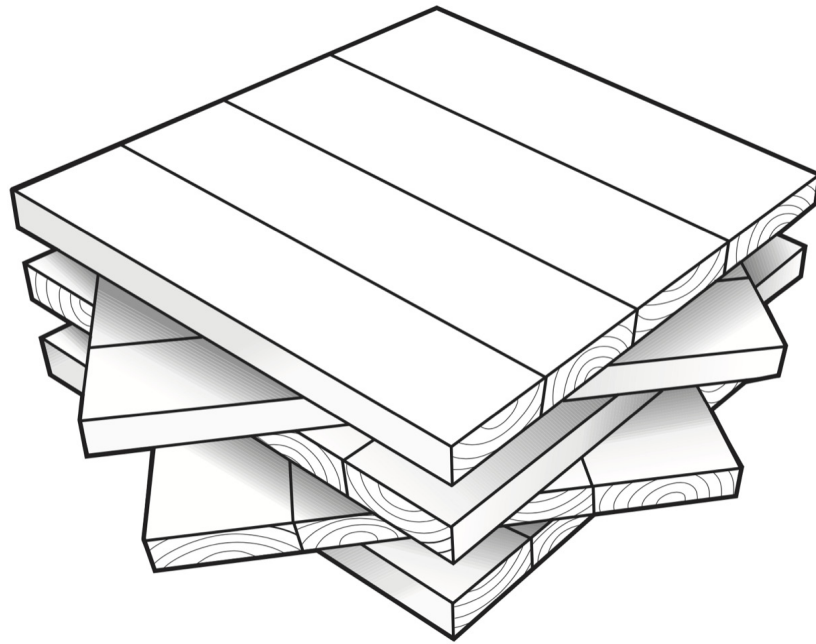




LUND
UNIVERSITY



INNOVATIV UTFORMNING AV KL-TRÄ

Diagonalt orienterade brädor

ALVA SVENSSON

Structural
Mechanics

Master's Dissertation

DEPARTMENT OF CONSTRUCTION SCIENCES
DIVISION OF STRUCTURAL MECHANICS

ISRN LUTVDG/TVSM--24/5269--SE (1-52) | ISSN 0281-6679

MASTER'S DISSERTATION

INNOVATIV UTFORMNING AV KL-TRÄ

Diagonalt orienterade brädor

ALVA SVENSSON

Supervisor: Professor **ERIK SERRANO**, Division of Structural Mechanics, LTH.
Examiner: **HENRIK DANIELSSON**, Associate Professor, Division of Structural Mechanics, LTH.

Copyright © 2024 Division of Structural Mechanics,
Faculty of Engineering LTH, Lund University, Sweden.
Printed by V-husets tryckeri LTH, Lund, Sweden, April 2024 (P).

For information, address:
Division of Structural Mechanics,
Faculty of Engineering LTH, Lund University, Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden.
Homepage: www.byggmek.lth.se

Abstract

Cross laminated timber (CLT) is a construction material consisting of crosswise glued layers of boards. It has high load-bearing capacity and is used in load-bearing structures such as walls and slabs. In today's discourse on environmental and climate issues, the use of timber products is often highlighted as a means to reduce the construction industry's climate impact. In traditional CLT, the boards are oriented with a 90° rotation between layers. Through innovative design, here referring to orientations other than $0^\circ/90^\circ$ in the layers, the aim is to utilize the materials' stronger direction. This could ultimately lead to more efficient material utilization.

The first part of this dissertation examined various methods to develop a computational model capable of representing the behavior of both traditional and innovatively designed CLT. A two-dimensional shell model, a model with solid layers, a model with solid boards, a model with seams and a model with a solid were created. Issues with the mesh's behavior arose in models with solid layers and solid boards, leading to the conclusion that these models could not effectively represent CLT. The shell model, solid model, and seam-model were capable of representing CLT. The Seam-model is more detailed than the model with shell and a solid due to the modeling of cuts between boards. Among the three models capable of representing the behavior of a CLT panel, it was observed that the deflection value varied depending on the model used. On average, the weakest model had 14 percent less stiffness than the stiffest model. Understanding the differences in stiffness between the models and the impact of various choices during modeling is crucial for obtaining reliable calculation results.

The second part of the dissertation consisted of a parameter study investigating how board orientation and the ratio of width to length of a plate affected deflection. The study revealed that traditional CLT performed better in deflection than diagonal orientations in most cases of rectangular and square plates, uniformly distributed load and point load, as well as two line supports, four point supports, and four line supports. The only cases where a 45° orientation resulted in less deflection than traditional CLT were for rectangular and square plates loaded with uniformly distributed load, supported on two line supports, with the middle layer oriented in the longitudinal direction. However, for a deviation less than 45° , there is a trend that the smaller deviation from the longitudinal direction, the smaller the deflection. For two line supports and four point supports, the variation in deflection with the ratio of width to length was similar for different orientations. For four line supports, traditional CLT had less increase than diagonal orientations. This meant that for plates supported by two line supports or four point supports, the orientations's impact on deflection decreased with an increasing ratio. However, for four line supports, the opposite applies, the greater the ratio, the greater the impact of the orientation.

Sammanfattning

Korslimmat trä (KL-trä) är ett konstruktionsmaterial som består av korsvis limmade brädor i flera lager. Det har god bärförmåga och används till bärande konstruktioner, främst som väggar och bjälklag. I dagens diskussion om miljö- och klimatfrågor tas användningen av träprodukter ofta upp som en del i att minska byggbranschens klimatpåverkan. I traditionellt KL-trä är brädorna orienterade med 90° rotation mellan varje lager. Med innovativ utformning, i detta arbete avses att använda andra orienteringar än 0°/90° för brädorna i de näst yttersta lagren, är förhoppningen att träets styva riktning ska kunna utnyttjas mer. Detta skulle i förlängningen kunna leda till mer effektiv materialanvändning.

I arbetets första del undersöktes olika metoder för att skapa en beräkningsmodell som kunde representera beteendet hos traditionellt och innovativt utformat KL-trä. En tvådimensionell skalmodell, en modell med solida lager, en modell med solida brädor, en modell med *seams* och en modell med en solid skapades. I modellerna med solida lager och solida brädor uppstod problem med elementnätets beteende vilket gjorde att de modellerna bedömdes att inte kunna representera KL-trä. Skalmodellen, solidmodellen och *seam*-modellen bedömdes kunna representera KL-trä. *Seam*-modellen är mer detaljerad än skal- och solidmodellen eftersom skarvarna mellan brädorna modelleras. Bland de tre modeller som bedömdes kunna representera beteendet hos en KL-platta kunde konstateras att storleken av nedböjningen varierade beroende på vilken modell som användes. Den vekaste modellen hade i genomsnitt 14 % lägre styvhet än den styvaste. Hur modellerna skiljer sig åt i styvhet och vilken inverkan olika val i uppbyggnaden har är viktigt för att få ett pålitligt resultat av beräkningarna.

Arbetets andra del bestod av en parameterstudie som undersökte hur orienteringen på brädorna samt förhållandet mellan bredd och längd påverkade nedböjningen. Studien visade att traditionellt KL-trä är bättre än diagonal orientering i de flesta fallen av rektangulär och kvadratisk platta, jämnt utbredd last och punktlast samt två linjestöd, fyra punktstöd och fyra linjestöd. De enda fallen där orientering på 45° ger mindre nedböjning än traditionellt KL-trä är för rektangulär och kvadratisk platta belastad med jämnt utbredd last, upplagd på två linjestöd och med mittersta lagret i orienterat i den longitudinella riktningen. För avvikelser under 45° fanns däremot en trend av att ju mindre brädornas orientering avviker från den longitudinella riktningen desto mindre blir nedböjningen. För två linjestöd och fyra punktstöd var nedböjningens variation med förhållandet mellan bredd och längd liknande för olika orienteringar. För fyra linjeupplag hade traditionellt KL-trä mindre ökning än diagonala orienteringar. Detta innebär att för plattor på två linjestöd och fyra punktstöd minskar orienteringens inverkan på nedböjningen med ökat förhållande. För fyra linjestöd gäller motsatsen, ju större förhållande desto större inverkan har orienteringen.

Förord

Detta arbetet markerar slutet på min utbildning till Civilingenjör inom Väg och Vattenbyggnad. Examensarbetet har genomförts tillsammans med avdelningen för byggnadsmekanik vid Lunds Tekniska Högskola och omfattar 30 hp. Ett antal personer har haft stor påverkan på resultatet av detta arbete och till dem vill jag uttrycka min tacksamhet.

Stort tack till min handledare Erik Serrano och examinator Henrik Danielsson som genom hela arbetet har bidragit med stöttning och kunskap närhelst det har behövts. Jag vill också rikta ett tack till mina vänner på sektionen som gjort hela studietiden till en fantastisk upplevelse.

Lund, mars 2024

Alva Svensson

Innehåll

Abstract	I
Sammanfattning	III
Förord	V
Innehåll	VII
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte, mål, frågeställningar	2
1.3 Avgränsningar	2
2 Metod	3
3 Trä och Korslimmat trä	5
3.1 Trä som konstruktionsmaterial	5
3.2 Korslimmat trä	8
3.3 Diagonalt Limmat Trä	10
4 Beräkningsteori	13
5 Resultat: Beräkningsmodell	17
5.1 Skalmodell	19
5.2 Modell med solida lager	21
5.3 Modell med solida brädor	21
5.4 Modell med seams	23
5.5 Solidmodell	24
5.6 Jämförelse av modeller	25
6 Resultat: Parameterstudie	29
6.1 Undersökning av orientering	30
6.2 Undersökning av förhållandet bredd:längd	34
7 Diskussion och slutsater	39
7.1 Beräkningsmodell	39
7.2 Parameterstudie	41
Litteratur	45
A Bilagor	47

1 Inledning

Inledningen ger en introduktion till arbetet där bakgrund till problemställningen beskrivs tillsammans med syfte, mål och frågeställningar. Även avgränsningar i arbetet presenteras.

1.1 Bakgrund

Miljö- och klimatfrågor diskuteras flitigt i dagens samhälle och är viktiga inom alla branscher. I Sverige finns det flera mål och lagar som påverkar hur landet jobbar med hållbarhetsfrågor, Fossilfritt Sverige, Sveriges klimatmål och FN:s globala mål för att nämna några. Bygg- och anläggningsbranschen står i dagsläget för en femtedel av Sveriges totala utsläpp av växthusgaser och har genom initiativet Fossilfritt Sverige ett mål på netto nollutsläpp 2045 [1]. För att nå detta krävs att åtgärder vidtas på flera plan samtidigt. Att bygga i trä tas inom branschen ofta upp som positivt för klimatet. Trä är ett förnybart material med energisnål tillverkning och god hållfasthet och styvhet i förhållande till sin vikt. Dessutom innebär den låga vikten klimatfördelar vid transport då stora volymer kan fraktas tillsammans [2]. Historiskt är byggandet i trä en viktig del i Sverige men sedan slutet av 1800-talet har byggnader i trä begränsats till högst två våningar, till stor del på grund av risken för stadsbränder som förelåg under denna tid. På 1990-talet, i samband med att Sverige blev medlem i EU och funktionsbaserade byggbestämmelser började gälla blev det åter tillåtet att bygga höga byggnader i trä. Sedan dess har omfattande forskning och kunskapsutveckling skett inom området och med hänsyn till klimatfrågor blir det allt viktigare att öka och sprida kunskap om träbyggandet [3].

Korslimmat trä, KL-trä är ett konstruktionsmaterial som består av korsvis limmade brädor i flera lager. Utvecklingen började i Centraleuropa på 1990-talet då forskare fick i uppdrag att utveckla en produkt för modernt träbyggande och presenterade Kreuzlagenholz, korslimmat trä, som utnyttjar träets egenskaper på ett effektivt sätt. Tekniken spreds till Sverige där de första mindre projekten byggdes i början av 2000-talet. Ett av de första större projekten är Inre hamnen i Sundsvall vilket stod klart 2006. Sedan dess har tillverkningen av KL-trä ökat för varje år. KL-trä har hög bärförmåga i förhållande till sin vikt och kan användas som bärande element i form av skivor, plattor, balkar och pelare. Materialet ger stor frihet vid utformningen och enkel montering till följd av den höga förtillverkningsgraden och goda möjligheter till justering på plats [2].

Idag används KL-trä främst i form av skivor och plattor i antingen väggar eller bjälklag. Bjälklag kan belastas med vertikala laster i form av egentygnd och nyttig last samt horisontella laster som exempelvis vindlast. Ett vanligt utförande av bjälklag i KL-trä består av en fritt upplagd platta på två stöd längs hela plattans bredd. Vid dimensionering betraktas en sådan platta bära last i enbart i en riktning, vanligtvis är brädorna i de yttre lagren orienterade i samma riktning [2]. Detta utförandet kräver

att det finns linjestöd längs hela plattans bredd i form av väggar eller balkar. Väggar begränsar byggnadens planlösning och balkar kan minska den fria rumshöjden. Ett alternativ till linjestöd är upplag på fyra punktstöd vilket tillåter flexibel planlösning och höga rumshöjder. Vid användning av punktstöd koncentreras tvärkrafterna i området kring stöden och risken för rullskjuvbrott ökar. Dessutom uppstår böjning i två riktningar och därmed vridning. En platta i KL-trä med upplag i form av fyra punktstöd måste därför kunna hantera höga tvärkrafter och vridning. Med innovativ utformning är förhoppningen att styvheten hos plattor upplagda på linjestöd och punktstöd ska öka genom att utnyttja träets starka riktning mer. I förlängningen kan det leda till mer effektiv materialanvändning vilket är positivt ur klimatsynpunkt [4].

1.2 Syfte, mål, frågeställningar

Syftet med arbetet är att fördjupa kunskapen om traditionellt och innovativt utformade KL-trä plattor för att kunna optimera användningen av råvaran. Arbetet går ut på att skapa och utvärdera modeller med målet att hitta en eller flera metoder som med nödvändig noggrannhet och precision kan representera beteendet hos traditionellt och innovativt KL-trä. Lämplig modell väljs ut för att genomföra en parameterstudie på hur faktorer i utformningen påverkar nedböjningen för bjälklag med olika upplagsförhållanden. Följande frågeställningar formulerades:

Vilka metoder kan användas för att modellera innovativt och traditionellt utformade KL-skivor?

Hur påverkar orientering på brädor samt förhållande mellan bjälklagets bredd och längd nedböjningen?

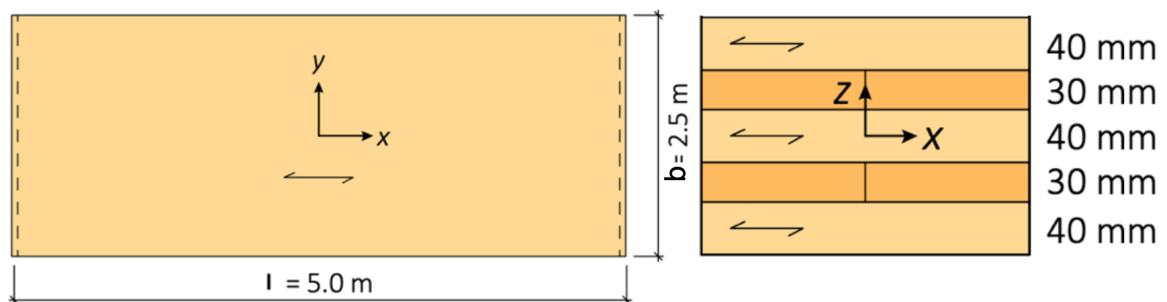
1.3 Avgränsningar

Med innovativ utformning avses i detta arbetet att orientera brädorna med andra orienteringar än $0^\circ/90^\circ$ som är standard idag. Det är brädorna i de näst yttersta lagren som ges annan orientering i detta arbetet. Andra innovativa utformningar, exempelvis hålrum mellan brädorna och andra träslag studeras inte. Arbetet begränsas till att undersöka det linjärelastiska beteendet vid statisk belastning ut ur planet. Ytterligare begränsningar är i första hand kopplade till den begränsade tid som står till förfogande för arbetet. Endast en variant av KL-trä har undersökts, uppbyggd av fem lager.

2 Metod

Arbetet består av två delar. I första steget undersöks olika metoder för att skapa en beräkningsmodell som kan representera beteendet hos traditionellt och innovativt utformat KL-trä. Nästa steg är en parameterstudie där flera orienteringar och förhållande mellan bredd och längd undersöks. Arbetet utfördes i datorprogrammet Abaqus men även andra program kan användas.

Vid undersökning av beräkningsmodell testas olika metoder, både tvådimensionella och tredimensionella metoder undersöks. Uppbyggnaden på KL-plattan som alla modeller bygger på är enligt figur 2.1: en 5 meter lång och 2,5 meter bred symmetrisk platta som består av fem lager. Tjockleken hos de två yttre och det mittersta lagret är 40 mm och hos resterande lager är tjockleken 30 mm. Alla ingående brädor har virkeskvaliteten C24 och bredden 156,25 mm. Brädorna är endast hoplimmade på flatsidorna, inget lim antas hamna mellan brädornas vertikala sidor. Plattan utsätts för en jämnt utbredd last på 7356 N/m^2 , denna har bestämts utifrån egentyngd från plattan och golvläggning samt en variabel nyttig last. I uppbyggnaden för de innovativt utformade skivorna är det brädorna i de två näst yttersta lagren som ska ges en annan orientering än $0^\circ/90^\circ$. Det är den longitudinella riktningen som betraktas som 0° och transversella som betraktas som 90° . Dessa orienteringar undersöks för det mittersta lagret orienterat både longitudinellt och transversellt. De undersökta orienteringarna i denna del är $[0,90,0,90,0]$, $[0,+45,90,-45,0]$ och $[0,+45,0,-45,0]$. De upplagsvillkor som undersöks är två linjestöd, fyra punktstöd och fyra linjestöd.



Figur 2.1: Dimensioner hos KL-platta.

En lämplig modell från den första delen av arbetet väljs ut för att genomföra parameterstudie av. I parameterstudien ingår två undersökningar: hur orienteringen av brädorna påverkar nedböjningen för olika längder och stöd samt om olika förhållanden mellan bredd och längd påverkar nedböjningens variation för olika orienteringar och stöd. De förhållande mellan bredd och längd som undersöks är 1:1, 1:1,25, 1:1,5, 1:1,75 och 1:2, med en konstant bredd på 2,5 meter. Undersökta upplagsvillkor i denna delen är två linjestöd, fyra punktstöd och fyra linjestöd. Det utvärderas ett antal kombinationer av orienteringar α hos brädorna i de näst yttersta lagren. Vinklar mellan 0° och 90° , med ett hopp om 10° samt diagonalen undersöks hos skivor med både 0° och 90° i mittersta lagret. Parametrar sammanfattas i tabell 2.1.

Tabell 2.1: Parametrar som varierar i parameterstudien.

Förhållande bredd:längd	Upplagstyp	Orientering
1:1	Två linjestöd	$0,\alpha,90,\alpha,0$
1:1,5	Fyra punktstöd	$0,\alpha,0,\alpha,0$
1:1,25	Fyra linjestöd	
1:1,5		
1:1,75		
1:2		

3 Trä och Korslimmat trä

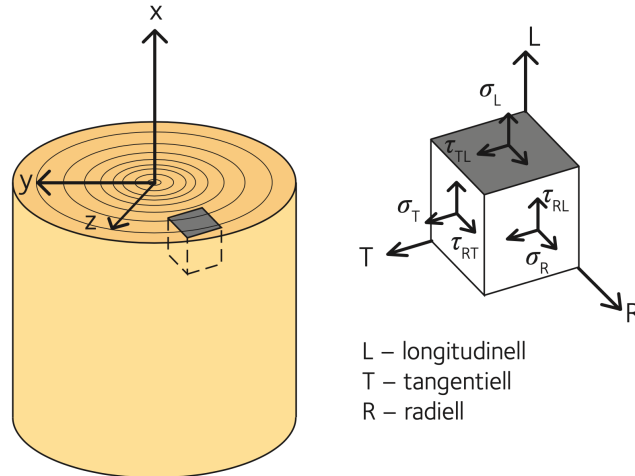
Detta avsnittet beskriver hur trä som material är uppbyggd, vilka egenskaper det har och hur de varierar. Vidare presenteras uppbyggnad, framställning och egenskaper för den förädlade träprodukten KL-trä. Till sist introduceras *Diagonal Laminated Timber*, DLT, vilket är en innovativ utformning av KL-trä.

3.1 Trä som konstruktionsmaterial

Konstruktionsprodukter i trä är skapade från träd, antingen som massiva eller sammansatta produkter. De vanligaste träarterna för virke i Sverige är gran och tall. Trädets egenskaper är optimalt utvecklade för att möta de förhållanden det exponeras för i naturen och är därför inte alltid fördelaktiga vid användningen av trä som konstruktionsmaterial. Av denna anledning är det viktigt att ha kunskap om träets uppbyggnad och struktur [5].

Trä består av kol, väte och syre som i olika formationer bygger upp rörformiga celler. Rörcellerna är orienterade i stammens längsriktning och växer i cirklar kring stammens mitt. Tjockleken på cellväggarna varierar med träslag och årstid. Under våren när trädet har stort behov av transport av vatten och näring bildas celler med tunna cellväggar och stora cellhålrum. Denna celltypen kallas vårved och har en ljus färg. På sommaren och hösten är behovet av transport lägre och cellerna som bildas har tjockare cellväggar och mindre cellhålrum. Denna celltypen kallas sommarved och har en mörkare färg. Allt eftersom åren går bildas flera omgångar av vårved och sommarved vilket är möjligt att se som årsringar i träet [5].

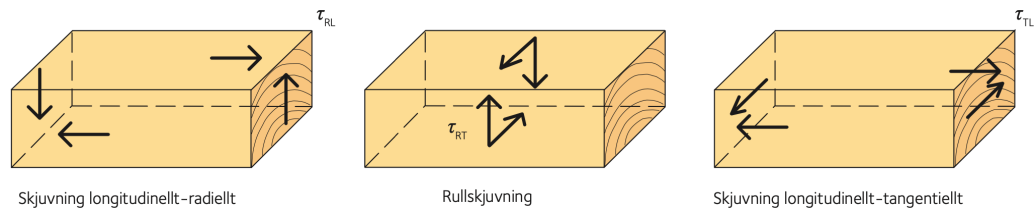
Träets uppbyggnad med rörformiga celler innebär att det har olika egenskaper i olika riktningar, det vill säga det är ett anisotropt material. Materialet antas dock ofta vara ortogonalt anisotropt, det vill säga ortotropt. De tre materialriktningar som ofta används för att beskriva trä materialet visas i figur 3.1. Den longitudinella riktningen kallas ofta fiberriktningen och är parallell med trädets stam. Den tangentiella riktningen är vinkelrät mot den longitudinella och tangentiell till årsringarna. Den radiella riktningen är vinkelrät mot den longitudinella och radiell till årsringarna. Skillnaden i egenskaper i den tangentiella och radiella riktningen är liten och bortses ofta från. I praktiken används därför två riktningar för att beskriva materialet, parallellt med fiberriktningen och vinkelrätt mot fiberriktningen [6].



Figur 3.1: Definition av riktningar i trätvärsnitt. Bildkälla: *Dimensionering av Träkonstruktioner Del 1/Svenskt Trä*.

För att beskriva trämaterialens beteende inom det elastiska området krävs ett antal materialegenskaper, elasticitetsmodul, skjuvmodul och tvärkontraktionstal, i respektive riktning. Genom att bortse från skillnaderna i tangentiell och radiell riktning samt anta symmetriska tvärkontraktionstal kan beteendet beskrivas med sex konstanter, elasticitetsmodulerna E_{\parallel} , E_{\perp} , skjuvmodulerna G_{\parallel} , G_{\perp} och tvärkontraktionstalen ν_{\parallel} , ν_{\perp} . Där \parallel betecknar parallellt fibrerna och \perp betecknar vinkelrätt fibrerna [6].

Trä har högre hållfasthet parallellt fibrerna, både i tryck och drag, än vinkelrätt fibrerna. Den högsta hållfastheten är i tryck parallellt fibrerna och den lägsta är i drag vinkelrätt fibrerna. Värdet för skjuvhållfasthet beror på vilka riktningar som betraktas, de olika skjuvningarna visas i figur 3.2. Vanligast förekommande är skjuvning i planen parallella med fiberriktningen, τ_{RL} - och τ_{TL} -riktningen [5]. I τ_{TL} -riktningen går brottlinjen genom både sommar- och vårveden vilket innebär högre skjuvhållfasthet än i τ_{RL} -riktningen där brottlinjen endast går genom den svagare vårveden. Det går dock inte att skilja mellan dessa i praktiken varför det lägre av de två värdena används. Notera att det i *Dimensionering av Träkonstruktioner* [5] anges att brottlinjen går genom vårveden för τ_{TL} och genom sommar- och vårveden för τ_{RL} vilket ger omvänt förhållande i hållfasthet. Med analogi kan läsaren dock inse att brottlinjerna och hållfasthetsrelationen är som nämt ovan. Detta bekräftas även i uppmätta styvhets-egenskaper där τ_{TL} är högre än τ_{RL} [7]. Vid skjuvning i τ_{RT} -riktningen rullar fibrerna mot varandra, så kallad rullskjuvning. Rullskjuvning är bara vanligt förekommande för vissa träprodukter och hållfastheten är omkring hälften av skjuvhållfastheten parallellt fibrerna [5].



Figur 3.2: Skjuvning i olika riktningar. Bildkälla: *Dimensionering av Träkonstruktioner Del 1/Svenskt Trä*.

Träets egenskaper varierar inte enbart med riktningen för fibrerna utan är också beroende av variationer i träet, förhållanden i omgivningen och belastningstiden. Variationer i träet kan uppstå lokalt där grenar växer ut från stammen och bildar en kvist. Fibrerna sveper runt kvisten och fiberriktningen är inte längre kontinuerlig vilket påverkar hållfastheten negativt. Variation i egenskaper visas också i större områden i materialet. Exempelvis i juvenilverden som skapas under trädets första 5-20 år av tillväxt och i den reaktionsved som bildas när trädet utsätts för påkänningar. Provningar i trä visar att storleken av provkroppen har en inverkan på hållfastheten. Detta kan förklaras med att ju större volym desto högre sannolikhet att materialet innehåller någon svaghet som kan initiera brottet. Vid dimensionering beaktas volymeffekten med modifieringsfaktorer av hållfastheten för vissa belastningsfall [5].

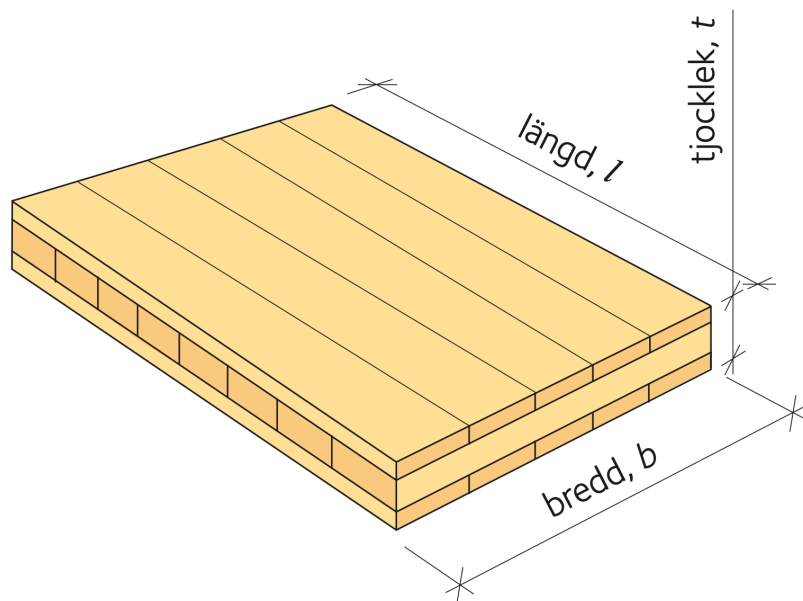
Omgivningen som träet är placerat i påverkar dess temperatur och fukttinnehåll vilket har inverkan på de mekaniska egenskaperna. Temperaturpåverkan är relativt liten inom normala temperaturer och tas normalt ingen hänsyn till vid dimensionering. Fukttinnehållet däremot kan ge betydande påverkan och tas därför hänsyn till genom reduktion av hållfasthetsvärden. Störst påverkan har fukttinnehållet på tryckhållfastheten medan draghållfastheten inte påverkas nämnvärt. Förutom påverkan på de mekaniska egenskaperna gör variationer i fukttinnehåll att träet krymper och sväller vilket kan leda till andra konstruktionstekniska svårigheter. Längdförändring för stora längder och formförändring vid varierande krympning behöver beaktas i vissa fall, inte minst i förband där förhindrad krympning kan ge risk för uppsprickning [5].

Belastningstiden påverkar de mekaniska egenskaperna hos träet i den mening att hållfastheten minskar med ökad belastningstid. Särskilt tydligt är det för böjhållfastheten. Effekterna av belastningstid tas hänsyn till vid dimensionering genom reduktion av hållfasthetsvärden baserat på lastvarighetsklass för pålagd last. Lastens varaktighet och fukttinnehåll kombineras i Eurokod 5 till en modifieringsfaktor, k_{mod} . Förutom hållfastheten påverkar belastningstiden även deformationerna. För trä som belastas med en konstant last ökar deformationerna med tiden. Denna effekten kallas krypning och beaktas vid dimensionering enligt Eurokod 5 med en krypfaktor k_{def} [5].

Med anledning av den stora variation i hållfasthet som trä uppvisar är det nödvändigt att sortera materialet i olika hållfasthetsklasser. Sortering kan genomföras visuellt eller maskinellt. I de flesta standarder sorteras materialet efter böjhållfasthet. Visuell sortering bygger på att hållfastheten bedöms utifrån upptäckta virkesfel. Varje hållfasthetsklass tillåter en viss typ och storlek av virkesfel. Nackdelen med visuell sortering är att det endast är yttre defekter som kan upptäckas. Maskinell sortering testar virket genom en icke-förstörande mätning av en eller flera parametrar, vanligen elasticitetsmodul och densitet, för att kunna förutse hållfastheten [5].

3.2 Korslimmat trä

Korslimmat trä, KL-trä, är uppbyggt av hoplimmade brädor i flera lager. Normalt används brädor av gran eller furu till KL-trä, men även andra träslag kan förekomma. Antalet lager i en platta av KL-trä är normalt udda, 3, 5, 7 och 9 lager är vanligt förekommande. Brädorna i varje lager är roterade 90° i förhållande till intilliggande lager. Brädorna kan ha samma tjocklek i varje lager eller variera mellan lagren. Om tjockleken varierar har normalt de lager som går i samma riktning samma tjocklek, men även helt osymmetriska tvärsnitt förekommer. Detta bör dock undvikas på grund av olikartade deformationer och fuktrörelse. Vanligt förekommande mått på brädorna är tjocklek på 20–45 mm och bredd på 80–200 mm, förhållandet mellan bredd och tjocklek är normalt 4:1 eller mer. Brädorna är av hållfasthets sorterat virke enligt SS-EN 14081-1 med hållfasthetsklass C14-C30. Samma hållfasthetsklass på brädorna kan användas för hela tvärsnittet men för att utnyttja träet optimalt kan brädor med högre hållfasthet användas i de yttre lagren och i huvudbärriktningen. Olika tillverkare av KL-trä har olika standarder gällande tjocklek, tvärsnittsuppbyggnad och hållfasthetsklass. Uppbyggnad och definition av dimensioner hos en KL platta visas i figur 3.3 och vanligt förekommande mått redovisas i tabell 3.1 [2].



Figur 3.3: Platta i KL-trä. Bildkälla: *KL-trähandboken/Svenskt Trä*.

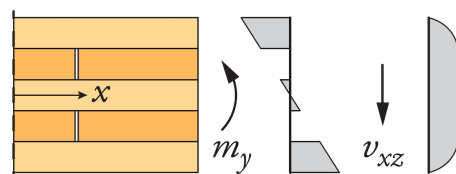
Tabell 3.1: Vanligt förekommande mått på brädor som används vid KL-trätillverkning och färdiga KL-träplattor.

Parameter	Vanligt förekommande
Tjocklek, bräda	20-45 mm
Bredd, bräda	80-200 mm
Hållfasthetsklass, bräda	C14-C30
Tjocklek, KL-skiva, t	80-300 mm
Bredd, KL-skiva, b	1,2-3,0 m
Längd, KL-skiva, l	16-30 m
Antal skikt, KL-skiva	3, 5, 7, 9 st

Tillverkningen av produkter i KL-trä sker i fabrik och ser till stor del likadan ut för olika tillverkare och i olika länder. Hållfasthets sorterat och torkat virke levereras från sågverket till fabriken. Brädorna ska ha en fuktkvot mellan 8–15 % vid limningen. Bäst resultat av limningen fås om fuktkvoten ligger nära den fuktkvot brädorna förväntas ha i den färdiga konstruktionen. Fuktkvoten beror även på vilket lim som används och vad produkten ska användas till. De enskilda brädorna sätts ihop med fingerskarvar till långa brädor och när limmet torkat hyvlas brädornas flatsida. Direkt efter hyvlingen läggs brädorna ihop till plattor med flera lager och limmas ihop under tryck. Generellt appliceras lim på brädornas över och undersida men även limning av de horisontella sidorna, så kallad kantlimning kan förekomma. När limmet har härdat erforderlig tid utförs efterbearbetning, sedan paketeras elementet och är klart för leverans till byggarbetsplatsen [2].

Vid tillverkningen av KL-trä följs de krav som ställs i Standarden *SS-EN 16351 Träkonstruktioner - Massivträ för byggsystem - Krav*. Inom EU finns en produktmärkning som visar att tillverkaren har följt grundläggande regler, CE-märkning. Produkter med CE-märkning får säljas inom EES-området utan någon ytterligare dokumentation. För att en produkt ska kunna CE-märkas krävs att det finns en harmoniserad standard, något som inte finns för KL-trä i nuläget. KL-trätillverkare kan istället certifiera sina produkter enligt European Technical Assessment, ETA. Den tillverkade produkten måste då uppfylla de egenskaper tillverkaren deklarerar i sin ETA. Certifiering av produkter är viktigt för att säkerställa att produkterna håller den kvalitet som tillverkaren påstår, med den europeiska standarden för certifiering säkerställs dessutom att produkter från olika länder håller samma standard. Den mest kritiska delen för god kvalitet och hållfasthet hos KL-trä är limningen. Fingerskarvarna och limfogarnas kvalitet kontrolleras därför noggrant genom intern egenkontroll och av utomstående kontrollorgan [2].

Som nämnt i avsnitt 3.1 *Trä som konstruktionsmaterial* har trä betydligt högre hållfasthet parallellt fiberriktningen än vinkelrätt mot fibrerna. Eftersom förhållandet är så stort kan hållfastheten vinkelrätt fibrerna antas vara noll. Detta ger en mer komplex spänningsbild för KL-trä än för massivt trä då lastupptagningen blir olika i de olika lagren. För massiva tvärsnitt belastade i böjning varierar böjspänningen linjärt över höjden med tryck i ovankant, drag i underkant och ingen spänning i neutrala lagret. Skjuvspänningen varierar kvadratisk över hela höjden. I KL-trä varierar spänningen enligt figur 3.4. Böjspänningen varierar linjärt över höjden men tas endast upp i de longitudinella lagren. Skjuvspänningar fördelas i både de longitudinella och transversella lagren. Över de longitudinella lagren varierar skjuvspänningen kvadratisk medan den i de transversella antas vara konstant [2].



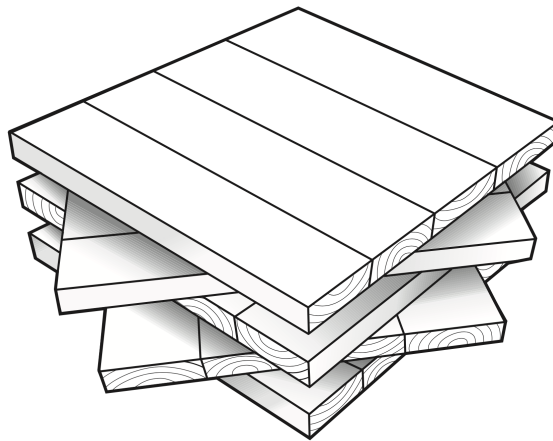
Figur 3.4: Spänningsfördelning av böjspänning och skjuvspänning i KL-trä tvärsnitt.

I likhet med andra träprodukter uppvisar KL-trä variationer i hållfasthet. Dels variationer på grund av fuktkvot, belastningstid och varierande materialegenskaper. Precis

som för trämaterialiet uppvisar dessutom KL-trä ett ortotrop beteende. Det finns inga framtagna hållfasthetsklasser för KL-trä utan hållfastheten baseras på de ingående brädornas karakteristiska hållfasthet. Tack vare den korsvisa uppbyggnaden i KL-trä är hållfastheten högre än i massivt virke. På grund av detta kan böj- och draghållfastheten ökas med en systemeffektfaktor, k_{sys} . Trä har störst hållfasthet parallellt med fibrerna och eftersom spänningen är störst i ovan- och underkant vid böjbelastning brukar brädorna orienteras så att de ligger i plattans huvudbärriktning i de yttersta lagren. Som tidigare nämnts kan även brädor med högre hållfasthetsklass användas i dessa lager för att utnyttja träet maximalt [2].

3.3 Diagonalt Limmat Trä

Vid traditionell tillverkning av KL-trä orienteras brädorna med 90° rotation mellan varje lager. I ett antal forskningsprojekt har en innovativ variant av KL-trä undersökts där brädorna är orienterade med andra vinklar än 90° i förhållande till intilliggande lager enligt figur 3.5. Produkter av detta slag kallas *Diagonal Laminated Timber*, DLT, eller på svenska diagonalt limmat trä. Där det är viktigt att skilja på vilken typ av KL-trä som benämns kommer i fortsättningen de engelska beteckningarna CLT (*Cross Laminated Timber*) och DLT (*Diagonal Laminated Timber*) att användas för element med 90° förskjutning mellan varje lager respektive element med diagonala orienteringar. Begreppet DLT kommer innefatta element med alla olika orienteringar som inte är $0^\circ/90^\circ$.



Figur 3.5: Illustration av Diagonalt Limmat Trä, DLT.

På grund av trämaterialiets låga hållfasthet och styvhet vinkelrätt fibrerna utgör de transversella lagren i huvudsak en distans mellan de lastbärande longitudinella lagren vid böjning i en riktning. Ökad tjocklek av hela tvärsnittet leder till större styvhet men ur ett resursanvändningsperspektiv är det mycket ineffektivt att lagret inte bidrar till att bära last [4]. Även om de longitudinella lagren har störst påverkan på plattans bärförmåga är det viktigt att ta hänsyn till materialegenskaperna hos de transversella lagren [8]. Genom användning av diagonala brädor är förhoppningen att lasten kan bäras mer i träets starka och styva riktning.

Diagonal orientering av brädor i limmade träprodukter har studerats tidigare. Richard Bosl var först med att undersöka effekten av diagonala brädor år 2002 när han undersökte bärförmågan för skivelement belastade i planet. År 2010 publicerades ytterligare en studie av skivor belastade i planet, denna med fokus på bärförmåga och stabilitet vid jordbävningar [4].

Begreppet DLT myntades första gången i en studie av Bejtka år 2011 där balkelement med diagonal orientering undersöktes för belastning i planet. Studien innehöll en experimentell del där balkelement med olika uppbyggnad testades i böjning samt en teoretisk del med en finita element-analys av CLT- och DLT-balkar. Den experimentella delen visade att korslimmat trä, både CLT och DLT, motverkar uppsprickning och sprött brott bättre än massivt trä och limträ med samma dimensioner. Vidare visade den experimentella delen tendenser till en ökad böjstyvhet för DLT-element men på grund av begränsat antal testade element drogs slutsatsen först efter en bekräftande finita element-analys där flera parameter studerades. Resultaten visar att DLT-balkar har högre bärförmåga i böjning än CLT-balkar, speciellt om de två lagren med diagonala brädor ligger intill varandra [9].

Skivor av korslimmat trä kan även belastas ut ur planet, något som Buck et al. har studerat experimentellt genom att böjbelasta skivor av CLT och DLT upplagda på fyra punktstöd. Skivor belastade ut ur planet benämns plattor. Studien visade att plattans böjstyvhet (EI) ökade med 15,5 % för DLT-plattor. Vidare observerades skillnader i brottmoder hos DLT och CLT. För båda varianterna förekom dragbrott i det yttre lagret, däremot var längsskjuvning mer förekommande i DLT än i CLT där rullskjuvning var mer dominerande [8].

Vridstyvheten av plattor belastade ut ur planet har studerats av Arnold et al. genom analytiska, experimentella och numeriska undersökningar varav alla metoder visade att den effektiva vridstyvheten hos DLT-element är högre än hos CLT-element. En genomsnittlig ökning av den effektiva vridstyvheten kunde bestämmas till omkring 30 % för element med brädor orienterade i $\pm 45^\circ$, för brädor med $\pm 30^\circ$ var motsvarande ökning omkring 20 %. Med numeriska metoden kunde det visas att ökningen av den effektiva vridstyvheten är som störst när brädorna är orienterade med en vinkel på $\pm 45^\circ$. En viss skillnad i ökning av effektiv vridstyvhet hittades för olika tjocka plattor där tjocka plattor hade något mindre ökning än tunna plattor. Utan hänsyn till transversella skjuvdeformationer kunde ökningen av vridstyvheten bestämmas till så mycket som 60 % högre för orienteringar på 45° och 48 % högre för 30° med hjälp av den analytiska metoden. Dessa värdena var oberoende av tjockleken på plattan. De ingående brädornas bredd påverkade den effektiva vridstyvheten, vilken ökar med ökad bredd. För bredder mellan 80-160 mm såg man denna trend. För bredder över 200 mm ökade inte styvheten med bredden. Där kunde man däremot se att styvheten för plattor med limmade vertikala skarvar var samma som för icke limmade. I studien hittades ingen skillnad i effektiv böjstyvhet mellan CLT och DLT i plattans huvudbärriktning, däremot en något lägre böjstyvhet i riktningen vinkelrätt mot huvudbärriktningen [4]. Arnolds studie visar alltså att den effektiva vridstyvheten är högre hos DLT än CLT. När det gäller böjstyvhet ger undersökningarna från Arnold et al. och Buck et al. olika resultat. Detta kan bero på experimentens förutsättningar.

4 Beräkningsteori

I Sverige regleras dimensionering av europeiska konstruktionsstandarder, Eurokoder, samt nationella anpassningar av dessa, EKS [6]. I nuläget finns inget kapitel i Eurokoderna som behandlar dimensionering av KL-trä, detta är dock något som planeras att läggas till i de nya Eurokoderna som är under utveckling. Av denna anledningen kan konstruktörer välja två alternativ vid dimensionering, antingen använda sig av KL-trätillverkarens framtagna egenskapstabeller eller utifrån ingående brädors egenskaper utforma ett tvärsnitt. Oavsett val utgår resten av dimensioneringen från den så kallade partialkoefficientmetoden och med hänsyn till gränstillstånd [2].

Gränstillstånd är det tillstånd då hela eller delar av en konstruktion är på gränsen att inte uppfylla de krav den är dimensionerad för. Användningen av gränstillstånd säkerställer att en bärande konstruktion uppfyller de funktioner den är avsedd för. Det finns två typer av gränstillstånd, brottgränstillstånd och bruksgränstillstånd. Brottgränstillstånd motsvarar det tillstånd då den yttre lasten är lika stor som bärförmågan i hela eller en del av konstruktionen. Konsekvenserna blir brott i materialet eller kollaps. Bruksgränstillstånd motsvarar det tillstånd då oacceptabel funktion nås vid normal användning. Exempel på krav som kan kontrolleras är deformation, förskjutning, svängningar och sprickor. Att uppnå bruksgränstillstånd innebär inte lika stora konsekvenser som brottgräns men är ändå viktigt att undvika för att brukarnas upplevelse och möjlighet till användning av konstruktionen ska vara god. I många fall är dimensionering i bruksgränstillstånd begränsande för en konstruktion [6]. Detta gäller även för bjälklag i KL-trä då deformation, svikt och vibrationer bör kontrolleras [2].

Deformationen hos ett KL-träbjälklag varierar med konstruktionens livslängd. Som nämnt i avsnitt 3.1 *Trä som konstruktionsmaterial* ökar deformationen hos träkonstruktioner som utsätts för konstant belastning med tiden, en effekt som kallas krypning. Den slutgiltiga nedböjningen består av initialnedböjning och krypdeformation [2]. Det finns inga konkreta krav som ska uppfyllas i bruksgränstillstånd enligt de svenska normerna. Det ligger på konstruktören och byggherren att bedöma vad som är rimligt för konstruktionen, till deras hjälp finns det handböcker med rekommenderade värden att tillgå [6]. Hos bjälklag i KL-trä är nedböjningskravet $L/300$ vanligt förekommande för bostäder och lokaler [2]. Förutom nedböjning av statiska laster kan bjälklag utsättas för dynamiska laster, till exempel från när människor går på golvet. Detta ger upphov till två effekter, golvsvikt vilket är den självupplevda vibrationen från personen som orsakar rörelsen samt svängning vilket är upplevelsen av vibration orsakad av andra människor. Eftersom detta arbetet begränsas till statiska laster beskrivs inte de dynamiska effekterna närmre. Vidare kommer resultaten baseras på den initiala nedböjningen. För vidare läsning om vibrationer och långtidseffekter hänvisas läsaren till KL-Trähandboken [2].

Analys av plattor i KL-trä kan ske i olika nivåer, 1D-, 2D-, och 3D-modeller. Den enklaste analysen beaktar plattan som en endimensionell balk och kan utföras med handberäkningar. En sådan modell förutsätter att plattan har en tydlig huvudbärriktning

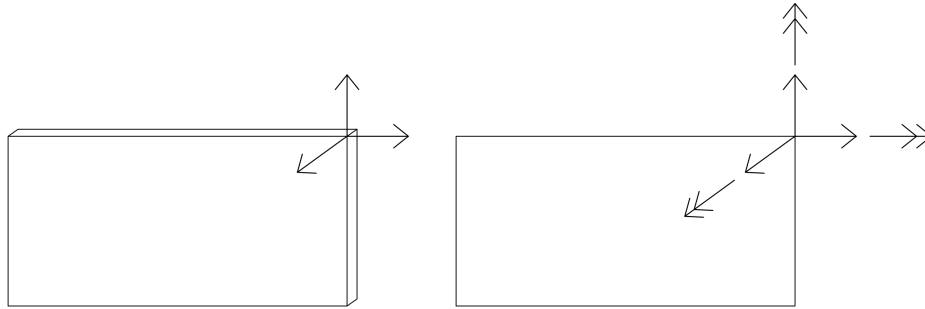
vilket ofta är fallet för bjälklagsplattor. Eftersom skjuvdeformationer utgör en betydande del av den totala deformationen hos plattor måste bidraget från dessa beaktas. I Eurokod 5 beskrivs en förenklad metod för detta, Gamma-metoden. I Gamma-metoden används ett effektivt tröghetsmoment I_{ef} , vid beräkning av deformation. Det effektiva tröghetsmomentet bestäms på liknande sätt som ett sammansatt tvärsnitt med skillnaden att respektive lagers Steinerdel minskas med ett Gamma-värde. Gamma-värdet beror på spännvidden, vilket således betyder att även tvärsnittsegenskaperna är beroende av längden av plattan. Metoden kan med enkelhet användas för plattor med 3 och 5 lager. Det finns relativt enkla program i till exempel Java eller Excel där användaren kan dimensionera KL-träplattor i brott- och brukgränstillstånd med endimensionell analys med hänsyn till Eurocode 5 [2].

Vid belastning i mer än en riktning måste effekten av den korslagda geometrin beaktas. Genom användning av en tvådimensionell skalmodell kan KL-träelement verka i två riktningar vid dimensionering. Elementets styvhetsvärden samlas i en matris som representerar beteendet i flera riktningar. Den tvåaxiellt bärande förmågan kan även beaktas i en full tredimensionell analys skapad med en eller flera solida delar. En sådan analys genomförs med fördel med finita elementmetoden [2].

Fysikaliska fenomen beskrivs ofta med differentialekvationer. Att lösa problem av denna typen med traditionell analytisk metod är ofta för komplicerat. Finita elementmetoden, FEM, är en numerisk metod för approximativ lösning av differentialekvationer som gäller för en-, två- eller tredimensionella kroppar. I FEM delas beräkningsområdet in i små delar, finita element, där approximering av en variabel sker elementvis. Elementen kan ha olika geometrisk form, till exempel rektangulära eller triangulära. Det antas att variabeln är känd i vissa punkter. Dessa kallas noder och ligger ofta på randen av elementet. Hur variabeln varierar mellan dessa kända punkter, det vill säga inom elementet och på dess rand, beskrivs av en antagen approximation vilken vanligtvis är linjär eller kvadratisk. Elementindelningen resulterar i ett elementnät, eller på engelska mesh. Vid beräkning är det viktigt att indelningen är tillräckligt fin för att fånga kroppens beteende samtidigt som en allt för fin indelning kan leda till lång beräkningstid. Ofta eftersträvas en elementindelning där elementen har ungefär lika stor utsträckning i alla riktningar, det innebär hellre kvadratiske eller kubiska former framför rektanglar eller rätblock. När approximeringen för beteendet hos de enskilda elementen genomförts kan resultaten läggas ihop enligt specifika regler för att beskriva hela kroppens beteende [10].

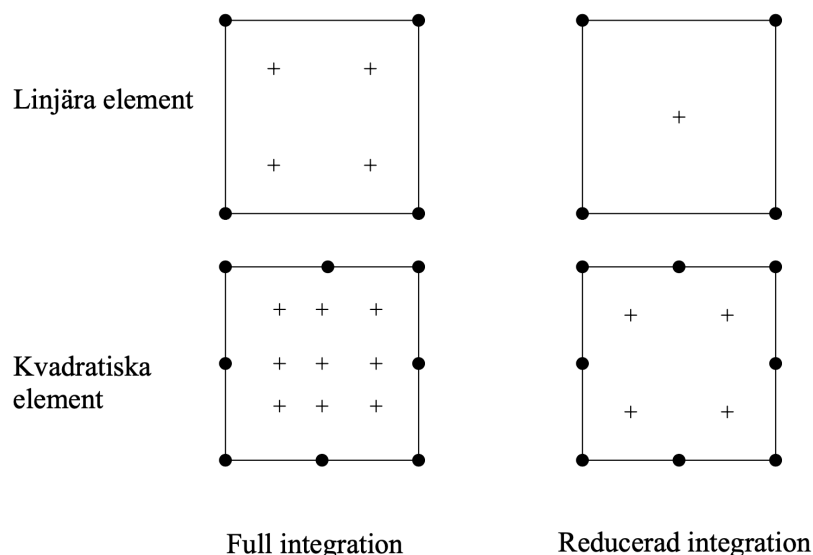
Antal parametrar som kan variera i varje nod kallas frihetsgrader. I konstruktionsberäkningar handlar det ofta om translation och rotation i olika riktningar. I tredimensionella modeller med solidelement finns det tre frihetsgrader i varje nod, förskjutning i x-, y- och z-riktning. Kroppar där tjockleken är liten i förhållande till längd och bredd kan modelleras med tvådimensionell skalmodell. Den förenklade geometrin kompenseras för genom att ge information om rotation. Förutom förskjutning i x-, y- och z-riktning finns även rotation kring x-, y- och z-riktningen i skalmodellen. I figur 4.1 illustreras frihetsgrader för solidelement respektive skalelement. En finita elementanalys sker vanligtvis med linjära eller kvadratiske element. När ett linjärt 3D-element deformeras kan inte böjning fångas eftersom beteendet mellan punkterna inte beskrivs. Detta kan leda till att linjära element får en artificiell styvhet. För att undvika detta fenomenet kan antal element i tjockleksriktningen ökas eller använda kvadratiske ele-

ment. I kvadratiska element kan böjning inom elementet fångas tack vare en nod på mitten av elementets rand [11].



Figur 4.1: Frihetsgrader, solidelement till vänster och skalelement till höger.

Under finita elementanalys kan full eller reducerad integration användas. Full integration använder så många integrationspunkter som krävs för att ge en exakt beräkning av elementets styvhetsgenskaper. Ett linjärt element använder två integrationspunkter i varje riktning, se figur 4.2. Motsvarande 3D-element får därmed åtta integrationspunkter. Vid reducerad integration används färre integrationspunkter. Linjära 3D-element med reducerad integration använder enbart en integrationspunkt i mitten av elementet. På motsvarande sätt används 27 integrationspunkter i kvadratiska element med full integration medan vid reducerad integration används endast åtta. Snabbare beräkningstid är den stora fördelen med reducerad integration. Till nackdelar hör att viss deformation inte fångas upp. Exempelvis linjärt element som utsätts för ren böjning. En punkt i mitten av elementet registrerar ingen töjning trots att elementets kanter har deformerats. Detta fenomen kallas *hourglassing* och kan upptäckas vid betraktande av elementindelningen i deformerat läge [12].



Figur 4.2: Integrationspunkter vid full och reducerad integration för linjära respektive kvadratiska tvådimensionella element.

I detta arbete användes programvaran Abaqus/CAE [13] vilket är ett kommersiellt datorprogram för finita elementanalys och datorstödd konstruktion. I detta sammanhanget står CAE för *Complete Abaqus Environment* och syftar på den version av

Abaqus där modellering och analys av strukturen samt visualisering av resultaten sker i samma program. FEM analysen består av tre steg, *pre-processing*, *processing* och *post-processing*. *Pre-processing* är modelleringsstadiet, då skapas uppbyggnaden av den struktur som ska beräknas. Ofta kan uppbyggnaden skapas på flera olika sätt och det är upp till användaren att bedöma uppbyggnadens nödvändiga noggrannhet. I *processing* stadiet sker själva analysen och i *post-processing*, visualiseras resultatet i rapport, bild, animation etc [14]. Abaqus/CAE User's Manual [15] har varit till stor hjälp under arbetets gång.

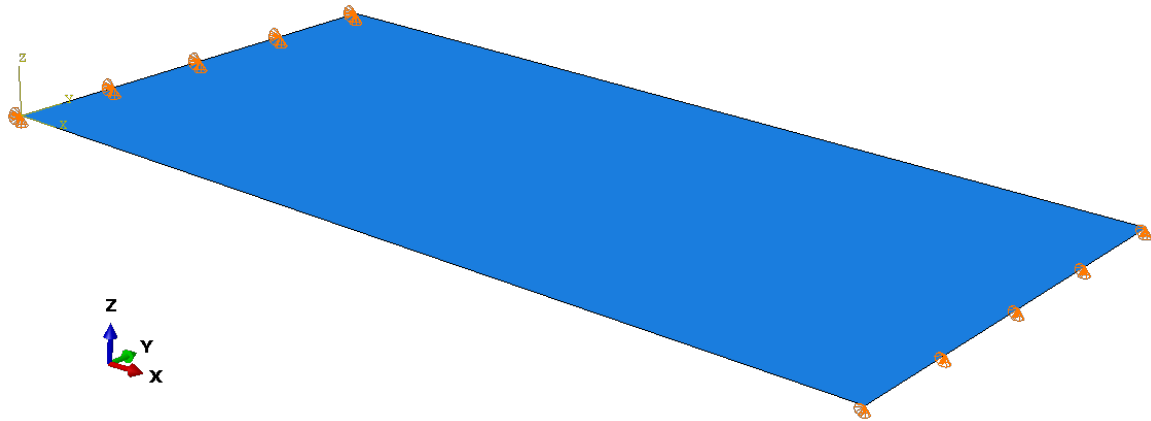
5 Resultat: Beräkningsmodell

En del inställningar i Abaqus var gemensamma för alla de fem modellerna. Trämaterialet gavs linjärelastiska egenskaper vilket beskrevs av ett antal materialparametrar: elasticitetsmodul, tvärkontraktionstal och skjuvmodul. Materialet antogs vara ortotrop och ha små skillnader i tangentiell och radiell riktning och kunde beskrivas med sex olika parametrar. För k-virke C24 gäller: elasticitetsmodul $E_1 = 11000$ MPa och $E_2 = E_3 = 370$ MPa, tvärkontraktionstal $\nu = 0,3$ och skjuvmoduler $G_{12} = G_{13} = 690$ MPa och $G_{23} = 50$ MPa. I Abaqus används beteckningarna 1, 2 och 3 istället för x, y och z.

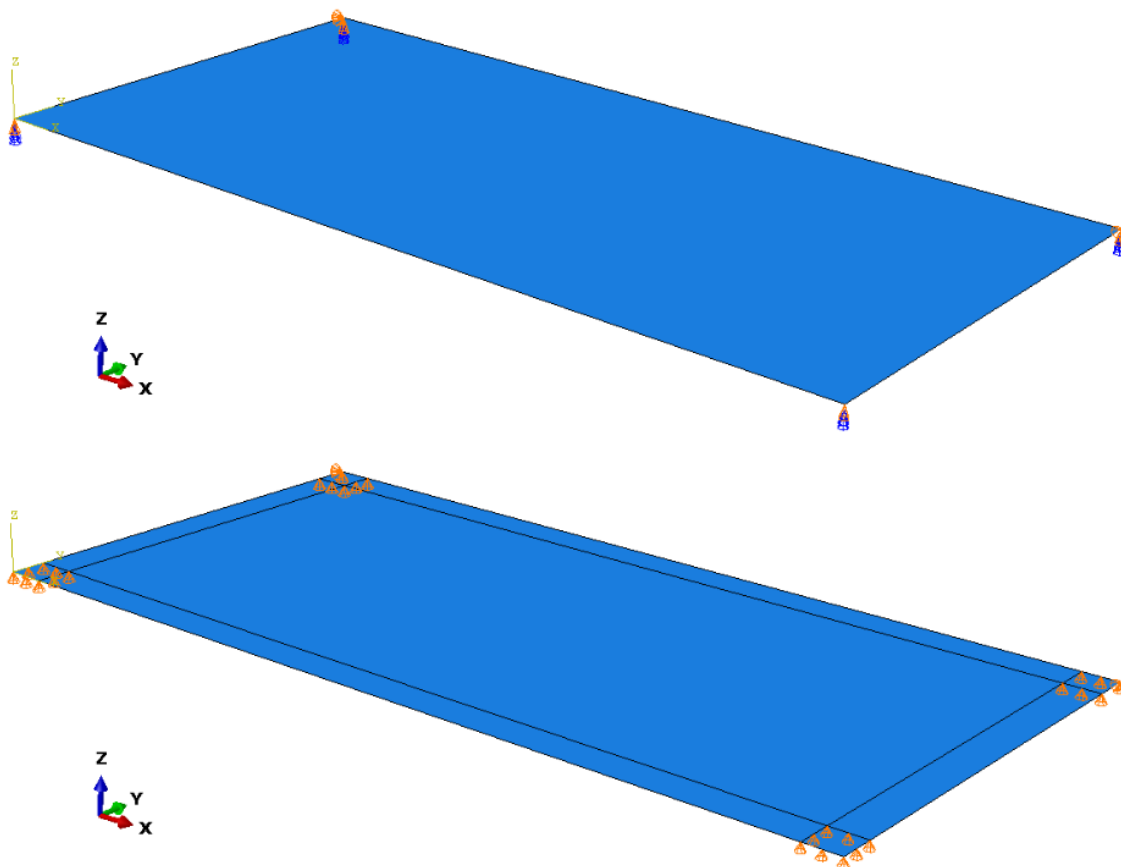
De modeller som är uppbyggda av solidelement bestod av *3D Deformable, solid extrusion parts* och använde *solid, homogeneous section*. Skalmodellen bestod av *3D deformable planar shell parts* och använde *conventional shell* element. Uppbyggnaden av lager i skalmodellen skapades med *composite layup*. Alla modeller använde *independent instance type*, vilket innebar att skapandet av elementnät skedde på sammansättningen till skillnad från *dependent instance* där elementnätet appliceras på varje part. *Dependent instance* är fördelaktigt när man har en sammansättning där en part ingår flera gånger, dock kan vissa funktioner som ändrar geometrin, exempelvis partitionering inte användas på *dependent instance*. Undantaget modellen med solida brädor, användes parterna inte flertalet gånger varför *independent instance* användes. Dessutom innebar det fördelen att partitionering kunde genomföras i efterhand. Tätheten på elementnätet bestäms av *seeds*, vilket representerar nodernas approximativa placering. Avståndet mellan *seeds* kan väljas baserat på antal element som ska genereras längs en kant, genomsnittlig elementstorlek eller anpassas för ett visst område. I arbetet användes mestadels *global seeding* med en approximativ storlek av 0,039 m. Detta gav ett element per lager i tjockleksriktningen och fyra element i brädans bredd vilket innebar att relativt liksidiga element kunde uppnås. På grund av begränsning av antal noder i Abaqus licensen som användes under arbetet kunde inte kvadratiska element användas samtidigt som en tillräckligt fin elementindelning uppnåddes. Därför användes linjära element för alla typer av modeller.

Modellerna utvärderas med tre olika upplagsvillkor: två linjestöd vid kortsidorna, fyra linjestöd vid alla sidor samt fyra punktstöd i hörnen. Upplagen modelleras med randvillkor vilka förhindrar plattans stelkroppsrorelse (translationer och rotationer). I fallet med två linjestöd innebär det i Abaqus begränsning i U1, U2 och U3 på ena sidan och i U2 och U3 på andra sidan. För linjestöd på alla fyra sidor begränsas U3 längs sidorna, en punkt med U2 och U1 samt en punkt med U2. För upplag med fyra punktstöd begränsas en punkt i varje hörn i U3 och rotation UR3, dessutom begränsas en av punkterna även i U2 och U1 samt en av punkterna i U2. För skalmodellen utvärderas två alternativ till punktstöd, ett där rörelse i U3 förhindras i enbart en punkt samt ett alternativ där rörelse i U3 förhindras över en liten area (0,2×0,2 meter) i hörnet. Upplagsvillkor för skalmodellen visas i figur 5.1-5.3. I solidmodellerna kopplas hörnen med Abaqus funktion *kinematic coupling* för att skapa plan deformation i hörnen,

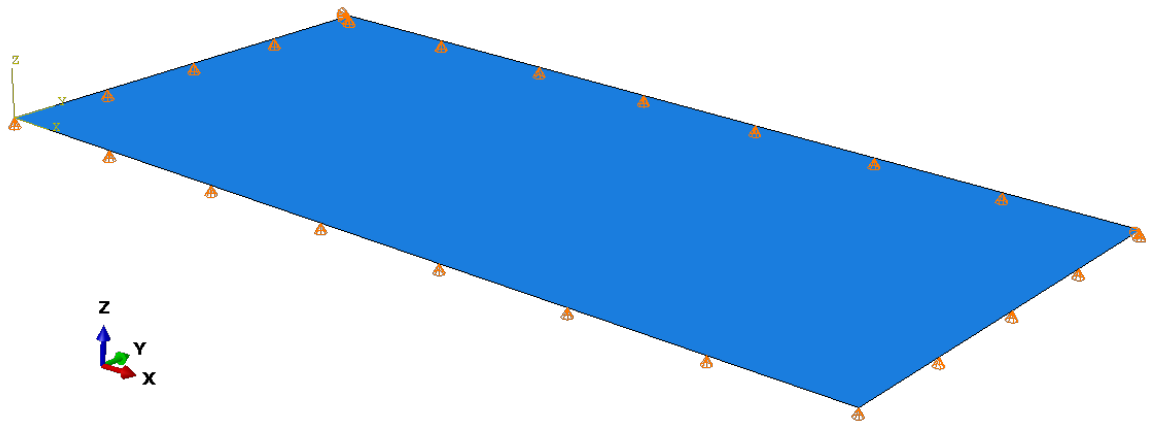
se figur 5.4. Alla upplagsvillkor placeras i mitten av tvärsnittshöjden och verkställs i det initiala tidssteget. Utöver det initiala skapas ett *static, linear pertubation step* där lasten appliceras som jämnt utbrett tryck på ovasidan.



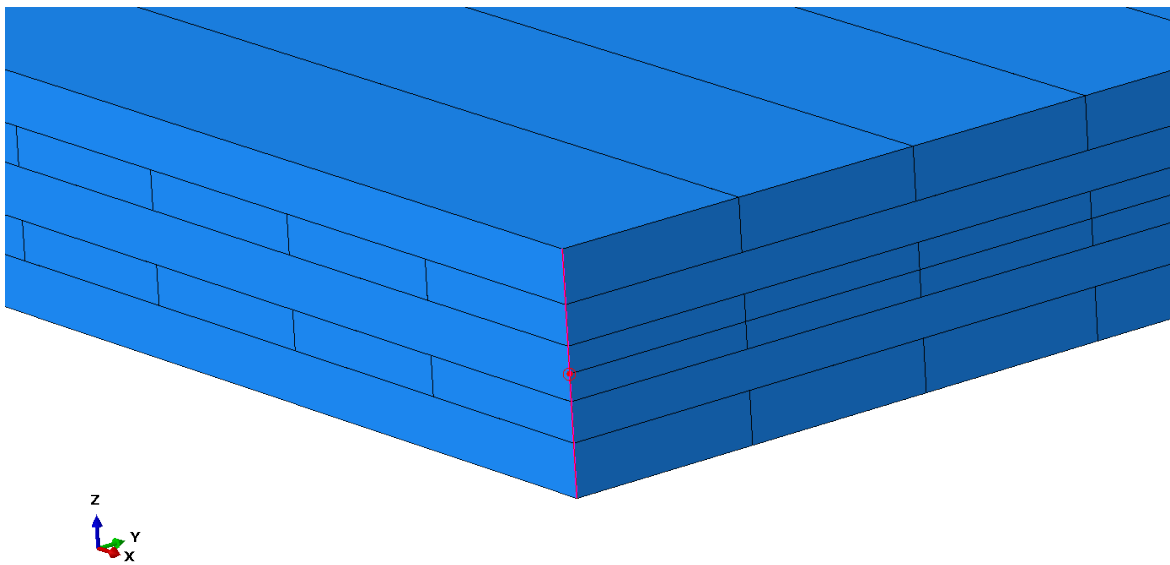
Figur 5.1: Upplagsvillkor för två linjestöd.



Figur 5.2: Upplagsvillkor för fyra punktstöd, förskjutning förhindrad i endast en punkt överst och förskjutning hindrad i en liten area underst.



Figur 5.3: Upplagsvillkor för fyra linjestöd.



Figur 5.4: Kinematic coupling i hörn hos modeller med flera solider i tjockleksriktningen.

5.1 Skalmmodell

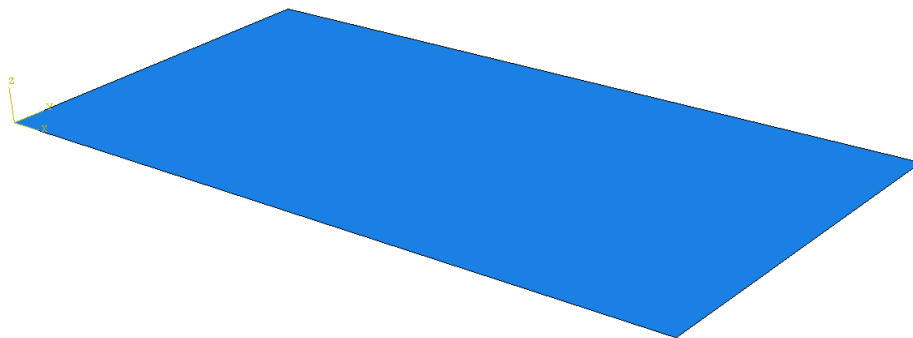
Den enklaste modellen som undersöktes var en tvådimensionell skalmmodell, se figur 5.6. Skalmmodell kan användas för kroppar där tjockleken är liten i förhållande till längd och bredd, vilket var fallet med KL-plattan. Eftersom modellen inte har någon geometri i tjockleksriktningen skapades de ingående lagren med funktionen *composite layup* i Abaqus. I *composite layup* definierades varje lager av material, tjocklek och orientering, se figur 5.5. Programmet beräknar sedan tvärsnittets styvhet genom att integrera styvhetsegenskaperna över de olika lagren i tvärsnittets höjd. Integrering kunde ske före analys eftersom endast linjärt beteende undersöktes.

		Ply Name	Region	Material	Thickness	CSYS	Rotation Angle
1	✓	Ply-1	(Picked)	Material-Trä	0.04	<Layup>	0
2	✓	Ply-2	(Picked)	Material-Trä	0.03	<Layup>	90
3	✓	Ply-3	(Picked)	Material-Trä	0.04	<Layup>	0
4	✓	Ply-4	(Picked)	Material-Trä	0.03	<Layup>	90
5	✓	Ply-5	(Picked)	Material-Trä	0.04	<Layup>	0

Figur 5.5: Inmatning av data i Abaqus funktion *Composite layup*.

Vid applicering av upplagsvillkor placerades randvillkoren automatiskt i mitten av skallets tänkta uppbyggnad. Vid konvergensstudie av fallet med fyra punktstöd upptäcktes att modellen inte konvergerade ju finare mesh som användes. Istället för att placera punktstöden i en enskild punkt i hörnen gjordes försök med att använda en liten area som punktstöd. Detta innebar att överdriven förskjutning av elementen i hörnen förhindrades och resultatet av totala nedböjningen mer jämförbar. Konvergensstudie visade att modellen med area som punktstöd konvergerade. För skalmodellen användes fyrsidig elementform och strukturerad teknik för elementindelning. Reducerad integration användes.

Skalmodellen har två dimensioner vilket, jämfört med solidmodellerna, ger betydligt färre element för samma elementstorlek i planet. Tack vare det blev beräkningstiden för skalmodellen kort. Dessutom kunde geometri, material och materialorientering varieras enkelt vilket är fördelaktigt vid parameterstudier. Till skalmodellens nackdel hör att eftersom den inte har någon utbredning i tjockleksriktningen saknas representation av spänningsfördelning över tvärsnittet.

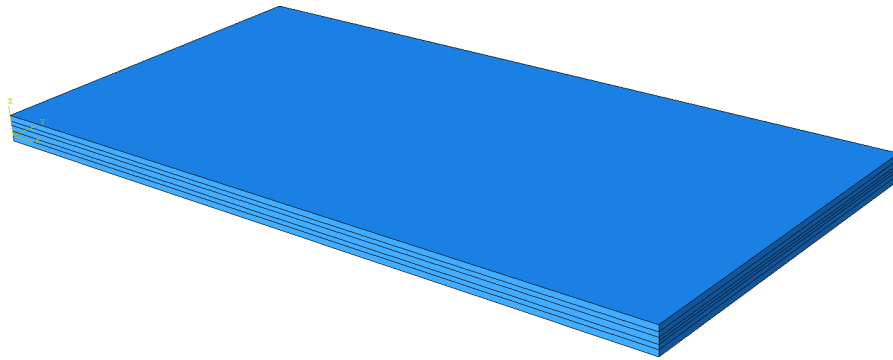


Figur 5.6: Skalmodell.

5.2 Modell med solida lager

En modell med lager skapades där varje lager utgjordes av en enskild solid part, se figur 5.7. Det skapades solider för varje typ av lager där tjocklek och materialorientering definierades. Parterna assemblerades med *position constraints*, *face to face* så att flatsidorna, långsidorna och kortsidorna låg i linje. Ytan på flatsidorna kopplades samman med *tie constraint*. Funktionen har en överordnad och en underordnad yta. Noder på den överordnade ytan kan gå in i den underordnade men inte tvärt om. Ytan på de längsgående lagren betraktades genomgående som överordnade och ytan på de tvärgående eller diagonala betraktades som underordnade. Metod för diskretisering sattes till den förutbestämda, vilket för Abaqus/Standard är yta till yta. Detta genererar en koppling som gör att spänningen för de ytor som sätts samman kan beräknas med god noggrannhet. Toleransen för att avgöra om en nod ska kopplas till den överordnade ytan bestämdes av Abaqus förutbestämda värden. Elementindelning genomfördes med strukturerad metod och sexsidiga element. Vid reducerad integration noterades fenomenet för *hourglassing* vid punktstöden varför full integration användes.

Modellen hade enkel uppbyggnad med möjligheter att göra förändringar i efterhand. Ett problem som upptäcktes för metoden med solida lager var att vid ökning av antal element i tjockleksriktningen minskade nedböjningen, kroppen blev alltså mer styv. Enligt finita elementmetoden bör fler element i en riktning göra kroppen mindre styv i den riktningen eftersom fler element och därmed noder kan visa mindre skillnader i förskjutningar. Orsaken till detta resultat misstänks ligga i hur *tie constraint* fungerar.



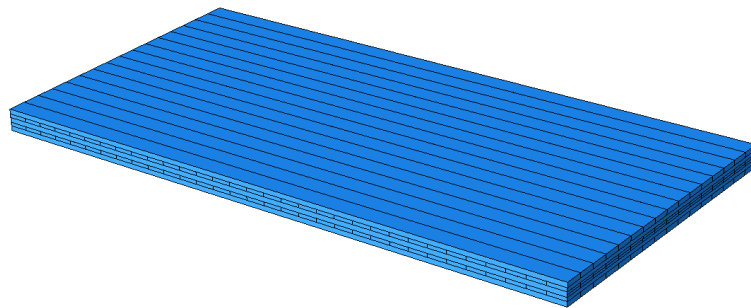
Figur 5.7: Modell med solida lager.

5.3 Modell med solida brädor

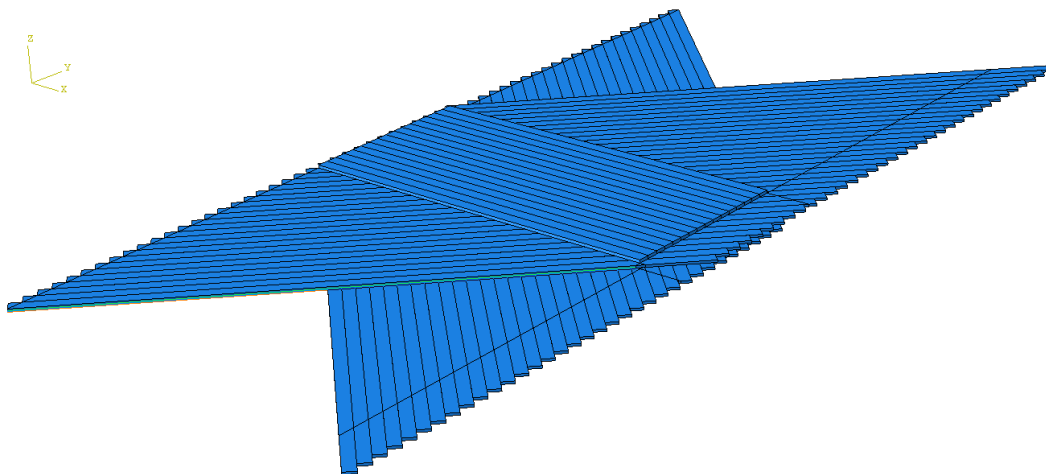
Den geometriskt mest detaljerade och komplicerade modellen skapades med solider för varje individuell bräda, se figur 5.8. En part för varje orientering på bräda skapades, parten gjordes tillräckligt lång för att kunna användas till alla brädor inom samma lager. Parterna assemblerades först i skilda lager som sedan kopplades samman med *tie constraint* till färdig platta, se figur 5.9. Kopplingen skedde på ytan av brädornas flatsida. Precis som för modellen med lager betraktades ytan på de längsgående lag-

ren som överordnade och ytan på de tvärgående eller diagonala som underordnade. Abaqus förutbestämde diskretiseringsmetod och tolerans för position användes. Eftersom parterna var längre än brädorna i färdig platta behövde assembleringen partitioneras innan elementindelningen kunde genomföras på plattans faktiska utbredning. Elementindelningen genomfördes med strukturerad metod och sexsidiga element. Vid reducerad integration noterades fenomenet för *hourglassing* vid punktstöden varför full integration användes.

Metoden med solida brädor efterliknade en verklig KL-platta mycket väl eftersom delningen mellan brädornas vertikala sidor modelleras. Metoden var dock mycket tidskrävande, både i uppbyggnaden och beräkningstid. Dessutom innebar uppbyggnaden med enskilda parter att det var svårt att göra ändringar i efterhand. Ett problem som inträffade i modellen med solida brädor var att noderna från den överordnade ytan trängde in i den underordnade ytan, något som inte är möjligt i verkligheten då materialet istället skulle deformerats. Samma effekt upptäcktes i skarvarna mellan brädorna på den tryckta sidan av plattan.



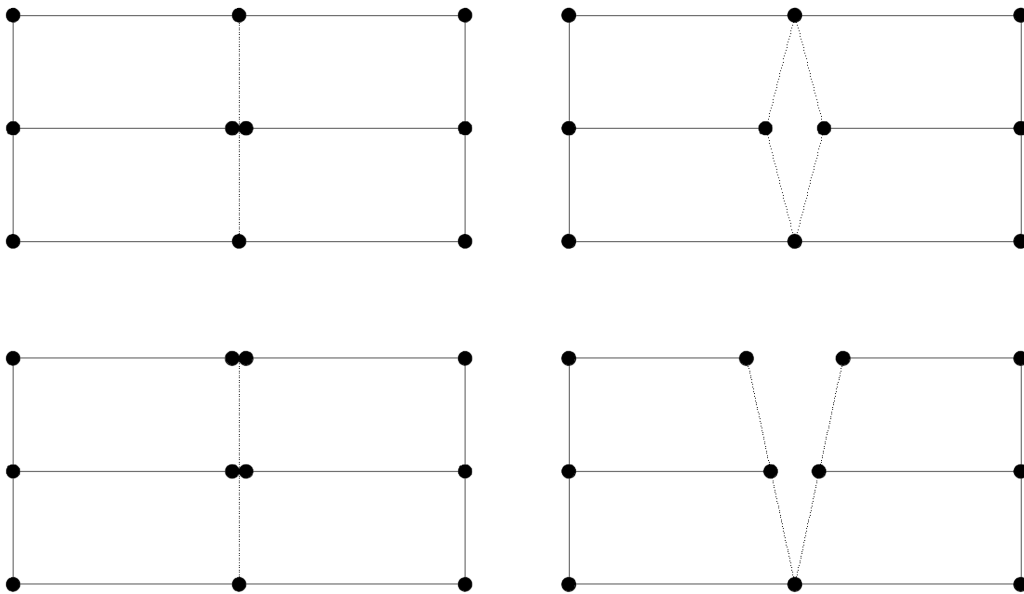
Figur 5.8: Modell med solida brädor.



Figur 5.9: Assemblering av modell med solida brädor.

5.4 Modell med seams

I Abaqus finns en funktion som heter *seam*, som tillåter att en partitionering av geometrin modelleras som en spalt utan bredd. Sättet det fungerar på är att vid elementindelningen placeras dubbla noder på den del som tilldelats en *seam*. Det gör att noderna är oberoende av varandra och fria att röra sig vilket innebär att sprickor och skarvar kan modelleras. Viktigt för att partitioneringen som tilldelats en *seam* ska kunna öppna upp är att det finns åtminstone två element i varje riktning. För *seams* placerade inuti kroppen är noderna i partitioneringens ändrar enkla och mellan ändarna är det dubbla noder. För *seams* som angränsar till kroppens yttre rand placeras dubbla noder även på den yttre randen.

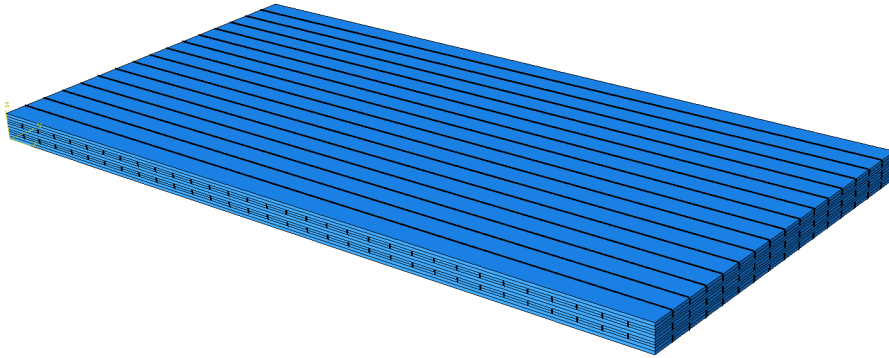


Figur 5.10: Illustration av funktionen *seam*. Övre raden: *Seam*-öppning inuti en kropp. Undre raden: *Seam*-funktionen i anslutning till en fri kant.

En modell med användning av *seams* skapades under arbetet, se figur 5.11. Modellen bestod av en solid som partitionerades med hjälp av *datum plane*. Partitioneringen skapade lager och skarvar mellan brädorna. Varje lager tilldelades en lokal materialorientering. De vertikala partitioneringarna tilldelades *seam*-funktionen för att efterlikna verklighetens skarvar mellan brädorna. *Seam*-funktionen kräver minst två element i varje riktning, för att tillgodose detta partitionerades varje lager i två delar i tjockleksriktningen.

För modellen med *seams* klarade inte Abaqus att skapa en elementindelning med sexsidiga element och strukturerad teknik då diagonala orienteringar användes. Geometrin var för komplicerad för att få ihop varför programmet inte lyckades skapa en indelning för hela kroppen. För att lösa problemet användes istället tetraederformade element, både för CLT och DLT, vilket även ledde till att fri elementindelningsteknik användes. För CLT kunde *mapped meshing* användas, det innebär att Abaqus trots en till synes komplicerad modell och fri elementindelningsteknik kan utgå från en yta som har relativt enkel geometri för att skapa en elementindelning. För DLT användes inte *mapped meshing* eftersom modellen var för komplex. Reducerad integration användes.

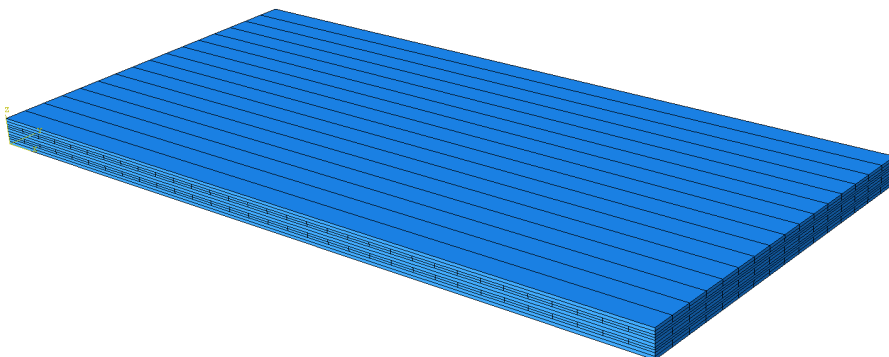
Modellen med *seams* hade fördelen att effekten av skarvarna mellan brädorna modellerades. Detta innebär att modellen är mindre styv än modeller där skarvarna inte modelleras och samtidigt mer lik verkligheten. Det ligger en del arbete bakom modellens uppbyggnad och det är inte helt enkelt att göra ändringar i efterhand.



Figur 5.11: Modell med *seams*. De tjockare linjerna representerar *seams*.

5.5 Solidmodell

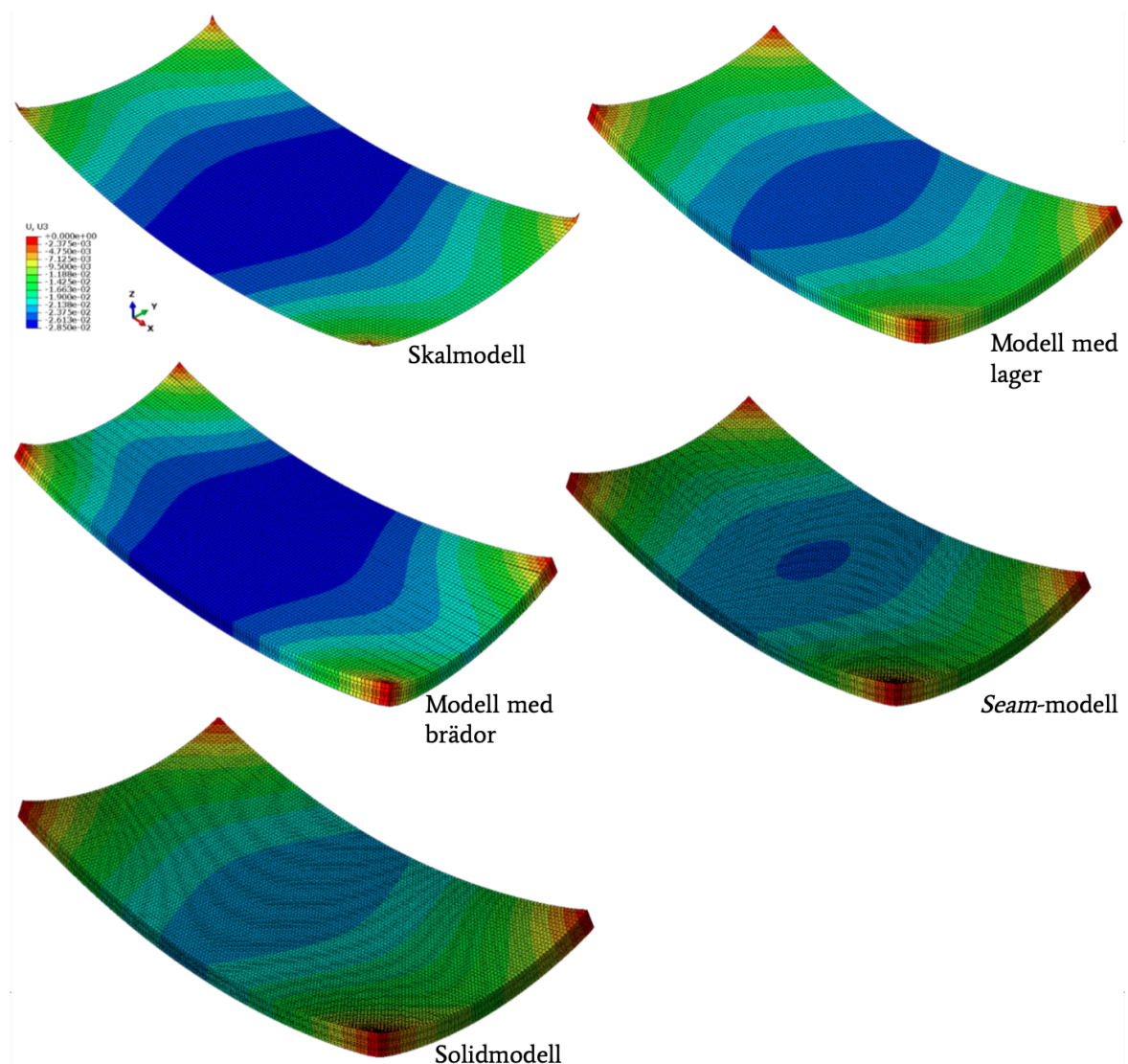
En enkel tredimensionell modell skapades av en solid som partitionerades med *datum plane*, se figur 5.12. Partitioneringen skapade lager som tilldelades lokal materialorientering samt delningar för brädorna. Uppbyggnaden var densamma som för modell med *seams* förutom att effekten av skarvarna inte togs hänsyn till med *seam*-funktionen. Förutom uppbyggnaden försökte även elementindelningen hållas så lik modellen med *seams* som möjligt. Tetraediska element, fri meshningsteknik samt reducerad integration användes. Modellen med en solid hade relativt enkel uppbyggnad med viss möjlighet att göra förändringar i efterhand. Metoden tog inte hänsyn till skarvar mellan brädorna och borde därför bli aningen styvare än i verkligheten.



Figur 5.12: Modell med en solid.

5.6 Jämförelse av modeller

I modellerna med solida lager och solida brädor uppstod problem vilka gjorde att de metoderna för att skapa en beräkningsmodell bedömdes inte kunna representera beteendet hos KL-plattor. I skalmodell, modell med *seams* och modell med en solid uppstod inga problem som inte kunde lösas. De metoderna bedömdes kunna representera beteendet hos traditionellt och innovativt utformade KL-plattor. För att få en bild av hur nedböjningen skiljer sig åt mellan olika modeller visas i figur 5.13 nedböjning för en traditionell rektangulär KL-platta belastad med jämnt utbredd last och upplagd på fyra punktstöd för de fem olika modelltyperna.



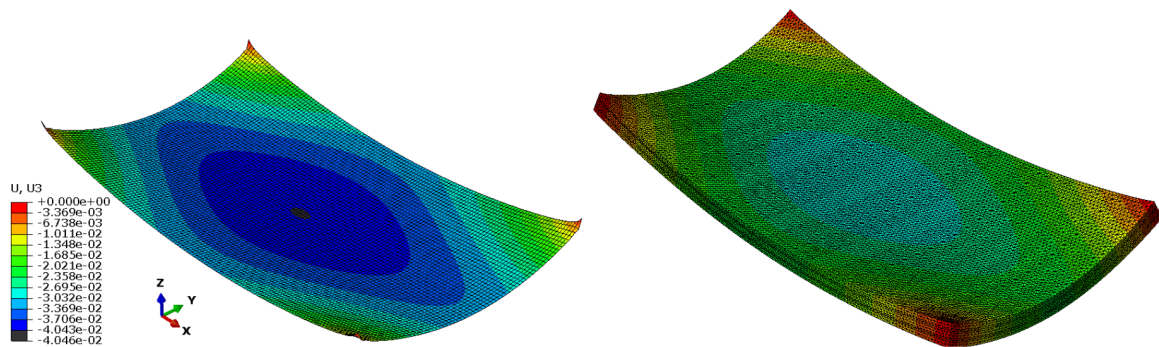
Figur 5.13: Nedböjning för en traditionell rektangulär ($2,5 \times 5$ m) KL-platta belastad med jämnt utbredd last och upplagd på fyra punktstöd för de fem olika modelltyperna.

Modellen med *seams* och modellen med en solid var båda tredimensionella metoder uppbyggda av en solid. I *seam*-modellen modellerades effekten av skarvarna mellan brädorna medan den effekten inte fanns med i solidmodellen. Det innebär att *seam*-modellen borde representera en KL-plattas verkliga beteende bättre än solidmodellen.

Effekten borde bli att solidmodellen var mer styv eftersom respektive lager består av en hel volym istället för separerade brädor. Detta visade sig också i resultatet av nedböjning. Solidmodellen uppvisade mindre nedböjning än *seam*-modellen för fyra punktstöd och fyra linjeupplag, det gällde alla orienteringar. Den genomsnittliga procentuella minskningen i nedböjning för dessa upplagen var 13,7 %. För fallen med två linjestöd, blev nedböjningen däremot större för solidmodellen än *seam*-modellen. Skillnaden var dock väldigt liten, den genomsnittliga ökningen av nedböjningen var endast 0,16 %.

Tredimensionella modeller skapade med solider kräver en del arbete vid uppbyggnaden och är svåra att i efterhand göra geometriska förändringar i. Användning av den tvådimensionella skalmodellen tillåter snabb uppbyggnad där ändringar är möjliga i efterhand. Detta är väldigt praktiskt vid parameterstudie där variation av bland annat geometri kan vara önskvärt. Detta arbetets nästa del, parameterstudien, beslutades därför att genomföras med en skalmodell. Ett par skillnader mellan användning av solidmodell och skalmodell noterades och är viktiga att ha med sig när resultatet analyseras.

Skal- och solidmodellen hade samma principiella geometriska uppbyggnad, det vill säga båda modellerna bestod av lager av hela volymer trä som orienterats i olika riktningar. Inverkan av skarvar modellerades inte i någon av modellerna. Vid jämförelse av resultat för nedböjning hos KL-plattan kunde noteras att nedböjningen genomgående var större för skal-modellen än för solidmodellen. Det gällde för alla upplagstyper och orienteringar som utvärderades. Den genomsnittliga ökningen av nedböjning var 15,2 %. Den största skillnaden mellan skal och solidmodell hittades för en platta med orienteringen $[0,45,0,-45,0]$ upplagd på fyra punktstöd, se figur 5.14 och tabell A.2 i bilaga.



Figur 5.14: Nedböjning för skalmodell respektive solidmodell för en rektangulär platta med orienteringen $[0,45,0,-45,0]$ upplagd på fyra punktstöd. Till vänster: Skalmodell. Till höger: Solidmodell.

Vid användande av skalmodell och fyra punktupplag där förskjutningen i z-led endast förhindrades i en nod i varje hörn uppstod stor deformation av elementen närmast hörnen, se figur A.2 i bilaga och figur 5.14. Värdet av nedböjningen hos plattan blev i detta fallet inte direkt jämförbart med solidmodellen då en stor del av den totala nedböjningen var deformation vid upplaget. Skalmodellen för fyra punktstöd kompletterades därför med ett fall där förskjutningen i z-led appliceras över en liten area istället för i enbart en nod. Genom användning av sådana stödareor kunde den extra nedböjningen på grund av hörnens deformation förhindras i skalmodellen. Vid användning av stödareor i skalmodellen kunde dock inte nedböjningen mellan skalmodell och *seam*-modell respektive skalmodell och solidmodell jämföras eftersom *seam*- och solidmodellerna hade förhindrad förskjutning enbart i en nod. Vid användning av en liten area som punktstöd ändrades upplaget från att vara fritt upplagt till att ha egenskaper som liknar fast inspänning. Dessutom minskades spännvidden mellan upplagen på grund av stödareans utbredning. Båda dessa förändringar ledde till att nedböjningen var mindre vid användningen av stödarea än förskjutning förhindrad i en nod. Dessa effekter gällde både skalmodeller och modeller uppbyggda av solid (*Seam* och solid). Förändring i upplagets egenskaper visades i resultatet av nedböjning. Nedböjningen hos ett traditionell KL-platta modellerat med skalmodell minskade med 55,6 % när stödarea användes istället för förskjutning förhindrad i enbart en nod i hörnet. Motsvarande minskning vid användning av solidmodellen var 40,5 %. Att skalmodellen minskade mer beror alltså både på att upplagets karaktär ändrades vilket minskade nedböjningen i stort och att deformationen av elementen i hörnen förhindrades. För fortsatta parameterstudie användes alltså skalmodellen med stödareor.

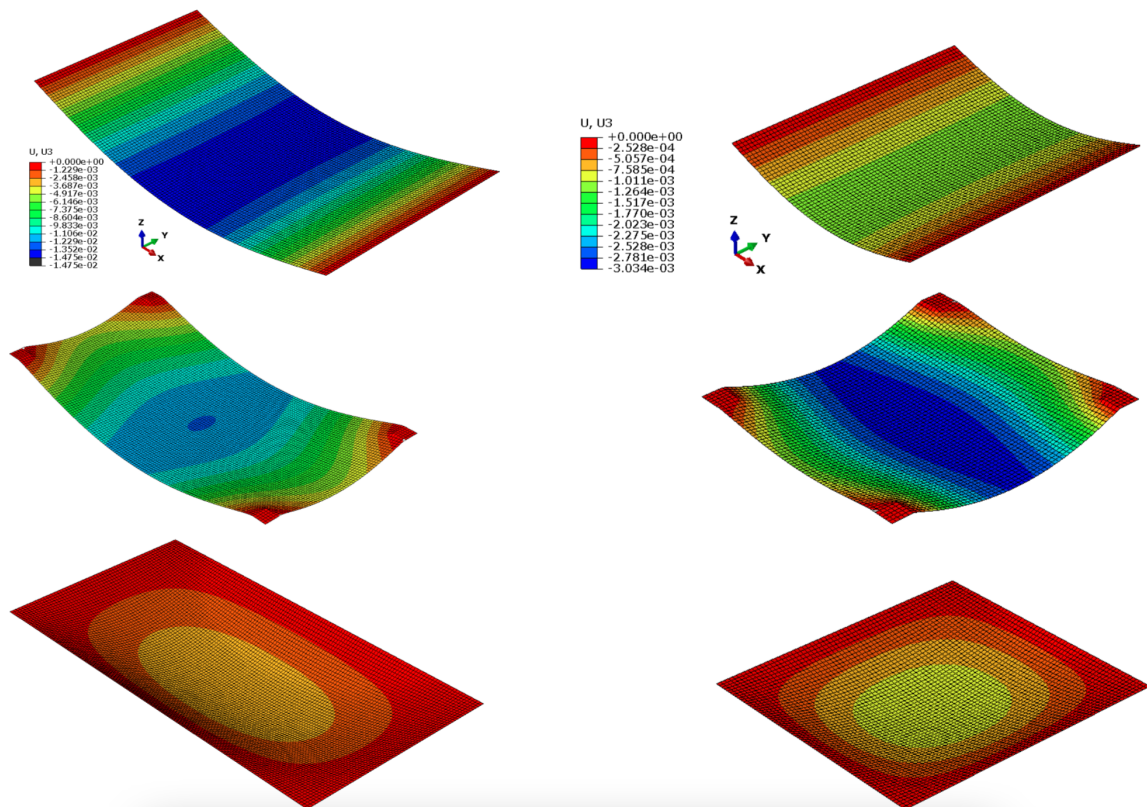
Som nämnts varierade resultatet av nedböjning beroende på vilken modell som användes. Bland de tre modeller som bedömdes kunna representera beteendet hos en KL-platta var den vekaste modellen i genomsnitt 14 % mindre styv än den styvaste. Eftersom endast skalmodellen utvecklades till att applicera punktstöd över en area bestämdes genomsnittet utifrån nedböjning då fyra punktstöd appliceras med förskjutning i en nod i hörnen. Den största skillnaden mellan modeller hittades hos en platta med orienteringen $[0,45,0,-45,0]$ och fyra punktstöd, där solidmodellen var 27 % styvare än skalmodellen. Den minsta skillnaden mellan modeller hittas hos en vanlig KL-platta ($[0,90,0,90,0]$) med två linjestöd. Där är styvheten för *seam*-modellen 3 % styvare än skalmodellen. Kvot mellan minsta och största nedböjningen för alla typer av plattor och upplag redovisas i tabell 5.1.

Tabell 5.1: Kvot mellan minsta och största nedböjningen för respektive typ av platta och upplag. Modeller kvoterna baseras på inom parantes.

	[0,90,0,90,0]	[0,45,90,-45,0]	[0,45,0,-45,0]
2 linjer	0,9742 (<i>seam</i> /skal)	0,9623 (<i>seam</i> /skal)	0,9705 (<i>seam</i> /skal)
4 punkter	0,8215 (solid/skal)	0,7985 (solid/skal)	0,7328 (solid/skal)
4 linjer	0,8989 (solid/ <i>seam</i>)	0,8317 (solid/ <i>seam</i>)	0,8101 (solid/skal)
Medelvärde	0,8668		

6 Resultat: Parameterstudie

Parameterstudien fokuserar på två undersökningar: hur orienteringen på brädorna påverkar nedböjningen för olika längder och stöd samt om olika förhållande mellan bredd och längd påverkar nedböjningens variation på olika sätt för olika orienteringar och stöd. Parameterstudien genomförs med skalmodell. KL-plattor med traditionell uppbyggnad betraktas som ett referensfall. Nedböjning för olika längder och upplag hos traditionellt KL-trä visas i figur 6.1



Figur 6.1: Nedböjning för traditionell KL-platta modellerat med skalmodell. Till vänster: Rektangulär platta. Till höger: Kvadratisk platta. Från ovan: Två linjestöd, fyra punktstöd, fyra linjestöd.

6.1 Undersökning av orientering

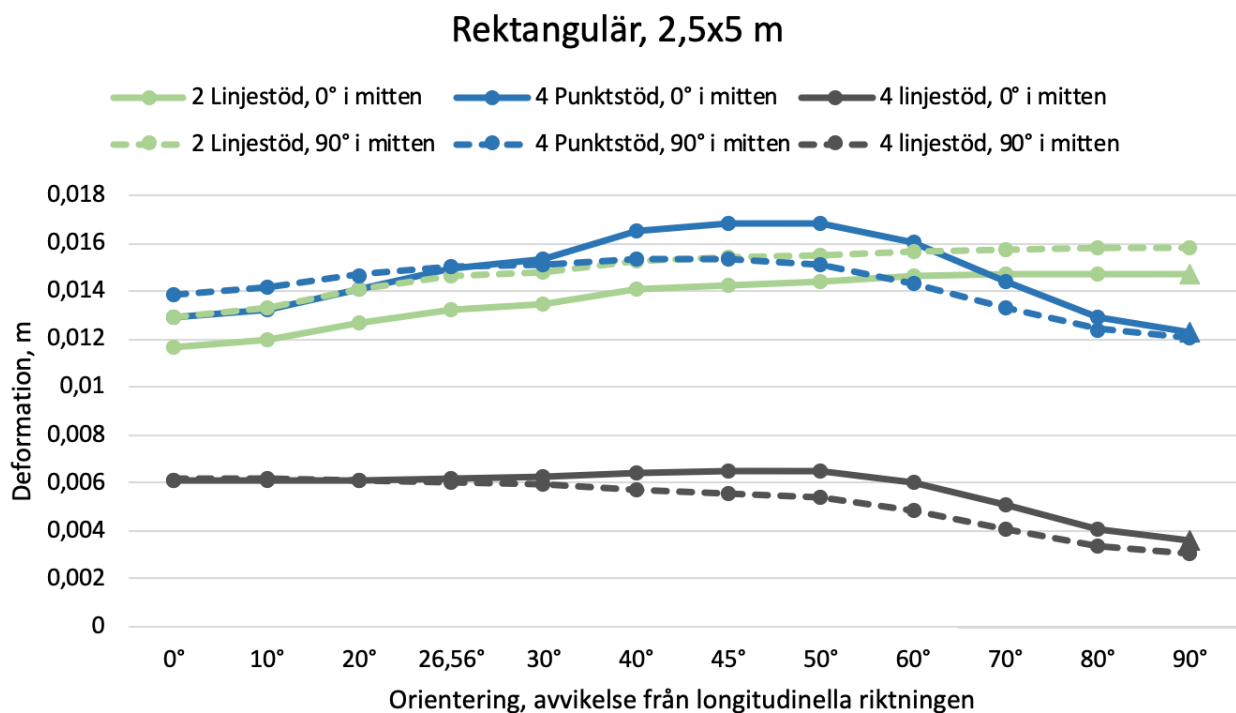
Studien för hur nedböjning varierar för olika orienteringar utfördes på KL-plattor med dimensioner $2,5 \times 2,5$ m och $2,5 \times 5$ m samt upplag på två linjestöd, fyra punktstöd och fyra linjestöd. Initialt undersöktes plattor utsatta för jämnt utbredd last men studien utvecklades till att även undersöka plattor utsatta för en punktlast. Punktlasten applicerades i mitten av plattan och hade en utbredning på $0,1 \times 0,1$ m samt storlek på 3000 N. Studien med punktlast begränsades till att endast undersöka plattor med brädorna i mittersta lagret orienterade i 0° . Alla resultat avser maximal nedböjning för respektive fall och redovisas som absolutvärden. De kombinationer av vinklar som avser traditionellt KL-trä redovisas med en triangel i kommande diagram.

För fallet med jämnt utbredd last visas nedböjningens variation med orienteringen i figur 6.2-6.4. Observera att skalan för orienteringen inte är linjär. Följande resultat var liknande hos både den kvadratiske och rektangulära plattan. Nedböjning vid två linjeupplag var mindre ju mindre brädornas orientering avvek från den longitudinella riktningen, det gällde oavsett 0° eller 90° i mittersta lagret. Det enda fallet där 45° avvikelse gav mindre nedböjning än traditionellt KL-trä var för 0° i mitten. Minskningen är dock mycket liten. För 90° i mitten var användning av 45° inte bättre än traditionellt CLT. Hos den rektangulära plattan gav orientering från hörn till hörn ($26,56^\circ$) med 90° i mitten något mindre nedböjning än CLT. Vid användningen av fyra punktstöd var nedböjningen som störst med orienteringar kring 45° , nedböjningen minskade med ökad eller minskad avvikelse från longitudinella riktningen. Detta gällde oavsett 0° eller 90° i mittersta lagret. Det gav generellt mindre nedböjning med mittersta lagret i 90° . För den kvadratiske plattan noterades en stor minskning i nedböjning vid användning av 90° orientering i mitten. Vid användning av fyra punktstöd var orientering på 45° inte bättre än traditionellt CLT, däremot fanns ett fåtal andra orienteringar som gav lägre nedböjning än CLT för fyra punktstöd. Det handlade om när brädorna gick mot en avvikelse på 90° . $[0,90,90,90,0]$ för rektangulär och $[0,70,90,-70,0]$, $[0,80,90,-80,0]$ och $[0,90,90,90,0]$ för kvadratisk platta gav mindre nedböjning än CLT.

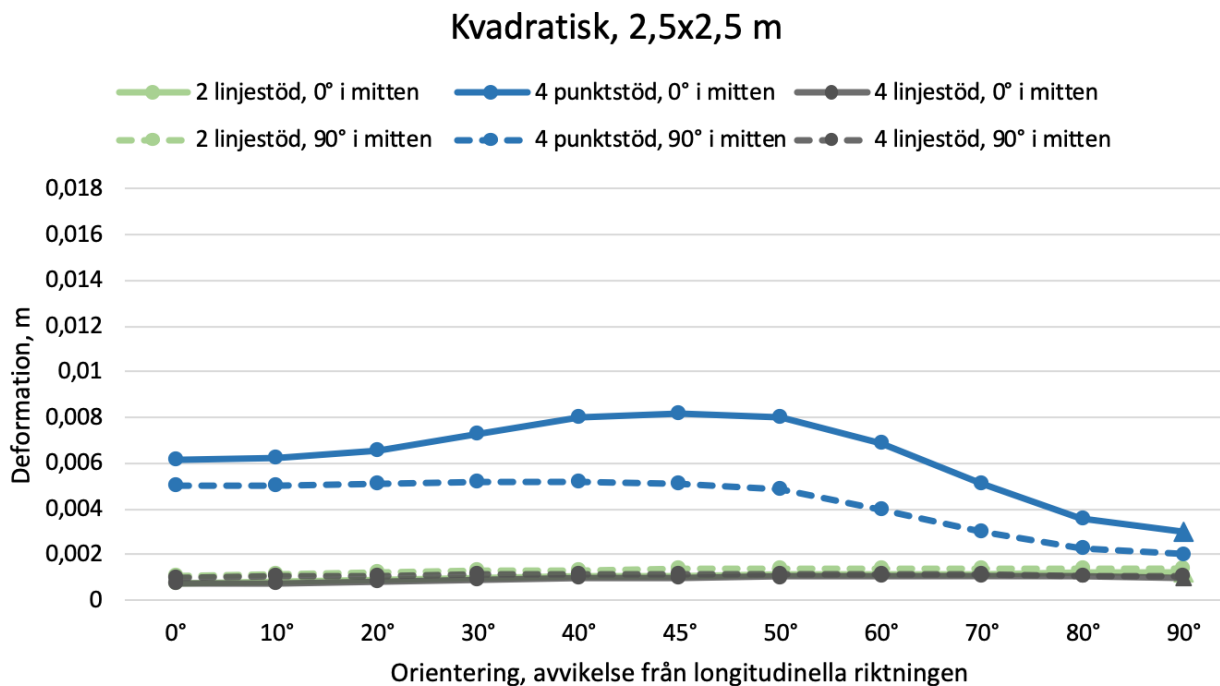
När en platta upplagd på fyra linjeupplag belastades med jämnt utbredd last skilde trender i resultaten sig åt mellan rektangulär och kvadratisk platta. Till skillnad från plattor upplagda på två linjestöd och fyra punktstöd gav en rektangulär platta upplagd på fyra linjestöd inte en avsevärd minskad nedböjning då brädorna orienterades med liten avvikelse från den longitudinella riktningen. Istället minskade nedböjningen då brädorna orienterades mer transversellt. Det gällde både 0° och 90° i mitten, 0° kulmerar något kring 45° . Detta innebar att för en rektangulär platta på fyra linjestöd var användningen av brädor orienterade med 45° avvikelse från longitudinella riktningen inte bättre än traditionellt CLT, oavsett 0° eller 90° i mitten. För kvadratisk platta var nedböjningen som störst för orienteringar runt 45° avvikelse, med ökad eller minskad avvikelse minskade nedböjningen. Nedböjningens variation var dock inte speciellt stor. För kvadratisk platta på fyra linjestöd var användning av brädor orienterade med 45° avvikelse inte bättre än traditionellt CLT för 90° i mitten, för 0° i mitten var nedböjningen i princip lika stor. Nedböjningen var mindre för rektangulär platta upplagd på fyra linjestöd än två linjestöd och fyra punktstöd. För den kvadratiske plattan var nedböjningen ungefär lika stor för upplag på två linjestöd och fyra linjestöd medan nedböjningen vid fyra punktstöd var större. För plattor upplagda på fyra linjestöd har

storleken på avvikelserna från den longitudinella riktningen minst betydelse av de olika upplagstyperna.

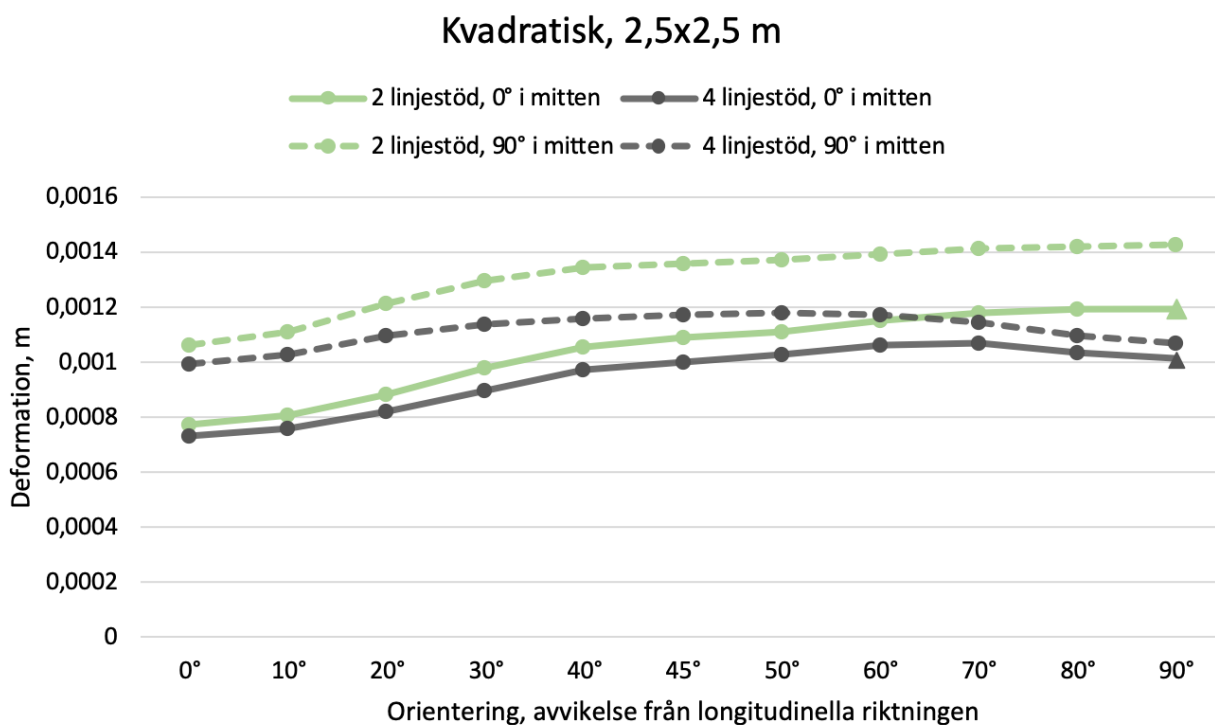
När plattan belastades med en punktlast blev nedböjningen större då brädorna var orienterade med 45° avvikelse från den longitudinella riktningen än i traditionellt CLT. Detta gällde för två linjestöd, fyra punktstöd och fyra linjestöd samt rektangulär och kvadratisk platta. Skillnaden i nedböjning vid traditionellt CLT och plattor med brädor orienterade med 45° var större för fyra punktstöd än för två linjestöd och fyra punktstöd. För fyra punktstöd och kvadratisk platta var skillnaden mellan CLT och 45° avvikelse stor. Nedböjningen vid fyra punktstöd och 45° orientering var hela 145 % större än traditionellt CLT för kvadratisk platta. Motsvarande siffra för rektangulär platta var 43 %. För två linjestöd var skillnaden mellan CLT och 45° avvikelse 25 % för kvadratisk platta och 8 % för rektangulär.



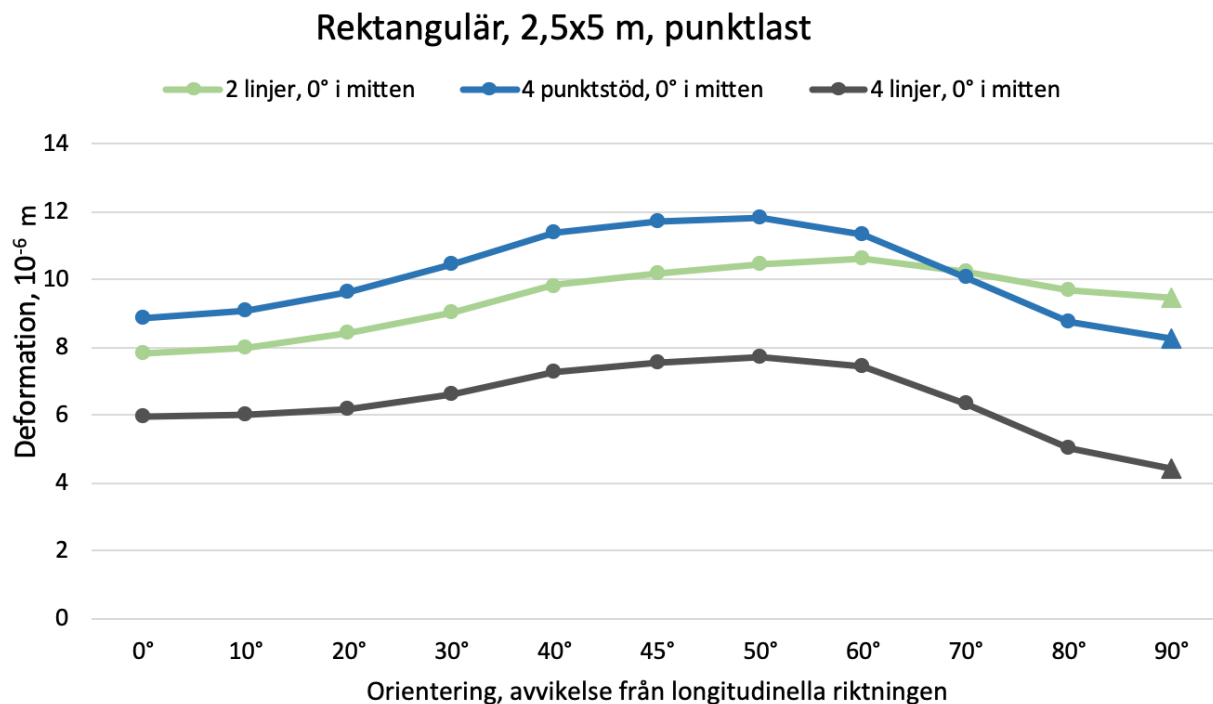
Figur 6.2: Diagram över hur nedböjningen varierar med brädornas orientering, rektangulär platta belastad med jämnt utbredd last.



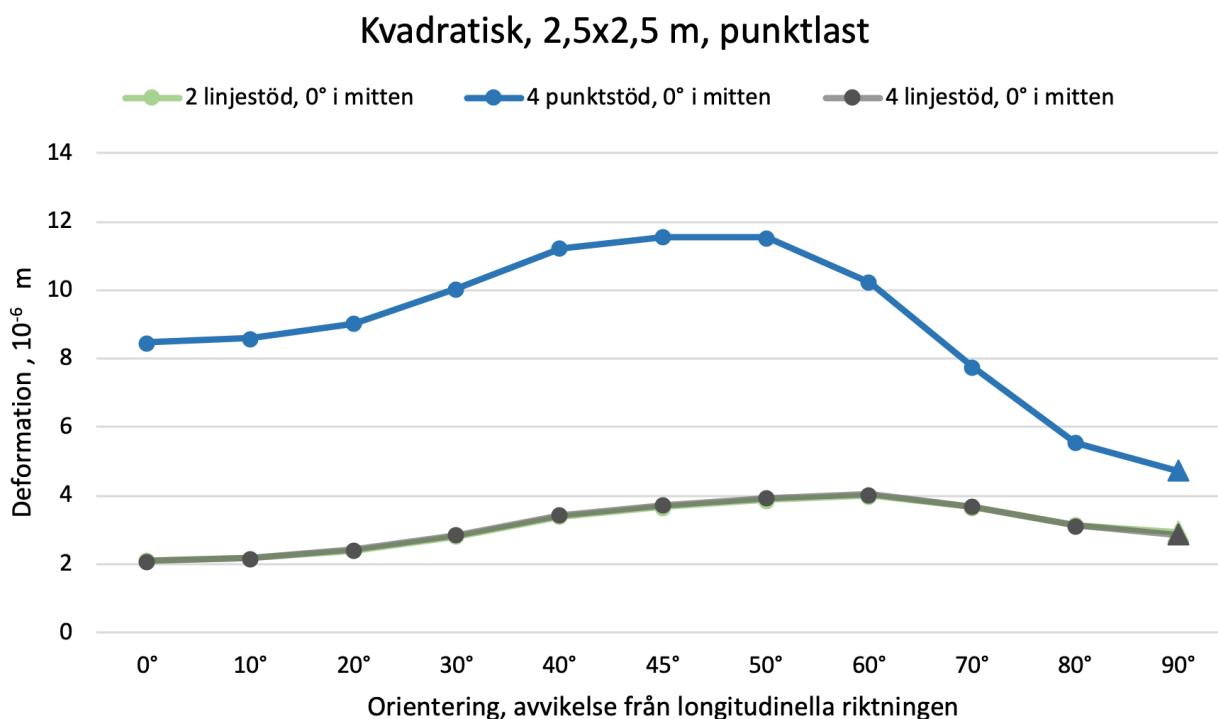
Figur 6.3: Diagram över hur nedböjningen varierar med brädornas orientering, kvadratisk platta belastad med jämnt utbredd last. För tydligare visualisering av grafen för 2 linjestöd och 4 linjestöd se figur 6.4



Figur 6.4: Diagram över hur nedböjningen varierar med brädornas orientering. Förtydligande för 2 linjestöd och 4 linjestöd för kvadratisk platta belastad med jämnt utbredd last. Se figur 6.3 för diagram med alla tre typer av upplag.



Figur 6.5: Diagram över hur nedböjningen varierar med brädornas orientering, rektangulär platta belastad med punktlast.

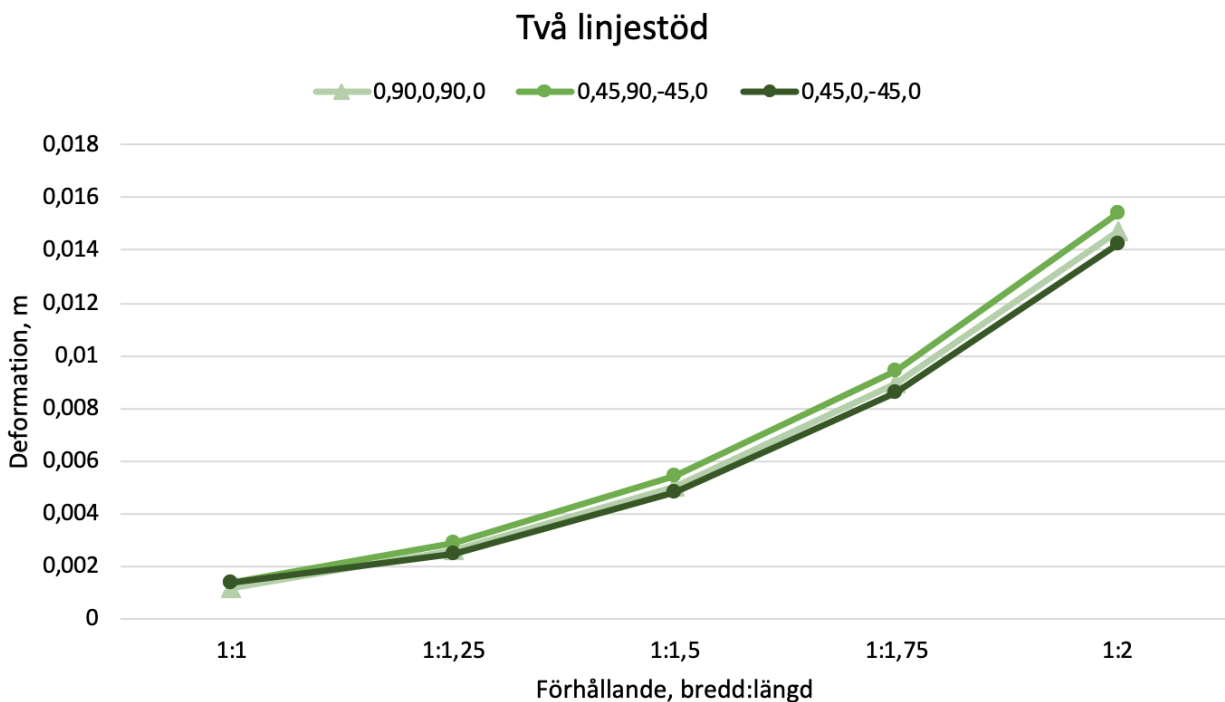


Figur 6.6: Diagram över hur nedböjningen varierar med brädornas orientering, kvadratisk platta belastad med punktlast. Notera att grafen för 2 linjestöd och 4 linjestöd sammanfaller.

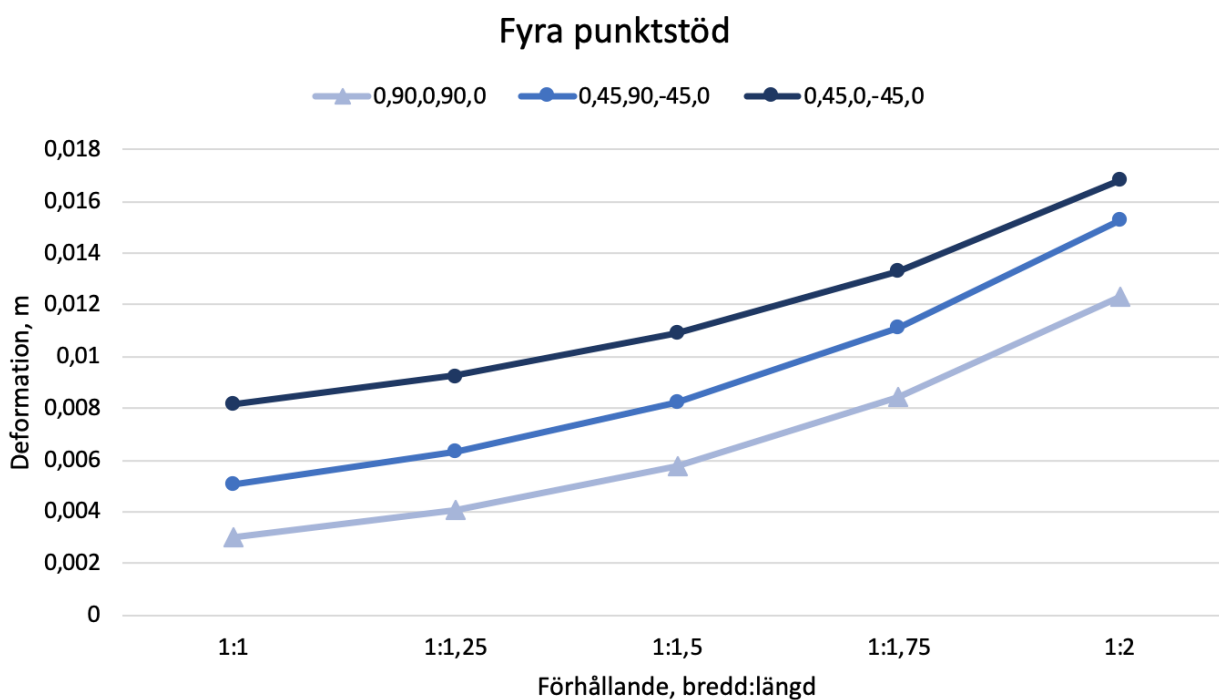
6.2 Undersökning av förhållandet bredd:längd

En parameterstudie för hur förhållandet mellan bredd och längd påverkar nedböjningens variation genomfördes för plattor belastade med jämnt utbredd last. Jämförelsen är gjord för konstant bredd och varierande längd. Undersökningen visade att nedböjningen varierade på liknande vis oberoende av orientering för två linjestöd och fyra punktstöd. För alla tre orienteringar ($[0,90,0,90,0]$, $[0,45,90,-45,0]$ och $[0,45,0,-45,0]$) och båda upplagstyperna ökar nedböjningen med ökat förhållande mellan bredd och längd. Ökningens storlek ökar ju större förhållande mellan bredd och längd hos plattan. För två linjestöd skilde inte nedböjningens storlek nämnvärt mellan de olika orienteringarna oavsett förhållandet mellan bredd och längd. För fyra punktstöd skilde nedböjningens storlek mellan de olika orienteringarna, skillnadens storlek var dock ungefär lika stor vid variation av förhållandet. För fyra linjestöd kunde skillnad i nedböjningens variation för olika orienteringar noteras. För alla orienteringar ökade nedböjningen med ökat förhållande mellan bredd och längd, men storleken på ökningen var olika för de olika orienteringarna. Traditionellt CLT hade mindre ökning än de diagonala orienteringarna.

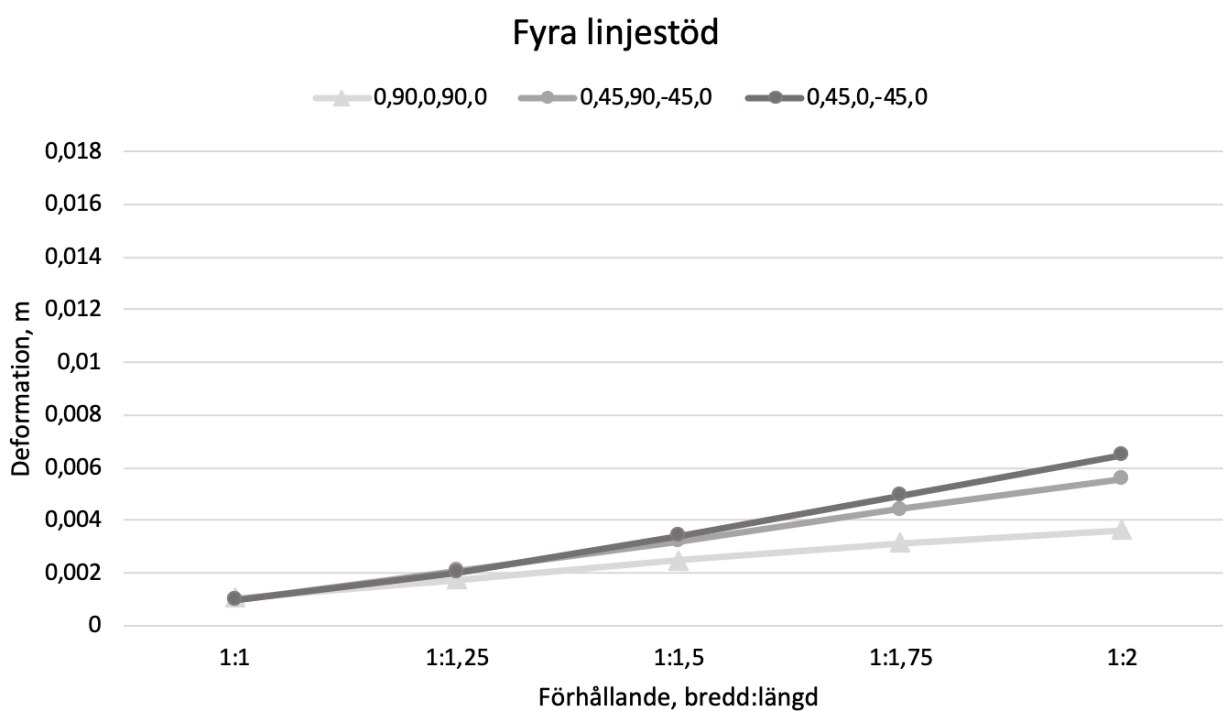
Förutom deformationsdiagramen i figur 6.7-6.9 kan resultaten redovisas med en kvot. I figur 6.7-6.12 redovisas kvoten mellan nedböjningen för DLT och CLT. För två linjestöd och fyra punktstöd närmar sig kvoten 1 när förhållandet mellan bredd och längd ökar. För fyra punktstöd minskar istället kvoten med ökat förhållande.



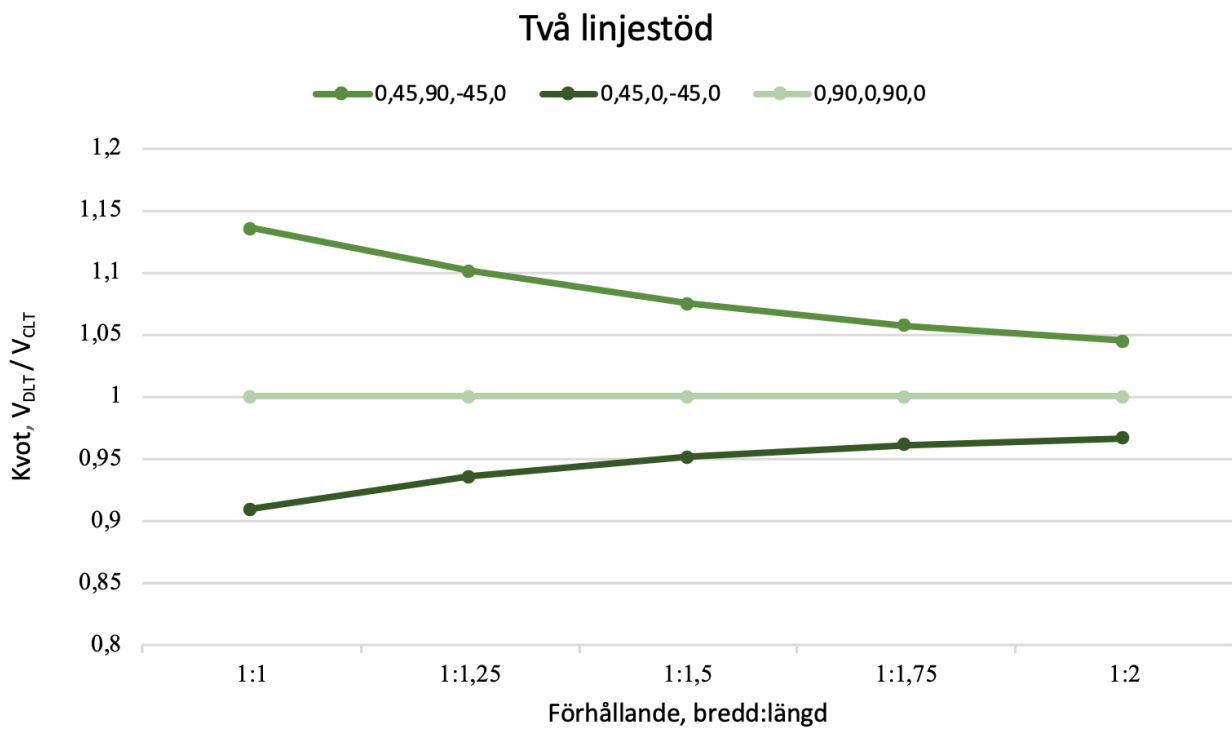
Figur 6.7: Diagram över hur nedböjningen varierar med förhållandet mellan bredd och längd, två linjestöd.



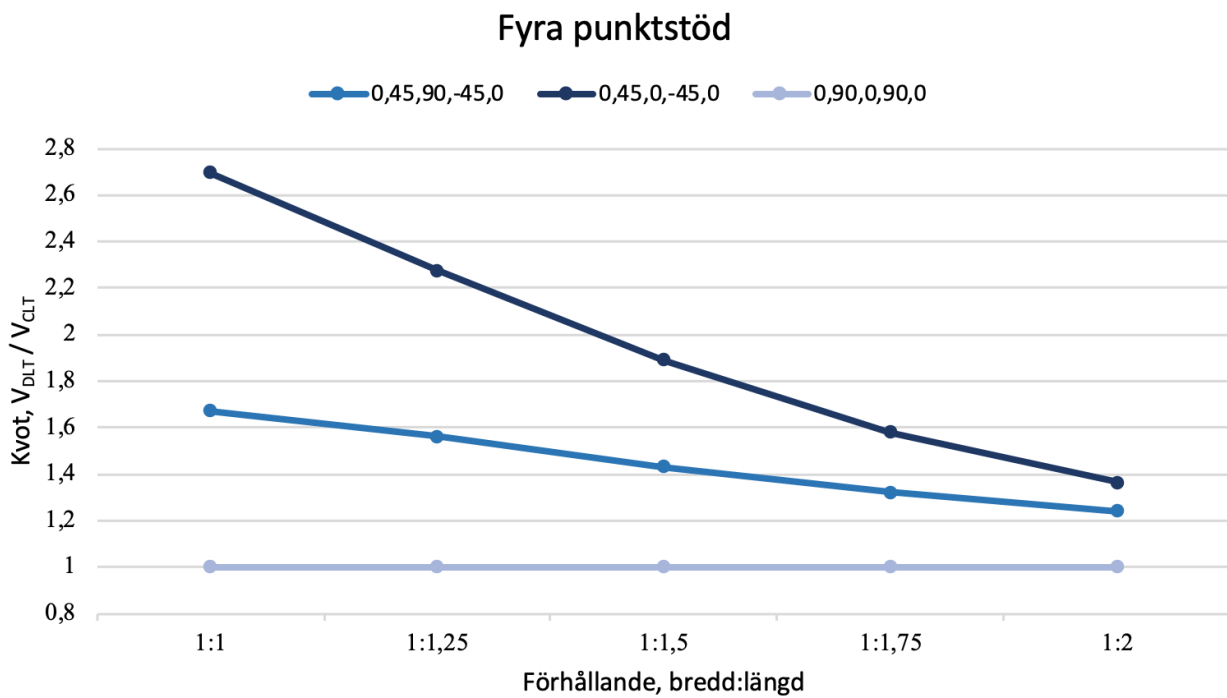
Figur 6.8: Diagram över hur nedböjningen varierar med förhållandet mellan bredd och längd, fyra punktstöd.



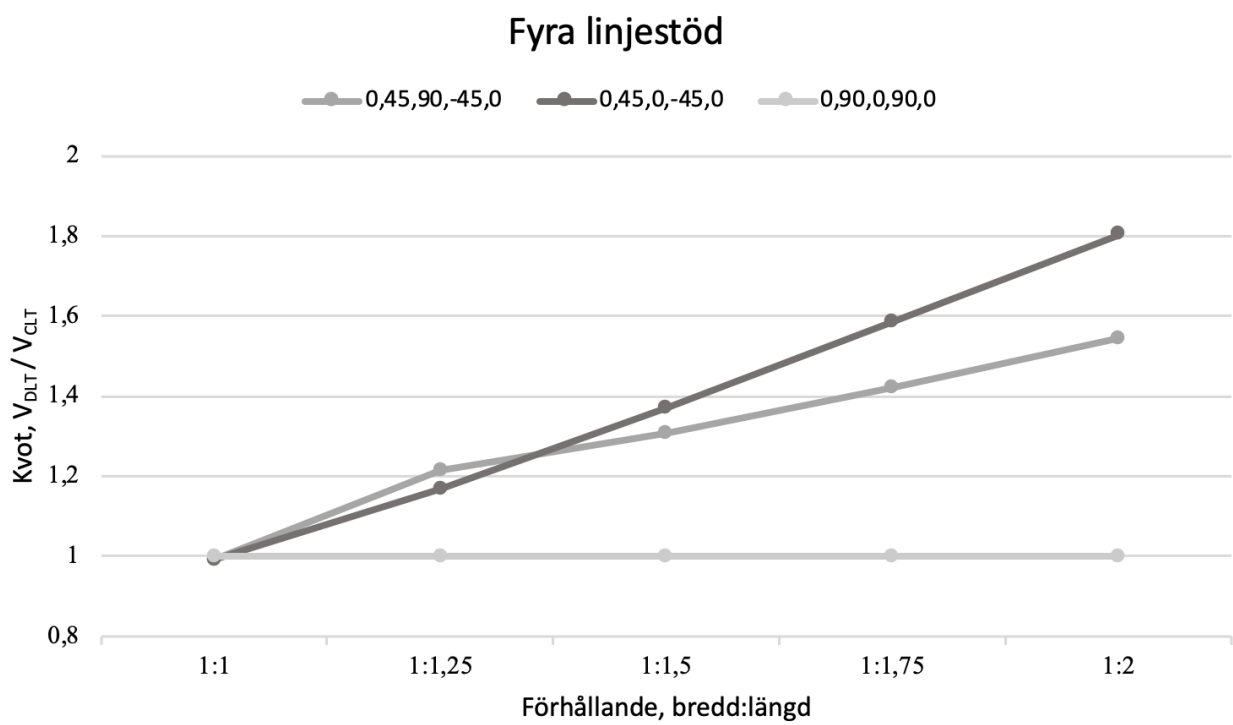
Figur 6.9: Diagram över hur nedböjningen varierar med förhållandet mellan bredd och längd, fyra linjestöd.



Figur 6.10: Diagram över hur kvoten varierar med förhållandet mellan bredd och längd. Platta belastad med jämnt utbredd last och upplagd på två linjestöd.



Figur 6.11: Diagram över hur kvoten varierar med förhållandet mellan bredd och längd. Platta belastad med jämnt utbredd last och upplagd på fyra punktstöd.



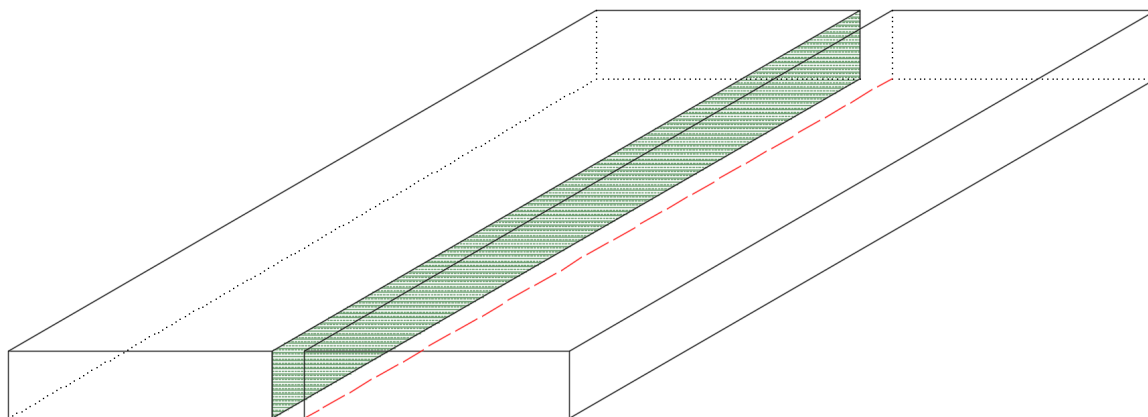
Figur 6.12: Diagram över hur kvoten varierar med förhållandet mellan bredd och längd. Platta belastad med jämnt utbredd last och upplagd på fyra linjestöd.

7 Diskussion och slutsater

Vid uppstart av arbetet var tanken att börja med att göra en jämförelse mellan en tvådimensionell och en tredimensionell modell för att se hur resultaten skilde sig åt och sedan gå vidare med en parameterstudie. Parameterstudien skulle undersöka ett flertal olika orienteringar, förhållande mellan bredd och längd, olika upplag, tjocklek på plattan och ingående brädor etc. Under arbetets gång upptäcktes svårigheter med att skapa en modell som fungerade för CLT och DLT, fokus skiftade därför från att ligga på parameterstudien till att undersöka modeller. Denna utvecklingen av arbetet ansågs nödvändig eftersom en omfattande parameterstudie med en allt för förenklad modell hade varit opålitlig då man inte vet vilka effekter en sådan förenklad modell innebär. Det initiala syftet med att fördjupa kunskapen om traditionellt och innovativt utformade korslimmade plattor har ändå uppnåtts. Följande diskussion är uppdelad för beräkningsmodell och parameterstudie.

7.1 Beräkningsmodell

Problemet med att noder från den överordnade ytan trängde in i den underordnade i modellen med solida brädor kunde inträffa på grund av hur ytorna var definierade. Den överordnade ytan var genomgående den ytan som hade brädorna i längsriktningen och bestod av varje brädas flatsida. När en nod från den underordnade ytan skulle finna en överordnad yta kopplades den till någon av de två intilliggande brädornas yta och tillät noden från den andra ytan att tränga in i den underordnade ytan. Ett eventuellt sätt att undvika detta hade varit att skapa en sammanhängande överordnad yta genom att koppla en kant på ena brädans flatsida till intilliggande brädans vertikala yta, se figur 7.1. När denna tanken kom upp hade arbetet redan gått vidare och det fanns inte längre någon övervägande fördel med att använda en modell med flera solider och tie constraints framför en modell med *seams*.



Figur 7.1: Koppling av två intilliggande brädor, röd streckad kant kopplas till grönt skuggad yta.

En jämförelse av nedböjning hos KL-plattan för *seam*-modellen och solidmodellen visade att nedböjningen var större för solidmodellen än *seam*-modellen vid två linjeupplag. Detta var ett resultat som inte borde ha uppnåtts då solidmodellen borde vara styvare på grund av att effekten av skarvarna mellan brädorna inte modelleras. Skillnaden i nedböjning var dock mycket liten, endast 0,16 %. För två linjeupplag skulle den förväntade ökningen av nedböjningen vara väldigt liten eftersom effekten av *seams* med sådana upplag inte borde vara så stor. Vid användning av två linjeupplag utsätts plattan för böjning i en riktning och största delen av spänningen tas upp i de yttre, longitudinella lagren där inverkan av skarvar inte är av så stor betydelse. Vid fyra punktstöd och fyra linjestöd utsätts plattan för böjning i två riktningar och lastupptagning sker även i de transversella lagren. Då har inverkan av *seams* större betydelse. Detta visade sig också i resultaten, skillnaden mellan *seam*- och solidmodellerna var större för fyra linjeupplag och fyra punktstöd än två linjeupplag. För två linjeupplag var skillnaden väldigt liten och dessutom omvänt mot förväntat men skillnaden var så pass liten att det skulle kunna antas ligga inom rimlig felmarginal.

Skalmodellen gav större nedböjning än solidmodellen. Det innebar att solidmodellen är styvare än skalmodellen. Vid användning av fyra punktstöd visade resultatet att det kunde bero på hur upplagsvillkoren applicerades. Förhindrad rörelse endast i en nod i hörnet gav tillägg i nedböjning på grund av stor deformation av elementet i hörnet. Faktum kvarstår dock att solidmodellen är styvare än skalmodellen i fallen med två linjestöd och fyra linjestöd. Möjlig orsak till detta är att elementindelningen inte är tillräckligt fin. Vid finita elementanalys bör en finare elementindelning ge en mindre styv struktur, det vill säga hade en finare elementindelning använts hade solidmodellen fått lägre styvhet och skillnaden mellan solid- och skalmodellen hade minskat. På grund av begränsning av antal noder i den Abaqus licens som användes utreddes detta inte vidare.

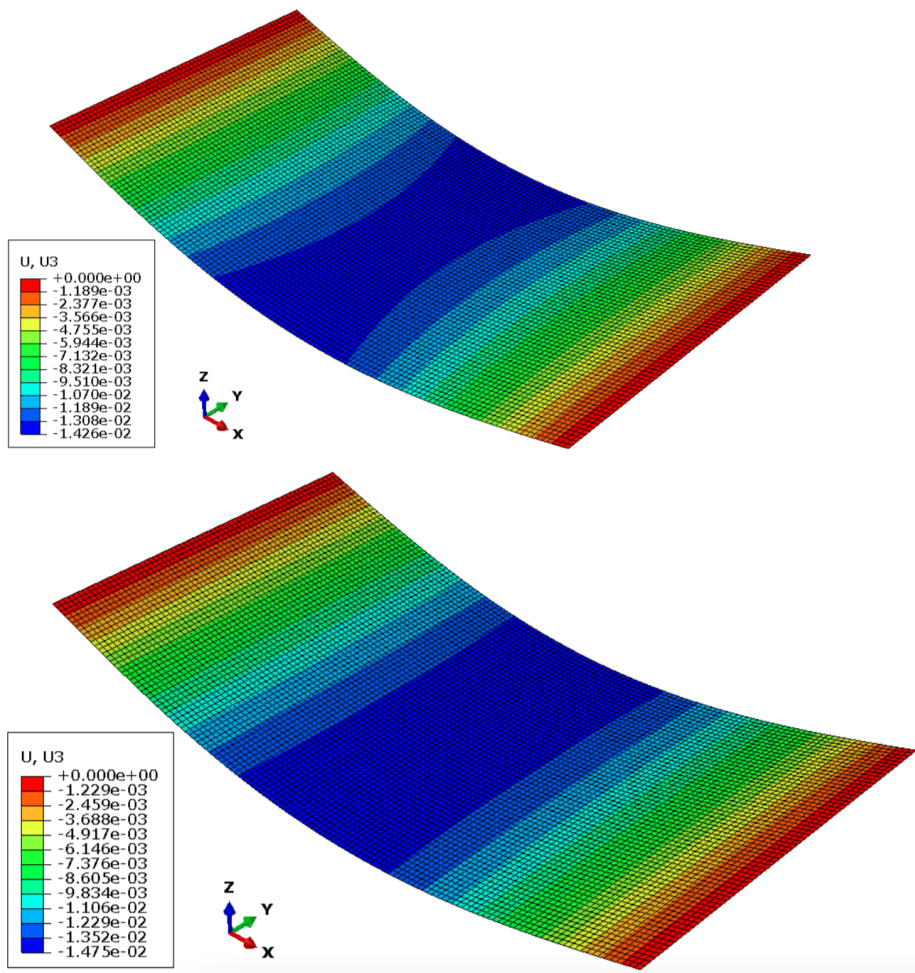
Under arbetets gång ändrades sättet att applicera punktstöd från att förhindra förskjutning i en nod i hörnet till att förhindra förskjutning över en liten area i hörnet. När förskjutningen förhindras över en area uppstår dragande krafter i upplaget. Om KL-plattan används som bjälklag i en byggnad måste upplaget kunna hantera detta. Ett vanligt utförande är att placera pelare från flera våningar rakt över varandra. Då motverkas de dragande krafterna av pelarens last.

I *seam*-modellen klarade inte Abaqus att skapa elementindelning med sexsidiga element för fallen med diagonala orienteringar. Det beslutades att använda tetraediskt formade element istället. Det användes för alla orienteringar i *seam*-modellen och även i solidmodellen. Tetraediskt formade element är styvare än sexsidiga element och ger mindre nedböjning, något som är viktigt att ha i åtanke när man jämför och utvärderar olika modeller. För att kunna skapa ett nät med sexsidiga solidelement, hade betydligt mer arbete med partitioneringar av geometrin behövts. Då det beslutades att skalmodellen skulle ligga till grund för parameterstudien utvecklades inte detta vidare.

7.2 Parameterstudie

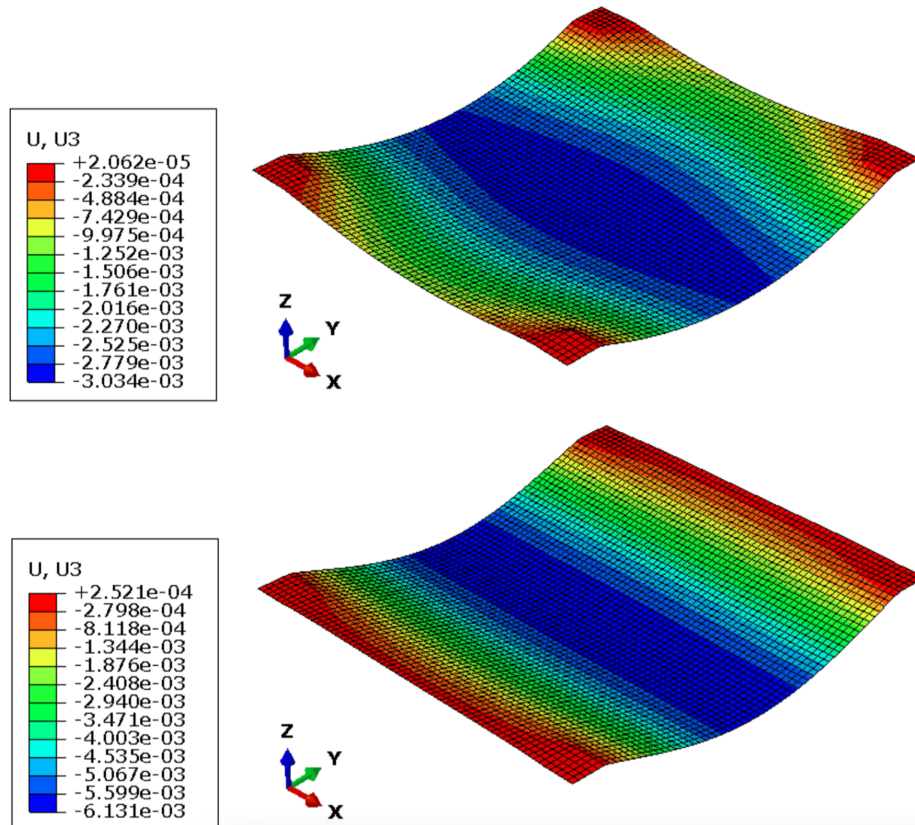
Viktigt att komma ihåg är att parameterstudien är genomförd med en skalmodell vilken inte modellerar effekten av skarvarna mellan brädorna i KL-plattan. Trots det kan resultaten från parameterstudien visa trender och mönster i beteendet hos KL-trä när orientering och förhållandet mellan bredd och längd varieras.

Vid variation av vinkeln för brädor inom vissa lager hos en platta på två linjestöd som belastas med jämt utbredd last upptäcktes att nedböjningens utbredning över bredden varierar, se figur 7.2. Det innebar att den maximala nedböjningen inte uppstod i mitten av plattan för alla orienteringar. För traditionellt CLT på två linjeupplag är nedböjningen lika stor i varje punkt i breddriktningen, med maximal nedböjning i mitten av plattans längdriktning. När vinkeln varierades gällde, för upp till 45° , att ju mer brädornas orientering avvek från den longitudinella riktningen desto mer försköts den maximala nedböjningen mot kanten. Vid 45° var effekten tydligast och ju mer vinkeln avvek över 45° desto närmre mitten av bredden hittades maxnedböjningen. Detta gällde vid både 0° och 90° i mitten.



Figur 7.2: Illustration av nedböjningens utbredning hos rektangulär platta upplag på två linjestöd belastad med jämnt utbredd last. Övre bilden: $[0,45,0,-45,0]$. Nedre bilden: $[0,90,0,90,0]$.

Även vid användning av fyra punktstöd och jämt utbredd last förekom skillnader i nedböjningens utbredning då vinkeln varierades. Då brädornas orientering gick mot den longitudinella riktningen (x-riktningen för kvadratisk platta) blev nedböjningen i kanterna parallellt med x-axeln mindre i jämförelse med den maximala, se figur 7.3. Ju mer brädorna avvek från den longitudinella riktningen desto mindre skillnad blev det mellan nedböjningen i kanten och maxnedböjningen. När brädorna var orienterade med 0° avvikelse, blev nedböjningen mellan stöden således mycket liten. Detta beror på de tvång som upplaget medför samt den kortare spännvidden på grund av stödets utbredning. Effekten var tydligare för plattor med 0° i mitten än 90° i mitten samt tydligare för kvadratiska än rektangulära plattor.



Figur 7.3: Illustration av nedböjningens utbredning hos kvadratisk platta belastad med jämnt utbredd last och upplagd på fyra punktstöd. Övre bilden: $[0,90,0,90,0]$. Nedre bilden: $[0,0,0,0,0]$.

I parameterstudien noterades att skillnaden i nedböjning vid två linjestöd och nedböjningen vid fyra punktstöd var mindre för den rektangulära plattan än den kvadratiska. För den kvadratiska plattan var nedböjningen alltid större vid användningen av fyra punktstöd än två linjestöd. Vilken upplagstyp som gav störst nedböjning för den rektangulära plattan berodde på orienteringen av brädorna. För traditionellt CLT gav fyra punktstöd mindre nedböjning än två linjestöd men för orienteringen $[0,45,0,-45,0]$ gällde motsatsen. Detta innebar att det i allmänhet är ofördelaktigt med diagonal orientering på brädorna i ett bjälklag vid fyra punktstöd och i synnerhet för kvadratiska plattor. Notera att detta gäller för uppbyggnaden i parameterstudien där punktstöd appliceras över en liten area. Resultaten av nedböjningen som togs fram under utveckling av beräkningsmodell där punktstöd applicerad i enbart en nod visar motsatt relation, användning av fyra punktstöd gav större nedböjning än två linjeupplag. Den-

na motstridighet visar att det är mycket viktigt att veta hur man skapar sin modell, vilken inverkan olika val har på resultatet samt att olika modeller inte kan jämföras mellan varandra utan att vara medveten om deras skillnader.

Vid böjning i två riktningar visade resultaten att det var fördelaktigt att ha flera lager med orienteringar kring 90° . För både fyra punktstöd och fyra linjestöd syntes en minskning av nedböjning då avvikelserna gick mot 90° . Med betongbyggnadsteknik där mest dragarmering placeras i den korta riktningen i en firsidigt upplagd platta i åtanke kan en möjlig förklaring till detta vara att lasten går den kortaste vägen till stöd. Vid upplag på alla sidor söker sig lasten alltså till långsidorna eftersom det är den kortaste vägen. Med fler lager där orienteringen går mot den transversella riktningen kan lasten tas upp i de transversella lagren likt dragarmering i betong och nedböjningen blir mindre.

Trender för hur orienteringen på brädorna påverkar nedböjningen var till viss del liknande hos en platta som belastas med en jämnt utbredd last och en platta som belastas med en punktlast. I fallet med fyra punktstöd var nedböjningen hos traditionellt CLT mindre än vid diagonala orienteringar oberoende på hur lasten applicerades. Vid två linjeupplag och punktlast gav en avvikelse från den longitudinella riktningen på 45° en större nedböjning än traditionellt CLT, till skillnad från jämnt utbredd last där 45° avvikelse gav mindre nedböjning. Vid praktisk tillämpning innebär detta att DLT i bjälklag med stora punktlaster ska användas med försiktighet, oavsett om plattan är kvadratisk eller rektangulär samt upplagsvillkor. Vid belastning med punktlast av en kvadratisk platta och upplag på fyra linjestöd gavs samma storlek och variation på nedböjningen som vid upplag på två linjestöd. För rektangulär platta gavs samma variation som för fyra punktstöd men mindre värde på nedböjningen. Detta är samma trend som för jämnt utbredd last där nedböjningen för fyra linjestöd följer nedböjningen för två linjestöd för kvadratisk platta. För rektangulär platta syns likheter i hur nedböjningen varierar samt att nedböjningen för fyra linjestöd är mindre än fyra punktstöd. Det innebär att en platta upplagd på fyra linjestöd har randvillkor som liknar en platta på två linjestöd för kvadratiske plattor och en platta upplagd på fyra punktstöd för en rektangulär platta.

I studien kring hur förhållandet mellan bredd och längd av plattan påverkar nedböjningens variation konstaterades att nedböjningen ökar med ökat förhållande mellan bredd och längd. I studien ökades förhållandet genom att öka längden och hålla bredden konstant. Det är plattans spännvidd som styr nedböjningen och då längden är den parameter som varierar är det väntat att nedböjningen ökar med ökat förhållande. En vidare intressant studie hade varit att variera förhållandet genom att hålla längden konstant och variera bredden.

I studien med förhållande var nedböjningens storlek ungefär lika för de tre olika orienteringarna vid två linjestöd medan nedböjningen vid fyra punktstöd skilde sig åt. Att nedböjningen inte skiljer sig nämnvärt åt mellan de olika orienteringarna vid användningen av två linjestöd beror på att den största delen av lastupptagnigen i plattan vid böjning i en riktning sker i de yttersta, longitudinella, lagren. Eftersom dessa är samma för alla tre orienteringar blir nedböjningen ungefär samma. Vid fyra punktstöd sker böjning i två riktningar och lastupptagningsförmågan i den transversella riktningen påverkar den totala nedböjningen. Nedböjningens ökning med ökat

förhållande är störst för två linjeupplag och minst för fyra linjeupplag. Det innebär att plattor på två linjeupplag är mer känsliga för ökad nedböjning vid ökat förhållande mellan bredd och längd. Detta kan bero på att all lastupptagning sker i de longitudinella lagren till skillnad från fyra punktstöd och fyra linjestöd där lastupptagningen sker även i de transversella lagren. För fyra linjeupplag kunde noteras att nedböjningens ökning med ökat förhållande var mindre för traditionellt CLT än diagonala orienteringar. Det innebär att CLT är mindre känsligt för ändring i förhållandet än diagonala orienteringar.

Vid jämförelse av kvoten mellan nedböjningen hos DLT och CLT för olika förhållande mellan bredd och längd vid olika upplag kunde två trender noteras. För två linjeupplag och fyra punktstöd närmade sig kvoten 1 vid ökat förhållande. Detta innebär att orienteringens inverkan på nedböjningen minskar med ökad längd hos plattan. För fyra linjestöd ökade däremot kvoten med ökat förhållande vilket innebär att orienteringen har större inverkan med ökad längd på plattan.

I studien kring förhållandet mellan bredd och längd ändrades plattans längd medan bredden hölls konstant. Ändring av längden innebär att förhållandet mellan höjd och längd påverkas vilket påverkar förhållandet mellan böjdeformation och skjuvdeformation. Ju högre plattan är i förhållande till längden desto större proportionell del av den totala deformationen utgör skjuvdeformationer. Ändring av brädornas orientering påverkar plattans böjgenskaper då träets styvhet varierar med belastningsriktningen i förhållande till fiberriktningen. När plattan blir kortare och högre blir skjuvdeformationerna proportionellt större än böjdeformationerna, detta skulle innebära att brädornas orientering har mindre inverkan på nedböjningen hos en kortare platta.

Arbetet har inte undersökt någonting hur lagrens tjocklek påverkar resultaten. I den uppbyggnad hela arbetet baseras på har de lagren där orienteringen varierar, de näst yttersta, en tunnare tjocklek än resterande, 0,03 m respektive 0,04 m. Eftersom tjockleken hos de lagren som varierar är tunnare har ändring i egenskaper inte lika stor påverkan på beteendet som om dessa lagren skulle varit lika tjocka. Det finns en möjlighet att de resultat och trender som presenteras i denna rapport inte gäller för andra uppbyggnader och lagertjocklekar.

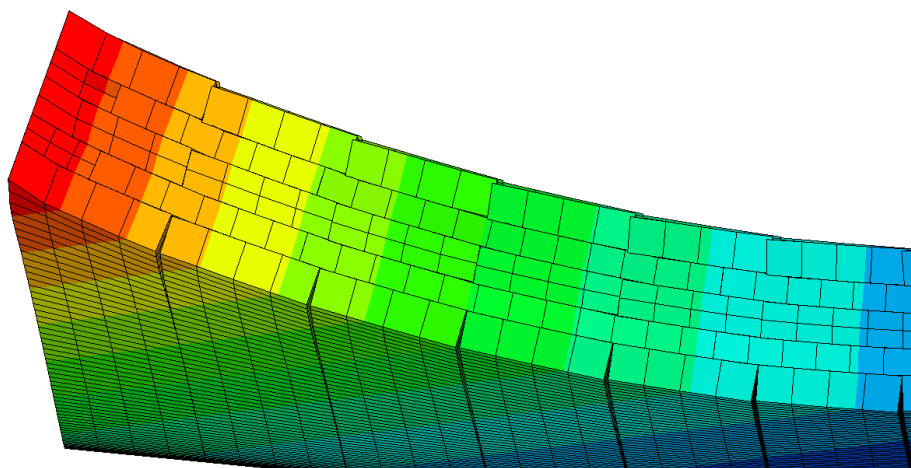
Att minska materialåtgången kan anses positivt i många avseende, inte minst ekonomiskt och resursmässigt, men det kan även leda till andra oönskade effekter. Träkonstruktioner anses redan med traditionell utformning som lätta konstruktioner och utformningen begränsas ofta stabilitetsproblem. Även problem med vibration och ljudöverföring är vanligt i träkonstruktioner. En alltför slank utformning av KL-bjälklag i en byggnad skulle alltså kunna leda till att åtgången av annat material ökar.

Litteratur

- [1] Byggföretagen. *Färdplan för fossilfri konkurrenskraft, Bygg- och anläggningssektorn*. Fossilfritt Sverige, 2018.
- [2] Erik Borgström och Johan Fröbel. *KL-trähandbok*. Svenskt Trä, 2017.
- [3] Anna Ågren Ryberg. *Trä i byggprocessen*. 2023. URL: <https://www.svenskttra.se/bygg-med-tra/byggande/bygga-i-tra/> (hämtad 2024-02-06).
- [4] Matthias Arnold, Philipp Dietsch, Roland Maderebner och Stefan Winter. *Diagonal Laminated Timber-Experimental, analytical, and numerical studies on the torsional stiffness*. *Constriction and building materials*, vol 322, s.14-16, mar 2022.
- [5] Johan Fröbel. *Dimensionering av träkonstruktioner-Projektering av träkonstruktioner del 1*. Svenskt Trä, 2019.
- [6] Tord Isaksson, Annika Mårtensson och Sven Thelandersson. *Byggkonstruktion*. Studentlitteratur, 2017.
- [7] Svenskt Trä. *Träets styrka och styvhet*. 2021. URL: <https://www.traguiden.se/om-tra/material-et-tra/traets-egenskaper-och-kvalitet/mekaniska-egenskaper1/traets-styrka-och-styvhet/>. (hämtad 2024-02-06).
- [8] Dietrich Buck, Anders Gustafsson, Olle Hagman och Xiaodong Alice Wang. *Bending Properties of Cross Laminated Timber (CLT) with a 45° Alternating Configuration*. Wood Technology och Engineering, Luleå University of Technology, 2016.
- [9] Betjka Ireneusz. *Cross (CLT) and diagonal (DLT) laminated timber as innovative material for beam elements*. KIT Scientific Publishing, 2011.
- [10] Niels Ottosen och Hans Petersson. *Introduction to the Finite Element Method*. Prentice Hall Europe, 1992.
- [11] Wasee Syed. *Solid vs Shell vs Solid Shell Elements*. 2024. URL: <https://featips.com/2021/02/21/solid-vs-shell-vs-solid-shell-elements/> (hämtad 2024-02-22).
- [12] Dassault Systemes. *SIMULIA User Assistance- ABAQUS 2023*. 2023.
- [13] Dassault Systemes Simulia Corp. *Abaqus/CAE*. Version 2023.
- [14] Wikipedia. *Abaqus*. 2023. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Abaqus> (hämtad 2024-02-27).
- [15] Dassault Systemes Simulia Corp. *Abaqus 6.11- Abaqus/CAE User's Manual*. Dassault Systemes, 2011.

A Bilagor

Beräkningsmodell



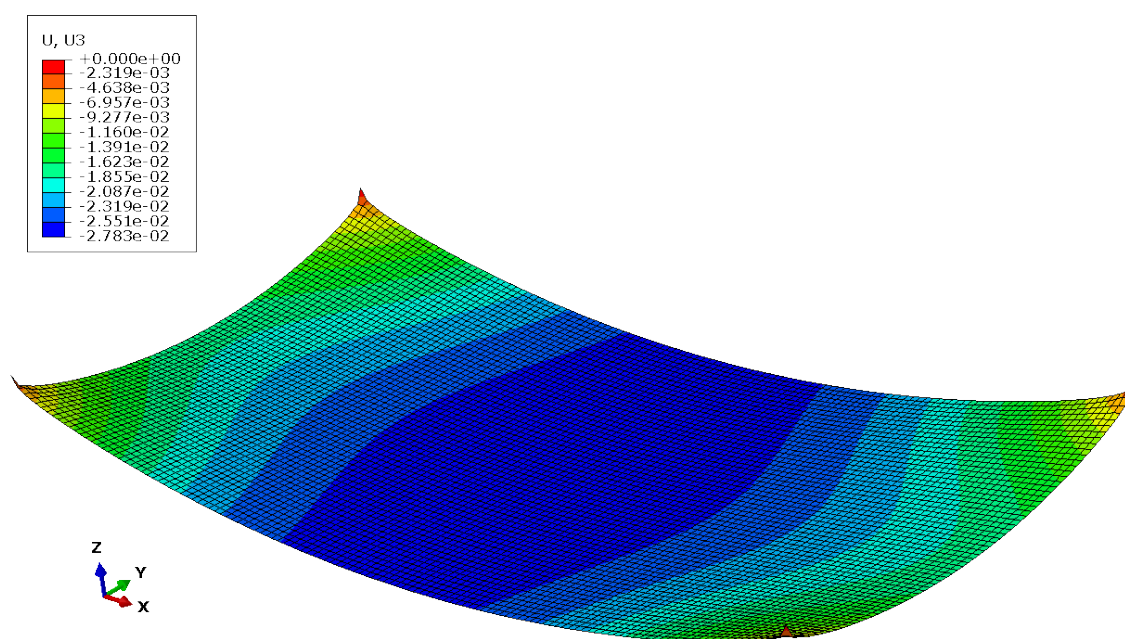
Figur A.1: Bild från modellen med solida brädor, visar hur noder tränger in i element.

Tabell A.1: Nedböjning för skal-, *seam*- och solidmodellen för olika vinklar och upplag vid undersökning av beräkningsmodell, [m]. Rektangulär platta $2,5 \times 5$ m belastad med jämnt utbredd last, 7356 N/m^2 .

		[0,90,0,90,0]	[0,45,90,-45,0]	[0,45,0,-45,0]
2 linjer	skal	0,01475	0,01541	0,01426
2 linjer	seam	0,01437	0,01483	0,01384
2 linjer	solid	0,01439	0,01487	0,01385
4 punkter	skal	0,02780	0,03520	0,04043
4 punktarea	skal	0,01232	0,01530	0,01680
4 punkter	seam	0,02394	0,03246	0,03667
4 punkter	solid	0,02284	0,02811	0,02963
4 linjer	skal	0,00360	0,00555	0,00649
4 linjer	seam	0,00371	0,00590	0,00645
4 linjer	solid	0,00334	0,00491	0,00526

Tabell A.2: Kvot mellan nedböjningen för solidmodell och *seam*-modell samt skalmodell och solidmodell för olika orienteringar och upplag.

		[0,90,0,90,0]	[0,45,90,-45,0]	[0,45,0,-45,0]	Medelvärde
solid/seam	2 linjer	1,0014	1,0027	1,0007	1,0016
	4 punkter	0,9541	0,8660	0,8080	0,8624
	4 linjer	0,8989	0,8318	0,8153	
skal/solid	2 linjer	1,0250	1,0363	1,0296	1,1523
	4 punkter	1,2172	1,2522	1,3645	
	4 linjer	1,0788	1,1323	1,2343	



Figur A.2: Illustration av nedböjning hos platta upplagd på fyra stöd där förskjutning är förhindrad i enbart en nod i hörnet. Notera stor deformation av elementen i hörnen.

Tabell A.3: Nedböjning för skalmodell där fyra punktstöd modelleras på två sätt: förskjutning förhindrad i en nod och förskjutning förhindrad över en liten area, samt procentuell skillnad mellan de olika metoderna för skalmodell och solidmodell, [m]. Rektangulär platta belastad med jämnt utbredd last.

	Skal	Solid
Förhindrad i en nod	0,0278	0,0228
Förhindrad över area	0,0123	0,0136
Procentuell skillnad	55,7	40,6

Parameterstudie

Tabell A.4: Nedböjning vid olika orienteringar hos rektangulär platta ($2,5 \times 5$ m) belastad med jämnt utbredd last 7356 N/m^2 , [m].

Vinkel, α	Två linjestöd		Fyra punktstöd		Fyra linjestöd	
	[0, α ,0, α ,0]	[0, α ,90, α ,0]	[0, α ,0, α ,0]	[0, α ,90, α ,0]	[0, α ,0, α ,0]	[0, α ,90, α ,0]
0	0,01167	0,01288	0,01288	0,01383	0,00607	0,00614
10	0,01198	0,01328	0,01322	0,01413	0,00608	0,00614
20	0,01271	0,01411	0,01411	0,01467	0,00611	0,00609
26,56	0,01323	0,01460	0,01491	0,01499	0,00618	0,00599
30	0,01348	0,01482	0,01536	0,01512	0,00624	0,00592
40	0,01406	0,01527	0,01649	0,01535	0,00644	0,00570
45	0,01426	0,01541	0,01680	0,01530	0,00649	0,00556
50	0,01441	0,01552	0,01684	0,01511	0,00648	0,00537
60	0,01460	0,01566	0,01604	0,01432	0,00605	0,00482
70	0,01470	0,01574	0,01441	0,01327	0,00510	0,00406
80	0,01474	0,01578	0,01292	0,01240	0,00405	0,00336
90	0,01475	0,01579	0,01232	0,01206	0,00360	0,00307

Tabell A.5: Nedböjning vid olika orienteringar hos kvadratisk platta ($2,5 \times 5$ m) belastad med jämnt utbredd last 7356 N/m^2 , [m].

Vinkel, α	Två linjestöd		Fyra punktstöd		Fyra linjestöd	
	[0, α ,0, α ,0]	[0, α ,90, α ,0]	[0, α ,0, α ,0]	[0, α ,90, α ,0]	[0, α ,0, α ,0]	[0, α ,90, α ,0]
0	0,000776	0,001062	0,006131	0,005019	0,000736	0,000993
10	0,000808	0,001114	0,006219	0,005038	0,000761	0,001031
20	0,000886	0,001216	0,006548	0,005076	0,000821	0,001096
30	0,000979	0,001296	0,007269	0,005157	0,000897	0,001138
40	0,001059	0,001343	0,008039	0,005181	0,000970	0,001162
45	0,001089	0,001359	0,008182	0,005072	0,001002	0,001171
50	0,001114	0,001372	0,008053	0,004837	0,001028	0,001177
60	0,001152	0,001393	0,006914	0,004009	0,001065	0,001175
70	0,001178	0,001411	0,005109	0,003005	0,001070	0,001147
80	0,001193	0,001422	0,003594	0,002269	0,001037	0,001099
90	0,001197	0,001426	0,003034	0,002018	0,001011	0,001072

Tabell A.6: Nedböjning vid olika orienteringar och stöd hos rektangulär och kvadratisk platta belastad med punktlast 3000 N, [mm].

Vinkel, α	Rektangulär skiva, 2,5x5 m			Kvadratisk skiva, 2,5x2,5 m		
	2 linjestöd	4 punktsöd	4 linjestöd	2 linjestöd	4 punktsöd	4 linjestöd
0°	7,86	8,89	5,96	2,10	8,47	2,10
10°	8,01	9,08	6,01	2,17	8,59	2,18
20°	8,42	9,62	6,19	2,40	9,04	2,43
30°	9,05	10,46	6,62	2,81	10,04	2,86
40°	9,83	11,38	7,27	3,39	11,22	3,44
45°	10,19	11,71	7,55	3,66	11,55	3,72
50°	10,48	11,84	7,72	3,87	11,53	3,93
60°	10,63	11,35	7,44	3,99	10,23	4,04
70°	10,25	10,06	6,33	3,66	7,76	3,68
80°	9,71	8,78	5,02	3,16	5,55	3,13
90°	9,47	8,26	4,45	2,92	4,71	2,87

Tabell A.7: Nedböjning vid olika förhållanden mellan bredd och längd hos platta upplagd på två linjestöd och belastad med jämnt utbredd last, [m]. Längden varierar och bredden, b=2,5 m hålls konstant.

Förhållande	[0,90,0,90,0]	[0,45,90,-45,0]	[0,45,0,-45,0]
1:1	0,00120	0,00136	0,00136
1:1,25	0,00260	0,00287	0,00244
1:1,5	0,00504	0,00541	0,00479
1:1,75	0,00892	0,00943	0,00857
1:2	0,01475	0,01541	0,01426

Tabell A.8: Nedböjning vid olika förhållanden mellan bredd och längd hos platta upplagd på fyra punktsöd och belastad med jämnt utbredd last, [m]. Längden varierar och bredden, b=2,5 m hålls konstant.

Förhållande	[0,90,0,90,0]	[0,45,90,-45,0]	[0,45,0,-45,0]
1:1	0,00303	0,00507	0,00818
1:1,25	0,00406	0,00634	0,00925
1:1,5	0,00576	0,00825	0,01088
1:1,75	0,00841	0,01112	0,01329
1:2	0,01232	0,01530	0,01680

Tabell A.9: Nedböjning vid olika förhållanden mellan bredd och längd hos platta upplagd på fyra linjestöd [m] och belastad med jämnt utbredd last. Längden varierar och bredden, $b=2,5$ m hålls konstant.

Förhållande	[0,90,0,90,0]	[0,45,90,-45,0]	[0,45,0,-45,0]
1:1	0,00101	0,00100	0,00100
1:1,25	0,00173	0,00209	0,00202
1:1,5	0,00246	0,00321	0,00337
1:1,75	0,00310	0,00440	0,00492
1:2	0,00360	0,00556	0,00649