

Massförlust och nedböjning av korslimmad träplatta för olika fuktscenarier

Modellering av KL-träplatta för beräkning av massförlust samt simulering över långtidsnedböjning med FEM

Kandidatarbete vid institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik

Angelica Andersson
Francisco Boudagh
Line Jensen

Gabriel Aronsson
Egil Hårding
Maja Lageson

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK

KANDIDATARBETE 2023

Massförlust och nedböjning av korslimmad träplatta för olika fuktscenarier

Modellering av KL-träplatta för beräkning av massförlust samt
simulering över långtidsnedböjning med FEM

Angelica Andersson
Gabriel Aronsson
Francisco Boudagh
Egil Hårding
Line Jensen
Maja Lageson



CHALMERS

Institutionen för Arkitektur och Teknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2023

Massförlust och nedböjning av korslimmad träplatta för olika fuktscenarier

Modellering av KL-träplatta för beräkning av massförlust samt simulering över långtidsnedböjning med FEM

ANGELICA ANDERSSON
GABRIEL ARONSSON
FRANCISCO BOUDAGH
EGIL HÅRDING
LINE JENSEN
MAJA LAGESON

© ANGELICA ANDERSSON, GABRIEL ARONSSON, FRANCISCO BOUDAGH,
EGIL HÅRDING, LINE JENSEN, MAJA LAGESON, 2023.

Handledare: Yutaka Goto, Chalmers, Byggnadsteknologi
Examinator: Alexander Hollberg, Chalmers, Byggnadsteknologi

Kandidatarbete 2023
Institutionen för Arkitektur och Teknik
Avdelningen för Byggnadsteknologi
ACEX11
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Omslagsbild: Nedböjning av en fritt upplagd KL-träplatta vilande på ett elastiskt underlag för olika fuktscenarier samt tre olika EPS densiteter.

Illustrationerna i arbetet är författarnas egna om inget annat anges.

Skriven i L^AT_EX
Göteborg, Sverige 2023

Sammanfattning

Byggsektorn i Sverige står i dagsläget för 21% av utsläppen av alla växthusgaser i landet. I en värld som är i drastiskt behov av en omställning till miljövänligt byggande behöver denna siffra minskas kraftigt, och byggföretag kan hjälpa till genom att hitta nya kreativa lösningar för att minska sina utsläpp. En möjlig lösning är att använda korslimmat trä (KL-trä) istället för betong i grunden till bostadshus. Om denna grund är pålitlig ur ett hållfasthets- och fuktbeständighetsperspektiv samt ekonomiskt förmånlig kan den i framtiden användas i en stor andel bostäder, vilket skulle bidra till ett mer hållbart bostadsbyggande.

Syftet med detta arbete är att undersöka lämpligheten hos en KL-träplatta som ersättning för betongplattan i grunden i ett enfamiljshus. Arbetet fokuserar på att utvärdera långtidseffekter såsom massförlust vid olika fuktscenarion och nedböjning av KL-träplattan över 100 år. Genom att undersöka dessa aspekter kan man avgöra om KL-träplattan är en lämplig ersättning för betongplattan i bostadsbyggande. I arbetet har ett godtyckligt enfamiljshus i Göteborg valts som referensmodell.

Under arbetets gång undersöktes fyra olika scenarion angående fukt, vilket var normala fuktbelastningar, ökad fuktproduktion inomhus samt globalt och lokalt vattenläckage. För att beräkna massförlusten vid dessa scenarion användes Glasermetoden med hjälp av programmet MS Excel. Nedböjningen av plattan räknades med hjälp av γ -metoden och Finita elementmetoden (FEM) i MATLAB. Reduceringen av styvheten i KL-träplattan togs fram genom att använda lösningen till Boltzmanns superpositionsintegral. Efter att dessa beräkningar var utförda undersöktes hur massförlusten påverkade nedböjningen av plattan. Nedböjningen av plattan beräknas för cellplast (EPS) med tre olika densiteter, vilka är 20 kg/m^3 , 25 kg/m^3 och 30 kg/m^3 .

Utfallet från arbetet visar att massförlusten blir 0% i plattan vid normala fuktbelastningar, ökad fuktproduktion inomhus och lokalt läckage under 1 vecka. Vid globalt vattenläckage och lokalt vattenläckage under 24 veckor uppgår den bestående massförlusten till 1.3% respektive 26.7%. Nedböjningen för de tre olika EPS densiteterna uppnår 1.3 mm, 1.8 mm och 2.3 mm. Resultaten från FEM visar att storleken på nedböjningen inte påverkas av styvhetsreduceringen. Däremot blir formen på nedböjningen mer komplex vid massförlust och reducering av plattans styvhet.

Sammanfattningsvis kan en korslimmad träplatta vara en lämplig lösning som grund till ett bostadshus, under förutsättning att man är medveten om de potentiella riskerna med fuktrelaterade problem och vidtar lämpliga åtgärder för att hantera dessa. En välplanerad och dimensionerad grund i korslimmat trä kan bidra till att skapa en hållbar och långsiktig lösning för ett enfamiljshus.

Sökord: Biologisk nedbrytning, FEM, Fukt, Fysikalisk nedbrytning, Korslimmat trä, Massförlust, Glasermetoden, Modellerling, Nedböjning, Fuktscenarion.

Abstract

Currently, the construction sector in Sweden is responsible for 21% of all greenhouse gas emissions in the country. In a world in desperate need of a transition to environmentally friendly building, this number needs to be significantly reduced, and construction companies can help by finding new creative solutions to reduce their emissions. One possible solution is to use cross-laminated timber (CLT) instead of concrete in the foundation of residential buildings. If this foundation is reliable from a strength, and moisture resistance perspective and economically advantageous, it could be used in a large proportion of homes in the future, contributing to more sustainable housing construction.

The purpose of this work is to investigate the suitability of a CLT (cross-laminated timber) slab as a replacement for the concrete slab in the foundation of a single-family house. The work focuses on evaluating long-term effects such as mass loss under different moisture scenarios and deflection of the CLT slab over 100 years. By examining these aspects, it can be determined if the CLT slab is a suitable replacement for the concrete slab in residential construction. An arbitrary single-family house in Gothenburg was chosen as the reference model in this work.

During the course of the work, four different scenarios regarding moisture were investigated, which were normal moisture loads, global water leakage, increased indoor moisture production, and local water leakage. The Glaser method was used with the help of the MS Excel program to calculate the mass loss under these scenarios. The deflection of the slab was calculated using the γ -method and Finite Element Method (FEM) in MATLAB. The reduction in the stiffness of the CLT slab was determined by using the solution to Boltzmann's superposition integral. After these calculations were performed, the study examined how the mass loss affected the deflection of the slab. The deflection was calculated for expanded polystyrene (EPS) with three different densities, which were 20 kg/m^3 , 25 kg/m^3 , and 30 kg/m^3 .

The outcome of the work shows that the mass loss in the slab is 0% under normal moisture loads, increased indoor moisture production, and local leakage for 1 week. In the case of global water leakage and local water leakage for 24 weeks, the remaining mass loss is 1.3% and 26.7%, respectively. The deflection for the three different EPS densities reaches 1.3 mm, 1.8 mm, and 2.3 mm. The results from FEM show that the size of the deflection is not affected by the stiffness reduction. However, the shape of the deflection becomes more complex with mass loss and a reduction in the slab's stiffness.

In conclusion, a cross-laminated timber slab can be a suitable solution as a foundation for a residential building, provided that the potential risks of moisture-related problems are recognized, and appropriate measures are taken to address them. A well-planned and dimensioned CLT foundation can help create a sustainable and long-term solution for a single-family home.

Förord

Denna rapport utgör en del av civilingenjörsprogrammet i Samhällsbyggnadsteknik vid Chalmers tekniska högskola och motsvarar 15 högskolepoäng. Vi har upplevt att arbetet har varit både lärorikt och givande och vi hoppas att den kunskap vi har förvärvat på vägen kommer att vara till nytta i framtiden.

Vi vill ta tillfället i akt att uttrycka vår tacksamhet till vår handledare Yutaka Goto och vår examinator Alexander Hollberg, för att de tog sig an detta kandidatarbete.

Yutaka har varit en engagerad och kunnig handledare. Vi uppskattar de många stimulerande diskussioner och idéutbyten vi har haft. Yutaka har utmanat oss att tänka kritiskt och kreativt, vilket har bidragit till en djupare analys av ämnet. Hans förmåga att guida oss genom komplexa problem och erbjuda insiktsfulla perspektiv har verkligen varit ovärderlig.

Göteborg, Maj 2023

Angelica Andersson, Gabriel Aronsson, Francisco Boudagh, Egil Hårding, Line Jensen & Maja Lageson

Akronymer

Nedan följer en lista av de akronymer som har använts i denna rapport i alfabetisk ordning:

BBR	Boverkets byggregler
CNC	Engelska: Computer Numerical Control
EC	Eurocode
EPS	Expanderad polystyren
FEM	Finita elementmetoden
KL-trä (CLT)	Korslimmat trä (engelska: Cross Laminated Timber)
ML	Massförlust (engelska: Mass loss)
MVOC	Mikrobiella volatila organiska ämnen (engelska: Microbial Volatile Organic Compounds)
PE	Polyeten
RF	Relativ fuktighet
RISE	Research Institutes of Sweden
SMHI	Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut
TCC	Engelska: Timber-Concrete Composites
UV	Ultraviolett strålning

Innehåll

Akronymer	viii
Nomenklatur	ix
Figurer	xii
Tabeller	xv
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	2
1.3 Problemformulering	3
1.4 Övergripande metod	3
1.4.1 Val av beräkningsmodeller	3
1.5 Avgränsningar	4
2 Teori	5
2.1 Massiva trärelement	5
2.2 Tidigare forskning	5
2.3 Uppbyggnad och egenskaper av KL-trä	7
2.3.1 Fuktegenskaper	9
2.3.2 Fukttransportmekanismer	10
2.3.3 Termiska egenskaper	12
2.4 Glasermetoden	12
2.5 Fuktkällor	13
2.5.1 Nederbörd	13
2.5.2 Luftfukt	14
2.5.3 Byggfukt	14
2.5.4 Markfukt	15
2.5.5 Vattenläckage	15
2.6 Biologisk nedbrytning	15
2.6.1 Missfärgande svampar	16
2.6.2 Rötsvampar	16
2.7 Matematisk modell för nedbrytning	17
2.7.1 Modellen för massförlust	17
2.8 Fysikalisk nedbrytning	19
2.8.1 Långtidseffekter	19

2.8.1.1	Boltzmanns superpositionsintegral	20
2.8.1.2	Materialparametrar för reducering av styvhet	21
2.8.2	Effektiv böjstyvhet enligt γ -metoden	21
2.8.3	Finita Elementmetoden för beräkning av nedböjning	23
2.8.3.1	Definiering av materialparametrar, laster, geometri och randvillkor	23
2.8.3.2	Styvhetmatriser och lastvektorer	24
2.8.3.3	Beräkning av elementvis nedböjning	25
3	Metod	26
3.1	Design	26
3.1.1	Designkrav - Eurokod och BBR	26
3.1.2	Design av enfamiljshus	26
3.1.3	Design av KL-träplatta	27
3.1.4	Anslutningar mellan element	28
3.1.5	Grunddesign	29
3.2	Laster	30
3.3	Mekanisk modell	30
3.4	Beräkning av massförlust	31
3.4.1	Scenario 1: Normal fuktbelastning	32
3.4.2	Scenario 2: Ökad fuktproduktion inomhus	32
3.4.3	Scenario 3: Globalt vattenläckage	32
3.4.4	Scenario 4: Lokalt vattenläckage	33
3.4.5	Generell beräkningsgång för redovisade scenarier	33
3.5	Långtidssimulering av nedböjning	34
3.5.1	Beaktning av massförlust	34
3.5.2	Modellering med FEM	35
4	Resultat	37
4.1	Massförlust av KL-träplattan	37
4.1.1	Scenario 1: Normal fuktbelastning	37
4.1.2	Scenario 2: Ökad fuktproduktion inomhus	38
4.1.3	Scenario 3: Globalt vattenläckage	39
4.1.4	Scenario 4: Lokalt vattenläckage	40
4.2	Styvhetsreducering	44
4.3	Nedböjning	45
4.3.1	Nedböjning vid olika EPS	45
4.3.2	Initiell nedböjning	46
4.3.3	Nedböjning efter 100 år	47
5	Diskussion och slutsats	48
5.1	Utvärdering av resultat	48
5.2	Förslag på eventuella åtgärder	50
5.3	Utvärdering av teoretiska modeller	51
5.4	Bedömning av KL-träplattans lämplighet	52
5.5	Förslag för framtida arbeten	53

A Bilagor	I
A.1 Nomenklatur	I
A.2 Glasermetoden	III
A.3 Temperatur- och ånghaltsfördelning	V
A.4 Beräkning med Glasermetoden	VI
A.5 Indata för temperatur och relativ fuktighet (SMHI)	VII
A.6 Beräknad markttemperatur	VII
A.7 Beräknad inomhustemperatur	VIII
A.8 Beräknad ånghalt inomhus samt i marken	IX
A.9 Indata för temperatur och relativ fuktighet vid normala fuktbelastningar	IX
A.10 Indata för temperatur och relativ fuktighet vid ökad fuktproduktion inomhus	X
A.11 Indata för temperatur och relativ fuktighet vid globalt läckage	X
A.12 Indata för temperatur och relativ fuktighet vid lokalt läckage som pågår under 1 vecka	XI
A.13 Indata för temperatur och relativ fuktighet vid lokalt läckage som pågår under 4 veckor	XII
A.14 Indata för temperatur och relativ fuktighet vid lokalt läckage som pågår under 12 veckor	XIII
A.15 Indata för temperatur och relativ fuktighet vid lokalt läckage som pågår under 24 veckor	XIV
A.16 Styvhetsreducering & γ -metod (MATLAB skript)	XIV
A.17 Nedböjning (EPS-beroende) enligt FEM (MATLAB skript)	XVI
A.18 Nedböjning, initiell (styvhetsberoende) enligt FEM (MATLAB skript)	XIX
A.19 Nedböjning, efter 100 år (styvhetsberoende) enligt FEM (MATLAB skript)	XXV
A.20 Referensbyggnad	XXX
A.21 Lastberäkningar	XXXIV

Figurer

2.1	Korslimmad skiva med tre lameller, respektive fem lameller. Visar hur lamellerna är placerade korsvist gentemot varandras fiberriktning. Fotograferad av Oregon Forest Resources Institute. Licensierad under CC BY 2.0. Omarbetad.	8
2.2	Fingerskarvning. Fotograferad av Dirk Bartens. Licensierad under CC BY 3.0. Omarbetad.	9
2.3	Bild över sorptionskurva för diverse träslag. Övre kurvan visar träets fuktkvot vid desorption och nedre kurvan visar träets fuktkvot vid adsorption. Bild hämtad från (Svenskt Trä, 2017a).	10
2.4	Fukttranssporthastighet i träets respektive riktningar, bild hämtad från (Svenskt Trä, 2017b).	12
2.5	Illustration av ett tvärsnitt över en KL-träskiva bestående av fem lager, med numrering för att passa γ -metodens konvention.	22
2.6	Illustration över en FEM 2D-modell för en balk med tre frihetsgrader i varje nod och N element. Representativ modell.	23
3.1	KLT-grunden till ett enfamiljshus bestående av fem element med förstärkning underifrån på kanterna.	27
3.2	Vänster: Grund i KL-trä bestående av fem element med planlösning. Höger: Det mittersta KL-trä elementet markerat i rött.	27
3.3	Illustration av tvärsnittet för KL-träplattan, bestående av fem lager.	28
3.4	Den valda typen av anslutning. Figur av (Loss m. fl., 2018). Licensierad under CC BY-NC-ND 4.0.	28
3.5	Tvärsnitt över grunden med KL-träplattan och EPS skivor.	29
3.6	Mekanisk modell över KL-träelement med tre olika utbredda laster och en punktlast. I denna modell betraktas fundamentet som en fritt upplagd balk på ett fjädrande upplag.	31
3.7	Tvärsnitt över grunden med utsatt nod.	32
3.8	Vy över KL-träplattan. Ljusorange: balkelementet som analyseras med Finita elementmetoden. Ljusblå: yta som utsätts för lokalt vattenläckage.	36
4.1	Modellerad aktiveringsprocess för rötsvampar och massförlust av KL-träplattan vid normala fuktbelastningar. Baserad på den beräknade indatan i bilaga A.9 och redovisas timme för timme under en tidsperiod på fyra år.	38

4.2	Modellerad aktiveringsprocess för rötsvampar, α , och massförlust av KL-träplattan vid ökad fuktproduktion inomhus. Baserad på den beräknade indatan i bilaga A.10 och redovisas timme för timme under en tidsperiod på fyra år.	39
4.3	Modellerad aktiveringsprocess för rötsvampar och massförlust av KL-träplattan vid globalt vattenläckage. Baserad på den beräknade indatan i bilaga A.11 och redovisas timme för timme under en tidsperiod på fyra år.	39
4.4	Modellerad aktiveringsprocess för rötsvampar och massförlust av KL-träplattan där plattan utsätts för lokalt vattenläckage under 1 vecka. Baserad på den beräknade indatan i bilaga A.12 och redovisas timme för timme under en tidsperiod på fyra år.	40
4.5	Modellerad aktiveringsprocess för rötsvampar och massförlust av KL-träplattan där plattan utsätts för lokalt vattenläckage under 4 veckor. Baserad på den beräknade indatan i bilaga A.13 och redovisas timme för timme under en tidsperiod på fyra år.	41
4.6	Modellerad aktiveringsprocess för rötsvampar och massförlust av KL-träplattan där plattan utsätts för lokalt vattenläckage under 12 veckor. Baserad på den beräknade indatan i bilaga A.14 och redovisas timme för timme under en tidsperiod på fyra år.	41
4.7	Modellerad aktiveringsprocess för rötsvampar och massförlusten av KL-träplattan där plattan utsätts för lokalt vattenläckage under 24 veckor. Baserad på den beräknade indatan i bilaga A.15 och redovisas timme för timme under en tidsperiod på fyra år.	42
4.8	Massförlust av KL-träplattan då den utsätts för lokalt läckage i 1, 4, 12 och 24 veckor. Baserad på den beräknade indatan i bilaga A.12 - A.15 och redovisas timme för timme under en tidsperiod på ett år. . .	43
4.9	Reducering av effektiv böjstyvhet för en frisk platta och fem olika fuktscenarier över en period på 100 år.	44
4.10	Initiell nedböjning av KL-träplattans mittsektion för tre olika EPS-densiteter. Denna nedböjning avser en frisk platta.	45
4.11	Initiell nedböjning av KL-träplattans mittsektion med EPS av densitet $\rho = 30 \text{ kg/m}^3$. Denna nedböjning avser en frisk platta och olika fuktscenarier.	46
4.12	Nedböjning efter 100 år av KL-träplattans mittsektion med EPS av densitet $\rho = 30 \text{ kg/m}^3$. Denna nedböjning avser en frisk platta och olika fuktscenarier.	47
A.1	Visualisering av temperatur- och ånghaltsfördelningen genom grunden. Noder är placerade där beräkningar med Glasermetoden har gjorts. V	
A.2	Indata för beräkningar, hämtad från SMHI och valts att presentera som en graf.	VII
A.3	Beräknad marktemperatur enligt ekvation A.7.	VII
A.4	Beräknad inomhustemperatur.	VIII
A.5	Beräknad ånghalt inomhus samt i marken. Beräkningarna utfördes med Glasermetoden.	IX

A.6	Indata för beräkningar. Beräknad med Glasermetoden i det översta skiktet i KL-träplattan, då plattan utsätts för normala fuktbelastningar.	IX
A.7	Indata för beräkningar. Beräknad med Glasermetoden i det översta skiktet i KL-träplattan, då plattan utsätts för ökad fuktproduktion inomhus.	X
A.8	Indata för beräkningar. Beräknad med Glasermetoden i det översta skiktet i KL-träplattan, då plattan utsätts för globalt läckage.	X
A.9	Indata för beräkningar. Beräknad med Glasermetoden i det översta skiktet i KL-träplattan, då plattan utsätts för lokalt läckage som pågår under 1 vecka.	XI
A.10	Indata för beräkningar. Beräknad med Glasermetoden i det översta skiktet i KL-träplattan, då plattan utsätts för lokalt läckage som pågår under 4 veckor.	XII
A.11	Indata för beräkningar. Beräknad med Glasermetoden i det översta skiktet i KL-träplattan, då plattan utsätts för lokalt läckage som pågår under 12 veckor.	XIII
A.12	Indata för beräkningar. Beräknad med Glasermetoden i det översta skiktet i KL-träplattan, då plattan utsätts för lokalt läckage som pågår under 24 veckor.	XIV
A.13	Vy: framsida.	XXX
A.14	Vy: baksida.	XXX
A.15	Vy: högersida.	XXXI
A.16	Vy: vänstersida.	XXXI
A.17	Vy: översidan av huset.	XXXII
A.18	Vy: undersida av huset.	XXXIII
A.19	Lastberäkningar.	XXXIV

Tabeller

2.1	Representativ tabell över Glasermetoden.	13
2.5	Tabell över materialparametrar för träslaget gran med en densitet på $\rho = 450 \text{ kg/m}^3$ från Eitelberger m. fl. (2012)	21
3.1	Tabell över laster som KL-träplattan utsätts för i ett bostadshus. . .	30
4.1	Böjstyvhet för frisk platta och alla undersökta fuktscenarier för år 0, 10 och 100. Observera att styvheten presenteras i enheten $[\text{MNm}^2]$. . .	44
A.1	Glasermetoden i tabellform.	III
A.3	Glasermetoden i tabellform.	VI

1

Inledning

I detta avsnitt presenteras bakgrunden till hur idén till arbetet uppkom och en introduktion ges till korslimmat trä och dess användningsområden, samt tekniken bakom. Vidare redovisas syftet, problemformuleringen, den övergripande metoden och de avgränsningar som har gjorts för arbetet.

1.1 Bakgrund

Idén till arbetet uppstod när Deromes hållbarhetschef, Anders Carlsson, presenterade ett projekt som Derome genomfört tillsammans med Research Institutes of Sweden (RISE). Projektet innefattade en jämförelse mellan en trägrundplatta i korslimmat trä (KL-trä) och en klassisk betongplatta med avseende på koldioxidutsläpp. Samarbetet resulterade i att Derome byggde ett pilotprojekt med namnet "Klivet", vilket är ett energieffektivt hus med en grund i KL-trä. Detta ämne är högst relevant eftersom det finns ett behov av nya åtgärder och innovativa idéer för att nå visionen om ett klimatneutralt samhälle.

En grundplatta tillverkad av korslimmat trä har lägre koldioxidavtryck än den konventionella betongplattan eftersom trä är en förnybar resurs som tar upp koldioxid under sin tillväxt, till skillnad från betongproduktionen som släpper ut stora mängder koldioxid (A. Gustafsson, 2019). Tekniken med trägrundplatta anses vara innovativ eftersom man använder ett byggnadsmaterial som både är lätt och starkt samtidigt som det har goda isoleringsförmågor. KL-träplattan är dessutom fördelaktig tack vare sin tillverkningsprocess som kan ske i fabrik under kontrollerade förhållanden. Detta gör det möjligt att förbereda elementen i god tid innan ett byggprojekt och således undvika fördröjningar och oplanerade händelser som eventuellt kan uppstå om man använder den konventionella betonggrundplattan. Betongfundament måste gjutas på plats och det är ofta svårt att kontrollera den exakta tiden och hastigheten på härdningen, vilket kan leda till ojämna belastningar och kvalitetsproblem.

KL-trä introducerades först i Centraleuropa och precis som med många framväxande tekniker utvecklades det under flera årtionden. Under mitten av 1970-talet implementerades tekniken för första gången i ett pilotprojekt i Tyskland (Brandner, 2013). År 1985 patenterades tekniken som byggelement för allmänt bruk i Frankrike. Senare, på mitten av 1990-talet användes KL-trä i ett byggprojekt för första

gången i Schweiz samt Tyskland och det första flerbostadshuset av KL-trä byggdes i Österrike år 1998.

Österrike var en av de främsta pionjärerna i branschen när det gällde tillverkning och användning av KL-trä under 1990-talet (A. Gustafsson, 2017). Vidare så ökade först intresset i Sverige för KL-trä när det år 1994 återigen blev tillåtet att bygga höga hus i trä. Det första stora projektet i Sverige stod klart år 2006 och det var den Inre Hamnen i Sundsvall. Efter detta har etableringen av KL-trä ökat hastigt och man satsade redan 2017 mycket på utvecklingen och forskningen av byggnadsmaterialet. Det var även vid denna tid som större delar av byggsektorn började inse att generellt byggande i trä hade stor potential, vilket också gjorde att efterfrågan av KL-trä ökade.

Forskning på korslimmat trä i byggnader har länge varit ett fokusområde för att utveckla tillverknings- och monterings tekniker, samt för att undersöka dess prestanda i olika byggprojekt. Tidigare studier har utforskat koldioxidavtryck, fuktproblem, tekniska frågor som brand- och värmesäkerhet samt styrka och akustik. Under senare år har användningen av KL-trä ökat inom olika byggområden, inklusive bostäder, kontorsbyggnader och skolor. Även om tekniken har visat sig ha goda prestandaegenskaper och en låg miljöpåverkan i jämförelse med traditionella byggmaterial, är det viktigt att fortsätta undersöka dess konkurrenskraft i förhållande till andra byggtekniker.

Trots sina framsteg vidhäftas KL-trä med en rad utmaningar vid tillämpningen och en av de största utmaningarna är den begränsade tillgången på råvaror. Det kräver en stor mängd trä för att tillverka korslimmat trä, och i vissa områden är det svårt att få tillgång till den kvalitet och mängd trä som krävs. En annan utmaning är att övertyga byggbranschen och beslutsfattare om att investera i nya och innovativa tekniker. KL-träplattan är fortfarande ett nytt koncept för många, och det kan vara svårt att få stöd och investeringar för att utveckla tekniken. Vidare är forskningen av bruksstadiet för en KL-träplatta bristfällig. Därmed saknas studier och experimentell data som undersöker eventuella problem som kan uppkomma under användningsfasen.

1.2 Syfte

Syftet med kandidatarbetet var att undersöka hur en träbaserad grundplatta kan påverkas av nedbrytningsprocesser i bruksstadiet. Detta för att öka kunskapen inom området. Studien fokuserade på den mekaniska nedbrytningen som kan uppstå på grund av fuktbetingade rörelser och långtidseffekter, samt risken för biologisk nedbrytning på grund av de termiska och fuktrelaterade förhållanden som kan råda i grunden. En annan målsättning var att öka förståelsen av KL-trä som material för grundplattor, och dess byggnadsfysikaliska egenskaper. Slutligen, skulle studien bedöma en KL-träplattas lämplighet som grund samt vilka åtgärder som kan vara lämpliga att vidta om fuktskador skulle uppstå.

1.3 Problemformulering

Arbetet kommer att undersöka storleken av nedböjning och massförlust i en KL-träplatta. För ändamålet valdes ett referenshus, vilket är ett enfamiljshus beläget i Göteborg. För att kunna utföra undersökningarna som beskrivs i syftet behöver ett flertal problem redas ut. Dessa är följande:

- Utformning av KL-träplattan.
- Definition av laster.
- Beräkning av massförlust vid olika fuktscenarion, med hjälp av Glasermetoden samt modellen för massförlust.
- Beräkning av långtidsnedböjning av KL-träplattan med hjälp av Finita elementmetoden.
- Visualisering av resultaten med hjälp av grafer.

När dessa uppgifter är utredda ska resultaten av massförlustberäkningarna användas för att analysera hur dem påverkar långtidsnedböjningen. Dessa resultat ska undersökas för en KL-träplatta under 100 år. Valet av denna tidsram grundar sig på flera faktorer. För det första är det viktigt att bedöma hållbarheten och livslängden för en KL-träplatta över en längre period, för att avgöra om den verkligen uppfyller förväntningarna som byggmaterial och fundament. Dessutom är 100 år en lämplig ålder att undersöka, särskilt med tanke på byggnaders livslängd. Många hus är utformade för att vara beständiga under en lång tid, och att utvärdera KL-träplattan under en period på 100 år ger möjligheten att bedöma dess prestanda och eventuell nedbrytning över en liknande tidsram.

1.4 Övergripande metod

För att uppnå syftet med kandidatarbetet användes metoder som inkluderade litteraturstudier och beräkningar. En omfattande undersökning av befintlig forskning inom området genomfördes, och denna information användes för att nyttja befintliga modeller och utveckla egna beräkningsmodeller. Därefter tillämpades dessa modeller för att med hjälp av verklig data analysera en KL-träplatta och bedöma dess lämplighet.

1.4.1 Val av beräkningsmodeller

För projektering av fukt- och temperaturförloppet i KL-träplattan valdes Glasermetoden som lämplig beräkningsmodell. Glasermetoden är passande för detta arbete då den ger en god översiktlig bild över rådande mikroklimat i plattan samtidigt som beräkningsgången kan följas på ett lätt och systematiskt sätt. Andra beräkningsmodeller vars tillämpbarhet utvärderades inkluderade *Wärme Und Feuchte Instationär* (WUFI), ett avancerat fuktberäkningsverktyg som tillåter att under icke-stationära fukt- och temperaturförhållanden dynamiskt simulera värme- och fuktförlopp genom en konstruktion. Denna modell ansågs dock inte vara praktiskt applicerbar då

expertis avseende programmets beräkningsmetodik saknades för arbetet.

Vidare valdes en modell av Viitanen m. fl. (2010) för att beräkna massförlusten som sker vid biologisk nedbrytning av träplattan. Denna massförlust beaktades sedan i nedböjningsberäkningen för att undersöka dess påverkan. För att beräkna nedböjningen användes Finita Elementmetoden (FEM) istället för att använda de analytiska lösningarna till Euler-Bernoullis balkekvation (för en balk på ett elastiskt underlag) som är mycket komplexa. Fördelen med att använda FEM är att den ger mycket hög precision av resultatet när ett mycket litet meshnät används eftersom FEM-lösningen konvergerar mot den exakta lösningen. Samtidigt är FEM en väldigt flexibel metod - vilket gör att randvillkoren och modellen enkelt kan anpassas vid behov. Detta skiljer sig från Euler-Bernoullis ekvation, där en ändring av randvillkoren eller modellen kräver att ekvationen löses på nytt.

1.5 Avgränsningar

I arbetet kommer fokus att ligga på att undersöka byggnadsfysikaliska egenskaper hos en specifik KL-träplatta under bruksstadiet. Särskild uppmärksamhet kommer att ägnas åt nedbrytning av trä på grund av rötsvampsangrepp, långtidsdeformation samt termisk- och fuktvariation. Trots detta finns det vissa avgränsningar som bör nämnas.

Först och främst kommer arbetet inte att behandla akustiska egenskaper eller brand-säkerhet relaterade till KL-träplattan. Dessutom kommer det inte att genomföras någon jämförelse mellan olika typer av KL-träplattor eller andra typer av konventionella fundament. Det är också viktigt att notera att arbetet inte kommer att beakta momentkapacitet och tvärkraftskapacitet hos KL-träplattan. Dessutom har endast en geometri för KL-träplattan undersökts, vilket innebär att andra geometrier inte kommer att behandlas inom ramen för denna studie.

En annan avgränsning är att arbetet fokuserar på beräkningar av biologisk nedbrytning från rötsvampar och deras påverkan på KL-träplattan. Andra former av biologisk nedbrytning eller skador som orsakas av olika organismer kommer inte att beräknas i denna rapport. Slutligen bör det noteras att klimatdata från endast ett år i Göteborg har använts i analysen. Denna begränsning kan påverka generaliseringen av resultaten till andra geografiska områden, klimatzoner eller framtida klimatpåverkan.

2

Teori

I detta avsnitt presenteras information och teori som inhämtats från litteraturstudier, bland annat fakta om massiva trärelement, uppbyggnad och egenskaper av korslimmat trä, samt biologisk och fysikalisk nedbrytning. Vidare redovisas befintlig forskning inom området samt valda beräkningsmodeller.

2.1 Massiva trärelement

Massiva trärelement används ofta i byggnadskonstruktioner som en del av tak, väggar och golv. Dessa element är tillverkade genom att sammanfoga flera tunnare träbitar till större och starkare massiva block (Svenskt Trä, 2017c). Massiva trärelement är populära på grund av sina estetiska och miljömässiga fördelar. De ger en naturlig och varm känsla till byggnader och är tillverkade av ett förnybart material som är biologiskt nedbrytbart och återvinningsbart.

Vidare kan massiva trärelement erbjuda en hög hållfasthet och stabilitet, vilket gör dem lämpliga för att stödja tunga laster och för att motstå yttre påfrestningar (A. Gustafsson, 2017). Elementen kan också erbjuda goda isoleringsegenskaper, vilket kan hjälpa till att minska energiförbrukningen i byggnader. Dessutom kan massiva trärelement tillverkas i olika former och storlekar för att passa olika arkitektoniska behov, vilket ger designers och arkitekter större flexibilitet i deras designkoncept. Enligt Svenskt Trä används olika metoder för att tillverka massiva trärelement (Svenskt Trä, 2017c). Dessa är spikade element, element ihopsatta av dymlingar, förspända plattelement och korslimmade element.

I kommande avsnitt introduceras korslimmade element, även känt som korslimmat trä, samt då korslimmade element används som grundplatta, som är den typ av massivt trärelement som kommer att studeras i arbetet.

2.2 Tidigare forskning

Tidigare studier utförda på grundplattor tillverkade av massiva trärelement visar att konstruktionen uppfyller de tekniska- samt miljöspecifikationer som förväntas av en generell grundplatta. En studie har utförts inom det strategiska innovationsprogrammet BioInnovation, en gemensam satsning av Vinnova, Formas och Energimyndigheten (A. Gustafsson, 2019) där projektledaren var Anders Gustafsson från Research Institutes of Sweden (RISE). Syftet var att undersöka om en massiv träplatta kan

konkurrera med den konventionella betongplattan med avseende på miljöpåverkan och nedan redovisas några av de resultat som erhöles:

- Enligt beräkningar kan man i dagsläget bygga 3-4 våningshus, förutsatt att rätt isolering väljs.
- Enligt de mätningar som gjordes uppkommer inga fuktskador i träplattan, med förutsättning att grunden utföres på rätt sätt. Notera att mätningarna gjordes under 6 månader samt att dessa var utförda på en träplatta av spikade element till skillnad från vad som undersöks i denna studie.
- KL-trä är den mest tillgängliga lösningen av massiva trärelement då det finns stort utbud av tillverkare.

Det finns ett flertal studier som påvisar samma eller liknande resultat. Ett masterarbete som skrevs av Karl Kaj Gustafsson vid Umeå Universitet gjorde en fallstudie med avseende på fuktegenskaper samt projekteringsmöjligheterna för en grundplatta på mark av KL-trä (K. K. Gustafsson, 2020). Studien använde sig av fuktberäkningsverktyget WUFI. Resultaten av fallstudien visar att denna typ av platta är lämplig för husbyggnation med avseende på fuktperspektivet när det gäller kända potentiella fuktbelastningar, samt att den är konkurrenskraftig jämfört med den konventionella betongplattan.

Ett annat masterarbete, från Lunds Universitet undersökte fuktsäkerheten samt klimatpåverkan hos en platta på mark av korslimmat trä (Baric & Johansson, 2022). Även detta arbete utförde beräkningar med WUFI. Resultaten från masterarbetet visar att en platta av KL-trä, om den byggs på rätt sätt, uppfyller fuktkraven vid normala belastningar. Denna studie gav även förslag på hur vidare studier kan utformas enligt följande: Notera att enbart rekommendationer som är relevanta för detta arbete redovisas.

- Studier som undersöker säkerheten med avseende på fuktbelastningar under mitten av konstruktionen, vid eventuell grundbalk.
- Undersökningar med avseende på fuktbelastningar inifrån, som exempelvis under våtrum.

Vidare föreslår studien av Baric och Johansson (2022) att det skulle vara givande att utföra beräkningar utan det fuktskyddsmembran som används ovanpå KL-träplattan. Fuktskyddsmembranet som skyddar plattan från fukt under transport, montering och byggtid, antogs i studien vara kvar efter det att byggnaden färdigställdes. Även om fuktskyddet kan agera som ångbroms vid höga fuktbelastningar inifrån så hindrar den samtidigt KL-träplattans förmåga att torka ut.

Angående nedböjningen av en KL-träplatta har en studie genomförts av avdelningen för byggnadsteknologi på Linnéuniversitetet i Växjö. Studien undersökte hur mycket nedböjning en KL-träplatta erhåller på grund av långvariga laster jämfört med en *Timber Concrete Composite* (TCC-platta) (Binder m. fl., 2022). En TCC-platta är en platta bestående av en KL-träplatta med ett pågjutet betonglager. Detta gör-

des med hjälp av den så kallade γ -metoden, se kapitel 2.8.2. Studien använde ett referenselement för golv med längden 5 m och tjockleken 160 mm, med 5 lager av lameller. Studien redovisade följande:

- Boltzmanns superpositionsintegral 2.8.1.1 behöver lösas för att kunna beräkna styvheten i plattan.
- Den undersökta KL-träplattan har en lägre styvhet än TCC-plattan. Dock är den procentuella minskningen av styvheten mindre hos KL-träplattan än TCC-plattan över tid.

Vidare har ett masterarbete gjorts av Caroline Johansson och Erik Johansson på Chalmers tekniska högskola som analyserar KL-trä som delvis ensamstående element och delvis som en del av ett tio våningshus (Johansson & Johansson, 2021). Gruppen undersökte ett referenshus som skapades i programmet RFEM för att efterlikna ett verkligt tio våningshus. Denna rapport utvärderade de mekaniska egenskaperna hos KL-trä, anslutningar mellan KL-träelement, modellering av elementen med avseende på böjstyvhet, skjuvstyvhet m.m, och deformationer på modellerna. Arbetet gav även förslag på ytterligare studier som kan bedrivas angående användandet av KL-trä i byggnader:

- Verifiering av resultat med hjälp av experiment.
- Undersökningar med avseende på utrymmet mellan anslutningar hos KL-träelement, och hur det påverkar deformationer hos elementen.
- Undersökningar av den effektiva styvheten hos KL-träelement.
- Undersökningar av icke-linjäritet i materialet för att bättre förstå dess beteende.

2.3 Uppbyggnad och egenskaper av KL-trä

Korslimmat trä har fått sitt namn från att byggnadsmaterialet är uppbyggt av korsvist limmade träbrädor (A. Gustafsson, 2017). I folkmun hör man även KL-trä benämnas som massivträ, CLT, cross laminated timber, crosslam, X-Lam samt BSP. Korslimmat trä är vanligtvis uppbyggt av barrträ eller lövträ, oftast gran- eller furuträ. Elementen är uppbyggda av minst tre skikt där trälamellerna är ihoplimmade med högpresterande polyuretanlim och placeras med dess fiberriktning i en annan riktning än de intilliggande lagren, se Figur 2.1 nedan. Detta gör att de olika lagren kan arbeta tillsammans för att skapa en mycket stabil och hållbar konstruktion. För att producera önskad tjocklek och dimension skapas korslimmade element genom att stapla flera lager av limmade plankor på varandra och pressa dem samman under högt tryck och hög värme. Lamellerna har en tjocklek mellan 20 mm och 60 mm där olika skikt i KL-elementet kan ha olika tjocklek. Materialet är hållfasthets sorterat enligt standarden SS-EN 14081-1.



Figur 2.1: Korslimmad skiva med tre lameller, respektive fem lameller. Visar hur lamellerna är placerade korsvist gentemot varandras fiberriktning. Fotograferad av Oregon Forest Resources Institute. Licensierad under CC BY 2.0. Omarbetad.

Träet levereras från sågverket med en fuktkvot på 8-15% beroende på vilket lim som används och vad produkten ska användas till (A. Gustafsson, 2017). Fuktkvoten hos intilliggande brädor får inte variera med mer än cirka 5% för att uppnå optimal bindning och minimera eventuell sprickbildning. Vanligtvis konstrueras tvärsnittet hos KL-trä med brädor som har samma hållfasthetsklass i huvudbärriktningen. För att optimera utnyttjandet av virkets styrka brukar man använda högre hållfasthetsklasser för ytskikten i tvärsnittet och för brädorna som belastas mest i skivans huvudbärriktning.

Tillverkningsprocessen innefattar först fingerskarvning av brädorna, se Figur 2.2 nedan. Därefter hyvlas de platta sidorna så att de senare ska kunna limmas samman för att bilda stora skivor. Skivorna pressas sedan och därefter bearbetas komponenterna i en CNC-maskin. Maskinen sågar då till kanter och gör urfräsningar för eventuella installationer. Borrning av hål och bearbetning för förband utförs även av CNC-maskinen. Slutligen sker en visuell inspektion och därefter förpackas komponenterna för transport. Ytterligare bearbetning för att skapa väggelement utförs senare av väggelementtillverkare (A. Gustafsson, 2017).



Figur 2.2: Fingerskarvning. Fotograferad av Dirk Bartens. Licensierad under CC BY 3.0. Omarbetad.

Genom att korsvist limma ihop träelementen motverkar lamellerna träets anisotropa egenskaper i drag och tryck, både vinkelrätt och parallellt dess fibrer, men denna process gör dock inte korslimmat trä till ett homogent material (A. Gustafsson, 2017). Vidare skall KL-trä vid projektering fortfarande klassas som ett ortotropt skivmaterial med olika egenskaper i olika riktningar. Listan nedan beskriver egenskapsprofilen för KL-trä.

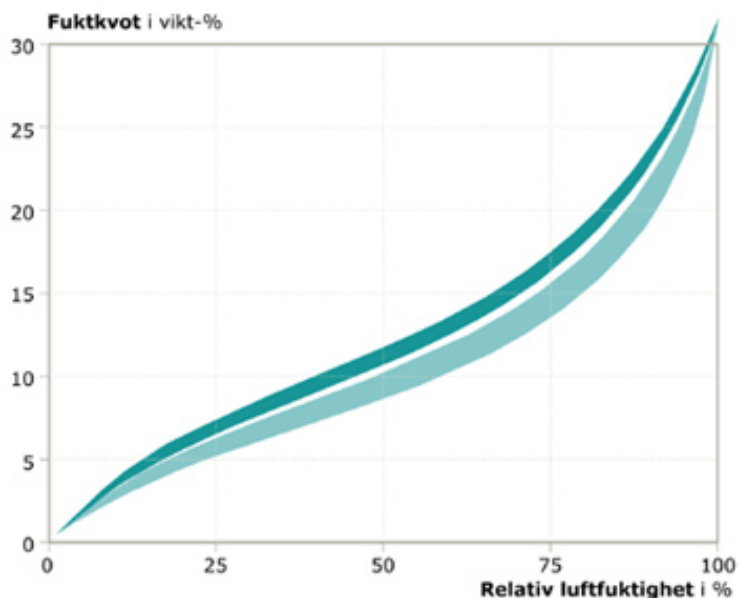
- KL-träets flexibilitet ger ett värdefullt bidrag till utvecklingen av byggandet.
- Hög hållfasthet i förhållande till sin vikt.
- Små tillverkningstoleranser och god formstabilitet.
- God bärförmåga vid brand.
- God värmeisoleringsförmåga.
- Låg egenvikt, vilket medför lägre transport- och montagekostnader och dessutom enklare och billigare grundkonstruktioner.
- God förmåga att tåla kemiskt aggressiva miljöer.
- Flexibel produktion som till och med möjliggör tillverkning av krökta ytor.

2.3.1 Fuktegenskaper

Trä är ett material vars egenskaper påverkas kraftigt av dess fuktkvot som definieras enligt ekvation 2.1 (Burström & Nilvér, 2019).

$$\text{Fuktkvot} = \frac{\text{Förångningsbara vattnets vikt}}{\text{Materialets torrsvikt}} \quad (2.1)$$

Denna fuktkvot beror i sin tur på det rådande klimatet i omgivningen då träet vill infinna sig i fuktjämvikt med sin omgivning. Hur mycket fukt trä innehåller är avgörande vid bedömning av risken för svampangrepp och kan utläsas ur sorptionskurvor för olika trämaterial, se Figur 2.3 för exempel på hur en sorptionskurva ser ut.



Figur 2.3: Bild över sorptionskurva för diverse träslag. Övre kurvan visar träets fuktkvot vid desorption och nedre kurvan visar träets fuktkvot vid adsorption. Bild hämtad från (Svenskt Trä, 2017a).

Noterbart är att fuktkvoten är lägre när träet går från ett uttorkat till uppfuktat tillstånd, jämfört med när träet torkar ut från uppfuktat tillstånd. Detta kallas hysteres och innebär att trä kan uppvisa olika fuktkvoter vid samma relativa fukthalt. För diverse träprodukter föreligger därför en förhöjd risk för mögel och rötangrepp även efter uttorkning. En ökad fukthalt medför även en tillfällig minskning av hållfastheten för träelement då fukten har en mjukgörande effekt på fibrerna. Därtill är fuktrörelsen som trä genomgår olika i olika riktningar. Där är den fuktbevingade rörelsen i fiberiktning 0.02%, 0.19% i radiell riktning och 0.36% i tangentiell riktning per procentuell ändring av fukthalt i materialet (A. Gustafsson, 2017). Denna rörelse kan direkt jämföras med fuktrörelsen för respektive lamell i KL-träet vilket leder till stora påfrestningar på limfogarna i materialet. Limfogarna kan till följd av detta spricka vid hög fuktbelastning med konsekvensen att vatten lättare tar sig in i materialet (Kukk m. fl., 2017).

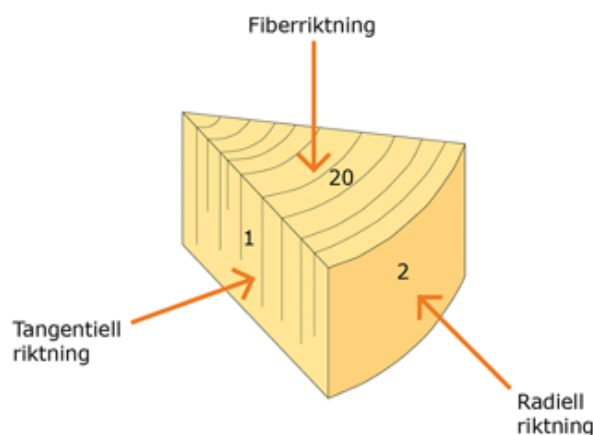
2.3.2 Fukttransportmekanismer

Fukttransport i trä kan antingen ske i vätskefas eller i ångfas. I ångfas kan detta ske antingen genom diffusion eller konvektion. Diffusion sker till följd av skillnad

i ånghalt mellan luft och materialskikt och bygger på att fukten diffunderar över materialskiktet genom de luftfyllda porerna i materialet. Den andra transportmekanismen, konvektion grundar sig i att luftrörelser för med sig fukt in i konstruktionen (Burström & Nilvér, 2019). Detta är farligast för porösa material som luft lätt kan ta sig igenom, men sprickor och håligheter i mer kompakta material innebär också att fukt kan tränga sig långt in i materialet.

I vätskefas sker fukttransport genom kapillärsugning och detta bygger på den attraktionskraft som uppstår mellan materialskiktet och vattenmolekyler. När detta sker skapas ett kapillärt undertryck som för fukten längre in i materialet (Burström & Nilvér, 2019). Kapillärsugning är som mest relevant då materialet får suga fritt från en fri vattenmassa men processen startar redan vid relativ fuktighet (RF) under 100%. Då fukthalten i materialet ökar blir därför kapillärsugning allt mer dominant samtidigt som diffusionen i materialet hämmas när de luftfyllda porerna fylls med vatten. Diffusion är en väldigt långsam transportmekanism i förhållande till konvektion vilket leder till att fukttransporten i träet går snabbare med ökad fukthalt. Fukttransporten genom ett material beräknas med hjälp av en ånggenomsläpplighetskoefficient (δ) som inte särskiljer mellan kapillärsugning och diffusion. Koefficienten varierar därför med ökad fukthalt då kapillärsugning blir den dominerande transportmekanismen.

Till följd av trädets anisotropa egenskaper är även fukttransporten i respektive riktning olika, vilket har stor påverkan på uttorkning- och uppfuktningprocessen (Svenskt Trä, 2017b). Transporten går långsammast i tangentiell riktning, dubbelt så snabbt i radiell riktning och 20 gånger så snabbt i parallell riktning med fibrerna, se Figur 2.4. För KL-trä som även har limfogar mellan de olika lamellerna innebär detta något förändrade fukttransportegenskaper. Vid lägre fukthalter är limfogarnas påverkan på diffusionsmotsånd försumbar gentemot vanliga träprodukter (Kordziel m. fl., 2020). Vid högre fukthalt ger dock limfogarna en mer noterbar ökning av diffusionsmotståndet. Detta till följd av att trädets diffusionsegenskaper varierar med dess fukthalt, medan limfogarnas förblir relativt konstanta. Vid kapillärsugning från fri vattenmassa är limfogarnas påverkan försumbar.



Figur 2.4: Fukttranssporthastighet i träets respektive riktningar, bild hämtad från (Svenskt Trä, 2017b).

Limfogningen av elementen och dess korsvisa struktur medför också problem avseende fukttransport, vilket måste beaktas. Limfogarna försvårar uttorkning av KL-trä svårare fukten måste transporteras över barriärer för att ta sig ut. (Vyas m. fl., 2023). Fogarna mellan träelementen innebär också inbyggda svagheter i elementet där sprickor kan uppstå och fukt kan tränga in i KL-träet. Detta är problematiskt då sprickor i den exponerade delen av KL-träet kan uppstå. När sprickor uppstår kan dock vatten förbigå att behöva tränga sig igenom KL-träet radiellt utan får istället direkt tillgång till KL-träets fiberriktning där snabb fuktspridning kan ske. Av samma anledning är ändarna av KL-träet också särskilt utsatta då dessa ytor innebär en exponering av fiberriktningarna mot den yttre miljön vilket kan orsaka mycket snabb fuktuppsugning kapillärt. Då dessa element skarvas ihop med andra byggdelar föreligger en stor risk att fukt byggs in i ändarna utan möjlighet att torkas ut (Kalbe m. fl., 2021).

2.3.3 Termiska egenskaper

KL-träets värmeegenskaper kan likställas till det för vanliga träelement (Vyas m. fl., 2023). Detta då limfogarnas påverkan på den totala värmekonduktiviteten är mycket liten. Därav ger att KL-elementen har en värmekonduktivitet på 0.14 W/mK i radiell och tangentiell riktning, samt 2.5 gånger så stor parallellt med fibrerna (Burström & Nilvér, 2019).

2.4 Glasermetoden

Nedan presenteras Glasermetoden, vilket är en handberäkningsmetod för stationära fukt- och temperaturberäkningar som kan användas för att uppskatta risken av fuktansamling i byggnader med endimensionella strukturer. Metoden kan användas för att utvärdera mögelrisk och kondensrisk och hittas i Europeisk standard SS-EN ISO 13788:2013 (SIS, 2013). Det är enklare att presentera Glasermetoden med hjälp av en tabell, då det dels visar ett tydligt resultat samt att det är flera ingående faktorer

som skall presenteras. Tabell 2.1 nedan visar Glasermetoden och dess parametrar. En utförligare redovisning av dessa parametrar hittas i bilaga A.2.

Tabell 2.1: Representativ tabell över Glasermetoden.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Skikt	d	λ	R	ΔT	T	v_s	δ	Z	Δv	v	RF
Inside											
...											
Mark											
Σ											

Där:

d	Tjocklek för skikt [m]
λ	Värmeledningsförmåga för skikt [W/mK]
R	Värmemotstånd för skikt [m ² K/W]
ΔT	Temperaturdifferens över skikt [°C]
T	Temperatur i skiktgränser [°C]
v_s	Mättnadsånghalt i skiktgränser [g/m ³]
δ	Ånggenomsläpplighetskoefficient för skikt [m ² /s]
Z	Ånggenomgångsmotstånd för skikt [s/m]
Δv	Ånghaltsskillnad över skikt [g/m ³]
v	Ånghalt i skiktgränser [g/m ³]
RF	Relativa fuktigheten i skiktgränser [%]

2.5 Fuktkällor

En av de klimatbelastningar som verkar på byggnader är fukt, som har en stor betydelse för diverse nedbrytningsprocesser (Hagentoft & Sandin, 2017). De olika fuktkällor en konstruktion kan utsättas för kan delas in i följande grupper:

- Nederbörd
- Luftfukt
- Byggfukt
- Markfukt
- Läckage

2.5.1 Nederbörd

Nederbörd avser regn, snö eller hagel. Regn i kombination med vind kallas för slagregn och träffar byggnadens vertikala delar (Hagentoft & Sandin, 2017). Slagregns-

mängderna en byggnad utsätts för varierar geografiskt samt beroende på väderstreck. Ett av de områden i Sverige som är mest utsatt för slagregn är västkusten, där det under extrema förhållanden uppmätts upp till 70 kg regnvatten per kvadratmeter fasadyta och dag. Nederbörden kan orsaka fuktproblem om vatten till exempel läcker in genom otäta tak eller tränger sig in i sprickor i klimatskalet. Vidare gör även nederbörden marken fuktig och vatten kan strömma in mot byggnaden och ge risk för fuktskador.

2.5.2 Luftfukt

Luften som vi och våra konstruktioner omges av har en förmåga att bära fukt och innehåller därmed alltid en viss mängd vattenånga (Hagentoft & Sandin, 2017). Hur mycket fukt luften kan bära beror på dess temperatur. Den fukt som finns i utomhusluften kommer från vatten som förångats från mark, sjöar och hav. Denna luftburna fukt når inomhusmiljön genom ventilationsluften och otätheter i klimatskärmen. Inne i byggnaden tillkommer även ett fukttillskott från de olika aktiviteter vi bedriver i en bostad som till exempel matlagning, duschning och klädtorkning. Människor avger också en särskild mängd vattenånga beroende på aktivitetsnivå, genom bland annat utandningsluft och svett. Storleken på fukttillskottet beror således på fuktproduktionen inomhus samt hur väl ventilationen fungerar.

Enligt en studie utförd av Kalamees m. fl. (2006) kan fukttillskottet variera beroende på utomhustemperaturen. Under varmare perioder är det vanligtvis fler fönster och dörrar öppna och aktiviteten inomhus minskar ofta, vilket leder till ett lägre fukttillskott. Vid kallare perioder sker motsatsen och fukttillskottet ökar istället. Studien mätte fukttillskottet i ett hundratal villor med trästomme och presenterade två viktiga värden för fukttillskottet: designvärde och maximalt värde. Designvärdet för fukttillskottet varierar beroende på utomhustemperaturen, med 4 g/m^3 under kallare perioder (-25 till 5°C), 0.5 g/m^3 under varmare perioder (15 till 25°C) och minskar linjärt mellan 5°C . till 15°C . Det maximala fukttillskottet var 6 g/m^3 under kallare perioder och 2.5 g/m^3 under varmare perioder, även det minskar linjärt mellan 5°C . till 15°C .

2.5.3 Byggfukt

Det fuktöverskott som lagras i byggnadsmaterial från tillverkning samt det som tillförs under byggnadstiden och som sedan avges efter att materialet byggts in i byggnaden kallas för byggfukt (Hagentoft & Sandin, 2017). Det definieras även som den andel fukt som behöver frigöras för att material och byggnadsdelar ska komma i fuktjämvikt med den resterande omgivningen. För träbaserade material är mängden byggfukt cirka 20 kg/m^3 .

Enligt Petersson (2018) måste byggfukten normalt ges möjlighet att torka ut antingen innan eller efter byggnaden färdigställts. För att undvika att fuktskador hinner uppstå är det av stor betydelse att uttorkningen sker tillräckligt fort. Den mängd

byggfukt som ska lämna en konstruktion varierar kraftigt. Uttorkningshastigheten för byggfukt beror till exempel på materialegenskaper, materialtjocklek, intilliggande material och den kringliggande miljöns temperatur och fuktighet.

2.5.4 Markfukt

Marken innehåller mycket fukt som kommer från nederbörd och grundvattnet (Hagetoft & Sandin, 2017). På grund av markens höga vattenhalt bedöms den relativa fuktigheten i marken alltid vara 100%. Detta medför att man vid dimensionering måste ta hänsyn till fukttransport i både vätskefas och ångfas. Det regnvatten som sipprar ner i marken kan orsaka fuktproblem om det inte dräneras bort från konstruktionen. Det är även viktigt att leda bort markvattnet då vatten som dämms upp mot konstruktionen utövar ett vattentryck på byggnaden. Fritt vatten i marken behöver även förhindras att transporteras in i konstruktionens byggnadsmaterial genom kapillärsugning.

2.5.5 Vattenläckage

Många av de fuktskador som uppstår i våra byggnader kommer från olika typer av vattenläckage. Vattenskadecentrum ger varje år ut en rapport som baseras på försäkringsbolagens inrapporterade vattenskador från föregående år (Vattenskadecentrum, 2021). I vattenskaderapporten för år 2021 kan det utläsas att av de inrapporterade läckagen utgör installerad utrustning 28%, ledningssystemet står för 57% och de resterande 15% kommer från tätskikt i våtrum. Många av vattenskadorna sker i köket eftersom det ofta saknas golvbrunn där samt att installationen till tapp- och spillvattenledningar ofta utförs av någon utan VVS-kunskap. Rapporten redovisade även att 80% av alla skador orsakade genom tätskikt i våtrum var i golvet. Det vanligaste skälet till dessa fuktskador är på grund av brister i tätskiktet eller anslutningen till golvbrunn.

Enligt Hagetoft och Sandin (2017) är byggnadskonstruktioner olika bra på att torka ut efter uppfuktning orsakat av exempelvis vattenläckage. Ibland kan en konstruktion torka ut snabbt av sig själv medan andra gånger krävs aktiva uttorkningsinsatser och i många fall måste även materialskikt bytas ut.

2.6 Biologisk nedbrytning

En av nedbrytningsprocesserna trä utsätts för är biologisk nedbrytning som främst orsakas av bakterier, svampar och insekter. (Burström & Nilvér, 2019). Bakterier och svampar är en naturlig del av vår miljö och är viktiga för naturens kretslopp då de bryter ner organiskt material. Dessa mikroorganismer kräver för sin existens vissa villkor exempelvis gällande temperatur, fukthalt, pH-värde och näring. Några av dessa existentiella villkor är ständigt uppfylla medan andra kan uppfyllas vid byggnadstekniska fel. Det finns ett stort antal svampar som kan angripa trä. Dessa brukar delas in i två huvudgrupper, missfärgande svampar och rötsvampar.

2.6.1 Missfärgande svampar

Till huvudgruppen missfärgande svampar hör mögelsvampar och blånadssvampar (Ewing, 2003). Mögel är en svamp som inte kan bryta ned vedfibrerna och därmed växer de oftast på virkets yta. För att mögel ska uppkomma krävs enligt Viitanen (1994) en relativ fuktighet på minst 75% och de flesta mögelsvamparna utvecklas i temperaturintervallet 5°C till 50°C. Mögelsvamparna växer fortare vid högre relativ fuktighet ($RF > 95\%$) samt vid optimala temperaturer mellan 20°C och 35°C. I kombination med dessa krav spelar även tiden en viktig roll. En ytterligare studie av Viitanen (1996) visar att mögel kan uppstå redan efter bara några dagar då $RF > 95\%$ och temperaturen är mellan 25°C och 40°C.

Mögelsvamparna kan vid ofördelaktiga omständigheter stanna av i tillväxt för att senare börja växa igen vid mer fördelaktiga förhållanden (Bloom m. fl., 2022). Spridningen av mögel sker genom att partiklar avges i form av sporer och mycel. Dessa partiklar sprids ut oavsett om mögelsvampen är aktiv eller inte och vid uttorkning av svampen ökar utsläppet exponentiellt. Luften inomhus kan påverkas av mikroorganismerna som således kan orsaka hälsoproblem hos människor. Kunskapen om detta är dock knapp och därmed saknas riktvärden för mikroorganismer i inomhusmiljön, men det finns experimentella data som beskriver toxiciteten hos olika ämnen producerade av mikroorganismer. Ett av dessa ämnen är de flyktiga kolväten som uppstår genom mikroorganismers ämnesomsättning, som benämns Mikrobiella volatila organiska ämnen (MVOC), som orsakar en irriterande och illaluktande gas. Flera av de ämnen som betecknas som MVOC kan enkelt penetrera de flesta byggmaterial som till exempel diffusionsspärrar och därmed nå inomhusmiljön.

En annan missfärgande svamp är den så kallade Blånadssvampen som kan orsaka gröna, bruna, blå eller svarta missfärgningar av virket (Svenskt trä, u. å). Till skillnad från mögelsvampen så kräver blånad en högre fuktkvot, växer inuti virket och avger inga ämnen till omgivande luft. Därmed har blånadssvampen ingen känd effekt på människors hälsa. Trots att blånadssvampen växer inne i veden så angriper den inte cellväggen och därför har den en negligerbar påverkan på virkets hållfasthet. Som nämnt ovan inverkar inte missfärgande svampar på träets hållfasthet nämnvärt men förekomsten av dessa svampar ger en indikation på att de förhållanden som råder kan ge upphov till rötsvampar. Blånad gör att virket torkar långsammare samt ökar virkets permeabilitet vilket innebär att träets förmåga att ta upp vatten ökar. Därför är en generell uppfattning att blånad kan bana väg för rötsvampar.

2.6.2 Rötsvampar

Till den andra huvudgruppen tillhör rötsvampar som till skillnad från missfärgande svampar har en förmåga att bryta ned vedstrukturen (Ewing, 2003). Nedbrytningen av veden gör att färg och form förändras kraftig och virkets hållfasthet blir sämre. Hur stor nedbrytning som orsakas beror på hur lång tid sammanlagt rötsvampen är aktiv. Rötsvampar kan vara svåra att upptäcka men det finns några varningssignaler att hålla utkik efter som till exempel mögelsvampar, fuktfläckar och obehaglig lukt.

Vidare kan rötsvampar enligt Ewing (2003) delas upp i tre grupper utifrån hur de bryter ned veden, brunröta, vitröta och mjukröta. Brunröta utgör den största andelen av rötsvamparna och förekommer främst på barrträd. Virke angripet av brunröta blir brunt och sprött och hållfastheten blir snabbt påverkad. En av de aggressivaste rötsvamparna är den Äkta hussvampen som är mycket tålig och har förmågan att med sina mycelsträngar sträcka sig flera meter till nya vattenkällor. Detta bidrar till att den kan sprida sig otroligt fort och över stora områden så snart den fått fäste i en konstruktion. Vitröta inverkar också på virkets hållfasthet men gör istället träet mjukt och trådigt och är vanligast bland lövträd. Mjukröta är inte en rötsvamp utan är egentligen en mögelsvamp som orsakar rötangrepp och kan förekomma i byggnadsdelar som haft en hög fukthalt en längre tid. Trä angripet av mjukröta blir mjukt på ytan men upplevs för övrigt som hårt. Detta gör att virket förlorar sin hållfasthet och ofta leder mjukröta till spröda brott.

Rötsvampar kräver liknande förhållanden som mögelsvampar för att de ska uppkomma (Viitanen, 1994). Skillnaderna är i stora drag att fuktkravet för rötsvampar är högre samt tiden det tar för ett angrepp att uppstå är vanligtvis längre. För att rötsvampar ska kunna etablera sig och gro fordras en fuktkvot i närheten av träets fibermättnadspunkt, vilket är över cirka 95% i RF beroende på temperaturen. Tillväxt av rötsvamp kan ske mellan temperaturer på cirka 0°C till 45°C beroende på art. Det finns dock de rötsvampar som kan överleva utanför dessa gränsvärden. Enligt Ewing (2003) är de mest gynnsamma villkoren för angrepp av rötsvampar vid en fuktkvot på 30% till 80% samt en temperatur mellan 15°C och 30°C.

2.7 Matematisk modell för nedbrytning

För att bedöma rötsvampars nedbrytning av trä är den procentuella massförlusten ett användbart mått. Nedan presenteras en modell för att kunna beräkna den eventuella massförlusten.

2.7.1 Modellen för massförlust

Nedan presenteras en empirisk modell för att bestämma massförlusten då träet förfaller på grund av rötsvamp (Viitanen m. fl., 2010). Modellen togs fram genom undersökningar på en träbit av furu, med data från väderprognoser (ERA-40) och är baserad på sex-timmars väderdata och observationer i Europa. Modellen kan visa vilka områden som eventuellt kan ha risk för nedbrytning av träet, samt kan användas för att beräkna framtida nedbrytning som skulle kunna uppkomma vid klimatförändringar. Denna modell ger möjligheten att utvärdera massförlusten av KL-träplattan, och vidare kan lämpligheten att använda en grundplatta av KL-trä konstateras.

Inledningsvis redovisar modellen för massförlust en ekvation för nedbrytning av trä under konstanta förhållanden, se ekvation 2.2. Enligt författarna kan denna ekvation enbart appliceras då $T \geq 0$ och då $RF \geq 95\%$.

$$ML(RF, T, t) = -42.9t - 2.3T - 0.035RF + 0.14T \cdot t + 0.024T \cdot RF + 0.45RF \cdot t \quad (2.2)$$

Där:

ML	Massförlusten av den totala massan [%]
RF	Relativa fuktigheten i KL-träplattan [%]
T	Temperaturen i KL-träplattan [°C]
t	Tid [månader]

Beräkningar under konstanta förhållanden är dock inte fullt realistiska, då den relativa fuktigheten RF , samt temperaturen T , normalt varierar. Nedan presenteras därför en utvecklad modell för nedbrytning av trä där parametrarna varierar över tiden. Denna modell består av två processer, aktiveringsprocessen samt processen för masslöshet.

Aktiveringsprocessen

Enligt författarna till modellen kan den kritiska tiden $t_{crit}(RF, T)$, i ekvation 2.5 bestämmas genom att sätta ekvation 2.2 lika med 0, se ekvation 2.3 nedan.

$$t_{crit}(RF, T) = \frac{2.3T + 0.035RF - 0.024T \cdot RF}{0.14T + 0.45RF - 42.9} \cdot 30 \cdot 24 \quad [\text{timmar}] \quad (2.3)$$

Vidare introduceras parametern α , vilken definierar när massförlusten startar. Värdet på α varierar enligt $0 \leq \alpha \leq 1$ och då α når 1 startar massförlusten. α är modellerad så att värdet även kan minska i en given takt, då uttorkning sker, se andra delen av ekvation 2.5. Tiden det tar för α att minska linjärt från 1 till 0 är två år (17520 timmar). Notera att tiden då α minskar inte går att härleda fram från denna modell. Denna minskningshastighet går enkelt att uppdatera i framtiden, då stöd från studier finns.

Ekvationerna 2.4 och 2.5 nedan redovisar tillsammans aktiveringsprocessen. $\alpha(t)$ är summan av samtliga $\Delta\alpha$ under en viss tidsperiod, där Δt ges i timmar.

$$\alpha(t) = \int_0^t d\alpha = \sum_0^t \Delta\alpha, \quad \text{där} \quad (2.4)$$

$$\Delta\alpha = \begin{cases} \frac{\Delta t}{t_{crit}(RF, T)}, & T > 0 \text{ °C}, RF > 95\% \\ -\frac{\Delta t}{17520}, & \text{annars} \end{cases} \quad (2.5)$$

Processen för massförlust

Massförlust anses vara omöjligt att återställa och uppstår då aktiveringsprocessen för rötsvamparna har fullt utvecklats, det vill säga då $\alpha = 1$. I undre gränsen i ekvation 2.6 benämns t som tiden då $\alpha = 1$. Massförlust uppkommer endast då $T > 0$ samt $RF > 95\%$. Utanför dessa randvillkor stannar processen för massförlust och α kommer börja minska, enligt andra delen av ekvation 2.5. $ML(t')$ är summan av massförlusten över tidsperioden och $ML(RF, T)/dt$ är massförlusten i procent per timme.

$$ML(t') = \int_t^{t'} \frac{ML(RF, T)}{dt} dt = \sum_t^{t'} \frac{ML(RF, T)}{dt} \Delta\alpha, \quad \text{där} \quad (2.6)$$

$$\frac{ML(RF, T)}{dt} = -5.96 \cdot 10^{-2} + 1.96 \cdot 10^{-4} \cdot T + 6.25 \cdot 10^{-4} \cdot RF \quad (2.7)$$

Modellen för massförlust tillsammans med Glasermetoden, se kapitel 2.4 kan slutligen ge ett resultat för att utvärdera KL-träplattans beständighet och livstid.

2.8 Fysikalisk nedbrytning

För att undersöka en KL-träplattas beteende under lång tid behöver man ta hänsyn till inverkan av den fysikaliska nedbrytningen av plattan. Denna uppstår som krypning i plattan orsakad av laster, förändringar av relativ fuktighet och temperaturförändringar (Binder m. fl., 2022). För att beräkna denna nedböjning behövs metoder för att beakta dessa parametrar. Eurokod 5 (SIS, 2004) beskriver hur γ -metoden kan användas för att beräkna krypningen med hänsyn till dessa. γ -metoden kompenserar för skjuvdeformationer i plattan och används även för att beräkna totala effektiva böjstyvheten. Dessutom reduceras styvheten över tid på grund av ovanstående parametrar. För att härleda denna reducering används lösningen till Boltzmanns superpositionsintegral, se kapitel 2.8.1.1.

2.8.1 Långtidseffekter

När KL-träplattan utsätts för laster under en lång tid förändras dess beteende. Bland annat så minskas dess styvhet med tiden, beroende på hur länge lasten varar och dess storlek. Denna minskning av styvhet tillsammans med lasten leder till nedböjning av plattan. Nedan beskrivs hur lösningen av Boltzmanns superpositionsintegrals används för att beräkna styvhetsreducering över tid samt ingående materialparametrar.

2.8.1.1 Boltzmanns superpositionsintegral

Reduceringen av styvheten i en KL-träplatta kan härledas genom att lösa Boltzmanns superpositionsintegral (Boltzmann, 1878). $J(t - \tau)$ är enaxliga krypningsfunktionen, $d\sigma/d\tau$ är tidsderivatan av spänningshistoriken, $\epsilon(t)$ är den tidsberoende töjningen och τ är den karakteristiska kryptiden. Superpositionsintegralen presenteras i ekvation 2.8. Integralen har lösts av Ausweger m. fl. (2019) och presenteras i ekvation 2.9.

$$\epsilon(t) = \int_0^t J(t - \tau) \frac{d\sigma}{d\tau} d\tau \quad (2.8)$$

$$\epsilon(t) = \frac{\Delta\sigma}{E} + \frac{\dot{\sigma} \cdot t_{ref}}{E_c(\beta + 1)} \left[\left(\frac{t - t_1}{t_{ref}} \right)^{\beta+1} - \left(\frac{t - t_2}{t_{ref}} \right)^{\beta+1} \right] \quad (2.9)$$

Där:	$\Delta\sigma$	Totala spänningsökningen under pålastning [Pa]
	$\dot{\sigma}$	Spänningshastighet [Pa]
	E	Elasticitetsmodul [Pa]
	E_c	Krypningsmodulen [Pa]
	t_{ref}	Referenstid för den viskösa styvheten (sätts till 1 sekund) [s]
	β	Krypningsexponent [-]
	t_1	Tiden då en last appliceras [s]
	t_2	Tiden då en last tas bort [s]

Integralen tar hänsyn till viskoelasticitet, och deformationen innehåller både elastisk och tidsberoende deformation (Ausweger m. fl., 2019). För att beräkna styvheten i plattan kan lösningen till integralen skrivas om enligt ekvation 2.10. Denna omskrivning har gjorts genom att dividera alla termer i ekvation 2.9 med spänningen σ . S_{el} representerar den elastiska delen av styvheten och S_{vi} den viskoelastiska delen av styvheten. $S(t)$ är den totala styvheten som är beroende på tiden. Denna omskrivning har gjorts av Binder m. fl. (2022).

$$S(t) = \left\{ \frac{1}{S_{el}} + \frac{t_{ref}}{S_{vi}(t_2 - t_1)(\beta + 1)} \left[\left(\frac{t - t_1}{t_{ref}} \right)^{\beta+1} - \left(\frac{t - t_2}{t_{ref}} \right)^{\beta+1} \right] \right\}^{-1} \quad (2.10)$$

2.8.1.2 Materialparametrar för reducering av styvhet

Materialparametrar som tagits fram enligt de två reologiska modellerna: *Fractional Zener* och *Power law* hämtade från Eitelberger m. fl. (2012), som identifierade parametrarna baserat på en flerskalig modell för trä. Modelleringsparametrarna presenteras i tabell 2.5.

Tabell 2.5: Tabell över materialparametrar för träslaget gran med en densitet på $\rho = 450 \text{ kg/m}^3$ från Eitelberger m. fl. (2012)

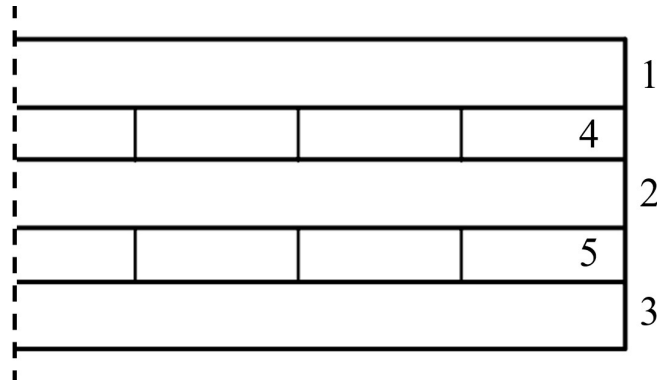
Reologisk modell	Materialparameter	Värde	Enhet
Fractional zener	β_L	0.2121	-
	$E_{L,el}$	1.639	GPa
	$E_{L,in}$	10.527	GPa
	$E_{L,vi}$	59.880	GPa
Power law	β_{RT}	0.2067	-
	$G_{RT,el}$	77.700	MPa
	$G_{RT,vi}$	3116	MPa

Där:

- β_L Kryptalet i longitudinell (L) riktning
- $E_{L,el}$ Elastisk styvhet i longitudinell riktning
- $E_{L,in}$ Power-law-fjäderstyvhet i longitudinell riktning
- $E_{L,vi}$ Viskoelastisk styvhet i longitudinell riktning
- β_{RT} Kryptalet i radiell och tangentiell (RT) fiberriktning
- $G_{RT,el}$ Elastisk skjuvmodul i radiell och tangentiell fiberriktning
- $G_{RT,vi}$ Viskoelastisk skjuvmodul i radiell och tangentiell fiberriktning

2.8.2 Effektiv böjstyvhet enligt γ -metoden

Figur 2.5 visar ett tvärsnitt av en KL-träskiva bestående av fem lager, med varje lager numrerat enligt γ -metodens konvention.



Figur 2.5: Illustration av ett tvärsnitt över en KL-träskiva bestående av fem lager, med numrering för att passa γ -metodens konvention.

Böjstyvhets för en homogen träbalk definieras som elasticitetsmodulen E multiplicerad med böjtröghetsmomentet I och är ett mått på hur väl en balk kan motstå deformationer (Ljung m. fl., 2007). För sammansatta träbalkar däremot, såsom limträbalkar eller ihopsatta KL-träpaneler, presenterar Eurokod en beräkningsmetod, γ -metoden för att räkna ut den totala effektiva böjstyvheten $(EI)_{ef}$. Metoden används för att kompensera för skjuvdeformationer som vanligtvis inte tas hänsyn till vid användning av balkteori. Denna böjstyvhets presenteras i bilaga B i Eurokod 5 (SIS, 2004) som:

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^3 (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) \quad (2.11)$$

Där index i indikerar olika KL-trä lager. γ -metoden är anpassad för KL-trä balkar med upp till totalt fem lager, tre transversala lager med två flexibla lager emellan. För varje lager betecknar A_i , E_i , I_i och a_i tvärsnittsarean, elasticitetsmodulen (parallellt fibrerna), böjtröghetsmomentet och avståndet från tyngdpunkten till den neutrala axeln. Koefficienten γ är en reduktionsfaktor och antar ett värde mellan 0 och 1. Den effektiva böjstyvheten kan därefter användas för beräkning av nedböjning hos KL-träelement. Enligt metoden är $\gamma_2 = 1$ för det mellersta lagret medan för det nedersta och översta lagret (1 och 3 i Figur 2.5) gäller följande:

$$\gamma_i = \left[1 + \pi^2 \frac{E_i A_i h_i}{G_R b_i \ell^2} \right]^{-1}, \quad i \in \{1, 3\} \quad (2.12)$$

Där h , b och ℓ är höjd, bredd och längd för de tre transversala lagren och G_R är skjuvmodulen för KL-träpanelen. γ -metoden bygger på Bernoulli-Eulers balkteori, vilket innebär att man bortser från skjuvdeformationerna i lager 2 och 4 i Figur 2.5. Formeln för γ -metoden är anpassad enligt Jacquier (2015) för ihoplammade lameller, till skillnad från originalformeln från Eurokod som är framtagen för mekaniskt sammansatta balkar.

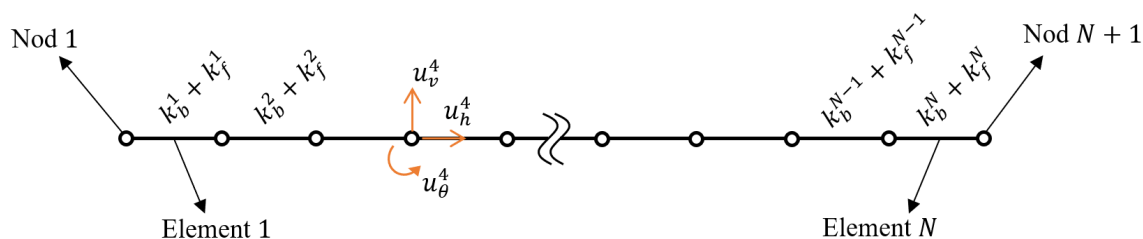
2.8.3 Finita Elementmetoden för beräkning av nedböjning

Finita Elementmetoden är en välkänd numerisk metod som utvecklades under tidigt 1900-tal för att lösa svåra partiella differentialekvationer utan att behöva lösa dem analytiskt. Metoden används som flera tillämpningar, inklusive beräkning av nedböjning av olika strukturer, värmeöverföring genom olika medier och simulering av vätske- och gasflöden (Reddy, 2019). I detta arbete kommer metoden att användas för att modellera och beräkna nedböjningen av en KL-träplatta. En sektion av KL-träplattan kommer att betraktas som en balk och analyseras. Observera att denna balk modelleras som fritt upplagd och vilar på ett elastiskt underlag av EPS-skivor.

Vid beräkning av nedböjningen med FEM består metoden i huvudsak av följande steg: definition av materialegenskaper, laster, geometri och randvillkor samt beräkning och assemblering av elementstyvhetmatriser och lastvektorer. Med hjälp av detta kan nedböjning beräknas (Reddy, 2019). Denna metod kan utföras effektivt genom olika datorprogram eller programspråk och i detta arbete har MATLAB använts som verktyg för att implementera FEM. Vidare har några MATLAB-funktioner från CALFEM använts för att underlätta FEM implementeringen (Austriell m. fl., 2004). Det bör noteras att modelleringen i detta arbete har varit av en relativt liten storlek och därmed har inga algoritm- eller programmeringsoptimeringar genomförts för att minska beräkningstiden och uppnå högre effektivitet.

2.8.3.1 Definiering av materialparametrar, laster, geometri och randvillkor

I denna del definieras materialparametrar såsom balkens längd ℓ , FEM-elementens längd ℓ_{el} , dess styvhet E och yttröghetsmoment I . Därefter väljs finheten på balkens diskretisering genom att välja antalet element till ett stort tal, N , och antalet noder till $N+1$, som illustreras i Figur 2.6. Varje nod har tre frihetsgrader: en för horisontell förflyttning u_h^n , en för vertikal förflyttning u_v^n , och en för rotation u_θ^n , där superskript n indikerar nodnumret. Frihetsgraderna för nod nummer 4 visas i Figur 2.6.



Figur 2.6: Illustration över en FEM 2D-modell för en balk med tre frihetsgrader i varje nod och N element. Representativ modell.

Kända randvillkor appliceras på nodernas frihetsgrader. Om en balk exempelvis är fast inspänd vid den vänstra änden, det vill säga i nod 1, kommer randvillkoren att vara $u_h^1 = u_v^1 = u_\theta^1 = 0$.

2.8.3.2 Styvhetmatriser och lastvektorer

Varje balkelement i Figur 2.6 har en total styvhet som är summan av balkstyvheten k_b^n och fjäderstyvheten k_f^n , där n är elementnumret. Elementstyvhetsmatrisen för balkens styvhet, $\bar{\mathbf{K}}_b^e$, och elementstyvhetsmatrisen för fjäderstyvheten, $\bar{\mathbf{K}}_f^e$, definieras enligt ekvationerna 2.13 och 2.14 nedan (Dahlblom & Olsson, 2015):

$$\bar{\mathbf{K}}_b^e = \begin{bmatrix} \frac{EA}{\ell_{el}} & 0 & 0 & -\frac{EA}{\ell_{el}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{\ell_{el}^3} & \frac{6EI}{\ell_{el}^2} & 0 & -\frac{12EI}{\ell_{el}^3} & \frac{6EI}{\ell_{el}^2} \\ 0 & \frac{6EI}{\ell_{el}^2} & \frac{4EI}{\ell_{el}} & 0 & -\frac{6EI}{\ell_{el}^2} & \frac{2EI}{\ell_{el}} \\ -\frac{EA}{\ell_{el}} & 0 & 0 & \frac{EA}{\ell_{el}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{\ell_{el}^3} & -\frac{6EI}{\ell_{el}^2} & 0 & \frac{12EI}{\ell_{el}^3} & -\frac{6EI}{\ell_{el}^2} \\ 0 & \frac{6EI}{\ell_{el}^2} & \frac{2EI}{\ell_{el}} & 0 & -\frac{6EI}{\ell_{el}^2} & \frac{4EI}{\ell_{el}} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$\bar{\mathbf{K}}_f^e = \frac{\ell_{el}}{420} \begin{bmatrix} 140k_{\bar{x}} & 0 & 0 & 70k_{\bar{x}} & 0 & 0 \\ 0 & 156k_{\bar{y}} & 22k_{\bar{y}}\ell_{el} & 0 & 54k_{\bar{y}} & -13k_{\bar{y}}\ell_{el} \\ 0 & 22k_{\bar{y}}\ell_{el} & 4k_{\bar{y}}\ell_{el}^2 & 0 & 13k_{\bar{y}}\ell_{el} & -3k_{\bar{y}}\ell_{el}^2 \\ 70k_{\bar{x}} & 0 & 0 & 140k_{\bar{x}} & 0 & 0 \\ 0 & 54k_{\bar{y}} & 13k_{\bar{y}}\ell_{el} & 0 & 156k_{\bar{y}} & -22k_{\bar{y}}\ell_{el} \\ 0 & -13k_{\bar{y}}\ell_{el} & -3k_{\bar{y}}\ell_{el}^2 & 0 & -22k_{\bar{y}}\ell_{el} & 4k_{\bar{y}}\ell_{el}^2 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Superskriptet e indikerar att det rör sig om elementstyvhetsmatriser. Variabeln $k_{\bar{x}}$ representerar fjäderstyvheten för horisontella fjädrar, vilket inte finns under balken i detta arbete och därmed är satt till 0. Medan $k_{\bar{y}}$ betecknar den vertikala fjäderstyvheten, som i Figur 2.6 benämns som k_f för de olika elementen. Summan av matriserna 2.13 och 2.14 ger elementstyvheten för respektive balkelement. Det är värt att notera att dessa två elementstyvhetsmatriser, tillsammans med elementlastvektorn 2.16 har tagits fram av Dahlblom & Olsson genom att approximativt lösa den kända Euler-Bernoulli ekvationen 2.15 nedan (Dahlblom & Olsson, 2015). Ekvationen härleddes först av matematikern Leonhard Euler (1744).

$$EI \nabla^4 w(\bar{x}) + k_{\bar{y}} w(\bar{x}) = q_{\bar{y}}(\bar{x}) \quad (2.15)$$

\bar{x} indikerar att det är elementvisa axlar och $q_{\bar{y}}(\bar{x})$ är en utbredd last som varierar med positionen längs axeln \bar{x} . Värdet på lösningen, $w(\bar{x})$ motsvarar den vertikala förskjutningen av balken i den elementvisa axeln \bar{x} .

Lastvektorerna är två, en för punktlaster och en för utbredda laster. Notera att punktlaster samt start och slutpositioner för utbredda laster endast kan placeras där det finns noder. Elementlastvektorn som innehåller utbredda laster ($\bar{\mathbf{f}}_l^e$) för ett balkelement med två ändnoder med tre frihetsgrader vardera definieras enligt ekvation

2.16. Medan elementlastvektor innehållande punktlaster ($\bar{\mathbf{f}}_p^e$) för samma balkelement definieras enligt 2.17 (Dahlblom & Olsson, 2015).

$$\bar{\mathbf{f}}_l^e = \ell_{el} \begin{bmatrix} \frac{q_x}{2} & \frac{q_y}{2} & \frac{q_y}{12} & \frac{q_x}{2} & \frac{q_y}{2} & -\frac{q_y}{12} \end{bmatrix}^T \quad (2.16)$$

$$\bar{\mathbf{f}}_p^e = [P_1 \quad P_2 \quad P_3 \quad P_4 \quad P_5 \quad P_6]^T \quad (2.17)$$

I detta arbete är balken inte utsatt för några horisontella utbredda laster och därför är q_x satt till 0. q_y representerar istället de vertikala utbredda lasterna som balken kommer att utsättas för. I vektorerna 2.16 och 2.17 representerar element 1, 2, 4 och 5 både horisontella och vertikala laster i de två noderna, medan element 3 och 6 representerar eventuella momentlaster. Till exempel kan P_3 eller P_6 vara externa momentlaster. Längden som används i vektorn 2.16 och matriserna 2.13 och 2.14, ℓ_{el} , är längden på ett element som visas i Figur 2.6. I detta arbete har indelningen av beräkningsnätet varit uniform, vilket innebär att alla element är lika långa och har längden $\ell_{el} = \ell/N$.

2.8.3.3 Beräkning av elementvis nedböjning

När elementlastvektorer och elementstyvhetsmatriser är kända kan ett ekvationssystem formuleras enligt ekvation 2.18 och därefter lösas. Då elementlastvektorn är summan av två vektorer, samt elementstyvhetsmatrisen är summan av två matriser kan uttrycket skrivas om enligt 2.19. Nu kan ekvationssystemet enkelt lösas. Lösningen presenteras i ekvation 2.20.

$$\bar{\mathbf{K}}^e \bar{\mathbf{a}}^e = \bar{\mathbf{f}}^e \quad (2.18)$$

$$(\bar{\mathbf{K}}_b^e + \bar{\mathbf{K}}_f^e) \bar{\mathbf{a}}^e = \bar{\mathbf{f}}_l^e + \bar{\mathbf{f}}_p^e \quad (2.19)$$

$$\bar{\mathbf{a}}^e = (\bar{\mathbf{K}}_b^e + \bar{\mathbf{K}}_f^e) \setminus (\bar{\mathbf{f}}_l^e + \bar{\mathbf{f}}_p^e) \quad (2.20)$$

Lösningsvektorn ($\bar{\mathbf{a}}^e$) till ett balkelement beskriver den horisontella och vertikala förflyttningen samt rotationen i elementets två noder. Operatorn \setminus är ett MATLAB-kommando som utför Gausselimination för att lösa ett ekvationssystem.

$$\bar{\mathbf{a}}^e = \begin{bmatrix} u_h^n & u_v^n & u_\theta^n & u_h^{n+1} & u_v^{n+1} & u_\theta^{n+1} \end{bmatrix}^T \quad (2.21)$$

Ekvation 2.21 beskriver lösningen för förflyttningen hos de två noderna n och $n+1$ med beteckningar enligt Figur 2.6.

3

Metod

I detta avsnitt introduceras designen för både den korslimmade träplattan och för enfamiljshuset, samt designkraven för dessa. Därefter presenteras den mekaniska modellen samt laster som träplattan utsätts för. Vidare redovisas de fyra valda fuktscenarierna och beräkningsgången för både massförlusten samt nedböjningen för träplattan.

3.1 Design

Designfasen är en viktig del av byggprocessen och syftar till att ta fram en väl genomtänkt plan för konstruktionen. I detta arbete fokuseras designen på ett fundament av korslimmat trä för en enfamiljsvilla i Göteborg. För att uppnå detta mål krävs att olika regler och riktlinjer följs, såsom Eurokod och Boverkets byggregler (BBR). Dessa krav utgör grunden för arbetet och påverkar beslut om materialval, dimensionering och konstruktion. Följande avsnitt beskriver designprocessen, inklusive olika designkrav, val av material samt dimensionering.

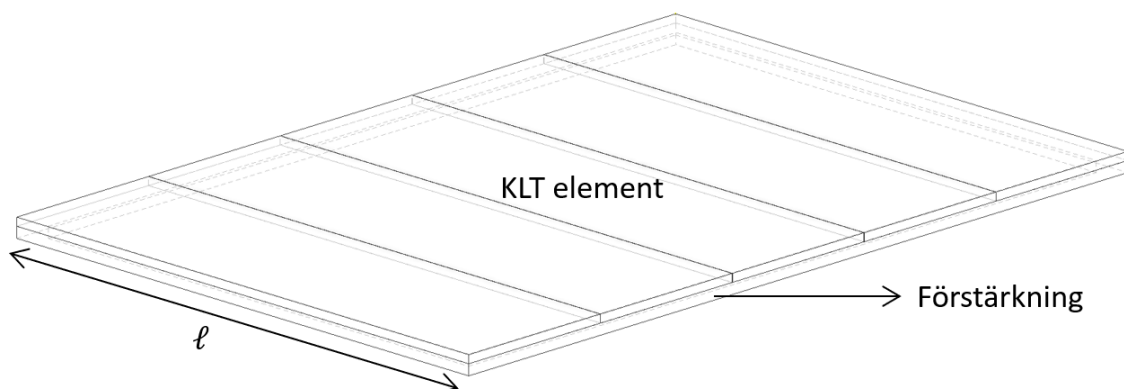
3.1.1 Designkrav - Eurokod och BBR

För att skapa ett grundelement som uppfyller rekommenderade riktvärden bör ett U-värde uppgå till $0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Boverket, 2020). För att uppnå detta värde krävs det isolering under trägrunden.

Enligt Eurokod är det rekommenderat att den initiala nedböjningen hos grundplattor ligger mellan $\ell/300$ till $\ell/500$, där ℓ är spannet på plattan. Dessutom bör den maximala slutliga nedböjningen, under kvasi-permanent last, ligga mellan $\ell/250$ till $\ell/350$ (SIS, 2004). Dessa riktvärden är viktiga att ta hänsyn till för att säkerställa att grundplattan inte deformeras för mycket vid långtidsbelastning.

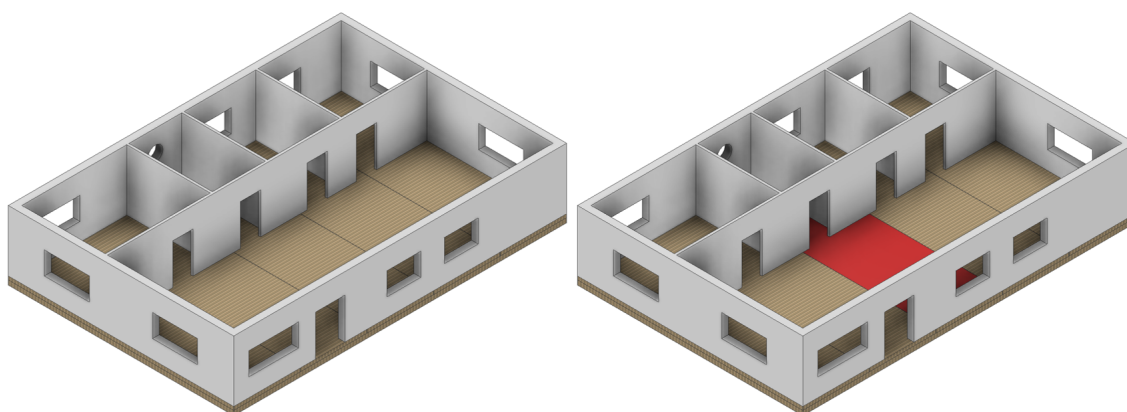
3.1.2 Design av enfamiljshus

Det valda enfamiljshuset som modell i detta arbete efterliknar en typisk bostadsvilla för en familj. Husets grund består av fem sammanfogade KL-trä element som förstärkts med extra lager längs kanterna på undersidan, vilket illustreras i Figur 3.1. De extra lagren har lagts till för att öka grundens styrka och förmåga att bära laster från ytterväggarna.



Figur 3.1: KLT-grunden till ett enfamiljshus bestående av fem element med förstärkning underifrån på kanterna.

Ett tvärsnitt som tydligt visar förstärkningen illustrerar i Figur 3.5. ℓ är spannet på 10 m och varje KL-trä element har bredden 2.95 m, vilket ger en total boarea på cirka 140 m². Enplanshuset har en innerhöjd på 2.7 m. Det är viktigt att notera att denna design är godtycklig och framtagen för att vara lämplig för enfamiljshus. En godtycklig planlösning har också tagits fram och presenteras i Figur 3.2 nedan.

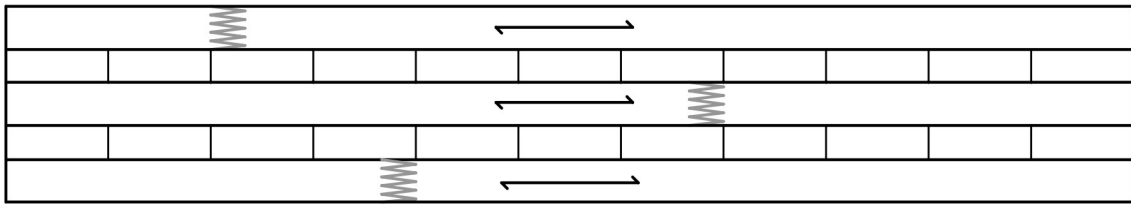


Figur 3.2: Vänster: Grund i KL-trä bestående av fem element med planlösning. Höger: Det mittersta KL-trä elementet markerat i rött.

Eftersom det mittersta KL-trä elementet (som är markerat i rött i Figur 3.2) är placerat mitt i huset och har innerväggar över sig är det det mest kritiska elementet och bör därför ha högst nedböjning.

3.1.3 Design av KL-träplatta

I detta arbete har en grund av KL-trä från Stora Enso valts som fundament. Det valda fundamentet har en total höjd på 150 mm (som är en standarddimension av Stora Enso) och består av fem lager med dimensionerna 40-20-30-20-40 mm (Stora Enso, 2023a). Figur 3.3 presenterar ett tvärsnitt av fundamentet.



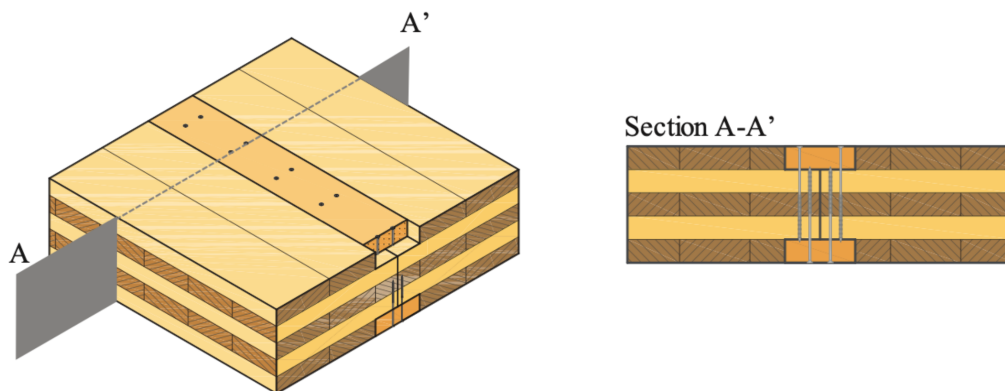
Figur 3.3: Illustration av tvärsnittet för KL-träplattan, bestående av fem lager.

Stora Enso tillverkar KL-trä i olika dimensioner och längder för att passa olika projekt. Den typen av KL-trä element som har valts för detta arbete finns tillgänglig i längder upp till 16 m och bredd upp till 2.95 m. I detta arbete har en längd på 10 m och bredd på 2.95 m valts för att passa byggnadens geometri.

3.1.4 Anslutningar mellan element

Av praktiska och ekonomiska skäl är det inte möjligt att producera en hel platta som motsvarar den totala bottenarean. Detta eftersom Stora Enso producerar element med en bestämd längd och bredd, vilket presenterades i kapitel 3.1.3 ovan. På grund av detta måste grundplattan bestå av del-element som sedan monteras ihop, vilket presenterades i kapitel 3.1.2, vidare se figur 3.1. Att producera mindre element som sedan monteras på plats underlättar dessutom vid transport och montering av grundelementen.

För att säkerställa att de olika KL-trä elementen i Figur 3.1 håller ihop ordentligt är det viktigt att anslutningarna kan motstå skjuvkrafter (Loss m. fl., 2018). För detta arbete har en anslutning med dubbla ytskivor valts, vilken på engelska kallas *Surface spline joint*. Denna anslutning fungerar genom att två element sammanfogas i en skarv med hjälp av skruvar genom två externa träplankor från båda sidor. Figur 3.4 nedan illustrerar den valda anslutningen.



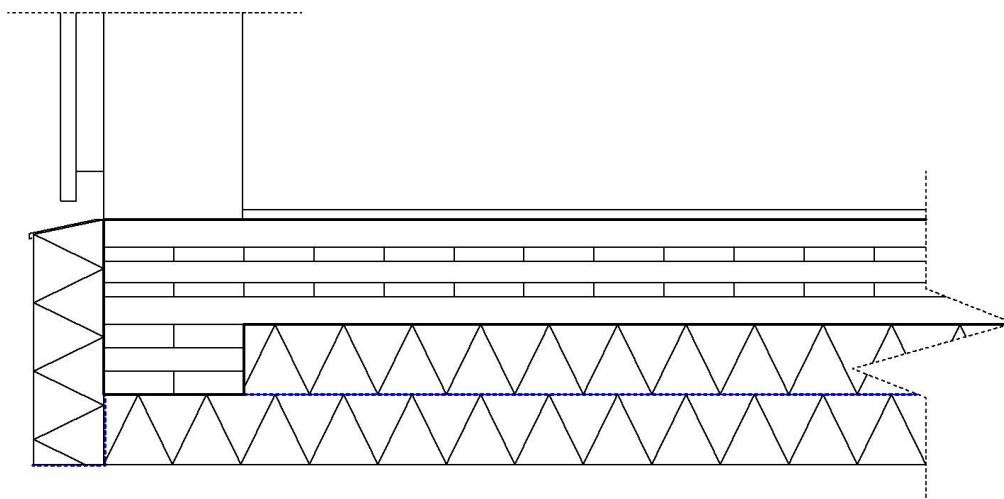
Figur 3.4: Den valda typen av anslutning. Figur av (Loss m. fl., 2018). Licensierad under CC BY-NC-ND 4.0.

De yttre brädorna fördelar skjuvkrafterna mellan de två elementen över en större yta, detta ökar i sin tur den övergripande styrkan och stabiliteten i fogarna. Dessa

yttre brädor hjälper också till att förhindra eventuell rörelse mellan de två elementen vilket kan vara viktigt för att bibehålla den strukturella integriteten och förhindra skador eller fel över tid (Loss m. fl., 2018).

3.1.5 Grunddesign

I detta arbete har en KL-träplatta med ett 14 mm parkettgolv ovanpå valts som grunddesign. Två skivor av EPS (Expanderad Polystyren) med en tjocklek på 100 mm vardera har placerats under KL-träplattan och mellan dessa finns en polyetenfolie (PE-folie). Dessutom har extra KL-träelement installerats under ytterväggen för ytterligare stabilitet. Denna grunddesign illustreras i Figur 3.5. Under EPS-skivorna finns det en fiberduk och ett packat dränerande makadamlager med en lämplig tjocklek på cirka 400 mm (K. K. Gustafsson, 2020). På utsidan av KL-träplattan finns en skiva av EPS, som täcks av en droppbleck med en lutning som syftar till att avleda nederbördsvatten från fasaden.



Figur 3.5: Tvärsnitt över grunden med KL-träplattan och EPS skivor.

Med given värmeledningsförmåga för grundplattan och isoleringsmaterial av cellplast med densiteten 30 kg/m^3 (Pettersson, 2018) kan en tjocklek på isoleringen tas fram genom att först beräkna resistansen för respektive materialskikt, se ekvation 3.1. U-värdet för grunden kan därefter tas fram genom att summera samtliga materialskikts resistanser, samt ytövergångsmotståndet mellan parkett och inneluft, enligt ekvation 3.2. Med given indata beräknades isoleringens tjocklek till 200 mm.

$$R_{mtrl} = \frac{d_{mtrl}}{\lambda_{mtrl}} \quad (3.1)$$

$$U = R_{tot}^{-1} \quad (3.2)$$

3.2 Laster

KL-träplattan utsätts huvudsakligen för fyra laster: två jämnt utbredda laster över hela plattan, en jämnt utbredd last över en del av plattan och en punktlast. De två jämnt utbredda lasterna inkluderar den nyttiga lasten q_k i bostadshuset och egenvikten q_{KLT} , se Figur 3.6. Den jämnt utbredda lasten q_1 som är över en del av plattan består av egenvikten av en innervägg. Punktlasten F kommer från en annan innervägg på grundelementet, och den består endast av väggens egenvikt (takets egenvikt eller snölast inkluderas inte då dessa bärs upp av takstolar som sedan för krafterna vidare till ytterväggarna). Enligt Eurokod 1 (SIS, 2002) är den karakteristiska nyttiga lasten i bostadshus $1.5 - 2.0 \text{ kN/m}^2$. Egentyngden på KL-träplattan som också betraktas som en utbredd last beräknas för en densitet på $\rho = 450 \text{ kg/m}^3$ och en höjd på $h = 150 \text{ mm}$. Lasterna som plattan utsätts för, i Figur 3.6, presenteras i tabell 3.1 nedan. För uträkningen på lasterna, se bilaga A.21.

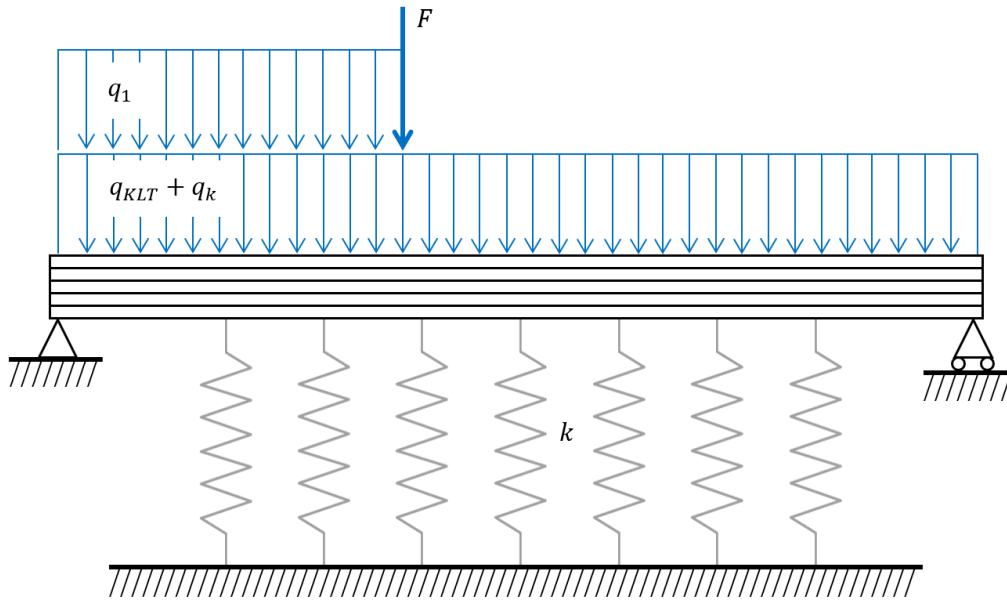
Tabell 3.1: Tabell över laster som KL-träplattan utsätts för i ett bostadshus.

Lasttyp	Beteckning	Last	Enhet
Nyttig last	q_k	2.00	kN/m^2
KLT (egenvikt)	q_{KLT}	0.66	kN/m^2
Väggelement 1 (egenvikt)	q_1	1.46	kN/m
Väggelement 2 (egenvikt)	F	4.31	kN

Lasterna q_k och q_{KLT} behöver multipliceras med balkens djup (2.95 m) för att få enheten kN/m och därmed betraktas som utbredda laster i FEM modellen.

3.3 Mekanisk modell

Figur 3.5 visar tvärsnittet av fundamentet, och utifrån dess utformning ska en mekanisk modell konstrueras. Genom att ha extra KL-träelement på kanterna, möjliggörs modelleringen av plattan som en fritt upplagd balk med fjädrar placerade mellan ändupplagen. Under plattan finns EPS-skivor som representeras av fjädrar i modellen. Dessa fjädrar har en styvhet, k , som motsvarar EPS-skivornas styvhet. Modellen illustreras i Figur 3.6. Genom att betrakta plattan som en fritt upplagd balk med fjädrar mellan ändupplagen och använda fjädrarnas styvhet, kan modellen beskriva beteendet hos plattan under belastning. Det är dock viktigt att påpeka att denna modell endast beskriver nedböjningen av plattan och inte tar hänsyn till sättningar i marken.



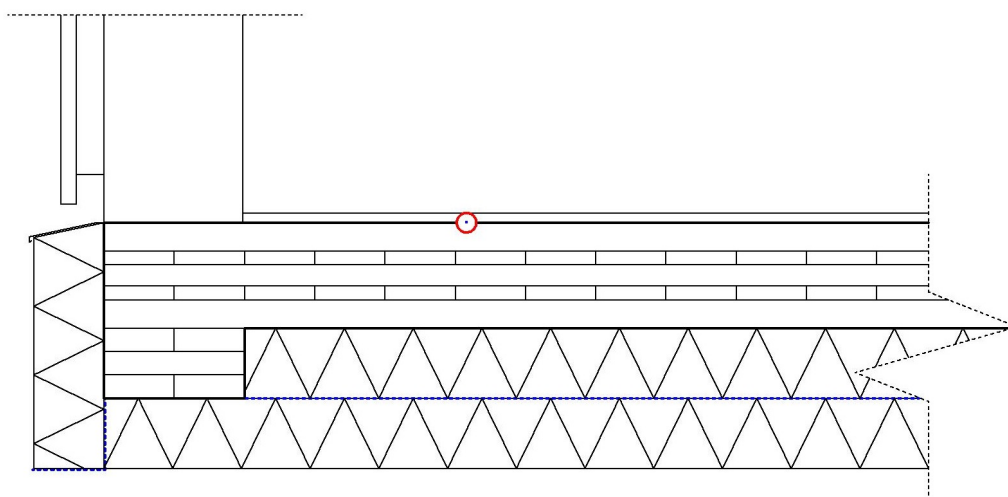
Figur 3.6: Mekanisk modell över KL-träelement med tre olika utbredda laster och en punktlast. I denna modell betraktas fundamentet som en fritt upplagd balk på ett fjädrande upplag.

Lasten q_1 är från egenvikten av väggelement 1 och sträcker sig 4 m över balken, vilket är den punkt där punktlasten F från väggelement 2 angriper. Lasten q_{KLT} är lasten från egenvikten av KL-träbalken och q_k är den nyttiga lasten från bostadshuset. Fjäderstyvhetsen k för EPS-skivor bestämdes genom experiment enligt Malai och Youwai (2021). Denna styvhet beror av materialets densitet. I detta arbete kommer tre olika styvheter för olika densiteter att undersökas, dessa presenteras i ekvation 3.3.

$$\begin{aligned}
 k(\rho = 20 \text{ kg/m}^3) &= 4.5 \text{ MPa} \\
 k(\rho = 25 \text{ kg/m}^3) &= 6.0 \text{ MPa} \\
 k(\rho = 30 \text{ kg/m}^3) &= 8.2 \text{ MPa}
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

3.4 Beräkning av massförlust

Genom att använda programmet MS Excel kunde massförlusten vid vattenabsorption av KL-träplattan beräknas med hjälp av modellen för massförlust och Glaser-metoden som presenterades i kapitel 2.7.1, respektive kapitel 2.4. Nedan beskrivs ett fuktscenario för normala fuktbelastningar samt tre fuktscenarion som är utformade för att eventuellt nå en kritisk nivå av vattenmättnad i plattan. Scenarierna valdes utifrån litteraturstudier samt egen rimlighetsbedömning. Beräkningarna av massförlusten för alla fuktscenarier gjordes ovanpå den översta lamellen som är den mest utsatta punkten i KL-träplattan för fritt vatten i de valda fuktscenarierna, se röd nod i Figur 3.7 nedan.



Figur 3.7: Tvärsnitt över grunden med utsatt nod.

3.4.1 Scenario 1: Normal fuktbelastning

Scenariot med normala fuktbelastningar undersöker KL-träplattan vid normalt driftfall för att kunna utvärdera dess funktion och lämplighet som grundplatta. Vidare kan detta scenario användas för rimlighetsanalys samt som referensvärde för jämförelse med de olika scenarierna. Relativa fuktigheten samt temperaturen i översta skiktet av plattan beräknas med hjälp av Glasermetoden och används därefter som indata till modellen för massförlust, se bilaga A.9.

3.4.2 Scenario 2: Ökad fuktproduktion inomhus

Scenariot med en ökad fuktproduktion inomhus undersöker hur KL-träplattan påverkas vid en hög luftfuktighet inomhus. I scenariot valdes det ökade fukttillskottet utifrån det maximala värdet för fukttillskott enligt kapitel 2.5.2. Den förhöjda fukthalten inomhus pågår under hela beräkningsperioden men varierar under året, beroende på temperatur. Relativa fuktigheten samt temperaturen i översta skiktet av plattan beräknas med hjälp av Glasermetoden och används därefter som indata till modellen för massförlust, se bilaga A.10.

3.4.3 Scenario 3: Globalt vattenläckage

Detta scenario undersöker hur KL-träplattan påverkas vid vattenläckage då läckan kommer inifrån, till exempel att den installerade utrustningen i köket går sönder. Det globala läckaget definieras som fritt vatten över hela mittbalken, se rött område i Figur 3.2. Tiden då plattan utsätts för fritt vatten från läckaget valdes till två veckor i slutet på Juli, då detta är vanliga semesterveckor och kan innebära att hushållet inte är hemma. Relativa fuktigheten samt temperaturen i översta skiktet av plattan beräknas med hjälp av Glasermetoden och används därefter som indata till modellen för massförlust, se bilaga A.11. I detta scenario bestämdes den relativa fuktigheten till 100% under de två veckor som det globala läckaget antogs uppstå.

Notera att den ökade relativa fuktigheten tvärt slutar och återgår till det normala. Scenariot är visualiserat som att översvämningen startar och tvärt slutar, pga. att beräkningarna som krävs för att beräkna gradvis uppfuktning och uttorkning inte är något som hanteras i detta arbete.

3.4.4 Scenario 4: Lokalt vattenläckage

Detta scenario är visualiserat så att KL-träplattan utsätts för ett lokalt vattenläckage i anslutningen av golvbrunnen i våtrum (Vattenskadecentrum, 2021). För att se tidens inverkan vid vattenläckage utfördes beräkningarna för fyra olika tidsperioder, 1, 4, 12 och 24 veckor. Då ett vattenläckage vid golvbrunnen kan vara gömt och därmed svårt att upptäcka kan ett sådant läckage pågå under en längre tid. Vattenläckage under 4 och 12 veckor kan anses vara mest realistiskt, men även längre perioder med vattenläckage kan förekomma och därav utvärderas också massförlusten för ett läckage som pågår under 24 veckor. Det lokala vattenläckaget definieras som fritt vatten över en del av mittbalken, se Figur 3.8 för en närmare beskrivning. Relativa fuktigheten samt temperaturen i översta skiktet av KL-träplattan beräknas med hjälp av Glasermetoden och används därefter som indata till modellen för massförlust. KL-träplattans temperatur och RF i den översta lamellen redovisas för varje tidsperiod, se bilaga A.12 för 1 veckas vattenläckage, bilaga A.13 för 4 veckors vattenläckage, bilaga A.14 för 12 veckors vattenläckage samt bilaga A.15 för 24 veckors vattenläckage. I indatan för dessa scenarion sätts den relativa fuktigheten till 100% under de fyra tidsperioderna.

Observera att även i detta fall slutar den ökade relativa fuktigheten abrupt och går direkt tillbaka till det normala. Anledningen till att scenariot är modellerat på detta sätt är för att beräkningarna som behövs för att beräkna gradvis uppfuktning och uttorkning inte behandlas i detta arbete.

3.4.5 Generell beräkningsgång för redovisade scenarier

För att uppskatta fukt och lufttemperaturen i grundplattan användes som tidigare nämnt Glasermetoden. Då Glasermetoden är ett endimensionellt stationärt beräkningsverktyg behövs dock definierade randvillkor för temperatur och luftfuktighet. Dessa randvillkor ansattes till inomhusklimatet i huset, samt rådande klimat i marken, under EPS-isoleringen, se bilaga A.7 för inomhustemperaturen respektive bilaga A.6 för marktemperaturen.

För invändiga randvillkor söktes lämplig data för lufttemperaturen och den relativa luftfuktigheten utomhus då dessa är direkt korrelerade till ånghalten inomhus. Beräkningarna utfördes med timvis data från väderstationen Göteborg A år 2022 och dessa parametrar hämtades från SMHI (u. å), se bilaga A.5. Fukttillskottet baserades på den studie som presenterades i kapitel 2.5.2 utifrån rekommenderat designvärde. Vidare antogs inomhustemperaturen inledningsvis till 22°C för utomhustemperaturer lägre än 20°C. För utomhustemperaturer över 20°C liksattes inomhustemperaturen till utomhustemperaturen för att efterlikna de temperaturförhållanden som

råder när fönster och dörrar öppnas i huset. Brytpunkten när människor är villiga att öppna fönster och dörrar baserades på bedömning av Folkhälsomyndigheten (2013), vilket är den temperatur som människor upplever som god termisk komfort. Därtill har enfamiljhus vanligtvis inte kylsystem för att hantera övertemperaturer, varefter inomhus- och utomhustemperatur likställes över 20°C.

För randvillkoren under grunden beräknades marktemperaturen enligt ekvation A.7 i bilaga A.6. Denna temperatur beräknades utifrån medeltemperaturen i luften för de fyra årstiderna (december-februari, mars-maj, juni-augusti, september-november). Därefter ansattes ånghalten i marken till mätnadsånghalten då marken kan antas mycket fuktig.

Med kunskap om temperatur och den relativa fuktigheten inomhus och i marken kunde därefter temperaturfördelningen samt ånghaltsfördelningen i träplattan beräknas, se bilaga A.4. En illustration över temperatur- och ånghaltsfördelningen hittas i bilaga A.3. Därefter beräknas slutgiltig massförlust med ekvationerna från kapitel 2.7.1. Resultaten för massförlusten över de olika scenarierna redovisas med hjälp av grafer.

3.5 Långtidssimulering av nedböjning

Genom att använda lösningen för Boltzmanns superpositionsintegral, som presenterats i tidigare kapitel (se ekvation 2.9), kan den tidsberoende styvheten för de olika lamellerna i KL-träplattan bestämmas. För vinkelrät fiberriktning kan styvheten beräknas med hjälp av ekvation 3.4, medan för fiberriktning kan styvheten beräknas enligt ekvation 3.5.

$$S(t) = \left\{ \frac{1}{S_{el}} + \frac{t_{ref}}{S_{vi}(t_2 - t_1)(\alpha + 1)} \left[\left(\frac{t - t_1}{t_{ref}} \right)^{\alpha+1} - \left(\frac{t - t_2}{t_{ref}} \right)^{\alpha+1} \right] \right\}^{-1} \quad (3.4)$$

$$S(t) = S_{in} + \left\{ \frac{1}{S_{el}} + \frac{t_{ref}}{S_{vi}(t_2 - t_1)(\alpha + 1)} \left[\left(\frac{t - t_1}{t_{ref}} \right)^{\alpha+1} - \left(\frac{t - t_2}{t_{ref}} \right)^{\alpha+1} \right] \right\}^{-1} \quad (3.5)$$

Efter att styvheterna för de olika lamellerna har beräknats kan de summeras för att räkna fram E och därmed bestämma den totala effektiva böjstyvheten $(EI)_{ef}$ i KL-träplattan genom att tillämpa γ -metoden enligt ekvationerna 2.11 och 2.12.

3.5.1 Beaktning av massförlust

De olika fuktscenarierna kommer att medföra en viss procentuell massförlust av plattan. För att ta hänsyn till denna massförlust i beräkningarna av nedböjningen

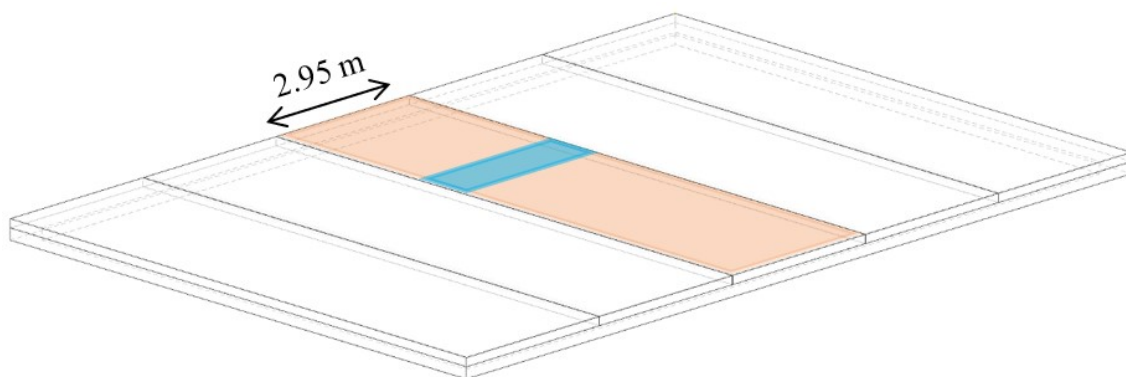
kan man välja ett specifikt område i plattan och minska höjden på detta område. Höjdminskningen är procentuell och dras av från ovansidan av KL-träplattan. Se ekvation 3.6 för beräkning av den nya reducerade höjden. Detta är en förenkling av hur rötsvampen attackerar träelementet, men eftersom den övre sidan är mest utsatta i det givna scenarierna ger det en god uppfattning om rötsvampens påverkan på plattan. En minskning av höjden kommer att påverka både yttröghetsmomentet och reduktionsfaktorn γ . Denna påverkan kommer i sin tur att leda till en högre nedböjning. Nedböjningen kommer att beräknas för en frisk platta och för varje fuktscenario med hjälp av Finita elementmetoden i programvaran MATLAB. Mer specifik information om detta presenteras i kapitel 3.5.2.

$$h_{tot.red} = h_{tot} \cdot (1 - ML) \quad (3.6)$$

3.5.2 Modellering med FEM

När alla parametrar har definierats, såsom balkens styvhet, styvheten för det elastiska underlaget k_y , laster och alla dimensioner, kan slutligen nedböjningen beräknas med hjälp av FEM. Först modellerades en FEM-modell över balken i Figur 3.6 enligt Figur 2.6. Detta gjordes genom att diskretisera balken i 10 element, vilket leder till 11 noder där krafter kan appliceras. Krafterna har applicerats precis enligt Figur 3.6, där balken från nod 1 till nod 10 har applicerats med de utbredda lasterna $q_{KLT} + q_k$. Mellan nod 1 och nod 4 har ytterligare en utbredd last q_1 applicerats, och över nod 4 har punktlasten F applicerats.

Styvheten i varje element i balken har satts till summan av balkstyvheten och fjäderstyvheten från det elastiska underlaget (EPS skivor). Balkstyvheten varierar beroende på om det är en frisk platta eller ett annat fuktscenario. I fuktscenarierna "Lokalt vattenläckage (4v)" och "Lokalt vattenläckage (12v)" har endast ett (av tio) FEM-balkelement fått en reducerad styvhet. Detta innebär att i det lokala läckaget har vattnet täckt en meter av balkspannet, denna meter är placerad mellan 3 m till 4 m. Denna placering har valts eftersom det över det spannet finns ett badrum i referenshuset och där kan man förvänta sig att det ska finnas rör som innehåller vatten. Eftersom balken har ett djup på 2.95 m, innebär detta att vattnet har täckt en yta på totalt 2.95 m², se den ljusblå ytan i Figur 3.8 nedan.



Figur 3.8: Vy över KL-träplattan. Ljusorange: balkelementet som analyseras med Finita elementmetoden. Ljusblå: yta som utsätts för lokalt vattenläckage.

I detta arbete har en beräkning gjorts av massförlusten vid lokala vattenläckage under olika tidsperioder på 1, 4, 12 och 24 veckor. Trots att massförlusten har beräknats under alla fyra tidsperioder har endast styvhetsreduceringen och nedböjningen beräknats för 4 och 12 veckor. Detta beror på att läckage som varar i 4 och 12 veckor anses vara realistiska händelser som skulle kunna inträffa.

Slutligen har randvillkor applicerats i ändnoderna 1 och 10, där den horisontella och vertikala frihetsgraden har låsts i nod 1 och den vertikala frihetsgraden har låsts i nod 10, detta i enlighet med definitionen av en fritt upplagd balk. Uttrycken för detta beskrivs i ekvationen 3.7 nedan enligt konventionen i kapitel 2.8.3.3.

$$u_h^1 = 0, u_v^1 = 0, u_v^{10} = 0 \quad (3.7)$$

Slutligen har varje element diskretiserats ytterligare i 50 element för att få en mer exakt och detaljerad nedböjningsgraf.

4

Resultat

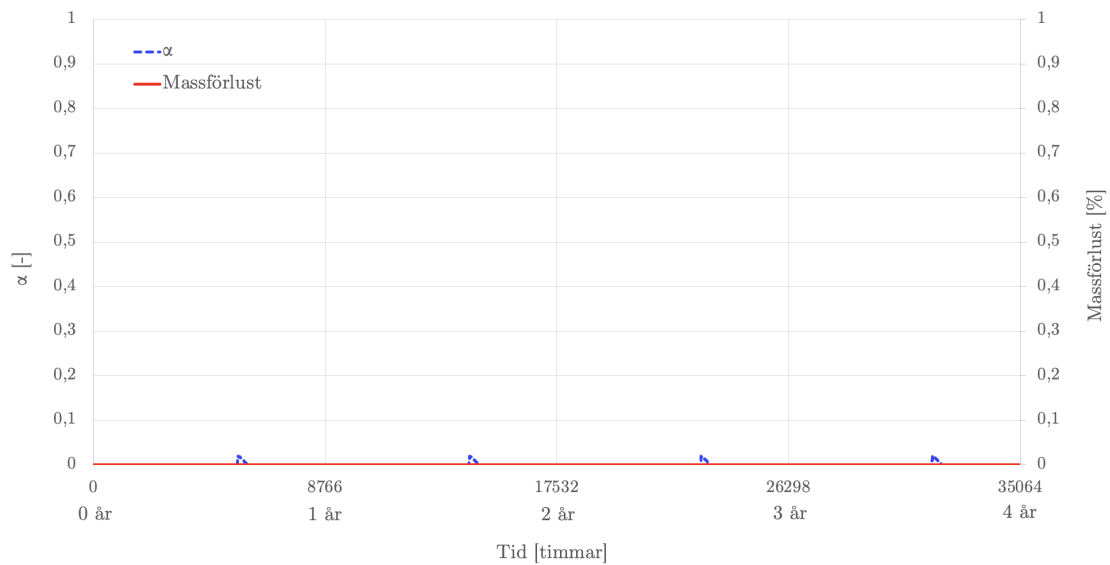
I detta avsnitt presenteras resultaten för beräkningarna av massförlusten för de fyra valda fuktscenarierna. Vidare beräknas styvhetsreduceringen som uppstår från den eventuella massförlusten. Slutligen beräknas nedböjningen för tre olika EPS-skivor med varierande densiteter samt den initiella och den slutliga nedböjningen för en specifikt vald densitet.

4.1 Massförlust av KL-träplattan

För de fyra valda fuktscenarierna, normal fuktbelastning, ökad fuktproduktion samt globalt och lokalt vattenläckage som presenterades i kapitel 3.4 har massförlusten beräknats. Beräkningarna har utförts enligt modellen för massförlust med hjälp av Glasermetoden, se kapitel 2.7.1 respektive kapitel 2.4. Resultaten presenteras i kommande avsnitt i form av figurer.

4.1.1 Scenario 1: Normal fuktbelastning

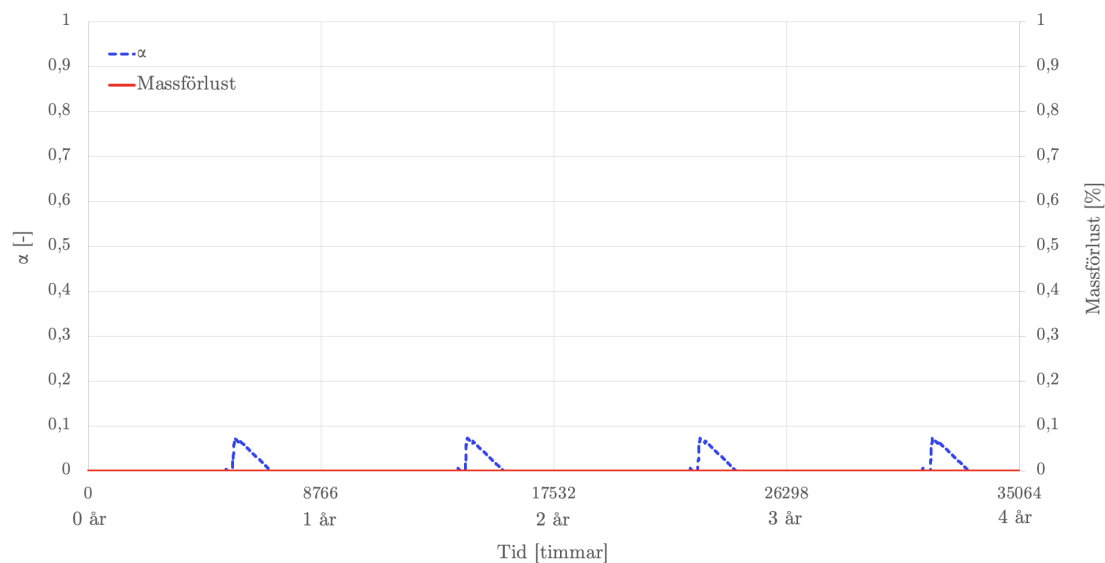
Den modellerade aktiveringsprocessen för rötsvampar, α , samt massförlusten vid normala fuktbelastningar redovisas i Figur 4.1 nedan. Figuren visar att tillväxt av α sker under en period i slutet av sommaren varje år men att massförlusten förblir 0% över hela tidsperioden. Resultatet för massförlusten överensstämmer med beräkningsmodellen då α aldrig når 1 och därmed sker ingen massförlust. Vidare motsvarar resultatet vad tidigare forskning redovisat, att grundplattor av KL-trä uppfyller fuktkraven vid normala belastningar.



Figur 4.1: Modellerad aktiveringsprocess för rötsvampar och massförlust av KL-träplattan vid normala fuktbelastningar. Baserad på den beräknade indata i bilaga A.9 och redovisas timme för timme under en tidsperiod på fyra år.

4.1.2 Scenario 2: Ökad fuktproduktion inomhus

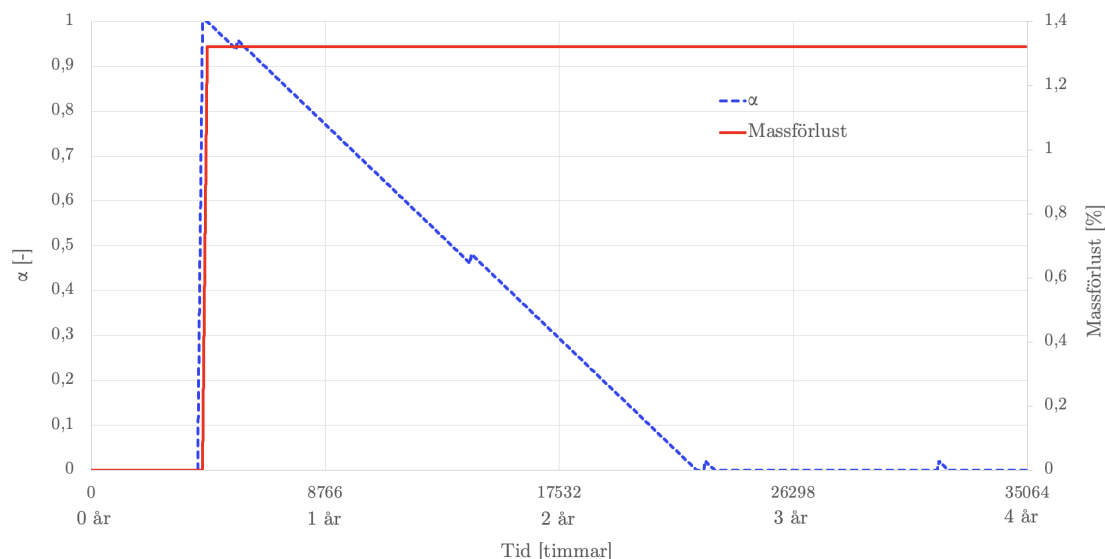
För scenariot med ökad fuktproduktion redovisas den modellerade aktiveringsprocessen för rötsvampar, α , samt massförlusten i Figur 4.2 nedan. I figuren kan det utläsas att α även här under en period i slutet av sommaren varje år ökar men att massförlusten förblir 0% över hela tidsperioden. Vid en jämförelse mellan scenariot med normala fuktbelastningar framkommer det att α blir noterbart större, men att den fortfarande inte ökar från år till år.



Figur 4.2: Modellerad aktiveringsprocess för rötsvampar, α , och massförlust av KL-träplattan vid ökad fuktproduktion inomhus. Baserad på den beräknade indatan i bilaga A.10 och redovisas timme för timme under en tidsperiod på fyra år.

4.1.3 Scenario 3: Globalt vattenläckage

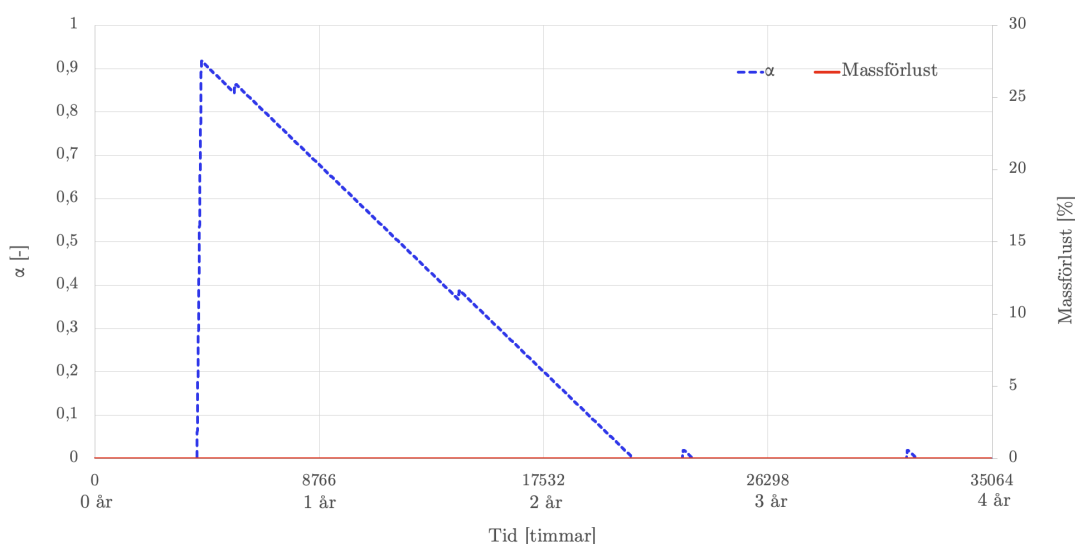
I Figur 4.3 nedan presenteras den modellerade aktiveringsprocessen för rötsvampar, α , samt massförlusten för scenariot vid globalt vattenläckage. Figuren visar att α når 1 under en kortare period, vilket är vid den tidpunkt vattenläckaget inträffar. Vid detta tillfälle fås en massförlust som uppgår till cirka 1.3%, som sedan kvarstår.



Figur 4.3: Modellerad aktiveringsprocess för rötsvampar och massförlust av KL-träplattan vid globalt vattenläckage. Baserad på den beräknade indatan i bilaga A.11 och redovisas timme för timme under en tidsperiod på fyra år.

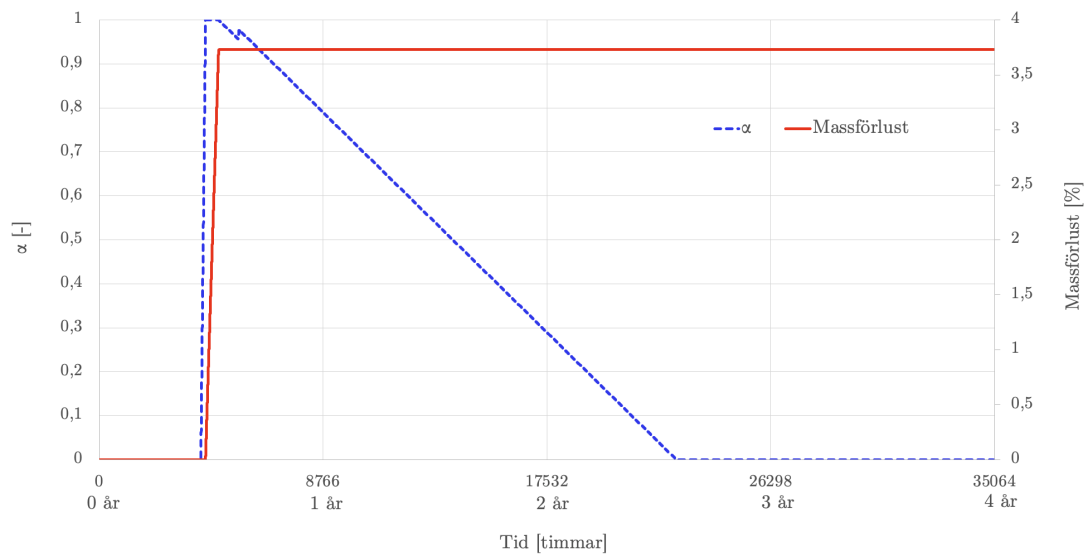
4.1.4 Scenario 4: Lokalt vattenläckage

Modellerad aktiveringsprocess för rötsvampar, α , samt massförlusten vid ett lokalt vattenläckage som pågick under 1 vecka redovisas i Figur 4.4 nedan. Figuren visar att α ökar kraftigt då vattenläckaget uppstår men når aldrig 1. Därmed blir massförlusten för det här scenariot 0%.



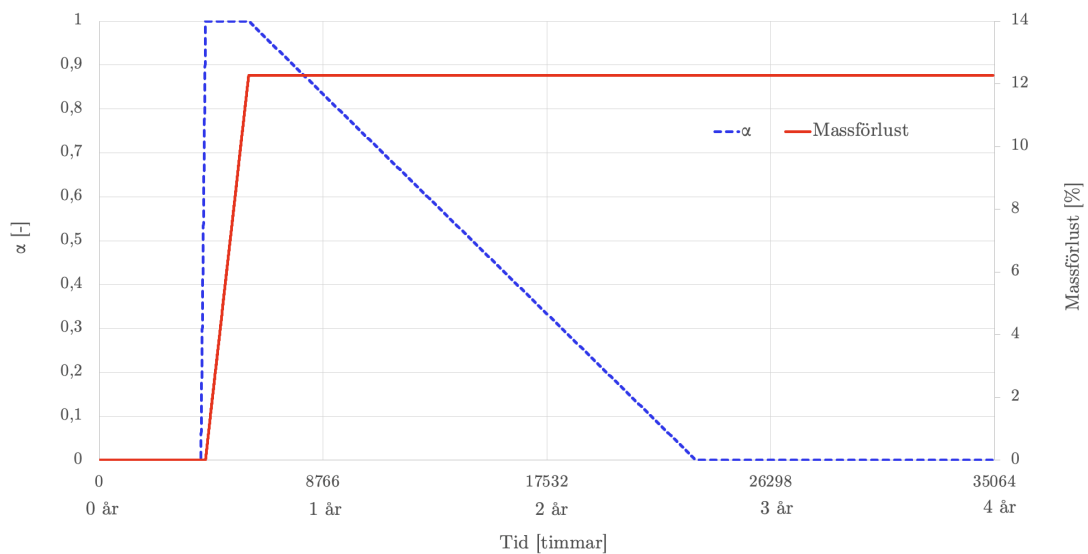
Figur 4.4: Modellerad aktiveringsprocess för rötsvampar och massförlust av KL-träplattan där plattan utsätts för lokalt vattenläckage under 1 vecka. Baserad på den beräknade indatan i bilaga A.12 och redovisas timme för timme under en tidsperiod på fyra år.

Figur 4.5 nedan illustrerar den modellerade aktiveringsprocessen för rötsvampar, α , samt massförlusten för ett lokalt vattenläckage som pågår under 4 veckor. När läckaget inträffar visar figuren att α uppnår 1, vilket sker 182 timmar efter att läckaget börjat. Detta leder till att massförlust uppkommer. Massförlusten för detta scenario uppgår till cirka 3.7%.



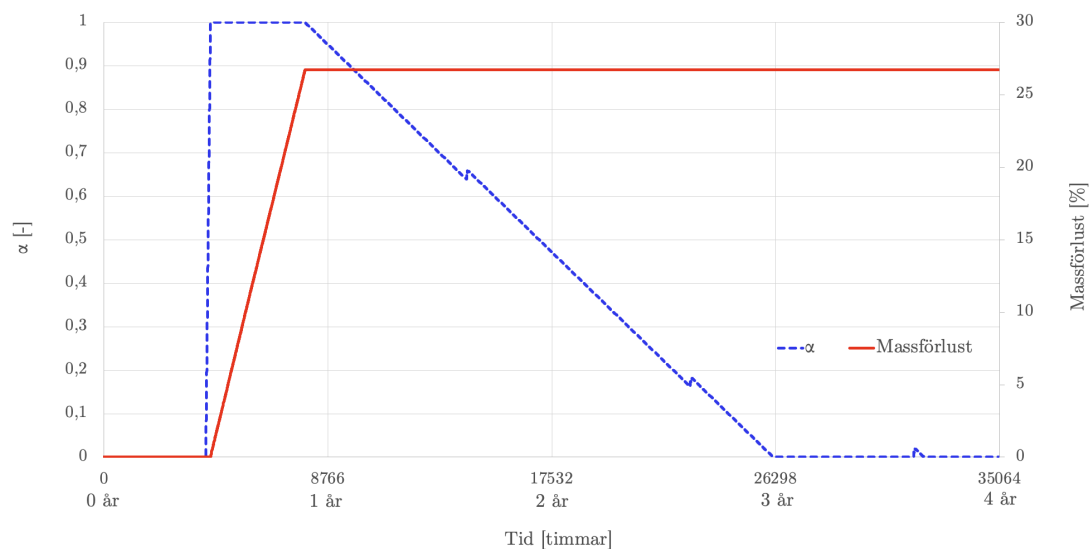
Figur 4.5: Modellerad aktiveringsprocess för rötsvampar och massförlust av KL-träplattan där plattan utsätts för lokalt vattenläckage under 4 veckor. Baserad på den beräknade indatan i bilaga A.13 och redovisas timme för timme under en tidsperiod på fyra år.

Modellerad aktiveringsprocess för rötsvampar, α , samt massförlusten vid ett lokalt vattenläckage som pågick under 12 veckor redovisas i Figur 4.6 nedan. Figuren visar att α når 1 under en längre period än för vattenläckaget som pågick under 4 veckor, vilket är förväntat. Massförlusten för detta scenario uppgår till cirka 12.3%.



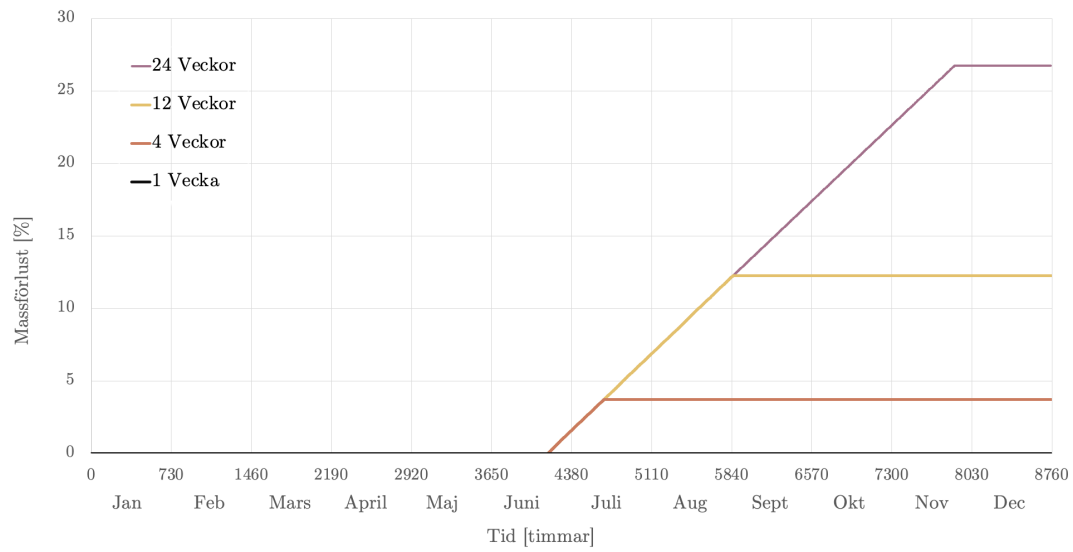
Figur 4.6: Modellerad aktiveringsprocess för rötsvampar och massförlust av KL-träplattan där plattan utsätts för lokalt vattenläckage under 12 veckor. Baserad på den beräknade indatan i bilaga A.14 och redovisas timme för timme under en tidsperiod på fyra år.

Figur 4.7 nedan illustrerar den modellerade aktiveringsprocessen för rötsvampar, α , samt massförlusten för ett lokalt vattenläckage som pågår under 24 veckor. Figuren visar att α uppnår 1 under en period då läckaget inträffar. Detta resulterar i en massförlust på cirka 26.7%.



Figur 4.7: Modellerad aktiveringsprocess för rötsvampar och massförlusten av KL-träplattan där plattan utsätts för lokalt vattenläckage under 24 veckor. Baserad på den beräknade indatan i bilaga A.15 och redovisas timme för timme under en tidsperiod på fyra år.

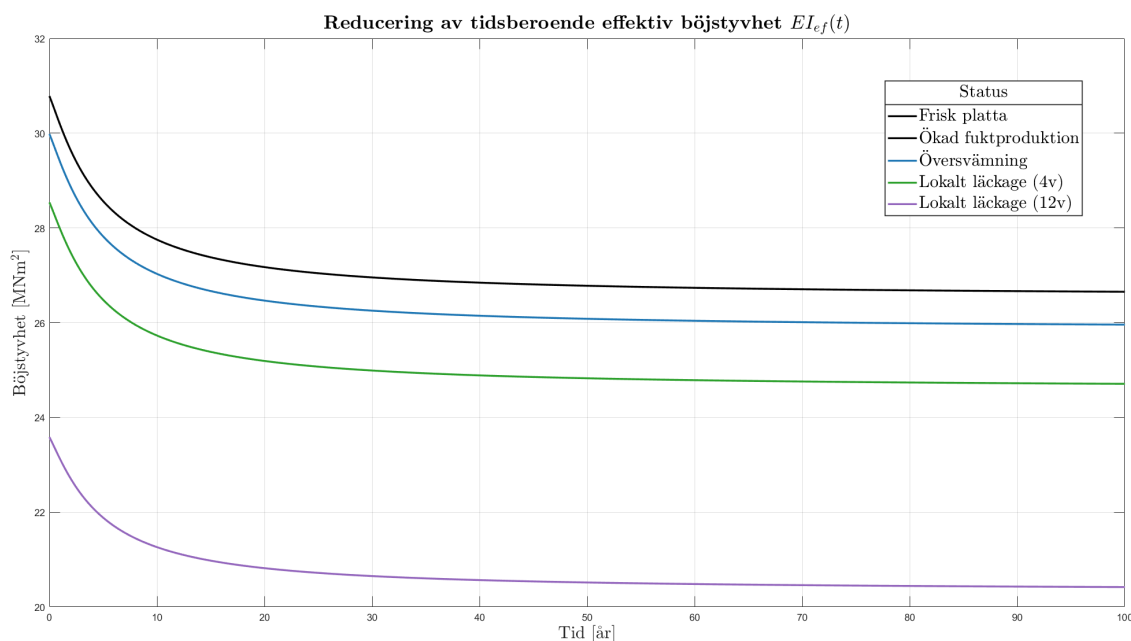
Figur 4.8 är en sammanställning och visar en översiktlig figur för utvecklingen av massförlust under det första året för ett lokalt vattenläckage som pågår under fyra olika tidsperioder, 1, 4, 12 och 24 veckor. I figuren framgår det att massförlusten ökar då tiden för vattenläckaget ökar, medan för 1 vecka uppkommer ingen massförlust. Notera att α inte är modellerad i figuren utan redovisas för varje tidsperiod i Figur 4.4 - 4.7.



Figur 4.8: Massförlust av KL-träplattan då den utsätts för lokalt läckage i 1, 4, 12 och 24 veckor. Baserad på den beräknade indatan i bilaga A.12 - A.15 och redovisas timme för timme under en tidsperiod på ett år.

4.2 Styvhetsreducering

Styvhetsreducering för en frisk platta samt olika fuktscenarier har simulerats över en period på 100 år och presenteras i Figur 4.9 nedan. Observera att detta är den effektiva böjstyvheten $(EI)_{ef}$. Både en frisk platta och scenariot med ökad fuktproduktion har en massförlust på 0%, vilket innebär att båda graferna har samma styvhet över åren och därför har samma färg, svart graf.



Figur 4.9: Reducering av effektiv böjstyvhet för en frisk platta och fem olika fuktscenarier över en period på 100 år.

Samma resultat som presenteras i Figur 4.9 ovan presenteras nedan i en tabell för förtydligande av minskningen över åren. Från tabell 4.1 går det att se att den största delen av styvhetsreduceringen sker inom de första tio åren. Detta på grund av den negativ-exponentiella formen på styvhetsreduceringsgraferna.

Tabell 4.1: Böjstyvhet för frisk platta och alla undersökta fuktscenarier för år 0, 10 och 100. Observera att styvheten presenteras i enheten $[MNm^2]$.

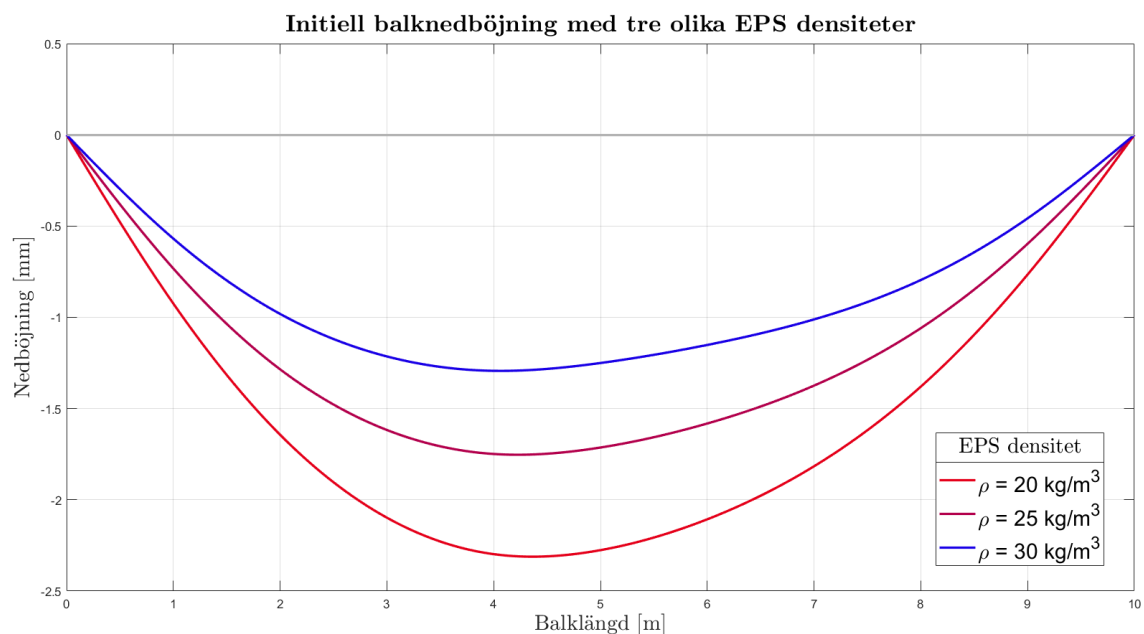
Status	0 år	10 år	10 års minskning	100 år
Frisk platta	30.8	27.8	73%	26.7
Ökad fuktproduktion	30.8	27.8	73%	26.7
Översvämning	30.0	27.0	75%	26.0
Lokalt läckage (4v)	28.5	25.7	74%	24.7
Lokalt läckage (12v)	23.6	21.3	72%	20.4

4.3 Nedböjning

Nedböjningen av KL-träplattan har beräknats med hjälp av FEM för olika densiteter av EPS-skivor, samt för en frisk platta och olika fuktscenarier. Både den initiella nedböjningen och nedböjningen efter 100 år kommer att presenteras.

4.3.1 Nedböjning vid olika EPS

Den initiella nedböjningen av träplattans mittsektion presenteras i Figur 4.10 för tre olika typer av EPS-skivor. Figur 4.10 visar att formen på nedböjningen inte är helt parabolisk på grund av den asymmetriska lastplaceringen. Dessutom ökar nedböjningen med lägre densitet på EPS-skivorna. Detta är både intuitivt och förväntat eftersom EPS-skivor med lägre densitet har också lägre styvhet. Från figuren framgår också att den högsta initiella nedböjningen för de olika densiteterna är cirka 1.3 mm, 1.8 mm och 2.3 mm.



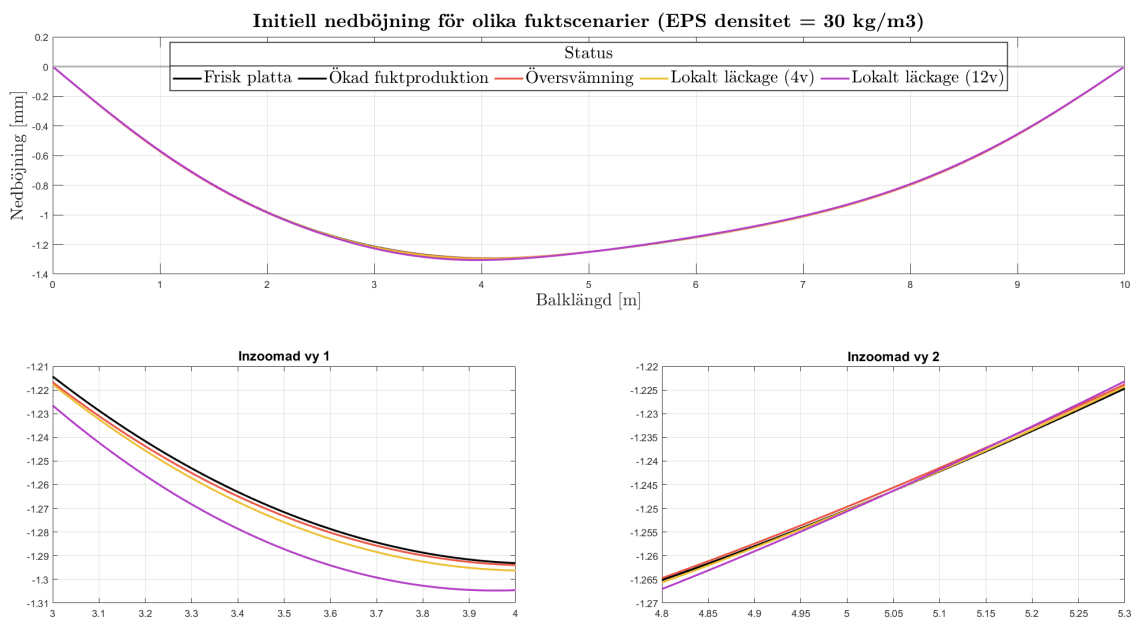
Figur 4.10: Initiell nedböjning av KL-träplattans mittsektion för tre olika EPS-densiteter. Denna nedböjning avser en frisk platta.

Från Figuren 4.10 ovan går det också att se att den högsta nedböjningen inträffar vid olika ställen i balken beroende på styvheten av det elastiska underlaget.

4.3.2 Initiell nedböjning

I Figur 4.11 presenteras nedböjningen av KL-träplattans mittsektion. För att beräkna nedböjningen har EPS med densitet $\rho = 30 \text{ kg/m}^3$ valts. Nedböjningen har plottats för en frisk platta (svart graf) samt fyra olika fuktscenarier. Fuktscenariot med ökad fuktproduktion har tidigare beräknats ge 0% massförlust, vilket gör att grafen för den helt och hållet överlappar med den friska plattans graf och båda graferna är därmed svarta. Högst massförlust fås vid fuktscenariot med ett lokalt vattenläckage som pågår under 12 veckor och har färgen mörk fuchsia i figuren. Figur 4.11 innehåller, utöver en plot för nedböjningen av hela balklängden, även två andra delploster som är inzoomade vyer vid specifika ställen av nedböjningen.

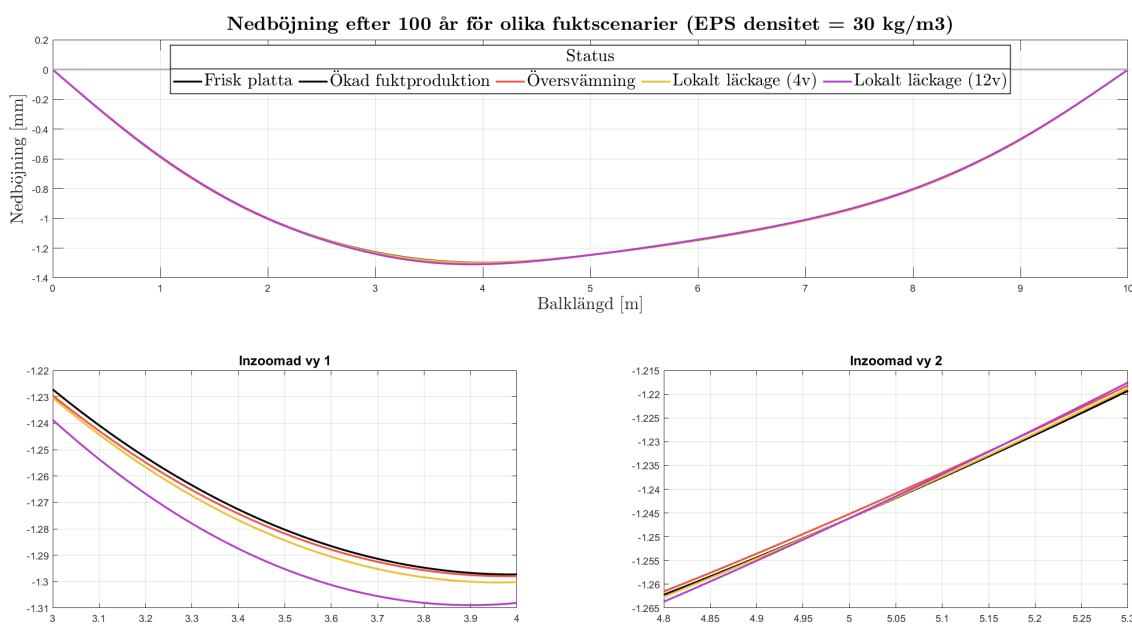
Den första inzoomade rutan (vy 1) visar den metern av balken (3-4 m) som är drabbad av det lokala läckaget. Det kan observeras att nedböjningen når sitt maximum under den metern, för samtliga graferna. Den andra inzoomade rutan (vy 2) visar stället där grafen för det lokala vattenläckaget som pågår 12 veckor (mörk fuchsia färg) går om de andra graferna. Detta är viktigt att observera då nedböjningen skiljer sig marginellt mellan de olika fuktscenarierna, men formen på nedböjningen skiljer sig mellan de olika fuktscenarierna. Från Figur 4.11 går det att observera, speciellt med hjälp av den andra inzoomade rutan (vy 2), att grafen för det lokala läckaget under 12 veckor har en mer komplex form (högre andraderivata) än grafen för en frisk platta och ökad fuktproduktion, som har en mer parabolisk-liknande form. Detta innebär att formen på nedböjningen blir mer komplex för fallen med högre massförlust. Med andra ord får nedböjningen en mer komplex form ju mindre styvhet plattan har.



Figur 4.11: Initiell nedböjning av KL-träplattans mittsektion med EPS av densitet $\rho = 30 \text{ kg/m}^3$. Denna nedböjning avser en frisk platta och olika fuktscenarier.

4.3.3 Nedböjning efter 100 år

Nedböjningen efter 100 år för en frisk KL-träplatta och olika fuktscenarier presenteras i Figur 4.12 nedan. Nedböjningen är ungefär densamma som den initiella (år 0), det som skiljer sig är formen på nedböjningen. Efter 100 år har både en frisk platta samt alla fuktscenarier en lägre styvhet. Detta medför i sin tur till att alla grafer får en något mer komplex form. Grafen för det lokala vattenläckage som pågår 12 veckor (mörk fuschia färg) har nu fått en ännu mer komplex form än i den initiella nedböjningen i Figur 4.11. Detta beror på att grafen nu, efter 100 år, har fått en styvhetsreducering som leder till en mer komplex form, som tidigare har konstaterats. Figur 4.12 innehåller, utöver en plot för nedböjningen av hela balklängden, även två andra delplotter som är inzoomade vyer vid specifika ställen av nedböjningen.



Figur 4.12: Nedböjning efter 100 år av KL-träplattans mittsektion med EPS av densitet $\rho = 30 \text{ kg/m}^3$. Denna nedböjning avser en frisk platta och olika fuktscenarier.

5

Diskussion och slutsats

I detta avsnitt presenteras arbetets diskussion samt slutsats, vilket innefattar en analys av resultat, förslag på eventuella åtgärder, utvärdering av nyttjade teoretiska modeller, samt förslag för framtida arbeten.

Arbetet syftade på att bedöma hur en korslimmad grundplatta presterar med avseende på nedbrytningsprocesser, mer specifikt den mekaniska nedbrytningen till följd av fuktbetingade rörelser, långtidseffekter, samt undersöka risken för biologisk nedbrytning av varierande termiska- och fuktmässiga förhållanden. Därefter öka förståelsen kring lämpligheten att använda KL-trä som teknik för en grundplatta, samt dess byggnadsfysikaliska egenskaper och åtgärder som eventuellt skulle vara lämpliga att implementera om fuktskador uppstår.

Detta gjordes genom befintliga modeller samt utveckling av egna beräkningsmodeller, som därefter användes för att göra beräkningar för att bedöma plattans prestation. Arbetet gjordes med förenklade metoder där inga verkliga experiment förekom, därför är de presenterade resultaten inte verifierade med verkliga undersökningar.

5.1 Utvärdering av resultat

Resultatet för beräkningarna av massförlust av KL-träplattan visar att massförlust endast sker vid två av fuktscenarierna, globalt läckage och lokalt läckage som pågår under 4 veckor eller längre. I resterande fuktscenarion når α aldrig 1 och därmed fås ingen massförlust. Vid en jämförelse mellan de olika scenarierna framgår det att massförlusten blir större då tiden för ökade fuktbelastningar ökar, vilket är ett förväntat resultat. Ytterligare framgår det i resultatet att rötsvamparna aktiveras vid flera tidpunkter, vilket innebär att det råder sådana förhållanden att både mögel och rötsvamp kan etablera sig.

Vid upptäckt av vattenläckage förutsätter detta arbete att intensiva åtgärder snabbt sätts in för att minimera konsekvenserna av fuktskadan. Därav antas plattan direkt efter identifiering av vattenläckaget återfinna sig i fuktjämnvikt med sin omgivning. Detta är ett förenklat antagande då fuktutorkningsprocessen är en komplex process som inte bara kräver att den fukt som ligger ovanpå plattan torkas ut. Det krävs också att den fukt som trängt längre in i materialet kan röra sig ut, vilket kan ta betydligt längre tid. Det skulle därför varit intressant att modellera en naturlig utorkningsprocess av plattans RF för respektive scenario. Detta skulle öka den totala

massförlusten något och skulle samtidigt vara en mer realistisk uppskattning av hur uttorkningsprocessen sker, men på grund av tidsbrist har det förenklade antagandet tillämpats.

Vidare sker den största delen av styvhetsreduceringen under de tidiga åren vilket syns i resultatet, se Figur 4.9. Där drygt 70% av styvhetsreduceringen för träplattan har ägt rum under de första 10 åren av de totalt 100 år som har simulerats. Detta på grund av att styvhetsreduceringen sker på ett negativ-exponentiellt sätt, det vill säga att grafen planar ut med tiden.

Baserat på resultaten kan man observera att nedböjningen av träplattan ökar när styvheten på det elastiska underlaget (EPS-skivorna) minskar och vice versa. Nedböjningen ökar när lasten ökar, och minskar när lasten minskar. Således är storleken på nedböjningen beroende av både lasten och EPS-styvheten. Denna slutsats är intuitiv och förväntad.

En annan mindre intuitiv slutsats är att storleken på nedböjningen inte påverkas när balkens böjstyvhets EI minskar (på grund av olika fuktscenarier eller långtidseffekter). Dock ändras formen på nedböjningen när styvheten ändras. Ju lägre styvhet träplattan har, desto mer komplex form får nedböjningen. För att förstå detta behöver man titta på andraderivatan av nedböjningen (som beskriver formen på grafen) samt vad den beskriver, se ekvation 5.1 nedan.

$$|M| = EIw'' \quad (5.1)$$

Utifrån ekvationen kan man se att böjmomentet M är proportionell mot produkten av böjstyvheten EI och andraderivatan av nedböjningen. När styvheten EI reduceras minskar böjmomentet M men eftersom grafen får en mer komplex form, ökar andraderivatan. Det visar sig att andraderivatan ökar mer än vad böjstyvheten minskar, vilket resulterar i att böjmomentet ökar. Således är slutsatsen att när styvheten minskar, ökar böjmomentet.

För att förstå beteendet av nedböjningsformen har vi undersökt hur styvheten påverkar formen. För att undersöka detta har styvheten reducerats och ökat extremt mycket ($\pm 90\%$). Genom att reducera styvheten extremt mycket har nedböjningsgraferna fått en mycket mer komplex form medan en extrem ökning av styvheten har resulterat i en helt parabolisk nedböjningsgraf. Dessa extrema skillnader i styvhet har inte presenterats i resultatdelen eftersom de inte relaterar till något specifikt fuktscenario samt är inte en del av arbetet. Det är viktigt att notera att dessa experiment utfördes endast för att förstå korrelationen mellan böjstyvheten och komplexiteten i nedböjningsformen för KL-träplattan på ett ännu bättre sätt. Detta påverkar inte resultaten för fuktscenarierna som presenteras i arbetet.

En lägre styvhet på träplattan innebär att dess nedböjningsform blir mer komplex,

vilket resulterar i en högre kurvatur och ökad böjning. Detta kan leda till att träplattan utsätts för högre spänningar, vilket i sin tur kan leda till sprickbildning och andra skador i träet. Därför är det viktigt att beakta träplattans styvhet vid dimensionering av denna typ av fundament, för att säkerställa att den utsätts för lämpliga belastningar och att risken för skador minimeras. Vidare kan resultatet också bidra till en bättre förståelse av hur korslimmat trä beter sig under olika belastningar och hur det kan påverkas av olika faktorer, vilket kan vara värdefullt för utvecklingen av nya och förbättrade typer av träfundament och generellt träbaserade material.

5.2 Förslag på eventuella åtgärder

En åtgärd för att minska komplexiteten i nedböjningsformen och därmed minimera risken för sprickbildning är att behålla den ursprungliga styvheten och undvika att minska den. Detta kan uppnås genom att undvika scenarier som kan orsaka extrema fuktnivåer, exempelvis lokala läckage där vattnet ligger kvar under en längre tid (mer än 3 månader). Det kan finnas flera orsaker till varför vattnet kan ligga kvar så länge, till exempel om man har varit bortrest under en längre tid och ett läckage inträffar. Ett annat skäl kan vara att läckaget är gömt. En annan åtgärd för att behålla styvheten på en KL-träplatta med en fast längd och laster, även om ett läckage inträffar, är att öka tjockleken på plattan. Detta ökar också den ursprungliga styvheten. Så även om en KL-träplatta utsätts för ett läckage, kommer styvheten inte att minska lika mycket som för en platta med mindre höjd.

Resultaten av arbetet visar att åtgärder för vissa oförutsägbara händelser troligen behövs, dock är det svårt att motverka att alla händelser av den typen uppkommer. Man hade däremot kunnat implementera förebyggande åtgärder som hade kunnat minimera risken och konsekvenserna vid en sådan händelse. En åtgärd skulle kunna vara att använda fuktskyddsmembran ovanpå KL-träplattan då den kan agera som ångbroms vid höga fuktbelastningar inifrån, samt förbättrat plattans motstånd för fuktintrång av fritt vatten. Å andra sidan kan ett fuktskyddsmembran hindra plattans uttorkningsförmåga om fuktinträngning uppstår, både under byggskedet samt bruksstadiet. Vidare skulle en annan förebyggande åtgärd vara att implementera sensorer i träplattan, vilket skulle kunna ge möjligheten att snabbt upptäcka avvikande fuktförhållanden och då eventuellt lokalisera och åtgärda problem som uppstått. Ytterligare förebyggande åtgärder som kan minimera risken för fuktskador är en effektiv ventilation samt en välplanerad dränering.

Om fuktinträngning skulle ske finns alternativa lösningar så som installation av fläktar eller byte av lokala delar i KL-träplattan. Det är dock noterbart att fläktar inte alltid är en lösning som åtgärdar hela problemet, då det finns risk för att mikrobiell tillväxt redan startat. Om ett sådant scenario uppkommer är det troligtvis nödvändigt att byta ut lokala delar av plattan. Under litteraturstudien för detta arbete framkom det dock inte någon information angående ersättning av lokala delar, därav är det svårt att bedöma lämpligheten och genomförbarheten av detta. Ett förslag är att vid projektering vara noga med att inte sätta rör under bärande element eller

väggar så att det potentiellt skulle kunna gå att byta ut en del av elementet. En annan lösning skulle kunna vara att projektera för ökad tjocklek av KL-träplattan, speciellt under bärande element eller väggar, så att hållfastheten förblir hög. En fundering som saknar belägg är att man även skulle kunna ha en luftspalt mellan rör och platta, för att förenkla vid ett byte av lokala delar i KL-träplattan.

5.3 Utvärdering av teoretiska modeller

En problematisk notering är den beräknade relativa fuktigheten i översta skiktet av KL-träplattan som vid ett flertal tillfällen stiger till nästan 100%. För en grundplatta är detta inte acceptabelt då det föreligger stor risk för biologiska angrepp och kondensation. Här föreligger det dock problem med beräkningsmetoden då randvillkoren för ånghalt uppdateras timme för timme, samtidigt som Glasermetoden är avsedd för beräkningar vid stationära endimensionella förhållanden. Då fukttransporten över KL-träplattan är en långsam process hinner inte stationära förhållanden infinna sig innan beräkning för nästa randvillkor genomförs. Konsekvensen av detta är en över- och underestimation i resultatets ånghalt för de värden som avviker från förväntad ånghalt. Vidare tar Glasermetoden inte heller hänsyn till kapillärsugning, fuktkapacitet eller luft rörelser, vilket bidrar till ytterligare osäkerheter.

Ett förslag för att motverka problemet med att Glasermetoden är avsedd för endimensionella stationära beräkningar hade möjligtvis varit att använda längre tidsintervaller, eller ett medelvärde. Å andra sidan hade detta varit en förenkling av de förhållanden som råder. Eventuellt hade en implementering av avancerade datorverktyg som exempelvis WUFI kunnat ta hänsyn till de icke-stationära förhållandena och således ge ett mer korrekt resultat. WUFI är dock ett beräkningsverktyg som kräver kunskap om fuktmekanik och programvarans beräkningsmetodik, vilket vi studenter saknar. Därmed hade arbetet blivit alltför tidskrävande samt skiftat fokus från det huvudsakliga syftet och detta hade sannolikt kunnat resultera i felaktiga antaganden och resultat.

En noterbar observation är den mycket stora massförlust som påvisas vid lokalt vattenläckage under 24 veckors tid. Då massförlusten uppgår till 27% försvinner den översta lamellen i grunden. Samtidigt fortsätter beräkningarna i Glasermetoden att göras utifrån den översta lamellen som efter 24 veckors tid inte längre existerar vilket inte kan anses realistiskt. Att massförlusten är så pass stor väcker också frågan om modellens förmåga att uppskatta rötsvampens utveckling vid höga temperaturer. För att validera formelns trovärdighet bör fler experimentella studier genomföras vid högre temperaturer. Ytterligare en felfaktor som kan förklara den kraftiga massförlusten är faktumet att beräkningsmodellen är framtagen för små provkroppar och att en korrigeringsfaktor hade behövts för att på korrekt sätt beskriva massförlusten för större träelement.

I arbetet antas konstanta förhållanden för temperaturen och fukthalten för att kunna använda Boltzmanns superpositionsintegral. Detta är orealistiskt, då temperatur

och därmed relativ fuktighet varierar över dygn och årstider. För att få ett mer verklighetsenligt värde behövs en metod som tar hänsyn till dessa förändringar, eller experimentella studier som ger data för hur fukt- och temperaturförändringar inverkar på styvhet. Dock tas hänsyn till massförlust vilken är orsakad av fukt, och dess påverkan på nedböjningen. Trots detta hade ytterliggare studier behövt utföras för att undersöka plattans ursprungliga styvhet vid inverkan av fuktförändringar utan massförlust.

Då modellen i FEM som används vid beräkningarna är en simplificerad modell av verkligheten finns vissa brister. Ett exempel på detta är anslutningarna som sammanfogar de olika elementen, dessa har inte beaktats i modelleringen. Anslutningarna skulle kunna ha en inverkan på nedböjningen, vilket kan vara av intresse. Ett annat exempel är att modellen står på ett hårt underlag vilket inte heller har beaktats. En mer realistisk modell skulle kunna inkludera marken och makadamlagret som EPS skivorna vilar på. Dessa lager skulle kunna modelleras i FEM som fjädrar som sedan seriekopplas, där varje fjäder representerar ett lager i grunden med en viss styvhet. Dock är det värt att notera att en grund av tillexempel lera inte beter sig exakt som en fjäder. Vid av- och pålastning kommer inte leran att fjädra tillbaka som en fjäder gör. Därför skulle man, för lager som dessa, istället kunna modellera som en fjäder med dämpare (engelska: spring with dashpot), då dessa inte instant åker tillbaka till ursprungsläget om last tas bort - något som representerar leran och makadamlagret på ett mer realistiskt sätt.

5.4 Bedömning av KL-träplattans lämplighet

Att använda en korslimmad träplatta som grund till ett enfamiljshus kan vara ett lämpligt alternativ under normala förhållanden. Korslimmat trä är starkt och stabilt, vilket gör det till ett bra alternativ som grund till ett enfamiljshus. Det är dock viktigt att vara medveten om de potentiella riskerna kring fuktrelaterade problem, som kan uppstå i grunden. Om fukten får chans att tränga in i träet, som till exempel i de presenterade fuktscenarierna, kan det orsaka röta, som kan försvaga strukturen och minska dess livslängd. Den förhöjda relativa fuktigheten i träet kan också bidra till att mögelsvampar uppkommer, vilket kan innebära en hälsorisk för de boende.

Det är därför viktigt att vid dimensionering av grunden ta hänsyn till eventuella fuktproblem som kan uppstå och att etablera lämpliga åtgärder för att hantera dessa. Några åtgärder som kan minimera risken för fuktskador är till exempel en välplanerad dränering, ett invändigt fuktskyddsmembran samt en effektiv ventilation. Det är också viktigt att kontinuerligt övervaka grundens tillstånd, till exempel genom att installera sensorer som mäter fukthalten i grunden i realtid, och vid behov utföra underhållsarbete för att säkerställa dess långsiktiga hållbarhet.

Vid dimensioneringen av en grund i korslimmat trä är det också viktigt att ta hänsyn till eventuella belastningar som kan uppstå under byggnadens livslängd. En grund

som är för svag kan leda till komplex form på nedböjning och därmed sprickbildning, vilket kan orsaka allvarliga problem för grundens struktur. Det är därför viktigt att grundens dimensioner och styrka är tillräckliga för att klara av belastningarna som kommer att uppstå under byggnadens livslängd.

Sammanfattningsvis kan en korslimmad träplatta vara en lämplig lösning som grund till ett hus, under förutsättning att man är medveten om de potentiella riskerna med fuktrelaterade problem och vidtar lämpliga åtgärder för att hantera dessa. En välplanerad och korrekt dimensionerad grund i korslimmat trä kan bidra till att skapa en hållbar och långsiktig lösning för ett enfamiljshus.

5.5 Förslag för framtida arbeten

För framtida arbeten kan en koppling mellan bruksstadiet och byggskedet förbättras genom att ta hänsyn till den eventuella fukten som redan finns i KL-träplattan vid byggstart. En möjlig metod för att uppnå detta är genom att beräkna massförlusten på ett liknande sätt som gjorts i detta arbete, men med tillägg av en initiell fukthalt. Ett annat sätt att undersöka detta är genom experimentella studier där fukthalten i KL-träplattor mäts i nybyggda hus. Att ta hänsyn till fukten i träet vid byggstart skulle kunna öka förståelsen för hur fukten kan påverka de byggnadsfysikaliska egenskaperna hos KL-träplattor över tid.

Ett förslag på ett framtida arbete, som ligger utanför omfattningen av ett kandidatarbete, är att modellera KL-träplattan som en 3D FEM-modell. Det skulle också vara värt att modellera makadamlagret och leran under EPS-skivorna för att göra modellen mer realistisk. En sådan modellering skulle ge mer verklighetsnära värden på nedböjning, spänningar och moment- och kurvaturfördelning. Att modellera en 3D FEM-modell av KL-träplattan skulle ge möjlighet att undersöka hur den påverkas av olika belastningar, underlag och fuktscenarier.

För att kunna bedöma lämpligheten hos en KL-träplatta är det viktigt att undersöka ytterligare områden, särskilt när det gäller åtgärder som kan behöva vidtas vid oförutsägbara händelser. Ett exempel på detta kan vara att installera sensorer i grunden som kan mäta fukt och temperatur i realtid för att snabbt identifiera fuktproblem. För att hitta fler innovativa och förebyggande åtgärder behövs dock ytterligare forskning. Dessutom krävs det mer avancerade simuleringar av plattans hållfasthet för att bedöma genomförbarheten av åtgärder som att byta ut lokala delar.

Litteratur

- Austriell, P.-E., Dahlblom, O., Lindemann, J., Olsson, A., Olsson, K.-G., Persson, K., Petersson, H., Ristinmaa, M., Sandberg, G., & Wernberg, P.-A. (2004). *CALFEM Finite Element Toolbox Version 3.4*. www.solid.lth.se/fileadmin/hallfasthetslara/utbildning/kurser/FHL064_FEM/calfem34.pdf
- Ausweger, M., Binder, E., Lahayne, O., Reihnsner, R., Maier, G., Peyerl, M., & Pichler, B. (2019). Early-Age Evolution of Strength, Stiffness, and Non-Aging Creep of Concretes: Experimental Characterization and Correlation Analysis. *Materials*, 14(7).
- Baric, R., & Johansson, B. (2022). *Platta på mark av KL-trä - En studie om fukt-säkerhet och klimatpåverkan* [Masteruppsats, Lunds Universitet]. <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=9097695&fileId=9097724>
- Binder, E., Derkowski, W., & Bader, T. (2022). Development of Creep Deformations during Service Life: A Comparison of CLT and TCC Floor Constructions. *Buildings*, 239. <https://doi.org/10.3390/buildings12020239>
- Bloom, E., Bok, G., & Theorin, M. (2022). Mögel och hälsa i byggnader, en litteratursammanställning för träbyggnadsindustrin.
- Boltzmann, L. (1878). Zur Theorie der elastischen Nachwirkung. *Annalen Der Physik*, 241. <https://doi.org/10.1002/andp.18782411107>
- Boverket. (2020). Boverkets byggregler (2011:6) – föreskrifter och allmänna råd, BBR. <https://www.boverket.se/sv/lag--ratt/forfattningssamling/gallande/bbr---bfs-20116/>
- Brandner, R. (2013). Production and Technology of Cross Laminated Timber (CLT): A state-of-the-art Report. *Conference Paper*.
- Burström, P., & Nilvér, K. (2019). *Byggnadsmaterial*. Studentlitteratur AB, Lund.
- Dahlblom, O., & Olsson, K.-G. (2015). *Strukturmekanik - Modellering och analys av ramar och fackverk* (2. utg.). Studentlitteratur AB.
- Eitelberger, J., Bader, T., de Borst, K., & Jäger, A. (2012). Multiscale prediction of viscoelastic properties of softwood under constant climatic conditions. *Com-*

putational Materials Science, 55. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.11.033>

- Euler, L. (1744). Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudentes, sive solutio problematis isoperimetrici lattissimo sensu accepti. *Commentarii academiae scientiarum Petropolitanae*, 24.
- Ewing, A. (2003). *En liten bok om mögel*. Skansen Byggnadsvård.
- Folkhälsomyndigheten. (2013). Temperatur inomhus (handbok). <https://www.folkhalsomyndigheten.se/publikationer-och-material/publikationsarkiv/t/temperatur-inomhus/>
- Gustafsson, A. (2017). *KL-Trä Handbok*. Skogsindustrierna, Svenskt Trä.
- Gustafsson, A. (2019). *Trägrund* (tekn. rapport RISE Rapport 2019:107). Research Institutes of Sweden. <https://www.bioinnovation.cdn.triggerfish.cloud/uploads/2018/11/19-11-14-trgrund-teknik-egenskaper-produktion.pdf>
- Gustafsson, K. K. (2020). *En fallstudie avseende fuktegenskaper och projekteringsmöjligheter för en grundplatta på mark av KL-trä* [Masteruppsats, Umeå Universitet]. <https://umu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1461974/FULLTEXT02.pdf>
- Hagentoft, C., & Sandin, K. (2017). *Byggnadsfysik*. Studentlitteratur AB, Lund.
- Jacquier, N. (2015). *Development and Evaluation of Mechanical Joints for Composite Floor Elements with Cross Laminated Timber* (doktorsavhandling). Luleå tekniska universitet.
- Johansson, C., & Johansson, E. (2021). *Modeling of Cross Laminated Timber in FE Analysis* [Masteruppsats, Chalmers Tekniska Högskola].
- Kalamees, T., Vinha, J., & Kurnitski, J. (2006). Indoor humidity loads and moisture production in lightweight timber-frame detached houses. *Journal of Building Physics*, 29(3), 219–246.
- Kalbe, K., Annuk, A., Ruus, A., & Kalamees, T. (2021). Experimental analysis of moisture uptake and dry-out in CLT end-grain exposed to free water. *Journal of Physics: Conference Series*, 2069(1), 012050. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2069/1/012050>
- Kordziel, S., Glass, S. V., Boardman, C. R., Munson, R. A., Zelinka, S. L., Pei, S., & Tabares-Velasco, P. C. (2020). Hygrothermal characterization and modeling of cross-laminated timber in the building envelope. *Building and Environment*, 177, 106866. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106866>
- Kukk, V., Horta, R., Püssa, M., Luciani, G., Kallakas, H., Kalamees, T., & Kers, J. (2017). Impact of cracks to the hygrothermal properties of CLT water

- vapour resistance and air permeability [11th Nordic Symposium on Building Physics, NSB2017, 11-14 June 2017, Trondheim, Norway]. *Energy Procedia*, 132, 741–746. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.019>
- Ljung, C., Ottosen, N. S., & Ristinmaa, M. (2007). *Introduktion till hållfasthetslära: enaxliga tillstånd* (1. utg.). Studentlitteratur AB.
- Loss, C., Hossain, A., & Tannert, T. (2018). Simple cross-laminated timber shear connections with spatially arranged screws. *Engineering Structures*, 173. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.031>
- Malai, A., & Youwai, S. (2021). Stiffness of Expanded Polystyrene Foam for Different Stress States. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 7. <https://doi.org/10.1007/s40891-021-00321-7>
- Petersson, B.-Å. (2018). *Tillämpad byggnadsfysik*. Studentlitteratur AB, Lund.
- Reddy, J. N. (2019). *Introduction to the Finite Element Method* (4. utg.). CRC Press.
- SIS, S. S. (2002). Eurokod 1: Laster på bärverk - Del 1-1: Allmänna laster - Tunghet, egentygnd, nyttig last för byggnader (1. utg.).
- SIS, S. S. (2004). Eurocode 5: Dimensionering av träkonstruktioner – Del 1-1: Allmänt – Gemensamma regler och regler för byggnader (1. utg.).
- SIS, S. S. (2013). Fukt- och värmeteknisk funktion hos byggkomponenter och byggnadsdelar – Invändig yttemperatur för att undvika kritisk ytfukt och kondens inuti konstruktion – Beräkningsmetoder (ISO 13788:2012) (2. utg.).
- SMHI. (u. å). *Ladda ner meteorologiska observationer*. <https://www.smhi.se/data/meteorologi/ladda-ner-meteorologiska-observationer#param=airtemperatureInstant,stations=core,stationid=71420>
- Stora Enso. (2023a). Building the future with cross-laminated timber. <https://www.storaenso.com/en/products/mass-timber-construction/building-products/>
- Stora Enso. (2023b). Cross-laminated timber (CLT). <https://www.storaenso.com/en/products/mass-timber-construction/building-products/clt>
- Svenskt Trä. (2017a). Fuktinnehåll och sorptionskurvor. <https://www.traguiden.se/om-tra/byggfysik/fukt/fukt/fuktinnehall-och-sorptionskurvor/?previousState=1>
- Svenskt Trä. (2017b). Fukttransport och fuktupptagning. <https://www.traguiden.se/om-tra/byggfysik/fukt/fukt/fukttransport-och-fuktupptagning/>
- Svenskt Trä. (2017c). Generell beskrivning av massivträteknik. <https://www.traguiden.se/planering/planera-ett-trabygge/byggsystem/massivtrateknik/generell-beskrivning-av-massivtrateknik/>

- Svenskt trä. (u. å). *Användning av virke med blånad*. <https://www.svenskttra.se/trafakta/allmant-om-tra/anvandning-av-virke-med-blanad/> (Hämtad: 12.04.2023)
- Vattenskadecentrum. (2021). Vattenskador i Sverige 2021. <http://www.vattenskadecentrum.se/download/136-BEC27F26B2209B430378549DFCDEB3D3/Vattenskaderapport-2021-fullstandig.pdf>
- Viitanen, H. (1996). *Factors affecting the development of mould and brown rot decay in wooden material and wooden structures, Effect of humidity, temperature and exposure time* (doktorsavhandling). Uppsala. The Swedish University of Agricultural Sciences, Dept. of Forest Products.
- Viitanen, H., Toratti, T., Makkonen, L., Peuhkuri, R., Ojanen, T., Ruokolainen, L., & Räisänen, J. (2010). Towards modelling of decay risk of wooden materials. *European Journal of Wood and Wood Products*, 68(3), 303–313. <https://doi.org/10.1007/s00107-010-0450-x>
- Viitanen, H. (1994). Factors affecting the development of biodeterioration in wooden constructions. *Materials and Structures*, 27(6), 483–493.
- Vyas, Y., Johns, D., Richman, R., & Liao, Z. (2023). Developing a Novel 1D-HAM Numerical Modelling Tool for Assessing the Hygrothermal Properties of Cross-Laminated Timber (CLT) Including Adhesive Layers. I S. Walbridge, M. Nik-Bakht, K. T. W. Ng, M. Shome, M. S. Alam, A. el Damatty & G. Lovegrove (Red.), *Proceedings of the Canadian Society of Civil Engineering Annual Conference 2021* (s. 429–442). Springer Nature Singapore.

A

Bilagor

A.1 Nomenklatur

Nedan följer en förteckning över symboler som har använts i denna rapport:

Kategori	Beteckning	Beskrivning
Dimensioner	ℓ	Spann av KL-träplatta [m]
	h	Höjd på KL-träplatta [m]
	d_i	Tjocklek för skikt i [m]
Massförlust	ML	Massförlust [%]
	RF	Relativ fuktighet [%]
	t	Tid [månader]
	t_{crit}	Kritiska tiden, då $ML = 0$ [timmar]
	α	Koefficient som definierar när massförlusten startar [-]
	$\Delta\alpha$	Skillnad i α över ett tidsintervall [-]
Finita elementmetoden	$\bar{\mathbf{K}}^e$	Elementstyvhetsmatris
	$\bar{\mathbf{K}}_b^e$	Balkens elementstyvhetsmatris
	$\bar{\mathbf{K}}_f^e$	Elastiska underlagets elementstyvhetsmatris
	$\bar{\mathbf{f}}_l^e$	Elementlastvektor för utbredda laster
	$\bar{\mathbf{f}}_p^e$	Elementlastvektor för punktlaster
	$\bar{\mathbf{a}}^e$	Förflyttningsvektor för ett balkelement
	u_h	Frihetsgrad för horisontell förflyttning
	u_v	Frihetsgrad för vertikal förflyttning
	u_θ	Frihetsgrad för rotation
	w	Nedböjning

Kategori	Beteckning	Beskrivning
Värme och fukt	λ	Värmeledningsförmåga [W/mK]
	R	Värmemotstånd [m ² K/W]
	T	Temperatur [°C]
	ΔT	Temperaturdifferens [°C]
	δ	Ånggenomsläplighetskoefficient [m ² /s]
	Z	Ånggenomgångsmotstånd [m ² /s]
	v	Ånghalt [g/m ³]
	Δv	Ånghaltsskillnad [g/m ³]
Materialparametrar	v_s	Mättnadsånghalt [g/m ³]
	β_L	Kryptal i longitudinell (L) riktning
	$E_{L,el}$	Elastisk styvhet i longitudinell riktning [Pa]
	$E_{L,in}$	Power-law-fjäderstyvhet i longitudinell riktning [Pa]
	$E_{L,vi}$	Viskoelastisk styvhet i longitudinell riktning [Pa]
	β_{RT}	Kryptal i radiell och tangentiell (RT) fiberriktning
	$G_{RT,el}$	Elastisk skjuvmodul i radiell och tangentiell fiberriktning [Pa]
γ -metod	$G_{RT,vi}$	Viskoelastisk skjuvmodul i radiell och tangentiell fiberriktning [Pa]
	S	Styvhet [Pa]
	A	Area [m ²]
	a	Avstånd från tyngdpunkt till neutral axel [m]
	E	Elasticitetsmodul [Pa]
	I	Böjtröghetsmoment [m ⁴]
	$(EI)_{ef}$	Effektiv böjstyvhet [Nm ²]
h_i	Höjd för element i [m]	
γ	Reduktionsfaktor [0, 1] [-]	

A.2 Glasermetoden

Tabell A.1: Glasermetoden i tabellform.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Skikt	d	λ	R	ΔT	T	v_s	δ	Z	Δv	v	RF
Inside											
...											
Mark											
Σ											

Där:

d	Tjocklek för skikt [m]
λ	Värmeledningsförmåga för skikt [W/mK]
R	Värmemotstånd för skikt [m ² K/W]
ΔT	Temperaturdifferens över skikt [°C]
T	Temperatur i skiktgränser [°C]
v_s	Mättnadsånghalt i skiktgränser [g/m ³]
δ	Ånggenomsläpplighetskoefficient för skikt [m ² /s]
Z	Ånggenomgångsmotstånd för skikt [s/m]
Δv	Ånghaltsskillnad över skikt [g/m ³]
v	Ånghalt i skiktgränser [g/m ³]
RF	Relativa fuktigheten i skiktgränser [%]

Nedan följer en redovisning för varje ingående parameter i glasermetoden.

Kolumn 1: Ingående skiktgränser och materialskikt. Presenteras som insidan till utsidan, med ingående skikt.

Kolumn 2: Tjockleken för skikten hämtas direkt från designen av KL-plattan, se kapitel 3.1.3.

Kolumn 3: Värmeledningsförmågan för KL-träplattan hämtas från den tekniska specifikationen från leverantören Stora Enso (2023b). Övriga indata hämtas från studentlitteratur (Burström & Nilvér, 2019).

Kolumn 4: Värmemotståndet för skikt bestäms genom ekvation A.1 nedan.

$$R_n = \frac{d_n}{\lambda_n} \quad (\text{A.1})$$

Kolumn 5: Temperaturdifferensen beräknas för vardera skikt utifrån kolumn 6.

Kolumn 6: Temperaturen i skiktgränser beräknas genom ekvation A.2 nedan. Visualisering av temperaturfördelningen hittas i bilaga A.3.

$$T_n = T_{n-1} + \frac{R_n}{R_{tot}} \cdot (T_{inne} - T_{mark}) \quad (\text{A.2})$$

Kolumn 7: Beräkningar av mätnadsånghalt för en given temperatur används ekvation A.3 nedan vid överslagsberäkningar (Petersson, 2018).

$$v_{s,n} = \frac{1.32}{T_n} [1 + 0.02 \cdot (T_n - 273)]^4 \quad (\text{A.3})$$

Kolumn 8: Ånggenomsläpplighetskoefficienten för skikt hämtas från tabell i studentlitteratur (Petersson, 2018).

Kolumn 9: Ånggenomgångsmotståndet för skikt kan hämtas direkt från tabell eller beräknas genom ekvation A.4 nedan.

$$Z_n = \frac{d_n}{\delta_n} \quad (\text{A.4})$$

Kolumn 10: Ånghaltsskillnaden över skikt fås från kolumn 11.

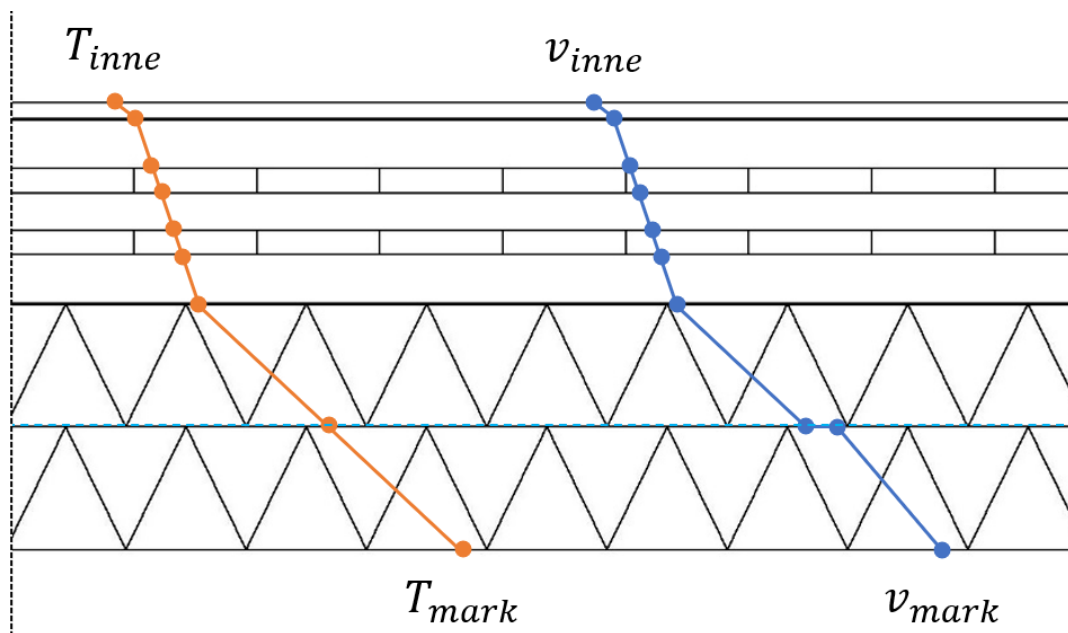
Kolumn 11: Ånghalten i skiktgränser beräknas via ekvation A.5 nedan. Visualisering av ånghaltsfördelningen hittas i bilaga A.3.

$$v_n = v_{n-1} + \frac{Z_n}{Z_{tot}} \cdot (v_{inne} - v_{mark}) \quad (\text{A.5})$$

Kolumn 12: Relativa fuktigheten i skiktgränser fås via ekvation A.6 nedan.

$$RF = \frac{v_n}{v_{s,n}} \quad (\text{A.6})$$

A.3 Temperatur- och ånghaltsfördelning



Figur A.1: Visualisering av temperatur- och ånghaltsfördelningen genom grunden. Noder är placerade där beräkningar med Glasermetoden har gjorts.

A.4 Beräkning med Glasermetoden

Beräkningarna visar en godtycklig dag i Oktober. 2022-10-02

Tabell A.3: Glasermetoden i tabellform.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Skikt	d	λ	R	ΔT	T	v_s	δ $\cdot 10^{-6}$	Z $\cdot 10^3$	Δv	v	RF
Inomhus	-	-	-	-	22	19.24	-	-	-	11.29	58.7
Ovanpå parkett	-	-	0.13	-	21.9	19.11	-	0.06	-	11.29	59.1
Under parkett	0.014	0.16	0.09	-	21.8	19.03	0.6	23.33	-	11.31	59.4
Lamell 1	0.04	0.12	0.33	-	21.5	18.71	-	56	-	11.35	60.6
Lamell 2	0.02	0.12	0.17	-	21.3	18.55	-	28	-	11.37	61.3
Lamell 3	0.03	0.12	0.25	-	21.1	18.32	-	42	-	11.39	62.2
Lamell 4	0.02	0.12	0.17	-	20.9	18.17	-	28	-	11.41	62.8
Lamell 5	0.04	0.12	0.33	-	20.6	17.86	-	56	-	11.45	64.1
Isolering (100mm)	0.1	0.03	3.03	-	17.7	15.23	1.4	71.4	-	11.50	75.5
PE-Folie	-	-	-	-	17.7	15.23	-	2000	-	12.85	84.4
Isolering (100mm)	0.1	0.03	3.03	-	14.7	12.90	1.4	71.4	-	12.90	100
Mark	-	-	-	-	14.7	12.90	-	-	-	12.90	100
Σ	-	-	7.53	7.25	-	-	-	2376	16.07	-	-

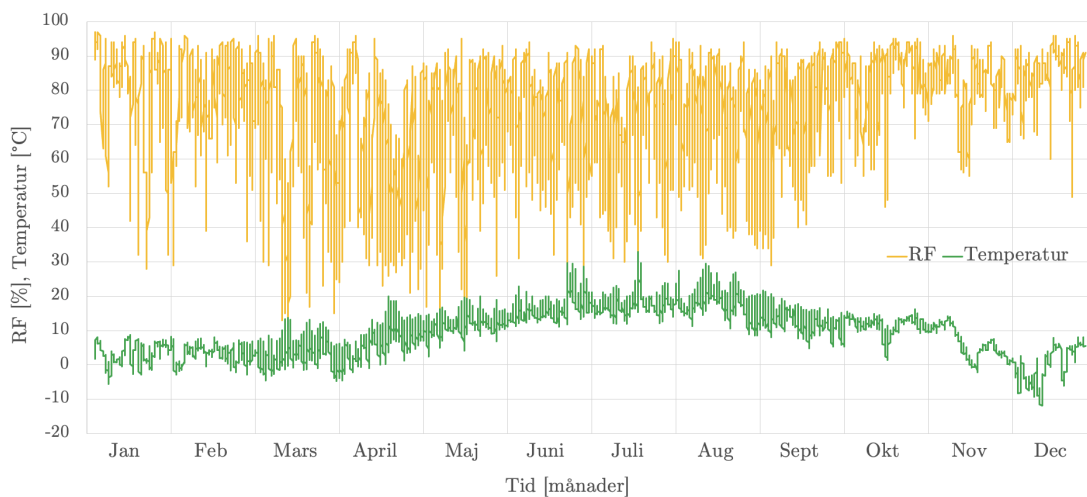
Värmemotståndet, R , för varje skikt beräknas enligt ekvation A.1.

Temperaturen, T beräknas enligt ekvation A.2.

Mättnadsånghalten, v_s , beräknas enligt ekvation A.3.

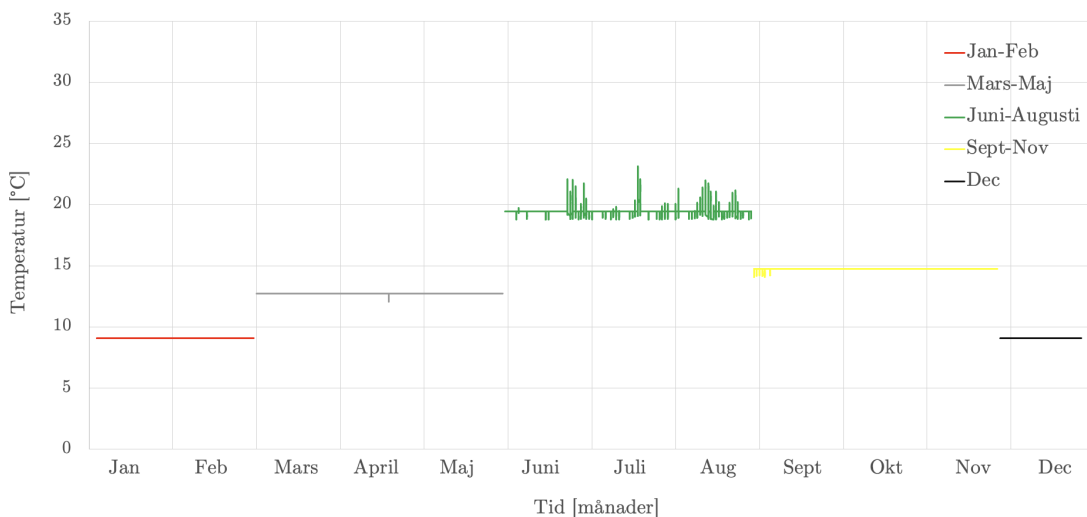
Ånghalten, v , för varje skikt beräknas enligt ekvation A.5.

A.5 Indata för temperatur och relativ fuktighet (SMHI)



Figur A.2: Indata för beräkningar, hämtad från SMHI och valts att presentera som en graf.

A.6 Beräknad markttemperatur



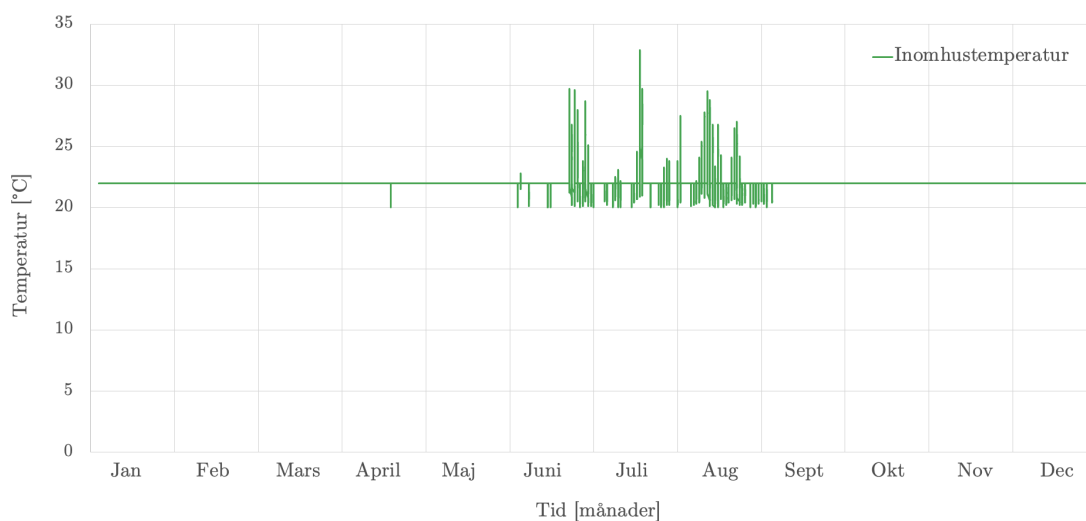
Figur A.3: Beräknad markttemperatur enligt ekvation A.7.

Ekvation A.7 nedan redovisar beräkning av markttemperaturen (Hagentoft & Sandin, 2017).

$$T_{mark, mitt} = \bar{T}_u + u_{mitt} \left(\frac{L}{\ell}, \frac{d}{\ell} \right) \cdot (T_i - \bar{T}_u) \quad (A.7)$$

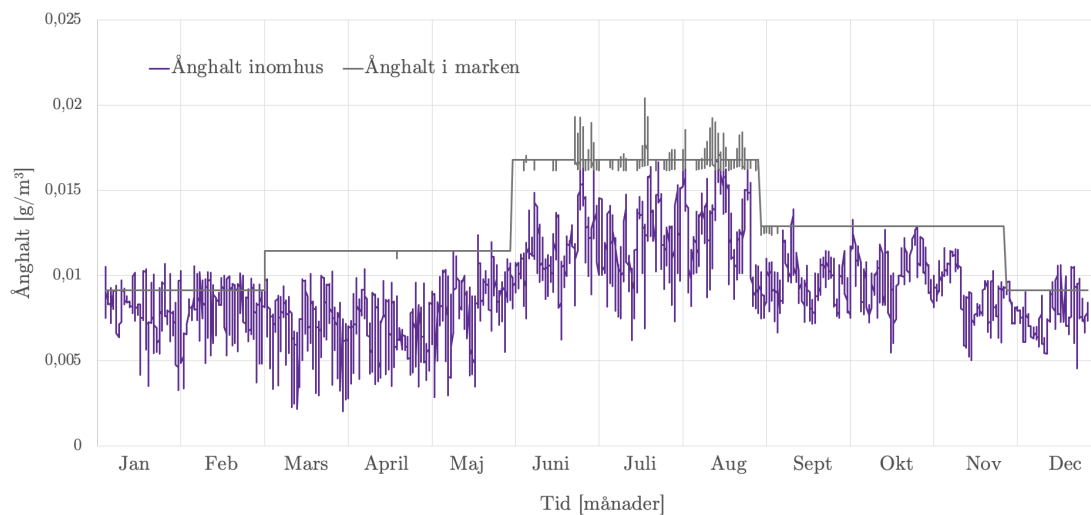
Där:	$T_{mark,mitt}$	Temperaturen i marken mitt under plattan [$^{\circ}\text{C}$]
	\bar{T}_u	Årsmedeltemperaturen utomhus [$^{\circ}\text{C}$]
	u_{mitt}	Relativ temperaturdifferens mellan inomhus och marken mitt under plattan [-]
	L	Längden på plattan [m]
	ℓ	Spannet på plattan [m]
	d	Ekvivalent jordtjocklek [m]
	T_i	Inomhustemperaturen [$^{\circ}\text{C}$]

A.7 Beräknad inomhustemperatur



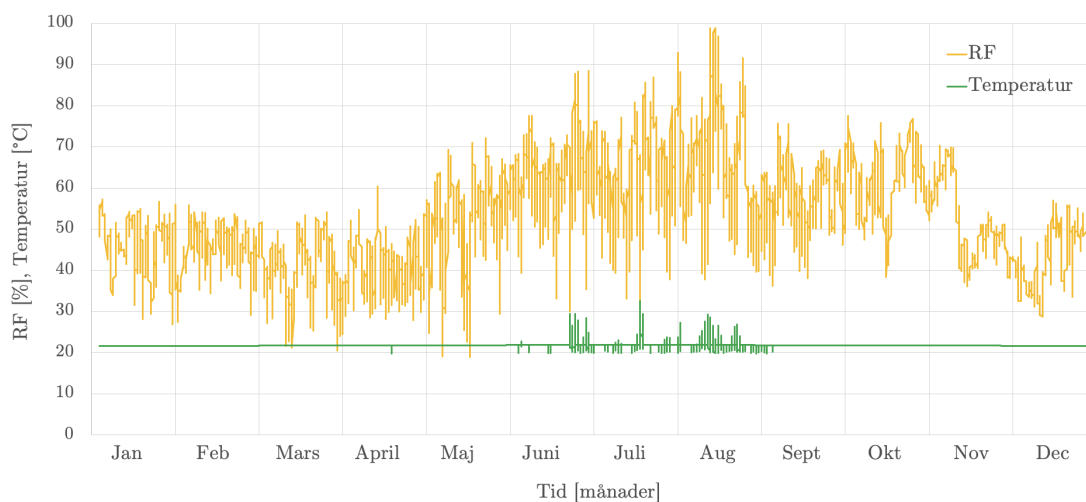
Figur A.4: Beräknad inomhustemperatur.

A.8 Beräknad ånghalt inomhus samt i marken



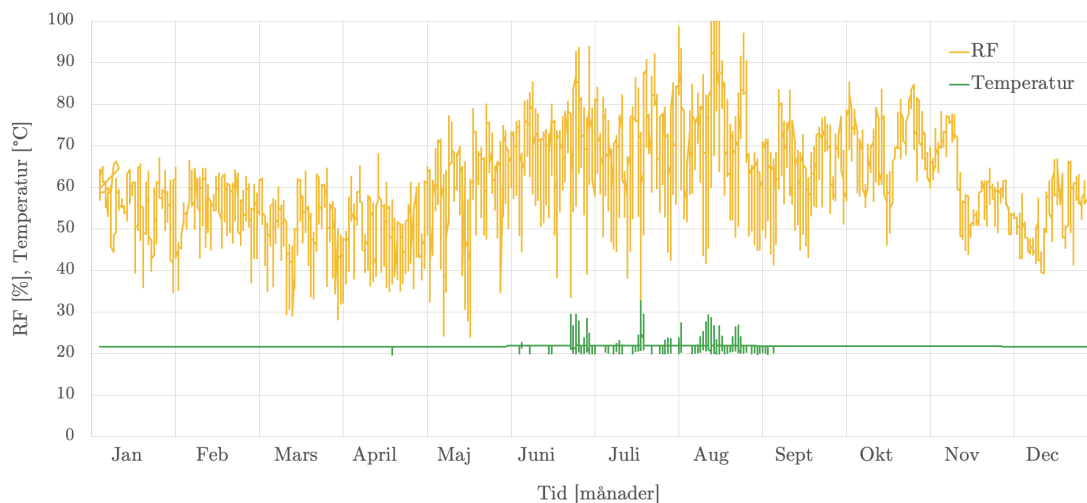
Figur A.5: Beräknad ånghalt inomhus samt i marken. Beräkningarna utfördes med Glasermetoden.

A.9 Indata för temperatur och relativ fuktighet vid normala fuktbelastningar



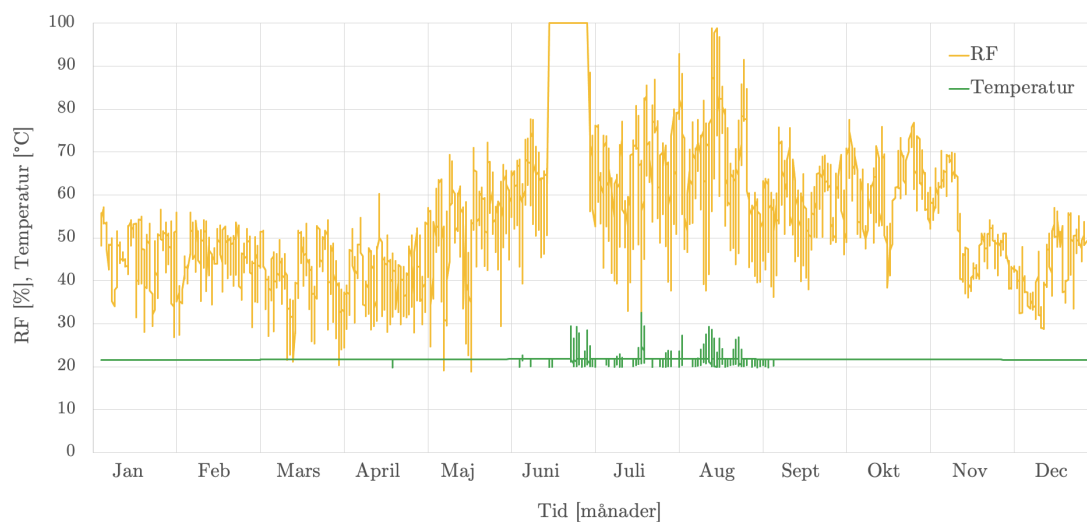
Figur A.6: Indata för beräkningar. Beräknad med Glasermetoden i det översta skiktet i KL-träplattan, då plattan utsätts för normala fuktbelastningar.

A.10 Indata för temperatur och relativ fuktighet vid ökad fuktproduktion inomhus



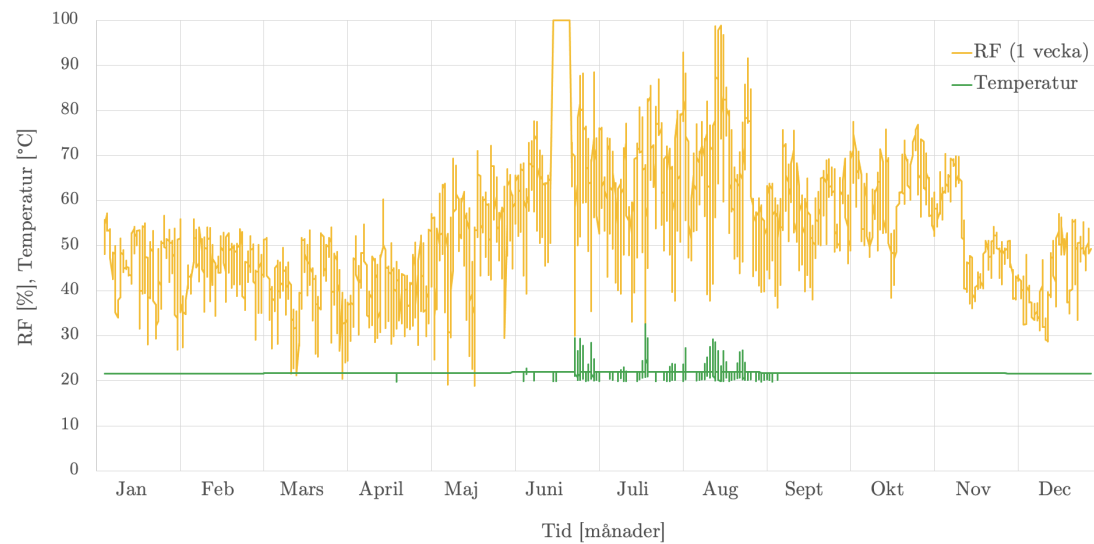
Figur A.7: Indata för beräkningar. Beräknad med Glasermetoden i det översta skiktet i KL-träplattan, då plattan utsätts för ökad fuktproduktion inomhus.

A.11 Indata för temperatur och relativ fuktighet vid globalt läckage



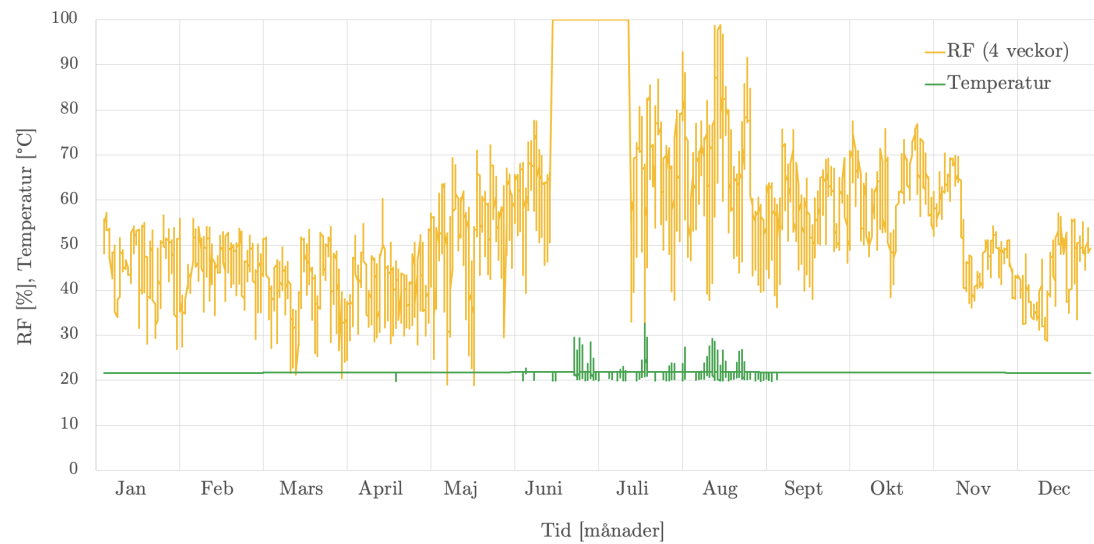
Figur A.8: Indata för beräkningar. Beräknad med Glasermetoden i det översta skiktet i KL-träplattan, då plattan utsätts för globalt läckage.

A.12 Indata för temperatur och relativ fuktighet vid lokalt läckage som pågår under 1 vecka



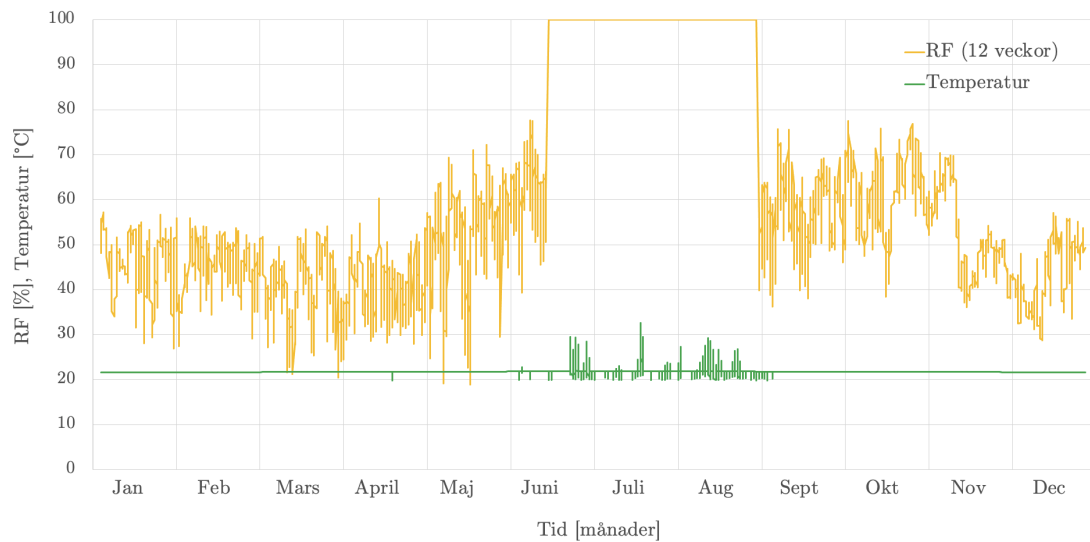
Figur A.9: Indata för beräkningar. Beräknad med Glasermetoden i det översta skiktet i KL-träplattan, då plattan utsätts för lokalt läckage som pågår under 1 vecka.

A.13 Indata för temperatur och relativ fuktighet vid lokalt läckage som pågår under 4 veckor



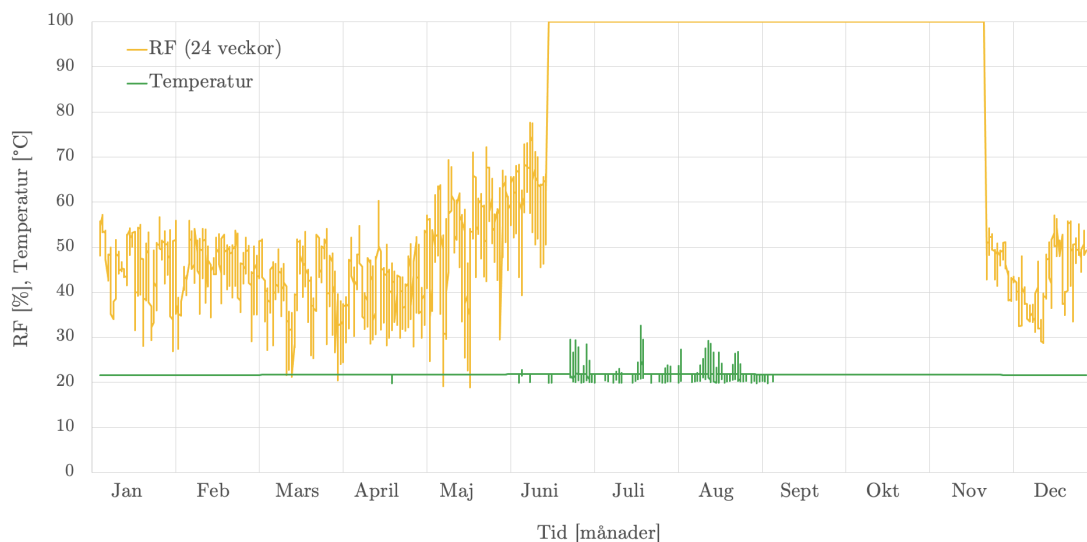
Figur A.10: Indata för beräkningar. Beräknad med Glasermetoden i det översta skiktet i KL-träplattan, då plattan utsätts för lokalt läckage som pågår under 4 veckor.

A.14 Indata för temperatur och relativ fuktighet vid lokalt läckage som pågår under 12 veckor



Figur A.11: Indata för beräkningar. Beräknad med Glasermetoden i det översta skiktet i KL-träplattan, då plattan utsätts för lokalt läckage som pågår under 12 veckor.

A.15 Indata för temperatur och relativ fuktighet vid lokalt läckage som pågår under 24 veckor



Figur A.12: Indata för beräkningar. Beräknad med Glasermetoden i det översta skiktet i KL-träplattan, då plattan utsätts för lokalt läckage som pågår under 24 veckor.

A.16 Styvhetsreducering & γ -metod (MATLAB skript)

```
1  clc, clear;
2  alpha_z = 0.2121;
3  S_el_z = 1.639e9;
4  S_in_z = 10.527e9;
5  S_vi_z = 59.88e9;
6  alpha_p = 0.2067;
7  S_el_p = 77.7e6;
8  S_vi_p = 3116e6;
9  l = 10;
10 b = 2.95;
11 t_ref = 1;
12 n = 500;
13 x = linspace(0, 60*60*24*365*101, n);
14
15 S_power = zeros(n, 1);
16 S_zener = zeros(n, 1);
```

```

17 E_tot = zeros(n, 1);
18 EI_ef = zeros(n, 5);
19 h_values = [(40)*10^-3 30e-3 40e-3;           %frisk
20             (40)*10^-3 30e-3 40e-3;           %okad fuktpro.
21             (40-1.9833)*10^-3 30e-3 40e-3;     %oversvamning
22             (40-5.5995)*10^-3 30e-3 40e-3;     %lackage 4v
23             (40-18.39)*10^-3 30e-3 40e-3;];     %lackage 12v
24
25 for i = 1:5
26     h = h_values(i,:);
27     A = 1*[h(1) h(2) h(3)];
28     a = [0.055 0 0.055];
29     I = [(1*(h(1))^3/12) (1*(h(2))^3/12) (1*(h(3))^3/12)
30           ];
31     gamma = zeros(3,1);
32     EI_ef_k = zeros(3, 1);
33
34     for q=1:3
35         gamma(q) = (1 + ((pi^2 * S_el_z * A(q) * h(q))/(
36             S_el_p * b * l^2)))^-1;
37         gamma(2) = 1;
38     end
39     for t = 1:n-1
40         t2 = t(end);
41
42         % Longitudinell
43         S_zener(t) = S_in_z + ((1/S_el_z)+(t_ref/(S_vi_z
44             *(alpha_z+1))))*((t)/t_ref)^(alpha_z+1) - ((t-
45             t2)/t_ref)^(alpha_z+1))^-1;
46         % Vinkelrat (RT)
47         S_power(t) = ((1/S_el_p)+(t_ref/(S_vi_p*(alpha_p
48             +1))))*((t)/t_ref)^(alpha_p+1) - ((t-t2)/t_ref
49             )^(alpha_p+1))^-1;
50         E_tot(t) = S_power(t) + S_zener(t);
51         for k = 1:3
52             EI_ef_k(k) = E_tot(t)*I(k) + gamma(k)*E_tot(t
53                 )*A(k)*a(k)^2;
54         end
55     end
56     EI_ef(t,i) = sum(EI_ef_k);
57 end
58
59 colors = ["#000000", "#1F77B4", "#2CA02C", "#9467BD"];
60 plot(x(1:end)/(60*60*24*365), abs(EI_ef(:,1))/1e6, 'Color
61     ', colors(1), 'LineWidth', 2);
62 hold on;

```

```

55 plot(x(1:end)/(60*60*24*365), abs(EI_ef(:,2))/1e6, 'Color
    ', colors(1), 'LineWidth', 2);
56 hold on;
57 plot(x(1:end)/(60*60*24*365), abs(EI_ef(:,3))/1e6, 'Color
    ', colors(2), 'LineWidth', 2);
58 hold on;
59 plot(x(1:end)/(60*60*24*365), abs(EI_ef(:,4))/1e6, 'Color
    ', colors(3), 'LineWidth', 2);
60 hold on;
61 plot(x(1:end)/(60*60*24*365), abs(EI_ef(:,5))/1e6, 'Color
    ', colors(4), 'LineWidth', 2);
62 hold on;
63 grid on
64 xlim([0 100]);
65 title('\textbf{Reducering av tidsberoende effektiv b}\{o}
    jstyvhet \textbf{\textit{\$EI_{ef}(t)\$}}}', '
    Interpreter', 'latex', 'FontSize', 20);
66 xlabel('Tid [\r{a}r]', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize'
    , 18);
67 ylabel('B\{o}jstyvhet [MNm\^{2}\$]', 'Interpreter', '
    latex', 'FontSize', 18);
68 hold on
69 lgd = legend('Frisk platta', '\{0}kad fuktproduktion', '
    \{0}versv\`anning',...
70 'Lokalt 1\`ackage (4v)', 'Lokalt 1\`ackage (12v)', '
    Interpreter', 'latex', 'FontSize', 18)
71 title(lgd, 'Status', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize', 18)

```

A.17 Nedböjning (EPS-beroende) enligt FEM (MATLAB skript)

```

1 clc, clear;
2
3 A = 1; % dummy variabel (
    spelar ingen roll)
4 E = 30.78514525116457e+06; % 0 yrs
5 % E = 26.65170187535369e+06; % 100 yrs
6 I = 1;
7 ex = [0 1; 1 2; 2 3; 3 4; 4 5; 5 6; 6 7; 7 8; 8 9; 9 10];
8 ey = [0 0];
9 ep_1 = [E A I 0 4.5e6];
10 ep_2 = [E A I 0 6e6];
11 ep_3 = [E A I 0 8.2e6];
12 % k = 4.5; 6; 8.2;

```

```

13 b=2.95;
14 q1=-1.46e3;           % N/m
15 qKLT=-0.66e3 * b;    % N/m
16 qk=-2e3 * b;         % N/m
17 eq = [0 q1+qKLT+qk;
18         0 q1+qKLT+qk;
19         0 q1+qKLT+qk;
20         0 q1+qKLT+qk;
21         0 qKLT+qk;
22         0 qKLT+qk;
23         0 qKLT+qk;
24         0 qKLT+qk;
25         0 qKLT+qk;
26         0 qKLT+qk];
27
28 % Frihetsgrader: 1, 2, 3 .... 1: hori kraft, 2: verti
    kraft, 3 moment
29 f_1 = zeros(33,1);
30 f_1(14) = -4.31e3;
31 f_2 = zeros(33,1);
32 f_2(14) = -4.31e3;
33 f_3 = zeros(33,1);
34 f_3(14) = -4.31e3;
35
36 Edof = [1 1 2 3 4 5 6;
37          2 4 5 6 7 8 9;
38          3 7 8 9 10 11 12;
39          4 10 11 12 13 14 15;
40          5 13 14 15 16 17 18;
41          6 16 17 18 19 20 21;
42          7 19 20 21 22 23 24;
43          8 22 23 24 25 26 27;
44          9 25 26 27 28 29 30;
45          10 28 29 30 31 32 33];
46
47 K_1 = zeros(33);
48 K_2 = zeros(33);
49 K_3 = zeros(33);
50 for i=1:10
51     dofs = Edof(i,2:7);
52
53     [Ke_1, fe_1] = beam2w(ex(i,:),ey,ep_1,eq(i,:));
54     K_1(dofs,dofs) = K_1(dofs,dofs) + Ke_1;
55     f_1(dofs,1) = f_1(dofs,1) + fe_1;
56
57     [Ke_2, fe_2] = beam2w(ex(i,:),ey,ep_2,eq(i,:));

```

```

58     K_2(dofs,dofs) = K_2(dofs,dofs) + Ke_2;
59     f_2(dofs,1) = f_2(dofs,1) + fe_2;
60
61     [Ke_3, fe_3] = beam2w(ex(i,:),ey,ep_3,eq(i,:));
62     K_3(dofs,dofs) = K_3(dofs,dofs) + Ke_3;
63     f_3(dofs,1) = f_3(dofs,1) + fe_3;
64 end
65
66 bc = [1 0; 2 0; 32 0];
67 [a_1,r_1] = solveq(K_1,f_1,bc)
68 [a_2,r_2] = solveq(K_2,f_2,bc)
69 [a_3,r_3] = solveq(K_3,f_3,bc)
70
71 ed_1 = extract(Edof,a_1);
72 ed_2 = extract(Edof,a_2);
73 ed_3 = extract(Edof,a_3);
74
75 elnum = 10;
76 ellen = 10/elnum;
77 for i = 1:elnum
78     [es_1,edi_1,eci_1]=beam2s(ex(i,:),ey,ep_1,ed_1(i,:),
79         eq,50);
80     [es_2,edi_2,eci_2]=beam2s(ex(i,:),ey,ep_2,ed_2(i,:),
81         eq,50);
82     [es_3,edi_3,eci_3]=beam2s(ex(i,:),ey,ep_3,ed_3(i,:),
83         eq,50);
84     x = linspace(0,ellen,50) + (i-1)*ellen;
85     grid on;
86     colors = ["#E5001A", "#B3004C", "#1900E6"];
87     plot(x,1000*edi_1(:,2),'Color', colors(1), '
88         LineWidth',2);
89     hold on
90     plot(x,1000*edi_2(:,2),'Color', colors(2), '
91         LineWidth',2);
92     hold on
93     plot(x,1000*edi_3(:,2),'Color', colors(3), '
94         LineWidth',2);
95     hold on
96     yline(0,'Color','[.7 .7 .7]', 'LineWidth',2)
97     hold on
98
99     title('\textbf{Initiell balknedb}\{"o}jning med tre
100         olika EPS densiteter}', 'Interpreter', 'latex', '
101         FontSize', 20);
102     xlabel('Balkl\{"a}ngd [m]', 'Interpreter', 'latex', '
103         FontSize', 18);

```

```

95     ylabel('Nedb\{o}jning [mm]', 'Interpreter', 'latex'
96           , 'FontSize', 18);
97     hold on
98     lgd = legend('\rho = 20 kg/m^3', '\rho = 25 kg/m^3', '
99           \rho = 30 kg/m^3', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize
           ', 18)
           title(lgd, 'EPS densitet', 'Interpreter', 'latex', '
           FontSize', 18)
           end

```

A.18 Nedböjning, initiell (styvhetsberoende) enligt FEM (MATLAB skript)

```

1  clc, clear;
2
3  E_1 = 3.078514525116457e+07;    % frisk
4  E_2 = 3.078514525116457e+07;    % okad fuktp.
5  E_3 = 2.998392233127254e+07;    % overs.
6  E_4 = [3.078514525116457e+07;    % frisk
7         2.854044756223778e+07];    % lok. 4v (4e elementet)
8  E_5 = [3.078514525116457e+07;    % frisk
9         23.58537685414734e+06];    % lok. 12v (4e elementet)
10 A = 1;
11 I = 1;
12 ex = [0 1; 1 2; 2 3; 3 4; 4 5; 5 6; 6 7; 7 8; 8 9; 9 10];
13 ey = [0 0];
14 ep_1 = [E_1 A I 0 8.2e6];
15 ep_2 = [E_2 A I 0 8.2e6];
16 ep_3 = [E_3 A I 0 8.2e6];
17
18 ep_4_f = [E_4(1) A I 0 8.2e6]; %frisk
19 ep_4_s = [E_4(2) A I 0 8.2e6]; %skadad
20
21 ep_5_f = [E_5(1) A I 0 8.2e6]; %frisk
22 ep_5_s = [E_5(2) A I 0 8.2e6]; %skadad
23
24 % k = 4.5; 6; 8.2;
25 b=2.95;
26 q1=-1.46e3;    % N/m
27 qKLT=-0.66e3 * b;    % N/m
28 qk=-2e3 * b;    % N/m
29 eq = [0 q1+qKLT+qk;
30       0 q1+qKLT+qk;
31       0 q1+qKLT+qk;

```

```

32     0 q1+qKLT+qk;
33     0 qKLT+qk;
34     0 qKLT+qk;
35     0 qKLT+qk;
36     0 qKLT+qk;
37     0 qKLT+qk;
38     0 qKLT+qk];
39
40 % Frihetsgrader: 1, 2, 3 .... 1: hori kraft, 2: verti
    kraft, 3 moment
41 f_1 = zeros(33,1);
42 f_1(14) = -4.31e3;
43 f_2 = zeros(33,1);
44 f_2(14) = -4.31e3;
45 f_3 = zeros(33,1);
46 f_3(14) = -4.31e3;
47 f_4 = zeros(33,1);
48 f_4(14) = -4.31e3;
49 f_5 = zeros(33,1);
50 f_5(14) = -4.31e3;
51
52 Edof = [1 1 2 3 4 5 6;
53         2 4 5 6 7 8 9;
54         3 7 8 9 10 11 12;
55         4 10 11 12 13 14 15;
56         5 13 14 15 16 17 18;
57         6 16 17 18 19 20 21;
58         7 19 20 21 22 23 24;
59         8 22 23 24 25 26 27;
60         9 25 26 27 28 29 30;
61         10 28 29 30 31 32 33];
62
63 K_1 = zeros(33);
64 K_2 = zeros(33);
65 K_3 = zeros(33);
66 K_4 = zeros(33);
67 K_5 = zeros(33);
68
69 for i=1:10
70     dofs = Edof(i,2:7);
71
72     [Ke_1, fe_1] = beam2w(ex(i,:),ey,ep_1,eq(i,:));
73     K_1(dofs,dofs) = K_1(dofs,dofs) + Ke_1;
74     f_1(dofs,1) = f_1(dofs,1) + fe_1;
75
76     [Ke_2, fe_2] = beam2w(ex(i,:),ey,ep_2,eq(i,:));

```

```

77     K_2(dofs,dofs) = K_2(dofs,dofs) + Ke_2;
78     f_2(dofs,1) = f_2(dofs,1) + fe_2;
79
80     [Ke_3, fe_3] = beam2w(ex(i,:),ey,ep_3,eq(i,:));
81     K_3(dofs,dofs) = K_3(dofs,dofs) + Ke_3;
82     f_3(dofs,1) = f_3(dofs,1) + fe_3;
83
84     if i == 4 %skadad
85         [Ke_4, fe_4] = beam2w(ex(i,:),ey,ep_4_s,eq(i,:))
86         ;
87         K_4(dofs,dofs) = K_4(dofs,dofs) + Ke_4;
88         f_4(dofs,1) = f_4(dofs,1) + fe_4;
89
90         [Ke_5, fe_5] = beam2w(ex(i,:),ey,ep_5_s,eq(i,:))
91         ;
92         K_5(dofs,dofs) = K_5(dofs,dofs) + Ke_5;
93         f_5(dofs,1) = f_5(dofs,1) + fe_5;
94     else % frisk
95         [Ke_4, fe_4] = beam2w(ex(i,:),ey,ep_4_f,eq(i,:))
96         ;
97         K_4(dofs,dofs) = K_4(dofs,dofs) + Ke_4;
98         f_4(dofs,1) = f_4(dofs,1) + fe_4;
99
100        [Ke_5, fe_5] = beam2w(ex(i,:),ey,ep_5_f,eq(i,:))
101        ;
102        K_5(dofs,dofs) = K_5(dofs,dofs) + Ke_5;
103        f_5(dofs,1) = f_5(dofs,1) + fe_5;
104    end
105
106    bc = [1 0; 2 0; 3 2 0];
107    [a_1,r_1] = solveq(K_1,f_1,bc);
108    [a_2,r_2] = solveq(K_2,f_2,bc);
109    [a_3,r_3] = solveq(K_3,f_3,bc);
110    [a_4,r_4] = solveq(K_4,f_4,bc);
111    [a_5,r_5] = solveq(K_5,f_5,bc);
112
113    ed_1 = extract(Edof,a_1);
114    ed_2 = extract(Edof,a_2);
115    ed_3 = extract(Edof,a_3);
116    ed_4 = extract(Edof,a_4);
117    ed_5 = extract(Edof,a_5);
118
119    elnum = 10;
120    ellen = 10/elnum;
121    figure(1);

```

```

119
120 matrix_edi_1 = zeros(10,50);
121 matrix_edi_2 = zeros(10,50);
122 matrix_edi_3 = zeros(10,50);
123 matrix_edi_4 = zeros(10,50);
124 matrix_edi_5 = zeros(10,50);
125
126 for i = 1:elnum
127     [es_1, edi_1, eci_1] = beam2s(ex(i,:), ey, ep_1, ed_1
128         (i,:), eq, 50);
129     [es_2, edi_2, eci_2] = beam2s(ex(i,:), ey, ep_2, ed_2
130         (i,:), eq, 50);
131     [es_3, edi_3, eci_3] = beam2s(ex(i,:), ey, ep_3, ed_3
132         (i,:), eq, 50);
133
134     if i == 4
135         [es_4, edi_4, eci_4] = beam2s(ex(i,:), ey, ep_4_s
136             , ed_4(i,:), eq, 50);
137         [es_5, edi_5, eci_5] = beam2s(ex(i,:), ey, ep_5_s
138             , ed_5(i,:), eq, 50);
139     else
140         [es_4, edi_4, eci_4] = beam2s(ex(i,:), ey, ep_4_f
141             , ed_4(i,:), eq, 50);
142         [es_5, edi_5, eci_5] = beam2s(ex(i,:), ey, ep_5_f
143             , ed_5(i,:), eq, 50);
144     end
145
146     matrix_edi_1(i,:) = edi_1(:,2);
147     matrix_edi_2(i,:) = edi_2(:,2);
148     matrix_edi_3(i,:) = edi_3(:,2);
149     matrix_edi_4(i,:) = edi_4(:,2);
150     matrix_edi_5(i,:) = edi_5(:,2);
151
152     subplot(2,2,[1,2])
153     x = linspace(0,ellen,50) + (i-1)*ellen;
154     colors = ["#000000", "#ea5545", "#edbf33", "#b33dc6
155         "];
156     plot(x,1000*edi_1(:,2), 'Color', colors(1), 'LineWidth
157         ',2);
158     hold on
159     plot(x,1000*edi_2(:,2), 'Color', colors(1), 'LineWidth
160         ',2);
161     hold on
162     plot(x,1000*edi_3(:,2), 'Color', colors(2), 'LineWidth
163         ',2);
164     hold on

```

```

154 plot(x,1000*edi_4(:,2), 'Color', colors(3), 'LineWidth
      ',2);
155 hold on
156 plot(x,1000*edi_5(:,2), 'Color', colors(4), 'LineWidth
      ',2);
157 hold on
158
159 yline(0, 'Color', [0.7 0.7 0.7], 'LineWidth',2)
160 hold on
161 grid on;
162 title('\textbf{Initiell nedb}\{"o}jning f\{"o}r olika
      fuktscenarier (EPS densitet = 30 kg/m3)}', '
      Interpreter', 'latex', 'FontSize', 20);
163 xlabel('Balkl\ "angd [m]', 'Interpreter', 'latex', '
      FontSize', 18);
164 ylabel('Nedb\{"o}jning [mm]', 'Interpreter', 'latex',
      'FontSize', 18);
165 hold on
166 lgd = legend('Frisk platta', '\{"0}kad fuktproduktion'
      , '\{"0}versv\ "amning', ...
167 'Lokalt 1\ "ackage (4v)', 'Lokalt 1\ "ackage (12v)', '
      Interpreter', 'latex', 'FontSize', 18)
168 title(lgd, 'Status', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize'
      ,18)
169
170 hold on
171
172 % Create first small subplot
173 hold on
174 subplot(2,2,3)
175 xlim([3 4])
176 plot(x,1000*edi_1(:,2), 'Color', colors(1), 'LineWidth
      ',2);
177 hold on
178 plot(x,1000*edi_2(:,2), 'Color', colors(1), 'LineWidth
      ',2);
179 hold on
180 plot(x,1000*edi_3(:,2), 'Color', colors(2), 'LineWidth
      ',2);
181 hold on
182 plot(x,1000*edi_4(:,2), 'Color', colors(3), 'LineWidth
      ',2);
183 hold on
184 plot(x,1000*edi_5(:,2), 'Color', colors(4), 'LineWidth
      ',2);
185 hold on

```

```

186
187     grid on;
188     title('Inzoomad vy 1', 'FontSize', 14);
189     %     xlabel('Balkl\''angd [m]', 'Interpreter', 'latex
        ', 'FontSize', 12);
190     %     ylabel('Nedb\''{o}jning [mm]', 'Interpreter', '
        latex', 'FontSize', 12);
191     hold on
192
193     % Create second small subplot
194     subplot(2,2,4)
195     xlim([4.8 5.3])
196     plot(x,1000*edi_1(:,2), 'Color', colors(1), 'LineWidth
        ',2);
197     hold on
198     plot(x,1000*edi_2(:,2), 'Color', colors(1), 'LineWidth
        ',2);
199     hold on
200     plot(x,1000*edi_3(:,2), 'Color', colors(2), 'LineWidth
        ',2);
201     hold on
202     plot(x,1000*edi_4(:,2), 'Color', colors(3), 'LineWidth
        ',2);
203     hold on
204     plot(x,1000*edi_5(:,2), 'Color', colors(4), 'LineWidth
        ',2);
205     hold on
206
207     grid on;
208     title('Inzoomad vy 2', 'FontSize', 14);
209     %     xlabel('Balkl\''angd [m]', 'Interpreter', 'latex
        ', 'FontSize', 12);
210     %     ylabel('Nedb\''{o}jning [mm]', 'Interpreter', '
        latex', 'FontSize', 12);
211     hold on
212 end
213
214 % mean_vector = [mean2(matrix_edi_1);
215 %                mean2(matrix_edi_2);
216 %                mean2(matrix_edi_3);
217 %                mean2(matrix_edi_4);
218 %                mean2(matrix_edi_5)]
219 %
220 % std_vector = [std2(matrix_edi_1);
221 %               std2(matrix_edi_2);
222 %               std2(matrix_edi_3)];

```

```

223 % std2(matrix_edi_4);
224 % std2(matrix_edi_5)]

```

A.19 Nedböjning, efter 100 år (styvhetsberoende) enligt FEM (MATLAB skript)

```

1  clc, clear;
2
3  E_1 = 2.665170187535369e+07; % frisk
4  E_2=2.665170187535369e+07; % okad fuktp.
5  E_3=2.595805712485979e+07; % overs.
6  E_4=[2.665170187535369e+07; % frisk
7      2.470839405213303e+07]; % lok. 4v (4e elementet)
8  E_5=[2.665170187535369e+07; % frisk
9      2.041862812100337e+07]; % lok. 12v (4e elementet)
10 A = 1;
11 I = 1;
12 ex = [0 1; 1 2; 2 3; 3 4; 4 5; 5 6; 6 7; 7 8; 8 9; 9 10];
13 ey = [0 0];
14 ep_1 = [E_1 A I 0 8.2e6];
15 ep_2 = [E_2 A I 0 8.2e6];
16 ep_3 = [E_3 A I 0 8.2e6];
17
18 ep_4_f = [E_4(1) A I 0 8.2e6]; %frisk
19 ep_4_s = [E_4(2) A I 0 8.2e6]; %skadad
20
21 ep_5_f = [E_5(1) A I 0 8.2e6]; %frisk
22 ep_5_s = [E_5(2) A I 0 8.2e6]; %skadad
23
24 % k = 4.5; 6; 8.2;
25 b=2.95;
26 q1=-1.46e3; % N/m
27 qKLT=-0.66e3 * b; % N/m
28 qk=-2e3 * b; % N/m
29 eq = [0 q1+qKLT+qk;
30      0 q1+qKLT+qk;
31      0 q1+qKLT+qk;
32      0 q1+qKLT+qk;
33      0 qKLT+qk;
34      0 qKLT+qk;
35      0 qKLT+qk;
36      0 qKLT+qk;
37      0 qKLT+qk;
38      0 qKLT+qk];

```

```

39
40 % Frihetsgrader: 1, 2, 3 .... 1: hori kraft, 2: verti
    kraft, 3 moment
41 f_1 = zeros(33,1);
42 f_1(14) = -4.31e3;
43 f_2 = zeros(33,1);
44 f_2(14) = -4.31e3;
45 f_3 = zeros(33,1);
46 f_3(14) = -4.31e3;
47 f_4 = zeros(33,1);
48 f_4(14) = -4.31e3;
49 f_5 = zeros(33,1);
50 f_5(14) = -4.31e3;
51
52 Edof = [1 1 2 3 4 5 6;
53         2 4 5 6 7 8 9;
54         3 7 8 9 10 11 12;
55         4 10 11 12 13 14 15;
56         5 13 14 15 16 17 18;
57         6 16 17 18 19 20 21;
58         7 19 20 21 22 23 24;
59         8 22 23 24 25 26 27;
60         9 25 26 27 28 29 30;
61         10 28 29 30 31 32 33];
62
63 K_1 = zeros(33);
64 K_2 = zeros(33);
65 K_3 = zeros(33);
66 K_4 = zeros(33);
67 K_5 = zeros(33);
68
69 for i=1:10
70     dofs = Edof(i,2:7);
71
72     [Ke_1, fe_1] = beam2w(ex(i,:),ey,ep_1,eq(i,:));
73     K_1(dofs,dofs) = K_1(dofs,dofs) + Ke_1;
74     f_1(dofs,1) = f_1(dofs,1) + fe_1;
75
76     [Ke_2, fe_2] = beam2w(ex(i,:),ey,ep_2,eq(i,:));
77     K_2(dofs,dofs) = K_2(dofs,dofs) + Ke_2;
78     f_2(dofs,1) = f_2(dofs,1) + fe_2;
79
80     [Ke_3, fe_3] = beam2w(ex(i,:),ey,ep_3,eq(i,:));
81     K_3(dofs,dofs) = K_3(dofs,dofs) + Ke_3;
82     f_3(dofs,1) = f_3(dofs,1) + fe_3;
83

```

```

84     if i == 4 %skadad
85         [Ke_4, fe_4] = beam2w(ex(i,:), ey, ep_4_s, eq(i,:))
            ;
86         K_4(dofs, dofs) = K_4(dofs, dofs) + Ke_4;
87         f_4(dofs, 1) = f_4(dofs, 1) + fe_4;
88
89         [Ke_5, fe_5] = beam2w(ex(i,:), ey, ep_5_s, eq(i,:))
            ;
90         K_5(dofs, dofs) = K_5(dofs, dofs) + Ke_5;
91         f_5(dofs, 1) = f_5(dofs, 1) + fe_5;
92     else % frisk
93         [Ke_4, fe_4] = beam2w(ex(i,:), ey, ep_4_f, eq(i,:))
            ;
94         K_4(dofs, dofs) = K_4(dofs, dofs) + Ke_4;
95         f_4(dofs, 1) = f_4(dofs, 1) + fe_4;
96
97         [Ke_5, fe_5] = beam2w(ex(i,:), ey, ep_5_f, eq(i,:))
            ;
98         K_5(dofs, dofs) = K_5(dofs, dofs) + Ke_5;
99         f_5(dofs, 1) = f_5(dofs, 1) + fe_5;
100    end
101 end
102
103 bc = [1 0; 2 0; 32 0];
104 [a_1, r_1] = solveq(K_1, f_1, bc);
105 [a_2, r_2] = solveq(K_2, f_2, bc);
106 [a_3, r_3] = solveq(K_3, f_3, bc);
107 [a_4, r_4] = solveq(K_4, f_4, bc);
108 [a_5, r_5] = solveq(K_5, f_5, bc);
109
110 ed_1 = extract(Edof, a_1);
111 ed_2 = extract(Edof, a_2);
112 ed_3 = extract(Edof, a_3);
113 ed_4 = extract(Edof, a_4);
114 ed_5 = extract(Edof, a_5);
115
116 elnum = 10;
117 ellen = 10/elnum;
118 figure(1);
119 hold on;
120 for i = 1:elnum
121     [es_1, edi_1, eci_1] = beam2s(ex(i,:), ey, ep_1, ed_1
            (i,:), eq, 50);
122     [es_2, edi_2, eci_2] = beam2s(ex(i,:), ey, ep_2, ed_2
            (i,:), eq, 50);

```

```

123 [es_3, edi_3, eci_3] = beam2s(ex(i,:), ey, ep_3, ed_3
      (i,:), eq, 50);
124 if i == 4
125     [es_4, edi_4, eci_4] = beam2s(ex(i,:), ey, ep_4_s
      , ed_4(i,:), eq, 50);
126     [es_5, edi_5, eci_5] = beam2s(ex(i,:), ey, ep_5_s
      , ed_5(i,:), eq, 50);
127 else
128     [es_4, edi_4, eci_4] = beam2s(ex(i,:), ey, ep_4_f
      , ed_4(i,:), eq, 50);
129     [es_5, edi_5, eci_5] = beam2s(ex(i,:), ey, ep_5_f
      , ed_5(i,:), eq, 50);
130 end
131 subplot(2,2,[1,2])
132 x = linspace(0,ellen,50) + (i-1)*ellen;
133 colors = ["#000000", "#ea5545", "#edbf33", "#b33dc6
      "];
134 plot(x,1000*edi_1(:,2), 'Color', colors(1), 'LineWidth
      ',2);
135 hold on
136 plot(x,1000*edi_2(:,2), 'Color', colors(1), 'LineWidth
      ',2);
137 hold on
138 plot(x,1000*edi_3(:,2), 'Color', colors(2), 'LineWidth
      ',2);
139 hold on
140 plot(x,1000*edi_4(:,2), 'Color', colors(3), 'LineWidth
      ',2);
141 hold on
142 plot(x,1000*edi_5(:,2), 'Color', colors(4), 'LineWidth
      ',2);
143 hold on
144
145 ylim([-1.4 0.201])
146 yline(0, 'Color', [0.7 0.7 0.7], 'LineWidth',2)
147 hold on
148 grid on;
149 title('\textbf{Nedb}\{"o}jning efter 100 \r{a}r f\{"o}
      r olika fuktscenarier (EPS densitet = 30 kg/m3)}',
      'Interpreter', 'latex', 'FontSize', 20);
150 xlabel('Balkl\angd [m]', 'Interpreter', 'latex', '
      FontSize', 18);
151 ylabel('Nedb\{"o}jning [mm]', 'Interpreter', 'latex',
      'FontSize', 18);
152 hold on

```

```

153     lgd = legend('Frisk platta', '\{0}kad fuktproduktion'
154               , '\{0}versv\`anning', ...
155               'Lokalt 1\`ackage (4v)', 'Lokalt 1\`ackage (12v)', '
156               Interpreter', 'latex', 'FontSize', 18)
157     title(lgd, 'Status', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize'
158           , 18)
159     hold on
160
161     % Create first small subplot
162     hold on
163     subplot(2,2,3)
164     xlim([3 4])
165     plot(x, 1000*edi_1(:,2), 'Color', colors(1), 'LineWidth
166           ', 2);
167     hold on
168     plot(x, 1000*edi_2(:,2), 'Color', colors(1), 'LineWidth
169           ', 2);
170     hold on
171     plot(x, 1000*edi_3(:,2), 'Color', colors(2), 'LineWidth
172           ', 2);
173     hold on
174     plot(x, 1000*edi_4(:,2), 'Color', colors(3), 'LineWidth
175           ', 2);
176     hold on
177     plot(x, 1000*edi_5(:,2), 'Color', colors(4), 'LineWidth
178           ', 2);
179     hold on
180
181     grid on;
182     title('Inzoomad vy 1', 'FontSize', 14);
183     %     xlabel('Balkl\`angd [m]', 'Interpreter', 'latex
184           ', 'FontSize', 12);
185     %     ylabel('Nedb\`{o}jning [mm]', 'Interpreter', '
186           latex', 'FontSize', 12);
187     hold on
188
189     % Create second small subplot
190     subplot(2,2,4)
191     xlim([4.8 5.3])
192     plot(x, 1000*edi_1(:,2), 'Color', colors(1), 'LineWidth
193           ', 2);
194     hold on
195     plot(x, 1000*edi_2(:,2), 'Color', colors(1), 'LineWidth
196           ', 2);
197     hold on

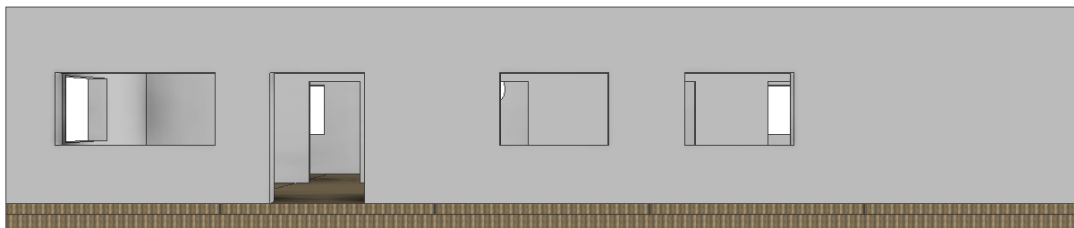
```

```

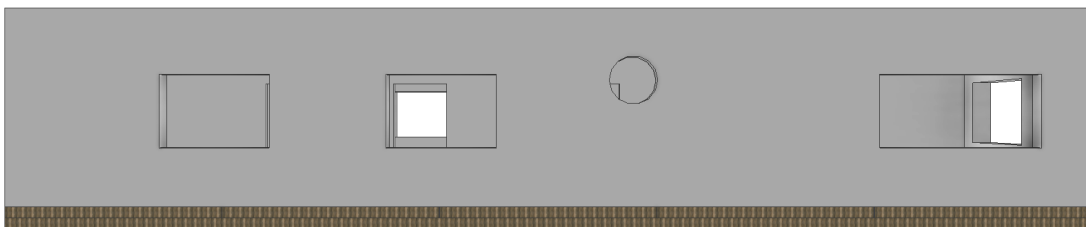
186 plot(x,1000*edi_3(:,2),'Color', colors(2), 'LineWidth
      ',2);
187 hold on
188 plot(x,1000*edi_4(:,2),'Color', colors(3), 'LineWidth
      ',2);
189 hold on
190 plot(x,1000*edi_5(:,2),'Color', colors(4), 'LineWidth
      ',2);
191 hold on
192
193 grid on;
194 title('Inzoomad vy 2', 'FontSize', 14);
195 % xlabel('Balkl\"angd [m]', 'Interpreter', 'latex
      ', 'FontSize', 12);
196 % ylabel('Nedb\"{o}jning [mm]', 'Interpreter', '
      latex', 'FontSize', 12);
197 hold on
198 end

```

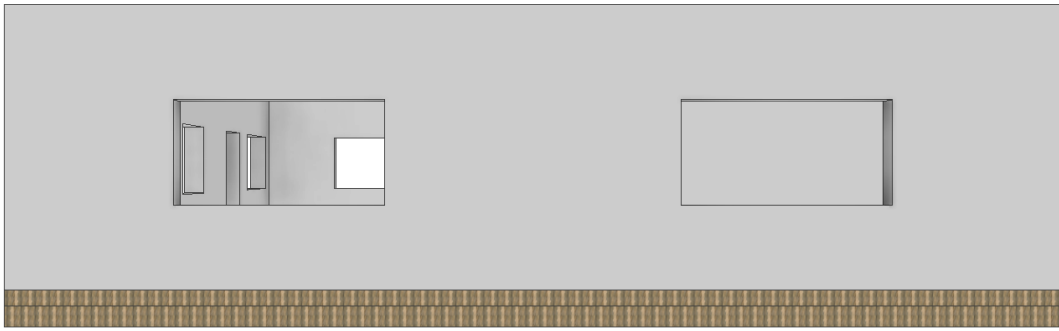
A.20 Referensbyggnad



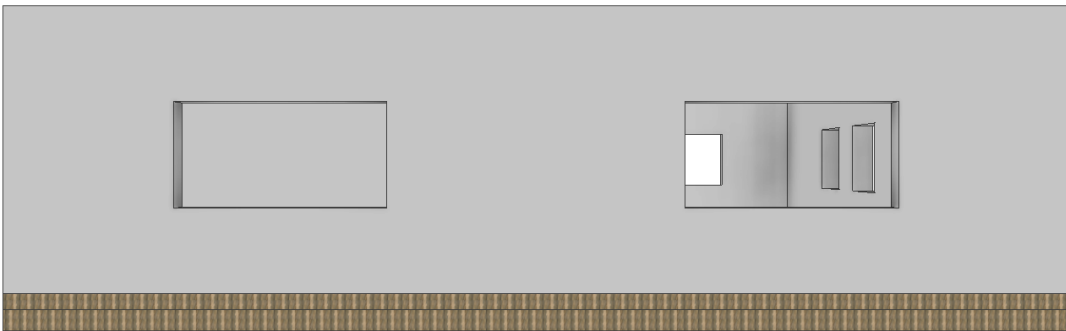
Figur A.13: Vy: framsida.



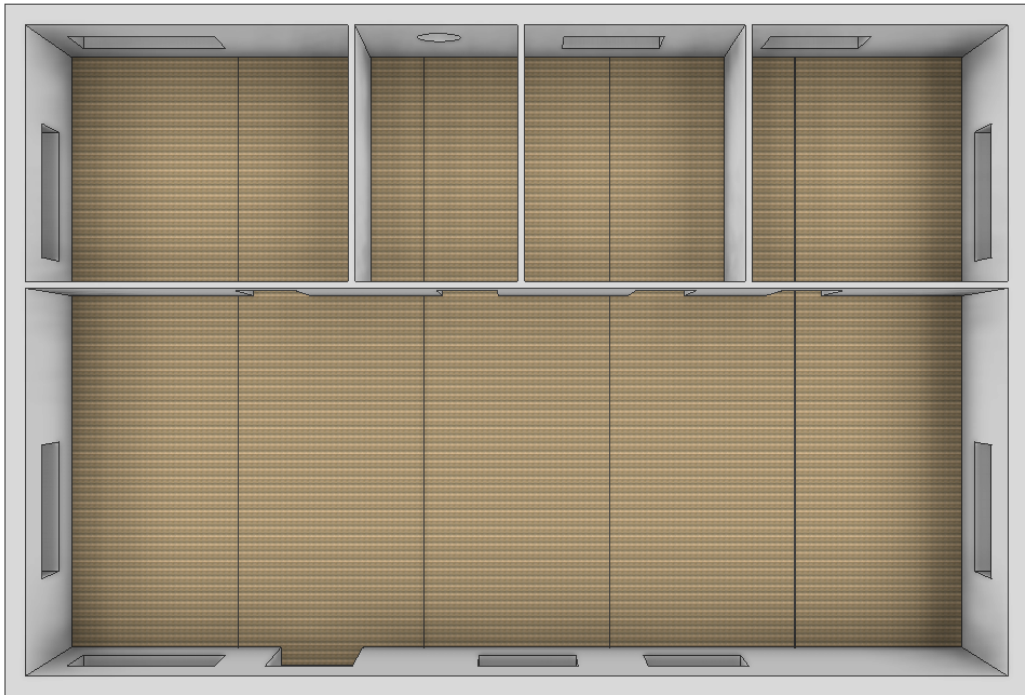
Figur A.14: Vy: baksida.



Figur A.15: Vy: högersida.



Figur A.16: Vy: vänstersida.



Figur A.17: Vy: översidan av huset.



Figur A.18: Vy: undersida av huset.

A.21 Lastberäkningar

Innervägg: gips-OSB-(70mm iso. 70mm reglar)-OSB-gips

$$\begin{array}{lll}
 b := 2.95 \text{ m} & \rho_{gips} := 960 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} & t_{gips} := 13 \text{ mm} \\
 h := 3 \text{ m} & \rho_{OSB} := 610 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} & t_{OSB} := 13 \text{ mm} \\
 & \rho_{iso} := 100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} & t_{trä} := 70 \text{ mm} \\
 & \rho_{trä} := 450 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} & d_{trä} := 45 \text{ mm} \\
 & & t_{iso} := 70 \text{ mm}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{ll}
 V_{trä} := 5 \cdot t_{trä} \cdot d_{trä} \cdot h = 0.047 \text{ m}^3 & m_{trä} := V_{trä} \cdot \rho_{trä} = 21.263 \text{ kg} \\
 V_{iso} := b \cdot h \cdot t_{iso} - V_{trä} = 0.572 \text{ m}^3 & m_{iso} := V_{iso} \cdot \rho_{iso} = 57.225 \text{ kg} \\
 V_{gips} := 2 \cdot b \cdot h \cdot t_{gips} = 0.23 \text{ m}^3 & m_{gips} := V_{gips} \cdot \rho_{gips} = 220.896 \text{ kg} \\
 V_{OSB} := 2 \cdot b \cdot h \cdot t_{OSB} = 0.23 \text{ m}^3 & m_{OSB} := V_{OSB} \cdot \rho_{OSB} = 140.361 \text{ kg}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \rho_{CLT} := 450 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\
 h_{CLT} := 150 \text{ mm}
 \end{array}$$

$$(m_{trä} + m_{iso} + m_{gips} + m_{OSB}) \cdot g = 4.312 \text{ kN} \quad \text{Punktlast fr. vägg}$$

$$(m_{trä} + m_{iso} + m_{gips} + m_{OSB}) \cdot \frac{g}{b} = 1.462 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \text{Utbredd last fr. vägg}$$

$$\rho_{CLT} \cdot h_{CLT} \cdot g = 0.662 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad \text{CLT egenvikt}$$

Figur A.19: Lastberäkningar.

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



CHALMERS