

Dimensionering av limträbalkar av olika geometriska former

Alexander Björkholm

Examensarbete för ingenjör (YH)-examen

Utbildning i byggnads- och samhällsteknik

Raseborg 2024

EXAMENSARBETE

Författare: Alexander Björkholm

Utbildning och ort: Utbildning i byggnads och samhällsteknik, ingenjör (YH), Raseborg

Inriktning: Konstruktionsplanering

Handledare: Johan Degerlund

Titel: Dimensionering av limträbalkar av olika geometriska former

Datum: 29.3.2024 Sidantal: 63

Bilagor: 3

Abstrakt

Konstruktionsmaterialet limträ förekommer alltmer i byggnader, vilket eventuellt kan förknippas med materialets unika egenskaper, som består av styrka, flexibilitet och hållbarhet. Limträ förekommer till stor del som bärande konstruktion, vilken vanligtvis består av fritt upplagda balkar placerade på pelare. I byggnader där spännvidden är längre kan limträets unika egenskaper utnyttjas, genom att man utformar balkarna med varierande höjd i tvärsnittet eller krökta tvärsnitt. Syftet med detta examensarbete var att undersöka och jämföra hur formen på tre olika limträbalkar påverkar hållfastheten av balkarna. De limträbalkar som behandlades i examensarbetet var sadelbalk, hängbuksbalk och bumerangbalk.

Målet med examensarbetet var att skapa en bättre förståelse för hur limträbalkar med olika geometriska former fungerar som bärande konstruktioner, samt hur deras dimensioneringsgång utförs. Målet var också att framställa ett trovärdigt resultat av dimensionering av de behandlade limträbalkarna, vilket kunde användas för att undersöka och jämföra hur formen påverkar hållfastheten av balkarna. Examensarbetet utfördes som en teoretisk studie där arbetet tillämpade exempelberäkningar, handböcker, Eurokoder och RIL böcker för att framställa resultaten. Till studien tillhörde en teoretisk del där konstruktionsmaterialet limträ behandlades följt av en beräkningsdel där de huvudsakliga resultaten framställdes från.

Beräkningarna antyder att hållfastheten av de behandlade limträbalkarna delvis påverkas av balkarnas form. Limträbalkarnas form påverkar böjhållfastheten, men resultaten visar inte avsevärda skillnader mellan balkarna. Beräkningarna visar att dragspänningen vinkelrätt mot fiberriktningen överstiger draghållfastheten vinkelrätt mot fiberriktningen för bumerangbalken. Denna avvikelse är också den största procentuella skillnaden jämfört mellan alla resultat. Resultatet antyder att limträbalkarnas form inte har någon betydande påverkan för skjuvhållfastheten vid stöden. Däremot har formen av bumerangbalken en positiv effekt på stämpeltrycket jämfört med sadelbalken och hängbuksbalken.

Språk: svenska

Nyckelord: limträ, dimensionering, sadelbalk, hängbuksbalk, bumerangbalk

OPINNÄYTETYÖ

Tekijä: Alexander Björkholm

Koulutus ja paikkakunta: Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, insinööri (AMK), Raasepori

Suuntautumisvaihtoehto: Rakennesuunnittelu

Ohjaaja: Johan Degerlund

Nimike: Liimapuupalkkien mitoitus eri geometrisissa muodoissa

Päivämäärä: 29.3.2024 Sivumäärä: 63

Liitteet: 3

Tiivistelmä

Rakennusmateriaali liimapuu esiintyy yhä enemmän rakennuksissa, mikä saattaa liittyä materiaalin ainutlaatuisiin ominaisuuksiin, kuten lujuuteen, joustavuuteen ja kestävyteen. Liimapuuta käytetään suurelta osin kantavana rakenteena, joka koostuu yleensä vapaasti asetetuista palkeista sijoitettuna pylväille. Rakennuksissa, joissa jänneväli on pidempi, voidaan hyödyntää liimapuun ainutlaatuisia ominaisuuksia muotoilemalla palkit vaihtelevalla poikkileikkauksen korkeudella tai kaarevilla poikkileikkauksilla. Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia ja vertailla kolmen eri liimapuupalkin muodon vaikutusta palkkien lujuuteen. Opinnäytetyön kohteena olivat harjapalkki, mahapalkki ja bumerangipalkki.

Opinnäytetyön tavoitteena oli lisätä ymmärrystä siitä, miten erimuotoiset liimapuupalkit toimivat kantavina rakenteina, sekä miten niiden mitoitus suoritetaan. Tavoitteena oli myös tuottaa uskottavaa tulosta käsiteltyjen liimapuupalkkien mitoituksesta, jota voitaisiin käyttää tutkimaan ja vertailemaan muodon vaikutusta palkkien lujuuteen. Opinnäytetyö suoritettiin teoreettisena tutkimuksena, jossa käytettiin esimerkkilaskelmia, käsikirjoja, eurokoodeja ja RIL-kirjoja tulosten tuottamiseksi. Tutkimukseen sisältyi teoreettinen osuus, jossa käsiteltiin liimapuun rakennusmateriaalia, ja laskennallinen osuus, jossa pääasialliset tulokset esitettiin.

Laskelmat viittaavat siihen, että käsiteltyjen liimapuupalkkien lujuuteen osittain vaikuttaa niiden muoto. Liimapuupalkkien muoto vaikuttaa taivutuslujuuteen, mutta tulokset eivät osoita merkittäviä eroja palkkien välillä. Laskelmat osoittavat, että vetolujuus poikittain kuitusuuntaan ylittää vetolujuuden poikittain kuitusuuntaan bumerangipalkissa. Tämä poikkeama on myös suurin prosentuaalinen ero kaikkien tulosten välillä. Tulokset viittaavat siihen, että liimapuupalkkien muodolla ei ole merkittävää vaikutusta leikkauslujuuteen tukikohdissa. Sen sijaan bumerangipalkin muodolla on positiivinen vaikutus puristusvoimaan verrattuna harjapalkkiin ja mahapalkkiin.

Kieli: ruotsi

Avainsanat: liimapuu, mitoitus, harjapalkki, mahapalkki, bumerangipalkki

BACHELOR'S THESIS

Author: Alexander Björkholm

Degree Programme: Civil and Construction Engineering, Raasepori

Specialisation: Structural Design

Supervisor: Johan Degerlund

Title: Dimensioning of Glued-Laminated Timber Beams in Various Geometric Shapes

Date: 29.3.2024 Number of pages: 63

Appendices: 3

Abstract

The construction material glued-laminated timber is increasingly common in buildings, which may be associated with the material's unique properties, consisting of strength, flexibility, and durability. Glued-laminated timber is largely used as load-bearing structure, typically consisting of simply supported beams placed on columns. In buildings where the span is longer, the unique properties of glued-laminated timber can be utilized by designing beams with varying cross-sectional heights or curved cross-sections. The purpose of this thesis was to investigate and compare how the shape of three different glued-laminated timber beams affects the strength of the beams. The glued-laminated timber beams studied in the thesis were double tapered beam, fish belly beam, and pitched cambered beam.

The aim of the thesis was to create a better understanding of how glued-laminated timber beams with different geometric shapes function as load-bearing structures, as well as how their design process is carried out. The goal was also to produce a credible result of the design of the treated glued-laminated timber beams, which could be used to examine and compare how the shape affects the strength of the beams. The thesis was conducted as a theoretical study, employing example calculations, handbooks, Eurocodes, and RIL books to produce the results. The study consisted of a theoretical part, where the construction material glulam was discussed, followed by a calculation part where the main results were derived from.

The calculations suggest that the strength of the treated glued-laminated timber beams is partially influenced by the shape of the beams. The shape of the glued-laminated timber beams affects the bending strength, but the results do not show significant differences between the beams. The calculations indicated that the tensile stress perpendicular to the grain exceeds the tensile strength perpendicular to the grain for the pitched cambered beam. This deviation is also the largest percentage difference compared to all results. The result suggested that the shape of the glued-laminated timber beams does not have a significant impact on the shear strength at the supports. However, the shape of the pitched cambered beam has a positive effect on the bearing pressure compared to the double tapered beam and fish belly beam.

Language: Swedish

Key words: glued-laminated timber, dimensioning, double tapered beam, fish belly beam, pitched cambered beam

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	1
1.1	Syfte och mål.....	1
1.2	Metoder och avgränsningar.....	2
2	Limträ som konstruktionsmaterial.....	3
2.1	Egenskaper.....	4
2.1.1	Användning av lim.....	4
2.1.2	Hållfasthet.....	5
2.1.3	Brandegenskaper.....	7
2.2	Tillverkningsprocess.....	9
2.3	Olika former av limträbalkar.....	10
2.3.1	Balkar med varierande tvärsnittshöjd.....	10
2.3.2	Krökta balkar och bumerangbalkar.....	12
3	Grunder för dimensionering av träkonstruktioner.....	14
3.1	Belastningar.....	14
3.2	Gränstillstånd.....	16
3.2.1	Brottgränstillstånd.....	17
3.2.2	Brukgränstillstånd.....	17
3.2.3	Lastkombinationer.....	18
3.3	Material- och säkerhetsfaktorer.....	20
3.3.1	Klimatklasser.....	20
3.3.2	Belastningens varaktighet.....	21
3.3.3	Krypning.....	22
3.3.4	Partialkoefficienter.....	23
3.3.5	Dimensionerande hållfasthet.....	24
4	Dimensioneringsgången av limträbalkar.....	26
4.1	Sadelbalk.....	26
4.1.1	Böjhållfasthet i det dimensionerande tvärsnittet.....	26
4.1.2	Böjhållfasthet vid åsen.....	29
4.1.3	Draghållfasthet vid åsen.....	31
4.1.4	Kombinerat drag- och skjuvhållfasthet vid åsen.....	33
4.1.5	Skjuvhållfasthet vid stöden.....	34
4.1.6	Stämpeltryck.....	35
4.1.7	Nedböjning.....	37
4.1.8	Vippning.....	39
4.1.9	Stabiliserande stöd i y-led.....	41
4.2	Hängbuksbalk.....	44

4.2.1	Anpassade dimensioneringsmetoder.....	45
4.2.2	Gemensamma dimensioneringsmetoder.....	46
4.3	Bumerangbalk.....	47
4.3.1	Anpassade dimensioneringsmetoder.....	47
4.3.2	Gemensamma dimensioneringsmetoder.....	51
5	Dimensioneringsexempel av limträbalkar	52
5.1	Belastningar	52
5.2	Teknisk data.....	52
5.3	Uppskattning av dimensioner.....	53
6	Analys av resultat.....	56
7	Sammanfattning.....	60
8	Källor.....	62
Bilagor		

1 Inledning

Användningen av konstruktionsmaterialet limträ i byggnader förekommer alltmer, vilket eventuellt kan förknippas med materialets unika egenskaper i form av stryka, flexibilitet och hållbarhet. Limträ är ett utmärkt konstruktionsmaterial för krävande konstruktioner. Användningen av konstruktionsmaterialet tillämpas i både mindre och större byggnader (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 1 s. 2).

Limträ förekommer ofta i byggnader som den bärande konstruktionen, vilken vanligtvis består av fritt upplagda balkar placerade på pelare. Raka limträbalkar med jämnt tvärsnitt tillämpas ofta vid byggnader med korta spännvidder. I byggnader där spännvidderna är längre kan limträets unika egenskap utnyttjas, genom att man utformar balkar med varierande höjd i tvärsnittet eller krökta tvärsnitt. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 3 s. 3) Limträbalkar med varierande höjd i tvärsnittet eller krökta tvärsnitt kan bidra till unika arkitektoniska former i byggnader, bilda olika lutningar på tak och möjliggöra variation i konstruktioners vägg- och takhöjd (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 7 s. 2).

1.1 Syfte och mål

Syftet med examensarbetet är att undersöka och jämföra hur formen på tre olika limträbalkarna påverkar hållfastheten av balkarna. Limträbalkarna, som undersöks i arbetet är sadelbalk, hängbuksbalk och bumerangbalk. Målet med examensarbetet är att skapa en bättre förståelse för hur limträbalkar med olika geometriska former fungerar som bärande konstruktioner, samt hur deras dimensioneringsgång utförs. Målet är också att framställa ett trovärdigt resultat av dimensioneringen av limträbalkarna, som kan användas för att undersöka och jämföra hur formen påverkar hållfastheten av limträbalkarna. Genom att läsa detta arbete får läsaren en bättre förståelse av limträ som konstruktionsmaterial, hur dimensioneringsgången för de behandlade limträbalkarna utförs samt hur formen påverkar hållfastheten av limträbalkarna.

1.2 Metoder och avgränsningar

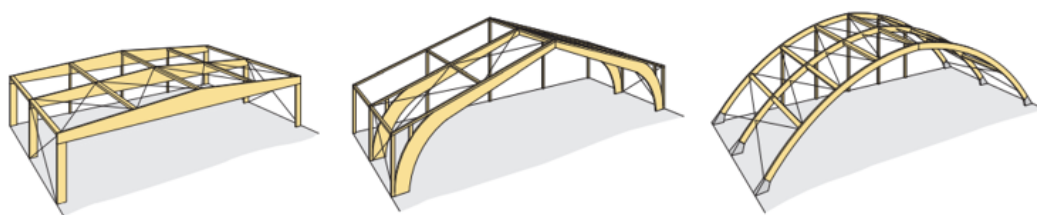
Examensarbetet utförs som en teoretisk studie, där arbetet behandlar teoretisk litteratur om limträ som konstruktionsmaterial med fokus på limträbalkar i olika former. Arbetet omfattar en teoretisk del följt av en beräkningsdel. Den teoretiska delen av arbetet baserar sig på material från Liimapuukäsikirja, RIL böcker, Eurokoder, beräkningsexempel från Teollisen puurakentamisen opetusmateriaalit och Vaativien puurakenteiden suunnittelu – täydennyskoulutus. Beräkningsdelen av arbetet består av ett beräkningsexempel, där det utförs dimensionering av de i avhandlingen behandlade limträbalkarna.

Examensarbetets omfattning begränsas till att omfatta endast dimensioneringen av sadelbalken, hängbuksbalken och bumerangbalken. Limträbalkarna är fritt upplagda och har en jämn linjelast. Arbetet behandlar laster från egenvikten av konstruktionen samt snölasten, vindlasten beaktas inte i detta arbete. Beräkningsdelen av arbetet behandlar hållfastheten av balkarna, vilket är böjhållfasthet, draghållfasthet, skjuvhållfasthet och stämpeltryck. Övriga skeden i dimensioneringen överges i detta examensarbete.

2 Limträ som konstruktionsmaterial

Limträ är en utvecklad träprodukt som presterar utmärkt i krävande konstruktioner. Genom att limma tillsammans noggrant sorterade trälameller, som först fingerskarvats och därefter limmas tillsammans, möjliggör limträ produkter av skräddarsydda storlekar och former. Förutom utmärkt prestanda som konstruktionsmaterial i förhållande till dess egenvikt vikt, har limträ också miljövänliga egenskaper på grund av 99 viktsprocent av det fullständigt förnybara råmaterialet trä. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 1 s. 2)

Förmågan att kunna skapa olika tvärsnittsstorlekar av limträ resulterar i utmärkta hållfasthets- och styvhetssegenskaper, vilket presterar bättre än trämaterial av sågat virke i en motsvarande storlek. Limträets låga egenvikt vikt är särskilt fördelaktig för bärförmågan jämfört med andra konstruktionsmaterial, vilket möjliggör konstruktioner med enorma spännvidder på upp till 150 meter. Speciellt inom arkitektoniskt värdefulla projekt har limträ blivit ett uppskattat material, tack vare dess förmåga att möjliggöra fri utformning av tvärsnitt och kontinuerlig variation eller krökning av tvärsnittshöjden, samtidigt som det tillåter långa spännvidder. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 1 s. 2) I figur 1 presenteras olika konstruktionssystem där limträns unika egenskaper tillämpas.



Figur 1. Olika konstruktionssystem där limträ tillämpas. (Sveriges Skogsindustrier & Svenskt Trä, 2016a, s. 35)

Användningen av limträ i konstruktioner är väldigt varierande, från småhus och flervåningshus till hallbyggnader, idrottshallar och vägbroar. För att uppnå optimal prestanda krävs noggrant utförande av konstruktionen, inklusive genomtänkta detaljer och skydd mot påverkan från väder och vind. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 1 s. 2)

2.1 Egenskaper

De mest väsentliga egenskaperna hos konstruktionsmaterialet limträ består av hållfasthet, styvhet och beständighet. Dessa egenskaper kan beaktas i kvaliteten på det trämaterial som används för att tillverka limträ. I de nordiska länderna består tillverkningen huvudsakligen av barrträden gran och tall, med möjlig förekomst av lärkträd, även om detta förekommer mer sällan. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2014, s. 19)

2.1.1 Användning av lim

Limmet utgör en central faktor vid tillverkningen av limträprodukter och är därmed en huvudkomponent som bör beaktas så att produkterna uppfyller olika standarder. Lim som har dokumenterad hög hållfasthet och beständighet under långvarig belastning är ytterst viktigt vid tillverkningsprocessen. Kraven på limmet specificeras enligt standarden EN 14080, som refererar till EN 301. Denna standard klassificerar två huvudtyper av lim, Limtyp I och Limtyp II. Alternativt kan enkomponents polyuretanlim användas, under förutsättning att det uppfyller kraven i EN 15425. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2014, s. 19)

Den huvudsakliga skillnaden mellan Limtyp I och Limtyp II är användningsklassen för limträprodukten, vilken bestäms av den planerade användningsmiljön. Eurokod 5 används för att definiera användningsklasserna för de två limtyper som används vid limträ tillverkning, baserat på den planerade platsen för produkten. Limträ som framställts med Limtyp I är inte begränsat av omgivande klimatförhållanden, vilket enligt Eurocode 5 är användningsklass 1–3. Användningen av Limtyp II begränsar placeringen av produkterna till skyddade förhållanden från väder och vind, vilket enligt Eurocode 5 är användningsklass 1–2. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2014, s. 19)

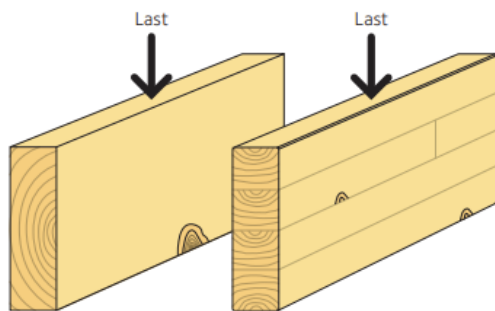
Oavsett placeringen av limträ, krävs det skydd mot långvarig värderpåverkan, vilket kan ha negativa effekter på produkten. Limmen som används i tillverkningsprocessen är godkända av certifierade kontrollmyndigheter i varje land. Melamin–urea–formaldehyd–lim (Melaminlim eller MUF-lim) är det vanligaste limmet som används i Limtyp I, och det är nästan uteslutande komponerat med hänsyn till miljön. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy 2014, s. 19)

Limmet kan observeras i lamellfogarna och fingerskarvningen. Melaminlimmet tenderar att föråldras över tid, vilket resulterar i att limfogarna går från ljusa till mörkare nyanser. Vid fingerskarvning används huvudsakligen det ljusa melaminlimmet för att minimera synligheten när limmet åldras, så att endast svaga linjer framträder i limträprodukten. Polyuretanlim (PUR-lim) kan också användas för fingerskarvningar. I tidigare skeden av limträstillverkning har lim baserat på tvåkomponents fenol-resorsinol-formaldehydlim (PRF-lim) använts, vilket huvudsakligen använts i Limtyp I och resulterat i limfogar i mörka rödbruna nyanser. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2014, s. 19-20)

2.1.2 Hållfasthet

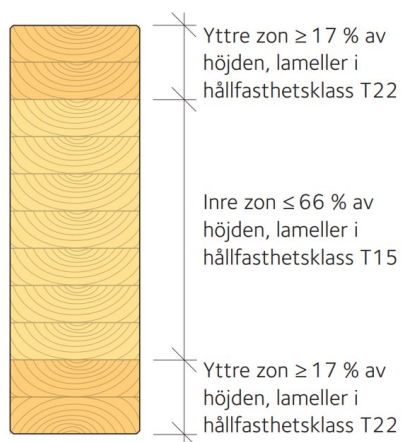
I förhållande till egenvikten har limträ hög hållfasthet. Detta gör att konstruktioner som använder sig av limträ kan uppnå enorma spännvidder. Jämfört med andra konstruktionsmaterial är limträ bland de starkaste med avseende på egenvikten. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2014, s. 22).

Hållfastheten hos konstruktionsvirke och andra byggnadsmaterial bestäms oftast av det svagaste snittet i en enskild plank, där det svagaste tvärsnittet vanligtvis påverkas av kvistar, fingerskarvar eller defekter i årsringarna. Det innebär att hållfastheten kan variera mellan olika plankor på grund av olika defekter. Limträ presterar bättre än vanligt konstruktionsvirke både i styrka och styvhet vid motsvarande dimensioner. Den höga prestandan både i styrka och styvhet i limträ baserar sig på lamineringseffekten, vilket visualiseras i figur 2, där limträ består av noggrant sorterade lameller av konstruktionsvirke placerade i samma tvärsnitt. Detta minimerar risken för att defekter i enskilda lameller placeras i samma snitt genom hela tvärsnittet. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2014, s. 22)



Figur 2. Laminerings-effekten i limträ. (Sveriges Skogsindustrier & Svenskt Trä, 2016a, s. 15)

Dessutom sorteras konstruktionsvirket efter hållfasthet, vilket kallas kombinerat limträ och betecknas med bokstaven c (c = combined, kombinerat limträ) efter hållfasthetsklassen. I limträtvärsnitt som tillhör hållfasthetsklasser med bokstaven c i slutet är placeringen av de yttre lamellerna viktig. Det beror på att spänningen i de yttersta lamellerna i tvärsnittet normalt utsätts för den största spänningen, det är därför lameller av högre hållfasthetsklass placeras i de yttersta lamellskikten. Limträ som tillhör hållfasthetsklassen GL30c kräver att de yttre lamellzonerna i tvärsnittet, vilket ska vara minst 17% av tvärsnittets totala höjd, består av lamellvirke som tillhör hållfasthetsklassen T22. Medan den inre lamellzonen i tvärsnittet, motsvarande 66% av tvärsnittets totala höjd, består av lamellvirke som tillhör hållfasthetsklassen T15 eller T14. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2014, s. 22) Placeringen av lamellerna med olika hållfasthetsklasser i ett GL30c limträtvärsnitt visualiseras i figur 3.



Figur 3. Placeringen av lamellerna i ett GL30c limträtvärsnitt. (Sveriges Skogsindustrier & Svenskt Trä, 2016a, s. 18)

Förutom kombinerat limträ finns även homogent limträ, betecknat med h (h = homogenous, homogent limträ) efter hållfasthetsklassen. Limträ som tillhör hållfasthetsklassen GL30h består enbart av lamellvirke som tillhör hållfasthetsklassen T22 i hela tvärsnittet, vilket visualiseras i figur 4. Det finns även klyvsågat limträ, där bokstaven s (s=split, klyvsågat limträ) används efter hållfasthetsklassen. Det förekommer främst om limträtvärsnittet är smalare än 90 mm och beror på att det klyvsågas från bredare tvärsnitt, vilket resulterar i nedgradering av hållfasthetsklassen enligt EN 14080 från 30 N/mm² till 28 N/mm². Detta innebär att den slutliga hållfasthetsklassen för klyvsågat limträ som tillhört hållfasthetsklassen GL30 blir GL28. (Sveriges Skogsindustrier & Svenskt Trä, 2016a, s. 18)



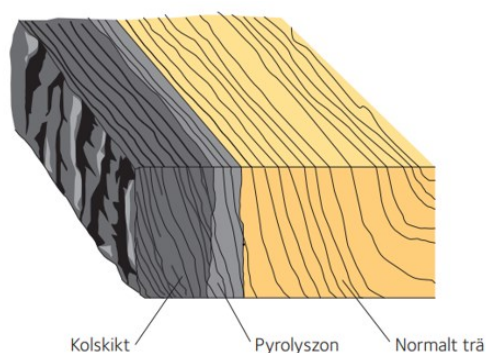
Figur 4. Placeringen av lamellerna i ett GL30h limträtvärsnitt. (Sveriges Skogsindustrier & Svenskt Trä, 2016a, s. 18)

Limträ tillverkas i sju olika hållfasthetsklasser, dessa klasser behåller samma sifferbeteckning oavsett om de tillhör kombinerat eller homogent limträ. Limträ tillverkas i hållfasthetsklasserna GL20, GL22, GL24, GL26, GL28, GL30 och GL32. Skillnaderna mellan hållfasthetsklasserna i kombinerat eller homogent limträ är främst deras prestanda. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 1 s. 12-13)

2.1.3 Brandegenskaper

Limträ har goda egenskaper vid brand. De goda egenskaperna grundar sig på de stora och homogena tvärsnitten som möjliggör ökad brandmotståndskraft, där brandförmågan ökar med tvärsnittsstorleken. Trots att det trä som limträ baseras på är brännbart vid kontakt med eld, fördröjs antändningsstadiet av det kompakta tvärsnittet hos limträ, vilket resulterar i en trög inledning av brandfasen och därmed en långsammare bränningsprocess. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2014, s. 24)

En avgörande faktor vid bränder är värmeutvecklingen, vilken antingen kan accelerera eller dämpa brandförloppet. Vid kontakt med eld bildar limträ en kolbeläggning på ytan, vilket fungerar som ett isolerande skikt och skyddar det underliggande träet. Detta fenomen bibehåller bärförmågan hos limträkonstruktionen under brandfasen. Kolbildningen sker vanligtvis med en hastighet på 0,6–1,0 mm/min och upprätthåller denna hastighet genom hela brandfasen. Kolskiktet skapar ett pyrolysområde, vilket illustreras i figur 5, som är skyddat av den brinnande ytan och upprätthåller en temperatur på 250°–350°C. Inom pyrolysområdet bildas brännbara gaser, vilka tränger igenom kolskiktet, kommer i kontakt med syre och antänds. Gränsen mellan kolskiktet och den intakta tvärsnittsytan varierar beroende på faktorer som breda sprickor och hörn där kolskiktet kan vara djupare än övriga områden. Metallinfästningar eller anslutningar kan öka värmeledningsförmågan och påskynda brandens acceleration in i tvärsnittet, vilket resulterar i en snabbare utveckling av branden. Generellt sett uppstår en tydlig övergång mellan kolskiktet och det intakta träet vid cirka 300°C. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2014, s. 24-70)



Figur 5. Pyrolysområdet vid brand av träkonstruktioner. (Sveriges Skogsindustrier & Svenskt Trä, 2016a, s. 62)

De limfogar som förekommer i limträtvärsnittet har ingen negativ inverkan på limträns brandmotstånd, förutsatt att godkända limtyper används vid tillverkningen. Däremot kan användning av andra limtyper, både äldre och nyare, som inte är brandbeständiga, orsaka att de förlorar sin hållfasthet i brandförloppet vid låga temperaturer och leda till delaminering. Delaminering är en process där lamellerna separeras från varandra på grund av att limmet förlorar sin hållfasthet. Detta försnabbar brandens spridning in i tvärsnittet och försämrar bärförmågan hos limträkonstruktionen. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2014, s. 70)

2.2 Tillverkningsprocess

Tillverkningen av limträ genomgår en noggrann tillverkningsprocess där alla element spelar en avgörande roll för det slutliga resultatet. Huvudsakligen används hållfasthets sorterat konstruktionsvirke av gran eller tall, med möjlig förekomst av lärk, även om det förekommer mer sällan. Vanligtvis levereras konstruktionsvirket till limträ tillverkaren från sågverket, där minst två olika hållfasthetsklasser bör kunna lagras. Materialet är vanligtvis sorterat och torkat vid ankomst. Fukthalten hos de enskilda lamellerna är en avgörande faktor för att säkerställa att limträ tvärsnittet når den planerade hållfasthetsklassen, de bör ha en fukthalt på 6–15% vid limningen. Skillnaden i fuktkvot mellan enskilda lameller i tvärsnittet får inte överstiga 5% vid limningen. Optimal fukthalt minimerar risken för sprickbildning och vridning, som är en väsentlig risk-faktor för slutprodukten. Trä är ett naturligt och levande material som har en tendens att i viss mån bilda sprickor, men detta har ingen negativ inverkan på den slutliga bärförmågan. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 1 s. 7)

Lamellerna som bildar limträ tvärsnittet, har vanligtvis en tjocklek på 6–45 mm. Hållfasthetsklassen för lamellerna i tvärsnittet kan variera beroende på om det är ett homogent eller kombinerat tvärsnitt. Lamellerna som är sorterade enligt hållfasthet fingerskarvas och bildar långa lameller, som kan vara upp till 30–40 meter beroende på tillverkarens kapacitet. Därefter kapas lamellerna till önskad längd enligt slutprodukten. I detta skede av tillverkningen beaktas både lamellernas ordning och fuktfördelning. Lamellerna staplas enligt den inbördes ordningen för antingen homogent eller kombinerat tvärsnitt. För att minimera inre spänningar från fuktförändring placeras kärnan av trä alltid utåt på de yttersta lamellerna, och övriga lameller placeras med kärnan av trä i samma riktning, detta illustreras i figur 4. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 1 s. 5-7)

Efter att de fingerskarvade lamellerna har torkat, hyvlas de flata sidorna av lamellerna. Därefter limmas de enskilda lamellerna ihop. Lamellerna staplas och överförs till limbänkar där de pressas ihop till limträ tvärsnittet innan limmet härdar, vilket vanligtvis sker inom drygt en timme beroende på torkningsförhållanden och limtyp. Pressningen sker med ett lämpligt tryck, och vid behov kan värme användas. Böjda eller andra former kan skapas genom att böja lamellerna under pressningen, där tvärsnittet får härdas under konstant

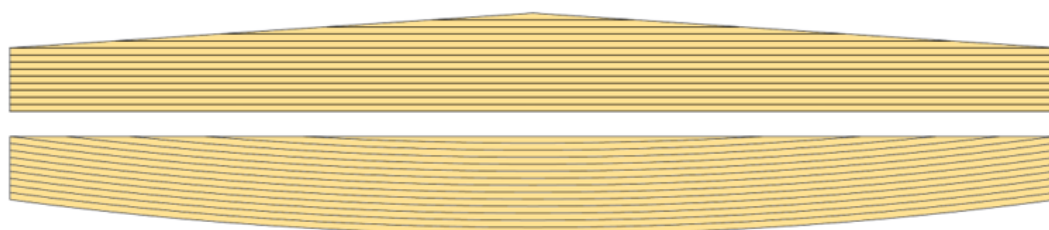
tryck. Raka balkar och pelare tillverkas med en stor press där de staplade lamellerna förs in. Efter härdningen avlägsnas trycket och limträkonstruktionen är redo för bearbetning. Bearbetningen består vanligtvis av hyvling av alla plana sidor i tvärsnittet, och följs av slutlig bearbetning såsom kantkapning, håltagningar eller förberedelser för anslutningar. Vid behov behandlas limträkonstruktionerna med ytbehandling för att skydda dem. Tillverkningsprocessen avslutas med visuell granskning och anmärkning av eventuella defekter innan produkterna packas och lagras för transport till kunden. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 1 s. 7-8)

2.3 Olika former av limträbalkar

Balkar som är gjorda av limträ kan förekomma i olika former. Utöver de raka balkarna med jämnt tvärsnitt kan limträbalkar utformas med olika variationer i tvärsnittshöjden, de kan krökas eller så görs en kombination av både krökning och variation i tvärsnittet. Detta möjliggör att konstruktioner kan utformas i unika arkitektoniska former, ge unika lutningar på tak och möjliggöra variation i konstruktionens vägg- och takhöjd. För att åstadkomma de olika formerna av balkarna kan de antingen sågas eller böjas. De vanligaste formerna av limträbalkar är sadelbalk, pulpetbalk, krökt balk och bumerangbalk. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 7 s. 2)

2.3.1 Balkar med varierande tvärsnittshöjd

Limträbalkar utformas ofta med en varierande tvärsnittshöjd, den varierande tvärsnittshöjden formas genom att man sågar limträbalkens lameller på den ena kanten av balken. De vanligaste limträbalkarna med varierande tvärsnittshöjd är sadelbalk, hängbuksbalk och pulpetbalk. Formerna av sadelbalken (övre) och hängbuksbalken (nedre) illustreras i figur 6. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 7 s. 2)



Figur 6. Den varierande tvärsnittshöjden för sadelbalken och hängbuksbalken. (Björkholm, 2024)

Den varierande tvärsnittshöjden medför att böjspänningsfördelningen inte är linjär i limträbalkarna. Största skjuvspänningen i balkar med varierande tvärsnittshöjd förekommer inte vid neutralaxeln, snarare förekommer den närmare den sneda kanten av limträbalkarna. Böjmomentet varierar längst med limträbalken med den varierande tvärsnittshöjden, vilket resulterar i att den största böjspänningen vanligtvis inte uppstår där böjmomentet är störst. Den största böjspänningen förekommer i ett tvärsnitt som befinner sig närmare balkens stöd. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 7 s. 2)

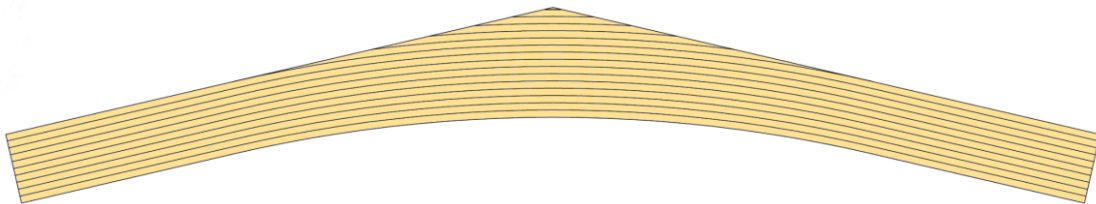
Lutningen på den snedsågade kanten inverkar på böjspänningsfördelningen. En lutning på mindre än 10° vid den snedsågade kanten av limträbalken, medför att inverkan på böjspänningsfördelningen är liten. Därmed kan den dimensionerande böjspänningen beräknas som för en rak limträbalk med ett konstant tvärsnitt, det vill säga dimensionerande böjmoment delat med tvärsnittets böjmotstånd. Detta gäller både för limträbalkens snedsågade- och raka kant. Eftersom den varierande tvärsnittshöjden medför att skjuvspänningar och dragspänningar vinkelrätt mot fiberriktningen sker samtidigt med böjspänningen, rekommenderar Eurokod 5 att böjhållfastheten vid den snedsågade kanten reduceras med faktorn $k_{m,\alpha}$. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 7 s. 3)

Det har påvisats att spänningen vinkelrätt mot fiberriktningen ökar i proportion till den snedsågade kantens lutning. Belastningar på den snedsågade kanten av en sadelbalk medför tryckspänningar vinkelrätt mot fiberriktningen när balken böjer sig. Ifall den snedsågade kanten av sadelbalken förekommer på den dragna sidan, vilket motsvarar en upp- och nervänd sadelbalk, uppstår det dragspänningar vinkelrätt mot fiberriktningen. Detta resulterar i att den snedsågade kantens lutning begränsas vid den tryckta sidan av limträbalken till 10° , medan lutningen på den dragna sidan av limträbalken begränsas till 2° – 3° . Orsaken till att lutningen begränsas till lägre grader vid den dragna sidan är en följd av att det kan förekomma spröda brott vid låga dragkrafter vinkelrätt mot fiberriktningen, och därmed bör lutningen hållas låg. Hängbuksbalken gör det möjligt att öka lutningen på den dragna sidan av limträbalken, vilket möjliggörs genom att man bibehåller kontinuerliga lameller längst hela spännvidden. Genom att böja hela balken, och därmed bibehålla de kontinuerliga lamellerna på den dragna sidan, säkerställs att farliga dragspänningar

vinkelrätt mot fiberriktningen inte uppstår. Hängbuksbalkens tryckta sida sågas endast för att få en rak kant. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 7 s. 3-4)

2.3.2 Krökta balkar och bumerangbalkar

Limträ är ett material med vilket man kan utforma krökta limträbalkar genom en enkel teknisk metod. Lamellerna som limträtvärsnittet består av böjs under tillverkningen till den önskade formen innan limmet härdat, resultatet ger en krökt form på en limträbalk, vilket går under namnet krökt balk. När man kombinerar krökning och sågning under tillverkningsprocessen, resulterar detta i att en ås bildas på mitten av balken, vilket går under namnet bumerangbalk. Bumerangbalkens unika form illustreras i figur 7. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 7 s. 4)



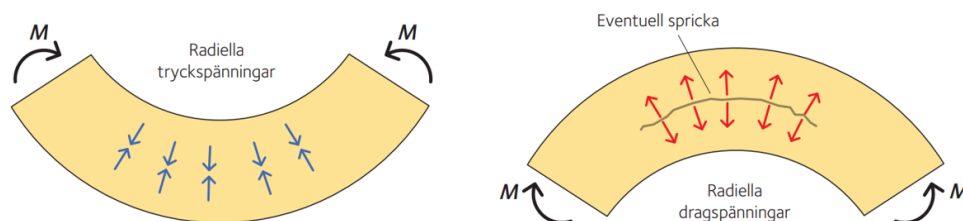
Figur 7. Bumerangbalkens form erhålls genom att sammanställa krökning och sågning. (Björkholm, 2024)

Krökta limträbalkar och limträbågar ska särskiljas från varandra. Den fundamentala skillnaden mellan dessa två limträkonstruktioner är konstruktionens funktion. Limträbågarnas båda stöd är förhindrade att röra sig i horisontalled, medan krökta limträbalkar tillåter det ena stödet att fritt röra sig i horisontalled i balkens längdriktning. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 7 s. 4)

Krökningen av limträbalkar innebär att lamellerna i limträtvärsnittet böjs. Lamellerna i en krökt limträbalk kan variera, eftersom en specifik krökningsradie ökar böjspänningen i enskilda lameller när dess tjocklek ökar. Det innebär att ju större krökningsradie är, desto tunnare måste lamellerna vara i tvärsnittet, eftersom tjockare lameller inte har förmågan att kunna böja sig lika mycket som tunnare lameller. Krökningen begränsas oftast för att lamellerna inte ska skadas, eller för att det inte ska förekomma stora inbyggda böjspänningar i det krökta tvärsnittet. De inbyggda böjspänningarna kan påverka den krökta limträbalkens böjhållfasthet, vilket sker om förhållandet mellan den inre

krökningsradien och lamelltjockleken är för liten. Vid tillfället där förhållandet är för litet bör böjhållfastheten reduceras, vilket enligt Eurokod 5 görs om förhållandet mellan den inre krökningsradien och lamelltjockleken är mindre än 240. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 7 s. 4)

Förutom böjspänningar kan det även förekomma radiella spänningar i krökta limträbalkar. Dessa radiella spänningar uppstår då ett böjmoment belastar en krökt limträbalk med initialkrökning i samma plan som böjmomentet. Spänningarna kan antingen vara tryck- eller dragspänningar. Böjmomentet kan påverka krökningen genom att antingen öka krökningen eller rätta ut krökningen. När böjmomentet orsakar att krökningen ökar, innebär det att lamellerna trycks samman och blir mera kompakta. Därmed uppstår radiella tryckspänningar mellan lamellerna, detta illustreras i figur 8 (vänster). Om böjmomentet däremot orsakar att krökningen rätas ut, innebär det att lamellerna vill sära på sig. Därmed uppstår radiella dragspänningar mellan lamellerna, detta illustreras i figur 8 (höger). Radiella dragspänningar kan förorsaka fläkning i den krökta limträbalken, vilket bör minimeras. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 7 s. 4)



Figur 8. Radiella spänningar orsakat av böjmomentet i krökta limträbalkar. (Sveriges Skogsindustrier & Svenskt Trä, 2016b, s. 104)

Krökta limträbalkar och bumerangbalkar förstärks ofta för att minska risken för sprickbildningar förorsakade av dragspänningar vinkelrätt mot fiberriktningen. Vanligen utförs förstärkningen av limträbalkarna med inlimmade skruvar, helgängade träskruvar eller skivförstärkning på ytan av limträbalken. Limträbalkarna bör förstärkas i de fall där den dimensionerande dragspänningen överskrider draghållfastheten vinkelrätt mot fiberriktningen. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 7 s. 4-5)

3 Grunder för dimensionering av träkonstruktioner

Syftet med dimensionering av bärande konstruktioner är att säkerställa att konstruktionens hållfasthet och styvhet upprätthålls av de belastningar som konstruktionen utsätts för under dess avsedda livslängd (Finlands författningssamling 477/2014, §2). Dimensioneringen av bärande konstruktioner tillämpas av Eurokoder med tillhörande nationella bilagor, dessa definierar olika tekniska krav som ställs på bärande konstruktioner (Finlands författningssamling 477/2014, §3).

Varierande laster belastar konstruktioner regelbundet under dess livslängd, dessa varierande belastningar kan vara permanenta- (G), variabla- (Q) eller olyckslaster (A) (RIL 201-1-2017, 2017, s. 31). Examensarbetet fokuserar på vertikala belastningar som takkonstruktioner med olika former utsätts för, medan olycks- och horisontella laster inte beaktas i detta examensarbete. Konstruktioner utsätts vanligtvis av flera olika belastningar som kan ske samtidigt, vilket beaktas genom tillämpning av lastkombinationer för olika gränstillstånd.

Vid dimensioneringen av träkonstruktioner är det viktigt att känna till hur materialets egenskaper fungerar i olika förhållanden samt hur de reagerar i kombinationen med belastningar. Genom att tillämpa klimatklasser, lastvaraktighetsklasser, modifieringsfaktorer och partialkoefficienter vid dimensioneringen av träkonstruktioner beaktas materialets egenskaper.

3.1 Belastningar

För att kunna dimensionera limträbalkar bör man vara medveten om de belastningar som konstruktionen utsätts för. De vertikala belastningar som takkonstruktioner utsätts för är främst egenvikten av konstruktionen och snölasten. Egenvikten av konstruktionen kan i allmänhet beräknas om man känner till materialets vikt och dimensioner.

Beräkning av snölasten som belastar takkonstruktioner följer standarden SFS-EN 1991-1-3 + AC + A1. Snölastens påverkan på takkonstruktioner baserar sig på flera faktorer, vilket är takets form, lutning och byggnadens geografiska läge. (RIL 201-1-2017, 2017, s. 100) Snölasten på taket kan beräknas enligt formel 1:

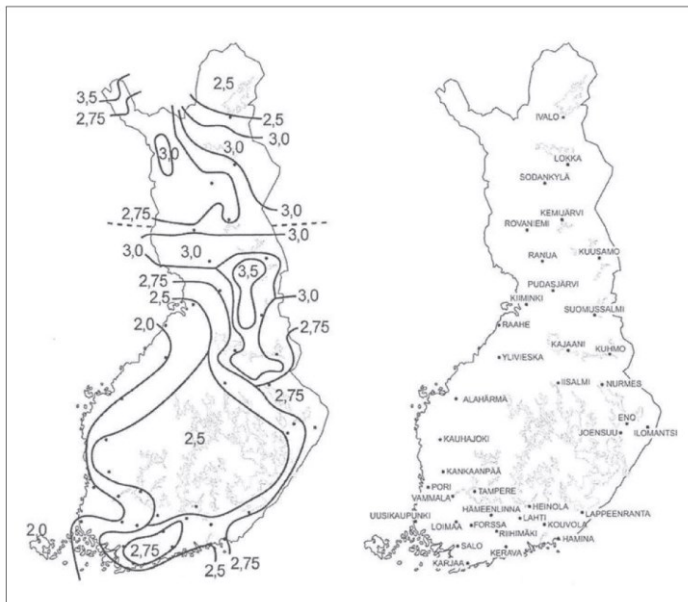
$$S = \mu_i C_e C_t S_k \quad (1)$$

Där μ_i är snölastens formfaktor

C_e är vindskyddsfaktor

C_t är värmekoefficient.

S_k är det karakteristiska värdet för snölasten på mark, värdet anges i kN/m². Det karakteristiska värdet kan bestämmas enligt byggnadens geografiska läge, vilket visas i figur 9. (RIL 201-1-2017, 2017, s. 98)



Figur 9. Värdet för snölasten på mark vid olika geografiska lägen. (RIL 201-1-2017, 2017, s. 98)

C_e beaktar den omgivande terrängens vindkapacitet i förhållandet till byggnaden, det vill säga om byggnaden befinner sig på ett område som är klassat som blåsigt, normalt eller skyddat när det gäller vindar (RIL 201-1-2017, 2017, s. 100). C_t beaktar isoleringsförmågan av takkonstruktioner (RIL 201-1-2017, 2017, s. 101). I detta examensarbete beaktas inte C_e eller C_t , därmed förkortas formeln för snölasten som belastar tak enligt formel 2:

$$S = \mu_i S_k \quad (2)$$

Formfaktorn μ_i baserar sig på takets form och lutning, vilket förekommer främst i tre formfaktorer μ_1 , μ_2 och μ_3 . Dessa formfaktorer används vid olika tillfällen på olika

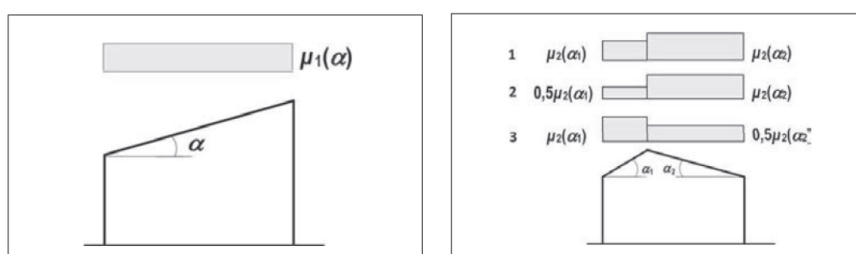
taklutningar. (RIL 201-1-2017, 2017, s. 102) Formfaktorn μ_i som baserar sig på takets lutning presenteras i tabell 1.

Tabell 1. Formfaktorn μ_i bestäms enligt takets lutning.

Katon kaltevuuskulma α	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
μ_1, μ_2	0,8	$0,8(60 - \alpha)/30$	0,0
μ_3	$0,8 + 0,8 \alpha/30$	1,6	1,6

(RIL 201-1-2017, 2017, s. 102).

Värdet S_k , vilket varierar beroende på var i landet byggnaden befinner sig, anges i den nationella bilagan. Värdet baserar sig på den genomsnittliga sannolikheten för en årlig överskridning på 0,02, vilket är en gång under en 50 års period. (RIL 201-1-2017, 2017, s. 98) Lastfallsdiagram används för att bestämma den snölast som belastar taket. Plant tak och pulpettak beräknas endast enligt ett lastfallsdiagram, vilket presenteras i figur 10 (vänster), medan ett tak med en ås beräknas enligt tre olika lastfallsdiagram, vilket presenteras i figur 10 (höger). (RIL 201-1-2017, 2017, s. 102)



Figur 10. Lastfallsdiagram för olika takformer. (RIL 201-1-2017, 2017, s. 102)

3.2 Gränstillstånd

Gränstillstånd används vid dimensionering av konstruktioner, och då används partialkoefficient metoden. Dimensionering i gränstillstånd där partialkoefficient metoden används, innebär att man beaktar olika säkerhetsfaktorer och partialkoefficienter som beaktar olika former av osäkerheter vid dimensioneringen. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 2 s. 7) Vid dimensioneringen förekommer två olika gränstillstånd, dessa är brott- och brukgränstillstånd. Gränstillstånd baserar sig på struktur- och

belastningsmodeller som är utvecklade för de olika gränstillstånden. Ändamålet med dessa struktur- och belastningsmodeller är att med hjälp av olika belastningsfall och säkerhetsfaktorer klargöra att inget gränsvärde överskrids. (RIL 201-1-2017, 2017, s. 30)

3.2.1 Brottgränstillstånd

Definitionen av brottgränstillstånd innebär det tillstånd konstruktionen befinner sig i före ett brott sker, detta i form av förlorad jämvikt, förlorad stabilitet, deformationsbrott, materialbrott eller tidsberoende defekter som utmattningsbrott hos konstruktionen. Brottgränstillståndet berör säkerheten för både människor och konstruktionen. (RIL 201-1-2017, 2017, s. 29-30)

Brottgränstillståndet kan tillämpas i dimensionering vid olika tillfällen, detta beror på vad det är som ska dimensioneras. De vanligaste brottgränstillstånden för konstruktioner är STR (strength) och EQU (equilibrium). STR beaktar inre brott och extrem deformation av konstruktionen. Vid brottgränstillståndet STR är materialhållfastheten avgörande för konstruktionen. EQU beaktar förlust av konstruktionens statiska jämvikt när konstruktionen betraktas som en stel kropp. Vid brottgränstillståndet EQU är materialhållfastheten inte avgörande när det gäller konstruktionen eller undergrunden. (Suomen standardisoimisliitto SFS ry, 2006, s. 76)

Dessa två brottgränstillstånd ska kontrolleras så att de uppfyller de krav som ställs i SFS-EN 1990 + A1 + AC. Dimensionering med brottgränstillståndet STR, måste kontrolleras så att $E_d \leq R_d$ uppfylls, där E_d är det dimensionerande värdet för belastningen och R_d är det motsvarande dimensionerande värdet för bärförmåga. Dimensionering med brottgränstillståndet EQU, måste kontrolleras så att $E_{d,dst} \leq E_{d,stb}$ uppfylls, där $E_{d,dst}$ är det dimensionerande värdet av effekten för stjälpande belastningar och $E_{d,stb}$ är det dimensionerande värdet för stabiliserande belastningar. (Suomen standardisoimisliitto SFS ry, 2006, s. 78)

3.2.2 Brukgränstillstånd

Definitionen av brukgränstillstånd innebär det tillstånd konstruktionen befinner sig i under normala förhållanden och berör människors bekvämlighet, konstruktionens funktion samt dess utseende. Brukgränstillståndet beaktar visuella aspekter som förskjutningar och

vibrationer. Även andra skador som kan påverka användarkomforten, konstruktionens funktion och hållbarhet beaktas. (RIL 201-1-2017, 2017, s. 30)

Brukgränstillståndet ska kontrolleras att de krav som ställs i SFS-EN 1990 + A1 + AC uppfylls. Brukgränstillståndet ska kontrolleras så att det uppfyller kravet $E_d \leq C_d$, där E_d är det dimensionerande värdet för belastningar och C_d är det dimensionerande värdet för begränsningar i brukgränstillståndet. (Suomen standardisoimisliitto SFS ry, 2006, s. 82)

3.2.3 Lastkombinationer

Konstruktioner utsätts vanligtvis av flera olika belastningar som kan ske samtidigt, vilket kan vara permanenta-, variabla- eller olyckslaster. Detta tas i beaktande genom att skapa olika lastkombinationer baserade på de varierande lasterna konstruktionen utsätts för. Den dimensionerande belastningen erhålls genom att varje belastning i tur och ordning fungerar som huvudbelastning i lastkombinationen. Huvudbelastningen kombineras med de andra belastningarna, vilka kombineras med kombineringsfaktorer som reducerar effekten på dem. Kombineringsfaktorerna presenteras i tabell 2. (Suomen Liimapuu yhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 2 s. 8; RIL 201-1-2017, 2017, s. 36)

Tabell 2. Kombinationsfaktorer för olika belastningar.

Kuorma	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Hyötykuormat rakennuksissa, luokka (SFS-EN 1991-1-1)			
Luokka A: asuintilat	0,7	0,5	0,3
Luokka B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,7	0,7	0,3
Luokka D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6
Luokka E: varastotilat	1,0	0,9	0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, ajoneuvon paino ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6 ^{**})
Luokka G: liikennöitävät tilat, $30 \text{ kN} < \text{ajoneuvon paino} \leq 160 \text{ kN}$	0,7	0,5	0,3 ^{**})
Luokka H: vesikatot	0	0	0
Lumikuorma (katso SFS-EN 1991-1-3) ^{*)} , kun $s_k < 2,75 \text{ kN/m}^2$ $s_k \geq 2,75 \text{ kN/m}^2$	0,7 0,7	0,4 0,5	0,2 0,2
Jääkuorma ^{***)}	0,7	0,3	0
Rakennusten tuulikuormat (SFS-EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila (ei tulipalossa) (SFS-EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
Pakkumuodonmuutokset	1,0	1,0	1,0
Tukien painumat	1,0	1,0	1,0

^{*)} Ulkotasoilla ja parvekkeilla $\psi_0 = 0$ luokkien A, B, F ja G yhteydessä.

Huom: Mikäli rakennuksessa on eri kuormaluokkia, joita ei voi erotella omiin selviin ryhmiinsä, käytetään ψ -arvoja, jotka antavat epäedullisimman vaikutuksen.

^{**)} Ajokäytävillä $\psi_2 = 0$.

^{***)} Koskee huurtumisesta, jäätävästä sateesta ja räntäsateesta aiheutuvia jääkuormia.

(RIL 201-1-2017, 2017, s. 38)

Lastkombinationer för brott- och brukgränstillstånd avviker från varandra. Lastkombinationer för brottgränstillståndet beaktar konsekvenserna av att byggnaden eller konstruktionen skadas. Dessa konsekvenser beaktas genom att man tillämpar konsekvensklasser, vilka använder lastkoefficienten K_{FI} för ogynnsamma belastningar. Värdet för Lastkoefficienten K_{FI} presenteras i tabell 3. Koefficienten K_{FI} används inte vid olycks-, utmattnings- eller brukgränstillstånd. (RIL 201-1-2017, 2017, s. 39-40)

Tabell 3. Lastkoefficienten baserar sig på konsekvensklassen.

Kuormakerroin K_{FI}	Seuraamusluokka
1,1	CC3
1,0	CC2
0,9	CC1

(RIL 201-1-2017, 2017, s. 39)

Vid beräkning av träkonstruktioners hållfasthet används lastkombinationen enligt brottgränstillståndet STR. Lastkombinationerna för brottgränstillståndet STR för träkonstruktioner skiljer sig mellan permanent- och medellång lastvaraktighetsklass. Konstruktioner som tillhör permanent lastvaraktighetsklass beräknas enligt formel 4, medan träkonstruktioner som tillhör en lastvaraktighetsklass där lastens varaktighet varierar, till exempel medellång lastvaraktighetsklass, beräknas enligt formel 3:

$$1,15 \cdot K_{FI} \cdot G_{k,j} + 1,5 \cdot K_{FI} \cdot Q_{k,1} + 1,5 K_{FI} \sum_{i>1} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (3)$$

$$1,35 \cdot K_{FI} \cdot G_{k,j} \quad (4)$$

Där $G_{k,j}$ är den permanenta lasten

$Q_{k,1}$ är den variabla lasten

$\Psi_{0,i}$ är kombineringsfaktor för $Q_{k,i}$ som är andra variabla laster som förekommer samtidigt

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 27)

3.3 Material- och säkerhetsfaktorer

Vid dimensionering av trä och limträ är det viktigt att känna till att materialet skiljer sig från övriga byggmaterial som betong och stål, vilket baserar sig på trämateriallets naturliga egenskaper som har stora variationer. Egenskaper hos trä som skiljer sig från andra material är dess ortotropiska egenskaper, vilket betyder att materialets egenskaper skiljer sig beroende på de olika riktningarna. Trä har även hygroskopiska egenskaper vilket betyder att materialets fuktkvot baserar sig på omgivningens relativa luftfuktighet (RF). (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 2 s. 9)

3.3.1 Klimatklasser

Klimatet och dess variation inverkar märkbart på limträ- och träkonstruktioners egenskaper. Fukten i luften är en faktor som inverkar på både konstruktionens hållfasthet och styvhet. Detta tas i beaktande vid dimensionering med hjälp av att man definierar i vilken klimatklass konstruktionen befinner sig. Enligt Eurokod 5 definieras tre olika klimatklasser för träkonstruktioner, vilket är klimatklass 1, 2 och 3. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 2 s. 10)

Träkonstruktioner som tillhör klimatklass 1 innebär att materialets fuktkvot motsvarar en temperatur på 20 grader och den relativa luftfuktigheten i omgivningen överstiger 65% endast några veckor under ett år. Fuktkvoten hos de flesta barrträd överstiger inte 12%. Klimatklass 1 berör konstruktioner som befinner sig i uppvärmda inomhusförhållanden eller i förhållanden med motsvarande relativ luftfuktighet, konstruktioner som befinner sig i ett isoleringsskikt eller har dragsidan på insidan av ett dylikt samt väggkonstruktioner som är placerade i en permanent uppvärmd byggnad där konstruktionen är skyddad med en välventilerad fasad. Träkonstruktioner som tillhör klimatklass 2 innebär att materialets fuktkvot motsvarar en temperatur på 20 grader och den relativa luftfuktigheten i omgivningen överstiger 85% endast några veckor under ett år. Fuktkvoten hos de flesta barrträd överstiger inte 20%. Klimatklass 2 berör konstruktioner som befinner sig utomhus i torra förhållanden, utrymmet ska således vara täckt och välventilerat. Trossbotten och takstolar i kalla utrymmen kan tillhöra klimatklass 2. Träkonstruktioner som tillhör klimatklass 3 innebär att materialets fuktkvot överstiger den angivna fuktkvoten hos materialet i klimatklass 2, detta har orsakats av klimatförhållanden. Fuktkvoten hos de

flesta barrträd överstiger inte 20%. Klimatklass 3 berör konstruktioner som befinner sig utomhus i fuktiga förhållanden där konstruktionen utsätts för väder och vind. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 2 s. 10)

3.3.2 Belastningens varaktighet

De tre klimatklasserna samverkar med belastningens varaktighet på konstruktionen. Belastningens varaktighet är väsentlig att beakta vid dimensionering av träkonstruktioner, eftersom trämaterialiet har en förmåga att upprätthålla sin hållfasthet bättre under kortvarig belastning än under långvarig belastning. Reduktionen av hållfastheten beaktas genom lastvaraktighetsklasser, vilka tar hänsyn till varaktigheten av belastningen som konstruktionen belastas av. Inverkan av lastvaraktighetsklasserna resulterar i en faktor k_{mod} , vilket grundar sig på klimat- och lastvaraktighets klasser, faktorn k_{mod} presenteras i tabell 4. Faktorn k_{mod} reducerar vanligtvis hållfastheten för trämaterial. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 2 s. 10)

Tabell 4. Faktorn k_{mod} för olika klimat- och lastvarighetsklasser.

Materiaali	Käyttö- luokka	Kuorman aikaluokka				
		P	L	M	S	I
Liimapuu, kertopuu, sahatavara	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Vaneri	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90

(Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 2 s. 11)

Det förekommer fem lastvaraktighetsklasser. Dessa är permanent, långtid, medellång, korttid och momentan. Klasserna presenteras i tabell 5, och förtydligas med tabell 6. I lastkombinationer som innehåller belastningar som tillhör olika lastvaraktighetsklasser, bestäms k_{mod} enligt den belastning som motsvarar den kortaste lastvaraktighetsklassen. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 2 s. 10-11)

Tabell 5. Lastvaraktighets klassernas varaktighet.

Kuorman aikaluokka	Ominaiskuorman vaikutusajan kertymän suuruusluokka
Pysyvä	yli 10 vuotta
Pitkäaikainen	6 kuukautta – 10 vuotta
Keskipitkä	1 viikko – 6 kuukautta
Lyhytaikainen	alle yksi viikko
Hetkellinen	

(Suomen standardisoimisliitto SFS ry, 2014, s. 23)

Tabell 6. Definitionen av de olika lastvarighetsklasserna.

Kuorman aikaluokka	Kuormitukset
Pysyvä	Oma paino Pysyvästi rakenteeseen kiinnitetyt koneet, laitteet ja kevyet väliseinät Maanpaine
Pitkäaikainen	Varastotilojen tavarakuormat (luokka E), vesisäiliökuorma
Keskipitkä	Lumi Lattioiden ja parvekkeiden hyötykuorman pintakuormat luokissa A - D Autotallien ja liikennöintialueiden hyötykuormat (luokat F ja G) Kosteuden vaihtelun aiheuttamat kuormitukset
Lyhytaikainen	Portaiden hyötykuormat Hyötykuorman pistekuorma (Q_k) Väliseinien ja kaiteiden vaakakuormat Kunnossapito- tai henkilökuorma katolla (luokka H) Ajoneuvokuormat luokassa E Kuljetusvälinekuormat Asennuskuormat
Hetkellinen	Tuuli Onnettomuuskuorma

(Suomen rakentamismääräyskokoelma, *Rakenteiden lujuus ja vakaus: Puurakenteet*, 2016, s. 10)

3.3.3 Krypning

Krypningsfenomenet som sker i träkonstruktioner, innebär att konstruktionens nedböjning ökar med tiden. Krypningen i träkonstruktioner orsakas främst av fuktkvoten i materialet,

högre fuktkvot resulterar i större krypning. Variationen i fuktkvoten kan öka krypningseffekten, som även kan ske vid lägre fuktkvot i materialet. Krypningseffekten är större vid varierande fuktkvot jämfört med konstant hög fuktkvot. Belastningen av konstruktionen ger en konstant nedböjning, men även variationen i belastningen kan orsaka ökad krypning. Med deformationskoefficienten k_{def} tas fenomenet i beaktande, deformationskoefficienten definieras enligt klimatklasserna, vilket presenteras i tabell 7. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 6 s. 5-6)

Tabell 7. Värdet k_{def} definieras enligt klimatklasserna.

Materiaali	Standardit	Käyttöluokka		
		1	2	3
Sahatavara, Pyöreä puu	EN 14081-1	0,60	0,80	2,00
Liimapuu	EN 14080			
LVL, CLT syrjällään	EN 14374			
Vaneri, Kerto-Q lappeellaan, CLT lappeellaan	EN 636, VTT 184/03	0,80	1,00	2,50

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 50)

3.3.4 Partialkoefficienter

Säkerhetsfaktorer, eller så kallade partialkoefficienter, tillämpas vid dimensionering. Partialkoefficienter tillämpas främst för att beakta olika former av osäkerheter som berör dimensioneringen av konstruktionen, detta kan vara osäkerheter som berör till exempel materialegenskaper. γ_M är en partialkoefficient som beaktar materialets egenskaper när det gäller dimensionering av träkonstruktioner. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 2 s. 7) Värdet för partialkoefficienten γ_M för olika material presenteras i tabell 8.

Tabell 8. Värden för partialkoefficienten γ_M .

Perusyhdistelmät:	
Sahatavara ja pyöreä puutavara	1,3
Liimapuu, CLT	1,25
LVL, vaneri, OSB-lastulevy	1,2
Muu lastulevy, kuitulevyt	1,3
Liitokset	1,3
Naulalevyliitokset: - tartuntalujuus	1,25
- levyn lujuus (teräs)	1,1
Onnettomuusyhdistelmät	1,0

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 47)

3.3.5 Dimensionerande hållfasthet

Limträ tillverkas enligt standarden EN 14080, där standarden definierar olika hållfasthetsklasser för limträ. Standarden definierar även olika hållfasthetsegenskaper för de olika hållfasthetsklasserna, vilket är karakteristiska värden för böj-, drag-, tryck- och skjuvhållfasthet, vilket presenteras i tabell 9. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 1 s. 12) Dessa karakteristiska värden kan förvandlas till dimensionerande värden genom att man kombinerar dem med material- och säkerhetsfaktorer. Det dimensionerande värdet för hållfastheten för de olika egenskaperna beräknas enligt formel 5:

$$X_d = k_{mod} \cdot \frac{X_k}{\gamma_M} \quad (5)$$

Där k_{mod} är modifieringsfaktor

X_k är det karakteristiska värdet för hållfasthetsegenskapen

γ_M är partialkoefficient för materialegenskaper

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 46)

Tabell 9. Hållfasthetsegenskaper för limträ i olika hållfasthetsklasser.

Ljuusluokka		Liimapuu				Halkaistu liimapuu	
		GL24c	GL24h	GL30c ¹	GL30h	GL30cs ¹	GL30hs
Ominaislujuudet (N/mm ²)							
Taivutus	$f_{m,k}$	24	24	30	30	28	28
Veto	$f_{t,0,k}$	17	19,2	19,5	24	18,7	22,4
	$f_{t,90,k}$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Puristus	$f_{c,0,k}$	21,5	24	24,5	30	23,3	28
	$f_{c,90,k}$	2,5	2,5	2,5	2,5	3,0	3,0
Leikkaus	$f_{v,k}$	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
	$f_{r,k}$	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Jäykkysominaisuudet (N/mm ²)							
Kimmomoduuli	$E_{0,mean}$	11 000	11 500	13 000	13 600	12 500	13 100
	$E_{0,05}$	9 100	9 600	10 800	11 300	10 300	10 800
	$E_{90,mean}$	300	300	300	300	300	300
Liukumoduuli	G_{mean}	650	650	650	650	650	650
	$G_{0,05}$	540	540	540	540	540	540
Tiheydet (kg/m ³)							
Ominastiheys	ρ_k	365	385	390	430	390	430
Tiheyden keskiarvo	ρ_{mean}	400	420	430	480	430	480

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 53)

4 Dimensioneringsgången av limträbalkar

I detta kapitel behandlar examensarbetet dimensioneringsgången av limträbalkar av olika geometriska former. De limträbalkar som behandlas är sadelbalk, hängbuksbalk och bumerangbalk. Dimensioneringsgången för limträbalkarna har både gemensamma skeden samt anpassade skeden som är specifika för varje enskild balk. Genom att förtydliga dimensioneringsgången för limträbalkarna, utförs sadelbalkens dimensioneringsgång i detalj med formler och väsentlig information om de olika skeden som ingår i dimensioneringsgången. Dimensioneringsgången för hängbuksbalken och bumerangbalken jämförs med sadelbalkens dimensioneringsgång. Fokus läggs på att framhäva vad limträbalkarna har gemensamt i dimensioneringsgången samt vad som är specifikt anpassat för de enskilda balkarna. Dimensioneringsgången behandlar både dimensionering i brott- och brukgränstillstånd.

Dimensioneringsgången för limträbalkarna grundar sig på exempelberäkningar av Teollisen puurakentamisen opetusmateriaalit, Vaativien puurakenteiden suunnittelu – täydennyskoulutus och Liimapuukäsikirja del 3. Dimensioneringen har även tillämpat Eurokod 5 med tillhörande nationella bilagor, vilka behandlar dimensionering av träkonstruktioner samt RIL 205-1-2017 puurakenteiden suunnitteluohje.

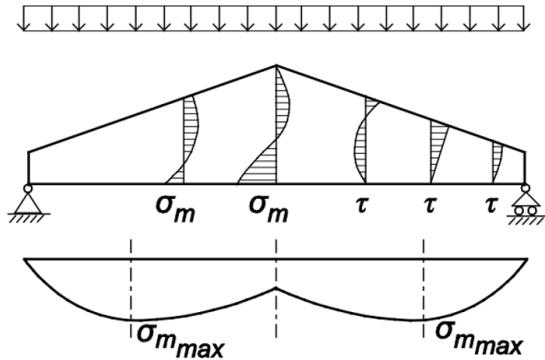
4.1 Sadelbalk

Sadelbalkens dimensioneringsgång baserar sig på exempelberäkning från Puuinfos Teollisen puurakentamisen opetusmateriaalit. Dimensioneringsgången behandlar en fritt upplagd symmetrisk sadelbalk med en jämnt fördelad linjelast. Sadelbalkens dimensioneringsgång består av böjhållfasthet i det dimensionerande tvärsnittet, böjhållfasthet vid åsen, draghållfasthet vid åsen, kombinerat drag och skjuvhållfasthet vid åsen, skjuvhållfasthet vid stöden, stämpeltryck, vippning, nedböjning och stabiliserande stöd i Y-led.

4.1.1 Böjhållfasthet i det dimensionerande tvärsnittet

Fritt upplagda symmetriska sadelbalkar med jämnt fördelad belastning bildar den dimensionerande böjhållfastheten i tvärsnittet med avståndet x_m från balkens stöd, det

innebär att den dimensionerande böjhållfastheten inte uppstår i tvärsnittet vid mitten av balken, detta presenteras i figur 11. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 7 s. 6)



Figur 11. Fördelningen av böj- och skjuvspänning i sadelbalk. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 7, s. 3)

Avståndet från stödet till tvärsnittet där den dimensionerande böjhållfastheten förekommer beräknas enligt formel 6:

$$x_m = \frac{L \cdot h_A}{2 \cdot h_{ap}} \quad (6)$$

Där L är spännvidden

h_A är balkhöjden vid stöden

h_{ap} är balkhöjden vid mitten av balken

Tvärsnittshöjden h_x vid avståndet x_m från stöden beräknas enligt formel 7:

$$h_x = h_{mitt} = h_A \cdot \left(2 - \frac{h_A}{h_{ap}} \right) \quad (7)$$

(Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015b, s. 53)

Vid det dimensionerande tvärsnittet granskas att den dimensionerande böjspänningen $\sigma_{m,\alpha,d}$ är mindre eller lika med reduktionsfaktor $k_{m,\alpha}$ multiplicerat med det dimensionerande värdet för böjhållfastheten $f_{m,d}$, dimensioneringsvillkoret presenteras i formel 8:

$$\sigma_{m,\alpha,d} \leq k_{m,\alpha} \cdot f_{m,d} \quad (8)$$

Den dimensionerande böjspänningen som förekommer i tvärsnittet beaktar effekten av den sneda kanten, vilket beräknas enligt formel 9:

$$\sigma_{m,\alpha,d} = \sigma_{m,0,d} = \frac{6 \cdot M_{d,mitt}}{b \cdot h_{mitt}^2} \quad (9)$$

Där h_{mitt} är tvärsnittshöjden i det dimensionerande tvärsnittet

b är balkens bredd

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 86)

Det dimensionerande momentet beräknas vid det dimensionerande tvärsnittet enligt formel 10:

$$M_{d,mitt} = \frac{p_d \cdot L \cdot x_m}{2} \cdot \left(1 - \frac{x_m}{L}\right) \quad (10)$$

Där p_d är den jämnt fördelade belastningen

L är spännvidden

(Puuinfo Oy, 2023)

Reduktionsfaktor $k_{m,\alpha}$ beaktar omfördelning av böjspänningar i det dimensionerande tvärsnittet, detta innebär att faktorn beaktar om balkens sågade kant är tryckt eller dragen. Vid tillfällen där den sågade kanten är tryckt tillämpas formel 11, medan formel 12 tillämpas om den sågade kanten är dragen:

$$k_{m,\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{m,d}}{1,5 \cdot f_{v,d}} \cdot \tan \alpha\right)^2 + \left(\frac{f_{m,d}}{f_{c,90,d}} \cdot \tan^2 \alpha\right)^2}} \quad (11)$$

$$k_{m,\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{m,d}}{0,75 \cdot f_{v,d}} \cdot \tan \alpha\right)^2 + \left(\frac{f_{m,d}}{f_{t,90,d}} \cdot \tan^2 \alpha\right)^2}} \quad (12)$$

Där $f_{c,90,d}$ är den dimensionerande tryckhållfastheten vinkelrätt mot fiberriktning

$f_{t,90,d}$ är den dimensionerande draghållfastheten vinkelrätt mot fiberriktning

$f_{v,d}$ är den dimensionerande skjuvhållfastheten

α är den sneda kantens lutning i förhållande till fiberriktningen

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 87)

4.1.2 Böjhållfasthet vid åsen

Böjhållfastheten granskas även vid området kring åsen av balken. Vid åsen granskas att den dimensionerande böjspänningen $\sigma_{m,d}$ är mindre eller lika med reduktionsfaktor k_r multiplicerat med $f_{m,d}$. Dimensioneringsvillkoret presenteras i formel 13:

$$\sigma_{m,d} \leq k_r \cdot f_{m,d} \quad (13)$$

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 88)

Den dimensionerande böjspänningen som förekommer vid området kring åsen beräknas enligt formel 14:

$$\sigma_{m,d} = k_l \cdot \frac{6 \cdot M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2} \quad (14)$$

Där h_{ap} är balkhöjden vid mitten av balken

b är balkens bredd

Korrektionsfaktorn k_l beräknas enligt formel 15:

$$k_l = \begin{cases} 1 + 1,4 \cdot \tan \alpha_{ap} + 5,4 \cdot \tan^2 \alpha_{ap} & ; \text{Sadelbalk} \\ 1 + 0,35 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r}\right) + 0,6 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r}\right)^2 & ; \text{Kröktbalk} \\ k_1 + k_2 \left(\frac{h_{ap}}{r}\right) + k_3 \left(\frac{h_{ap}}{r}\right)^2 + k_4 \left(\frac{h_{ap}}{r}\right)^3 & ; \text{Bumerangbalk} \end{cases} \quad (15)$$

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 87)

Korrektionsfaktorn k_l innehåller olika faktorer som beräknas enligt formlerna 16 till 20:

$$r = r_{in} + 0,5 \cdot h_{ap} \quad (16)$$

$$k_1 = 1 + 1,4 \cdot \tan \alpha_{ap} + 5,4 \cdot \tan^2 \alpha_{ap} \quad (17)$$

$$k_2 = 0,35 - 8 \cdot \tan \alpha_{ap} \quad (18)$$

$$k_3 = 0,6 + 8,3 \cdot \tan \alpha_{ap} - 7,8 \cdot \tan^2 \alpha_{ap} \quad (19)$$

$$k_4 = 6 \cdot \tan^2 \alpha_{ap} \quad (20)$$

Där r_{in} är den inre radien av balken

α_{ap} är ytans lutning vid åsen

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 88)

Det dimensionerande momentet vid området kring åsen beräknas enligt formel 21:

$$M_{ap,d} = \frac{p_d \cdot L^2}{8} \quad (21)$$

Där p_d är den jämnt fördelade belastningen

L är spännvidden

(Högström m.fl., 2019).

Reduktionsfaktor k_r är för sadelbalken 1,0, för övriga krökta limträbalkar bestäms k_r enligt formel 22:

$$k_r = \begin{cases} 1 & \text{när } \frac{r_{in}}{t} \geq 240 \\ 0,76 + 0,001 \cdot \frac{r_{in}}{t} & \text{när } \frac{r_{in}}{t} < 240 \end{cases} \quad (22)$$

Där r_{in} är den inre radien av balken

t är lamellernas tjocklek

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 88)

4.1.3 Draghållfasthet vid åsen

Draghållfastheten granskas vid området kring åsen av balken. Vid åsen granskas att den dimensionerande dragspänningen vinkelrätt mot fiberriktningen $\sigma_{t,90,d}$ är mindre eller lika med korrektionsfaktorn k_{dis} multiplicerat med volymfaktorn k_{vol} multiplicerat med $f_{t,90,d}$. Dimensioneringsvillkoret presenteras i formel 23:

$$\sigma_{t,90,d} \leq k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t,90,d} \quad (23)$$

Dimensionerande dragspänning vinkelrätt mot fiberriktningen beräknas enligt formel 24:

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \cdot \frac{6 \cdot M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2} \quad (24)$$

Vid tillfällen där limträbalken ytbehandlas, vilket orsakar att fuktöverföringen förhindras, beräknas den dimensionerande draghållfastheten enligt formel 25:

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \cdot \frac{6 \cdot M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2} - 0,6 \cdot \frac{p_d}{b} \quad (25)$$

Där $M_{ap,d}$ är det dimensionerande momentet vid området kring åsen

h_{ap} är balkhöjden vid mitten av balken

p_d är den jämnt fördelade belastningen

b är balkens bredd

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 90)

Reduktionsfaktor k_p beräknas enligt formel 26:

$$k_p = \begin{cases} 0,2 \cdot \tan \alpha_{ap} & ; \text{Sadelbalk} \\ 0,25 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r}\right) & ; \text{Kröktbalk} \\ k_5 + k_6 \left(\frac{h_{ap}}{r}\right) + k_7 \left(\frac{h_{ap}}{r}\right)^2 & ; \text{Bumerangbalk} \end{cases} \quad (26)$$

Korrektionsfaktorn k_p innehåller olika faktorer som beräknas enligt formlerna 27 till 29:

$$k_5 = 0,2 \cdot \tan \alpha_{ap} \quad (27)$$

$$k_6 = 0,25 - 1,5 \cdot \tan \alpha_{ap} + 2,6 \cdot \tan^2 \alpha_{ap} \quad (28)$$

$$k_7 = 2,1 \cdot \tan \alpha_{ap} - 4 \cdot \tan^2 \alpha_{ap} \quad (29)$$

Där h_{ap} är balkhöjden vid mitten av balken

α_{ap} är ytans lutning vid åsen

r presenteras i formel 16

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 91)

Volymfaktorn k_{vol} beräknas enligt formel 30:

$$k_{vol} = \left(\frac{V_0}{V}\right)^{0,2} \quad (30)$$

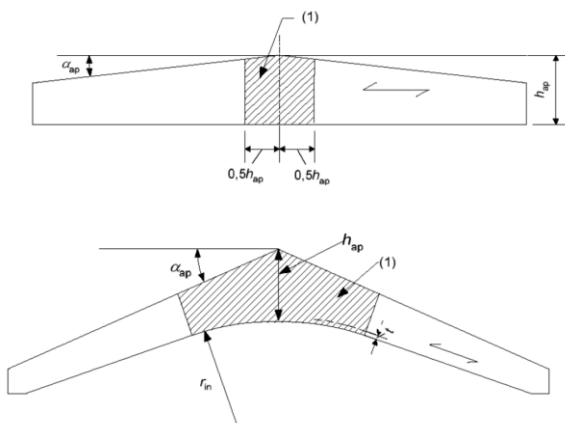
Där V_0 är referensvolym $0,01\text{m}^3$

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 89)

V är det utsatta volymområdet kring åsen, vilket figur 12 framställer. Det utsatta volymområdet kring åsen kan uppskattas med formel 31:

$$V = \begin{cases} b \cdot h_{ap}^2 & ; \text{Sadelbalk} \\ b \cdot \left(\sin \alpha_{ap} \cdot \cos \alpha_{ap} \cdot (r_{in} \cdot h_{ap})^2 - r_{in}^2 \cdot \frac{\alpha_{ap} \cdot \pi}{180} \right) & ; \text{Bumerangbalk} \end{cases} \quad (31)$$

(Sveriges Skogsindustrier & Svenskt Trä, 2016c, s. 48)



Figur 12. Området kring åsen för sadelbalken och bumerangbalken märkt med (1). (RIL 205-1-2017, 2017, s. 89)

Korrektionsfaktorn k_{dis} beaktar spänningsfördelningen i området kring åsen. Korrektionsfaktorn presenteras i formel 32:

$$k_{dis} = \begin{cases} 1,4 & ; \text{Sadelbalk \& kröktbalk} \\ 1,7 & ; \text{Bumerangbalk} \end{cases} \quad (32)$$

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 90)

4.1.4 Kombinerat drag- och skjuvhållfasthet vid åsen

Då balken belastas med en jämnt fördelad belastning förekommer det maximala momentet i mitten av balken, däremot framstår det ingen skjuvkraft vid mitten av balken. Detta betyder att endast draghållfastheten granskas vid området kring åsen när balken belastas av en jämnt fördelad belastning, vilket har utförts i kapitel 4.1.3. Vid tillfällen där balken belastas med en osymmetrisk belastning, det vill säga att belastningen varierar i form av till exempel driven snö vid området kring åsen, uppstår det maximala momentet inte i mitten av balken. Detta betyder att området kring åsen utsätts för både drag- och skjuvspänningar vid samma tillfälle. (Puuinfo Oy, 2023) Dimensioneringsvillkoret presenteras i formel 33:

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} + \frac{\sigma_{t,90,d}}{k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t,90,d}} \leq 1 \quad (33)$$

Där $f_{v,d}$ är den dimensionerande skjuvhållfastheten

$f_{t,90,d}$ är den dimensionerande draghållfastheten vinkelrätt mot fiberriktning

$\sigma_{t,90,d}$, k_{dis} och k_{vol} är beskrivna i kapitel 4.1.3

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 90)

Den dimensionerande skjuvspänningen τ_d vid området kring åsen beräknas enligt formel 34:

$$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{b_{ef} \cdot h_{ap}} \quad (34)$$

Där V_d är den dimensionerande tvärkraften vid åsen

h_{ap} är balkhöjden vid mitten av balken

(Puuinfo Oy, 2023)

Trämateriäl har egenskaper som kan resultera i sprickbildningar, detta tar den effektiva bredden b_{ef} i beaktande genom att reducera den totala bredden av balken, den effektiva bredden beräknas enligt formel 35:

$$b_{ef} = k_{cr} \cdot b \quad (35)$$

Där b är balkens bredd

Reduktionsfaktor k_{cr} baserar sig på träkonstruktionens klimatklass, där faktorn beaktar trämateriallets sprickbildningsegenskaper. Limträkonstruktioner som tillhör de olika klimatklasserna i Finland använder värdet 1,0 för reduktionsfaktor k_{cr} .

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 75)

4.1.5 Skjuvhållfasthet vid stöden

Skjuvspänningar förekommer i balkar som böjs, där spänningen verkar parallellt med balkens axel (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 4 s. 3). För fritt upplagda tvåstödsbalkar med jämn belastning förekommer skjuvspänningen störst vid stöden av balken. Dimensioneringsvillkoret granskar att den dimensionerande skjuvspänning τ_d är mindre eller lika med den dimensionerande skjuvhållfastheten $f_{v,d}$, vilket presenteras i formel 36:

$$\tau_d \leq f_{v,d} \quad (36)$$

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 74)

Den dimensionerande skjuvspänningen beräknas vid stöden på balken, enligt formel 37:

$$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{b_{ef} \cdot h_A} \quad (37)$$

(Puuinfo Oy, 2023)

Där tvärkraften vid stöden beräknas enligt formel 38:

$$V_d = \frac{P_d \cdot L}{2} \quad (38)$$

Där p_d är den jämnt fördelade belastningen

L är spännvidden

(Högström m.fl., 2019).

Vid balkar med jämnt fördelad belastning kan tvärkraften reduceras, detta utförs med reduktionsfaktor V_{red} , vilket kan beräknas enligt formel 39:

$$V_{red} = V \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot h_A + l_A}{L}\right) \quad (39)$$

Där V är tvärkraften vid stöden

h_A är balkhöjden vid stöden

l_A är stödets längd

L är spännvidden

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 76)

4.1.6 Stämpeltryck

Kontaktytan mellan olika träkonstruktioner kan resultera i att det förekommer stora belastningar vinkelrätt mot fiberriktningen. Träets elasticitetsmodul är lägre vinkelrätt mot fiberriktningen jämfört med vinkelrätt med fiberriktningen. Stora belastningar vinkelrätt mot fiberriktningen kan förorsaka deformationer i materialet. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 4 s. 9) Dessa deformationer granskas genom att man kontrollerar att den dimensionerande tryckspänningen vinkelrätt mot fiberriktningen $\sigma_{c,90,d}$ är mindre eller lika med stämpeltrycksfaktorn $k_{c,\perp}$ multiplicerat med den dimensionerande tryckhållfastheten vinkelrätt mot fiberriktning $f_{c,90,d}$. Stora stämpeltryck kan kontrolleras genom att man använder olika metoder, till exempel stålstänger och spikplåtar, som minskar deformationen och ökar hållfastheten (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 4 s. 9). Dimensioneringsvillkoret för stämpeltryck presenteras i formel 40:

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,\perp} \cdot f_{c,90,d} \quad (40)$$

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 72)

Den dimensionerande tryckspänningen vinkelrätt mot fiberriktningen beräknas enligt formel 41:

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A} \quad (41)$$

Där $F_{c,90,d}$ är den dimensionerande tryckkraften vinkelrätt mot fiberriktningen

A är kontaktytan vid tryck vinkelrätt mot fiberriktningen

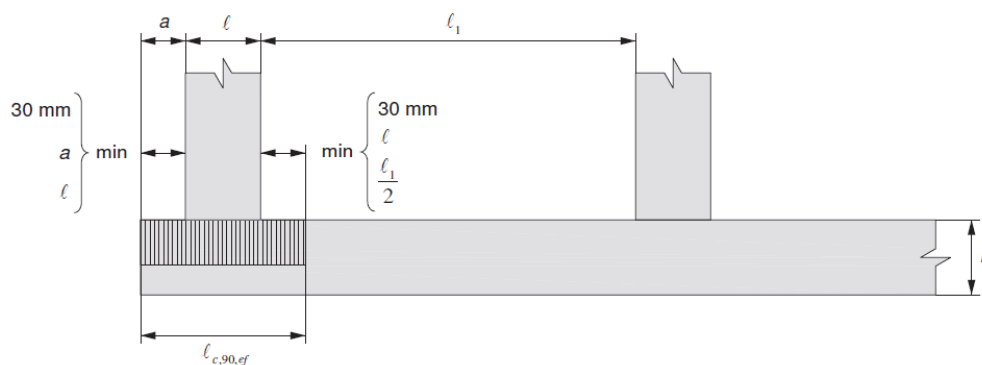
(Puuinfo Oy, 2023)

Stämpeltrycksfaktorn $k_{c,\perp}$ beräknas enligt formel 42:

$$k_{c,\perp} = \frac{l_{c,90,ef}}{l} \cdot k_{c,90} \quad (42)$$

Där $l_{c,90,ef}$ är den effektiva längden på stödytan, vilket framförs i figur 13

l är stödytans längd



Figur 13. Den effektiva längden på stödytan. (RIL 205-1-2017, 2017, s. 73)

$k_{c,90}$ är en faktor som beaktar belastningens placering, risken för sprickbildning och tryckkraftens storlek. Värdet 1,0 kan användas för faktorn $k_{c,90}$ förutsatt att följande villkor uppfylls: Värdet 1,5 kan användas då balken har kontinuerligt stöd och $l_1 \geq 2h$. Värdet 1,75 kan användas då balken är belastad med jämn- eller punktbelastning, som är längre bort från stödets kant än $2h$, dock ska $l \leq 400\text{mm}$.

Där l är stödytans längd

h är balkens höjd.

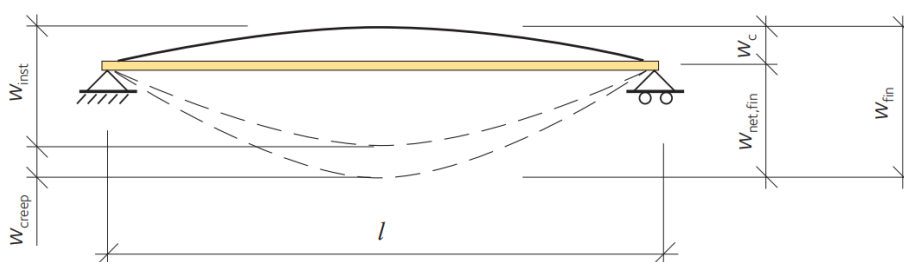
(RIL 205-1-2017, 2017, s. 72-73)

4.1.7 Nedböjning

Nedböjningen för limträkonstruktioner kontrolleras i brukgränstillståndet. Limträbalkar med stora tvärsnitt och långa spännvidder bör kontrolleras och begränsas mot nedböjningen. Nedböjningen i brukgränstillståndet kontrolleras främst för att man kontrollerar att limträkonstruktionen är tillräckligt styv för att skadliga nedböjningar elimineras. Dessutom kontrolleras och begränsas nedböjningen även av estetiska skäl, eftersom en mindre nedböjning kan vara fullkomligt synlig vid tillfällen där horisontella referenslinjer kan jämföras med nedböjningen. Limträbalkar med lägre lutningar kan tillverkas med överhöjning om nedböjningen är ett problem. Storleken på överhöjningen kan motsvara minst den nedböjning som orsakas av egenvikten av limträkonstruktionen. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 2 s. 12-13) Den slutliga nedböjningen $w_{net,fin}$ beräknas för limträbalkar genom att subtrahera överhöjningen w_c från den totala nedböjningen w_{fin} , vilket framförs i figur 14. Den slutliga nedböjningen beräknas enligt formel 43:

$$w_{net,fin} = w_{fin} - w_c \quad (43)$$

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 97)



Figur 14. Olika påverkningar på nedböjningen. (Sveriges Skogsindustrier & Svenskt Trä, 2016c, s. 51)

I limträkonstruktioner som är konstant belastade under hela livslängden påverkas nedböjningen av krypningsfenomenet, vilket behandlas i kapitel 3.3.3. Nedböjningen som

orsakas vid krypning w_{creep} är påverkad av den momentana nedböjningen w_{inst} , vilket kan beräknas enligt formel 44:

$$w_{creep} = k_{def} \cdot w_{inst} \quad (44)$$

Där k_{def} är deformationsfaktorn

Den totala nedböjningen framstår enligt formel 45:

$$w_{fin} = w_{creep} + w_{inst} = w_{inst} \cdot (1 + k_{def}) \quad (45)$$

(Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 6 s. 6)

Den totala nedböjningen beräknas genom att man beaktar permanenta- och variabla belastningar som förorsakar nedböjning. Permanenta och variabla belastningar som förorsakar nedböjningen beräknas separat, därefter adderas de med varandra. Den slutliga formeln för totala nedböjningen beräknas enligt formel 46:

$$w_{fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q} = w_{inst,G} \cdot (1 + k_{def}) + w_{inst,Q} \cdot (1 + \Psi_2 k_{def}) \quad (46)$$

Där $w_{inst,G}$ är den slutliga nedböjningen förorsakad av permanent belastning

$w_{inst,Q}$ är den slutliga nedböjningen förorsakad av variabel belastning

Ψ_2 är kombineringsfaktor för långvarig variabel belastning

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 30)

De jämnt fördelade permanenta belastningar som förorsakar nedböjning för raka limträbalkar med varierande tvärsnitt beräknas enligt formel 47:

$$w_{inst,G} = \frac{5}{384} \cdot \frac{P_{g,k} \cdot L^4}{E_{0,mean} \cdot I_y} + 0,35 \cdot \frac{P_{g,k} \cdot L^2}{G_{0,mean} \cdot b \cdot (h_A + h_{ap})} \quad (47)$$

Medan de jämnt fördelade variabla belastningar som förorsakar nedböjning för raka limträbalkar med varierande tvärsnitt beräknas enligt formel 48:

$$w_{inst,Q} = \frac{5}{384} \cdot \frac{P_{q,s,k} \cdot L^4}{E_{0,mean} \cdot I_y} + 0,35 \cdot \frac{P_{q,s,k} \cdot L^2}{G_{0,mean} \cdot b \cdot (h_A + h_{ap})} \quad (48)$$

Där $P_{g,k}$ är den permanenta belastning som belastar konstruktionen

$P_{q,s,k}$ är den variabla belastning som belastar konstruktionen

$E_{0,mean}$ är elasticitetsmodulens medelvärde

$G_{0,mean}$ är skjuvmodulens medelvärde

L är spännvidden

b är balkens bredd

h_A är balkhöjden vid stöden

h_{ap} är balkhöjden vid mitten av balken

(Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 6 s. 11)

Tröghetsmomentet I_y för det bestämda tvärsnittet beräknas enligt formel 49:

$$I_y = \frac{b \cdot h_e^3}{12} \quad (49)$$

(Puuinfo Oy, 2023)

Där h_e beräknas enligt formel 50:

$$h_e = \begin{cases} h_A + 0,33L \cdot \tan \alpha ; \text{Sadelbalk} \\ h_A + 0,45L \cdot \tan \alpha ; \text{Pulpetbalk} \end{cases} \quad (50)$$

(Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 6 s. 11)

Man granskar att den slutliga nedböjningen i bärande limträkonstruktioner är mindre eller lika med $L/300$ samt att den totala nedböjningen är mindre eller lika med $L/200$. (RIL 205-1-2017, 2017, s. 98)

4.1.8 Vippning

Vippning är ett fenomen som kan ske vid slanka limträbalkar vid tillfällena där den tryckta kanten av tvärsnittet inte är stagad mot förskjutningar ut ur sitt plan. Fenomenet förekommer redan när böjspänningen är lägre än böjhållfastheten. Olika faktorer inverkar

på vippningen av balken, vilket kan vara stödförhållanden, stagnering i y-led samt dess avstånd och belastningens placering. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 4 s. 5) Då balken belastas av endast böjmoment granskas vippningen vid det dimensionerande tvärsnittet (Puuinfo Oy, 2023). Vippningen granskas genom att kontrollera att den dimensionerande böjspänningen $\sigma_{m,\alpha,d}$, vilket beräknas enligt formel 9, är mindre eller lika med reduktionsfaktor k_{crit} multiplicerad med dimensionerande böjhållfastheten $f_{m,d}$, dimensioneringsvillkoret presenteras i formel 51:

$$\sigma_{m,\alpha,d} \leq k_{crit} \cdot f_{m,d} \quad (51)$$

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 83)

För limträbalkar med rektangulärt tvärsnitt kan den kritiska böjspänningen beräknas enligt formel 52:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{c \cdot b^2}{h_{mitt} \cdot l_{ef}} \cdot E_{0,05} \quad (52)$$

Där b är balkens bredd

h_{mitt} är balkens höjd vid det dimensionerande tvärsnittet

$E_{0,05}$ är elasticitetsmodulens 5-procentsfraktil

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 84)

Den effektiva längden l_{ef} beaktar belastningen, stöd- och stagneringsförhållanden, vilka beräknas enligt formel 53:

$$l_{ef} = a + 2 \cdot h_{mitt} \quad (53)$$

Där a är avståndet mellan stagneringsstöden

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 85)

Faktorn c presenteras i formel 54:

$$c = \begin{cases} 0,78 ; \text{Trämateriäl av barrträd} \\ 0,72 ; \text{Limträ GL30cs} \\ 0,70 ; \text{Limträ GL30c \& GL30hs} \\ 0,68 ; \text{Limträ GL30h} \end{cases} \quad (54)$$

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 84)

Det relativa slankhetstalet vid vippning beräknas enligt formel 55:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \quad (55)$$

Där $f_{m,k}$ är den karakteristiska böjhållfastheten

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 83)

Reduktionsfaktor k_{crit} tillämpas vid granskningen av vippning. Reduktionsfaktor k_{crit} baserar sig på den relativa slankheten. Reduktionsfaktor k_{crit} kan framställas med tre olika tillstånd baserat på den relativa slankheten. Det första tillståndet behandlas då $\lambda_{rel,m}$ är mindre eller lika med 0,75, detta resulterar i att limträbalken definieras som stabil och ingen vippning sker. Det andra tillståndet behandlas då när $\lambda_{rel,m}$ är större än 1,4, detta resulterar i att limträbalkens bärförmåga definieras av vippningen. Det tredje tillståndet baserar sig på att när $\lambda_{rel,m}$ är mellan 0,75 och 1,4, vilket resulterar i att limträbalken förlorar sin bärförmåga på grund av böjmomentet, detta efter stora deformationer i både vertikal- och horisontalled. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 4 s. 6) Värdet för k_{crit} beskrivs i formel 56:

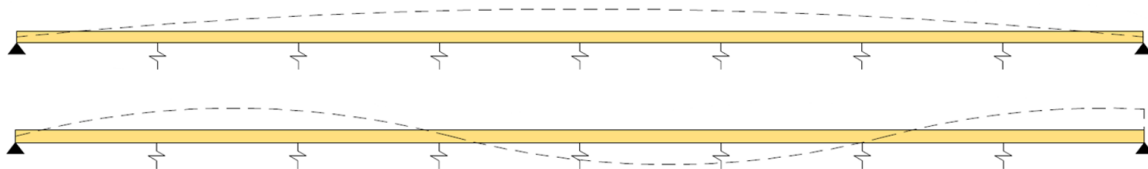
$$k_{crit} = \begin{cases} 1 & \text{när } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75\lambda_{rel,m} & \text{när } 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \\ \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} & \text{när } 1,4 < \lambda_{rel,m} \end{cases} \quad (56)$$

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 85)

4.1.9 Stabiliserande stöd i y-led

För limträbalkar vars styvhet inte är tillräcklig, kan metoder användas som gör konstruktionen styvare och därmed förhindrar stabilitetsförlust eller stora deformationer (RIL 205-1-2017, 2017, s. 169). Enligt föreläsaren Tero Lahtela förekommer det två olika

former som kan uppstå vid vippning, den första formen förskjuter limträbalken åt endast ett håll, medan den andra formen förskjuter limträbalken i s-form. (Puuinfo Oy, 2020b) Detta presenteras i figur 15.



Figur 15. Förskjutningar som kan uppstå vid vippning. (Puuinfo Oy, 2020a)

Stabiliserande stöd förhindrar förskjutningar i de former som kan uppstå för limträbalkar. Stöden ska uppfylla villkoret för dess fjäderstyvhet, vilket beskriver hur styvt stödet bör vara för att klara av de krafter som uppstår. (Puuinfo Oy, 2020b) De två formerna som kan uppstå vid vippning kontrolleras med samma dimensioneringsvillkor för stödets fjäderstyvhet. Dimensioneringsvillkoret för stödets fjäderstyvhet presenteras i formel 57:

$$C \geq \left(2 + 2 \cdot \cos \left(\frac{180^\circ}{m} \right) \right) \cdot \frac{N_d}{a} \quad (57)$$

Där m är antalet mellanrum mellan stöden

a är stödets indelning

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 170)

Den dimensionerande tryckkraften som limträbalken utsätts för beräknas enligt formel 58:

$$N_d = (1 - k_{crit}) \cdot \frac{M_{d,mitt}}{h_{mitt}} \quad (58)$$

Där k_{crit} är reduktionsfaktor

$M_{d,mitt}$ är det dimensionerande momentet i det dimensionerande tvärsnittet

h_{mitt} är balkens höjd vid det dimensionerande tvärsnittet

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 172)

Det stabiliserande stödets dimensionerande hållfasthet som motverkar vippning där förskjutningen sker endast åt det ena hållet beräknas enligt formel 59:

$$F_d = \frac{N_d \cdot a}{50 \cdot L} \quad (59)$$

Där a är stödets indelning

L är spännvidden

(Puuinfo Oy, 2023)

Förskjutningen i s-form granskas med formel 60, genom att man kontrollerar om förskjutningen överhuvudtaget är möjlig. Villkoret granskar om den kritiska våglängden l_s är större än hälften av spännvidden av limträbalken. Förskjutningar i s-form kan inte förekomma om den kritiska våglängden l_s är större än hälften av spännvidden av limträbalken:

$$l_s > \frac{L}{2} \quad (60)$$

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 172)

Den kritiska våglängden l_s beräknas enligt formel 61:

$$l_s = \max \left\{ \frac{\pi}{\sqrt[4]{\frac{C}{a \cdot E_{0,05} \cdot I_{z, \text{mitt}}}}} \right. \\ \left. 2a \right\} \quad (61)$$

Där C är fjäderstyvheten för stöden

a är stödets indelning

$E_{0,05}$ är elasticitetsmodulens 5-procentsfraktil

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 171)

Tröghetsmomentet $I_{z, \text{mitt}}$ beräknas för det dimensionerande tvärsnittet enligt formel 62:

$$I_{z, \text{mitt}} = \frac{h_{\text{mitt}} \cdot b^3}{12} \quad (62)$$

Där h_{mitt} är tvärsnittshöjden i det dimensionerande tvärsnittet

b är balkens bredd

(Högström m.fl., 2019).

Det stabiliserande stödets dimensionerande hållfasthet som motverkar vippning där förskjutningen sker i s-form beräknas enligt formel 63:

$$F_d = \frac{N_d}{80} \quad (63)$$

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 171)

Det stabiliserande stödet som motverkar vippning där förskjutningen sker i s-form, kan med formel 63 reduceras med reduktionsfaktor $k_{s,red}$, vilket beräknas enligt formel 64. Reduktionsfaktor $k_{s,red}$ kan tillämpas endast om limträbalken stabiliseras av minimi fyra stabiliserande stöd med jämn intervall:

$$k_{s,red} = \frac{a}{l_s - a} \quad (64)$$

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 171)

4.2 Hängbuksbalk

Hängbuksbalkens dimensioneringsgång baserar sig på exempelberäkning från Puuinfos Vaativien puurakenteiden suunnittelu – täydennyskoulutus. Dimensioneringsgången behandlar en fritt upplagd symmetrisk hängbuksbalk med en jämnt fördelad linjelast, där den nedre kanten av balken är konstant böjd över hela spännvidden. Hängbuksbalkens dimensioneringsgång består av böjhållfasthet i det dimensionerande tvärsnittet, böjhållfasthet i mitten av balken, skjuvhållfasthet vid stöden, stämpeltryck, nedböjning, vippning och stabiliserande stöd i y-led.

Det förekommer gemensamma skeden i dimensioneringsgången för hängbuksbalken och sadelbalken. De främsta skillnaderna i dimensioneringsgången mellan hängbuksbalken och sadelbalken är de dimensionerande skeden som är specifika för sadelbalkens ås. Utöver det förekommer det mått som beräknas med olika metoder. Uppbyggnaden av

hängbuksbalken och sadelbalken är samma, på grund av att deras lameller på balkarnas nedre kant är kontinuerliga och dragna, medan de på balkarnas övre kant är kapade och tryckta. Kapitel 4.2.1 behandlar de skeden i dimensioneringsgången som är anpassade till hängbuksbalken jämfört med sadelbalkens dimensioneringsgång. Kapitel 4.2.2 behandlar de gemensamma skedena i dimensioneringsgången för hängbuksbalken och sadelbalken.

4.2.1 Anpassade dimensioneringsmetoder

Böjhållfastheten i det dimensionerande tvärsnittet för hängbuksbalken dimensioneras enligt samma formler som förekommer i kapitel 4.1.1 för sadelbalken. Därmed beräknas hängbuksbalkens böjhållfasthet i det dimensionerande tvärsnittet enligt formlerna 9, 10 och 11. Dessa formler granskas enligt formel 8, vilken presenterar dimensioneringsvillkoret. Eftersom hängbuksbalkens nedre kant är konstant böjd mellan stöden avviker måttet för höjden vid det dimensionerande tvärsnittet. Vid det dimensionerande tvärsnittet för hängbuksbalken beräknas höjden enligt formel 65:

$$h_x = h_{mitt} = h_A + \left(\sqrt{R_{out}^2 - \left(\frac{L}{2} - x\right)^2} - \sqrt{R_{out}^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} \right) \quad (65)$$

Där R_{out} är den yttre radien av balkens nedre kant

L är spännvidden

Vid dimensioneringen av tvärsnittet behöver förhållandet i grader mellan balkens övrekant och nedrekant vid stödet definieras, eftersom den är konstant böjd längst hela spännvidden. Förhållandet beräknas enligt formel 66:

$$\sin \alpha = \frac{\frac{L}{2} - x_m}{R_{out}} \quad (66)$$

Där x_m är Avståndet från stödet till tvärsnittet där den dimensionerande böjhållfastheten förekommer

L är spännvidden

(Puuinfo Oy, 2020a)

Böjhållfastheten i mitten av hängbuksbalken beräknas delvis av samma formler som förekommer i kapitel 4.1.2 för sadelbalken. Vid beräkning av böjhållfastheten i mitten av hängbuksbalken är det främst beräkningen av böjspänningen som skiljer sig i dimensioneringsgången. För hängbuksbalken beräknas böjspänningen specifikt enligt formel 67. Böjhållfastheten i mitten av hängbuksbalken beräknas enligt formlerna 21, 22 och 67. Dessa formler granskas enligt formel 13, vilket presenterar dimensioneringsvillkoret:

$$\sigma_{m,d} = \frac{6 \cdot M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2} \quad (67)$$

Där $M_{ap,d}$ är dimensionerande moment vid mitten av balken

h_{ap} är balkhöjden vid mitten av balken

b är bredden

(RIL 205-1-2017, 2017, s. 86)

Nedböjningen för hängbuksbalken beräknas enligt samma formler som förekommer i kapitel 4.1.7 för sadelbalken. Det som är specifikt för hängbuksbalken i jämförelse med sadelbalken, berör beräkningen av tröghetsmomentet som behandlas i formel 49. Värdet h_e som för sadelbalken beräknas enligt formel 50, beräknas för hängbuksbalken enligt formel 65. Sadelbalken har en skild beräkning som är specifik för sadelbalken, medan hängbuksbalken använder värdet för höjden i det dimensionerande tvärsnittet. (Puuinfo Oy, 2020a)

4.2.2 Gemensamma dimensioneringsmetoder

De skeden i dimensioneringsgången som hängbuksbalken har gemensamt med sadelbalken är skjuvhållfastheten vid stöden, stämpeltrycket, vippningen och de stabiliserande stöden i y-led. Enligt de tidigare behandlade skedena i dimensioneringsgången för sadelbalken, beräknas skjuvhållfastheten vid stöden enligt kapitel 4.1.5, stämpeltrycket beräknas enligt kapitel 4.1.6, vippningen beräknas enligt kapitel 4.1.8 och de stabiliserande stöden i y-led beräknas enligt kapitel 4.1.9. (Puuinfo Oy, 2020a)

4.3 Bumerangbalk

Bumerangbalkens dimensioneringsgång baserar sig på exempelberäkning från Liimapuukäsikirja del 3. Dimensioneringsgången behandlar en fritt upplagd symmetrisk bumerangbalk med en jämnt fördelad linjelast. Bumerangbalkens dimensioneringsgång består av böjhållfasthet i det dimensionerande tvärsnittet, böjhållfasthet vid åsen, draghållfasthet vid åsen, skjuvhållfasthet vid stöden, stämpeltryck, nedböjning och vippning. Liimapuukäsikirja del 3 utför dimensioneringsgången med dimensioneringsbenämningar som skiljer sig från dimensioneringsgången för sadelbalken och hängbuksbalken. För att kunna jämföra limträbalkarnas dimensioneringsgång bättre med varandra har dimensioneringsbenämningar för bumerangbalken anpassats. I exempelberäkningen i Liimapuukäsikirja del 3, förekom det inget om de stabiliserande stöden i Y-led eller kombinerat drag- och skjuvhållfasthet vid åsen, därmed beaktas de inte i detta examensarbete för bumerangbalken.

Det förekommer gemensamma skeden i dimensioneringsgången för bumerangbalken och sadelbalken. Bumerangbalkens krökta tvärsnitt bidrar till de största skillnaderna i dimensioneringsgången jämfört med sadelbalken. Stämpeltrycket och nedböjningen är de skeden som skiljer sig mest i dimensioneringsgången mellan bumerangbalken och sadelbalken, utöver dessa förekommer det olika mått som beräknas med olika metoder. Kapitel 4.3.1 behandlar de anpassade skedena i dimensioneringsgången för bumerangbalken jämfört med sadelbalkens dimensioneringsgång, medan kapitel 4.3.2 behandlar de gemensamma skedena i dimensioneringsgången för bumerangbalken och sadelbalken.

4.3.1 Anpassade dimensioneringsmetoder

Böjhållfastheten i det dimensionerande tvärsnittet för bumerangbalken beräknas delvis med samma formler som förekommer i kapitel 4.1.1. För böjhållfastheten i det dimensionerande tvärsnittet har bumerangbalken och sadelbalken gemensamma formler i beräkningarna. Dessa är avståndet till tvärsnittet där den dimensionerande böjspänningen förekommer vilket presenteras i formel 6, dimensionerande böjspänning som presenteras i formel 9, dimensionerande moment som presenteras i formel 10 och dimensioneringsvillkoret som presenteras i formel 8. Krökningen av bumerangbalkens

tvärsnitt orsakar att beräkningen av höjden i det dimensionerande tvärsnittet skiljer sig från sadelbalken. Höjden i det dimensionerande tvärsnittet beräknas enligt formel 68:

$$h_x \approx h'_x = h_a + x_m \cdot (\tan \alpha - \tan \beta) + r_{in} \cdot \frac{(1 - \cos \beta)}{\cos \beta} \cdot \cos \alpha - \beta \quad (68)$$

Där h'_x är det vertikala måttet vid det dimensionerande tvärsnittet

α är lutningen på balkens övre kant

β är lutningen på balkens undre kant

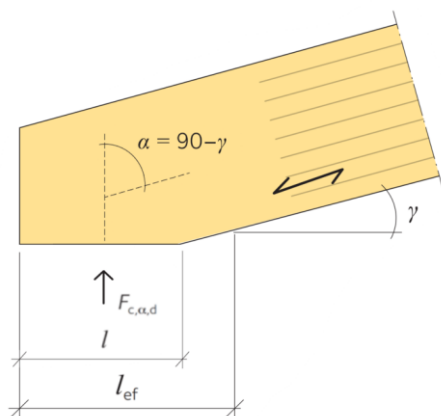
r_{in} är den inre krökningsradien

(Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015b, s. 52)

Reduktionsfaktor $k_{m,\alpha}$ anpassas vid beräkningen av bumerangbalken. Reduktionsfaktor $k_{m,\alpha}$ beräknas enligt formel 11 och 12, där formlerna för sadelbalken beaktar balkens lutning med α . Specifikt för bumerangbalken används $\Delta\alpha$ för att beakta skillnaden mellan lutningen på bumerangbalkens övre och nedre kant. Överlag behåller formel 11 och 12 samma beräkningsmetod för reduktionsfaktor $k_{m,\alpha}$ både för sadelbalken och bumerangbalken.

(Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015b, s. 120)

Stämpeltrycket som uppstår mellan bumerangbalken och stöden förekommer i en vinkel α mot fiberriktningen, vilket beror på bumerangbalkens krökta tvärsnitt. Den anpassade figur 16, illustrerar hur stämpeltrycket förekommer i vinkel α mot fiberriktningen. (Sveriges Skogsindustrier & Svenskt Trä, 2016c, s. 26)



Figur 16. Stämpeltryck i vinkel α mot fiberriktningen. (Sveriges Skogsindustrier & Svenskt Trä, 2016c, s. 26)

Dimensioneringsvillkoret för stämpeltryck i en vinkel α mot fiberriktningen presenteras i formel 69:

$$\sigma_{c,\alpha,d} \leq f_{c,\alpha,d} \quad (69)$$

Den dimensionerande tryckspänningen i en vinkel α mot fiberriktningen beräknas enligt formel 70:

$$\sigma_{c,\alpha,d} = \frac{F_{c,\alpha,d}}{l_{ef} \cdot b} \quad (70)$$

Där $F_{c,\alpha,d}$ är den dimensionerande tryckkraften i vinkel α mot fiberriktningen

b är balkens bredd

(Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015b, s. 32)

l_{ef} är den effektiva längden på stödet, vilket beräknas enligt formel 71:

$$l_{ef} = l + 30 \cdot \cos \alpha \quad (71)$$

Där α är lutningen på balkens nedre kant

(Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015b, s. 31)

Den dimensionerande tryckhållfastheten i en vinkel α mot fiberriktningen beräknas enligt formel 72:

$$f_{c,\alpha,d} = \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{k_{c,90} \cdot k_1 \cdot f_{c,90,d}} \cdot \sin^2 \beta + \cos^2 \beta} \quad (72)$$

Där $f_{c,0,d}$ är dimensionerande tryckhållfasthet med fiberriktning

$f_{c,90,d}$ är dimensionerande tryckhållfasthet vinkelrätt mot fiberriktningen

β är vinkeln som tryckspänningen uppstår i vid stödet, $90^\circ - \alpha$

(Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015b, s. 32)

$k_{c,90}$ är en faktor som beaktar belastningens placering, risken för sprickbildning och tryckkraftens storlek. (RIL 205-1-2017, 2017, s. 77) Faktorn $k_{c,90}$ bestäms enligt kapitel 4.1.6.

k_1 är en faktor som beaktar förhållandet mellan permanent- och variabel last. Enligt Eurokod är värdet på $k_1 = 1,0$, medan Liimapuukäsikirja del 3 anger värdet på k_1 enligt formel 73:

$$k_1 = \begin{cases} \frac{f_{c,90,k}}{f_{c,90,d}} & \text{när } \frac{g_k}{q_k} \leq 0,4 \\ 1 & \text{när } \frac{g_k}{q_k} > 0,4 \end{cases} \quad (73)$$

(Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015b, s. 32)

Nedböjningen av bumerangbalken förekommer i mitten av balken, där det krökta tvärsnittet orsakar att horisontella förskjutningar förekommer vid det "fria" stödet. Bumerangbalkens krökta tvärsnitt orsakar att beräkningen av nedböjningen och förskjutningen är komplicerad, trots detta kan de uppskattas med formler. Nedböjningen och förskjutningen rekommenderas att utföras i ett beräkningsprogram för att få noggrannare resultat. Nedböjningen för en bumerangbalk uppskattas enligt formel 74:

$$w = \frac{w_q}{\left(\cos \frac{\alpha + \beta}{2}\right)} \quad (74)$$

Där w_q är nedböjningen i mitten av en symmetrisk sadelbalk med samma spännvidd, tvärsnitt vid stöden och vid mitten av balken som bumerangbalken.

α är lutningen på balkens övre kant

β är lutningen på balkens undre kant

De horisontella förskjutningarna som förekommer vid det "fria" stödet, som förorsakas av nedböjningen, beräknas enligt formel 75:

$$w_h = 4 \cdot \frac{f + 0,8h}{L} \cdot w \quad (75)$$

Där f är det vertikala avståndet mellan neutralaxeln vid stödet och åsen

h är balkhöjden vid stöden

L är spännvidden

w är den vertikala nedböjningen i mitten av balken

(Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 6 s. 14)

4.3.2 Gemensamma dimensioneringsmetoder

De gemensamma skedena i dimensioneringsgången för bumerangbalken och sadelbalken är böjhållfasthet vid åsen, draghållfasthet vid åsen, skjuvhållfasthet vid stöden och vippning. Baserat på de tidigare stegen i dimensioneringsgången för sadelbalken, beräknas böjhållfastheten vid åsen enligt kapitel 4.1.2, draghållfastheten vid åsen beräknas enligt kapitel 4.1.3, skjuvhållfastheten vid stöden beräknas enligt kapitel 4.1.5 och vippningen beräknas enligt kapitel 4.1.8. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015b, s. 119-122)

5 Dimensioneringsexempel av limträbalkar

För att kunna jämföra hållfastheten av de behandlade limträbalkarna i kapitel 4, på ett så trovärdigt sätt som möjligt, har ett fiktivt beräkningsexempel bildats. Det uppgjorda beräkningsexemplet består av en pelar-balk konstruktion. Limträbalkarna har en spännvidd på 15 000 mm med en indelning på 6000 mm. Limträbalkarna är fritt upplagda på limträpelare, där limträpelarna har ett tvärsnitt med bredden enligt limträbalkarnas bredd, och ett djup på 400 mm. De skeden i dimensioneringsgången som behandlas är böjhållfasthet i det dimensionerande tvärsnittet, böjhållfasthet vid åsen/böjhållfasthet vid mitten av balken, draghållfasthet vid åsen, skjuvhållfasthet vid stöden och stämpeltryck. Detta innebär att dimensioneringen endast beaktar hållfastheten av limträbalkarna. Det antas att vippningen är förhindrad av takkonstruktionen, detta innebär att vippningen av limträbalkarna inte beaktas i dimensioneringen. Pelar-balk konstruktionen beaktar endast dimensioneringen av limträbalkarna, vilket innebär att dimensionering av övriga konstruktioner och anslutningar inte beaktas. Övriga takkonstruktioner tas i beaktande endast genom deras belastningar.

5.1 Belastningar

Pelar-balk konstruktionen belastas av både permanent- och variabel belastning. Den permanenta belastningen består av limträbalkarnas egenvikt och egenvikten av vattentaket. Den variabla belastningen består endast av snölasten. Egenvikten av limträ beräknas enligt 5 kN/m^3 . Medan vattentakets egenvikt beräknas enligt $0,5\text{ kN/m}^2$. Snölasten beräknas som en jämn linjelast, vilket betyder att drivningen vid åsen inte tas i beaktande. Värdet för snölasten på mark beräknas med $2,75\text{ kN/m}^2$ vilket motsvarar snölasten på mark i södra Finland enligt figur 9. Den dimensionerande belastningen för limträbalkarna beräknas i bilaga 1, 2 och 3, vilka består av dimensioneringen av limträbalkarna.

5.2 Teknisk data

Limträbalkarna dimensioneras i klimatklass 2. Dimensioneringen av limträbalkarna utförs i endast medellång tidsklass. Konstruktionen tillhör konsekvensklass CC2. Limträbalkarna tillhör hållfasthetsklassen GL30c. Lamelltjockleken för sadelbalken och hängbuksbalken är

45 mm, medan bumerangbalken har en lamelltjocklek på 33 mm. Den tunnare lamelltjockleken för bumerangbalken beror på förhållandet mellan den inre krökningsradien och lamelltjockleken, vilket har behandlats i kapitel 2.3.2. Sadelbalkens snedsågade kant har en lutning på 4 grader. Hängbuksbalken är kontinuerligt krökt på balkens nedre kant, den nedre kanten har en yttre krökningsradie på 57 065 mm. Bumerangbalken är kontinuerligt krökt längst hela spännvidden med en inre krökningsradie på 20 000 mm, vilket betyder att inga lameller är sågade. Bumerangbalkens form möjliggörs genom ett skilt åsstycke, vilket är fäst med mekaniska fastsättningar. Dimensionering av de mekaniska fastsättningarna vid åsen behandlas inte i detta examensarbete. Den raka delen av bumerangbalkens övre- och nedre kant har en lutning på 13 grader.

5.3 Uppskattning av dimensioner

För att resultatet av limträbalkarna ska kunna undersökas och jämföras på ett trovärdigt sätt, bör limträbalkarnas dimensioner vara jämförbara. Eftersom limträbalkarna har olika former kan dimensionerna uppskattas med olika metoder. Limträbalkarnas dimensioner uppskattas enligt Liimapuukäsikirja osa 2, vilket anger uppskattning av dimensionerna för sadelbalken och bumerangbalken. Hängbuksbalken har ingen angiven metod för att uppskatta dess höjd, vilket innebär att hängbuksbalken använder sig av samma dimensioner som för sadelbalken. Enligt Liimapuukäsikirja osa 2, uppskattas sadelbalkens höjd vid stöden enligt formel 76, medan höjden vid mitten av balken uppskattas enligt formel 77. Dessa formler som uppskattar höjden vid stöden och vid mitten av limträbalkarna är preliminära uppskattningar, vilket betyder att antaganden har gjorts eftersom höjderna är okända. Formlerna antar att x_m är beläget med ett avstånd på en fjärdedel av spännvidden från stöden. Formlerna antar dessutom att den dimensionerande böjhållfastheten $f_{m,d}$ delvis är reducerad till följd av den snedsågade kanten. Reduktionsfaktor $k_{m,\alpha}$ kan uppskattas till 0,9 vid lutningar som är lägre än 6°:

$$h_A = \frac{L}{4} \cdot \left(3 \cdot \sqrt{\frac{p_d}{b \cdot (0,9 \cdot f_{m,d})}} - \tan \alpha \right) \quad (76)$$

$$h_{ap} = \frac{L}{4} \cdot \left(3 \cdot \sqrt{\frac{p_d}{b \cdot (0,9 \cdot f_{m,d})}} + \tan \alpha \right) \quad (77)$$

Där L är spännvidden

p_d är den dimensionerande belastningen

b är balkens bredd

$f_{m,d}$ är den dimensionerande böjhållfastheten

(Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 7, s. 10)

Uppskattning av dimensionerna för bumerangbalken kan antingen göras med formler eller med tabellvärden med geometriska parametrar. Genom att uppskatta bumerangbalkens dimensioner med hjälp av formler och AutoCad, kan möjligast jämförbara dimensioner med sadelbalken och hängbuksbalken uppskattas. Uppskattningen av dimensionerna med formler för bumerangbalken uppskattar höjden vid det dimensionerande tvärsnittet, vilket antas vara beläget med ett avstånd på en fjärdedel av spännvidden från stöden. De antaganden som används för uppskattningen av sadelbalken och hängbuksbalken används även för bumerangbalken. Formeln för uppskattningen av höjden vid det dimensionerande tvärsnittet beräknas enligt formel 78:

$$h_{x_0} = \frac{3 \cdot L}{4} \cdot \sqrt{\frac{p_d}{b \cdot (0,9 \cdot f_{m,d})}} \quad (78)$$

Genom att man känner till den uppskattade höjden i det dimensionerande tvärsnittet, kan höjden vid stöden och vid mitten av balken uppskattas om man känner till bumerangbalkens geometriska förhållanden och parametrar. (Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 7, s. 14)

Eftersom bumerangbalken är kontinuerligt krökt med den inre krökningsradien längst hela spännvidden, formas därmed raka sektioner efter krökningen. Detta innebär att höjden vid stöden är samma som den uppskattade höjden i det dimensionerande tvärsnittet. Med dessa uppskattade höjder kan sedan höjden vid åsen bestämmas med hjälp av AutoCad. Den slutliga höjden i det dimensionerande tvärsnittet bestäms med AutoCad.

Limträbalkarnas bredder uppskattas även med formler, vilka tar hänsyn till att reducera risken för vippning framför allt vid monteringskedet. Bredden för sadelbalken och

hängbuchs balken uppskattas med formel 79, medan bredden för bumerangbalken uppskattas med formel 80:

$$b = \frac{L}{110} \quad (79)$$

$$b = \frac{L}{80} \quad (80)$$

Där b är balkens bredd

L är spännvidden

(Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015a, stycke 7, s. 10-14)

Uppskattningen av dimensionerna för limträbalkarna beräknas i bilaga 1, 2 och 3, vilka består av dimensioneringen av limträbalkarna. De uppskattade dimensionerna för sadelbalken och hängbuchs balk är samma, medan bumerangbalken skiljer sig åt i dimensionerna. I tabell 10 presenteras de uppskattade höjderna för limträbalkarna.

Tabell 10. De uppskattade dimensionerna för limträbalkarna.

Dimensioner (mm)	Sadelbalk	Hängbuchs balk	Bumerangbalk
Bredd	140	140	190
Höjd vid stöd	900	900	990
Höjd vid ås/mitt	1395	1395	1542

(Björkholm, 2024)

6 Analys av resultat

De huvudsakliga resultaten från beräkningsexemplet, vilket presenterades i kapitel 5, presenteras i tabell 11. Beräkningen av limträbalkarna är bifogade i bilagorna. Bilaga 1 presenterar beräkningen av sadelbalken, bilaga 2 presenterar beräkningen av hängbuksbalken och bilaga 3 presenterar beräkningen av bumerangbalken. Beräkningsexemplet bestod av dimensionering av tre limträbalkar med olika former, nämligen sadelbalk, hängbuksbalk och bumerangbalk. Dimensioneringen fokuserade på att jämföra hållfastheten av limträbalkarna, vilket innebar att dimensioneringsskeden som nedböjning och vippning inte behandlades. Dimensioneringen av limträbalkarna beräknades enligt formlerna i de behandlade skedena i kapitel 4.

Tabell 11. Utnyttjandegrad av de angivna skedena i dimensioneringen.

Dimensioneringsskede	Sadelbalk	Hängbuksbalk	Bumerangbalk
Böjhållfasthet i det dimensionerande tvärsnittet	97,1 %	78,0 %	82,1 %
Böjhållfasthet vid åsen/mitten	88,4 %	78,6 %	72,9 %
Draghållfasthet vid åsen	91,3 %		251,4 %
Skjuvhållfasthet vid stöden	82,9 %	82,9 %	55,7 %
Stämpeltryck	108,5 %	108,5 %	50,2 %

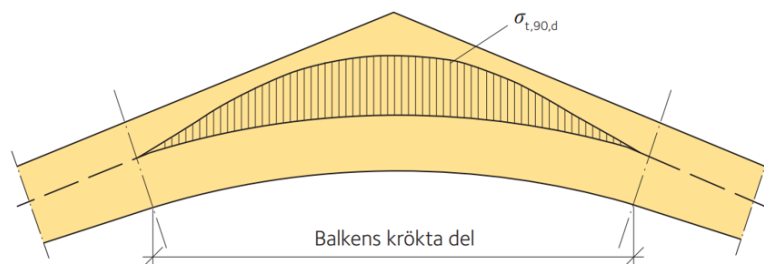
(Björkholm, 2024)

Böjhållfastheten beräknades och granskades på två tvärsnitt i balkarna, i det dimensionerande tvärsnittet och vid åsen/mitten av balken. Enligt tabell 11 är utnyttjandegraden i det dimensionerande tvärsnittet för sadelbalken högst på 97,1%, medan bumerangbalken hade en utnyttjandegrad på 82,1% och hängbuksbalken hade lägsta utnyttjandegrad på 78%. Sadelbalken hade även högst utnyttjandegrad på 88,4% vid böjhållfastheten vid åsen/mitten av balken, medan hängbuksbalken hade en utnyttjandegrad på 78,6% och bumerangbalken hade lägsta utnyttjandegraden på 72,9%. Draghållfastheten vid åsen beräknades för sadelbalken och bumerangbalken, där det kunde beaktades att bumerangbalken hade högre utnyttjandegrad än vad som är tillåtet, vilket var 251,4%, medan utnyttjandegraden för sadelbalken bibehölls inom de tillåtna gränserna på 91,3%. Eftersom sadelbalken och hängbuksbalken hade samma dimensioner på tvärsnittet, hade de samma utnyttjandegrad för både skjuvhållfastheten vid stöden

vilket var 82,9% och för stämpeltrycket 108,5%. Däremot hade bumerangbalken betydligt lägre utnyttjandegrad för skjuvhållfastheten vid stöden, vilket var 55,7%. Bumerangbalken hade över hälften lägre utnyttjandegrad för stämpeltrycket än vad sadelbalken och hängbuksbalken hade, vilket var 50,2%.

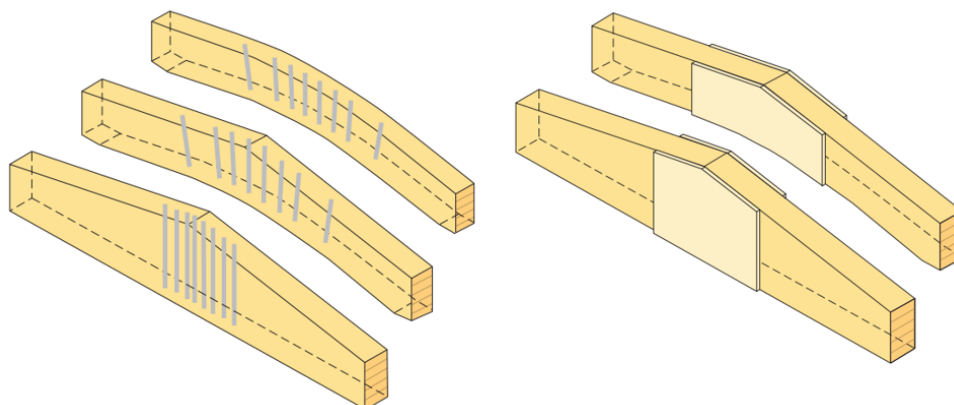
I de två tvärsnitten där böjhållfastheten granskades, kan man lägga märke till att utnyttjandegraden för alla balkar överstiger 70%. Sadelbalken hade en högre utnyttjandegrad för böjhållfastheten i det dimensionerande tvärsnittet jämfört med böjhållfastheten vid åsen. Detta kan förklaras med att sadelbalkens form följer momentkurvan, vilket innebär att där tvärsnittet är störst är även momentet störst. Bumerangbalken visar motsvarande resultat, eftersom formen för bumerangbalken följer momentkurvan. Hängbuksbalken har en nästan identisk utnyttjandegrad för böjhållfastheten i båda tvärsnitten. Den nästan identiska utnyttjandegraden beror på den höga krökningsradien som hängbuksbalken har. Tvärsnitten befinner sig inom det område där krökningen orsakar att höjdskillnaderna är väldigt små, vilket resultatet antyder.

Draghållfastheten vid åsen beräknades för sadelbalken och bumerangbalken, och resultaten har en avsevärd procentuell avvikelse från varandra. Dragspänningen som förekommer vinkelrätt mot fiberriktningen vid åsen för bumerangbalken överstiger draghållfastheten vinkelrätt mot fiberriktningen, medan för sadelbalken förblir dragspänningen vinkelrätt mot fiberriktningen lägre än draghållfastheten vinkelrätt mot fiberriktningen. Detta förorsakar att det för bumerangbalken förekommer fläkning av lamellerna vid åsstycket, vilket betyder att åsstycket lossnar från den krökta balken. Dessa dragspänningar förorsakas främst av att böjmomentet försöker rätta ut krökningen av bumerangbalken. Vanlig förekomst av dragspänningsfördelning visualiseras i figur 17.



Figur 17. Dragspänningsfördelningen vinkelrätt mot fiberriktningen i bumerangbalk. (Sveriges Skogsindustrier & Svenskt Trä, 2016b, s. 115)

För att bumerangbalken ska kunna motstå de dragspänningar som förekommer vinkelrätt mot fiberriktningen vid åsstycket bör balkens draghållfasthet förstärkas vid åsen. Detta innebär att bumerangbalken inte går att utföra med de dimensioner som har uppskattats utan att någon förstärkning har utförts. Examensarbetet behandlar inte dimensionering av förstärkningar vid åsstycket för bumerangbalken, vilket innebär att ingen noggrannare slutsats kan dras angående om förstärkning av åsstycket är tillräckligt eller inte. I fall där förstärkningen av åsstycket inte är tillräcklig kan bumerangbalkens dimensioner ökas eller lasten minskas för att reducera böjmomentet. En vanlig metod att förstärka åsstycket för bumerangbalken är att använda mekaniska fästdon eller skivförstärkning på balkens sidor, detta visas i figur 18.



Figur 18. Förstärkning med mekaniska fästdon och skivor. (Sveriges Skogsindustrier & Svenskt Trä, 2016b, s. 116)

Trots att bumerangbalken har ett större tvärsnitt vid åsen, jämfört med sadelbalken, uppstår det över dubbelt så stor dragspänning vid åsen. Detta beror främst på

reduktionsfaktor k_p som beaktar geometrin av området kring åsen. Draghållfastheten vinkelrätt mot fiberriktningen reduceras mera för bumerangbalken än för sadelbalken. Bumerangbalken har högre korrigeringsfaktorer som beaktar spänningsfördelningen i området kring åsen samt större volym i området kring åsen, vilket resulterar i lägre volymfaktor jämfört med sadelbalken.

Sadelbalken och hängbuksbalken hade båda samma utnyttjandegrad för skjuvhållfastheten vid stöden, vilket beror på att båda balkarna har samma dimensioner och utgångsdata. Däremot hade bumerangbalken en lägre utnyttjandegrad. Beräkningsgången för skjuvhållfastheten vid stöden är samma för alla balkar, vilket innebär att det som orsakar att utnyttjandegraden är lägre för bumerangbalken är balkens dimensioner. Sadelbalken och hängbuksbalken hade även samma utnyttjandegrad för stämpeltrycket, vilket beror på att båda balkarna har dimensioner och utgångsdata. Stämpeltrycket för sadelbalken och hängbuksbalken beräknas vinkelrätt mot fiberriktningen, medan bumerangbalkens krökta form orsakar att stämpeltrycket beräknas i vinkel α mot fiberriktningen. Bumerangbalken hade en lägre utnyttjandegrad jämfört med sadelbalken och hängbuksbalken. Den lägre utnyttjandegraden beror främst på att stämpeltrycket förekommer i vinkel α vid stödet. Eftersom elasticitetsmodulen för limträ är högre längs fiberriktningen än vinkelrätt mot fiberriktningen, har även materialet större kapacitet, vilket resultatet antyder.

Då man analyserar resultaten i tabell 11, kan man konstatera att sadelbalken och hängbuksbalken har en mera jämn och konstant utnyttjandegrad av de olika dimensioneringsskedena jämfört med bumerangbalken. Sadelbalken har den jämnaste och högsta utnyttjandegraden, medan bumerangbalken har den mest varierande och delvis högsta och lägsta utnyttjandegraden.

7 Sammanfattning

Syftet med detta examensarbete var att undersöka och jämföra hur formen på tre olika limträbalkar påverkar hållfastheten av balkarna. Limträbalkarna som har undersökts och jämförts var sadelbalken, hängbuksbalken och bumerangbalken. Trots att formerna skiljer sig från varandra, har alla tre limträbalkarna kontinuerliga lameller på nedre kanten och sågade på övre kanten.

Limträbalkarnas form medför att skedena i dimensioneringsgången är olika för de tre typerna av balkar. För hängbuksbalken är det främst metoder för beräkning av olika mått och användningen av olika faktorer som beaktar formen som skiljer sig från sadelbalken. Också för bumerangbalken beräknas mått med olika metoder, även användningen av olika faktorer som beaktar formen skiljer sig från sadelbalken. Dessutom medför bumerangbalkens form att nedböjningen är komplicerad att beräkna, och av den orsaken rekommenderas beräkningen utföras med program för noggrannare resultat. Den krökta formen på bumerangbalken medför även att stämpeltrycket beräknas med andra metoder och formler jämfört med sadelbalken och hängbuksbalken. Sadelbalken, hängbuksbalken och bumerangbalken har en del gemensamma skeden i dimensioneringsgången, men det förekommer olika skeden som beror på balkarnas form.

Resultatet från beräkningsexemplet antyder att hållfastheten av limträbalkarna delvis påverkas av formen. Det kan konstateras att sadelbalken, hängbuksbalken och bumerangbalken har motsvarande resultat för böjhållfastheten i det dimensionerande tvärsnittet och vid åsen/mitten. Detta innebär att limträbalkarnas form påverkar böjhållfastheten, trots detta avviker resultaten inte avsevärt mycket från varandra. Resultatet för draghållfastheten vid åsen för bumerangbalken var det som avvek procentuellt mest mellan alla resultat. Avvikelsen beror på limträbalkens form, vilket kan utgöra en begränsande faktor för användningen av bumerangbalken. Resultaten visade att skjuvhållfastheten vid stöden främst beror på dimensionerna och utgångsdata, det vill säga att formen på limträbalkarna inte visade någon effekt på resultatet. Stämpeltrycket visade att formen på limträbalkarna påverkar resultatet. Sadelbalkens och hängbuksbalkens form orsakar att stämpeltrycket förekommer vinkelrätt mot fiberriktningen, medan bumerangbalkens form orsakar att stämpeltrycket förekommer i vinkel α mot fiberriktningen.

Resultatet av beräkningsexemplet är till en viss del begränsat. De främsta begränsningarna är att resultatet baserar sig på endast den utgångsdata, dimensioner och spännvidder av limträbalkarna som beräkningsexemplet behandlade. Detta innebär att noggrannare slutsatser inte kan dras på grund av dessa begränsningar. En noggrannare slutsats skulle kunna dras genom att utföra flera olika typer av beräkningsexempel med olika utgångsdata, dimensioner och spännvidder av limträbalkarna. Detta skulle troligen framställa ett mönster för hur limträbalkarnas hållfasthet påverkas av formen, och därmed skulle limträbalkarna noggrannare kunna undersökas och jämföras. Med det sagt skulle detta kunna vara en alternativ fortsatt fördjupad studie inom området dimensionering av limträbalkar av olika geometriska former.

8 Källor

Finlands författningssamling 477/2014. (2014). *Miljöministeriets förordning om bärande konstruktioner*. <https://www.finlex.fi/sv/laki/alkup/2014/20140477>

Högström, J., Järveläinen, H., Koskinen, K., Lindholm, M., Saarikko, T., Åhl, M. (Red.). (2019). *Byggnadskalendern 2019* (85:e uppl.) Svenska Byggmästare- och Ingenjörsförbundet YH i Finland r.f.

Puuinfo Oy. (2020a). *Vaativien puurakenteiden suunnittelu - täydennyskoulutus*. Puuinfo. Hämtad 5.2.2024, från <https://puuinfo.fi/koulutus/vaativien-puurakenteiden-suunnittelu-taydennyskoulutus-vaapu/vaapu-esimerkkilaskelmat/>

Puuinfo Oy. (2023). *Teollisen puurakentamisen opetusmateriaali - aineistot*. Puuinfo. Hämtad 29.1.2024, från <https://puuinfo.fi/koulutus/oppimateriaalit/teollisen-puurakentamisen-oppimateriaali-tpuur-aineistot/>

Puuinfo Oy. (30.6.2020b). *Moduuli 2: 18 Rakenneosan stabiliteettituenta ja levyjäykistys* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=H69uuCJaOXo>

RIL 201-1-2017 (2017). *RIL 201-1-2017 Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat*. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

RIL 205-1-2017 (2017). *RIL 205-1-2017 Puurakenteiden suunnitteluohje*. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy. (2014). *Liimapuukäsikirja osa 1*. Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy. <https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/07/Liimapuuk%C3%A4sikirja-Osa-1.pdf>

Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy. (2015a). *Liimapuukäsikirja osa 2*. Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy. <https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/07/Liimapuuk%C3%A4sikirja-Osa-2.pdf>

Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy. (2015b). *Liimapuukäsikirja osa 3*. Suomen Liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy. <https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2023/04/Liimapuukasikirja-Osa-3.pdf>

Suomen rakentamismääräyskokoelma. (2016). *Rakenteiden lujuus ja vakaus: Puurakenteet*. <https://ym.fi/rakentamismaaraykset>

Suomen standardisoimisliitto SFS ry. (2006). *Rakenteiden suunnitteluperusteet* (SFS-EN 1990 + A1 + AC). Suomen standardisoimisliitto SFS ry. <https://online.sfs.fi>

Suomen standardisoimisliitto SFS ry. (2014). *Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt* (SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC). Suomen standardisoimisliitto SFS ry. <https://online.sfs.fi>

Sveriges Skogsindustrier & Svenskt Trä (2016a). *Limträhandbok Del 1: Fakta om limträ* (5:e uppl.). Sveriges Skogsindustrier & Svenskt Trä. <https://www.svenskttra.se/siteassets/5-publikationer/pdf/limtrahandbok-del-1-svenska-2018.pdf>

Sveriges Skogsindustrier & Svenskt Trä (2016b). *Limträhandbok Del 2: Projektering av limträkonstruktioner* (5:e uppl.). Sveriges Skogsindustrier & Svenskt Trä. <https://www.svenskttra.se/siteassets/5-publikationer/pdf/limtrahandbok-del-2-svenska-2018.pdf>

Sveriges Skogsindustrier & Svenskt Trä (2016c). *Limträhandbok Del 3: Dimensionering av limträkonstruktioner* (5:e uppl.). Sveriges Skogsindustrier & Svenskt Trä. <https://www.svenskttra.se/siteassets/5-publikationer/pdf/limtrahandbok-del-3-svenska-2018.pdf>

Bilagor

Sadelbalk

Materialegenskaper:

Material:		GL30c
Klimatklass:		2
Partialkoefficient för materialegenskaper:	$\gamma_M =$	1,25
Modifieringsfaktor:	$k_{mod} =$	0,8
Reduktionsfaktor:	$k_{cr} =$	1,0

Dimensioner:

Balkindelning:	$k =$	6000 mm
Spännvidd:	$L =$	15 000 mm
Lamelltjocklek:	$t =$	45 mm
Övrekantens lutning:	$\alpha_{ap} =$	4 °
Uppskattad balkhöjd vid stöd:	$h_A = \frac{L}{4} \cdot \left(3 \cdot \sqrt{\frac{p_d}{b \cdot (0,9 \cdot f_{m,d})}} - \tan \alpha_{ap} \right) =$	900 mm
Uppskattad balkhöjd vid åsen:	$h_{ap} = \frac{L}{4} \cdot \left(3 \cdot \sqrt{\frac{p_d}{b \cdot (0,9 \cdot f_{m,d})}} + \tan \alpha_{ap} \right) =$	1395 mm
Uppskattad balkbredd:	$b = \frac{L}{110} =$	140 mm
Pelardjup:	$l_A =$	400 mm
Åsområdets volym:	$V = b \cdot h_{ap}^2 =$	0,272 m ³

Hållfasthetsegenskaper:

Böjhållfasthet:	$f_{m,k} =$	30 N/mm ²
Skjuvhållfasthet:	$f_{v,k} =$	3,5 N/mm ²
Tryckhållfasthet (90°):	$f_{c,90,k} =$	2,5 N/mm ²
Draghållfasthet (90°):	$f_{t,90,k} =$	0,5 N/mm ²

Dimensionerande värden för hållfastheter:

Böjhållfasthet:	$f_{m,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} =$	19,2 N/mm ²
Skjuvhållfasthet:	$f_{v,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} =$	2,24 N/mm ²
Tryckhållfasthet (90°):	$f_{c,90,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c,90,k}}{\gamma_M} =$	1,6 N/mm ²
Draghållfasthet (90°):	$f_{t,90,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{t,90,k}}{\gamma_M} =$	0,32 N/mm ²

Belastningar:

Permanent belastning:

Limträbalkens egenvikt uppskattas. Eftersom höjden vid stöden och vid åsen av limträbalken är okända. Egenvikten uppskattas därför enligt en limträbalk med en jämn höjd på 1,4m.

Volymvikt för limträ:	$\rho =$	5 kN/m ³
Limträbalkens egenvikt per meter:	$g_{k,1} = b \cdot h \cdot \rho =$	0,98 kN/m
Vattentakets egenvikt:	$g_{vattentak} =$	0,5 kN/m ²
Vattentakets egenvikt per meter:	$g_{k,2} = g_{vattentak} \cdot k =$	3 kN/m
Permanent belastning per meter:	$g_{k,1} + g_{k,2} =$	3,98 kN/m

Variabel belastning:

Snölasten beräknas som en jämn linje last över hela balken.

Snölast på mark:	$S_k =$	2,75 kN/m ²
	$\mu_1 =$	0,8
Snölast på limträbalken:	$S = \mu_1 \cdot S_k =$	2,2 kN/m ²
Snölast per meter:	$q_k = S \cdot k =$	13,2 kN/m

Dimensionerande belastning:

$$p_d = 1,15 K_{FI} + G_{k,j} + 1,5 K_{FI} Q_{k,1} + 1,5 K_{FI} \sum_{i>1} \Psi_{0,i} Q_{k,i} = 24,4 \text{ kN/m}$$

Böjhållfasthet i det dimensionerande tvärsnittet:

Tvärsnittets placering: $x_m = \frac{L \cdot h_A}{2 \cdot h_{ap}} = 4838,7 \text{ mm}$

Tvärsnittets höjd: $h_{mitt} = h_A \cdot \left(2 - \frac{h_A}{h_{ap}}\right) = 1219,4 \text{ mm}$

Böjmoment: $M_{d,mitt} = \frac{P_d \cdot L \cdot x_m}{2} \cdot \left(1 - \frac{x_m}{L}\right) = 599,3 \text{ kNm}$

Böjspänning: $\sigma_{m,\alpha,d} = \sigma_{m,0,d} = \frac{6 \cdot M_{d,mitt}}{b \cdot h_{mitt}^2} = 17,3 \text{ N/mm}^2$

Reduktionsfaktor: $k_{m,\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{m,d}}{1,5 \cdot f_{v,d}} \cdot \tan \alpha_{ap}\right)^2 + \left(\frac{f_{m,d}}{f_{c,90,d}} \cdot \tan^2 \alpha_{ap}\right)^2}} = 0,927$

Dimensioneringsvillkor: $\sigma_{m,\alpha,d} \leq k_{m,\alpha} \cdot f_{m,d}$

Utnyttjandegrad: 97,1 %

Böjhållfasthet vid åsen:

Böjmoment: $M_{ap,d} = \frac{P_d \cdot L^2}{8} = 685,6 \text{ kNm}$

Korrektionsfaktor: $k_l = 1 + 1,4 \cdot \tan \alpha_{ap} + 5,4 \cdot \tan^2 \alpha_{ap} = 1,12$

Böjspänning: $\sigma_{m,d} = k_l \cdot \frac{6 \cdot M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2} = 17,0 \text{ N/mm}^2$

Reduktionsfaktor: $k_r = 1,0$

Dimensioneringsvillkor: $\sigma_{m,d} \leq k_r \cdot f_{m,d}$

Utnyttjandegrad: 88,4 %

Draghållfasthet vid åsen:

Dragspänning (90°):	$\sigma_{t,90,d} = k_p \cdot \frac{6 \cdot M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2} =$	0,21 N/mm ²
Reduktionsfaktor:	$k_p = 0,2 \cdot \tan \alpha_{ap} =$	0,014
Korrektionsfaktor:	$k_{dis} =$	1,4
Referensvolym:	$V_0 =$	0,01 m ³
Volymfaktor:	$k_{vol} = \left(\frac{V_0}{V}\right)^{0,2} =$	0,52
Dimensioneringsvillkor:	$\sigma_{t,90,d} \leq k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t,90,d}$	
Utnyttjandegrad:		91,3 %

Skjuvhållfasthet vid stöden:

Tvärkraft:	$V_d = \frac{P_d \cdot L}{2} =$	182,8 kN
Reduktionsfaktor:	$V_{red} = V \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot h_A + l_A}{L}\right) =$	156,0 kN
Skjuvspänning:	$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{red}}{b_{ef} \cdot h_A} =$	1,86 N/mm ²
Effektiva bredden:	$b_{ef} = k_{cr} \cdot b =$	140 mm
Dimensioneringsvillkor:	$\tau_d \leq f_{v,d}$	
Utnyttjandegrad:		82,9 %

Stämpeltryck:

Tryckspänning (90°):	$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A} =$	3,26 N/mm ²
Tryckkraft (90°):	$F_{c,90,d} = V_d =$	182,8 kN
Effektiva kontaktytan:	$A = b \cdot l_A =$	56000 mm ²
Stämpeltrycksfaktor:	$k_{c,\perp} = \frac{l_{c,90,ef}}{l_A} \cdot k_{c,90} =$	1,88
Effektiva stödlängden:	$l_{c,90,ef} = l_A + 30\text{mm} =$	430 mm
	$k_{c,90} =$	1,75
Dimensioneringsvillkor:	$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,\perp} \cdot f_{c,90,d}$	
Utnyttjandegrad:		108,5 %

Hängbuksbalk

Materialegenskaper:

Material:		GL30c
Klimatklass:		2
Partiakoefficient för materialegenskaper:	$\gamma_M =$	1,25
Modifieringsfaktor:	$k_{mod} =$	0,8
Reduktionsfaktor:	$k_{cr} =$	1,0

Dimensioner:

Balkindelning:		$k =$	6000 mm
Spännvidd:		$L =$	15 000 mm
Lamelltjocklek:		$t =$	45 mm
Yttre krökningsradie:		$r_{out} =$	57 065 mm
Uppskattad balkhöjd vid stöd:	$h_A = \frac{L}{4} \cdot \left(3 \cdot \sqrt{\frac{p_d}{b \cdot (0,9 \cdot f_{m,d})}} - \tan \alpha \right) =$		900 mm
Uppskattad balkhöjd vid mitten:	$h_{ap} = \frac{L}{4} \cdot \left(3 \cdot \sqrt{\frac{p_d}{b \cdot (0,9 \cdot f_{m,d})}} + \tan \alpha \right) =$		1395 mm
Uppskattad balkbredd:		$b = \frac{L}{110} =$	140 mm
Pelardjup:		$l_A =$	400 mm

Hållfasthetsegenskaper:

Böjhållfasthet:	$f_{m,k} =$	30 N/mm ²
Skjuvhållfasthet:	$f_{v,k} =$	3,5 N/mm ²
Tryckhållfasthet (90°):	$f_{c,90,k} =$	2,5 N/mm ²
Draghållfasthet (90°):	$f_{t,90,k} =$	0,5 N/mm ²

Dimensionerande värden för hållfastheter:

Böjhållfasthet:	$f_{m,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} =$	19,2 N/mm ²
Skjuvhållfasthet:	$f_{v,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} =$	2,24 N/mm ²
Tryckhållfasthet (90°):	$f_{c,90,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c,90,k}}{\gamma_M} =$	1,6 N/mm ²
Draghållfasthet (90°):	$f_{t,90,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{t,90,k}}{\gamma_M} =$	0,32 N/mm ²

Belastningar:

Permanent belastning:

Limträbalkens egenvikt uppskattas. Eftersom höjden vid stöden och vid mitten av limträbalken är okända. Egenvikten uppskattas därför enligt en limträbalk med en jämn höjd på 1,4m.

Volymvikt för limträ:	$\rho =$	5 kN/m ³
Limträbalkens egenvikt per meter:	$g_{k,1} = b \cdot h \cdot \rho =$	0,98 kN/m
Vattentakets egenvikt:	$g_{vattentak} =$	0,5 kN/m ²
Vattentakets egenvikt per meter:	$g_{k,2} = g_{vattentak} \cdot k =$	3 kN/m
Permanent belastning per meter:	$g_{k,1} + g_{k,2} =$	3,98 kN/m

Variabel belastning:

Snölasten beräknas som en jämn linje last över hela balken.

Snölast på mark:	$S_k =$	2,75 kN/m ²
	$\mu_1 =$	0,8
Snölast på limträbalken:	$S = \mu_1 \cdot S_k =$	2,2 kN/m ²
Snölast per meter:	$q_k = S \cdot k =$	13,2 kN/m

Dimensionerande belastning:

$$p_d = 1,15 K_{FI} + G_{k,j} + 1,5K_{FI} Q_{k,1} + 1,5K_{FI} \sum_{i>1} \Psi_{0,i} Q_{k,i} = 24,4 \text{ kN/m}$$

Böjhållfasthet i det dimensionerande tvärsnittet:

Tvärsnittets placering: $x_m = \frac{L \cdot h_A}{2 \cdot h_{ap}} = 4838,7 \text{ mm}$

Tvärsnittets höjd: $h_{mitt} = h_A + \left(\sqrt{R_{out}^2 - \left(\frac{L}{2} - x\right)^2} - \sqrt{R_{out}^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} \right) = 1332,9 \text{ mm}$

Böjmoment: $M_{d,mitt} = \frac{P_d \cdot L \cdot x_m}{2} \cdot \left(1 - \frac{x_m}{L}\right) = 599,3 \text{ kNm}$

Böjspänning: $\sigma_{m,\alpha,d} = \sigma_{m,0,d} = \frac{6 \cdot M_{d,mitt}}{b \cdot h_{mitt}^2} = 14,5 \text{ N/mm}^2$

Reduktionsfaktor: $k_{m,\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{m,d}}{1,5 \cdot f_{v,d}} \cdot \tan \alpha\right)^2 + \left(\frac{f_{m,d}}{f_{c,90,d}} \cdot \tan^2 \alpha\right)^2}} = 0,965$

$$\alpha = \sin \alpha = \frac{\frac{L}{2} - x_m}{R_{out}} = 2,67^\circ$$

Dimensioneringsvillkor: $\sigma_{m,\alpha,d} \leq k_{m,\alpha} \cdot f_{m,d}$

Utnyttjandegrad: 78,0 %

Böjhållfasthet i mitten av balken:

Böjmoment: $M_{ap,d} = \frac{P_d \cdot L^2}{8} = 685,6 \text{ kNm}$

Böjspänning: $\sigma_{m,d} = \frac{6 \cdot M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2} = 15,10 \text{ N/mm}^2$

Reduktionsfaktor: $k_r = \frac{r_{out} - h_{ap}}{t} \geq 240 = 1,0$

Dimensioneringsvillkor: $\sigma_{m,d} \leq k_r \cdot f_{m,d}$

Utnyttjandegrad: 78,6 %

Skjuvhållfasthet vid stöden:

Tvärkraft:	$V_d = \frac{P_d \cdot L}{2} =$	182,8 kN
Reduktionsfaktor:	$V_{red} = V \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot h_A + l_A}{L}\right) =$	156,0 kN
Skjuvspänning:	$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{red}}{b_{ef} \cdot h_A} =$	1,86 N/mm ²
Effektiva bredden:	$b_{ef} = k_{cr} \cdot b =$	140 mm
Dimensioneringsvillkor:	$\tau_d \leq f_{v,d}$	
Utnyttjandegrad:		82,9 %

Stämpeltryck:

Tryckspänning (90°):	$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A} =$	3,26 N/mm ²
Tryckkraft (90°):	$F_{c,90,d} = V_d =$	182,8 kN
Effektiva kontaktytan:	$A = b \cdot l_A =$	56000 mm ²
Stämpeltrycksfaktor:	$k_{c,\perp} = \frac{l_{c,90,ef}}{l_A} \cdot k_{c,90} =$	1,88
Effektiva stödlängden:	$l_{c,90,ef} = l_A + 30mm =$	430 mm
	$k_{c,90} =$	1,75
Dimensioneringsvillkor:	$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,\perp} \cdot f_{c,90,d}$	
Utnyttjandegrad:		108,5 %

Bumerangbalk

Materialegenskaper:

Material:		GL30c
Klimatklass:		2
Partialkoefficient för materialegenskaper:	$\gamma_M =$	1,25
Modifieringsfaktor:	$k_{mod} =$	0,8
Reduktionsfaktor:	$k_{cr} =$	1,0

Dimensioner:

Balkindelning:	$k =$	6000 mm
Spännvidd:	$L =$	15 000 mm
Lamelltjocklek:	$t =$	33 mm
Övrekantens lutning:	$\alpha_{ap} =$	13 °
Nedrekantens lutning:	$\alpha =$	13 °
Inre krökningsradie:	$r_{in} =$	20000 mm

Uppskattad balkhöjd vid stöd:
$$h_A = h_{x_0} = \frac{3 \cdot L}{4} \cdot \sqrt{\frac{q_d}{b \cdot (0,9 \cdot f_{m,d})}} = 990 \text{ mm}$$

Balkhöjd vid åsen: Från AutoCad
$$h_{ap} = 1542 \text{ mm}$$

Uppskattad balkbredd:
$$b = \frac{L}{80} = 190 \text{ mm}$$

Pelardjup:
$$l_A = 400 \text{ mm}$$

Åsområdets volym:
$$V = b \cdot \left(\sin \alpha_{ap} \cdot \cos \alpha_{ap} \cdot (r_{in} + h_{ap})^2 - r_{in}^2 \cdot \frac{\alpha_{ap} \cdot \pi}{180} \right) = 2,08 \text{ m}^3$$

Hållfasthetsegenskaper:

Böjhållfasthet:	$f_{m,k} =$	30 N/mm ²
Skjuvhållfasthet:	$f_{v,k} =$	3,5 N/mm ²
Tryckhållfasthet (0°):	$f_{c,0,k} =$	24,5 N/mm ²
Tryckhållfasthet (90°):	$f_{c,90,k} =$	2,5 N/mm ²
Draghållfasthet (90°):	$f_{t,90,k} =$	0,5 N/mm ²

Dimensionerande värden för hållfastheter:

Böjhållfasthet:	$f_{m,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} =$	19,2 N/mm ²
Skjuvhållfasthet:	$f_{v,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} =$	2,24 N/mm ²
Tryckhållfasthet (0°):	$f_{c,0,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} =$	15,7 N/mm ²
Tryckhållfasthet (90°):	$f_{c,90,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c,90,k}}{\gamma_M} =$	1,6 N/mm ²
Draghållfasthet (90°):	$f_{t,90,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{t,90,k}}{\gamma_M} =$	0,32 N/mm ²

Belastningar:

Permanent belastning:

Limträbalkens egenvikt uppskattas. Eftersom höjden vid stöden och vid åsen av limträbalken är okända. Egenvikten uppskattas därför enligt en limträbalk med en jämn höjd på 1,4m.

Volymvikt för limträ:	$\rho =$	5 kN/m ³
Limträbalkens egenvikt per meter:	$g_{k,1} = b \cdot h \cdot \rho =$	1,33 kN/m
Vattentakets egenvikt:	$g_{vattentak} =$	0,5 kN/m ²
Vattentakets egenvikt per meter:	$g_{k,2} = g_{vattentak} \cdot k =$	3 kN/m
Permanent belastning per meter:	$g_{k,1} + g_{k,2} =$	4,33 kN/m

Variabel belastning:

Snölasten beräknas som en jämn linje last över hela balken.

Snölast på mark:	$S_k =$	2,75 kN/m ²
	$\mu_1 =$	0,8
Snölast på limträbalken:	$S = \mu_1 \cdot S_k =$	2,2 kN/m ²
Snölast per meter:	$q_k = S \cdot k =$	13,2 kN/m

Dimensionerande belastning:

$$p_d = 1,15 K_{FI} + G_{k,j} + 1,5 K_{FI} Q_{k,1} + 1,5 K_{FI} \sum_{i>1} \Psi_{0,i} Q_{k,i} = 24,8 \text{ kN/m}$$

Böjhållfasthet i det dimensionerande tvärsnittet:

Tvärsnittets placering: $x_m = \frac{L \cdot h_A}{2 \cdot h_{ap}} = 4815,2 \text{ mm}$

Tvärsnittets höjd: Från AutoCad $h_{mitt} = 1103 \text{ mm}$

Böjmoment: $M_{d,mitt} = \frac{P_d \cdot L \cdot x_m}{2} \cdot \left(1 - \frac{x_m}{L}\right) = 607,6 \text{ kNm}$

Böjspänning: $\sigma_{m,\alpha,d} = \sigma_{m,0,d} = \frac{6 \cdot M_{d,mitt}}{b \cdot h_{mitt}^2} = 15,8 \text{ N/mm}^2$

Reduktionsfaktor: $k_{m,\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{m,d}}{1,5 \cdot f_{v,d}} \cdot \tan \Delta_\alpha\right)^2 + \left(\frac{f_{m,d}}{f_{c,90,d}} \cdot \tan^2 \Delta_\alpha\right)^2}} = 1$

Dimensioneringsvillkor: $\sigma_{m,\alpha,d} \leq k_{m,\alpha} \cdot f_{m,d}$

Utnyttjandegrad: 82,1 %

Böjhållfasthet vid åsen:

Böjmoment:	$M_{ap,d} = \frac{P_d \cdot L^2}{8} =$	696,9 kNm
Korrektionsfaktor:	$k_l = k_1 + k_2 \left(\frac{h_{ap}}{r}\right) + k_3 \left(\frac{h_{ap}}{r}\right)^2 + k_4 \left(\frac{h_{ap}}{r}\right)^3 =$	1,51
	$k_1 = 1 + 1,4 \cdot \tan \alpha_{ap} + 5,4 \cdot \tan^2 \alpha_{ap} =$	1,61
	$k_2 = 0,35 - 8 \cdot \tan \alpha_{ap} =$	-1,50
	$k_3 = 0,6 + 8,3 \cdot \tan \alpha_{ap} - 7,8 \cdot \tan^2 \alpha_{ap} =$	2,10
	$k_4 = 6 \cdot \tan^2 \alpha_{ap} =$	0,32
	$r = r_{in} + 0,5 \cdot h_{ap} =$	20771 mm
Böjspänning:	$\sigma_{m,d} = k_l \cdot \frac{6 \cdot M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2} =$	14,0 N/mm ²
Reduktionsfaktor:	$k_r = \frac{r_{in}}{t} \geq 240 =$	1,0
Dimensioneringsvillkor:	$\sigma_{m,d} \leq k_r \cdot f_{m,d}$	
Utnyttjandegrad:		72,9 %

Draghållfasthet vid åsen:

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \cdot \frac{6 \cdot M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2} = 0,47 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Dragspänning (90°):}$$

$$k_p = k_5 + k_6 \left(\frac{h_{ap}}{r}\right) + k_7 \left(\frac{h_{ap}}{r}\right)^2 = 0,05$$

$$\text{Reduktionsfaktor:}$$

$$k_5 = 0,2 \cdot \tan \alpha_{ap} = 0,05$$

$$k_6 = 0,25 - 1,5 \cdot \tan \alpha_{ap} + 2,6 \cdot \tan^2 \alpha_{ap} = 0,04$$

$$k_7 = 2,1 \cdot \tan \alpha_{ap} - 4 \cdot \tan^2 \alpha_{ap} = 0,27$$

$$r = r_{in} + 0,5 \cdot h_{ap} = 20771 \text{ mm}$$

$$\text{Korrektionsfaktor:} \quad k_{dis} = 1,7$$

$$\text{Referensvolym:} \quad V_0 = 0,01 \text{ m}^3$$

$$\text{Volymfaktor:} \quad k_{vol} = \left(\frac{V_0}{V}\right)^{0,2} = 0,34$$

$$\text{Dimensioneringsvillkor:} \quad \sigma_{t,90,d} \leq k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t,90,d}$$

$$\text{Utnyttjandegrad:} \quad 251,4 \%$$

Skjuvhållfasthet vid stöden:

$$\text{Tvärkraft:} \quad V_d = \frac{P_d \cdot L}{2} = 185,8 \text{ kN}$$

$$\text{Reduktionsfaktor:} \quad V_{red} = V \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot h_A + l_A}{L}\right) = 156,4 \text{ kN}$$

$$\text{Skjuvspänning:} \quad \tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{red}}{b_{ef} \cdot h_A} = 1,25 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Effektiva bredden:} \quad b_{ef} = k_{cr} \cdot b = 190 \text{ mm}$$

$$\text{Dimensioneringsvillkor:} \quad \tau_d \leq f_{v,d}$$

$$\text{Utnyttjandegrad:} \quad 55,7 \%$$

Stämpeltryck:

$$\text{Tryckspänning } (\alpha): \quad \sigma_{c,\alpha,d} = \frac{F_{c,\alpha,d}}{l_{ef} \cdot b} = 2,28 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Tryckkraft } (\alpha): \quad F_{c,90,d} = V_d = 185,8 \text{ kN}$$

$$\text{Effektiva stödlängden:} \quad l_{ef} = l_A + 30 \text{ mm} \cdot \cos \alpha = 429,2 \text{ mm}$$

$$k_{c,90} = 1,75$$

$$k_1 = \frac{g_k}{q_k} \leq 0,4 = \frac{f_{c,90,k}}{f_{c,90,d}} = 1,56$$

$$f_{c,\alpha,d} = \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{k_{c,90} \cdot k_1 \cdot f_{c,90,d}} \cdot \sin^2 \beta + \cos^2 \beta} = 4,54 \text{ N/mm}^2$$

$$\beta = 90^\circ - \alpha = 77^\circ$$

$$\text{Dimensioneringsvillkor:} \quad \sigma_{c,\alpha,d} \leq f_{c,\alpha,d}$$

$$\text{Utnyttjandegrad:} \quad 50,2 \%$$