

FE-analyse av krysslimte (CLT) og diagonallimte (DLT) massivtre-elementer med henblikk på skjærstivhet

MASTEROPPGAVE 2014

NORGES MILJØ- OG BIOVITENSKAPELIGE UNIVERSITET

SHISHIR AHMED

2014

FORORD

Denne masteroppgaven utgjør 30 studiepoeng og er et avsluttende arbeid i utdanningen til graden Master i teknologi ved instituttet for matematiske realfag og teknologi (IMT) på Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU) i Ås.

Masteroppgaven er foreslått av min hovedveileder, Nils Ivar Bovim, som er ansvarlig for NMBUs del av forskningsprosjektet Wood/Be/Better koordinert av Arkitekthøyskolen i Oslo (AHO) og finansiert av Norges Forskningsråd. Det har som mål å skape mer anvendelige trebygg i byområder. Masteroppgaven skal brukes videre av stipendiat Anders Steinsvik Nygård.

Denne oppgaven har for meg vært en liten reise inn i treets verden. Oppgaven har gitt meg en dypere og et mer detaljert innblikk i trevirke som byggemateriale. Tre er et spennende materiale å arbeide med og oppbyggingen av massivtre-elementer i elementprogrammet ANSYS har bidratt til økt kunnskap i bruken av elementprogrammer generelt som i tillegg kan brukes til andre materialer og konstruksjoner.

Jeg ønsker å rette en stor takk til alle som hjulpet meg og som har bidratt til støtte og veiledning i arbeidet med denne masteroppgaven. Jeg vil først og fremst takke min hovedveileder, Nils Ivar Bovim, som har tildelt denne oppgaven til meg og gitt meg råd og god veiledning. Jeg vil også takke min biveileder og stipendiat, Anders Steinsvik Nygård, for veiledning i oppbyggingen av veggmodellene i ANSYS. En stor takk rettes også til Geir Vestøl, Olav Høibø og Sebastian Knutsen for treteknisk veiledning og hjelp, samt også å takke EDR MEDESO for support i ANSYS. Til sist vil jeg takke min far, Khorshed Ahmed, og min mor, Matluba Khatoon, for deres støtte hele veien i min utdannelse.

Masteroppgaven omhandler modellering og analyse av krysslimte og diagonallimte massivtre-elementer der skjærstivheten sammenliknes. Excel-filer, script-filer og ANSYS DATABASE-filer finnes som elektronisk vedlegg på minnepenn.

Ås, november 2014

Shishir Ahmed

2014

SAMMENDRAG

Tre som byggemateriale har sterke tradisjoner i Norge. Materialet har lav egenvekt, høy styrke, god isoleringsevne, god varmelagringskapasitet og er miljøvennlig. Tre er enkelt å bearbeide, og Norge har god tilgjengelighet til materialet.

Behovet for miljøeffektive og fornuftige konstruksjonssystemer var grunnlaget for at det ble utviklet bygningselementer i massivtre som har sitt opphav fra tverrspente brodekker.

Denne oppgaven er en av mange tidligere masteroppgaver som er en del av forskningsprosjektet Wood/Be/Better koordinert av Arkitektthøyskolen i Oslo (AHO) og finansiert av Norges Forskningsråd.

Opgaven tar utgangspunkt i studiet til I.Bejtka fra Karlsruhe Institute of Technology (KIT) publisert 2011. Han tar for seg krysslaminerte massivtre-elementer (Cross Laminated Timber, CLT) og diagonallaminerte massivtre-elementer (Diagonal Laminated Timber, DLT) med henblikk på nedbøyning av bjelkeelementer.

I denne oppgaven er det bygget opp tolv veggmodeller i DLT og seks veggmodeller i CLT i Finite Element-programmet ANSYS Mechanical APDL. Blant DLT-veggene er det seks hele vegger og seks vegger med utsparinger. Blant CLT-veggene er tre hele vegger og tre vegger med utsparinger. DLT hele vegger og vegger med utsparinger er analysert med henblikk på skjærstivhet og sammenliknet med CLT hele vegger og vegger med utsparinger. Sjiktstørrelse er eneste parameter som er undersøkt.

I krysslimte massivtre-elementer blir det meste av kreftene, grunnet skjærstrømmer, tatt opp som ren skjærdeformasjon av bordene, rulleskjær og torsjon i limfugen mellom sjiktene. I diagonallimte massivtre-elementer blir det meste av kreftene, grunnet skjærstrømmer, tatt opp av diagonale bord som trykk- og strekkstaver i tillegg til ren skjærdeformasjon og noe rulleskjær. DLT gir mindre torsjonsvirkning i limfugen mellom sjiktene enn CLT og de diagonale bordene fungerer mer som en lang rekke med avstivere.

Analysene i ANSYS viser at DLT (diagonale bord lik -45° og 45°) er et vesentlig stivere massivtre-element enn CLT (vinkelen mellom stående bord og liggende bord lik 90°) utsatt for skjærstrømmer forårsaket av horisontal vindpåkjenning. For hele vegger er DLT omtrentlig tre og en halv gang stivere enn CLT og for vegger med utsparinger er DLT omtrentlig to ganger stivere enn CLT.

ABSTRACT

Using wood as a building material has a strong tradition in Norway. Wood is a unique material. It is multicomponent, hygroscopic, anisotropic, biodegradable and renewable. Wood is a highly accessible material in Norway. This M.Sc. thesis is a part of the WOOD/BE/BETTER project, funded by The Research Council of Norway through the BIONÆR/BIONAER research programme.

Six cross laminated (CLT) and twelve diagonal laminated (DLT) timber panels are modelled in ANSYS. Among the DLT panels there are six entire panels and six panels with recesses. Among the CLT panels there are three entire panels and three panels with recesses.

Finite Element analysis with respect to shear displacement of DLT and CLT elements are conducted using ANSYS Mechanical APDL 15.0. The modelling is based on the studies of cross (CLT) and diagonal (DLT) laminated timber as innovative material for beam elements by I.Bejtka published in 2011. The board thickness in the DLT and CLT panels is the only parameter studied.

In CLT panels most of the acting shear forces is obtained as shear deformation of each single boards and torsion in the glued interfaces between the broad sides of the boards. In addition some of the shear forces is also obtained as rolling shear. In DLT panels most of the acting shear forces is obtained in the diagonal boards and also as shear deformation of the single boards. The diagonal boards act as a truss-framework absorbing compressive and tensile stresses reducing the effect of torsion in the glued interfaces between the broad sides of the boards. In addition small quantity of the acting shear forces is also obtained as rolling shear.

The results of the Finite Element analyses show that DLT (45° and -45° inclination of the diagonal boards) is a significantly stiffer panel compared to CLT (90° between horizontal and vertical boards) with respect to shear displacement caused by shear forces induced by horizontal wind load. DLT entire panels is approximately three and a half times stiffer than CLT entire panels. DLT panels with recesses is approximately two times stiffer than CLT panels with recesses.

Innholdsfortegnelse

FORORD.....	1
SAMMENDRAG.....	2
ABSTRACT.....	3
FIGURLISTE.....	7
TABELLISTE.....	12
1 INNLEDNING	13
1.1 Bakgrunn	13
1.1.1 Historikk.....	13
1.1.2 Miljøaspekt.....	14
1.1.3 Tidligere arbeid.....	15
1.2 Problemstilling	16
1.3 Begrensninger	16
2 TEORI.....	17
2.1 Materialeegenskaper for trevirke	17
2.1.1 Oppbygning	17
2.2 Materialsymmetri	19
2.3 Fuktbevegelser	21
2.4 Poissons tall.....	21
2.5 Ortotrop elastisitet.....	23
3 MASSIVTRE.....	32
3.1 Introduksjon	32
3.2 Krysslagte elementer, CLT	33
3.3 Diagonallagte elementer, DLT	35
3.4 Dimensjonsstabilitet.....	36
3.5 Styrke og stivhet	37
3.6 Beregningsmetode av CLT.....	38
3.7 Skjærdeformasjon.....	43
3.7.1 CLT.....	43
3.7.2 DLT.....	47
4 FINITE ELEMENT METHOD – ELEMENTMETODEN	48
4.1 Elementmetoden og dens prinsipper.....	48

4.2	Analyseverktøy for Finite Element Method (FEM) modellering	50
5	METODE	53
5.1	Valg av metode	53
5.2	Generell beskrivelse	53
5.3	Elementtype i ANSYS	57
5.4	Materialdata	58
5.5	Oppbygging geometri vegger i ANSYS	59
5.5.1	CLT hele vegger	59
5.5.2	CLT-vegg med utsparinger	62
5.5.3	DLT hele vegger	65
5.5.4	DLT-vegger med utsparinger	68
5.6	Mesh	71
5.7	Lokale aksesystemer i ansys	73
5.8	Liming av sjiktene i Ansys	74
5.9	Vindlaster	76
5.10	Fastlåsninger	78
6	RESULTATER	79
6.1	Forventet skjærdeformasjon Δx hele vegger (ANSYS)	79
6.1.1	Maks Δx CLT 5 LAG stående bord lik 0.3 x tykkelse	81
6.1.2	Maks Δx CLT 5 LAG stående bord lik 0.6 x tykkelse	82
6.1.3	Maks Δx CLT 5 LAG stående bord lik 0.9 x tykkelse	83
6.1.4	Maks Δx DLT 4 lag diagonale bord lik 0.2 x tykkelse	84
6.1.5	Maks Δx DLT 4 LAG diagonale bord lik 0.4 x tykkelse	85
6.1.6	Maks Δx DLT 4 LAG diagonale bord lik 0.8 x tykkelse	86
6.1.7	Maks Δx DLT 5 LAG diagonale bord lik 0.23 x tykkelse	87
6.1.8	Maks Δx DLT 5 LAG diagonale bord lik 0.4 x tykkelse	88
6.1.9	Maks Δx DLT 5 LAG diagonale bord lik 0.79 tykkelse	89
6.2	Forventet skjærdeformasjon Δx vegger med utsparinger (ANSYS)	90
6.2.1	Maks Δx CLT 5 LAG UTSPARINGER stående bord 0.3 x tykkelse	91
6.2.2	Maks Δx CLT 5 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.6 x tykkelse	92
6.2.3	Maks Δx CLT 5 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.9 x tykkelse	93
6.2.4	Maks Δx DLT 4 LAG UTSPARINGER diagonale bord 0.2 x tykkelse	94
6.2.5	Maks Δx DLT 4 LAG UTSPARINGER diagonale bord 0.4 x tykkelse	95

6.2.6	Maks Δx DLT 4 LAG UTSPARINGER diagonale bord 0.8 x tykkelse.....	96
6.2.7	Maks Δx DLT 5 LAG UTSPARINGER diagonale bord 0.23 x tykkelse.....	97
6.2.8	Maks Δx DLT 5 LAG UTSPARINGER diagonale bord 0.4 x tykkelse.....	98
6.2.9	Maks Δx DLT 5 LAG UTSPARINGER diagonale bord 0.79 x tykkelse.....	99
6.3	Grafisk framstilling resultater hele vegger	100
6.4	Grafisk framstilling resultater vegger med utsparinger	103
6.5	Grafisk sammenlikning resultater hele vegger og vegger med utsparinger	106
7	DISKUSJON.....	107
7.1	Generelt	107
7.2	Hele vegger	108
7.3	Vegger med utsparinger	109
8	KONKLUSJON	111
9	VIDERE ARBEID.....	113
10	REFERANSER	114
11	VEDLEGG	115
11.1	MASTEROPPGAVE PDF-FIL	115
11.2	EXCEL-FILER.....	115
11.3	SCRIPT-FILER ANSYS.....	116
11.4	FEM MODELLER, DATABASE – FILER ANSYS	117

FIGURLISTE

Figur 1.1.1: <i>Trevirkets CO₂ syklus. Kilde: http://www.allskog.no/skog-og-klima.....</i>	14
Figur 2.1: Snitt av en trestamme og dens bestanddeler. Kilde: presentasjon, Nils Ivar Bovim....	18
Figur 2.2: Hovedaksene i trevirke.....	19
Figur 2.3: Illustrasjon på materialsymmetri. Kilde: (Bodig og Jayne 1992).....	20
Figur 2.4: Illustrasjon på tverrkontraksjon. Kilde: (Bodig og Jayne 1992).....	22
Figur 2.5: Spenningskomponenter i et lite element i et rektangulært koordinatsystem. Kilde: (Bodig og Jayne 1992).....	25
Figur 2.6: Ortotrop modell av et trestykke. L, lengderetning. R, radialretning. T, tangentialretning. Kilde: (Bodig og Jayne 1992).....	26
Figur 2.7: Skjærkomplians i 2,3-planet (radiell-tangentiell-planet). Kilde: (Bodig og Jayne 1992)	27
Figur 2.8: Illustrasjon av deformasjonsenergien som blir lagret i et ortotrop materiale som følge av spenningene σ_1 og σ_2 . Kilde: (Bodig og Jayne 1992).....	29
Figur 3.1: Kantstilt element. Kilde: (Norsk Treteknisk Institutt 2006).....	32
Figur 3.2: Hulromselement. Kilde: (Norsk Treteknisk Institutt 2006).....	32
Figur 3.3: Krysslimt element av massivtre, CLT (Cross Laminated Timber). Kilde: (Bejtka 2011)	34
Figur 3.4: Sammenføyning av DLT 5 sjikt og alternativt DLT 4 sjikt (Vectorworks)......	35
Figur 3.5: <i>Forklaringsskisse av Schubanalogieverfahren-metoden med stiv forbindelse mellom Bjelke A og Bjelke B med tilhørende stivhetsverdier. Kilde: (Glasø 2014).....</i>	39
Figur 3.6: Illustrasjon av et 7 lag CLT element utsatt for rulle-skjærdeformasjon mellom sjiktene der stående lameller møter tverrgående lameller. Kilde: (Glasø 2014).....	43
Figur 3.7: 5-lags CLT vegg utsatt for bøye- og skjærpåkjønning belastet i planet. Kilde: (Bogensperger, Moosbrugger og Silly 2010).....	44
Figur 3.8: Framstilling av skjærspenninger i et massivtre-element. a) den totale skjærvirkningen, ikke kantlimte bord. b) ren skjærpåvirkning, kantlimte bord. c) skjærpåvirkning på grunn av torsjon, ikke kantlimte bord. Kilde: (Bogensperger, Moosbrugger og Silly 2010).	44
Figur 3.9: Ren skjærdeformasjon illustrert med vinkelendring. Kilde: (Bogensperger, Moosbrugger og Silly 2010).....	45
Figur 3.10: Skjærdeformasjon grunnet torsjon illustrert med vinkelendring. Kilde: (Bogensperger, Moosbrugger og Silly 2010).....	45
Figur 3.11: Forklaring på ulike betegnelser i formel (3.25). Kilde: (Bogensperger, Moosbrugger og Silly 2010).....	46
Figur 3.12: Diagonale sjikt der lamellene fungerer som trykk- og strekkstaver. Denne effekten antas å gi en mindre skjærdeformasjon sammenliknet med krysslimte sjikt pga. redusert torsjonsvirkning sammenliknet med CLT.	47

Figur 4.1: Oppbygging elementprogram, del 1.....	51
Figur 4.2: Oppbygging av elementprogram, del 2.....	51
Figur 4.3: Oppbygging av elementprogram, del 3.....	52
Figur 4.4: Oppbygging av elementprogram, del 4.....	52
Figur 5.1: Elementgeometri SOLID186 med beskrivelse under (engelsk).....	57
Figur 5.2: Isometrisk visning av ett liggende bord (ANSYS).....	59
Figur 5.3: Isometrisk visning ett stående bord (ANSYS).....	59
Figur 5.4: Snittegning CLT 5 LAG av de ulike sjiktene (Vectorworks).....	60
Figur 5.5: Isometrisk visning sjikt med stående bord CLT 5 LAG hel vegg (ANSYS).....	60
Figur 5.6: Isometrisk visning sjikt med liggende bord CLT 5 LAG hel vegg (ANSYS).....	61
Figur 5.7: Isometrisk visning CLT 5 LAG hel vegg med målsetting (ANSYS).....	61
Figur 5.8: Vegg CLT 5 LAG med utsparinger med målsetting (ANSYS).....	62
Figur 5.9: Isometrisk visning vegg CLT 5 LAG med utsparinger sjikt med liggende bord (ANSYS).....	63
Figur 5.10: Isometrisk visning CLT 5 LAG med utsparinger sjikt med stående bord (ANSYS).....	63
Figur 5.11: Isometrisk visning vegg CLT 5 LAG med utsparinger (ANSYS).....	64
Figur 5.12: 45grader diagonalt bord i XZ-planet (ANSYS).....	65
Figur 5.13: Minus 45grader diagonalt bord i XZ-planet (ANSYS).....	65
Figur 5.14: Isometrisk visning DLT-vegg sjikt med -45grader bord (ANSYS).....	66
Figur 5.15: Isometrisk visning DLT-vegg sjikt med 45grader bord (ANSYS).....	66
Figur 5.16: Isometrisk visning DLT 5 LAG hel vegg. Global modell (ANSYS).....	67
Figur 5.17: Isometrisk visning DLT 4 LAG hel vegg. Global modell (ANSYS).....	67
Figur 5.18: Isometrisk visning sjikt med 45grader diagonale bord med utsparinger (ANSYS).....	68
Figur 5.19: Isometrisk visning sjikt med -45grader bord med utsparinger (synlige justeringsbord) (ANSYS).....	69
Figur 5.20: Isometrisk visning DLT 5 LAG med utsparinger (ANSYS).....	70
Figur 5.21: Isometrisk visning DLT 4 LAG med utsparinger (ANSYS).....	70
Figur 5.22: <i>Eksempler free mesh (irregulær oppdeling) og mapped mesh (regulær oppdeling) (ANSYS, HELP)</i>	71
Figur 5.23: Eksempel mapped mesh global modell (ANSYS).....	72
Figur 5.24: "Euler rotation angles". Lokale aksesystemer i ANSYS (ANSYS, HELP).....	73
Figur 5.25: Prinsipp liming av sjiktene med CONTA174 og TARGE170 i ANSYS.....	74
Figur 5.26: Palisaden. Høyhus i CLT (Ås) med vindtall hentet fra masteroppgaven til Lars Christian Mørch (Mørch 2014).....	76
Figur 5.27: Skjærstrømmer (røde piler) i en global modell CLT/DLT hel vegg (ANSYS).....	77

Figur 5.28: Isometrisk visning av fastlåsninger i en global modell CLT/DLT hel vegg (ANSYS).	78
Figur 6.1: Beregningsgrunnlag forskyvning X-retning hel vegg (ANSYS).....	80
Figur 6.2: Skalert isometrisk visning CLT 5 LAG stående bord 0.3 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.237\text{mm}$	81
Figur 6.3: Isometrisk visning CLT 5 LAG stående bord 0.3 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.237\text{mm}$	81
Figur 6.4: Skalert visning, CLT 5 LAG stående bord lik 0.6 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.213\text{mm}$	82
Figur 6.5: Isometrisk visning CLT 5 LAG stående bord lik 0.6 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.213\text{mm}$	82
Figur 6.6: Skalert isometrisk visning CLT 5 LAG stående bord lik 0.9 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.264\text{mm}$	83
Figur 6.7: Isometrisk visning CLT 5 LAG stående bord lik 0.9 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.264\text{mm}$	83
Figur 6.8: Skalert isometrisk visning DLT 4 LAG diagonale bord lik 0.2 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.124\text{mm}$	84
Figur 6.9: Visning DLT 4 LAG diagonale bord lik 0.2 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.124\text{mm}$	84
Figur 6.10: Skalert isometrisk visning DLT 4 LAG diagonale bord lik 0.4 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.768\text{E-}01\text{mm}$	85
Figur 6.11: Visning DLT 4 LAG diagonale bord lik 0.4 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.768\text{E-}01\text{mm}$	85
Figur 6.12: Skalert isometrisk visning DLT 4 LAG diagonale bord lik 0.8 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.556\text{E-}01\text{mm}$	86
Figur 6.13: Visning DLT 4 LAG diagonale bord lik 0.8 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.556\text{E-}01\text{mm}$	86
Figur 6.14: Skalert isometrisk visning DLT 5 LAG diagonale bord lik 0.23 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.993\text{E-}01\text{mm}$	87
Figur 6.15: Visning DLT 5 LAG diagonale bord lik 0.23 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.993\text{E-}01\text{mm}$	87
Figur 6.16: Skalert isometrisk visning DLT 5 LAG diagonale bord lik 0.4 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.711\text{E-}01\text{mm}$	88
Figur 6.17: Visning DLT 5 LAG diagonale bord lik 0.4 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.711\text{E-}01\text{mm}$	88
Figur 6.18: Skalert isometrisk visning DLT 5 LAG diagonale bord lik 0.79 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.562\text{E-}01\text{mm}$	89
Figur 6.19: Visning DLT 5 LAG diagonale bord lik 0.79 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.562\text{E-}01\text{mm}$	89
Figur 6.20: Beregningsgrunnlag forskyvning X-retning vegg med utsparinger (ANSYS).	90

Figur 6.21: Skalert isometrisk visning CLT 5 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.3 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.354\text{mm}$.	91
Figur 6.22: Visning CLT 5 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.3 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.354\text{mm}$.	91
Figur 6.23: Skalert isometrisk visning CLT 5 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.6 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.311\text{mm}$.	92
Figur 6.24: Visning CLT 5 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.6 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.311\text{mm}$.	92
Figur 6.25: Skalert isometrisk visning CLT 5 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.9 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.387\text{mm}$.	93
Figur 6.26: Visning CLT 5 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.9 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.387\text{mm}$.	93
Figur 6.27: Skalert isometrisk visning DLT 4 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.2 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.220\text{mm}$.	94
Figur 6.28: Visning DLT 4 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.2 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.220\text{mm}$.	94
Figur 6.29: Skalert isometrisk visning DLT 4 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.4 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.161\text{mm}$.	95
Figur 6.30: Visning DLT 4 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.4 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.161\text{mm}$.	95
Figur 6.31: Skalert isometrisk visning DLT 4 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.8 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.155\text{mm}$.	96
Figur 6.32: Visning DLT 4 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.8 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.155\text{mm}$.	96
Figur 6.33: Skalert isometrisk visning DLT 5 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.23 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.187\text{mm}$.	97
Figur 6.34: Visning DLT 5 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.23 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.187\text{mm}$.	97
Figur 6.35: Skalert isometrisk visning DLT 5 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.4 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.154\text{mm}$.	98
Figur 6.36: Visning DLT 5 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.4 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.154\text{mm}$.	98
Figur 6.37: Skalert isometrisk visning DLT 5 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.79 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.154\text{mm}$.	99
Figur 6.38: Visning DLT 5 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.79 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.154\text{mm}$.	99
Figur 6.39: Grafisk framstilling resultater CLT 5 LAG hele vegger.	100
Figur 6.40: Grafisk framstilling resultater DLT 4 LAG hele vegger.	101
Figur 6.41: Grafisk framstilling resultater DLT 5 LAG hele vegger.	102

2014

Figur 6.42: Grafisk framstilling resultater CLT 5 LAG vegger med utsparinger.	103
Figur 6.43: Grafisk framstilling resultater DLT 4 LAG vegger med utsparinger.	104
Figur 6.44: Grafisk framstilling resultater DLT 5 LAG vegger med utsparinger.	105
Figur 6.45: Grafisk sammenlikning resultater hele vegger og vegger med utsparinger.....	106

TABELLISTE

Tabell 1: Sjiktstørrelser vegger CLT 4 LAG MED ETT LAG MDF plater.....	54
Tabell 2: Sjiktstørrelser vegger CLT 5 LAG.....	55
Tabell 3: Sjiktstørrelser vegger DLT 4 LAG.....	55
Tabell 4: Sjiktstørrelser vegger DLT 5 LAG.....	56
Tabell 5: Resultater CLT 5 LAG hele vegger.....	100
Tabell 6: Resultater DLT 4 LAG hele vegger.....	101
Tabell 7: Resultater DLT 5 LAG hele vegger.....	102
Tabell 8: Resultater CLT 5 LAG vegger med utsparinger.....	103
Tabell 9: Resultater DLT 4 LAG vegger med utsparinger.....	104
Tabell 10: Resultater DLT 5 LAG vegger med utsparinger.....	105

1 INNLEDNING

1.1 Bakgrunn

1.1.1 Historikk

Tre som byggemateriale har sterke tradisjoner i Norge. Materialet har lav egenvekt, høy styrke, god isoleringsevne og god varmelagringskapasitet. Tre er enkelt å bearbeide, og tilgjengeligheten til materialet har vært god gjennom de fleste tider. Over hele landet kan gamle håndverkstradisjoner sees igjen i en rekke middelalderbygg. Flere av bygningene viser meget god kunnskap om hvordan byggematerialet best kunne anvendes i bygninger og andre konstruksjoner. Vikingskip og stavkirker er gode eksempler på komplisert byggeteknikk i tre. Mot slutten av 1700-tallet gikk man fra tradisjonell laftevegg over til reisverksvegg.

Utviklingen av massivtre-elementer opprinner fra Canada rundt 1975. Det var tverrspente planker på høykant som ble brukt til brodekker og dette prinsippet viste seg svært vellykket og ble spredt videre til Mellom-Europa rundt 1990.

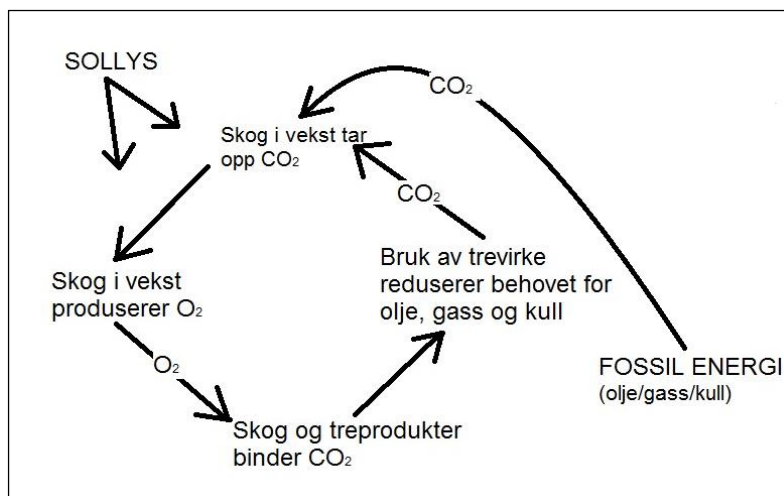
Behovet for miljøeffektive og fornuftige konstruksjonssystemer var grunnlaget for at det ble utviklet bygningselementer i massivtre som har sitt opphav fra tverrspente brodekker. Ved de tekniske høyskolene i Sveits, begynte de i 1990 å utvikle forskjellige metoder for å sette sammen planker til større elementer. Bygging med massivtre-elementer er i dag en kjent byggemetode i Sveits, Østerrike og Tyskland. Mot slutten av 1990-tallet ble massivtre-elementer introdusert i Norden gjennom forskningsprosjektet Nordic Wood. I Norge ble massivtre-elementer først brukt i en enebolig i Asker i 1998. (Norsk Treteknisk Institutt 2006)

1.1.2 Miljøaspekt

Tre er et naturlig og levende materiale. De store skogsmassene vi har i Norge er en naturressurs som kan brukes i det uendelige, så lenge den forvaltes på en bærekraftig måte. Miljø kommer stadig høyere på den politiske agendaen, og Norges mål er å bli karbonnøytralt innen 2030. Dette vil medføre store utfordringer for alle sektorer i samfunnet. Dette gir også nye muligheter for skogs- og trenæringen. Tre er et av de mest miljøvennlige byggematerialene vi har tilgjengelig i Norge. Trevirke opptar mye karbon. Trevirke dannes blant annet gjennom fotosyntesen ved at trærne benytter CO₂ fra atmosfæren og binder karbonet sammen med trevirket helt til det frigis gjennom nedbryting eller forbrenning. Å bygge med tre gjør at man lagrer store mengder med karbon. Dette er et bedre alternativ enn at skogen dør på rot.

1 m³ tre som erstatter betong reduserer CO₂-utslippene med 0,2 – 2,1 tonn. 1 m³ tre som erstatter stål reduserer CO₂-utslippene med 0,2 – 0,5 tonn. Det å øke bruken av trevirke i et harmonisk samspill med andre materialer er en fornuftig miljøriktig utvikling.

I tillegg har tre en positiv effekt på innemiljøet. Tre er et materiale som både avgir og opptar fuktighet og dette bidrar til regulering av temperaturen. For de aller fleste av oss oppleves tre som et varmt og «menneskelig» materiale. (Treindustriens lille grønne 2013)



Figur 1.1.1: Trevirkets CO₂ syklus. Kilde: <http://www.allskog.no/skog-og-klima>

1.1.3 Tidligere arbeid

Denne oppgaven er en av mange tidligere masteroppgaver som er en del av forskningsprosjektet Wood/Be/Better koordinert av Arkitekthøyskolen i Oslo (AHO) og finansiert av Norges Forskningsråd. Det har som mål å skape mer anvendelige trebygg i byområder. Aktuelle problemstillinger innen arkitektur, design, økonomi, bygningsfysikk og konstruksjonsteknikk skal belyses. Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, NMBU, ved instituttet for matematiske realfag og teknologi (IMT) har ansvaret for Work Package 3 (WP3) som omhandler konstruksjonsteknikk.

Her på Ås Campus ble det høsten 2013 ferdigstilt to åtteetasjes høyhus der bæresystemet er utført i krysslimte massivtre-elementer. For fleretasjes høyhus i massivtre vil stabiliseringen være via skivevirkninger i vegger, etasjeskillere, sjakter og tak. I trebygg med mange etasjer vil vindlasten være en betydelig faktor i dimensjoneringen. Bevegelser som oppstår i form av skjærdeformasjoner i veggelementene er en konstruksjonsmessig utfordring det må tas hensyn til.

Denne oppgaven tar utgangspunkt i studiet til I. Bejtka fra Karlsruhe Institute of Technology (KIT) publisert 2011. Han tar for seg krysslaminerte massivtre-elementer (Cross Laminated Timber, CLT) og diagonallaminerte massivtre-elementer (Diagonal Laminated Timber, DLT) med henblikk på nedbøyning av bjelkeelementer. Bejtkas arbeid samt masteroppgavene til Arne Schröder og Lars Christian Mørch, som også er en del av Wood/Be/Better, danner grunnlaget for denne oppgaven.

1.2 Problemstilling

Det dannes skjærstrømmer som et resultat av vindlaster og andre horisontale laster der yttervegg og andre vegger møter etasjeskiller i et høyhus i massivtre. Målet med denne oppgaven er bruke effekten av disse skjærstrømmene til å bestemme skjærstivheten til krysslaminerte (CLT) og diagonallaminerte (DLT) vegger med høyde lik 2,8 meter og bredde lik 15 meter. Følgelig også å undersøke effekt av sikktykkelse på skjærstivheten på hele vegger samt vegger med utsparinger. Det kan benyttes FEM-modellering og for eksempel programmet ANSYS som analyseverktøy.

1.3 Begrensninger

Treets fiberegenskaper blir utnyttet for å skape CLT- og DLT-vegger. Denne fiberutnyttelsen finner man også i andre kompositt-konstruksjoner som glassfiber plater og karbonfiber plater. I teoridelen er dette forklart i detalj.

Tykkelse, fiberhelning, trekvalitet og tresort er parametre som kan varieres ved sammenlikning av skjærstivheten til en CLT-vegg og en DLT-vegg. På grunn av begrenset omfang av denne oppgaven (30 studiepoeng) er tykkelse den eneste parameteren som er undersøkt. På krysslaminerte elementer er fiberhelningen på 0 grader og 90 grader. På diagonallaminerte elementer er fiberhelningen på 0 grader, 45 grader og -45 grader. Det er valgt gran som tresort og trekvalitet på C24 (bøyningsfasthet lik 24 N/mm²).

Det er kun benyttet horisontale vindlaster og en lineær-elastiske analyse. Dynamiske egenskaper er ikke tatt i betraktning.

2 TEORI

2.1 Materialelegenskaper for trevirke

2.1.1 Oppbygning

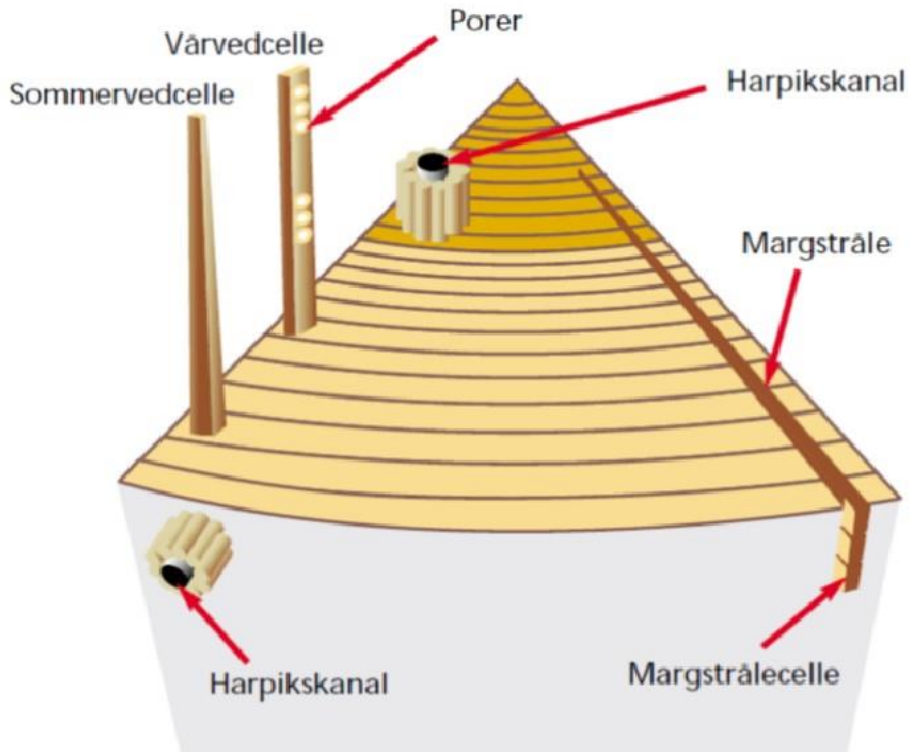
Tre består hovedsakelig av karbon, hydrogen og oksygen. Trefibrene som danner trevirke er bygget opp av mindre celler. Disse cellene er mange ganger høyere enn de er brede. De danner derfor langformede celler som utgjør trefibrene i trestammens lengderetning. Celleveggene i disse cellene er primært bygget opp av tre prinsipielle kjemiske materialer; cellulose, hemicellulose og lignin. I tillegg kommer også ekstraktivstoffer (Shmulsky og Jones 2011).

Cellulose er hovedkomponenten i cellene og cellulosemolekylet består av lange repeterende glukoseenheter. De molekylære kreftene mellom cellulosemolekylene er meget sterke og bidrar sterkt til treets karakteristiske strekkfasthet (Kollman og Côté 1968). Cellulose er et kjent begrep hos mange. For å nevne en analogi inneholder bomull 99 prosent ren cellulose (Shmulsky og Jones 2011).

Hemicellulose utgjør nærmere 30 prosent av treets totale masse. Dette kjemiske stoffet er bygget opp av lineære polysakkarider (sakarider betyr sukkerenheter) med korte sideforgreninger som penetrerer cellulosestrukturene i celleveggen. Hemicellulose har innvirkning på både de fysiske og kjemiske egenskapene til trevirket og påvirker prosesser som tørking og oppfukning (Kucera 1998).

Lignin er et komplisert og strukturløs polymer bestående av fenypropen-enheter. Ligninet dannes mellom de individuelle cellene og innad i cellene i veden. Mellom cellene er ligninet et bindemiddel som holder cellene sammen. Innad i cellene er ligninet sterkt forbundet med cellulose og hemicellulose og bidrar til økt stivhet i cellene. Det bidrar også til økt dimensjonsfasthet ved at den motvirker dimensjonsbevegelser ved tørking og oppfukning. Cellulose kan ses på som treets sement og ligninet som armeringen. Lignin motvirker råte og angrep fra insekter (Shmulsky og Jones 2011).

Ekstraktivstoffer påvirker treets holdbarhet ved at stoffene øker bestandigheten i trevirket i tillegg til farge og duft. Flere av stoffene er giftige og virker beskyttende mot sopp og insekter (Bodig og Jayne 1992).

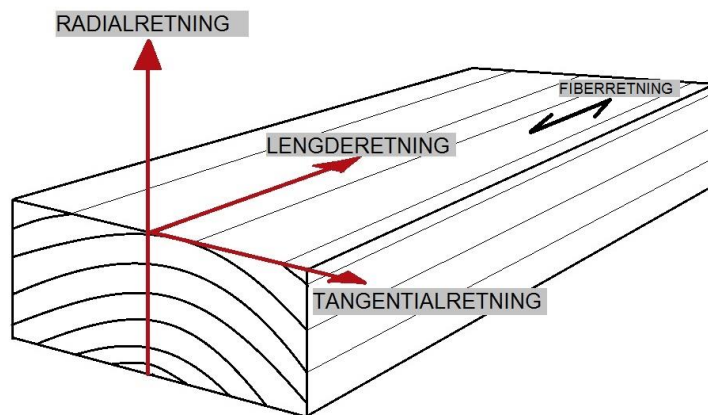


Figur 2.1: Snitt av en trestamme og dens bestanddeler. Kilde: presentasjon, Nils Ivar Bovim

2.2 Materialsymmetri

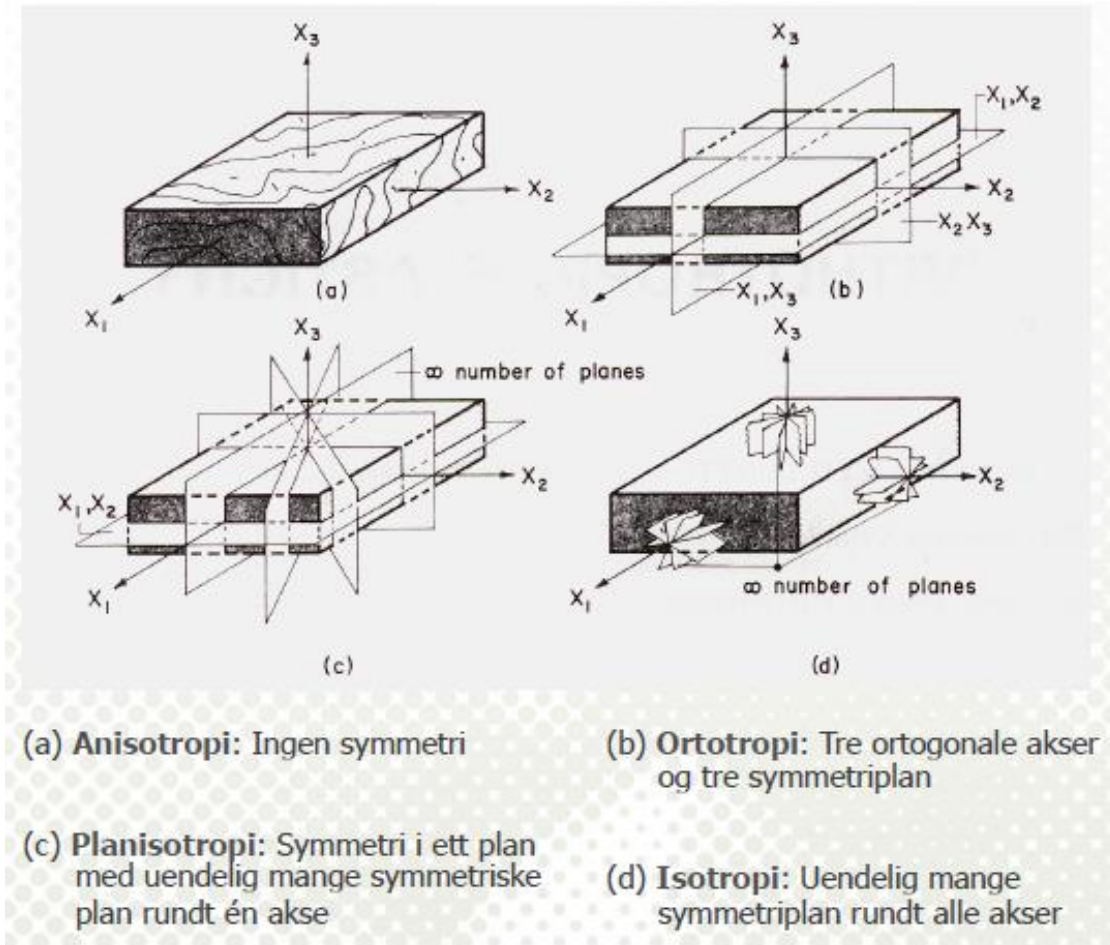
Tre har ikke materialsymmetri slik som stål og betong. Dette betyr at trevirke har ulike materialegenskaper i de ulike hovedretningene. Dersom et materiale har retningsavhengige egenskaper, men mangler symmetri, klassifiseres det som et anisotrop materiale. Det er tre hovedretninger i trevirke; radialretning, tangentialretning og lengderetning. På grunn av treets usymmetriske materialegenskaper blir trevirke klassifisert som et anisotrop materiale. Dette begrunnes med at materialet har tre ortogonale plan med ulike fasthetsegenskaper.

$E\text{-modul}_{\text{LENGDERETNING}} \gg E\text{-modul}_{\text{RADIALRETNING}} > E\text{-modul}_{\text{TANGENTIALRETNING}}$



Figur 2.2: Hovedaksene i trevirke.

$E\text{-modul}_{\text{LENGDERETNING}}$ dividert på $E\text{-modul}_{\text{RADIALRETNING}}$ er høyere for bartrær enn for løvtrær på grunn av flere margstråler å løvtrær. I grantrær er dette forholdstallet mellom 25-30. Det betyr at $E\text{-modul}$ -verdien i lengderetningen er 25 til 30 ganger høyere enn $E\text{-modul}$ -verdien i radialretningen (Kollman og Côté 1968). Dette forholdstallet er med på å gi de ulike tverrkontraksjonstallene (Poissons tall) som er viktig å ta hensyn til når man arbeider med tre. Tverrkontraksjonstallet er nærmere forklart under delkapittelet Poissons tall.



Figur 2.3: Illustrasjon på materialsymmetri. Kilde: (Bodig og Jayne 1992)

Treets anisotropi illustreres med figur (a) og treets ortogonale materialegenskaper illustreres med figur (b).

2.3 Fuktbevegelser

Tre avgir fukt i tørre omgivelser og opptar fukt i fuktige omgivelser. Krympingen i de ulike hovedretningene er:

- Lengderetning: ca. 0,3 %
- Tangentialretning: ca. 8 %
- Radialretning: ca. 4 %

Krympingen i tangentialretningen er dobbel så stor sammenliknet med radialretningen. Dette skyldes margstrålene i radialretningen som gir høyere dimensjonsstabilitet mot fuktbevegelser.

2.4 Poissons tall

Ved å utsette tre for strekkpåkjenning langs fibrene, vil det oppstå en forlengelse i samme retning som kraften virker. Samtidig vil det virke en kontraksjon på tvers av fibrene. Denne kontraksjonen er en passiv deformasjon som et resultat av aktiv deformasjon. Passiv deformasjon opptrer vinkelrett på den aktive deformasjonen og beskrives med Poissons tall. Poissons tall er definert som forholdet mellom passiv og aktiv deformasjon og betegnes med den greske bokstaven, ν (nu).

$$\nu_{ij} = -\gamma_{jj} / \gamma_{ii} \quad (2.1)$$

ν_{ij} = Poissons tall

γ_{ii} = Aktiv deformasjon

$-\gamma_{jj}$ = Passiv deformasjon

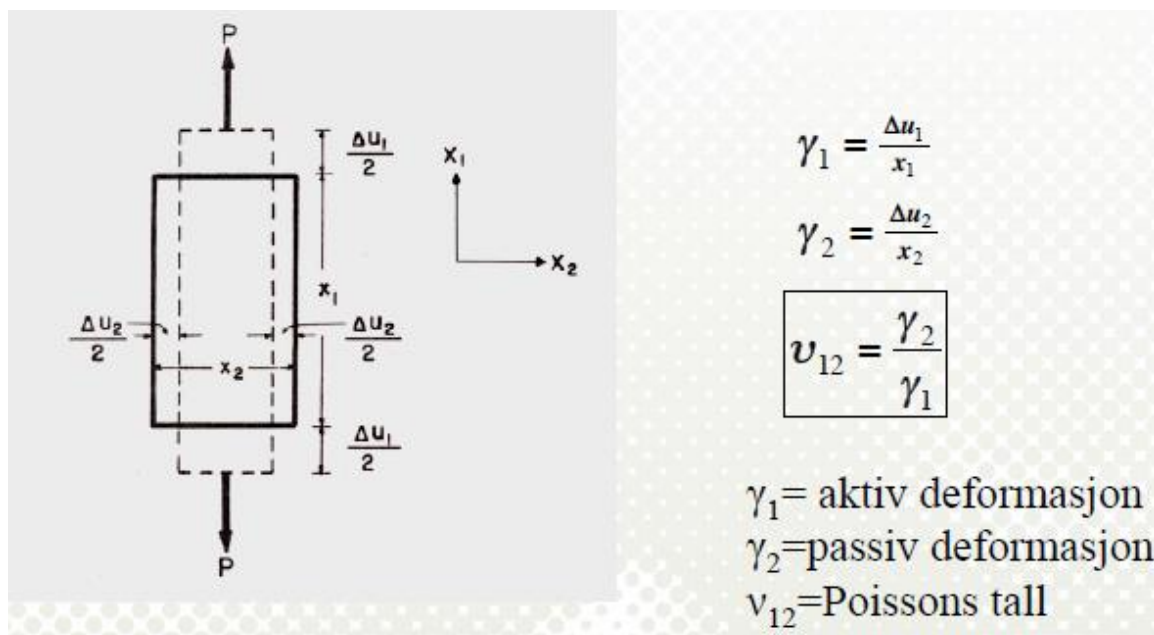
Ved å kombinere Poissons tall og Hookes lov om lineærelastisitet kan størrelsen på passive deformasjoner beregnes. Se likning (2.2)

$$\gamma_{jj} = (-\nu_{ij}) \cdot (\gamma_{ii}) = \frac{-\nu_{ij}}{E_i} \cdot \sigma_{ii} = S_{ji} \cdot \sigma_{ii} \quad (2.2)$$

E_i = E-modul i aktiv retning.

S_{ji} = Kompliansetall for passiv deformasjon.

De passive deformasjonene vil være motsatt av den aktive deformasjonen. Når den aktive deformasjonen som følge av strekkspenning er en utvidelse, vil de passive deformasjonene være kontraksjoner med negativt fortegn. (Bodig og Jayne 1992)



Figur 2.4: Illustrasjon på tverrkontraksjon. Kilde: (Bodig og Jayne 1992)

2.5 Ortotrop elastisitet

Teorigrunnlaget for dette delkapittelet er hovedsakelig hentet fra (Bodig og Jayne 1992), samt forelesningsnotater fra Geir Vestøl (NMBU).

De tre ortogonale retningene er langs treets lengderetning, radialretning og tangentialretning. (Se figur 2.2).

Når trevirke blir utsatt for belastning opptrer både normalspenninger og skjærspenninger. Dersom spenningene følger de tre ortogonale aksene, kan spenningstilstanden for et lite stykke tre-element beskrives med 9 spenninger og 9 deformasjoner. Hookes lov om lineærelastisitet er gjeldende med følgende betingelser:

1. Kun små deformasjoner.
2. Materialet holder jevn temperatur.
3. Materialet er homogent og med lik densitet.
4. Det er ingen kopling mellom komponentene som utgjør belastningen.

Følgende er de 9 spenningene:

$$[\sigma_{11} \sigma_{12} \sigma_{13} \sigma_{22} \sigma_{21} \sigma_{23} \sigma_{33} \sigma_{31} \sigma_{32}] \quad (2.3)$$

Følgende er de 9 deformasjonene:

$$[\gamma_{11} \gamma_{12} \gamma_{13} \gamma_{22} \gamma_{21} \gamma_{23} \gamma_{33} \gamma_{31} \gamma_{32}] \quad (2.4)$$

Første indeks angir retningen på normalvektoren til planet, andre indeks angir retningen på kraften. De to indeksene er like for normalspenninger og forskjellige for skjærspenninger.

Sammenhengen mellom deformasjon og spenning beskrives følgende:

$$\epsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (2.5)$$

- ϵ_{ij} = deformasjon, bestående av normalkomponent og skjærkomponent
 S_{ijkl} = Kompliansetall, en proporsjonalitets-parameter.
 σ_{kl} = Spenning, bestående av normalkomponent og skjærkomponent
 i, j, k, l = Koordinat-indeks. Bestående av tall 1 eller 2 eller 3

Med 9 x 9 matrise bestående av 81 kompliansetall beskriver sammenhengen mellom deformasjon og spenning som nevnt. Denne matrisen kan reduseres til en 6 x 6 matrise ettersom skjærspenningene alltid opptrer parvis.

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji} \tag{2.6}$$

Denne forutsetningen følger av Newtons lov om momentlikevekt der parvise krefter skaper likevekt og forhindrer rotasjon.

Likning (2.5) kan uttrykkes med følgende matriselikning:

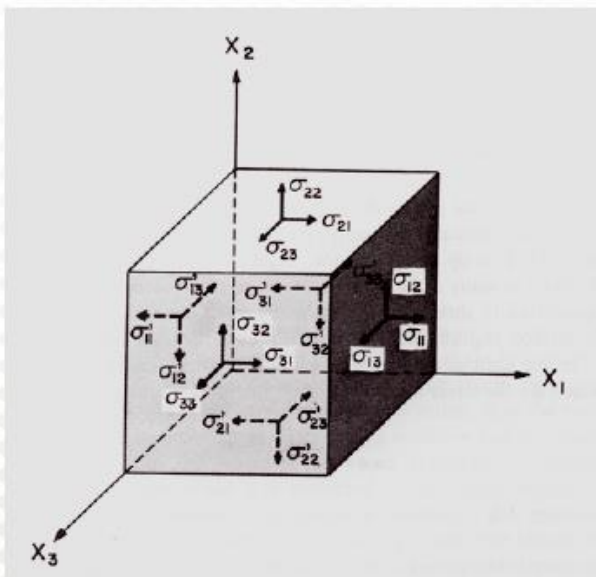
$$\begin{pmatrix} \gamma_{11} \\ \gamma_{22} \\ \gamma_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} \tag{2.7}$$

Sammenhengen mellom deformasjon og spenning kan også beskrives følgende, men her benyttes stivhetstall, C_{ijkl} , og ikke kompliansetall:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\epsilon_{kl} \tag{2.8}$$

Likning (2.8) kan uttrykkes med følgende matriselikning:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma_{11} \\ \gamma_{22} \\ \gamma_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} \quad (2.9)$$



- Tre normalspenninger
 - $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$
 - $(\sigma'_{ii} = \sigma_{ii})$
- Seks skjærspenninger
 - $\sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{21}, \sigma_{23}, \sigma_{31}, \sigma_{32}$
 - $(\sigma'_{ij} = \sigma_{ij})$

Tilsvarende

- tre normaldeformasjoner
 - $\gamma_{11}, \gamma_{22}, \gamma_{33}$
- og seks skjærdeformasjoner
 - $\gamma_{12}, \gamma_{13}, \gamma_{21}, \gamma_{23}, \gamma_{31}, \gamma_{32}$

Figur 2.5: Spenningskomponenter i et lite element i et rektangulært koordinatsystem. Kilde: (Bodig og Jayne 1992)

Likning (2.7) og (2.9) kan skrives enklere:

$$\boldsymbol{\gamma} = \boldsymbol{S}\boldsymbol{\sigma} \quad (2.10)$$

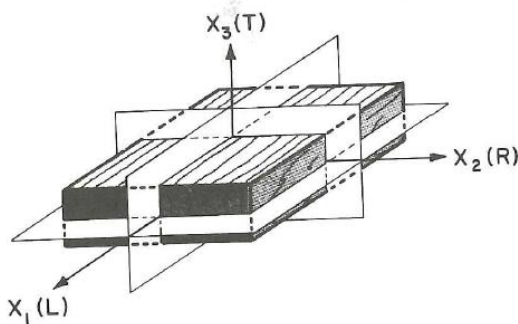
$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{C}\boldsymbol{\gamma} \quad (2.11)$$

Stivhetsmatrisen, \boldsymbol{C} , er den inverse av kompliansematisen, \boldsymbol{S} .

$$\boldsymbol{C} = \boldsymbol{S}^{-1} \quad (2.12)$$

Følgelig er kompliansematisen den inverse av stivhetsmatrisen.

$$\boldsymbol{S} = \boldsymbol{C}^{-1} \quad (2.13)$$



Figur 2.6: Ortotrop modell av et trestykke. L, lengderetning. R, radialretning. T, tangentialretning.

Kilde: (Bodig og Jayne 1992)

Ved å ta utgangspunkt i figur 2.6 og likning (2.7) vil spenningen, σ_1 , alene bidra til normaldeformasjonene γ_1 , γ_2 og γ_3 . Deformasjonene γ_2 og γ_3 er et resultat av Poissons effekt. Helningen på de ulike spenning-deformasjon-kurvene er med på å gi grunnlaget for kompliansetallene S_{11} , S_{21} og S_{31} . Videre følger:

$$\gamma_1 = S_{11}\sigma_1, \quad \gamma_2 = S_{21}\sigma_1, \quad \gamma_3 = S_{31}\sigma_1 \quad (2.14)$$

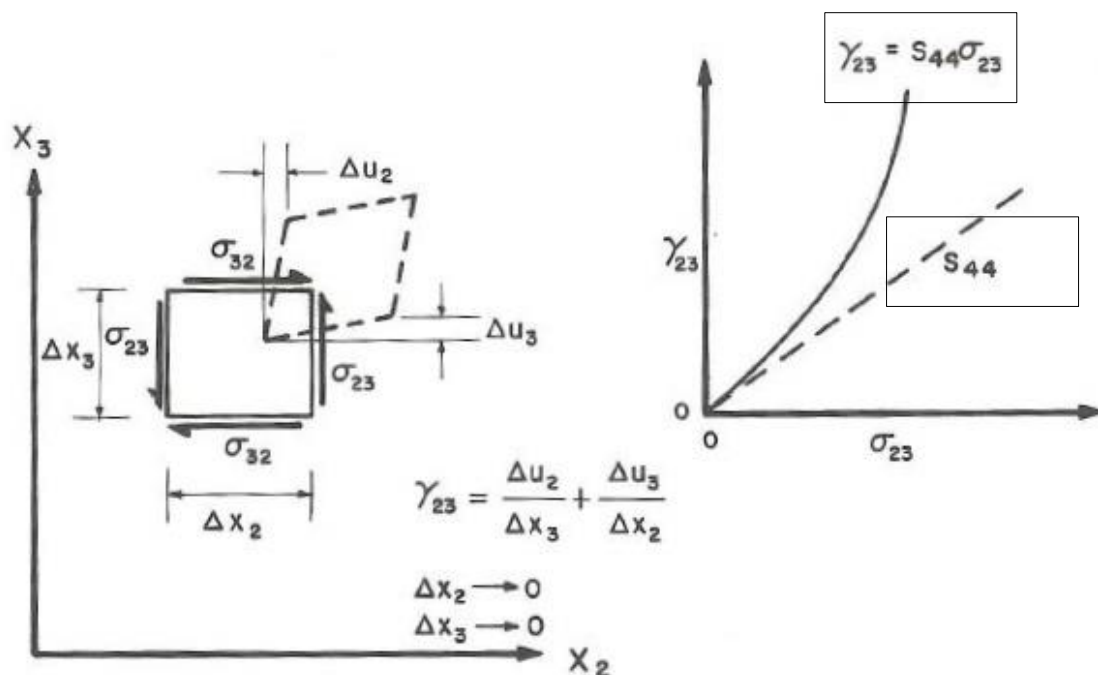
$$\gamma_1 = S_{12}\sigma_2, \quad \gamma_2 = S_{22}\sigma_2, \quad \gamma_3 = S_{32}\sigma_2 \quad (2.15)$$

$$\gamma_1 = S_{13}\sigma_3, \quad \gamma_2 = S_{23}\sigma_3, \quad \gamma_3 = S_{33}\sigma_3 \quad (2.16)$$

Følgelig blir den totale deformasjonen et resultat av alle normalspenningskomponentene:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_1 &= S_{11}\sigma_1 + S_{12}\sigma_2 + S_{13}\sigma_3 \\ \gamma_2 &= S_{21}\sigma_1 + S_{22}\sigma_2 + S_{23}\sigma_3 \\ \gamma_3 &= S_{31}\sigma_1 + S_{32}\sigma_2 + S_{33}\sigma_3 \end{aligned} \right\} \quad (2.17)$$

I likning (2.17) gjelder superposisjonsprinsippet.



Figur 2.7: Skjærkomplianse i 2,3-planet (radiell-tangentiell-planet). Kilde: (Bodig og Jayne 1992)

Med figur 2.7 som utgangspunkt får vi følgende skjærdeformasjoner:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{23} &= S_{44}\sigma_{23} \\ \gamma_{13} &= S_{55}\sigma_{13} \\ \gamma_{12} &= S_{66}\sigma_{12} \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

For materialer som er ortotrope vil tre forutsetninger bidra til en forenkling av deformasjonsberegningene.

1. Normalspenninger parallelt med de ortogonale aksene gir bare normale deformasjoner langs de ortogonale aksene.
2. Skjærspenninger parallelt med de ortogonale aksene gir ingen normaldeformasjoner langs de ortogonale aksene.
3. Skjærspenninger langs de ortogonale aksene gir ingen passive skjærdeformasjoner langs de ortogonale aksene.

Med å kombinere likning (2.17) og (2.18) med de overnevnte forutsetningene vil kompliansematriksen beskrives med 12 kompliansetall. Likning (2.7) blir følgelig forenklet:

$$\begin{pmatrix} \gamma_{11} \\ \gamma_{22} \\ \gamma_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{S}_{11} & \mathbf{S}_{12} & \mathbf{S}_{13} & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{S}_{21} & \mathbf{S}_{22} & \mathbf{S}_{23} & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{S}_{31} & \mathbf{S}_{32} & \mathbf{S}_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{S}_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{S}_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{S}_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

Hookes lov om tredimensjonal spenning for ortotrope materialer er gjeldende så lenge de tre ulike geometriske aksene er sammenfallende og at det er symmetri.

Ved hjelp av en energibetraktning kan man vise at

$$S_{ij} = S_{ji} . \quad (2.20)$$

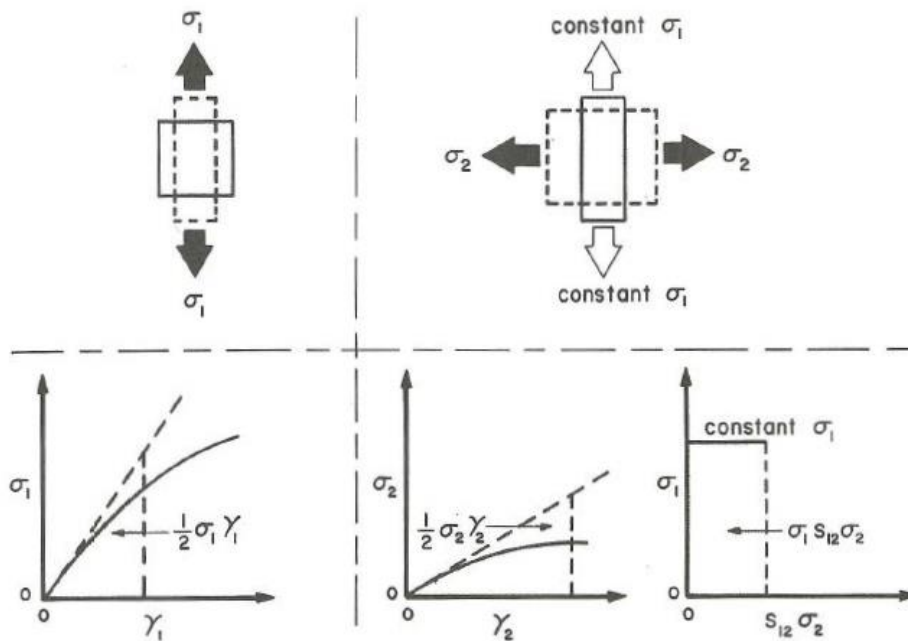
For lineær spenning-deformasjon kurve har vi at:

$$W = \frac{P}{2} \Delta u_1 , \text{ der } \Delta u_1 = \text{deformasjon} \quad (2.21)$$

$$W = \frac{\sigma \gamma (A l)}{2} = \frac{\sigma \gamma V}{2} \quad (2.22)$$

$$A l = \text{Areal} \times \text{lengde} = V = \text{Volum} \quad (2.23)$$

$$w = \frac{W}{V} = \frac{\sigma \gamma}{2} , \left[\frac{\text{Joule}}{\text{m}^3} \right] \quad (2.24)$$



Figur 2.8: Illustrasjon av deformasjonsenergien som blir lagret i et ortotropt materiale som følge av spenningene σ_1 og σ_2 . Kilde: (Bodig og Jayne 1992)

Fra figur 2.8 kan følgende skrives med spenningen, σ_1 :

$$w_1 = \frac{1}{2} \sigma_1 \gamma_1 \quad (2.25)$$

Ved å erstatte deformasjonen, γ_1 , fra likning (2.14) får vi at:

$$w_1 = \frac{1}{2} S_{11} \sigma_1^2 \quad (2.26)$$

Fra figur 2.8 kan følgende skrives med spenningen, σ_2 :

$$w_2 = \frac{1}{2} \sigma_2 \gamma_2 + \sigma_1 \gamma_1 \quad (2.27)$$

Ved å erstatte deformasjonen, γ_2 , fra likning (2.15) får vi at:

$$w_2 = \frac{1}{2} S_{22} \sigma_2^2 + S_{12} \sigma_1 \sigma_2. \quad (2.28)$$

Summen av $w_1 + w_2$ gir en total energi i et stykke element lik:

$$w_{12} = \frac{1}{2} S_{11} \sigma_1^2 + \frac{1}{2} S_{22} \sigma_2^2 + S_{12} \sigma_1 \sigma_2. \quad (2.29)$$

Ved å bytte på spenningsrekkefølgen slik at σ_2 blir belastet med en spenning før σ_1 vil vi ut i fra figur 2.8 får vi følgende deformasjoner med samme energibetrakning:

$$w_3 = \frac{1}{2} S_{22} \sigma_2^2 \quad (2.30)$$

$$w_4 = \frac{1}{2} S_{11} \sigma_1^2 + S_{21} \sigma_1 \sigma_2 \quad (2.31)$$

Summen av $w_3 + w_4$ gir en total energi i et stykke element lik:

$$w_{34} = \frac{1}{2} S_{22} \sigma_2^2 + \frac{1}{2} S_{11} \sigma_1^2 + S_{21} \sigma_1 \sigma_2. \quad (2.32)$$

$$w_{12} = w_{34} \quad (2.33)$$

Ved å sette inn likning (2.29) og likning (2.32) i likning (2.33) får vi at:

$$\frac{1}{2}S_{11}\sigma_1^2 + \frac{1}{2}S_{22}\sigma_2^2 + S_{12}\sigma_1\sigma_2 = \frac{1}{2}S_{22}\sigma_2^2 + \frac{1}{2}S_{11}\sigma_1^2 + S_{21}\sigma_1\sigma_2 \quad (2.34)$$

Etter å ha flyttet over og redusert likning (2.34) får vi at:

$$S_{12} = S_{21} \quad (2.35)$$

og dermed ser vi at $S_{ij} = S_{ji}$.

Kompliansematriksen kan beskrives med 9 forskjellige kompliansetall.

$$\begin{pmatrix} \gamma_{11} \\ \gamma_{22} \\ \gamma_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} \quad (2.36)$$

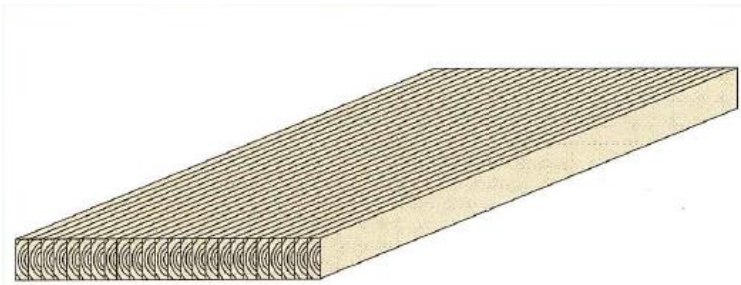
■

3 MASSIVTRE

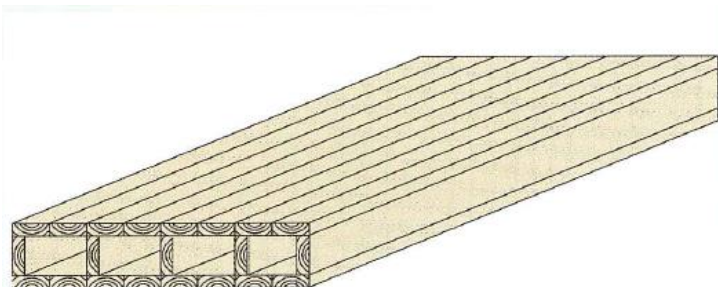
3.1 Introduksjon

Litteraturgrunnlaget for dette kapittelet er hentet fra hefte 1, 2 og 3 utgitt av Norsk Treteknisk Institutt om å bygge med massivtre-elementer. (Norsk Treteknisk Institutt 2006)

Massivtre-elementer er planker som er satt sammen til elementer ved bruk av spiker, skruer, tredybler, lim eller stålstag. Det finnes kantstilte elementer, krysslagte elementer og hulromselementer. Disse tre hovedtypene av elementer har hvert sitt bruksområde i tillegg til å kunne benyttes i fornuftig samspill med hverandre.



Figur 3.1: Kantstilt element. Kilde: (Norsk Treteknisk Institutt 2006)



Figur 3.2: Hulromselement. Kilde: (Norsk Treteknisk Institutt 2006)

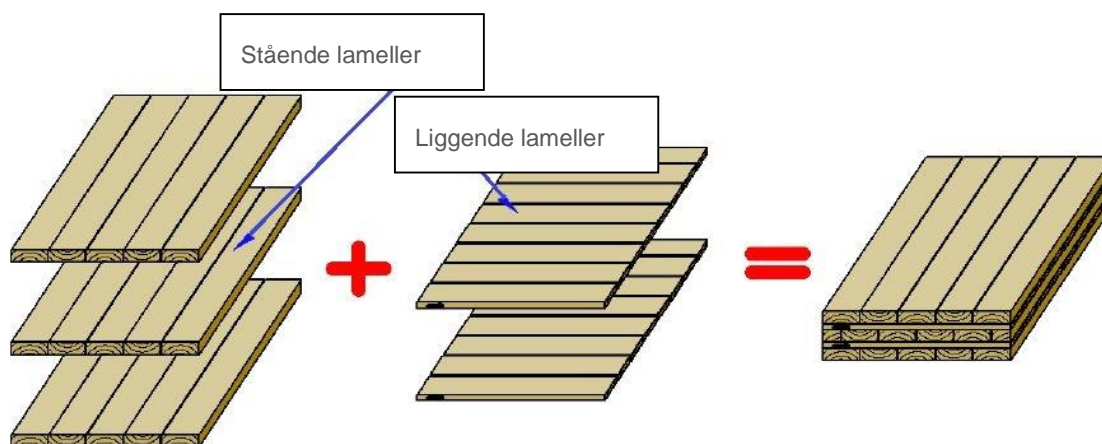
3.2 Krysslagte elementer, CLT

Denne oppgaven tar for seg krysslagte elementer som består av flere bordsjikt som ligger over hverandre, enten med 45 grader eller 90 grader vinkel mellom sjiktene. Et slikt element består av to eller flere bordsjikt som ligger i hovedretningen til elementet, i tillegg til det også være ett eller flere sjikt som ligger på tvers av hovedretningen. Krysslagte elementer kan bygges opp med så mange sjikt som nødvendig. Tykkelse og fasthet på sjiktene kan variere ut i fra elementets brukskrav, funksjon, stivhet, brannmotstand, vibrasjon eller varmegjennomgangsmotstand. Vanlig byggeskikk i dag er med 3, 5, 7 eller 9 sjikt. Forbindelsesmidler for krysslagte elementer er lim eller trediabler. Denne oppgaven tar for seg sammenføring av bordsjiktene med lim. Krysslagte elementer med lim, også kalt krysslimte elementer, produseres ved å krysslegge sjiktene 90 grader i forhold til hverandre og påføre lim mellom hvert sjikt. Krysslimte elementer vil videre bli betegnet, CLT (Cross Laminated Timber). I tillegg til å lime mellom sjiktene, er det noen produsenter som limer lamellene i de ytterste sjiktene kant i kant. I mange tilfeller kan dette gi et tettere element, men her er det viktig å ta i betraktning mulige tørkesprekker på grunn av avfuktning av trevirket.

Limet som brukes i elementene er i mange tilfeller MUF-lim. MUF er forkortelse for Melamin-Urea-Formaldehyd lim. Melamin og urea er selve limet og formaldehyd virker herdende. Emisjonsmessig tilfredsstillende MUF-lim kravene til emisjonsklasse E1 med god margin.

Tykkelsen til CLT-elementer varierer mellom 60 – 240 mm. Antall sjikt, kan som tidligere nevnt, variere mellom tre, fem, syv eller ni sjikt. Trelastkvaliteten kan variere mellom C14 – C30. Ved å sette sammen de innerste sjiktene med fasthetsklasse C14 - C18 og de ytterste sjiktene med fasthetsklasse C24 – C30, vil en slik sammenføring virke gunstigere på bøyestivheten sammenliknet med et element med samme fasthetsklasse i alle sjiktene. Dette grunnet med at yttersjiktene gir det største bidraget til bøyestivheten.

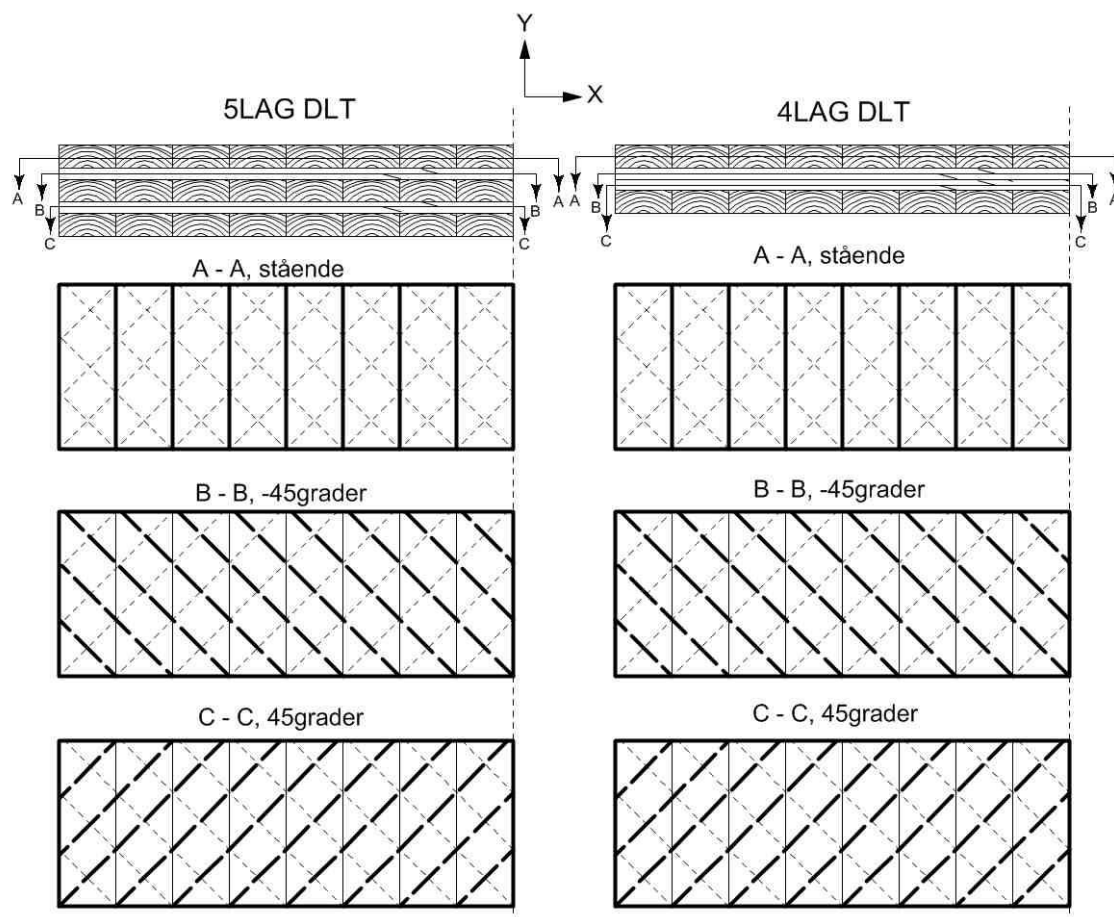
2014



Figur 3.3: Krysslimt element av massivtre, CLT (Cross Laminated Timber). Kilde: (Bejtka 2011)

3.3 Diagonallagte elementer, DLT

Et alternativ til CLT er å sammenføre sjiktene med 45 grader vinkel i forhold til hverandre. En slik sammensetning er et diagonallagt element med lim som forbindelsesmiddel mellom sjiktene. Et slikt element med for eksempel 5 sjikt kan bestå av 0 grader stående bord, (+)45 grader diagonale bord, 0 grader stående bord, (-)45 grader diagonale bord og 0 grader stående bord. Diagonallimte elementer vil videre bli betegnet, DLT (Diagonal Laminated Timber).



Figur 3.4: Sammenføyning av DLT 5 sjikt og alternativt DLT 4 sjikt (Vectorworks).

3.4 Dimensjonsstabilitet

På grunn av trevirkets ortotrope materialeegenskaper, vil det ha ulik dimensjonsendring som et resultat av fuktbevegelser i de ulike retninger. (Se 2.3, fuktbevegelser). Dimensjonsendringen er mye større vinkelrett på fiberretningen enn langs med fibre. Massivtre-elementer med krysslagte sjikt vil fungere som en låsende effekt på dimensjonsendringer i relasjon til fuktbevegelser, siden det vil være et kryssende sjikt med kryssende fiberretning som bidrar til større styrke og stivhet. Dette begrenser dimensjonsendringen vinkelrett på fiberretningen. Dette gir totalt sett en meget dimensjonsstabil plate eller skive. Dimensjonsendringen vil være minst i lengderetningen enn tverretningen grunnet større stivhet og styrke i elementets lengderetning enn tverretning.

Ut i fra beregninger vil dimensjonsendringene til CLT i de ulike retningene være:

- i. Elementets lengderetning:
0,010 % per % fuktighetsendring
- ii. Elementets tverretning:
0,025 % per % fuktighetsendring

I tillegg til deformasjoner på grunn av fuktighetsendringer, vil et CLT element få deformasjoner grunnet lastpåkjenning. Massivtre-elementer vil ha små deformasjoner på grunn av trykk, siden det alltid er et eller flere sjikt der fiberretningen er parallell med kraftretningen. Der massivtre-elementer brukes som dekker som er fritt opplagt på vegger, vil lastvirkningen være vinkelrett på fiberretningen. Ved bruk av massivtre-elementer i dekker og vegger, vil trykkraftene på dekkene fordeles som en kontinuerlig flatelast og dermed unngå store konsentrerte punktlaster på dekkene. Dette bidrar til mindre lokale lastpåkjenninger og de opptredende trykkspenningene blir mindre sammenliknet med konvensjonell trehusbygging.

3.5 Styrke og stivhet

I beregningen av styrke og stivhet for et CLT-element, tas det hensyn til sjiktene ulike elastisitetsmoduler (E-moduler). Ved beregning av styrke og stivhet, vil sjiktene som ligger 90 grader i forhold til retninger vi beregner, gi et svært lite bidrag. Dette grunnet den store forskjellen i E_0 -modul (langs fibre) og E_{90} -modul (vinkelrett på fibre). Hvis alle sjiktene er bygget opp av samme fasthetsklasse er forholdet E_0 -modul/ E_{90} -modul omtrent 1/30. Dersom de midtre sjiktene har lavere fasthetsklasse enn de ytterste sjiktene vil vi få et større forholdstall. Ut i fra dette vil belastningen vinkelrett på fiberretningen gi tilnærmet lik null bidrag, og følgelig gi et konservativt anslagsverdi ved beregning av styrke og stivhet.

Avhengig av antall sjikt, tykkelse på de ulike sjiktene og fasthetsklasse til sjiktene, vil bøyestivheten i tverretningen utgjøre mellom ca. 3 % og 40 % av bøyestivheten i lengderetningen. $((E \times I_T) = \text{ca. } 0.03 - 0.4 \times (E \times I_L))$, E = E-modul, I = arealtreghetsmoment, T =tangentialretning, L =Lengderetningen). Den effektive bøyestivheten i lengderetningen hos et limt CLT-element vil, avhengig av oppbygging, ha en bøyestivhet som utgjør omtrentlig 60 % og 96 % av bøyestivheten til et tverrsnitt av heltre (bjelkeelement). I beregningene forutsettes det et 100 % statisk samvirke mellom sjiktene som er limt sammen. CLT-elementer kan betraktes som en bred bjelke med enveis bæring, eller den kan betraktes som en toveis plate med ulik styrke og stivhet i to hovedretninger. Det er vanlig at flere elementer blir koblet sammen ved hjelp av not- og fjærløsning til en større skive eller plate. Koblingen mellom elementene vil være myke koblinger, som normalt kun tar opp skjærkrefter. Studiet utført av I.Bejtka viser spennende resultater på bøyedeformasjoner til bjelkeelementer av CLT sammenliknet med bjelkeelementer av DLT.

3.6 Beregningsmetode av CLT

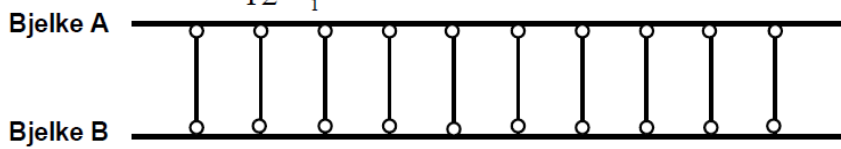
Det er to typer belastning massivtre-elementer utsettes for. Belastning vinkelrett på elementplanet og belastning på elementretningen. Ved beregning av styrke og stivhet hos krysslagte massivtre-elementer, kan det benyttes flere metoder. De mest brukte er kompositteori og Schubanalogieverfahren («Skjæranalogi»-metoden). Kompositteori er blant annet også kjent fra beregning av kryssfinér. Denne teorien tar hensyn til styrke og stivhetsegenskaper når forholdet mellom spennvidde og elementtykkelse ($L \gg t$) er stort. Kompositteori tar ikke hensyn til skjærdeformasjon ved bøyepåkjenning og er derfor best egnet der $L \gg t$. Forsøk viser at der $L / t \geq 25$ gir denne metoden bra samsvar.

Schubanalogieverfahren er en godt egnet beregningsmetode av tverrsnittsdata for et CLT element. Denne beregningsmetoden tar hensyn til alle sjiktene uavhengig av antall, retning, tykkelse, stivhet og styrkeklasse (E-modul og G-modul). Den tar også hensyn til forholdet mellom Lengde (L) og tykkelse (t) (Glasø 2014).

Schubanalogieverfahren-metoden går ut på at vi betrakter et massivtre-element som to bjelker, bjelke A og bjelke B, som er bundet sammen med «uendelige», stive staver. Se figur 3.5. Deformasjon og nedbøyning på grunn av ytre laster er lik for begge bjelkene.

$$u_A = u_B \quad (3.1)$$

Relevante stivhetsverdier tildeles de to bjelkene. Bjelke A tildeles summen av bøyestivheten for hvert enkelt sjikt som elementet er bygget opp av. For bjelke A er det ikke statisk samvirke mellom de ulike sjiktene og den har uendelig stor skjærstivhet. Bjelke B tildeles summen av Steiners formel til sjiktene. Dette medfører til samvirke mellom de ulike sjiktene og gir bidrag til skjærstivheten.

$$(EI)_A = \frac{b}{12} \cdot \sum_1^n E_i \cdot d_i^3 \quad (GA)_A = \infty$$


Bjelke A

Bjelke B

$$(EI)_B = b \cdot \sum_1^n E_i \cdot d_i \cdot z_i^2 \quad (GA)_B = a^2 \cdot \frac{1}{\left[\sum_1^{n-1} \frac{1}{c_i} + \frac{d_1}{2 \cdot G_1 \cdot b} + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{d_i}{G_i \cdot b} + \frac{d_n}{2 \cdot G_n \cdot b} \right]}$$

Figur 3.5: Forklaringsskisse av Schubanalogieverfahren-metoden med stiv forbindelse mellom Bjelke A og Bjelke B med tilhørende stivhetsverdier. Kilde: (Glasø 2014)

Bjelke A har en uendelig stor skjærstivhet. Fordeling av bøyestivhet til Bjelke A gir følgende:

$$(EI)_A = \sum_1^n E_i \cdot I_i = \frac{b}{12} \cdot \sum_1^n E_i \cdot d_i^3 \quad (3.2)$$

- E_i = E-modul til sjikt i.
- I_i = arealtryghetsmomentet til sjikt i.
- d_i = tykkelse til sjikt i.
- b = 1000 mm.

Fordeling av bøyestivhet og skjærstivhet til Bjelke B gir følgende:

$$(EI)_B = \sum_1^n E_i \cdot A_i \cdot z_i^2 = b \cdot \sum_1^n E_i \cdot d_i \cdot z_i^2 \quad (3.3)$$

- z_i = avstanden fra tyngdepunkt i sjikt i og nøytralaksen til elementvernsnittet.

$$(GA)_B = a^2 \cdot \left[\frac{1}{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{c_i} + \frac{d_1}{2 \cdot G_1} \cdot b + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{d_i}{G_i \cdot b} + \frac{d_n}{2 \cdot G_n \cdot b}} \right] \quad (3.4)$$

G_i = G-modul til sjikt i.

a = total tykkelse på elementet minus tykkelse på ytterste sjikt.

Total bøyestivhet blir da summen av bøyestivheten fra Bjelke A og Bjelke B som gir følgende:

$$(EI)_{ef} = (EI)_A + (EI)_B = \left(\frac{b}{12} \cdot \sum_1^n \cdot E_i \cdot d_i^3 + b \cdot \sum_1^n \cdot E_i \cdot d_i \cdot z_i^2 \right) \quad (3.5)$$

En ytre momentpåkjønning M vil fordeles til Bjelke A og Bjelke B.

$$M = M_A + M_B \quad (3.6)$$

Momentet fordeles til Bjelke A og Bjelke B avhengig av forholdet mellom den respektive bjelkens bøyestivhet i forhold til den totale effektive bøyestivheten.

$$M_A = \frac{M}{(EI)_{ef}} \cdot (EI)_A \quad (3.7)$$

$$M_B = \frac{M}{(EI)_{ef}} \cdot (EI)_B \quad (3.8)$$

Det fordelte ytre momentet til Bjelke A vil gi et bøyemoment til hvert enkelt sjikt, avhengig av det respektive sjiktets bøyestivhet sett i forhold til momentet i Bjelke A. Momentet i Bjelke B vil gi en normalkraftfordeling til hver enkelt sjikt, avhengig av det respektive sjiktets aksialstivhetsbidrag og avstand fra tverrsnittets nøytralakse. Dette gir følgende likninger:

$$M_i = M_{Ai} = \frac{E_i I_i}{(EI)_A} \cdot M_A \quad (3.9)$$

$$N_i = N_{Bi} = \frac{E_i A_i z_i}{(EI)_B} \cdot M_B \quad (3.10)$$

Vi kan da finne bøyespenningen til hvert sjikt ut i fra momentfordeling fra Bjelke A og normalspenning til hvert enkelt sjikt ut i fra normalkraftfordelingen fra bjelke B. Summen av bøyespenning til hvert sjikt og normalspenning til hvert sjikt vil gi den totale spenningsfordelingen over tverrsnittet som følgende:

$$\sigma_{Mi} = \frac{M_i}{I_i} \cdot \left(\frac{d_i}{2}\right) \quad (3.11)$$

$$\sigma_{Ni} = \frac{N_i}{b \cdot d_i} \quad (3.12)$$

På samme måte som for det ytre momentet vil skjærkraften fordele seg til Bjelke A og Bjelke B, avhengig av den respektive bjelkens bøyestivhet i forhold til total effektiv bøyestivhet. Skjærkraft-fordelingen til bjelke A og Bjelke B blir som følgende:

$$V = V_A + V_B \quad (3.13)$$

$$V_A = \frac{V}{(EI)_{ef}} \cdot (EI)_A \quad (3.14)$$

$$V_B = \frac{V}{(EI)_{ef}} \cdot (EI)_B \quad (3.15)$$

Hvert enkelt sjikt vil få et skjærkraftbidrag fra Bjelke A og Bjelke B lik:

$$V_i = V_{Ai} + V_{Bi} \quad (3.16)$$

$$V_{Ai} = \frac{E_i I_i}{(EI)_A} \cdot V_A \quad (3.17)$$

$$V_{Bi} = \left(\frac{\tau_{i-1} + \tau_{i,i+1}}{2} \right) \cdot b \cdot d_i \quad , \text{ der} \quad (3.18)$$

$$\tau_{i,i+1} = \left(\frac{V_B}{(EI)_B} \right) \cdot \sum_{j=i+1}^n E_j \cdot d_j \cdot z_j \quad (3.19)$$

$\tau_{i,i+1}$ = skjærstrømmen i limfugen mellom sjikt i+1 og i.

Summen av skjærspenningen i hvert enkelt sjikt fra Bjelke A og Bjelke B vil gi den totale spenningsfordelingen over tverrsnittet som følgende:

$$\tau_{Ai} = V_{Ai} \cdot \frac{1,5}{d_i \cdot b} \quad (3.20)$$

$$\tau_{Bi,i+1} = \left(\frac{V_B}{(EI)_B} \right) \cdot \sum_{j=i+1}^n E_j \cdot d_j \cdot z_j \quad (3.21)$$

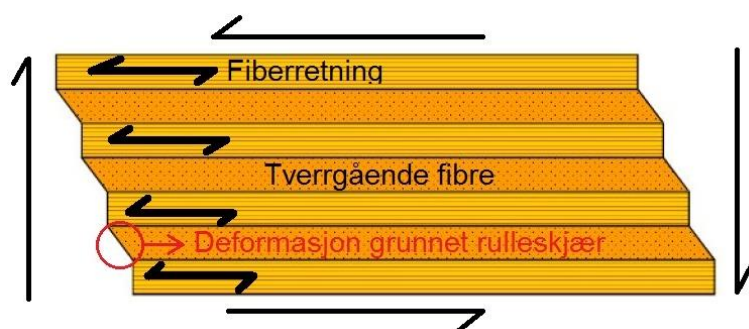
Maksimal skjærspenning blir da:

$$\tau_{max} = \max \left[\tau_{Ai} + \frac{(\tau_{i-1} + \tau_{i,i+1})}{2} \right] \quad (3.22)$$

3.7 Skjærdeformasjon

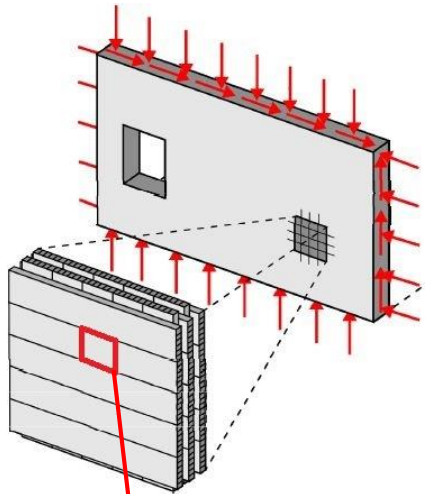
3.7.1 CLT

Spenningsfordeling og deformasjon hos krysslagte massivtre-elementer belastet vinkelrett på elementplanet er avhengig av skjærdeformasjonen. Ettersom trevirke har lav rulleskjærmodul, ca. 10 % av skjærmodulen, vil bordene som utgjør de tverrgående sjiktene være av stor betydning. Skjærdeformasjonen vil øke med økt tykkelse på de tverrgående sjiktene. Bredden på lamellene bør være større eller lik 4 ganger tykkelsen. Ved økende forhold vil skjærdeformasjonene reduseres. Verst forhold mellom bredde og tykkelse på bordene er 1:1. Om bordene i de tverrgående sjiktene er kantlimt eller ikke, vil også ha betydning for skjærdeformasjonen. Når de kantlimes vil den effektive bredden på lamellene øke i forhold til tykkelsen og redusere skjærdeformasjonen. I mange tilfeller kan det være mer gunstig uten kantlimte lameller ettersom dette vil redusere tilleggsspenningene forårsaket av tørkesprekker i trevirket. For et rent bøyepåkjent CLT-element der forholdet mellom spennvidde og tykkelse er lite, vil innvirkningen av skjærdeformasjonen være av stor betydning. Ved et forhold mellom spennvidde dividert på tykkelse på et CLT-element lik 2,5 (lengde/tykkelse = 2,5), vil skjærdeformasjoner utgjøre ca. 90 %, mens bøyedformasjoner kun utgjør ca. 10 %. Ut i fra testresultater i henhold til NS-EN 408, der forholdet mellom spennvidde dividert på tykkelse er lik 18, vil skjærdeformasjoner utgjøre ca. 20-25 %. Der forholdstallet er > 30 , vil skjærdeformasjoner utgjøre mindre enn 10 %.

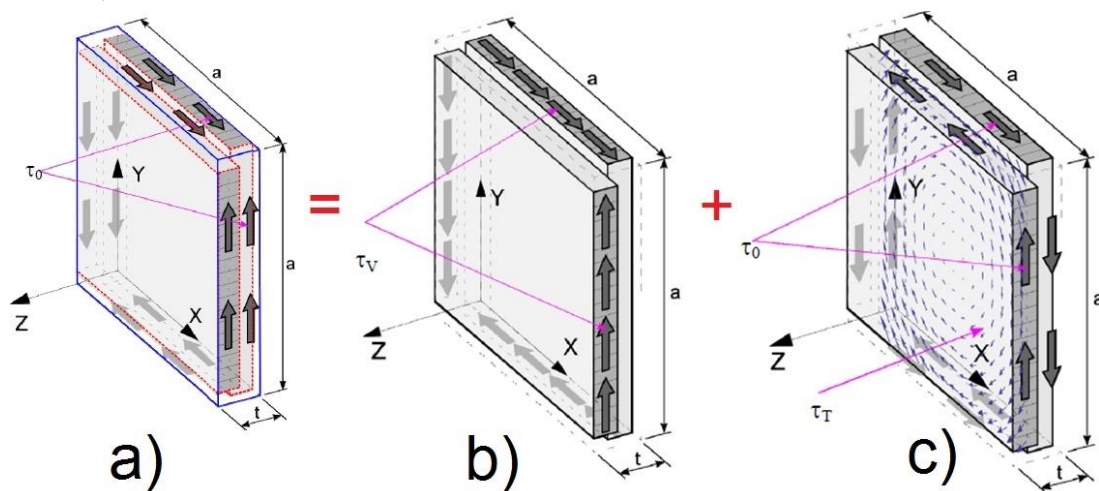


Figur 3.6: Illustrasjon av et 7 lag CLT element utsatt for rulleskjærdeformasjon mellom sjiktene der stående lameller møter tverrgående lameller. Kilde: (Glasø 2014)

For CLT elementer som blir belastet i planet overføres skjærspenninger i limfugen mellom de vertikale og horisontale lamellene som danner sjiktene. Deformasjonen som oppstår er et resultat av glidning mellom de ulike sjiktene på grunn av friksjon i limfugen.

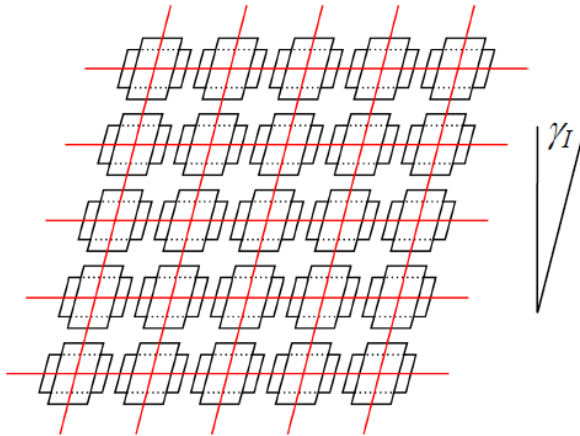


Figur 3.7: 5-lags CLT vegg utsatt for bøy- og skjærpåkjenning belastet i planet. Kilde: (Bogensperger, Moosbrugger og Silly 2010)



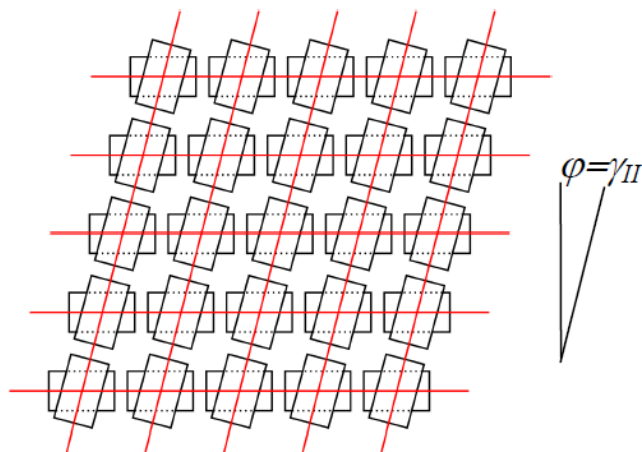
Figur 3.8: Framstilling av skjærspenninger i et massivtre-element. a) den totale skjærvirkningen, ikke kantlimte bord. b) ren skjærpåvirkning, kantlimte bord. c) skjærpåvirkning på grunn av torsjon, ikke kantlimte bord. Kilde: (Bogensperger, Moosbrugger og Silly 2010).

Figur 3.8b) der det kun er ren skjærpåvirkning kan også framstilles på en slik grafisk måte:



Figur 3.9: Ren skjærdeformasjon illustrert med vinkelendring. Kilde: (Bogensperger, Moosbrugger og Silly 2010)

Figur 3.8c) der det kun er ren skjærpåvirkning kan også framstilles på en slik grafisk måte:



Figur 3.10: Skjærdeformasjon grunnet torsjon illustrert med vinkelendring. Kilde: (Bogensperger, Moosbrugger og Silly 2010)

Ut i fra figur 3.9 og figur 3.10 kan vi sette opp denne likningen for total deformasjon som følgende:

$$\gamma = \gamma_I + \gamma_{II} \quad (3.23)$$

$$\gamma_I = \frac{\tau_0}{G_{0,mean}} \quad (3.24)$$

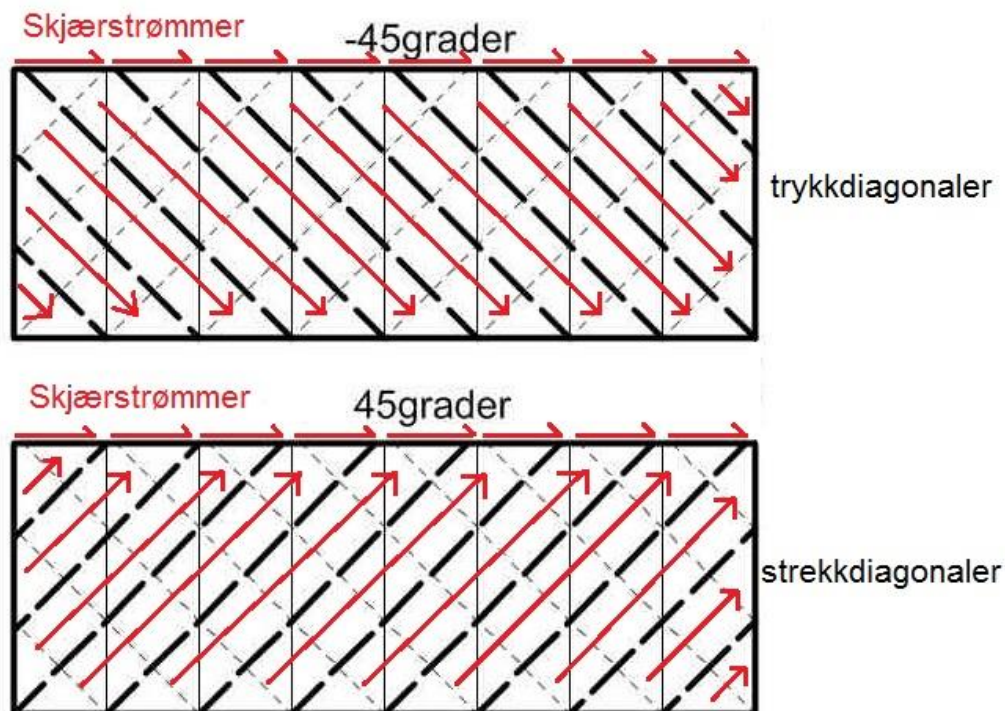
$$\gamma_{II} = \frac{t}{2} \cdot \frac{\tau_0 \cdot t \cdot a^2}{\frac{G_{0,mean}}{2} \cdot \frac{a^4}{6}} = \frac{6 \cdot \tau_0}{G_{0,mean}} \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^2 \quad (3.25)$$

$G_{0,mean}$ mean shear modulus of the boards
 a board width or mean distance of cracks
 t mean thickness of boards

Figur 3.11: Forklaring på ulike betegnelser i formel (3.25). Kilde: (Bogensperger, Moosbrugger og Silly 2010)

3.7.2 DLT

I en DLT-vegg, der to eller flere sjikt ligger som diagonallimte bord, vil kraften fra skjærstrømmer bli tatt opp på en annen måte enn en CLT-vegg. I en DLT-vegg/element vil de diagonale bordene, vinklet 45 grader og -45 grader, fungere som en lang rekke med avstivere. Lamellene som er rotert 45 grader vil fungere som strekkstaver og lamellene som er rotert -45 grader vil fungere som trykkstaver med kraftretningen fra venstre mot høyre. Skjærstrømmene blir derfor tatt opp som aksialkrefter i de diagonallimte bordene. Det er denne effekten som trolig vil gi en mindre skjærdeformasjon i en DLT-vegg sammenliknet med en CLT vegg. Som nevnt tidligere blir skjærstrømmene i en CLT-vegg opptatt som en kombinasjon en ren skjærdeformasjon av bordene, torsjon i limfugen mellom sjiktene og rulleskjær. (Se figur 3.9 og 3.10). Skjærstrømmene vil også gi rulleskjær i både CLT- og DLT-veggene.



Figur 3.12: Diagonale sjikt der lamellene fungerer som trykk- og strekkstaver. Denne effekten antas å gi en mindre skjærdeformasjon sammenliknet med krysslimte sjikt pga. redusert torsjonsvirkning sammenliknet med CLT.

4 FINITE ELEMENT METHOD – ELEMENTMETODEN

4.1 Elementmetoden og dens prinsipper

Finite Element Method (FEM), elementmetoden (også kalt enhetsforskyvningsmetoden), går kortfattet ut på at en gitt konstruksjon deles opp i en rekke mindre elementer. Stivheten til hvert element beregnes. Dette gjøres ved å beregne krefter som må påføres elementene for å skape enhetsdeformasjoner med gitt enhetsforskyvning. Disse oppdelte elementene settes deretter sammen med knutepunkter som tilsammen danner det aktuelle systemet. Disse knutepunktene danner et nett av små elementer som tilsammen utgjør hele konstruksjonen (systemet). Elementenes stivhet adderes sammen for å finne systemets endelige stivhet. Med dette menes hvilke krefter som må påføres i knutepunktene for å oppnå enhetsforskyvninger i hvert enkelt knutepunkt. Likevektslikningene for hvert enkelt knutepunkt gir et likningssystem med knutepunktforskyvninger som det ukjente. Dette likningssystemet løses. Etter å ha løst likningssystemet vil deformasjonen av hvert element være kjent og spenninger i elementet kan beregnes (Waløen 1993).

Her er 5 hovedtrinn som inngår i elementmetoden og dens prinsipper:

1. DISKRETISERING, OPPDELING

▪ **Oppdeling**

Konstruksjonen, systemet, må deles opp i elementer (members). Elementene må identifiseres med ett nummer. Elementene grenser til hverandre i knutepunkter (noder, joints). Knutepunktene må identifiseres med nummer.

▪ **IEG-matrisen**

Beskriver topologien, dvs. angir hvor start- og slutt-node for hvert enkelt element er plassert i konstruksjonen.

2. ELEMENTANALYSEN

Vi finner verdien for \mathbf{k} og \mathbf{S}^0 .

$\mathbf{S} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{v} + \mathbf{S}^0$ for hvert element. Disse gir oss egenskapene til elementene. Dette gir sammenhengen mellom fri variabel \mathbf{v} – deformasjon, og avhengig variabel \mathbf{S} – belastningen. Dette er **indre belastning** som kan være krefter eller momenter. \mathbf{k} kalles elementets stivhetsmatrise. \mathbf{S}^0 er elementbelastning.

3. SYSTEMANALYSEN

Vi finner verdier for \mathbf{K}_m og \mathbf{R}_m^0 .

$\mathbf{R}_m = \mathbf{K}_m \cdot \mathbf{r} + \mathbf{R}_m^0$ gir oss egenskapene til systemet (konstruksjonen). Vektoren \mathbf{r} er den frie variabel, den eneste ukjente. \mathbf{r} er deformasjonsvektoren som kan være forskyvninger eller vinkelendringer. \mathbf{R}_m kalles systemets avhengige variable og er modifisert belastningsvektor. Lastene er **ytre laster** som angriper i knutepunktene, **knutepunktbelastningen**. Dette kan være krefter eller momenter.

Innadding

a) Ved hjelp av innadding skapes stivhetsmatrisen, \mathbf{K} . Systemets stivhet er en sum av elementenes stivhet. \mathbf{R}^0 er konstruksjonens konstantbelastning som skapes ved innadding av elementenes konstantbelastning \mathbf{S}^0 . Det tas ikke hensyn til opplagringene. $\mathbf{R} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{r} + \mathbf{R}^0$.

b) Grensebetingelser

Opplagringsforholdene betraktes og benyttes til å modifisere systemets matriselikning. $\mathbf{R}_m = \mathbf{K}_m \cdot \mathbf{r} + \mathbf{S}_a$, der indeksen m indikerer at grensebetingelsene er satt inn. Dvs. at hensynet til opplagringsforholdene er tatt med i vektoren.

4. LØSNING

Finner frie variable: $\mathbf{r} = \mathbf{K}^{-1}_m \cdot (\mathbf{R}_m - \mathbf{R}_m^0) = \mathbf{K}^{-1}_m \cdot \mathbf{R}_m + -\mathbf{K}^{-1}_m \cdot \mathbf{R}_m^0 = \mathbf{r}_a + \mathbf{r}_b$. Deformasjonsvektoren \mathbf{r} er en sum av \mathbf{r}_a , som er deformasjonen som et resultat av knutepunktbelastningen, og \mathbf{r}_b , som er deformasjonen på grunn av konstantbelastningen, \mathbf{R}_m^0 .

5. RESULTATER

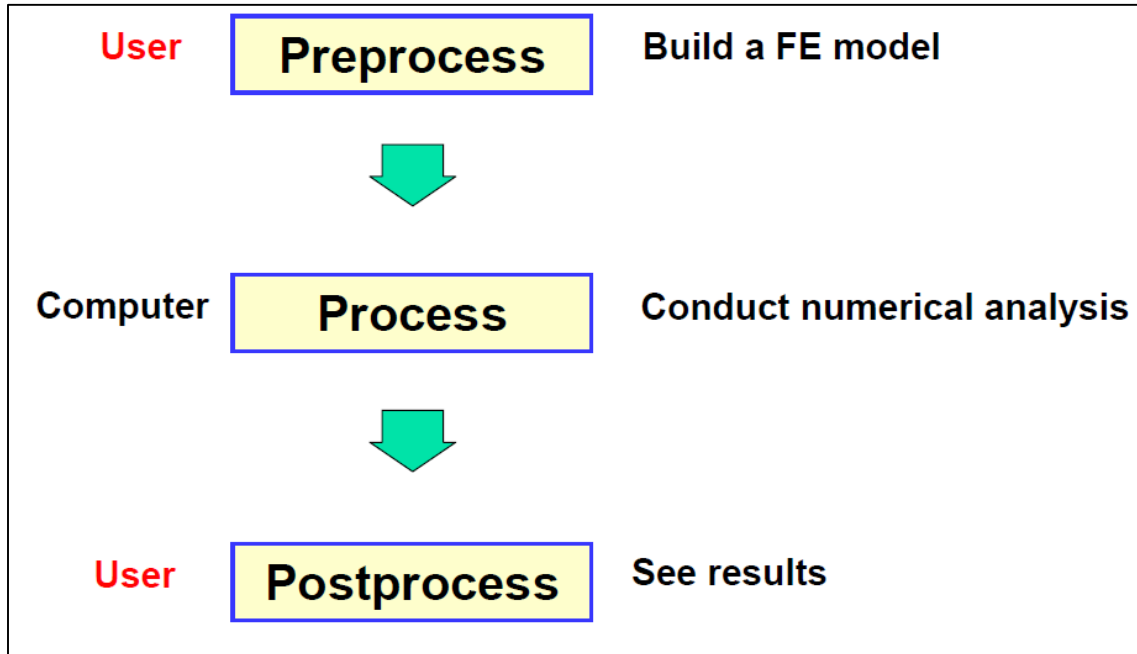
Finner elementbelastningene: $\mathbf{S} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{v} + \mathbf{S}^0$. En matriselikning for hvert element. Dette er indre belastninger som kan være krefter og/eller momenter. Summen av de indre belastningene er lik de ytre belastningene i et knutepunkt. \mathbf{v} vektoren regnes ut av \mathbf{r} vektoren og angir elementets deformasjoner. \mathbf{v}_a regnes ut fra \mathbf{r}_a og \mathbf{v}_b regnes ut fra \mathbf{r}_b . $\mathbf{S} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{v} + \mathbf{S}^0 = \mathbf{k} \cdot (\mathbf{v}_a + \mathbf{v}_b) + \mathbf{S}^0 = \mathbf{k} \cdot \mathbf{v}_a + \mathbf{k} \cdot \mathbf{v}_b + \mathbf{S}^0 = \mathbf{S}_a + \mathbf{S}_b + \mathbf{S}^0$. \mathbf{S}_a er indre belastning pga. knutepunktbelastningen, \mathbf{R}_m . \mathbf{S}_b er indre belastning pga. deformasjonen forårsaket av konstantbelastningen, \mathbf{R}_m^0 . \mathbf{S}^0 , er som nevnt tidligere konstantbelastning. Disse fem trinnene er hentet fra (Berg 2013).

4.2 Analyseverktøy for Finite Element Method (FEM) modellering

CLT-vegger og DLT-vegger er modellert i FEM-programmet ANSYS Mechanical APDL. Versjon 15.0 (ANSYS Academic Teaching Mechanical) er brukt. ANSYS er et omfattende numerisk elementanalyse-program til både lineære og ikke-lineære analyser. Programmet brukes blant annet innen mekanikk, fluidmekanikk og elektromagnetisme. Denne versjonen, som er en skoleversjon, har en begrensning på antall elementer en CLT-vegg/DLT -vegg kan deles opp i. Dette medfører en begrensning på 256.000 noder. Dette er en faktor som påvirker nøyaktigheten på beregningene.

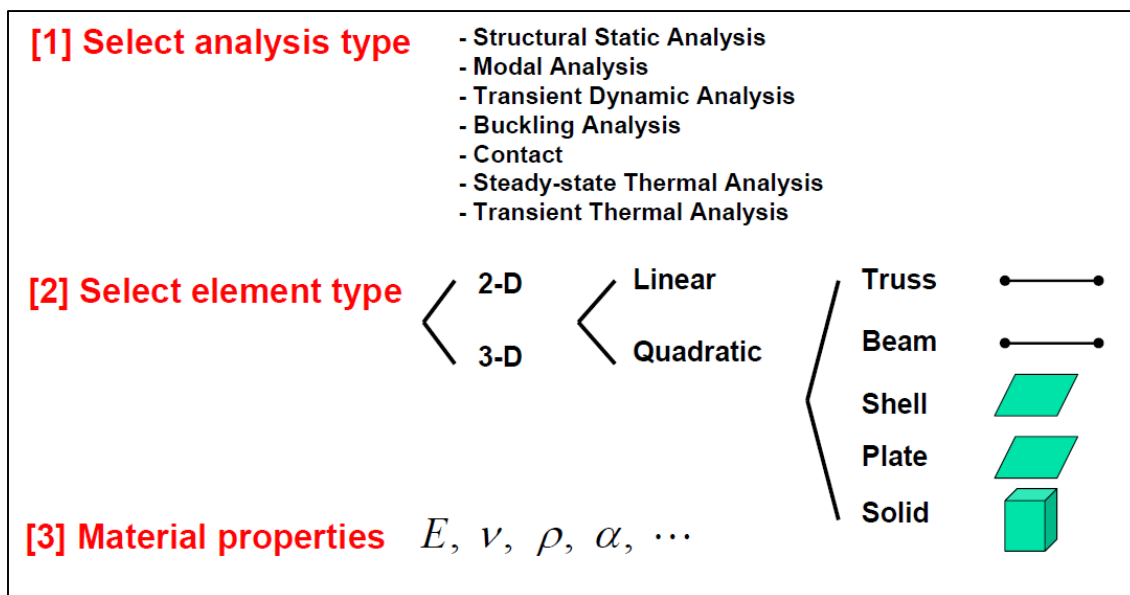
For store konstruksjoner blir også likningssystemene store og et analyseprogram som ANSYS gjør det mulig å løse disse store likningssystemene på kort tid.

Oppbyggingen av et elementprogram som ANSYS kan deles inn i følgende figurer (Weck og Kim 2004):



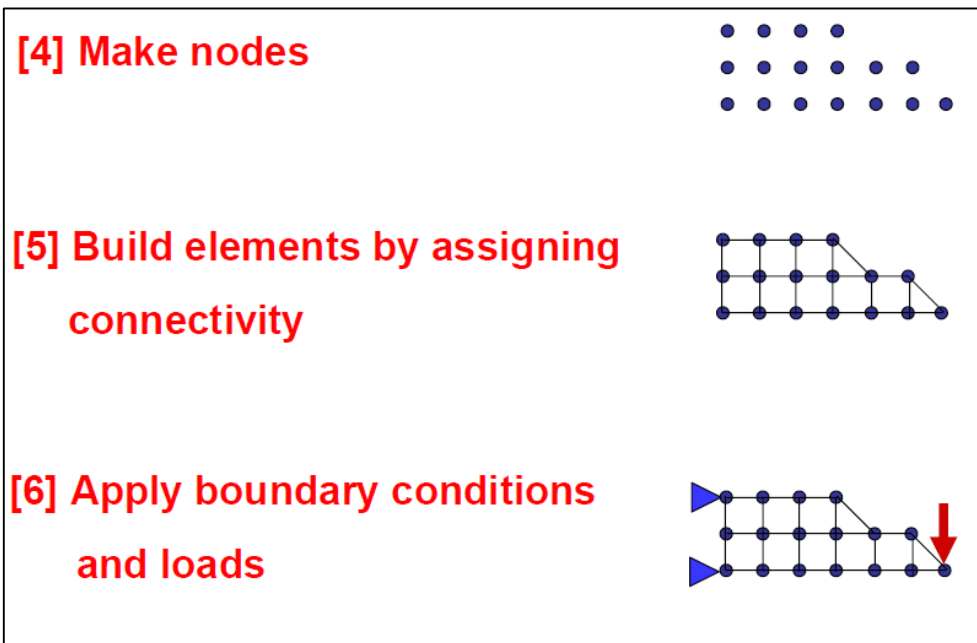
Figur 4.1: Oppbygging elementprogram, del 1.

PREPROCESS (1)



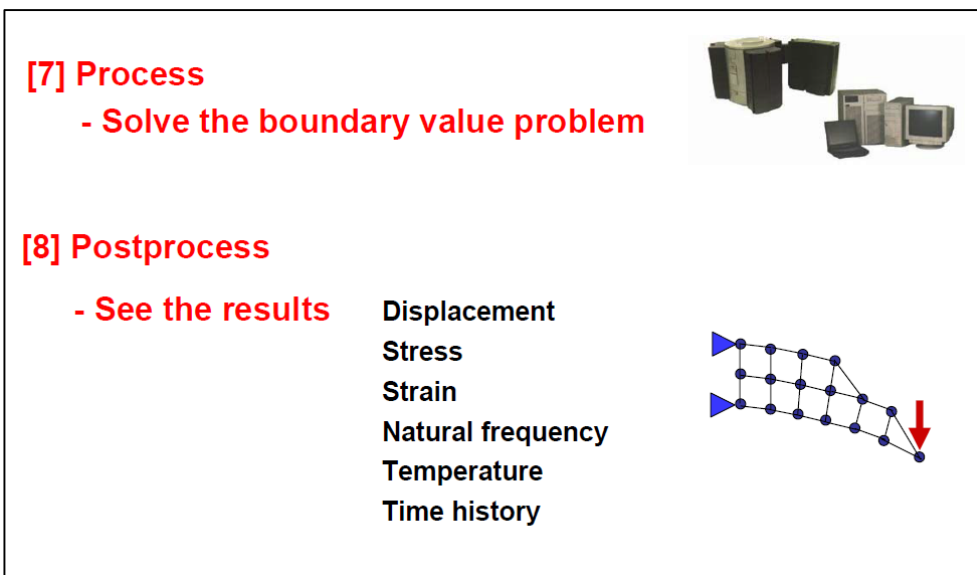
Figur 4.2: Oppbygging av elementprogram, del 2.

PREPROCESS (2)



Figur 4.3: Oppbygging av elementprogram, del 3.

PROCESS OG POSTPROCESS



Figur 4.4: Oppbygging av elementprogram, del 4.

5 METODE

5.1 Valg av metode

For å imøtekomme oppgavens problemstilling er det brukt kvantitative metoder. Elementprogrammet ANSYS Academic Teaching Mechanical 15.0 er blitt brukt som analyseverktøy for å teste de ulike veggene. I forkant av ANSYS ble det brukt Microsoft Excel 2013 som plattform for utforming av «keypoints». Notepad ble brukt som script-plattform og som konvertering av «keypoints» fra Excel til ANSYS. Det ble valgt å jobbe med kommandolinjer skrevet i Notepad som senere ble matet inn i ANSYS. I delkapitlene som følger vil fremgangsmåte og analysebeskrivelse bli presentert i detalj.

5.2 Generell beskrivelse

Som tidligere nevnt er målet med denne oppgaven å modellere krysslimte og diagonallimte hele vegger og vegger med utsparinger. Høyde på veggene er 2800mm og lengden på veggene er 15000mm. Veggtykkelsen er på 140mm. Bordene har en bredde på 100mm. Utsparingene til vinduer har en høyde lik 1273mm og bredde lik 990mm. Vegger med utsparinger har totalt fire utsparinger. Alle veggene vil bli utsatt for en gitt horisontal vindlast. Disse vindlastene vil skape skjærstrømmer på randen av veggtoppen. Den totale vindlasten på 64 kN (se delkapittel 5.9 Vindlast) vil bli fordelt på alle nodene ved høyde lik 2800mm (veggtoppen). Dette vil skape skjærstrømmene som følgelig vil gi en skjærdeformasjon. Denne skjærdeformasjonen vil være forflytningen i veggens lengderetning, X-retning, som vil bli hentet ut fra resultater (postprocessor). Denne forflytningen i veggens lengderetning danner grunnlaget for skjærstivheten i CLT- og DLT-veggene. ANSYS bruker en numerisk beregningsmetode for å løse de store likningssystemene og vil generere ut resultater raskt. Veggene gjennomgår en lineær analyse. Lineær analyse baseres på følgende tre hovedforutsetninger:

- Hookes lov for lineær-elastiske materialer.
- Naviers hypotese der plane tverrsnitt forblir plane etter deformasjon.
- Omfatter små forskyvninger og rotasjoner.

Følgelig har vi at all geometri baseres på de opprinnelige udeformerte og opprinnelige geometrien til veggene og at superposisjonsprinsippet er gjeldende. En lineær analyse i ANSYS er en god metode for å gjøre en rask og omtrentlig beregning av veggene.

Liste over veggsammensetninger hele vegger:

- CLT 4 LAG med ett lag MDF (Medium Density Fibreboard). Totalt 5 sjikt.
- CLT 5 LAG
- DLT 4 LAG
- DLT 5 LAG

Liste over veggsammensetninger vegger med utsparing:

- CLT 5 LAG
- DLT 4 LAG
- DLT 5 LAG

Effekt av sjikttykkelse på skjærstivheten er som tidligere nevnt en parameter i denne oppgaven på hele vegger og vegger med utsparinger.

Tabeller for sjiktstørrelser i de ulike veggene er som følgende:

HEL VEGG og VEGG MED UTSPARINGER CLT 4 LAG MED ETT LAG MDF						
	1.sjikt stående bord (mm)	2.sjikt liggende bord (mm)	3.sjikt MDF plater (mm)	4.sjikt liggende bord (mm)	5.sjikt stående bord (mm)	Total (mm)
MDF LAG 10 mm	37	28	10	28	37	140
MDF LAG 20 mm	37	18	20	18	37	140
MDF LAG 30 mm	37	23	30	23	37	140

Tabell 1: Sjiktstørrelser vegger CLT 4 LAG MED ETT LAG MDF plater.

HEL VEGG og VEGG MED UTSPARINGER CLT 5 LAG						
	1.sjikt stående bord (mm)	2.sjikt liggende bord (mm)	3.sjikt stående bord (mm)	4.sjikt liggende bord (mm)	5.sjikt stående bord (mm)	Stående / tot.tykkelse (mm)
Stående bord lik 0.3 x tykkelse	14	49	14	49	14	42/140
Stående bord lik 0.6 x tykkelse	28	28	28	28	28	84/140
Stående bord lik 0.9 x tykkelse	42	7	42	7	42	126/140

Tabell 2: Sjiktstørrelser vegger CLT 5 LAG.

HEL VEGG og VEGG MED UTSPARINGER DLT 4 LAG					
	1.sjikt stående bord (mm)	2.sjikt 45 grader bord (mm)	3.sjikt -45grader bord (mm)	4.sjikt stående bord (mm)	Diagonaler / tot.tykkelse (mm)
Diagonale bord lik 0.2 x tykkelse	56	14	14	56	28/140
Diagonale bord lik 0.4 x tykkelse	42	28	28	42	56/140
Diagonale bord lik 0.8 x tykkelse	14	56	56	14	112/140

Tabell 3: Sjiktstørrelser vegger DLT 4 LAG.

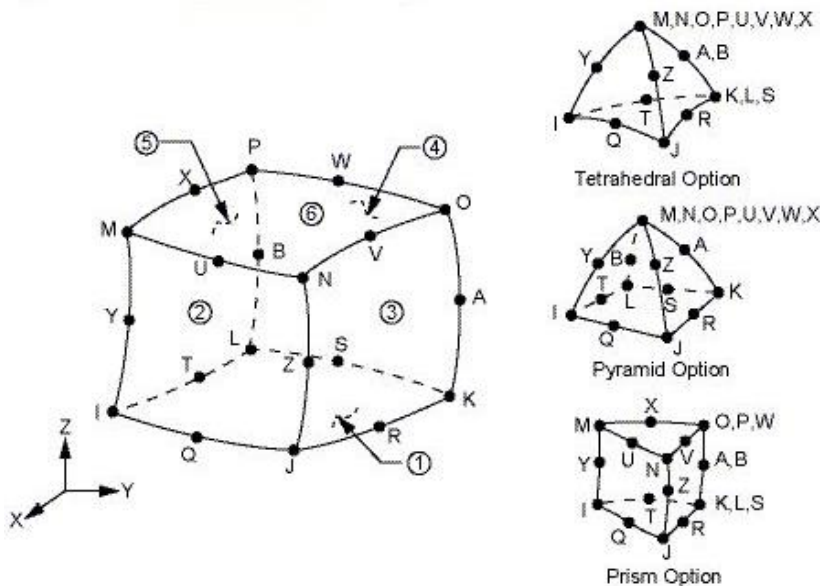
HEL VEGG og VEGG MED UTSPARINGER DLT 5 LAG						
	1.sjikt stående bord (mm)	2.sjikt 45 grader bord (mm)	3.sjikt stående bord (mm)	4.sjikt -45grader bord (mm)	5.sjikt stående bord (mm)	Diagonaler / tot.tykkelse (mm)
Diagonale bord lik 0.23 x tykkelse	36	16	36	16	36	32/140
Diagonale bord lik 0.4 x tykkelse	28	28	28	28	28	56/140
Diagonale bord lik 0.79 x tykkelse	10	55	10	55	10	110/140

Tabell 4: Sjiktstørrelser vegger DLT 5 LAG

Det ble foreslått å bruke MDF-plater med tykkelse lik 10, 20 og 30 mm i sjikt nummer 3 i CLT 4 LAG med ett lag MDF. Dette for å kunne sammenlikne effekt av MDF-plater på skjærstivheten. Grunnet manglende Poissons tall på MDF-plater er CLT 4 LAG med ett lag MDF ikke tatt med videre i oppgaven. En slik veggsammensetning er av høy interesse dersom Poissons tall kan innhentes.

5.3 Elementtype i ANSYS

Det er benyttet volumelementer av typen SOLID186. Denne elementtypen er godt egnet til simulering av massivtre. Elementtypen opererer med 20 noder som hvert element blir delt inn i. Hver av nodene har tre frihetsgrader. Disse tre frihetsgradene er forskyvninger i X-, Y- og Z-retning. SOLID186 tar hensyn til ortotrope materialegenskaper med tre tverrkontraksjonsverdier, tre verdier av E-modul i de tre hovedretningene og tre verdier av skjærmodul (G-modul) i de tre hovedretningene. Elementtypen har muligheten til å simulere blant annet plastisitet, krep og svelling og store deformasjoner. Det er valgt å jobbe med KEYOPTION(2) = 1, Full Integration (ANSYS Mechanical APDL, HELP).



Figur 5.1: Elementgeometri SOLID186 med beskrivelse under (engelsk).

SOLID186 is a higher order 3-D 20-node solid element that exhibits quadratic displacement behavior. The element is defined by 20 nodes having three degrees of freedom per node: translations in the nodal x, y, and z directions. The element supports plasticity, hyperelasticity, creep, stress stiffening, large deflection, and large strain capabilities. It also has mixed formulation capability for simulating deformations of nearly incompressible elastoplastic materials, and fully incompressible hyperelastic materials.

2014

5.4 Materialdata

Tresort: Gran. Forenkling: bordene er tatt ut fra samme sted i stammen for å gi mest mulig lik fasthetsegenskaper.

Trelastkvalitet: C24, bruddfasthet bøyning lik 24 [N/mm²].

Densitet: 420 [kg/m³], kilde: (Dahl 2009)

X-plan: veggens lengderetning (vegg lengde) i globalt aksesystem.

Y-plan: veggens tverretning (vegg tykkelse) i globalt aksesystem.

Z-plan: veggens vertikalretning (vegg høyde) i globalt aksesystem.

E-MODUL VERDIER, [N/mm²]:

Kilde: (Standardization 2009)

E-modul vinkelrett på fiberretning, veggens lengderetning, x-akse: 370.

E-modul vinkelrett på fiberretning, på tvers av lengderetning, y-akse: 370.

E-modul langs på fiberretning, vertikal retning, z-akse: 11000.

G-MODUL VERDIER (SKJÆR-MODUL), [N/mm²]:

Kilde: (Bejtka 2011)

G-modul i XY-planet i geometrien: 75. (Rulleskjær).

Kilde: (Standardization 2009)

G-modul i YZ-planet i geometrien: 690.

G-modul i XZ-planet i geometrien: 690.

POISSONS RATIO (TALL):

Kilde: (Dahl 2009)

Første betegnelse er aktiv retning. Andre betegnelse er passiv retning.

(Se delkapittel 2.4).

Major Poissons ratio XY: 0.25

Major Poissons ratio YZ: 0.01

Major Poissons ratio XZ: 0.01

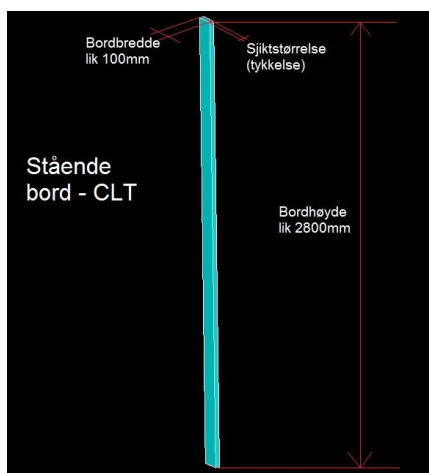
FRIKSJONSKOEFFISIENT (til liming av sjiktene, CONTACT og TARGET):

Friksjonskoeffisienttall i limfugen mellom sjiktene: 0.0

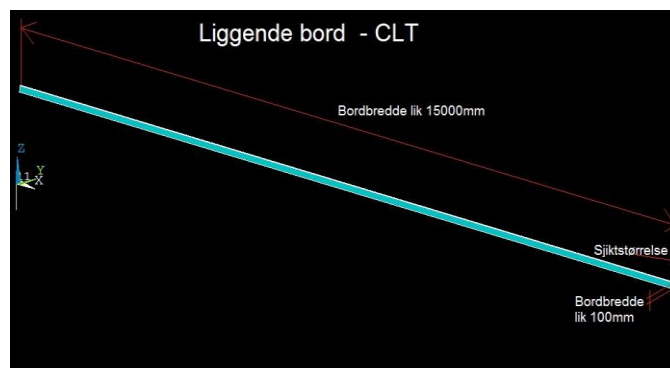
5.5 Oppbygging geometri vegger i ANSYS

5.5.1 CLT hele vegger

Bordene er som tidligere nevnt 100mm brede. En CLT-vegg består av fem sjikt. Den globale modellen i ANSYS har X-retning lik veggens lengderetning på 15000mm, Y-retning lik veggens tykkelse på 140mm og Z-retning lik veggens høyde på 2800mm. Første, tredje og femte sjikt består av 150 ikke kantlimte bord i hvert sjikt. Bordene i disse sjiktene er 2800mm i høyden. Andre og fjerde sjikt består av 28 ikke kantlimte bord i hvert sjikt. Bordene i disse sjiktene er 15000mm i lengden. Totalt vil en CLT vegg bestå av 3 sjikt med stående bord og 2 sjikt med liggende bord. For å lage disse bordene i ANSYS er Excel blitt benyttet som en plattform for alle keypoints med sjiktstørrelse som parameter. Keypoints fra Excel er videre blitt eksportert til Notepad. Programmet, Notepad, er som tidligere nevnt blitt benyttet som grunnlag for scriptfilene til de ulike veggtypene. I CLT hele vegger er det benyttet BLOCK-verktøy for å skape volumelementene i ANSYS. Her skapes volumene til hvert enkelt bord ved hjelp av start og slutt koordinater i X-, Y- og Z-retning. For et stående bord (1. bord) vil start- og slutt-koordinater i X-retning være (0,100). I Y-retning vil det følgelig være (0, (gitt sjikttykkelse)). I Z-retning vil start- og slutt-koordinater være (0,2800). De liggende volumelementene (bordene) med lengde lik 15000mm er bygget med samme verktøy og prinsipp. For det første bordet i sjikt nummer to vil start- og slutt-koordinater i X-retning være (0,15000), i Y-retning være (0, (gitt sjiktstørrelse)) og i Z-retning være (0,100).

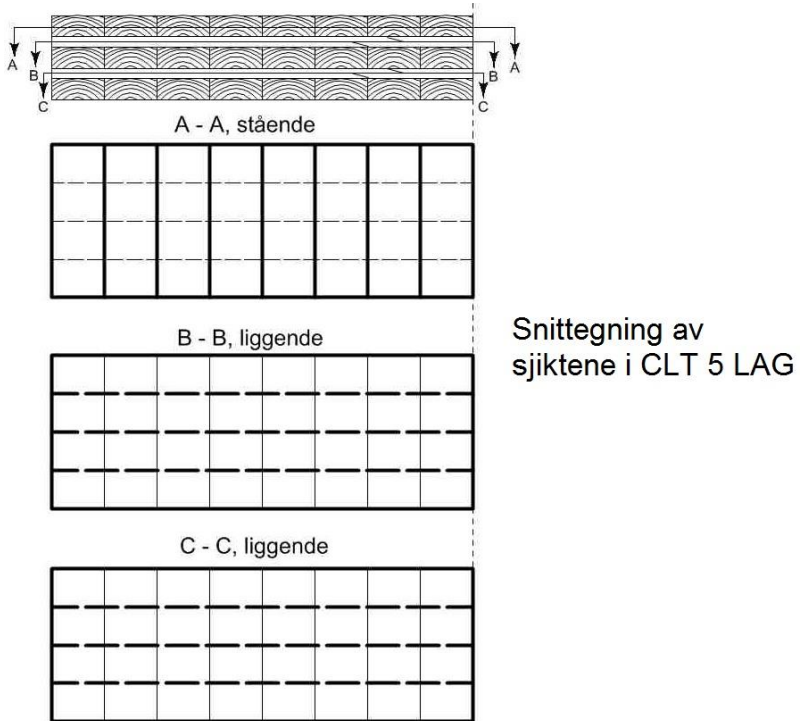


Figur 5.3: Isometrisk visning ett stående bord (ANSYS).

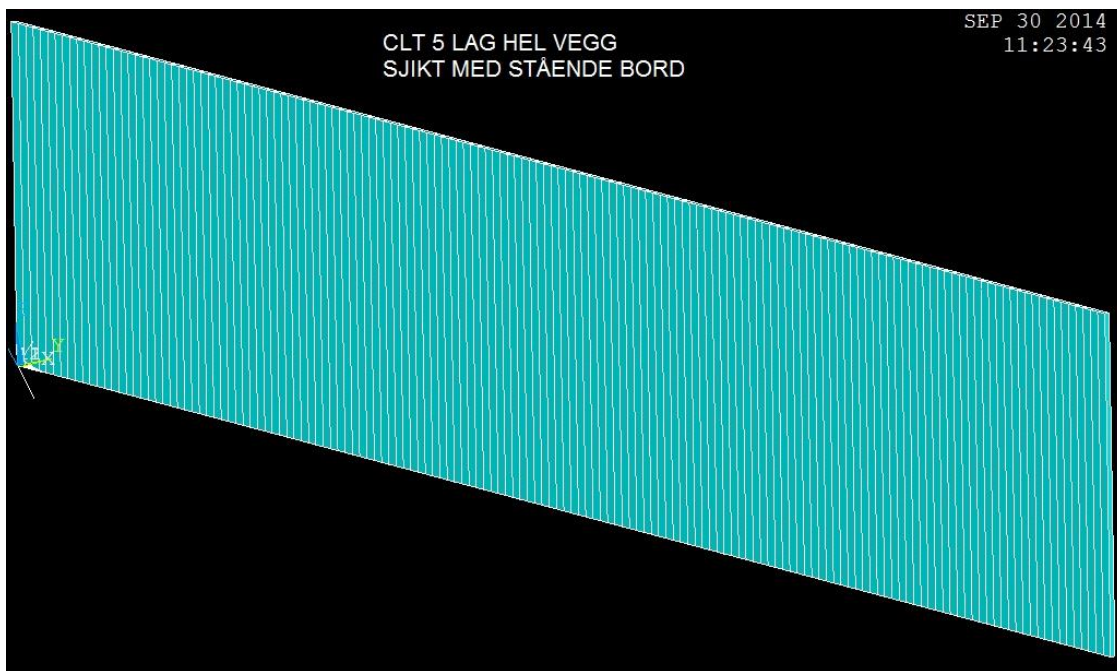


Figur 5.2: Isometrisk visning av ett liggende bord (ANSYS).

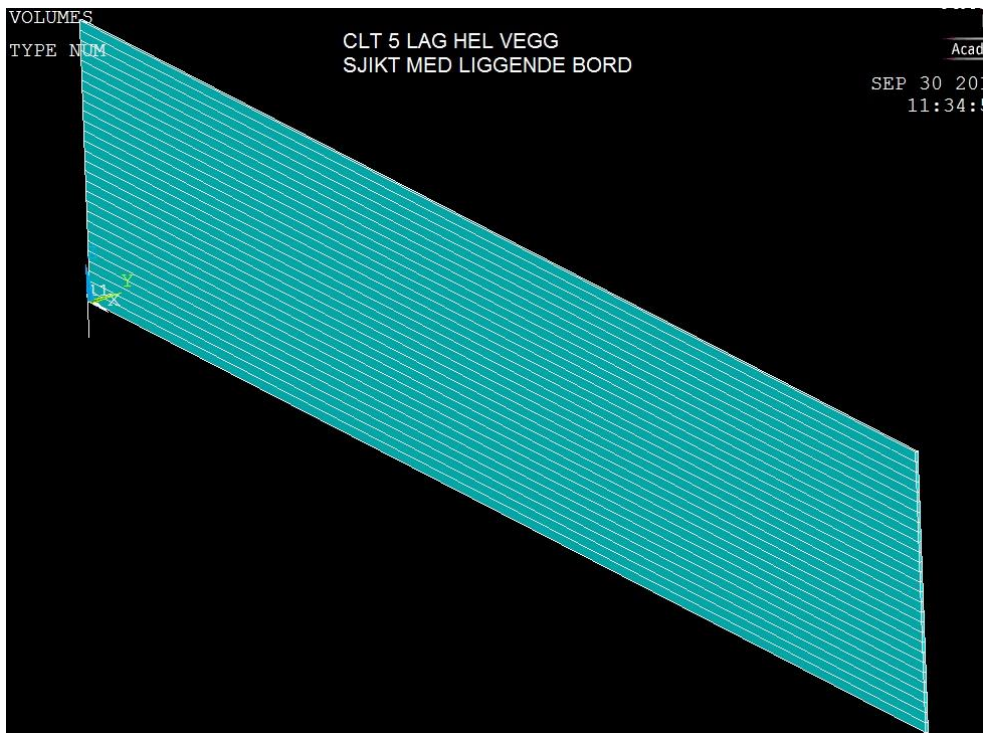
2014



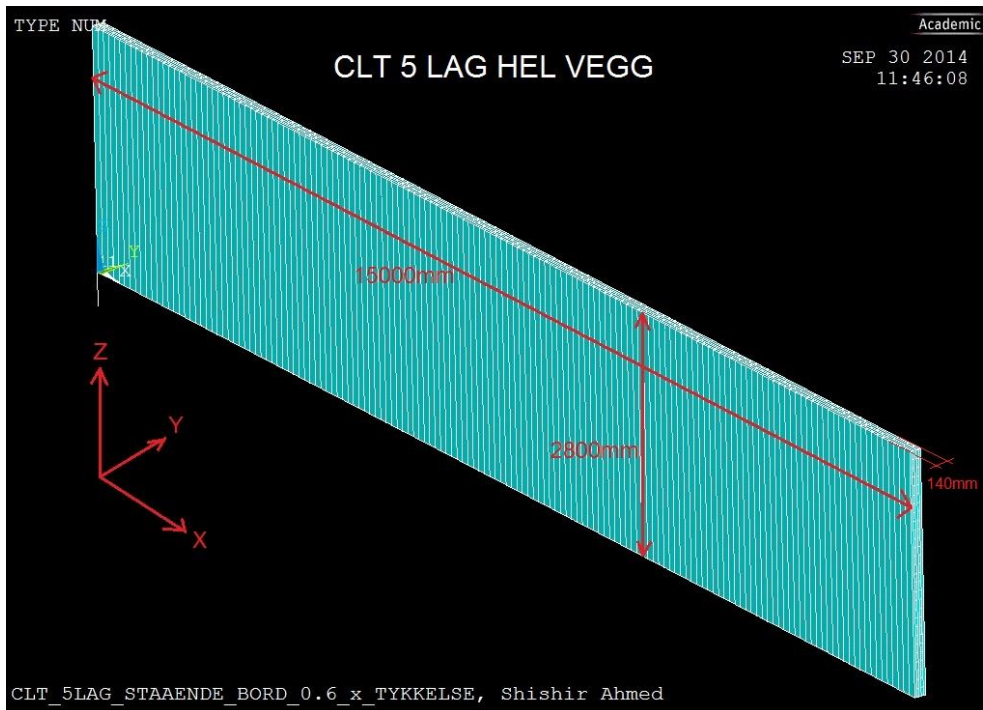
Figur 5.4: Snittegning CLT 5 LAG av de ulike sjiktene (Vectorworks).



Figur 5.5: Isometrisk visning sjikt med stående bord CLT 5 LAG hel vegg (ANSYS).



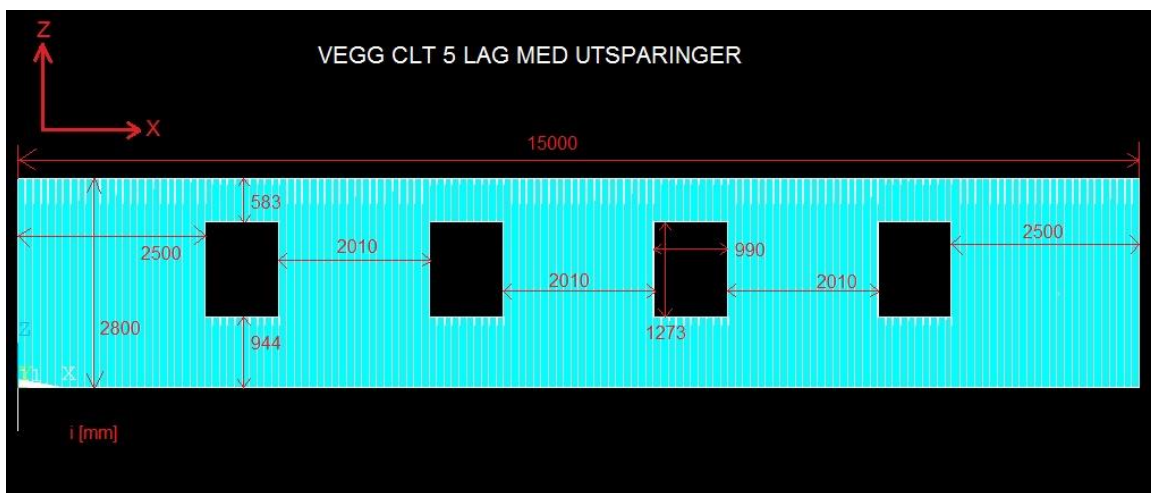
Figur 5.6: Isometrisk visning sjikt med liggende bord CLT 5 LAG hel vegg (ANSYS).



Figur 5.7: Isometrisk visning CLT 5 LAG hel vegg med målsetting (ANSYS).

5.5.2 CLT-vegg med utsparinger

CLT-vegg med utsparinger er bygget opp med BLOCK-verktøy i ANSYS. Veggene er bygget opp sjikt for sjikt der hvert sjikt er tilpasset utsparinger. For første utsparing i første sjikt er stående bord på høyde lik 2800mm fram til venstre kant. Videre er det stående bord på høyde lik 944mm fram til punktet hvor høyre kant utsparing møter bunnkant utsparing. Stående bord fra Z-retning=2217 til Z-retning=2800mm er bordene fra toppkant utsparing til veggtopp. På denne måten er det totalt fire utsparinger med avstand mellom utsparingene lik 2010mm, høyde lik 1273mm og bredde lik 990mm. Utsparingene var i utgangspunktet vurdert med høyde lik 1200mm og bredde lik 1000mm, men grunnet geometritilpasning er høyden lik 1273mm og bredden lik 990mm. Geometrien i andre og fjerde sjikt med liggende bord er bygget opp med samme grunnprinsipp som for geometrien i første, tredje og femte sjikt med stående bord. I sjiktene med liggende bord er bordene lagt med en horisontal tilpasning i forhold til utsparinger. Et antall på fire justeringsbord er benyttet for å imøtekomme vegg lengden og geometrien til utsparingene. Disse justeringsbordene har en bredde på 110mm (100mm vanlig bredde).

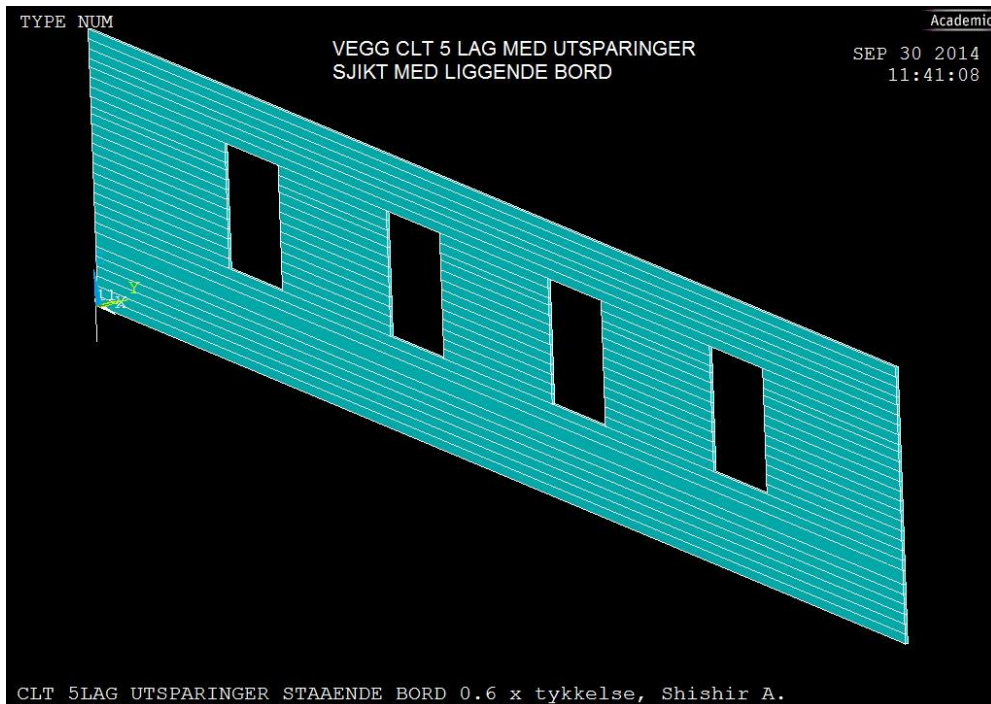


Figur 5.8: Vegg CLT 5 LAG med utsparinger med målsetting (ANSYS).

2014

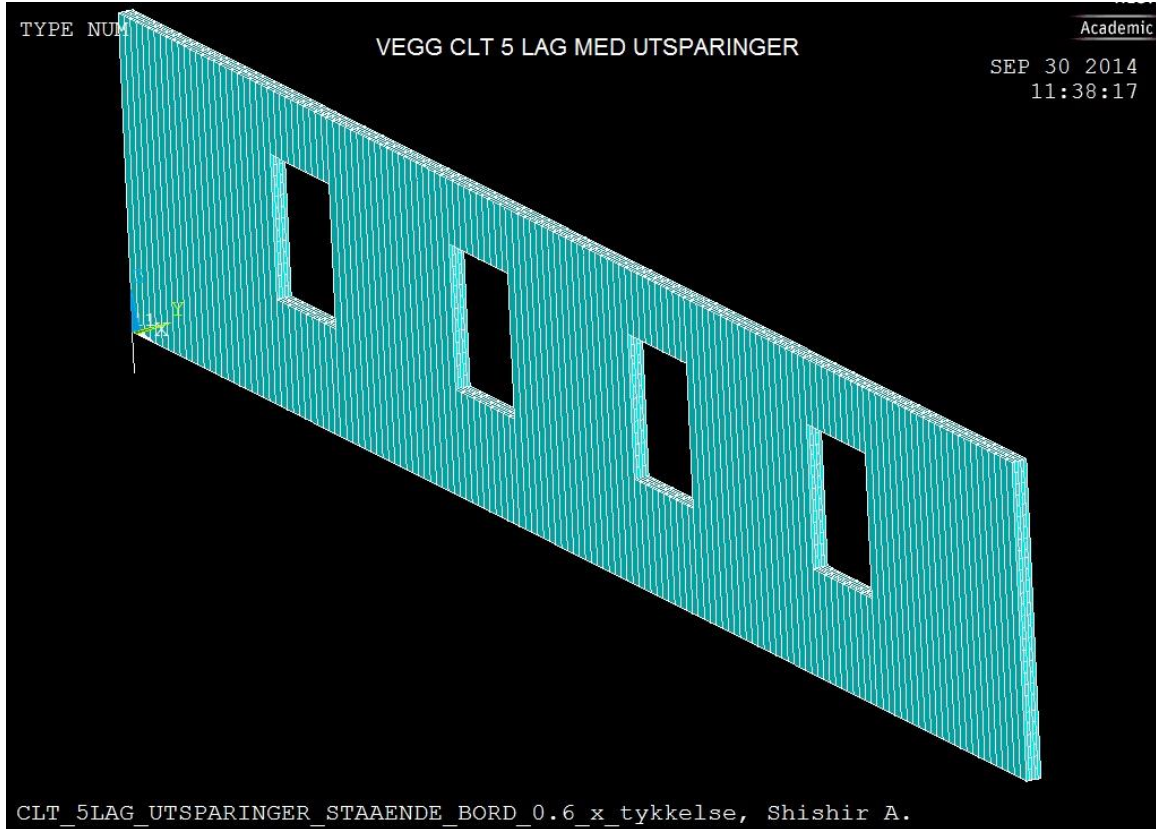


Figur 5.10: Isometrisk visning CLT 5 LAG med utsparinger sjikt med stående bord (ANSYS).



Figur 5.9: Isometrisk visning vegg CLT 5 LAG med utsparinger sjikt med liggende bord (ANSYS).

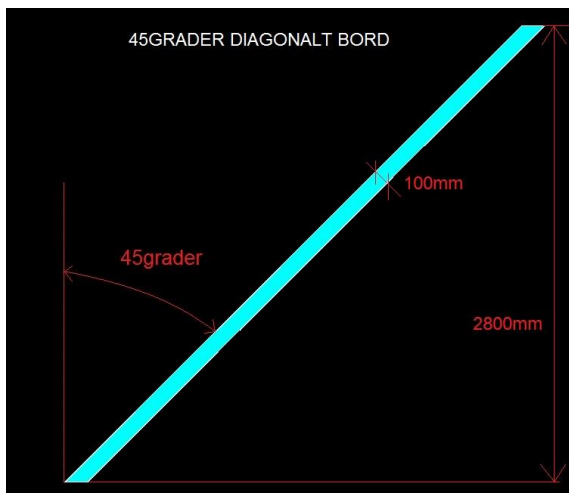
2014



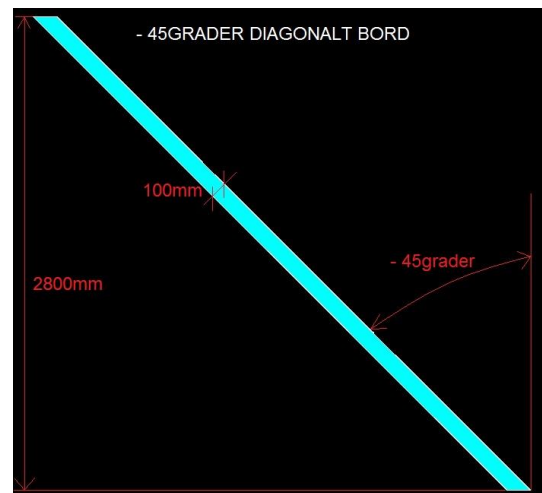
Figur 5.11: Isometrisk visning vegg CLT 5 LAG med utsparinger (ANSYS).

5.5.3 DLT hele vegger

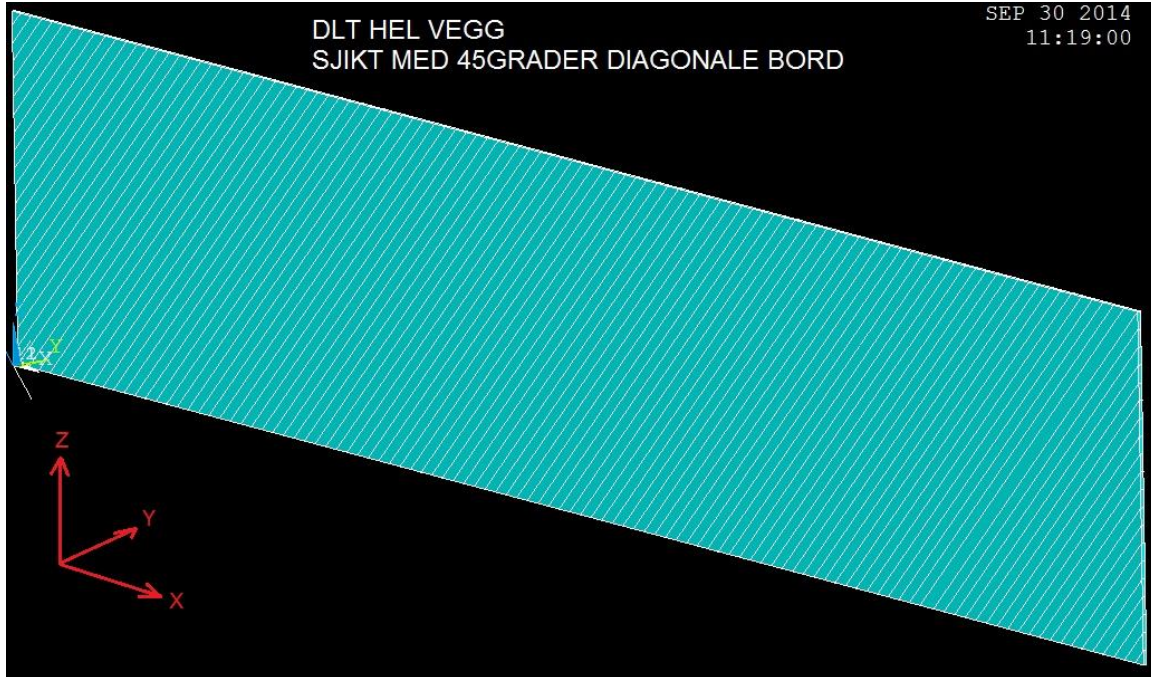
Keypoints til DLT hele vegger er bygget opp i Excel med sjiktstørrelse som eneste parameter. DLT 4 LAG består av stående bord, 45 grader bord, minus 45 grader bord og stående bord. DLT 5 LAG består av stående bord, 45 grader bord, stående bord, minus 45 grader bord og stående bord. (Se figur 3.4). Volumelementene i sjiktene med stående bord er satt opp med BLOCK-verktøy i ANSYS. I sjiktene med diagonale bord er det benyttet V-verktøy (VOLUME-verktøy). V-verktøy krever 8 keypoints for hvert bord. Ett diagonalt bord inneholder totalt 8 keypoints. Hvert keypoint har tilhørende X-, Y- og Z-koordinat i det globale aksesystemet. Det er viktig å følge et fast mønster for oppbygging av diagonaler med keypoints. En vanlig rekkefølge er å bygge diagonalene med 4 keypoints med tilhørende X-, Y- og Z-koordinater som danner flaten der $y=28\text{mm}$ (retning veggtykkelse) og deretter med 4 keypoints med tilhørende X-, Y- og Z-koordinat der $y=56\text{mm}$. Keypoints(1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) blir tilknyttet V(1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8). Hvert keypoint har tilhørende X-, Y- og Z-koordinat. Dette skaper ett diagonalt bord i ANSYS. Det er 126 bord i hvert diagonale sjikt og 150 bord i hvert sjikt med stående bord. Totalt 552 bord i DLT 4 LAG og totalt 702 bord i DLT 5 LAG. Se figur 5.5 for illustrasjon av sjikt med stående bord.



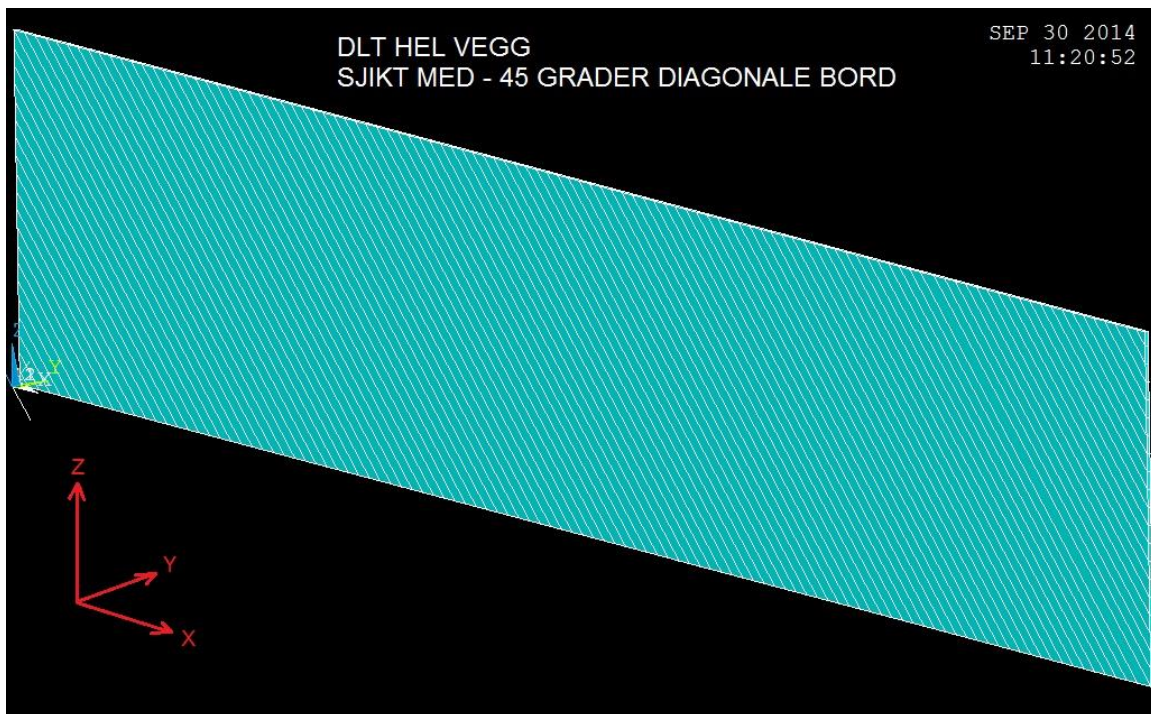
Figur 5.12: 45grader diagonalt bord i XZ-planet (ANSYS).



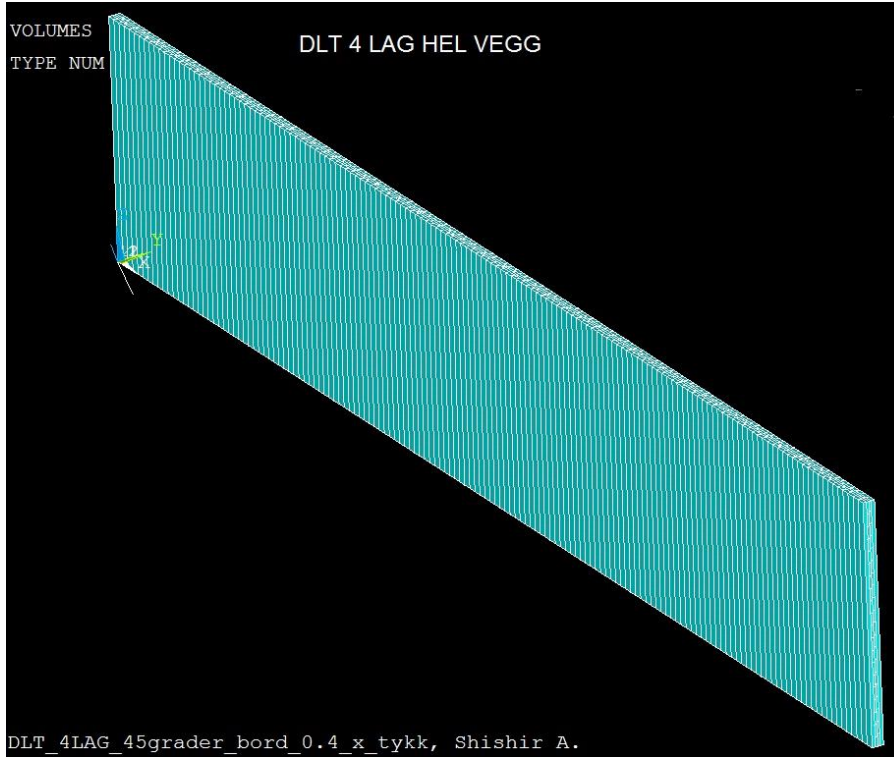
Figur 5.13: Minus 45grader diagonalt bord i XZ-planet (ANSYS).



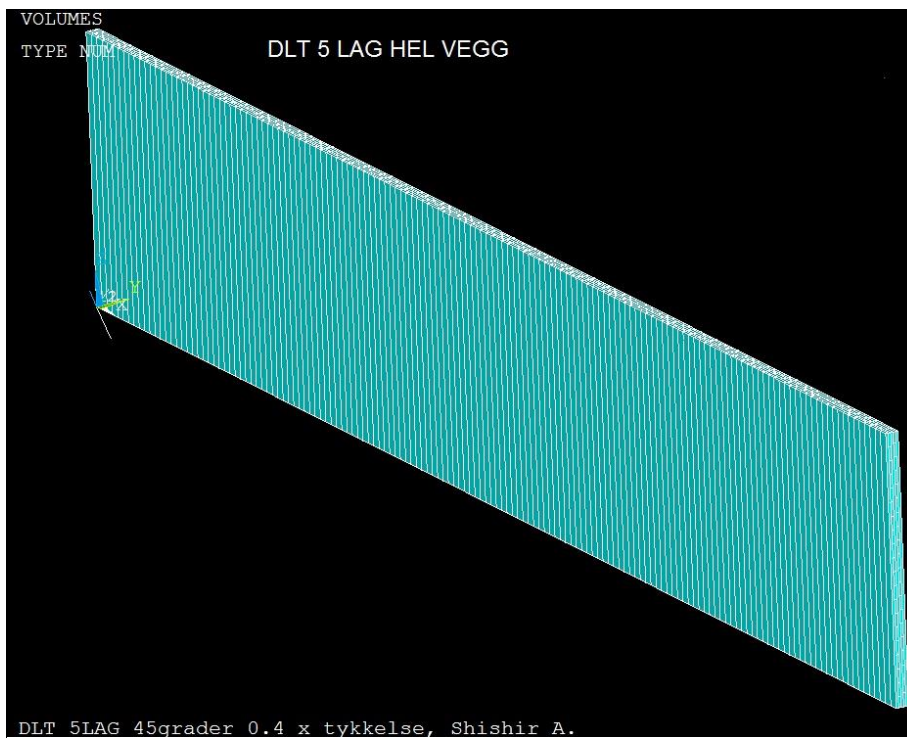
Figur 5.15: Isometrisk visning DLT-vegg sjikt med 45grader bord (ANSYS).



Figur 5.14: Isometrisk visning DLT-vegg sjikt med -45grader bord (ANSYS).



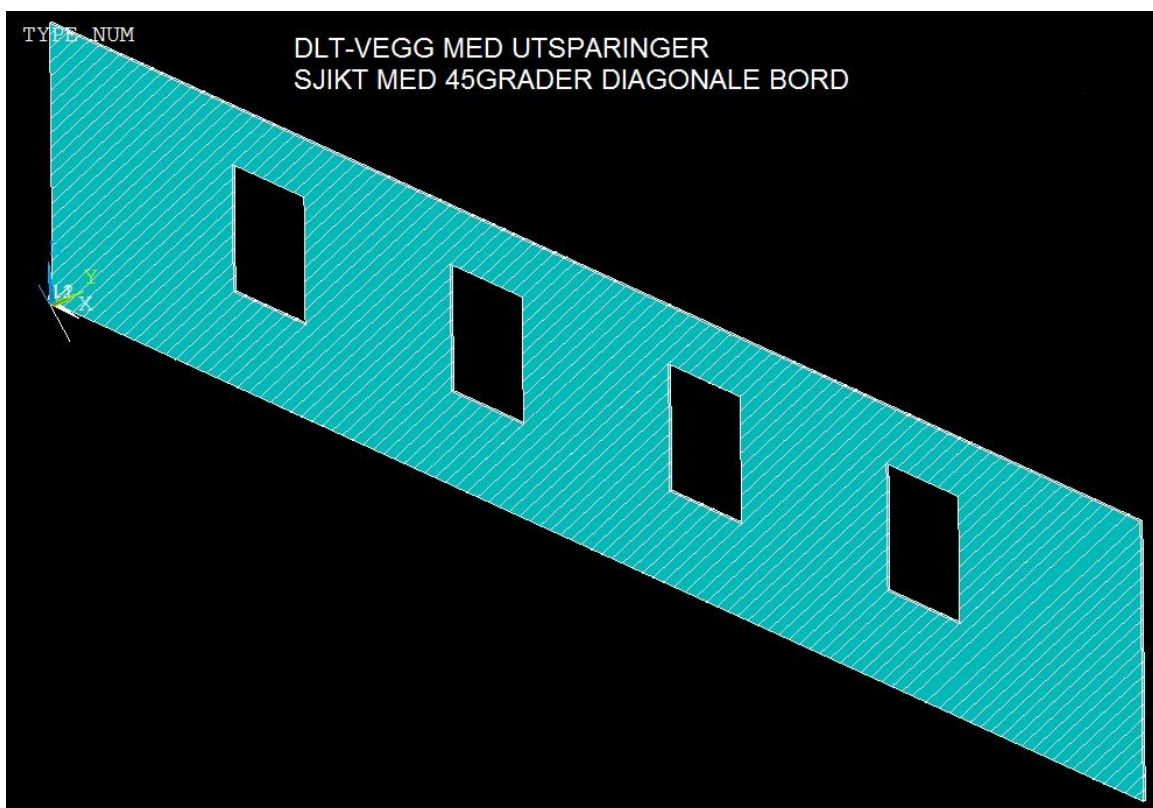
Figur 5.17: Isometrisk visning DLT 4 LAG hel vegg. Global modell (ANSYS).



Figur 5.16: Isometrisk visning DLT 5 LAG hel vegg. Global modell (ANSYS).

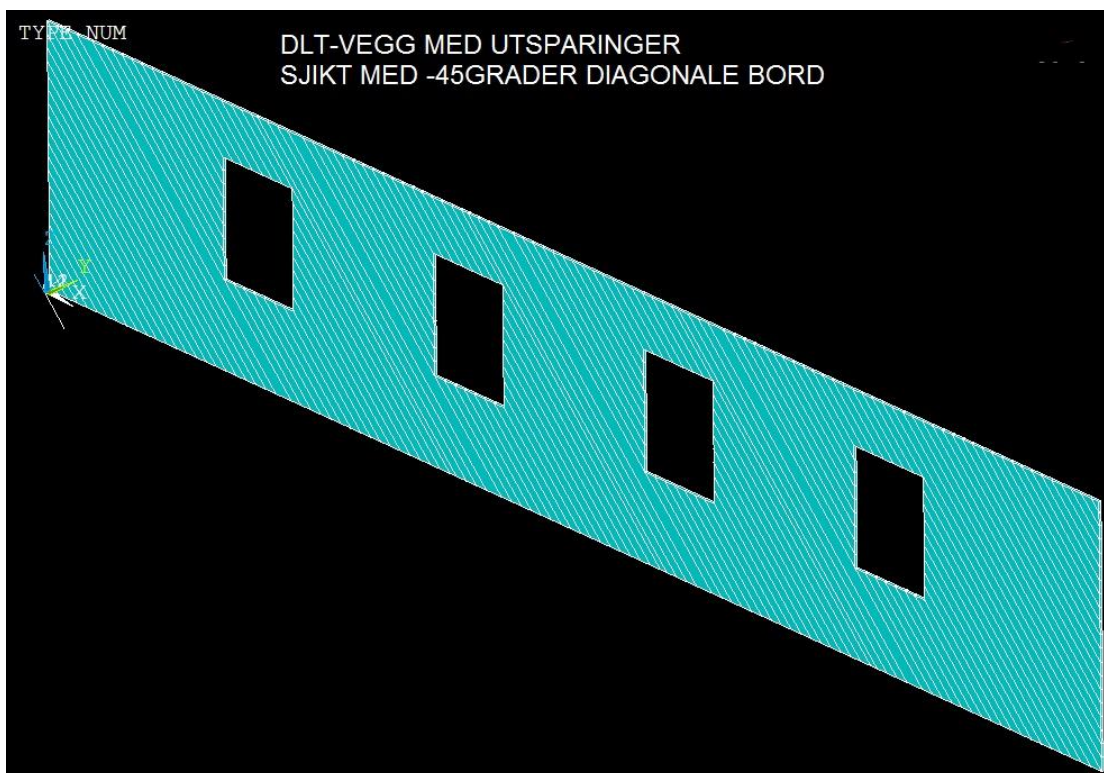
5.5.4 DLT-vegger med utsparinger

DLT 4 LAG og DLT 5 LAG med utsparinger er bygget opp med BLOCK-verktøy for stående bord og V-verktøy for diagonale bord. Geometrien i sjiktene med stående bord er bygget opp på samme måte som i CLT 5 LAG med utsparinger. Se delkapittel 5.5.2. Volumelementene som danner geometrien i sjiktene med diagonale bord er tilpasset utsparingene. Det er også benyttet et få antall justeringsbord for å imøtekomme vegg lengden samt geometrien til utsparingene. Utsparingene sjikt for sjikt danner følgelig den totale tykkelsen til hver utsparing. Totalt 4 utsparinger DLT 4 LAG og totalt 4 utsparinger i DLT 5 LAG. Se figur 5.10 for sjikt med stående bord med utsparinger og figur 5.8 for målsetting av vegg og utsparinger.

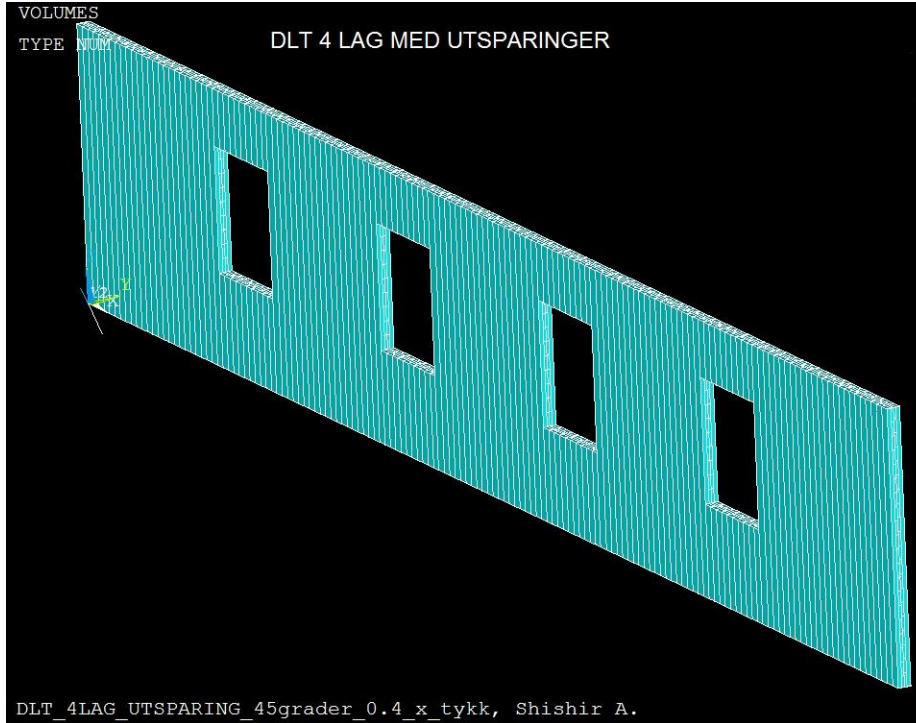


Figur 5.18: Isometrisk visning sjikt med 45grader diagonale bord med utsparinger (ANSYS).

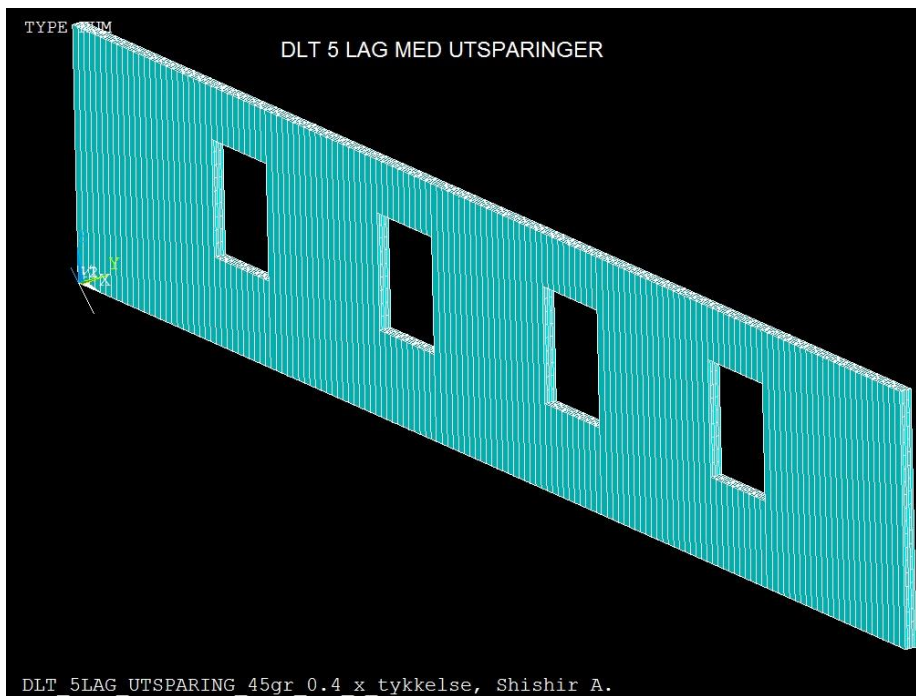
2014



Figur 5.19: Isometrisk visning sjikt med -45grader bord med utsparinger (synlige justeringsbord) (ANSYS).



Figur 5.21: Isometrisk visning DLT 4 LAG med utsparinger (ANSYS).



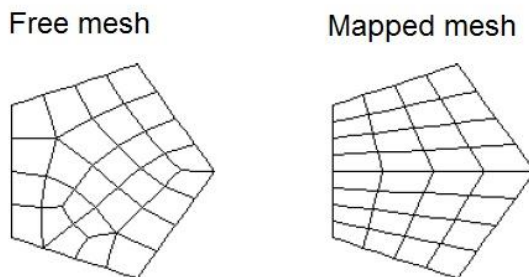
Figur 5.20: Isometrisk visning DLT 5 LAG med utsparinger (ANSYS).

5.6 Mesh

Meshing i ANSYS deler den globale modellen og dens opprinnelige volum-geometri opp i mindre volumelementer. Meshing følger disse tre hovedtrinnene:

1. Definere elementattributter som elementtype, materialdata, aksesystemer o.l.
2. Definere størrelse på elementene.
3. Utføre mesh av modellen.

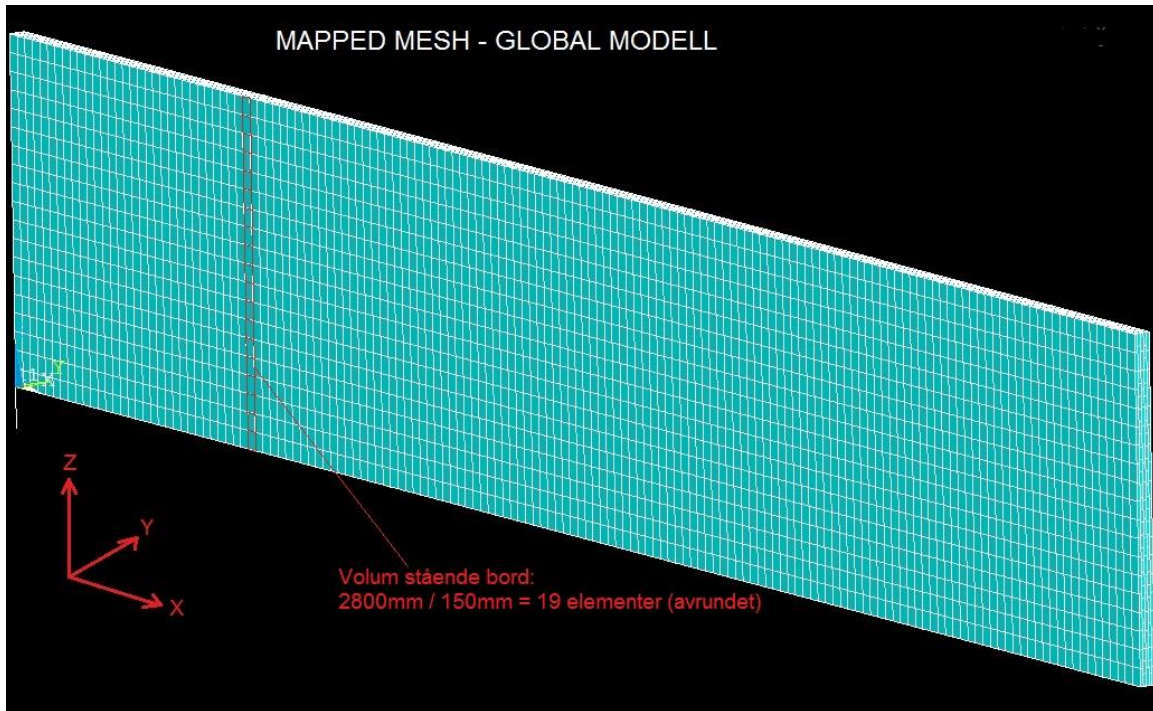
Det finnes «free meshing» og «mapped meshing». En «free mesh» har ingen restriksjoner med tanke på elementgeometri og har heller ingen fast oppbygging av mesh. «Free mesh» gir irregulære elementer der antall arealer/flater som danner elementene varierer i stor grad. En «mapped mesh» har restriksjoner med tanke på elementgeometri og det kreves en fast mønster på oppbygging av meshingen. Det finnes «area mesh» og «volume mesh» i «mapped mesh». «Mapped area mesh» består av firkanter og eller trekkanter. «Mapped volume mesh» består av volumelementer med 6 sider (hexahedrons). (ANSYS, HELP).



Figur 5.22: Eksempler free mesh (irregulær oppdeling) og mapped mesh (regulær oppdeling) (ANSYS, HELP).

I denne oppgaven er det benyttet «mapped mesh». Dette gir bedre kontroll på spenninger i elementene på grunn av oppbygging med regulære volumer av seks flater. ANSYS Academic Teaching Mechanical har en begrensning på 256 000 noder. På grunn av denne begrensningen er veggene meshet i elementstørrelse på 150mm. Eksempelvis vil volumelementene som danner de stående bordene blir delt opp i $2800\text{mm} / 150\text{mm} \approx 19$ mindre elementer. Ved å utføre meshingen vil volumene i en vegg bli inndelt i mindre elementer, bli tilknyttet elementtype, materialdata og lokale aksesystemer. Følgelig opprettes også likningssystemer som danner grunnlaget for

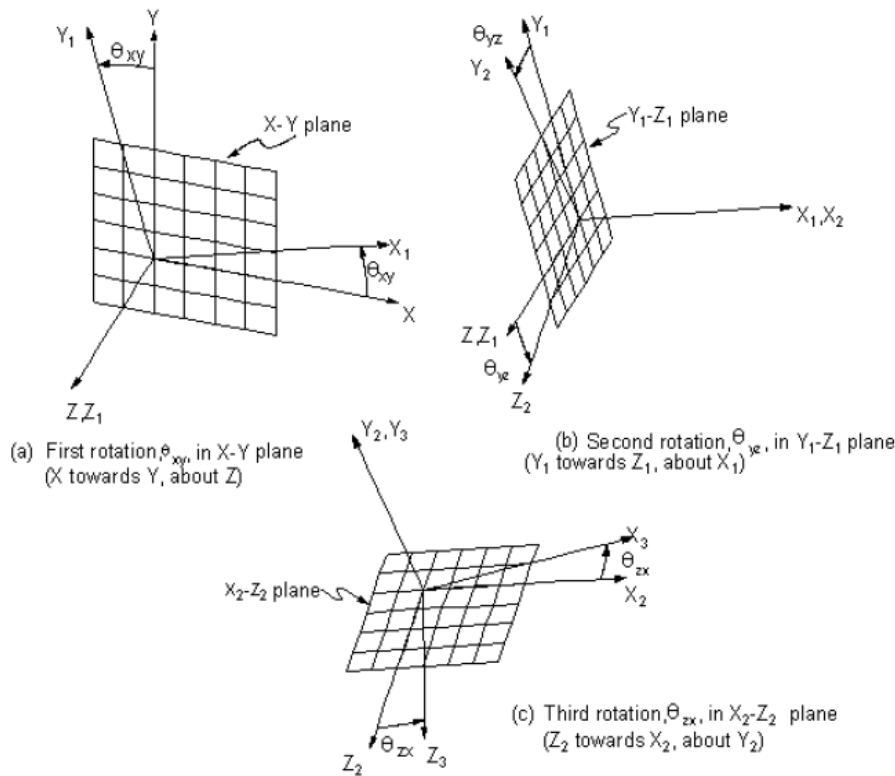
senere beregninger. Med en enda finere oppdeling av volumelementene vil man oppnå en finere beregning som gir grunnlag for en mer detaljert analyse av de ytre og indre spenninger som vil oppstå.



Figur 5.23: Eksempel mapped mesh global modell (ANSYS).

5.7 Lokale aksesystemer i ANSYS

Globalt og lokalt aksesystem blir i ANSYS brukt for å lokalisere geometrielementer som keypoints og noder i rommet. I modelleringen er det benyttet lokale aksesystemer med tilhørende materialegenskaper. For sjikt med stående bord er det benyttet et lokalt aksesystem med en rotasjon lik 0° i det globale aksesystemet. For sjikt med liggende bord er det benyttet et lokalt aksesystem rotert 90° i det globale aksesystemet. For sjikt med diagonale bord lik 45° er det benyttet lokalt aksesystem med en rotasjon lik 45° i det globale aksesystemet. Tilsvarende er det benyttet et lokalt aksesystem i det globale aksesystemet med en rotasjon lik -45° for sjikt med diagonale bord lik -45° . Med lokale aksesystemer er det derfor benyttet ett sett med materialdata der hvert sjikt blir tilknyttet samme materialdata med tilhørende akserotasjon.

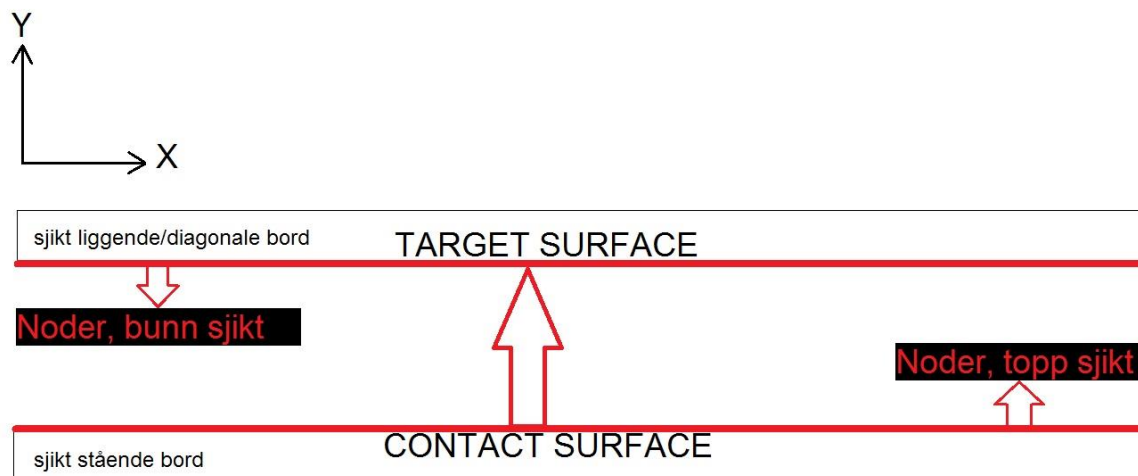


Figur 5.24: "Euler rotation angles". Lokale aksesystemer i ANSYS (ANSYS, HELP).

5.8 Liming av sjiktene i ANSYS

CONTA174 (CONTACT) og TARGE170 (TARGET) er benyttet i ANSYS for å lime sjiktene i Y-retning (veggtykkelsen). Bordene er ikke kantlimte i veggens lengderetning. I ANSYS er det opprettet TARGET-overflater og CONTACT-overflater. Det er nodene ved ulike y-verdier som danner grunnlaget for TARGET-overflater og CONTACT-overflater. Disse overflatene settes sammen og gjenspeiler limfugen mellom sjiktene. Hver TARGET- og CONTACT-overflate er gitt et unikt navn. Vegger med fem sjikt vil ha fire par kontaktflater og vegger med fire sjikt vil ha tre par kontaktflater. For en vegg med fem sjikt, der alle sjiktene har tykkelse 28mm, danner alle nodene i $y = 28\text{mm}$ grunnlaget for første CONTACT-overflate. Denne flaten er navngitt med «topp sjikt 1». Sjikt nummer to i $y = 28\text{mm}$ danner grunnlaget for TARGET-overflate. Denne flaten er navngitt med «bunn sjikt 2». Følgende mønster med navnsetting er benyttet i alle limfugene mellom sjiktene i totalt 18 vegger som er testet. Deretter er det benyttet CONTACT/TARGET-Wizard for «bonding» av sjiktene. «Bonding» er endelig liming av sjiktene.

PRINSIPP LIMING AV SJIKTENE I ANSYS



Figur 5.25: Prinsipp liming av sjiktene med CONTA174 og TARGE170 i ANSYS.

2014

Figur 5.25 viser i prinsipp hvordan liming av to sjikt utføres i ANSYS. Nodene i bunnen av et sjikt danner TARGET-flate og toppen av et sjikt danner CONTACT-flate. Det er benyttet «surface-to-surface» liming av sjiktene.

Følgende kontaktverdier er brukt:

Contact algorithm:	MPC (MultiPoint Constraint Contact)
Contact detection:	On nodes-normal to target
Behaviour of contact surface:	Bonded always (Keyoption (12) = 5)
Type of constraint:	Solid/Solid
Friction Coefficient:	0.0

Ved å benytte «bonded always» vil sjiktene holdes tett sammen og effekten av limfugen vil gjenspeiles mest mulig realistisk.

5.9 Vindlaster

Vindlasttallene er hentet fra (Mørch 2014) med CLT-høyhusene i Ås (Palisaden) som utgangspunkt. Vindlasten på 64 kN fordeles på alle noder ved $Z = 2800\text{mm}$ som vil simulere skjærstrømmene.

Utrekning forenklet vindlast:

Vindtrykk (D):

$$24[m] - 2,8[m] \times 15[m] \times 0,97 \left[\frac{kN}{m^2} \right] = 308,46 [kN] \quad (5.1)$$

Vindsug (E):

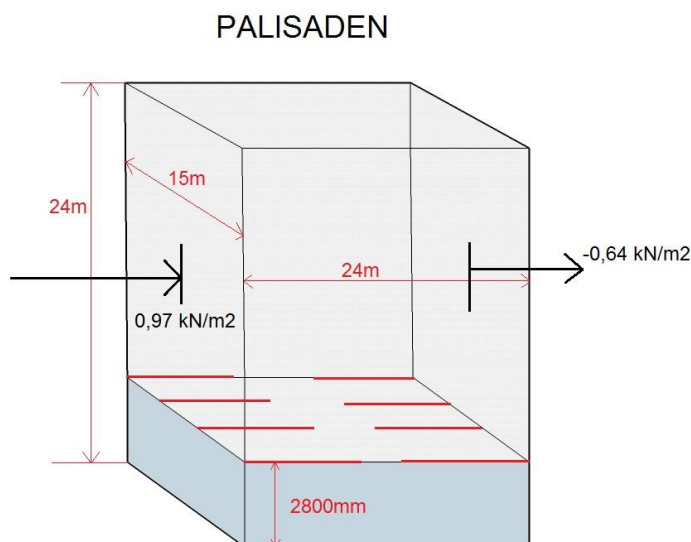
$$24[m] - 2,8[m] \times 15[m] \times 0,64 \left[\frac{kN}{m^2} \right] = 203,52 [kN] \quad (5.2)$$

Likning (5.1) og likning (5.2) adderes sammen og gir den totale vindlasten:

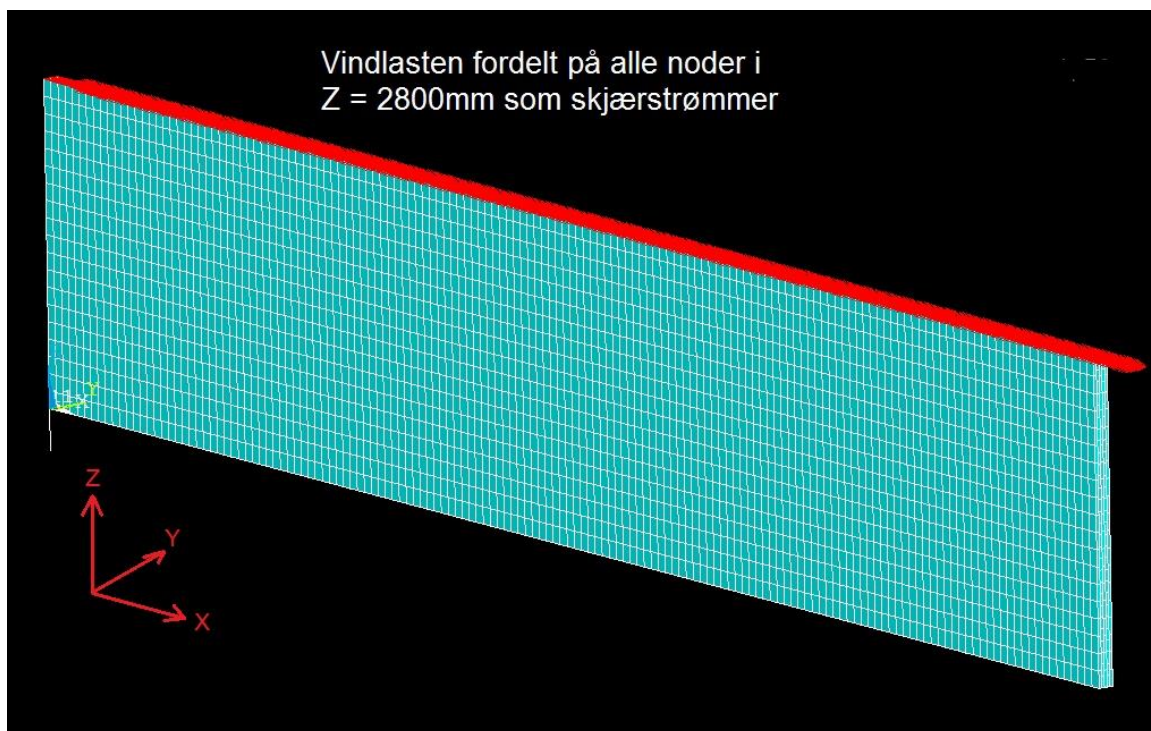
$$308,46 + 203,5 \cong 512 [kN] \quad (5.3)$$

Denne lasten fordeles ut over 8 flater der vegg møter etasjeskiller.

$$\frac{512kN}{8} \cong 64 [kN] \quad (5.4)$$



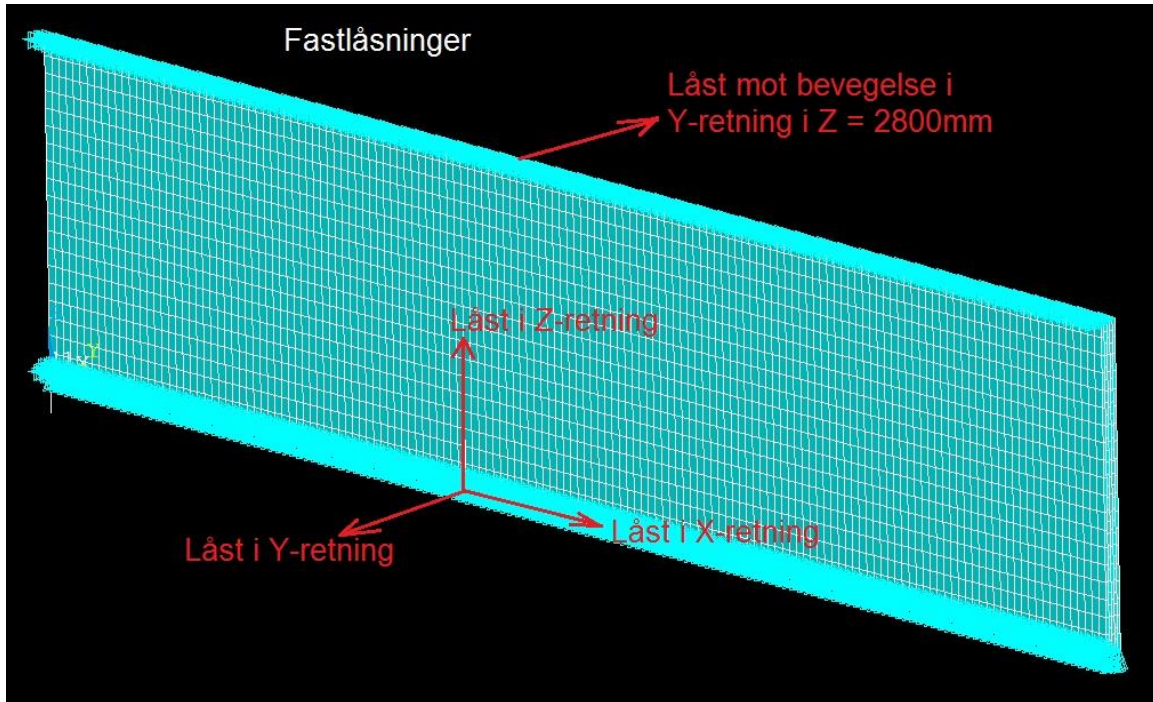
Figur 5.26: Palisaden. Høyhus i CLT (Ås) med vindtall hentet fra masteroppgaven til Lars Christian Mørch (Mørch 2014).



Figur 5.27: Skjærstrømmer (røde piler) i en global modell CLT/DLT hel vegg (ANSYS).

5.10 Fastlåsnings

Veggene er låst i alle frihetsgradene (X-, Y- og Z-retning) i alle nodene ved høyde $Z = 0\text{mm}$, samt fastlåst i Y-retning i alle nodene ved $Z = 2800\text{mm}$.



Figur 5.28: Isometrisk visning av fastlåsnings i en global modell CLT/DLT hel vegg (ANSYS).

6 RESULTATER

6.1 Forventet skjærdeformasjon Δx hele vegger (ANSYS)

Skjærmodulen er gitt ved:

$$G \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\tau_{xy}}{\gamma_{xy}} = \frac{F/A}{\Delta x/l} = \frac{F \cdot l}{A \cdot \Delta x} \quad (6.1)$$

der

$$\tau_{xy} = F/A = \text{skjærspenning}$$

$$F = \text{gitt kraft}$$

$$A = \text{arealet som kraften virker på}$$

$$\gamma_{xy} = \Delta x/l = \tan \theta = \text{relativ skjærdeformasjon}$$

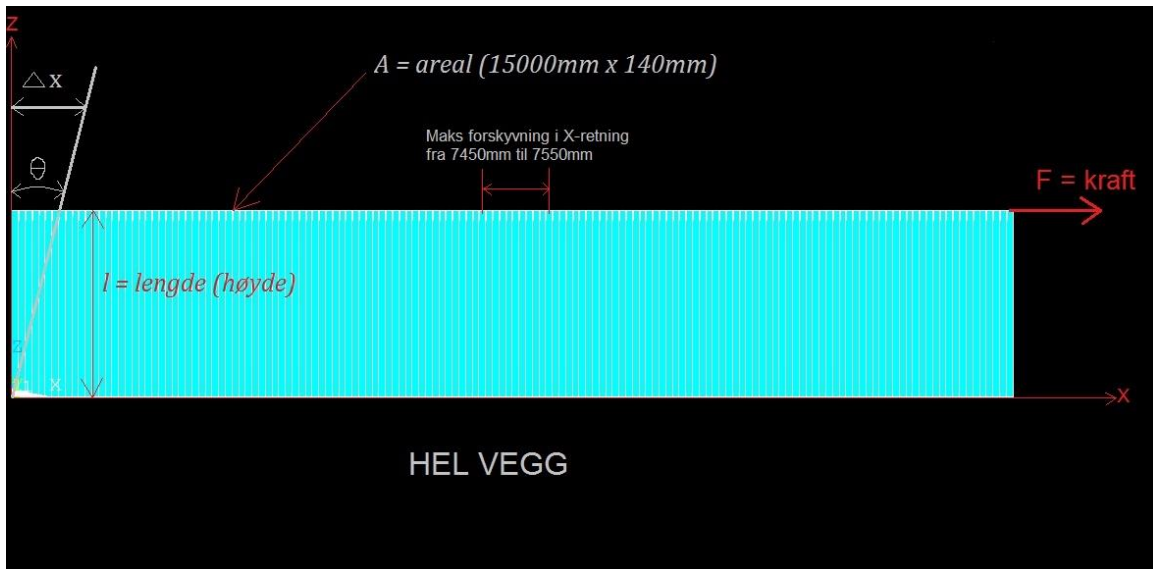
$$\Delta x = \text{deformasjon i X-retning}$$

$$l = \text{opprinnelig lengde}$$

Torsjonsvirkningen i limfugen mellom sjiktene i Y-retning er ikke tatt i betraktning i beregningene og verdien for $G_{\text{rulleskjær}} = 75 \text{ N/mm}^2$ er følgelig ikke tatt med. Veggene blir sett på som en hel skive og følgelig er verdien for $G_{\text{skjær}} = 690 \text{ N/mm}^2$ blitt benyttet. Se delkapittel 5.4. Omgjøring av formel (6.1) gir oss følgelig:

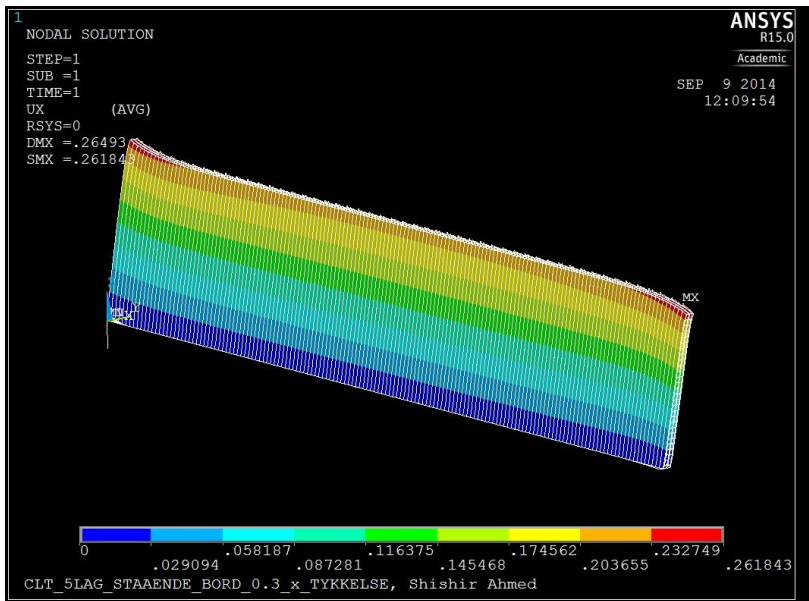
$$\Delta x = \frac{F \cdot l}{A \cdot G} = \frac{64000 \text{ N} \cdot 2800 \text{ mm}}{2100000 \text{ mm}^2 \cdot 690 \text{ N/mm}^2} = 0,1236 = 0,124 \text{ mm} \quad (6.2)$$

0,124mm er omtrentlig verdi på forventet skjærdeformasjon i X-retning. Δx_{maks} er hentet fra 7450mm til 7550mm i X-retning ved høyde $Z = 2800 \text{ mm}$. Dette er gjort ettersom dette området vil gi en forskyvning i X-retning som er lite påvirket av randbetingelser sammenliknet med venstre eller høyre topphjørne på veggene.

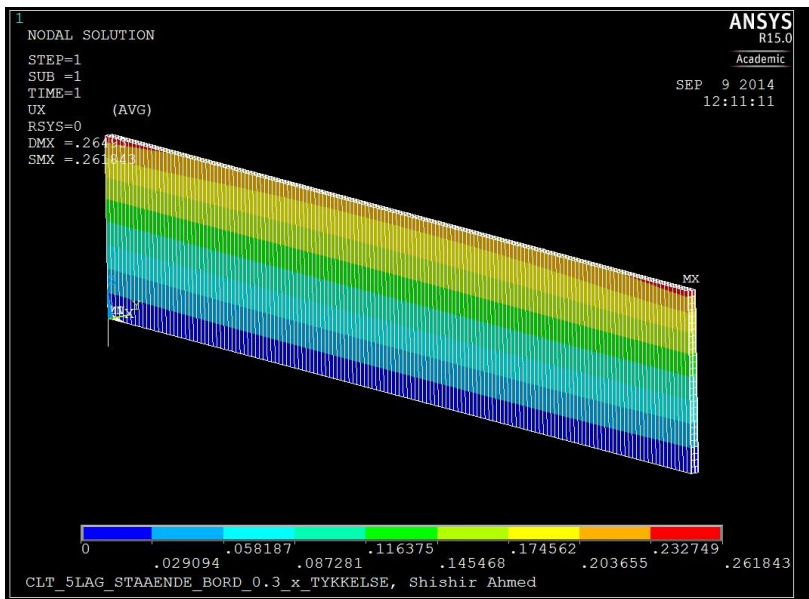


Figur 6.1: Beregningsgrunnlag forskyvning X-retning hel vegg (ANSYS).

6.1.1 Maks Δx CLT 5 LAG stående bord lik 0.3 x tykkelse

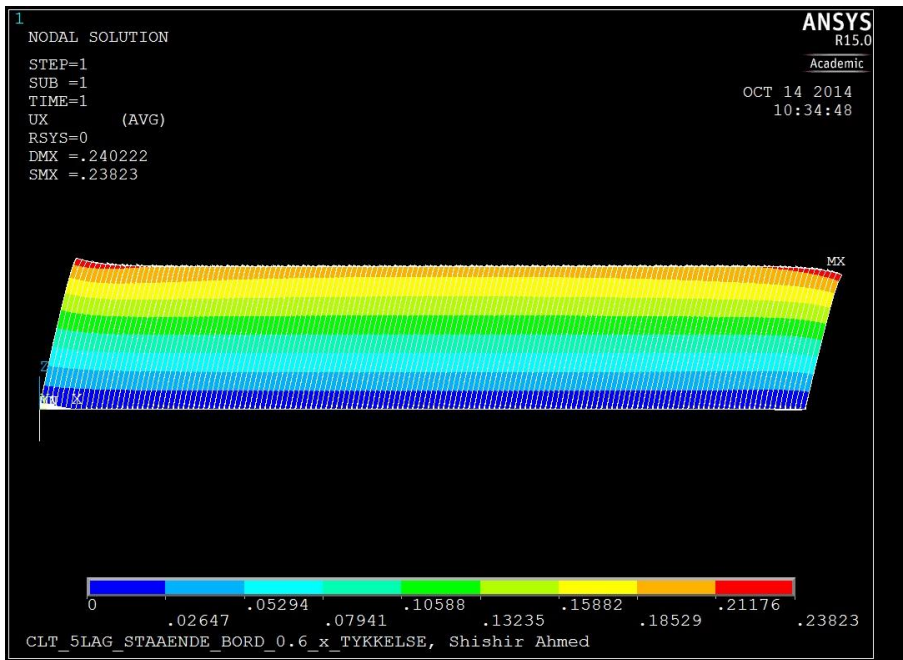


Figur 6.2: Skalert isometrisk visning CLT 5 LAG stående bord 0.3 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.237\text{mm}$.

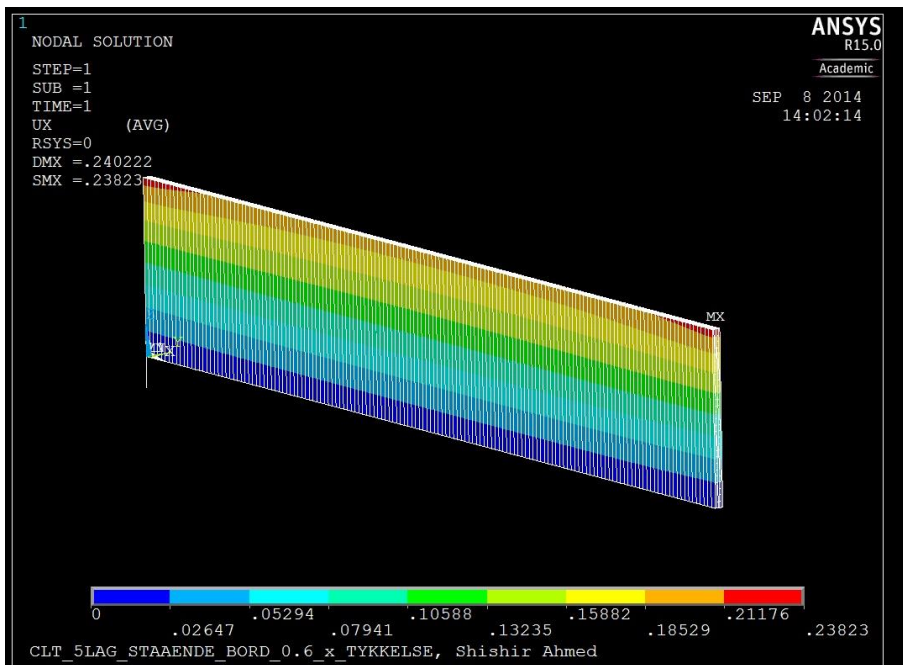


Figur 6.3: Isometrisk visning CLT 5 LAG stående bord 0.3 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.237\text{mm}$.

6.1.2 Maks Δx CLT 5 LAG stående bord lik 0.6 x tykkelse

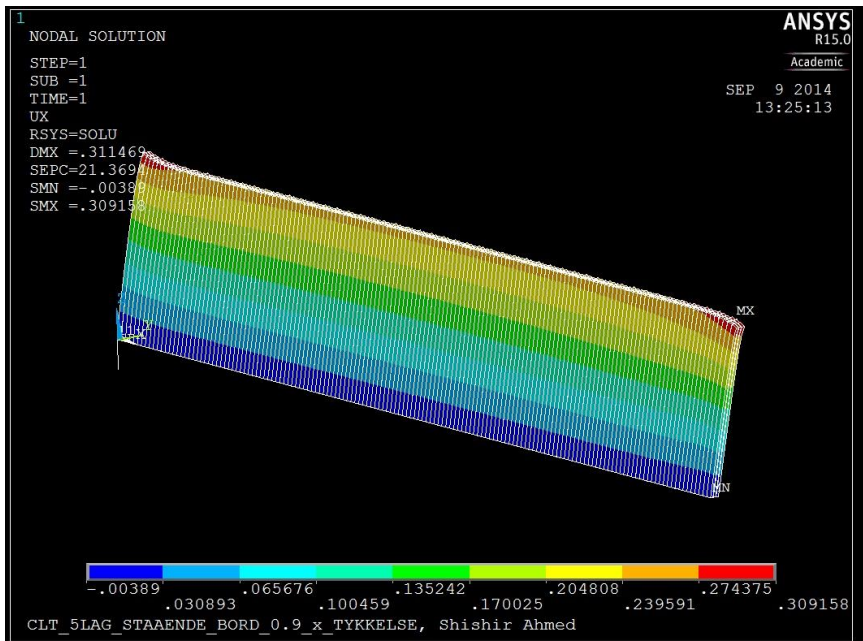


Figur 6.4: Skalert visning, CLT 5 LAG stående bord lik 0.6 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.213\text{mm}$.

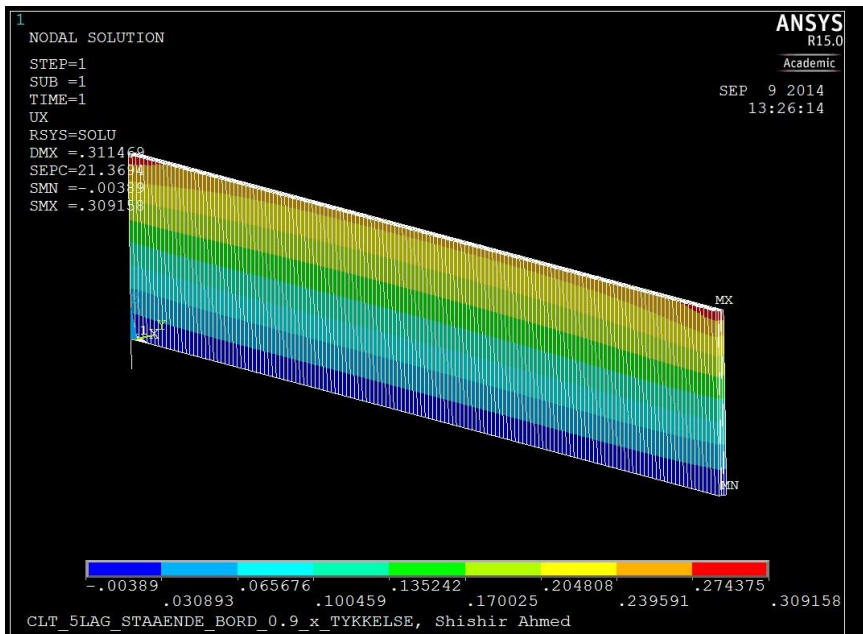


Figur 6.5: Isometrisk visning CLT 5 LAG stående bord lik 0.6 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.213\text{mm}$.

6.1.3 Maks Δx CLT 5 LAG stående bord lik 0.9 x tykkelse

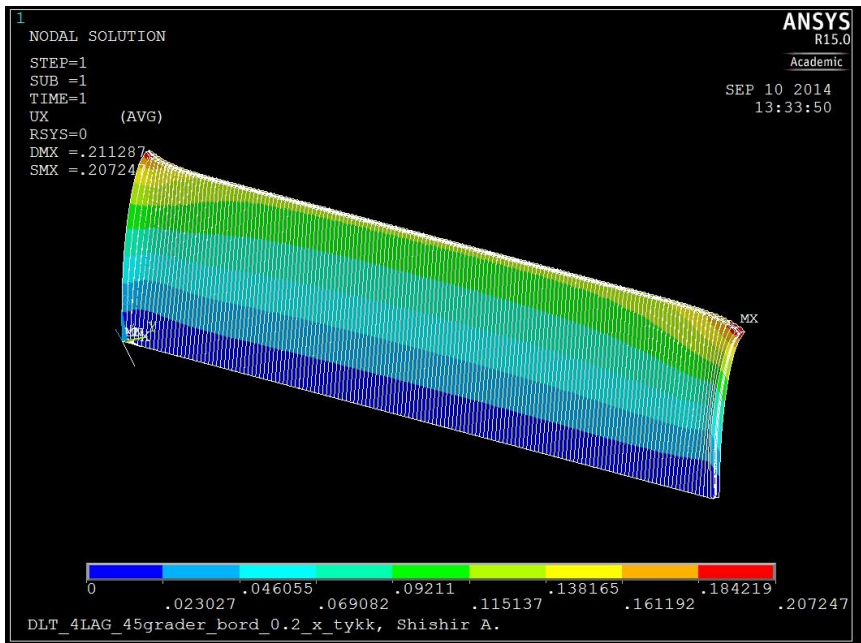


Figur 6.6: Skalert isometrisk visning CLT 5 LAG stående bord lik 0.9 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.264\text{mm}$

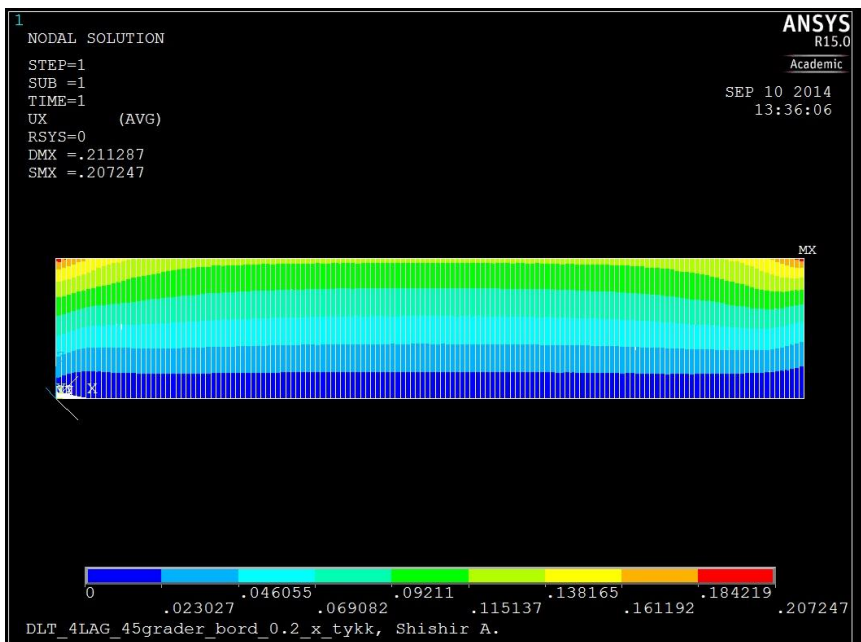


Figur 6.7: Isometrisk visning CLT 5 LAG stående bord lik 0.9 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.264\text{mm}$

6.1.4 Maks Δx DLT 4 lag diagonale bord lik 0.2 x tykkelse

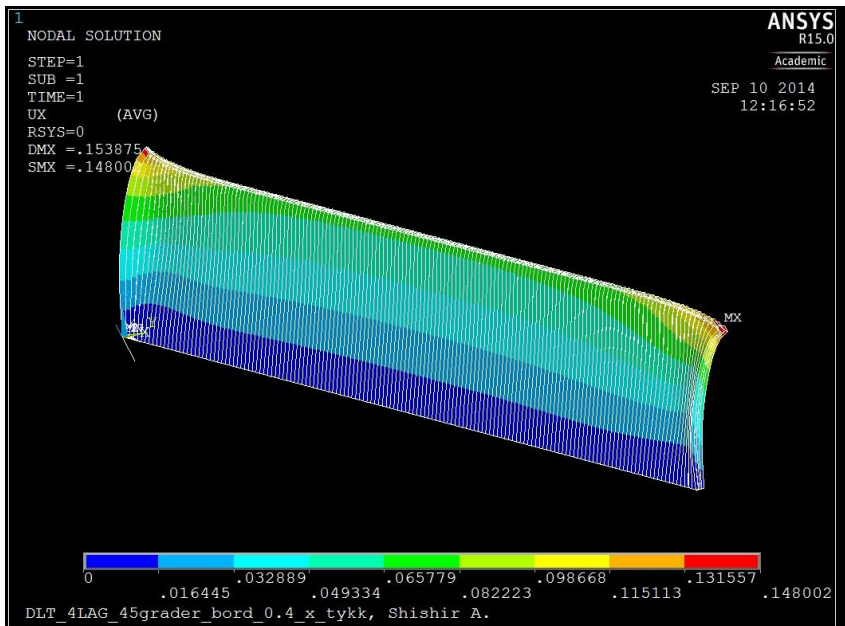


Figur 6.8: Skalert isometrisk visning DLT 4 LAG diagonale bord lik 0.2 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.124\text{mm}$.

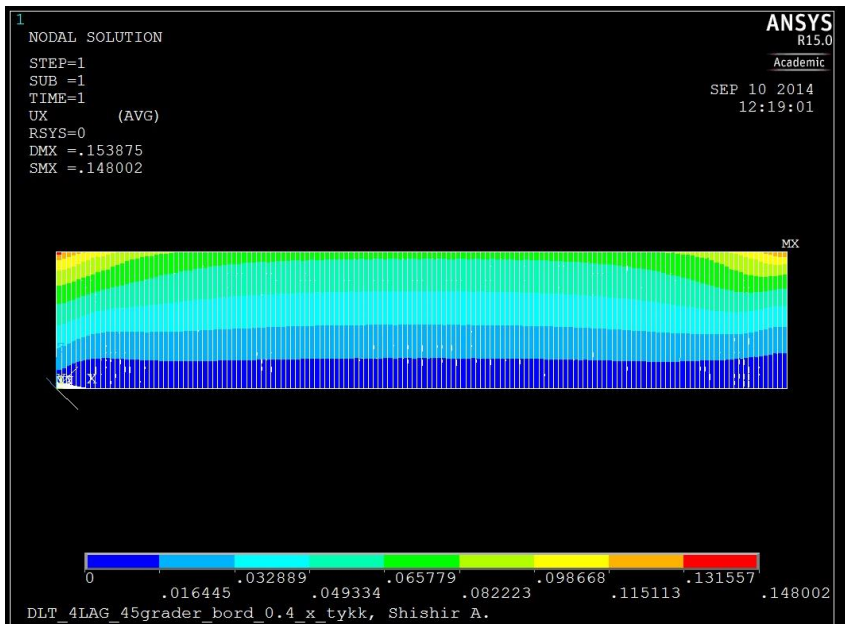


Figur 6.9: Visning DLT 4 LAG diagonale bord lik 0.2 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.124\text{mm}$.

6.1.5 Maks Δx DLT 4 LAG diagonale bord lik 0.4 x tykkelse

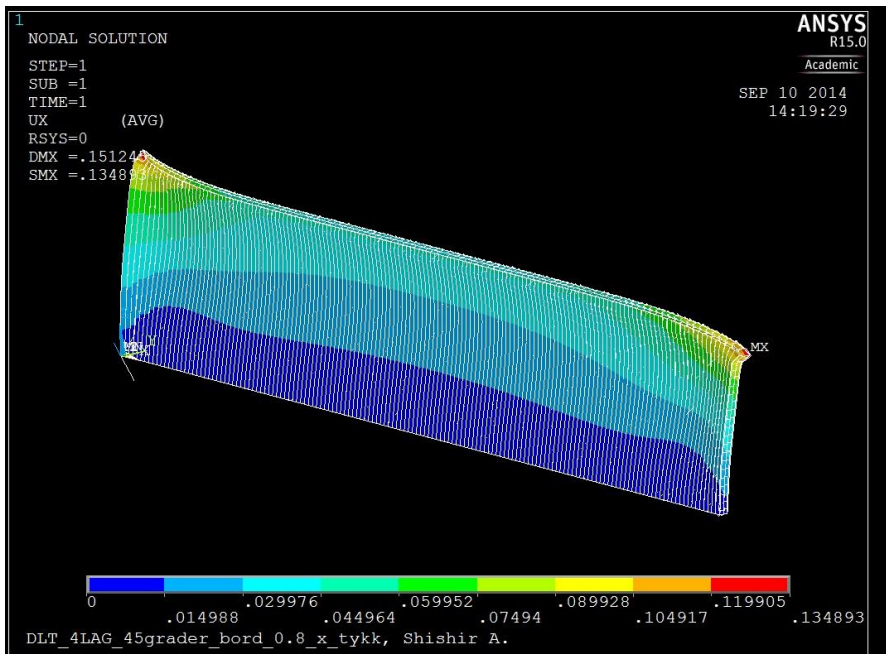


Figur 6.10: Skalert isometrisk visning DLT 4 LAG diagonale bord lik 0.4 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.768E-01$ mm.

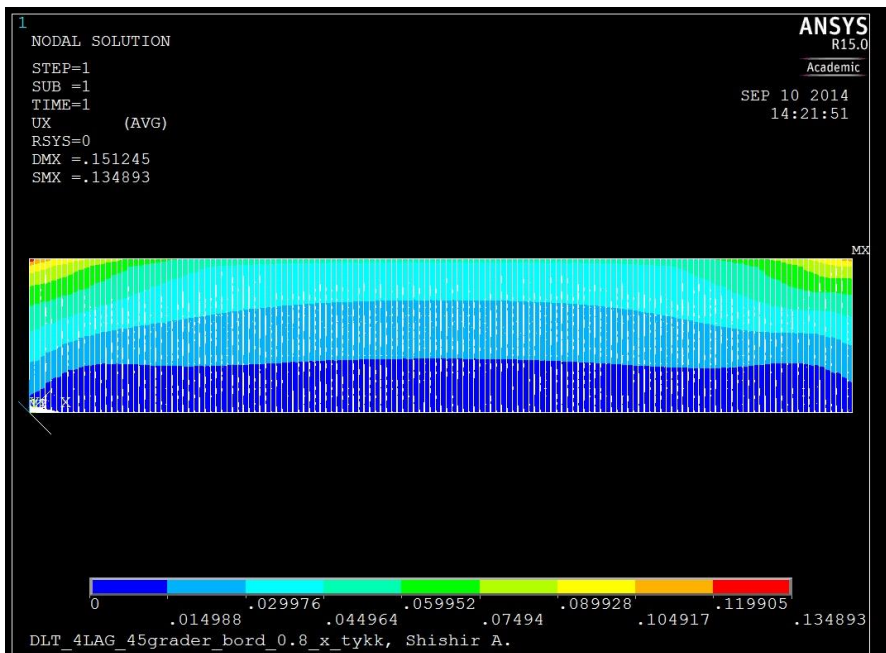


Figur 6.11: Visning DLT 4 LAG diagonale bord lik 0.4 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.768E-01$ mm

6.1.6 Maks Δx DLT 4 LAG diagonale bord lik 0.8 x tykkelse

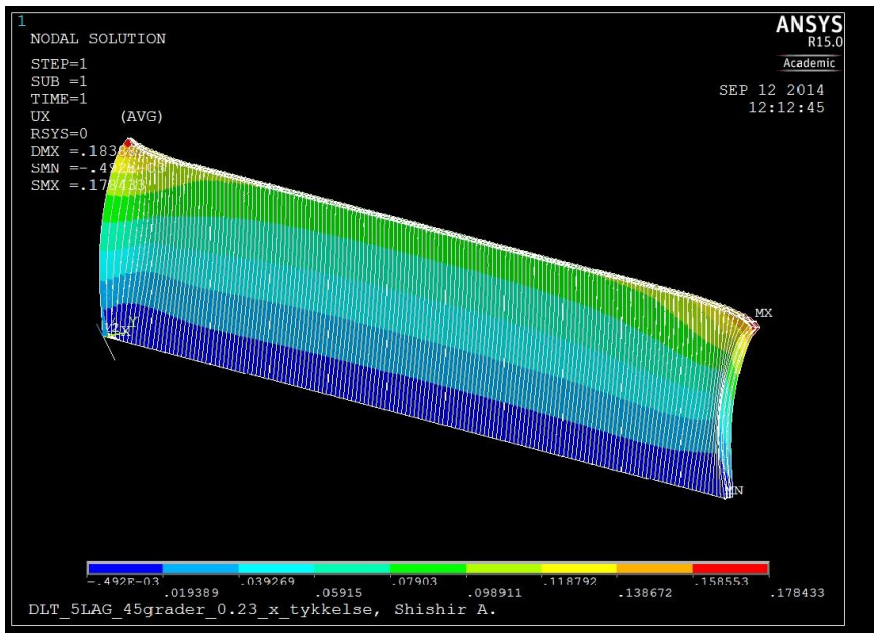


Figur 6.12: Skalert isometrisk visning DLT 4 LAG diagonale bord lik 0.8 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.556E-01\text{mm}$.

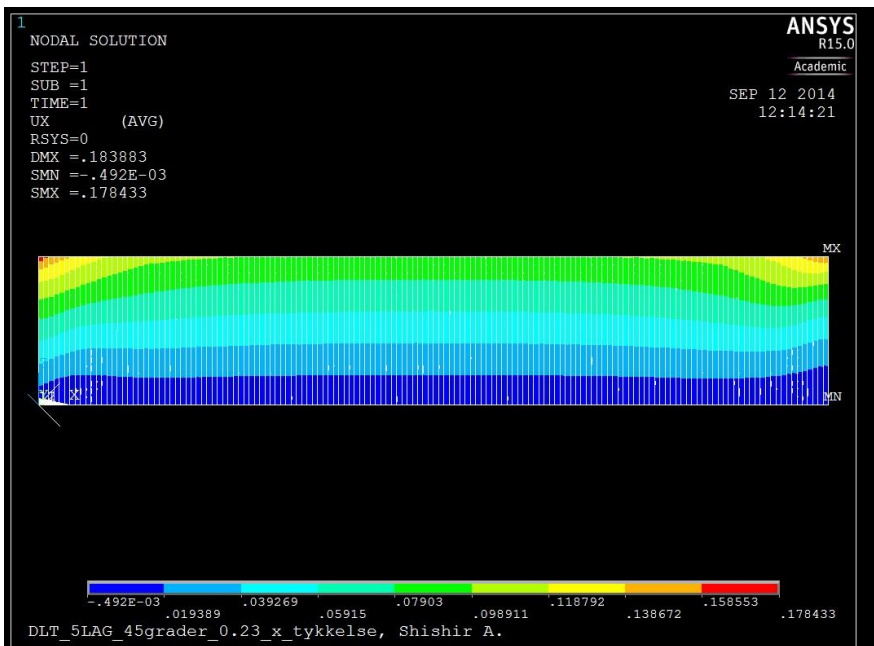


Figur 6.13: Visning DLT 4 LAG diagonale bord lik 0.8 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.556E-01\text{mm}$.

6.1.7 Maks Δx DLT 5 LAG diagonale bord lik 0.23 x tykkelse

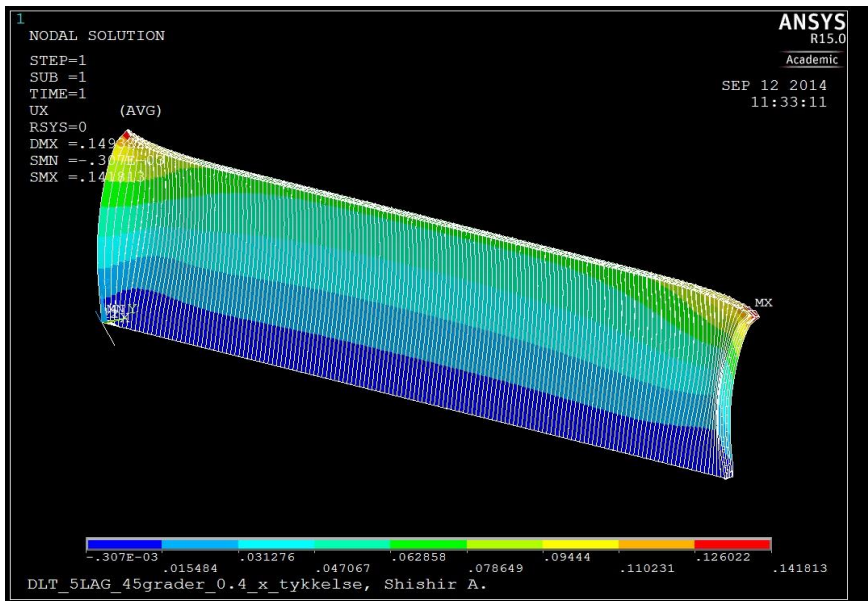


Figur 6.14: Skalert isometrisk visning DLT 5 LAG diagonale bord lik 0.23 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.993E-01$ mm.

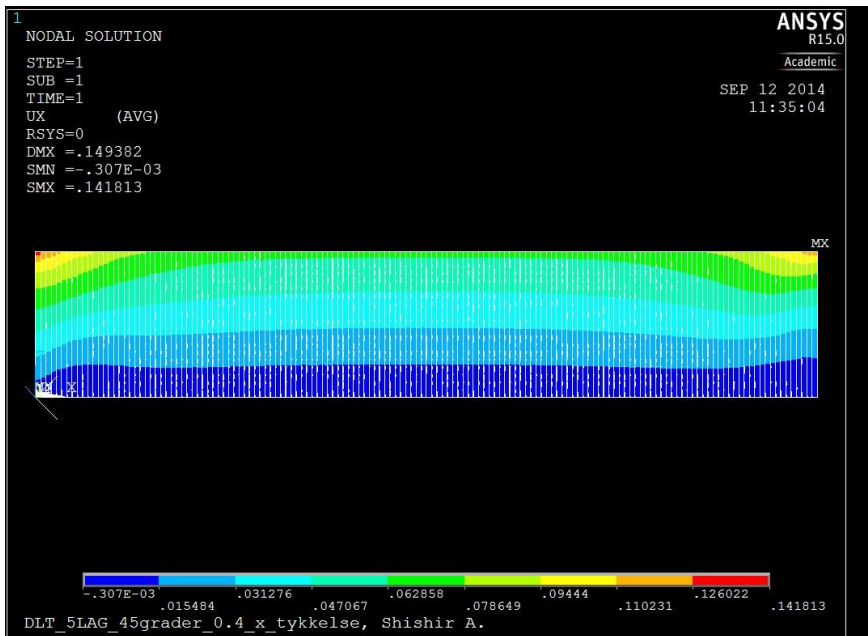


Figur 6.15: Visning DLT 5 LAG diagonale bord lik 0.23 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.993E-01$ mm.

6.1.8 Maks Δx DLT 5 LAG diagonale bord lik 0.4 x tykkelse

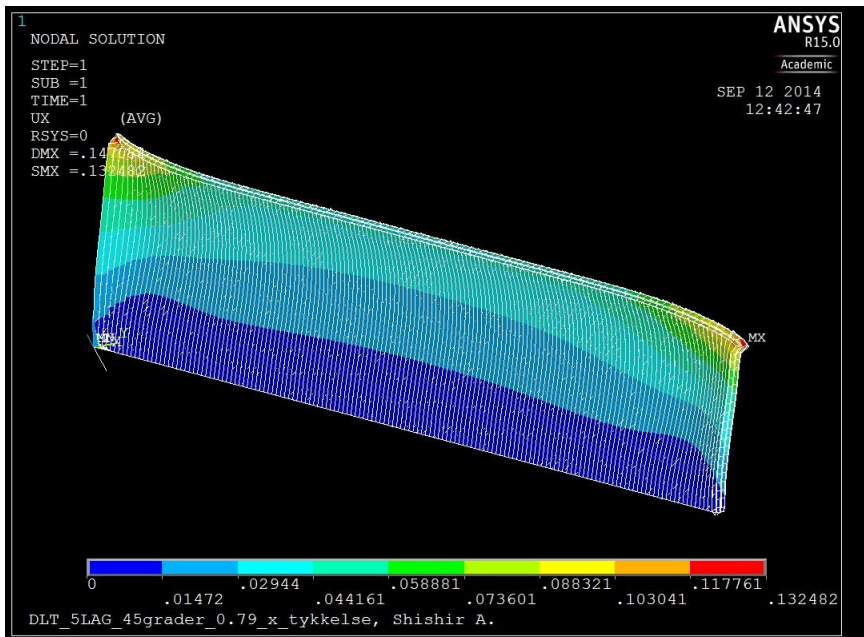


Figur 6.16: Skalert isometrisk visning DLT 5 LAG diagonale bord lik 0.4 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.711E-01\text{mm}$.

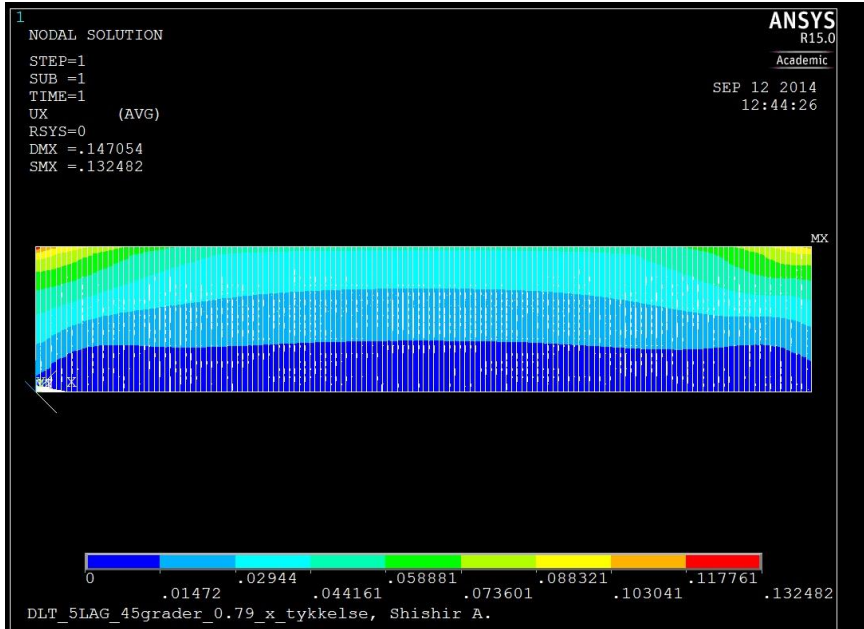


Figur 6.17: Visning DLT 5 LAG diagonale bord lik 0.4 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.711E-01\text{mm}$.

6.1.9 Maks Δx DLT 5 LAG diagonale bord lik 0.79 tykkelse

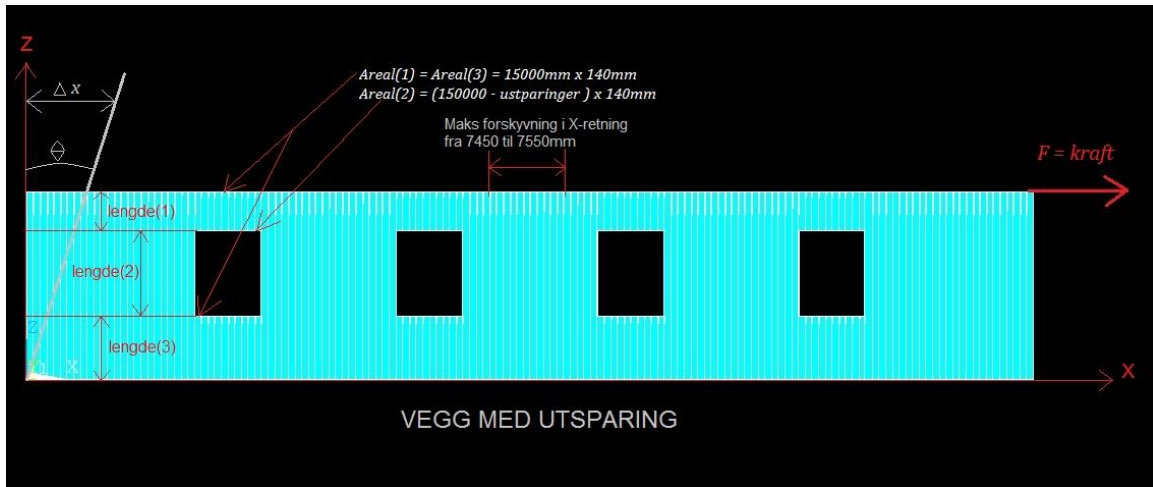


Figur 6.18: Skalert isometrisk visning DLT 5 LAG diagonale bord lik 0.79 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.562E-01$ mm.



Figur 6.19: Visning DLT 5 LAG diagonale bord lik 0.79 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.562E-01$ mm.

6.2 Forventet skjærdeformasjon Δx vegger med utsparinger (ANSYS)



Figur 6.20: Beregningsgrunnlag forskyvning X-retning vegg med utsparinger (ANSYS).

På grunn av utsparinger og følgelig mindre materiale er forventet skjærdeformasjon i X-retning større for vegg med utsparinger sammenliknet med skjærdeformasjon i X-retning for hel vegg.

$$\Delta x_{lengde(1)} = \frac{F \cdot l}{A \cdot G} = \frac{64000 \text{ N} \cdot 583 \text{ mm}}{2100000 \text{ mm}^2 \cdot 690 \text{ N/mm}^2} = 0,025 \text{ mm} \quad (6.3)$$

$$\Delta x_{lengde(2)} = \frac{F \cdot l}{A \cdot G} = \frac{64000 \text{ N} \cdot 1273 \text{ mm}}{1544200 \text{ mm}^2 \cdot 690 \text{ N/mm}^2} = 0,076 \text{ mm} \quad (6.4)$$

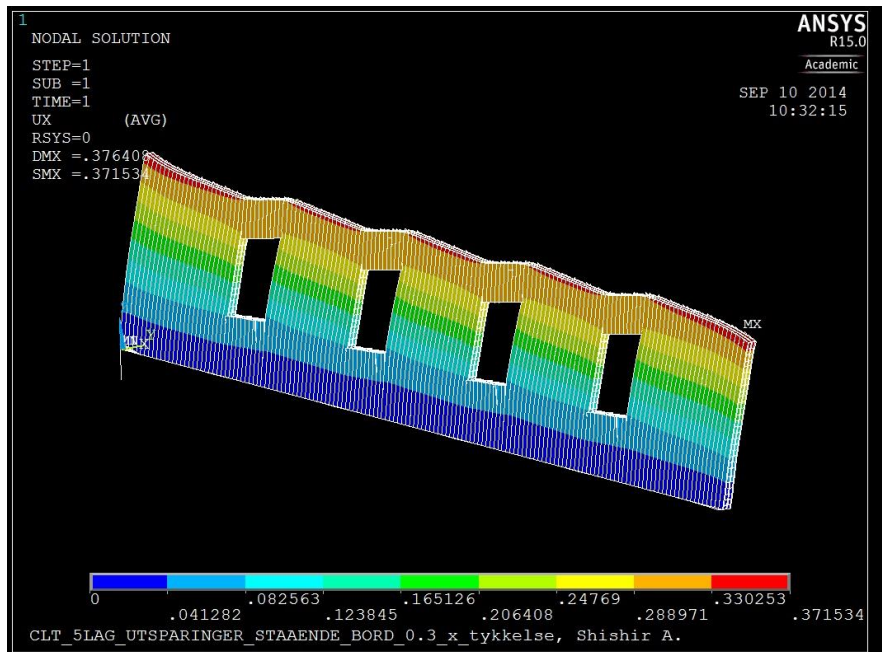
$$\Delta x_{lengde(3)} = \frac{F \cdot l}{A \cdot G} = \frac{64000 \text{ N} \cdot 944 \text{ mm}}{2100000 \text{ mm}^2 \cdot 690 \text{ N/mm}^2} = 0,042 \text{ mm} \quad (6.5)$$

$$\Delta x_{lengde(1)+lengde(2)+lengde(3)} = 0,143 \text{ mm} \quad (6.6)$$

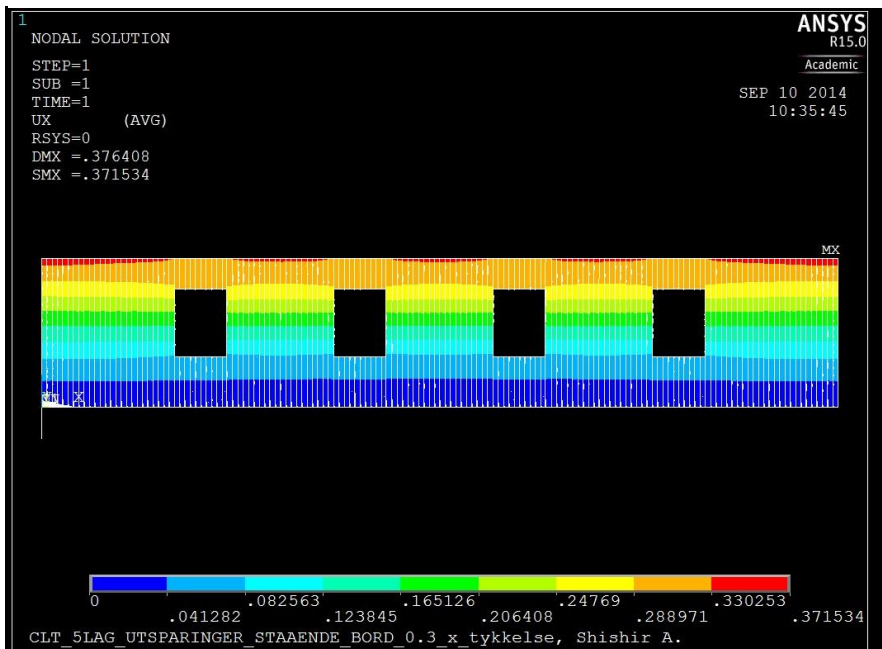
$$\Delta x_{vegg \text{ med utsparinger}} = 0,143 \text{ mm} > \Delta x_{hel \ vegg} = 0,124 \text{ mm} \quad (6.7)$$

0,143mm er omtrentlig verdi på forventet skjærdeformasjon i X-retning. Δx_{maks} er hentet fra 7450mm til 7550mm i X-retning ved høyde Z = 2800mm. Dette er gjort ettersom området vil gi en forskyvning i X-retning som er lite påvirket av randbetingelser sammenliknet med venstre eller høyre topphjørne av veggene.

6.2.1 Maks Δx CLT 5 LAG UTSPARINGER stående bord 0.3 x tykkelse

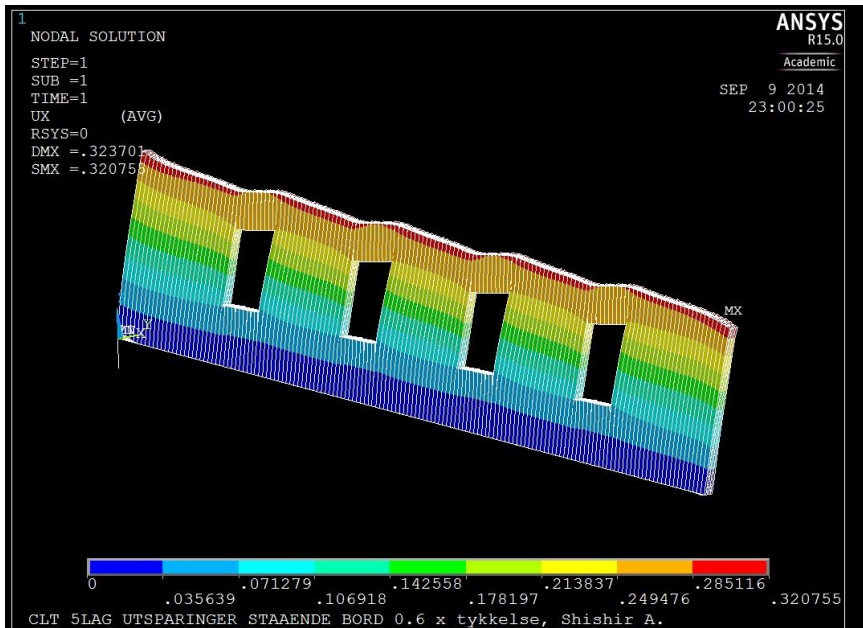


Figur 6.21: Skalert isometrisk visning CLT 5 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.3 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.354\text{mm}$.

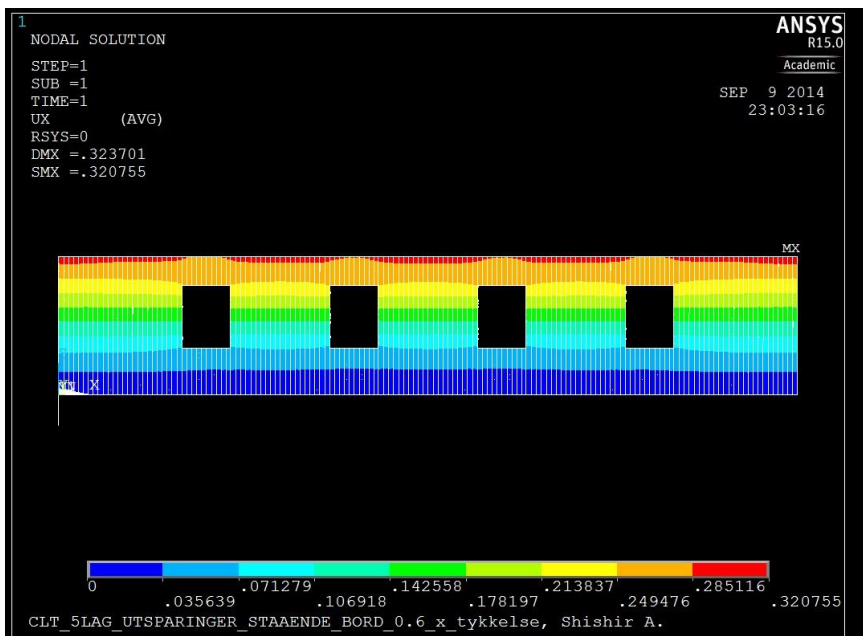


Figur 6.22: Visning CLT 5 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.3 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.354\text{mm}$.

6.2.2 Maks Δx CLT 5 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.6 x tykkelse

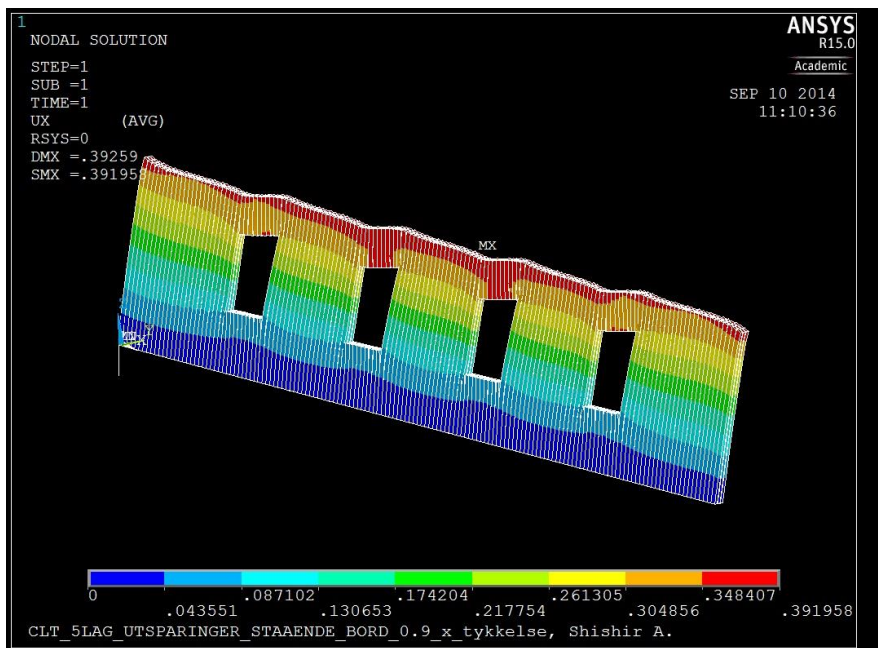


Figur 6.23: Skalert isometrisk visning CLT 5 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.6 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.311\text{mm}$.

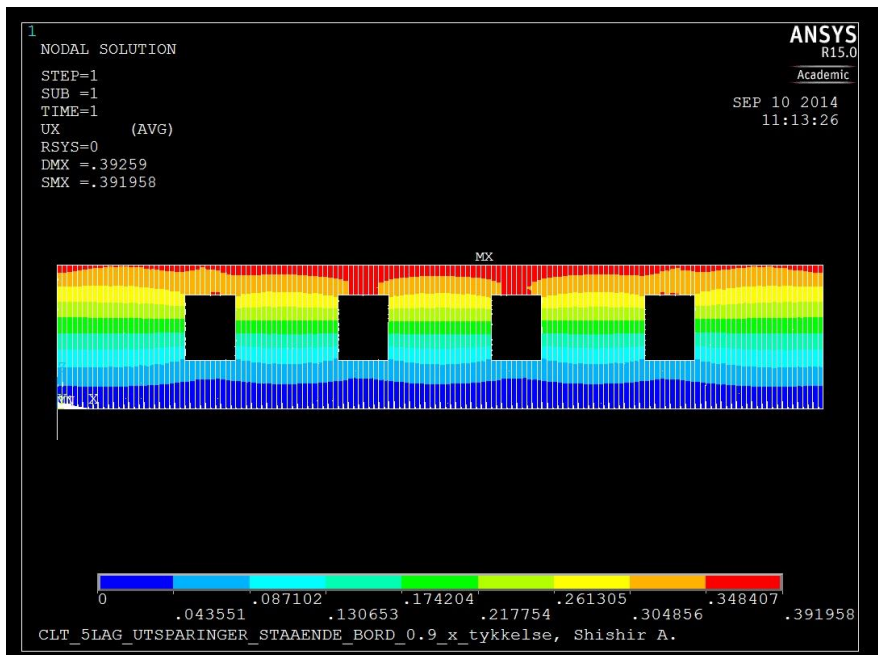


Figur 6.24: Visning CLT 5 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.6 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.311\text{mm}$.

6.2.3 Maks Δx CLT 5 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.9 x tykkelse

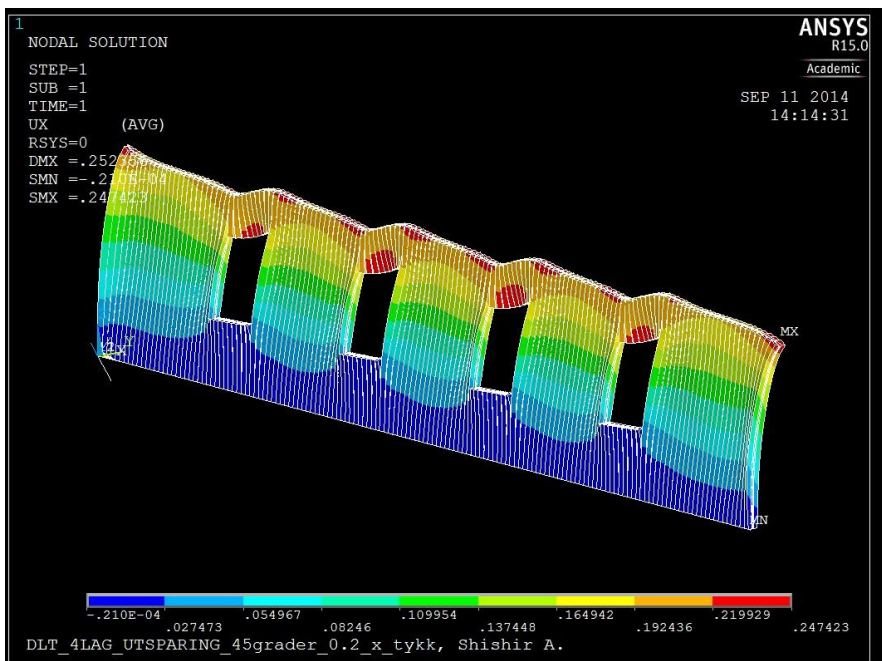


Figur 6.25: Skalert isometrisk visning CLT 5 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.9 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.387\text{mm}$.

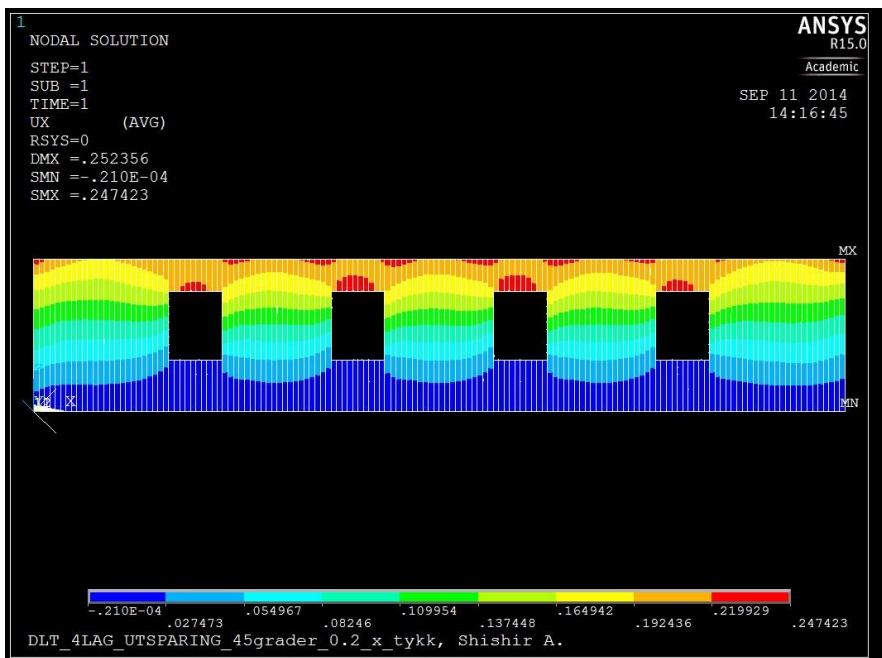


Figur 6.26: Visning CLT 5 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.9 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.387\text{mm}$.

6.2.4 Maks Δx DLT 4 LAG UTSPARINGER diagonale bord 0.2 x tykkelse

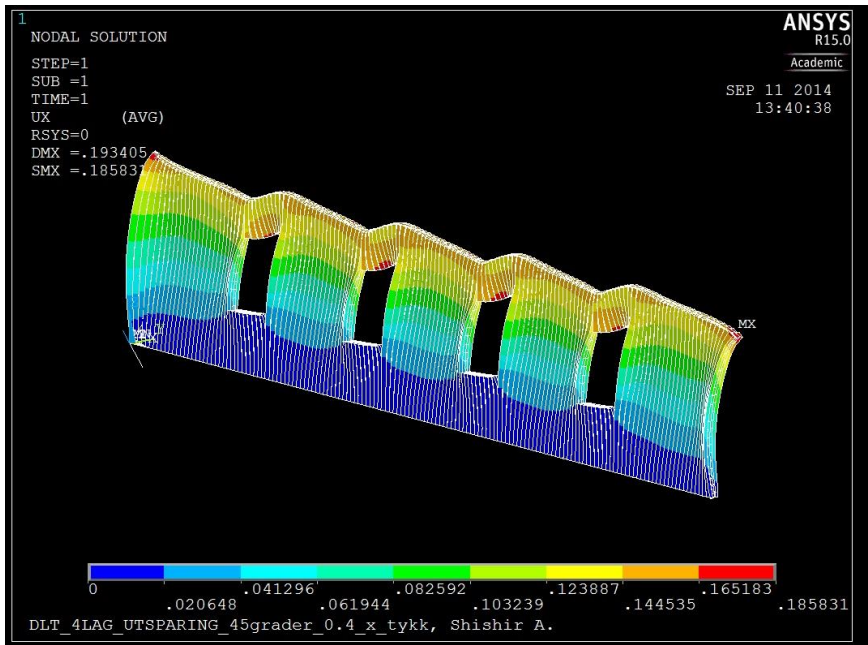


Figur 6.27: Skalert isometrisk visning DLT 4 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.2 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.220\text{mm}$.

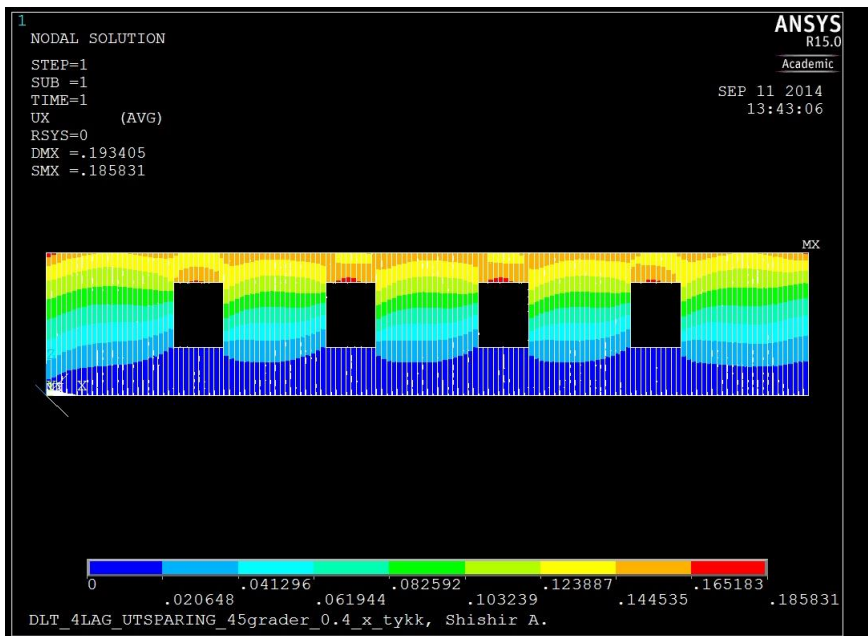


Figur 6.28: Visning DLT 4 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.2 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.220\text{mm}$.

6.2.5 Maks Δx DLT 4 LAG UTSPARINGER diagonale bord 0.4 x tykkelse

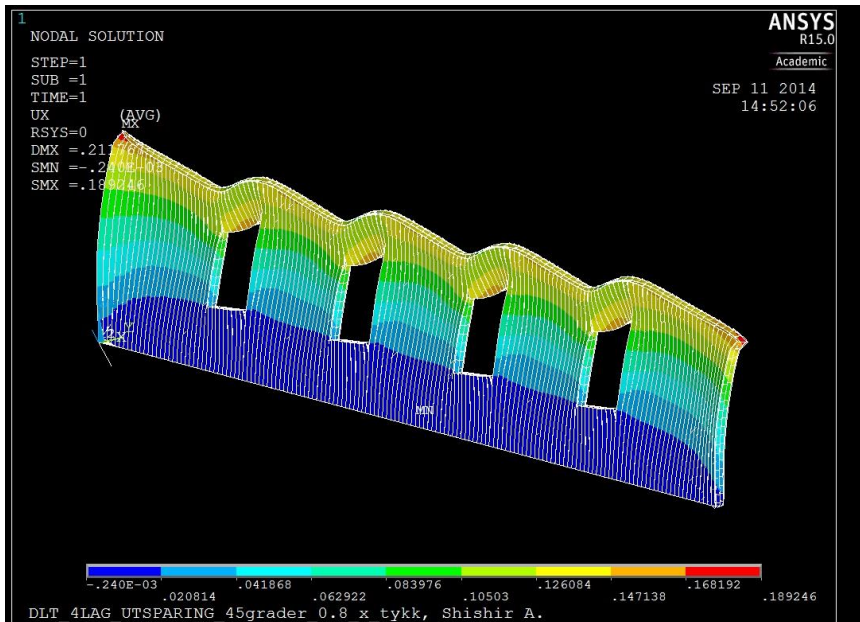


Figur 6.29: Skalert isometrisk visning DLT 4 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.4 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.161\text{mm}$.

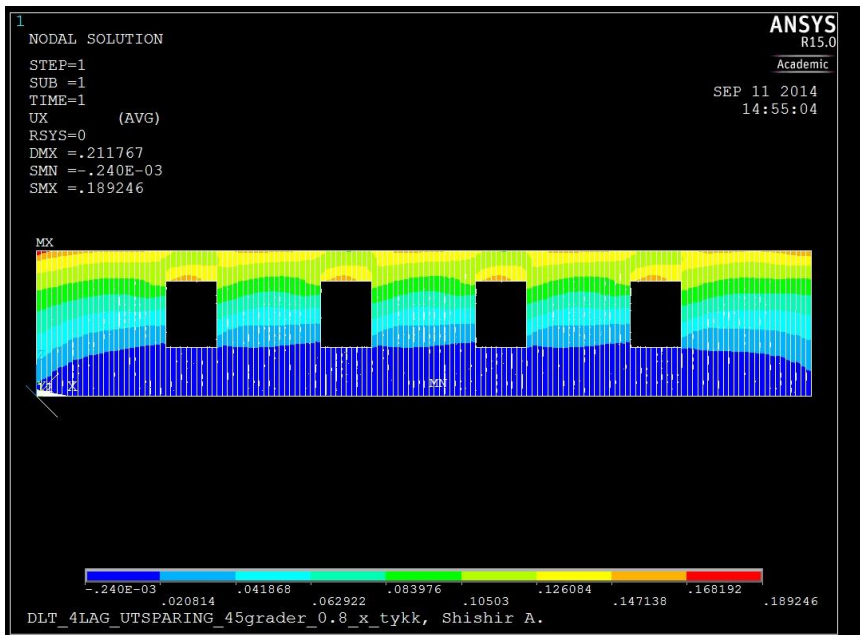


Figur 6.30: Visning DLT 4 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.4 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.161\text{mm}$.

6.2.6 Maks Δx DLT 4 LAG UTSPARINGER diagonale bord 0.8 x tykkelse

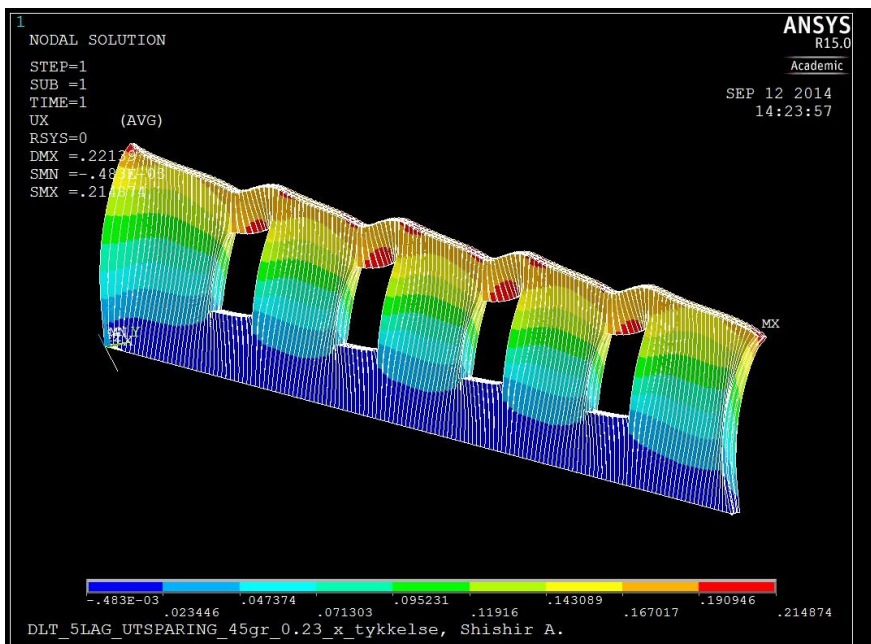


Figur 6.31: Skalert isometrisk visning DLT 4 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.8 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.155\text{mm}$.

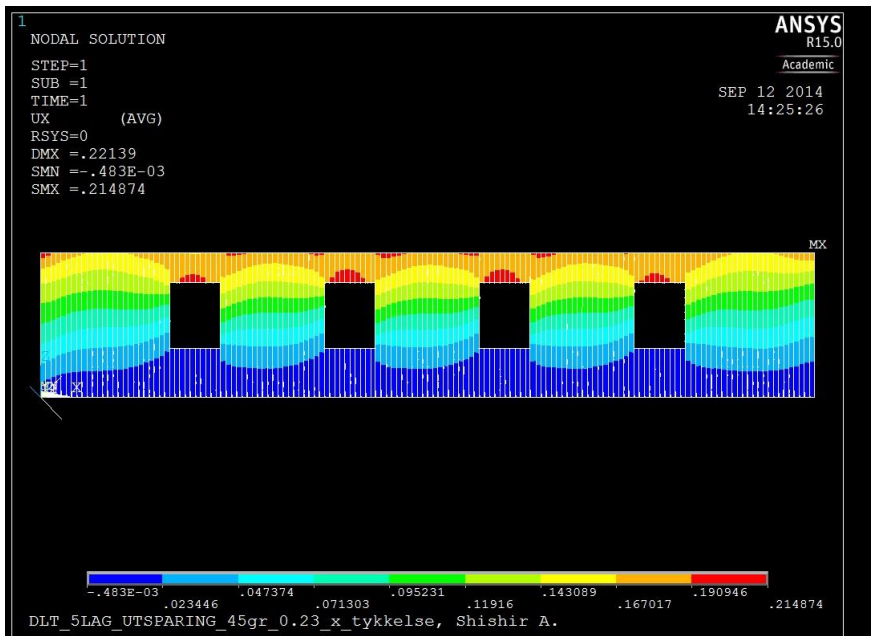


Figur 6.32: Visning DLT 4 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.8 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.155\text{mm}$.

6.2.7 Maks Δx DLT 5 LAG UTSPARINGER diagonale bord 0.23 x tykkelse

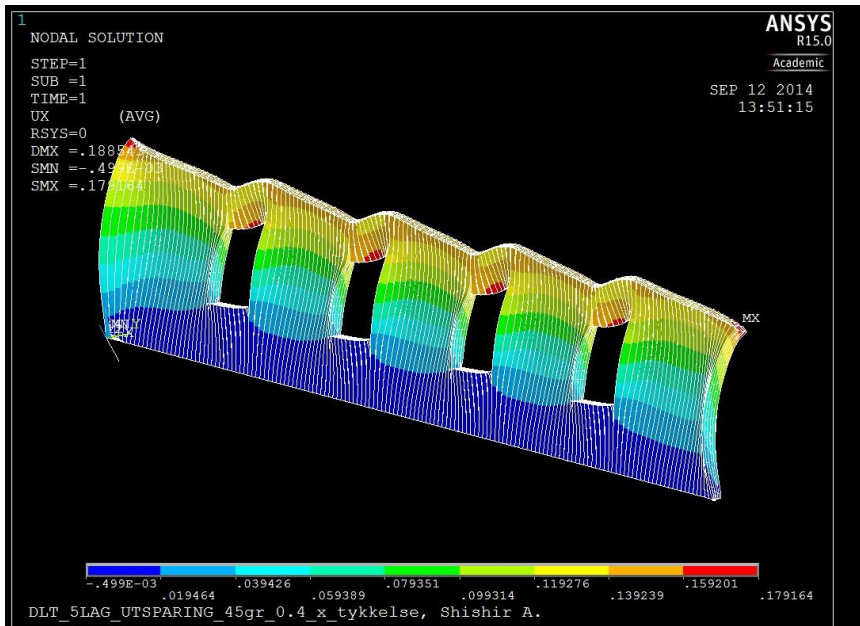


Figur 6.33: Skalert isometrisk visning DLT 5 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.23 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.187\text{mm}$.

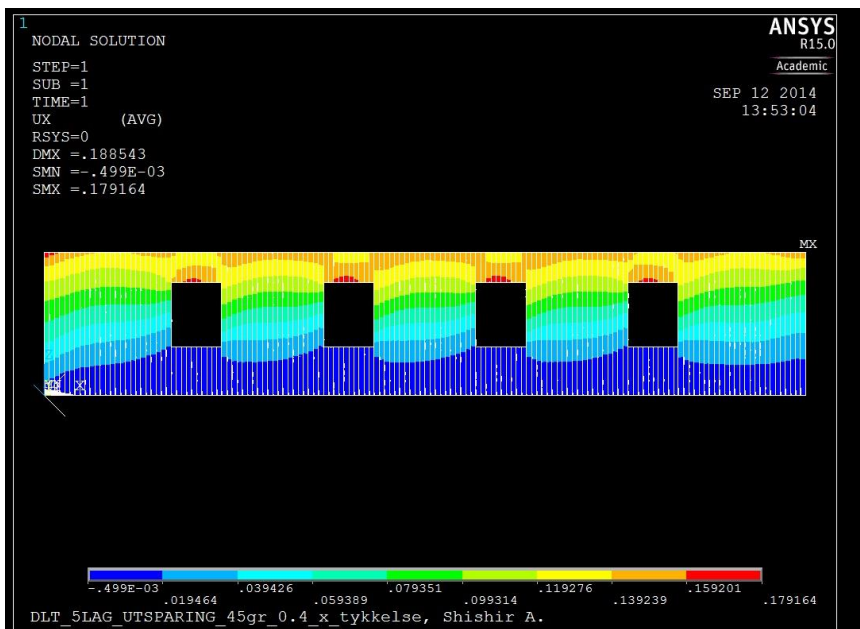


Figur 6.34: Visning DLT 5 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.23 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.187\text{mm}$.

6.2.8 Maks Δx DLT 5 LAG UTSPARINGER diagonale bord 0.4 x tykkelse

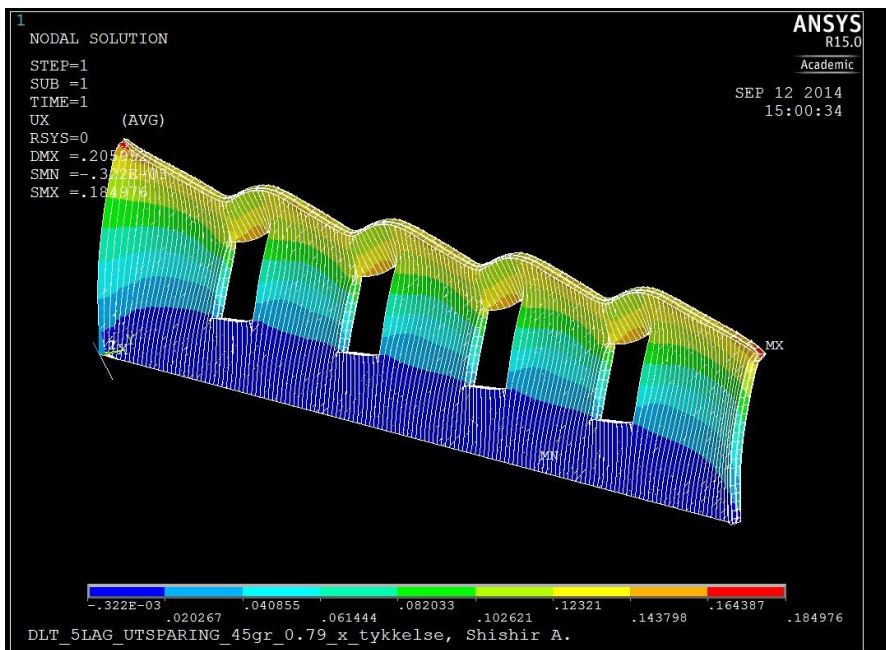


Figur 6.35: Skalert isometrisk visning DLT 5 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.4 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.154\text{mm}$.

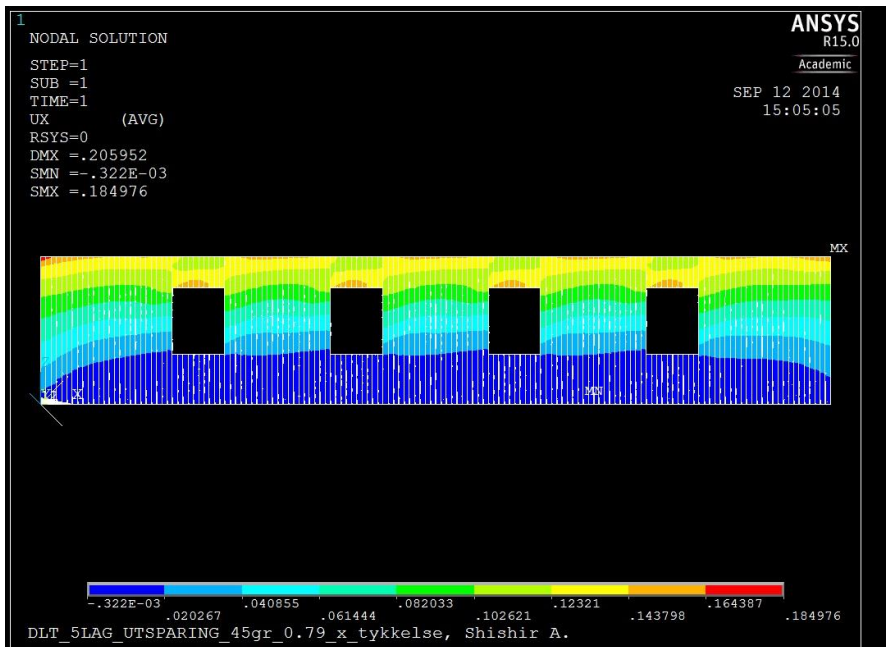


Figur 6.36: Visning DLT 5 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.4 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.154\text{mm}$.

6.2.9 Maks Δx DLT 5 LAG UTSPARINGER diagonale bord 0.79 x tykkelse



Figur 6.37: Skalert isometrisk visning DLT 5 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.79 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.154\text{mm}$.



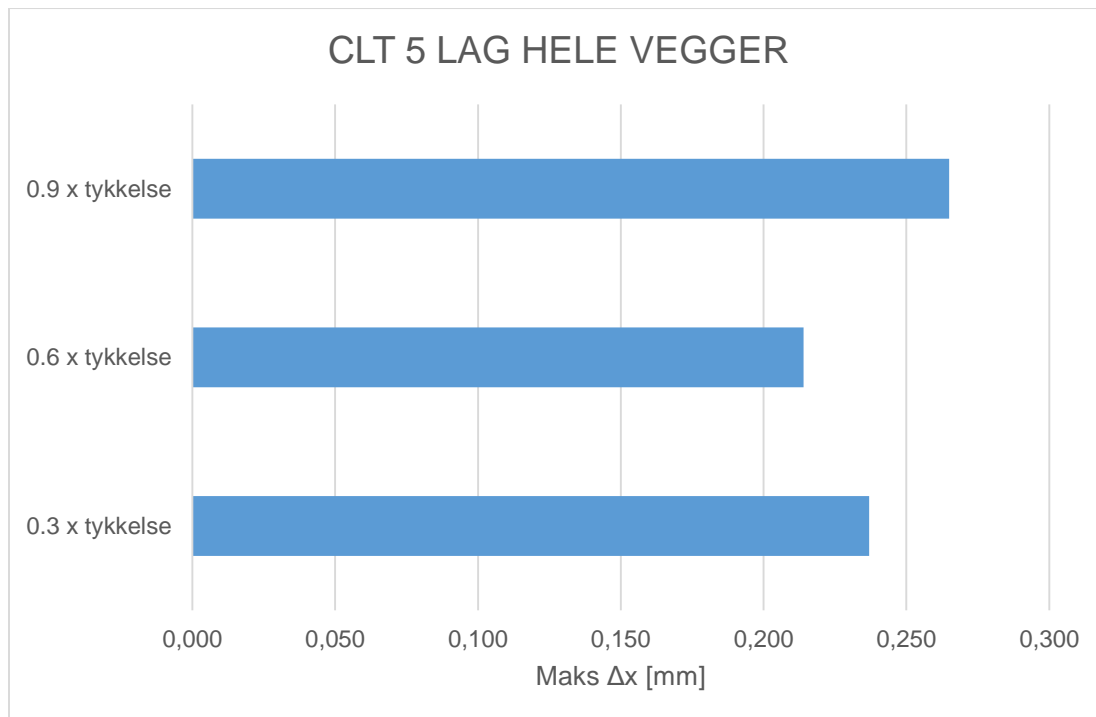
Figur 6.38: Visning DLT 5 LAG UTSPARINGER stående bord lik 0.79 x tykkelse (ANSYS). Maks $\Delta x = 0.154\text{mm}$.

6.3 Grafisk framstilling resultater hele vegger

CLT 5 LAG HELE VEGGER

	Stående bord lik 0.3 x tykkelse	Stående bord lik 0.6 x tykkelse	Stående bord lik 0.9 x tykkelse
Maks Δx i [mm]	0.237	0.214	0.265

Tabell 5: Resultater CLT 5 LAG hele vegger.

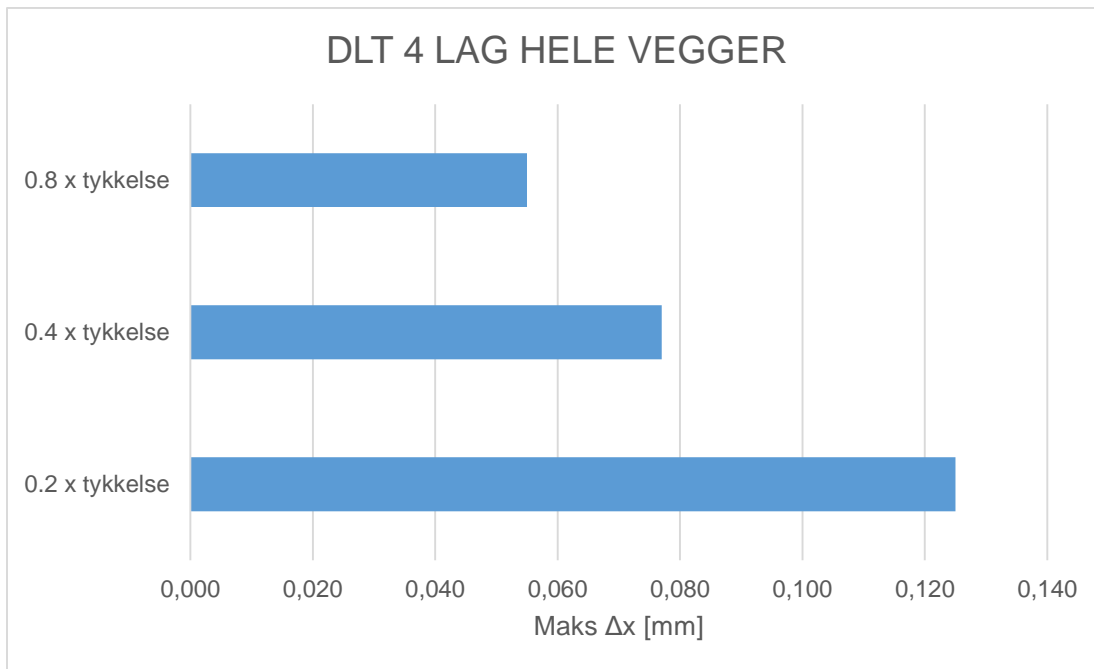


Figur 6.39: Grafisk framstilling resultater CLT 5 LAG hele vegger.

DLT 4 LAG HELE VEGGER

	Diagonale bord lik 0.2 x tykkelse	Diagonale bord lik 0.4 x tykkelse	Diagonale bord lik 0.8 x tykkelse
Maks Δx i [mm]	0.125	0.77E-01	0.56E-01

Tabell 6: Resultater DLT 4 LAG hele vegger.

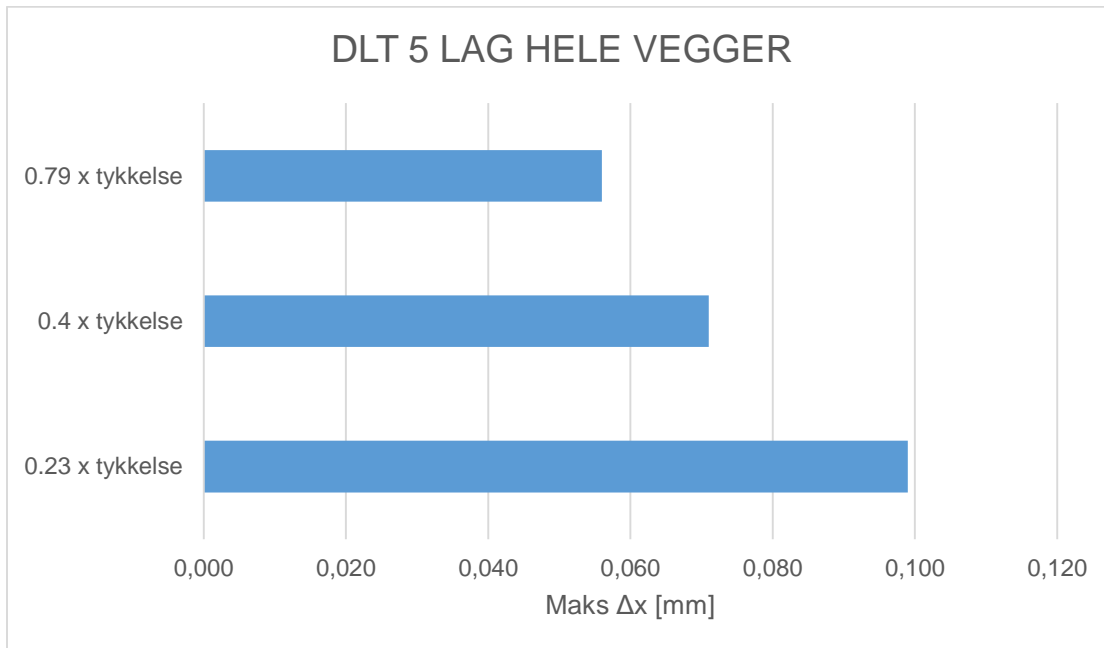


Figur 6.40: Grafisk framstilling resultater DLT 4 LAG hele vegger.

DLT 5 LAG HELE VEGGER

	Diagonale bord lik 0.23 x tykkelse	Diagonale bord lik 0.4 x tykkelse	Diagonale bord lik 0.79 x tykkelse
Maks Δx i [mm]	0.99E-01	0.71E-01	0.56E-01

Tabell 7: Resultater DLT 5 LAG hele vegger.



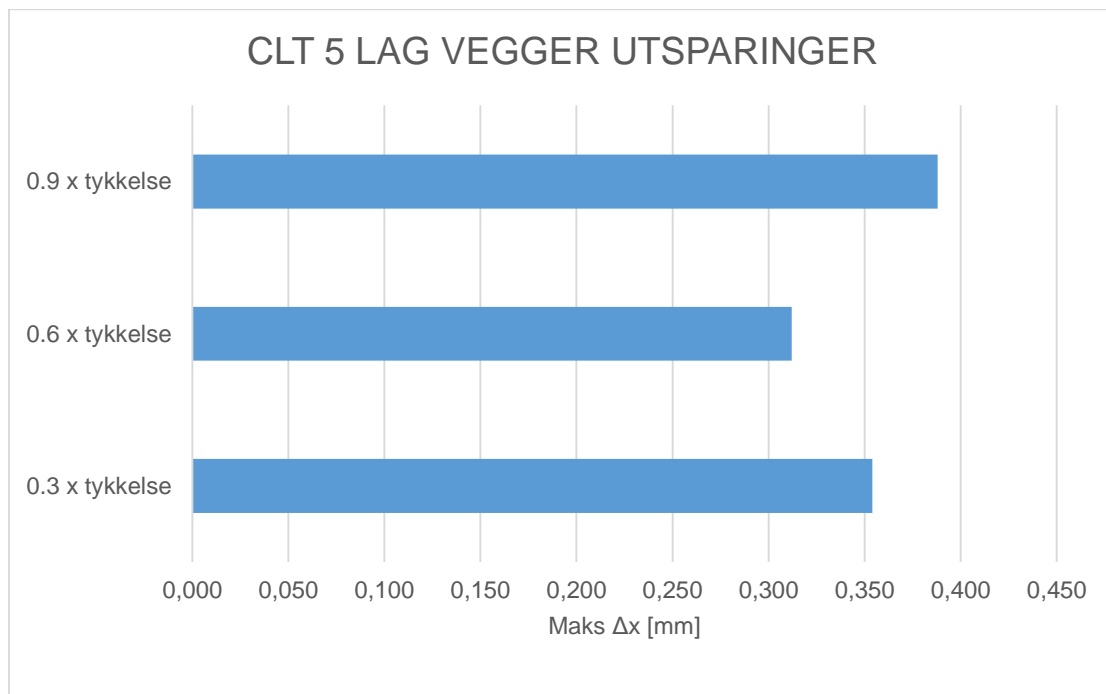
Figur 6.41: Grafisk framstilling resultater DLT 5 LAG hele vegger.

6.4 Grafisk framstilling resultater vegger med utsparinger

CLT 5 LAG VEGGER UTSPARINGER

	Stående bord lik 0.3 x tykkelse	Stående bord lik 0.6 x tykkelse	Stående bord lik 0.9 x tykkelse
Maks Δx i [mm]	0.354	0.312	0.388

Tabell 8: Resultater CLT 5 LAG vegger med utsparinger.

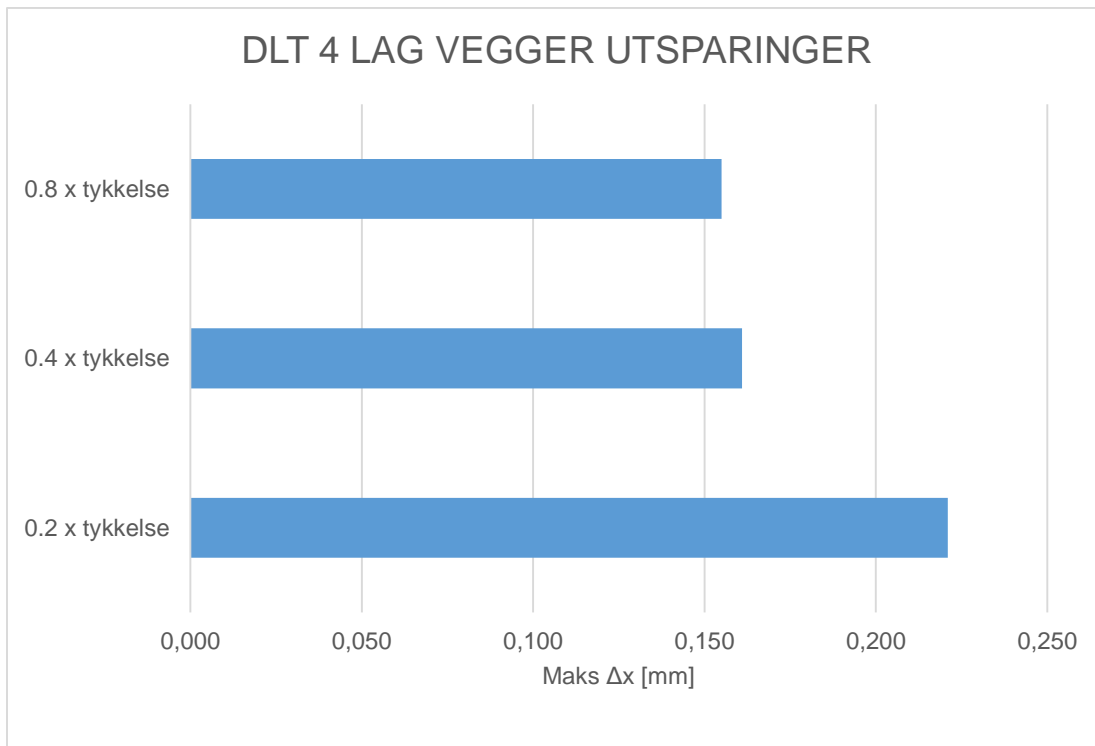


Figur 6.42: Grafisk framstilling resultater CLT 5 LAG vegger med utsparinger.

DLT 4 LAG VEGGER UTSPARINGER

	Diagonale bord lik 0.2 x tykkelse	Diagonale bord lik 0.4 x tykkelse	Diagonale bord lik 0.8 x tykkelse
Maks Δx i [mm]	0.221	0.161	0.155

Tabell 9: Resultater DLT 4 LAG vegger med utsparinger.

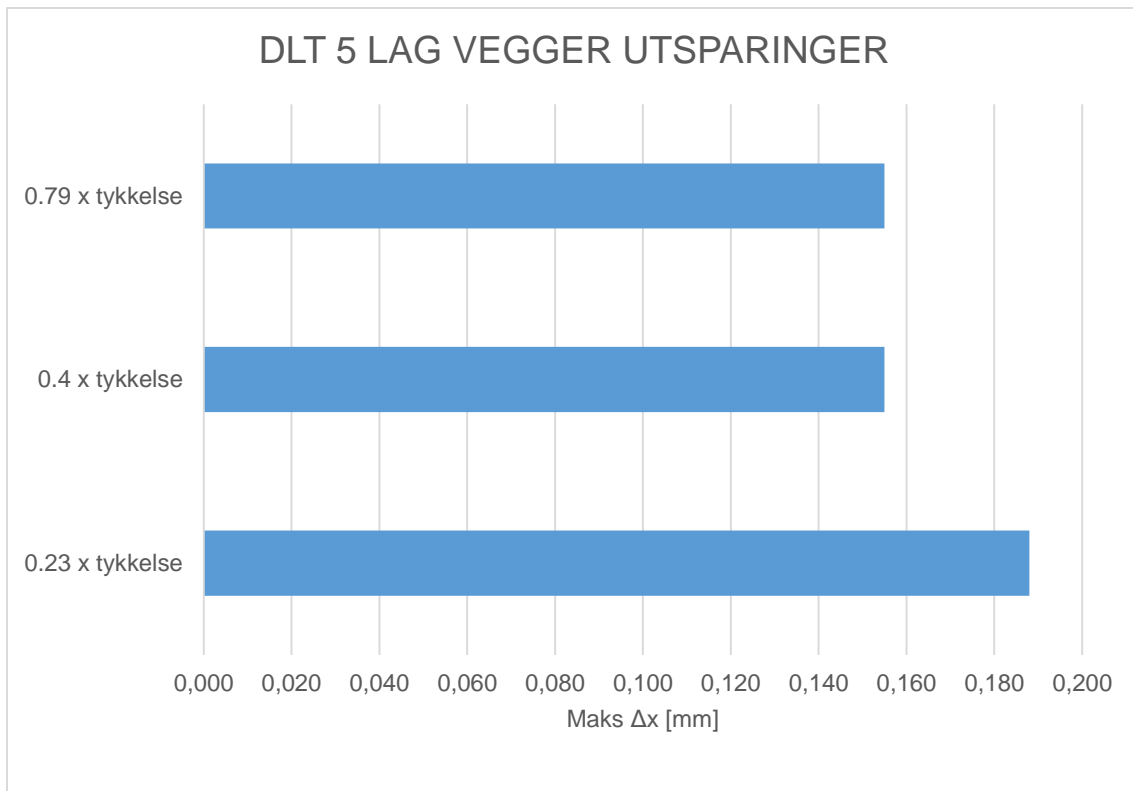


Figur 6.43: Grafisk framstilling resultater DLT 4 LAG vegger med utsparinger.

DLT 5 LAG VEGGER UTSPARINGER

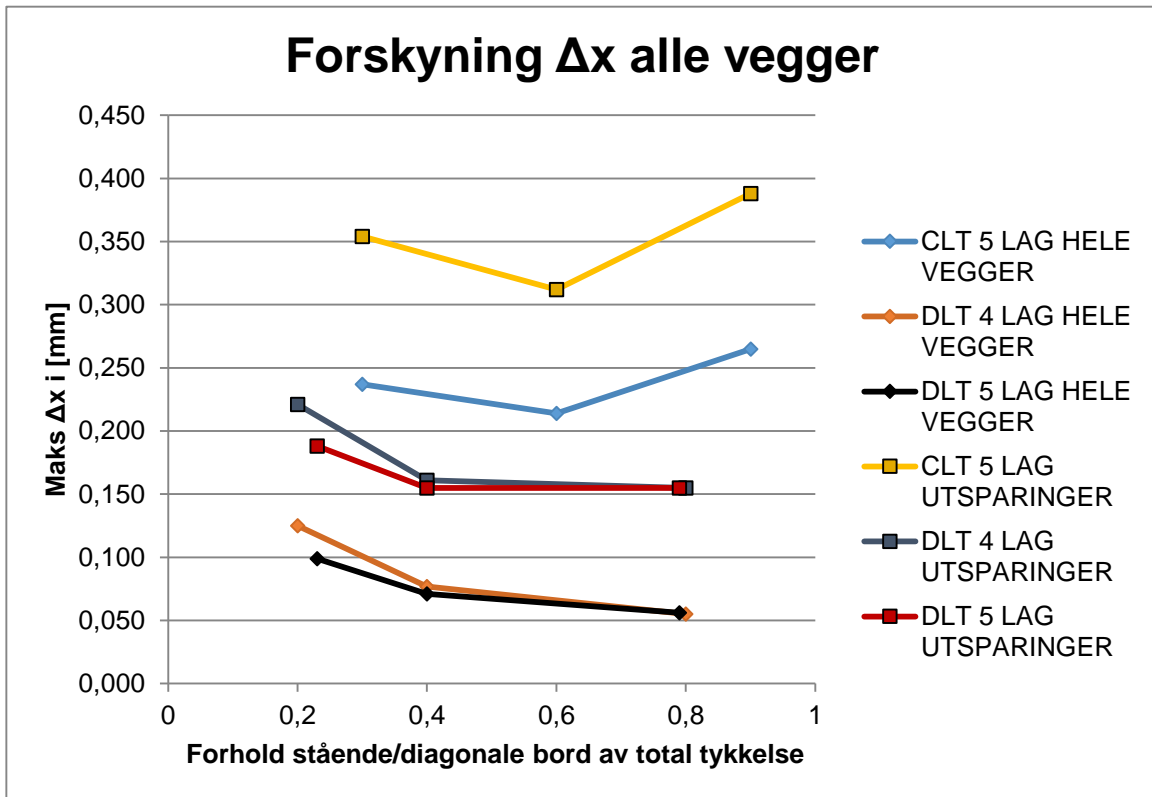
	Diagonale bord lik 0.23 x tykkelse	Diagonale bord lik 0.4 x tykkelse	Diagonale bord lik 0.79 x tykkelse
Maks Δx i [mm]	0.188	0.155	0.155

Tabell 10: Resultater DLT 5 LAG vegger med utsparinger.



Figur 6.44: Grafisk framstilling resultater DLT 5 LAG vegger med utsparinger.

6.5 Grafisk sammenlikning resultater hele vegger og vegger med utsparinger



Figur 6.45: Grafisk sammenlikning resultater hele vegger og vegger med utsparinger.

7 DISKUSJON

7.1 Generelt

Tykkelse er den eneste parameteren som er undersøkt i de seks ulike veggtypene. Tre av veggtypene er hele vegger og de tre andre veggtypene er vegger med utsparinger. For CLT HELE VEGGER og VEGGER UTSPARINGER utgjør de stående bordene 0.3xtykkelse, 0.6xtykkelse og 0.9xtykkelse. Disse tre ulike sjiktsammensetningene danner grunnlaget for forholdet mellom total tykkelse på stående bord av total veggtykkelse og forholdets effekt på skjærdeformasjonen i CLT HELE VEGGER og VEGGER UTSPARINGER. For DLT 4 LAG HELE VEGGER og VEGGER UTSPARINGER utgjør de diagonale bordene 0.2xtykkelse, 0.4xtykkelse og 0.8xtykkelse. For DLT 5 LAG HELE VEGGER og VEGGER UTSPARINGER utgjør de diagonale bordene 0.23xtykkelse og 0.4xtykkelse og 0.79xtykkelse. Disse seks ulike sjiktsammensetningene danner følgelig grunnlaget for forholdet mellom total tykkelse på diagonale bord av total veggtykkelse og forholdets effekt på skjærdeformasjonen i DLT 4 LAG HELE VEGGER og VEGGER UTSPARINGER og DLT 5 LAG HELE VEGGER og VEGGER UTSPARINGER.

ANSYS gir kun omtrentlige resultatverdier. For CLT 5 LAG HELE VEGGER er forskyvningen i ANSYS noe høyere enn den beregnede forskyvningen på 0,124mm. For DLT 4 LAG HELE VEGGER og DLT 5 LAG HELE VEGGER er forskyvningen i ANSYS noe lavere enn den beregnede forskyvningen. Dette er ønskelig ettersom DLT i utgangspunktet ble vurdert som et stivere massivtre-element sammenliknet med CLT. For massivtre-elementene med utsparinger er forventet beregnet forskyvning, Δx , noe høyere sammenliknet med forventet forskyvning, Δx , hele massivtre-elementer. Dette er forventet på grunn av mindre areal som opptar skjærstrømmene der det er utsparinger. For CLT 5 LAG VEGGER UTSPARINGER er forskyvningen i ANSYS to ganger større enn den beregnede forskyvningen. For DLT 4 LAG VEGGER UTSPARINGER og DLT 5 LAG VEGGER UTSPARINGER er forskyvningen i ANSYS nær den beregnede forskyvningen på 0,143mm. Dette gjenspeiles også i ANSYS, noe som er ønskelig. Se figur 6.45 for sammenlikning av resultater hele vegger og vegger med utsparinger.

7.2 Hele vegger

(Alle skjærdeformasjonene gjelder nodeforskyvning i X-retning fra 7450mm til 7550mm).

For CLT 5 LAG HEL VEGG 0.3xtykkelse er maks skjærdeformasjon lik 0,237mm. For CLT 5 LAG HEL VEGG 0.6xtykkelse er maks skjærdeformasjon lik 0,214mm. For CLT 5 LAG HEL VEGG 0.9xtykkelse er maks skjærdeformasjon lik 0,265mm. CLT 5 LAG HEL VEGG 0.3xtykkelse gir en økning i skjærdeformasjonen på ca. 11% sammenliknet med CLT 5 LAG HEL VEGG 0.6xtykkelse. CLT 5 LAG HEL VEGG 0.9xtykkelse gir en økning i skjærdeformasjonen på ca. 24% sammenliknet med CLT 5 LAG HEL VEGG 0.6xtykkelse. Ingen klar sammenheng mellom økende total sjiktstørrelse stående bord av total veggtykkelse og skjærdeformasjon. En økning fra 0.3xtykkelse til 0.6xtykkelse gir en reduksjon av skjærdeformasjon og en økning fra 0.6xtykkelse til 0.9xtykkelse gir en økning av skjærdeformasjonen. Se figur 6.39.

For DLT 4 LAG HEL VEGG 0.2xtykkelse er maks skjærdeformasjon lik 0,125mm. For DLT 4 LAG HEL VEGG 0.4xtykkelse er maks skjærdeformasjon lik 0.077mm. For DLT 4 LAG HEL VEGG 0.8xtykkelse er maks skjærdeformasjon lik 0.056mm. DLT 4 LAG 0.2xtykkelse gir en økning i maks skjærdeformasjon på ca. 62% sammenliknet med DLT 4 LAG HEL VEGG 0.4xtykkelse. DLT 4 LAG 0.8xtykkelse gir en reduksjon i maks skjærdeformasjon på ca. 27% sammenliknet med DLT 4 LAG 0.4xtykkelse. For DLT 4 LAG HELE VEGGER er det en viss sammenheng mellom økende total sjiktstørrelse diagonale bord av total veggtykkelse og skjærdeformasjon. En økning av total sjiktstørrelse diagonale bord av total veggtykkelse gir en reduksjon i skjærdeformasjonen. Se figur 6.40.

For DLT 5 LAG HEL VEGG 0.23xtykkelse er maks skjærdeformasjon lik 0,099mm. For DLT 5 LAG HEL VEGG 0.4xtykkelse er maks skjærdeformasjon lik 0.071mm. For DLT 5 LAG HEL VEGG 0.79xtykkelse er maks skjærdeformasjon lik 0.056mm. DLT 5 LAG 0.23xtykkelse gir en økning i maks skjærdeformasjon på ca. 39% sammenliknet med DLT 5 LAG HEL VEGG 0.4xtykkelse. DLT 5 LAG 0.79xtykkelse gir en reduksjon i maks skjærdeformasjon på ca. 21% sammenliknet med DLT 5 LAG 0.4xtykkelse. For DLT 5 LAG HELE VEGGER er det også en viss sammenheng mellom total sjiktstørrelse diagonale bord av total veggtykkelse og skjærdeformasjon. En økning av total

sjiktstørrelse diagonale bord av total veggtykkelse gir en reduksjon i skjærdeformasjonen. Se figur 6.41.

7.3 Vegger med utsparinger

(Alle skjærdeformasjonene gjelder nodeforskyvning i X-retning fra 7450mm til 7550mm).

For CLT 5 LAG VEGG UTSPARINGER 0.3xtykkelse er maks skjærdeformasjon lik 0,354mm. For CLT 5 LAG VEGG UTSPARINGER 0.6xtykkelse er maks skjærdeformasjon lik 0,312mm. For CLT 5 LAG VEGG UTSPARINGER 0.9xtykkelse er maks skjærdeformasjon lik 0,388mm. CLT 5 LAG VEGG UTSPARINGER 0.3xtykkelse gir en økning i skjærdeformasjonen på ca. 13% sammenliknet med CLT 5 LAG VEGG UTSPARINGER 0.6xtykkelse. CLT 5 LAG VEGG UTSPARINGER 0.9xtykkelse gir en økning i skjærdeformasjonen på ca. 24% sammenliknet med CLT 5 LAG HEL VEGG 0.6xtykkelse. I likhet med CLT 5 LAG HELE VEGGER er det heller ingen klar sammenheng mellom total sjiktstørrelse stående bord av total veggtykkelse og skjærdeformasjon blant CLT 5 LAG VEGGER UTSPARINGER. En økning fra 0.3xtykkelse til 0.6xtykkelse gir en reduksjon av skjærdeformasjonen og en økning fra 0.6xtykkelse til 0.9xtykkelse gir en økning av skjærdeformasjonen. Se figur 6.42.

For DLT 4 LAG VEGG UTSPARINGER 0.2xtykkelse er maks skjærdeformasjon lik 0,221mm. For DLT 4 LAG VEGG UTSPARINGER 0.4xtykkelse er maks skjærdeformasjon lik 0,161mm. For DLT 4 LAG VEGG UTSPARINGER 0.8xtykkelse er maks skjærdeformasjon lik 0,155mm. DLT 4 LAG VEGG UTSPARINGER 0.2xtykkelse gir en økning i maks skjærdeformasjon på ca. 37% sammenliknet med DLT 4 LAG HEL VEGG 0.4xtykkelse. DLT 4 LAG VEGG UTSPARINGER 0.8xtykkelse gir en reduksjon i maks skjærdeformasjon på ca. 4% sammenliknet med DLT 4 LAG 0.4xtykkelse. For DLT 4 LAG VEGGER UTSPARINGER er det også her en liten sammenheng mellom total sjiktstørrelse diagonale bord av total veggtykkelse og skjærdeformasjon. En økning av total sjiktstørrelse diagonale bord av total veggtykkelse gir en reduksjon i skjærdeformasjonen. Prosenttallene er av lavere verdi i DLT 4 LAG VEGGER UTSPARINGER sammenliknet med DLT 4 LAG HELE VEGGER. Se figur 6.43, figur 6.40 og figur 6.45.

2014

For DLT 5 LAG VEGG UTSPARINGER 0.23xtykkelse er maks skjærdeformasjon lik 0,188mm. For DLT 5 LAG VEGG UTSPARINGER 0.4xtykkelse er maks skjærdeformasjon lik 0,155mm. For DLT 5 LAG VEGG UTSPARINGER 0.79xtykkelse er maks skjærdeformasjon lik 0,155mm.

DLT 5 LAG 0.23xtykkelse gir en økning i maks skjærdeformasjon på ca. 21% sammenliknet med DLT 5 LAG VEGG UTSPARINGER 0.4xtykkelse. DLT 5 LAG VEGG UTSPARINGER 0.79xtykkelse har lik maks skjærdeformasjon sammenliknet med DLT 5 LAG VEGG UTSPARINGER 0.4xtykkelse. For DLT 5 LAG VEGGER UTSPARINGER er det en viss sammenheng mellom total sjiktstørrelse diagonale bord av total veggtykkelse og skjærdeformasjon fra 0.23xtykkelse til 0.4xtykkelse. En økning av total sjiktstørrelse diagonale bord av total veggtykkelse gir en reduksjon i skjærdeformasjonen fra 0.23xtykkelse til 0.4xtykkelse. Ingen reduksjon eller økning i skjærdeformasjonen fra 0.4xtykkelse til 0.79xtykkelse. Se figur 6.44, figur 6.41 og figur 6.45.

8 KONKLUSJON

Målet med denne oppgaven er å bestemme skjærstivheten til CLT- og DLT-vegger og undersøke effekt av sjiktstørrelse på skjærstivheten på hele vegger og vegger med utsparinger.

Analyseresultatene i ANSYS viser at DLT 4 LAG HELE VEGGER og DLT 5 LAG HELE VEGGER har en horisontal forskyvning i X-retning lik 1/4 av den horisontale forskyvningen i X-retning til CLT 5 LAG HELE VEGGER.

Blant CLT 5 LAG HELE VEGGER, gir veggen der stående bord utgjør 60% av total veggtykkelse, størst skjærstivhet. Blant DLT 4 LAG HELE VEGGER gir veggen der diagonale bord utgjør 80% av total veggtykkelse størst skjærstivhet. Blant DLT 5 LAG HELE VEGGER gir veggen der diagonale bord utgjør 79% av total veggtykkelse størst skjærstivhet.

Analyseresultatene i ANSYS viser videre at DLT 4 LAG VEGGER UTSPARINGER og DLT 5 LAG VEGGER UTSPARINGER har en horisontal forskyvning i X-retning lik 1/2 av den horisontale forskyvningen i X-retning til CLT 5 LAG VEGGER UTSPARINGER.

Blant CLT 5 LAG HELE VEGGER gir veggen der stående bord utgjør 60% av total veggtykkelse størst skjærstivhet. Blant DLT 4 LAG HELE VEGGER gir veggen der diagonale bord utgjør 80% av total veggtykkelse størst skjærstivhet. Blant DLT 5 LAG HELE VEGGER gir veggen der diagonale bord utgjør 40% og 79% av total veggtykkelse størst skjærstivhet. Analysene viser at DLT 4 LAG HELE VEGGER og DLT 4 LAG VEGGER UTSPARINGER er veggene der økt total sjiktstørrelse av diagonale bord har størst effekt på skjærstivheten. Skjærstivheten er i dette tilfellet høyere der diagonale bord utgjør 80% av total veggtykkelse sammenliknet med vegg der diagonale bord utgjør 40% av total veggtykkelse. To diagonale sjikt inntil hverandre har en viss høyere virkning på skjærstivheten sammenliknet med vegger der stående bord skiller de diagonale sjiktene. Se figur 6.45.

Effekten av å ha diagonale bord i massivtre-vegger gir økt skjærstivhet utsatt for skjærstrømmer forårsaket av horisontal vindpåkjenning. I krysslimte massivtre-elementer blir det meste av kreftene, grunnet skjærstrømmer, tatt opp som ren skjærdeformasjon av bordene, rulleskjær og torsjon i limfugen mellom sjiktene. Se figur 3.9 og figur 3.10.

2014

I diagonallimte massivtre-elementer blir det meste av kreftene, grunnet skjærstrømmer, tatt opp av diagonale bord som trykk- og strekkstaver i tillegg til ren skjærdeformasjon og noe rulleskjær. DLT gir mindre torsjonsvirkning i limfugen mellom sjiktene enn CLT og diagonale bordene fungerer mer som en lang rekke med avstivere.

Analysene i ANSYS viser at DLT (diagonale bord lik -45° og 45°) er et vesentlig stivere materiale enn CLT (vinkelen mellom stående bord og liggende bord lik 90°) utsatt for skjærstrømmer på grunn av horisontal vindpåkjenning. For hele vegger er DLT omtrentlig tre og en halv gang stivere enn CLT og for vegger med utsparinger er DLT omtrentlig to ganger stivere enn CLT.

9 VIDERE ARBEID

Arbeidet fra denne masteroppgaven skal videre benyttes av PhD-stipendiat Anders Steinsvik Nygård, som også er en del av forskningsprosjektet Wood/Be/Better. På grunn av oppgavens omfang er tykkelse den eneste parameteren som er undersøkt. I arbeidet til Anders Steinsvik Nygård vil blant annet parametere som tykkelse, fiberhelning og trekvalitet også bli undersøkt. Videre er det planlagt at Nygård skal teste skjærstivheten til DLT-vegger sammenliknet med CLT-vegger i laboratorium i full skala.

Diagonallimte massivtre-elementer (DLT) viser seg å være et stivere materiale enn krysslimte massivtre-elementer (CLT) i ANSYS med henblikk på skjærstivhet. DLT, som et stivere byggemateriale enn CLT, åpner nye muligheter for videre forskning innen dynamiske egenskaper, bruk av DLT i brukonstruksjoner og andre spennende konstruksjoner der DLT kan være et alternativ framfor stål og/eller betong. DLT åpner også muligheten for nye spennende arkitekturløsninger.

I denne oppgaven er effekten av ett sjikt med MDF ikke tatt med i analysen grunnet manglende verdier for Poissons tall. I arbeidet videre kan det foreslås å sammenlikne effekten av ett sjikt MDF i både CLT- og DLT-vegger og hvordan effekt dette har på skjærstivheten.

Massivtre som byggemateriale er et spennende materiale og vil mest sannsynlig i framtiden bli tatt i bruk i større omfang.

10 REFERANSER

- Bejtka, I. *Cross (CLT) and diagonal (DLT) laminated timber as innovative material for beam elements*. PhD Thesis, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2011.
- Berg, Egil. *De 5 trinn, Elementmetoden*. Kompendium, Høgskolen i Østfold, 2013.
- Bodig, Jozsef, and Benjamin A. Jayne. *Mechanics of Wood and Wood Composites*. KRIEGER PUBLISHING COMPANY, 1992.
- Bogensperger, Thomas, Thomas Moosbrugger, og Gregor Silly. «Verification of CLT-plates under loads in plane, World Conference On Timber Engineering.» 2010.
- Dahl, Kristian Berbo. *Mechanical properties of clear wood from Norway spruce*. PhD Thesis, NTNU, Tapir Uttrykk, 2009.
- Glasø, Geir. «Design of CLT in Europe.» 2014.
- Kollman, Franz F. P., and Wilfred A. Côté. *Principles of Wood Science and Technology*. Springer, 1968 .
- Kucera, Bohumil. *Treets oppbygging og vedanatomi*. Norsk Institutt for treforskning, NMBU, Ås, 1998.
- Mørch, Lars Christian. *FEM-modellering av fleretasjes trehus med henblikk på optimalisering av forbindelser mellom massivtre-elementer*. Master of Science Thesis, NMBU, 2014.
- Norsk Treteknisk Institutt. *Bygge med massivtre-elementer, Hefte 1, 2 og 3*. Oslo: Strandberg & Nilsen Grafisk as, 2006.
- Shmulsky, Rubin, og P. David Jones. *Forest Products and Wood Science An Introduction*. WILEY - BLACKWELL, 2011.
- Standardization, European Committee For. *EN 338:2003*. Brussels, 2009.
- Treindustriens lille grønne. «Treindustriens lille grønne.» 2013.
- Waløen, Åge Ø. *Elementmetoden, en innføring*. Kompendium, Norges Tekniske Høgskole, NTH, 1993.
- Weck, Olivier de, og Il Yong Kim. *Finite Element Method, Engineering Design and Rapid Prototyping*. Presentasjon, Forelesning, MIT, Massachusetts Institute of Technology, 2004.

11 VEDLEGG

Elektronisk vedlegg

11.1 MASTEROPPGAVE PDF-FIL

1. Masteroppgave Shishir Ahmed 2014.pdf

11.2 EXCEL-FILER

Excel-filer, Keypoints

1. CLT_5LAG_HEL_VEGG.xlsx
2. CLT_5LAG_VEGG_MED_UTSPARINGER.xlsx
3. DLT_4LAG_HEL_VEGG.xlsx
4. DLT_4LAG_VEGG_MED_UTSPARINGER.xlsx
5. DLT_5LAG_HEL_VEGG.xlsx
6. DLT_5LAG_VEGG_MED_UTSPARINGER.xlsx

2014

11.3 SCRIPT-FILER ANSYS

TXT-filer, script-filer ANSYS Mechanical APDL 15.0

1. CLT_5LAG_STÅENDE_0.3_x_tykk.txt
2. CLT_5LAG_STÅENDE_0.6_x_tykk.txt
3. CLT_5LAG_STÅENDE_0.9_x_tykk.txt

4. DLT_4LAG_45GRADER_0.2_x_tykk.txt
5. DLT_4LAG_45GRADER_0.4_x_tykk.txt
6. DLT_4LAG_45GRADER_0.8_x_tykk.txt

7. DLT_5LAG_45GRADER_0.23_x_tykk.txt
8. DLT_5LAG_45GRADER_0.4_x_tykk.txt
9. DLT_5LAG_45GRADER_0.79_x_tykk.txt

10. CLT_5LAG_UTSPARING_STÅENDE_0.3_x_tykk.txt
11. CLT_5LAG_UTSPARING_STÅENDE_0.6_x_tykk.txt
12. CLT_5LAG_UTSPARING_STÅENDE_0.9_x_tykk.txt

13. DLT_4LAG_UTSPARINGER_45GRADER_0.2_x_tykk.txt
14. DLT_4LAG_UTSPARINGER_45GRADER_0.4_x_tykk.txt
15. DLT_4LAG_UTSPARINGER_45GRADER_0.8_x_tykk.txt

16. DLT_5LAG_UTSPARINGER_45GRADER_0.23_x_tykk.txt
17. DLT_5LAG_UTSPARINGER_45GRADER_0.4_x_tykk.txt
18. DLT_5LAG_UTSPARINGER_45GRADER_0.79_x_tykk.txt

2014

11.4 FEM MODELLER, DATABASE – FILER ANSYS

1. CLT_5LAG_STÅENDE_BORD_0.3_x_tykk.db
2. CLT_5LAG_STÅENDE_BORD_0.6_x_tykk.db
3. CLT_5LAG_STÅENDE_BORD_0.9_x_tykk.db

4. DLT_4LAG_45grader_BORD_0.2_x_tykk.db
5. DLT_4LAG_45grader_BORD_0.4_x_tykk.db
6. DLT_4LAG_45grader_BORD_0.8_x_tykk.db

7. DLT_5LAG_45grader_BORD_0.23_x_tykk.db
8. DLT_5LAG_45grader_BORD_0.4_x_tykk.db
9. DLT_5LAG_45grader_BORD_0.79_x_tykk.db

10. CLT_5LAG_UTSPARING_STÅENDE_BORD_0.3_x_tykk.db
11. CLT_5LAG_UTSPARING_STÅENDE_BORD_0.6_x_tykk.db
12. CLT_5LAG_UTSPARING_STÅENDE_BORD_0.9_x_tykk.db

13. DLT_4LAG_UTSPARING_45grader_BORD_0.2_x_tykk.db
14. DLT_4LAG_UTSPARING_45grader_BORD_0.4_x_tykk.db
15. DLT_4LAG_UTSPARING_45grader_BORD_0.8_x_tykk.db

16. DLT_5LAG_UTSPARING_45grader_BORD_0.23_x_tykk.db
17. DLT_5LAG_UTSPARING_45grader_BORD_0.4_x_tykk.db
18. DLT_5LAG_UTSPARING_45grader_BORD_0.79_x_tykk.db



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Postboks 5003
NO-1432 Ås
67 23 00 00
www.nmbu.no