



CHALMERS



Förankrad frontregel i flervåningsbostadshus med trästomme

En studie av träets formförändringar och dess påverkan på förankringssystem i träkonstruktioner.

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet maskinteknik

Theo Hafstrand

Samuel Öman

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK
OCH MARITIMA VETENSKAPER

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2025
www.chalmers.se

EXAMENSARBETE 2025

Förankrad frontregel i flervåningsbostadshus med trästomme

En studie av träets formförändringar och dess påverkan på förankringssystem i
träkonstruktioner

THEO HAFSTRAND

SAMUEL ÖMAN



CHALMERS

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2025

Förankrad frontregel i flervåningsbostadshus med trästomme

En studie av träets formförändringar och dess påverkan på förankringssystem i träkonstruktioner

THEO HAFSTRAND, SAMUEL ÖMAN

© THEO HAFSTRAND, SAMUEL ÖMAN, 2025.

Handledare: Per Hogström, Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper

Examinator: Per Hogström, Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper

Extern handledare: Ove Norberg, Derome Husproduktion AB | Konstruktion

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

Chalmers tekniska högskola

SE-412 96 Göteborg

Sverige

Telefon + 46 (0)31-772 1000

Erkännanden, dedikationer och liknande personliga uttalanden återspeglar författarnas egna åsikter.

Omslag: Flervåningshus med trästomme, Trollsmultronet.

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

Göteborg, Sverige 2025

Förord

Detta examensarbete har genomförts under vårterminen 2025 vid Chalmers tekniska högskola, inom kursen examenarbete MMSX25 på högskoleingenjörsprogrammet inom maskinteknik. Arbetet har genomförts vid institutionen för mekanik och maritima vetenskaper i samarbete med Derome. Vi vill rikta ett stort tack till Derome för möjligheten att genomföra detta examensarbete i samverkan med er verksamhet. Ett särskilt tack till vår externa handledare Ove Norberg på Derome för värdefulla insikter, stort engagemang och stöd under arbetets gång. Vi vill även tacka vår examinator och handledare vid Chalmers, Per Hogström, för vägledning och ett gott stöd under projektets gång.

-Theo Hafstrand & Samuel Öman, Göteborg, maj 2025

Förankrad frontregel i flervåningsbostadshus med trästomme

En studie av träs formförändringar och dess påverkan på förankringssystem i träkonstruktioner

THEO HAFSTRAND, SAMUEL ÖMAN

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Abstract

This thesis investigates the anchoring challenges in Derome's multi-storey timber buildings. When wind loads act on the structure, vertical uplift forces occur in the walls. Currently, Derome manages these forces by anchoring the building's front studs using steel rods between the foundation and the joists. The issue with combining timber and steel over long distances lies in the differences in material properties, which have significant consequences for the anchoring system, primarily due to the timber's moist-related deformation and creep behaviour.

The purpose of the project is to analyse a conceptual alternative to Derome's current solution, in the form of a wire system with a spring behaviour. To understand which technical factors influence the anchoring systems ability to function as intended and what requirements a solution must fulfil, the study includes literature review, calculations and conceptual analysis.

The conceptual analysis shows that both flexible and rigid systems only work optimally at a specific point in the timber's moisture cycle. As such, the proposed concept does not meet all requirements simultaneously, but it contributes to a better understanding of the core problem and offers insights for further research. Furthermore, it is found that anchoring solutions applied over short distances are less affected by this issue, suggesting that an alternative design strategy may be more suitable.

The report is written in Swedish.

Keywords: Pre-tensioning, timber construction, anchoring, uplift forces, moisture movement, front stud, multi-storey buildings, shrinkage, creep

Förankrad frontregel i flervåningsbostadshus med trästomme

En studie av träets formförändringar och dess påverkan på förankringssystem i träkonstruktioner

THEO HAFSTRAND, SAMUEL ÖMAN

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Sammanfattning

I detta examensarbete undersöks problematiken med förankringen av Deromes flervåningsbostadshus med trästomme. När vindlasten verkar på konstruktionen uppstår vertikala lyftkrafter i väggarna. I nuläget hanterar Derome dessa lyftkrafter genom att förankra byggnadens fronteglar med hjälp av stålstag mellan bottenplattan och bjälklaget. Problematiken med att kombinera trä och stål över långa avstånd är att skillnaderna i materialegenskaper medför betydande konsekvenser för förankringen, främst till följd av träets fuktrelaterade rörelser och krypningsbeteende.

Examensarbetet syftar till att analysera ett konceptuellt alternativ till Deromes nuvarande lösning i form av ett fjädrande vajersystem. För att förstå vilka tekniska faktorer som påverkar förutsättningarna för förankringen att verka på önskat sätt samt vilka krav som ställs på en lösning genomförs litteraturstudier, beräkningar och konceptuell analys.

Genom den konceptuella analysen framgår det att både fjädrande och styva förband endast har optimal verkan vid ett visst läge i träets fuktrörelsecykel. Det framtagna konceptet uppfyller därmed inte de satta kraven samtidigt, men ger förståelse för kärnan i problemet och ger insikter för vidare forskning. Vidare visar det sig att infästningar över kortare avstånd inte lider av denna problematik och antyder på att en annan designstrategi kan vara mer lämpad.

Sökord: Förspänning, träkonstruktion, förankring, lyftkrafter, fuktrörelser, frontregel, flervåningshus, krympning, krypning

Innehållsförteckning

1.	Inledning.....	1
1.1	Bakgrund.....	1
1.2	Syfte och mål.....	2
1.3	Frågeställningar.....	3
1.4	Avgränsningar.....	3
1.5	Metod.....	4
2.	Teoretisk bakgrund.....	6
2.1	Träkonstruktioner och materialegenskaper.....	6
2.1.1	Trä som material.....	6
2.1.2	Fuktrörelser och formförändringar.....	8
2.2	Laster och spänningsuträkning.....	15
2.2.1	Vindlast.....	15
2.2.2	Permanent last.....	16
2.2.3	Snölast.....	17
2.2.4	Nyttig last.....	18
2.2.5	Uträkning av spänning i LSV.....	18
2.3	Stabilisering av trästomme.....	20
2.3.1	Skivverkan.....	20
2.3.2	Deromes nuvarande konstruktion och problematik.....	23
2.3.3	Fallstudie.....	29
3.	Metod.....	31
3.1	Forskningsstrategi.....	31
3.2	Litteraturstudie.....	32
3.3	Funktionsanalys.....	33
3.4	Idégenerering och konceptutveckling.....	35
3.5	Beräkningar.....	36
3.6	Utvärdering och validering av koncept.....	36
3.6.1	Kvantitativ utvärdering - Pugh-matris.....	36
3.6.2	Kravspecifikation.....	37
3.6.3	Kvalitativ bedömning.....	37
3.6.4	Platsbesök som validering.....	38
3.6.5	Sammanfattning av urvalsprocessen.....	38
4.	Resultat.....	39
4.1	Konceptgenerering.....	39
4.2	Beräkningsunderlag för dimensionering.....	41

4.3	Kvantitativ utvärdering – Pugh-matris	42
4.4	Kravspecifikation	44
4.5	Kvalitativ analys av utvalda koncept	45
4.6	Platsbesök som validering	46
4.7	Val av koncept för vidare analys	47
4.8	Utformning av koncept.....	48
4.9	Dimensioneringsanalys av konceptet	50
4.9.1	Konceptets idé och problembild.....	50
4.9.2	Dimensionering av vajer	51
4.10	Utvärdering mot kravspecifikation.....	53
4.11	Sammanfattning av resultatet	54
5.	Diskussion	55
5.1	Problemförståelse	55
5.2	Tolkning av resultat.....	56
5.3	Begränsningar.....	57
5.4	Metodkritik.....	57
5.5	Praktiska implikationer	60
6.	Slutsatser	61
7.	Förslag på vidare forskning.....	63
8.	Litteraturförteckning	65

Bilagor

BETECKNINGAR

Versala latinska bokstäver

A	Tvårsnittsarea
D	Ursprunglig dimension
E	Elasticitetsmodul
$E_{mean,inst}$	Initial elasticitetsmodul medelvärde (krypning)
$E_{mean,fin}$	Slutgiltig elasticitetsmodul medelvärde (krypning)
F	Kraft
$F_{förankring}$	Förankrande kraft
F_{regel}	Kraft i enskild regel
F_{lyft}	Lyftkraft
H	Horisontell kraft
L	Längd
R	Reaktionskraft
RF	Relativ luftfuktighet

Gemena latinska bokstäver

b	Bredd på tvärsnitt
c_{pe}	Formfaktor för vindlast
c_t	Termisk koefficient (snölast)
c_e	Exponeringsfaktor (snölast)
f_{cd}	Dimensionerande tryckhållfasthet
f_{ck}	Karakteristisk tryckhållfasthet
f_p	Skjuvflöde
h	Höjd på vägg eller bjälklag
k_{def}	Krypfaktor
n_{regel}	Antal regler
$q_{s,k}$	Karakteristisk snölast
q_{LSV}	Utbredd last i lägenhetsskiljande vägg
$q_p(z_e)$	Karakteristiskt hastighetstryck
S_k	Snölast på mark
w_e	Verksam vindlast

Versala grekiska bokstäver

Δ	Förändring
Σ	Summa

Gemena grekiska bokstäver

β	Krympningskoefficient
δ	Deformation
δ_{inst}	Initial deformation (krypning)
δ_{fin}	Slutgiltig deformation (krypning)
δ_{tot}	Total deformation
ε	Töjning
ε_{inst}	Initial töjning (krypning)
ε_{fin}	Slutgiltig töjning (krypning)
μ	Fuktkvot
σ	Spänning

Akronymer

<i>LVL</i>	Laminated Veneer Lumber (Fanerträ)
<i>C24</i>	Hållfasthetsklass för konstruktionsvirke
<i>LSV</i>	Lägenhetsskiljande vägg
<i>BFS</i>	Boverkets Byggregler
<i>SS</i>	Svensk standard

1. Inledning

Träbyggnation i flera våningar medför höga krav på både stabilitet och lastöverföring i konstruktionen. Infästningarna i trästommen måste över tid hantera både statiska laster och materialets naturliga formförändringar. Derome, Sveriges största familjeägda träindustri som är en ledande aktör inom industriellt träbyggnande, har identifierat ett behov av att förbättra förankringen mellan bottenplattan och frontregeln i sina flervåningsbostadshus.

I detta examensarbete undersöks hur en sådan förankring kan utformas för att behålla sin funktion trots träets naturliga formförändringar över tid. Examensarbetet syftar till att analysera problemets tekniska komplexitet och utvärdera möjliga lösningar och genomförs i samarbete med Derome.

1.1 Bakgrund

Derome är en svensk familjeägd träindustri som startades 1946 och har verksamheter genom hela kedjan, från skog till färdigt hus. Företaget, som är en av Sveriges största aktörer inom industriellt träbyggnande, har en tydlig ambition att utveckla och bygga resurseffektiva lösningar. Genom en stark koppling mellan produktion och montage, prefabricerade byggkomponenter och standardiserade byggsystem arbetar företaget aktivt med att effektivisera byggprocessen.

Derome bygger bland annat flervåningshus med trästomme. När konstruktionen tar upp vindlaster och för ner dessa till grunden kan det uppstå lyftkrafter i väggarna, i detta fall lägenhetsskiljande väggar (LSV). Deromes lösning är att förankra frontregeln i dessa väggar i bottenplattan med ett långt dragstag av stål. Dessa stag placeras i hus med fler än tre våningar och verkar mellan bottenplattan och bjälklaget mellan våning fyra och fem.

Eftersom dessa stålstag har egenskaper som skiljer sig mycket från träets egenskaper uppstår ett problem. Luftfuktigheten i träet minskar över tid vilket resulterar i att materialet krymper. Detta leder till att förbandet tappar sin förspänning. Trots trästommens utformning med

stående fiberriktning som minimerar krympning och sättning så krymper träet för mycket för att förbandet ska bibehålla sin förspänning.

Utöver detta påverkar även den egna lasten som byggnaden utgör trästommen, vilket medför sättningar i träet som stålet inte kan följa. När spänningen i förbandet släpper tas lyftkrafterna upp i huset på ett oönskat sätt utifrån Deromes design. Problemet med att förspänningen förloras i förbandet leder till försämrad lastupptagning. Detta gör att Derome är i behov av att hitta en långsiktig lösning.

Under examensarbetet kommer alternativa metoder för att bibehålla förspänningen i konstruktionen undersökas.

1.2 Syfte och mål

Syftet med detta arbete är undersöka de tekniska förutsättningarna för att förankra en hög träkonstruktion, så att systemet kan tillåta träs rörelser och samtidigt ta upp vertikala lyftkrafter. Genom att studera ett koncept belyses komplexiteten hos problemet och möjliga begränsningar hos befintliga system.

Målet med arbetet är att analysera och utvärdera ett koncept för hur en frontregel kan förankras på ett sätt som tillåter trästommens naturliga rörelser och samtidigt uppfyller kraven på bärkraft. Fokus i arbetet ligger på att identifiera tekniska konflikter och begränsningar, snarare än att en färdig lösning ska tas fram. Arbetet ska resultera i ett tekniskt underlag som kan användas som grund för vidare utveckling inom Deromes byggsystem.

1.3 Frågeställningar

Den huvudsakliga frågeställningen som detta arbete kommer att behandla är:

- Hur kan förspänningen i en förankring mellan bjälklaget och bottenplattan bibehållas i en träkonstruktion som över tid utsätts för krympning, sättning och säsongsberoende storleksförändringar?

Dessa delfrågor kommer att undersökas för att svara på huvudfrågan:

- Vilka tekniska faktorer påverkar förlust av förspänningen?
- Vilka alternativa metoder kan motverka förlusten av förspänningen?
- Vilka tekniska lösningar finns idag för att lösa liknande problem?
- Hur väl kan ett koncept uppfylla både bärkraft och följsamhet?
- Vad är kraven på konceptet för att det ska vara lämpligt för Derome?

1.4 Avgränsningar

Examensarbetet kommer att vara inriktat på de tekniska aspekterna för att bibehålla en förspänning mellan bottenplattan och bjälklaget på en av de övre våningarna. Det innebär att endast de tekniska aspekterna kring bibehållen spänning i frontregeln kommer att behandlas, inte hela byggnadens struktur. På grund av begränsningar i tid och resurser kommer praktiska tester i verkliga byggnader inte att genomföras. Arbetet kommer vara fokuserat på tekniska förutsättningar och litteraturstudie.

Problemet är väl definierat av Derome så djupgående intervjuer med aktörer på fältet kommer inte att genomföras. Önskemål från Derome är att konceptet ska vara användarvänlig på byggplatsen vilket gör att avancerad teknisk utrustning inte är relevant. Arbetet kommer inte att omfatta en långsiktig hållbarhetsbedömning utan studien kommer att analysera den omedelbara effekten av det tekniska konceptet. Ekonomiska aspekter som kostnadsanalys kommer inte tas i beaktning.

Att räkna på ett fullskaligt hus i trä är komplext och är inte det huvudsakliga syftet med examensarbetet. Därför har avgränsningar satts till enklare handberäkningar där endast, nyttig last, egentyngd och vindlast verkar på konstruktionen. Problemet har i detta arbete förenklats för att möjliggöra hantering inom ramen för arbetets omfattning. Dessa förenklingar kan medföra avvikelser från exakta verkliga förhållanden. Då problemet kvarstår även under förenklade antaganden bedöms denna metodik vara tillräcklig för att svara på frågeställningar och dra relevanta slutsatser.

1.5 Metod

För att uppnå målet med projektet kommer arbetsgången att utföras enligt en strukturerad metod.

- Litteraturstudie - Söka och sammanställa information. Detta innefattar fakta om träkonstruktioner, dess materialegenskaper och tidigare forskning, samt relaterade lösningar till liknande problem för att få en bredare kunskap och bättre förståelse för problemet.
- Problemanalys och kravspecifikation – Identifiera och analysera de faktorer som påverkar förspänningen, samt sammanställa en kravspecifikation för konceptet.
- Konceptutveckling – Utveckla och utvärdera koncept. Detta sker genom idégenerering, beräkningar.
- Slutsats och presentation – Utvärdera det slutgiltiga konceptet, dra slutsatser, samt ge förslag på vidareutveckling.

Under konceptutvecklingsfasen kommer beräkningar och mekaniska analyser av systemet att genomföras med hjälp av handberäkningar. De variabler som kommer att användas i analyserna kan exempelvis vara belastningar, materialegenskaper och spänningar i komponenterna. De metoder som kommer att användas för datainsamling kommer främst vara:

- Litteraturstudie – Samla information från vetenskapliga artiklar, rapporter, databaser och böcker inom området.
- Tekniska dokument - Sammanställa data från Deromes lastnedräkningar, ritningar och nuvarande lösning.

2. Teoretisk bakgrund

För att skapa förståelse kring problematiken gällande förankringen av frontregeln i flervåningsbostadshus med trästomme kommer detta avsnitt att behandla de grundläggande faktorer som påverkar konstruktionen och dess funktion över tid. Deformationer i konstruktionen till följd av träets materialegenskaper såsom fuktrörelser, krympning och krypning redovisas med hjälp av tidigare forskning och branschrelaterade standarder. Dessa tekniska aspekter är centrala för att förstå hur deformationsändringar orsakar den aktuella problematiken och ligger till grund för vilka krav som ställs på problemlösningen i arbetet.

2.1 Träkonstruktioner och materialegenskaper

Trä är ett vanligt förekommande byggmaterial på grund av dess mångsidighet och omfattande användningsområden. Det finns många olika träslag med specifika egenskaper som kan tillämpas till olika byggändamål och det är därför viktigt att känna till hur träet beter sig under olika förhållanden.

2.1.1 Trä som material

Barrträ som gran och tall är det träslag som står för den största delen av byggnation med trä, där gran är det huvudsakliga materialet för konstruktionsvirke. Materialegenskaper varierar för virke av olika träslag men även inom samma träslag. Eftersom trä är ett naturligt material finner man enligt Svenskt Trä (2025a) stora variationer i materialegenskaper i ett och samma träd, exempelvis vid olika höjder på trädet samt fiberstörningar i form av kvistar och särdrag som påverkar virkets tekniska egenskaper. Träets materialegenskaper, såsom hållfasthet, densitet och elasticitetsmodul varierar avsevärt. Variationsstorlekarna visas i tabell 1 nedan och är hämtade från Svenskt Trä (2025a).

Tabell 1. Varierande materialegenskaper för trä med ostörd fiberstruktur.

Hållfasthet [%]	Densitet [%]	Elasticitetsmodul [%]
± 40	± 20	± 35

Till följd av att egenskaperna kan variera mycket är skillnaden mellan den genomsnittliga hållfastheten för trä och den tillåtna hållfastheten större än för andra konstruktionsmaterial som stål och betong. Det vill säga att säkerhetsmarginalen är större för konstruktioner av trä än för andra material på grund av spridningar i träets materialegenskaper (Svenskt Trä, 2025a).

Materialegenskaper för gran och furu är hämtade från Svenskt Trä (2025a) och visas i tabell 2 där värdena avser provkroppar med en genomsnittlig temperatur på 20 °C och en fuktkvot på 12%. De parallella linjerna (II) motsvarar egenskaper längs med fiberriktningen och den enskilda linjen (I) avser egenskaperna vinkelrätt mot fiberriktningen. Viktigt att notera är att Svenskt Trä (2025a) informerar om att Eurokod 5 (*SS-EN 1995-1-1:2004*) samt Boverkets Europeiska Konstruktionsstandarder (Boverket, 2019) måste användas för beräkningar av styvhet och bärförmåga.

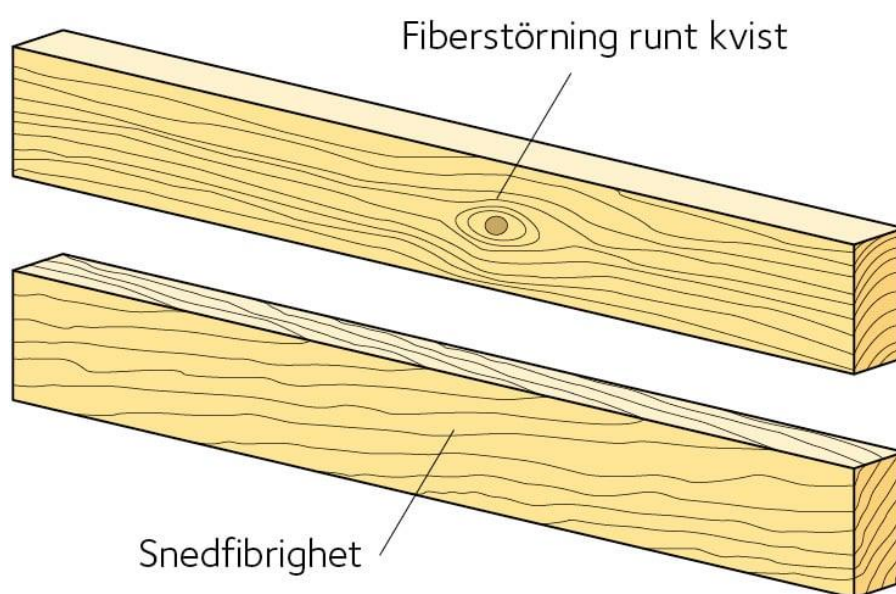
Tabell 2. Fysikaliska data för gran och furu. (Svenskt Trä, 2025a). Återgiven med tillstånd.

Egenskap		Furu	Gran
Fuktkvot (%)	II	12	12
Torr-rådensitet (kg/m ³)	II	420	380
Densitet (kg/m ³)	II	470	440
Draghållfasthet (MPa)	II	104	90
	I	(3)	(2,5)
Böjhållfasthet (MPa)	II	87	75
Tryckhållfasthet (MPa)	II	46	40
	I	(7,5)	(6)
Skjuvhållfasthet (MPa)	II	10	9
Slaghållfasthet (KJ/m ²)	II	70	50
Hårdhet (Brinell)	II	4	3,2
	I	(1,9)	(1,2)
Elasticitetsmodul (MPa)	II	12 000	11 000
	I	(460)	(550)
Värmeledningsförmåga (W/m °C)	II	0,26	0,24
	I	(0,12)	(0,11)
Värmekapacitet (J/kg °C)	II	1 650	1 650
Värmevärde (MJ/kg)	II	16,9	16,9

Som beskrivit av Svenskt Trä (2025a) så är trä ett starkt anisotropt material vilket innebär att materialet har olika egenskaper i olika riktningar. Träet är avsevärt mycket starkare längs med fiberriktningen än vinkelrätt mot fibrerna och det gäller för alla lastfall, det vill säga om det uppstår tryck, drag eller böjspänningar i virket.

Styrkan i träet påverkas också av materialets densitet och hur väl fiberriktningen stämmer överens med den pålagda kraftens riktning enligt Svenskt Trä (2025a). Till följd av att trä är ett naturmaterial uppkommer det sporadiskt fiberstörningar i form av kvistar och snedfibrihet som illustreras i figur 1. Vid kvistar och där fibrerna inte är parallella med virkets kant avviker fiberriktningarna från kraftens riktning.

Olika fiberstörningar i virket



Figur 1. Fiberstörningar i virket. (Svenskt Trä, 2025a). Återgiven med tillstånd.

Styrkan hos träet påverkas av en rad andra faktorer som virkets fuktighet, temperatur och hur lång tid det belastas. Styrkan hos ett virkestycke ökar med minskande fuktkvot, vilket innebär att torrare virke generellt är starkare än fuktigare virke. Dessutom påverkar temperaturen materialets hållfasthet, där kallare virke uppvisar högre hållfasthet än varmare virke. Vid långvarig belastning sker en successiv reducering av materialets styrka över tid, vilket kan leda till krypning och bestående deformationer enligt Träguiden (2021c).

2.1.2 Fuktrörelser och formförändringar

Fukt har en betydande påverkan på träets egenskaper, både vid bearbetning och vid användning. Flera viktiga processer så som hyvling, limning och ytbehandling påverkas av

fukttinnehållet, men även tekniska aspekter som träets dimensioner och hållfasthet. Fukten i träet uttrycks som fuktkvot μ , det vill säga kvoten mellan vikten av vattnet i det fuktiga materialet och vikten av torrt trä efter att det har torkat i 103°C, illustrerat i ekvation 2.1.2a nedan, Svenskt Trä (2025b).

$$\mu = \frac{(\text{vikt innan} - \text{vikt efter})}{\text{vikt efter}} \cdot 100 = \text{fuktkvot i \%} \quad (2.1.2a)$$

Trä är ett så kallat hygroskopiskt byggmaterial, vilket innebär att det har förmågan att ta upp och avge vattenånga från omgivningen. Materialets fukttinnehåll anpassar sig kontinuerligt till rådande klimat, vilket medför krympningar och svällningar i virket. När träet över en längre period har kunnat anpassas tillomgivande klimat når det sin jämviktsfuktkvot. Denna fuktkvot påverkas främst av temperaturen och den relativa luftfuktigheten (RF), där relativ luftfuktighet har som störst inverkan mellan temperaturer på 0–20°C. Eftersom klimatet under årets gång varierar förändras också träets fukttinnehåll. Under sommaren så kommer materialet att ta upp fukt och svälla, medan det under vinterhalvåret kommer att torka och krympa, Svenskt Trä (2025b).

Mängden vattenånga som luften kan innehålla beror på temperaturen; varm luft bär mer vattenånga medan kall luft bär mindre. Om luften mäts, det vill säga att den innehåller mer fukt än den aktuella temperaturens mätnadsånghalt, eller när temperaturen sänks, så kondenserar överskottsången i luften till vatten. Relativ luftfuktighet (RF), är då kvoten mellan mängden vattenånga som luften faktiskt innehåller och den maximala mängden vattenånga som luften kan hålla vid den temperaturen. Inomhus är den relativa luftfuktigheten som högst på sommaren, 45–60%, och som lägst på vintern, där den är 10–25% (Svenskt trä 2025b). Fuktkvoten i träet anpassar sig efter detta, både omgivningens temperatur och relativa luftfuktighet, och har i en svensk bostad i mitten av Sverige fuktkvotsmedelvärde på 7,5%. Det värdet varierar dock beroende på säsong, där det är mellan 7–12% på sommaren och 2–6% på vintern.

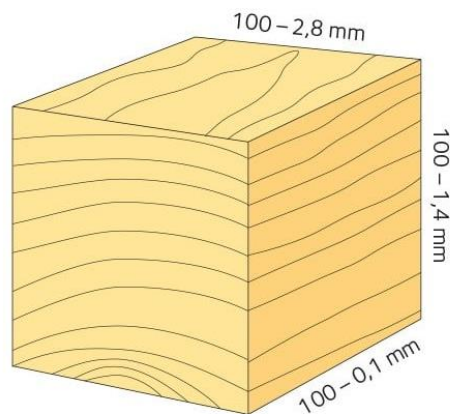
Dessa värden är sedan till grund för att bestämma vilket klimat materialen är avsedda att användas i, så kallade klimatklasser. Dessa klasser kan variera beroende på bransch, men inom byggbranschen talar man om tre olika klimatklasser, där produkter klassificeras enligt,

Tabell 3. Byggformler och tabeller. (2011, s.64).

Klimatklass	Relativ luftfuktighet
1	Högst få veckor per år över 65%
2	Högst få veckor per år över 85%
3	Miljö som ger högre fuktkvot än klimatklass 2

Utifrån dessa data samt ovanstående information om den relativa luftfuktigheten görs antagandet att klimatklass 1 gäller vid deformationsberäkningarna.

Figur 2 illustrerar krympningen i träets olika fiberriktningar. De största fuktrörelserna uppträder i den tangentiella riktningen, följt av den radiella riktningen, medan de minsta förändringarna sker längs fiberriktningen. Svällning följer samma princip, men sker i motsatt riktning vid en ökning av fuktkvoten.



Figur 2. Krympning i olika riktningar. (Svenskt Trä, 2025c). Återgiven med tillstånd.

Som nämnt i föregående kapitel så genomgår trä en långsiktig deformation när det utsätts för konstant belastning, så kallad krypning. Flera faktorer påverkar omfattningen på krypningen, så som lastriktning, styvhet, fukttinnehåll och temperatur. Trä med högre fukttinnehåll eller en högre temperatur på omgivningen uppvisar exempelvis större krypdeformationer (Träguiden, 2021c). Vid dimensionering av konstruktioner i trä är därför krypning en faktor som är viktig att ta i beaktning, särskilt när det gäller långsiktiga deformationer. Krypning beaktas genom en krypfaktor k_{def} som tar hänsyn till krypning och andra tidsberoende deformationer. Denna faktor beror på klimatklassen och för klimatklass 1 är $k_{def} = 0,6$, Byggformler och tabeller (2011).

Konstruktionsvirke delas in i olika hållfasthetsklasser, där klasserna C (massivt konstruktionsvirke) och L (limträ) är vanliga. För detta arbete är hållfasthetsklass C24 relevant, då det är kvalitén på Deromes konstruktionsvirke, Derome (2025). Materialegenskaperna för C24 presenteras i Tabell 4.

För att förstå materialets mekaniska egenskaper definieras följande parametrar:

- f_{c0k} – Karakteristisk tryckhållfasthet längs fibrerna.
- f_{c90k} – Karakteristisk tryckhållfasthet tvärs fibrerna.
- E_{0mean} – Medelvärde för elasticitetsmodulen längs fibrerna.
- E_{90mean} – Medelvärde för elasticitetsmodulen tvärs fibrerna.

Tabell 4. Hållfasthetsegenskaper för konstruktionsvirke C24. Byggformler och tabeller (2011, s.64).

Hållfasthetsklass	f_{c0k} [MPa]	f_{c90k} [MPa]	E_{0mean} [GPa]	E_{90mean} [GPa]
C24	20,9	2,5	11	0,37

$E_{mean,inst}$ är den initiala elasticitetsmodulen som beskriver materialets styvhet vid kortvarig belastning. Eftersom konstruktionen kommer belastas över lång tid av egentynghet och nyttig last behöver tidsberoende effekter beaktas. Formeln 2.1.2b ger $E_{mean,fin}$ som är en reducerad elasticitetsmodul som används för långtidsdeformationer (byggformler och tabeller, 2011, s.64).

$$E_{mean,fin} = \frac{E_{mean,inst}}{1 + k_{def}} \quad (2.1.2b)$$

Töjningen ε beräknas genom Hookes lag, (byggformler och tabeller, 2011, s.17), som sambandet mellan spänningen σ och elasticitetsmodulen E , visat i ekvation 2.1.2c.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (2.1.2c)$$

Genom att använda 2.1.2b och 2.1.2c kan man skriva om uttrycket till en formel för slutgiltig töjning till följd av permanent last enligt ekvation 2.1.2d.

$$\varepsilon_{fin} = \varepsilon_{inst} \cdot (1 + k_{def}) \quad (2.1.2d)$$

För att beräkna deformationen δ när man vet längden L på konstruktionsvirket kan man använda deformationssambandet 2.1.2e.

$$\delta = \varepsilon \cdot L \quad (2.1.2e)$$

Formeln för töjning kan således konverteras till 2.1.2f som ger den slutgiltiga deformationen δ_{fin} till följd av den permanenta lasten.

$$\delta_{fin} = \delta_{inst} \cdot (1 + k_{def}) \quad (2.1.2f)$$

Vid beräkning av den vertikala deformationen i konstruktionen beaktas endast bjälklag, reglar och syll, eftersom dessa komponenter bär de huvudsakliga vertikala lasterna. De vertikala deformationseffekterna från skivmaterial försummas i beräkningarna eftersom skivorna primärt fungerar som stabiliserande element för horisontella laster.

Som tidigare beskrivit deformeras konstruktionsvirket till följd av ändrad fuktkvot och ekvation 2.1.2g beräknar den totala krympningen till följd av uttorkning.

Krympningskoefficienten β är en materialberoende konstant som beskriver hur mycket träet krymper per procentenhet förändring i fuktkvot ($\Delta\mu$). β varierar beroende på träslag och fiberriktning och är experimentellt framtagen och tabellerad i flera källor såsom Svenskt Trä (2025c). Den ursprungliga dimensionen skrivs D (mm) och dimensionsförändringen skrivs som ΔD (mm).

$$\Delta D_{dehyd} = D \cdot \beta \cdot \Delta\mu \quad (2.1.2g)$$

Tabell 5. Total krympning från fibermättnad till absolut torrt trä. (Svenskt Trä, 2025c). Återgiven med tillstånd.

Träslag	Krympning				Krympning i procent per en procentenhets ändring av fuktkvoten
	Fiberriktning, i stammens längdriktning, axiellt β_a (%)	Radiell riktning, tvärs årsringarna, radiellt β_r (%)	Tangentiell riktning, längs årsringarna, β_t (%)	Volymändring β_v (%)	
Ask	0,2	5	8	13,2	0,27
Björk	0,3	6,7	10,4	17,4	0,35
Bok	0,3	5,8	11,8	17,9	0,39
Ek	0,4	4	7,8	12,2	0,26
Al	0,5	4,4	9,3	14,2	0,31
Asp	0,2	3,8	8,7	12,7	0,29
Gran	0,3	3,6	7,8	11,7	0,26
Furu	0,4	4	7,7	12,1	0,26

Krympning och svällning i trä sker huvudsakligen inom fuktkvotsintervallet 0–30% (Svenskt Trä, 2020). De tabellerade värdena för träs krympning visar den totala krympningen vid torkning från fibermättnadspunkt (30 %) till absolut torrt tillstånd (0 %).

För att beräkna krympningen i procent per procentenhets förändring i fuktkvot kan en linjär approximation användas. Den momentana krympningen per procentenhets fuktkvotsförändring beräknas genom att dividera det totala tabellvärdet för krympning med fuktkvotsintervallet 30 %. Detta visas i ekvation 2.1.2h nedan.

$$\beta = \frac{\text{totala krympningen}}{30} \quad (2.1.2h)$$

Den totala vertikala deformationen δ_{tot} till följd av permanenta laster och krympning för konstruktionen bestäms genom summering av deformationerna, δ_{fin} och ΔD_{dehyd} , illustrerat i ekvation 2.1.2i.

$$\delta_{tot} = \delta_{fin} + \Delta D_{dehyd} \quad (2.1.2i)$$

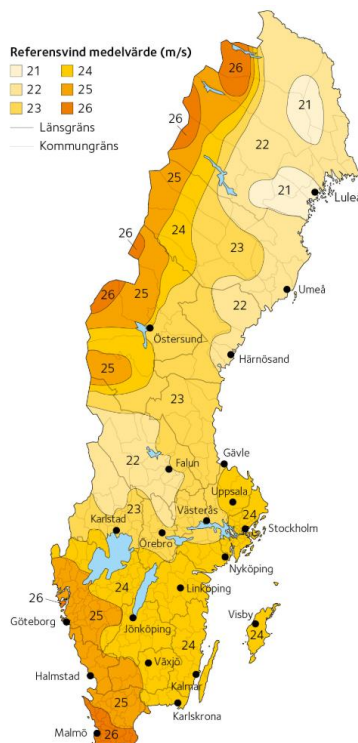
Detta samband är grunden till deformationsberäkningarna i kapitel 4.2 och tar hänsyn till träs deformationsegenskaper i olika riktningar samt över tid.

2.2 Laster och spänningsuträkning

En konstruktion påverkas av både horisontella och vertikala laster. Vindlaster verkar i det horisontala planet medan laster som egentynngd, nyttig last och snölast verkar vertikalt. De vertikala lasterna förs ner till grunden via bjälklag och reglar, medan vindlasterna förs via skivverkan ner till grunden, se stycke 2.3.1 nedan. Konstruktionens stabilitet och effekterna av lasterna beskrivs i följande avsnitt.

2.2.1 Vindlast

Vindlasten påverkar konstruktionen på ett sådant sätt att den skapar både tryck- och sugkrafter på byggnadens lovart- och läsida. Lasten beror på flera olika faktorer så som vindens hastighet, byggnadens höjd och utformning, geografisk belägenhet samt terrängens beskaffenhet. För att byggnader skall dimensioneras för att tåla de vindkrafter som beror på geografisk plats så har Boverket skapat vindlastkartor över landet, det vill säga områdesfördelningar tilldelade olika referenshastigheter. Bild på denna karta visas i figur 3 nedan.



Figur 3. Vindlastkarta över Sverige. (Träguiden, 2021b). Återgiven med tillstånd.

Vid beräkning av den verksamma vindlasten används två huvudformler, en formel för utvändig vindlast samt en för invändig vindlast, enligt Träguiden (2021b). I många fall så kan den inre vindlasten dock försummas eftersom tryckskillnaderna mellan in- och utsidan är mycket små. Detta resulterar i att den verksamma vindlasten på en yta kan beräknas enligt ekvation 2.2.1 nedan (SS-EN-1991-1-4:2005), där w_e är den verksamma vindlasten, $q_p(z_e)$ är det karaktäristiska hastighetstrycket för den utvändiga lasten, (vindlast per kvadratmeter för byggnadens höjd), och c_{pe} är formfaktorn för den utvändiga lasten.

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \quad (2.2.1)$$

2.2.2 Permanent last

Den permanenta lasten eller egentyngheden är en vertikal last och utgörs av egenvikter för de olika komponenterna i byggnaden. Det finns standardiserade värden för egenvikt på träkomponenter och olika material som gips och stål men i detta fall fås de givna från Deromes lastnedräkningar.

Enligt Träguiden (2021a) har egentyngheden påverkan på träkonstruktioner eftersom den verkar över lång tid och kan medföra krypningar i konstruktionen. Detta är särskilt relevant då dessa långtidsdeformationer riskerar att påverka förspända förband och dess funktion då det finns risk att spänningen i förbanden successivt minskar till följd av krypningen.

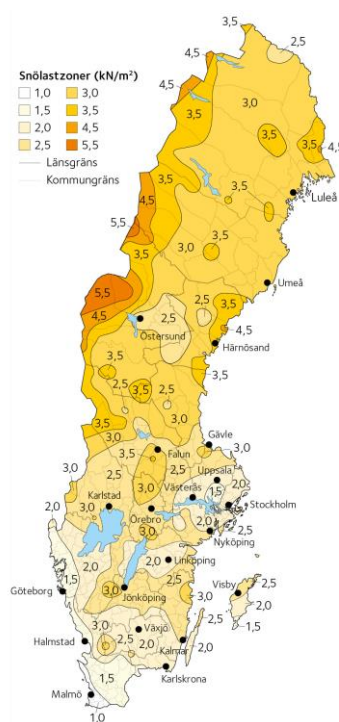
För jämviktberäkningar med statisk permanent last får endast 90% av lasten räknas som gynnsam mot lyftkraften i väggen (Boverket, 2019) och den nyttiga lasten måste försummas. Det innebär att den kraft som förbandet verkar mot beräknas enligt jämviktsambandet mellan egentynghed och lyftkraft som visas i formel 2.2.2.

$$F_{lyft} = 0,9 \cdot F_{egentyngd} + F_{förankring} \quad (2.2.2)$$

2.2.3 Snölast

Snölasten är ofta den största lasten som verkar på ett tak och den beräknas liksom vindlasten utifrån olika snölastzoner i Sverige och formfaktor samt densitet, se figur 4. Information om faktorerna finns i Eurokoder. Enligt Träguiden (2021e) kan den karakteristiska snölasten $q_{s,k}$ beräknas enligt ekvation 2.2.3 där μ_i är formfaktorn, c_e är exponeringsfaktorn och c_t är en termisk koefficient. S_k är ett värde för snölast på mark, kN/m.

$$q_{s,k} = \mu_i \cdot c_e \cdot c_t \cdot S_k \quad (2.2.3)$$



Figur 4. Karta över snölastzoner i Sverige (Träguiden, 2021e). Återgiven med tillstånd.

2.2.4 Nyttig last

Nyttig last uppkommer under användningen av byggnaden och är laster som möbler, inredning, personer och fordon. De nyttiga lasterna ska oftast betraktas som variabla och fria (Boverket, 2024). De nyttiga lasterna ska antas bestå av fri variabel utbredd last eller som punktlast och ska placeras i byggnaden på så sätt att maximal lasteffekt påverkar bärverket för att beskriva verkliga förhållanden (Boverket, 2024). Nyttig last finns tabellerat i BFS 2024:6–4 kap. 10§.

2.2.5 Uträkning av spänning i LSV

Den utbredda lasten q_{LSV} är given i lastnedräkningar från Derome och kan konverteras till kraft per regel (F_{regel}) genom formeln 2.2.5a, där L är längden på väggen och n_{regel} är antalet regler, härledd från byggformler och tabeller (2011, s.36).

$$F_{regel} = \frac{q_{LSV} \cdot L}{n_{regel}} \quad (2.2.5a)$$

LSVx05 består av två sorters reglar, 45x95 och 45x220, vilket visas i figur 5. Tvärsnittsarean beräknas sedan enligt ekvation 2.2.5b byggformler och tabeller (2011, s.36).

REGELVERKS DATA					
Alla mått i mm, vinkel i grader					
Vägg: LSVx05 (väggnummer 18)					
Projekt: 54298 9567 TROLLSMULTRONET					
Ansv/Tfn: OvNo/1861					
Info 1:					
Info 2:					
Vikt: 391 kg					
Reglar					
Dimension	Längd	Vinkel	Nr	Antal	
45 x 220	2616	90 90	125	4	
45 x 220	2616	90 90	331	2	
45 x 220	2616	90 90	332	2	
Regel OptiCut					
Dimension	Längd	Vinkel	Nr	Antal	
45 x 95	2616	90 90	126	10	
45 x 95	505	90 90	61	6	
45 x 95	222	90 90	63	2	
45 x 95	205	90 90	37	2	
45 x 95	113	90 90	60	2	
Spånskiva					
Tjocklek	Dimension	Nr	Antal		
38	1200x 2979	462	1		
38	1100x 2979	471	1		
38	909x 2979	473	1		

Figur 5. Regelverksdata LSVx05. Derome. (2025). Återgiven med tillstånd.

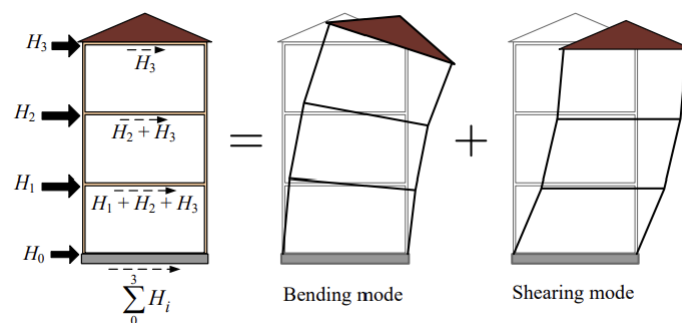
$$A_i = b \cdot h \quad (2.2.5b)$$

Den vertikala spänningen i reglarna beräknas sedan genom ekvation 2.2.5c (byggformler och tabeller, 2011, s.24).

$$\sigma_{v,i} = \frac{F_{regel}}{A_i} \quad (2.2.5c)$$

2.3 Stabilisering av trästomme

Den horisontella deformationen som uppstår när ett bärverk utsätts för horisontella laster som vindlast leder till böjning och skjuvning i konstruktionen enligt figur 6. Dessa deformationer tas upp av väggarna via skivverkan för att överföra de horisontella krafterna till byggnadens stabiliserande element. Genom väggarna kan lasten fördelas och spridas ner till grunden på ett kontrollerat sätt, vilket motverkar deformationer och instabilitet.



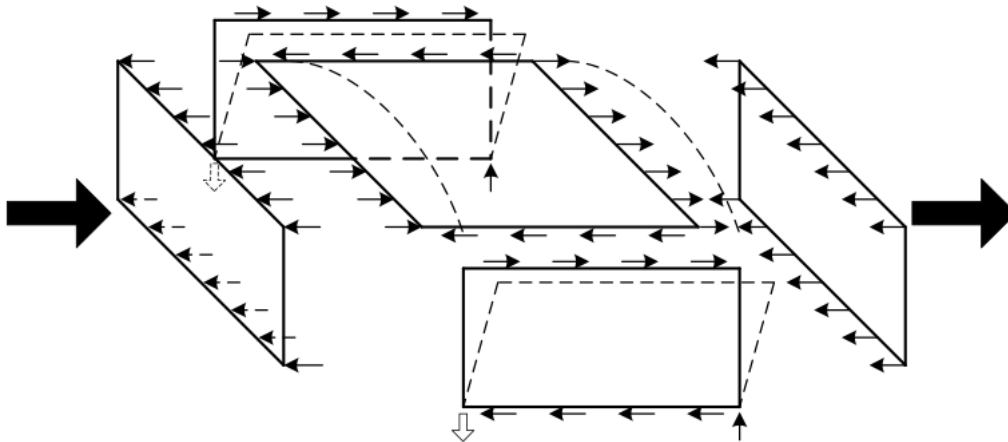
Figur 6. Skjuvning och böjning i flervåningshus. (*Horizontal Stabilisation of Sheathed Timber Frame Structures Using Plastic Design Methods*, 2016). CC BY-NC-ND.

I detta avsnitt analyseras hur skivverkan bidrar till konstruktionens stabilitet genom att beskriva hur det fungerar som lastfördelande element. I träkonstruktioner är skivverkan en fundamental del för att öka stabiliteten och motverka ramdeformationer.

2.3.1 Skivverkan

Skivverkan är en viktig konstruktionsprincip som utgår från att en skiva är styv i sitt eget plan, och det används sedan för att kunna ta upp de horisontella krafter som verkar på byggnaden, bland annat vindlaster (TräGuiden, 2020). Principen innebär att krafterna sprids ut i materialets yta i stället för att överföras till andra delar i konstruktionen, och de krafter som verkar på byggnaden överförs via skjuvning ned i grunden. Detta illustreras i figur 7 nedan. När vinden verkar på byggnadens sida så uppstår en tryckkraft på lovartsidan samt en sugkraft på läsidan. Dessa krafter tas sedan upp av bjälklaget som sedan överför lasten ned till gavelväggarna. Det är i sin tur dessa väggar som kan föra vidare lasten ned i grunden.

För att detta ska fungera på ett effektivt sätt så kräver det att den yttre kanten är ordentligt förankrad, därav Deromes lösning med ett dragstag i stål.



Figur 7. Lastöverföring i en byggnad, skivverkan (*Horizontal Stabilisation of Sheathed Timber Frame Structures Using Plastic Design Methods*, 2016). CC BY-NC-ND.

Forskarna Bo Källsner och Ulf Arne Girhammar har utvecklat en plastisk designmetod för fullt förankrade trästommar för skjuvväggar och metoden har genom analytiska och experimentella studier verifierats. En svensk version av deras handbok är publicerad där grundläggande metodbeskrivning, materialegenskaper och förankringssystem presenteras. Källsners och Girhammars plastiska modell medför ett flertal fördelar som exempelvis förbättrad produktivitet och effektivare materialanvändning då metoden bättre återspeglar verkliga förankringsförhållanden i praktiska byggkonstruktioner. Det är en flexibel metod som kan tillämpas både på enkla och komplexa byggnader, hus med flera våningar samt olika lastkonfigurationer. Med hjälp av metoden så kan den totala lyftkraften i regeln beräknas, vilket är en viktig faktor i detta arbete.

Figur 8 visar hur den horisontella kraften påverkar en vägg. Den horisontella kraften H uppstår av vindlaster som beräknas enligt formel 2.2.1. Utifrån vindlasten kan den horisontella kraften beräknas genom ekvation 2.3.1a, där kraften divideras med väggskivans area A .

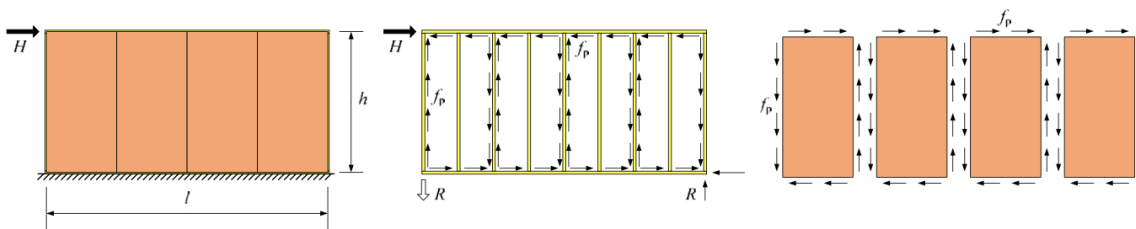
$$w_e = \frac{H}{A} \quad (2.3.1a)$$

Enligt (*Horizontal Stabilisation of Sheathed Timber Frame Structures Using Plastic Design Methods, 2016*) kan skjuvflödet f_p beräknas enligt formel 2.3.1b där l är längden på väggen.

$$H = f_p \cdot l \quad (2.3.1b)$$

Reaktionskrafterna R som verkar mot lyftkrafterna i väggen beräknas med formel 2.3.1c (*Horizontal Stabilisation of Sheathed Timber Frame Structures Using Plastic Design Methods, 2016*).

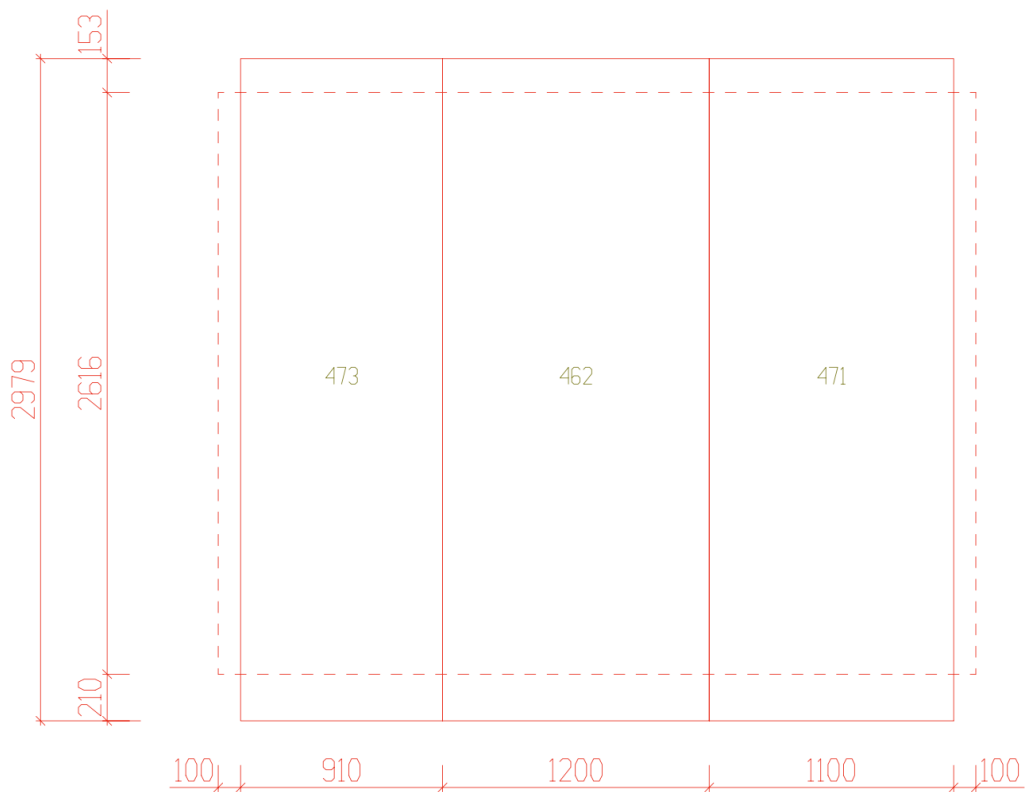
$$R = f_p \cdot h \quad (2.3.1c)$$



Figur 8. Skjuvflöde i väggen vid fullt förankrad frontregel (*Horizontal Stabilisation of Sheathed Timber Frame Structures Using Plastic Design Methods, 2016*). CC BY-NC-ND.

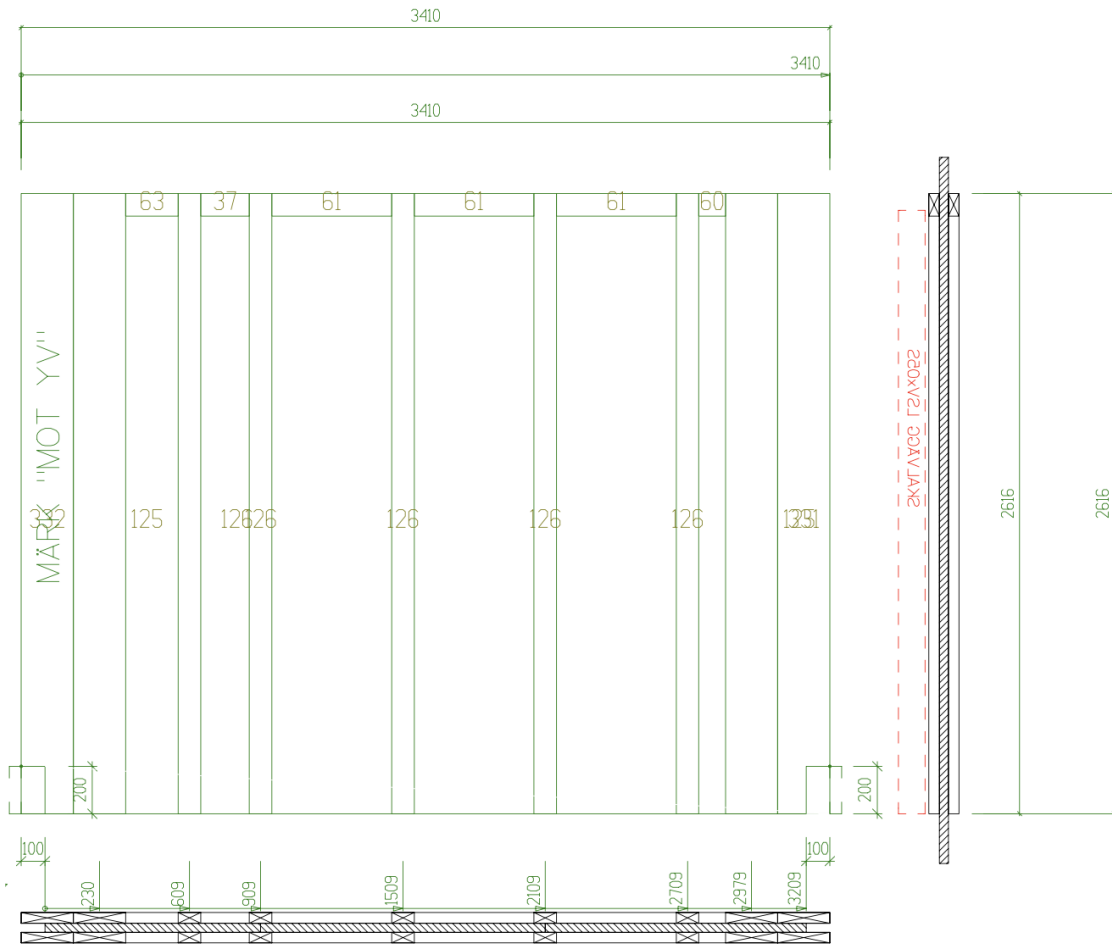
2.3.2 Deromes nuvarande konstruktion och problematik

Byggsystemet Derome använder i sina flervåningshus av trä består av en bärande stomme där de lägenhetsskiljande väggarna har en betydande roll för horisontal stabilitet och vertikal lastöverföring. Deromes LSV är en konstruktion där långsidorna på tre skivor sammanfogas för att bilda ett stort väggsegment, se figur 9 nedan. Detta gör att en väggsektion får samma egenskaper som en enda skiva, och det resulterar i en enhetlig och styv struktur vars förmåga att ta upp horisontella krafter fungerar likadant.



Figur 9. Sammanfogning av tre skivor (LSV). Derome. (2025). Återgiven med tillstånd.

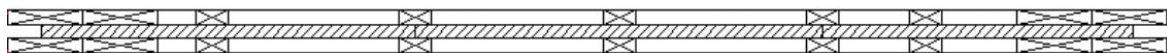
Sammanfogningen görs genom att regler limmas och spikas över skarvarna mellan skivornas långsidor. För att skapa ytterligare stabilitet och fördela de vertikala lasterna som strukturen senare kommer att utsättas för fästs ytterligare en regel i mitten av varje skiva, detta illustreras i figur 10.



Figur 10. Reglar fastsatta på skivorna, skapar ett väggsegment. Derome. (2025). Återgiven med tillstånd

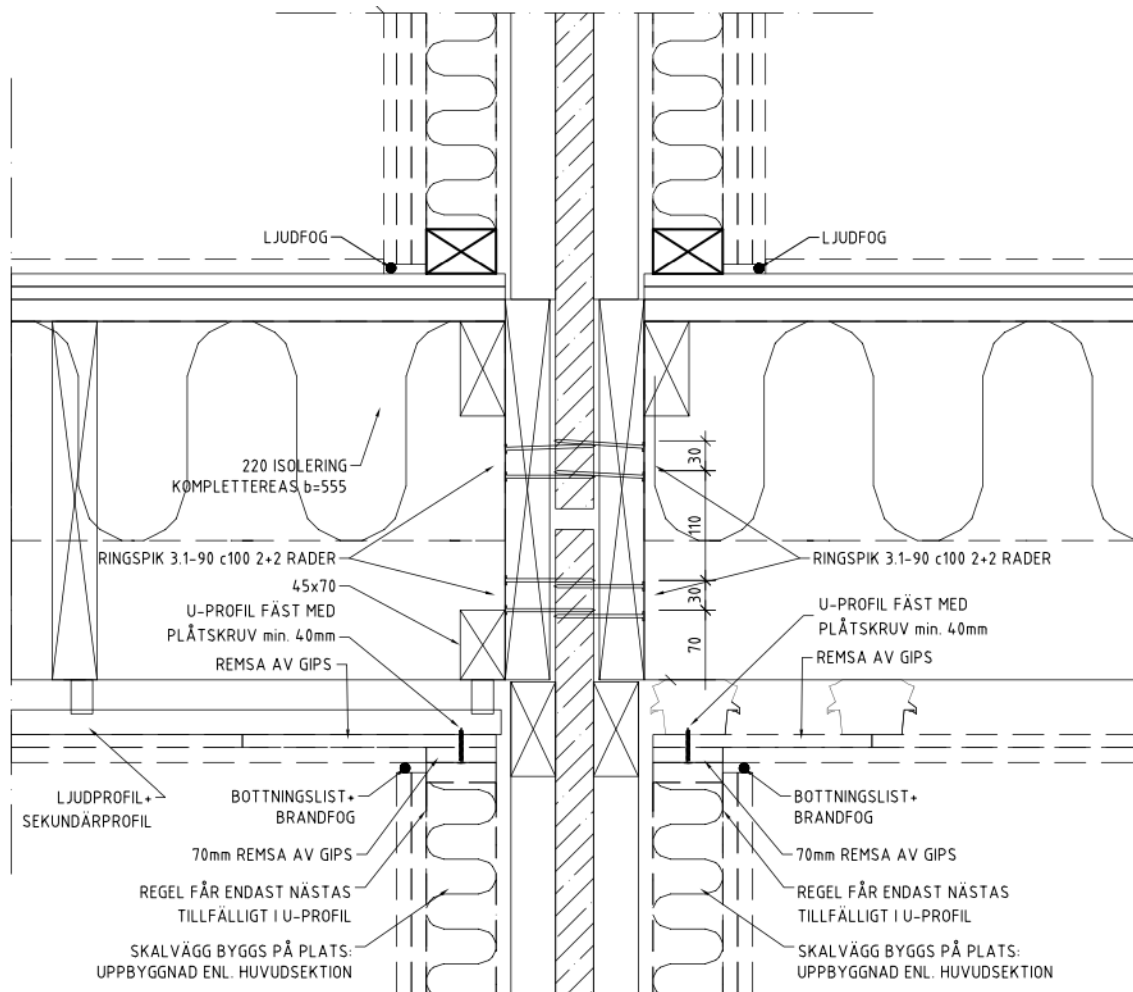
Denna metod används på båda sidor av spånskivan, vilket resulterar i att ett väggsegment i slutändan består av tre sammansatta spånskivor och 16 regler, utöver stommens två yttersta regler, se figur 11.

LSVx05



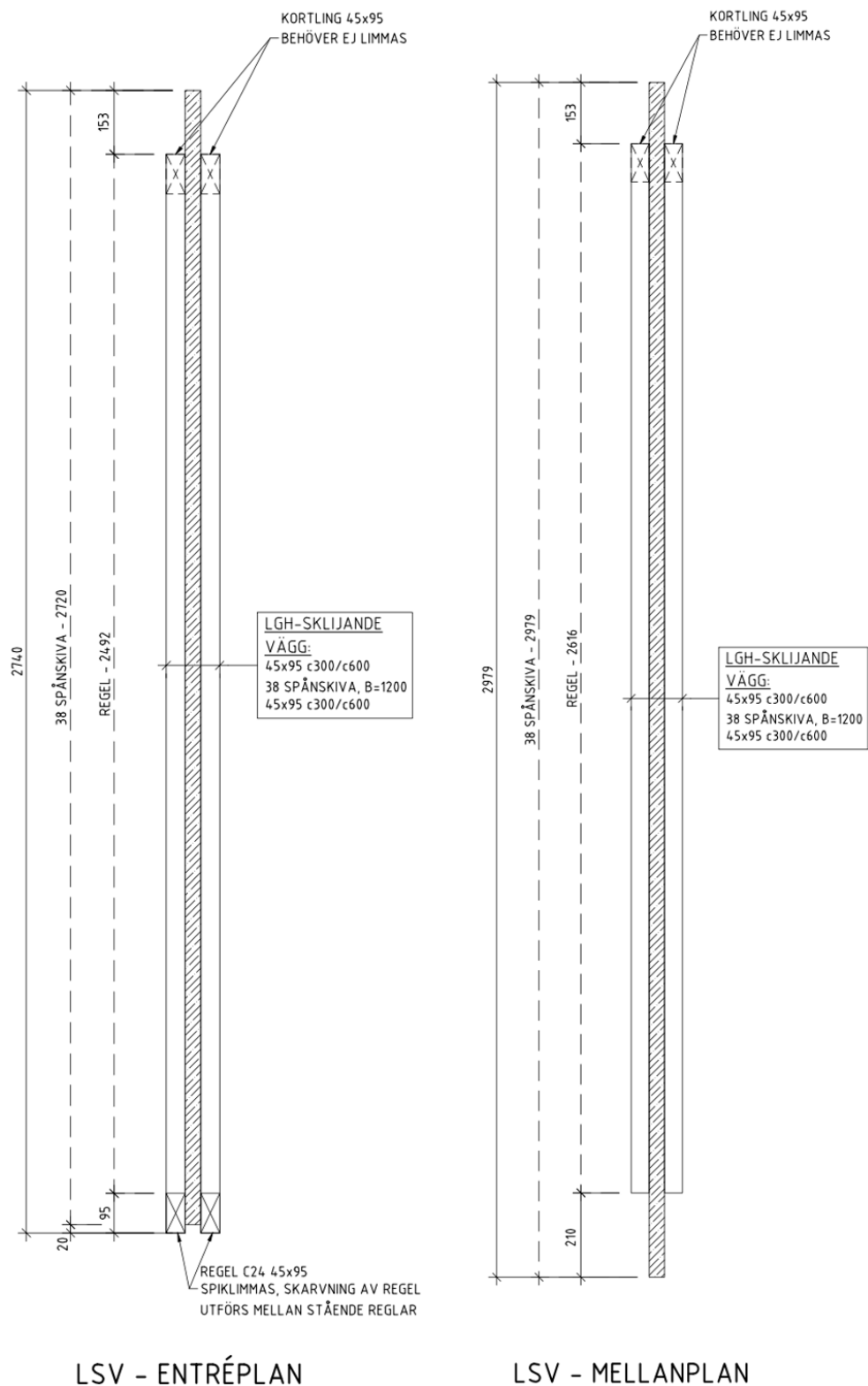
Figur 11. LSV ovanifrån, med spånskiva och regler. Derome. (2025). Återgiven med tillstånd

Utformningen på de lägenhetsskiljande väggarna varierar något beroende på våningsplan. På mellanplanen är LSV placerade mellan bjälklag där reglarna ansluter i både över- och underkant vilket medför att enbart dessa komponenter i väggen verkar mot de vertikala krafterna, illustrerat i figur 12 nedan. På entréplanet sitter väggarna i en plåtsyll ovanpå bottenplattan, vilket medför en annan typ av infästning mot syllen.



Figur 12. Detaljritning mellan våningsplan. Derome. (2023). Återgiven med tillstånd.

En jämförelse av LSV vid entréplan och mellanplan illustreras i figur 13 nedan.



Figur 13. LSV-entréplan och LSV-mellanplan. Derome. (2020). Återgiven med tillstånd.

Deromes bjälklag är komponenter av fanerträ även kallat LVL (laminated veneer lumber) vars egenskaper skiljer sig från det vanliga konstruktionsvirket med C24 kvalitet. Fanerträ är en komposit av tunna träskivor som sammanfogas med lim och minimerar därför risken av genomgående fiberstörningar (SS-EN 14374:2004). I Deromes fall används fanerträ bemärkt Kerto-Q vilket innebär att fiberriktningarna i fanerträ varierar för att minimera deformationer till följd av krypning och krympning. Detta innebär att några lager har längsgående fiberriktning i förhållande till lasten och vissa har tvärgående. Det resulterar i att en Kerto-Q LVL-balk ståendes på högkant får en högre elasticitetsmodul jämfört med Kerto-S och konstruktionsvirke där fiberriktningarna åt samma håll genom hela komponenten, se tabell 6. Krympningskoefficienten för LVL är betydligt mindre än för vanligt konstruktionsvirke, se tabell 6 (Stora Enso, u.å.), medan krypningsfaktorn k_{def} är samma för LVL som för konstruktionsträ i klimatklass 1 (SS-EN 1995-1-1:2004).

Tabell 6. Krympningsfaktor LVL.

Riktning	% krympning eller svällning per % fuktkvotsförändring
Längdriktning (L)	LVL S/LVL GS +/- 0,006, LVL X/LVL GX +/- 0,009
Breddriktning (w/h)	LVL S/LVL GS +/- 0,31, LVL X/LVL GX +/- 0,033
Tjockleksriktning (b)	LVL S/LVL GS +/- 0,30, LVL X/LVL GX +/- 0,44

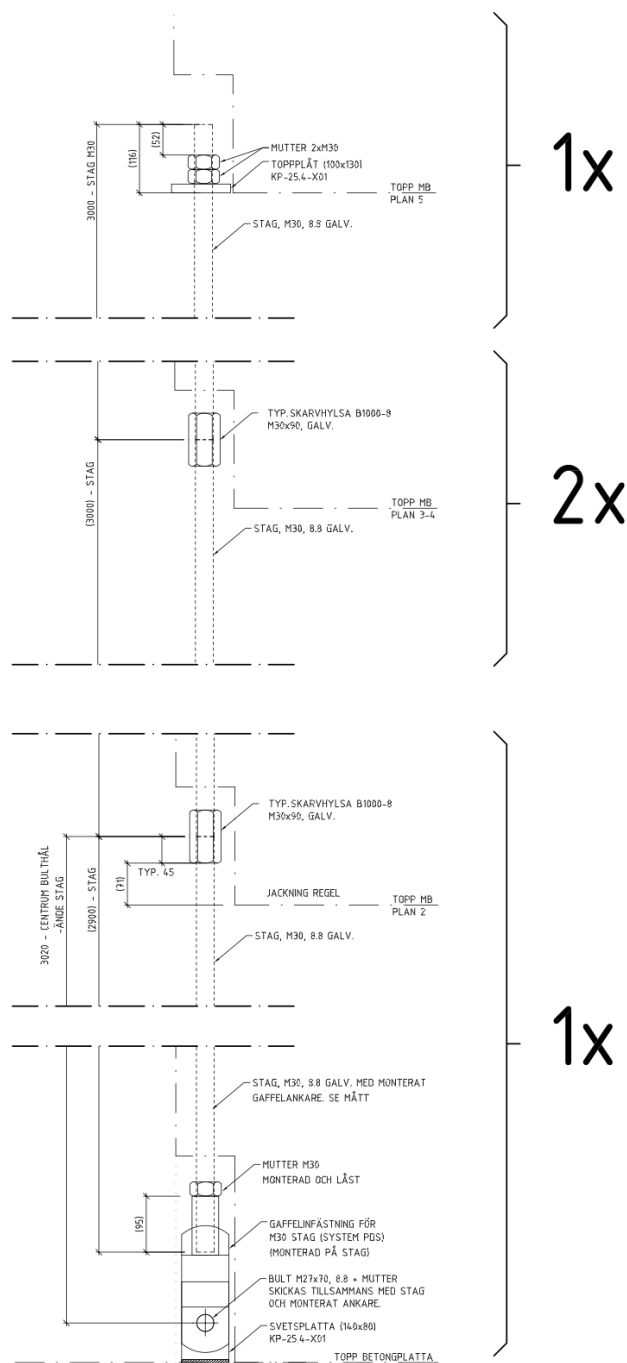
Tabell 7. Hållfasthetsegenskaper hos fanerträ (MPa). (Trä Guiden, 2019). Återgiven med tillstånd.

Egenskap	Kerto-S tjocklek 21-90 mm	Kerto-Q tjocklek 21-24 mm	Kerto-Q tjocklek 27-69 mm
Styhetsvärden för deformationsberäkningar, medelvärden			
Elasticitetsmodul			
- parallellt med fibrerna, längs $E_{0,mean}$	13 800	10 000	10 500
- parallellt med fibrerna, tvärs $E_{90,mean}$	-	1 200 ¹⁾	2 000
- på högkant, vinkelrätt mot fibrerna $E_{90,edge,mean}$	430	2 400	2 400
- på lågkant, vinkelrätt mot fibrerna $E_{90,flat,mean}$	130	130	130

Vid byggnation av träkonstruktioner med fler än tre våningsplan uppstår betydande lyftkrafter i väggarna som en följd av vindlast. Dessa krafter medför en risk att väggarna lyfter från grunden om inte infästningarna är dimensionerade korrekt. Eftersom Derome bygger

bostadshus med upp till åtta våningar blir lyftkrafterna så stora att ytterligare krav på förankringen ställs, för att säkerställa stabiliteten i konstruktionen.

I dagsläget används ett förband i form av ett dragstag i stål för att motverka dessa lyftkrafter. Dragstaget löper från bottenplattan upp till bjälklaget mellan våning fyra och fem. Dragstaget har en total längd på ca 12 meter och dras åt och säkras i övre änden med hjälp av dubbla muttrar, se figur 14 nedan.



Figur 14. Dragstång för förankring av flervåningshus.

Det uppstår brister med detta förankringssystem till följd av krypning och krympning i konstruktionen som gör att staget mister sin funktion. Eftersom deformationerna i konstruktionen leder till ett glapp vid den övre ändesinfästningen i staget medför det att staget inte kan ta upp några lyftkrafter. Detta är problematiken som examensarbetet är ägnat att undersöka. Med hjälp av litteraturstudien och lastnedräkningar från Derome ska ett koncept utvecklas där förankringen inte mister sin funktion till följd av deformationer och säsongsberoende storleksförändringar.

2.3.3 Fallstudie

Den 12 mars 2025 genomfördes en fallstudie där både handledare på Derome och studenter inspekterade ett flervåningshus med trästomme under monteringsprocessen. Där analyserades Deromes nuvarande lösning på problemet vilket skapade en bättre förståelse för aspekter som användarvänlighet och utrymme. Detta visas i nedanstående figur.



Figur 15. Deromes nuvarande lösning.

Vidare så besöktes ett flervåningshus som stått klart sedan flera år tillbaka där sättningar och fuktrörelser har hunnit verka. Via en inspektionslucka i trapphuset kunde problematiken med den nuvarande lösningen undersökas, se figur 16.



Figur 16. Åtdragningsändan i ett dragstag.

Det framgår tydligt av figuren att dragstaget inte längre är verksamt och att det finns ett slag på cirka en centimeter mellan muttern och brickan.

3. Metod

I metodavsnittet beskrivs genomförandet av arbetet genom att förklara hur olika metoder och verktyg har använts samt hur relevant information har sammanställts och analyserats.

Inledningsvis ges en övergripande beskrivning av metodstrukturen följt av hur litteraturstudie, konceptutveckling och beräkningar genomförts.

3.1 Forskningsstrategi

För att identifiera och analysera förutsättningarna för ett koncept som hanterar problematiken med förlorad förspänning i frontreglar till följd av träets rörelser har arbetet strukturerats enligt en systematisk produktutvecklingsprocess. I första steget sammanställdes en planeringsrapport där en preliminär tidsplan för de olika delarna i arbetet sattes. Relevanta teorier, tidigare forskning och standarder inom området sammanställdes i en genomgående litteraturstudie. Fokus låg på att skapa en bred förståelse för hur problematiken uppstår och vilka faktorer som spelar roll samt att sammanställa tillräckliga formler för att kunna skapa en förenklad beräkningsmodell av problemet.

En funktionsanalys genomfördes och låg till grund för de principer som idégenereringen baserades på. Efter idégenereringen gjordes en Pugh-matris för att väga de olika idéerna mot varandra utifrån de principer som konceptet måste klara av.

För att beräkna hur stora de olika faktorerna som bidrar till problematiken är användes den teori och ekvationer som sammanställts i kapitel 2 samt lastnedräkningar och annan relevant information från Derome. Detta var en viktig del i konceptutvecklingen för att kunna dimensionera ett koncept efter beräkningsmodellen.

Det slutgiltiga konceptet utvärderades sedan genom sammanställandet av tekniska beräkningar, kravbaserad analys. Med hjälp av kvantitativa och kvalitativa metoder kunde koncepturvalet stegvis smaltas av och väga in teoretiska funktionskrav och praktiska förutsättningar på ett systematiskt sätt. Detta möjliggjorde en teknisk och praktisk bedömning av konceptets potential för vidare utveckling och framtida implementering.

3.2 Litteraturstudie

Litteraturstudien syftar till att skapa en teoretisk grund till examensarbetet. Studien har fokuserat på att sammanställa och analysera befintlig forskning och tekniska standarder. Detta för att skapa förståelse kring problematiken med trä som konstruktionsmaterial i byggnader till följd av dess inneboende egenskaper som krympning och krypning. En mer ingående diskussion av detta förs i avsnitt 5.4, metodkritik. Faktorer som påverkar konstruktionens stabilitet över tid har identifierats och Deromes befintliga lösning har undersökts.

Litteraturstudien har genomförts genom en systematisk granskning av vetenskapliga och industriella källor på följande sätt:

1. Vetenskapliga artiklar och forskningsrapporter.

- Studier om trä som konstruktionsmaterial och dess mekaniska egenskaper som fuktrörelser, krypning och fiberstörningar.
- Vetenskapliga artiklar om vilka laster som påverkar träkonstruktionen.
- Forskningsartiklar om stabilisering av trästommar och skivverkan.
- Böcker med sammanställda tabeller och formler för konstruktionsberäkningar i trä.

2. Tekniska standarder och regelverk.

- Eurokod 5, *SS-EN 1995-1-1:2004* har undersökts tillsammans med andra standarder delvis för att hämta information men också för att säkerställa att informationen som hämtats från Svenskt Trä som är mer lättillgänglig är korrekt.
- Boverkets regler kring bärförmåga har studerats gällande krav på stabilitet.

3. Branschspecifika dokument

- Deromes tekniska dokumentation har undersökts för att identifiera nuvarande lösning och problematiken med den.
- Deromes lastnedräkningar på det specifika huset har analyserats.

4. Fallstudie.

- Problem i ett praktiskt byggprojekt har granskats och dokumenterats för att ta lärdomar av verkliga tillämpningar.
- Montering av nuvarande lösning har undersökts på byggplats.

3.3 Funktionsanalys

För att identifiera de viktigaste funktionerna som konceptet måste uppfylla och skapa ett underlag för idégenereringen så genomfördes en funktionsanalys. Syftet var att urskilja huvudfunktion samt identifiera eventuella del- och stödfunktioner. Huvudfunktionen för konceptet givet Deromes problemställning är att ta upp de lyftkrafter som uppstår i väggarna till följd av vindlast. Samtidigt så behöver träets naturliga fuktrörelser tillåtas utan förlorad hållfasthet och stabilitet, vilket bröts ned till tre delfunktioner.

Den första delfunktionen är att förankra frontregeln i bottenplattan och därmed säkra väggen mot de vertikala lyftkrafter som uppstår. Detta innebär att konceptet behöver vara hållfast nog att klara av både statiska och dynamiska belastningar som uppstår i konstruktionen till följd av vindlast. Den andra delfunktionen är förmågan att anpassa sig till träets naturliga fuktrörelser, eftersom trä som ett hygroskopiskt material genomgår deformationsändringar över tid. Detta ska ske utan risk för glapp eller sprickor i träet. Den sista delfunktionen är att bibehålla funktion över tid och inte förlora prestanda under belastning.

Utöver delfunktionerna så identifierades även två stödfunktioner. Detta för att säkerställa att huvud- och delfunktionerna på ett effektivt och praktiskt genomförbart sätt kan uppfyllas. Den första stödfunktionen är att medföra enkelt montage. Detta för att minimera risken för felinstallation och inte riskera fel i den långsiktiga funktionaliteten. Den andra stödjande funktionen som identifierades var att uppkomna laster i konstruktionen ska fördelas jämnt, för att inte skapa koncentrerade punktbelastningar vilket kan leda till lokala skador och sprickbildning i träet. Funktionsanalysen illustreras i tabell 8 nedan.

Tabell 8. Funktionsanalys

Funktionsnivå	Beskrivning
Huvudfunktion	Ta upp lyftkrafter i väggarna som uppstår på grund av vindlaster
Delfunktion 1: Förankra frontregeln i bottenplattan	Lösningen ska säkra väggen mot vertikala lyftkrafter och överföra lasterna till grunden
Delfunktion 2: Tillåta träets rörelser (krympning och svällning)	Lösningen ska anpassa sig till träets naturliga fuktrörelser utan att orsaka glapp eller sprickor
Delfunktion 3: Upprätthålla funktion över tid	Lösningen ska bibehålla sin funktion över dess livslängd och inte förlora prestanda vid långvarig belastning
Stödfunktion 1: Enkel att montera	Lösningen ska vara möjlig att montera med standardverktyg med minimal risk för felinstallation
Stödfunktion 2: Jämn fördelning av laster	Minimera risk för sprickbildning

Genom funktionsanalysen så kunde grundläggande krav som ställs på konceptet att fastställas, och det kunde sedan utgöra en grund för den idégenerering och konceptutveckling som presenteras i nästkommande kapitel.

3.4 Idégenerering och konceptutveckling

Utifrån funktionsanalysen så inleddes idégenereringsprocessen med att identifiera olika tekniska principer som uppfyller funktionskraven. Målet med detta var att hitta olika mekanismer som på ett effektivt sätt motverkar lyftkrafter i väggarna, samtidigt som konceptet fortfarande möjliggör träets fuktrörelser. Dessa mekaniska principer listades för att skapa en bred och innovativ grund för vidare utveckling och analys.

- Fjädermekanismer – Både tryck- och dragfjädrar har förmågan att dynamiskt anpassa sig till en yttre deformation.
- Hydrauliska lösningar – Hydrauliska kolvar kan absorbera och justera sig efter yttre förändringar.
- Vajersystem – En förspänd vajer som tillåter mer töjning än solitt stål.
- Gummibaserad dämpare – Funktion likt en tryckfjäder, absorberar yttre rörelser.
- Adaptivt reglersystem – System med sensorer och motorer för att automatiskt justera infästningen.

Efter identifiering av dessa principer så påbörjades konceptutvecklingsfasen där skisser som involverade de olika mekanismerna skapades. Syftet med detta var att illustrera hur olika principer med liknande funktion kunde integreras i ett koncept. Koncepten analyserades sedan utifrån olika aspekter som teknisk genomförbarhet, hållfasthet, möjlighet till materialval och konceptets förmåga att anpassa sig till träet. Även potentiella utmaningar och begränsningar för de olika koncepten granskades under denna fas. En fjädermekanism har en god förmåga att hantera och anpassa sig till yttre rörelser, men ett koncept byggt på denna princip löper risk att utsättas för materialutmattning över tid vilket är negativt för konceptets livslängd och funktion. Ett hydraulbaserat koncept kräver regelbundet underhåll för att säkerställa korrekt funktion, och ett vajersystem kan ställa högre krav på noggrant och korrekt åtdragsmoment vid monteringen.

För att det mest lämpade konceptet för vidare utveckling ska kunna identifieras så användes en systematisk utvärderingsmetod. Utvärderingen tillsammans med praktisk validering och kompletterande analyser presenteras i kapitel 3.6.

3.5 Beräkningar

För att hålla beräkningarna hanterbara och relevanta för projektet valdes att begränsa analysen till enklare handberäkningar. Med stöd från kapitel 2 och ekvation 2.1.2i, gjordes beräkningar på de vertikala deformationer som uppstår i det relevanta området för konstruktionen till följd av krypning och krympning. De laster som bedömdes representera de huvudsakliga vertikala belastningarna var nyttig last och egentygnd. En förenklad beräkningsmodell av husets gjordes för att kunna beräkna vertikal deformation, vilket redovisas i kapitel 4.2. De på höjd följande verksamma komponenterna i modellen antogs vara, en syll, fyra bjälklag och fyra reglar. Utifrån Deromes lastnedräkningar (se bilaga A) kunde det aktuella värdet för den största lyftkraften som verkar i en enskild vägg till följd av vindlast identifieras. Denna kraft, tillsammans med de beräknade vertikala deformationerna utgjorde grunden för dimensioneringen av det föreslagna konceptet och kravspecifikationen.

3.6 Utvärdering och validering av koncept

Efter att ett flertal koncept tagits fram och analyserats, samt de tekniska beräkningar som är relevanta för dimensionering vid verkliga tillämpningar så genomfördes en strukturerad utvärdering för att det mest lämpade konceptet för vidare utveckling skulle identifieras. Denna utvärdering byggde på kvantitativa samt kvalitativa metoder, och både praktiska förutsättningar samt funktionskrav vägdes in.

3.6.1 Kvantitativ utvärdering - Pugh-matris

Som första steg i utvärderingen och för identifiering av det mest lämpade konceptet för vidare utveckling så användes en Pugh-matris, för att objektivet ställa de tekniska principerna mot varandra och utvärdera deras styrkor och svagheter (Innovationsplattformen VGR, 2022). I matrisen valdes ett av koncepten som referenslösning och utifrån de kriterier som formulerats i funktionsanalysen jämfördes sedan övriga koncept med denna. Koncepten poängsattes efter hur väl de presterar mot referenslösningen, med betygen sämre (-), likvärdigt (0) eller bättre (+).

Denna utvärdering genomfördes sedan ytterligare en gång med ett annat koncept som referenslösning, detta för att undvika bias och säkerställa ett tillförlitligt resultat. En totalpoäng kunde sedan sammanställas och fungera som underlag för vilka koncept som har jämförbar prestanda.

3.6.2 Kravspecifikation

I samråd med Derome sammanställdes en kravspecifikation för att skapa ett konkret underlag för att jämföra de kvarvarande koncepten, se avsnitt 4.4. Den fungerade som ett verktyg för vidare analys av konceptutvecklingen efter att den initiala Pugh-utvärderingen genomfördes. Kravspecifikationen innehöll både funktionella och praktiska kriterier såsom, monterbarhet, hållfasthet och den huvudsakliga funktionen att motverka lyftkrafter i väggarna. Den användes sedan för att bedöma vad en praktisk genomförbart koncept måste uppfylla och kompletterade den kvantitativa delen av konceptutvecklingen.

3.6.3 Kvalitativ bedömning

Då flera koncept fick hög totalpoäng i den viktade matrisen och Pugh-matrisen genomfördes en bedömning, med fokus på de faktorer som inte beaktades i funktionsanalysen men som skulle kunna påverka konceptets praktiska genomförbarhet.

Bedömningen fokuserade på de kvarvarande koncepten och utfördes med stöd från den framtagna kravspecifikationen och resultaten från de tekniska beräkningarna i kapitel 4.2. Syftet var att identifiera viktiga bedömningspunkter för en mer nyanserad analys. Exempelvis analyserades koncepten utifrån komponentdimensionering för att uppnå tillräcklig hållfasthet och hur dessa dimensioner skulle påverka mått och monterbarhet. Även underhåll och funktion över tid vägdes in och de koncept som krävde mer komplexa komponenter och installationsåtgärder bedömdes ha högre praktisk risk jämfört med koncept som grundar sig i nuvarande byggnormer.

Utifrån denna bedömning kunde konceptens styrkor och svagheter identifieras och analyseras djupare än vad den initiala matrisen tillät vilket resulterade i att urvalsprocessen smalnades av inför den slutgiltiga konceptvalideringen.

3.6.4 Platsbesök som validering

För att få en djupare förståelse för hur ett koncept skulle kunna hanteras i en verklig situation så genomfördes ett platsbesök på en av Deromes byggplatser. Syftet med detta besök var att undersöka deras nuvarande lösning samt identifiera och diskutera eventuella begränsningar gällande implementerbarheten av en ny lösning. Typiska monteringsituationer och arbetsflödet i produktionen kunde kartläggas, och informationen användes som ett kompletterade underlag till den kvalitativa analysen.

3.6.5 Sammanfattning av urvalsprocessen

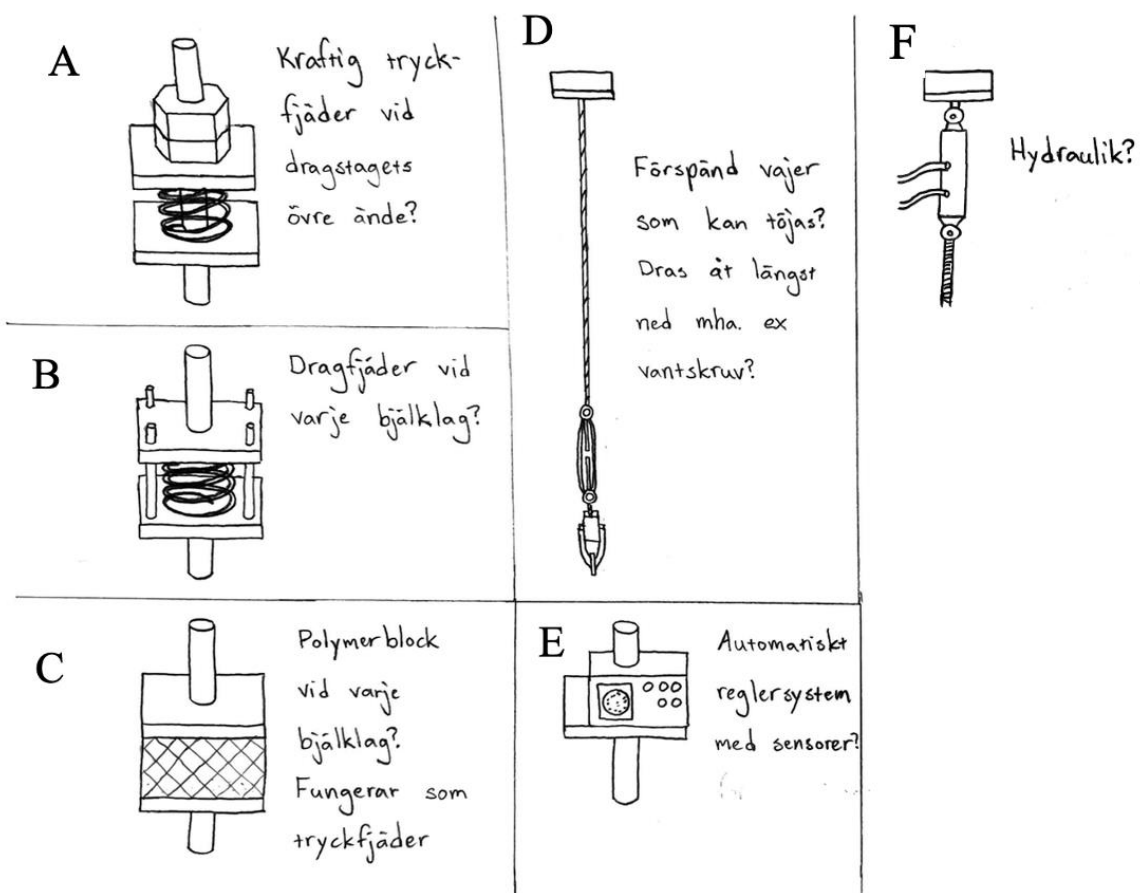
Efter identifiering av de mest relevanta koncepten genom Pugh-matrisen, samt bedömningar utifrån kravspecifikationen, kvalitativa bedömningar och underlaget från platsbesöket, så kunde en sammanvägd utvärdering genomföras för att urskilja ett koncept som var mest lämpligt för vidare analys. Syftet med sammanvägningen var att göra ett välgrundat konceptval som bäst uppfyller projektets tekniska och praktiska krav. Konceptet som valdes låg sedan till grund för vidare analys, där konceptet analyserades utifrån de beräkningar som genomförts i tidigare kapitel, samt specificerade krav. Vidare utformning av konceptet samt teknisk validering presenteras i resultatkapitlet.

4. Resultat

Följande kapitel redovisar resultaten av arbetet som gjorts för att utveckla ett koncept som motverkar lyftkrafterna i frontreglar i flervåningshus med trästomme. Redovisningen bygger på den process som beskrivs i kapitel 3, Metod, med målet att analysera och utvärdera ett koncept.

4.1 Konceptgenerering

Utifrån de olika tekniska principerna i kapitel 3.4 och funktionsanalysen i kapitel 3.3 så togs flera olika koncept fram. Konceptgenereringens syfte var identifiera olika typer av koncept utifrån de tekniska principerna som på olika sätt har förmågan att följa träets fuktrörelser men samtidigt stå emot de vertikala lyftkrafterna. Totalt togs sex koncept fram och dessa illustreras i figur 17 nedan.



Figur 17. Genererade koncept.

Koncept A: Tryckfjäder

Det första konceptet bygger på principen tryckfjäder och involverar en kraftig tryckfjäder som monteras i dragstagets övre ände. Syftet är att fjädern ska förspännas vid monteringen och trycka med en konstant kraft nedåt, för att då ta upp eventuella lyftkrafter och följa träets formförändringar.

Koncept B: Dragfjäder

Det andra konceptet liknar det tidigare men bygger i stället på att en eller flera dragfjädrar monteras utmed dragstaget. Tanken med detta koncept är att en konstant dragkraft nedåt av fjädrarna ska bidra till att förbandet i övre delen av dragstaget inte ska förlora förspänningen. Att dessutom använda sig av flera dragfjädrar monterade vid bjälklaget på varje våning ställer mindre krav på dimensioneringen av varje enskild fjäder.

Koncept C: Polymerblock

Det tredje konceptet involverar ett polymerblock som på samma sätt som tryckfjädern monteras med en förspänning/kompression. Blocket fungerar som en elastisk dämpare, liknande tryckfjädern. Skillnaden är att detta koncept inte innehåller rörliga delar och löper mindre risk för materialutmattning än en fjäder, med nackdelen att dimensioneringen och deformationsegenskaperna hos materialet kan vara svårare att anpassa.

Koncept D: Vajer

Det fjärde konceptet innebär att en vajer spänns upp från bottenplattan till det övre fästet mellan våning 4 och 5. Vajern ska kunna töjas i viss mån men samtidigt ha förmågan att stå emot de dragkrafter som uppstår av vindlasten. Fördelen med detta koncept är att det är väldigt platseffektivt och består av enkla komponenter, med nackdel att det kan vara svårt att få till exakt rätt förspänning vid monteringen.

Koncept E: Reglersystem

Det femte konceptet använder ett adaptivt reglersystem där sensorer ska kunna mäta rörelser i konstruktionen vilket motoriserat justerar åtdragningen i realtid. Detta koncept har förmågan att väldigt exakt kunna anpassa sig till träets fuktrörelser, men systemet kräver konstant strömtillförsel och innehåller fler små och tekniska komponenter som kan komma att kräva regelbundet underhåll.

Koncept F: Hydraulik

Det sjätte konceptet är byggt på principen hydraulik, och består av en oljefyllt kolv som monteras i övre delen av dragstaget. Fördelen med detta koncept är att det skulle ha en god förmåga att anpassa sig till träets formförändringar, men liknande koncept E så kräver hydraulik regelbundet underhåll och kan ställa högre krav på installationen.

Denna konceptgenerering utgör grunden för fortsatta utvärderingsmetoder där de framtagna koncepten med dess för- och nackdelar jämförs.

4.2 Beräkningsunderlag för dimensionering

För att kunna bedöma och senare dimensionera koncepten som togs fram genomfördes beräkningar på en förenklad beräkningsmodell av konstruktionen där syll, bjälklag och reglar utgör de vertikalt påverkade komponenterna. Beräkningarna är baserade på relevant teori, standarder och lastnedräkningar givna från Derome. Målet med att göra beräkningar på modellen var att uppskatta de deformationer som blir till följd av krympning och krypning vilket är grunden till problematiken.

Den maximala lyftkraft som uppstår vid frontregeln är hämtad från Deromes lastnedräkningar och för att ta reda på storleken på den motkraft som konceptet måste klara av används formel (2.2.2) från teorikapitlet. 182 kN var den största lyftkraft som uppstår i en frontregel enligt Deromes lastnedräkningar, den motverkas av både egentygnd och förankring där egentygnden är 31 kN per meter. För att ta höjd för att egentygnden verkar som en utbredd last längs väggen, antas den vara verksam över en sträcka av 0,3 meter i området för lyftkraften. Detta antagande baseras på observationer från fallstudien. Enligt ekvation 2.2.2 blir den maximala kraften som konceptet behöver motverka 173,63 kN.

$$F_{\text{förankring}} = 182 - 0,9 \cdot 31 \cdot 0,3 = 173,63 \text{ kN}$$

Resultatet av beräkningarna som finns i bilaga B visar att den initiala vertikala deformationen till följd av krypning och krympning uppnår -7,69 mm vid medelfuktkvoten 7,5%. Träets säsongsberoende krympnings- och svällningsbeteenden till följd av ändrad fuktkvot medför

att deformationen kan variera ytterligare från medelfuktkvotsläget. Beräkningarna visar att konstruktionen kan krympa ytterligare -6,47 mm på vintern och svälla + 5,29 mm på sommaren, vilket gör att den maximala deformationen blir 14,16 mm.

$$\delta_{tot} = -7,69 \begin{matrix} +5,29 \\ -6,47 \end{matrix} [\text{mm}]$$

Denna beräkningsdata låg till grund för dimensionering och vidare analys av koncept. Informationen är kritisk för en lösning då den påverkar hur mycket rörelse en lösning måste tillåta utan att förlora sin verkan.

4.3 Kvantitativ utvärdering – Pugh-matris

För att så objektivt som möjligt jämföra de framtagna koncepten och deras förmåga att uppfylla funktionskraven så genomfördes en kvantitativ utvärdering i två steg. I det första steget så användes en viktad matris där varje kriterium tilldelades en vikt från 1–5 beroende på dess relativa betydelse för projektet. Kriterier som *Motverka lyftkrafter* och *Anpassa sig efter träets rörelser* tilldelades en hög vikt, medan andra kriterier som *Jämn lastfördelning* värderades lägre. Koncepten tilldelades sedan en poäng mellan 1–5 beroende på hur väl de uppfyllde de olika kriterierna. Poängen multiplicerades slutligen med det viktade kriteriet, och summerades tillsammans med poängen från de andra kriterierna till en totalpoäng. Den viktade matrisen visas i tabell 9 nedan.

Tabell 9. Viktad matris

Kriterium	Vikt (1–5)	Koncept A	Koncept B	Koncept C	Koncept D	Koncept E	Koncept F
		Tryckfjäder	Dragfjäder	Polymerblock	Vajer	Reglersystem	Hydraulik
Ta upp lyftkrafter	5	4	4	3	5	5	3
Anpassa sig efter träets rörelser	5	4	4	4	4	5	3
Upprätthålla funktion över tid	4	3	3	3	4	1	2
Enkel montering	3	2	2	3	5	1	3
Jämn lastfördelning	2	3	3	3	3	5	3
Totalt		64	64	62	82	67	53

Genom den viktade matrisen så konstaterades att koncepten A, B, D och E fick en högre poäng än de övriga kriterierna, och koncept D utmärkte sig särskilt med en hög totalpoäng. För att ytterligare utvärdera de olika koncepten och minska risken för felvärdering vid poängsättningen genomfördes även en viktad Pugh-matris, (Innovationsplattformen VGR, 2022). Utvärderingsmetoden genomfördes två gånger med olika koncept som referenslösning, för att säkerställa ett pålitligt resultat.

I den första Pugh-matrisen valdes koncept A som referenslösning. Övriga koncept jämfördes sedan mot referensen där de poängsattes utefter att de uppfyllde kriterierna bättre, sämre eller likvärdigt. Nettovärdet för den totala poängen räknades ut och koncepten rangordnades, se tabell 10 nedan.

Tabell 10. Pugh-matris med koncept A som referens

Kriterium	Koncept A Tryckfjäder	Koncept B Dragfjäder	Koncept C Polymerblock	Koncept D Vajer	Koncept E Reglersystem	Koncept F Hydraulik
Ta upp lyftkrafter	R	0	-	+	+	-
Anpassa sig efter träets rörelser	E	0	0	0	+	-
Upprätthålla funktion över tid	F	0	0	+	-	-
Enkel montering	E	0	+	+	-	+
Jämn lastfördelning	R	0	0	0	+	0
$\Sigma+$	E	0	1	3	3	1
$\Sigma 0$	N	5	3	2	0	1
$\Sigma-$	S	0	1	0	2	3
Nettovärde	0	0	0	3	1	-2
Rangordning	3	3	3	1	2	4

I den andra Pugh-matrisen valdes i stället koncept D som referens. Detta gav ett nytt perspektiv och resulterade i ett mer robust resultat.

Tabell 11. Pugh-matris med koncept D som referens

Kriterium	Koncept A Tryckfjäder	Koncept B Dragfjäder	Koncept C Polymerblock	Koncept D Vajer	Koncept E Reglersystem	Koncept F Hydraulik
Ta upp lyftkrafter	-	-	-	R	0	-
Anpassa sig efter träets rörelser	0	0	0	E	+	-
Upprätthålla funktion över tid	-	-	-	F	-	-
Enkel montering	-	-	-	E	-	-
Jämn lastfördelning	0	0	0	R	+	0
$\Sigma+$	0	0	0	E	2	0
$\Sigma 0$	2	2	2	N	1	1
$\Sigma-$	3	3	3	S	2	4
Nettovärde	-1	-1	-3	0	0	-4
Rangordning	2	2	3	1	1	4

Det sammanvägda resultatet från de två Pugh-matriserna visade att koncept A, B, D och E fortfarande presterade bäst, liksom den första viktade matrisen. Koncept D och E var de som presterade absolut bäst vid båda jämförelser, och koncept A och B rangordnades strax därefter. Samtliga fyra koncept bedömdes vara lämpliga för vidare analys, och utvärderades ytterligare i kapitel 4.5. Koncept C och F fick i samtliga matriser lägre poäng än övriga koncept, och detta resulterade i att de eliminerades i urvalet.

4.4 Kravspecifikation

I detta kapitel redovisas den kravspecifikation som beskrevs i kapitel 3.6.2 och i samråd med Derome togs fram för projektet. Kravspecifikationen användes som underlag för den kvalitativa analysen i kapitel 4.5 och illustreras i tabell 12.

Tabell 12. Kravspecifikation

ID	Krav/Önskemål	Typ	Målvärde	Vikt	Verifieringsmetod
K01	Lösningen ska vara enkel att montera och konstruerad för att minimera risken för felinstallation	Krav	Maximalt 4 monteringsmoment. Effektiv monteringstid \leq 30 min.	-	Granskning av monteringsprocess. Identifiera möjliga felkällor med hjälp av standarder.
K02	Lösningens livslängd ska motsvara husets livslängd	Krav	Minst 50 år, i linje med byggstandarder (BBR)	-	Materialval och beräkning. Livslängdsdata från materialstandarder.
K03	Lösningen ska kunna hantera träets initiala krympning från leveransfuktkvot, säsongsberoende fuktrörelser och husets krypning utan att påverka funktionen	Krav	Klarar maximal träkrympning från 12% \rightarrow 2% fuktkvot (leverans \rightarrow vintersäsong)	-	Beräkningar enligt Eurokod 5
K04	Lösningen ska vara underhållsfri	Krav	Inga underhållskrav under 50 år	-	Materialanalys. Valda material ska uppfylla hållbarhetsstandarder.
K05	Lösningen ska effektivt ta upp lyftkrafter i väggarna	Krav	Ska tåla last $>$ 180 kN	-	Beräkningar
K06	Lösningen ska inte orsaka oönskad deformation, sprickbildning eller glapp i konstruktionen	Krav	Minimal deformation vid full belastning	-	Beräkningar
Ö01	Lösningen ska fungera både med och utan en övre förankringspunkt i vägg	Önskemål	Likvärdig lastkapacitet i båda konfigurationer	Hög (5)	Konstruktionsanalys. Analysera skillnader mellan förankringsalternativen.
Ö02	Lösningen tillverkas med standardiserade material och processer	Önskemål	Material ska uppfylla SS-EN-standarder. Tillverkning med existerande metoder/byggnormer	Medel (3)	Standardgranskning. Verifiering av materialval mot industristandarder
Ö03	Lösningen kan installeras utan specialverktyg	Önskemål	Ska kunna ske med standardverktyg	Medel (3)	Granskning av standardverktyg.
Ö04	Montering kan utföras av en person	Önskemål	Kan installeras av en person utan behov av lyftutrustning	Låg (1)	Arbetsbelastningsanalys. Uppskattning av vikter och antal moment som krävs vid montering.

Kravspecifikationen låg till grund för den kvalitativa analysen och vidare jämförelse mellan de olika koncepten. Den användes även som underlag för dimensionering av det slutgiltiga konceptet i kapitel 4.9.

4.5 Kvalitativ analys av utvalda koncept

Utifrån den kvantitativa utvärderingen valdes koncepten A, B, D och E som mest lovande. En kvalitativ bedömning genomfördes av de kvarvarande koncepten för att ytterligare granska deras genomförbarhet och funktion. Syftet med detta var att identifiera egenskaper och risker med hänsyn till fler faktorer än i funktionsanalysen.

De underlag som låg till grund för den kvalitativa analysen var resultaten från beräkningarna i kapitel 4.2 samt den kravspecifikation som sammanställdes i samråd med Derome i föregående kapitel. Genom att utgå från de kriterier som kravspecifikationen innehöll, kunde varje koncept granskas utifrån hur väl de uppfyllde både krav och önskemål.

Koncept A som baseras på tryckfjädrar bedömdes ha god förmåga att anpassa sig efter träets rörelser (K03). Att dimensionera en fjäder som kan röra sig 15 mm och ha en mothållskraft på 180 kN är orimligt då fjäderkonstanten k blir 12 MN/m enligt uträkning (4.5). För att minska kravet på en enskild fjäder föddes tanken om parallellkopplade tryckfjädrar för att fördela lasten över flera fjädrar. Detta medför att fler komponenter är inblandade vilket kan öka risken för felinstallation. Att involvera fjädrar i en huskonstruktion avviker från traditionella byggnormer vilket också kan medföra risker med installationen. Andra potentiella risker som identifierades var materialutmattning vid långvarig belastning, risk för oönskade deformationer i träet vid hög spänning och instabilitet.

$$k = \frac{F}{\Delta x} = \frac{180000}{0,015} = 12 \text{ MN/m} \quad (4.5)$$

Koncept B baseras på dragfjädrar och har liknande egenskaper och risker som koncept A. Infästningen av dessa är det som skiljer de åt då dragfjädrarna behöver monteras på så sätt att det tillåter dragkraft.

Koncept D baseras på ett vadersystem och bedömdes ha tillräckligt hög hållfasthet samtidigt som den har en förmåga att töjas inom sitt elastiska område, vilket medför att systemet kan följa träets rörelser om vadjern töjs vid montering. Systemet går att implementera utifrån traditionella byggnormer och kräver inget underhåll efter installation. Konceptet medför att åtdragning kan ske på entréplan. Det finns risker vid montering då vadjern kan bli slack om

den inte monteras rätt och på så sätt tappa sin verkan över tid. System som sätter spänning i konstruktionen vid montering kan potentiellt orsaka knäckning eller sprickbildning. En tolv meter lång vajer som skall monteras lodrätt i väggarna kan vara opraktisk att arbeta med.

Koncept E som baseras på ett reglersystem kring Deromes nuvarande lösning bedömdes kunna anpassas effektivt efter träets rörelser. Konceptet skulle kunna hålla en konstant åtdragningsspänning mellan muttern och åtdragningsytan, vilket hade medfört att de nuvarande dragstagen är konstant verksamma. En sådan lösning skulle också kunna anpassas så att risken för sprickbildning och knäckning minimeras. Ett reglersystem kan komma att kräva regelbundet underhåll, konstant strömförsörjning och avviker definitivt från traditionella byggnormer. Konstant strömförsörjning försvårar installation och medför risker med elfel.

4.6 Platsbesök som validering

För att ytterligare stärka den kvalitativa utvärderingen genomfördes det i samarbete med Derome två platsbesök. Det första besöket ägde rum på ett av Deromes aktuella byggprojekt, där konstruktionen av ett nytt flervåningsbostadshus kunde studeras i realtid. Något som kunde studeras var hur montage av Deromes befintliga lösning gick till, arbetsmoment som krävdes för detta samt hur åtkomligheten var. Ytterligare något som kunde observeras var hur mycket utrymme som kunde användas för en ny lösning. Dessa observationer visade att det utrymme som finns att tillgå är begränsad, vilket leder till att konstruktionen av ett nytt koncept begränsas när det kommer till stora komponenter eller andra skrymmande delar.

Det andra platsbesöket genomfördes vid ett färdigbyggt hus som stod klart för cirka 10 år sedan. I höjd med den övre infästningen av dragstaget fanns det i byggnaden en monterad inspektionslucka i väggen som möjliggjorde direkt inspektion över hur infästningen såg ut, och eventuellt glapp i konstruktionen. Mellan mutter och bricka så observerades ett glapp som mättes till cirka 1 cm, vilket stämmer väl överens med de vertikala deformationsberäkningar som genomförts i kapitel 4.2 och bekräftar träets deformationer i form av krympning och krypning över tid. I figur 16 i kapitel 2.3.3 framgår det tydligt hur detta har orsakat ett slag mellan mutter och bricka.

Bilden är tagen från inspektionssluckan vid platsbesöket. De två platsbesöken gav en helhetsbild av den nuvarande lösningen och dess problematik, och informationen är en bidragande faktor för analys och val av ett slutgiltigt koncept, som redovisas i följande kapitel.

4.7 Val av koncept för vidare analys

Utifrån kvantitativ utvärdering, kvalitativ bedömning och validering genom platsbesök var koncept D, vajer, det koncept som valdes för vidareutveckling. Bedömningen att detta koncept var mest lovande för vidare analys grundades på dess höga poäng i utvärderingsmatriserna, förmågan att i teorin följa träets rörelser och ta upp lyftkrafter samt genomförbarheten i Deromes nuvarande konstruktion.

Utifrån matriserna i den kvantitativa bedömningen visade vajerkonceptet goda resultat när den jämfördes mot de andra koncepten. Konceptet bedömdes ha potential att uppfylla kriterierna *motverka lyftkrafter* och *anpassa sig efter träets rörelser* vilket är de huvudsakliga funktionerna av systemet.

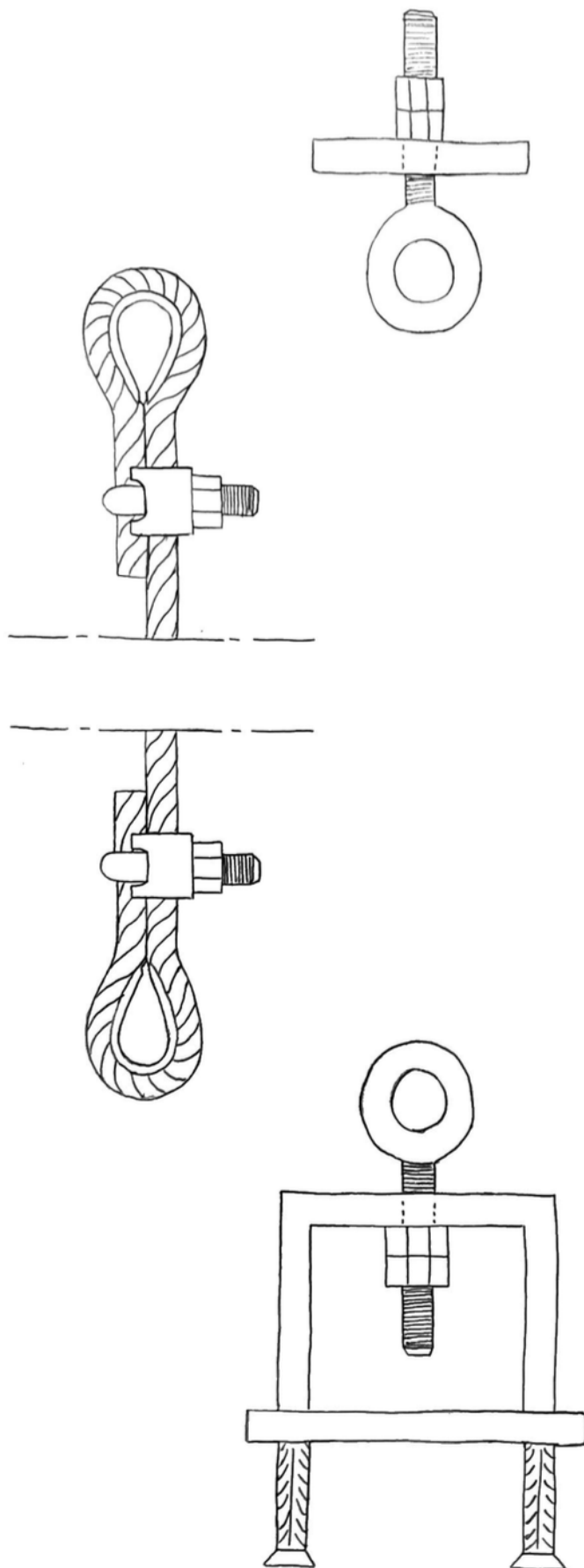
Resultaten från den kvalitativa analysen visade att vajerkonceptet ligger närmare traditionella byggnormer än de andra koncepten då systemet har en enkel uppbyggnad. Platsbesöket bekräftade att utrymmet för systemet är begränsat vilket gjorde att vajerkonceptet uppfattades gynnsamt eftersom det kan monteras på liknande sätt som den nuvarande lösningen. Detta innebär att Deromes väggar kan behålla de dimensioner de har i nuläget. Det sågs som en fördel att konceptet inte innehåller delar som behöver regelbundet underhåll.

Sammanfattningsvis bedömdes vajerkonceptet vara det mest lovande i detta skede, till följd av dess potentiella praktiska fördelar samt teoretiska möjligheter att hantera lyftkrafter och deformationer i konstruktionen genom potentiell balans mellan hållfasthet och styvhet.

4.8 Utformning av koncept

För att underlätta analysen av vajerkonceptet togs ett mer konkret förslag fram på hur systemet skulle kunna vara utformat. Utformningen av det hypotetiska konceptet baseras på de krav som identifierats i arbetet samt de faktiska byggförhållanden som studerades på platsbesöket. För att strukturera upp konceptet så delas det in i tre delsystem som beskrivs nedan och visas i figur 18:

- **Övre infästning:** Det övre delsystemet föreslås utgöras av en öglebult som monteras genom bjälklaget mellan våning 4 och 5. Öglebulten placeras i en bricka och fixeras med en mutter som sedan säkras mot självlossning med en extra mutter. Infästningen är tänkt att vila mot ovansidan av bjälklaget för att skapa en stabil förankringspunkt.
- **Nedre infästning:** För att möjliggöra ingjutning av systemet i bottenplattan föreslås en svetsplåt med en påsvetsad bygel i stål av U-profil. Denna U-profil skulle möjliggöra montering av en öglebult likt den övre infästningen och tillåta justering med hjälp av muttrar.
- **Vajer:** Systemet föreslås bestå av en vajer, två kaus (vajeröglor) samt vajerlås. Vajern är tänkt att löpa fritt mellan den nedre och övre infästningen och monteras med en viss förspänning. Tanken är då att vajern likt en fjäder potentiellt ska kunna följa med träets rörelser samtidigt som den teoretisk skulle kunna ta upp lyftkrafterna.



Komponenter ①:

- 1 st bricka
- 2 st muttrar
- 1 st öglebult

Komponenter ②:

- 1 st vajer
- 2 st kaus (vajeröglor)
- x st vajerlås

Komponenter ③:

- 1 st öglebult
- 2 st muttrar
- 1 st stål U-profil
- 1 st svetsplåt

Figur 18. Utformning av konceptet – tre delsystem

I linje med Deromes önskemål så har utformningen av vajerkonceptet skett med fokus på att använda standardkomponenter för att försöka följa branschnormer. Alla delsystem baseras på komponenter som är hanterliga med vanliga verktyg och dessutom är systemet anpassat efter den faktiska installationsmiljön som studerades vid platsbesöket. Utformningen underlättar visualiseringen av konceptet och i följande kapitel presenteras analysen av konceptets tekniska prestanda utifrån beräkningarna i kapitel 4.2.

4.9 Dimensioneringsanalys av konceptet

För att utvärdera vajerkonceptet genomförs en dimensioneringsanalys som syftar till att undersöka hur väl konceptet uppfyller kraven K01 och K03 utifrån beräkningarna i kapitel 4.2. I detta kapitel undersöks hur egenskaperna hos vajerkonceptet påverkar möjligheten att kombinera följsamhet och bärkraft, samt begränsningar hos fjädrande system.

4.9.1 Konceptets idé och problembild

Konceptet med en vajer togs fram som ett förslag på hur de vertikala lyftkrafterna till följd av vindbelastningen skulle kunna motverkas, där trästommens naturliga formförändringar över tid samtidigt tillåts. Tanken bakom vajerkonceptet var att det skulle ha förmågan att kombinera egenskaperna följsamhet och bärkraft. Vajern skulle initialt fungera likt en fjäder och tillåta viss töjning utan att generera betydande krafter på träkonstruktionen, samtidigt som stora vertikala krafter på grund av vinden skulle tas upp. Genom att hitta en balans mellan egenskaperna bedömdes konceptet ha potential att lösa problemet, bibehålla förspänning utan att hindra träets formförändringar.

Trots att ett fjädrande vajersystem ansågs ha potential att lösa problematiken uppstår en utmaning i att hitta en balans mellan följsamhet och bärkraft. Dimensionen på vajern påverkar dess styvhet, vilket innebär att en vajer som är tillräckligt hållfast för att ta upp de dimensionerade lyftkrafterna riskerar att bli för styv för att följa och tillåta träets formförändringar. I nästa avsnitt analyseras hur dimensioneringen påverkar den tekniska funktionen av systemet och utmaningen med att uppfylla dessa krav samtidigt.

4.9.2 Dimensionering av vajer

Vid dimensionering av vajern behöver de två motstående kraven följsamhet och bärkraft beaktas.

- Följsamhet: Vajern ska tillåta de naturliga formförändringar som sker i träet på cirka $\delta_{tot} = -7,69 \begin{smallmatrix} +5,29 \\ -6,47 \end{smallmatrix}$ mm utan att betydande krafter utvecklas på träkonstruktionen.
- Bärkraft: Vajern ska ha förmågan att ta upp de vertikala lyftkrafter som uppstår i konstruktionen, med en magnitud på upp till 180 kN.

I denna dimensioneringsanalys antas vajern ha samma linjära egenskaper som ett dragstag. Sambandet mellan kraft och töjning är då enligt Hookes lag proportionellt upp till sträckgränsen. Detta antagande möjliggör dimensionering av vajern, baserat på maximal dragspänning och tvärsnittsarea.

I praktiken så uppvisar en spirallindad vajer till skillnad från ett dragstag ett mer icke-linjärt beteende i början av belastningskurvan. Vid den initiala belastningen så sker en så kallad konstruktionstöjning som orsakas av att trådarna i vajern sätter sig och tillåter viss rotation, vilket resulterar i en förlängning. Detta fenomen beskriver Costello (*Theory of Wire Rope, 1997*), där den totala töjningen av en vajer kan delas upp i:

$$\Delta L_{total} = \Delta L_{construction} + \Delta L_{elastic}$$

I denna dimensionering beaktas endast vajerns elastiska deformation efter sättningsfasen och den initiala konstruktionstöjningen.

Valet av material baseras på svensk standard (*SS-EN 12385-4+A1:2008*) som specificerar egenskaper för stålvajrar, och värdet 1770 MPa används som värde för minsta brottgräns utifrån detta. Dimensioneringen utgår direkt från brottgränsen utan tillämpning av säkerhetsfaktor, då syftet med dimensioneringen är att uppmärksamma den tekniska konflikten som uppstår mellan kraven följsamhet och bärkraft. Vid verklig dimensionering ska en säkerhetsfaktor 5:1 användas enligt samma standard.

För att vajern ska kunna ta upp en lyftkraft på 180 kN krävs tvärsnittsarean:

$$A \geq \frac{F}{R_m} = \frac{180000}{1770 \cdot 10^6} \approx 1,017 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 101,7 \text{ mm}^2$$

Vilket resulterar i vajerdiametern:

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 101,7}{\pi}} \approx 11,4 \text{ mm}$$

Förutsatt att ingen säkerhetsfaktor tillämpas skulle alltså en vajer med 11,4 mm i diameter vara tillräckligt stark för att ta upp den aktuella lyftkraften. En vajer med denna dimension uppvisar dock en hög styvhet, vilket resulterar i att den aktivt motverkar träets naturliga formförändringar. Detta kan i sin tur leda till oönskade spänningar och i värsta fall sprickbildning i trästommen.

För att träets naturliga rörelser ska tillåtas krävs då en mindre dimension på vajern, då en minskad tvärsnittsarea resulterar i en mindre kraftpåverkan på konstruktionen när den krymper eller sväller. En vajer med en mindre diameter har alltså en bättre förmåga att följa träets rörelser, utan att orsaka stor negativ påverkan på konstruktionen. Detta innebär samtidigt att draghållfastheten på vajern reduceras, och en lyftkraft på 180 kN är ej längre möjlig att ta upp utan risk för plastisk deformation eller brott.

Detta innebär att det inte finns någon möjlig lösning för en vajer som uppfyller de båda funktionskraven samtidigt, då de är motstridiga. Med denna bakgrund bedöms och utvärderas sedan konceptet och dess förmåga att uppfylla kraven enligt kravspecifikationen, vilket beskrivs i nästa avsnitt.

4.10 Utvärdering mot kravspecifikation

En utvärdering av vajerkonceptet mot kravspecifikationen genomfördes sedan. Resultatet visar att flera krav och önskemål är uppfyllda eller kan uppfyllas. Vajerkonceptet är en tekniskt enkel lösning som bygger på standardiserade komponenter och material vilket resulterar i att exempelvis K01, K04 och Ö02 kan uppfyllas.

Två av de centrala kraven, K03 och K05, har däremot visat sig vara motstridiga. Krav K05 som innebär att lösningen effektivt ska ta upp lyftkrafter i väggarna, uppmätta till 180 kN enligt tidigare beräkningar, resulterade i en nödvändig vajerdiameter på 11,4 mm. En sådan vajer uppfyller då K05 men har en hög styvhet, vilket motverkar träets fuktrörelser och resulterar i att krav K03 inte kan uppfyllas. Krav K06, som innebär att konceptet inte ska orsaka oönskad deformation eller sprickbildning har inte kunnat verifieras inom ramen för detta arbete. Detta då underlaget inte är tillräckligt omfattande för att risken för lokal deformation eller sprickbildning ska bedömas. Samtliga krav och önskemål presenteras i en fullständig utvärdering i tabell 13 nedan.

Tabell 13. Utvärdering mot kravspecifikation

ID	Krav/Önskemål	Uppfyllt	Kommentar
K01	Lösningen ska vara enkel att montera och konstruerad för att minimera risken för felinstallation	Ja	Inga rörliga delar, teoretiskt enkel installation
K02	Lösningens livslängd ska motsvara husets livslängd	Ja	Materialvalet uppfyller krav
K03	Lösningen ska kunna hantera träets initiala krympning från leveransfuktkvot, säsongsberoende fuktrörelser och husets krypning utan att påverka funktionen	Nej	Vajer i nödvändig dimension blir för styv
K04	Lösningen ska vara underhållsfri	Ja	Inga rörliga delar eller komponenter i behov av underhåll
K05	Lösningen ska effektivt ta upp lyftkrafter i väggarna	Ja	Uppfylls med en vajerdimension på 11,4 mm (utan SF)
K06	Lösningen ska inte orsaka oönskad deformation, sprickbildning eller glapp i konstruktionen	Information saknas	Hög förspänning och/eller grov vajer kan medföra risker
Ö01	Lösningen ska fungera både med och utan en övre förankringspunkt i vägg	Ja	Utformningen av infästningspunkten möjliggör montering vid bjälklag
Ö02	Lösningen tillverkas med standardiserade material och processer	Ja	SS-EN-standardmaterial används
Ö03	Lösningen kan installeras utan specialverktyg	Ja	Standardkomponenter
Ö04	Montering kan utföras av en person	Ej verifierat	Potentiellt möjligt

4.11 Sammanfattning av resultatet

Ett försök har gjorts för att hitta en mekanisk lösning som kan anpassa sig efter träets rörelser och samtidigt hantera de lyftkrafter som uppstår till följd av vindlast. Föregående kapitel visar att det finns en konflikt mellan dessa två krav då dimensioneringen av vajerkonceptet inte gör det möjligt att uppfylla dessa krav samtidigt.

Resultatet visar att en passiv mekanisk lösning baserat på ett fjädrande koncept inte kan uppfylla de mest centrala kraven K03 och K05 som önskas vid förankring av frontregeln. Gällande de andra kraven har vajerkonceptet god möjlighet att uppfylla dem, detta är dock inte tillräckligt för att konceptet ska realiseras. I följande kapitel diskuteras resultatet och metoden vidare och sammanställer tankar och idéer som skulle kunna ligga till grund för vidare forskning.

5. Diskussion

Syftet med detta kapitel är att tolka, diskutera och reflektera över resultatet av arbetet, utifrån frågeställningar, metodval och begränsningar. Arbetet har syftat till att analysera problematiken med att förankra en hög träkonstruktion och att förstå problemets komplexitet. Denna del av rapporten diskuterar de konflikter som identifierats, utvärderar metoden samt sammanställer idéer kring vidare forskning och utveckling.

5.1 Problemförståelse

Syftet med arbetet har varit att fördjupa förståelsen för problematiken med förankring av flervåningshus med trästomme. Detta har gjorts genom att analysera förutsättningarna för att skapa en förankring mellan bottenplattan och bjälklaget som bibehåller sin funktion genom hela konstruktionens rörelsespann.

Genom att analysera ett vajerkoncept, som var tänkt att fungera som en fjäder, har problemets komplexitet illustrerats genom att visa att det uppstår en konflikt mellan bärkraft och följsamhet. Det framgår att träets rörelser i kombination med stumma material som stål leder till att en infästning som från början är spänd lätt tappar sin funktion över tid. Analysen har visat att det inte räcker med att spänna systemet initialt, utan systemet återfjädringsförmåga måste anpassas till hela träets rörelsespann, vilket visat sig vara svårt.

Karaktären hos problemet är tydligt. Det räcker inte att bara dimensionera ett starkt förband, utan att hantera samspelet mellan två material med helt skilda egenskaper över tid.

5.2 Tolkning av resultat

Arbetet med konceptet visar att utformningen av ett system som både är bärkraftigt och samtidigt har förmågan att vara följsamt är komplext. Från analysen av vajerkonceptet är ett tydligt resultat att det uppstår en konflikt mellan två av de centrala kraven för projektet, systemets kraftupptagningsförmåga och förmåga att följa träets formförändringar. För att systemet ska kunna ta upp de lyftkrafter som uppstår i konstruktionen när fuktkvoten är som störst så krävs en initial förspänning vid installation anpassad för detta. När fuktkvoten i träet sedan minskar och materialet krymper minskar denna förspänning i linje med Svenskt Trä (2025b), vilket i sin tur minskar systemets förmåga att ta upp vertikala lyftkrafter. En lösning på detta problem skulle vara att i stället installera systemet för det lägsta läget, men detta kräver en mycket högre initial förspänning vilket riskerar att motverka träets naturliga rörelser, och hindrar framtida svällning i materialet.

Slutsatsen kan därför dras att ett fjädrande system endast fungerar optimalt när träets fuktrörelsecykel är vid ett specifikt läge. Konceptet kan inte hantera hela rörelsepannet utan att oönskade bieffekter som deformation, materialspänningar eller risk för sprickbildning uppstår.

Resultaten visar att det saknas en enkel lösning som samtidigt uppfyller samtliga krav för projektet. Det är tekniskt utmanande att skapa ett koncept som bibehåller förspänningen utan att påverka kraftupptagningsförmåga eller följsamhet med träet. Detta belyser varför det är komplext att uppfylla huvudfrågans krav med ett passivt system. Arbetet har identifierat de tekniska faktorer som påverkar förlusten av förspänning, tydliggjort de begränsningar i ett valt koncept, och fastställt vilka krav en möjlig lösning måste uppfylla för att kunna tillämpas i praktiken.

5.3 Begränsningar

Från början utgick arbetet från en produktutvecklingsmetod som syftade i att ta fram ett koncept som kunde lösa problemet med att förspänningen förloras över tid. Genom arbetets gång blev det tydligare att problemet är mer komplext än väntat, vilket innebar att fokuset flyttades mer mot en djupare analys av problemet. Detta har påverkat arbetets struktur och hur resultatet utvecklats och innebär att tyngden har legat vid identifiering av tekniska begränsningar snarare än att skapa en färdig lösning.

Utifrån denna metod valdes en vajer som var tänkt att fungera som en fjäder till konceptuell analys. Det är ett rimligt antagande i praktiken men i teorin är det svårt att beräkna konstruktionstøjningen som följer när vajer till en början flätas upp. Därför fick vajern analyseras utifrån samma egenskaper som ett stålstag där konstruktionstøjningen försumrades, vilket liknar den nuvarande lösningen. För att korrekt kunna avgöra vajerns fjädrande egenskaper hade mer avancerade numeriska beräkningar eller experiment behövts. Beräkningsmodellen för träets krympning och krypning är också förenklad för att tillåta handberäkningar som kan ge en bra uppskattning.

Resultaten visar trots dessa förenklingar att problemet med att ta upp lyftkrafter effektivt genom hela träets rörelsespann uppstår oavsett om förbandet utgörs av ett stelt stag eller om systemet är fjädrande. Det beror på att båda systemen är direkt beroende av Hookes lag oavsett om det är styvt eller fjädrande, det vill säga att man bara kan ha optimal kraftupptagningsförmåga vid en specifik fuktkvot/läge.

5.4 Metodkritik

Metoden som i huvudsak har använts i detta arbete är konceptuell analys i kombination med handberäkningar. Detta valdes som ett lämpligt tillvägagångssätt eftersom det möjliggjorde ett systematiskt sätt att analysera problemet som en förenklad modell och jämföra den mot projektets definierade krav. Även om den förenklade modellen inte möjliggjorde en fullständigt exakt prediktion av verkliga förhållanden så gav metoden värdefulla insikter kring problematiken och de tekniska konflikter som uppstår.

En viktig fördel med metoden som använts i arbetet har varit att den varit transparent, lättillgänglig och möjlig att genomföra inom projektets ramar. Metoden har dessutom möjliggjort att fokus kan ligga på själva kärnproblemet i uppgiften, hur träets fuktrörelser påverkar ett förspänt förband över tid. Metoden har även tillåtit idégenerering och möjligheten att dra tidiga slutsatser kring grundläggande principer snarare än detaljer.

Kvantitativa slutsatser har dock varit svåra att dra på grund av avsaknad av numeriska simuleringar och praktiska tester. Genom praktiska tester så hade resultat för exempelvis konstruktionstöjningen i vajern kunnat valideras mer precist. Sammanfattningsvis så bedöms metoden som använts för arbetet som lämplig, både för att förstå kärnan i problemet och att analysera och komma fram till ett tänkbart koncept. Metoden är dock inte tillräcklig för att ta fram exakta dimensioner på komponenterna i systemet, eller säkerställa hur ett verkligt system skulle fungera i praktiken. För en färdig lösning krävs mer avancerade och djupgående analyser, som exempelvis praktiska tester och numeriska simuleringar.

Etablerade branschdokument såsom Träguiden, Eurokoder och Boverkets byggregler har använts som källor i litteraturstudien, och anses vara normgivande inom byggteknik i Sverige med hög trovärdighet. Dessa källor är relevanta för att förstå grundläggande materialbeteenden och dimensioneringsprinciper vilket är nödvändigt då examensarbetet behandlar förankring i träkonstruktioner.

Träguiden (2025c) visar hur krypning och krympning till följd av permanent belastning och fuktkvotändring är direkt kopplade till de deformationer som uppstår hos trä. Vilket är direkt kopplat till problematiken med förlust av förspänning i frontregeln. Boverket (2019) redovisar hur mycket av husets egenvikt som får användas vid beräkningar, vilket är viktigt vid dimensionering för att ta upp vertikala lyftkrafter.

Dessa källor utgör inte specifika lösningar relaterade till förspända infästningar i flervåningshus, vilket medför att informationen till viss del har tolkats för att vara relevant för implementering i detta arbete. Litteraturstudien utgör en stabil grund och har varit viktig för att identifiera de faktorer som påverkar konstruktionen samt för att förstå problematiken.

5.5 Praktiska implikationer

Även om konceptet som analyserats i arbetet inte uppfyller de två centrala kraven på bärkraft och följsamhet samtidigt, så ger arbetet insikter som har praktisk betydelse och är viktiga för fortsatt utveckling inom området.

Både fjädrande och styva system delar samma grundläggande problem. De är endast optimalt anpassade under ett visst läge i träets fuktrörelsecykel. När träet krymper eller sväller på grund av ändrad fuktkvot förändras systemets förutsättningar för kraftupptagning, oavsett om systemet har fjädrande egenskaper eller ej. Det innebär att systemets funktion inte kan garanteras över tid, utan någon form av regelbunden justering av systemet.

En praktisk slutsats som går att dra är att det är möjligt att använda sig av stumma material som stål för att förankra trä, men endast när infästningen sträcker sig över ett kort avstånd. Det är av denna anledning som traditionella infästningar som vinkeljärn, spik och skruv fungerar. Träets deformation förekommer fortfarande, men då avståndet är litet så ger inte skillnaderna upphov till problem i konstruktionen. När avståndet är större, som i detta projekt cirka 12 meter, får träets rörelser större genomslag och skillnaderna blir kritiska. Ett system med en förspänd vajer som sträcker sig över flera våningar är därför betydligt mer utmanande.

Konceptet som tagits fram genom detta arbete lämpar sig i nuvarande form inte för implementering i Deromes byggsystem, men det bidrar till att skapa en djupare förståelse för varför befintliga system och metoder inte fungerar tillfredsställande i vissa situationer. Detta är en viktig utgångspunkt för framtida innovationsarbete och kan ligga till grund för framtida kravställning och vidare konceptutveckling.

6. Slutsatser

Detta arbete har undersökt problematiken med förankring av frontregeln i en trästomme till följd av träets fuktrörelser och krypningsbeteenden. Genom att analysera ett koncept där en vajer beaktas som ett fjädrande förankringssystem har arbetet visat att det uppstår ett problem när det ställs krav på bärkraft och följsamhet samtidigt.

Enligt analysen kan både fjädrande och styva förankringssystem endast fungera optimalt i ett specifikt läge inom träets rörelsespann. Trä är ett säsongberoende material i den mening att när luftfuktigheten ändras påverkas träets fuktkvot och därmed dess form. Detta leder till att det uppstår svårigheter med att bibehålla ett förankringssystem bärförmåga över tid. Ett system som är dimensionerat för ett visst läge inom träets rörelsespann riskerar att tappa kraftupptagningsförmågan i ett annat läge och detta gäller oavsett om systemet är stelt eller följsamt.

Huvudfrågan i arbetet, hur förspänningen i en förankring mellan bottenplatta och bjälklag kan behållas över tid kan alltså inte besvaras med ett enkelt, mekaniskt passivt system. Arbetet visar i stället att förankringssystem med andra materialegenskaper än trä förlorar sin förspänning som en direkt följd av träets formförändringar. Sannolikt krävs det ett aktivt reglerande system för att hantera problemet på detta sätt.

- **Vilka tekniska faktorer påverkar förlust av förspänningen?**

Arbetet har visat att trä påverkas av krypdeformationer samt fuktrelaterade formförändringar. Detta i relation med ett styvt material som stål som har andra egenskaper är de främsta orsakerna till att förspänningen förloras.

- **Vilka alternativa metoder kan motverka förlusten av förspänningen?**

Ett fjädrande vajersystem har analyserats som ett förankrande system men det visade sig att det inte var tillräckligt för att hantera alla krav inom träets rörelsespann.

- **Vilka tekniska lösningar finns idag för att lösa liknande problem?**

Den befintliga lösningen, styva stålstag, har visats lida av samma grundproblem som det analyserade konceptet, det fungerar endast vid en och samma fuktkvot/position av träet.

- **Hur väl kan ett koncept uppfylla både bärkraft och följsamhet?**

Det framgår tydligt att det är svårt att uppnå båda dessa krav samtidigt med ett passivt system. Det analyserade konceptet visar att det inte går att få det ena kravet optimalt utan att kompromissa med det andra.

- **Vad är kraven på konceptet för att det ska vara lämpligt för Derome?**

För att Derome ska kunna ha praktiskt nytta av en lösning i deras byggsystem krävs det en lösning som styvt kan ta upp lyftkrafter samtidigt som lösningen kan följa träets rörelser.

Det analyserade konceptet uppfyller inte de kraven som ställs för att kunna implementera det som lösning. Dock har analysen av systemet bidragit med insikter som kan användas som stöd till vidare forskning kring hur man kan hantera träets levande egenskaper i höga hus där det ställs krav på vindstabilisering.

7. Förslag på vidare forskning

Genom arbetet har flera tekniska utmaningar i samband med bärkraft och följsamhet i konstruktioner identifierats, och för att utveckla en fungerande lösning föreslås följande metoder och angreppssätt på problemet.

- **Experimentell validering**

Praktiska tester och experiment bör genomföras för att mer precist undersöka vajerns töjning och beteende under olika laster. Mätningar på flera dimensioner rekommenderas för att skapa bredare underlag och förståelse för komponentens egenskaper, och hur förspänning samt kraftupptagningsförmågan förändras under belastning.

- **Numeriska beräkningar (FEM/FEA)**

För att på ett mer realistiskt sätt simulera deformationer och spänningar i konstruktionen och komponenterna bör finit elementanalys (FEA) användas. Detta skulle möjliggöra en mer detaljerad förståelse för problemet och underlätta för att hitta en möjlig lösning.

- **Träbaserade infästningslösningar och korta avstånd**

Ett möjligt angreppssätt på problemet är att helt gå ifrån det ursprungliga konceptet med förankringen i stål och i stället undersöka möjligheten att skapa infästningar där delarna helt eller mestadels består av trä. Det kan innebära ett stort system där hela infästningen är i trä, eller att man utgår från mer traditionella infästningar och korta avstånd, vilket resulterar i små och hanterbara deformationer. Ett koncept där avståndet mellan material med olika egenskaper minimeras kan vara avgörande för att uppnå önskad stabilitet samtidigt systemet inte motverkar träets formförändringar.

- **Utveckling av ett självreglerande aktivt system**

Ett passivt system har visat sig ha problem att hantera de naturliga formförändringar som sker i träet samtidigt som det ska ha förmågan att ta upp stora vertikala krafter. Ett möjligt att undersöka är utformningen av ett automatiserat system, exempelvis genom sensorer och andra aktiva komponenter som kan registrera träets deformationer i realtid, och anpassa infästningens förspänning efter detta. Detta är ett mer avancerat spår som ställer höga krav på bland annat energiförsörjning och tillförlitlighet, och direkt implementering i Deromes nuvarande byggsystem kan vara svårt.

8. Litteraturförteckning

Standarder:

1. Swedish Standard Institute. (2005). *SS-EN 1991-1-4:2005. Eurokod 1: Laster på bärverk – Del 1-4: Allmänna laster – Vindlast*. Stockholm: Swedish Standard Institute.
2. Swedish Standard Institute. (2004). *SS-EN 1995-1-1:2004. Eurokod 5: Dimensionering av träkonstruktioner – Del 1-1: Allmänt – Gemensamma regler och regler för byggnader*. Stockholm: Swedish Standard Institute.
3. Swedish Standard Institute. (2008). *SS-EN 12385-4+A1:2008. Stållinor – Säkerhet – Del 4: Kardellinor för allmänt ändamål*.
4. Swedish Standard Institute. (2005). *SS-EN 14374:2004. Träkonstruktioner – Fanerträ (LVL) – Krav*.

Vetenskapliga artiklar:

5. Girhammar, U. A., & Källsner, B. (2016). Horizontal stabilisation of sheathed timber frame structures using plastic design methods – Introducing a handbook Part 1: Design principles for horizontal stabilisation. *Procedia Engineering*, *161*, 618–627.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.713>
6. Källsner, B., & Girhammar, U. A. (2016). Horizontal stabilisation of sheathed timber frame structures using plastic design methods – Introducing a handbook Part 3: Basics of the plastic design method. *Procedia Engineering*, *161*, 636–644.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.719>

Webbkällor:

7. Boverket. (2019). *Boverkets föreskrifter och allmänna råd om tillämpningen av europeiska konstruktionsstandarder (EKS 11)* (BFS 2019:1 med ändringar t.o.m. BFS 2019:1). <https://rinfo.boverket.se/BFS2011-10/pdf/BFS2019-1.pdf>
8. Boverket. (2024, december 16). Nyttiga laster. <https://www.boverket.se/sv/PBL-kunskapsbanken/regler-om-byggande/barformaga-stadga-bestandighet/laster/nyttiga-laster/>
9. Stora Enso. (u.å.). LVL – Laminerat fanervirke. *Stora Enso*. <https://www.storaenso.com/sv-se/products/mass-timber-construction/building-products/lvl>
10. Svenskt Trä. (2025a). Egenskaper hos barrträ. *Svenskt Trä*. <https://www.svenskttra.se/trafakta/allmant-om-tra/fran-timmer-till-planka/egenskaper-hos-barrtra/>
11. Svenskt Trä. (2025b). Trä och fukt. *Svenskt Trä*. <https://www.svenskttra.se/trafakta/allmant-om-tra/tra-och-fukt/>
12. Svenskt Trä. (2025c). Träets fuktrörelser. *Svenskt Trä*. <https://www.svenskttra.se/trafakta/allmant-om-tra/tra-och-fukt/traets-fuktrorelser/>
13. Träguiden. (2021a, november 2). 1.3.1 Egentyngd. *Träguiden*. <https://www.traguiden.se/konstruktion/takstolshandboken/bakgrund/1.3-laster-och-lastfall/1.3.1-egentyngd/>
14. Träguiden. (2021b, november 2). 1.3.3 Vindlast. *Träguiden*. <https://www.traguiden.se/konstruktion/takstolshandboken/bakgrund/1.3-laster-och-lastfall/1.3.3-vindlast/>
15. Träguiden. (2021c, juni 15). Inverkan på de mekaniska egenskaperna. *Träguiden*. <https://www.tra.guiden.se/om-tra/materialet-tra/traets-egenskaper-och-kvalitet/mekaniska-egenskaper1/inverkan-pa-de/>

16. Träguiden. (2021d, juni 14). Träets fuktrörelser. *Träguiden*.
<https://www.traguiden.se/om-tra/materialet-tra/traets-egenskaper-och-kvalitet/fuktegenskaper1/traets-fuktrorelser/?previousState=010000>
17. Träguiden. (2021e, november 2). Snölast. *Träguiden*.
<https://www.traguiden.se/konstruktion/takstolshandboken/bakgrund/1.3-laster-och-lastfall/1.3.2-snolast/>
18. Träguiden. (2020, mars 26). Stabiliserande system – generellt. *Träguiden*.
<https://www.traguiden.se/konstruktion/konstruktiv-utformning/stomme/stomme/stabiliserande-system/>
19. Träguiden. (2019). Fanerträ (LVL) – Karakteristisk hållfasthet. *Träguiden*.
<https://www.traguiden.se/konstruktion/dimensionering/hallfasthet-och-barformaga/karakteristisk-hallfasthet/fanertra-lvl/>
20. Innovationsplattformen VGR. (2022, april 29). Mall Pugh-matris. *Västra Götalandsregionen*.
<https://mellanarkiv-offentlig.vgregion.se/alfresco/s/archive/stream/public/v1/source/available/sofia/su4625-1724666503-291/surrogate/Mall%20Pughmatris%202022-04-29.pdf>

Böcker:

21. Johannesson, P., & Vretblad, B. (2011). *Byggformler och tabeller*. Liber.
22. Svenskt Trä. (2020). *Att välja trä*.
<https://www.svenskttra.se/siteassets/5-publikationer/pdf/avt-2020-72ppi.pdf>

Bilagor

Bilaga A. Lastnedräkningar givna från Derome

Lastnedräkningar
Total karaktäristisk egentyngd: 4911 kN
Total karaktäristisk nyttig last: 3830 kN
Total karaktäristisk vindlast (-Y riktning på hela byggnaden): 880 kN
Maximal nyttig last i en LSV: 23 kN/m
Maximal egentyngd i en LSV: 31 kN/m
Maximal lyftkraft i nuvarande dragstag: 182 kN

Bilaga B. Deformationsberäkningar

Krympning

Medelfuktkvot = 7,5%

Leveransfuktkvot = 12% (Givet från Derome)

Minsta fuktkvot (vintersäsong) = 2%

Maximal fuktkvot (sommarsäsong) = 12%

Enligt ekvation (2.1.2h) har följande värden för β räknats ut för samtliga komponenter i beräkningsmodellen.

$$\beta_{\text{stående fiberriktning (gran)}} = \frac{0,003}{30} = 0,0001$$

$$\beta_{\text{radiell fiberriktning (gran)}} = \frac{0,036}{30} = 0,0012$$

$$\beta_{\text{LVL, bredriktning}} = \frac{0,00033}{30} = 0,000011$$

Enligt ekvation (2.1.2g) har följande värden för krympningen för samtliga komponenter i beräkningsmodellen räknats ut.

Initial krympning: från leverans till medelfuktkvot

Bjälklag: $360 \cdot 0,000011 \cdot (12 - 7,5) = 0,01782$ [mm]

Regel: $2616 \cdot 0,0001 \cdot (12 - 7,5) = 1,17720$ [mm]

Syll: $95 \cdot 0,0012 \cdot (12 - 7,5) = 0,51300$ [mm]

Total initial krympning: 5,29308 [mm]

Maximal säsongsberoende krympning/svällning, medelfuktkvot till säsongsberoende fuktkvot

Krympning (vinter)

Bjälklag: $360 \cdot 0,000011 \cdot (7,5 - 2) = 0,02178$ [mm]

Regel: $2616 \cdot 0,0001 \cdot (7,5 - 2) = 1,4388$ [mm]

Syll: $95 \cdot 0,0012 \cdot (7,5 - 2) = 0,627$ [mm]

Total säsongsberoende krympning: 6,46932 [mm]

Svällning (sommar)

$$\text{Bjälklag: } 360 \cdot 0,000011 \cdot (12 - 7,5) = 0,01782 \text{ [mm]}$$

$$\text{Regel: } 2616 \cdot 0,0001 \cdot (12 - 7,5) = 1,1772 \text{ [mm]}$$

$$\text{Syll: } 95 \cdot 0,0012 \cdot (12 - 7,5) = 0,513 \text{ [mm]}$$

$$\text{Total säsongsb beroende svällning: } 5,29308 \text{ [mm]}$$

$$\text{Krympningsintervall: } -5,29308 \begin{matrix} +5,29308 \\ -6,46932 \end{matrix} \text{ [mm]}$$

Krypning: deformation av permanent belastning

Regel:

Utbredd last q_{LSV} utgörs av egentyngd och nyttig last:

$$q_{LSV} = \begin{cases} \text{Egentyngd} = 31 \text{ kN/m} \\ \text{Nyttig last} = 23 \text{ kN/m} \end{cases} = 54 \text{ kN/m}$$

Total last Q_{LSV} :

$$Q_{LSV} = q_{LSV} \cdot L_{vägg} = 54 \cdot 3,41 = 184,14 \text{ kN}$$

Enligt ekvation (2.2.5a) räknas kraften på varje regel ut:

$$F_{regel} = \frac{Q_{LSV}}{n_{regel}} = \frac{184,14}{18} = 10,23 \text{ kN}$$

Enligt ekvation (2.2.5b) har tvärsnittsarean för reglarna räknats ut:

$$A_{220} = 220 \cdot 45 = 9900 \text{ mm}^2$$

Enligt ekvation (2.2.5c) har spänningen i reglarna räknats ut:

$$\sigma_{v,220} = \frac{10230}{9900} = 1,033 \text{ MPa}$$

Enligt ekvation (2.1.2b) räknas den reducerade elasticitetsmodulen för reglarna ut:

$$E_{0,mean,fin} = \frac{11 \cdot 10^9}{1 + 0,6} = 6,875 \text{ GPa}$$

Enligt ekvation (2.1.2c) räknas den slutgiltiga töjningen $\varepsilon_{fin,220}$ ut:

$$\varepsilon_{fin,220} = \frac{1,033}{6875} = 0,00015$$

Enligt ekvation (2.1.2.e) räknas den slutgiltiga deformationen $\delta_{fin,220}$ ut:

$$\delta_{fin,220} = 0,00015 \cdot 2616 = 0,3924 \text{ mm}$$

Syll:

Total last Q_{LSV} :

$$Q_{LSV} = q_{LSV} \cdot L_{v\u00e4gg} = 54 \cdot 3,41 = 184,14 \text{ kN}$$

Enligt ekvation (2.2.5a) räknas kraften p\u00e5 syllen ut:

$$F_{syll} = \frac{Q_{LSV}}{n_{syll}} = \frac{184,14}{2} = 92,07 \text{ kN}$$

Enligt ekvation (2.2.5b) har tv\u00e4rsnittsarean f\u00f6r syllen r\u00e4knats ut:

$$A_{syll} = 3410 \cdot 45 = 153450 \text{ mm}^2$$

Enligt ekvation (2.2.5c) har sp\u00e4nningen i syllen r\u00e4knats ut:

$$\sigma_{v,syll} = \frac{92070}{153450} = 0,6 \text{ MPa}$$

Enligt ekvation (2.1.2b) räknas den reducerade elasticitetsmodulen f\u00f6r syllen ut:

$$E_{90,mean,fin} = \frac{0,37 \cdot 10^9}{1 + 0,6} = 0,23125 \text{ GPa}$$

Enligt ekvation (2.1.2c) räknas den slutgiltiga töjningen $\varepsilon_{fin,syll}$ ut:

$$\varepsilon_{fin,syll} = \frac{0,6}{231,25} = 0,00259$$

Enligt ekvation (2.1.2.e) räknas den slutgiltiga deformationen $\delta_{fin,syll}$ ut:

$$\delta_{fin,syll} = 0,00259 \cdot 95 = 0,24648 \text{ mm}$$

Bjälklag LVL:

Total last Q_{LSV} :

$$Q_{LSV} = q_{LSV} \cdot L_{vägg} = 54 \cdot 3,41 = 184,14 \text{ kN}$$

Enligt ekvation (2.2.5a) räknas kraften på bjälklaget ut:

$$F_{bjälklag} = \frac{Q_{LSV}}{n_{bjälklag}} = \frac{184,14}{2} = 92,07 \text{ kN}$$

Enligt ekvation (2.2.5b) har tvärsnittsarean för bjälklaget räknats ut:

$$A_{bjälklag} = 3410 \cdot 45 = 153450 \text{ mm}^2$$

Enligt ekvation (2.2.5c) har spänningen i bjälklaget räknats ut:

$$\sigma_{v,bjälklag} = \frac{92070}{153450} = 0,6 \text{ MPa}$$

Enligt ekvation (2.1.2b) räknas den reducerade elasticitetsmodulen för bjälklaget ut:

$$E_{90,edge,mean,fin} = \frac{2,4 \cdot 10^9}{1 + 0,6} = 1,5 \text{ GPa}$$

Enligt ekvation (2.1.2c) räknas den slutgiltiga töjningen $\varepsilon_{fin,bjälklag}$ ut:

$$\varepsilon_{fin,bjälklag} = \frac{0,6}{1500} = 0,0004$$

Enligt ekvation (2.1.2.e) räknas den slutgiltiga deformationen $\delta_{fin,bjälklag}$ ut:

$$\delta_{fin,bjälklag} = 0,0004 \cdot 360 = 0,144 \text{ mm}$$

Total krypning: 2,39208 mm

Total vertikal deformation: krympning och permanent last

Enligt ekvation (2.1.2i) räknas den totala vertikala deformationen δ_{tot} ut:

$$\delta_{tot} = -7,68516 \begin{matrix} +5,29308 \\ -6,46932 \end{matrix} \text{ [mm]}$$

**INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK
OCH MARITIMA VETENSKAPER
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA**

Göteborg, Sverige 2025
www.chalmers.se



CHALMERS