

Sebastian Mauer Pettersen

Fransk lås

Simulering og testing av historisk brukt forbindelse i treverk

Mai 2022

NTNU

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for vareproduksjon og byggteknikk

Bacheloroppgave

2022



Sebastian Mauer Pettersen

Fransk lås

Simulering og testing av historisk brukt forbindelse i treverk

Bacheloroppgave
Mai 2022

NTNU

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for vareproduksjon og byggteknikk



Kunnskap for en bedre verden

Fransk lås

*Simulering og testing av historisk brukt
forbindelse i treverk.*

Sebastian Mauer Pettersen

[Gradering: Åpen]

Bachelor i ingeniørfag - bygg
Innlevert: mai 2022
Veileder: Marthin Landgraff

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for vareproduksjon og byggteknikk

Oppgavens tittel:	Dato: 20.05.2022		
Fransk lås	Antall sider: 55		
	Masteroppgave:	Bacheloroppgave	x
Navn: Sebastian Mauer Pettersen			
Veileder: Marthin Landgraff			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/ veiledere: [navn]			

Sammendrag:

Klimaendringer og overforbruk av ressurser er reelle utfordringer vi står overfor i dag. Det er nødvendig med store samfunnsendringer for å møte disse. Innen byggenæringen har ombruk av byggematerialer vokst frem som et stadig mer aktuelt tema som bidrar til dette. Fremstilling av stål er energikrevende, og dermed en belastning på miljø. Reduksjon av stål i bygningskomponenter vil derfor være ønskelig.

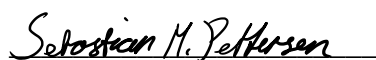
Denne rapporten har som hensikt å bidra til økt ombruk og reduksjon av stål i byggenæringen ved å se på den historiske brukte forbindelsen «Fransk lås» og undersøke hvilken utforming av denne som har størst kapasitet ved aksielt strekk.

Dette har vært gjort ved simuleringer, håndberegninger og fysisk testing på lab. Som en kontroll av at utforming av forbindelse skulle være utslagsgivende faktor ble det av den ene variasjonen testet med et annet materiale. Snittverdier av kontrolltesting viste et avvik på 0,008%, som tyder på at utforming vil være utslagsgivende faktor.

Med bakgrunn i teori og samlet empirisk data kom man frem til et resultat. Sammenligning av resultatene viser at det vil kreve mer forskning for å kunne konkludere med kapasitet til forbindelsen. Simuleringer, håndberegninger og testing på lab viser alle sammen at utformingen «Lang Skrå» har høyest kapasitet.

Stikkord:

Forbindelse i treverk
Abaqus simulering
Fransk lås
Test på lab



Sebastian Mauer Pettersen

Forord

Denne oppgaven er avsluttende del av min bachelorgrad i ingeniørfag, retning konstruksjonsteknikk ved Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet (NTNU) Gjøvik og utgjør 20 studiepoeng.

Prosjektet har vært meget lærerik og interessant å gjennomføre. Spesielt givende var det å se sammenheng mellom teori og virkelighet med testing på lab. Det har også vært meget spennende å lære simuleringer i Abaqus, og jeg vil rette en stor takk til Professor Stergios Goutianos og Førsteamanuensis Arne Ilseng ved NTNU Gjøvik for opplæring av programvare og gode innspill til simuleringer. Jeg vil takke Moelven Limtre for å ha produsert testobjekter og bidratt med materialer. Jeg vil også takke Thomas Haavi og veileder Marthin Landgraff for et godt samarbeid.

Abstract

Climate change and over-consumption of resources are real challenges we face today. Major societal changes are needed to meet these. In the construction industry, the reuse of building materials has emerged as an increasingly relevant topic that contributes to this. The production of steel is energy-intensive, and thus a burden on the environment. Reduction of steel in building components will therefore be desirable.

The purpose behind this report is to contribute to an increase in reuse of building materials by researching the historically used timber joint type, scarf joint with tenon and key, to see what configuration of this connection that had the highest capacity in axial tension.

This has been done by performing simulations, hand calculations and physical tests in a lab. As a control to ensure that configuration would be the deciding factor, one of the configurations was tested in a different material. The average values of the control showed a deviation of 0,008%, which can indicate that configuration is the deciding factor.

Based on theory and gathered empirical data, a result was reached. Comparing the results shows that more research is needed to conclude on a load capacity of the joint. Simulations, hand calculations and lab tests all show that the configuration “Lang Skrå” (Long inclined) has the highest capacity in axial tension.

Innhold

Forord	iv
Abstract	v
Innhold	vi
Figurliste.....	viii
Tabelliste	x
1 Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn	1
1.1.1 Miljø.....	1
1.1.2 Ombruk av materialer.....	2
1.2 Formål med oppgave	2
1.3 Problemstilling.....	2
1.4 Begrensninger.....	3
1.5 Struktur	3
2 Teori	4
2.1 Trevirke	4
2.1.1 Fasthet	5
2.1.2 E-modul og skjærmodul G	5
2.1.3 Teori bak håndberegninger.....	6
2.2 Simuleringer med elementmetode	9
3 Fransk lås og Materialer	10
3.1 Fransk lås.....	10
3.1.1 Rett	12
3.1.2 Skrå.....	12
3.1.3 Lang skrå.....	13
3.2 Materialer.....	14
4 Metode.....	15
4.1 Programmer	15
4.1.1 Solidworks.....	16
4.1.2 Abaqus.....	16
4.2 Produksjon av testobjekter.....	19

4.2.1	Sammenstilling av lås.....	19
4.3	Test på lab.....	20
4.3.1	Testoppsett	21
4.3.2	Utførelse av forsøk	22
4.3.3	Usikkerheter ved forsøk	23
5	Resultater.....	24
5.1	Simuleringer	24
5.1.1	Rett	24
5.1.2	Skrå.....	27
5.1.3	Lang skrå	29
5.2	Håndberegninger	31
5.3	Test på lab.....	32
5.3.1	Limtre Rett	34
5.3.2	Limtre Skrå.....	38
5.3.3	Limtre Lang Skrå	42
5.3.4	Konstruksjonsvirke Rett.....	46
6	Diskusjon og analyse.....	51
7	Konklusjon	55
	Litteraturliste	56
	Vedlegg	58
	Manual for utførte Abaqus-simuleringer.....	64

Figurliste

Figur 1 – Kraftfordeling – utviklet av oppgaveforfatter	6
Figur 2 - Kraftfordeling ved kombinasjon – utviklet av oppgaveforfatter.....	8
Figur 3 – Tverrstrekk – utviklet av oppgaveforfatter	9
Figur 4 – Fra befaring, fransk lås som del av forsterkningsbjelke for materialløfting.	10
Figur 5 - Fra befaring, fransk brukt som dobbel toppsvill	11
Figur 6 - Formuleringsbeskrivelse av forbindelse.....	11
Figur 7 - Fransk lås rett	12
Figur 8 - Fransk lås skrå.....	12
Figur 9 - Fransk lås lang skrå.....	13
Figur 10 - Tverrsnittoppbygning av limtre. Gjengitt fra "Dimensjonering av trekonstruksjoner" (Bell, 2017) med tillatelse fra forlag.....	14
Figur 11 - Diagram for arbeidsprosess	15
Figur 12 - Seed og mesh.....	17
Figur 13 - Fastholdning og belastning.....	18
Figur 14 - Singularitet	18
Figur 15 - CNC-fres produserer test-emne.	19
Figur 16 - Avrundinger før manuell ferdigstilling	19
Figur 17 - Testoppsett	21
Figur 18 - Stokastisk mønster.....	22
Figur 19 - Avvik ved prøve	23
Figur 20 - Rett - Kinetisk energi mot intern energi.....	24
Figur 21 - simulering - Rett - skjær.....	25
Figur 22 - Simulering - Rett - tverrstrekk ved skjærbrudd.....	25
Figur 23 - Simulering - Rett - last ved grense for tverrstrekk	26
Figur 24 - Skrå - Kinetisk energi mot intern energi	27
Figur 25 - Simulering - Skrå - skjær	27
Figur 26 - Simulering - Skrå - tverrstrekk ved skjærbrudd	28
Figur 27 - Simulering - Skrå - last ved grense for tverrstrekk	28
Figur 28 - Lang skrå - Kinetisk energi mot intern energi.....	29
Figur 29 - Simulering - Lang skrå - skjær	29
Figur 30 - Simulering - Lang skrå - tverrstrekk ved skjærbrudd	30
Figur 31 - Simulering - Lang skrå - last ved grense for tverrstrekk.....	30
Figur 32 - Fuktinhold	32
Figur 33 - Gjennomsnittsverdier av test-resultater.....	33
Figur 34 - LR - Gjennomsnittsverdi	34
Figur 35 - LR-1,2,3 - diagram last, deformasjon	34
Figur 36 - LR-1 - diagram last, deformasjon	35
Figur 37 - LR-1 Bilder fra forsøk.....	35
Figur 38 - LR-2 - diagram last, deformasjon	36

Figur 39 - LR-2 - bilder fra forsøk	36
Figur 40 - LR-3 - diagram last, deformasjon	37
Figur 41 - LR-3 - bilder fra forsøk	37
Figur 42 - LS - Gjennomsnittsverdi	38
Figur 43 - LS-1,2,3 - diagram last, deformasjon	38
Figur 44 - LS-1 - diagram last, deformasjon	39
Figur 45 - LS-1 - bilder fra forsøk.....	39
Figur 46 - LS-2 - diagram last, deformasjon	40
Figur 47 - LS-2 - bilder fra forsøk.....	40
Figur 48 - LS-3 - diagram last, deformasjon	41
Figur 49 - LS-2 - bilder fra forsøk.....	41
Figur 50 - LLS - Gjennomsnittsverdi	42
Figur 51 - LLS-1,2,3 - diagram last, deformasjon	42
Figur 52 - LLS-1 - diagram last, deformasjon	43
Figur 53 - LLS-1 - bilder fra forsøk	43
Figur 54 - LLS-2 - diagram last, deformasjon	44
Figur 55 - LLS-2 - bilder fra forsøk	44
Figur 56 - LLS-3 - diagram last, deformasjon	45
Figur 57 - LLS-3 - bilder fra forsøk	45
Figur 58 - KR - Gjennomsnittsverdi	46
Figur 59 - KR-1,2,3,4 - diagram last, deformasjon	46
Figur 60 - KR-1 - diagram last, deformasjon.....	47
Figur 61 - KR-1 - bilder fra forsøk.....	47
Figur 62 - KR-2 - diagram last, deformasjon	48
Figur 63 - KR-2 - bilder fra forsøk.....	48
Figur 64 - KR-3 - diagram last, deformasjon	49
Figur 65 - KR-3 - bilder fra forsøk.....	49
Figur 66 - KR-3 - avstand og nærbilde av brudd	49
Figur 67 - KR-4 - diagram last, deformasjon	50
Figur 68 - KR-4 - bilder fra forsøk.....	50
Figur 69 - Sammenligning av last-kapasitet.....	52
Figur 70 - Deformasjon i kiler.....	52
Figur 71 - Avvik mellom beregninger, simuleringer og testresultater	53
Figur 72 - Sammenligning av skjærspenningsforløp og spenninger tvers fiber.....	54

Tabelliste

Tabell 1 - Materialspesifikasjoner for simuleringer	16
Tabell 2 - Prøvenavn og antall	20
Tabell 3 – Resultater fra håndberegninger	31
Tabell 4 - Resultater fra lab.....	33
Tabell 5 – Fasthetstabell for limtrelameller	58
Tabell 6 – Fasthetstabell for konstruksjonsvirke.....	59
Tabell 7 – Håndberegninger utført i Excel.....	60

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Bakgrunnen for oppgaven var et tema gitt av NTNU som omhandlet tre- mot tre-forbindelser som kunne bidra til redusert klimaavtrykk ved å redusere mengden stål og bidra til ombruk i byggenæringen.

1.1.1 Miljø

Byggenæringen står for en stor andel av miljøpåvirkningen verden står overfor. Metoder for å redusere denne andelen vil være nødvendig. Det finnes flere deler av næringen det kan gjøres endringer ved for å redusere utslippene. To av disse er mengden avfall og produksjon av materialer.

En av de største andelene av avfall i Norge kommer fra byggenæringen, og andelen har økt de siste årene. En måte å redusere mengden avfall er å øke mengden ombruk av materialer (Ibenholdt, 2020). Ombruk kan foregå på en bedre og enklere måte dersom komponentene lar seg demontere, og da for eksempel ikke er limt.

Det brukes i dag store mengder stål i byggenæringen, og da fremstilling av stål er energikrevende, vil det være gunstig for miljøet dersom bruken av stål blir redusert.(Sandaker, Sandvik, & Vik, 2017, p. 63).

Mengden energi som er nødvendig for å produsere treverk er mindre enn stål, og det vil av den grunn kunne være ønskelig å benytte løsninger av treverk (Glosli, Aurlien, Nyrud, Rørstad, & Tomasi, 2021).

1.1.2 Ombruk av materialer

Ombruk av materialer blir mer og mer diskutert som løsning på reduksjon av avfall og produksjonsutslipp i byggenæringen. Ombruk av materialer har 90-99% mindre utslipp enn nyprodusert (Grønn Byggallianse, 2022). I tilknytning til denne økte interessen er «design for demontering» aktuelt, da mange byggematerialer vanskelig lar seg demontere uten å skade materialet med dagens konvensjonelle forbindelser (Leland, 2008). Utviklingen innen design for demontering ser gjerne på utvikling av nye produkter med forbindelser egnet for demontering. I denne oppgaven ser man derimot på en gammel forbindelse, som allerede lar seg demontere. Forbindelsen «Fransk lås» er en historisk brukt tre- mot tre- forbindelse som lar seg demontere ved å banke ut kilene som sammenfører forbindelsen (Godal, Moldal, Oalann, & Sandbakken, 2018).

1.2 Formål med oppgave

Formålet med oppgaven er å bidra til økt ombruk og redusert mengde stål i byggenæringen ved å se nærmere på kapasiteten av den historisk brukte tre- mot tre-forbindelsen fransk lås. Forbindelsen er beskrevet med at den kan ta aksiell strekklast (Godal, Moldal, Oalann, & Sandbakken, 2018), men ikke hvilken utforming av fransk lås som er spesielt egnet for det formål. Undersøkelse av kapasitet skal gjøres ved å se på variasjoner av forbindelsen ved simulering, håndberegninger og testing på lab. Av resultatene er formålet å beslutte hvilken utforming som har høyest kapasitet i strekk.

1.3 Problemstilling

Med bakgrunn i ønsket om å redusere klimaavtrykket til byggenæringen, og formålet beskrevet i 1.2, skal det beregnes, simuleres og samle empirisk data fra laboratorieforsøk for å forsøke å besvare følgende problemstilling:

«Hvilken utforming av fransk lås har høyest kapasitet i strekk?»

1.4 Begrensninger

Det er begrenset til kun å omhandle bruddkapasitet og deformasjon ved simulering og testing på lab.

Det var i utgangspunktet tenkt å teste både aksielt trykk og strekk samt moment i fire punkt bøy, men da tilgang til lab var begrenset begrenses oppgaven til å kun omhandle aksielt strekk. Simuleringer og håndberegninger av trykk og moment utelates derfor fra oppgaven selv om data er innhentet.

Det er begrenset det til å kun å behandle data fra målte forskyvninger direkte fra testmaskin og LVDT (Linear Variable Differential Transformer). Data ble samlet inn for «Digital image correlation» og vil være tilgjengelig for videre forskning.

1.5 Struktur

Oppgaven er strukturert med en innledning i kapittel 1, som beskriver bakgrunn for prosjekt, formål med oppgave, problemstilling og begrensninger.

Kapittel 2 omhandler teori benyttet for å komme frem til resultatene.

Kapittel 3 beskriver forbindelsen fransk lås og variasjonene i utforming det er sett på i denne oppgaven, samt valgte materialer.

Kapittel 4 beskriver valgt metode og fremgangsmåte benyttet for å komme frem til resultatene.

Kapittel 5 beskriver resultatene fra simuleringer, håndberegninger og testing på lab.

Disse resultatene diskuteres og sammenlignes i kapittel 6.

Til slutt skal det konkluderes i kapittel 7.

Bak litteraturliste ligger vedlegg der det er produsert en manual for utførte Abaqus-simuleringer.

2 Teori

Grunnet fraværet av standardiserte beregningsmetoder av tre- mot tre-forbindelser er teori hentet fra fagfelleverderte artikler der det har vært sett på lignende forbindelser. Aktuell litteratur ble innhentet ved søk i NTNU universitetsbibliotek Oria og Google Scholar. Teorien beskrevet i 2.1.3 baserer seg på følgende artikler:

- «Load capacity of halved and tabled tenoned timber scarf joint» (Aira, Íñiguez-González, Guaita, & Arriaga, 2016)
- «Analysis of the stress state of a halved and tabled traditional timber scarf joint with the finite element method» (Aira, Arriaga, Íñiguez-González, Guaita, & Estaban, 2012)
- «Failure modes in halved and tabled tenoned timber scarf joint by tension test» (Aira J. R., Arriaga, Íñiguez-González, & Guaita, 2015)
- «Tensile properties of Utgulisanji connection» (Jeong, 2021)
- «Analysis and strengthening of carpentry joints» (Branco & Descamps, 2015)

2.1 Trevirke

Tre er et anisotropt materiale, som vil si at det har forskjellige fysiske egenskaper i forskjellige retninger. Av egenskapene som er relevant i denne oppgaven, er det fasthet som benyttes til beregninger. På et makronivå kan man anse trevirke som ortotropt, ved at det har nokså konstante egenskaper i tre, ortogonale retninger: Langs fiberretning, radiell retning og retning tangentielt på årringene. (Bell, 2017, pp. 49-51)

2.1.1 Fasthet

Fasthetene for trevirke som konstruksjonsmateriale er først delt med hensyn på moment, skjær, strekk og trykk. Deretter er fasthetene delt av fiberorientering, der 0 indikerer parallelt fiberretning og 90 indikerer tvers fiberretning (Bell, 2017, pp. 59-63).

$f_{t,0}$ - Strekkfasthet i fiberretning

$f_{t,90}$ - Strekkfasthet tvers på fiberretning

$f_{c,0}$ - Trykkfasthet i fiberretning

$f_{c,90}$ - Trykkfasthet tvers på fiberretning

f_m - Bøyefasthet

f_v - Skjærfasthet

For beregning av dimensjonerende kapasitet ved bruddgrensetilstand, skal det benyttes dimensjonerende fasthet f_d definert i NS EN 1995-1-1 2004, 2.4.1. Denne oppgave benytter seg av karakteristiske verdier for å kunne sammenligne beregninger med simuleringer og laboratorieforsøk.

2.1.2 E-modul og skjærmodul G

Trevirkets stivhet beskrives med elastisitetsmodulen E i retningene parallelt med fiberretning E_0 og vinkelrett på fiberretning E_{90} . Ved en 1. ordens analyse av komponenter med tilnærmet samme materialeegenskaper benyttes middelveidene $E_{0,mean}$, $E_{90,mean}$ og G_{mean} (Bell, 2017, ss. 61-87)

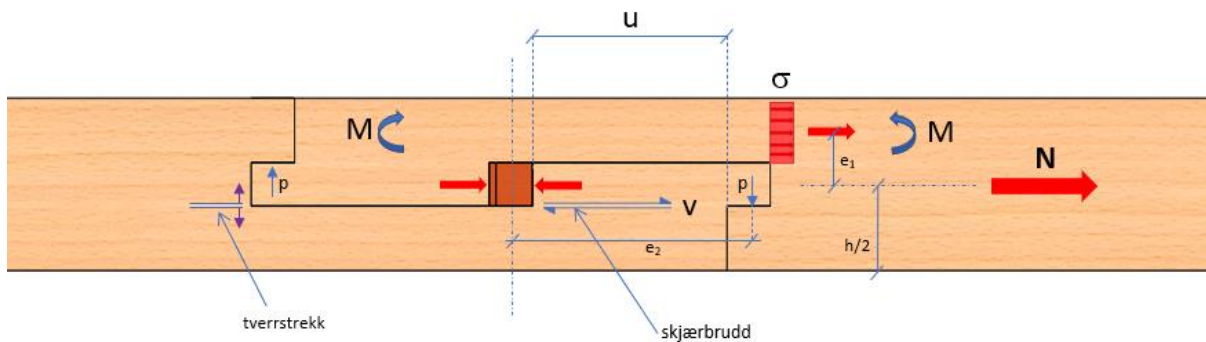
2.1.3 Teori bak håndberegninger

I en studie av Aira, Arriga, Íñiguez-González, og Guaita (2016) ble lignende forbindelse testet i strekk. De fant at aktuelle bruddformer var skjærbrudd eller tverrstreksbrudd. Med utgangspunkt i denne litteraturen, og i simuleringer ble det utført håndberegninger av sannsynlige bruddpunkt. For å visualisere beregninger ble det laget figurer.

Skjærkapasiteten til en lignende forbindelse av fransk lås ble beregnet til å være ligning (1) (Aira, Íñiguez-González, Guaita, & Arriaga, 2016):

$$\frac{\tau_v}{0,45 * f_v} \leq 1 \quad (1)$$

τ_v - opp tredende skjærspenning



Figur 1 – Kraftfordeling – utviklet av oppgaveforfatter

$$\tau_v = \frac{N}{b * u} \leq 0.45 * f_v \quad (2)$$

b - tverrsnittebredde

$$N_{Rd} = 0.45 * f_v * (b * k_{cr}) * u \quad (3)$$

$$M = N * e_1 \quad (4)$$

$$p = \frac{M}{e_2} \quad (5)$$

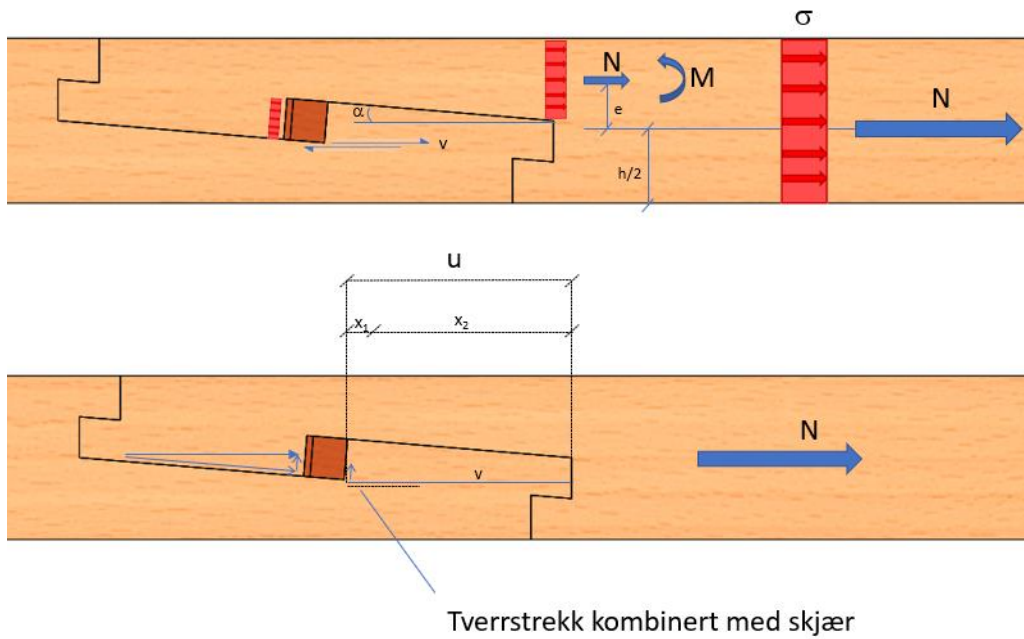
$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{W_y} \quad (6)$$

σ – kombinasjonsspennning av aksielt strekk og moment.

Faktoren k_{cr} i ligning 3 er definert i NS EN 1995-1-1 6.1.7. Denne utelukkes fra beregninger, da dette er en reduksjonsfaktor som tar hensyn til sprekker i tverrsnittsbredde, og det er ønskelig å regne med karakteristiske verdier for sammenligning med simuleringer og forsøk på laboratoriet.

De sannsynlige bruddårsakene ved strekk er som nevnt skjærbrudd i overgang innhakk ved kiler og tverrstrekkbrudd ved horisontaltapp. Tverrstrekket ved horisontaltapp oppstår som følge av eksentrisiteten mellom påført aksialstrekk og resultanten fra spenningene i bakre del, som opptar disse strekkreftene. Eksentrisitetsmomentet fører til kraften p som påfører en last tvers fiber på «innhakk» i motsatt stykke, som kan føre til tverrstrekk i fiber.

Ved kraftoverføring mot skrå flater vil det grunnet friksjon kunne oppstå spenninger mot fiber. Har disse retning slik at det vil oppstå tverrstrekk vil det kunne være nødvendig å ta med i beregninger av skjærkapasitet. En plausibel praktisk måte å gjøre dette på kan være å beregne nødvendig areal for å ta unna tverrstrekk, før resterende areal kan benyttes til å beregne skjærkapasitet. Dette har utgangspunkt i kombinasjon av spenninger definert i NS-EN 1995-1-1: 2004, 6.2.



Figur 2 - Kraftfordeling ved kombinasjon – utviklet av oppgaveforfatter

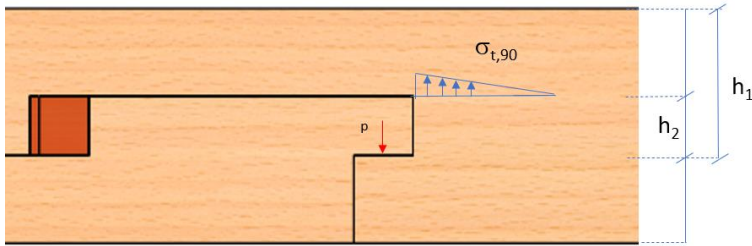
$$u = x_1 + x_2 \quad (7)$$

$$x_1 = \frac{N * \sin(\alpha)}{f_{t90} * b} \quad (8)$$

$$x_2 = \frac{N}{(0,45 * f_v) * b} \quad (9)$$

$$u = \frac{N}{0,45 f_v * b} + \frac{N * \sin(\alpha)}{f_{t90} * b} \quad (10)$$

$$N_{Rd} = \frac{u}{\frac{1}{0,45 f_v * b} + \frac{\sin(\alpha)}{f_{t90} * b}} \quad (11)$$



Figur 3 – Tverrstrekk – utviklet av oppgaveforfatter

Tverrstrekk som følge av kraften P kan beregnes med formel 12 omskrevet fra formel for tverrstrekksberegning ved utsparring i bjelke fra tysk standard: DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12.

$$\sigma_{t90} = \frac{p}{0,5 * (0,5 * (h_1 + h_2)) * b} \quad (12)$$

$$p_{Rd} = f_{t0} * 0,25 * (h_1 + h_2) * b \quad (13)$$

$$N = p * \frac{e_2}{e_1} \quad (14)$$

$$N = f_{t0} * 0,25 * (h_1 + h_2) * b * \frac{e_2}{e_1} \quad (15)$$

Ut ifra det, kan maks aksiell last N før tverrstrekk inntreffer beregnes ved likning 15.

2.2 Simuleringer med elementmetode

Elementmetoden er en regnemåte der man deler opp ett objekt i et nett (et *mesh*) bestående av elementer og noder som analyseres ved numerisk beregning av partielle differensiallikninger (Fiskvatn, 1984, p. 14).

3 Fransk lås og Materialer

I dette kapittelet beskrives forbindelsen fransk lås og variasjonene av utforming det er sett på i denne oppgaven. Deretter beskrives valgte materialer det er benyttet i beregninger, simuleringer og testing på lab.

3.1 Fransk lås

Fransk lås er en historisk brukt forbindelse som boken «Berekonstruksjoner i eldre norske hus» skildrer som «kongen av skjøtene». Forbindelsen skjøter bjelkeelementer i aksial retning. Fransk lås beskrives som sterk i strekk, trykk, krefter sideveis og bøyning. Det skilles mellom to hovedtyper av fransk lås: rett og skrå (Godal, Moldal, Oalann, & Sandbakken, 2018, pp. 252-254).

Alle de produserte variantene har mål basert på franske låser som er brukt forskjellige steder i Norge. Disse er dokumentert i boken nevnt i avsnitt over med mål basert på tverrsnittsdimensjon kalt d . I denne oppgaven er $d = 125\text{mm}$ da det på en gjennomført befaring av et ca. 120 år gammelt bygg i Nes i Ådal for denne, ble funnet fransk lås av denne dimensjonen.

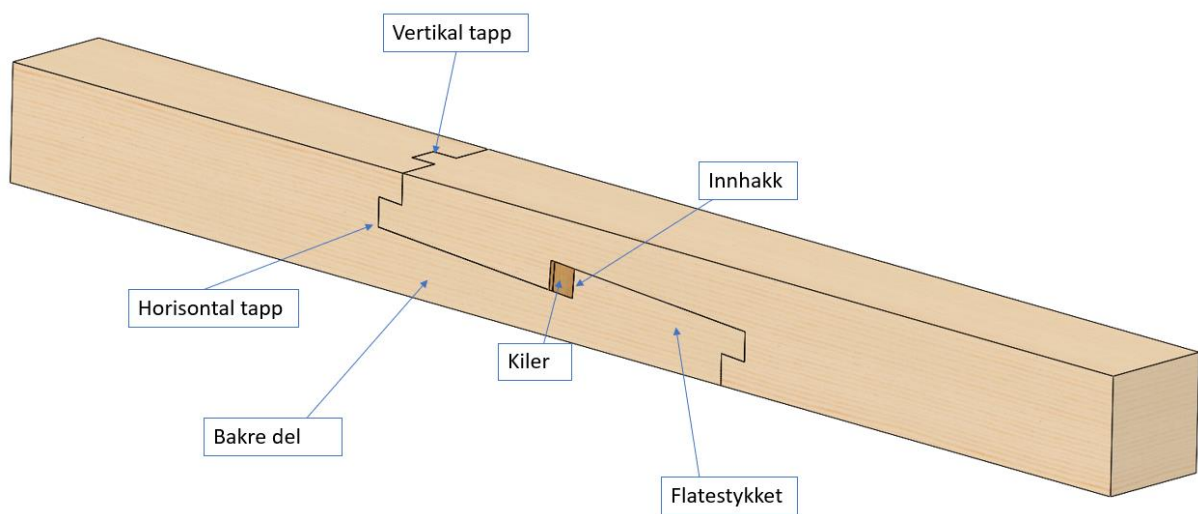


Figur 4 – Fra befaring, fransk lås som del av forsterkningsbjelke for materialløfting.



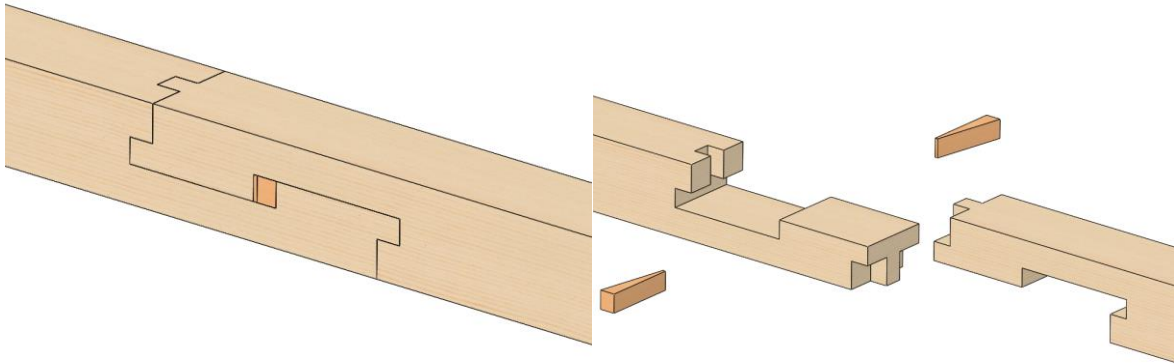
Figur 5 - Fra befaring, fransk brukt som dobbel toppsvill

Figuren under viser navnbeskrivelse av de forskjellige delene av forbindelsen.



Figur 6 - Formuleringsbeskrivelse av forbindelse

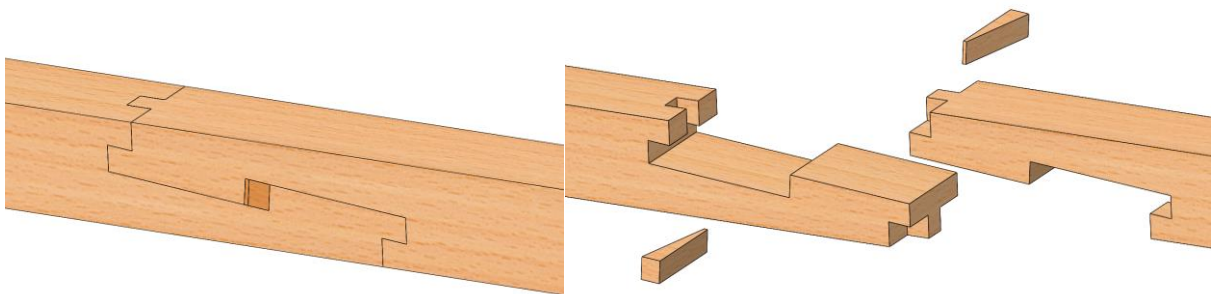
3.1.1 Rett



Figur 7 - Fransk lås rett

Den rette varianten har en lengde $3d$ og taper i $d/4$ slik beskrevet i Godal et al. (Godal et al., 2018)

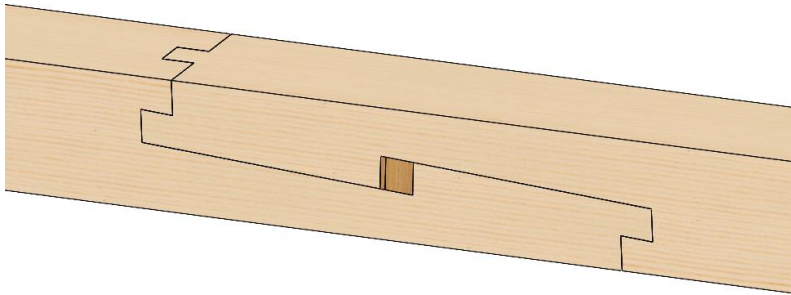
3.1.2 Skrå



Figur 8 - Fransk lås skrå

Den skrå varianten har en lengde på $3d$ og taper i $d/4$. Fallet på skråflaten er ca. $d/8$ slik beskrevet i Godal et al. (Godal et al., 2018)

3.1.3 Lang skrå



Figur 9 - Fransk lås lang skrå

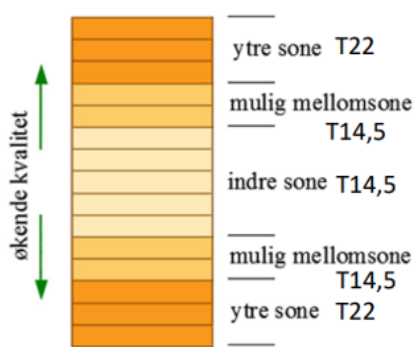
Den lange skrå varianten har en lengde på $4d$ og tapper i $d/4$. Dette er den lengste varianten funnet i Norge (Godal et al., 2018, p. 254).

3.2 Materialer

Det er benyttet seg av to forskjellige materialer i testene. Limtre av kvalitet GL30C og konstruksjonsvirke som ble klassifisert som C24 ved visuell kontroll i henhold til NS-INSTA 142:2009.

Valget å benytte limtre til forsøk begrunnes med at limtre er sammensatt av lameller som er styrkesortert enkeltvis, og at eventuelle virkefeil ikke er gjennomgående i tverrsnitt. Dette skaper et mer forutsigbart materiale (Bell, 2017, s. 97). Konstruksjonsvirke er benyttet i én av de tre utformingene som en kontroll for å sikre at det er utforming som blir utslagsgivende faktor og ikke material.

GL30C er kombinert limtre, som vil si at det er sammensatt av lameller av forskjellig klassifisering. Høy kvalitet i yttersjikt, og lavere innover i tverrsnittet (Bell, 2017, pp. 101-109). Forbindelsen vil derfor ha en lavere styrkeklassifisering mot midten enn mot kantene. Bruddårsaker funnet i artikkelen av Aira et al, nevnt i kapittel 2.1.3, var i hovedsak skjærbrudd ved innhakk mot kiler, og tverrstrekkbrudd ved horisontal tapp i endene av forbindelsen (Aira, Arriaga, Íñiguez-González, & Guaita, 2015). Skjærkapasiteten og strekkkapasiteten tvers fiber er den samme mellom lavere kapasitets lameller og høyere kapasitetslameller og også C24.



Figur 10 - Tverrsnittoppbygging av limtre. Gjengitt fra "Dimensjonering av trekonstruksjoner" (Bell, 2017) med tillatelse fra forlag

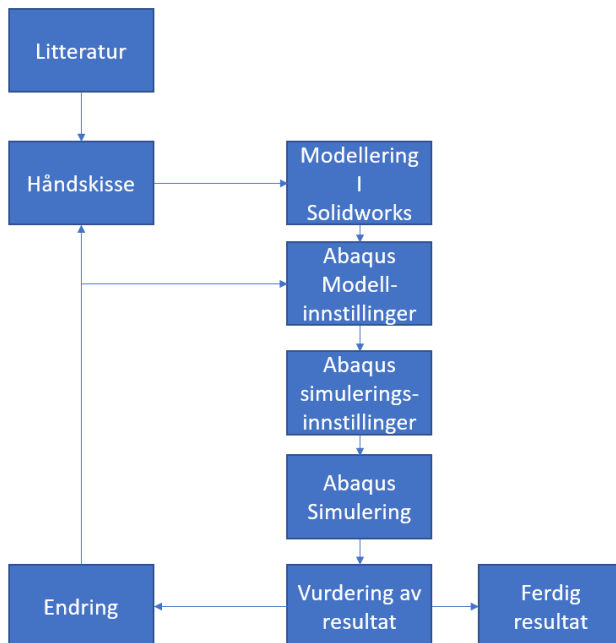
4 Metode

I dette kapittelet skal det redegjøres for hvordan man har kommet frem til resultatene presentert i kapittel 5 for å kvalitetssikre arbeidet ved å muliggjøre gjentakelse og videre forskning på temaet(Olson, 2011, pp. 37-45).

For å kunne utføre forsøk på laboratoriet var det nødvendig med noen anslag på maksimal last og deformasjon. Det ble derfor utført håndberegninger og simuleringer av forbindelsen. Fordelen med dette er at det da er resultater fra dette som kan sammenlignes med testresultater, for så å kunne se om beregningsmetoder benyttet kan benyttes til praktisk kapasitetsberegning av forbindelsen.

4.1 Programmer

Det ble benyttet seg av forskjellige programmer til modellering og elementanalyse. Dette kapittelet tar for seg metodene som ble benyttet for å komme frem til resultatene. For å tydeliggjøre fremgangsmåte og prosess ble det laget et diagram.



Figur 11 - Diagram for arbeidsprosess

4.1.1 Solidworks

Som modelleringsprogram ble det benyttet Solidworks, da det grunnet forfatters erfaring med programmet forenklet prosessen betraktelig. I Solidworks ble det også laget animasjoner av de forskjellige knutepunktene for å forenkle kommunikasjon med kontaktpersoner og veileder, da knutepunktene kan være utfordrende å beskrive med ord alene.

4.1.2 Abaqus

For å simulere knutepunktet ble det benyttet seg av analyseprogrammet Abaqus, som benytter seg av elementmetoden (finite element method) for å beregne spenningsforløp over en modell (Dassault systems, 2022).

En fullstendig manual for utførelse av simuleringer i Abaqus er lagt i vedlegg.

Materialegenskaper benyttet i simuleringer ble hentet fra Huber et al og tilpasset material benyttet i denne oppgaven (Huber, Bitá, Tannert, & Berg, 2021):

Tabell 1 - Materialspesifikasjoner for simuleringer

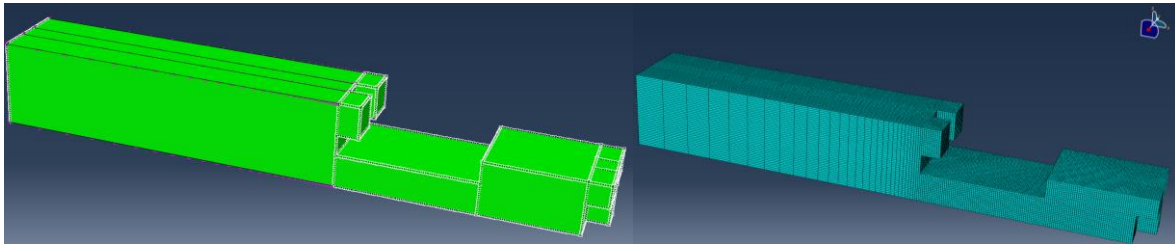
Styrkeklassifisering	E-modul (MPa)	Poissons tall Tverrkontraksjonstallet (-)	Skjærmodul (MPa)	Densitet (kg/m ³)
GL30C Benytter tall for svakeste lamell: T14,5	$E_1 = 11\ 000$ $E_2 = E_3 = 370$	$N_{u1} = N_{u2} = 0,445$ $N_{u3} = 0,41$	$G_1 = 690$ $G_2 = G_3 = 69$	420
C24	$E_1 = 11\ 000$ $E_2 = E_3 = 370$	$N_{u1} = N_{u2} = 0,445$ $N_{u3} = 0,41$	$G_1 = 690$ $G_2 = G_3 = 69$	420

Da tallene for svakeste lamell og konstruksjonsvirke er like, blir resultatene fra simulering likt for begge tilfeller.

Simuleringer ble utført av typen *dynamic explicit*, da dette gir mulighet for generell kontakt mellom elementer. Det gir også muligheten til å skalere modellens masse slik at simuleringstid reduseres. For å sikre at det ikke oppstår for mye kinetisk energi som følge av masseskaleringen er det derfor nødvendig å plote kinetisk energi mot indre energi og kontrollere at forholdet er tilstrekkelig lite (kinetisk energi tilnærmet lik null).

I *interactions* ble det valgt *general contact*, friksjon med *penalty* på 0,2. Valget av benyttet friksjonstall ble tatt med utgangspunkt i tabell 6.1 i NS EN 1995-2 6.1.2.

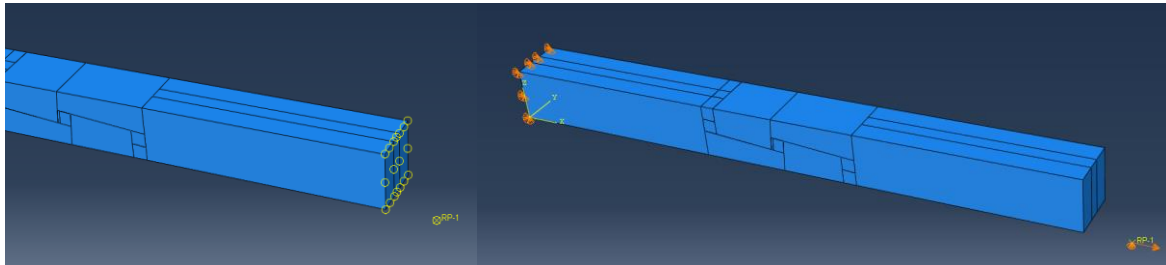
I meshet ble det benyttet Heksaeder-elementer for økt nøyaktighet. Til forskjell fra tetraeder-elementer og kile-elementer vil ikke heksaeder-elementer få enkeltstående noder på en flate. Dette ville ha kunnet gitt singulariteter midt på en flate.



Figur 12 - Seed og mesh

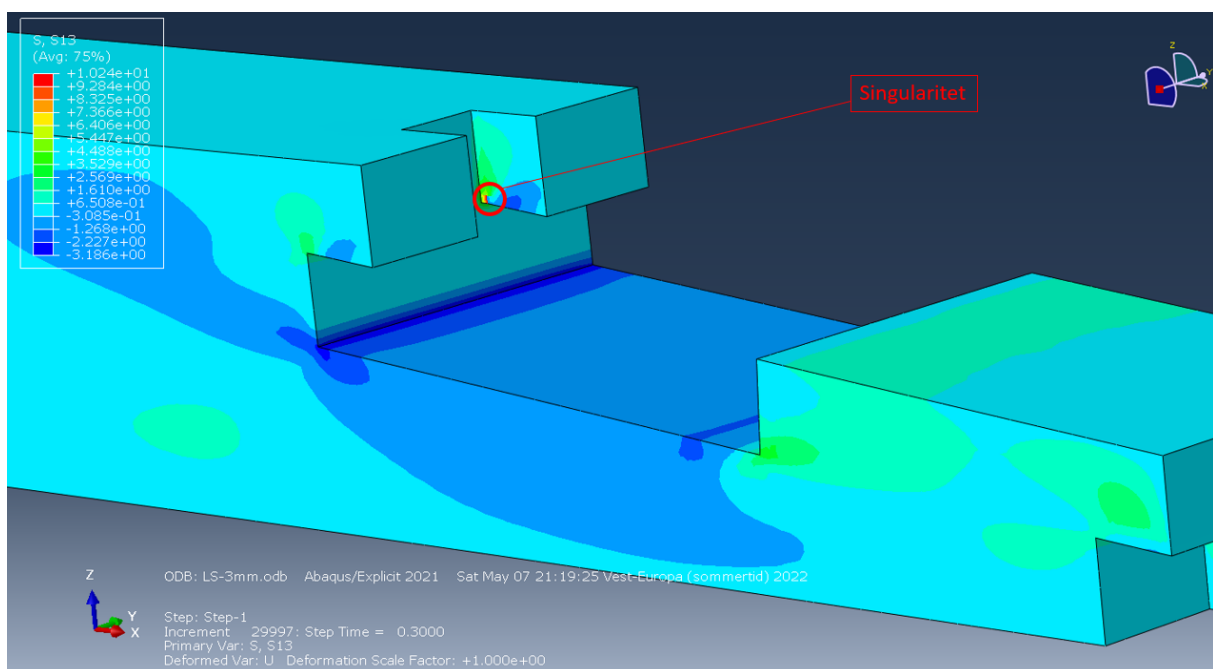
For å muliggjøre bruk av Heksaeder-elementer var det nødvendig å seksjonere opp delene før *seed edge* og *global seeds* kunne velges. For å redusere antallet elementer på mindre interessante steder ble det benyttet progressivt mesh ved bruk av *seed edge* fra 50-3mm. Generelt på delene ble det brukt *global seed* på 3mm. På kilene ble det brukt *global seed* på 5mm.

For å plassere last/deformasjon ble det benyttet et referansepunkt. Referansepunktet ble låst til «belastet ende» med *constraint – Equation*. En deformasjon på 10mm ble satt på referansepunktet. Motsatt ende ble fastholdt mot translasjon og åpen for rotasjon.



Figur 13 - Fastholdning og belastning

For å analysere resultatene fra simuleringer ble det sett bort fra singulariteter på irrelevante lokasjoner. Det ble benyttet visuell avlesning av spenningsverdier på de sannsynlige bruddlokasjonene beskrevet i litteraturen nevnt i kapittel 2.1.3, Skjærbrudd og tverrstrekk (Aira, Íñiguez-González, Guaita, & Arriaga, 2016)



Figur 14 - Singularitet

4.2 Produksjon av testobjekter



Figur 15 - CNC-fres produserer test-emne



Figur 16 - Avrundingar før manuell ferdigstilling

Produksjon av testobjekter ble utført av Moelven Limtre med deres CNC-fres Hundegger K2i. Denne maskinen opererer med en toleranse på ± 2 mm, noe som gjorde at det var nødvendig å finskjære enkelte deler for hånd med stemjern for at de skulle passe sammen. Innvendige hjørner hadde avrunding etter fingerfres som manuelt måtte skjæres rett. Noen av disse kunne vært unngått ved manuell programmering av maskin.

For å lage filer som kunne leses av maskinen ble det hentet ifc-fil fra modell i Solidworks som kunne brukes i programmet Cadwork. I Cadwork er det mulig å lage Hundegger-fil til K2i (Cadwork, 2022).

Bruken av CNC-fres reduserte arbeidstid betraktelig sammenliknet med manuell utførelse for hånd, men det gikk på bekostning av nøyaktighet.

4.2.1 Sammenstilling av lås

Objektene ble montert med kiler laget av samme styrkeklassifisering som hvert enkelt prøvestykke var produsert av. Det ble slått inn en kile fra hver side med en gummihammer for å redusere ødeleggelse av fiber i kilene. Kilenes overlengde ble så saget av jevnt med ytterkant av prøvestykkene. Etter montering ble sammenstillingen demontert og remontert for å teste at dette gikk an.

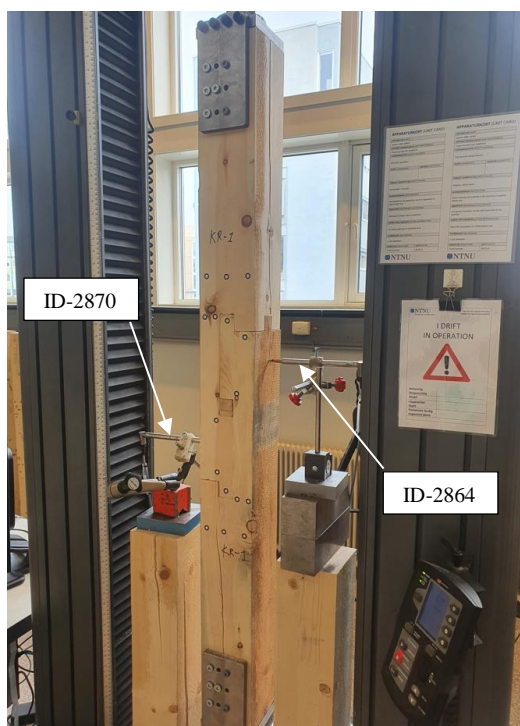
4.3 Test på lab

De franske låsene ble testet i aksielt strekk til brudd på laboratoriet ved Institutt for Konstruksjonsteknikk i Trondheim. Maskinen som ble benyttet, var av typen Instron 5982 100kN. Det ble testet totalt 13 objekter, tre av hver variant i limtre, og fire rette varianter i konstruksjonsvirke. Testobjektene hadde en total lengde på 1400mm og ble lagret under forhold tilsvarende klimaklasse 1 definert i Eurokode 5, 2.3.1.3.

Tabell 2 - Prøvenavn og antall

Type	Prøvenavn	Antall
Konstruksjonsvirke rett	KR	4
Limtre rett	LR	3
Limtre skrå	LS	3
Limtre lang skrå	LLS	3

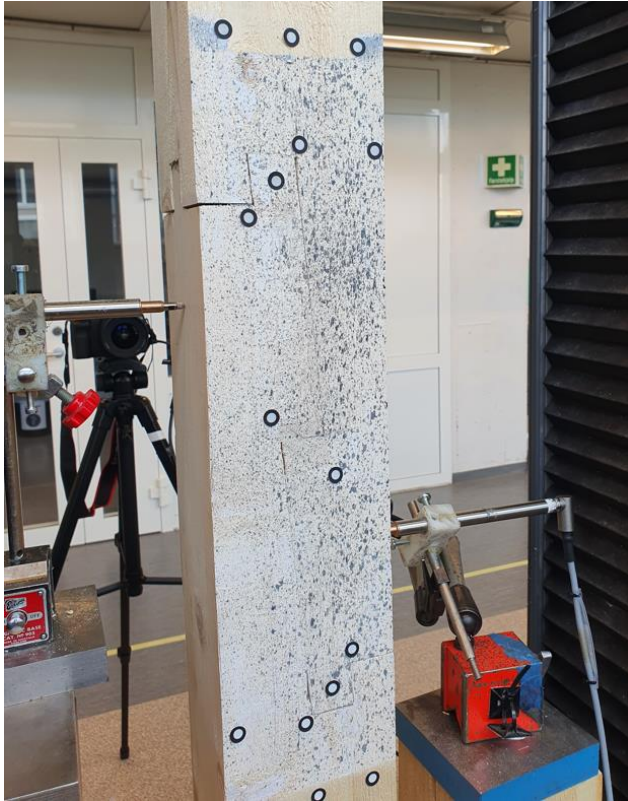
4.3.1 Testoppsett



Testoppsettet bestod av innfesting av stålplater skrudd sammen som en U-profil festet til treverket med 4 stk. 9x100mm av typen Rothoblass VGS ("rothoblaas.com," 2022) og 2 stk. 8x80mm av typen treskrue sekskant ("strongtie.no," 2022), Skrudd inn fra hver side både oppe og nede. Sideplatene hadde hullene forskjøvet slik at skruer fra én side ikke kom i konflikt med de fra den andre siden. For å sikre symmetri ble det valgt å speilvende skruemønsteret fra en side til den andre.

Figur 17 - Testoppsett

Last og aksial deformasjon ble målt og hentet rett fra test-maskin. Deformasjoner ble også dokumentert med DIC (Digital image correlation). DIC er en metode å måle deformasjon og tøyninger ved bruk av kameraer som fanger opp endringer i et påført mønster på en overflate (McCormick & Lord, 2010). Én av hver variant av forbindelsen ble markert med et stokastisk mønster av svart spray-maling over lag med hvit maling. Samtlige prøver var påført et mønster av sirkulære klistrelapper plassert på interessante områder.



Figur 18 - Stokastisk mønster

Sideveis deformasjon ble i tillegg målt ved LVDT (Linear Variable Differential Transformer) plassert 10 cm fra senter av forbindelsen mot endene av hver del.

4.3.2 Utførelse av forsøk

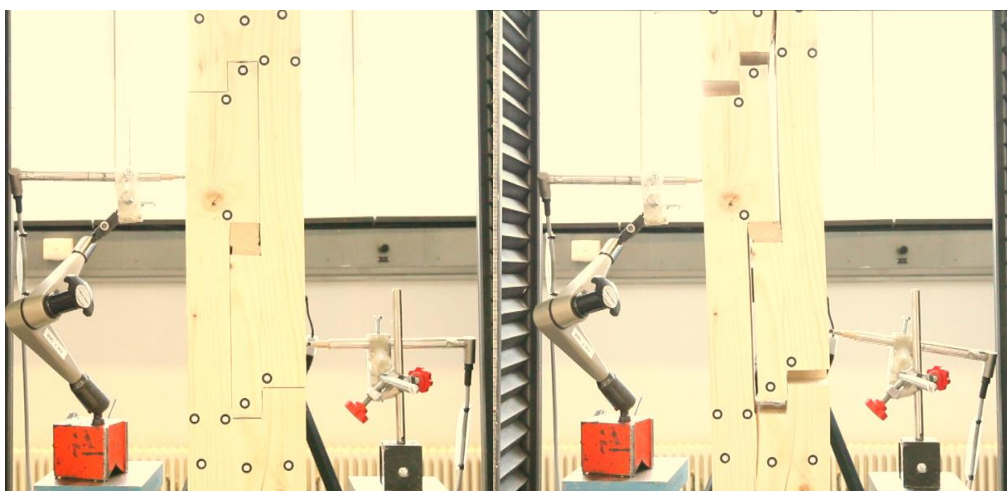
Forsøkene ble utført ved å påføre økende aksiell deformasjon per minutt i maskinen, og måle last mot deformasjon. Det første forsøket ble utført med en deformasjon på 1,8mm/min. De resterende forsøkene ble utført med en deformasjon på 2,5mm/min.

4.3.3 Usikkerheter ved forsøk

Noen av prøvene hadde virkefeil i form av tørkesprekker og kvist med plassering som kunne gi brudd ved en lavere last enn et prøvestykke uten samme virkefeil.

Ved forsøk av prøve nummer LLS-3 ble det utført en feil ved montering av prøvestykket, der det kun ble skrudd inn fra én side av prøvestykket. Feilen ble oppdaget før testen var kommet langt, og stoppet før det ble festet riktig og forsøket ble startet på nytt. Det ansees som viktig for kvalitetssikring av test å nevne dette avviket, selv om det tilsynelatende har gått bra.

Ved forsøk av prøve LR-1 oppsto det en vertikal forskyvning i den ene LVDT som følge av for slakk tilstramming av innfestning til måler med ID-nummer LVDT_WA20_ID2864_L2



Figur 19 - Avvik ved prøve

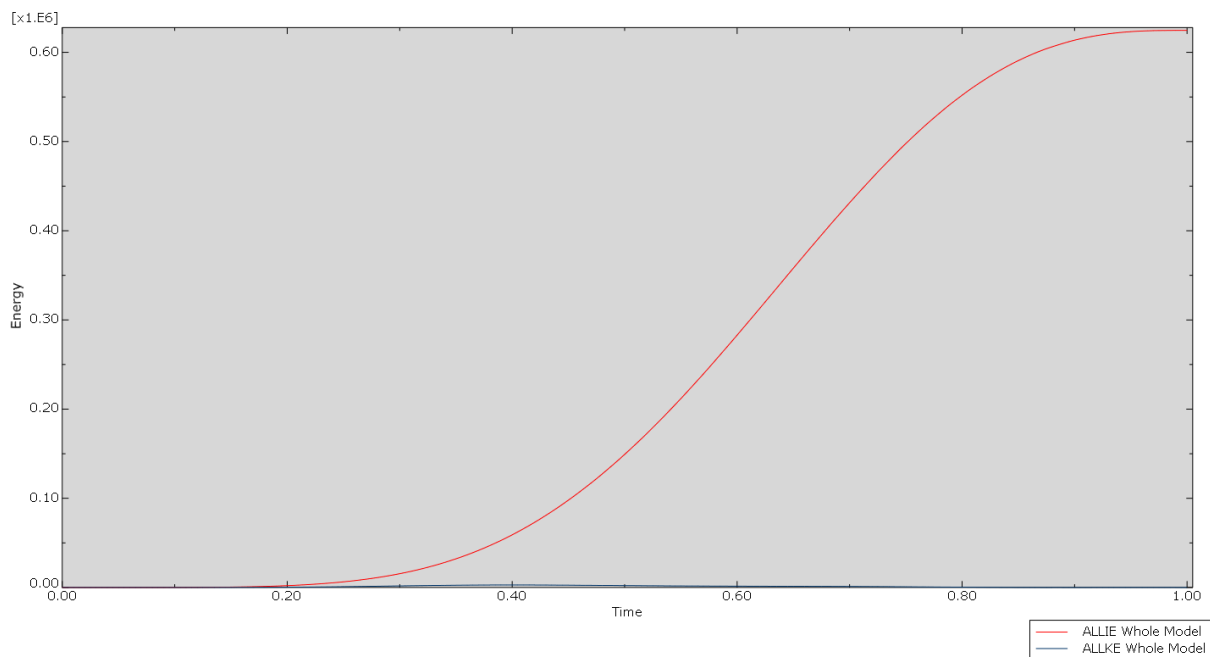
5 Resultater

Dette kapitlet skal presentere resultatene fra simuleringer, håndberegninger og testing på lab.

5.1 Simuleringer

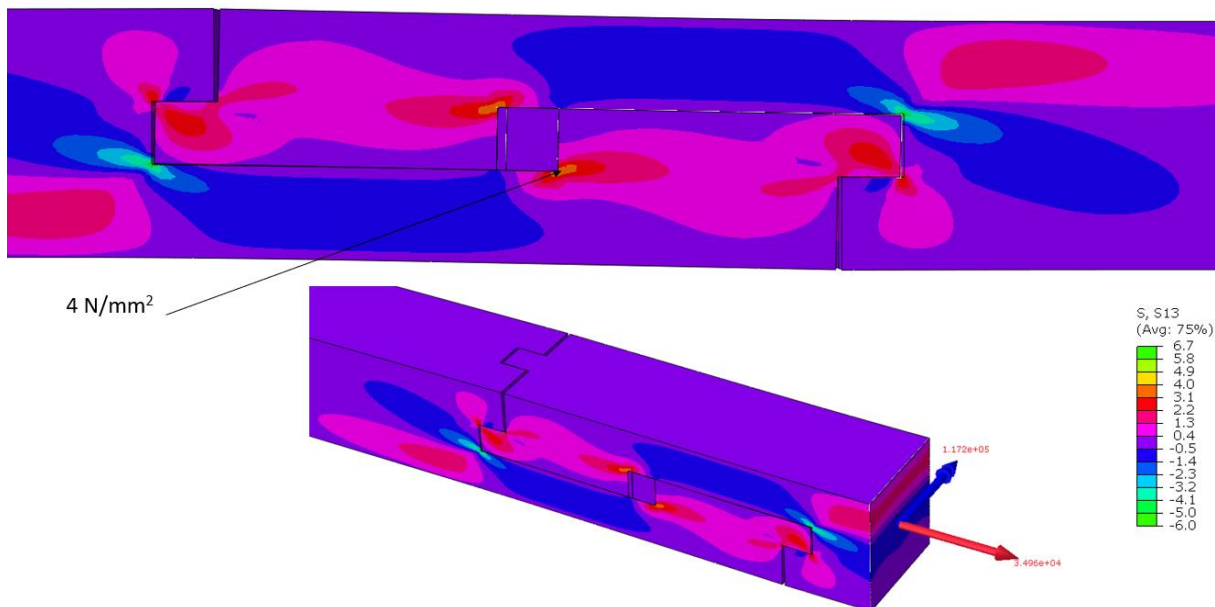
Resultater fra simulering av hver utforming skal presenteres hver for seg, først med validering av simulering ved å sammenlikne kinetisk og intern energi. Deretter skal last ved skjærbrudd presenteres med påfølgende tverrstreksspenninger ved skjærbrudd, før last ved punkt for påbegynt tverrstreksbrudd beskrives.

5.1.1 Rett



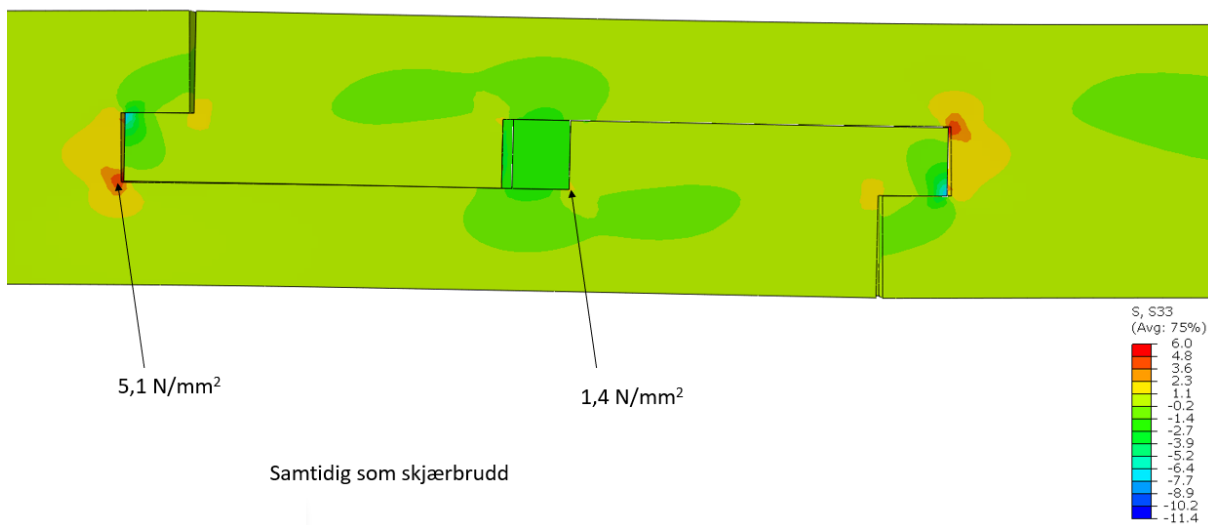
Figur 20 - Rett - Kinetisk energi mot intern energi

Kinetisk energi overgikk ikke akseptabelt nivå i forhold til intern energi, resultater fra simulering er derfor valide.



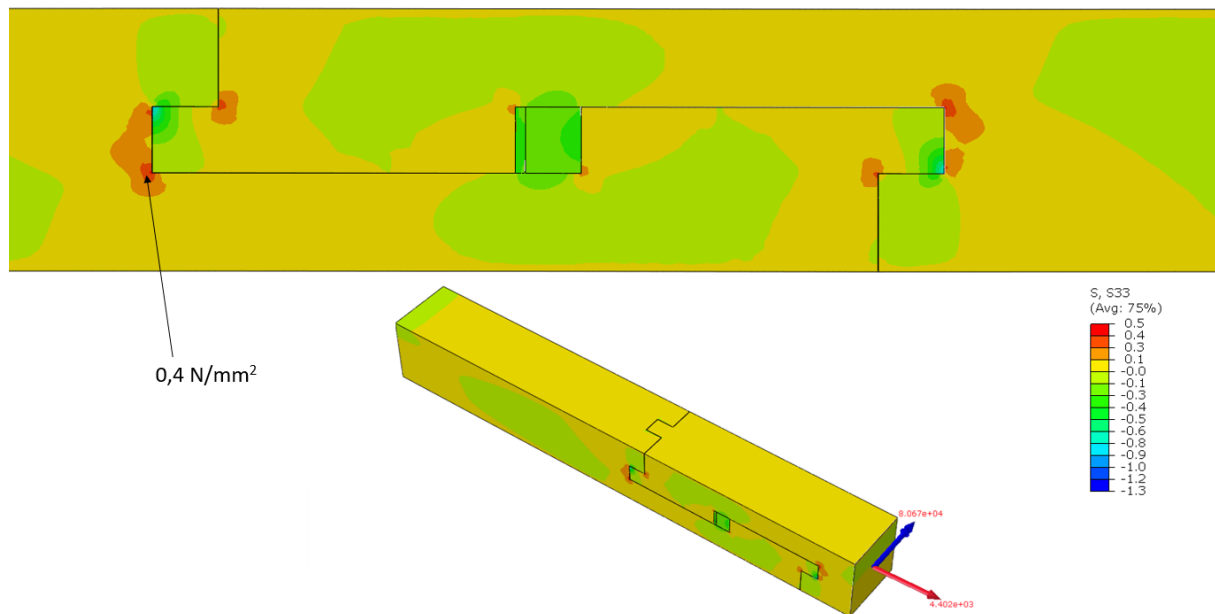
Figur 21 - simulering - Rett - skjær

Skjærbrudd inntreffer når spenninger overstiger 4 N/mm^2 . Når dette inntreffer i simulering er resultantkraft N målt til $34,96 \text{ kN}$. Samtidig som skjærbrudd inntreffer måles et nivå for tverrstrekk til $1,4 \text{ N/mm}^2$ ved innhakk mot kiler og $5,1 \text{ N/mm}^2$ ved horisontaltapp.



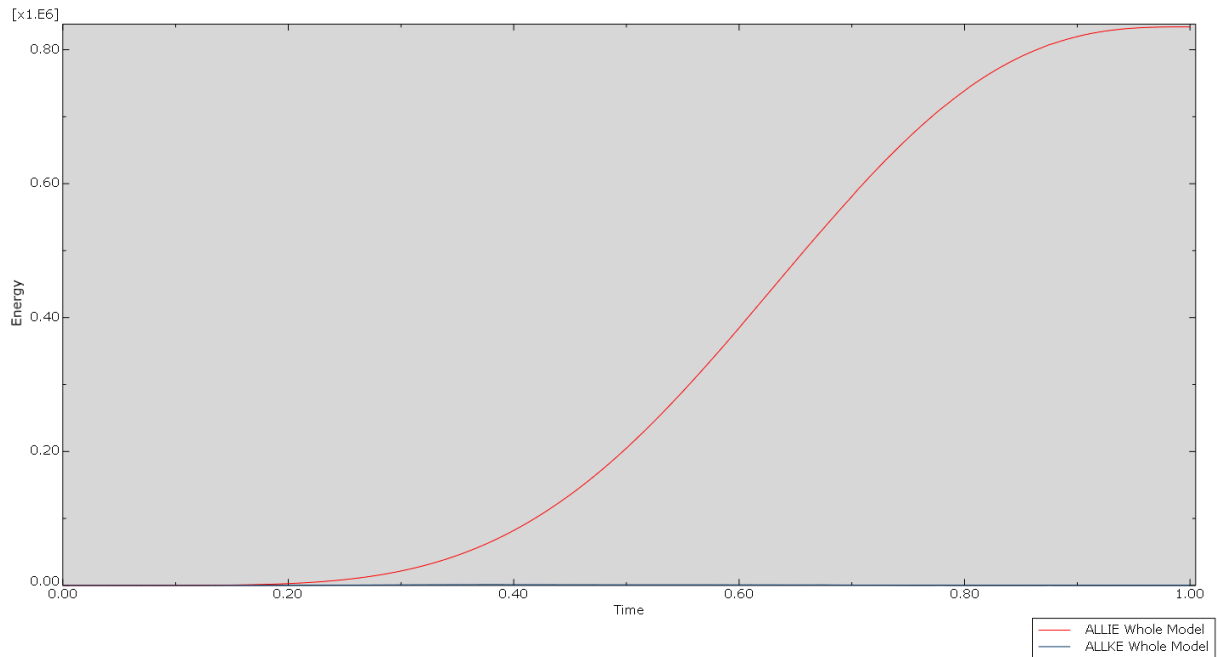
Figur 22 - Simulering - Rett - tverrstrekk ved skjærbrudd

Tverrstrekk påbegynnes når spenninger overstiger $0,4 \text{ N/mm}^2$. Når dette inntreffer måles en resultantkraft N til $4,4 \text{ kN}$.



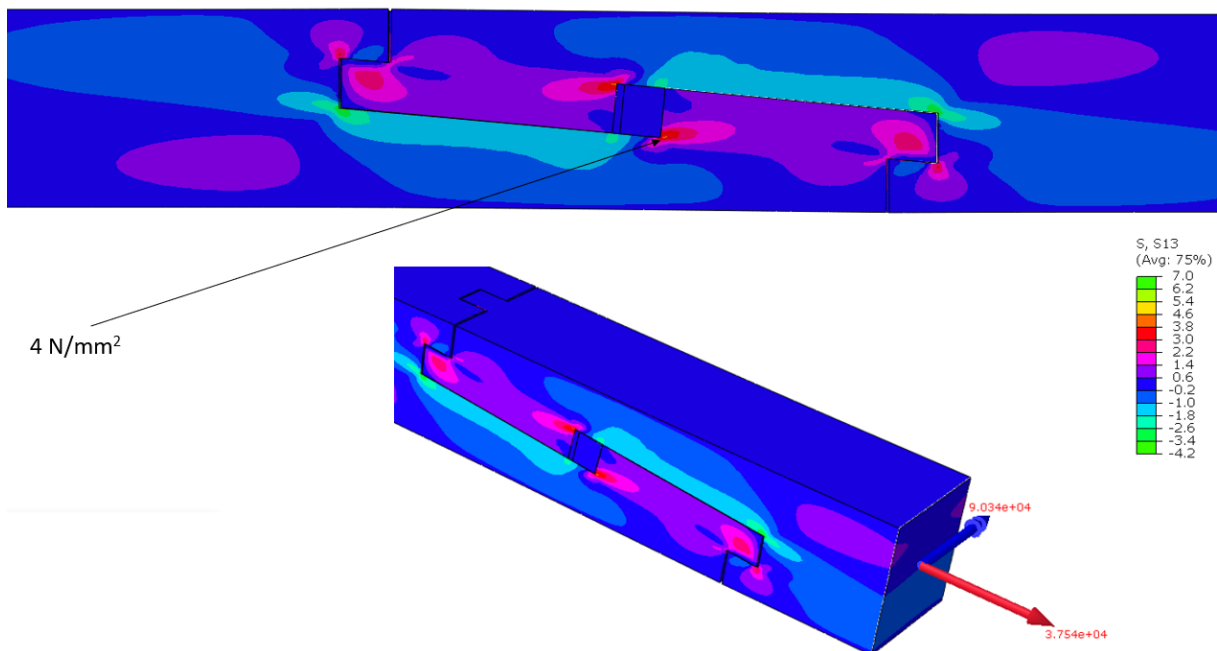
Figur 23 - Simulering - Rett - last ved grense for tverrstrekk

5.1.2 Skrå



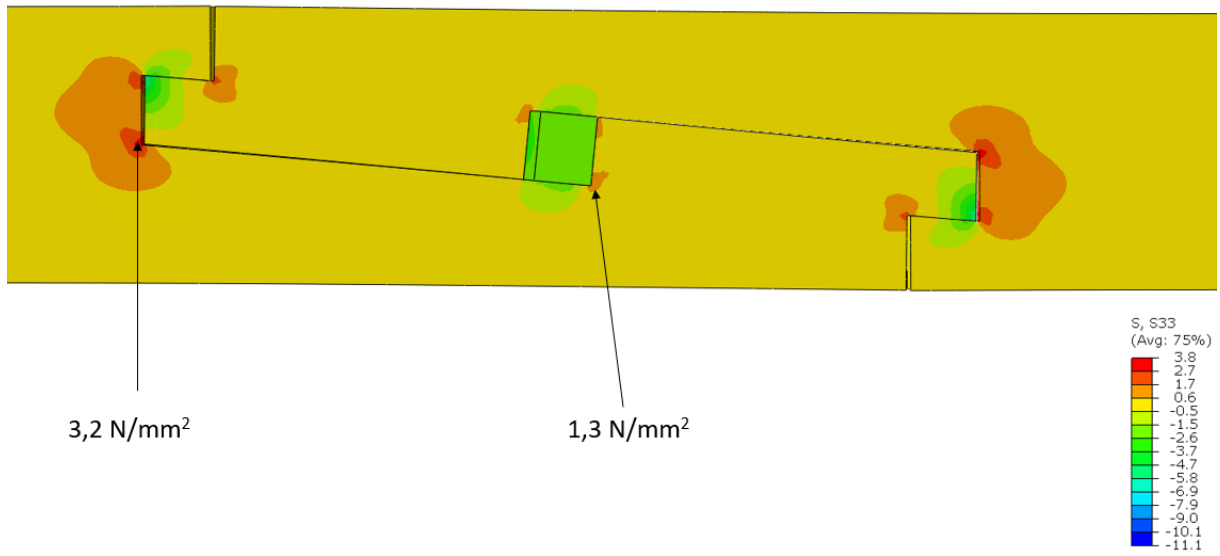
Figur 24 - Skrå - Kinetisk energi mot intern energi

Kinetisk energi overgikk ikke akseptabelt nivå i forhold til intern energi, resultater fra simulering er derfor valide.

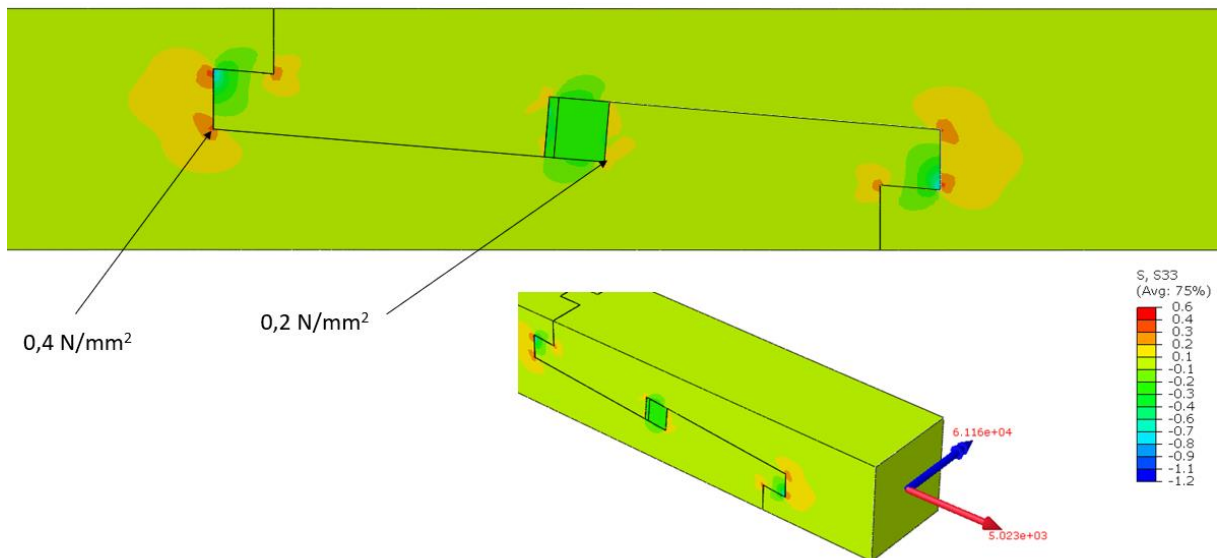


Figur 25 - Simulering - Skrå - skjær

Ved skjærbrudd måles en resulterende aksialkraft på 37,54 kN. Samtidig måles tverrstrekk ved innhakk mot kiler til 1,3 N/mm² og horisontaltapp til 3,2 N/mm².



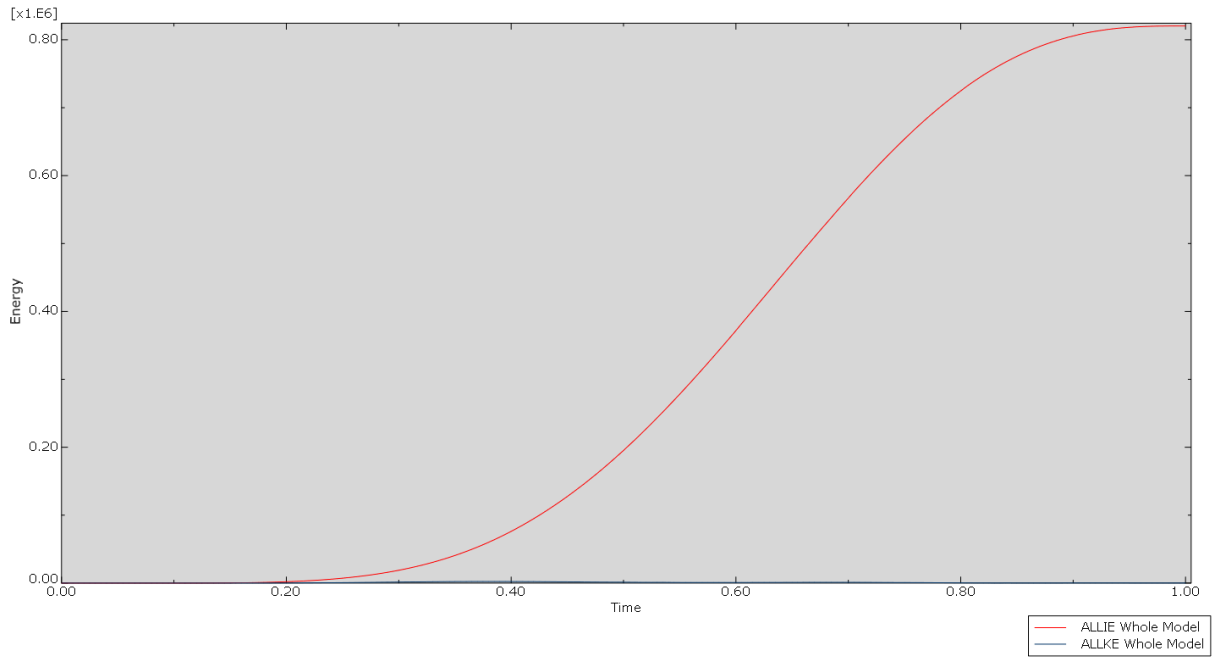
Figur 26 - Simulering - Skrå - tverrstrekk ved skjærbrudd



Figur 27 - Simulering - Skrå - last ved grense for tverrstrekk

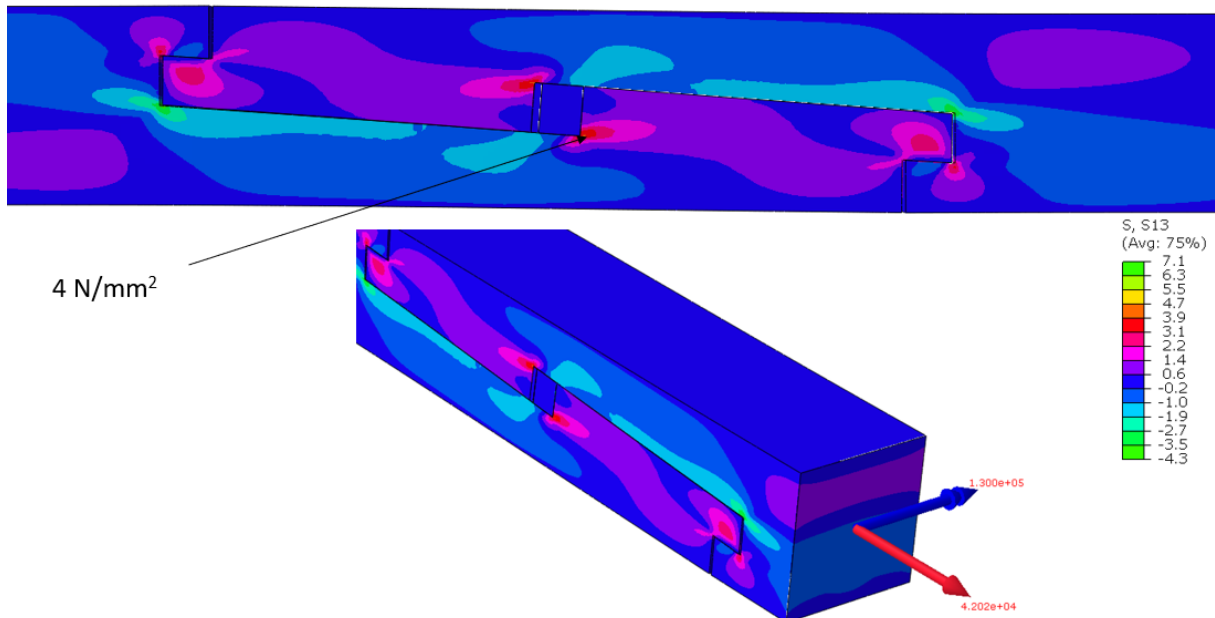
Ved påbegynnelse av tverrstrekk måles en resulterende aksialkraft på 5 kN

5.1.3 Lang skrå



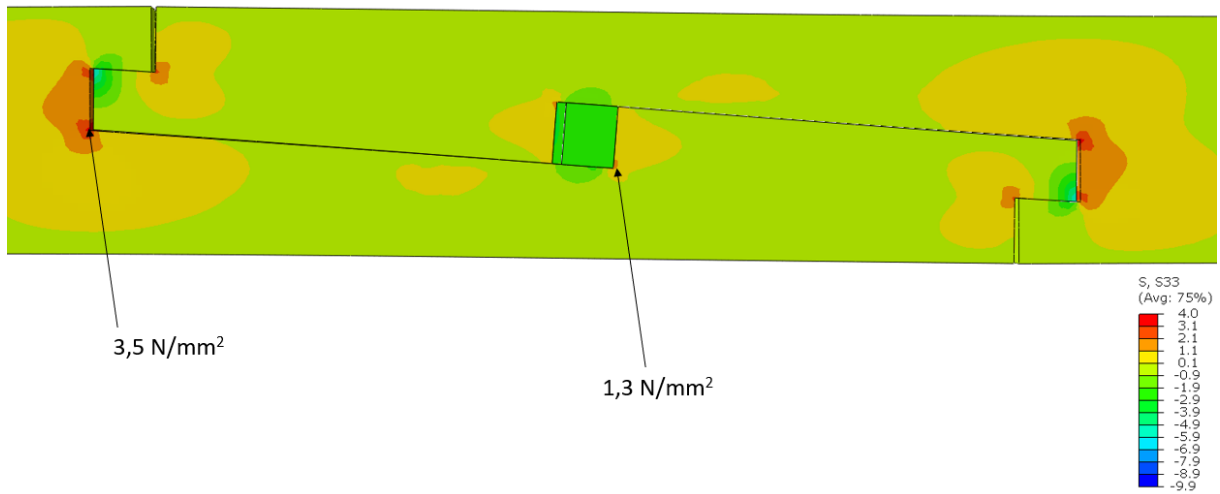
Figur 28 - Lang skrå - Kinetisk energi mot intern energi

Kinetisk energi overgikk ikke akseptabelt nivå i forhold til intern energi, resultater fra simulering er derfor valide.



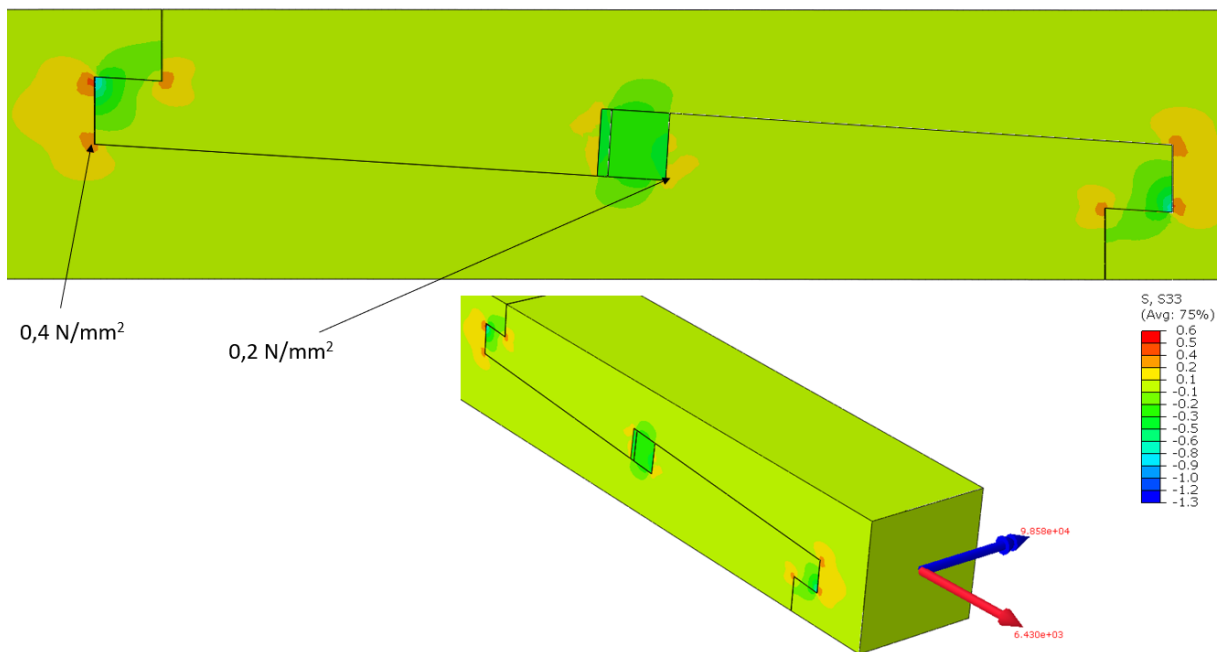
Figur 29 - Simulering - Lang skrå - skjær

Ved skjærbrudd måles en resulterende aksiell kraft på 42,02 kN. Samtidig måles tverrstrekk ved innhakk mot kiler til 1,3 N/mm² og ved horisontaltapp til 3,5 N/mm²



Figur 30 - Simulering - Lang skrå - tverrstrekk ved skjærbrudd

Ved påbegynnelse av tverrstrekk måles en resulterende aksiell kraft til 6,43 kN



Figur 31 - Simulering - Lang skrå - last ved grense for tverrstrekk

5.2 Håndberegninger

Ved håndberegninger er formler gitt i teorikapittelet benyttet. Beregningene ga følgende resultater:

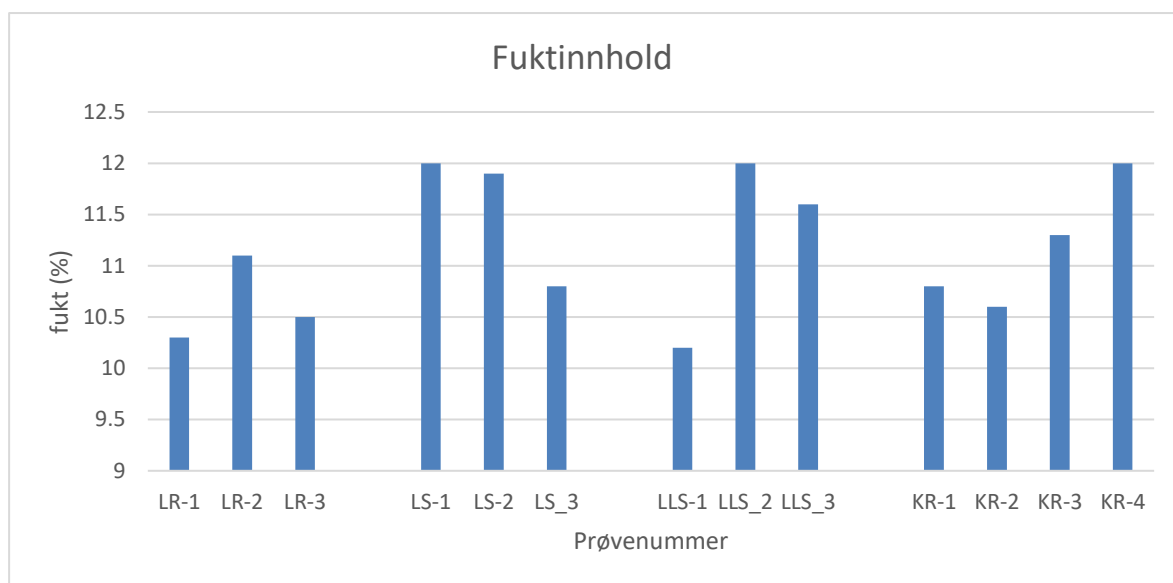
Tabell 3 – Resultater fra håndberegninger

Utforming	N_{Rd} (kN) ved skjærbrudd Ligning (3)	N_{Rd} (kN) ved kombinert skjærbrudd og tverstrekk Ligning (11)	Strekkspenning i redusert tverrsnitt (N/mm ²) Ligning (6)	Kraften P ved skjærbrudd (kN) Ligning (5)	Tverstrekk som følge av P ved skjærbrudd (N/mm ²) Ligning (12)	N ved tverstrekk ved horisontaltapp (kN) Ligning (15)
Rett	31,8	31,8	5,4	7,3	3	4,2
Skrå	39,2	28,6	4,9	3,3	1,1	10,2
Lang skrå	52,8	41,3	7	3,5	1,2	13,8

5.3 Test på lab

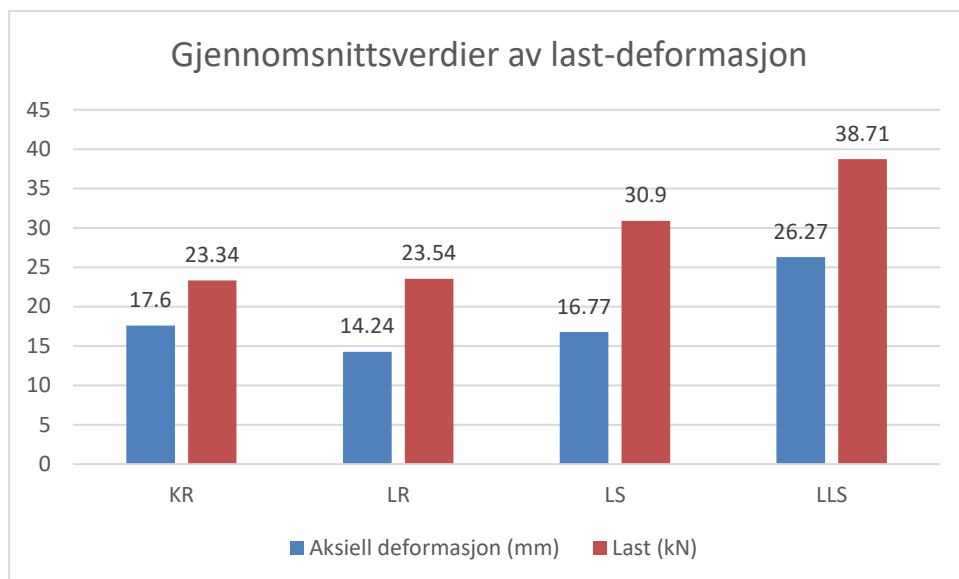
Dette delkapittelet skal beskrive resultatene fra testing på lab. Det settes først opp fuktinnhold og en oversikt over alle testene med bruddform, maks last og aksial deformasjon ved maks last. Deretter skal resultatene fra hvert enkelt forsøk beskrives nærmere.

Felles for alle testene var at kilene ble kraftig komprimert, og fikk en sideveis utpressning.



Figur 32 - Fuktinnhold

Fuktinnhold i samtlige prøver ble målt med hammerelektrode, og alle prøvene hadde fuktnivå under 12%.

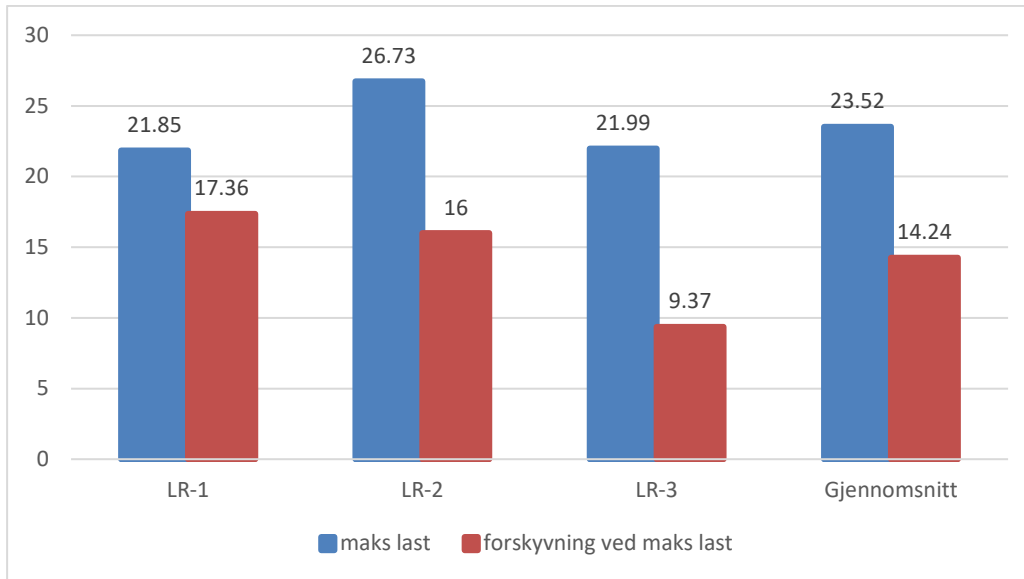


Figur 33 - Gjennomsnittsverdier av test-resultater

Tabell 4 - Resultater fra lab

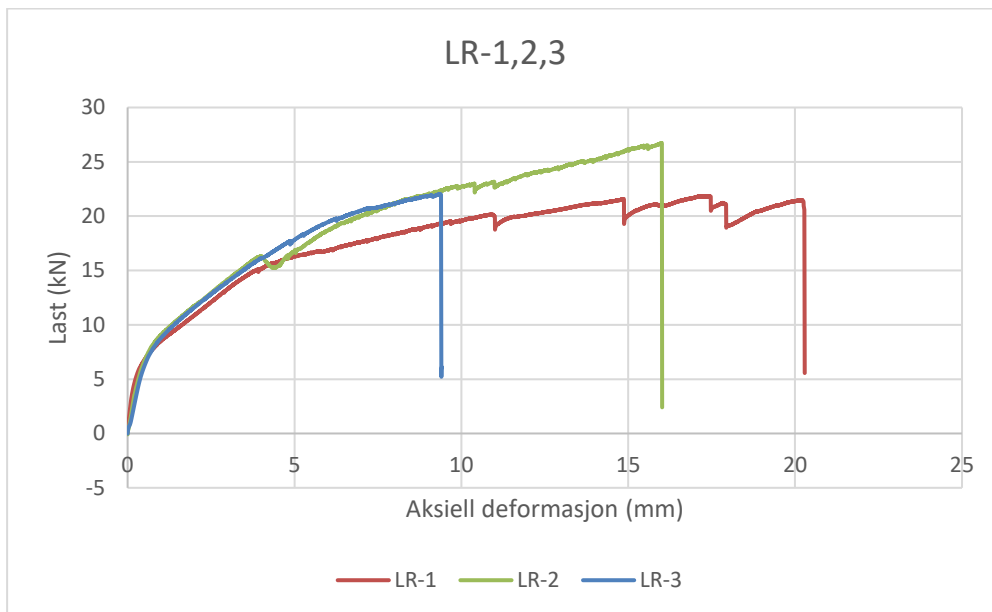
Prøvenavn	Forskyvningshastighet	Maks Last	Aksiell deformasjon ved maks last	Bruddform
LR-1	1,8 mm/min	21,85 kN	17,36 mm	Skjærbrudd
LR-2	2,5 mm/min	26,73 kN	16,00 mm	Skjærbrudd
LR-3	2,5 mm/min	21,99 kN	9,37 mm	Skjærbrudd
LS-1	2,5 mm/min	34,23 kN	17,97 mm	Skjærbrudd
LS-2	2,5 mm/min	31,24 kN	9,71 mm	Skjærbrudd
LS-3	2,5 mm/min	27,23 kN	22,62 mm	Tverrestrekk før skjærbrudd
LLS-1	2,5 mm/min	35,89 kN	26,18 mm	Skjærbrudd
LLS-2	2,5 mm/min	45,01 kN	28,45 mm	Skjærbrudd
LLS-3	2,5 mm/min	35,24 kN	24,18 mm	Tverrestreksbrudd
KR-1	2,5 mm/min	23,18 kN	8,84 mm	Skjærbrudd
KR-2	2,5 mm/min	20,28 kN	8,85 mm	Strekbrudd
KR-3	2,5 mm/min	28,43 kN	29,92 mm	Tverrestrekk til strekkbrudd
KR-4	2,5 mm/min	21,46 kN	22,79 mm	Skjærbrudd

5.3.1 Limtre Rett

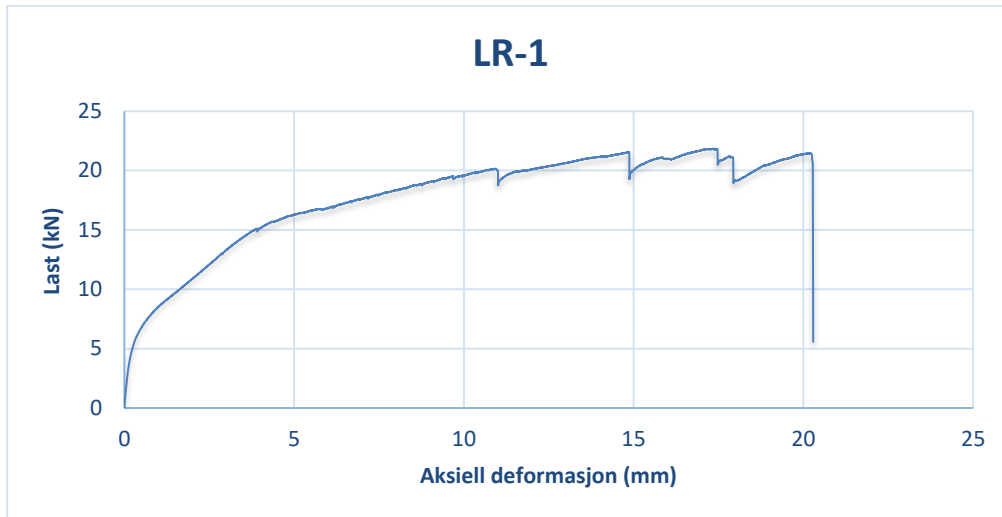


Figur 34 - LR - Gjennomsnittsverdi

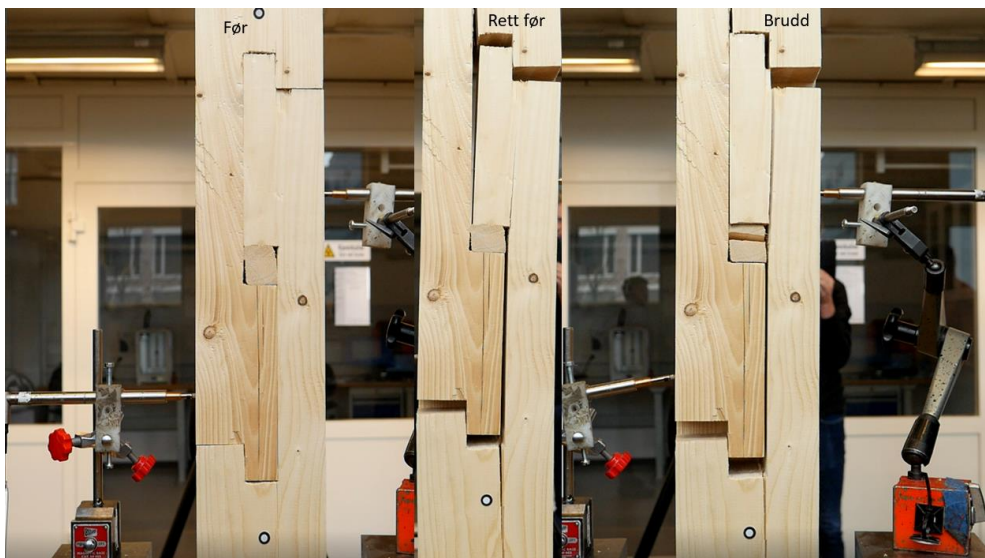
Prøve LR-1,2,3 hadde gjennomsnittlig maks last på 23,52 kN og gjennomsnittlig aksial deformasjon ved maks last på 14,24 mm



Figur 35 - LR-1,2,3 - diagram last, deformasjon



Figur 36 - LR-1 - diagram last, deformasjon

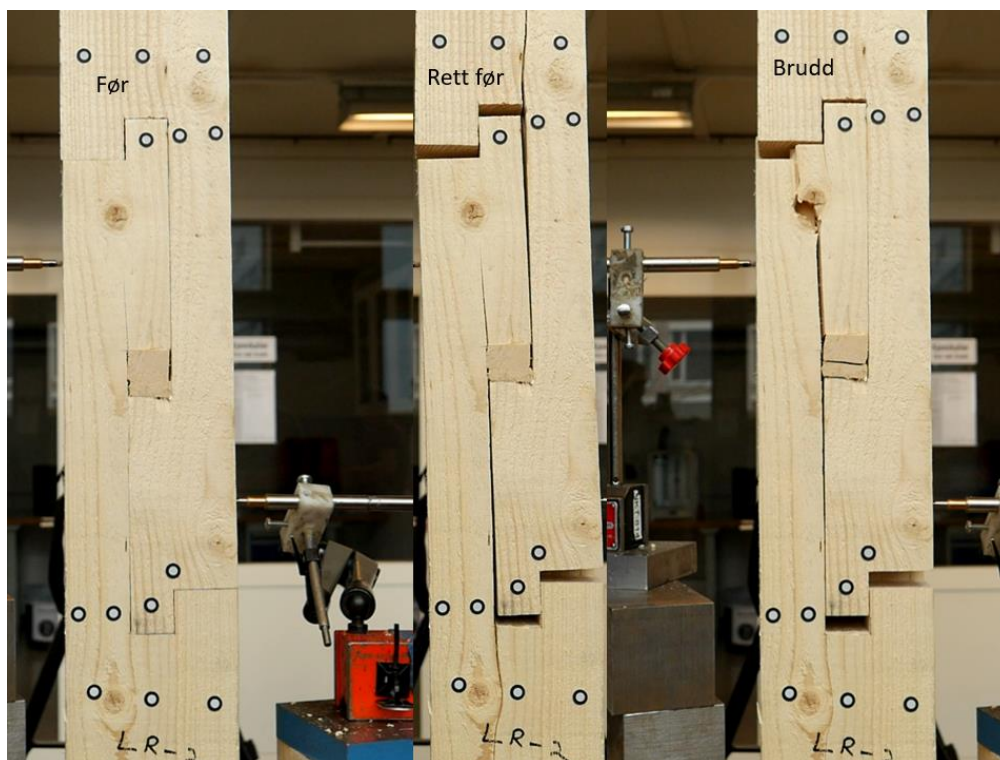


Figur 37 - LR-1 Bilder fra forsøk

Prøve nummer LR-1 nådde en maks last på 21,85 kN etter 17,33mm aksiell deformasjon. På dette punktet oppsto det et begynnende tverrstreksbrudd ved innhakk mot kiler. Deformasjon fortsetter, og lasten kommer bare nesten opp til maks før skjærbrudd oppstår.

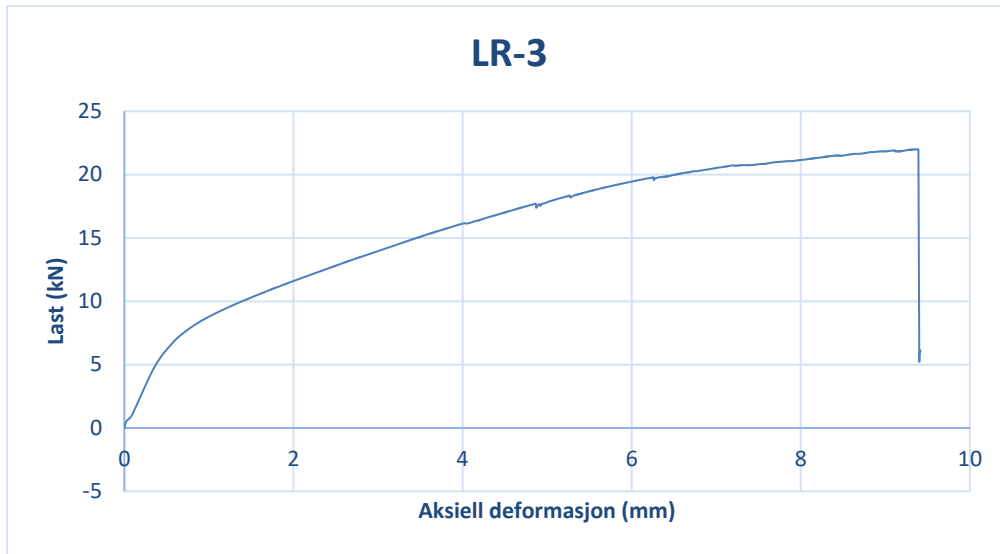


Figur 38 - LR-2 - diagram last, deformasjon

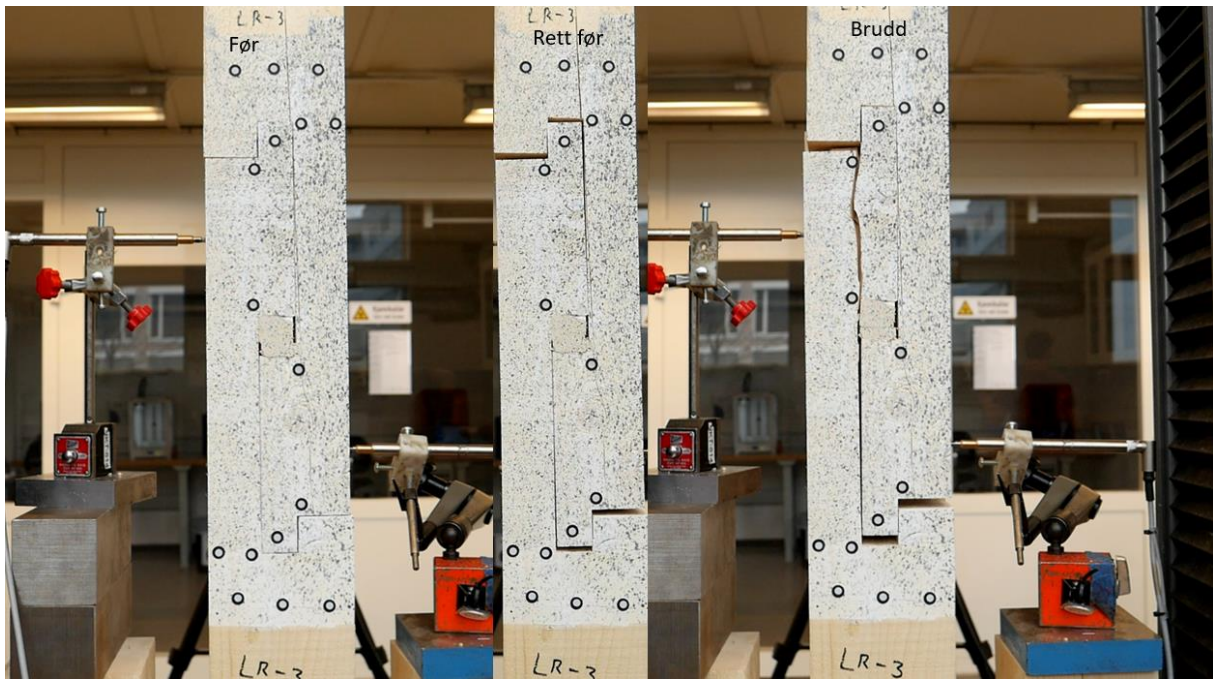


Figur 39 - LR-2 - bilder fra forsøk

Prøve nummer LR-2 nådde skjærbrudd ved en maks last på 26,73 kN og 16 mm aksial deformasjon. Brudd beveger seg rundt kvist.



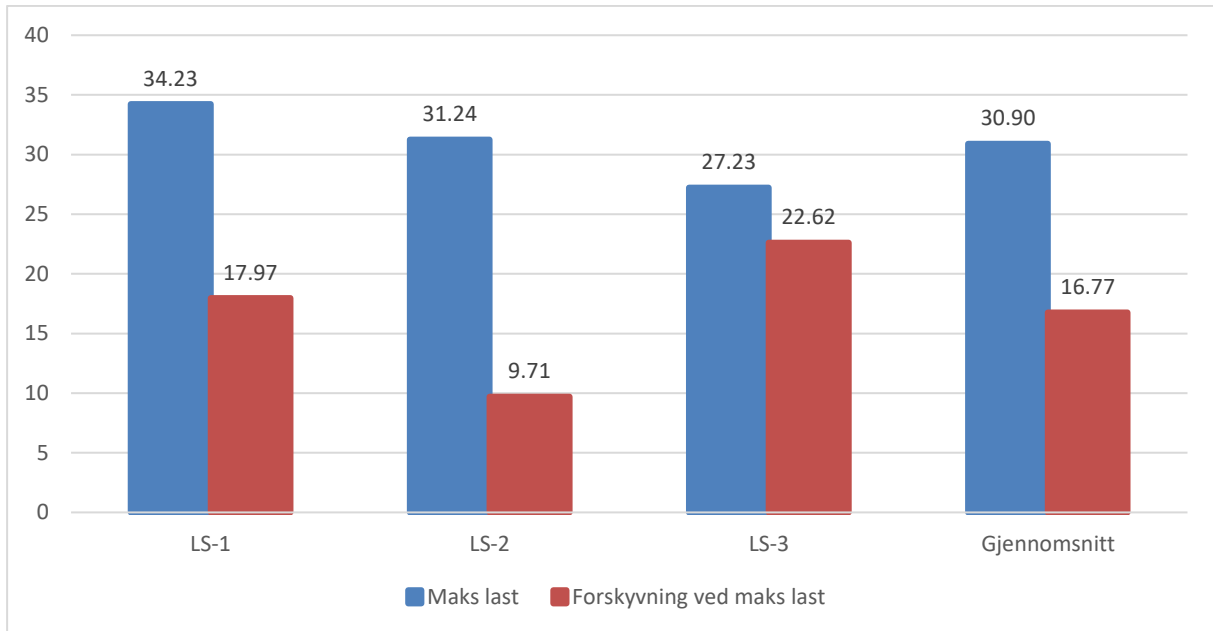
Figur 40 - LR-3 - diagram last, deformasjon



Figur 41 - LR-3 - bilder fra forsøk

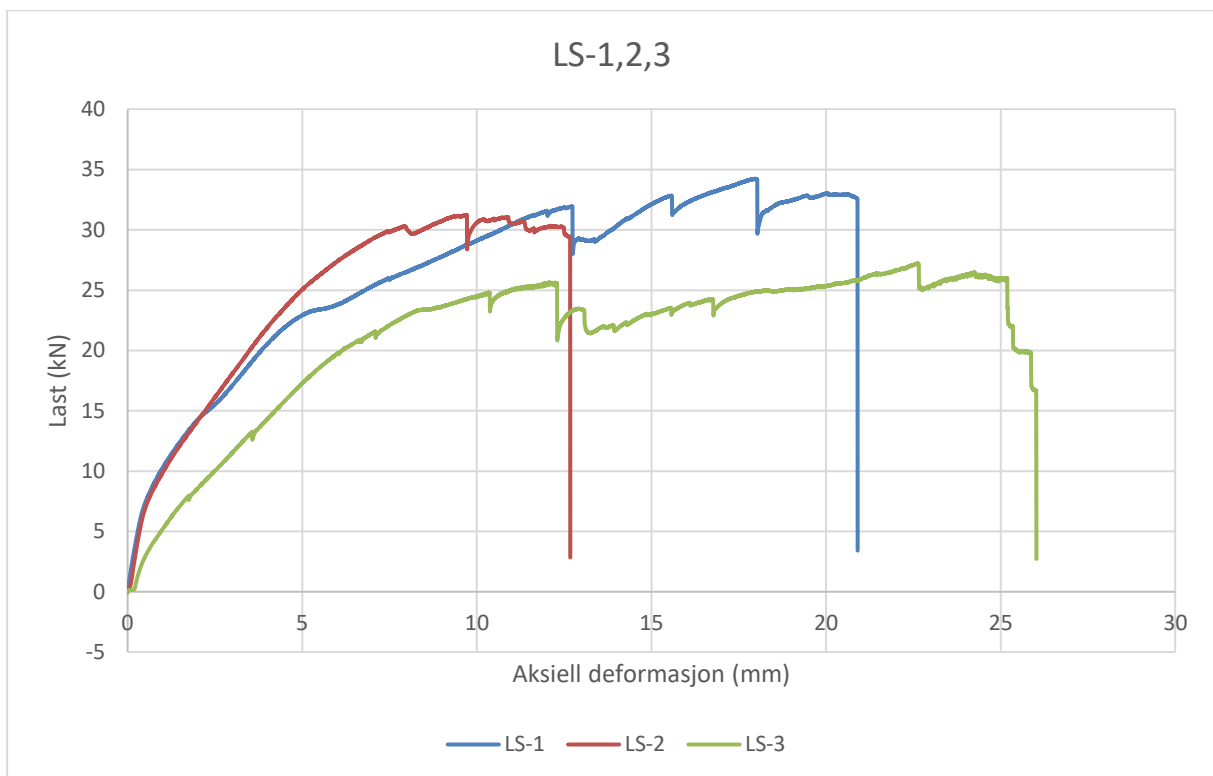
Prøve LR-3 nådde skjærbrudd ved en maks last på 21,99kN og 9,37mm aksiell deformasjon.

5.3.2 Limtre Skrå

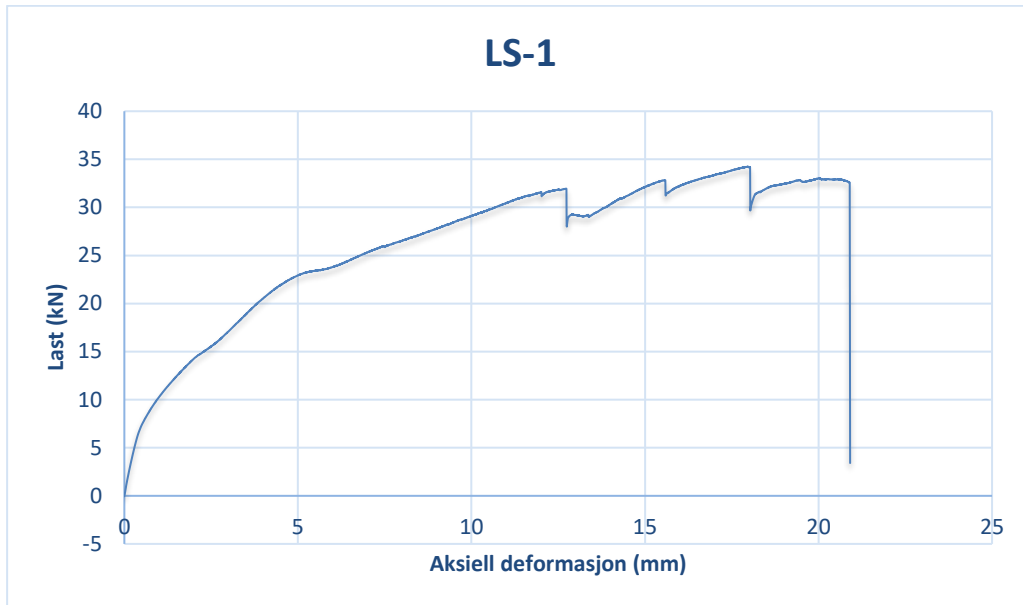


Figur 42 - LS - Gjennomsnittsverdi

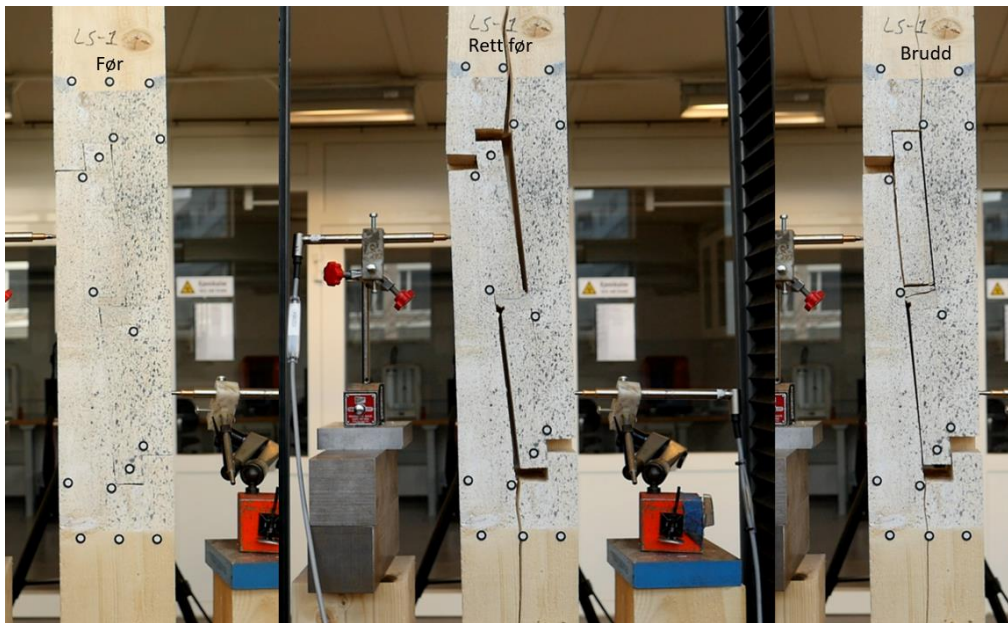
Prøvene LS-1,2,3 hadde en gjennomsnittlig maks last på 30,9 kN og gjennomsnittlig aksial deformasjon ved maks last på 16,77 mm.



Figur 43 - LS-1,2,3 - diagram last, deformasjon

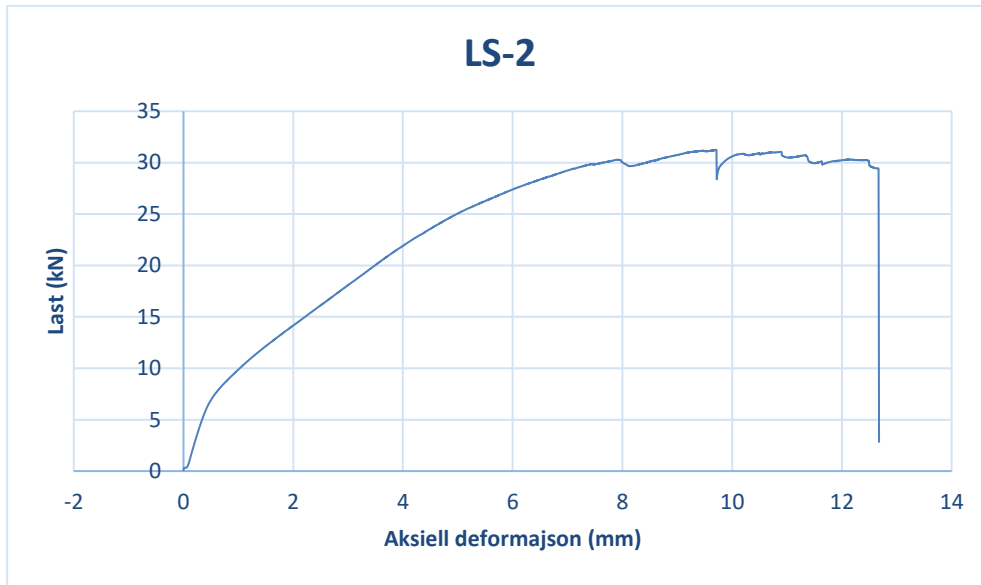


Figur 44 - LS-1 - diagram last, deformasjon

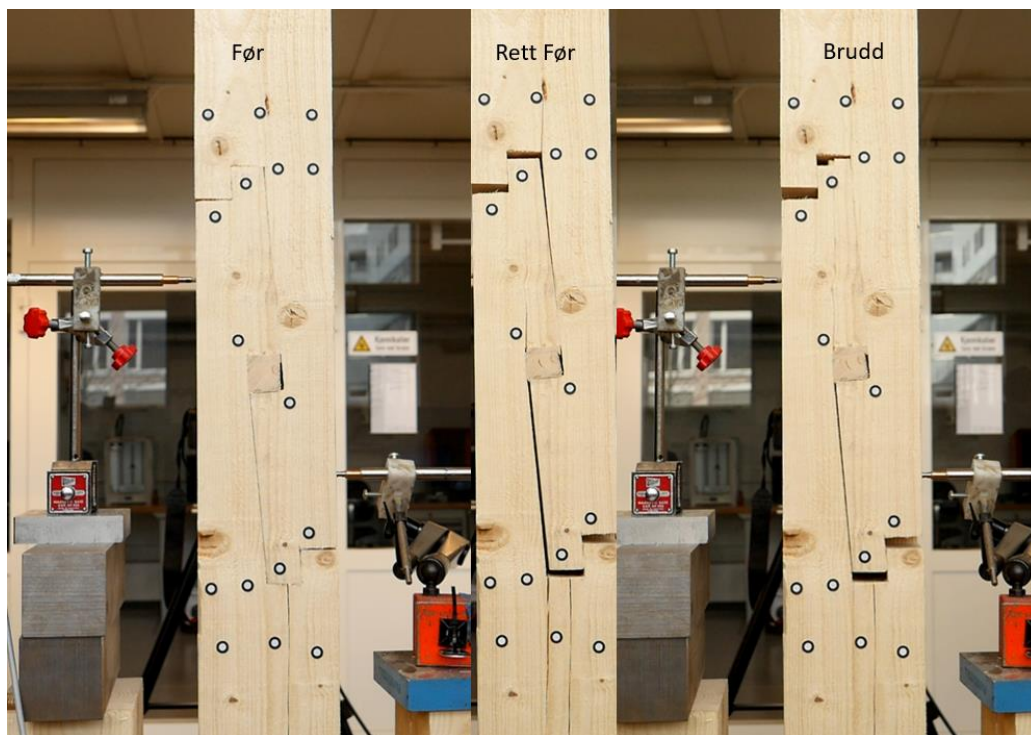


Figur 45 - LS-1 - bilder fra forsøk

LS-1 nådde en maks last på 34,23 kN ved aksiell deformasjon på 17,97mm. På dette punktet var det tverrstrekk i øvre del og påbegynnende tverrstrekk i nedre del. Ved deformasjon på 20,9mm inntraff skjærbrudd.



Figur 46 - LS-2 - diagram last, deformasjon

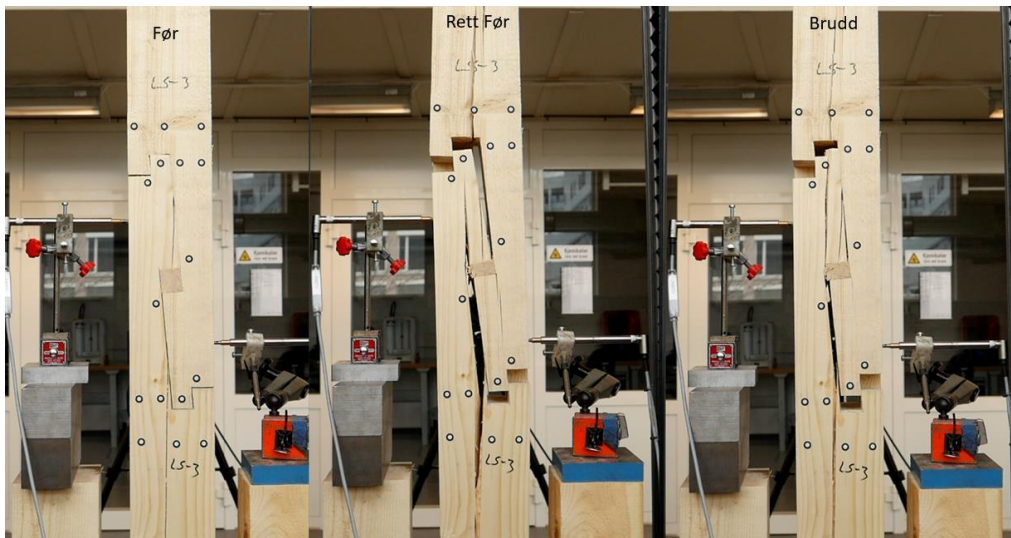


Figur 47 - LS-2 - bilder fra forsøk

Prøve nummer LS-2 nådde en maks last på 31,24 kN ved aksiell deformasjon på 9,71mm, da det oppsto tverrstrekk. Deformasjon fortsetter og last når et jevnt nivå opp mot maks last før skjærbrudd inntreffer.



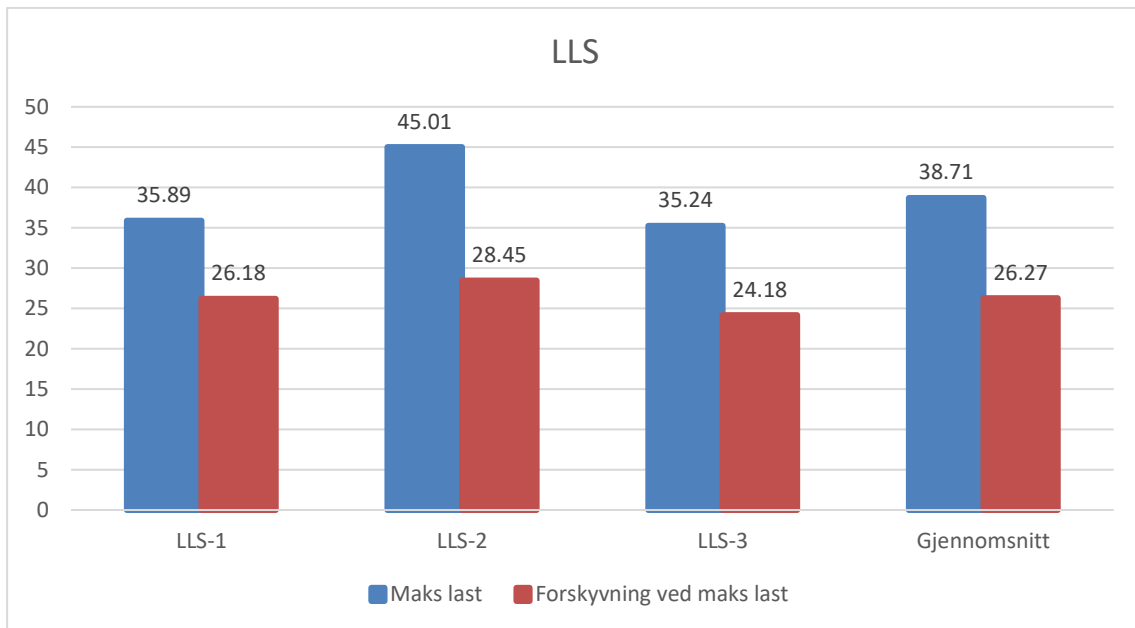
Figur 48 - LS-3 - diagram last, deformasjon



Figur 49 - LS-2 - bilder fra forsøk

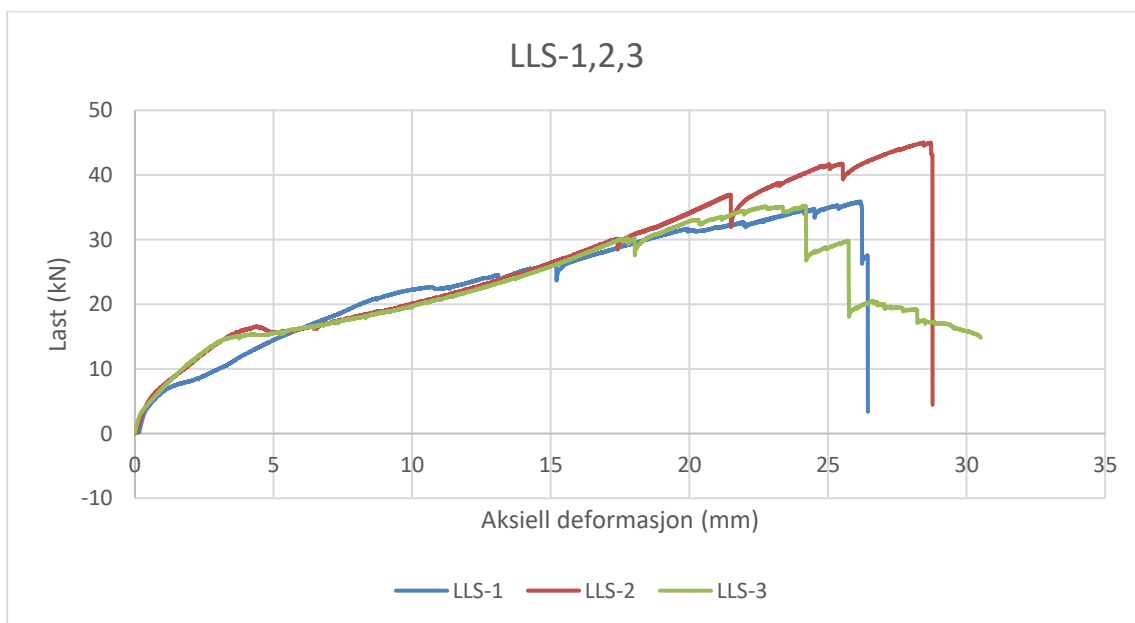
Prøve nummer LS-3 får kraftig tverrstrekk og skjærbrudd inntreffer ved maks last på 27,23 kN og aksiell deformasjon på 22,62 mm

5.3.3 Limtre Lang Skrå

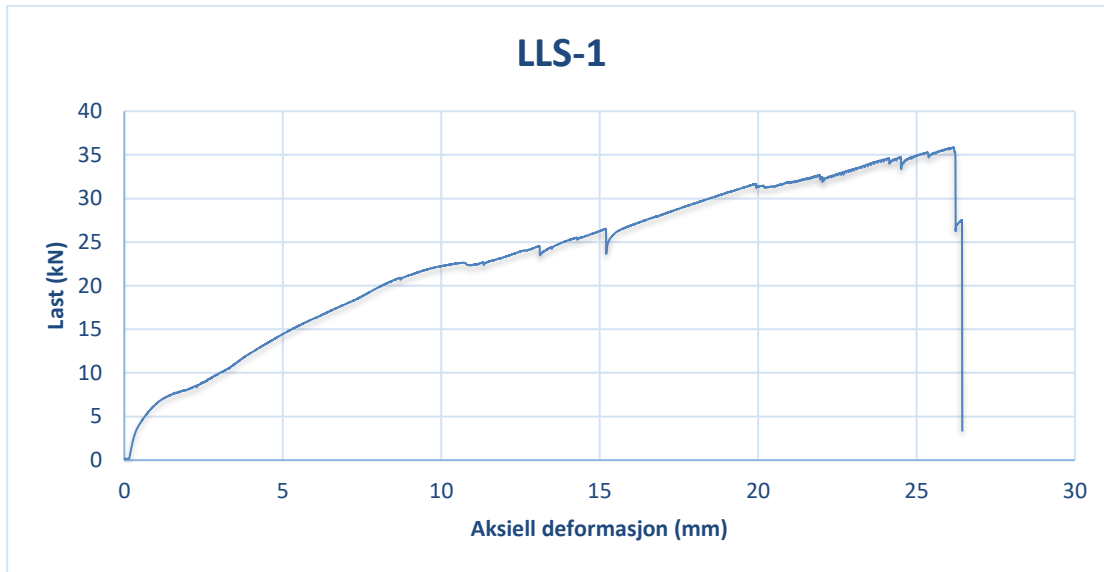


Figur 50 - LLS - Gjennomsnittsverdi

Prøvene LLS-1,2,3 hadde en gjennomsnittlig maks last på 38,71 kN og en gjennomsnittlig aksial deformasjon ved maks last på 26,27 mm



Figur 51 - LLS-1,2,3 - diagram last, deformasjon



Figur 52 - LLS-1 - diagram last, deformasjon

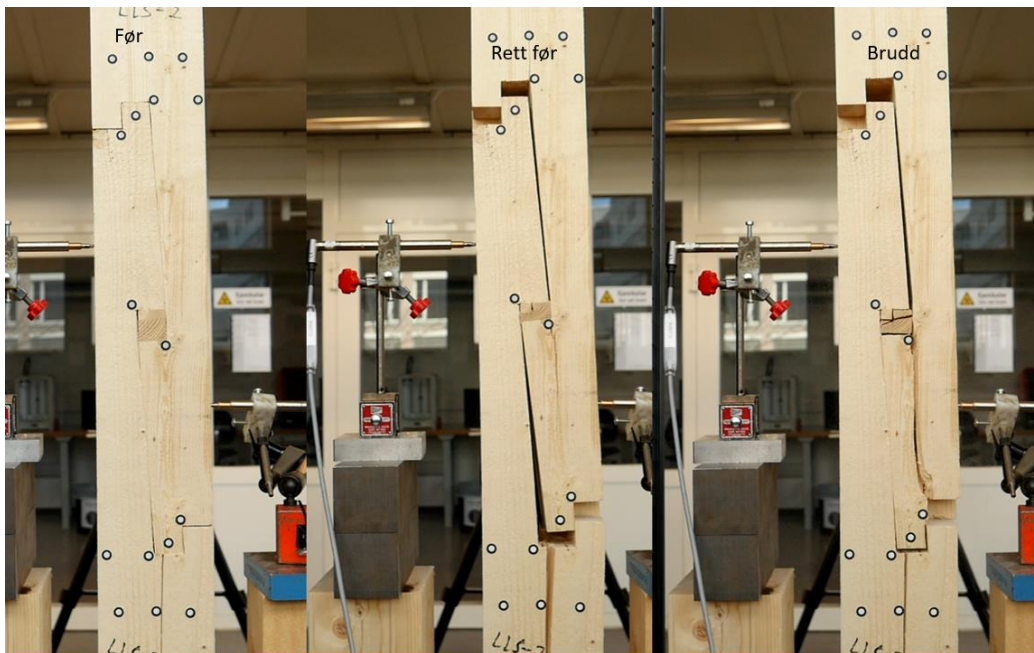


Figur 53 - LLS-1 - bilder fra forsøk

Prøve nummer LLS-1 nådde skjærbrudd ved maks last på 35,89 kN og aksiell deformasjon på 26,18mm.



Figur 54 - LLS-2 - diagram last, deformasjon

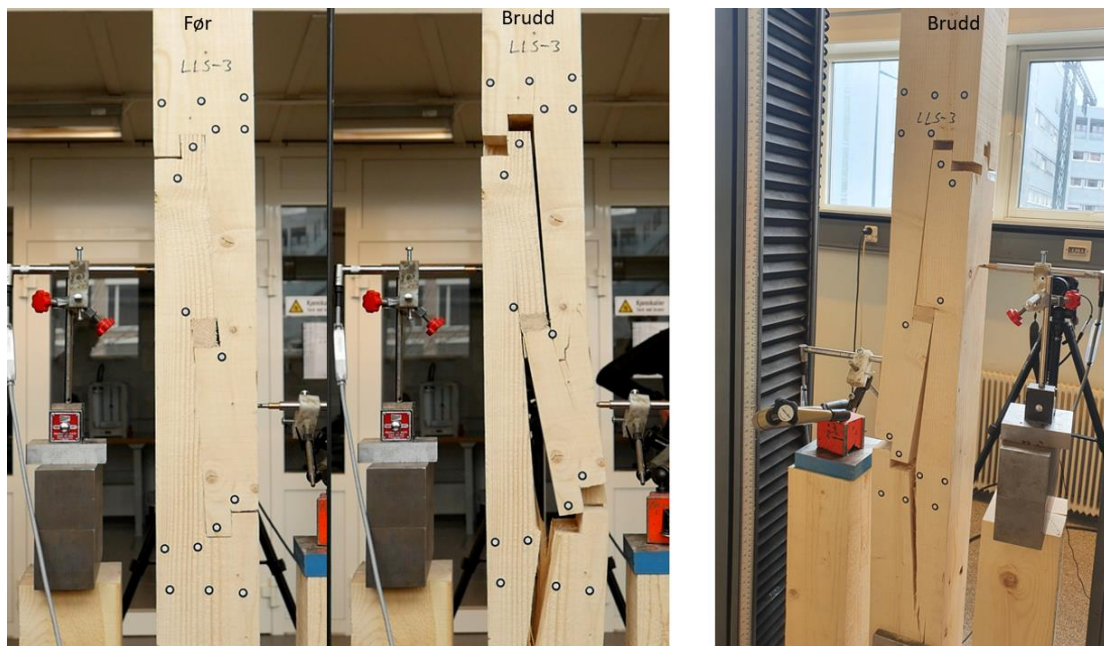


Figur 55 - LLS-2 - bilder fra forsøk

Prøve nummer LLS-2 nådde skjærbrudd ved en maks last på 45,01 kN ved aksiell deformasjon på 28,45 mm.



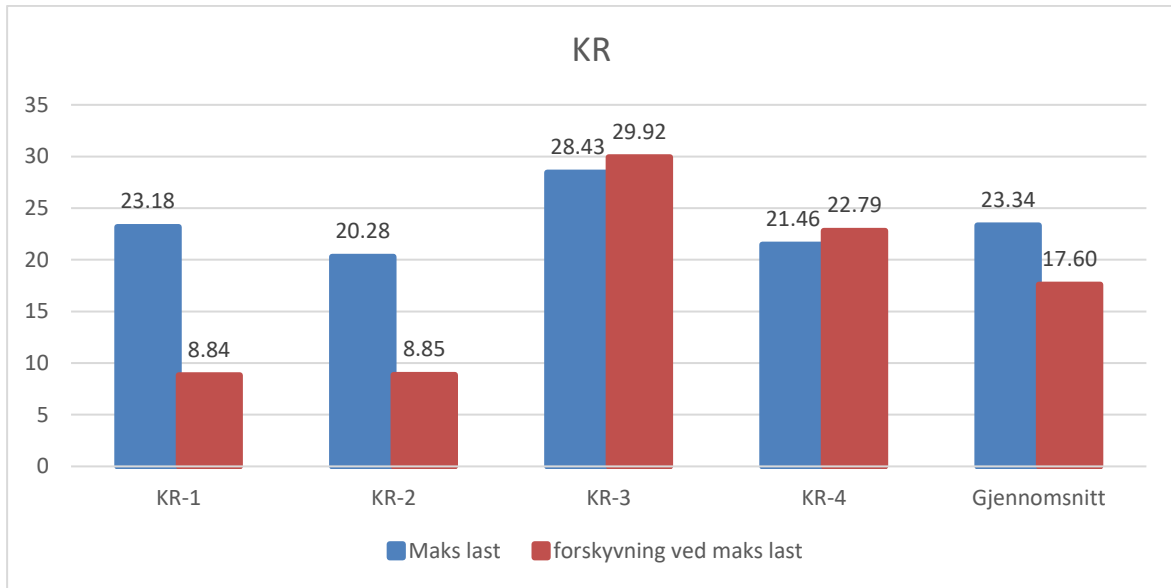
Figur 56 - LLS-3 - diagram last, deformasjon



Figur 57 - LLS-3 - bilder fra forsøk

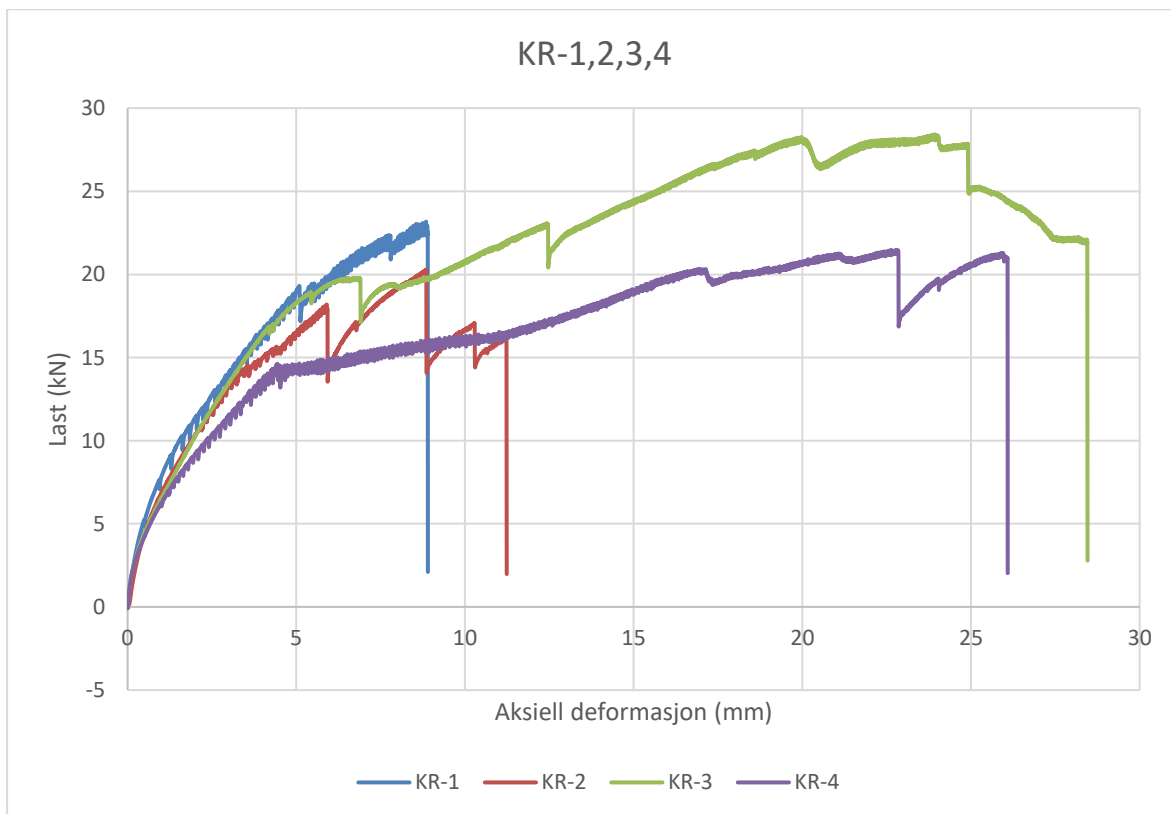
Prøve nummer LLS-3 nådde tverrstreksbrudd ved en maks last på 35,24 kN og 24,18 mm aksiell deformasjon.

5.3.4 Konstruksjonsvirke Rett

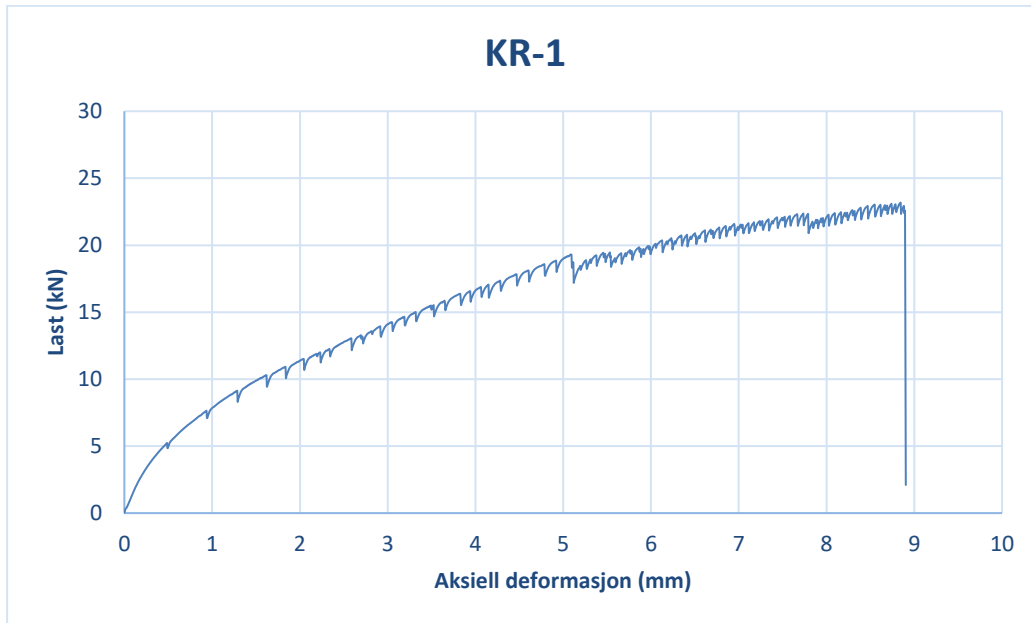


Figur 58 - KR - Gjennomsnittsverdi

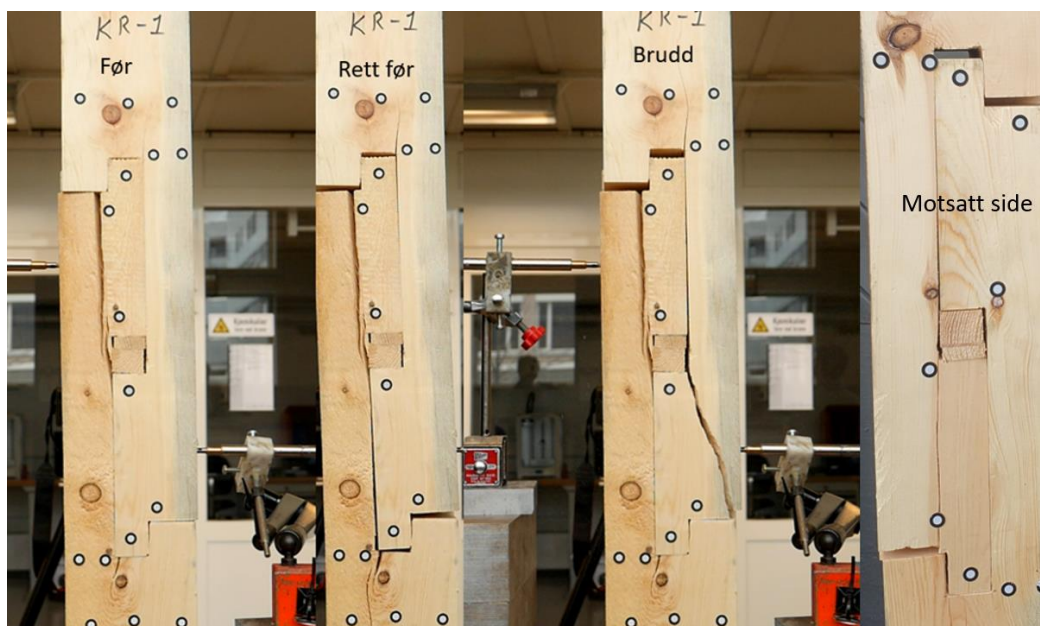
Prøvene KR-1,2,3,4 hadde et gjennomsnitt av maks last på 23,34 kN og et gjennomsnitt av deformasjon ved maks last på 17,6 mm.



Figur 59 - KR-1,2,3,4 - diagram last, deformasjon

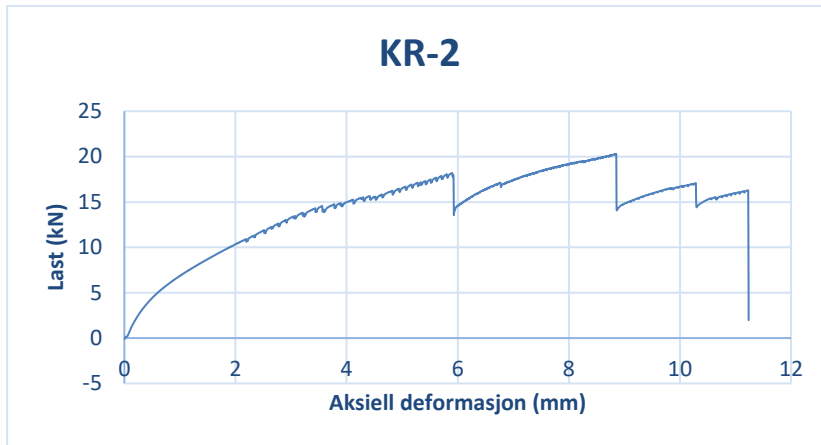


Figur 60 - KR-1 - diagram last, deformasjon

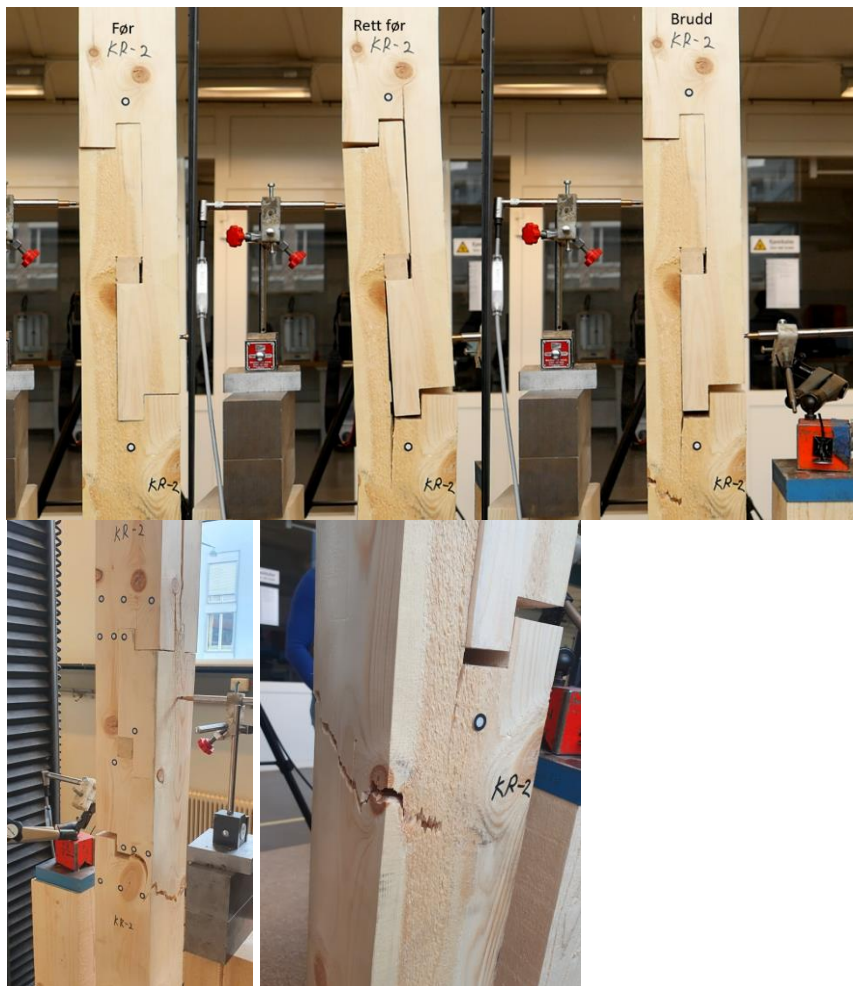


Figur 61 - KR-1 - bilder fra forsøk

Prøve nummer KR-1 hadde en stor tørkesprekk langs flatestykket før test startet. Prøven nådde skjærbrudd ved 23,18 kN ved en aksiell deformasjon på 8,84 mm.



Figur 62 - KR-2 - diagram last, deformasjon



Figur 63 - KR-2 - bilder fra forsøk

Prøve nummer KR-2 hadde tørkesprekker ved den vertikale tappene i hver ende før forsøk.

Prøven nådde strekkbrudd ved maksimal last på 20,28 kN og aksiell deformasjon på 8,85 mm.



Figur 64 - KR-3 - diagram last, deformasjon

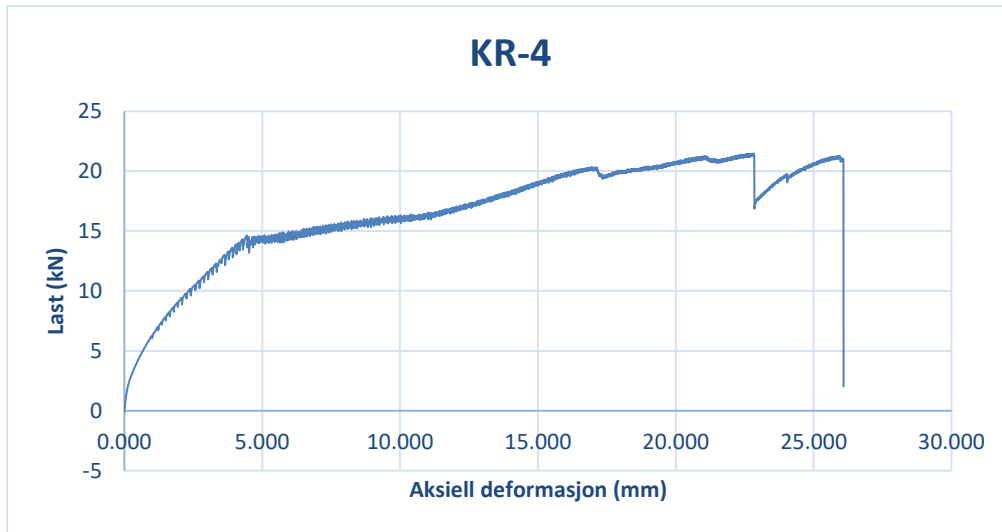


Figur 65 - KR-3 - bilder fra forsøk

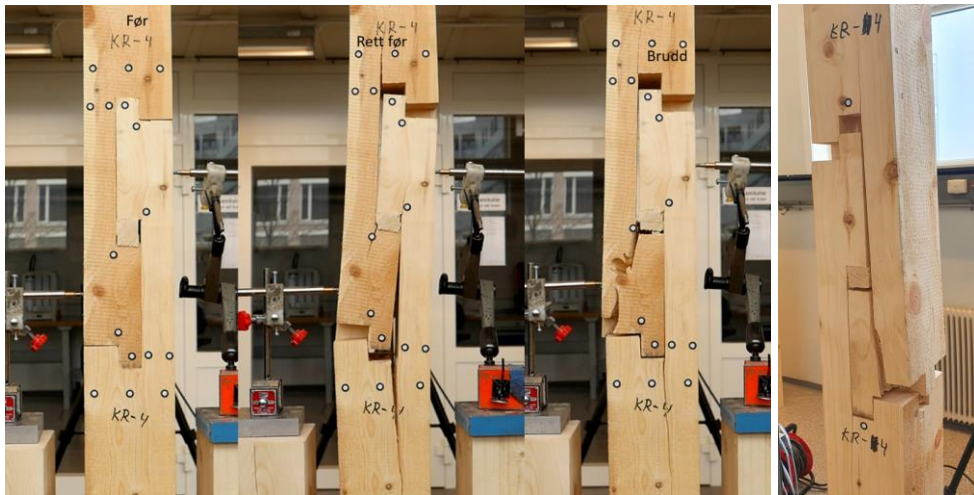
Prøve nummer KR-3 hadde en tørkesprekk innerst i utfelling for horisontal tapp. Prøven nådde maks last på 28,43 kN ved aksiell deformasjon på 29,92 mm da tverrstrekk førte til lenger opp på prøvestykket.



Figur 66 - KR-3 - avstand og nærbilde av brudd



Figur 67 - KR-4 - diagram last, deformasjon



Figur 68 - KR-4 - bilder fra forsøk

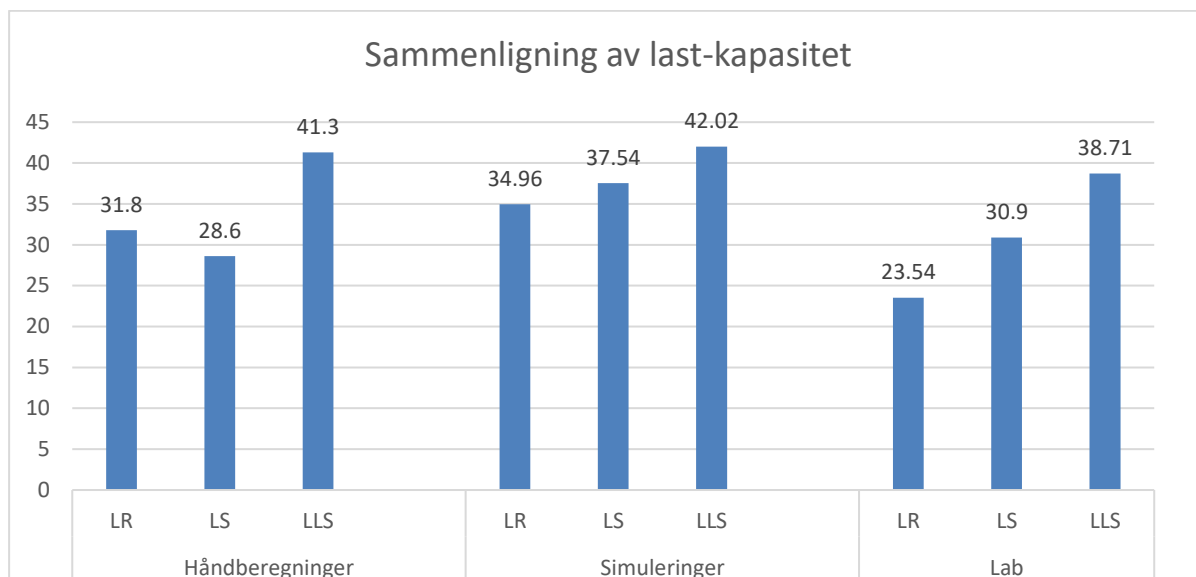
Prøve nummer KR-4 nådde skjærbrudd ved maksimal last på 21,46 kN og aksiell deformasjon på 22,79 mm.

6 Diskusjon og analyse

I dette kapitlet skal resultatene presentert i kapittel 5 analyseres og diskuteres. Dette skal gjøres ved å først å se på snittverdiene fra KR og LR som er kontrolltesten. Deretter skal man sammenlikne resultatene av last-kapasitet fra håndberegninger, simuleringer og lab.

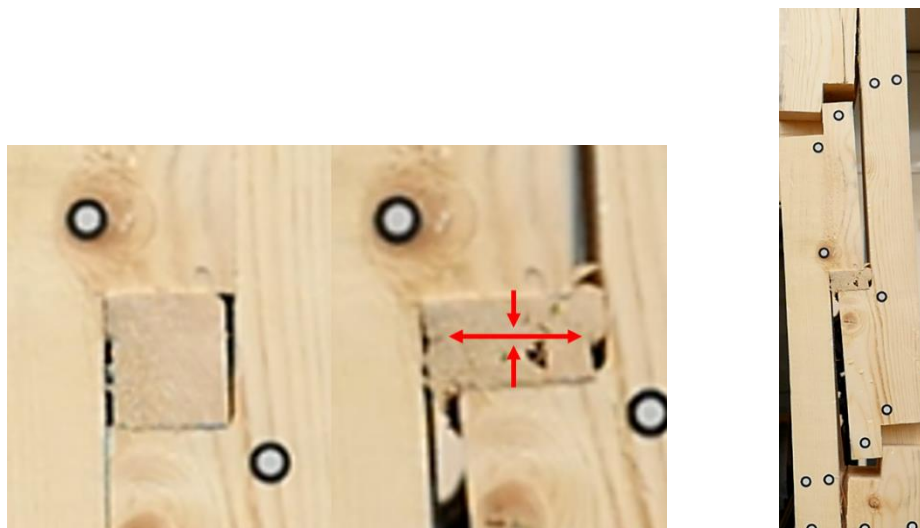
Som vist i figur 33 i kapittel 5.3, hadde gjennomsnittsverdiene fra testing av lik utforming med forskjellig materiale et avvik på 0,008%, noe som kan tyde på at materialforskjellen ikke har innvirkning på forsøk, og at utforming av forbindelse vil være utslagsgivende faktor. Ved å sammenlikne diagrammene i figur 35 i 5.3.1 og figur 59 i 5.3.4, kan man også se at limtre er et mer forutsigbart og stabilt materiale der målte verdier er nærmere snittverdi enn konstruksjonsvirke. Av bruddformene til de forskjellige materialene ser man også at kvist har vært en stor utslagsgiver på type brudd, og kapasitet. Gjennomgående kvist med retning langs bruddflate ser ut til å redusere kapasitet, retning tvers bruddflate ser ut til å forsterke kapasitet. Da limtre, som beskrevet i kapittel 3.2, er sammensatt av lameller blir ikke virkefeil som kvist gjennomgående i tverrsnitt, og man kan i forsøkene se et mer forutsigbart resultat.

Avviket ved prøve LLS-3 beskrevet i 4.3.3 hadde en annen bruddform enn de andre to prøvene av samme utforming. Dersom innfesting med skruer på dette forsøket skapte en økning i spenninger tvers fiber i ende av prøvestykket kan det hende at målt maks last ville vært høyere uten dette avvik. Oppnådd maks last var likevel innenfor samme område som øvrige tester av samme utforming og det ble derfor ansett som av liten betydning. Av hensyn til kvalitetssikring av resultater ansees det som viktig å nevne avviket og forskjell i bruddform som oppsto.



Figur 69 - Sammenligning av last-kapasitet

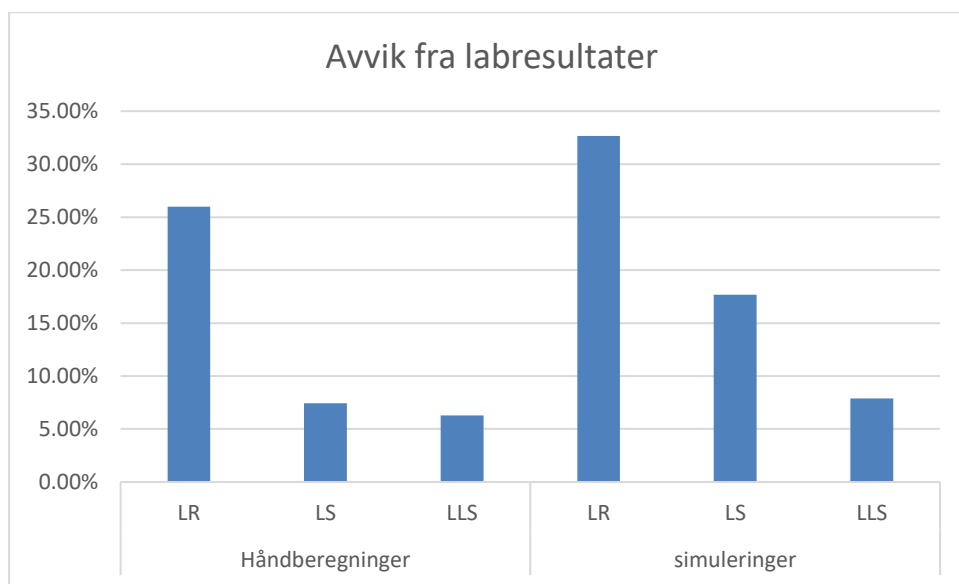
Sammenligningen i figur 69 viser at håndberegninger og simuleringer avviker fra resultater på lab. Det ble observert stor deformasjon i kilene på samtlige lab-forsøk. Kilene ble presset sammen, som følge av treverkets trykkfasthet tvers fiber, og presset ut sidelengs. Dette vil bidra til tverrstrekk, noe som kan forklare at forsøk på lab har en lavere kapasitet enn simulert og beregnet. Kiler i et materiale med høyere fasthet ville kunne forhindre denne utpressingen.



Figur 70 - Deformasjon i kiler

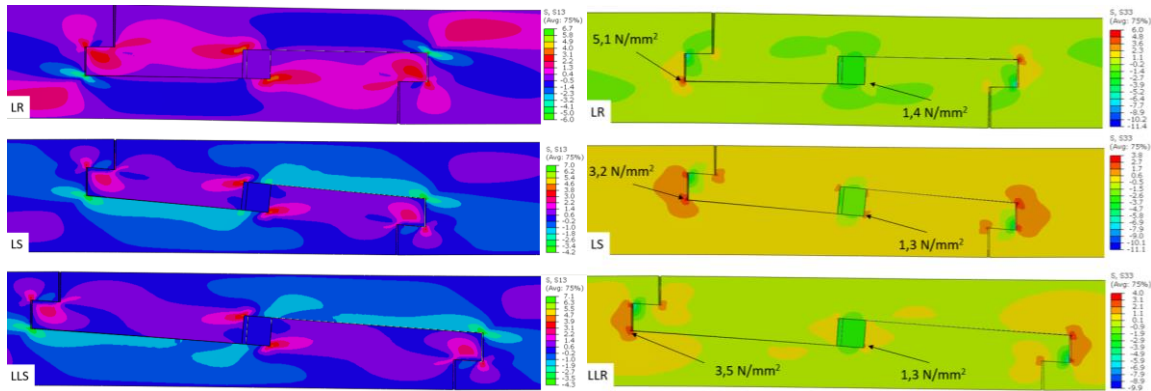
Fra tabell 3 i kapittel 5.2 kan man se at håndberegninger av aksial kapasitet ved skjærbrudd kombinert med tverrstrekk i skjærflaten er den mest korrekte beregningsmetoden sammenlignet med simuleringresultatene. Det man ikke har fått med i disse beregningene er friksjonskraften som tilføres fra vridning som følge av eksentrisitetsmomentet. Denne vil

kunne tilføre mer tverrstrekk basert på moment. Fra testing på lab kan man se at de største vridningene forekommer for den rette varianten. Utført kapasitetsberegning vil da kunne være høyere enn virkeligheten for denne utformingen. Man kan også i tabell 3 se at spenninger tvers fiber ved horisontaltapp er nesten tre ganger høyere for rett variant enn de skrå, noe som kan tyde på at en reduksjon av beregnet kapasitet er nødvendig. De skrå variantene får et proporsjonalt mindre eksentrisitetsmoment grunnet forskjellene på eksentrisitetsavstandene e_1 og e_2 sammenlignet med den rette varianten. Det kan derfor også ansees som mindre viktig med en slik reduksjon for de skrå variantene med hensyn på vridning.



Figur 71 – Avvik mellom beregninger, simuleringer og testresultater

Av figur 71 kan man se at simuleringer har større avvik fra testresultater enn håndberegninger. Dette kan forklares med at simuleringer ikke får med økt deformasjon som følge av at materialet får påbegynt oppsprekking. Noe av denne kombinasjonen av tverrstrekk og skjær kan det se ut som fanges bedre opp med håndberegninger ved bruk av ligning (11).



Figur 72 – Sammenligning av skjærspenningsforløp og spenninger tvers fiber

I simuleringene ble maks last valgt ut fra punktet der skjærspenning ved innhakk mot kiler nådde skjærkapasitet. Ved samme tids-steg ble spenninger tvers fiber avlest. Da simuleringer ikke inneholder fastheter av material, følger ikke sprekkdannelse som ville kunne redusert skjærflate. I figur 72 sammenlignes strekkspenninger tvers fiber med skjærspenninger ved nådd skjærkapasitet. Av sammenligningen kommer det frem at tverrstrekkskapasitet på $0,4 \text{ N/mm}^2$ overstiges. Dette tyder på at det i virkeligheten ville vært sprekkdannelse her som kunne redusert areal av skjærflate. Avleste maksimalverdier for last kan derfor ansees som høyere enn virkelighet.

7 Konklusjon

Hvilken utforming av fransk lås har høyest kapasitet i strekk?

Man har ved denne oppgaven fremvist materialvalg og variasjoner av en type forbindelse, samt tilknyttet relevant teori rundt spenning- og kapasitetsberegninger av de forskjellige variasjonene. Valgte metoder er beskrevet og resultater med tilhørende diskusjon er gjennomgått.

Da det, som beskrevet i kapittel 6, kom frem at kontrolltest med konstruksjonsvirke hadde et ikke-signifikant avvik sammenlignet med limtre, tilsier dette at det ville være utforming og ikke material som var utslagsgivende faktor for kapasitet av forbindelse.

Resultatene fra både håndberegninger, simuleringer og test på lab viste at utformingen «Lang Skrå» er den utforming av forbindelsen med størst kapasitet i strekk. Denne konklusjonen ansees som plausibel, da det på tross av forskjell på beregninger, simuleringer og testresultater, ble indikert fra alle tre fremgangsmåter at denne utformingen var sterkest. Kapasitetene det er kommet frem til ved de forskjellige fremgangsmåtene vil derimot kun være en indikator for hvilket område faktisk kapasitet vil divergere mot.

Antall tester utført på lab er ikke tilstrekkelig for å kunne konkludere med noen kapasitet for praktisk bruk av forbindelse, og videre forskning vil være nødvendig. For videre forskning vil det kunne være interessant å se på bruk av kiler med hardere fasthet slik at sideveis utpressing ikke oppstår i lik grad. Det ville også kunne vært interessant å se resultatene av simuleringer der sprekkdannelse inkluderes. Innsamlet data for *Digital image correlation* kan benyttes for videre forskning.

Litteraturliste

- Aira, J. R., Íñiguez-González, G., Guaita, M., & Arriaga, F. (2016, 03 24). Load carrying capacity of halved and tabled tenoned timber scarf joint. *Materials and Structures*, 49(12), ss. 5343-5355.
- Aira, J. R., Arriaga, F., Íñiguez-González, G., & Guaita, M. (2015, 02 20). Failure modes in halved and tabled tenoned timber scarf joint by tension test. *Construction and Building Materials 96 - Elsevier*, ss. 360-367.
- Aira, J. R., Arriaga, F., Íñiguez-González, G., Guaita, M., & Estaban, M. (2012, 06 16). Analysis of the stress state of a halved and tabled traditional timber scarf joint with the finite element method. *Proceedings of the 12th world conference on timber engineering*.
- Bell, K. (2017). *Dimensjonering av Trekonstruksjoner*. Fagbokforlaget.
- Branco, J. M., & Descamps, T. (2015, 05 23). Analysis and strengthening of carpentry joints. *Elsevier - Construction and Building Materials*, ss. 6-10.
- Cadwork. (2022, 04 25). *en.cadwork.com*. Hentet fra <https://en.cadwork.com/indexL1.jsp?wsid=675967&now=1650888250319>
- Dassault systems. (2022, 04 05). *3ds.com*. Hentet fra <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>
- Fiskvatn, A. (1984). *Elementmetoden*. Trondheim: Tapir.
- Glosli, C., Aurlien, T., Nyrud, A. Q., Rørstad, P. K., & Tomasi, R. (2021, 07 20). *NMBU.no*. Hentet 05 15, 2022 fra <https://www.nmbu.no/aktuelt/node/34779>
- Godal, J. B., Moldal, S., Oalann, T., & Sandbakken, E. (2018). *Beresystem i eldre norske hus 3. utgave*. Bergen: Fagbokforlaget.
- Grønn Byggallianse. (2022, 04 25). *byggalliansen.no*. Hentet fra <https://byggalliansen.no/kunnskapsenter/ombruk-i-byggeprosjekter/>
- Huber, J. A., Bitar, H. M., Tannert, T., & Berg, S. (2021, 04 25). Finite element analysis of alternative load paths to prevent disproportionate collapse in platform-type CLT floor systems. *Elsevier - Engineering structures*, s. 5.
- Ibenholdt, K. (2020, 02 25). *Samfunnsøkonomisk analyse av redusert avfall i byggebransjen*. Hentet fra dibk.no: https://dibk.no/globalassets/02.-om-oss/rapporter-og-publikasjoner/samfunnsokonomisk-analyse-av-reduert-avfall-i-byggebransjen_nibio-og-samfunnsokonomisk-analyse-2020.pdf

- Jeong, G. Y. (2021, 10 09). Tensile properties of Utgulisanji connection. *International Journal of Architectural Heritage*, 15(2), ss. 313-320.
- Leland, B. N. (2008). *Prosjektering for ombruk og gjenvinning*. Oslo: RIF.
- McCormick, N., & Lord, J. (2010, 12). Digital Image Correlation. *Materials today*, ss. 52-54.
- Olson, N. (2011). *Praktisk Rapportskrivning*. Trondheim: Tapir.
- Rothoblaas. (2022, 04 28). *rothoblaas.com*. Hentet fra <https://www.rothoblaas.com/products/fastening/screws/screws-structures/vgs>
- Sandaker, B. N., Sandvik, M., & Vik, B. (2017). *Materialkunnskap*. Oslo: Byggenæringens forlag.
- Simpson strong-tie. (2022, 05 02). *strongtie.no*. Hentet fra https://shop.strongtie.no/?s=treskrue+sekskant&post_type=product

Vedlegg

Tabell 5 – Fasthetstabell for limtre lameller

NS-EN 338:2016

Table 2 — Strength classes for softwood based on tension tests – strength, stiffness and density values

	Class	T 8	T 9	T 10	T 11	T 12	T 13	T 14	T 14,5	T 15	T 16	T 18	T 21	T 22	T 24	T 26	T 27	T 28	T 30
Strength properties in N/mm²																			
Bending	$f_{m,k}$	13,5	14,5	16	17	18	19,5	20,5	21	22	23	25,5	29	30,5	33	35	36,5	37,5	40
Tension parallel	$f_{t,0,k}$	8	9	10	11	12	13	14	14,5	15	16	18	21	22	24	26	27	28	30
Tension perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Compression parallel	$f_{c,0,k}$	16	17	17	18	19	20	21	21	21	22	23	25	26	27	28	29	29	30
Compression perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,0	2,1	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,5	2,5	2,6	2,7	2,7	2,7	2,8	2,9	2,9	2,9	3,0
Shear	$f_{v,k}$	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Stiffness properties in kN/mm²																			
Mean modulus of elasticity parallel tension	$E_{t0,mean}$	7,0	7,5	8,0	9,0	9,5	10,0	11,0	11,0	11,5	11,5	12,0	13,0	13,0	13,5	14,0	15,0	15,0	15,5
5 percentile modulus of elasticity parallel tension	$E_{t0,k}$	4,7	5,0	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,4	7,7	7,7	8,0	8,7	8,7	9,0	9,4	10,1	10,1	10,4
Mean modulus of elasticity perpendicular	$E_{t90,mean}$	0,23	0,25	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,37	0,38	0,38	0,40	0,43	0,43	0,45	0,47	0,50	0,50	0,52
Mean shear modulus	G_{mean}	0,44	0,47	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,69	0,72	0,72	0,75	0,81	0,81	0,84	0,88	0,94	0,94	0,97
Density in kg/m³																			
5 percentile density	ρ_k	290	300	310	320	330	340	350	350	360	370	380	390	390	400	410	410	420	430
Mean density	ρ_{mean}	350	360	370	380	400	410	420	420	430	440	460	470	470	480	490	490	500	520
NOTE 1 Values given above for bending strength, compression strength, shear strength, char. modulus of elasticity in tension, mean modulus of elasticity perpendicular to grain and mean shear modulus have been calculated using the equations given in EN 384.																			
NOTE 2 The bending strength values are conservatively estimated since grading is done for tension strength.																			
NOTE 3 The tabulated properties are compatible with timber at moisture content consistent with a temperature of 20 °C and a relative humidity of 65 %, which corresponds to a moisture content of 12 % for most species.																			
NOTE 4 Characteristic values for shear strength are given for timber without fissures, according to EN 408.																			
NOTE 5 These classes may also be used for hardwoods with similar strength and density profiles such as e.g. poplar or chestnut.																			
NOTE 6 The bending strength may be used in the case of edgewise or flatwise bending.																			

Tabell 6 – Fasthetstabell for konstruksjonsvirke

NS-EN 338:2016

Table 1 — Strength classes for softwood based on edgewise bending tests – strength, stiffness and density values

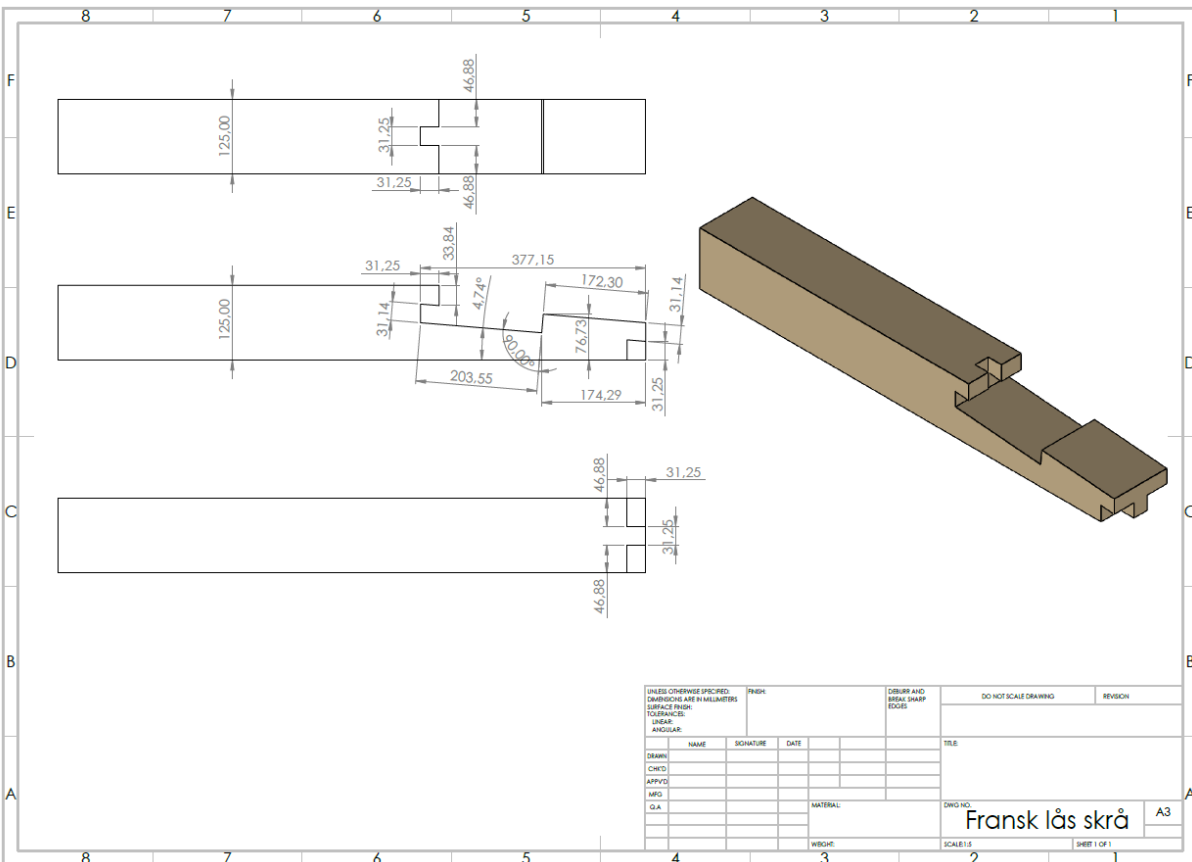
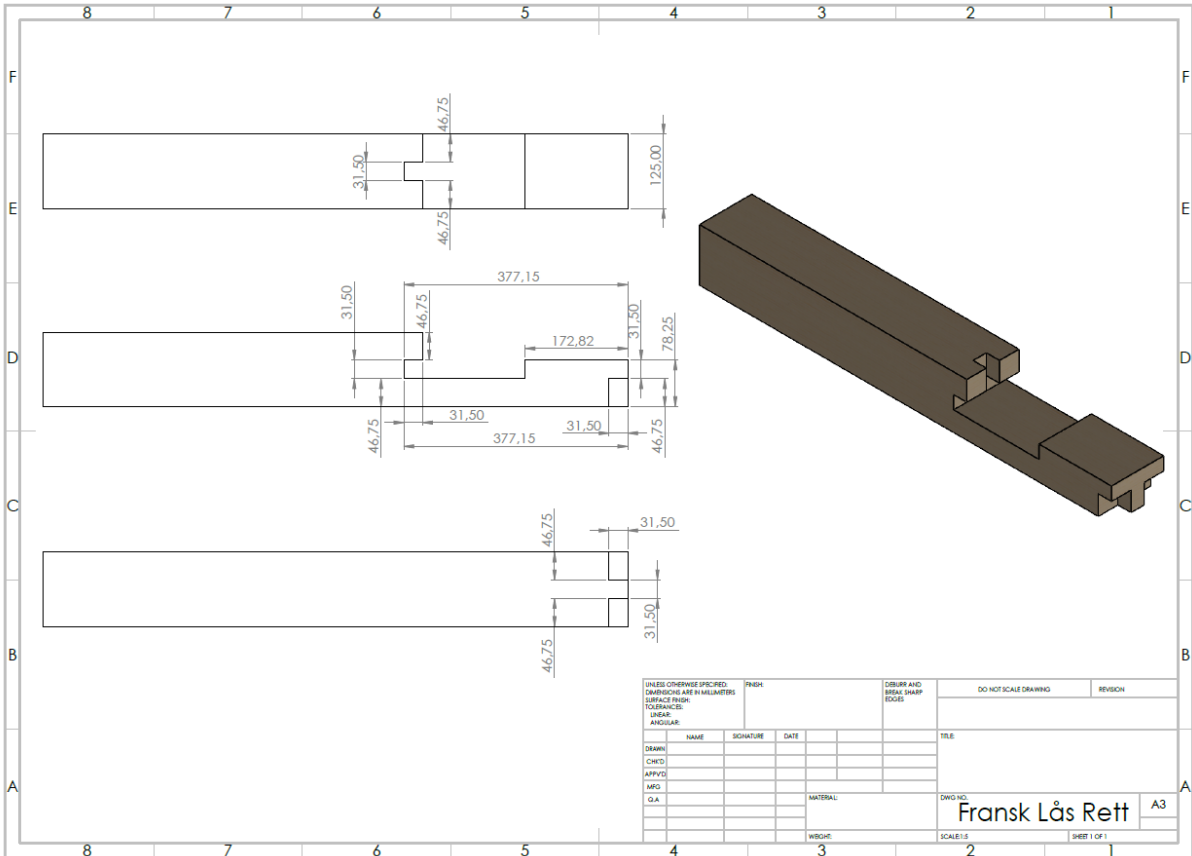
	Class	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Strength properties in N/mm²													
Bending	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Tension parallel	$f_{t0,k}$	7,2	8,5	10	11,5	13	14,5	16,5	19	22,5	26	30	33,5
Tension perpendicular	$f_{t90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Compression parallel	$f_{c0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	24	25	27	29	30
Compression perpendicular	$f_{c90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,5	2,7	2,7	2,8	2,9	3,0
Shear	f_{vk}	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Stiffness properties in kN/mm²													
Mean modulus of elasticity parallel bending	$E_{m,0,mean}$	7,0	8,0	9,0	9,5	10,0	11,0	11,5	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0
5 percentile modulus of elasticity parallel bending	$E_{m,0,k}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,1	10,7
Mean modulus of elasticity perpendicular	$E_{m,90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
Mean shear modulus	G_{mean}	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
Density in kg/m³													
5 percentile density	ρ_k	290	310	320	330	340	350	360	380	390	400	410	430
Mean density	ρ_{mean}	350	370	380	400	410	420	430	460	470	480	490	520
NOTE 1 Values given above for tension strength, compression strength, shear strength, char. modulus of elasticity in bending, mean modulus of elasticity perpendicular to grain and mean shear modulus have been calculated using the equations given in EN 384.													
NOTE 2 The tension strength values are conservatively estimated since grading is done for bending strength.													
NOTE 3 The tabulated properties are compatible with timber at moisture content consistent with a temperature of 20 °C and a relative humidity of 65 %, which corresponds to a moisture content of 12 % for most species.													
NOTE 4 Characteristic values for shear strength are given for timber without fissures, according to EN 408.													
NOTE 5 These classes may also be used for hardwoods with similar strength and density profiles such as e.g. poplar or chestnut.													
NOTE 6 The edgewise bending strength may also be used in the case of flatwise bending.													

Tabell 7 – Håndberegninger utført i Excel

Rett				
0.45fv	1.8	kombinert		
ft90	0.4	N =	31797	N
e1	40			
b	125	ikke kombinert		
hredusert	46.75	N =	31797	N
u	141.32			
alpha	0			
e2	172.95	Strekkspenning i redusert tverrsnitt	5.44179537	N/mm ²
h1	31.5			
h2	46.75	p	7354.03296	N
		tverrstrekk	3.00740006	N/mm ²
		N tverrstrekk	4229.16797	N

Skrå				
0.45fv	1.8	kombinert		
ft90	0.4	N =	28601.8998	N
e1	20			
b	125	Ikke kombinert		
hredusert	46.75	N =	39215.25	N
u	174.29			
alpha	4.73			
e2	172.95	Strekkspenning i redusert tverrsnitt	4.89471149	N/mm ²
h1	31.5			
h2	62.5	p	3307.53395	N
		tverrstrekk	1.125969	N/mm ²
		N tverrstrekk	10160.8125	N

Lang Skrå				
0.45fv	1.8	kombinert		
ft90	0.4	N =	41276.6809	N
e1	20			
b	125	Ikke kombinert		
hredusert	46.75	N =	52875	N
u	235			
alpha	3.58			
e2	234.25	Strekkspenning i redusert tverrsnitt	7.06377707	N/mm ²
h1	31.5			
h2	62.5	p	3524.15632	N
		tverrstrekk	1.19971279	N/mm ²
		N tverrstrekk	13762.1875	N



Sebastian Mauer Pettersen

Fra: Lasse Postmyr <Lasse.Postmyr@fagbokforlaget.no>
Sendt: mandag 25. april 2022 15:21
Til: Sebastian Mauer Pettersen
Emne: Re: Bruk av illustrasjoner til Bacheloroppgave

Hei,

Du har herved vår tillatelse, med korrekt referanse. Lykke til med oppgaven! Lasse

Få [Outlook for Android](#)

From: Sebastian Mauer Pettersen <sebasmau@stud.ntnu.no>
Sent: Monday, April 25, 2022 3:09:32 PM
To: Lasse Postmyr <Lasse.Postmyr@fagbokforlaget.no>
Subject: Bruk av illustrasjoner til Bacheloroppgave

Hei Lasse,

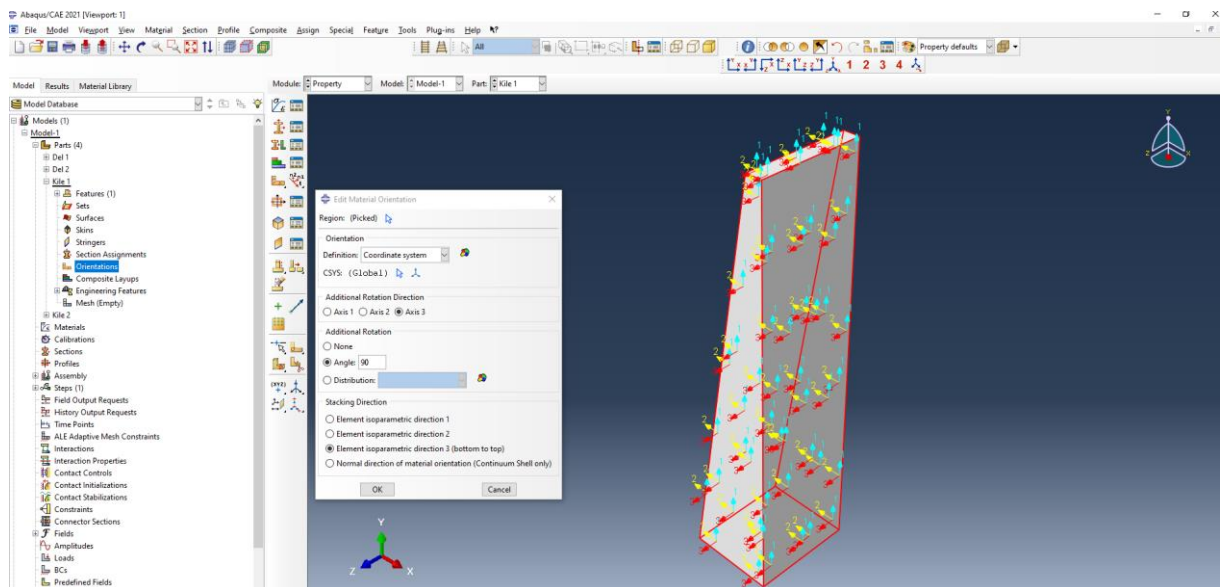
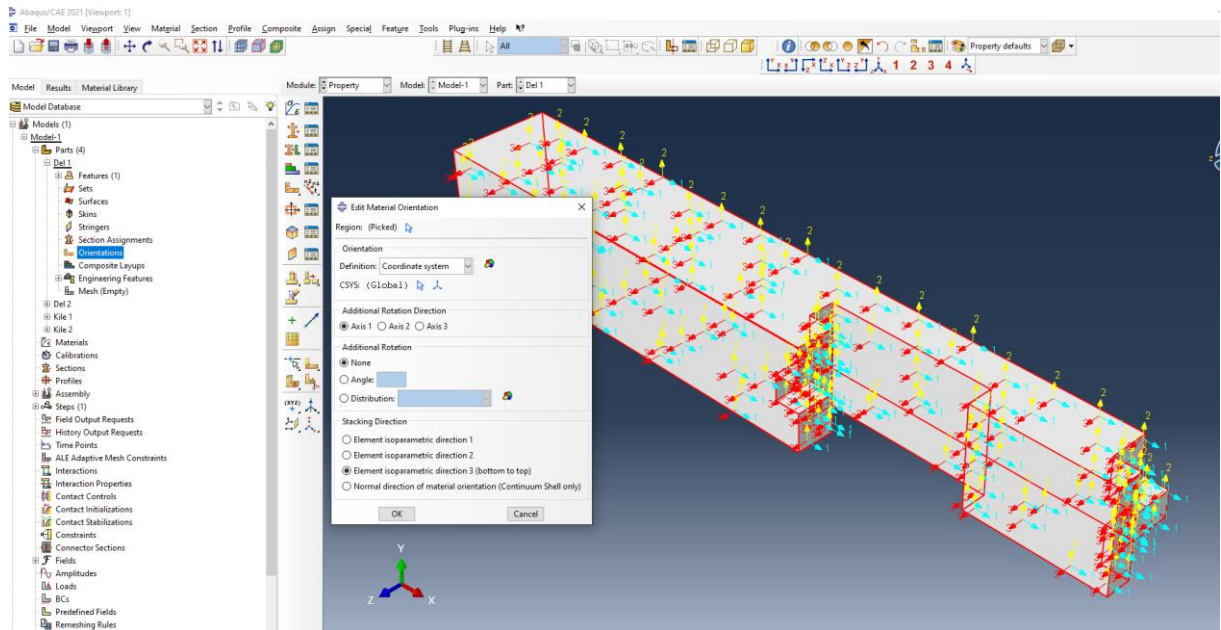
Takk for hyggelig telefonsamtale.

Jeg ønsker som sagt å gjengi noen illustrasjoner fra en av deres bøker i min bacheloroppgave. Boken heter «Dimensjonering av trekonstruksjoner» skrevet av Kolbein Bell. Kan du sende meg en bekreftelse på tillatelse til dette?

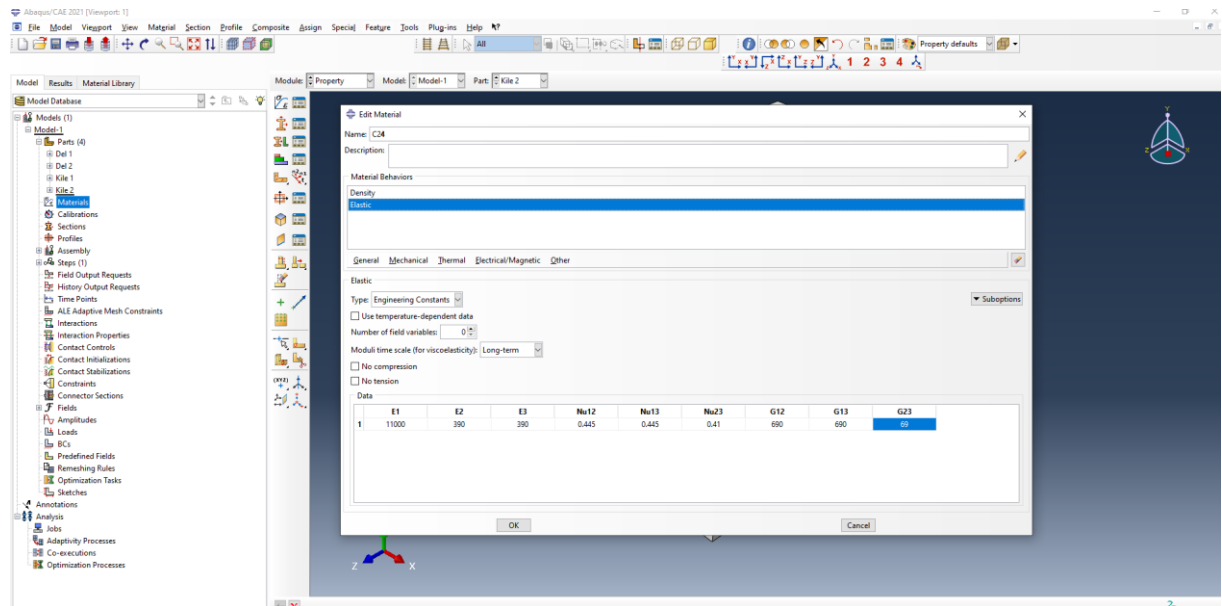
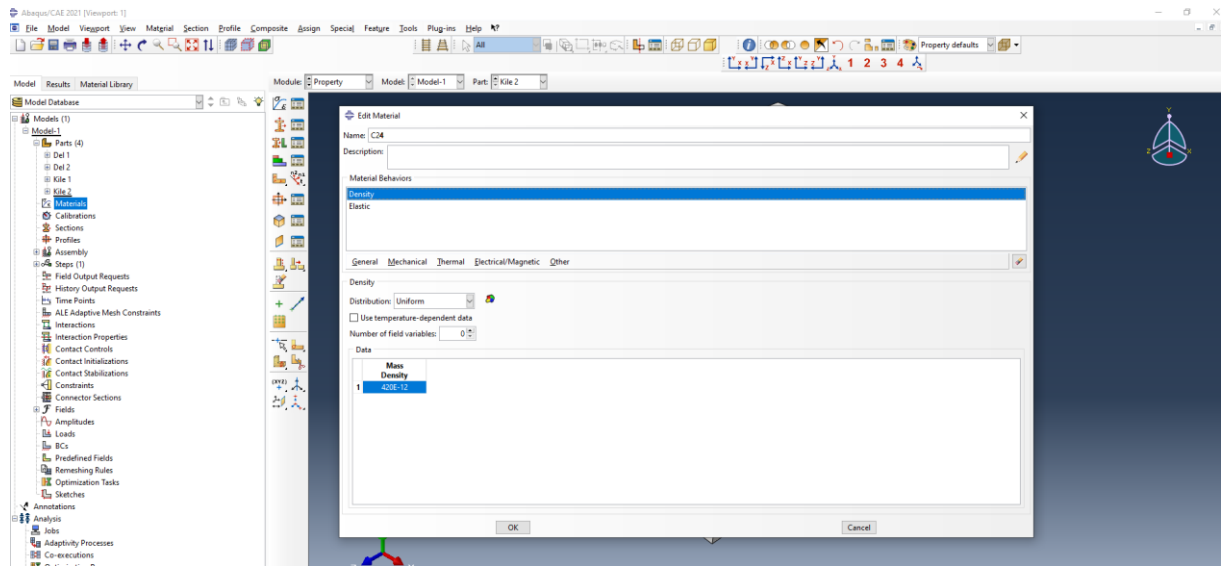
Med vennlig hilsen
Sebastian Pettersen
Bachelor-student Byggingeniør
NTNU Gjøvik

Manual for utførte Abaqus-simuleringer

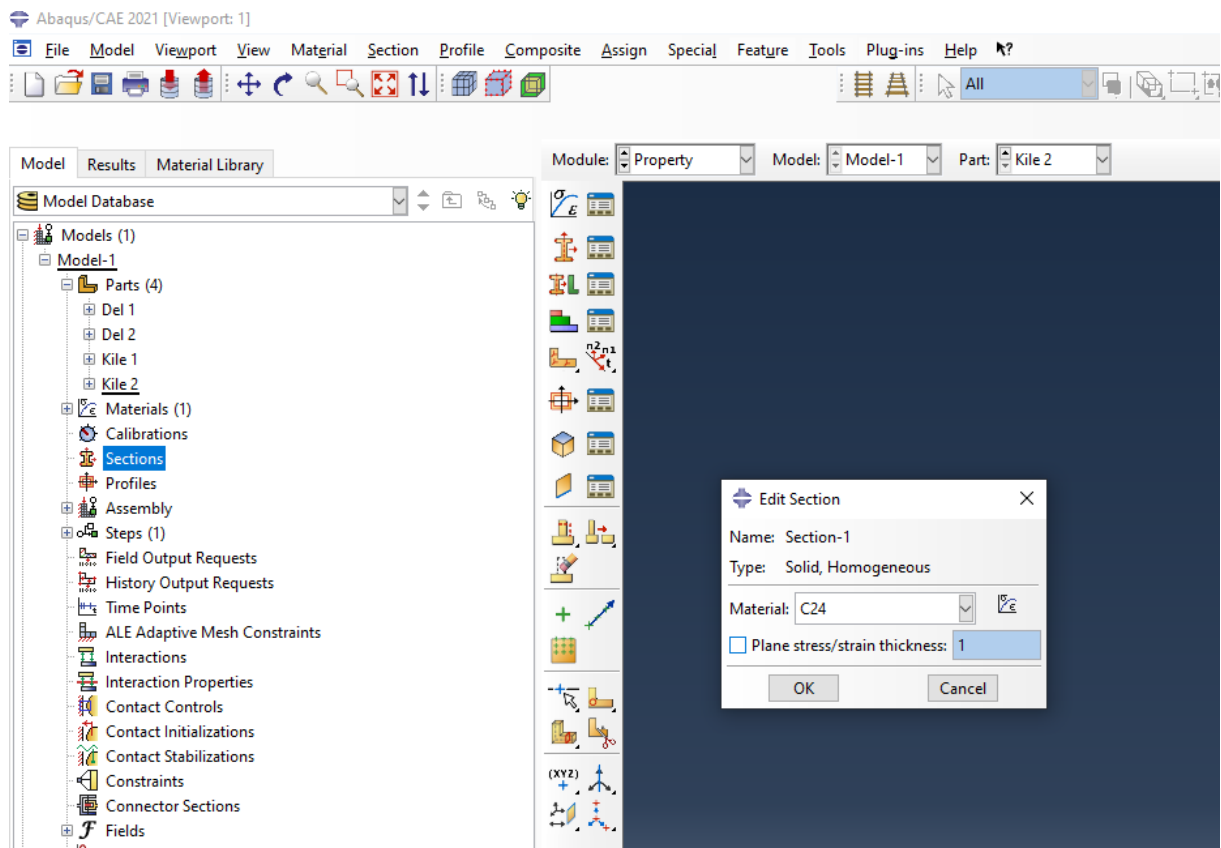
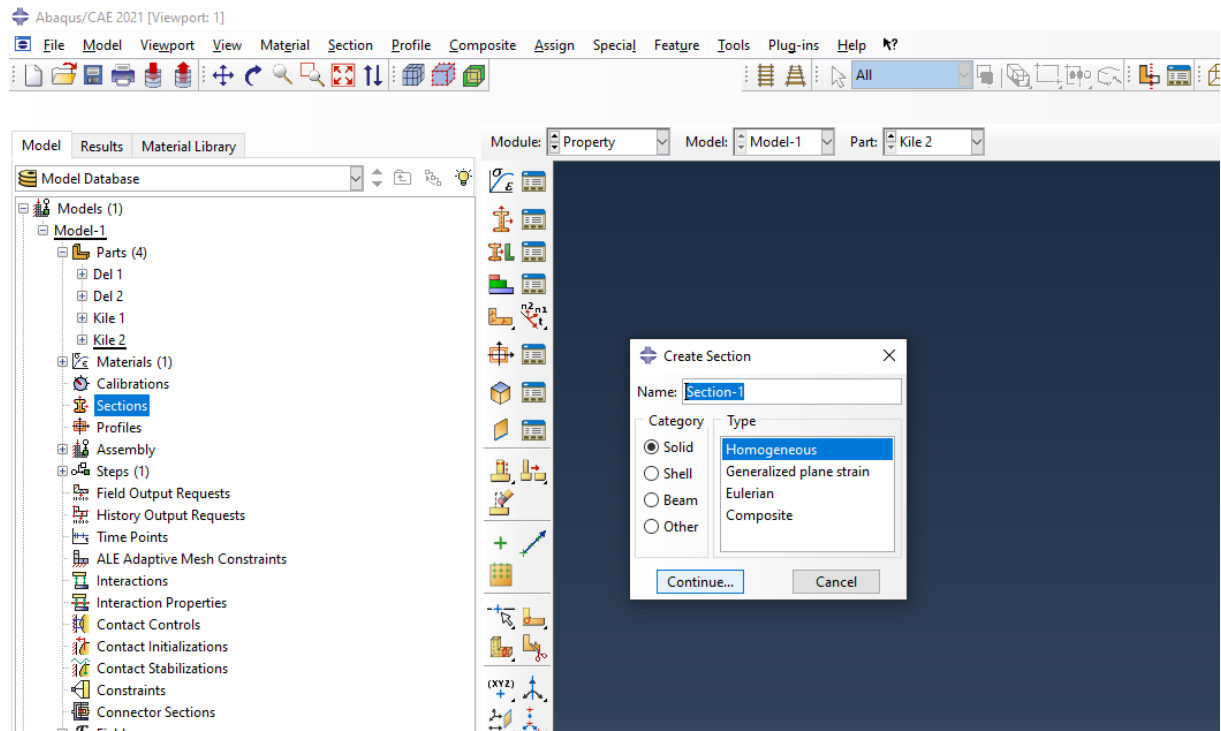
1. Importer sammenstilling som part fra .step-fil
2. Gi hver enkelt del et navn
3. sett orientering av fiberretning på hver del



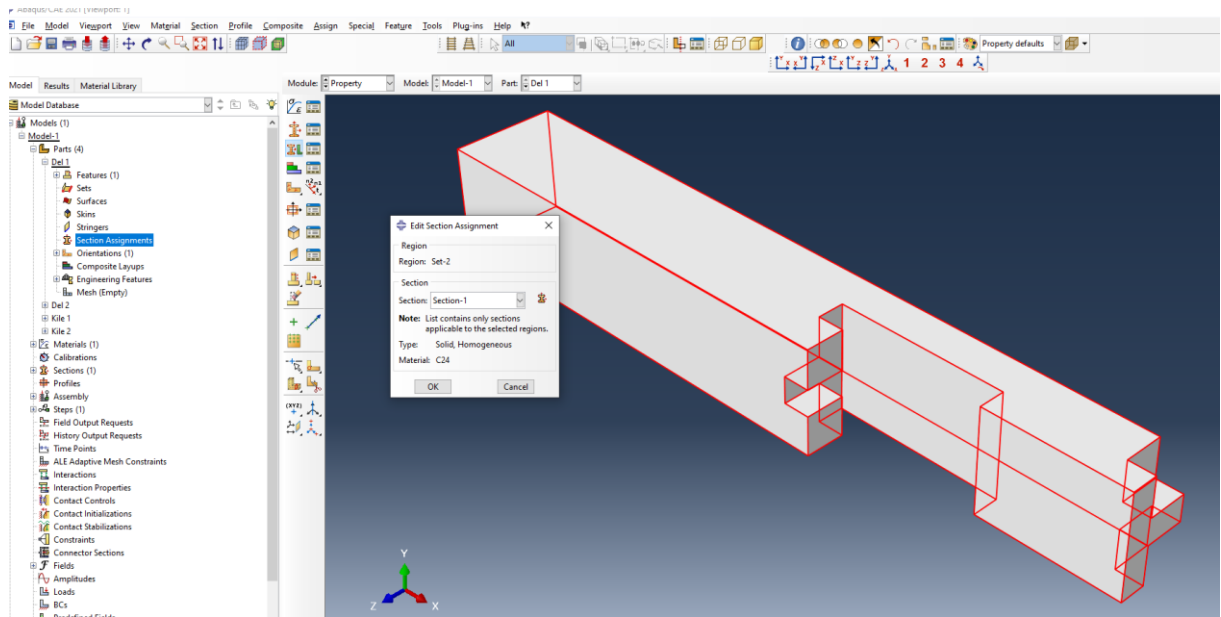
4. Definer materiale med densitet og engineering constants



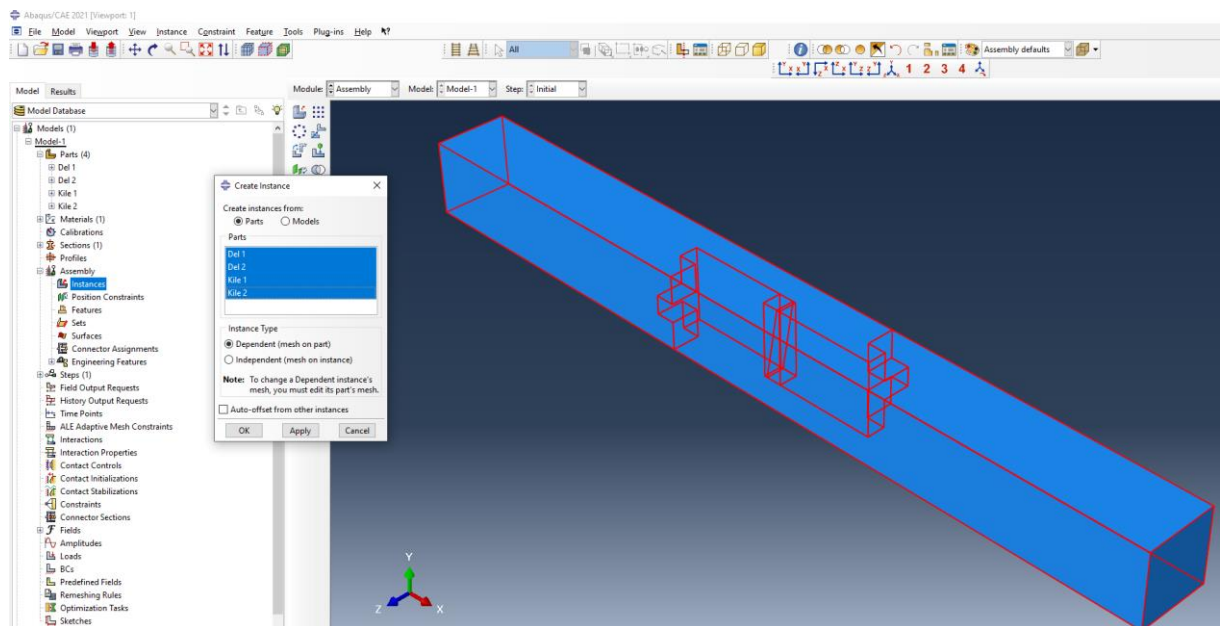
5. Definer section for materialet



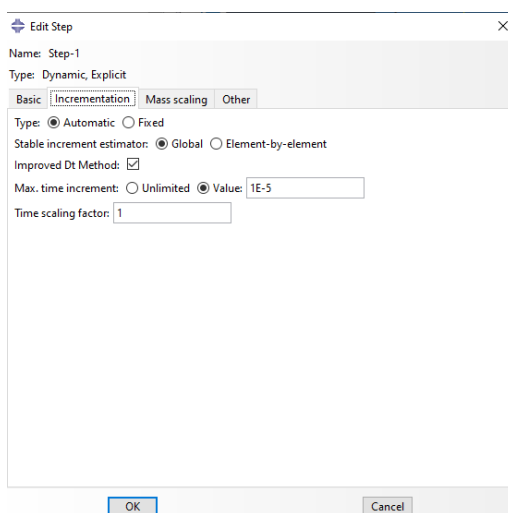
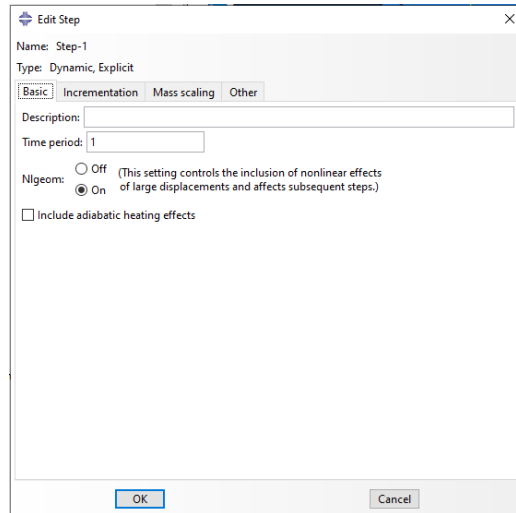
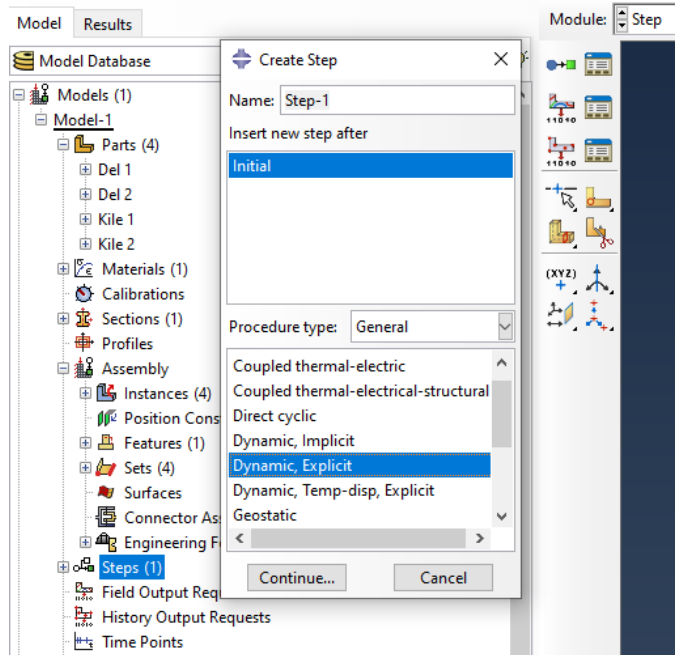
6. Tildel section til hver part



7. Legg til parts i assembly



8. Definer step-1 som dynamic explicit og velg masseskallering (masseskallering reduserer simuleringstid, men det er da viktig å kontrollere internal energy mot kinetic energy i resultatene av simuleringene).



Edit Step

Name: Step-1
Type: Dynamic, Explicit

Basic Incrementation **Mass scaling** Other

Use scaled mass and "throughout step" definitions from the previous step

Use scaling definitions below

Data

Region	Type	Frequency/Interval	Factor	Target Time Increment

Create... Edit... Delete

OK Cancel

Edit Mass Scaling

Objective

Semi-automatic mass scaling

Automatic mass scaling

Reinitialize mass

Disable mass scaling throughout step

Application

Region: Whole model Set:

Scale: At beginning of step Throughout step

Type

Scale by factor:

Scale to target time increment of:

Scale element mass:

Frequency

Scale: Every increments

At equal intervals

Warning: This option will disable all "Throughout step" definitions applied in a previous step.

OK Cancel

Edit Step

Name: Step-1
Type: Dynamic, Explicit

Basic Incrementation **Mass scaling** Other

Use scaled mass and "throughout step" definitions from the previous step

Use scaling definitions below

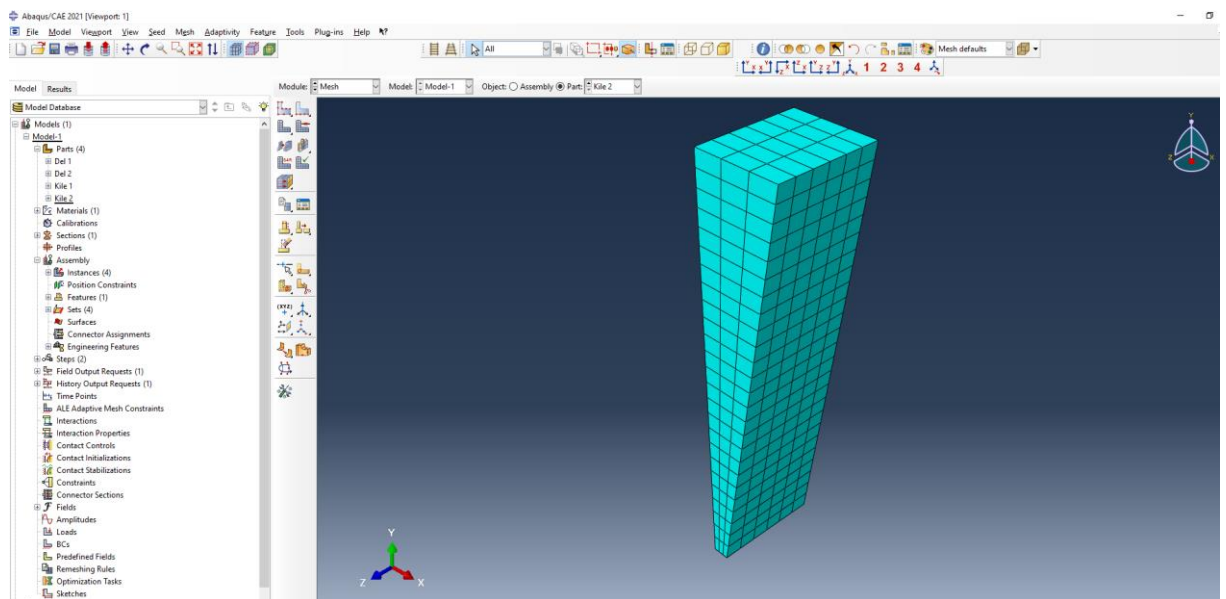
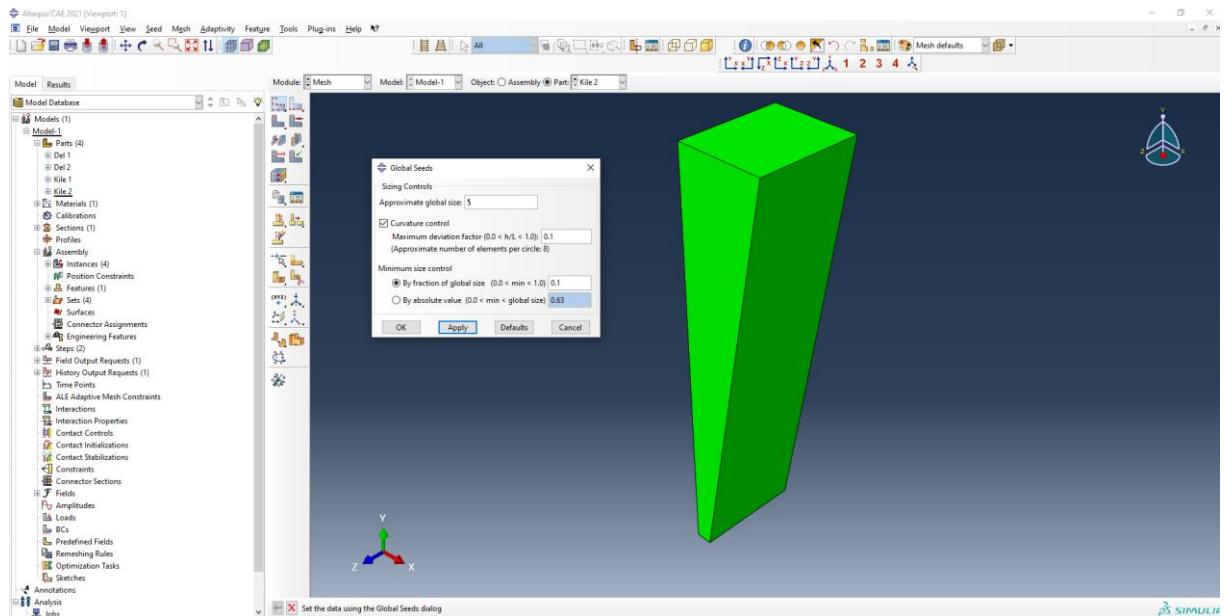
Data

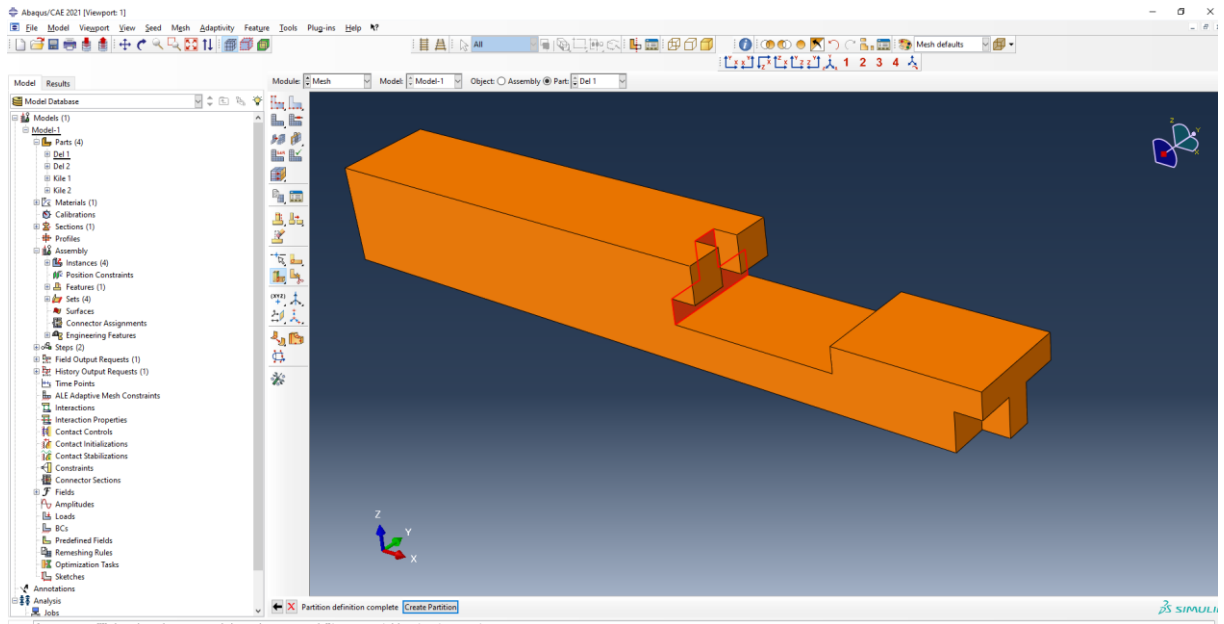
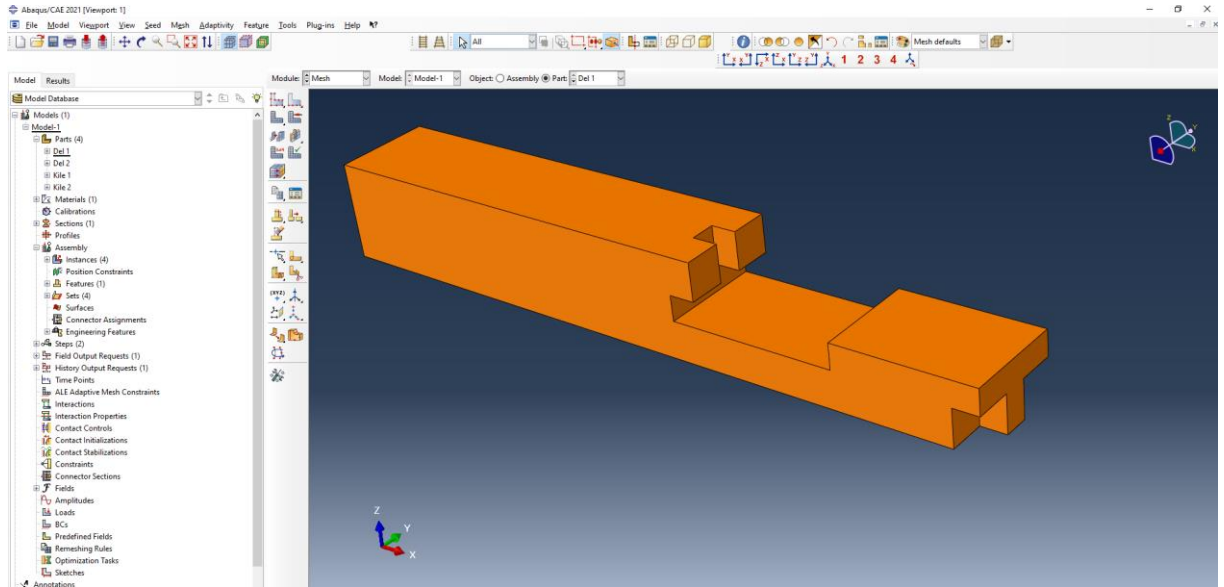
Region	Type	Frequency/Interval	Factor	Target Time Increment
Whole Model	Target Time Inc.	Frequency of 10000	None	1e-05

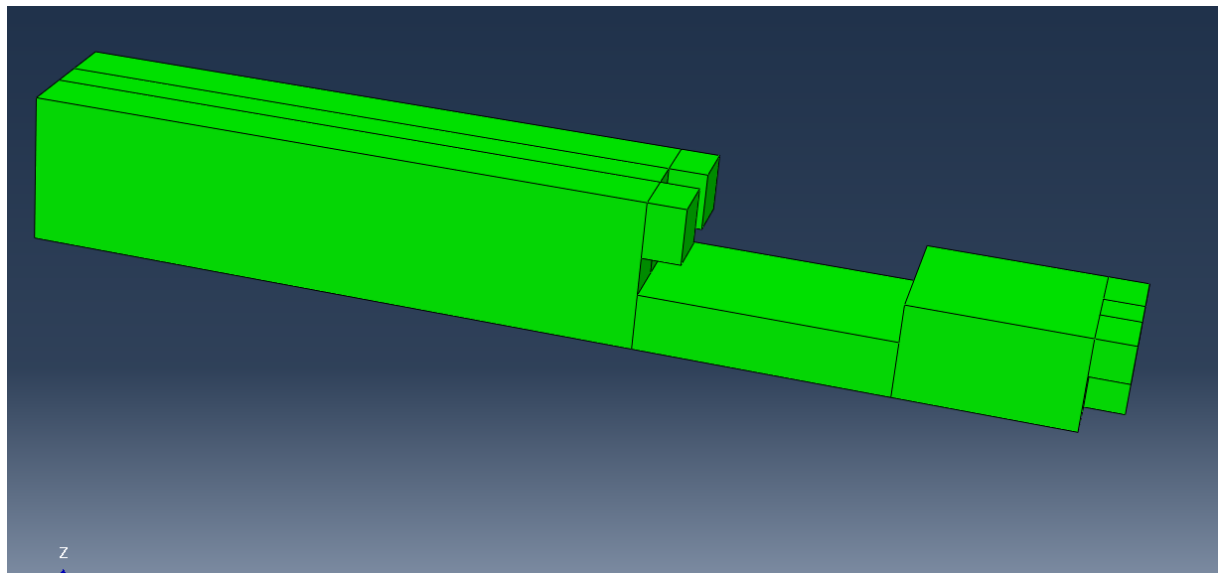
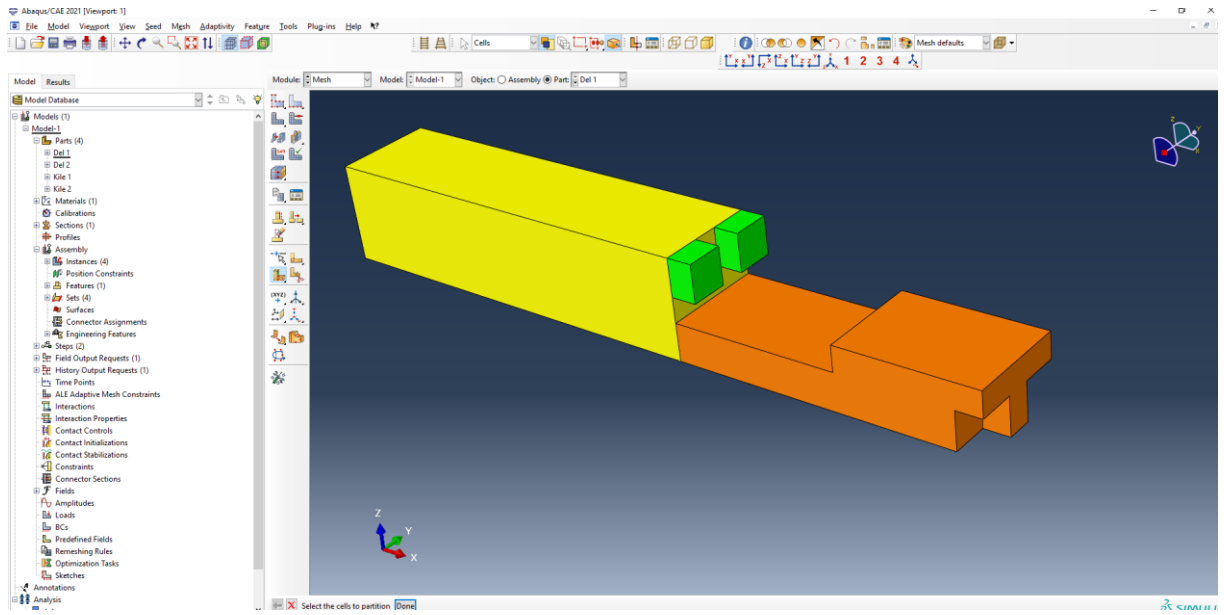
Create... Edit... Delete

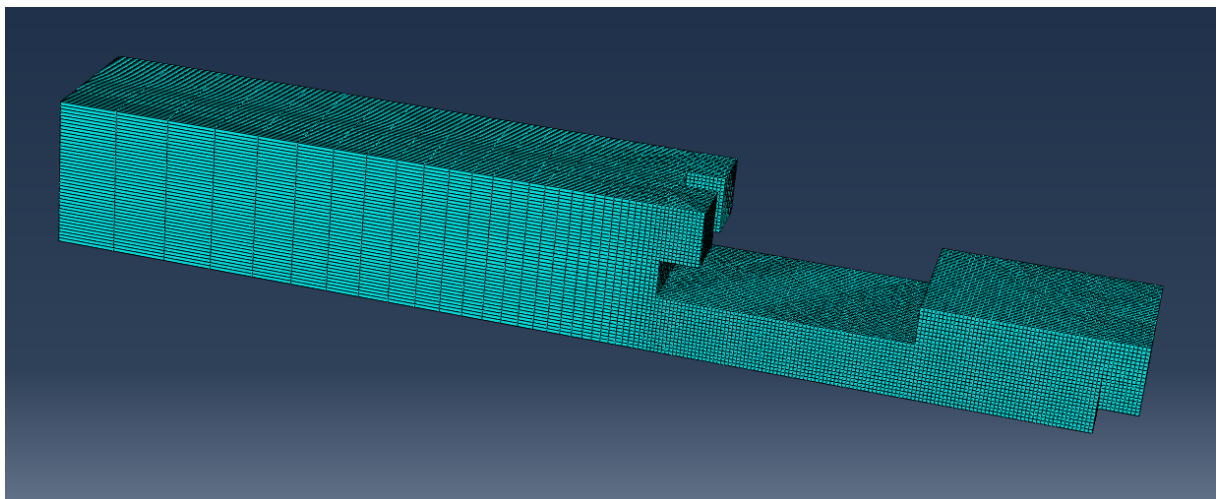
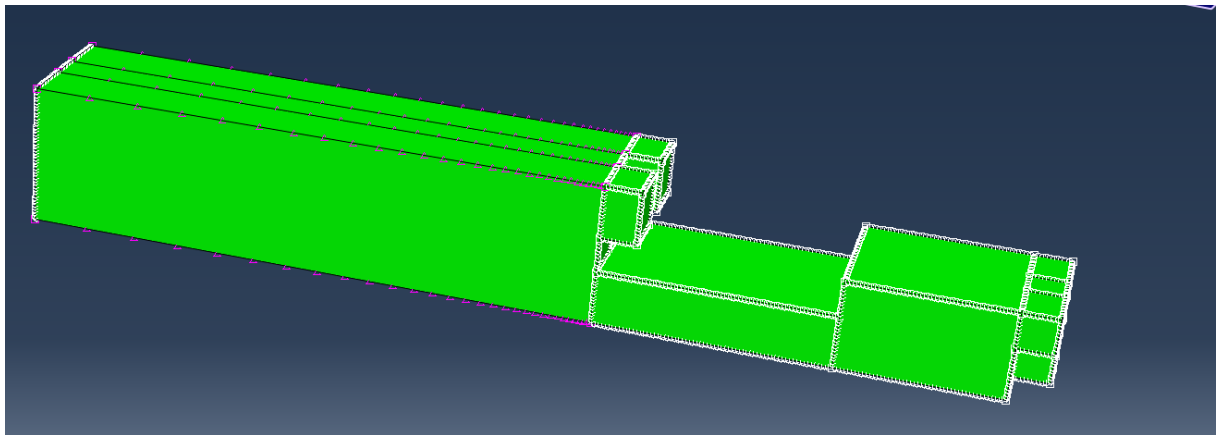
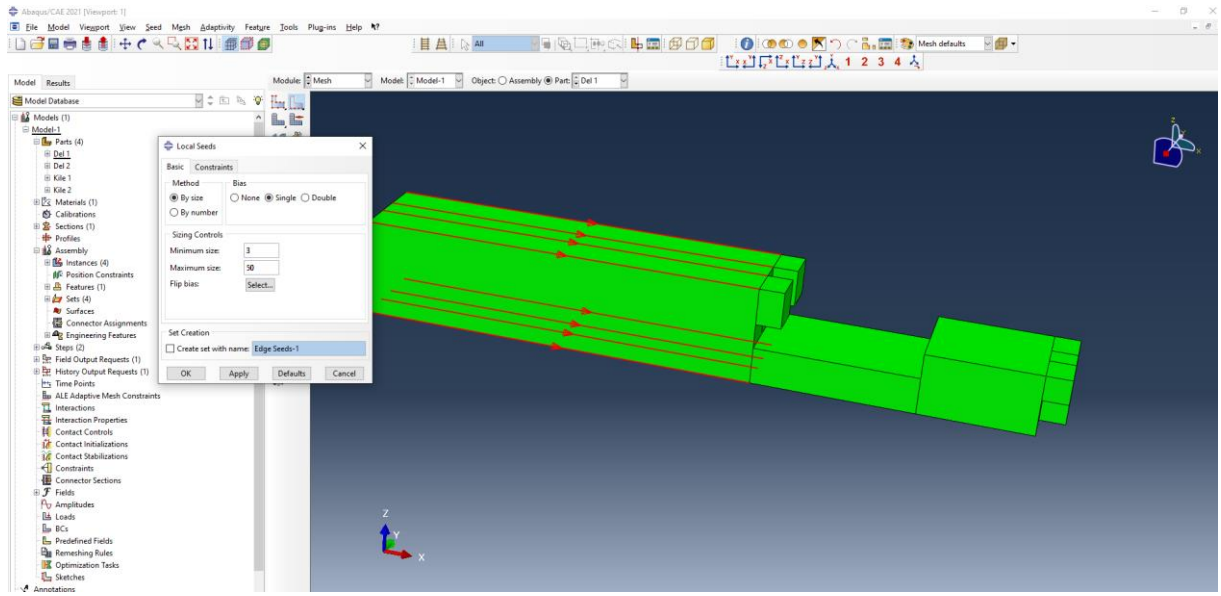
OK Cancel

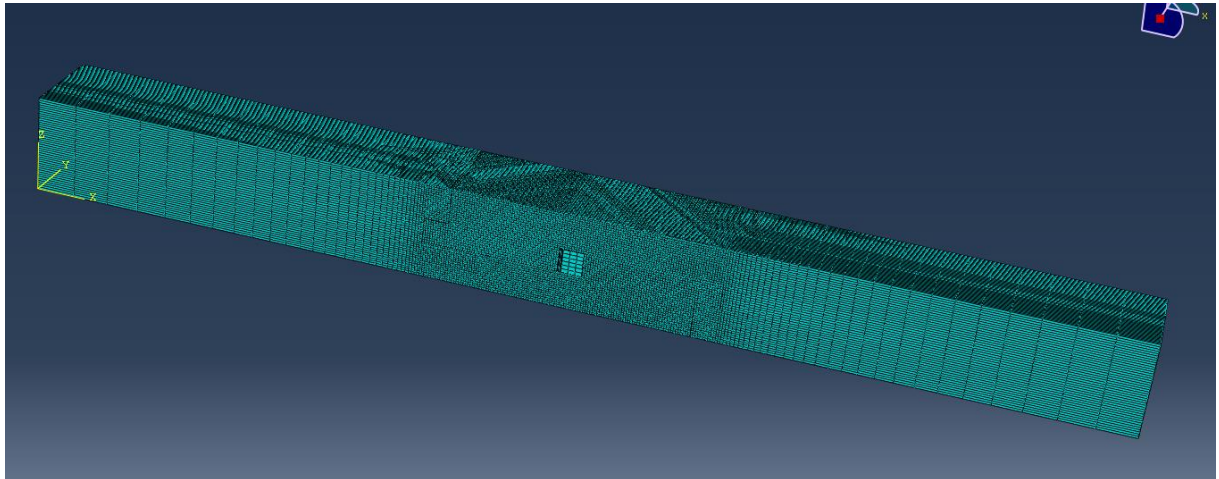
9. Mesh hver enkelt del. Noen deler må deles opp for å bli «Grønne» som betyr at de fungerer optimalt for hex-mesh, som gir mer nøyaktige resultater. Global seed på størrelse 5mm for kilene, og 3mm for de øvrige delene. Seed-edge fra 3mm-50mm for å redusere antall elementer.



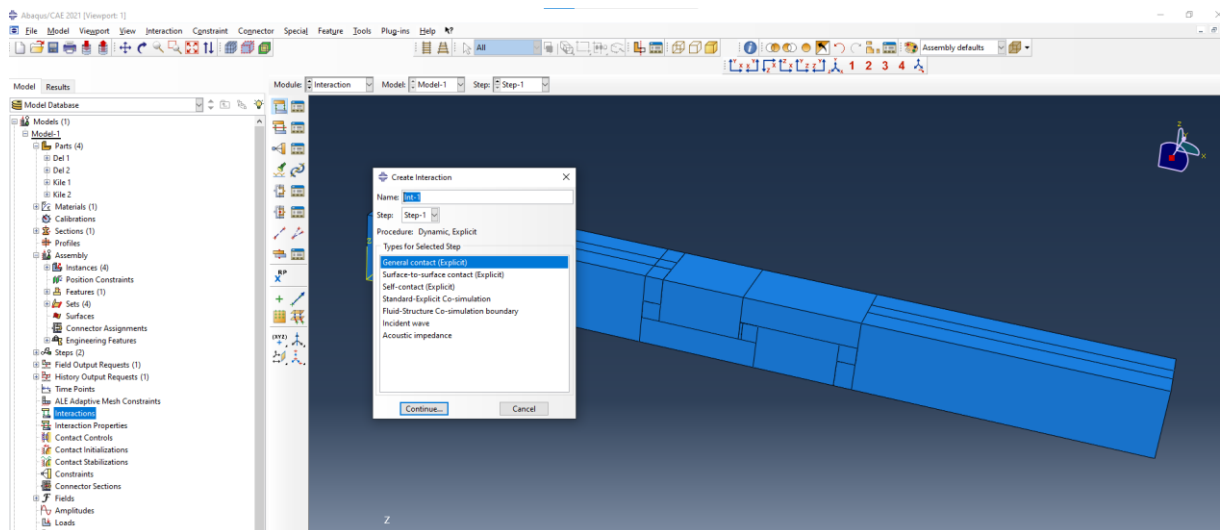


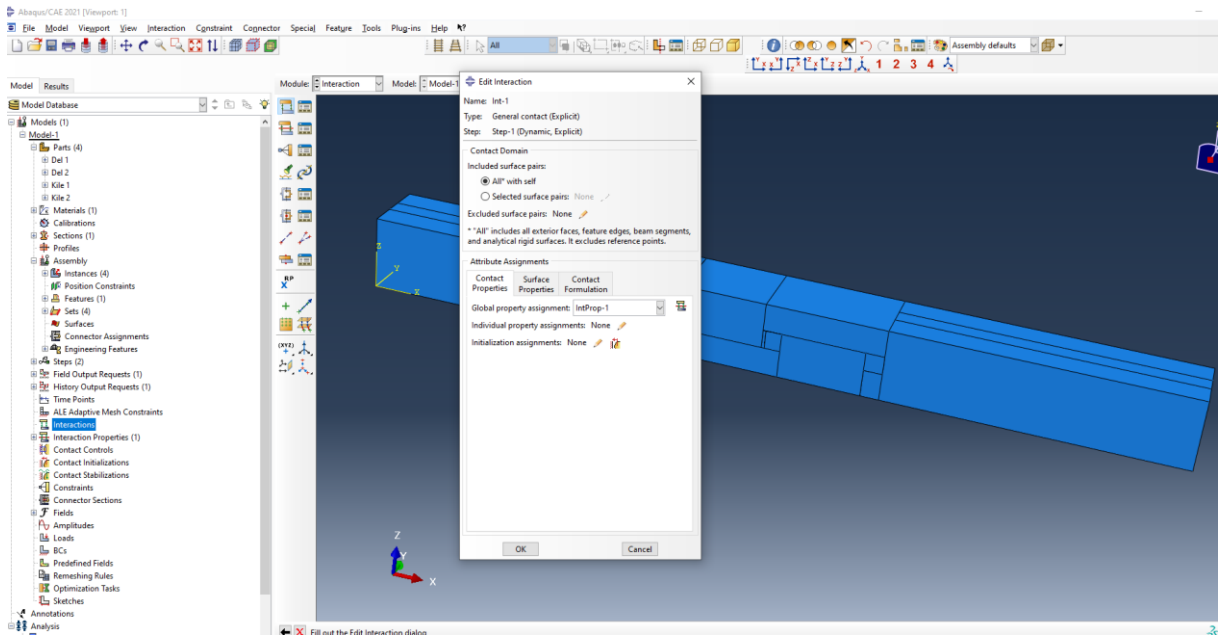
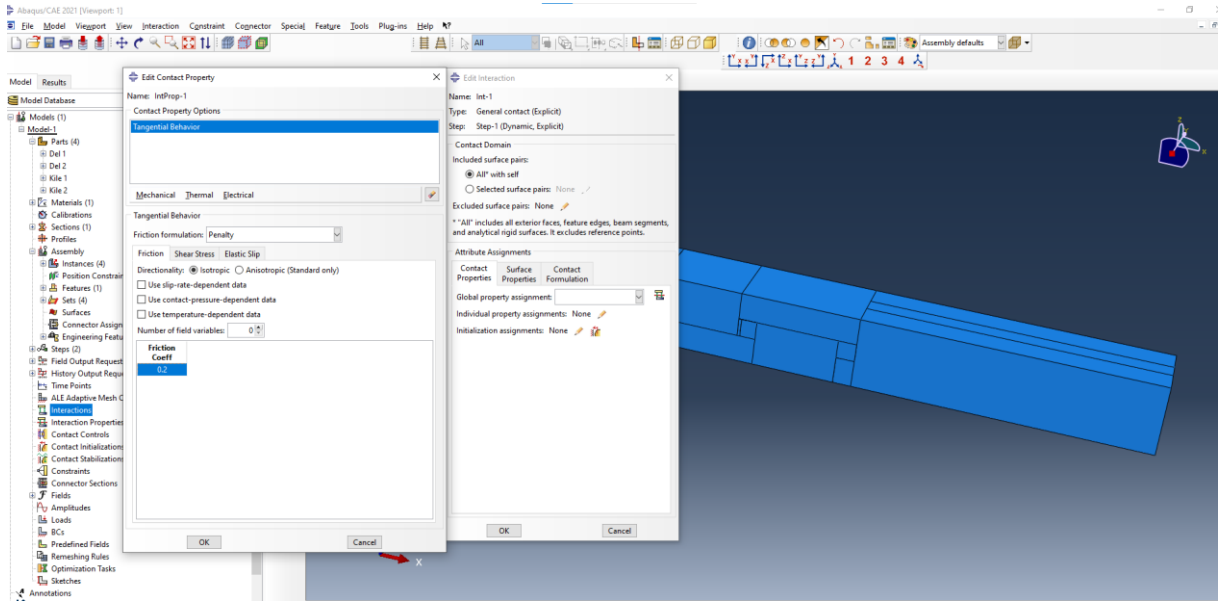




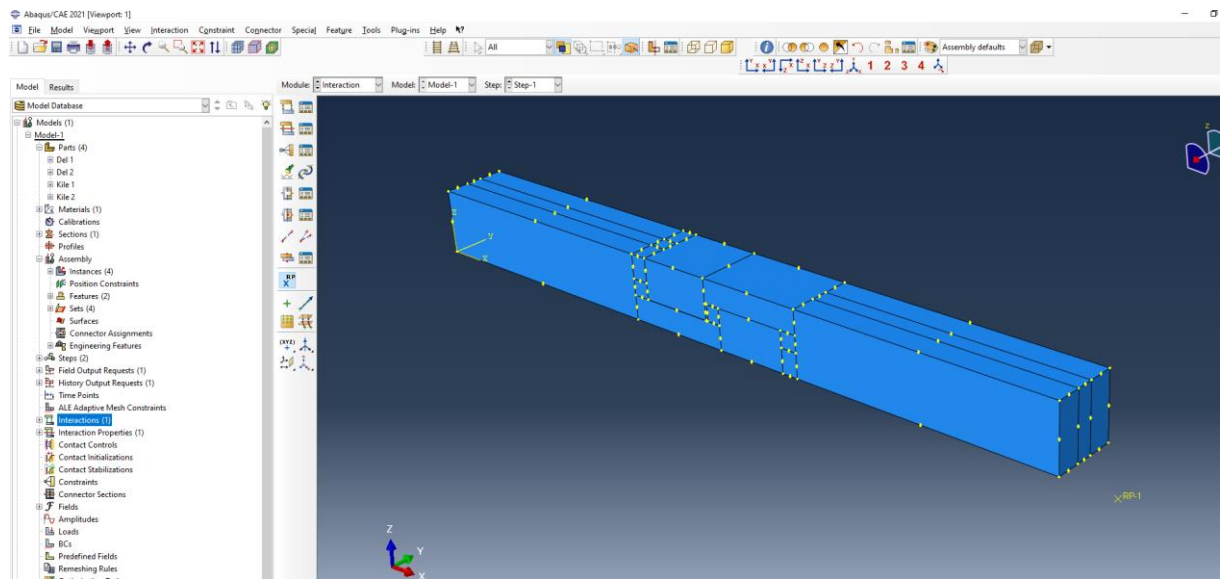


10. Definer kontakt- interactions. Da det er brukt dynamic explicit er det mulig med general contact mellom komponenter. Definer med friksjon penalty

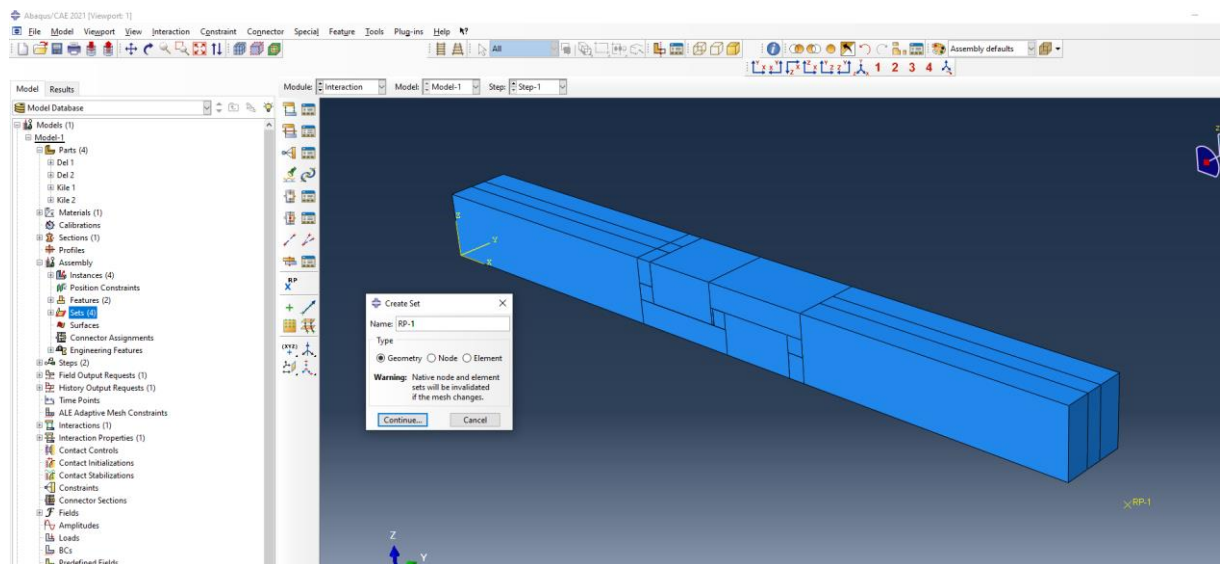




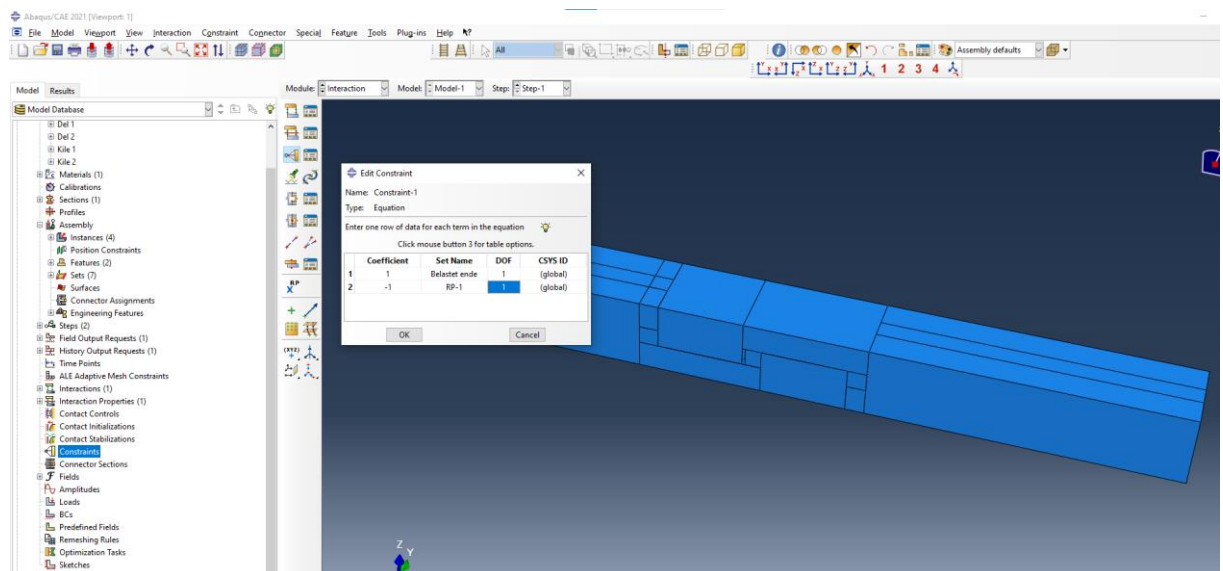
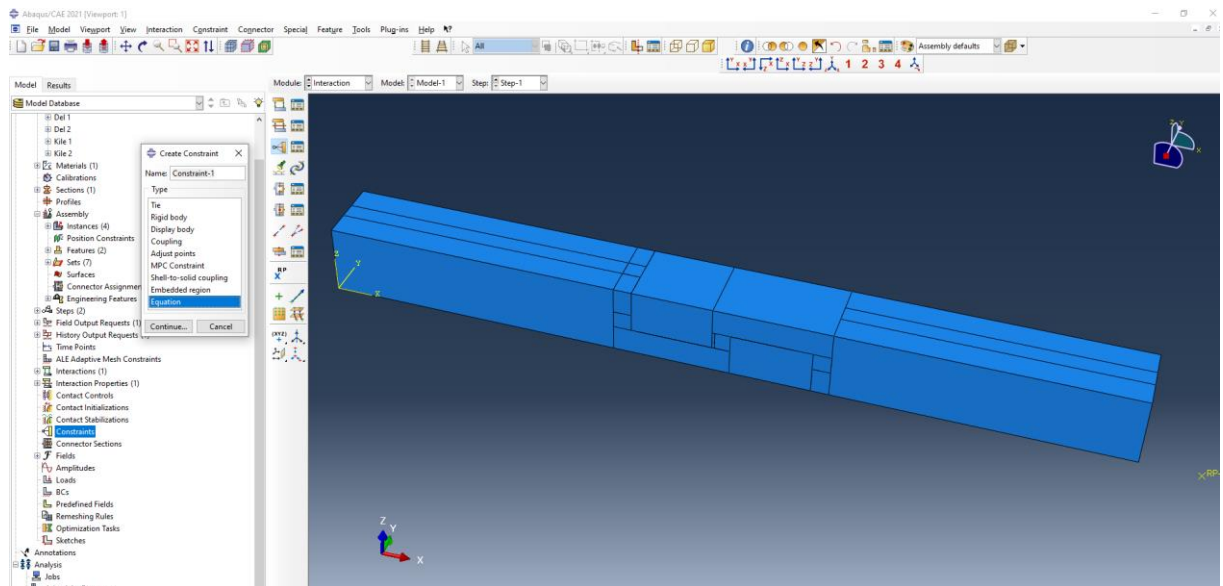
11. Sett ett referansepunkt utenfor enden av “lastpåført ende”

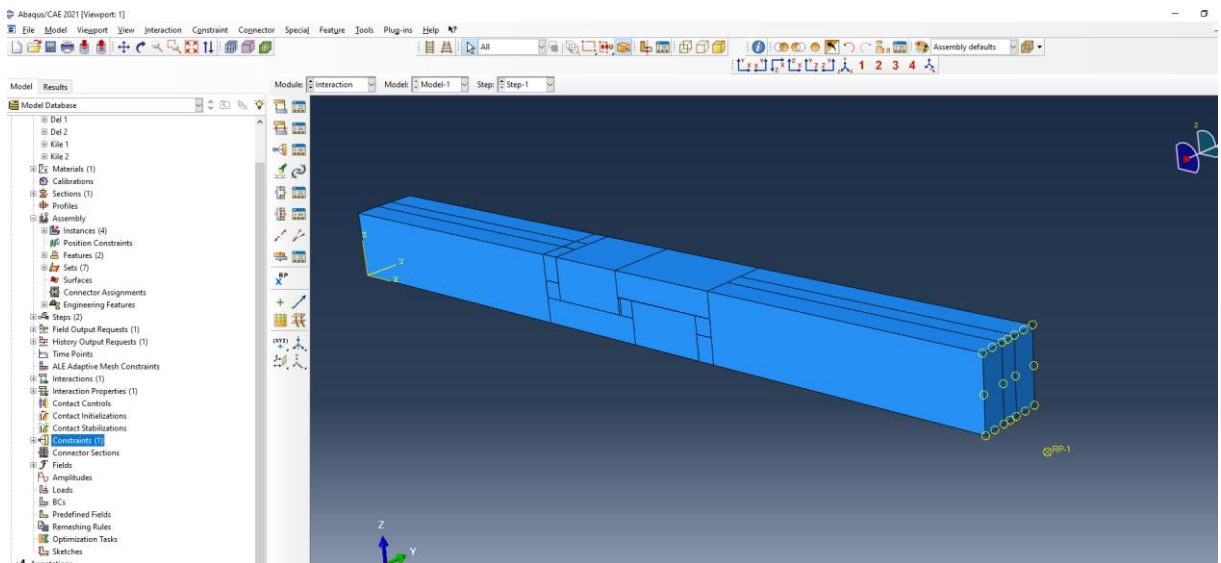


12. Lag set av endene og referansepunktet hver for seg

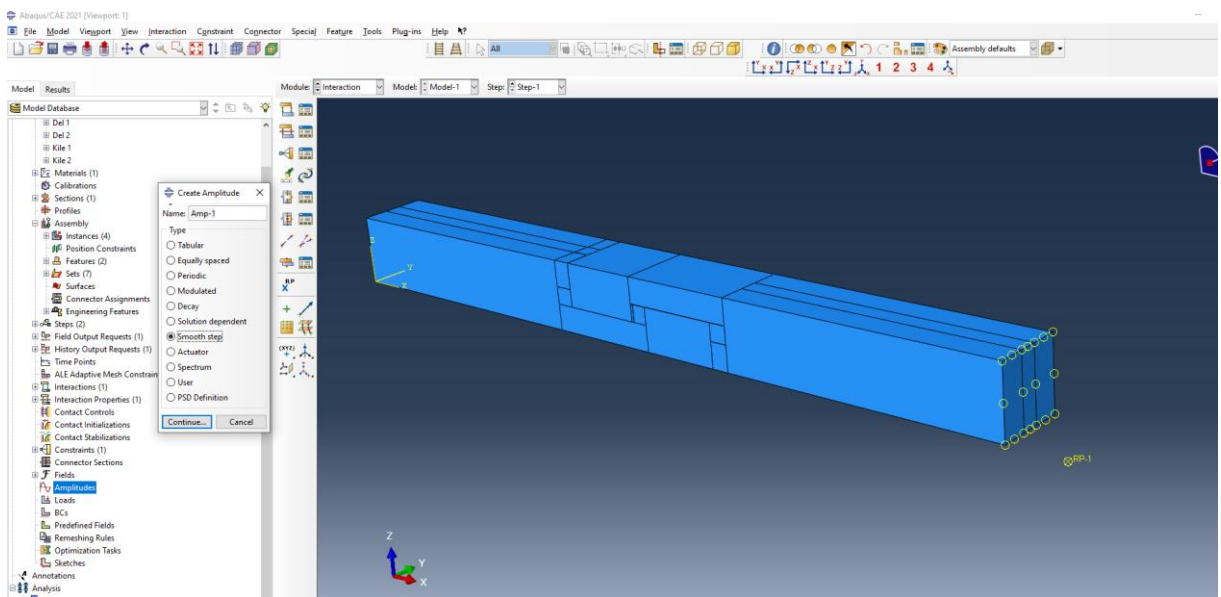


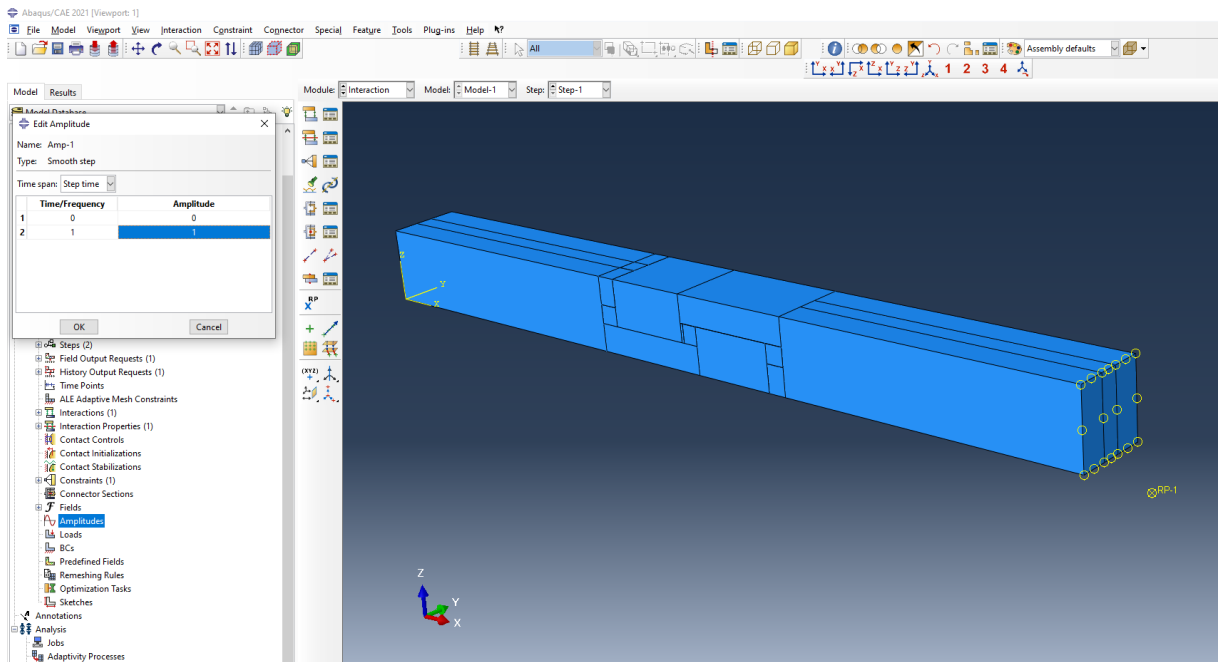
13. Definer constraint mellom referansepunkt og belastet ende



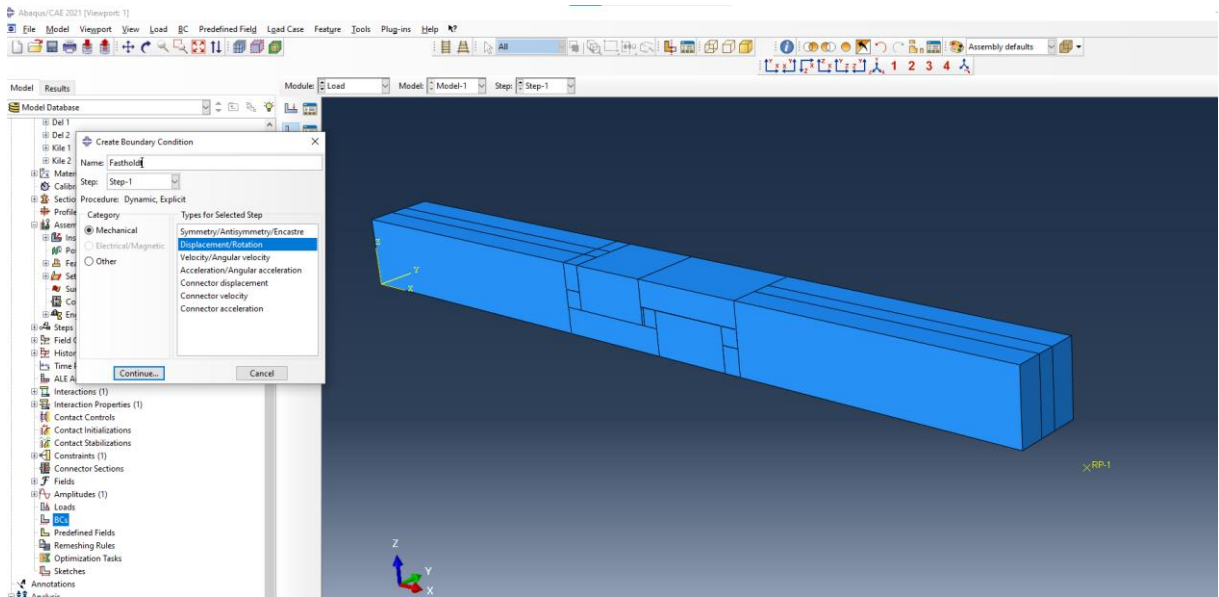


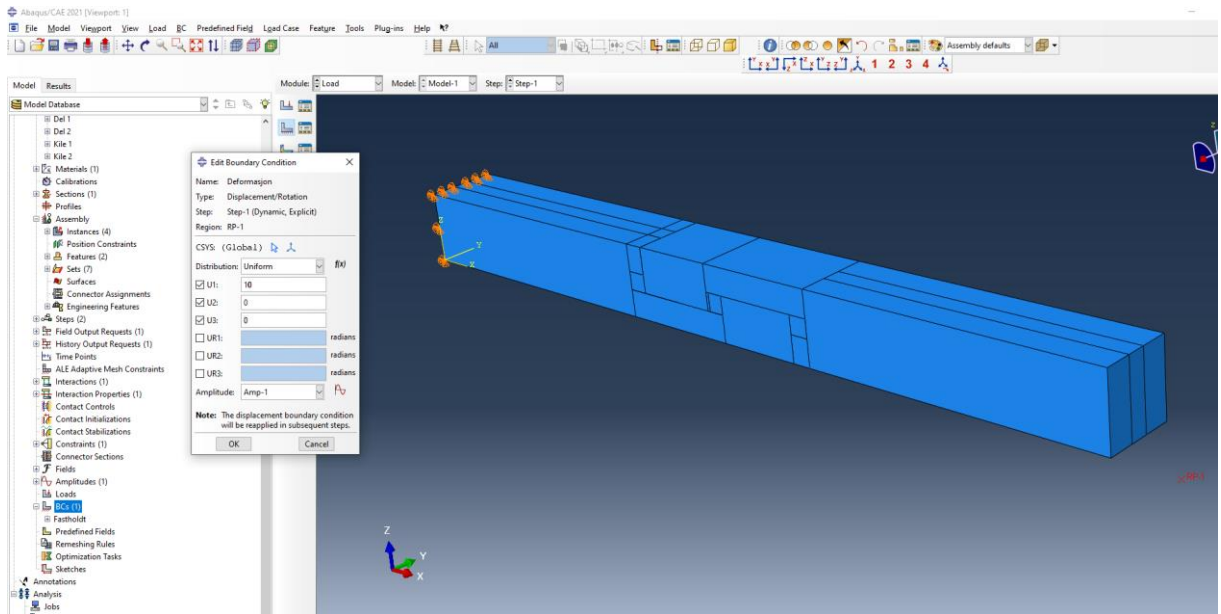
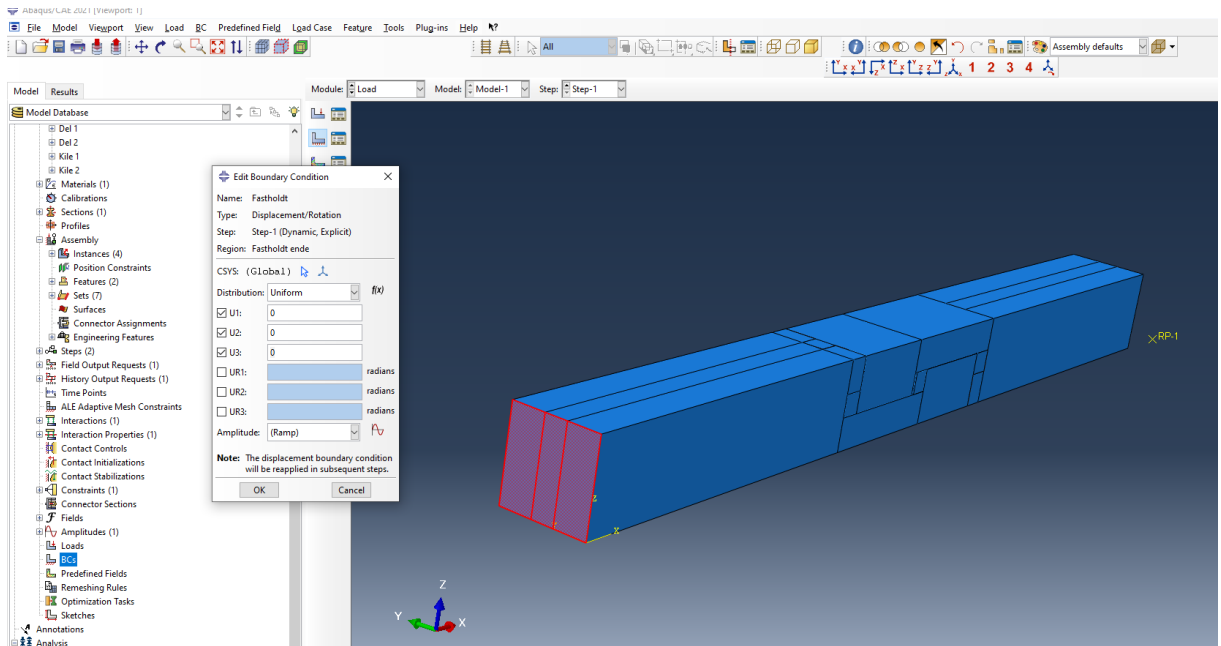
14. Definer amplitude smooth step

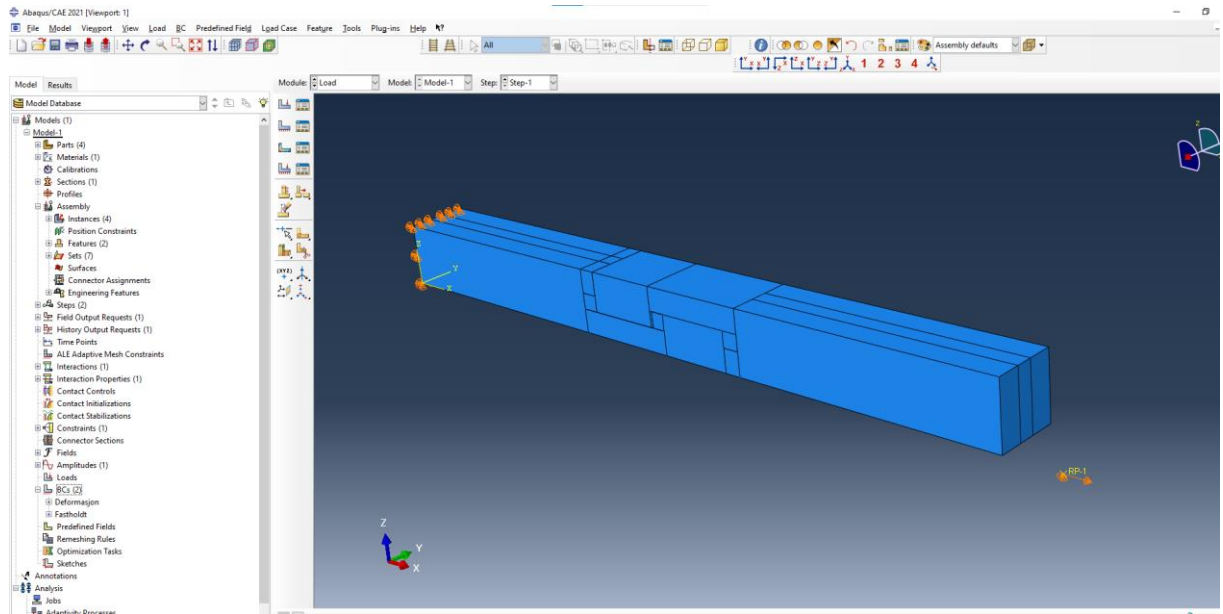




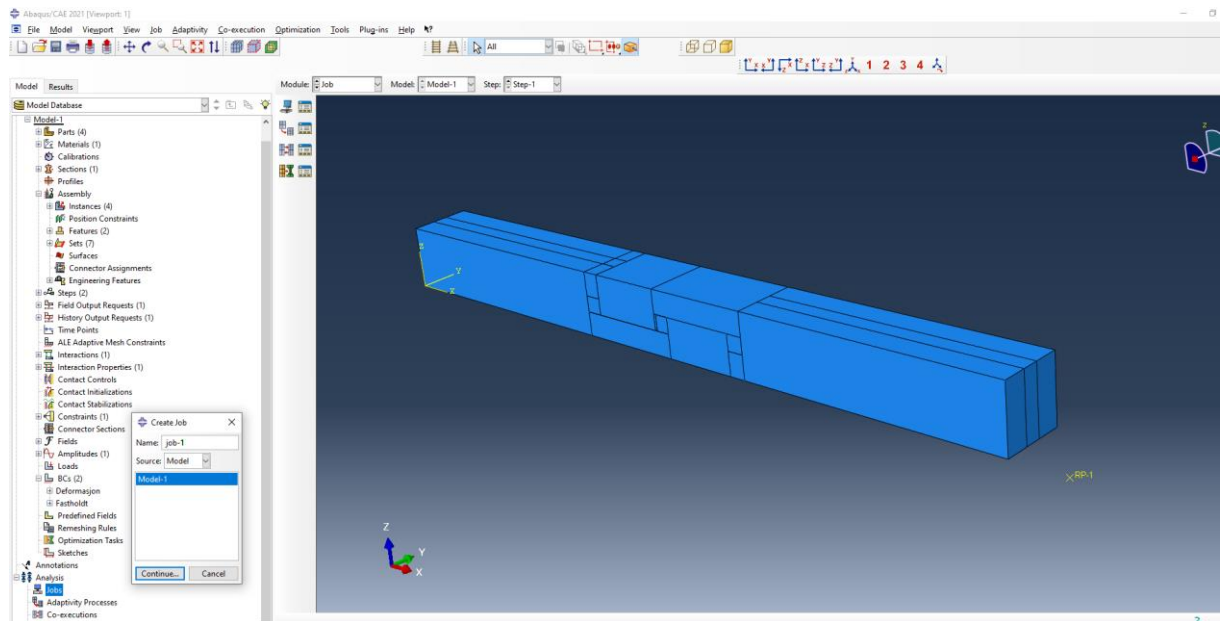
15. I BC, definer deformasjon og fastholdt endre fast mot translasjon.

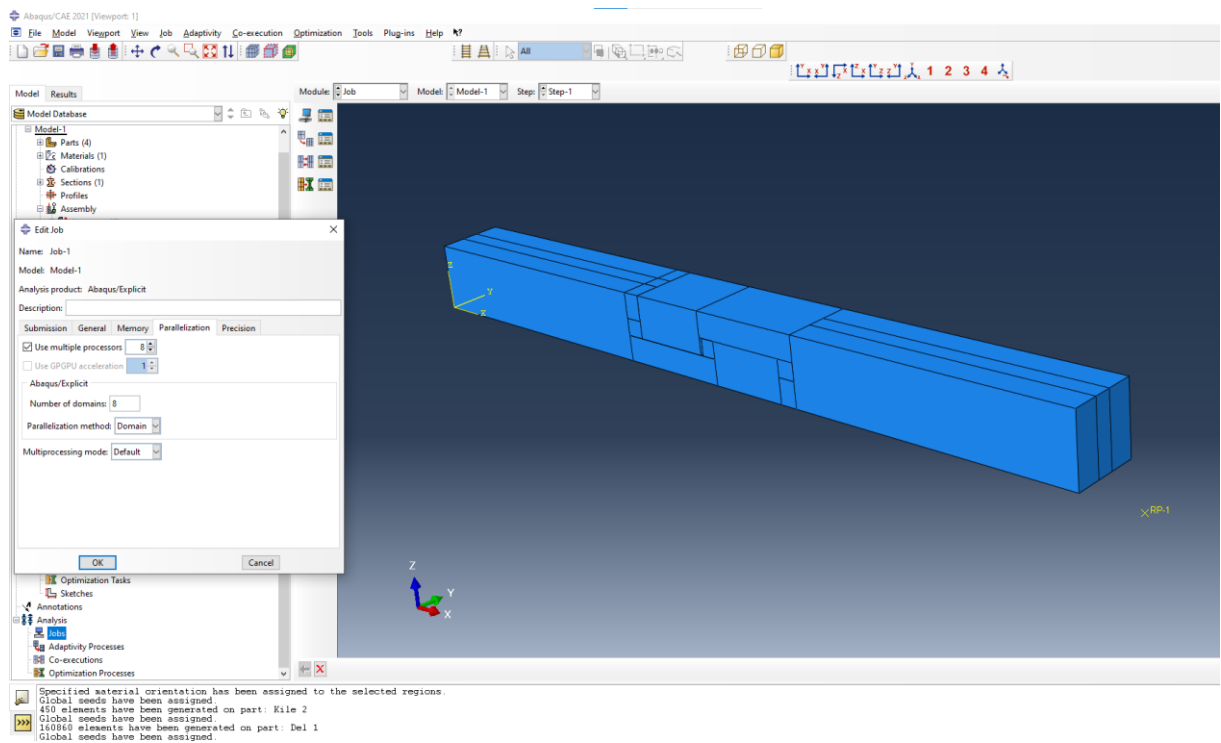






16. Lag en “job”, der man definerer antall prosessorer som benyttes til simuleringen





17. Høyreklikk på valgt "job" og velg submit. Dette starter simulering.

