimerad

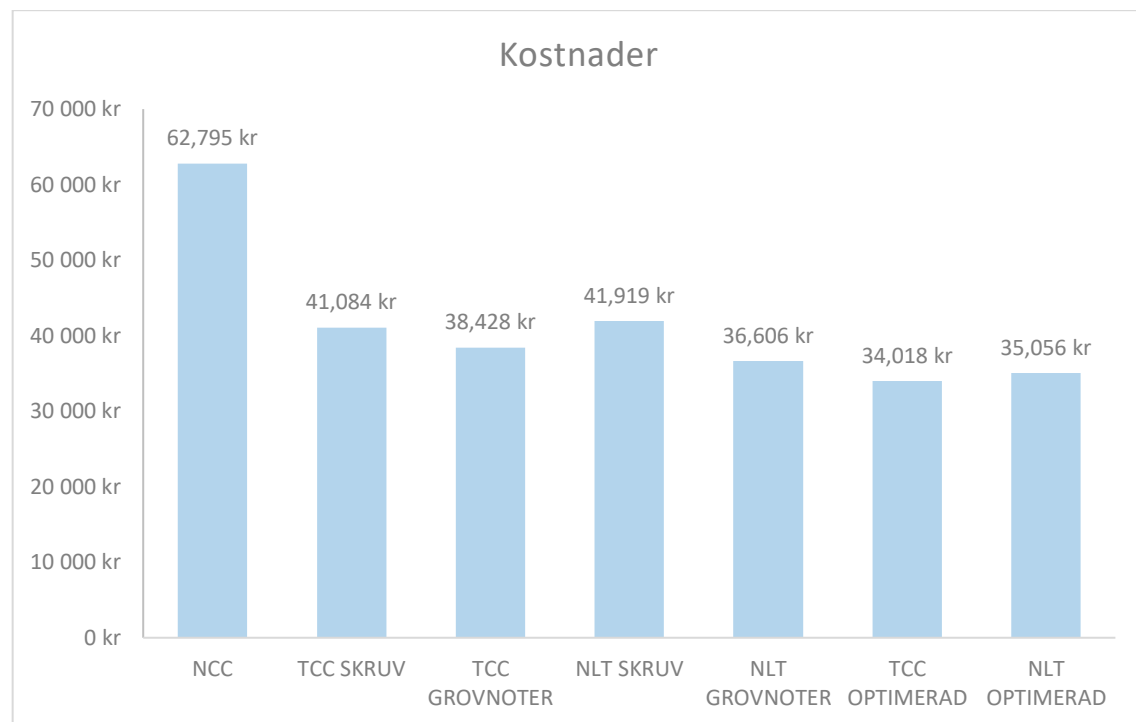
Tabell 4.8 Kostnad för optimerat NLT-bjälklag med skruv som skjuvförbindare.

Material	Arbetskostnad [kr]	Materialkostnad [kr]
Betong	1 226	7 039
Konstruktionsvirke	6 336	14 256
SFS VB Skruv	1 226	4 086
=	8 788	25 382
TOT:		35 056

4.2.8 Utvärdering

I kostnadskalkylerna kan man se att kompositbjälklagen ligger i ungefär samma prisklass. När man sedan jämför med KLT-bjälklaget ser man en stor skillnad i pris, detta bjälklag är 30% dyrare att tillverka än det dyraste kompositbjälklaget och 45% dyrare än det billigaste kompositbjälklaget. Priserna på bjälklagen är beräknade ut efter varje element där dimensionerna, (längd och bredd) är satta till samma mått. Figur 4.1 visualiserar skillnaden i pris på varje bjälklagselement. Pris i m² kan ses i Tabell 6.1.

Betongen på alla kompositbjälklag kommer att platsgjutas och därmed tillkommer extra kostnader till följd av konstruktion av gjutform, dessa kostnader är inte medräknade i kalkylen. NLT-konstruktionen kommer även att vara i behov av ett installationsgolv för att ge utrymme till installationer, dessa kostnader är inte heller medräknade i kalkylen.



Figur 4.1 Kostnadsjämförelse av de olika bjälklagsversionerna. Priset angivet i kostnad för ett helt bjälklagselement. Författarens egen bild.

5. Miljöpåverkananalys

Analysen av den miljöpåverkan de olika bjälklagen har framför allt fokuserat på koldioxidutsläpp mätt i kg CO₂ ekvivalenter. Data för undersökningen är framtagen av NCC teknik för att ge en jämförelse mellan de olika bjälklagen.

En komplett LCA analys hade inneburit en djupare undersökning än den som presenteras här. I detta kapitel behandlas enbart de stegen som innefattar byggskedet i byggnadens livslängd. Detta innebär steg A1-A5 i en LCA analys och innefattar enligt Boverket (2019):

- A1 – Råvaruförsörjning
- A2 – Transport
- A3 – Tillverkning
- A4 – Transport
- A5 – Byggnadsprocess

Betongen som anges som grön betong i kalkylen anses vara förbättrad med 30% lägre koldioxidutsläpp än standardbetong enligt NCC:s beräkningar. Angående skruvförbindelsen i NCC:s bjälklag är det verkliga antalet skruv inte känt, därför används samma skruvindelning som för samverkansbjälklagen för att ge en så rättvis jämförelse som möjligt.

5.1 NCC

Tabell 5.1 Miljöpåverkan för NCC:s bjälklag.

Material	Mängd	Omräknings-faktor <i>kg/m³</i>	EPD/Generiska data <i>kgCO₂/kg</i>	Klimat-påverkan A1-3, <i>kgCO₂e</i>	Klimat-påverkan A1-3, <i>kgCO₂e/m²</i>
Grön betong C30/37 vct 0,55	1,3 m ³	2350	0,081	241,2	15,2
Limträbalk GL30c	1,5 m ³	430	0,106	69,9	4,4
Stegljudsmatta	0,8 m ³	14	1,190	13,2	0,8
KL-trä	2,2 m ³	460	0,106	108,1	6,8
Skruv	198 st	0,04466	2,590	22,9	1,4
					28,7 kgCO ₂ /m ²

5.2 TCC Skruv

Tabell 5.2 Miljöpåverkan för TCC-bjälklag med skruv som skruvförbindare.

Material	Mängd	Omräknings-faktor <i>kg/m³</i>	EPD/Generiska data <i>kgCO₂/kg</i>	Klimat-påverkan A1-3, <i>kgCO₂e</i>	Klimat-påverkan A1-3, <i>kgCO₂e/m²</i>
Grön betong C30/37 vct 0,55	2,2 m ³	2350	0,081	422,1	26,6
Limträbalk GL30c	1,1 m ³	430	0,106	52,4	3,3
Armeringsnät	10 kg/m ²	15,8 m ²	0,596	94,4	6,0
SFS VB Skruv	132 st	0,04466	2,590	15,3	1,0
					36,9 kgCO ₂ /m ²

5.3 TCC Grovnot

Tabell 5.3 Miljöpåverkan för TCC-bjälklag med grovnot som skjuvförbindare.

Material	Mängd	Omräkningsfaktor kg/m^3	EPD/Generiska data $kgCO_2/kg$	Klimat-påverkan A1-3, $kgCO_2e$	Klimat-påverkan A1-3, $kgCO_2e/m^2$
Grön betong C30/37 vct 0,55	2,2 m^3	2350	0,081	422,1	26,6
Limträbalk GL30c	1,1 m^3	430	0,106	52,4	3,3
Armeringsnät	10 kg/m^2	15,8 m^2	0,596	94,4	6,0
Grovnot	0				35,9 $kgCO_2/m^2$

5.4 NLT Skruv

Tabell 5.4 Miljöpåverkan för NLT-bjälklag med skruv som skjuvförbindare.

Material	Mängd	Omräkningsfaktor kg/m^3	EPD/Generiska data $kgCO_2/kg$	Klimat-påverkan A1-3, $kgCO_2e$	Klimat-påverkan A1-3, $kgCO_2e/m^2$
Grön betong C30/37 vct 0,55	2,2 m^3	2350	0,081	422,1	26,6
Konstruktionsvirke 30c	4,0 m^3	460	0,106	193,1	12,2
Armeringsnät	10 kg/m^2	15,8 m^2	0,596	94,4	6,0
SFS VB Skruv	264 st	0,04466	2,590	30,5	1,9
					46,7 $kgCO_2/m^2$

5.5 NLT Grovnot

Tabell 5.5 Miljöpåverkan för NLT-bjälklag med grovnot som skjuvförbindare.

Material	Mängd	Omräkningsfaktor kg/m^3	EPD/Generiska data $kgCO_2/kg$	Klimat-påverkan A1-3, $kgCO_2e$	Klimat-påverkan A1-3, $kgCO_2e/m^2$
Grön betong C30/37 vct 0,55	2,2 m^3	2350	0,081	422,1	26,6
Konstruktionsvirke 30c	4,0 m^3	460	0,106	193,1	12,2
Armeringsnät	10 kg/m^2	15,8 m^2	0,596	94,4	6,0
Grovnot	0				44,8 $kgCO_2/m^2$

5.6 TCC optimerad

Tabell 5.6 Miljöpåverkan för optimerat TCC-bjälklag med skruv som skjuvförbindare.

Material	Mängd	Omräkningsfaktor kg/m^3	EPD/Generiska data $kgCO_2/kg$	Klimat-påverkan A1-3, $kgCO_2e$	Klimat-påverkan A1-3, $kgCO_2e/m^2$
Grön betong C30/37 vct 0,55	1,6 m^3	2350	0,081	301,5	19,0
Limträbalk GL30c	1,0 m^3	430	0,106	46,6	2,9
Armeringsnät	10 kg/m^2	15,84 m^2	0,596	94,4	6,0
SFS VB Skruv	132 st	0,04466	2,590	15,3	1,0
					28,9 $kgCO_2/m^2$

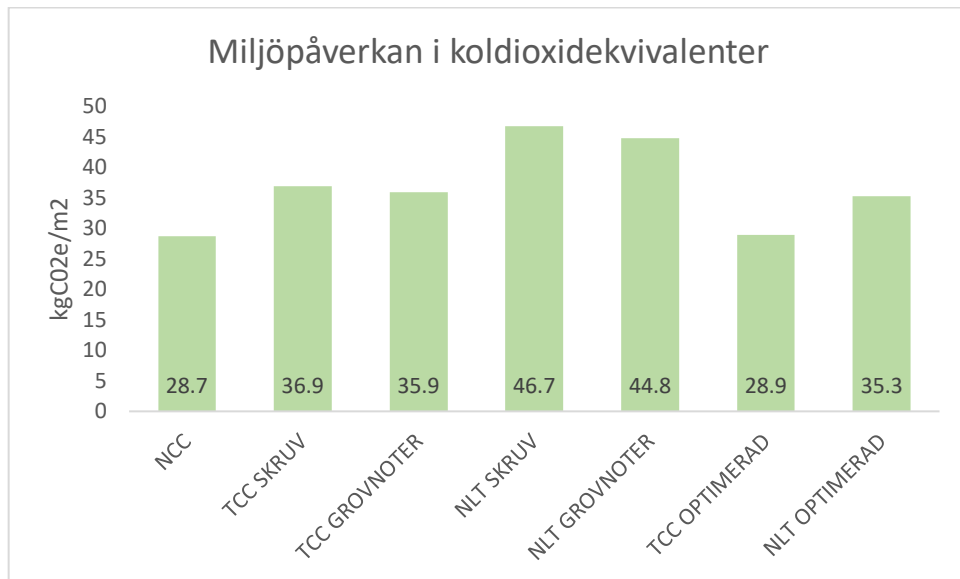
5.7 NLT optimerad

Tabell 5.7 Miljöpåverkan för optimerat NLT-bjälklag med skruv som skjuvförbindare.

Material	Mängd	Omräkningsfaktor kg/m^3	EPD/Generiska data $kgCO_2/kg$	Klimat-påverkan A1-3, $kgCO_2e$	Klimat-påverkan A1-3, $kgCO_2e/m^2$
Grön betong C30/37 vct 0,55	1,3 m^3	2350	0,081	241,2	15,2
Konstruktionsvirke 30c	4,0 m^3	460	0,106	193,1	12,2
Armeringsnät	10 kg/m^2	15,8 m^2	0,596	94,4	6,0
SFS VB Skruv	264 st	0,04466	2,590	30,5	1,9
					35,3 $kgCO_2/m^2$

5.8 Utvärdering

Figur 5 visualiserar hur hög miljöpåverkan i koldioxidekvivalenter varje bjälklagselement bidrar med. Bjälklaget som NCC har dimensionerat är bäst ur en miljösynpunkt, detta till följd av att den till störst del använt sig av trä i konstruktionen. Det optimerade NLT-bjälklaget kräver lika mycket betong som NCC:s KLT-bjälklag, men behöver ändå en betydligt större volym trä vilket medför att det i slutändan får ett högre koldioxidutsläpp. Alternativet TCC optimerad ger det bästa resultatet av samverkanskonstruktionerna, dock ligger alla bjälklag på rimliga nivåer för dagens standard.



Figur 5.1 Jämförelse av bjälklagens utsläpp mätt i koldioxidekvivalenter.
Författarens egen bild.

6. Diskussion

6.1 Jämförelse

Tabell 6.1 Jämförelse av för och nackdelar för de framtagna designförslagen.

Bjälklag	Miljöpåverkan [kgCO ₂ e/m ²]	Kostnad [kr/m ²]	Vikt [kg/m ²]	Höjd [mm]	Eigenfrekvens [f ₁]	Punktlast- nedböjning [mm]	Initial nedböjning [mm]
NCC	28,7	3964	346	630	10,45	0,18	12,15
TCC skruv	36,9	2594	449	545	10,13	0,14	11,12
TCC grovnot	35,9	2426	449	545	10,89	0,12	9,61
NLT skruv	46,7	2646	533	390	9,00	0,15	13,17
NLT grovnot	44,8	2311	533	390	10,11	0,12	10,44
TCC optimerad	28,9	2148	346	460	8,71	0,25	16,40
NLT optimerad	35,3	2213	383	330	8,45	0,24	16,63

Under rapportens gång har olika parametrar redovisats inom miljöpåverkan, kostnader och konstruktion. Samverkanbjälklagen som redovisats är dimensionerade ut efter två olika tekniker, som har olika fördelar och nackdelar.

Fördelar med TCC-bjälklag:

- Bjälklagen kräver inte lika höga limträbalkar som ett KLT-bjälklag för denna spännvidd, vilket bidrar till en lägre bjälklagshöjd.
- Bjälklagen kräver inte lika mycket betong som ett betongbjälklag, vilket bidrar till en lägre miljöpåverkan.
- Bjälklagen kan utformas med olika skjuvförbindare beroende på vilka egenskaper man är ute efter. Skjuvförbindarna kan bestå av skruv eller grovnoter. Grovnoter bidrar till högst samverkan mellan materialen.
- Bjälklagen kan vara upp till 45% billigare att tillverka än ett KLT-bjälklag med samma dimensioner.
- Eftersom denna konstruktion kräver mer betong än ett KLT-bjälklag blir konstruktionen tyngre och minskar därav risker som kan uppkomma hos lättare konstruktioner byggda i trä.
- Bjälklagen står emot slutgiltig nedböjning upp till 20% bättre än ett KLT-bjälklag med samma dimensioner, och uppnår därav L/300.
- Bjälklagen är miljövänligast när man jämför med de andra kompositalternativen

Fördelar med NLT-bjälklag:

- Bjälklagen består av konstruktionsvirke och betong, detta medför en lägre bjälklagshöjd än både KLT och TCC-bjälklag.
- Bjälklagen kan dimensioneras med mindre betong än både betong och TCC-bjälklag vilket bidrar till en lägre miljöpåverkan.
- Bjälklagen kan utformas med olika skjuvförbindare beroende på vilka egenskaper man är ute efter. Skjuvförbindarna kan bestå av skruv eller grovnoter. Grovnoter bidrar till högst samverkan mellan materialen.
- Bjälklagen kan vara upp till 44% billigare att tillverka än ett KLT-bjälklag med samma dimensioner.

- Eftersom denna konstruktion kräver mer betong än ett KLT-bjälklag blir konstruktionen tyngre och minskar därav risker som kan uppkomma hos lättare konstruktioner byggda i trä.
- Bjälklagen står emot slutgiltig nedböjning upp till 14% bättre än ett KLT-bjälklag med samma dimensioner, och uppnår därav $L/300$.

Nackdelar med TCC-bjälklag:

- Vid dimensionering med grovnoter och händelse vid brott, kommer ett sprött brott att uppstå.
- Miljöpåverkan kan vara upp emot 22% högre än ett KLT-bjälklag med samma dimensioner.
- Vid en optimerad version av bjälklaget kommer stegljudsmattor att behövas för att bjälklaget ska klara de akustiska kraven.
- Den optimerade versionen klarar inte kravet på $L/300$ avseende nedböjning.

Nackdelar med NLT-bjälklag:

- Vid dimensionering med grovnoter och händelse vid brott, kommer ett sprött brott att uppstå.
- Miljöpåverkan kan vara upp emot 38% högre än ett KLT-bjälklag med samma dimensioner.
- Vid en optimerad version av bjälklaget kommer stegljudsmattor att behövas för att bjälklaget ska klara de akustiska kraven.
- Dessa bjälklag rymmer inget utrymme för att dra installationer i och kommer därmed att behöva förses med installationsgolv, vilket medför att höjden på bjälklaget kommer att öka.
- Den optimerade versionen klarar inte kravet på $L/300$ avseende nedböjning.

6.2 Materialval

Betongen som har används vid dimensioneringen är grön betong som är 30% miljövänligare än standardbetong. Denna betong använder sig av mindre cement vilket bidrar till längre härdnings- och uttorkningstider, vilket kommer att påverka tidsplanen. Denna typ av betong är så gott som standardiserad på byggbranschen idag på grund av dess sänkta klimatavtryck. Det existerar också grön betong med 50% lägre klimatavtryck än standardbetong, denna typ har relativt lång härdnings- och uttorkningstid vilket man helst undviker vid byggnationer. Grön betong 50% klimatförbättrad hade kunnat användas vid dimensioneringen av samverkanbjälklagen eftersom denna också finns med hållfasthetsklass C30/37. Hade detta använts skulle bjälklagens miljöpåverkan sänkts ytterligare, dock valdes det bort eftersom vi anser att en kort torktid är viktigt när det gäller bjälklag. Grön betong har även visat sig ha en längre livstid på grund av att risken för armeringskorrosion är lägre än för standardbetong (Skanska, 2022).

Trät som använts har hållfasthetsklassen 30c, vilket nu i efterhand är en klass som gör att träs hållfasthetsklass är överdimensionerat. Man hade kunnat gå ner flera klasser och ändå uppnå samma resultat. Trä har också förmågan att binda koldioxid när de växer, efter som ett träd kräver koldioxid för att kunna utföra fotosyntes (Perssons, 2021). Denna bundna koldioxid kan man räkna bort från det totala utsläppet från en

byggnation i trä. Det har inte tagits i beaktning vid kalkyleringen av varje konstruktions klimatavtryck.

6.3 Slutsats

Den slutsats som kommer att framföras är att kompositbjälklag har stora fördelar men även en del utmaningar. Kompositbjälklagen har jämförts mellan varandra men också mot ett KLT-bjälklag, under dem flesta jämförelser ser man att TCC och NLT-bjälklag presterar bättre. Dessa bjälklag har dock en något högre miljöpåverkan eftersom en större mängd betong används. Däremot ligger kompositbjälklag fortfarande på rimliga nivåer.

Som tidigare nämnt är kostnadskalkylen baserad på ungefärliga siffror tagna från NCC:s teknikgrupp, därmed kan resultatet från detta kapitel endast ses som en indikation. Något som inte heller har tagits i beaktning är eventuella omkostnader och efterbehandlingskostnader som tillkommer vid tillverkningen och installationen av elementen. Dessa kostnader kan till exempel vara efterbehandling, tillverkning av gjutform, torktid av betong och installationsgolv. Eftersom samverkanbjälklag är en relativt ovanlig teknik i Sverige finns det inga aktörer som prefabricerar TCC-element, vilket också har påverkan på kostnaderna. Nya tekniker medför också andra utmaningar till exempel byggarbetare som inte är familjära med byggtekniken, vilket kan påverka både tidsplanen och kvaliteten på konstruktionen.

Vi anser dock att kostnadskalkylen indikerar på att samverkanbjälklag kan vara kostnadseffektiva alternativ till KLT-bjälklag, speciellt om tekniken utvecklas och blir mer vanlig. Med en utvecklad teknik, bredare kunskap och prefabricering kan denna kompositlösning bli en stor konkurrent mot både KLT-bjälklag och betongbjälklag.

Det kompositbjälklag som vi anser vara det bästa alternativet till NCC:s KLT-bjälklag är TCC-bjälklaget som använder skruv som skjuvförbindare, se Figur 2.7. I Tabell 6.1 kan man se att TCC-skruv och TCC-grovnot inte presterar sämst i någon av de jämförda parametrarna, vilket är mycket positivt. Vi har valt TCC-skruv just för att detta bjälklag känns säkrare att producera då det skulle få ett segt brott vid ett olycksfall samt att skruvarna är enkla att montera.

Fördelar med TCC- Skruv:

- Är säkrat mot spröda brott eftersom skruv används som skjuvförbindare.
- Presterar bra vid last med minimal nedböjning (klaras L/300).
- Klarar gott vibrations kraven för en kontorsbyggnad (klass B) vid långvarig last.
- Har en relativt låg klimatpåverkan jämfört med ett NLT-bjälklag.
- Utrymme för installationer.

7. Referenser

- Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., & Johansson, P. (2019). *Bärande konstruktioner, del 1*. Chalmers tekniska högskola. Göteborg.
- Betongindustri. (u.d.). *Tekniska egenskaper*. Hämtat från <https://www.betongindustri.se/sv/tekniska-egenskaper>
- Boverket. (2019). *Boverkets konstruktionsregler, EKS 11*. Hämtat från <https://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2019/eks-11.pdf>
- Boverket. (2019). *Introduktion till livscykelanalys (LCA)*. Hämtat från <https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/livscykelanalys/introduktion-till-livscykelanalys-lca/>
- Byggelement. (u.d.). *Håldäck (HDF)*. Hämtat från <https://byggelement.se/produkter/bjalklag/haldack/>
- Derome. (2020). *Norska HENT är världsmästare på att bygga högt i trä*. Hämtat från <https://www.derome.se/privat/om-derome/innovation-forskning/sara-kulturhus/senaste-nytt/norska-hent-ar-varldsmastare-pa-att-bygga-hogt-i-tra>
- Deutsches Institut für Bautechnik. (2013). *European technical approval ETA-13/0699*. Hämtat från https://www.sfs.com/sfs_download/media/sv/general_media/downloadcenter/sfs_intec_mo_sv/traebraekningsprogrammet/certifikat_2/european_technical_approval_eta_13_0699.pdf
- Dias, A., Schänzlin, J., Dietsch, P. (2018). *Design of timber-concrete composite structures*. Hämtat från <https://www.cost.eu/uploads/2018/11/Design-of-Timber-Concrete-Composite-Structures.pdf>
- Hansson, V., Hervén, O. (2011). *Sverige bygger högt i trä*. Lunds tekniska högskola. Lund. <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=1982360&fileId=8961303>
- Ingvarsson, M. Gustafsson, D. (2015). *Prefabricerade kompositbjälklag*. Hämtat från <https://odr.chalmers.se/bitstream/20.500.12380/218504/1/218504.pdf>
- Jockwer, R. (2021). *Timber concrete composite floor systems for more efficient structures*. Chalmers university of technology. Göteborg.
- Martinsons. (2022). *Martinsons materialguide för KL-trä*. Hämtat från https://martinsons.se/wp-content/uploads/2022/05/Materialguide_KL-tra%CC%88_05_2022.pdf

- Ohlsson, S.: Serviceability criteria – especially floor vibration criteria. 1991
International timber engineering conference. TRADA. Vol. 1, 58–65, 1991.
- Perssons Träteknik. (2021). *Koldioxidens kretslopp när du bygger i trä*. Hämtat från <https://www.perssonstrateknik.se/artikel/koldioxidens-kretslopp-nar-du-bygger-i-tra/>
- RISE. (u.d.). *Träbyggande och träkonstruktioner*. Hämtat från <https://www.ri.se/sv/vad-vi-gor/expertiser/trabyggande>
- SFS. (2020). *Träinfästning 21*. Hämtat från [https://www.sfs.com/sfs_download/media/general_media/downloadcenter/sfs_intec_mo_sv/prislista/Prislista_TW_2020 - Trainfastningar.pdf](https://www.sfs.com/sfs_download/media/general_media/downloadcenter/sfs_intec_mo_sv/prislista/Prislista_TW_2020_-_Trainfastningar.pdf)
- Skanska. (u.d.). *Grön betong för en hållbar framtid*. Hämtat från <https://www.skanska.se/49903f/siteassets/vart-erbjudande/produkter-och-tjanster/betong/gron-betong/produktblad-gron-betong.pdf>
- Strängbetong. (u.d.) *Håldäck*. Hämtat från <https://strangbetong.se/produkter/bjalklag/haldack/>
- Svenskt trä. (2016). *Limträhandbok Del 2*. Hämtat från <https://www.svenskttra.se/publikationer-start/publikationer/limtrahandbok/>
- Svenskt trä. (2016). *Limträhandbok Del 3*. Hämtat från <https://www.svenskttra.se/publikationer-start/publikationer/limtrahandbok/>
- Svenskt trä. (2017). *KL-trähandbok, fakta och projektering av KL-träkonstruktioner*. Hämtat från <https://www.svenskttra.se/siteassets/5-publikationer/pdfer/svt-kl-trahandbok-2017.pdf>
- Svenskt trä. (2018). *Dimensioner*. Hämtat från <https://www.traguiden.se/om-tra/materialet-tra/sagverksprocessen/sagprocessen/dimensioner/>
- Svenskt trä. (2019). *Dimensionering av träkonstruktioner Del 1 utgåva 3:2019*. Hämtat från <https://www.svenskttra.se/publikationer-start/publikationer/dimensionering-av-trakonstruktioner/>
- Svenskt trä. (2019). *Dimensionering av träkonstruktioner Del 2 utgåva 3:2019*. Hämtat från <https://www.svenskttra.se/publikationer-start/publikationer/dimensionering-av-trakonstruktioner/>
- Svenskt trä. (2019). *Dimensionering av träkonstruktioner Del 3 utgåva 3:2019*. Hämtat från <https://www.svenskttra.se/publikationer-start/publikationer/dimensionering-av-trakonstruktioner/>
- Svenskt trä. (2021). *Träbaserade sammansatta konstruktioner*. Hämtat från [Svensk Trä Sammansatta konstruktioner 20211007\[2165\].pdf](#)

Svenskt trä. (2021). *Träets styrka och styvhet*. Hämtat från <https://www.traguiden.se/om-tra/materialet-tra/traets-egenskaper-och-kvalitet/mechaniska-egenskaper1/traets-styrka-och-styvhet/>

Talja, A., Toratti, T.: Classification of Human Induced Floor Vibrations. *Journal of Building Acoustics*, Vol. 13, No. 3, 211–221, 2006.



CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY