



CHALMERS



Fanérträ

Experimentella försök och en studie av dess tillämpningar

Examensarbete inom högskoleingenjörprogrammet Byggingenjör

ROBIN BJÖRNKLINT
ADAM JONSSON

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för konstruktionsteknik
Stål- och träbyggnad
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Examensarbete 2015:68
Göteborg, Sverige 2015

EXAMENSARBETE 2015:68

Fanérträ

Experimentella försök och en studie av dess tillämpningar

Examensarbete i högskoleingenjörsprogrammet

Byggingenjör

ROBIN BJÖRNKLINT

ADAM JONSSON

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för konstruktionsteknik
Stål- och träbyggnad
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, 2015

Fanérträ
Experimentella försök och en studie av dess tillämpningar

*Examensarbete i högskoleingenjörsprogrammet
Byggingenjör*

ROBIN BJÖRNKLINT

ADAM JONSSON

© ROBIN BJÖRNKLINT OCH ADAM JONSSON, 2015

Examensarbete 2015:68 / Institutionen för bygg- och miljöteknik,
Chalmers tekniska högskola 2015

Institutionen för bygg och miljöteknik
Avdelningen för konstruktionsteknik
Stål- och träbyggnad
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Telefon: 031-772 10 00

Omslag:
Provuppställning för provkroppstyp 1, 3 och 5.

Chalmers reproservice
Göteborg 2015

Fanérträ

Experimentella försök och en studie av dess tillämpningar

Examensarbete i högskoleingenjörsprogrammet

Byggingenjör

ROBIN BJÖRNKLINT

ADAM JONSSON

Institutionen för bygg- och miljöteknik

Avdelningen för konstruktionsteknik

Stål- och träbyggnad

Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

Fanérträ (LVL – Laminated Veneer Lumber) är en träprodukt som har använts som konstruktionsmaterial sedan 70-talet. Materialet växte i Nordamerika fram som ett viktigt alternativ till sågat virke under 90-talet. Det berodde på att det blev brist på det timmer som användes för att tillverka konstruktionsvirke av sågat virke.

Arbetet omfattar med en litteraturstudie som inleds med en allmän introduktion om egenskaper hos trä och LVL. Sedan följer en studie om produktion och konsumtion av LVL i världen. Litteraturstudien beskriver slutligen dess tillämpningar och användningsområden. Studien visade att LVL är ett mångsidigt material med många användningsområden. Den visade även att materialet används mer i Nordamerika än i Europa. I Europa används istället limträ i en större utsträckning.

Vidare omfattar arbetet en framtagning av elasticitetsmoduler för de två LVL-materialen Kerto-S® och Kerto-Q® vilket gjordes genom experimentella försök. Dessa två material tillverkas av Metsä Wood i Finland. Kerto-S® används främst som balk och i materialet har all fanér orienterats i samma riktning. Kerto-Q® används främst som skivmaterial och i materialet har en femtedel av fanéren orienterats vinkelrätt mot de andra. Totalt testades sex olika belastningsfall. I ett av fallen, då Kerto-Q® belastas i sin veka riktning på högkant, var inte elasticitetsmodulen eller brottspänningen angiven av tillverkaren. Den framtagna elasticitetsmodulen och brottspänningen i detta belastningsfall var nära de värden som framtagits för materialet när det belastats i sin veka riktning på lågkant. Elasticitetsmodulerna var i fyra fall lägre än tillverkarens värden och i två fall högre. Detta var i de två fall där Kerto-Q® belastades i sin veka riktning.

Slutligen utfördes en jämförelse mellan olika uppbyggda bjälklag. Dessa bjälklag bestod av en balk av sågat virke, limträ eller Kerto-S® med en skiva av OSB eller Kerto-Q® ovanpå. Detta utfördes för att finna eventuella fördelar med att använda Kerto-S® och/eller Kerto-Q®. Det visade sig att Kerto-S® gav samma spännvidd som motsvarande dimension av limträ och längre spännvidder än sågat virke i samma dimension. Kerto-Q® resulterade i längre spännvidder än OSB. Dock användes 27mm tjock Kerto-Q® och 22mm tjock OSB vilket kan ha haft viss påverkan. Längst spännvidd uppnåddes med en kombination av Kerto-S® och Kerto-Q®.

Nyckelord: Fanérlaminatträ, Fanérträ, Kerto, LVL, Elasticitetsmodul, Bjälklag

Laminated veneer lumber

Experimental trials and a study of its uses

Diploma Thesis in the Engineering Programme

Building and Civil Engineering

ROBIN BJÖRNKLINT

ADAM JONSSON

Department of Civil and Environmental Engineering

Division of structural engineering

Steel- and timberstructures

Chalmers University of Technology

ABSTRACT

Laminated Veneer Lumber (LVL) is a wood-based construction material that has been used in the building industry since the 1970s. It grew in popularity at the beginning of the 1990s when there was a shortage of trees in the dimensions that is needed to manufacture structural timber.

The thesis begins with a literature study that starts with a general introduction of the properties of wood and LVL. It continues with a global study of production and consumption of LVL and ends with describing its applications. The study showed that LVL is a versatile material with many areas of use. It also showed that the material is used more in North America than in Europe. In Europe, glulam is more widely used.

In the next part of the report the elastic modulus of Kerto-S® and Kerto-Q® is found through experimental trials. The two materials are manufactured by Metsä Wood in Finland. Kerto-S® is mainly used as a beam and has all its veneers oriented in the same direction. Kerto-Q® is mainly used as a board and in this material one fifth of the veneers has been oriented perpendicular to the others. A total of six load cases were tested. In one of the cases, when Kerto-Q® is stressed in its weak direction on its edge, there were no given values for the elastic modulus or strength. The found values for this load case were close to the found values for the material when stressed in its weak direction flatwise. The elastic modulus found in this thesis turned out to be lower than the elastic modulus given by the manufacturer in four of the cases and higher in two of the cases. The found elastic modulus was higher for the two cases when Kerto-Q® was stressed in its weak direction.

The thesis ends with a comparison of floors consisting of different materials. These floors consisted of sawn wood, glulam or Kerto-S® with an OSB or Kerto-Q® mounted on top. The comparison was made to see if there were any advantages with using Kerto-S® and/or Kerto-Q®. It proved that Kerto-S® could be used in similar spans as corresponding dimensions of glulam and in longer spans than sawn wood of the same dimension. Kerto-Q® resulted in longer spans than OSB. However, in the evaluations Kerto-Q® with a thickness of 27mm and OSB with a thickness has been used. This could have had some effect on the results. The longest span was achieved with a combination of Kerto-S® and Kerto-Q®.

Key words: Laminated venneer lumber, LVL, Kerto, Elastic modulus, Floor.

Innehåll

SAMMANFATTNING	I
ABSTRACT	II
INNEHÅLL	III
FÖRORD	V
BETECKNINGAR	VI
1 INLEDNING	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Metod	2
1.4 Avgränsningar	2
2 TRÄ OCH FANÉRTRÄ	3
2.1 Egenskaper hos trä	3
2.2 Egenskaper hos fanérträ	3
2.3 Produktion och konsumtion av fanérträ	5
2.3.1 Nordamerika	5
2.3.2 Asien och Oceanien	5
2.3.3 Europa	5
2.4 Tillämpningar	6
2.4.1 Möbler	6
2.4.2 Dörrar	6
2.4.3 Broar	6
2.4.4 Balkar och lättviktsbalkar	7
2.4.5 Bjälklag	8
2.4.6 Form och fuktbeständiga plattor	9
2.4.7 Komplexa träkonstruktioner	10
3 FRAMTAGNING AV ELASTICITETSMODULER	11
3.1 Utförande	11
3.2 Resultat av experimentella försök	15
3.2.1 Framtagna elasticitetsmoduler	15
3.2.2 Typer av brott	17
4 JÄMFÖRELSE MELLAN OLIKA BJÄLKLAG AV TRÄ	21
4.1 Kontroll av bjälklag enligt Eurokod 5	22
4.1.1 Nedböjningskontroll	22
4.1.2 Punktlastdeformation	23
4.1.3 Svikt och vibration	23
4.2 Resultat av jämförelsen mellan olika bjälklag	24
5 DISKUSSION OCH SLUTSATS	25
5.1 Produktion, konsumtion och tillämpningar av LVL	25
5.2 Framtagna elasticitetsmoduler	25
5.3 Beräkningar av bjälklag	26

BILAGOR

Bilaga A: Dimensioner för testade provkroppar

Bilaga B: Fuktkvoter

Bilaga C: Härledning av elementarfall

Bilaga D: Framtagna elasticitetsmoduler och brottspänningar

Bilaga E: Typer av brott

Bilaga F: Bilder på brott

Bilaga G: Grafer av deformationskurvor

Bilaga H: Beräkning av bjälklag

Förord

Detta examensarbete omfattar 15 poäng och utfördes på våren 2015 som en del i byggingenjörsprogrammet på Chalmers. Det utfördes på förslag från forskargruppen stål-och träbyggnad vid institutionen för Bygg- och Miljöteknik.

Vi vill tacka vår examinator och handledare professor Robert Kliger som varit till stor hjälp under hela examensarbetet. Vi vill även tacka laborationsingenjören Sebastian Almfeldt som hjälpt oss med alla experimentella försök. Fanérträet som använts i de experimentella försöken kommer från Moelven Töreboda.

Göteborg, juni 2015

Robin Björnklint och Adam Jonsson

Beteckningar

Gemena:

a	Mittnedböjning [mm].
b	Bredd [m].
b_{golv}	Golvets bredd [m].
f_1	Fundamentala frekvensen [Hz].
f_{Ed}	Dimensionerande hållfasthet [Pa].
f_{Rd}	Dimensionerande hållfasthetskapacitet [Pa].
f_{vd}	Dimensionerande skjuvhållfasthet [Pa].
$f_{c,0,d}$	Dimensionerande tryckhållfasthet parallellt med fibrerna [Pa].
$f_{c,0,k}$	Karakteristisk tryckhållfasthet parallellt med fibrerna [Pa].
$f_{t,0,d}$	Dimensionerande draghållfasthet parallellt med fibrerna [Pa].
$f_{t,0,k}$	Karakteristisk draghållfasthet parallellt med fibrerna [Pa].
$f_{r,k}$	Karakteristisk hållfasthet mot skiktskjuvning [Pa].
$f_{r,d}$	Dimensionerande hållfasthet mot skiktskjuvning [Pa].
$f_{v,k}$	Karakteristisk skjuvhållfasthet [Pa].
$f_{v,d}$	Dimensionerande skjuvhållfasthet [Pa].
$f_{v,0,edge,d}$	Dimensionerande skjuvhållfasthet för material på högkant [Pa].
$f_{v,0,edge,k}$	Karakteristisk skjuvhållfasthet för material på högkant [Pa].
$f_{v,0,flat,d}$	Dimensionerande skjuvhållfasthet för material på lågkant [Pa].
$f_{v,0,flat,k}$	Karakteristisk skjuvhållfasthet för material på lågkant [Pa].
g	Egenvikt [kN/m].
h	Höjd [m].
k_{def}	Kryptal.
k_{mod}	Omräkningsfaktor med hänsyn till lastvaraktighet och fukt.
l	Golvets spännvidd [m].
m	Golvets massa [kg/m^2].
m_u	Vikten av det fuktiga träet [g].
m_{dry}	Vikten av det torkade träet [g].

n_{40}	Antalet första ordningens moder med en frekvens lägre än 40Hz [st].
q	Utbredd last p.g.a. nyttig last [N].
q_{ULS}	Utbredd last p.g.a. nyttig last i brottgränstillstånd [N].
u	Fuktkvot [%].
v	Impulshastighet [m/s].
$x_{tp,inst}$	Tyngdpunkt vid beräkning av omedelbar nedböjning [m].
$x_{tp,fin}$	Tyngdpunkt vid beräkning av slutgiltig nedböjning [m].
y_{mitt}	Mittnedböjning [mm].
z	Avståndet mellan vald tvärsnittsyttas tyngdpunkt och hela tvärsnittsyttans tyngdpunkt [m].

Versaler:

A	Tvärsnittsarea [m ²].
E	Elasticitetsmodul [Pa].
E_0	Elasticitetsmodul parallellt med fibrerna [Pa]
E_{90}	Elasticitetsmodul vinkelrätt med fibrerna [Pa]
E_d	Dimensionerande elasticitetsmodul [Pa].
E_{mean}	Medelvärde för elasticitetsmodul [Pa].
$E_{mean, fin}$	Slutgiltigt medelvärde för elasticitetsmodulen [Pa].
EI_l	Böjstyvhet i balkens längdriktning [Nm ² /m].
EI_b	Böjstyvhet i balkens tvärriktning [Nm ² /m].
F	Kraft [N].
G	Skjuvmodul [Pa].
G_d	Dimensionerande skjuvmodul [Pa].
G_{Mean}	Medelvärde för skjuvmodul [Pa].
I	Böjtröghetmoment [m ⁴].
I_{inst}	Böjtröghetmoment vid beräkning av omedelbar nedböjning[m ⁴].
I_{fin}	Böjtröghetmoment vid beräkning av slutgiltig nedböjning[m ⁴].
L	Spännvidd [m].
M	Momentkraft [Nm].

M_{Ed}	Dimensionerande momentkraft [Nm].
P	Punktlast [N].
Q	Nyttig last [kN/m ²].
V_{Ed}	Dimensionerande tvärkraft [N].
W	Böjmotstånd [m ³].

Grekiska alfabetet:

γ_M	Partialkoefficient.
δ_{fin}	Slutgiltig nedböjning [mm].
$\delta_{fin,G}$	Slutgiltig nedböjning orsakad av egenvikt [mm].
$\delta_{fin,Q}$	Slutgiltig nedböjning orsakad av variabel last [mm].
$\delta_{inst,G}$	Omedelbar nedböjning orsakad av egenvikt [mm].
$\delta_{inst,Q}$	Omedelbar nedböjning orsakad av variabel last [mm].
δ_{skj}	Omedelbar nedböjning orsakad av skjuvdeformation [mm].
ζ	Relativ dämpning.
ρ	Densitet [kg/m ³].
σ	Spänning [Pa].
$\sigma_{inst,X}$	Omedelbar spänning [Pa].
$\sigma_{fin,X}$	Slutgiltig spänning [Pa].
$\tau_{inst,ansl}$	Omedelbar skjuvspänning som uppstår mellan liv och fläns [Pa].
$\tau_{inst,ctp}$	Omedelbar skjuvspänning som uppstår i tvärsnittets tyngdpunkt [Pa].
$\tau_{fin,ansl}$	Slutgiltig skjuvspänning som uppstår mellan liv och fläns [Pa].
τ_d	Dimensionerande skjuvspänning [Pa].
ψ_2	Reduktionsfaktor för olika variabla laster.

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Detta examensarbete utfördes på förslag från forskargruppen stål- och träbyggnad vid institutionen för Bygg- och Miljöteknik på Chalmers. Arbetet är en studie av fanérlaminatträ som är en förädlad träprodukt bestående av flera tunna träfanéer som limmats ihop. Fanérlaminatträ användes under andra världskriget i flygplanspropellrar men började under 70-talet att användas som ett byggnadsmaterial. Materialet kommer i fortsättningen benämnas som LVL, vilket är en förkortning för Laminated Veneer Lumber (Lam, 2003).

I kursen "Timber Engineering" som ingår i masterprogrammet "Structural engineering and building technology" skulle laborationsövningar på LVL-materialet Kerto® utföras. Under laborationen skulle två typer av Kerto® prövas, Kerto-Q och Kerto-S. Skillnaden mellan dessa material är att i Kerto-Q är en femtedel av fanéren placerade vinkelrätt mot resterande fanér medan i Kerto-S är all fanér orienterad i samma riktning. Laborationen utfördes för att visa studenterna hur fiberriktningen spelar en avgörande roll för trämaterials styvhet. Studenterna skulle efter laborationen bestämma elasticitetsmodulen för de olika materialen i dess styva och veka riktning. Att utvärdera resultaten från laborationen mer ingående samt att undersöka användningsområden för LVL var en del av ett lämpligt examensarbete.

Bidragande orsaker till att examensarbetet utfördes var ett tidigare examensarbete gjort av Hans Häggqvist (2008) där experimentella försök på fanérträ utfördes på Moelvans fabrik i Töreboda.

1.2 Syfte

Syftet med detta examensarbete var att genom experimentella försök bestämma elasticitetsmodulen då Kerto-Q belastas i styv och vek riktning, för balkar på hög- och lågkant. Kerto-S belastades på samma sätt, men bara i materialets styva riktning då det ansågs att böjning i svaga riktningen inte var av intresse. De brott som uppstod under de experimentella försöken dokumenterades och analyserades. De framtagna värdena för elasticitetsmoduler jämfördes med tillverkarens motsvarande värden. Detta för att få en uppfattning om hur väl tillverkarens värden för materialens elasticitetsmoduler stämmer.

Vidare genomfördes en litteraturstudie av LVL. Denna litteraturstudie fokuserade på hur LVL av barrträ produceras och konsumeras i olika delar av världen. Även tillämpningar av LVL undersöktes. Detta för att få en översikt över materialets faktiska användningsområden och betydelse i olika delar av världen.

Slutligen utfördes en jämförelse av möjliga spännvidder för olika uppbyggda träbjälklag med ett T-tvärssnitt. Detta för att undersöka eventuella fördelar med Kerto® gällande möjliga spännvidder. Utvärdering av bjälklag gjordes för att bjälklag är ett av de största användningsområdena för Kerto-S och Kerto-Q.

1.3 Metod

Undersökningen av hållfasthetsvärden skedde i samband med en laboration i kursen "Timber Engineering" som ingår i masterprogrammet "Structural engineering and building technology" på Chalmers. I laborationen belastades balkar stegvis och nedböjningen mättes. Med data om nedböjning och last kunde de eftersökta elasticitetsmodulerna bestämmas. Vidare genomfördes en litteraturstudie för att undersöka användningsområden, produktion och konsumtion av materialet, både i Sverige och i utlandet. Beräkningar av spännvidder för de olika bjälklagen utfördes i MathCad enligt de krav som finns i Eurokod 5, EN1995-1-1:2004.

1.4 Avgränsningar

Experimentella försök utfördes enbart för Kerto-Q och Kerto-S. Vid de experimentella försöken undersöktes endast elasticitetsmodulen för Kerto-Q vid böjning i svag- och styv riktning för balkar på lågkant respektive högkant. Elasticitetsmodulen för Kerto-S togs endast fram vid böjning i styv riktning för balkar på högkant respektive lågkant.

Rapporten kommer enbart behandla LVL tillverkat av barrträ.

Lastcellerna som användes i de experimentella försöken är konstruerade för att mäta mycket högre laster än de som mättes i de försök som utfördes som del i detta examensarbete. För att få tillförlitliga värden borde lastcellen belastats över 5% av sin maximala kapacitet. Under de experimentella försöken belastades lastcellen i de flesta fall inte mer än 5% av sin maxkapacitet.

De experimentella försöken utfördes i en liten del av ett stort rum där resten av rummet var utlånat som ett lagerutrymme. Lastportarna till rummet hölls ibland öppna och då det var minusgrader ute ändrades temperaturen i rummet ibland med flera grader vilket kan ha haft påverkan på materialet och mätutrustningen.

2 Trä och fanérträ

I detta kapitel beskrivs först egenskaper hos trä och fanérträ på materialnivå. Sedan beskrivs produktion och konsumtion av LVL i olika världsdelar och till sist beskrivs dess olika användningsområden.

2.1 Egenskaper hos trä

Trä är ett ortotropiskt material vilket innebär att det har olika hållfasthetsegenskaper beroende på belastningens riktning i förhållande till träets fibrer. Det är avsevärt starkare vid belastning parallellt med fibrerna jämfört med belastning vinkelrätt (Svenskt trä, 2014). Materialets hållfasthet påverkas även av temperatur och fuktkvot. Hållfastheten och styvheten minskar vid ökande fuktkvot. Tryckhållfasthet påverkas mest, medans draghållfastheten inte påverkas lika mycket av varierande fukthalt (Johansson, 2011), se Tabell 3.1. I Eurokod 5 finns tre olika klimatklasser definierade för att vid dimensionering kunna kompensera för olika förväntade fukthalter i träet (Kliger, 2011). Enligt Johansson (2011) spelar temperaturen en betydligt mindre roll för hållfastheten hos trä vid normal temperatur (-30°C - $+90^{\circ}\text{C}$). Det är främst vid temperaturer över 95°C som har stor påverkan då trä börjar brytas ned vid denna temperatur.

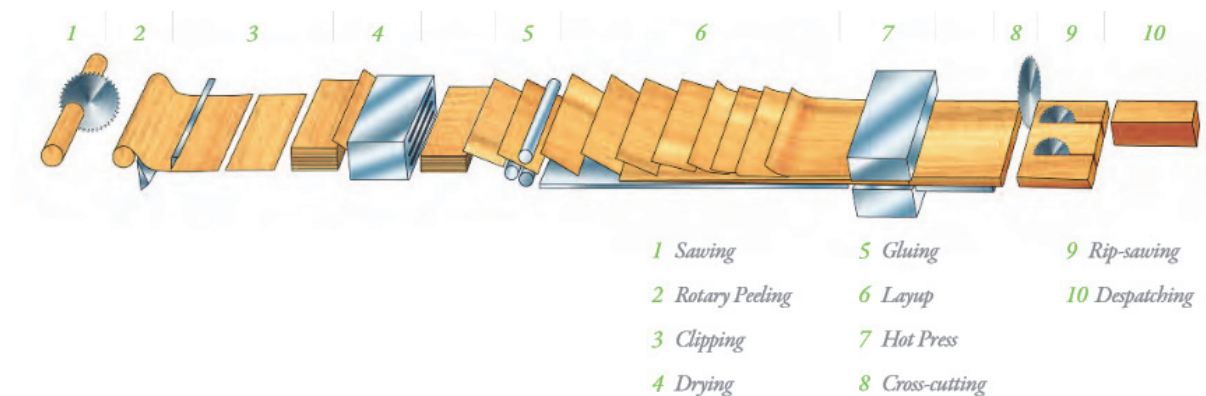
Hållfastheten hos trä påverkas även av träets uppbyggnad. Kvistar stör träfibrernas naturliga utbredning och tvingar fibrerna att ändra riktning runt kvisten. Detta skapar en högre påfrestning på lokal nivå, då fibrerna vid kvistarna får en annan riktning än kraftens riktning. Träets densitet spelar också stor roll för hållfastheten (Johansson, 2011). Olika trädslag har olika densitet, men även samma trädslag kan ha olika densitet. Densiteten varierar även utmed stammen, både i longitudinell och radiell riktning. Även förhållanden såsom klimat och markförhållande under trädets uppväxt har stor påverkan. (Svenskt trä, UÅb)

Med anledning av osäkerheten och den stora spridningen av defekter och variationer i trä är det svårt att bedöma hållfastheten för enskilda träkroppar. Istället uppskattas medelvärden och karakteristiska hållfasthetsvärden baserat på tester utförda enligt en standard. Det finns dock vissa parametrar som kan användas för att klassa trä i olika hållfasthetsklasser. Ett sätt att klassa trä är att inspektera antalet kvistar i en träprodukt, men även densiteten spelar roll för att klassa materialet (Johansson, 2011). Johansson (2011) menar att kvistar är den defekt som påverkar hållfastheten allra mest. Det har visat sig i genomförda tester att 90% av alla brott hos gran börjar vid en kvist.

2.2 Egenskaper hos fanérträ

Fanérträ (LVL) är en förädlad träprodukt som består av flera lager tunn träfanér. Till skillnad från plywood orienteras vanligast fanéren med fiberriktningen i elementets längdriktning när det används som balk (Lam, 2003).

Tillverkningsprocessen börjar med att fanéren svarvas från stockar som sedan skärs till skivor. Synliga defekter kan avlägsnas och fanéren graderas, både visuellt och med hjälp av maskiner. Sedan skärs fanéren till rätt storlek och limmas samman till skivor under högt tryck och hög temperatur, för att till sist sågas till önskade dimensioner. För en illustration av tillverkningsprocessen, se Figur 2.1. Eftersom många defekter kan avlägsnas under tillverkningen leder det till att LVL är mer pålitligt och har mindre variationer jämfört med sågat virke (Lam, 2003).



Figur 2.1: Tillverkningprocess för LVL-materialet Kerto® (Metsä Wood, 2013)

Vid tillverkningen av LVL-materialet Kerto® används 3 mm tjock fanér från gran (Moelven, UÅa). I Kerto-S placeras alla lager av fanér med fiberriktningarna i balkens längdriktning. I Kerto-Q är en femtedel av fanéren placerade med fiberriktningen vinkelrätt mot övriga lager, se Tabell 2.1. Denna struktur ökar skjuvhållfastheten men det gör också Kerto-Q mer lämplig att använda som skiva, i till exempel golv och tak, då den blir styvare i materialets tvärriktning. Denna fanérstruktur gör också Kerto-Q mindre känslig för fuktvariationer som annars kan göra att träet ändrar form (Metsä Wood, 2012).

Tabell 2.1- Fanérstruktur för Kerto-Q

Tjocklek [mm]	Fanér [st]		Fanérstruktur
	Z	X	
27	7	2	- -
33	9	2	- -
39	10	3	- - -
45	12	3	- - -
51	14	3	- - -
57	15	4	- - - -
63	16	5	- - - - -
69	18	5	- - - - -
Z=Fanéer parallellt med längdriktningen			
X=Fanéer vinkelrätt mot längdriktningen			

Källa: Metsä Wood (2012)

2.3 Produktion och konsumtion av fanérträ

I detta avsnitt beskrivs produktionen och konsumtionen av LVL i olika världsdelar.

2.3.1 Nordamerika

Nordamerika är den världsdel där det konsumeras mest LVL och det används då främst vid byggnationer av bostadshus som balkar eller komponenter i I-balkar (UNECE timber committee, 2014). Konsumtionen av LVL ökade på 90-talet då det blev brist på träd av de dimensioner som behövs för att tillverka konstruktionsvirke av sågat virke. Bristen berodde på ett domstolsbeslut som införde hårda restriktioner för avverkning av träd på statlig mark. Under samma tid gjordes stora tekniska framsteg inom framställning av förädlade träprodukter. Det ledde till att förädlade träprodukter kunde tillverkas av mindre och yngre träd samt av mindre ansedda träsorter som tidigare inte kunnat användas för tillverkning av konstruktionsvirke. Detta ledde till efterfrågan av förädlade träprodukter ökade under 90-talet. En av dessa förädlade träprodukter var LVL (Schuler, 2000).

År 2014 användes 74% av den totala konsumtionen av LVL till att bygga bostadshus (UNECE timber committee, 2014). År 2000 var 95% av allt LVL tillverkat av barrträd och till största del av sorterna Douglasgran och olika typer av tall (Schuler, 2000).

2.3.2 Asien och Oceanien

Japan använder och producerar mest LVL av de asiatiska länderna. Landets användning skiljer sig från användningen i USA och Europa då endast 20% av konsumtionen används till bärande konstruktioner. Istället används materialet mestadels i möbler som komponenter eller dekor. Även de använda träsorterna skiljer sig från övriga världen då ungefär hälften av det LVL som används i Japan består av virke från lövträ. Resterande länder i Asien och Oceanien använder LVL i viss mån men mycket av deras produktion exporteras till Japan. (Schuler, 2000).

2.3.3 Europa

Användandet av LVL skiljer sig inom Europa då det i norra Europa används främst till bostadshus medans det i södra Europa används mestadels i kommersiella byggnader. Dock är konsumtionen av LVL relativt låg jämfört med Nordamerika, istället används limträ i större utsträckning (Schuler, 2000). I Europa marknadsförs LVL under namnet Kerto® av Metsä Wood i Finland. Metsä Wood har även vidareutvecklat LVL och anpassat det för användning i olika ändamål såsom pelare, balkar och bjälklag (Metsä Wood, 2012). Nästintill all LVL som använts inom byggnadskonstruktion i Europa har bestått av barrträ. År 2013 påbörjade dock den tyska tillverkaren Pollmeier konstruktionen av en fabrik för att tillverka LVL ämnat för byggnadskonstruktion av träslaget bok (Pollmeier, 2014).

2.4 Tillämpningar

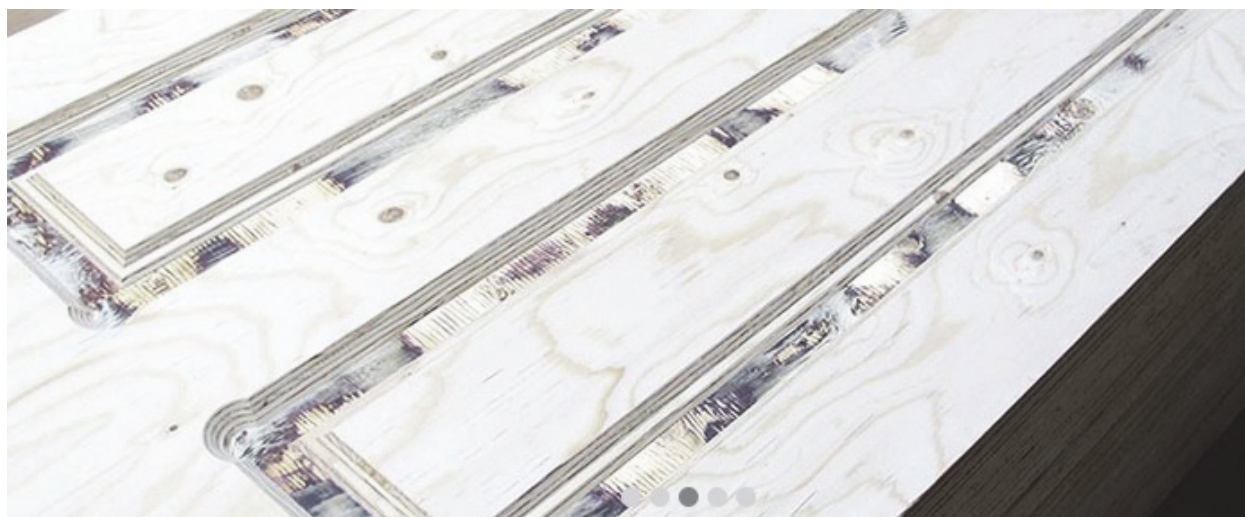
I detta avsnitt beskrivs ett antal tillämpningar för LVL-material.

2.4.1 Möbler

LVL är lämplig att använda till möbeltillverkning då det kan tillverkas på ett sådant sätt att det både känns och ser ut som genuint trä. Jämfört med massivt trä ställer det heller inte lika stora krav på att det ursprungliga träet har ett fint och kvistfritt utseende då det räcker med att det yttersta lagret fanér har det. Detta leder till att material av finare utseende kan tillverkas till en lägre kostnad och av sämre trä. Vidare är LVL bättre på att behålla formen än massivt trä när det utsätts för fuktvariation och last (Eckelman, 1993).

2.4.2 Dörrar

Rocal är en dörrtillverkare i Storbritannien som tillverkar många av sina dörrar med Kerto-Q. Anledningen var att Storbritanniens regering ställde större krav på att alla träprodukter ska komma från ett, för framtiden, hållbart skogsbruk. Rocal valde då att använda sig av Kerto-Q från Metsä Wood då det uppfyllde regeringens krav. I dörrarna används 45mm tjock Kerto-Q som kärna till dörrbladen, se Figur 2.2. Trämaterialets kanter täcks med ett 1.5mm tjockt kantband för att skydda materialet och ge det en finare yta (Rocal, UÅ).

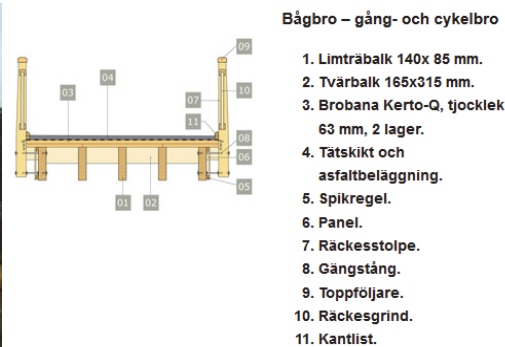


Figur 2.2: Dörr av Kerto-Q tillverkad av Rocal (Metsä Wood, UÅ)

2.4.3 Broar

LVL kan användas i broar och används främst som brodäck. Materialet behöver då skyddas med flera skyddslager som generellt består av ett vattentätt lager av bitumen och över det ett slitlager för trafiken. Speciellt impregnerad Kerto-Q lämpar sig väl för att användas som substrat i brodäck eller som förstärkning mot skjuvkrafter. LVL i brodäck kan användas i ett förspänt enkelt däck eller håldäck. I ett håldäck används LVL både som flänsar och liv. Det är även lämpligt att använda i ett skyddande tak över en bro (Mettem, 2011).

Ett exempel där LVL använts är en bågbro i Hägernäs som korsar E18, se Figur 2.3. Bron byggdes 2007 och är en gång- och cykelbro med en brobana som är 42,1m lång. Brobanan består av Kerto-Q som vilar på limträbalkar, se Figur 2.4. Brons bågar består av limträ med en spännvidd på 34 meter som är inklädda i plåt för att skydda träet från fukt. Den tekniska livslängden för denna bro är 80 år (Pousette, 2008).



Figur 2.3: Bågbro i Hägernäs (Svenskt trä, 2007) Figur 2.4: Brons uppbyggnad (Svenskt trä, 2007)

Ett annat exempel är två vägbroar som byggdes på 90-talet vid McGrath's Flat Lagoon nordväst om Sydney i Australien. Broarna är plattbroar med ett 400mm tjockt brodäck av kreosotbehandlad LVL och har ett spann på cirka 10 meter (Crews, 2001).

Ytterligare ett exempel är en bro i Tharandt i Tyskland som färdigställdes 2004. Det är en 117 meter lång gångbro av prefabricerade element som ger människor möjlighet att gå bland trädtopparna i en till staden närlägen bokskog. Brobanan i denna gångbro är 2,5 meter bred och består av plywood, 40mm tjock Kerto® och 220mm tjocka träbalkar som limmats ihop. Brodäcket skyddas av ett vattentätt membran och två lager polymeriserad asfalt. (Mettem, 2011).

2.4.4 Balkar och lättviktsbalkar

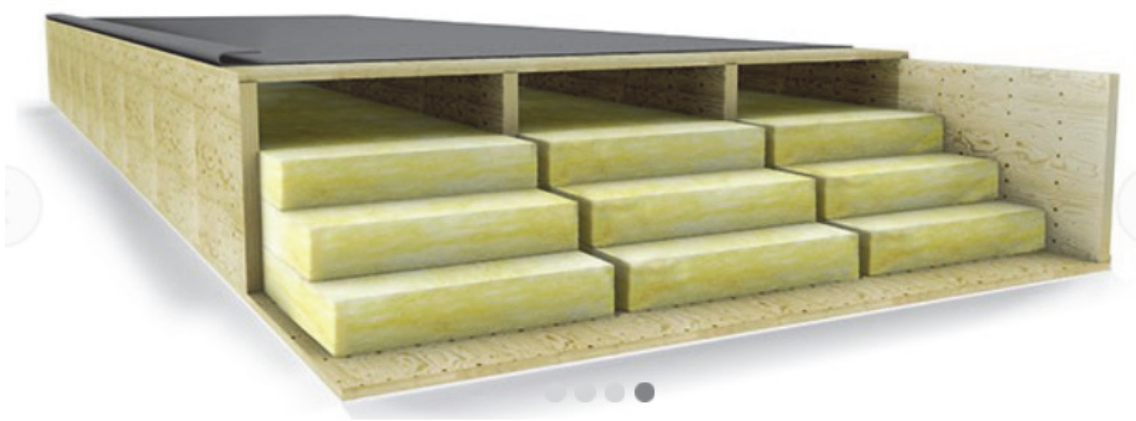
Rektangulära balkar av LVL kan användas på precis samma sätt som balkar av limträ eller sågat virke. Lättviktsbalkar är balkar som är optimerade för böjbelastningar och utformas vanligtvis som låd- eller I-balkar, se Figur 2.5. Dessa balkars flänsar kan bestå av vanligt virke vid kortare spännvidder och av limträ eller LVL vid längre spännvidder. Som liv används normalt sett ett skivmaterial så som OSB eller plywood (Svenskt trä, UÅa). Fördelar med lättviktsbalkar gentemot balkar av sågat virke är att de är starkare, lättare, styvare, rakare och kan användas i längre spännvidder (Allen, 2004). De är också mer formstabila efter som de tillverkas av torrt trä. Även om den initiala kostnaden för att bygga med lättviktsbalkar är högre, jämfört med att bygga med balkar av sågat virke, kan den slutgiltiga kostnaden vara lägre. Detta på grund av att det i många fall minskar behovet av senare merarbete på grund av knarriga eller sviktande golv. Dessutom är kostnadsskillnaden mellan dimensioner hos lättviktsbalkar små då högre dimensioner fås genom att lägga till mer material i livet som ofta består av ett, jämfört med LVL och limträ, relativt billigt material såsom plywood eller OSB. Nackdelar med lättviktsbalkar är att de för tillfället bara kan användas invändigt och att materialet är känsligt för skador och hål i flänsarna. Det är dock acceptabelt att göra hål i livet så länge de inte överskrider vissa dimensioner (Russelberg, 2006). Lättviktsbalkar är jämfört med sågat virke och limträ känsligare för eld då livet som består av ett tunt skivmaterial snabbt brinner upp vilket leder till att balken tappar sin bärförmåga (Avila, 2008).



Figur 2.5: Lättviktsbalk med flänsar av Kerto® (Metsä Wood, UÅb.)

2.4.5 Bjälklag

Ett bjälklagssystem som utvecklats av Metsä Wood är Kerto-Ripa® som är ett bjälklag bestående av Kerto-Q och Kerto-S. Kerto-S används som balkar och Kerto-Q används som skivor på ovan och undersidan, se Figur 2.6. Kerto-Ripa® kan användas i spännvidder upp till 8 meter när det används som golvbjälklag och upp till 18 meter vid användning som takbjälklag. Detta minskar begränsningarna vid utformning av planlösningar. Det är även snabbt att montera då det prefabriceras. (Metsä Wood, UÅc). Kerto-Ripa® utgör tillsammans med pelare och balkar av limträ pelarbalksystemet "Trä8" som marknadsförs av Moelven Töreboda AB (Moelven Töreboda AB, UÅa).



Figur 2.6: Bjälklagssystemet Kerto-Ripa® (Metsä Wood, UÅc)

Lättviktsbalkar kan användas i bjälklag, se Figur 2.7. Fördelar och nackdelar med att använda dessa beskrivs i kapitel 2.4.4. I Nordamerika är det vanligt att använda lättviktsbalkar i bjälklag och ungefär 50 % av de nybyggda husen i Nordamerika år 2004 byggdes med lättviktsbalkar (Russelberg, 2006).



Figur 2.7: Bjälklag av lättviktsbalkar (Masonite Beams, 2014)

2.4.6 Form och fuktbeständiga plattor

Assyx GmbH & Co. KG är ett tyskt företag inom betongblocksindustrin. Företaget sökte efter en långtidslösning för de bottenplattor som används vid gjutning av betongplattor. Lösningen blev då att använda sig av Kerto® LVL inklätt i en specialutvecklad plast, se Figur 2.8. Assyx GmbH & Co. KG utvecklade produkten i samarbete med Bayer MaterialScience. Produkten, som de valde att kalla Duroboard, är ett konstruktionsmaterial i trä som är väderbeständigt och helt underhållsfritt. Det visade sig att materialet hade andra användningsområden och har till exempel använts i byggnaden Forum Confluentes i Koblenz, Tyskland som beläggning på ett utsiktsdäck (Albawaba, 2014).



Figur 2.8: LVL inklädd i plast (ASSYX GmbH & Co., 2006)

2.4.7 Komplexa träkonstruktioner

I Sevilla, Spanien finns en av världens största träkonstruktioner, se Figur 2.9. Den heter Metropol Parasol och har designats av arkitekten Jürgen Mayer H. Byggnationen av Metropol Parasol påbörjades år 2005 och avslutades våren 2011. Konstruktionen rymmer restauranger och barer samt att den fungerar som en utsiktspunkt. Den täcker en yta av ungefär 11 000 m² och består av cirka 3 400 stycken paneler av Kerto-Q i varierande storlekar. Den största panelen är 16,5 meter hög och 3,5 meter bred. Materialet har täckts med 2-c-polyurethan för att skydda det från väder och vind. Enligt Metsä Wood är Kerto-Q det enda materialet som kunde användas i en så stor och komplex byggnad som Metropol Parasol (Metsä Wood, UÅc).



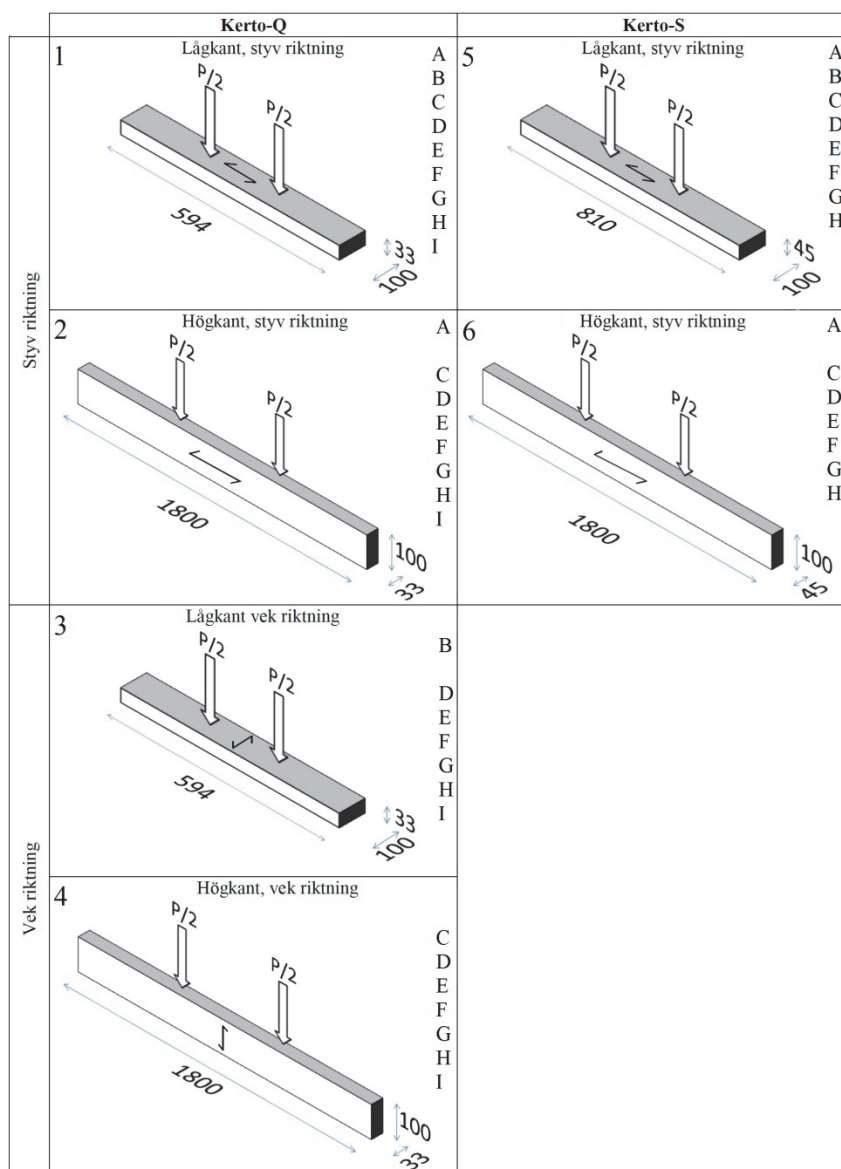
Figur 2.9: Under Metropol Parasol (Rubendene, 2012)

3 Framtagning av elasticitetsmoduler

I detta kapitel beskrivs hur elasticitetsmodulerna togs fram genom experimentella försök samt resultaten av dessa.

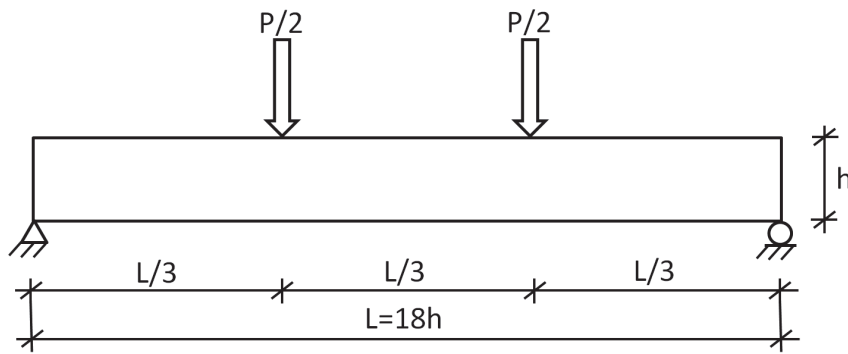
3.1 Utförande

Laborationerna utfördes på institutionen för bygg- och miljöteknik på Chalmers tekniska högskola av rapportförfattarna och en forskningsingenjör. Sex olika typer av provkroppar testades, se Figur 3.1. Av varje typ testades åtta eller nio provkroppar som vardera märktes med en bokstav från A till I för att kunna skilja dem åt. Laborationen utfördes vid två olika tillfällen. Laborationen utfördes vid det första tillfället i samband med en laboration i kursen "Timber Engineering". Vid det andra laborationstillfället var endast rapportförfattarna och forskningsingenjören närvarande. Då det fanns önskan från andra universitet att försöken skulle dokumenteras, filmades och loggades många utav de experimentella försök som utfördes.

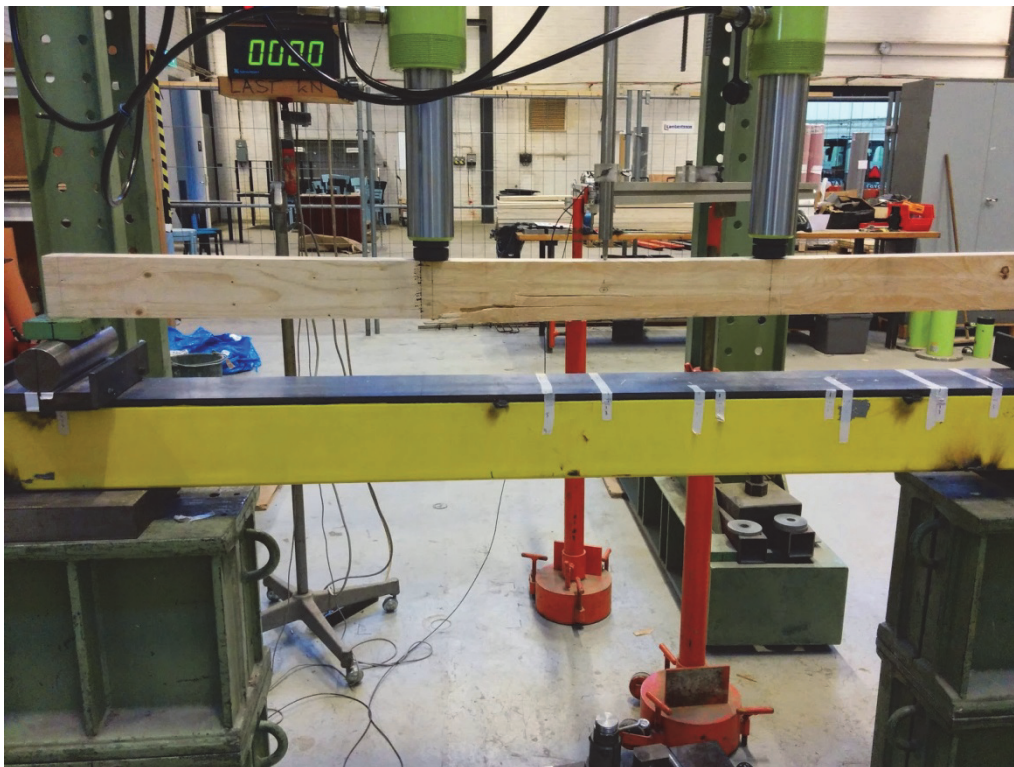


Figur 3.1: Belastningsfall för de olika provkroppstyperna. Bokstäverna till höger i varje ruta anger hur många provkroppar av varje typ som testats och vilka beteckningar de givits.

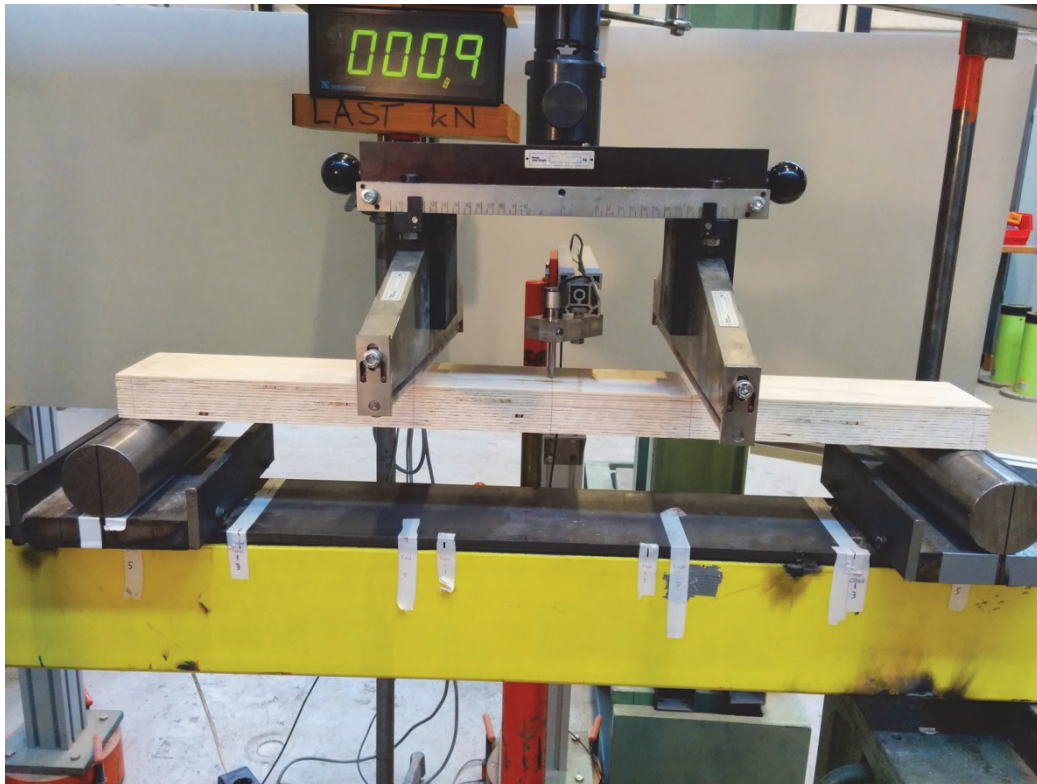
Provkropparna lades på rullstöd i vardera ände och belastades med två punktlaster. Spännvidden för provkropparna var 18 gånger längre än höjden på tvärsnittet och punktlasterna placerades med en tredjedel av längden i mellan och från stöden, se Figur 3.2. Spännvidden och provuppställningen är enligt standarden EN408:2003. När de längre provkropparna testades användes två domkrafter som punktlaster, se Figur 3.3. När de kortare provkropparna testades fördelades lasten från en domkraft till två punktlaster, se Figur 3.4. För de långa provkropparna användes metallplattor på rullarna för att öka kontaktytan mellan provkropparna och stöden. Detta för att minska spänningarna vinkelrätt mot fibrerna.



Figur 3.2 Principiell belastning

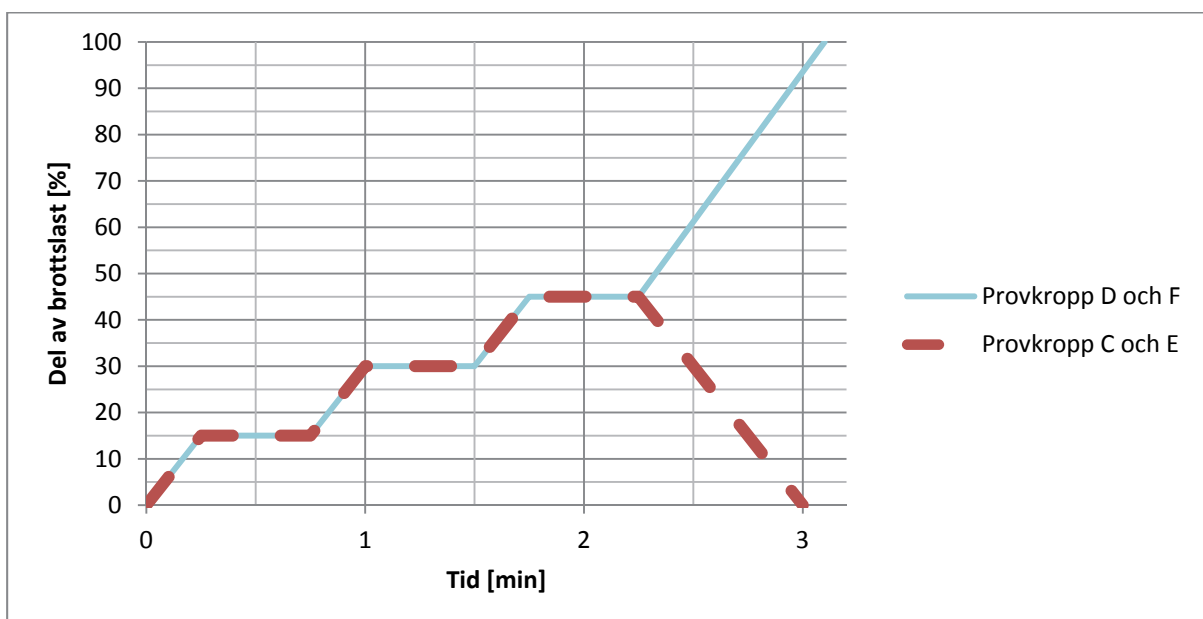


Figur 3.3: Belastning på högkant i styva riktningen



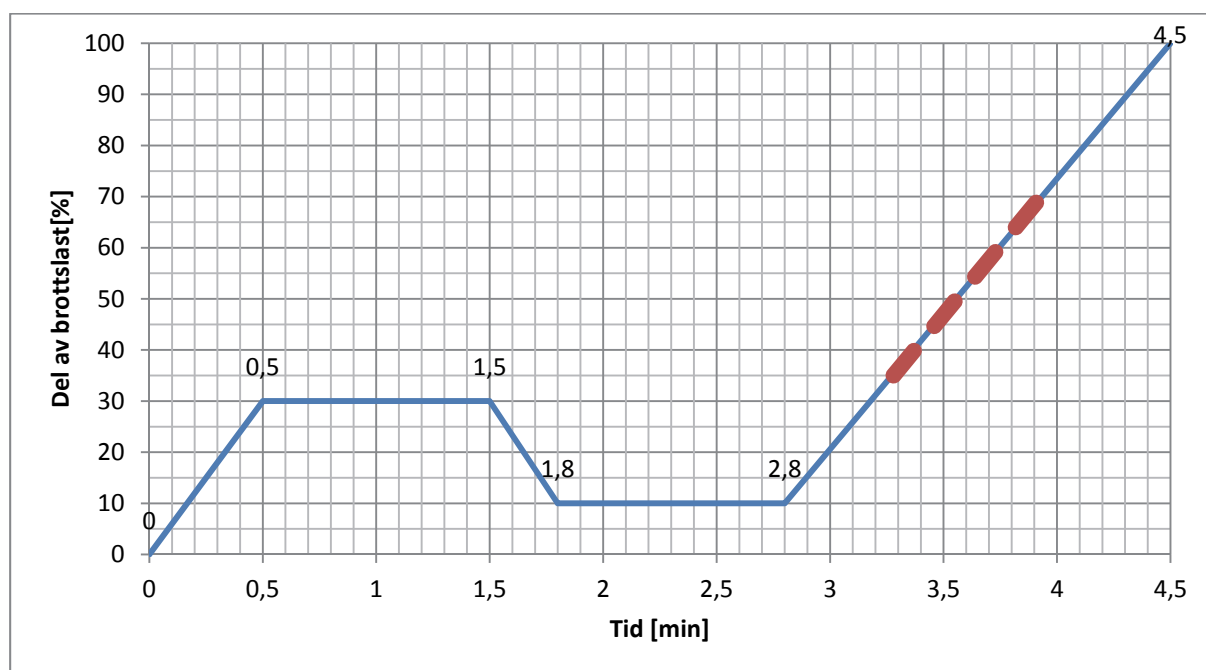
Figur 3.4: Belastning på lågkant i styva riktningen

Vid det första laborationstillfället testades de fyra provkropparna C till F av varje typ. Två av provkropparna, C och E, belastades till en viss last som bestämts i förväg och hölls vid denna last för att studenterna skulle kunna anteckna aktuell last och mittnedböjning. Detta upprepades tre gånger för att sedan avlasta provkroppen helt. Provkropparna D och F belastades på samma sätt med skillnaden att efter den tredje avläsningen belastades de till brott, se Figur 3.5. Laborationen utfördes på detta vis för att ge studenterna möjlighet att se hur materialet beter sig vid brott. För att hinna med hela laborationen på fyra timmar belastades dock bara två provkroppar av varje typ till brott.



Figur 3.5: Belastningskurva under det första tillfället

Under det andra laborationstillfället fanns dock inga tidsbegränsningar vilket möjliggjorde att testerna av resterande provkroppar kunde utföras på ett sådant sätt att påverkan från sättningar i materialet reducerades. Detta gjordes enligt instruktioner från professor Robert Kliger. Påverkan från sättningar minskades genom att provkropparna först belastades med 30% av brottslasten i en minut. Sedan minskades lasten till 10% av brottslast och hölls kvar där i en minut för att till sist successivt belastas till brott, se Figur 3.6.



Figur 3.6: Belastningskurva under det andra tillfället. Det fetstreckade visar inom vilket intervall i grafen som punkterna för beräkning av elasticitetsmodulen valts.

Nedböjningen mättes i mitten på varje provkropp. För de längre provkropparna användes en LVDT (Linear variable differential transformer), se Figur 3.3. För de kortare provkropparna kunde inte samma LVDT användas av praktiska skäl. Då användes istället en mindre LVDT, se Figur 3.4. Datan från varje test sparades i loggfiler på en dator som innehöll information om kraften från varje domkraft, nedböjningen från LVDT:n, samt tid.

För att beräkna tröghetsmomentet för varje provkropp mättes bredd och höjd av tvärsnittet, i tre punkter jämnt fördelade över provkroppen, före försöken. Medelvärden för bredd och höjd antecknades, och tröghetsmoment samt böjmotståndet för varje provkropp kunde bestämmas, se Bilaga A.

Fuktkvoten i provkropparna kunde bestämmas genom att väga ett antal provkroppar direkt efter att de belastats till brott. Sedan fick de torka i en ugn med temperaturen 105 °C i ca 2,5 dygn för att då vägas igen. Endast fuktkvoten i de korta provkropparna kunde bestämmas då de långa inte fick plats i ugnen. Dock kunde fuktkvoten i en lång provkropp mätas då den i testet gick av på mitten och fick då plats i ugnen. Anmärkningsvärt är att fuktkvoten i Kerto-Q och Kerto-S skiljer sig något. Fuktkvoten i Kerto-Q var ca 9% medans den för Kerto-S var ca 8%, se Bilaga B.

Enligt normen ska tester utföras när trämaterialens fuktkvot är 12%. Eftersom fuktkvoten vid laborationstillfällena var lägre behövde resultaten korrigeras. För varje procentenhets skillnad i fuktkvot skall hållfasthetsvärdena reduceras med procentenheter enligt Tabell 3.1.

Tabell 3.1: Hållfasthetsförändring vid 1% skillnad i fuktkvot (Johansson, 2011)

Egenskap	Förändring [%]
Tryckhållfasthet, parallellt med fibrerna	5
Tryckhållfasthet, vinkelrätt mot fibrerna	5
Böjhållfasthet, parallellt med fibrerna	4
Draghållfasthet, parallellt med fibrerna	2,5
Draghållfasthet, vinkelrätt mot fibrerna	2
Elasticitetsmodul, parallellt med fibrerna	1,5

3.2 Resultat av experimentella försök

I detta avsnitt presenteras framtagna elasticitetsmoduler samt brottyper.

3.2.1 Framtagna elasticitetsmoduler

I Tabell 3.2 redovisas resultatet från försöken. De redovisade värdena är medelvärden för de provkroppar som testats enligt standard, reducerade med hänsyn till fuktkvot. Se Bilaga D för varje enskild provkropp elasticitetsmodul samt brottspänning för de provkroppar som belastats till brott. Se Bilaga G för varje provkropp deformationsskurva.

Tabell 3.2: Resultat av de experimentella försöken

		Värden från laboration				Tillverkarens värden*	
Kerto-Q	Läge	Belastnings- riktning	E-modul Medelvärde	E-modul med hänsyn till skjuvdeformation	Brottspänning Medelvärde	E-modul Medelvärde	Brottspänning Karakteristiskt
2	Höggkant	Styv	9530	9840	41,4	10500	32
3	Lågkant	Vek	2130	2560	14,4	2000	8
4	Höggkant	Vek	3570		15,0	--	--
Kerto-S							
5	Lågkant	Styv	10270	12200	38,8	13800	50
6	Höggkant	Styv	10310	10660	43,4	13800	44

* VTT Certificate No 184/03

Elasticitetsmodulen beräknas enligt ekvation 3.1.

$$E = \frac{0,85\Delta PL^3}{48I\Delta y_{mitt}} \quad (3.1)$$

där ΔP och Δy_{mitt} är skillnad i kraft, respektive mittnedböjning, mellan två punkter i provkroppens deformationskurva där förhållandet mellan dem är linjärt. Dessa två punkter är tagna i det fetstreckade intervallet i belastningskurvan, se Figur 3.6. Se bilaga G för samlade deformationskurvor. Vid vilken procentuell del av brottlasten punkterna tagits skiljer sig lite mellan provkropparna men alla punkter är tagna i intervallet 35 – 70 % av brottlasten. Se Bilaga C för härledning av ekvation 3.1. Elasticitetsmodulen har även korrigerats med hänsyn till skjuvdeformationer. Detta har gjorts genom att mittnedböjningen (Δy_{mitt} i ekvation 3.1) har reducerats med hänsyn till skjuvdeformationer enligt ekvation 3.2.

$$y_{mitt} = y_{böj} - y_{skjuv} \quad (3.2)$$

där $y_{böj}$ är den uppmätta deformationen och y_{skjuv} beräknas enligt ekvation 3.3. Härledning av ekvation 3.3 kan ses i Bilaga C.

$$y_{skjuv} = \frac{0,2\Delta PL}{GA}$$

där G är skjuvmodul enligt norm och A är tvärsnittsarean. (3.3)

Brottspänningen beräknas enligt ekvation 3.4 och momentet enligt ekvation 3.5.

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad (3.4)$$

$$M = \frac{P}{2} \cdot \frac{L}{3} \quad (3.5)$$

3.2.2 Typer av brott

I detta avsnitt beskrivs de typer av brott som uppkommit under de experimentella försöken. Av praktiska skäl har i vissa fall två provkroppstyper beskrivits i samma avsnitt. Foton på alla de provkroppar som belastats till brott kan ses i Bilaga F.

3.2.2.1 Provkroppstyp 1 och 5, beteckning enligt Figur 3.1

Typ 1 och 5 betedde sig lika vid brott. Alla brott utom ett var böjbrott och brotten var spröda utan tydlig förvarning. I provkropp 5D uppstod ett skjuvbrott, se Figur 3.7.



Figur 3.7: Skjuvbrott i provkropp 5D

3.2.2.2 Provkroppstyp 2 och 6, beteckning enligt Figur 3.1

Även typ 2 och 6 betedde sig lika vid brott. Alla brott utom ett var böjbrott och brotten var spröda utan tydlig förvarning. Brotten uppstod nära någon av punktlasterna, se Figur 3.8.

En skillnad mellan dem är att sprickorna i träet utbredd sig i transversell riktning för typ 2 och i longitudinell riktning för typ 6, se Bilaga F. Provkropp 2F vippade vid belastning. Det ser dock ut som att ett böjbrott på tvären har påbörjats, se Figur 3.9



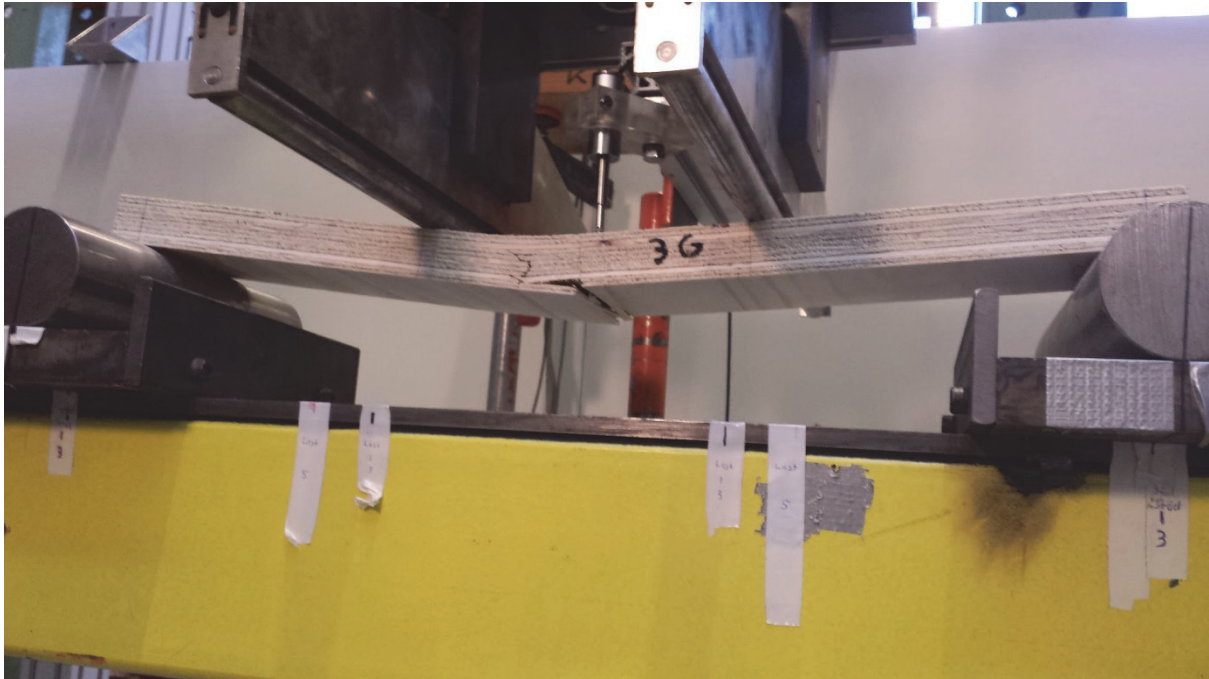
Figur 3.8: Typiska brott för typ 2 (vänster) och typ 6 (höger)



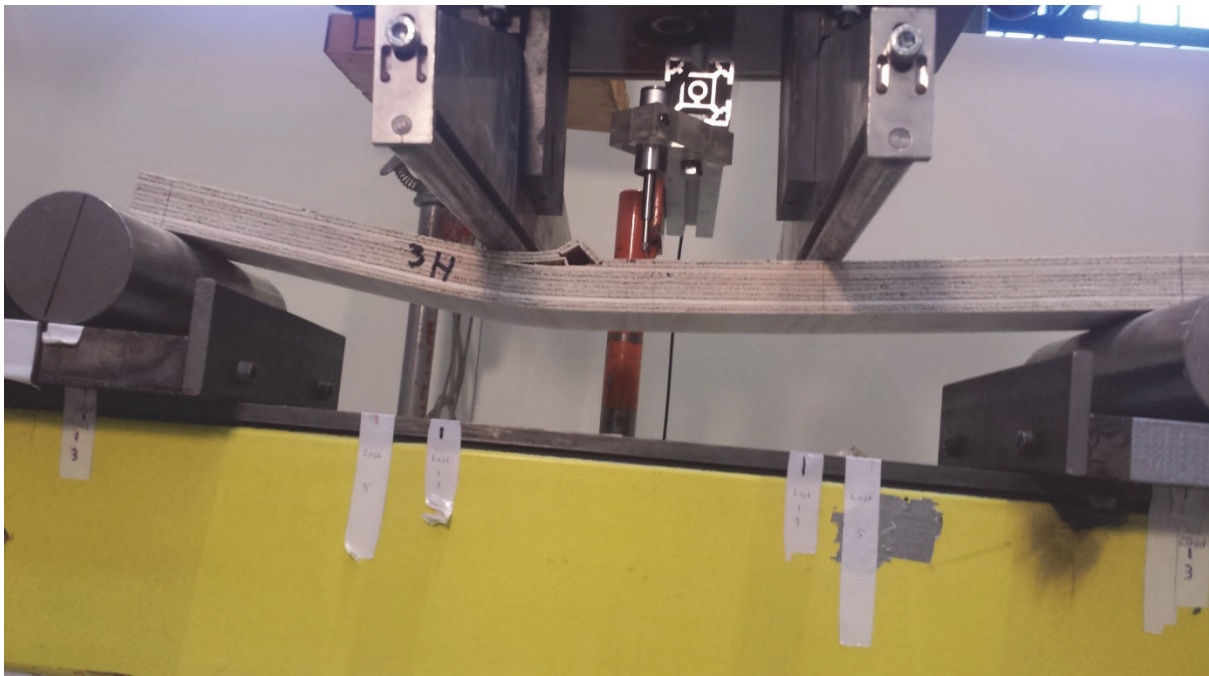
Figur 3.9: Böjbrott på tvären i provkropp 2F

3.2.2.3 Provkroppstyp 3, beteckning enligt Figur 3.1

Av de fem provkroppar av typ 3 som belastades till brott uppvisade tre stycken dragbrott vid böjning, se Figur 3.10, och två tryckbrott, se Figur 3.11. Dragbrotten vid böjning var spröda medans de vid tryck var sega.



Figur 3.10: Böjbrott i provkropp 3G



Figur 3.11: Tryckbrott i provkropp 3H

3.2.2.4 Provkroppstyp 4, beteckning enligt Figur 3.1

Av de fyra provkroppar av typ 4 som belastades till brott gick tre stycken helt av, se Figur 3.12. Provkropp 4H gick nästan helt av men satt fortfarande ihop i den övre delen av balken, se Figur 3.13. Brotten hos denna provkroppstyp var spröda.



Figur 3.12: Typiskt brott för typ 4



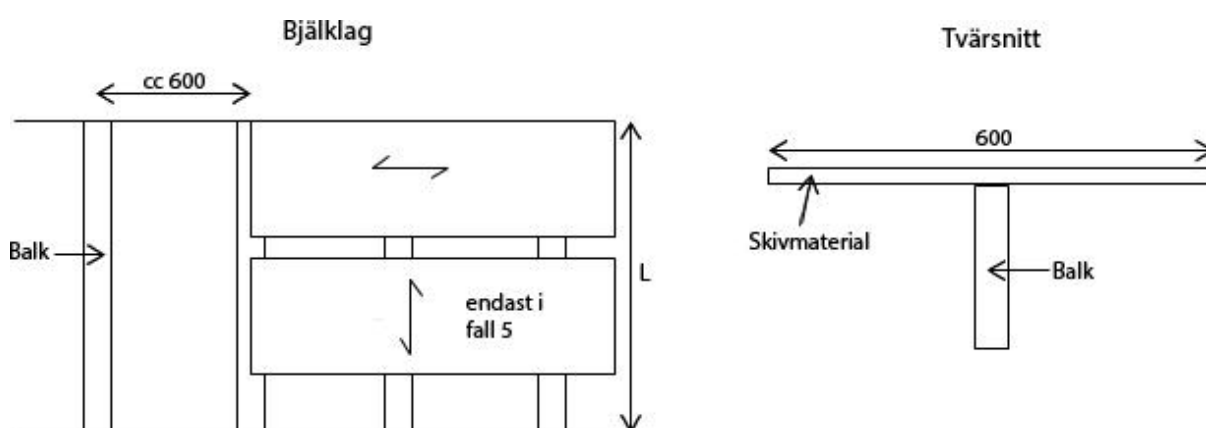
Figur 3.13: Böjbrott i provkropp 4H

4 Jämförelse mellan olika bjälklag av trä

I detta kapitel har träbjälklag uppbyggda av olika konstruktionsmaterial utvärderats enligt krav specificerade i Eurokod 5 beträffande nedböjning och svikt, se Tabell 4.1. De olika typerna av bjälklag består av tre olika typer av balkar med ett centrumavstånd på 600 mm med två olika skivmaterial ovanpå, se Figur 4.1. Kravet för nedböjning orsakad av karakteristisk lastkombination är satt till max Spännvidden/400. I beräkningarna antas att bjälklaget är ett mellanbjälklag placerat i bostad vilket innebär att klimatklass 1 antas. Balkarnas dimensioner har valts på grund av att den största standarddimensionen för sågat virke är 45x220mm och att liknande standarddimensioner finns för Kerto-S och limträ. Beräkningarna utfördes enligt Eurokod 5 och med formelsamlingen ”Byggformler och tabeller” av Johanneson och Vretblad som stöd. För att få en bättre förståelse för svikt och vibrationer i träbjälklag har Sven Ohlssons bok ”Svikt, svängningar och styvhet hos bjälklag” (1984) använts. Se Bilaga H för samtliga beräkningar.

Tabell 4.1: Utvärderade kombinationer av balk och skivmaterial

Fall	Balk	Dimension [mm]	Skiva	Tjocklek [mm]
1	Sågat virke C30	45x220	OSB/4	22
2	Limträ GL30c	42x225	OSB/4	22
3	Kerto-S	45x220	OSB/4	22
4	Kerto-S	45x220	Kerto-Q. Fiberriktning vinkelrätt mot balkens längdriktning.	27
5	Kerto-S	45x220	Kerto-Q. Fiberriktning parallell med balkens längdriktning.	27



Figur 4.1: Plan av bjälklag sett ovanifrån och dess tvärsnitt. Den övre skivan i i bjälklaget visar skivans placering och dess styva riktning i kombination 1 till 4. Den nedre skivan visar motsvarande för kombination 5.

4.1 Kontroll av bjälklag enligt Eurokod 5

I Eurokod 5, EN 1995-1-1:2004 anges ett antal krav som måste uppfyllas för bjälklag i trä. I dessa krav ingår att bjälklaget inte ska få för stor långtidsnedböjning vid den förväntade belastningen. Ett annat krav är att konstruktionen inte ska få för stor omedelbar nedböjning orsakad av en punktlast placerad där störst nedböjning erhålls. Förutom deformation ställs även krav på svikt- och vibrationsegenskaper hos konstruktionen.

Trä som belastas under lång tid kommer att få minskade hållfasthetsvärden och deformationen kommer att öka med tiden på grund av krypning (Johansson, 2011). För att ta hänsyn till krypning i träet används kryptalet k_{def} som är specificerad för varje material. I Fall 1-3 har balken och skivmaterialet olika kryptal vilket leder till en omfördelning av lasten då materialen kryper. Eftersom skivmaterialet i dessa fall kommer att krypa mer än balken fördelas över tid mer last till balken. På grund av detta är det därför nödvändigt att skilja på omedelbart och slutgiltigt tillstånd. I beräkningarna har index "inst", som står för instant, använts för att beteckna det omedelbara tillståndet och index "fin", som står för final, för att beteckna det slutgiltiga tillståndet.

För att beräkna den slutgiltiga elasticitetsmodulen och skjuvmodulen för ett material där krypning beaktas används ekvation 4.1 och 4.2.

$$E_{fin} = \frac{E}{1+k_{def}} \quad (4.1)$$

$$G_{fin} = \frac{G}{1+k_{def}} \quad (4.2)$$

4.1.1 Nedböjningskontroll

Den slutgiltiga nedböjningen i bjälklaget beräknas med ekvation 4.3.

$$\delta_{fin} = \delta_{fin,G} + \delta_{fin,Q} + \delta_{fin,s} \quad (4.3)$$

där $\delta_{fin,G}$ och $\delta_{fin,Q}$ är den slutgiltiga nedböjningen orsakad av permanent last G och variabel last Q . $\delta_{fin,s}$ är den slutgiltiga skjuvdeformationen. Dessa deformationer beräknas med elementarfall. För en fritt upplagd balk med en jämnt utbredd last kan mittnedböjningen beräknas enligt ekvation 4.4.

$$y_{mitt} = \frac{5ql^4}{384EI} \quad (4.4)$$

där q är en jämnt utbredd last [N/m] och l är spännvidden [m].

Skjuvdeformationen beräknas enligt ekvation 4.5 och den uppstår endast i livet eftersom all skjuvkraft antas tas upp av livet (Norlin, 2011).

$$\delta_s = \frac{ql^2}{8GA} \quad (4.5)$$

där G är skjuvmodulen [Pa] för materialet och A är tvärsnittsarean [m²].

I ekvation 4.4 används summan ΣEI , som definieras i ekvation 4.6, eftersom de undersökta tvärsnitten består av olika material med olika elasticitetsmoduler, och i vissa fall olika kryptal.

$$\Sigma EI_x = E_1 \times (I_1 + A_1 * z_1^2) + E_2 \times (I_2 + A_2 * z_2^2) \quad (4.6)$$

där E_i är elasticitetsmodulen [Pa] I_i är tröghetsmomentet [m^4] och z_i är avståndet [m] från neutrala lagret till tyngdpunkten hos arean för respektive material i tvärsnittet. ΣEI_x är tvärsnittets styvhet i balkens längdriktning

När de slutgiltiga nedböjningarna $\delta_{fin,G}$ och $\delta_{fin,Q}$ beräknas används ΣEI_{fin} där slutgiltiga elasticitetsmoduler och tröghetsmoment används. Den slutgiltiga skjuvdeformationen $\delta_{fin,s}$ beräknas med G_{fin} .

4.1.2 Punktlastdeformation

Ytterligare en kontroll beträffande nedböjning skall utföras. Kontrollen är modellerad för att ge nedböjningen orsakad av ett fotsteg från en människa på den del av balken som ger störst nedböjning. Detta kan teoretiskt tolkas som en punktlast på 1 kN. Nedböjningen får inte bli större än 1,5 mm (Mårtensson, 2011). För en fritt upplagd balk med en punktlast på mitten kan nedböjningen beräknas enligt ekvation 4.7.

$$a = \frac{Pl^3}{48\Sigma EI_x} \quad (4.7)$$

Enligt Mårtensson (2011) kommer denna uträkning att överskatta nedböjningen eftersom den inte tar hänsyn till styvheten vinkelrätt mot balkens längdriktning. En noggrannare kontroll kan utföras för att få en mer exakt nedböjning. En sådan kontroll utfördes för kombination 4 och 5 där punktlastnedböjningen blev dimensionerande, se bilaga H s.H30 för kombination 4 och s.H38 för kombination 5. Den noggrannare kontrollen visade dock att punktlastnedböjningen inte blev dimensionerande i någon av kombinationer.

4.1.3 Svikt och vibration

Enligt EN-1995-1-1:2004 ska det säkerställas att det i en konstruktion inte uppkommer vibrationer som kan försämra dess funktion eller orsaka obehag hos människor som går på golvet. Detta kontrolleras genom att beräkna impulshastighetsresponsen v , det vill säga den största initialhastigheten som uppstår vid vertikal vibration, orsakad av en idealisk enhetsimpuls. Kravet definieras av ekvation 4.8.

$$v \leq b f_1 \zeta^{-1} \quad (4.8)$$

där b är vald faktor och ζ är den relativa dämpningen. Enligt kap 7.3.1 i EN-1995-1-1:2004 kan ζ sättas till 0,01. f_1 är den lägsta egenfrekvensen [Hz] och beräknas enligt ekvation 4.9. Impulshastighetsresponsen v beräknas enligt ekvation 4.10.

$$f_1 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{EI_l}{m}} \quad (4.9)$$

där l är golvet's spännvidd [m], EI_l är böjstyvheten i balkens längdriktning [Nm^2/m] och m är golvet's massa [kg/m^2].

$$v = \frac{4(0,4+0,6n_{40})}{mb_{golv}l+200} \quad (4.10)$$

där b_{golv} hela golvetns bredd [m] och n_{40} är antalet egenmoder med en frekvens lägre än 40Hz och beräknas enligt ekvation 4.11.

$$n_{40} = \left\{ \left[\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right] \left(\frac{b_{golv}}{l} \right)^4 \frac{EI_l}{EI_b} \right\}^{0,25} \quad (4.11)$$

där EI_b är böjstyvheten vinkelrätt mot balkens längdriktning [Nm^2/m].

4.2 Resultat av jämförelsen mellan olika bjälklag

I detta avsnitt presenteras resultaten från beräkningarna av bjälklagen, se Tabell 4.2.

Tabell 4.2: Resultat av jämförelsen. Siffrorna i rutorna avser den längsta tillåtna spännvidd [m] för att klara respektive kontroll. Står det "ok" klarar bjälklagskombinationen spännvidden från tidigare kontroll.

Komb.:	Balk	Skiva	Resultande spännvidd av respektive kontroll. [m]				
			L/400	Punktlast-kontroll	Svikt- och vibrationskontroll	Böj-spänningar	Skjuv-spänningar
1	Sågat virke C30	OSB/4	3,9	ok	ok	ok	ok
2	Limträ GL30c	OSB/4	4,0	ok	ok	ok	ok
3	Kerto-S	OSB/4	4,0	ok	ok	ok	ok
4	Kerto-S	Kerto-Q 90	4,1	ok	ok	ok	ok
5	Kerto-S	Kerto-Q 0	5,0	ok	ok	ok	ok

5 Diskussion och slutsats

I detta kapitel diskuteras resultaten av de experimentella försöken och bjälklagsberäkningarna samt trovärdigheten i dessa. Vidare diskuteras produktionen, konsumtionen och nuvarande tillämpningar för LVL.

5.1 Produktion, konsumtion och tillämpningar av LVL

Nordamerika är en stor marknad för LVL. Det kan bero på att det i Nordamerika under 90-talets början infördes restriktioner för avverkning av träd på statlig mark. Detta ledde till en brist på träd av tillräckligt hög kvalitet för att tillverka konstruktionsvirke av sågat virke. Efterfrågan av förädlade träprodukter ökade då och en av dessa produkter var LVL. Med detta i åtanke kan det tänkas att LVL kan vara ett substitut till sågat virke i delar av världen med låg tillgång på stora träd av hög kvalitet. Detta för att det kan tillverkas av mindre och yngre träd än vad som behövs för att tillverka motsvarande dimensioner av sågat virke.

I Sverige är det dock ingen brist på träd av hög kvalitet så det är förmodligen mer av en kostnadsfråga ifall det är värt att använda LVL istället för limträ eller vanligt virke. Övriga länder var det svårt att dra slutsatser om då det har varit svårt att hitta information gällande produktion och konsumtion av LVL. Detta skulle kunna tyda på att LVL används i liten utsträckning utanför Nordamerika.

Det har varit svårt att få tag i aktuell data för produktionen och konsumtionen av LVL. Detta på grund av att de flesta marknadsundersökningar av förädlade träprodukter, som LVL, utförts av företag som inte var villiga att delge resultat till studenter.

5.2 Framtagna elasticitetsmoduler

De framtagna elasticitetsmodulerna för provkroppstyp 1, 2, 5 och 6 är något lägre än de elasticitetsmoduler givna av tillverkaren. För provkroppstyp 3 där Kerto-Q belastades i sin vecka riktning på lågkant, blev elasticitetsmodulen något högre än tillverkarens värde. Provkroppstyp 4 där Kerto-Q belastas i sin vecka riktning på högkant fanns inte några angivna värden för elasticitetsmodul och brottspänning. Denna provkroppstyp visade sig ha högre elasticitetsmodul och brottspänning än provkroppstyp 3. Då de framtagna elasticitetsmodulerna för typ 1, 2, 5 och 6 är lägre än tillverkarens motsvarande värden kan det tyda på att elasticitetsmodulen för provkroppstyp 4 bör vara ännu högre än den framtagna elasticitetsmodulen i detta examensarbete.

Skjuvdeformationer hade störst påverkan hos provkroppstyperna 1 och 3. Dessa provkroppstyper är när Kerto-Q belastas på lågkant. De är även de kortaste provkroppstyperna. Efter att elasticitetsmodulen korrigerats med hänsyn till skjuvdeformation var de framtagna värdena för alla provkroppstyper fortfarande lägre än de som givits av tillverkaren.

De elasticitetsmoduler som tagits fram i detta examensarbete kan vara missvisande då för lågt antal provkroppar har testats för varje provkroppstyp. De experimentella försöken utfördes på åtta exemplar av varje provkroppstyp men endast tre eller fyra av dessa belastades på ett sätt som minskar påverkan av sättningar. De provkroppar som inte belastats på detta sätt har uteslutits från medelvärdet för respektive elasticitetsmoduler. Detta betyder att de framtagna elasticitetsmodulerna kommer från endast tre eller fyra exemplar av varje provkroppstyp. Elasticitetsmodulerna kan ha påverkats ytterligare av att mätutrustningen som använts inte är anpassad för att mäta så låga laster som använts under laborationerna. Enligt olika standarder ska lasterna överstiga 10% av lastcellens maxkapacitet. Klimatet som laborationerna utfördes i kan ha fluktuerat under testernas gång vilket även det kan ha påverkat de slutgiltiga elasticitetsmodulerna, men det är av lägre betydelse.

Beträffande de brott som uppkommit under laborationerna var de flesta böjbrott. Böjbroten skiljde sig något mellan de olika typerna. Intressant är att provkroppstyp 4 i de flesta fall gått av helt. Dock har för få provkroppar testats för att kunna dra några definitiva slutsatser.

5.3 Beräkningar av bjälklag

Beräkningarna i detta examensarbete tyder på att Kerto-S ger något längre spännvidd än motsvarande dimension av sågat virke och samma spännvidd som limträ. De tyder även på att Kerto-Q, använt som golvskena, presterar bättre än OSB. I kombination 4 är elasticitetsmodulen i längdriktningen lägre hos Kerto-Q jämfört med OSB men då OSB har ett högre krytpal resulterar det i att elasticitetsmodulen för Kerto-Q vid långtidsnedböjning blir högre. Detta leder till att kombinationen Kerto-S och Kerto-Q i kombination 4 resulterar i en något längre spännvidd än någon beräknad kombination med OSB. Ännu längre spännvidd uppnås då Kerto-Q orienteras med sin huvudsakliga fiberriktning i balkens längdriktning som i kombination 5. Denna kombination resulterar i den längsta spännvidden och ger ungefär en meter längre spännvidd än de andra beräknade kombinationerna. Slutsatsen är därför att både Kerto-S och Kerto-Q resulterar i längre spännvidder och att en kombination av de båda resulterar i längst spännvidd.

Referenser

Aghayere, A and Vigil, J. (2007) *Structural Wood Design: A Practice-Oriented Approach*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Albawaba (2014) Germany : Polyurethane coating makes wooden panels robust and weather-resistant *MENA Report*, 2 April.

<http://proxy.lib.chalmers.se/login?url=http://search.proquest.com/docview/1512134942?accountid=10100>

Allen, E. och Iano, J. (2004) *Fundamentals of building construction - Materials and methods*. 4e upplagan. Hoboken: John Wiley & Sons.

Avila, M (2008) *A technical analysis - The Performance of Composite Wood Joists Under Realistic Fire Conditions*.

ASSYX GmbH & Co. (2006) New base plate with laminated wood core and polyurethane casing for the concrete block industry. *CPI-Worldwide*, Nr. 1, ss. 110-112.

Crews, K (2001) Development and application of stress laminated timber bridge decks in Australia. *NZ Timber design journal*, vol. 10, nr. 2, ss. 14-23.

<http://www.timberdesign.org.nz/files/development%20and%20application%20of%20stress%20lam.pdf> (2015-04-28)

Eckelman, C (1993) Potential uses of laminated veneer lumber in furniture. *Forest products journal*, 43,4.

EN 1995-1-1 (2004). Eurocode 5: Design of timber structures. CEN Brussels.

EN408:2003 (2003). Timber structures – structural timber and glued laminated timber – determination of some physical and mechanical properties. CEN Brussels.

Häggqvist, H (2008). *Testing of Kerto-Q LVL plates for bridge deck applications*. Göteborg: Chalmers tekniska högskola.

Johannesson, P. Vretblad, B. (2011) *Byggformler och tabeller*. Elfte upplagan. Stockholm: Liber AB

Johansson, M. (2011) Structural properties of sawn timber and engineered wood products. I *Design of timber structures*, red. Per Bergkvist , ss. 2.1-2.39. Stockholm: Swedish Wood

Kliger, R. (2011) Introduction to design and design process i *Design of timber structures*, red. Per Bergkvist , ss. 1.1-1.16. Stockholm: Swedish Wood

Lam. F. Prion, H. (2003) Engineered Wood Products for Structural Purposes. *Timber engineering*, red. Sven Thelandesson och Hans J. Larsen, ss. 81-102. Chippenham, England: Antony Rowe Ltd

Masonite Beams (2014) Masonite Beams - Det lätta valet. *Masonite Beams*.

http://www.masonitebeams.se/media/272260/masonite-beams-b219_lq.pdf (2015-04-28)

- Metsä Wood (2012) *Kerto® for loadbearing structures*.
<http://www.metsawood.com/global/Tools/MaterialArchive/MaterialArchive/MW-Kerto-ENG-2012.pdf> (2015-02-15).
- Metsä Wood (2013) Finnframe Floor System. *Metsä Wood*.
<http://www.mwebrochure.eu/uk/metsawood/Finnframe/> (2015-04-28)
- Metsä Wood (UÅa) Kerto-Q LVL panels used in door manufacturing. *Metsä Wood*.
<http://www.metsawood.com/global/Credentials/Pages/Rocal.aspx> (2015-04-28)
- Metsä Wood (UÅc). *I-beam joists delivering strength and stability for your engineered wood flooring*. [Fotografi] Metsä Wood
- Metsä Wood (UÅb) Kerto Ripa LVL roofing solution. *Metsä Wood*.
<http://www.metsawood.com/global/Products/kerto/Pages/Kerto-Ripa.aspx> (2015-04-28)
- Metsä Wood (UÅc). Metropol Parasol – One of the largest wooden buildings. *Metsä Wood*.
<http://www.metsawood.com/global/Credentials/Pages/metropol-parasol-urban-centre.aspx> (2015-05-26)
- Mettem, C J (2011) *Timber Bridges*. Abingdon: Spon Press
- Moelven Töreboda AB. (UÅa) Bygg enkelt i trä - Levande material för inspirerande miljöer
http://www.moelven.com/Documents/Toreboda/Broschyren/Limtra_och_kerto-Bygg-enkelt-i-tra.pdf (2015-04-28)
- Moelven Töreboda AB (UÅb) *TRÄ8 Pelarbalksystem - Ett revolutionerande byggsystem helt i trä*
<http://www.moelven.com/Documents/Toreboda/Broschyren/TR%C3%848.pdf> (2015-04-28)
- Mårtensson, A. (2011) Design for serviceability i *Design of timber structures*, red. Per Bergkvist , ss. 7.1-7.24. Stockholm: Swedish Wood
- Norlin, B. (2011) Composite timber elements i *Design of timber structures*, red. Per Bergkvist , ss. 5.1-5.48. Stockholm: Swedish Wood
- Ohlsson, S (1984) *Svikt, svängningar och styvhet hos bjälklag – Dimensioneringsmetoder*. Stockholm: Statens råd för byggnadsforskning
- Pollmeier. (2014) Ingenious Hardwood: Baubuche information, *Pollmeier*
- Pousette, A (2008) *Träbroar - Konstruktion och dimensionering*. SP RAPP 2008:50
- Rocal (UÅ) Specification and information for Endurance composite doors, *Rocal*
<http://www.rocal.co.uk/download/Spec-Composite.pdf> (2015-03-30)
- Russelberg, K (2006) Wood vs. Engineered Lumber. *Professional Builder* ,71.1, 220.

Rubendene (2012). *Espacio Parasol Sevilla*. [fotografi] Licensed under CC BY-SA 3.0 via Wikimedia Commons -
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Espacio_Parasol_Sevilla.jpg#/media/File:Espacio_Parasol_Sevilla.jpg

Schuler A. (2000) *Engineered Wood Products- Production, Trade, Consumption and outlook*. Kapitel 11 i *Forest Product Annual Market Review, 1999-2000*

Svenskt trä (2007) Bågbro över E18, Hägernäs, *Träguiden*.
<http://traguiden.se/konstruktion/konstruktionsexempel/trabroar/bagbroar/bagbro-over-e18-hagernas---gang--och-cykelbro/> (2015-04-28)

Svenskt trä (2014) Trä som material-Styrka. *Svenskt Trä*
http://www.svenskttra.se/om_tra_1/tra-som-material/styrka (2015-03-19)

Svenskt trä (UÅa) Balkar och ytbärande kassetter, *Träguiden*
<http://www.traguiden.se/TGtemplates/popup1spalt.aspx?id=1401> (2015-03-20)

Svenskt trä (UÅb) Träets egenskaper-Densitet träslag. *Träguiden*. <http://www.traguiden.se>. (2015-03-20)

UNECE. (2014) *Forest Products Annual Market Review 2013-2014* Geneva: United Nations
<http://www.unece.org/fileadmin/DAM/timber/publications/FPAMR-2014-final.pdf> (2015-04-28)

Bilaga A: Dimensioner för testade provkroppar

Spännvidd [m]	A		B		C		D		E		F		G		H		I	
	b [mm]	h [mm]	b [mm]	h [mm]	b [mm]	h [mm]	b [mm]	h [mm]	b [mm]	h [mm]	b [mm]	h [mm]	b [mm]	h [mm]	b [mm]	h [mm]	b [mm]	h [mm]
0,594	100,65	31,85	101,43	32,6	102,12	32,77	101,6	32,03	101,17	32,33	101,92	32	100,6	32,04	100,6	32,05	101,05	32,75
1,8	32,48	101,24	32,6	100,83	32,32	101,42	32,32	100,82	32,23	100,43	32,07	101,06	32,17	101,31	32,41	101,16	32,38	101,91
0,594	-	-	99,73	31,48	100,32	31,57	101,55	31,46	100,85	31,38	100,27	31,21	100,36	31,38	100,51	31,48	101,18	31,68
1,8	31,61	100,98	31,97	101,28	32,37	103,2	32,24	100,92	31,9	101,4	31,97	101,1	31,66	102,03	31,95	99,91	32	100,15
0,81	100,45	44,52	100,7	44,63	100,43	44,7	100,34	44,54	100,64	44,13	100,63	44,12	100,6	43,53	100,53	43,7	100,53	43,7
1,8	43,95	100,31	43,43	100,36	43,74	100,16	43,51	100,48	42,63	100,41	44,17	100,41	44,64	100,48	44,07	100,72	44,07	100,72

Tröghetsmoment I [m ⁴]	A		B		C		D		E		F		G		H		I	
	b [mm]	h [mm]	b [mm]	h [mm]	b [mm]	h [mm]	b [mm]	h [mm]	b [mm]	h [mm]	b [mm]	h [mm]	b [mm]	h [mm]	b [mm]	h [mm]	b [mm]	h [mm]
1	2,71E-07		2,93E-07		2,99E-07		2,78E-07		2,88E-07		2,78E-07		2,76E-07		2,76E-07		2,96E-07	
2	2,81E-06		2,76E-06		2,81E-06		2,76E-06		2,72E-06		2,76E-06		2,79E-06		2,80E-06		2,86E-06	
3			2,59E-07		2,63E-07		2,63E-07		2,60E-07		2,54E-07		2,58E-07		2,61E-07		2,68E-07	
4	2,71E-06		2,77E-06		2,96E-06		2,76E-06		2,77E-06		2,75E-06		2,80E-06		2,68E-06		2,68E-06	
5	7,39E-07		7,46E-07		7,47E-07		7,39E-07		7,21E-07		7,20E-07		6,91E-07		6,99E-07		6,68E-06	
6	3,70E-06		3,66E-06		3,66E-06		3,68E-06		3,60E-06		3,73E-06		3,77E-06		3,76E-06		3,76E-06	

Böjmoment M [m ³]	A		B		C		D		E		F		G		H		I	
	b [mm]	h [mm]	b [mm]	h [mm]	b [mm]	h [mm]	b [mm]	h [mm]	b [mm]	h [mm]	b [mm]	h [mm]	b [mm]	h [mm]	b [mm]	h [mm]	b [mm]	h [mm]
1	1,70E-05		1,80E-05		1,83E-05		1,74E-05		1,76E-05		1,74E-05		1,72E-05		1,72E-05		1,81E-05	
2	5,58E-05		5,52E-05		5,54E-05		5,48E-05		5,42E-05		5,46E-05		5,50E-05		5,53E-05		5,60E-05	
3			1,65E-05		1,67E-05		1,68E-05		1,66E-05		1,63E-05		1,65E-05		1,66E-05		1,69E-05	
4	5,37E-05		5,47E-05		5,75E-05		5,47E-05		5,47E-05		5,45E-05		5,49E-05		5,32E-05		5,35E-05	
5	3,32E-05		3,34E-05		3,34E-05		3,32E-05		3,27E-05		3,26E-05		3,18E-05		3,20E-05		3,26E-05	
6	7,37E-05		7,29E-05		7,31E-05		7,32E-05		7,16E-05		7,42E-05		7,51E-05		7,45E-05		7,35E-05	

Bilaga B - Fuktkvot

$$u = \frac{m_u - m_{dry}}{m_{dry}}$$

u – Fuktkvot

m_u – Vikten av fuktigt trä

m_{dry} – Vikten av torkat trä

Ref: Johansson, M. (2011) Structural properties of sawn timber and engineered wood products. I *Design of timber structures*, red. Per Bergkvist, ss. 2.1-2.39. Malmö: ProService Reklambyrå i Malmö AB

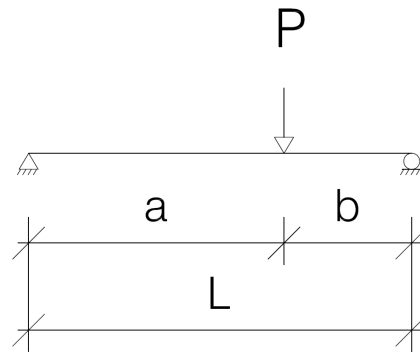
Placerades i en ugn med en temperatur på ca 105°C, fredag 30/1 ca kl 13.30				
Togs ut ur ugn och vägdes Måndag 2/2 ca kl 08.30				
Provkropp	m_u – Vikt före torkning [g]	m_{dry} – Vikt efter torkning [g]	Δ Vikt [g]	u – Fuktkvot [%]
1D	1073.33	981.07	92.26	9.4%
3D	1097.26	1007.76	89.5	8.9%
5D	1912.21	1770.59	141.62	8.0%
1F	1082.26	988.69	93.57	9.5%
3F	1082.49	994.8	87.69	8.8%
4F	1182.16	1085.72	96.44	8.9%
5F	1945.96	1803.54	142.42	7.9%



Bilaga 3- Härledning av elementarfall

Enligt Byggformler och tabeller*
Kap 4.2.2, elementarfall:2

$$y_{mitt} = \frac{Pb(3L^2 - 4b^2)}{48EI}$$

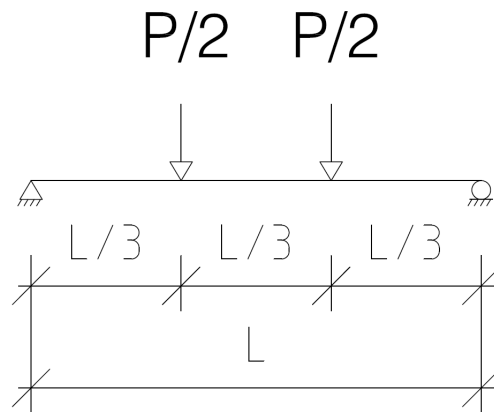


$a > b$

Två punktlaster enligt figur ger:

$$y_{mitt} = 2 \cdot \frac{\frac{P}{2} \cdot \frac{L}{3} (3L^2 - 4(\frac{L}{3})^2)}{48EI}$$

$$\Rightarrow$$



$$y_{mitt} = \frac{0,85PL^3}{48EI}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$E = \frac{0,85PL^3}{48I \cdot y_{mitt}}$$

Skjuvdeformation för två punktlaster enligt figur:

$$y_{skjuv} = \frac{1,2}{GA} \int_0^{L/3} V dx = \frac{1,2PL}{6GA} = \frac{0,2PL}{GA}$$

*Ref: Johannesson, P. Vretblad, B. (2011) *Byggformler och tabeller*. Elfte upplagan. Stockholm: Liber AB

Bilaga D: Framtagna elasticitetsmoduler och brottspänningar

E-modul [MPa]											Testade med reducerad påverkan av sättningar		Testade med reducerad påverkan av sättningar och med hänsyn till skjuvdeformationer		Tillverkarens värden	
A	B	C	D	E	F	G	H	I	Medel	Med kompensaton för fuktkvot	Medel	Med kompensaton för fuktkvot				
1	8472	7274	7533	8600	7233	7575	8472	8138	7992	7839	10123	9681	10500			
2	9799		9207	9562	8014	8539	10216	9803	9379	9970	10491	10033	10500			
3		1193		1996	2021	2355	2136	2281	2035	2227	3045	2912	2000			
4			2345	2120	1850	2941	4140	3558	2924	3737						
5	9991		10333	10969	9549	11273	11242	11353	10617	10939	11522	10821	13800			
6	10850		10511	11869	8434	9746	11052	11017	10497	10973	11595	10891	13800			
Brottspänning [MPa]											Testade till brott. Reducerad påverkan av sättningar					
											Testad till brott		Testad till brott		Testade till brott. Reducerad påverkan av sättningar	
A	B	C	D	E	F	G	H	I	Medel	Med reducerade sättningar	Med kompensaton för fuktkvot	Tillverkarens värden				
1	52.3	42.4	50.7	50.8	47.6	51.0	47.2	53.9	49.3	49.4	43.6	36				
2	57.3		50.8	15.9	56.1	47.5	46.9	46.4	50.8	46.9	41.4	32				
3			15.9		17.1	16.1	14.5	15.3	15.8	15.3	14.4	8				
4					15.5	16.8	16.4	14.6	15.8	15.9	15.0					
5		37.6	42.3	58.1	68.1	46.3	55.1		49.9	46.3	38.8	50				
6	51.7		58.1		51.2	49.8	43.5		50.9	48.3	43.4	44				

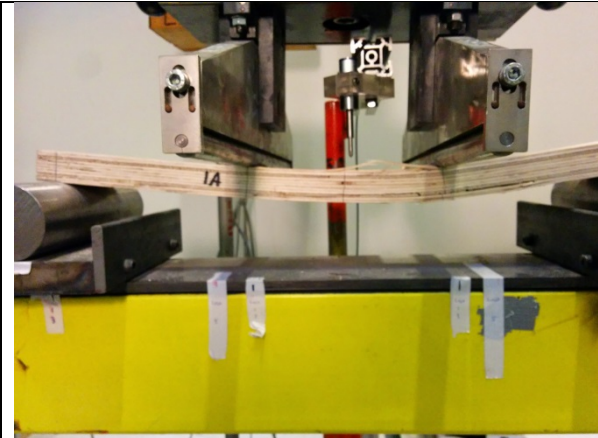
Bilaga E - Typer av brott

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Böj	Böj		Böj		Böj		Böj	Böj
2	Böj			Böj		Vippling		Böj	Böj
3				Böj		Böj	Böj	Tryck?	Tryck?
4						Böj, helt av	Böj, helt av	Böj	Böj, helt av
5		Böj		Skjuv		Böj	Böj	Böj	
6	Böj			Böj		Böj	Böj	Böj	

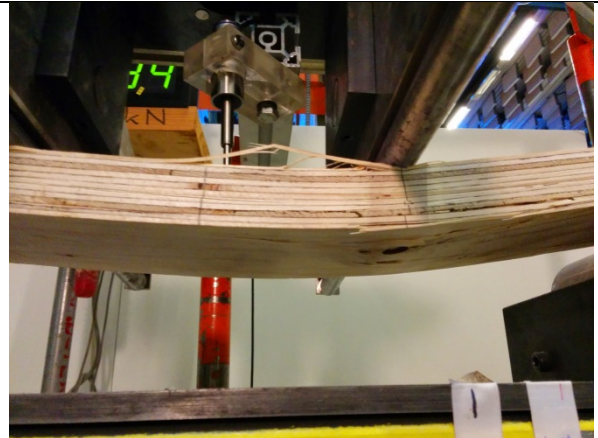
Andel av varje brott

	Böj	Skjuv	Vippling	Tryck	Totalt	Böj	Skjuv	Vippling	Tryck
1	6	0	0	0	6	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%
2	4	0	1	0	5	80.00%	0.00%	20.00%	0.00%
3	3	0	0	2	5	60.00%	0.00%	0.00%	40.00%
4	4	0	0	0	4	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%
5	4	1	0	0	5	80.00%	20.00%	0.00%	0.00%
6	5	0	0	0	5	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Sammanlagt					= Har ej testats till brott			
	Böj	86.67%							
	Skjuv	3.33%							
	Vippling	3.33%							
	Tryck	6.67%							

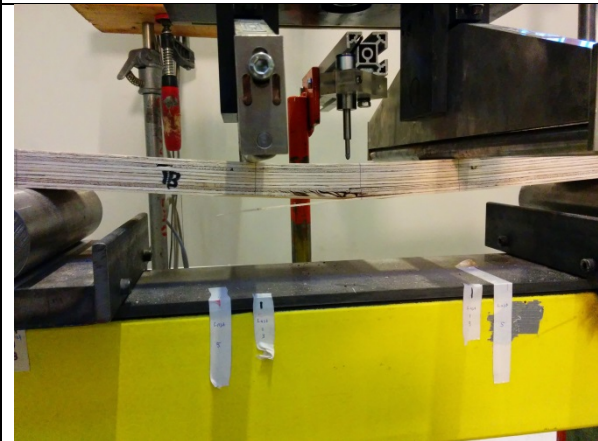
Bilaga F: Bilder på brott



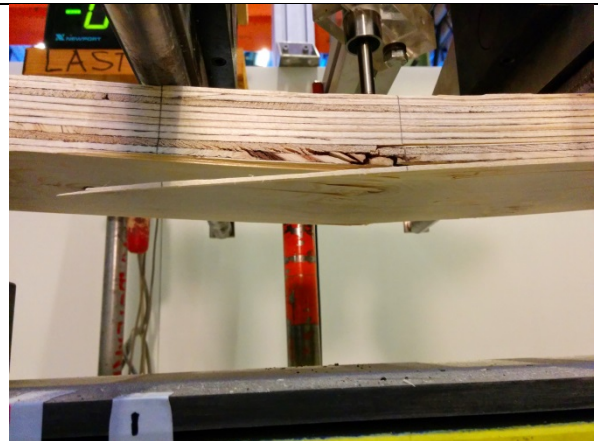
1A



1A



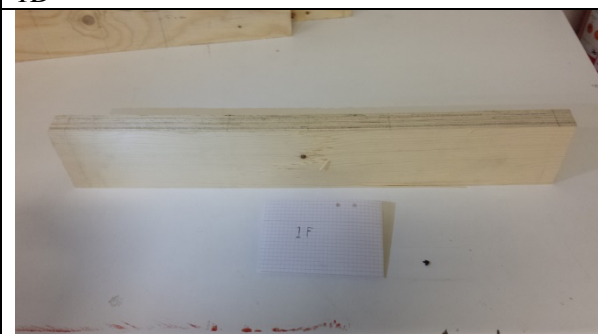
1B



1B



1D

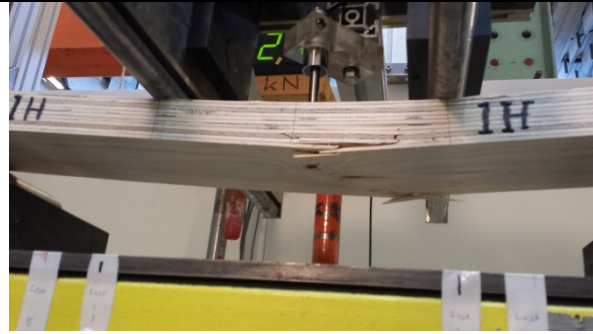


1F

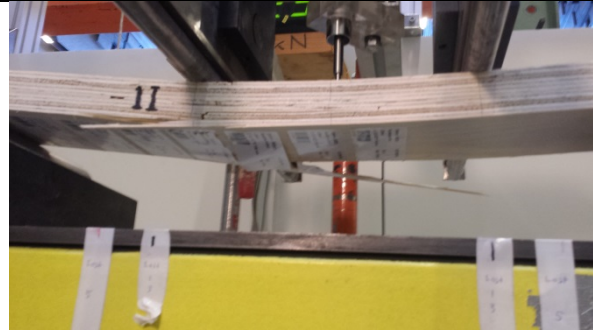


1F

1G



1H



1I

1G



1H



1I



2A



2A



2D



2D



2F



2F



2F



2F



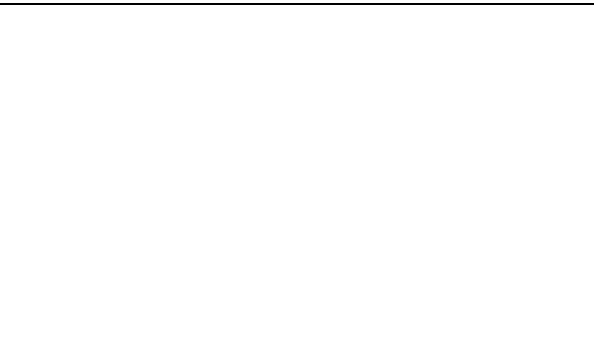
2H



2H



2H



2I



2I



2I





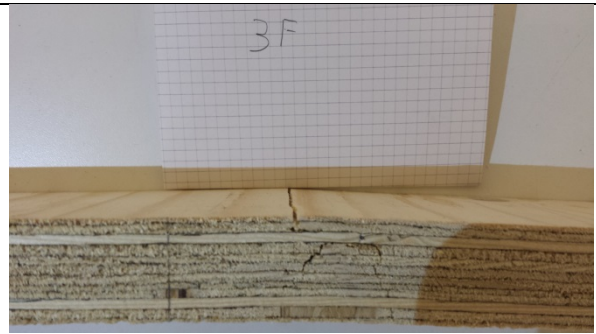
3D



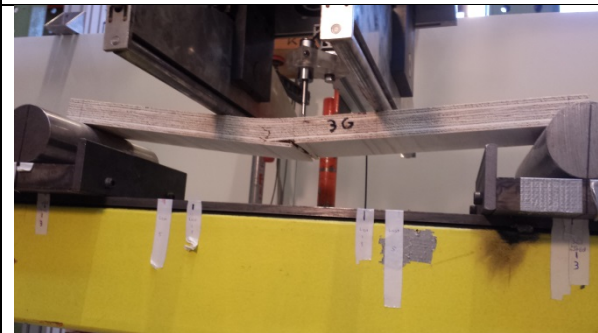
3D



3F



3F



3G



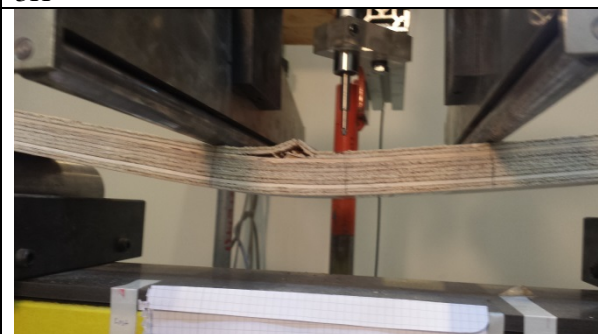
3G



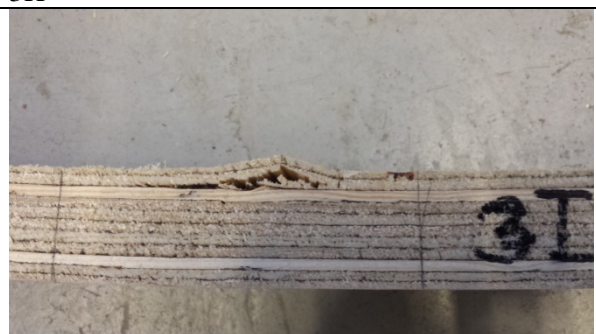
3H



3H



3I



3I



4F



4F



4G



4G



4G



4H



4H



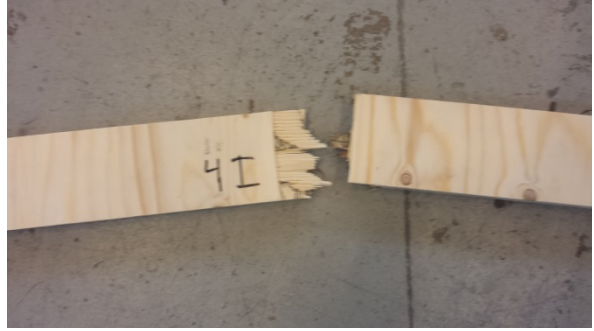
4H



4H



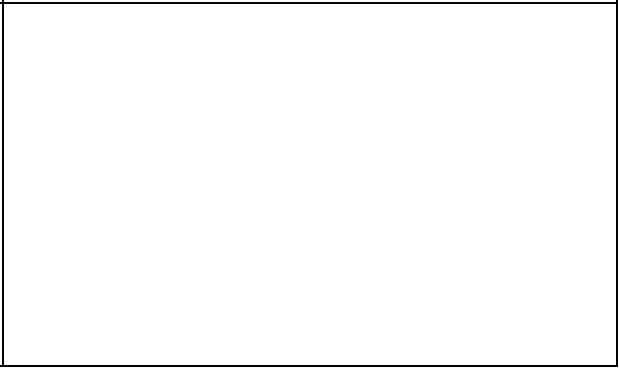
4I



4I

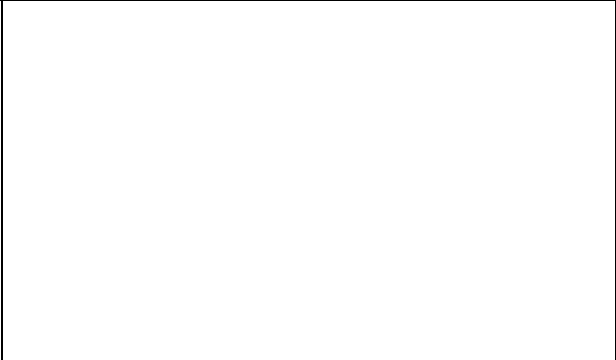


4I

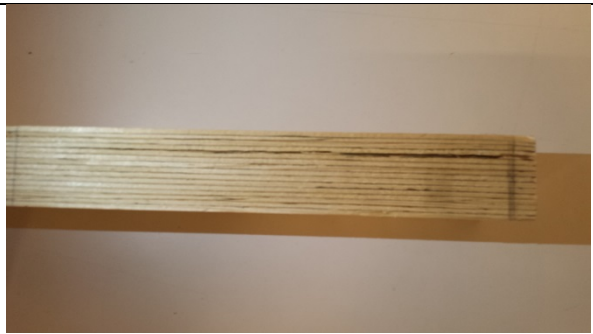




5B



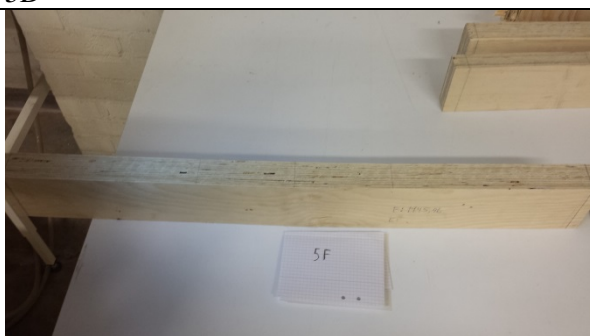
5D



5D



5D



5F



5F



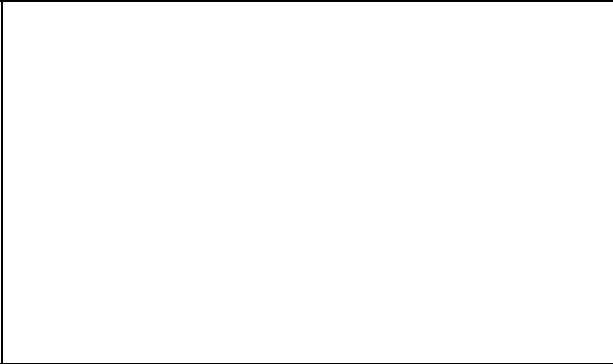
5G



5G



5H





6A



6A



6A



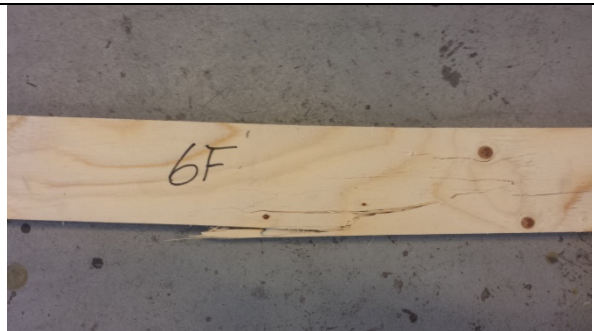
6D



6D



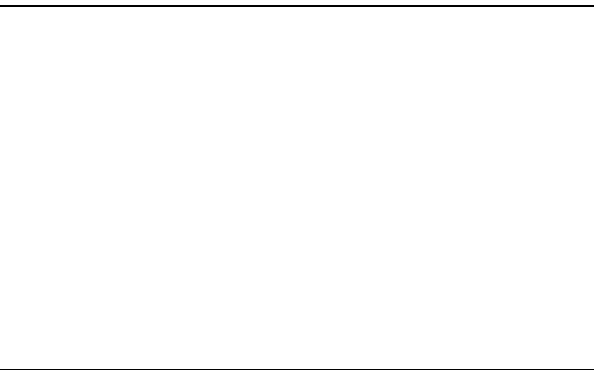
6F



6F



6F





6G



6G



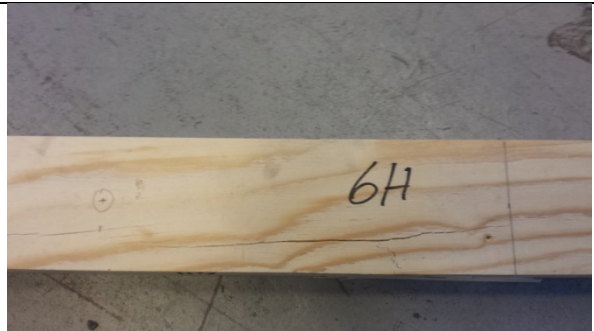
6G



6G

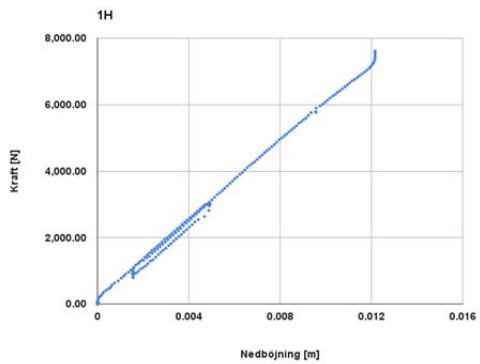
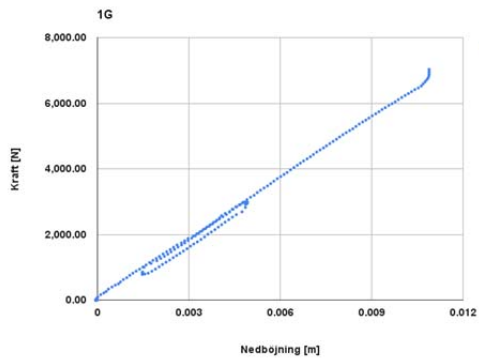
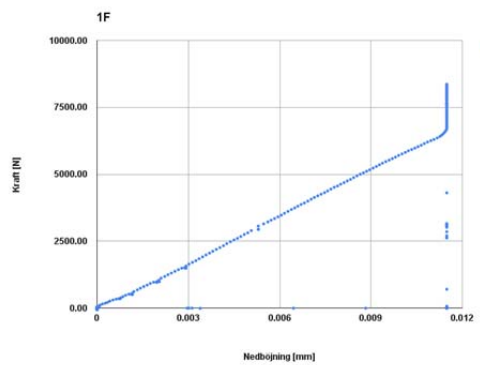
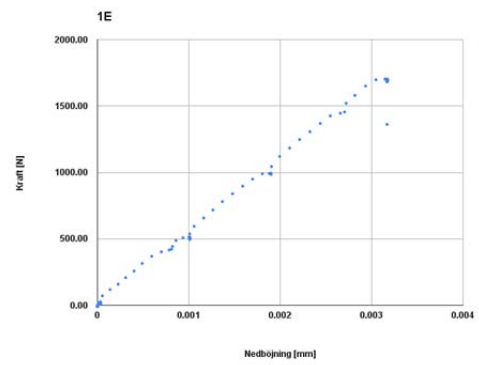
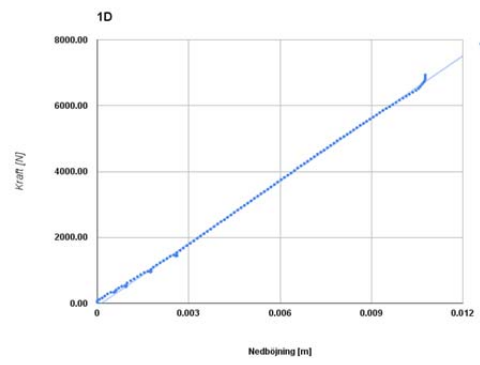
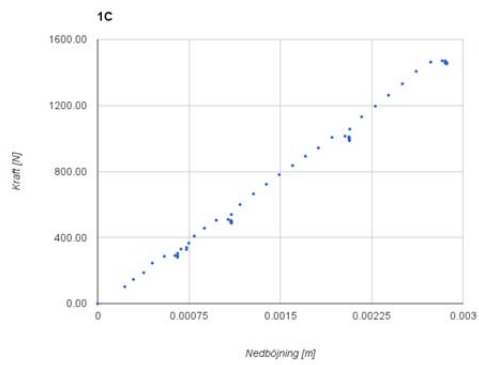
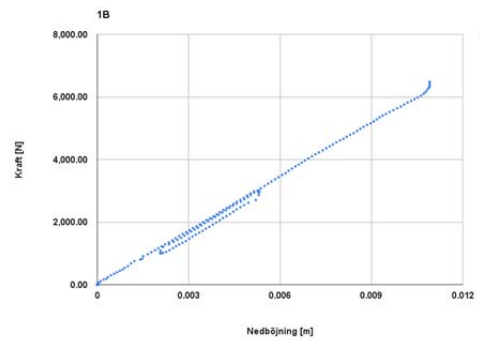
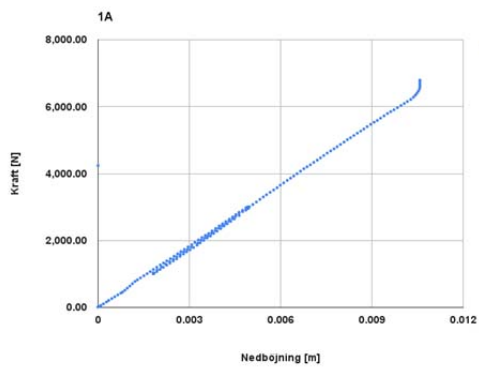


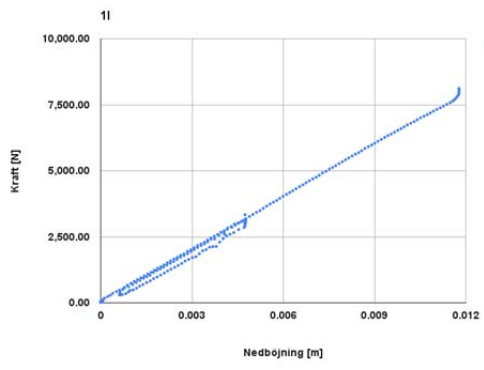
6H

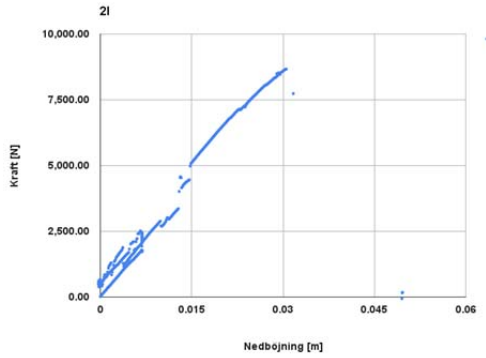
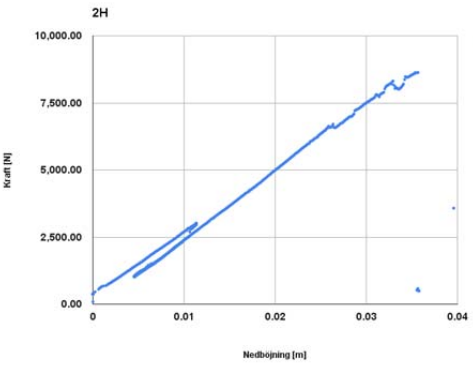
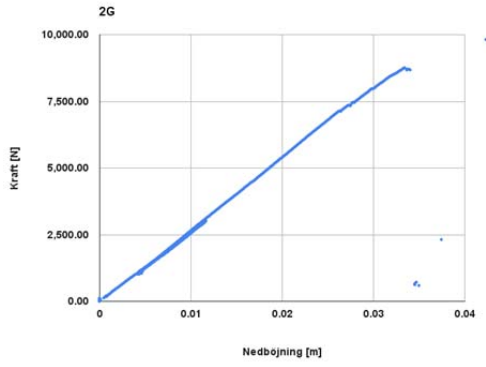
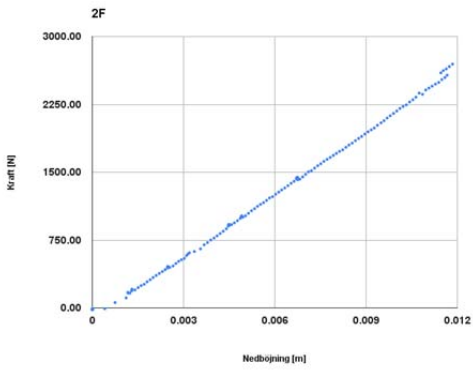
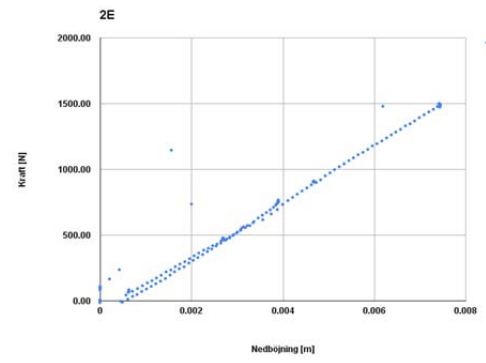
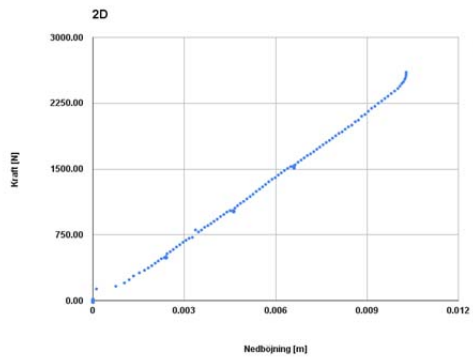
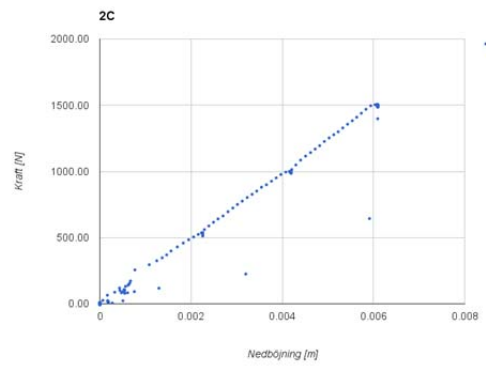
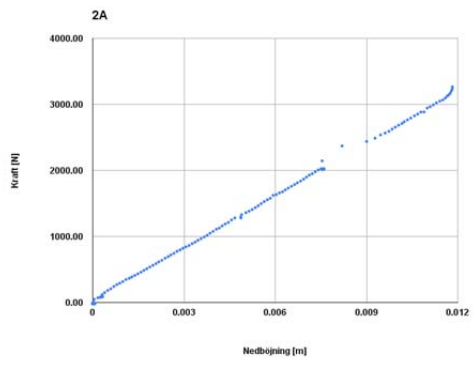


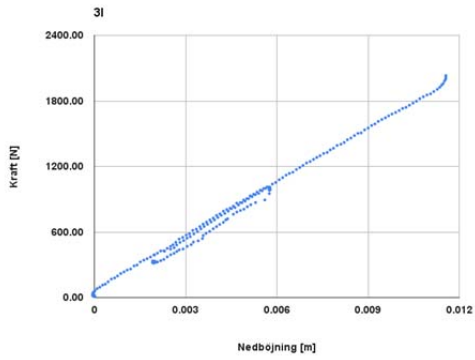
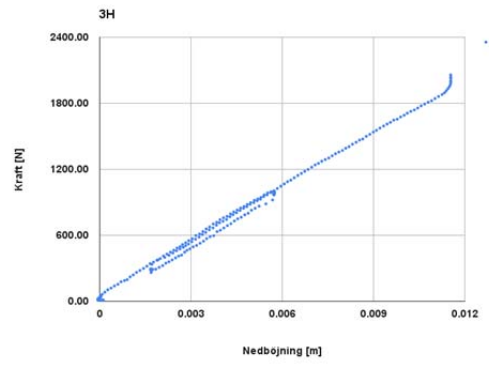
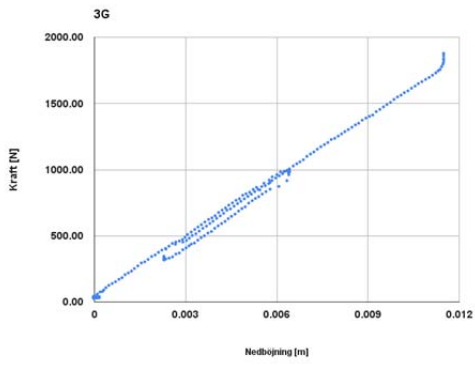
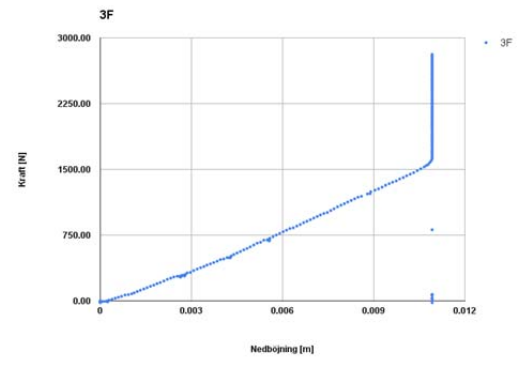
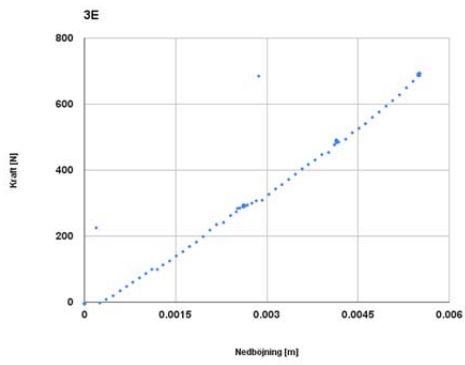
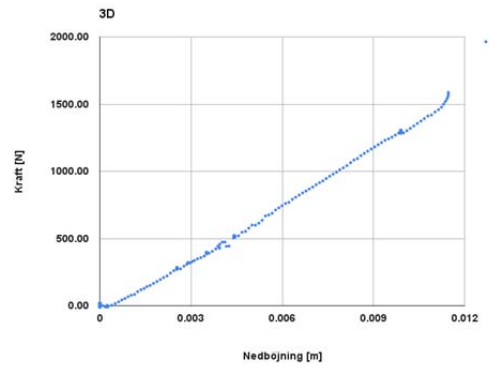
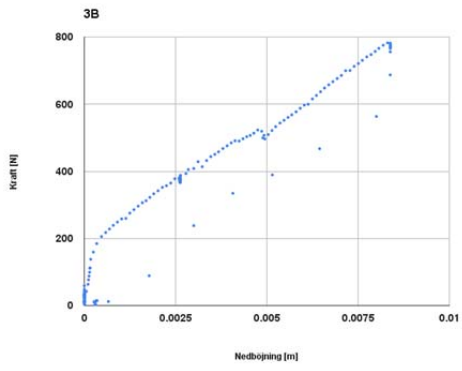
6H

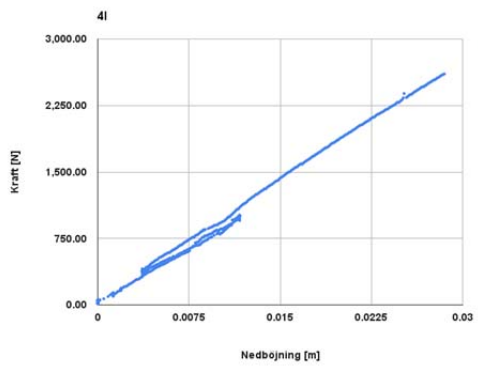
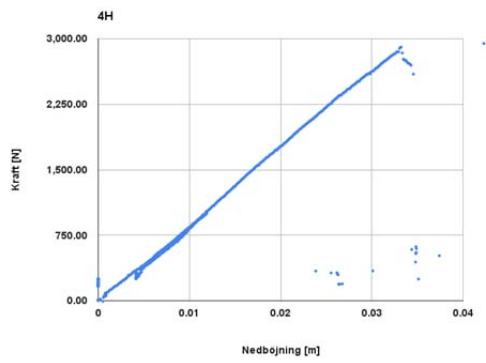
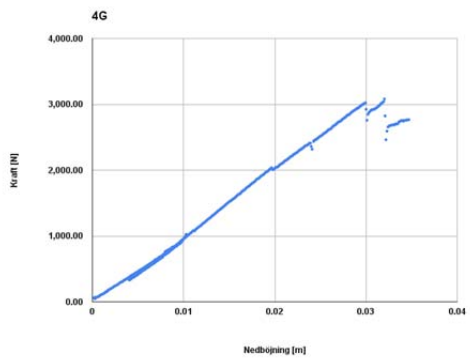
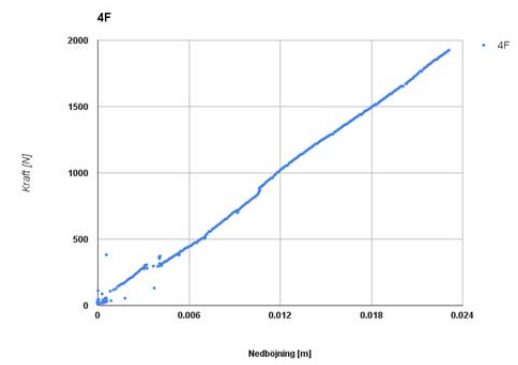
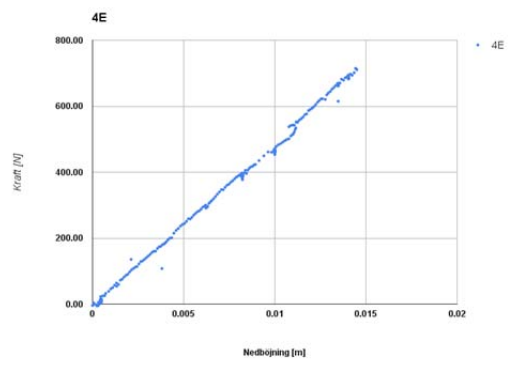
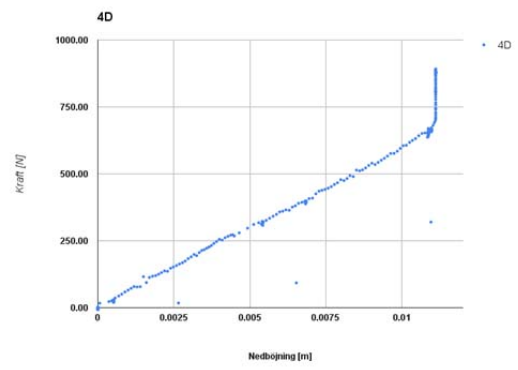
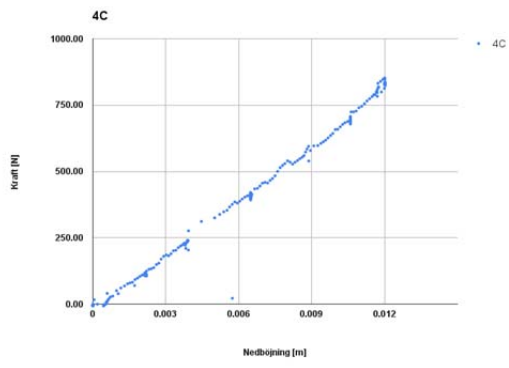
Bilaga G - Samlade grafer över deformationskurvor

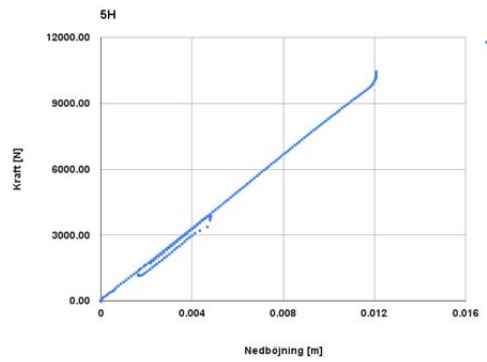
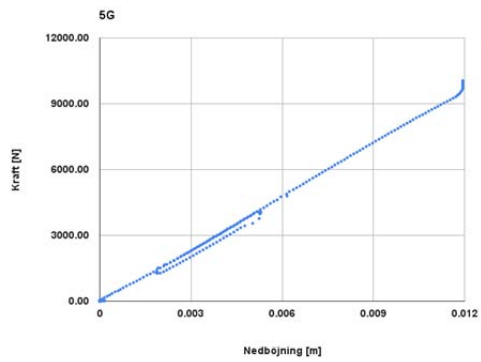
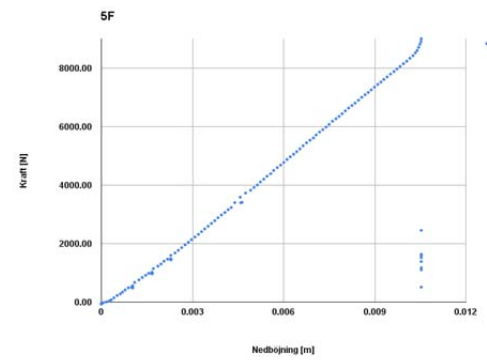
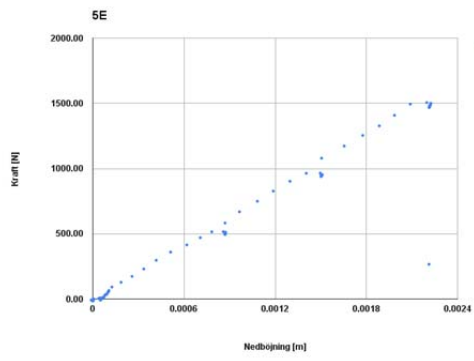
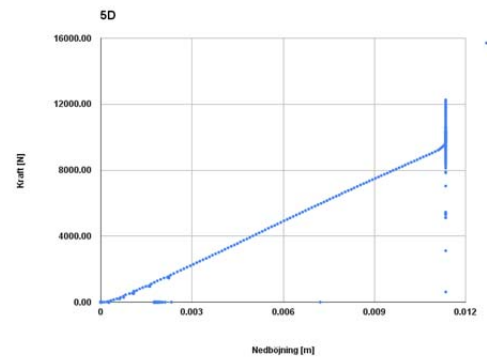
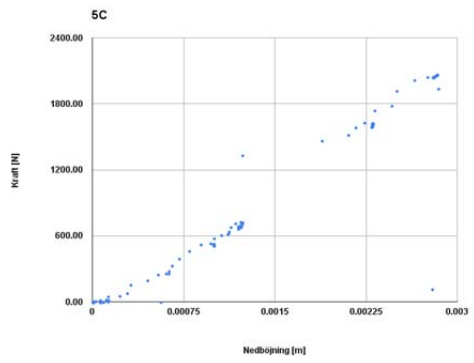
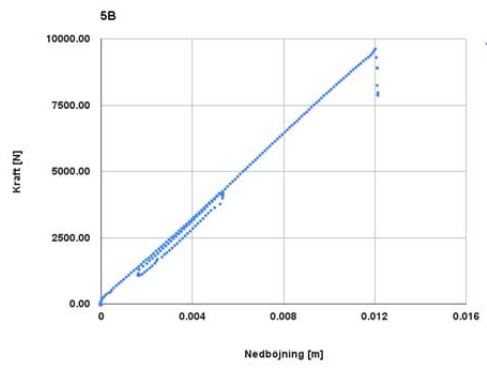
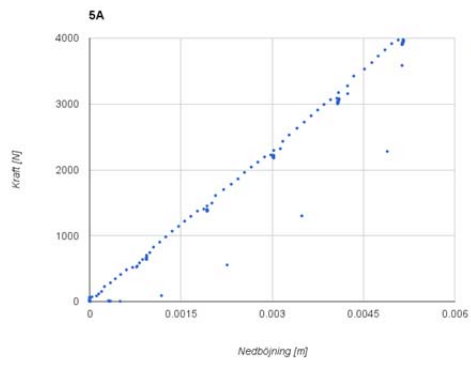


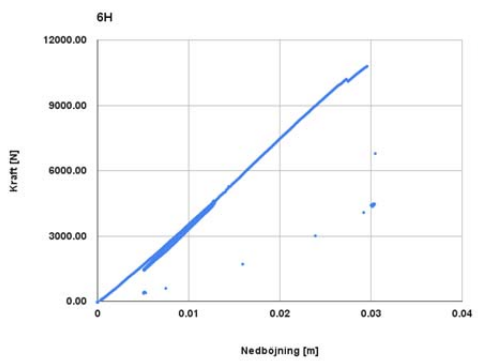
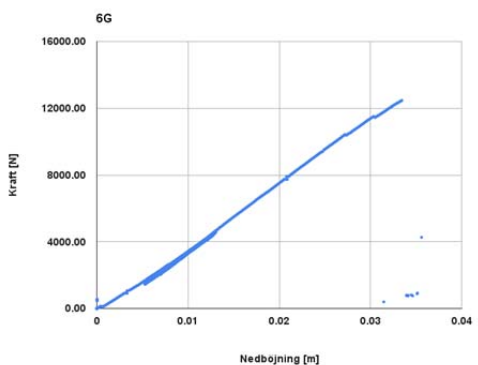
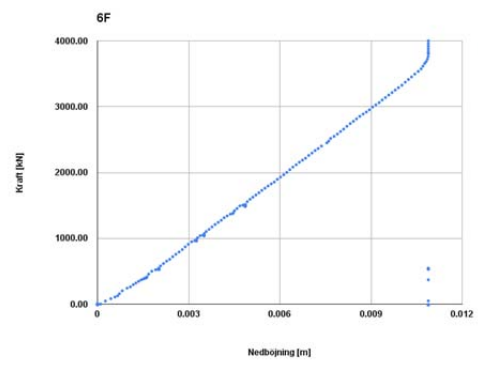
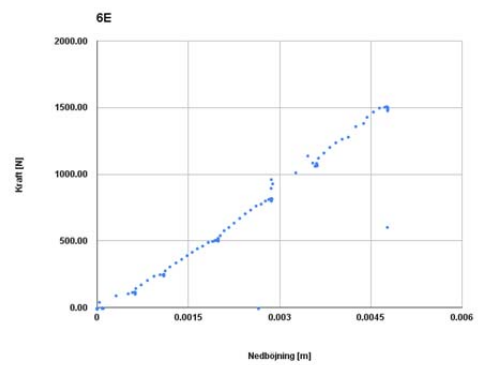
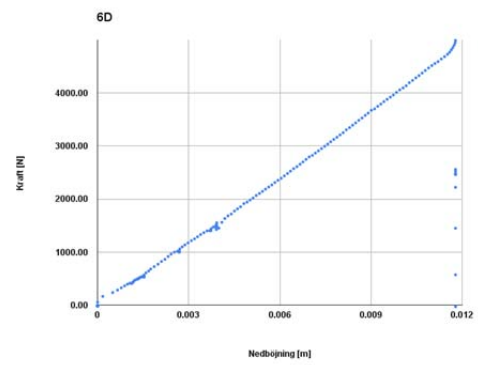
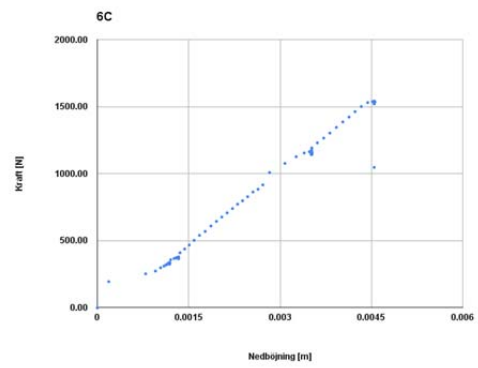
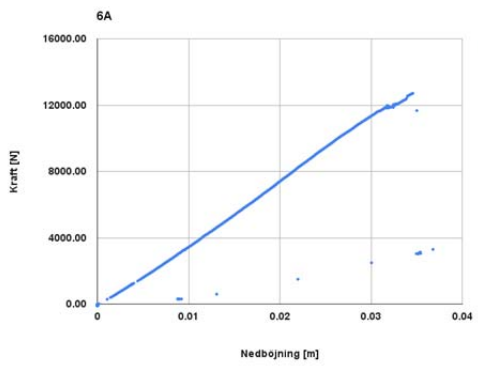








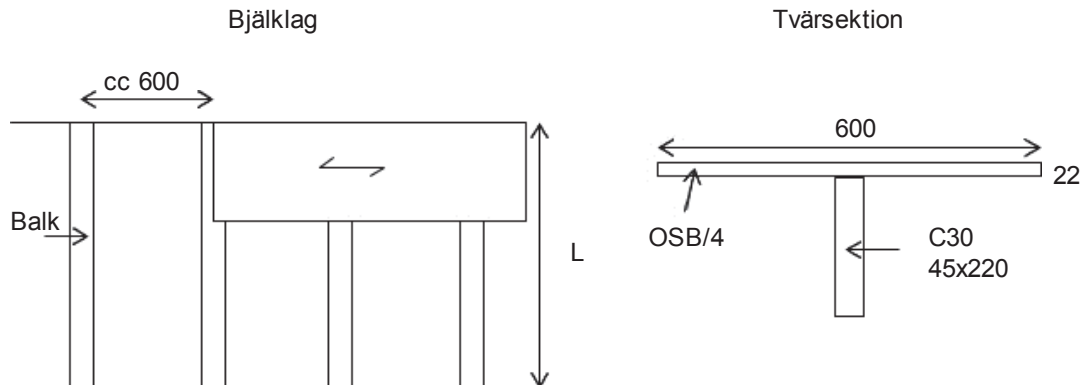




Bilaga H: Beräkning av bjälklag

Komb. 1: Sågat virke C30 och OSB	H1
Komb. 2: Limträ GL30c och OSB	H10
Komb. 3: Kerto-S och OSB	H19
Komb. 4: Kerto-S och Kerto-Q (Fiberriktning vinkelrätt mot balkens längdriktning)	H28
Komb. 5: Kerto S och Kerto-Q (Fiberriktning parallell med balkens längdriktning)	H36

Kombination 1: Sågat virke C30 och OSB



Beräkningarna utförs enligt EN 1995-1-1:2004.
Mellanbjälklag i bostad => Klimatklass 1 kan antas.

Skiva: OSB/4

$$b_1 := 600\text{mm}$$

$$h_1 := 22\text{mm}$$

$$E_{1,0} := 4300\text{MPa}$$

$$E_{1,90} := 3200\text{MPa}$$

$$\rho_1 := 550 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$k_{\text{mod},1} := 0.7$$

$$k_{\text{def},1} := 1.5$$

Balk: Sågat virke C30

$$b_2 := 45\text{mm}$$

$$h_2 := 220\text{mm}$$

$$E_{2,0} := 12000\text{MPa}$$

$$G_2 := 750\text{MPa}$$

$$\rho_2 := 460 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$k_{\text{mod},2} := 0.8$$

$$k_{\text{def},2} := 0.6$$

Tvårsnittskonstanter

$$A_1 := b_1 \cdot h_1 = 0.013 \text{ m}^2$$

$$A_2 := b_2 \cdot h_2 = 9.9 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

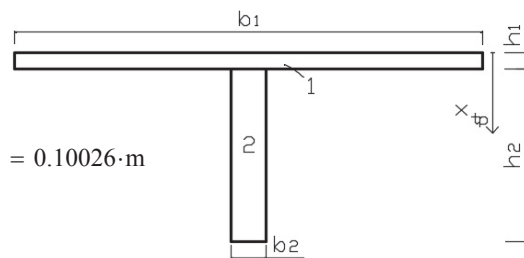
Omedelbar (index "inst" står för instant)

$$x_{\text{tp,inst}} := \frac{E_{1,90} \cdot A_1 \cdot \frac{h_1}{2} + E_{2,0} \cdot A_2 \cdot \left(h_1 + \frac{h_2}{2} \right)}{E_{1,90} \cdot A_1 + E_{2,0} \cdot A_2} = 0.10026 \cdot \text{m}$$

$$I_{1,\text{inst}} := \frac{b_1 \cdot (h_1)^3}{12} + A_1 \cdot \left(x_{\text{tp,inst}} - \frac{h_1}{2} \right)^2 = 1.057 \times 10^{-4} \cdot \text{m}^4$$

$$I_{2,\text{inst}} := \frac{b_2 \cdot (h_2)^3}{12} + A_2 \cdot \left(h_1 + \frac{h_2}{2} - x_{\text{tp,inst}} \right)^2 = 4.99 \times 10^{-5} \cdot \text{m}^4$$

$$\Sigma EI_{\text{inst}} := E_{1,90} \cdot I_{1,\text{inst}} + E_{2,0} \cdot I_{2,\text{inst}} = 9.371 \times 10^5 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^2$$



Slutgiltig (Index "fin" står för final)

Reducering av hållfasthetsvärden för att ta hänsyn till krypning

$$E_{1,90,fin} := \frac{E_{1,90}}{1 + k_{def,1}} = 1280 \cdot \text{MPa}$$

$$E_{2,0,fin} := \frac{E_{2,0}}{1 + k_{def,2}} = 7500 \cdot \text{MPa}$$

$$G_{2,fin} := \frac{G_2}{1 + k_{def,2}} = 468.75 \cdot \text{MPa}$$

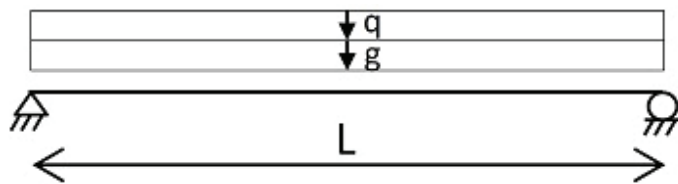
$$x_{tp,fin} := \frac{E_{1,90,fin} \cdot A_1 \cdot \frac{h_1}{2} + E_{2,0,fin} \cdot A_2 \cdot \left(h_1 + \frac{h_2}{2} \right)}{E_{1,90,fin} \cdot A_1 + E_{2,0,fin} \cdot A_2} = 0.10957 \cdot \text{m}$$

$$I_{1,fin} := \frac{b_1 \cdot (h_1)^3}{12} + A_1 \cdot \left(x_{tp,fin} - \frac{h_1}{2} \right)^2 = 1.288 \times 10^{-4} \cdot \text{m}^4$$

$$I_{2,fin} := \frac{b_2 \cdot (h_2)^3}{12} + A_2 \cdot \left(h_1 + \frac{h_2}{2} - x_{tp,fin} \right)^2 = 4.491 \times 10^{-5} \cdot \text{m}^4$$

$$\Sigma EI_{fin} := E_{1,90,fin} \cdot I_{1,fin} + E_{2,0,fin} \cdot I_{2,fin} = 5.017 \times 10^5 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^2$$

Laster



Gravitationskonstanten:

$$g := 9.82 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Egenvikt

$$cc := 0.6 \text{m}$$

$$G := \frac{(\rho_1 \cdot A_1 + \rho_2 \cdot A_2)}{cc} \cdot g = 0.193 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Balk och skiva

$$G_{gblgn} := 0.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Extravikt för golvbeläggning

$$G_{golv} := G + G_{gblgn} = 0.393 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$g_{golv} := G_{golv} \cdot cc = 0.236 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Nyttig last

$$Q := 2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad \text{Bostad}$$

$$q := Q \cdot cc = 1.2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Bruksgränstillstånd

Deformation

Slutgiltig

$$\delta_{\text{fin},g}(x) := \frac{5 \cdot g_{\text{golv}} \cdot x^4}{384 \cdot \Sigma EI_{\text{fin}}}$$

Deformation orsakad av permanent last

$$\delta_{\text{fin},q}(x) := \frac{5 \cdot q \cdot x^4}{384 \cdot \Sigma EI_{\text{fin}}}$$

Deformation orsakad av nyttig last

$$\delta_{\text{fin},s}(x) := \frac{(g_{\text{golv}} + q) \cdot x^2}{8 \cdot G_{2,\text{fin}} \cdot A_2}$$

Skjuvdeformation

$$\delta_{\text{fin}}(x) := \delta_{\text{fin},g}(x) + \delta_{\text{fin},q}(x) + \delta_{\text{fin},s}(x)$$

Den slutgiltiga nedböjningen

Antag längd:

$$\overset{\text{ww}}{L} := 4.0\text{m}$$

$$\delta_{\text{fin}}(L) = 10.16 \cdot \text{mm} \quad \text{inte ok!}$$

Nedböjningen får ej överstiga L/400

$$\frac{L}{400} = 10 \cdot \text{mm}$$

$$\overset{\text{ww}}{L} := 3.9\text{m}$$

$$\delta_{\text{fin}}(L) = 9.211 \cdot \text{mm} \quad \text{ok!}$$

$$\frac{L}{400} = 9.75 \cdot \text{mm}$$

Punktlastkontroll

$$\frac{w}{F} \leq a$$

$$a := 1.5 \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

$$\overset{\text{ww}}{F} := 1\text{kN}$$

$$w := \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot \Sigma EI_{\text{inst}}} = 1.319 \cdot \text{mm}$$

$$\frac{w}{F} = 1.319 \cdot \frac{\text{mm}}{\text{kN}} < a \quad \text{ok!}$$

Impulshastighetsrespons

Lägsta egenfrekvens

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_L}{m}}$$

$$L = 3.9 \text{ m}$$

Från tidigare beräkningar

$$EI_L := \frac{\sum EI_{i,inst}}{0.6 \text{ m}} = 1.562 \times 10^6 \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{m}}$$

$$m := \frac{G_{golv}}{g} = 40.057 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$f_1 := \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_L}{m}} = 20.392 \cdot \text{Hz}$$

$f > 8 \text{ Hz}$ innebär att följande krav ska uppfyllas

$$v \leq b \cdot f_1 \cdot \zeta^{-1}$$

$$b := 100$$

$$\zeta := 0.01$$

$$v = \frac{4(0.4 + 0.6n_{40})}{m \cdot b \cdot L + 200}$$

$$n_{40} = \left[\left[\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right] \cdot \left(\frac{b}{L} \right)^4 \cdot \left(\frac{EI_L}{EI_b} \right) \right]^{0.25}$$

Här är b bredden på hela golvbjälklaget. Antag:

$$b_{\text{AA}} := 10 \text{ m}$$

$$EI_b := \frac{(h_1)^3}{12} \cdot E_{1,0} = 3.816 \times 10^3 \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{m}}$$

$$n_{40} := s^{-0.5} \left[\left[\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \text{ s}^2 \right] \cdot \left(\frac{b}{L} \right)^4 \cdot \left(\frac{EI_L}{EI_b} \right) \right]^{0.25} = 14.982$$

$$v := \frac{4(0.4 + 0.6n_{40})}{m \cdot b \cdot L + 200 \text{ kg}} \cdot \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{N} \cdot \text{s}^2} = 0.021 \cdot \frac{\text{m}}{\text{N} \cdot \text{s}^2}$$

$$b_{\text{AA}} := 100$$

$$\frac{b \cdot f_1 \cdot \zeta \cdot \text{s}^{-1}}{b} = 0.026$$

Alltså:

$$v < b \quad f_1 \cdot \zeta^{-1} \quad \text{ok!}$$

Ett bjälklag med 22mm OSB/4 och balk av sågat virke med måtten 45x220mm klarar alla ställda krav i bruksgränstillstånd vid en spännvidd på 3.9 m.

Brottgränstillstånd

Hållfasthetsvärden

Skiva: OSB/4

Tryck parallellt fibrerna:

$$f_{1,c,0,k} := 17\text{MPa}$$

Tryck vinkelrätt fibrerna:

$$f_{1,c,90,k} := 13.7\text{MPa}$$

Skjuvning

$$f_{1,v,k} := 6.9\text{MPa}$$

Skiktskjuvning

$$f_{1,r,k} := 1.1\text{MPa}$$

Balk: Sågat virke C30

Drag parallellt fibrerna:

$$f_{2,t,0,k} := 18\text{MPa}$$

Tryck parallellt fibrerna:

$$f_{2,c,0,k} := 23\text{MPa}$$

Skjuvning

$$f_{2,v,k} := 4.0\text{MPa}$$

Dimensionerande hållfasthet

Skiva

$$\gamma_{m,1} := 1.2$$

$$f_{1,c,0,d} := k_{\text{mod},1} \cdot \frac{f_{1,c,0,k}}{\gamma_{m,1}} = 9.917 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{1,c,90,d} := k_{\text{mod},1} \cdot \frac{f_{1,c,90,k}}{\gamma_{m,1}} = 7.992 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{1,v,d} := k_{\text{mod},1} \cdot \frac{f_{1,v,k}}{\gamma_{m,1}} = 4.025 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{1,r,d} := k_{\text{mod},1} \cdot \frac{f_{1,r,k}}{\gamma_{m,1}} = 0.642 \cdot \text{MPa}$$

Balk

$$\gamma_{m,2} := 1.3$$

$$f_{2,t,0,d} := k_{\text{mod},2} \cdot \frac{f_{2,t,0,k}}{\gamma_{m,2}} = 11.077 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{2,c,0,d} := k_{\text{mod},2} \cdot \frac{f_{2,c,0,k}}{\gamma_{m,2}} = 14.154 \cdot \text{MPa}$$

För att ta hänsyn till eventuella sprickor i balken reduceras den dimensionerande skjuvhållfastheten med faktorn:

$$k_{\text{cr}} := 0.67$$

$$f_{2,v,d} := k_{\text{cr}} \cdot k_{\text{mod},2} \cdot \frac{f_{2,v,k}}{\gamma_{m,2}} = 1.649 \cdot \text{MPa}$$

Last, moment- och tvärkraft

kNm := kN·m

$$g_{\text{golv}} = 0.236 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad q = 1.2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad L = 3.9 \text{ m} \quad (\text{sedan tidigare})$$

$$q_{\text{ULS}} := 1.35 \cdot g_{\text{golv}} + 1.5 \cdot q = 2.119 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{Ed}} := \frac{q_{\text{ULS}} \cdot L^2}{8} = 4.028 \cdot \text{kNm}$$

$$V_{\text{Ed}} := \frac{q_{\text{ULS}} \cdot L}{2} = 4.131 \cdot \text{kN}$$

Tryck- och dragspänningar

Omedelbar

Spänningar i skivan

$$\sigma_{\text{inst,skiva}}(z) := \frac{M_{\text{Ed}} \cdot E_{1,90}}{\Sigma EI_{\text{inst}}} \cdot z \quad -x_{\text{tp,inst}} \leq z \leq -x_{\text{tp,inst}} + h_1$$

Överkant

$$\sigma_{\text{inst,skiva}}(-x_{\text{tp,inst}}) = -1.379 \cdot \text{MPa}$$

Underkant

$$\sigma_{\text{inst,skiva}}(-x_{\text{tp,inst}} + h_1) = -1.077 \cdot \text{MPa}$$

Spänningar i balken

$$\sigma_{\text{inst,balk}}(z) := \frac{M_{\text{Ed}} \cdot E_{2,0}}{\Sigma EI_{\text{inst}}} \cdot z \quad -x_{\text{tp,inst}} + h_1 \leq z \leq h_1 + h_2 - x_{\text{tp,inst}}$$

Överkant

$$\sigma_{\text{inst,balk}}(-x_{\text{tp,inst}} + h_1) = -4.037 \cdot \text{MPa}$$

Underkant

$$\sigma_{\text{inst,balk}}(h_1 + h_2 - x_{\text{tp,inst}}) = 7.311 \cdot \text{MPa}$$

$$|f_{\text{Ed}}| < f_{\text{Rd}} \quad \text{För alla fall}$$

Slutgiltig

Spänningar i skivan

$$\sigma_{\text{fin,skiva}}(z) := \frac{M_{\text{Ed}} \cdot E_{1,90,\text{fin}}}{\Sigma EI_{\text{fin}}} \cdot z \quad -x_{\text{tp,fin}} \leq z \leq -x_{\text{tp,fin}} + h_1$$

$$\sigma_{\text{fin,skiva}}(-x_{\text{tp,fin}}) = -1.126 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{fin,skiva}}(-x_{\text{tp,fin}} + h_1) = -0.9 \cdot \text{MPa}$$

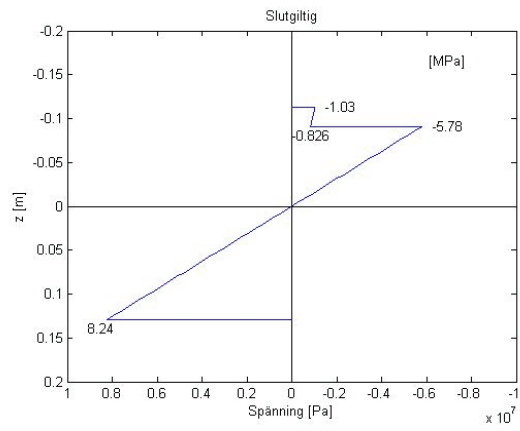
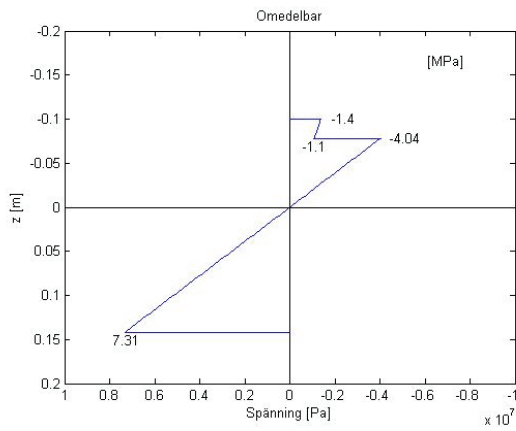
Spänningar i balken

$$\sigma_{\text{fin,balk}}(z) := \frac{M_{\text{Ed}} \cdot E_{2,0,\text{fin}}}{\Sigma EI_{\text{fin}}} \cdot z \quad -x_{\text{tp,fin}} + h_1 \leq z \leq h_1 + h_2 - x_{\text{tp,fin}}$$

$$\sigma_{\text{fin,balk}}(-x_{\text{tp,fin}} + h_1) = -5.273 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{fin,balk}}(h_1 + h_2 - x_{\text{tp,fin}}) = 7.975 \cdot \text{MPa}$$

$$|f_{\text{Ed}}| < f_{\text{Rd}} \quad \text{för alla fall.}$$



Skjuvspänningar

Skjuvspänningar i skivan

Störst skjuvspänning uppstår i skivans underkant

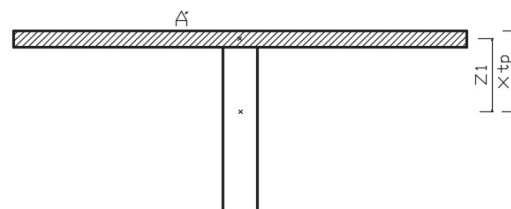
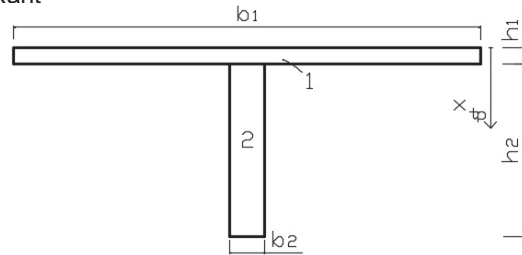
Omedelbar

$$A' := A_1 = 0.013 \text{ m}^2$$

$$z_1 := x_{tp,inst} - \frac{h_1}{2} = 0.089 \text{ m}$$

$$S'_A := A' \cdot z_1 = 1.178 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^3$$

$$\tau_{inst,ansl} := \frac{V_{Ed} \cdot S'_A \cdot E_{1,90}}{\Sigma EI_{inst} \cdot b_1} = 0.028 \cdot \text{MPa}$$



Slutgiltig

$$A' := A_1 = 0.013 \text{ m}^2$$

$$z_1 := x_{tp,fin} - \frac{h_1}{2} = 0.099 \text{ m}$$

$$S'_A := A' \cdot z_1 = 1.301 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^3$$

$$\tau_{inst,ansl} := \frac{V_{Ed} \cdot S'_A \cdot E_{1,90,fin}}{\Sigma EI_{fin} \cdot b_1} = 0.023 \cdot \text{MPa}$$

Skjuvspänningar vid anslutningen mellan balk och skiva.

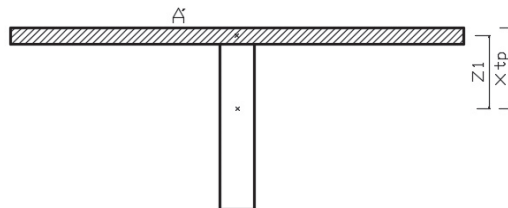
Omedelbar

$$A' := A_1 = 0.013 \text{ m}^2$$

$$z_1 := x_{tp,inst} - \frac{h_1}{2} = 0.089 \text{ m}$$

$$S' := A' \cdot z_1 = 1.178 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^3$$

$$\tau_{inst,ansl} := \frac{V_{Ed} \cdot S' \cdot E_{1,90}}{\Sigma EI_{inst} \cdot b_2} = 0.369 \cdot \text{MPa}$$



Slutgiltig

$$A' := A_1 = 0.013 \text{ m}^2$$

$$z_1 := x_{tp,fin} - \frac{h_1}{2} = 0.099 \text{ m}$$

$$S' := A' \cdot z_1 = 1.301 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^3$$

$$\tau_{fin,ansl} := \frac{V_{Ed} \cdot S' \cdot E_{1,90,fin}}{\Sigma EI_{fin} \cdot b_2} = 0.305 \cdot \text{MPa}$$

Skjuvspänningar i neutrala lagret:

Omedelbar

$$A'_1 := A_1 = 0.013 \text{ m}^2$$

$$z_1 := x_{tp,inst} - \frac{h_1}{2} = 0.089 \text{ m}$$

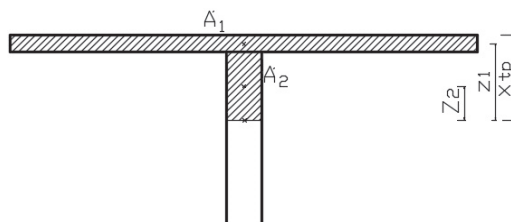
$$S'_{A1} := A'_1 \cdot z_1 = 1.178 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^3$$

$$A'_2 := (x_{tp,inst} - h_1) \cdot b_2 = 3.522 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$z_2 := x_{tp,inst} - h_1 - \frac{x_{tp,inst} - h_1}{2} = 0.039 \text{ m}$$

$$S'_{A2} := A'_2 \cdot z_2 = 1.378 \times 10^{-4} \cdot \text{m}^3$$

$$\tau_{inst,xtp} := \frac{V_{Ed} \cdot (S'_{A1} \cdot E_{1,90} + S'_{A2} \cdot E_{2,0})}{\Sigma EI_{inst} \cdot b_2} = 0.531 \cdot \text{MPa}$$



Slutgiltig

$$A'_{1,1} := A_1 = 0.013 \text{ m}^2$$

$$z_{1,1} := x_{tp,fin} - \frac{h_1}{2} = 0.099 \text{ m}$$

$$S'_{A1} := A'_{1,1} \cdot z_{1,1} = 1.301 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^3$$

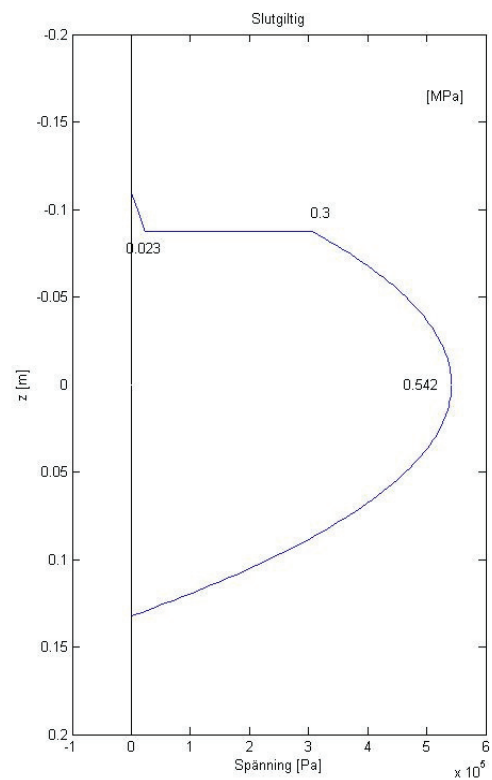
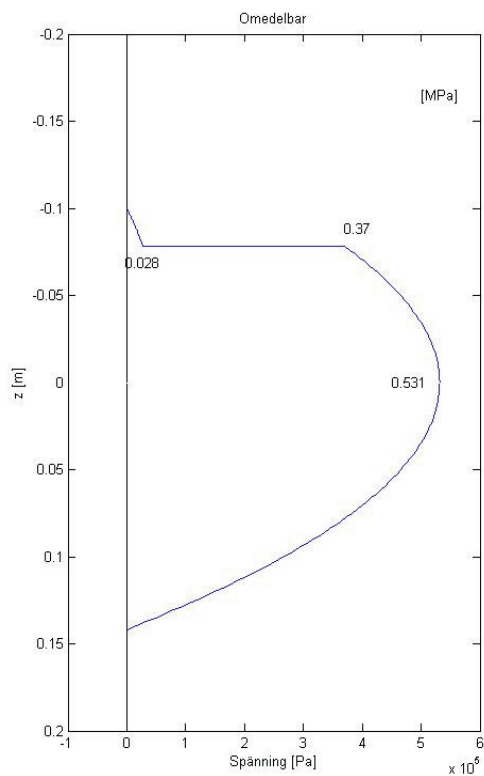
$$A'_{2,1} := (x_{tp,fin} - h_1) \cdot b_2 = 3.941 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$z_{2,1} := x_{tp,fin} - h_1 - \frac{x_{tp,fin} - h_1}{2} = 0.044 \text{ m}$$

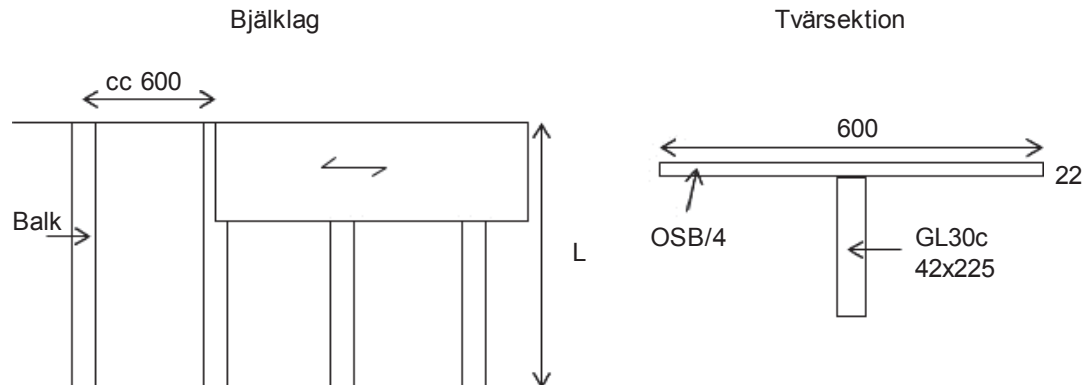
$$S'_{A2} := A'_{2,1} \cdot z_{2,1} = 1.725 \times 10^{-4} \cdot \text{m}^3$$

$$\tau_{fin,xtp} := \frac{V_{Ed} \cdot (S'_{A1} \cdot E_{1,90,fin} + S'_{A2} \cdot E_{2,0,fin})}{\Sigma EI_{fin} \cdot b_2} = 0.542 \cdot \text{MPa}$$

$\tau_d < f_{v,d}$ för alla fall



Kombination 2: Limträ GL30c och OSB



Beräkningarna utförs enligt EN 1995-1-1:2004.
Mellanbjälklag i bostad => Klimatklass 1 kan antas.

Skiva: OSB/4

$$\begin{aligned} b_1 &:= 600\text{mm} \\ h_1 &:= 22\text{mm} \\ E_{1,0} &:= 4300\text{MPa} \\ E_{1,90} &:= 3200\text{MPa} \\ \rho_1 &:= 550 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ k_{\text{mod},1} &:= 0.7 \\ k_{\text{def},1} &:= 1.5 \end{aligned}$$

Balk: Limträ GL30c

$$\begin{aligned} b_2 &:= 42\text{mm} \\ h_2 &:= 225\text{mm} \\ E_{2,0} &:= 13000\text{MPa} \\ G_2 &:= 650\text{MPa} \\ \rho_2 &:= 430 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ k_{\text{mod},2} &:= 0.8 \\ k_{\text{def},2} &:= 0.6 \end{aligned}$$

Tvärsnittskonstanter

$$A_1 := b_1 \cdot h_1 = 0.013 \text{ m}^2$$

$$A_2 := b_2 \cdot h_2 = 9.45 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

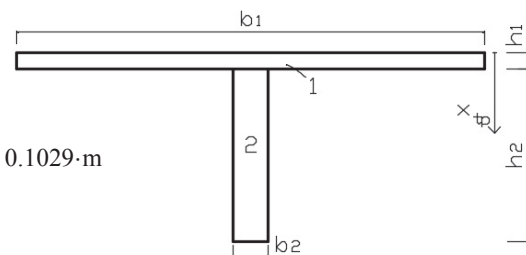
Omedelbar (index "inst" står för instant)

$$x_{\text{tp,inst}} := \frac{E_{1,90} \cdot A_1 \cdot \frac{h_1}{2} + E_{2,0} \cdot A_2 \cdot \left(h_1 + \frac{h_2}{2} \right)}{E_{1,90} \cdot A_1 + E_{2,0} \cdot A_2} = 0.1029 \cdot \text{m}$$

$$I_{1,\text{inst}} := \frac{b_1 \cdot (h_1)^3}{12} + A_1 \cdot \left(x_{\text{tp,inst}} - \frac{h_1}{2} \right)^2 = 1.12 \times 10^{-4} \cdot \text{m}^4$$

$$I_{2,\text{inst}} := \frac{b_2 \cdot (h_2)^3}{12} + A_2 \cdot \left(h_1 + \frac{h_2}{2} - x_{\text{tp,inst}} \right)^2 = 4.93 \times 10^{-5} \cdot \text{m}^4$$

$$\Sigma EI_{\text{inst}} := E_{1,90} \cdot I_{1,\text{inst}} + E_{2,0} \cdot I_{2,\text{inst}} = 9.994 \times 10^5 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^2$$



Slutgiltig (Index "fin" står för final)

Reducering av hållfasthetsvärden för att ta hänsyn till krypning

$$E_{1,90,fin} := \frac{E_{1,90}}{1 + k_{def,1}} = 1280 \cdot \text{MPa}$$

$$E_{2,0,fin} := \frac{E_{2,0}}{1 + k_{def,2}} = 8125 \cdot \text{MPa}$$

$$G_{2,fin} := \frac{G_2}{1 + k_{def,2}} = 406.25 \cdot \text{MPa}$$

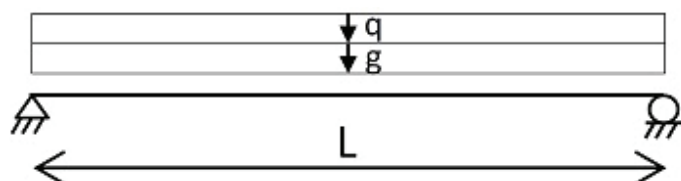
$$x_{tp,fin} := \frac{E_{1,90,fin} \cdot A_1 \cdot \frac{h_1}{2} + E_{2,0,fin} \cdot A_2 \cdot \left(h_1 + \frac{h_2}{2} \right)}{E_{1,90,fin} \cdot A_1 + E_{2,0,fin} \cdot A_2} = 0.1122 \cdot \text{m}$$

$$I_{1,fin} := \frac{b_1 \cdot (h_1)^3}{12} + A_1 \cdot \left(x_{tp,fin} - \frac{h_1}{2} \right)^2 = 1.358 \times 10^{-4} \cdot \text{m}^4$$

$$I_{2,fin} := \frac{b_2 \cdot (h_2)^3}{12} + A_2 \cdot \left(h_1 + \frac{h_2}{2} - x_{tp,fin} \right)^2 = 4.456 \times 10^{-5} \cdot \text{m}^4$$

$$\Sigma EI_{fin} := E_{1,90,fin} \cdot I_{1,fin} + E_{2,0,fin} \cdot I_{2,fin} = 5.358 \times 10^5 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^2$$

Laster



Gravitationskonstanten:

$$g := 9.82 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Egenvikt

$$cc := 0.6 \text{m}$$

$$G := \frac{(\rho_1 \cdot A_1 + \rho_2 \cdot A_2)}{cc} \cdot g = 0.185 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Balk och skiva

$$G_{gblgn} := 0.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Extravikt för golvbeläggning

$$G_{golv} := G + G_{gblgn} = 0.385 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$g_{golv} := G_{golv} \cdot cc = 0.231 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Nyttig last

$$Q := 2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad \text{Bostad}$$

$$q := Q \cdot cc = 1.2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Bruksgränstillstånd

Deformation

Slutgiltig

$$\delta_{\text{fin},g}(x) := \frac{5 \cdot g_{\text{golv}} \cdot x^4}{384 \cdot \Sigma EI_{\text{fin}}}$$

Deformation orsakad av permanent last

$$\delta_{\text{fin},q}(x) := \frac{5 \cdot q \cdot x^4}{384 \cdot \Sigma EI_{\text{fin}}}$$

Deformation orsakad av nyttig last

$$\delta_{\text{fin},s}(x) := \frac{(g_{\text{golv}} + q) \cdot x^2}{8 \cdot G_{2,\text{fin}} \cdot A_2}$$

Skjuvdeformation

$$\delta_{\text{fin}}(x) := \delta_{\text{fin},g}(x) + \delta_{\text{fin},q}(x) + \delta_{\text{fin},s}(x)$$

Den slutgiltiga nedböjningen

Antag längd:

$$\overset{\text{ww}}{L} := 4.1\text{m}$$

$$\delta_{\text{fin}}(L) = 10.611 \cdot \text{mm} \quad \text{inte ok!}$$

Nedböjningen får ej överstiga L/400

$$\frac{L}{400} = 10.25 \cdot \text{mm}$$

$$\overset{\text{ww}}{L} := 4.0\text{m}$$

$$\delta_{\text{fin}}(L) = 9.649 \cdot \text{mm} \quad \text{ok!}$$

$$\frac{L}{400} = 10 \cdot \text{mm}$$

Punktlastkontroll

$$\frac{w}{F} \leq a$$

$$a := 1.5 \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

$$\overset{\text{ww}}{F} := 1\text{kN}$$

$$w := \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot \Sigma EI_{\text{inst}}} = 1.334 \cdot \text{mm}$$

$$\frac{w}{F} = 1.334 \cdot \frac{\text{mm}}{\text{kN}} < a \quad \text{ok!}$$

Impulshastighetsrespons

Lägsta egenfrekvens

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_L}{m}}$$

$$L = 4 \text{ m}$$

Från tidigare beräkningar

$$EI_L := \frac{\Sigma EI_{i,inst}}{0.6 \text{ m}} = 1.666 \times 10^6 \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{m}}$$

$$m := \frac{G_{golv}}{g} = 39.239 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$f_1 := \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_L}{m}} = 20.227 \cdot \text{Hz}$$

$f > 8 \text{ Hz}$ innebär att följande krav ska uppfyllas

$$v \leq b \cdot f_1 \cdot \zeta^{-1}$$

$$b := 100$$

$$\zeta := 0.01$$

$$v = \frac{4(0.4 + 0.6n_{40})}{m \cdot b \cdot L + 200}$$

$$n_{40} = \left[\left[\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right] \cdot \left(\frac{b}{L} \right)^4 \cdot \left(\frac{EI_L}{EI_b} \right) \right]^{0.25}$$

Här är b bredden på hela golvbjälklaget. Antag:

$$b_{\text{AA}} := 10 \text{ m}$$

$$EI_b := \frac{(h_1)^3}{12} \cdot E_{1,0} = 3.816 \times 10^3 \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{m}}$$

$$n_{40} := s^{-0.5} \left[\left[\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \text{ s}^2 \right] \cdot \left(\frac{b}{L} \right)^4 \cdot \left(\frac{EI_L}{EI_b} \right) \right]^{0.25} = 14.926$$

$$v := \frac{4(0.4 + 0.6n_{40})}{m \cdot b \cdot L + 200 \text{ kg}} \cdot \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{N} \cdot \text{s}^2} = 0.021 \cdot \frac{\text{m}}{\text{N} \cdot \text{s}^2}$$

$$b_{\text{AA}} := 100$$

$$\frac{b \cdot f_1 \cdot \zeta \cdot \text{s}^{-1}}{b} = 0.025$$

Alltså:

$$v < b \quad f_1 \cdot \zeta^{-1} \quad \text{ok!}$$

Ett bjälklag med 22mm OSB/4 och limträbalk GL30c med måtten 45x220mm klarar alla ställda krav i bruksgränstillstånd vid en spännvidd på 4,0 m.

Brottgränstillstånd

Hållfasthetsvärden

Skiva: OSB/4

Tryck parallellt fibrerna:

$$f_{1,c,0,k} := 17\text{MPa}$$

Tryck vinkelrätt fibrerna:

$$f_{1,c,90,k} := 13.7\text{MPa}$$

Skjuvning

$$f_{1,v,k} := 6.9\text{MPa}$$

Skiktskjuvning

$$f_{1,r,k} := 1.1\text{MPa}$$

Balk: Limträ GL30C

Drag parallellt fibrerna:

$$f_{2,t,0,k} := 19.5\text{MPa}$$

Tryck parallellt fibrerna:

$$f_{2,c,0,k} := 24.5\text{MPa}$$

Skjuvning:

$$f_{2,v,0,k} := 3.5\text{MPa}$$

Skiktskjuvning:

$$f_{2,r,k} := 1.2\text{MPa}$$

Dimensionerande hållfasthet

Skiva

$$\gamma_{m,1} := 1.2$$

$$f_{1,c,0,d} := k_{\text{mod},1} \cdot \frac{f_{1,c,0,k}}{\gamma_{m,1}} = 9.917 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{1,c,90,d} := k_{\text{mod},1} \cdot \frac{f_{1,c,90,k}}{\gamma_{m,1}} = 7.992 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{1,v,d} := k_{\text{mod},1} \cdot \frac{f_{1,v,k}}{\gamma_{m,1}} = 4.025 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{1,r,d} := k_{\text{mod},1} \cdot \frac{f_{1,r,k}}{\gamma_{m,1}} = 0.642 \cdot \text{MPa}$$

Balk

$$\gamma_{m,2} := 1.25$$

$$f_{2,t,0,d} := k_{\text{mod},2} \cdot \frac{f_{2,t,0,k}}{\gamma_{m,2}} = 12.48 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{2,c,0,d} := k_{\text{mod},2} \cdot \frac{f_{2,c,0,k}}{\gamma_{m,2}} = 15.68 \cdot \text{MPa}$$

För att ta hänsyn till eventuella sprickor i limträbalken reduceras den dimensionerande skjuvhållfastheten med faktorn:

$$k_{\text{cr}} := 0.67$$

$$f_{2,v,0,d} := k_{\text{cr}} \cdot k_{\text{mod},2} \cdot \frac{f_{2,v,0,k}}{\gamma_{m,2}} = 1.501 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{2,r,d} := k_{\text{mod},2} \cdot \frac{f_{2,r,k}}{\gamma_{m,2}} = 0.768 \cdot \text{MPa}$$

Last, moment- och tvärkraft

kNm := kN·m

$$g_{\text{golv}} = 0.231 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad q = 1.2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad L = 4 \text{ m} \quad (\text{sedan tidigare})$$

$$q_{\text{ULS}} := 1.35 \cdot g_{\text{golv}} + 1.5 \cdot q = 2.112 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{Ed}} := \frac{q_{\text{ULS}} \cdot L^2}{8} = 4.224 \cdot \text{kNm}$$

$$V_{\text{Ed}} := \frac{q_{\text{ULS}} \cdot L}{2} = 4.224 \cdot \text{kN}$$

Tryck- och dragspänningar

Omedelbar

Spänningar i skivan

$$\sigma_{\text{inst,skiva}}(z) := \frac{M_{\text{Ed}} \cdot E_{1,90}}{\Sigma EI_{\text{inst}}} \cdot z \quad -x_{\text{tp,inst}} \leq z \leq -x_{\text{tp,inst}} + h_1$$

Överkant

$$\sigma_{\text{inst,skiva}}(-x_{\text{tp,inst}}) = -1.392 \cdot \text{MPa}$$

Underkant

$$\sigma_{\text{inst,skiva}}(-x_{\text{tp,inst}} + h_1) = -1.094 \cdot \text{MPa}$$

Spänningar i balken

$$\sigma_{\text{inst,balk}}(z) := \frac{M_{\text{Ed}} \cdot E_{2,0}}{\Sigma EI_{\text{inst}}} \cdot z \quad -x_{\text{tp,inst}} + h_1 \leq z \leq h_1 + h_2 - x_{\text{tp,inst}}$$

Överkant

$$\sigma_{\text{inst,balk}}(-x_{\text{tp,inst}} + h_1) = -4.445 \cdot \text{MPa}$$

Underkant

$$\sigma_{\text{inst,balk}}(h_1 + h_2 - x_{\text{tp,inst}}) = 7.918 \cdot \text{MPa}$$

$$|f_{\text{Ed}}| < f_{\text{Rd}} \quad \text{För alla fall}$$

Slutgiltig

Spänningar i skivan

$$\sigma_{\text{fin,skiva}}(z) := \frac{M_{\text{Ed}} \cdot E_{1,90,\text{fin}}}{\Sigma EI_{\text{fin}}} \cdot z \quad -x_{\text{tp,fin}} \leq z \leq -x_{\text{tp,fin}} + h_1$$

$$\sigma_{\text{fin,skiva}}(-x_{\text{tp,fin}}) = -1.132 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{fin,skiva}}(-x_{\text{tp,fin}} + h_1) = -0.91 \cdot \text{MPa}$$

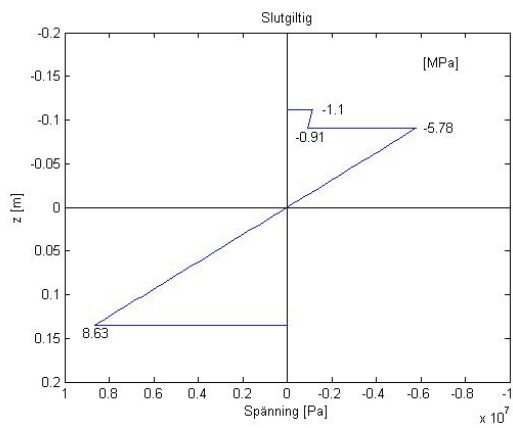
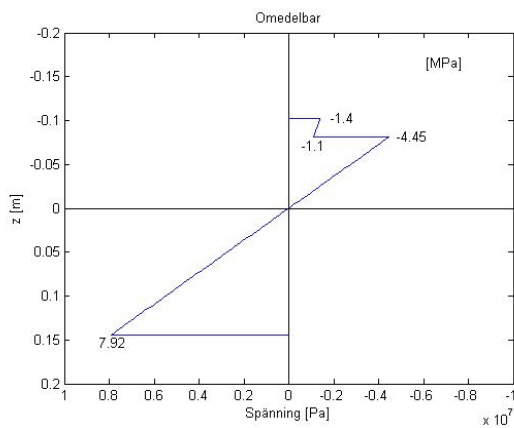
Spänningar i balken

$$\sigma_{\text{fin,balk}}(z) := \frac{M_{\text{Ed}} \cdot E_{2,0,\text{fin}}}{\Sigma EI_{\text{fin}}} \cdot z \quad -x_{\text{tp,fin}} + h_1 \leq z \leq h_1 + h_2 - x_{\text{tp,fin}}$$

$$\sigma_{\text{fin,balk}}(-x_{\text{tp,fin}} + h_1) = -5.779 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{fin,balk}}(h_1 + h_2 - x_{\text{tp,fin}}) = 8.633 \cdot \text{MPa}$$

$$|f_{\text{Ed}}| < f_{\text{Rd}} \quad \text{för alla fall.}$$



Skjuvspänningar

För att ta hänsyn till sprickor i limträbalken används effektiv bredd.

Skjuvspänningar i skivan

Störst skjuvspänning uppstår i skivans underkant

Omedelbar

$$A' := A_1 = 0.013 \text{ m}^2$$

$$z_1 := x_{tp,inst} - \frac{h_1}{2} = 0.092 \text{ m}$$

$$S'_A := A' \cdot z_1 = 1.213 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^3$$

$$\tau_{inst,ansl} := \frac{V_{Ed} \cdot S'_A \cdot E_{1,90}}{\Sigma EI_{inst} \cdot b_1} = 0.027 \cdot \text{MPa}$$

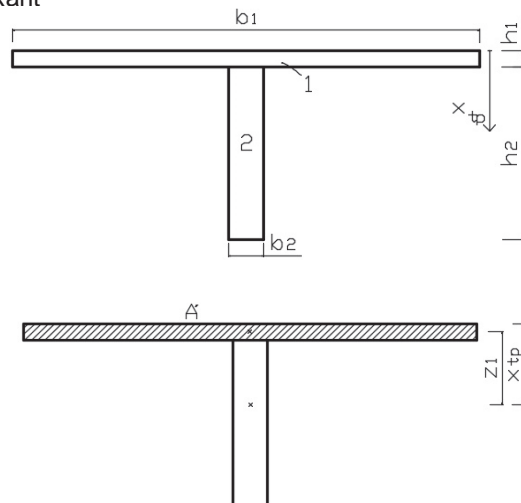
Slutgiltig

$$A' := A_1 = 0.013 \text{ m}^2$$

$$z_1 := x_{tp,fin} - \frac{h_1}{2} = 0.101 \text{ m}$$

$$S'_A := A' \cdot z_1 = 1.336 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^3$$

$$\tau_{fin,ansl} := \frac{V_{Ed} \cdot S'_A \cdot E_{1,90,fin}}{\Sigma EI_{fin} \cdot b_1} = 0.022 \cdot \text{MPa}$$



Skjuvspänningar vid anslutningen mellan balk och skiva.

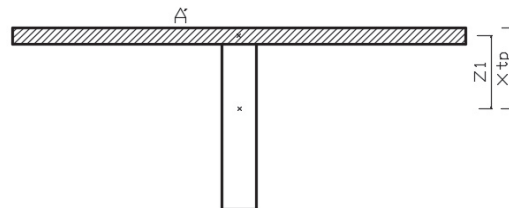
Omedelbar

$$A' := A_1 = 0.013 \text{ m}^2$$

$$z_1 := x_{tp,inst} - \frac{h_1}{2} = 0.092 \text{ m}$$

$$S'_{A1} := A' \cdot z_1 = 1.213 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^3$$

$$\tau_{inst,ansl} := \frac{V_{Ed} \cdot S'_{A1} \cdot E_{1,90}}{\Sigma EI_{inst} \cdot b_2} = 0.391 \cdot \text{MPa}$$



Slutgiltig

$$A' := A_1 = 0.013 \text{ m}^2$$

$$z_1 := x_{tp,fin} - \frac{h_1}{2} = 0.101 \text{ m}$$

$$S'_{A1} := A' \cdot z_1 = 1.336 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^3$$

$$\tau_{fin,ansl} := \frac{V_{Ed} \cdot S'_{A1} \cdot E_{1,90,fin}}{\Sigma EI_{fin} \cdot b_2} = 0.321 \cdot \text{MPa}$$

Skjuvspänningar i neutrala lagret:

Omedelbar

$$A'_1 := A_1 = 0.013 \text{ m}^2$$

$$z_1 := x_{tp,inst} - \frac{h_1}{2} = 0.092 \text{ m}$$

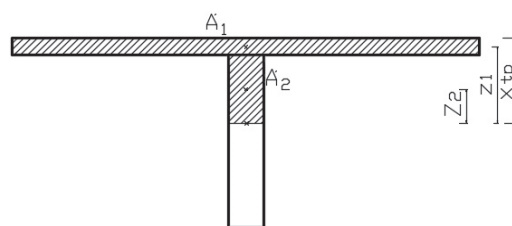
$$S'_{A1} := A'_1 \cdot z_1 = 1.213 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^3$$

$$A'_2 := (x_{tp,inst} - h_1) \cdot b_2 = 3.398 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$z_2 := x_{tp,inst} - h_1 - \frac{x_{tp,inst} - h_1}{2} = 0.04 \text{ m}$$

$$S'_{A2} := A'_2 \cdot z_2 = 1.374 \times 10^{-4} \cdot \text{m}^3$$

$$\tau_{inst,xtp} := \frac{V_{Ed} \cdot (S'_{A1} \cdot E_{1,90} + S'_{A2} \cdot E_{2,0})}{\Sigma EI_{inst} \cdot b_2} = 0.57 \cdot \text{MPa}$$



Slutgiltig

$$A'_{1w} := A_1 = 0.013 \text{ m}^2$$

$$z_{1w} := x_{tp,fin} - \frac{h_1}{2} = 0.101 \text{ m}$$

$$S'_{A1} := A'_{1w} \cdot z_1 = 1.336 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^3$$

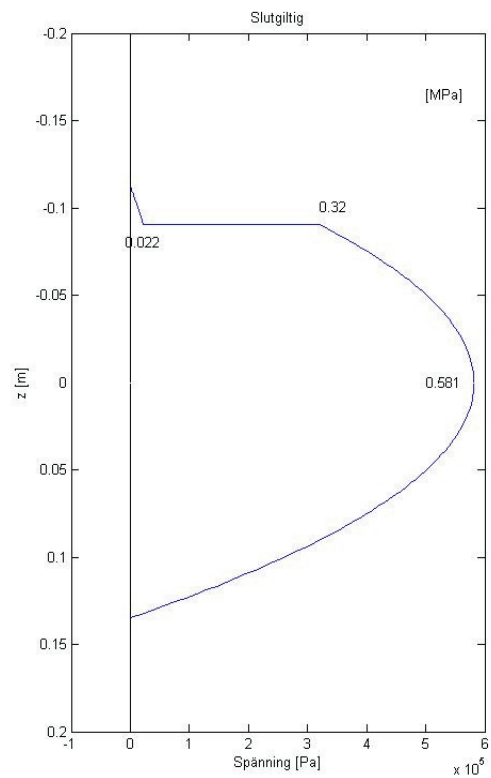
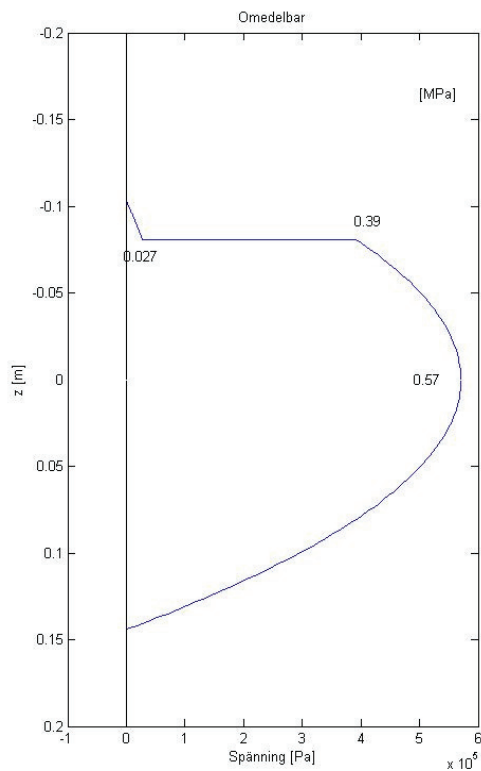
$$A'_{2w} := (x_{tp,fin} - h_1) \cdot b_2 = 3.789 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$z_{2w} := x_{tp,fin} - h_1 - \frac{x_{tp,fin} - h_1}{2} = 0.045 \text{ m}$$

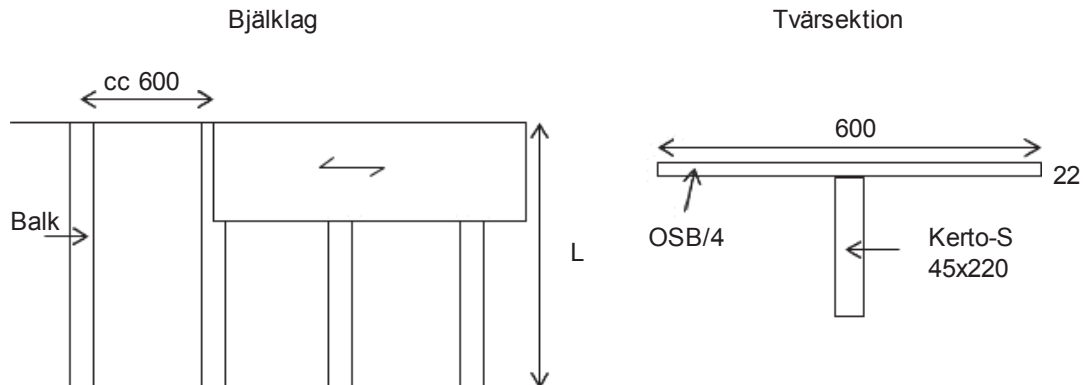
$$S'_{A2} := A'_{2w} \cdot z_2 = 1.71 \times 10^{-4} \cdot \text{m}^3$$

$$\tau_{fin,xtp} := \frac{V_{Ed} \cdot (S'_{A1} \cdot E_{1,90,fin} + S'_{A2} \cdot E_{2,0,fin})}{\Sigma EI_{fin} \cdot b_2} = 0.582 \cdot \text{MPa}$$

$\tau_d < f_{v,d}$ för alla fall



Kombination 3: Kerto-S och OSB



Beräkningarna utförs enligt EN 1995-1-1:2004.
Mellanbjälklag i bostad => Klimatklass 1 kan antas.

Skiva: OSB/4

$$b_1 := 600\text{mm}$$

$$h_1 := 22\text{mm}$$

$$E_{1,0} := 4300\text{MPa}$$

$$E_{1,90} := 3200\text{MPa}$$

$$\rho_1 := 550 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$k_{\text{mod},1} := 0.7$$

$$k_{\text{def},1} := 1.5$$

Balk: Kerto-S

$$b_2 := 45\text{mm}$$

$$h_2 := 220\text{mm}$$

$$E_{2,0} := 13800\text{MPa}$$

$$G_2 := 600\text{MPa}$$

$$\rho_2 := 510 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$k_{\text{mod},2} := 0.8$$

$$k_{\text{def},2} := 0.6$$

Tvärsnittskonstanter

$$A_1 := b_1 \cdot h_1 = 0.013 \text{ m}^2$$

$$A_2 := b_2 \cdot h_2 = 9.9 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

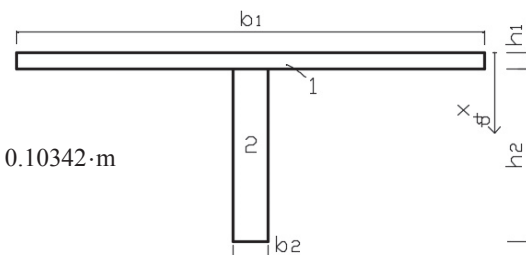
Omedelbar (index "inst" står för instant)

$$x_{\text{tp,inst}} := \frac{E_{1,90} \cdot A_1 \cdot \frac{h_1}{2} + E_{2,0} \cdot A_2 \cdot \left(h_1 + \frac{h_2}{2} \right)}{E_{1,90} \cdot A_1 + E_{2,0} \cdot A_2} = 0.10342 \cdot \text{m}$$

$$I_{1,\text{inst}} := \frac{b_1 \cdot (h_1)^3}{12} + A_1 \cdot \left(x_{\text{tp,inst}} - \frac{h_1}{2} \right)^2 = 1.133 \times 10^{-4} \cdot \text{m}^4$$

$$I_{2,\text{inst}} := \frac{b_2 \cdot (h_2)^3}{12} + A_2 \cdot \left(h_1 + \frac{h_2}{2} - x_{\text{tp,inst}} \right)^2 = 4.801 \times 10^{-5} \cdot \text{m}^4$$

$$\Sigma EI_{\text{inst}} := E_{1,90} \cdot I_{1,\text{inst}} + E_{2,0} \cdot I_{2,\text{inst}} = 1.025 \times 10^6 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^2$$



Slutgiltig (Index "fin" står för final)

Reducering av hållfasthetsvärden för att ta hänsyn till krypning

$$E_{1,90,fin} := \frac{E_{1,90}}{1 + k_{def,1}} = 1280 \cdot \text{MPa}$$

$$E_{2,0,fin} := \frac{E_{2,0}}{1 + k_{def,2}} = 8625 \cdot \text{MPa}$$

$$G_{2,fin} := \frac{G_2}{1 + k_{def,2}} = 375 \cdot \text{MPa}$$

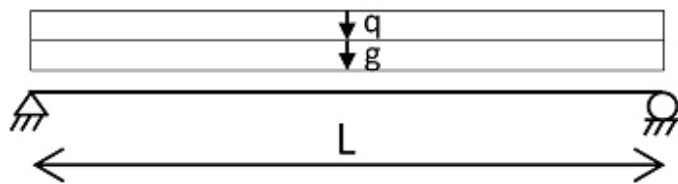
$$x_{tp,fin} := \frac{E_{1,90,fin} \cdot A_1 \cdot \frac{h_1}{2} + E_{2,0,fin} \cdot A_2 \cdot \left(h_1 + \frac{h_2}{2} \right)}{E_{1,90,fin} \cdot A_1 + E_{2,0,fin} \cdot A_2} = 0.112 \cdot \text{m}$$

$$I_{1,fin} := \frac{b_1 \cdot (h_1)^3}{12} + A_1 \cdot \left(x_{tp,fin} - \frac{h_1}{2} \right)^2 = 1.352 \times 10^{-4} \cdot \text{m}^4$$

$$I_{2,fin} := \frac{b_2 \cdot (h_2)^3}{12} + A_2 \cdot \left(h_1 + \frac{h_2}{2} - x_{tp,fin} \right)^2 = 4.389 \times 10^{-5} \cdot \text{m}^4$$

$$\Sigma EI_{fin} := E_{1,90,fin} \cdot I_{1,fin} + E_{2,0,fin} \cdot I_{2,fin} = 5.516 \times 10^5 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^2$$

Laster



Gravitationskonstanten:

$$g := 9.82 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Egenvikt

$$cc := 0.6 \text{m}$$

$$G := \frac{(\rho_1 \cdot A_1 + \rho_2 \cdot A_2)}{cc} \cdot g = 0.201 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Balk och skiva

$$G_{gblgn} := 0.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Extravikt för golvbeläggning

$$G_{golv} := G + G_{gblgn} = 0.401 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$g_{golv} := G_{golv} \cdot cc = 0.241 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Nyttig last

$$Q := 2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad \text{Bostad}$$

$$q := Q \cdot cc = 1.2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Bruksgränstillstånd

Deformation

Slutgiltig

$$\delta_{\text{fin},g}(x) := \frac{5 \cdot g_{\text{golv}} \cdot x^4}{384 \cdot \Sigma EI_{\text{fin}}}$$

Deformation orsakad av permanent last

$$\delta_{\text{fin},q}(x) := \frac{5 \cdot q \cdot x^4}{384 \cdot \Sigma EI_{\text{fin}}}$$

Deformation orsakad av nyttig last

$$\delta_{\text{fin},s}(x) := \frac{(g_{\text{golv}} + q) \cdot x^2}{8 \cdot G_{2,\text{fin}} \cdot A_2}$$

Skjuvdeformation

$$\delta_{\text{fin}}(x) := \delta_{\text{fin},g}(x) + \delta_{\text{fin},q}(x) + \delta_{\text{fin},s}(x)$$

Den slutgiltiga nedböjningen

Antag längd:

$$\overset{\text{ww}}{L} := 4.1\text{m}$$

$$\delta_{\text{fin}}(L) = 10.427 \cdot \text{mm} \quad \text{inte ok!}$$

Nedböjningen får ej överstiga L/400

$$\frac{L}{400} = 10.25 \cdot \text{mm}$$

$$\overset{\text{ww}}{L} := 4.0\text{m}$$

$$\delta_{\text{fin}}(L) = 9.484 \cdot \text{mm} \quad \text{ok!}$$

$$\frac{L}{400} = 10 \cdot \text{mm}$$

Punktlastkontroll

$$\frac{w}{F} \leq a$$

$$a := 1.5 \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

$$\overset{\text{ww}}{F} := 1\text{kN}$$

$$w := \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot \Sigma EI_{\text{inst}}} = 1.301 \cdot \text{mm}$$

$$\frac{w}{F} = 1.301 \cdot \frac{\text{mm}}{\text{kN}} < a \quad \text{ok!}$$

Impulshastighetsrespons

Lägsta egenfrekvens

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_L}{m}}$$

$$L = 4 \text{ m}$$

Från tidigare beräkningar

$$EI_L := \frac{\sum EI_{i,inst}}{0.6 \text{ m}} = 1.709 \times 10^6 \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{m}}$$

$$m := \frac{G_{golv}}{g} = 40.882 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$f_1 := \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_L}{m}} = 20.07 \cdot \text{Hz}$$

$f > 8 \text{ Hz}$ innebär att följande krav ska uppfyllas

$$v \leq b \cdot f_1 \cdot \zeta^{-1}$$

$$b := 100$$

$$\zeta := 0.01$$

$$v = \frac{4(0.4 + 0.6n_{40})}{m \cdot b \cdot L + 200}$$

$$n_{40} = \left[\left[\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right] \cdot \left(\frac{b}{L} \right)^4 \cdot \left(\frac{EI_L}{EI_b} \right) \right]^{0.25}$$

Här är b bredden på hela golvbjälklaget. Antag:

$$b_{\text{AA}} := 10 \text{ m}$$

$$EI_b := \frac{(h_1)^3}{12} \cdot E_{1,0} = 3.816 \times 10^3 \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{m}}$$

$$n_{40} := s^{-0.5} \left[\left[\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 s^2 \right] \cdot \left(\frac{b}{L} \right)^4 \cdot \left(\frac{EI_L}{EI_b} \right) \right]^{0.25} = 15.1$$

$$v := \frac{4(0.4 + 0.6n_{40})}{m \cdot b \cdot L + 200 \text{ kg}} \cdot \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{N} \cdot \text{s}^2} = 0.021 \cdot \frac{\text{m}}{\text{N} \cdot \text{s}^2}$$

$$b_{\text{AA}} := 100$$

$$\frac{b \cdot f_1 \cdot \zeta \cdot s^{-1}}{b} = 0.025$$

Alltså:

$$v < b \quad f_1 \cdot \zeta^{-1} \quad \text{ok!}$$

Ett bjälklag med 22mm OSB/4 och Kerto-S balk med mätten 45x220mm klarar alla ställda krav i bruksgränstillstånd vid en spännvidd på 4 m.

Brottgränstillstånd

Hållfasthetsvärden

Skiva: OSB/4

Tryck parallellt fibrerna:

$$f_{1,c,0,k} := 17\text{MPa}$$

Tryck vinkelrätt fibrerna:

$$f_{1,c,90,k} := 13.7\text{MPa}$$

Skjuvning

$$f_{1,v,k} := 6.9\text{MPa}$$

Skiktskjuvning

$$f_{1,r,k} := 1.1\text{MPa}$$

Balk: Kerto-S

Drag parallellt fibrerna:

$$f_{2,t,0,k} := 35\text{MPa}$$

Tryck parallellt fibrerna:

$$f_{2,c,0,k} := 35\text{MPa}$$

Skjuvning, högkant:

$$f_{2,v,0,edge,k} := 4.1\text{MPa}$$

Skjuvning, lågkant:

$$f_{2,v,0,flat,k} := 2.3\text{MPa}$$

Dimensionerande hållfasthet

Skiva

$$\gamma_{m,1} := 1.2$$

$$f_{1,c,0,d} := k_{mod,1} \cdot \frac{f_{1,c,0,k}}{\gamma_{m,1}} = 9.917 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{1,c,90,d} := k_{mod,1} \cdot \frac{f_{1,c,90,k}}{\gamma_{m,1}} = 7.992 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{1,v,d} := k_{mod,1} \cdot \frac{f_{1,v,k}}{\gamma_{m,1}} = 4.025 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{1,r,d} := k_{mod,1} \cdot \frac{f_{1,r,k}}{\gamma_{m,1}} = 0.642 \cdot \text{MPa}$$

Balk

$$\gamma_{m,2} := 1.2$$

$$f_{2,t,0,d} := k_{mod,2} \cdot \frac{f_{2,t,0,k}}{\gamma_{m,2}} = 23.333 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{2,c,0,d} := k_{mod,2} \cdot \frac{f_{2,c,0,k}}{\gamma_{m,2}} = 23.333 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{2,v,0,edge,d} := k_{mod,2} \cdot \frac{f_{2,v,0,edge,k}}{\gamma_{m,2}} = 2.733 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{2,v,0,flat,d} := k_{mod,2} \cdot \frac{f_{2,v,0,flat,k}}{\gamma_{m,2}} = 1.533 \cdot \text{MPa}$$

Last, moment- och tvärkraft

kNm := kN·m

$$g_{\text{golv}} = 0.241 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad q = 1.2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad L = 4 \text{ m} \quad (\text{sedan tidigare})$$

$$q_{\text{ULS}} := 1.35 \cdot g_{\text{golv}} + 1.5 \cdot q = 2.125 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{Ed}} := \frac{q_{\text{ULS}} \cdot L^2}{8} = 4.25 \cdot \text{kNm}$$

$$V_{\text{Ed}} := \frac{q_{\text{ULS}} \cdot L}{2} = 4.25 \cdot \text{kN}$$

Tryck- och dragspänningar

Omedelbar

Spänningar i skivan

$$\sigma_{\text{inst,skiva}}(z) := \frac{M_{\text{Ed}} \cdot E_{1,90}}{\Sigma EI_{\text{inst}}} \cdot z \quad -x_{\text{tp,inst}} \leq z \leq -x_{\text{tp,inst}} + h_1$$

Överkant

$$\sigma_{\text{inst,skiva}}(-x_{\text{tp,inst}}) = -1.372 \cdot \text{MPa}$$

Underkant

$$\sigma_{\text{inst,skiva}}(-x_{\text{tp,inst}} + h_1) = -1.08 \cdot \text{MPa}$$

Spänningar i balken

$$\sigma_{\text{inst,balk}}(z) := \frac{M_{\text{Ed}} \cdot E_{2,0}}{\Sigma EI_{\text{inst}}} \cdot z \quad -x_{\text{tp,inst}} + h_1 \leq z \leq h_1 + h_2 - x_{\text{tp,inst}}$$

Överkant

$$\sigma_{\text{inst,balk}}(-x_{\text{tp,inst}} + h_1) = -4.659 \cdot \text{MPa}$$

Underkant

$$\sigma_{\text{inst,balk}}(h_1 + h_2 - x_{\text{tp,inst}}) = 7.929 \cdot \text{MPa}$$

Slutgiltig

Spänningar i skivan

$$\sigma_{\text{fin,skiva}}(z) := \frac{M_{\text{Ed}} \cdot E_{1,90,\text{fin}}}{\Sigma EI_{\text{fin}}} \cdot z \quad -x_{\text{tp,fin}} \leq z \leq -x_{\text{tp,fin}} + h_1$$

Överkant

$$\sigma_{\text{fin,skiva}}(-x_{\text{tp,fin}}) = -1.105 \cdot \text{MPa}$$

Underkant

$$\sigma_{\text{fin,skiva}}(-x_{\text{tp,fin}} + h_1) = -0.888 \cdot \text{MPa}$$

Spänningar i balken

$$\sigma_{\text{fin,balk}}(z) := \frac{M_{\text{Ed}} \cdot E_{2,0,\text{fin}}}{\Sigma EI_{\text{fin}}} \cdot z \quad -x_{\text{tp,fin}} + h_1 \leq z \leq h_1 + h_2 - x_{\text{tp,fin}}$$

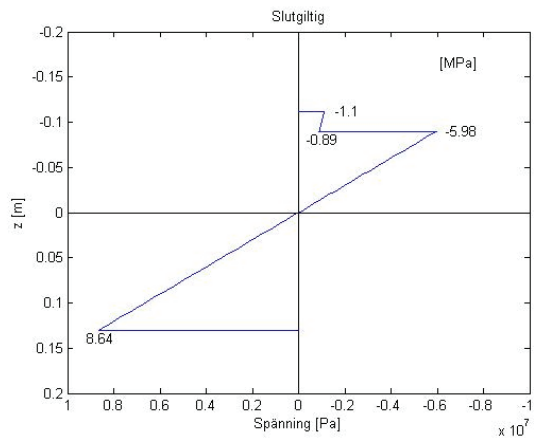
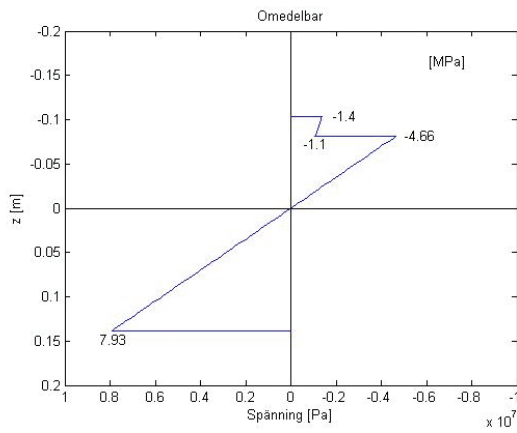
Överkant

$$\sigma_{\text{fin,balk}}(-x_{\text{tp,fin}} + h_1) = -5.982 \cdot \text{MPa}$$

Underkant

$$\sigma_{\text{fin,balk}}(h_1 + h_2 - x_{\text{tp,fin}}) = 8.639 \cdot \text{MPa}$$

$|f_{\text{Ed}}| < f_{\text{Rd}}$ för alla fall.



Skjuvspänningar

Skjuvspänningar i skivan

Störst skjuvspänning uppstår i skivans underkant

Omedelbar

$$A' := A_1 = 0.013 \text{ m}^2$$

$$z_1 := x_{tp,inst} - \frac{h_1}{2} = 0.092 \text{ m}$$

$$S'_A := A' \cdot z_1 = 1.22 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^3$$

$$\tau_{inst,ansl} := \frac{V_{Ed} \cdot S'_A \cdot E_{1,90}}{\Sigma EI_{inst} \cdot b_1} = 0.027 \cdot \text{MPa}$$

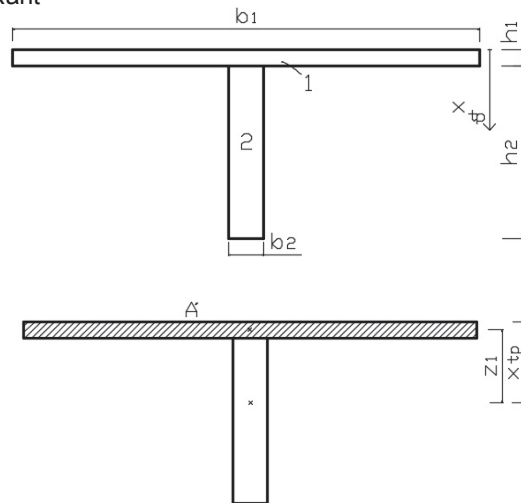
Slutgiltig

$$\underline{A'} := A_1 = 0.013 \text{ m}^2$$

$$\underline{z_1} := x_{tp,fin} - \frac{h_1}{2} = 0.101 \text{ m}$$

$$\underline{S'_A} := A' \cdot z_1 = 1.333 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^3$$

$$\underline{\tau_{inst,ansl}} := \frac{V_{Ed} \cdot S'_A \cdot E_{1,90,fin}}{\Sigma EI_{fin} \cdot b_1} = 0.022 \cdot \text{MPa}$$



Skjuvspänningar vid anslutningen mellan balk och skiva.

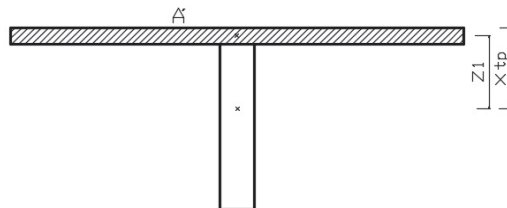
Omedelbar

$$A' := A_1 = 0.013 \text{ m}^2$$

$$z_1 := x_{tp,inst} - \frac{h_1}{2} = 0.092 \text{ m}$$

$$S'_{A1} := A' \cdot z_1 = 1.22 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^3$$

$$\tau_{inst,ansl} := \frac{V_{Ed} \cdot S'_{A1} \cdot E_{1,90}}{\Sigma EI_{inst} \cdot b_2} = 0.36 \cdot \text{MPa}$$



Slutgiltig

$$A' := A_1 = 0.013 \text{ m}^2$$

$$z_1 := x_{tp,fin} - \frac{h_1}{2} = 0.101 \text{ m}$$

$$S'_{A1} := A' \cdot z_1 = 1.333 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^3$$

$$\tau_{fin,ansl} := \frac{V_{Ed} \cdot S'_{A1} \cdot E_{1,90,fin}}{\Sigma EI_{fin} \cdot b_2} = 0.292 \cdot \text{MPa}$$

Skjuvspänningar i neutrala lagret:

Omedelbar

$$A'_1 := A_1 = 0.013 \text{ m}^2$$

$$z_1 := x_{tp,inst} - \frac{h_1}{2} = 0.092 \text{ m}$$

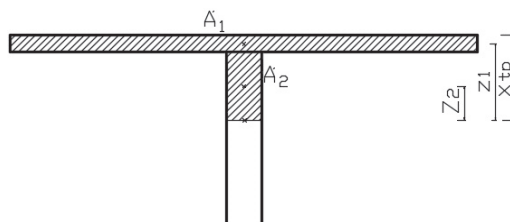
$$S'_{A1} := A'_1 \cdot z_1 = 1.22 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^3$$

$$A'_2 := (x_{tp,inst} - h_1) \cdot b_2 = 3.664 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$z_2 := x_{tp,inst} - h_1 - \frac{x_{tp,inst} - h_1}{2} = 0.041 \text{ m}$$

$$S'_{A2} := A'_2 \cdot z_2 = 1.492 \times 10^{-4} \cdot \text{m}^3$$

$$\tau_{inst,xtp} := \frac{V_{Ed} \cdot (S'_{A1} \cdot E_{1,90} + S'_{A2} \cdot E_{2,0})}{\Sigma EI_{inst} \cdot b_2} = 0.549 \cdot \text{MPa}$$



Slutgiltig

$$A'_{1w} := A_1 = 0.013 \text{ m}^2$$

$$z_{1w} := x_{tp,fin} - \frac{h_1}{2} = 0.101 \text{ m}$$

$$S'_{A1w} := A'_{1w} \cdot z_1 = 1.333 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^3$$

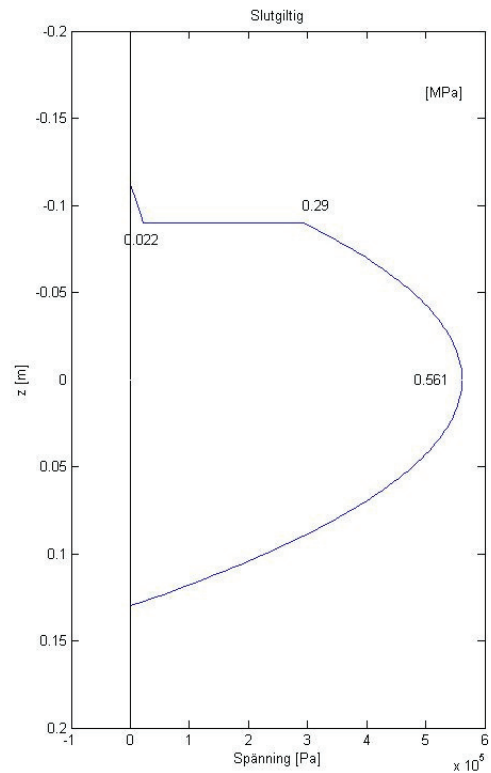
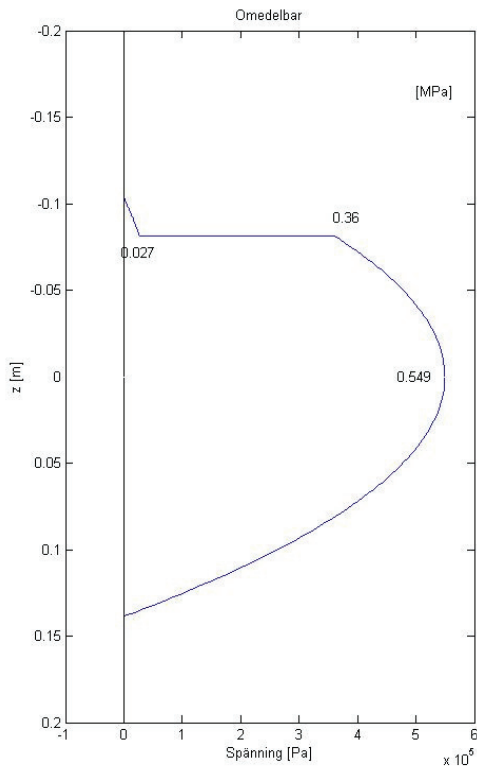
$$A'_{2w} := (x_{tp,fin} - h_1) \cdot b_2 = 4.051 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$z_{2w} := x_{tp,fin} - h_1 - \frac{x_{tp,fin} - h_1}{2} = 0.045 \text{ m}$$

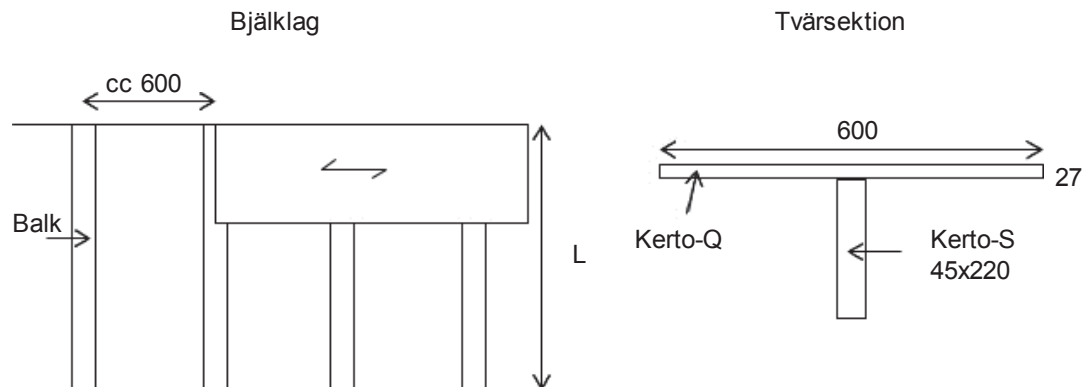
$$S'_{A2w} := A'_{2w} \cdot z_2 = 1.823 \times 10^{-4} \cdot \text{m}^3$$

$$\tau_{fin,xtp} := \frac{V_{Ed} \cdot (S'_{A1} \cdot E_{1,90,fin} + S'_{A2} \cdot E_{2,0,fin})}{\Sigma EI_{fin} \cdot b_2} = 0.561 \cdot \text{MPa}$$

$\tau_d < f_{v,d}$ för alla fall



Kombination 4: Kerto-S och Kerto-Q (Fiberriktning vinkelrätt mot balkens längdriktning)



Beräkningarna utförs enligt EN 1995-1-1:2004.
Mellanbjälklag i bostad => Klimatklass 1 kan antas.

Skiva: Kerto-Q

$$b_1 := 600\text{mm}$$

$$h_1 := 27\text{mm}$$

$$E_{1,0} := 10500\text{MPa}$$

$$E_{1,90} := 2000\text{MPa}$$

$$\rho_1 := 510 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$k_{\text{mod},1} := 0.8$$

$$k_{\text{def},1} := 0.6$$

Balk: Kerto-S

$$b_2 := 45\text{mm}$$

$$h_2 := 220\text{mm}$$

$$E_{2,0} := 13800\text{MPa}$$

$$G_2 := 600\text{MPa}$$

$$\rho_2 := 510 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$k_{\text{mod},2} := 0.8$$

$$k_{\text{def},2} := 0.6$$

Tvärsnittskonstanter

$$A_1 := b_1 \cdot h_1 = 0.016 \text{ m}^2$$

$$A_2 := b_2 \cdot h_2 = 9.9 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

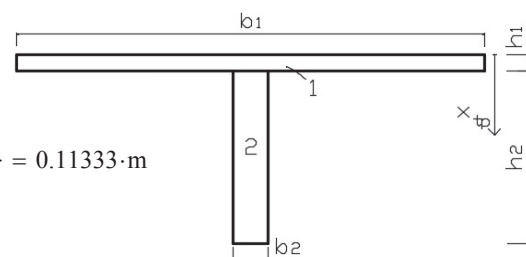
Omedelbar (index "inst" står för instant)

$$x_{\text{tp,inst}} := \frac{E_{1,90} \cdot A_1 \cdot \frac{h_1}{2} + E_{2,0} \cdot A_2 \cdot \left(h_1 + \frac{h_2}{2} \right)}{E_{1,90} \cdot A_1 + E_{2,0} \cdot A_2} = 0.11333 \cdot \text{m}$$

$$I_{1,\text{inst}} := \frac{b_1 \cdot (h_1)^3}{12} + A_1 \cdot \left(x_{\text{tp,inst}} - \frac{h_1}{2} \right)^2 = 1.624 \times 10^{-4} \cdot \text{m}^4$$

$$I_{2,\text{inst}} := \frac{b_2 \cdot (h_2)^3}{12} + A_2 \cdot \left(h_1 + \frac{h_2}{2} - x_{\text{tp,inst}} \right)^2 = 4.548 \times 10^{-5} \cdot \text{m}^4$$

$$\Sigma EI_{\text{inst}} := E_{1,90} \cdot I_{1,\text{inst}} + E_{2,0} \cdot I_{2,\text{inst}} = 9.524 \times 10^5 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^2$$



Slutgiltig (Index "fin" står för final)

Reducering av hållfasthetsvärden för att ta hänsyn till krypning

$$E_{1,90,fin} := \frac{E_{1,90}}{1 + k_{def,1}} = 1250 \cdot \text{MPa}$$

$$E_{2,0,fin} := \frac{E_{2,0}}{1 + k_{def,2}} = 8625 \cdot \text{MPa}$$

$$G_{2,fin} := \frac{G_2}{1 + k_{def,2}} = 375 \cdot \text{MPa}$$

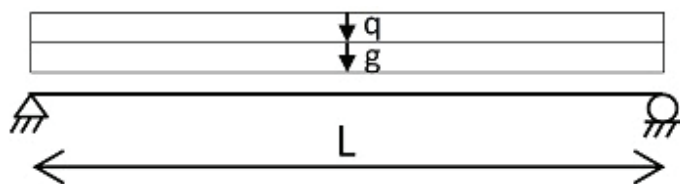
$$x_{tp,fin} := \frac{E_{1,90,fin} \cdot A_1 \cdot \frac{h_1}{2} + E_{2,0,fin} \cdot A_2 \cdot \left(h_1 + \frac{h_2}{2} \right)}{E_{1,90,fin} \cdot A_1 + E_{2,0,fin} \cdot A_2} = 0.11333 \cdot \text{m}$$

$$I_{1,fin} := \frac{b_1 \cdot (h_1)^3}{12} + A_1 \cdot \left(x_{tp,fin} - \frac{h_1}{2} \right)^2 = 1.624 \times 10^{-4} \cdot \text{m}^4$$

$$I_{2,fin} := \frac{b_2 \cdot (h_2)^3}{12} + A_2 \cdot \left(h_1 + \frac{h_2}{2} - x_{tp,fin} \right)^2 = 4.548 \times 10^{-5} \cdot \text{m}^4$$

$$\Sigma EI_{fin} := E_{1,90,fin} \cdot I_{1,fin} + E_{2,0,fin} \cdot I_{2,fin} = 5.953 \times 10^5 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^2$$

Laster



Gravitationskonstanten:

$$g := 9.82 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Egenvikt

$$cc := 0.6 \text{m}$$

$$G := \frac{(\rho_1 \cdot A_1 + \rho_2 \cdot A_2)}{cc} \cdot g = 0.218 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Balk och skiva

$$G_{gblgn} := 0.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Extravikt för golvbeläggning

$$G_{golv} := G + G_{gblgn} = 0.418 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$g_{golv} := G_{golv} \cdot cc = 0.251 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Nyttig last

$$Q := 2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad \text{Bostad}$$

$$q := Q \cdot cc = 1.2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Bruksgränstillstånd

Deformation

Slutgiltig

$$\delta_{\text{fin},g}(x) := \frac{5 \cdot g_{\text{golv}} \cdot x^4}{384 \cdot \Sigma EI_{\text{fin}}} \quad \text{Deformation orsakad av permanent last}$$

$$\delta_{\text{fin},q}(x) := \frac{5 \cdot q \cdot x^4}{384 \cdot \Sigma EI_{\text{fin}}} \quad \text{Deformation orsakad av nyttig last}$$

$$\delta_{\text{fin},s}(x) := \frac{(g_{\text{golv}} + q) \cdot x^2}{8 \cdot G_{2,\text{fin}} \cdot A_2} \quad \text{Skjuvdeformation}$$

$$\delta_{\text{fin}}(x) := \delta_{\text{fin},g}(x) + \delta_{\text{fin},q}(x) + \delta_{\text{fin},s}(x) \quad \text{Den slutgiltiga nedböjningen}$$

Antag längd:

$$\overset{\text{ww}}{L} := 4.2\text{m}$$

$$\delta_{\text{fin}}(L) = 10.736 \cdot \text{mm} \quad \text{inte ok!}$$

Nedböjningen får ej överstiga L/400

$$\frac{L}{400} = 10.5 \cdot \text{mm}$$

$$\overset{\text{ww}}{L} := 4.1\text{m}$$

$$\delta_{\text{fin}}(L) = 9.788 \cdot \text{mm} \quad \text{ok!}$$

$$\frac{L}{400} = 10.25 \cdot \text{mm}$$

Punktlastkontroll

$$\frac{w}{F} \leq a$$

$$a := 1.5 \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

$$\overset{\text{ww}}{F} := 1\text{kN}$$

$$w := \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot \Sigma EI_{\text{inst}}} = 1.508 \cdot \text{mm}$$

$$\frac{w}{F} = 1.508 \cdot \frac{\text{mm}}{\text{kN}} > a \quad \text{inte ok!}$$

Noggrannare kontroll enligt Ohlsson (1984)

$$EI_L := \frac{\Sigma EI_{\text{inst}}}{0.6\text{m}}$$

$$EI_b := \frac{(h_1)^3}{12} \cdot E_{1,0}$$

$$\beta := \frac{EI_L}{EI_b} \cdot \left(\frac{600\text{mm}}{3.5\text{m}} \right)^4 = 0.08$$

$$\kappa := -4.7\beta^2 + 2.9\beta + 0.4 = 0.601$$

$$\overset{\text{ww}}{w} := \kappa \cdot \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot \Sigma EI_{\text{inst}}} = 0.906 \cdot \text{mm} < a \quad \text{ok!}$$

Impulshastighetsrespons

Lägsta egenfrekvens

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_L}{m}}$$

$$L = 4.1 \text{ m}$$

Från tidigare beräkningar

$$EI_L := \frac{\Sigma EI_{i,inst}}{0.6 \text{ m}} = 1.587 \times 10^6 \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{m}}$$

$$m := \frac{G_{golv}}{g} = 42.552 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$f_1 := \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_L}{m}} = 18.048 \cdot \text{Hz}$$

$f > 8 \text{ Hz}$ innebär att följande krav ska uppfyllas

$$v \leq b \cdot f_1 \cdot \zeta^{-1}$$

$$b := 100$$

$$\zeta := 0.01$$

$$v = \frac{4(0.4 + 0.6n_{40})}{m \cdot b \cdot L + 200}$$

$$n_{40} = \left[\left[\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right] \cdot \left(\frac{b}{L} \right)^4 \cdot \left(\frac{EI_L}{EI_b} \right) \right]^{0.25}$$

Här är b bredden på hela golvbjälklaget. Antag:

$$b := 10 \text{ m}$$

$$EI_b := \frac{(h_1)^3}{12} \cdot E_{1,0} = 1.722 \times 10^4 \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{m}}$$

$$n_{40} := s^{-0.5} \left[\left[\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right] \cdot \left(\frac{b}{L} \right)^4 \cdot \left(\frac{EI_L}{EI_b} \right) \right]^{0.25} = 10.628$$

$$v := \frac{4(0.4 + 0.6n_{40})}{m \cdot b \cdot L + 200 \text{ kg}} \cdot \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{N} \cdot \text{s}^2} = 0.014 \cdot \frac{\text{m}}{\text{N} \cdot \text{s}^2}$$

$$b := 100$$

$$b \cdot f_1 \cdot \zeta \cdot s^{-1} = 0.023$$

Alltså:

$$v < b \cdot f_1 \cdot \zeta^{-1} \quad \text{ok!}$$

Ett bjälklag med 27mm Kerto-Q med fiberriktningen vinkelrätt mot balkens längdriktning och Kerto-S med måtten 45x220mm klarar alla ställda krav i bruksgränstillstånd vid en spännvidd på 4,1 m.

Brottgränstillstånd

Hållfasthetsvärden

Skiva: Kerto-Q

Tryck vinkelrätt fibrerna, lågkant:

$$f_{1,c,90,flat,k} := 1.8 \text{ MPa}$$

Skiktsskjuvning

$$f_{1,v,0,flat,k} := 1.3 \text{ MPa}$$

Balk: Kerto-S

Drag parallellt fibrerna:

$$f_{2,t,0,k} := 35 \text{ MPa}$$

Tryck parallellt fibrerna:

$$f_{2,c,0,k} := 35 \text{ MPa}$$

Längsskjuvning:

$$f_{2,v,0,edge,k} := 4.1 \text{ MPa}$$

Dimensionerande hållfasthet

Skiva

$$\gamma_{m,1} := 1.2$$

$$f_{1,v,0,flat,d} := k_{mod,1} \cdot \frac{f_{1,v,0,flat,k}}{\gamma_{m,1}} = 0.867 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{1,c,90,flat,d} := k_{mod,1} \cdot \frac{f_{1,c,90,flat,k}}{\gamma_{m,1}} = 1.2 \cdot \text{MPa}$$

Balk

$$\gamma_{m,2} := 1.2$$

$$f_{2,t,0,d} := k_{mod,2} \cdot \frac{f_{2,t,0,k}}{\gamma_{m,2}} = 23.33 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{2,c,0,d} := k_{mod,2} \cdot \frac{f_{2,c,0,k}}{\gamma_{m,2}} = 23.33 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{2,v,0,edge,d} := k_{mod,2} \cdot \frac{f_{2,v,0,edge,k}}{\gamma_{m,2}} = 2.73 \cdot \text{MPa}$$

Last, moment- och tvärkraft

kNm := kN·m

$$g_{\text{golv}} = 0.251 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad q = 1.2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad L = 4.1 \text{ m} \quad (\text{sedan tidigare})$$

$$q_{\text{ULS}} := 1.35 \cdot g_{\text{golv}} + 1.5 \cdot q = 2.138 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{Ed}} := \frac{q_{\text{ULS}} \cdot L^2}{8} = 4.493 \cdot \text{kNm} \quad V_{\text{Ed}} := \frac{q_{\text{ULS}} \cdot L}{2} = 4.384 \cdot \text{kN}$$

Tryck- och dragspänningar

Eftersom kryptalet k_{def} är samma för Kerto-Q och Kerto-S kommer inte spänningarna omfördelas på grund av krypning. Det innebär att omedelbar och slutgiltig spänning kommer vara lika med varann.

Spänningar i skivan

$$\sigma_{\text{fin,skiva}}(z) := \frac{M_{\text{Ed}} \cdot E_{1,90,\text{fin}}}{\Sigma EI_{\text{fin}}} \cdot z \quad -x_{\text{tp,fin}} \leq z \leq -x_{\text{tp,fin}} + h_1$$

Överkant

$$\sigma_{\text{fin,skiva}}(-x_{\text{tp,fin}}) = -1.069 \cdot \text{MPa}$$

Underkant

$$\sigma_{\text{fin,skiva}}(-x_{\text{tp,fin}} + h_1) = -0.815 \cdot \text{MPa}$$

Spänningar i balken

$$\sigma_{\text{fin,balk}}(z) := \frac{M_{\text{Ed}} \cdot E_{2,0,\text{fin}}}{\Sigma EI_{\text{fin}}} \cdot z \quad -x_{\text{tp,fin}} + h_1 \leq z \leq h_1 + h_2 - x_{\text{tp,fin}}$$

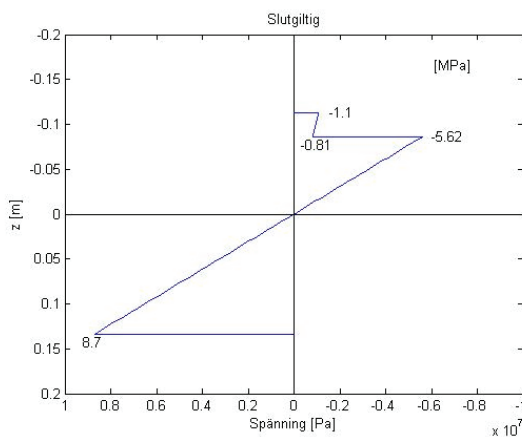
Överkant

$$\sigma_{\text{fin,balk}}(-x_{\text{tp,fin}} + h_1) = -5.62 \cdot \text{MPa}$$

Underkant

$$\sigma_{\text{fin,balk}}(h_1 + h_2 - x_{\text{tp,fin}}) = 8.703 \cdot \text{MPa}$$

$|f_{\text{Ed}}| < f_{\text{Rd}}$ för alla fall.



Skjuvspänningar

Detsamma gäller för skjuvspänningarna. Omedelbar och slutgiltig spänning kommer vara lika med varann eftersom k_{def} är samma.

Skjuvspänningar i skivan

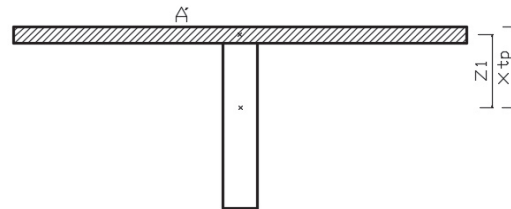
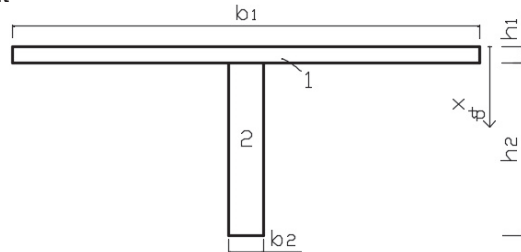
Störst skjuvspänning uppstår i skivans underkant

$$A' := A_1 = 0.016 \text{ m}^2$$

$$z_1 := x_{tp,fin} - \frac{h_1}{2} = 0.1 \text{ m}$$

$$S'_A := A' \cdot z_1 = 1.617 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^3$$

$$\tau_{inst,ansl} := \frac{V_{Ed} \cdot S'_A \cdot E_{1,90,fin}}{\Sigma EI_{fin} \cdot b_1} = 0.025 \cdot \text{MPa}$$



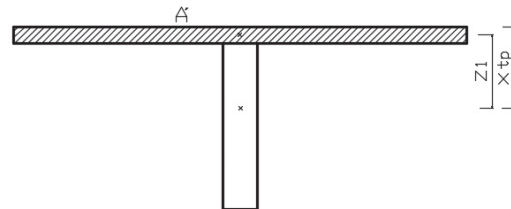
Skjuvspänningar vid anslutningen mellan balk och skiva.

$$A' := A_1 = 0.016 \text{ m}^2$$

$$z_1 := x_{tp,fin} - \frac{h_1}{2} = 0.1 \text{ m}$$

$$S'_A := A' \cdot z_1 = 1.617 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^3$$

$$\tau_{fin,ansl} := \frac{V_{Ed} \cdot S'_A \cdot E_{1,90,fin}}{\Sigma EI_{fin} \cdot b_2} = 0.331 \cdot \text{MPa}$$



Skjuvspänningar i neutrala lagret:

$$A'_1 := A_1 = 0.016 \text{ m}^2$$

$$z_1 := x_{tp,fin} - \frac{h_1}{2} = 0.1 \text{ m}$$

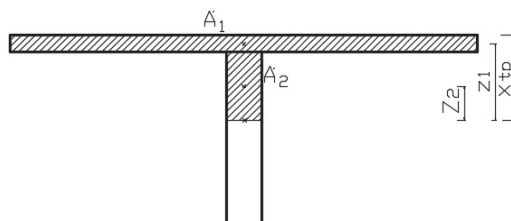
$$S'_{A1} := A'_1 \cdot z_1 = 1.617 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^3$$

$$A'_2 := (x_{tp,fin} - h_1) \cdot b_2 = 3.885 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

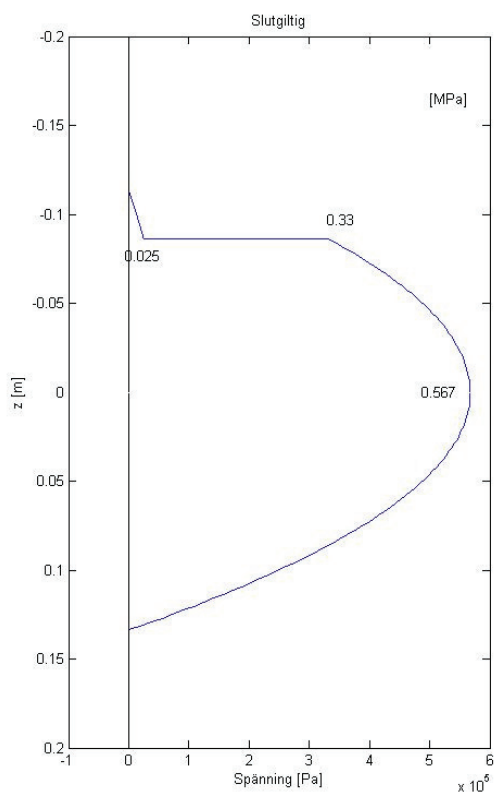
$$z_2 := x_{tp,fin} - h_1 - \frac{x_{tp,fin} - h_1}{2} = 0.043 \text{ m}$$

$$S'_{A2} := A'_2 \cdot z_2 = 1.677 \times 10^{-4} \cdot \text{m}^3$$

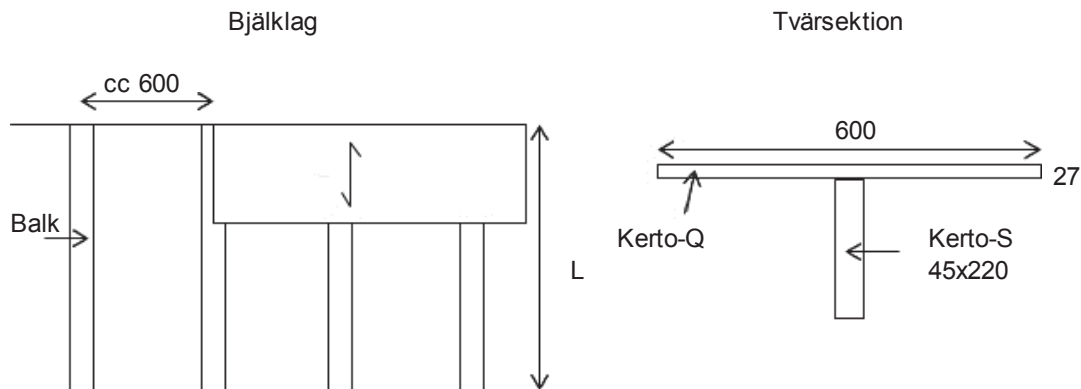
$$\tau_{fin,xtp} := \frac{V_{Ed} \cdot (S'_{A1} \cdot E_{1,90,fin} + S'_{A2} \cdot E_{2,0,fin})}{\Sigma EI_{fin} \cdot b_2} = 0.567 \cdot \text{MPa}$$



$\tau_d < f_{v,d}$ för alla fall



Kombination 5: Kerto S och Kerto-Q (Fiberriktning parallell med balkens längdriktning)



Beräkningarna utförs enligt EN 1995-1-1:2004.
Mellanbjälklag i bostad => Klimatklass 1 kan antas.

Skiva: Kerto-Q

$$b_1 := 600\text{mm}$$

$$h_1 := 27\text{mm}$$

$$E_{1,0} := 10500\text{MPa}$$

$$E_{1,90} := 2000\text{MPa}$$

$$\rho_1 := 510 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$k_{\text{mod},1} := 0.8$$

$$k_{\text{def},1} := 0.6$$

Balk: Kerto-S

$$b_2 := 45\text{mm}$$

$$h_2 := 220\text{mm}$$

$$E_{2,0} := 13800\text{MPa}$$

$$G_2 := 600\text{MPa}$$

$$\rho_2 := 510 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$k_{\text{mod},2} := 0.8$$

$$k_{\text{def},2} := 0.6$$

Tvärsnittskonstanter

$$A_1 := b_1 \cdot h_1 = 0.016 \text{ m}^2$$

$$A_2 := b_2 \cdot h_2 = 9.9 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

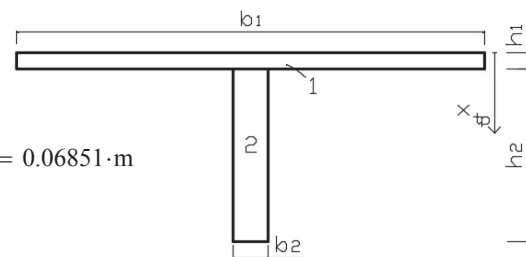
Omedelbar (index "inst" står för instant)

$$x_{\text{tp,inst}} := \frac{E_{1,0} \cdot A_1 \cdot \frac{h_1}{2} + E_{2,0} \cdot A_2 \cdot \left(h_1 + \frac{h_2}{2} \right)}{E_{1,0} \cdot A_1 + E_{2,0} \cdot A_2} = 0.06851 \cdot \text{m}$$

$$I_{1,\text{inst}} := \frac{b_1 \cdot (h_1)^3}{12} + A_1 \cdot \left(x_{\text{tp,inst}} - \frac{h_1}{2} \right)^2 = 5.001 \times 10^{-5} \cdot \text{m}^4$$

$$I_{2,\text{inst}} := \frac{b_2 \cdot (h_2)^3}{12} + A_2 \cdot \left(h_1 + \frac{h_2}{2} - x_{\text{tp,inst}} \right)^2 = 8.637 \times 10^{-5} \cdot \text{m}^4$$

$$\Sigma EI_{\text{inst}} := E_{1,0} \cdot I_{1,\text{inst}} + E_{2,0} \cdot I_{2,\text{inst}} = 1.717 \times 10^6 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^2$$



Slutgiltig (Index "fin" står för final)

Reducering av hållfasthetsvärden för att ta hänsyn till krypning

$$E_{1,0,fin} := \frac{E_{1,0}}{1 + k_{def,1}} = 6562.5 \cdot \text{MPa}$$

$$E_{2,0,fin} := \frac{E_{2,0}}{1 + k_{def,2}} = 8625 \cdot \text{MPa}$$

$$G_{2,fin} := \frac{G_2}{1 + k_{def,2}} = 375 \cdot \text{MPa}$$

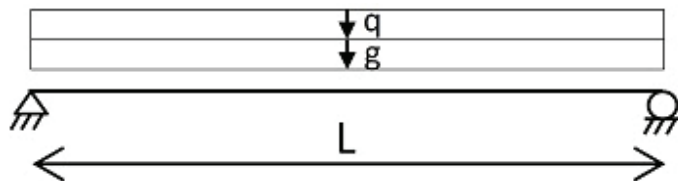
$$x_{tp,fin} := \frac{E_{1,0,fin} \cdot A_1 \cdot \frac{h_1}{2} + E_{2,0,fin} \cdot A_2 \cdot \left(h_1 + \frac{h_2}{2}\right)}{E_{1,0,fin} \cdot A_1 + E_{2,0,fin} \cdot A_2} = 0.06851 \cdot \text{m}$$

$$I_{1,fin} := \frac{b_1 \cdot (h_1)^3}{12} + A_1 \cdot \left(x_{tp,fin} - \frac{h_1}{2}\right)^2 = 5.001 \times 10^{-5} \cdot \text{m}^4$$

$$I_{2,fin} := \frac{b_2 \cdot (h_2)^3}{12} + A_2 \cdot \left(h_1 + \frac{h_2}{2} - x_{tp,fin}\right)^2 = 8.637 \times 10^{-5} \cdot \text{m}^4$$

$$\Sigma EI_{fin} := E_{1,0,fin} \cdot I_{1,fin} + E_{2,0,fin} \cdot I_{2,fin} = 1.073 \times 10^6 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^2$$

Laster



Gravitationskonstanten:

$$g := 9.82 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Egenvikt

$$cc := 0.6 \text{m}$$

$$G_{ww} := \frac{(\rho_1 \cdot A_1 + \rho_2 \cdot A_2)}{cc} \cdot g = 0.218 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Balk och skiva

$$G_{gblgn} := 0.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Extravikt för golvbeläggning

$$G_{golv} := G + G_{gblgn} = 0.418 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$g_{golv} := G_{golv} \cdot cc = 0.251 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Nyttig last

$$Q := 2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad \text{Bostad}$$

$$q := Q \cdot cc = 1.2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Bruksgränstillstånd

Deformation

Slutgiltig

$$\delta_{\text{fin},g}(x) := \frac{5 \cdot g_{\text{golv}} \cdot x^4}{384 \cdot \Sigma EI_{\text{fin}}} \quad \text{Deformation orsakad av permanent last}$$

$$\delta_{\text{fin},q}(x) := \frac{5 \cdot q \cdot x^4}{384 \cdot \Sigma EI_{\text{fin}}} \quad \text{Deformation orsakad av nyttig last}$$

$$\delta_{\text{fin},s}(x) := \frac{(g_{\text{golv}} + q) \cdot x^2}{8 \cdot G_{2,\text{fin}} \cdot A_2} \quad \text{Skjuvdeformation}$$

$$\delta_{\text{fin}}(x) := \delta_{\text{fin},g}(x) + \delta_{\text{fin},q}(x) + \delta_{\text{fin},s}(x) \quad \text{Den slutgiltiga nedböjningen}$$

Antag längd:

$$\overset{\text{ww}}{L} := 5.1\text{m}$$

$$\delta_{\text{fin}}(L) = 13.179 \cdot \text{mm} \quad \text{inte ok!}$$

Nedböjningen får ej överstiga L/400

$$\frac{L}{400} = 12.75 \cdot \text{mm}$$

$$\overset{\text{ww}}{L} := 5.0\text{m}$$

$$\delta_{\text{fin}}(L) = 12.223 \cdot \text{mm} \quad \text{ok!}$$

$$\frac{L}{400} = 12.5 \cdot \text{mm}$$

Punktlastkontroll

$$\frac{w}{F} \leq a$$

$$a := 1.5 \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

$$F := 1\text{kN}$$

$$w := \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot \Sigma EI_{\text{inst}}} = 1.517 \cdot \text{mm}$$

$$\frac{w}{F} = 1.517 \cdot \frac{\text{mm}}{\text{kN}} > a \quad \text{inte ok!}$$

Noggrannare kontroll enligt Ohlsson (1984)

$$EI_L := \frac{\Sigma EI_{\text{inst}}}{0.6\text{m}}$$

$$EI_b := \frac{(h_1)^3}{12} \cdot E_{1,0}$$

$$\beta := \frac{EI_L}{EI_b} \cdot \left(\frac{600\text{mm}}{3.5\text{m}} \right)^4 = 0.143$$

$$\kappa := -4.7\beta^2 + 2.9\beta + 0.4 = 0.719$$

$$\overset{\text{ww}}{w} := \kappa \cdot \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot \Sigma EI_{\text{inst}}} = 1.091 \cdot \text{mm} < a \quad \text{ok!}$$

Impulshastighetsrespons

Lägsta egenfrekvens

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_L}{m}}$$

$$L = 5 \text{ m}$$

$$EI_L := \frac{\sum EI_{i,\text{inst}}}{0.6\text{m}} = 2.862 \times 10^6 \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{m}}$$

$$m := \frac{G_{\text{golv}}}{g} = 42.552 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$f_1 := \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_L}{m}} = 16.294 \cdot \text{Hz}$$

$f > 8\text{Hz}$ innebär att följande krav ska uppfyllas

$$v \leq b \cdot f_1 \cdot \zeta^{-1}$$

$$b := 100$$

$$\zeta := 0.01$$

$$v = \frac{4(0.4 + 0.6n_{40})}{m \cdot b \cdot L + 200}$$

$$n_{40} = \left[\left[\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right] \cdot \left(\frac{b}{L} \right)^4 \cdot \left(\frac{EI_L}{EI_b} \right) \right]^{0.25}$$

Här är b bredden på hela golvbjälklaget. Antag:

$$b_{\text{AA}} := 10\text{m}$$

$$EI_b := \frac{(h_1)^3}{12} \cdot E_{1,90} = 3.28 \times 10^3 \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{m}}$$

$$n_{40} := s^{-0.5} \left[\left[\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1s^2 \right] \cdot \left(\frac{b}{L} \right)^4 \cdot \left(\frac{EI_L}{EI_b} \right) \right]^{0.25} = 16.275$$

$$v := \frac{4(0.4 + 0.6n_{40})}{m \cdot b \cdot L + 200\text{kg}} \cdot \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{N} \cdot \text{s}^2} = 0.017 \cdot \frac{\text{m}}{\text{N} \cdot \text{s}^2}$$

$$b_{\text{AA}} := 100$$

$$\frac{b_{\text{AA}} \cdot f_1 \cdot \zeta \cdot s^{-1}}{b} = 0.021$$

Alltså:

$$v < b^{f_1 \cdot \zeta - 1} \quad \text{ok!}$$

Ett bjälklag med 27mm Kerto-Q med fiberriktningen i balkens längdriktning och Kerto-S som balk med måtten 45x220mm klarar alla ställda krav i bruksgränstillstånd vid en spännvidd på 5,0 m.

Brottgränstillstånd

Hållfasthetsvärden

Skiva: Kerto-Q

Tryck parallellt fibreerna:

$$f_{1,c,0,k} := 26\text{MPa}$$

Skiktskjuvning

$$f_{1,v,0,flat,k} := 1.3\text{MPa}$$

Balk: Kerto-S

Drag parallellt fibreerna:

$$f_{2,t,0,k} := 35\text{MPa}$$

Tryck parallellt fibreerna:

$$f_{2,c,0,k} := 35\text{MPa}$$

Längsskjuvning:

$$f_{2,v,0,edge,k} := 4.1\text{MPa}$$

Dimensionerande hållfasthet

Skiva

$$\gamma_{m,1} := 1.2$$

$$f_{1,c,0,d} := k_{\text{mod},1} \cdot \frac{f_{1,c,0,k}}{\gamma_{m,1}} = 17.33 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{1,v,0,flat,d} := k_{\text{mod},1} \cdot \frac{f_{1,v,0,flat,k}}{\gamma_{m,1}} = 0.867 \cdot \text{MPa}$$

Balk

$$\gamma_{m,2} := 1.2$$

$$f_{2,t,0,d} := k_{\text{mod},2} \cdot \frac{f_{2,t,0,k}}{\gamma_{m,2}} = 23.33 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{2,c,0,d} := k_{\text{mod},2} \cdot \frac{f_{2,c,0,k}}{\gamma_{m,2}} = 23.33 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{2,v,0,edge,d} := k_{\text{mod},2} \cdot \frac{f_{2,v,0,edge,k}}{\gamma_{m,2}} = 2.73 \cdot \text{MPa}$$

Last, moment- och tvärkraft

kNm := kN·m

$$g_{\text{golv}} = 0.251 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad q = 1.2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad L = 5 \text{ m} \quad (\text{sedan tidigare})$$

$$q_{\text{ULS}} := 1.35 \cdot g_{\text{golv}} + 1.5 \cdot q = 2.138 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{Ed}} := \frac{q_{\text{ULS}} \cdot L^2}{8} = 6.683 \cdot \text{kNm} \quad V_{\text{Ed}} := \frac{q_{\text{ULS}} \cdot L}{2} = 5.346 \cdot \text{kN}$$

Tryck- och dragspänningar

Eftersom kryptalet k_{def} är samma för Kerto-Q och Kerto-S kommer inte spänningarna omfördelas på grund av krypning. Det innebär att omedelbar och slutgiltig spänning kommer vara lika med varann.

Spänningar i skivan

$$\sigma_{\text{fin,skiva}}(z) := \frac{M_{\text{Ed}} \cdot E_{1,0,\text{fin}}}{\Sigma EI_{\text{fin}}} \cdot z \quad -x_{\text{tp,fin}} \leq z \leq -x_{\text{tp,fin}} + h_1$$

Överkant

$$\sigma_{\text{fin,skiva}}(-x_{\text{tp,fin}}) = -2.8 \cdot \text{MPa}$$

Underkant

$$\sigma_{\text{fin,skiva}}(-x_{\text{tp,fin}} + h_1) = -1.696 \cdot \text{MPa}$$

Spänningar i balken

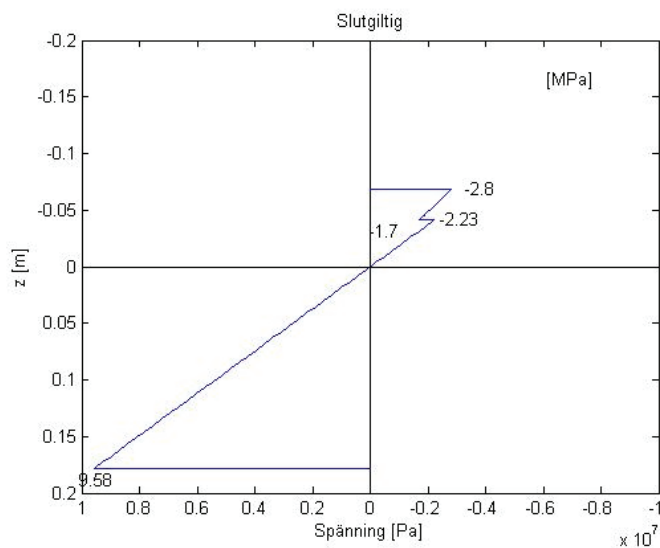
$$\sigma_{\text{fin,balk}}(z) := \frac{M_{\text{Ed}} \cdot E_{2,0,\text{fin}}}{\Sigma EI_{\text{fin}}} \cdot z \quad -x_{\text{tp,fin}} + h_1 \leq z \leq h_1 + h_2 - x_{\text{tp,fin}}$$

Överkant

$$\sigma_{\text{fin,balk}}(-x_{\text{tp,fin}} + h_1) = -2.23 \cdot \text{MPa}$$

Underkant

$$\sigma_{\text{fin,balk}}(h_1 + h_2 - x_{\text{tp,fin}}) = 9.587 \cdot \text{MPa}$$



Skjuvspänningar

Skjuvspänningar i skivan

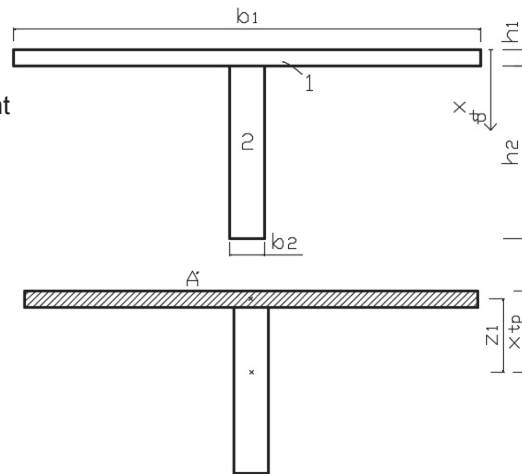
Störst skjuvspänning uppstår i skivans underkant

$$A' := A_1 = 0.016 \text{ m}^2$$

$$z_1 := x_{tp,fin} - \frac{h_1}{2} = 0.055 \text{ m}$$

$$S'_A := A' \cdot z_1 = 8.912 \times 10^{-4} \cdot \text{m}^3$$

$$\tau_{fin,skiva} := \frac{V_{Ed} \cdot S'_A \cdot E_{1,0,fin}}{\Sigma EI_{fin} \cdot b_1} = 0.049 \cdot \text{MPa}$$



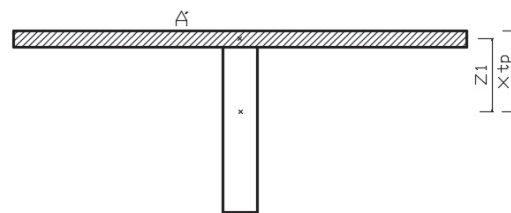
Skjuvspänningar vid anslutningen mellan balk och skiva.

$$A' := A_1 = 0.016 \text{ m}^2$$

$$z_1 := x_{tp,fin} - \frac{h_1}{2} = 0.055 \text{ m}$$

$$S'_A := A' \cdot z_1 = 8.912 \times 10^{-4} \cdot \text{m}^3$$

$$\tau_{fin,ansl} := \frac{V_{Ed} \cdot S'_A \cdot E_{1,0,fin}}{\Sigma EI_{fin} \cdot b_2} = 0.647 \cdot \text{MPa}$$



Skjuvspänningar i neutrala lagret:

$$A'_1 := A_1 = 0.016 \text{ m}^2$$

$$z_1 := x_{tp,fin} - \frac{h_1}{2} = 0.055 \text{ m}$$

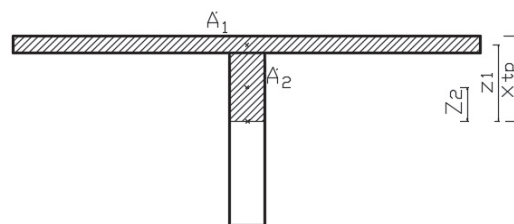
$$S'_{A1} := A'_1 \cdot z_1 = 8.912 \times 10^{-4} \cdot \text{m}^3$$

$$A'_2 := (x_{tp,fin} - h_1) \cdot b_2 = 1.868 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$z_2 := x_{tp,fin} - h_1 - \frac{x_{tp,fin} - h_1}{2} = 0.021 \text{ m}$$

$$S'_{A2} := A'_2 \cdot z_2 = 3.877 \times 10^{-5} \cdot \text{m}^3$$

$$\tau_{fin,xtp} := \frac{V_{Ed} \cdot (S'_{A1} \cdot E_{1,0,fin} + S'_{A2} \cdot E_{2,0,fin})}{\Sigma EI_{fin} \cdot b_2} = 0.684 \cdot \text{MPa}$$



$\tau_d < f_{v,d}$ för alla fall

