

Halgrim Kvello Stake

Trykk vinkelrett på fiberretningen i treelementer

Compression orthogonal to grain in timber elements

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk
Veileder: Francesco Mirko Massaro
Juni 2023

Halgrim Kvello Stake

Trykk vinkelrett på fiberretningen i trelementer

Compression orthogonal to grain in timber elements

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk
Veileder: Francesco Mirko Massaro
Juni 2023

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for konstruksjonsteknikk



Kunnskap for en bedre verden

Forord

Denne oppgaven er avsluttende arbeid på min mastergrad for å bli sivilingeniør i Bygg og Miljøteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. Arbeidet er gjort på instituttet for konstruksjonsteknikk. Oppgaven er foreslått av Francesco Mirko Massaro.

Jeg vil rette en stor takk til Francesco Mirko Massaro for god veiledning og oppfølging underveis i arbeidet med oppgaven.

Sammendrag

Krysslaminerte tre-elementer (*Cross-laminated timber* (CLT)) erstatter i økende grad flere ikke-fornybare konstruksjonskomponenter. Dette skyldes CLT-platers betydelige potensial som to-dimensjonale bæreelementer. Ved prosjektering med CLT-plater må man vurdere ulike parametere, deriblant trykk vinkelrett på treets fiberretning.

Nåværende Eurokode 5 har ingen beregningsmetoder for CLT-elementer. Derfor er en ny Eurokode under utredning, der det er foreslått en øvre grense for trykkspenninger ved last vinkelrett på fiberretningen i CLT-elementer. Uttrykket for denne grensen er blant annet avhengig av en faktor k_p . Verdien av k_p endres etter hvor store deformasjoner konstruktøren tillater i konstruksjonen. Store deler av denne oppgaven går ut på å vurdere de foreslåtte verdiene for k_p -faktoren i kommende Eurokode 5 basert på data fra tidligere eksperimentelle forsøk med trykk vinkelrett på fiberretningen i limtre- og CLT-elementer.

I oppgaven er det også utført flere numeriske modelleringsforsøk. Basert på overnevnte data er det i modelleringsprogrammet *ABAQUS*, ved bruk av FEM-modellen (Finite Element Method), modellert tilsvarende oppsett som i de eksperimentelle testene. Resultatene fra *ABAQUS* er satt opp imot resultatene fra de eksperimentelle forsøkene. Ved å endre variabler i *ABAQUS* slik at disse resultatene blir tilfredsstillende like, har et endelig forslag til modelleringsmodell blitt utarbeidet. Denne modelleringsmodellen har så blitt anvendt til å modellere 7-lags CLT-elementer.

I denne studien er beregnet k_p -verdi ved 2,5%-, 10%- og 20%-tøyning lavere enn foreslåtte verdier i kommende Eurokode 5, og forskjellen øker med økende tøyning. Det betyr at kommende Eurokode 5 tillater større spenninger ved trykk vinkelrett på fiberretningen enn hva resultatene i denne oppgaven tilsier er tilrådelig.

Den forenklete modelleringsmodellen i *ABAQUS* kan brukes som en indikator på spenningsnivået som oppstår ved trykk vinkelrett på fiberretningen. Modellen baserer seg på for lite data til at den kan verifiseres som et prosjekteringsverktøy.

Abstract

Today, cross-laminated timber (CLT) elements are replacing multiple non-renewable construction components. This is due to the potential of CLT panels as two-dimensional load-bearing elements. During construction design using CLT panels, various parameters need to be controlled, including compression perpendicular to the grain.

The current Eurocode 5 does not provide calculation methods for CLT elements. Therefore, a new Eurocode is under development, proposing an upper limit for compression stress when loaded perpendicular to the grain in CLT elements. The expression for this limit depends, among others, on a factor called k_p . The value of the k_p factor varies based on the allowed deformations determined by the designer. A substantial part of this study aims to examine the reasonableness of the proposed values for the k_p factor in the upcoming Eurocode, based on data from previous experimental tests on compression perpendicular to the grain in glued-laminated timber and CLT elements.

Additionally, several numerical modeling attempts have been performed in this study. Based on the aforementioned data, equivalent setups as the experimental tests were modeled in the modeling software ABAQUS using the Finite Element Method (FEM). The results from ABAQUS were compared to the results from the experimental tests. By adjusting variables in ABAQUS to match these results, a final proposal for the model was developed. This model was then used to test 7-ply CLT elements.

The calculated k_p values in this study are consistently lower than the proposed values in the upcoming Eurocode 5 at 2.5%, 10%, and 20% strain, and the difference increases with increasing strain. This means that the upcoming Eurocode 5 allows for higher compression stress perpendicular to the grain than what this study suggests.

The simplified model in ABAQUS can be used as an indicator of compression stress that will occur when loaded perpendicular to the grain. However, the model relies on insufficient data to verify it as a design tool.

Innhold

Innholdsfortegnelse

Forord	1
Sammendrag	2
Abstract	3
Figurliste	6
Tabelliste	8
1. Introduksjon	10
2. Teori	12
2.1 Treets oppbygning og egenskaper	12
2.2 Krysslaminerte plater (CLT).....	13
2.3 CEN-modellen	14
2.4 Spredningsmodellen	14
2.5 Hammock-effekten.....	16
2.6 Eurokoden.....	16
2.7 ABAQUS.....	17
3. Metode	19
3.1 Oppsett forsøk	19
3.2 Postprosessering av data fra lab.....	20
3.3 Kalkulering av faktor k_p , ek_v	21
3.4 Modellering i ABAQUS.....	22
4. Resultater	26
4.1 Symbolforklaring	26
4.2 Resultater fra Troller sine eksperimentelle forsøk.....	27
4.2.1 Uniformt belastede prøvestykker	27
4.2.2 Ikke-uniformt belastede prøvestykker	33
4.2.3 Samling av data fra Troller sine forsøk.....	40
4.3 FEM-modellering basert på Troller.....	41
4.3.1 Uniformt belastede prøvestykker	41
4.3.2 Ikke-uniformt belastede prøvestykker	44
4.4 Resultater fra Dalheim og Bjerkeng sine eksperimentelle forsøk.....	47
4.4.1 Uniformt belastede prøvestykker	47
4.4.2 Ikke-uniformt belastede prøvestykker	51
4.4.3 Prøvestykker med CLT-kloss som lastapplikator.....	59
4.4.4 Samling av data Dalheim og Bjerkeng sine forsøk	63

4.5 FEM-modellering basert på Dalheim og Bjerkeng.....	64
4.5.1 Uniformt belastede prøvestykker.....	64
4.5.2 Ikke-uniformt belastede prøvestykker.....	65
4.6 Resultater for modellering av Schweigler et al sine eksperimentelle forsøk.....	72
4.7 Resultater for modellering av 7 lags CLT-elementer.....	75
5. Diskusjon	77
5.1 Videre arbeid.....	83
6. Konklusjon	84
7. Kilder	85

Figurliste

Figur 1: Tverrsnitt av trestamme	12
Figur 2: Typisk spenning-/tøyningskurve for trevirke	13
Figur 3: Skisse av CLT-plate.....	13
Figur 4: Spredning av spenninger ved trykk vinkelrett på fiberretningen for trevirke foreslått av Van der Put.....	15
Figur 5: Spredning av spenninger ved trykk vinkelrett på fiberretningen for CLT foreslått av Brandner	15
Figur 6: Hammock-effekten	16
Figur 7: 2D-elementer plan spenning og 3D-elementer	18
Figur 8: Typisk testoppsett for Troller, Dalheim og Bjerkeng og Schweigler et al.....	20
Figur 9: CEN-modellen.....	21
Figur 10: FEM-modell av prøvestykke og lastapplikator	24
Figur 11: Lokal bruddmekanisme.....	25
Figur 12: Konvergenstudie	25
Figur 13: Modelleringsstudie	25
Figur 14: Dimensjoner på uniformt belastede prøvestykker	27
Figur 15: Typiske bruddmekanismer	27
Figur 16: Kraft-/deformasjonskurve for R30.....	28
Figur 17: Kraft-/deformasjonskurve for R60.....	29
Figur 18: Kraft-/deformasjonskurve for R90.....	30
Figur 19: Kraft-/deformasjonskurve for R120.....	31
Figur 20: Kraft-/deformasjonskurve for R150.....	32
Figur 21: Dimensjoner på ikke-uniformt belastede prøvestykker	33
Figur 22: Typiske bruddmekanismer	33
Figur 23: Kraft-/deformasjonskurve for Lu30	34
Figur 24: Kraft-/deformasjonskurve for Lu50.....	35
Figur 25: Kraft-/deformasjonskurve for Lu70	36
Figur 26: Kraft-/deformasjonskurve for Lu100	37
Figur 27: Kraft-/deformasjonskurve for Lu150	38
Figur 28: Kraft-/deformasjonskurve for Lu200	39
Figur 29: R120 og Lu150	41
Figur 30: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for R30	41
Figur 31: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for R60	42
Figur 32: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for R90	42
Figur 33: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for R120	43
Figur 34: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for R150	43
Figur 35: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for Lu30	44
Figur 36: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for Lu50	44
Figur 37: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for Lu70	45
Figur 38: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for Lu100.....	45
Figur 39: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for Lu150.....	46
Figur 40: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for Lu200.....	46
Figur 41: Testoppsett for Dalheim og Bjerkeng	48
Figur 42: Kraft-/deformasjonskurve for U50	49
Figur 43: Kraft-/deformasjonskurve for U100	50

Figur 44: Kraft-/deformasjonskurve for IKS-50.....	51
Figur 45: Kraft-/deformasjonskurve for IPS-50.....	52
Figur 46: Kraft-/deformasjonskurve for IKP-50	53
Figur 47: Kraft-/deformasjonskurve for IPP-50	54
Figur 48: Kraft-/deformasjonskurve for IKS-100.....	55
Figur 49: Kraft-/deformasjonskurve for IPS-100.....	56
Figur 50: Kraft-/deformasjonskurve for IPP-100.....	57
Figur 51: Kraft-/deformasjonskurve for IKP-100.....	58
Figur 52: Kraft-/deformasjonskurve for C-IKS-100.....	59
Figur 53: Kraft-/deformasjonskurve for C-IPS-100.....	60
Figur 54: Kraft-/deformasjonskurve for C-IPP-100	61
Figur 55: Kraft-/deformasjonskurve for C-IKP-100	62
Figur 56: IKS-50 og IKS-100	64
Figur 57: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for U50.....	64
Figur 58: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for U100.....	65
Figur 59: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for IKS-50	65
Figur 60: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for IPS-50	66
Figur 61: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for IKP-50	66
Figur 62: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for IPP-50	67
Figur 63: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for IKS-100	67
Figur 64: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for IPS-100	68
Figur 65: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for IKP-100	68
Figur 66: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for IPP-100	69
Figur 67: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for C-IKS-100	69
Figur 68: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for C-IPS-100	70
Figur 69: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for C-IKP-100.....	70
Figur 70: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for C-IPP-100.....	71
Figur 71: Full surface tests og W80-F140-ww-cen	72
Figur 72: Testoppsett for Schweigler et al.....	73
Figur 73: "180", "220", "240" og "180_T15 og T22"	75
Figur 74: Spenning-/tøyningskurve for R30-1.....	77
Figur 75: Spenning-/tøyningskurve for R120-1.....	78
Figur 76: Sammenligning av FEM-modell basert på datablad og FEM-modell basert på CEN-modellen.....	79

Tabelliste

Tabell 1: k_p -faktorer.....	17
Tabell 2: $k_s(n)$ verdier for styrkeparameteren	22
Tabell 3: Materialegenskaper for modellering av Troller sine forsøk.....	23
Tabell 4: Materialegenskaper for modellering av Dalheim og Bjerkeng sine forsøk.....	23
Tabell 5: Materialegenskaper for modellering av Schweigler et al sine forsøk	23
Tabell 6: Symbolforklaringer	26
Tabell 7: Data - R30	28
Tabell 8: Data - R60	29
Tabell 9: Data - R90	30
Tabell 10: Data - R120	31
Tabell 11: Data - R150	32
Tabell 12: Data - Lu30.....	34
Tabell 13: Data - Lu50.....	35
Tabell 14: Data - Lu70.....	36
Tabell 15: Data - Lu100.....	37
Tabell 16: Data - Lu150.....	38
Tabell 17: Data - Lu200.....	39
Tabell 18: Samling av data fra Troller sine forsøk.....	40
Tabell 19: Beregnet $k_{p,ekv}$ fra Troller sine forsøk.....	40
Tabell 20: Dimensjoner på prøvestykkene testet av Dalheim og Bjerkeng	47
Tabell 21: Data - U50	49
Tabell 22: Data - U100	50
Tabell 23: Data - IKS-50.....	51
Tabell 24: Data - IPS-50.....	52
Tabell 25: Data - IKP-50	53
Tabell 26: Data - IPP-50	54
Tabell 27: Data - IKS-100.....	55
Tabell 28: Data - IPS-100.....	56
Tabell 29: Data - IPP-100	57
Tabell 30: Data - IKP-100	58
Tabell 31: Data - C-IKS-100	59
Tabell 32: Data - C-IPS-100	60
Tabell 33: Data - C-IPP-100	61
Tabell 34: Data - C-IKP-100	62
Tabell 35: Samling av data fra Dalheim og Bjerkeng sine forsøk.....	63
Tabell 36: Beregnet $k_{p,ekv}$ fra Dalheim og Bjerkeng sine forsøk.....	63
Tabell 37: Beregnet $k_{p,ekv}$ for Troller og Dalheim og Bjerkeng sine forsøk samlet	72
Tabell 38: Dimensjoner på prøvestykkene testet av Schweigler et al	72
Tabell 39: Data - Schweigler et al.....	74
Tabell 40: Beregnet $k_{p,ekv}$ for Schweigler et al sine eksperimentelle forsøk og $k_{p,ekv}$ for resultater fra ABAQUS.....	74
Tabell 41: Data - 7-lags CLT.....	76
Tabell 42: Beregnet $k_{p,ekv}$ for 7-lags CLT	76
Tabell 43: Beregnede $k_{p,ekv}$ -verdier med nøyaktighet for R-serier	80
Tabell 44: Beregnede $k_{p,ekv}$ -verdier med nøyaktighet for Lu-serier	80

Tabell 45: Beregnede k_p , ek_v -verdier med nøyaktighet for prøvestykker hvor arealet til lastapplikatoren er 50x50 mm	80
Tabell 46: Beregnede k_p , ek_v -verdier med nøyaktighet for prøvestykker hvor arealet til lastapplikatoren er 100x100 mm	81
Tabell 47: Beregnede k_p , ek_v -verdier med nøyaktighet for prøvestykker hvor lastapplikatoren er en CLT-kloss	81
Tabell 48: Beregnede k_p , ek_v -verdier med nøyaktighet for FEM-modell av Schweigler et al sine forsøk.....	81
Tabell 49: Beregnede k_p , ek_v -verdier med nøyaktighet for FEM-modell av Schweigler et al sine forsøk.....	81
Tabell 50: Beregnede k_p , ek_v -verdier med nøyaktighet for FEM-modeller med 7-lags CLT	82
Tabell 51: Beregnede k_p , ek_v -verdier med nøyaktighet for alle testseriene.....	82
Tabell 52: Beregnede k_p -verdier med nøyaktighet for alle testseriene	82

1. Introduksjon

Den høye bæreevnen til krysslaminerte tre-elementer (*Cross-laminated timber* (CLT)) sammenlignet med massivtre og andre trebaserte produkter, samt økende global klimabevissthet, er hovedårsakene til den økende bruken av CLT. Forsterkningseffektene fra krysslagene i CLT gjør det mulig å bruke CLT på flere måter, for eksempel som plater og skiver i konstruksjoner. Dette gjør CLT til et konkurransedyktig materiale for bygging av fleretasjes hus (1). Materialelegenskapene og designbestemmelsene for CLT er ennå ikke inkludert i Eurokoden for trekonstruksjoner (2). Det er et pågående arbeid med dette.

Trykk vinkelrett på fiberretningen er en av de viktigste designkriteriene i CLT-elementer. Slike kompresjoner finner man eksempelvis i overgangen mellom vegg- og dekke-elementer av CLT. Vinkelrett på fiberretningen har CLT lav stivhet og styrke i forhold til parallelt med fiberretningen.

CLT, og trevirke generelt, har en duktil oppførsel ved trykk vinkelrett på fiberretningen (1). Dette gjør at CLT-elementer kan gjennomgå store deformasjoner uten at det oppstår brudd. Dette har ført til en diskusjon om karakteristisk trykkfasthet skal beregnes som spenningen ved en bestemt deformasjon (1%) eller som spenningen ved skjæringspunktet mellom spennings-deformasjonskurven og en parallellforskyvning av E-modulen (som gir uttrykk for stivheten i materialet).

Flere forskningsarbeider har blitt utført på CLT for å undersøke effekten av antall lag, elementstørrelse, last- og opplagerbetingelser og orienteringen av treets fiberretning ved trykk vinkelrett på fiberretningen (1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11). Resultatene viser en betydelig variasjon i stivhet og styrke avhengig av disse faktorene. Elementtykkelse og størrelse er viktige faktorer for uniformt belastede elementer, mens last- og opplagerbetingelser og kantavstander er viktige faktorer for ikke-uniformt belastede og opplagrede elementer.

Hensikten med denne oppgaven er å vurdere om de foreslåtte verdiene brukt i beregningsmetoden for trykk vinkelrett på fiberretningen i CLT-elementer i kommende Eurokode 5 er rimelige (12). Beregningsmetoden er avhengig av en faktor k_p , en faktor som endres etter hvor store deformasjoner konstruktøren tillater i konstruksjonen.

Joakim Brendjord Troller utførte i 2014 eksperimentelle forsøk med trykk vinkelrett på fiberretningen i limtre-elementer (11). Hans-Kristian Dalheim og Benjamin H. Bjerkeng utførte tilsvarende tester i 2022, men da på 3-lags CLT-elementer (7). Det samme gjorde Michael Schweigler et al, også i 2022, da på 5-lags CLT-elementer (1). Data fra disse forsøkene brukes til beregning av k_p -faktoren.

Det er utført numeriske modelleringsforsøk i modelleringsprogrammet ABAQUS (Versjon 20.41.51), ved bruk av FEM-modellen (Finite Element Method). Dette er modelleringer av de eksperimentelle forsøkene gjort av Troller, Dalheim og Bjerkeng og Schweigler et al (1, 7, 11). Resultatene fra de numeriske modelleringene og de eksperimentelle forsøkene er sammenlignet for å se om FEM-modellen samsvarer med de eksperimentelle forsøkene.

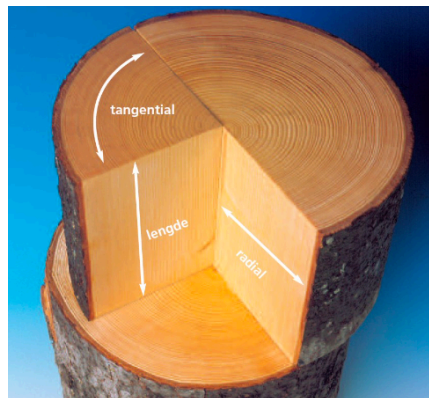
Det er også modelleret 7-lags CLT-elementer. Disse modelleringene har ikke eksperimentelle forsøk å sammenligne med, men resultatet fra modelleringene er allikevel vurderes ut i fra forventede verdier basert på Schweigler et al sine forsøk (1).

2. Teori

2.1 Treets oppbygning og egenskaper

Trevirke er et komplekst byggemateriale på grunn av sin unike struktur. Det består av cellulosefibre og celler som gir ulike egenskaper i forskjellige retninger. Trevirke er derfor et sylindrisk ortogonalt materiale (3).

Treets spesielle struktur gjør at man deler trevirke inn i tre hovedretninger; lengde- (L), radial- (R) og tangential- (T) retning (figur 1). I lengderetningen, som er retningen parallelt med de styrkegivende cellulosefibrene, har treet vesentlig høyere elastisitetsmodul og styrke enn i radial- og tangentialretningen. Det er også forskjeller mellom styrkeegenskapene i radial- og tangentialretningen, med radialretningen som den sterkeste av de to. Materialeegenskapene til trevirket varierer derfor med hvor i trestokken materialet er hentet ut og i hvilken retning det belastes i forhold til fiberretningen.

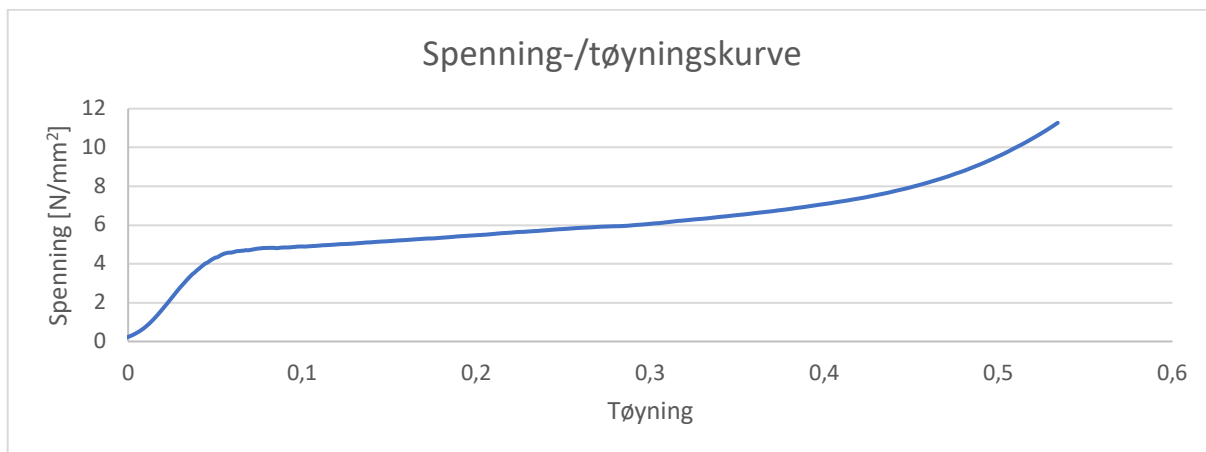


Figur 1: Tverrsnitt av trestamme. Kilde: Dalheim og Bjerkeng (7)

Treets vekst endres med forskjellige klimatiske forhold (13). Dette har påvirkning på tettheten av årringer. Større tetthet av årringer gir treet en høyere densitet, og dermed større styrke. Det er derfor et klassifiseringssystem på trevirke, som gir forventede materialeegenskaper og styrke. Klassifiseringen skal alltid dokumenteres.

Bæreevnen til tre påvirkes av mange faktorer, inkludert tetthet, fuktighetsinnhold, belastningsretning, retningen til fibrene og belastningsperioden (kryp) (1). Disse parameterne må tas i betraktning når man beregner treets totale styrke, men denne oppgaven fokuserer i all hovedsak på belastningsretningen i forhold til fiberretningen.

Når tre blir utsatt for trykksbelastning, oppfører det seg lineært-elastisk med ikke-permanente deformasjoner opp til en viss grense. Her kan sammenhengen mellom belastning og deformasjon beskrives ved Hookes lov. Over denne grensen vil materialet begynne å oppføre seg plastisk, og permanente deformasjoner vil oppstå. Ettersom materialet presses mer og mer sammen, jo mer kompakt blir cellestrukturen, og stivere blir materialet. Det kan derfor tåle svært store belastninger uten risiko for brudd, og man kan se en eksponentiell vekst i spennings-/tøyningsforholdet ved store tøyninger (figur 2).

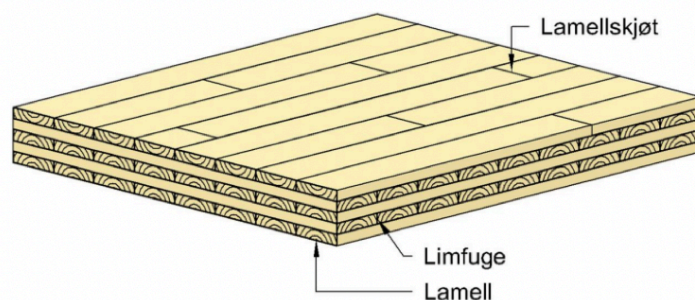


Figur 2: Typisk spennings-/tøyningskurve for trevirke

Kvist i treverket har også betydning for styrkeegenskapene (13). Da veden i trevirke må vokse rundt kvist, endres også fiberretningen rundt kvist. Da forekomsten av kvist er svært tilfeldig og uforutsigbart, kan man ikke ta dette med i beregningen av styrken.

2.2 Krysslaminerte plater (CLT)

Krysslaminert tre (CLT) er et konstruksjonselement som består av 3 til 9 lag med limte lameller. Hvert lag er orientert vinkelrett på hverandre. Denne ortogonale orienteringen gir CLT-plater stor kapasitet i både lengde- og bredde-retning (1).



Figur 3: Skisse av CLT-plate. Kilde: Dalheim og Bjerkeng (7)

Lamellene som brukes i CLT er planker med varierende tykkelse og bredde. Tykkelsen variere fra 20 til 60 mm, mens bredden varierer fra 40 til 300 mm. For å produsere CLT-plater blir lamellene skåret ut av tømmer, tørket og sortert etter styrke. Lameller med lik klassifisering blir så skjøtt, ofte fingerskjøtt, høvlet og limt sammen til en plate i henhold til ønsket geometri- og styrkebehov. CLT-plater kan i teorien være så lange og brede man måtte ønske, men på grunn av faktorer som frakt, håndtering og lagring er det ikke vanlig med lengder over 16 meter og bredder over 3 meter.

CLT-plater er ofte bygd opp av lag med ulik styrkeklassifisering av lamellene, med de ytterste lagene med høyest styrke. Dette kan være nyttig når man ønsker å tilpasse styrken til spesifikke områder av konstruksjonen eller oppnå spesifikke lastbærende krav. Dette er også kosteffektivt da prisen på trevirke er økende med styrken.

CLT-plater gir stor fleksibilitet når det gjelder geometri, slik at de kan tilpasses forskjellige bygningsformer. Konstruksjoner med CLT kan også bidra til kortere byggetid sammenlignet med tradisjonelle metoder. CLT har en lav total kostnad, ettersom produksjonen er effektiv og materialene kostnadseffektive. Videre har CLT gode miljøegenskaper og utnytter treet og dets egenskaper effektivt. Treverk er miljøvennlig, fornybart og resirkulerbart. Det har også gode isolasjonsegenskaper og muligheter for termisk lagring, noe som kan bidra til energieffektive bygninger. CLT-paneler kan prefabrikeres med ulike tilpasningsmuligheter. Dette gjør det enkelt å produsere CLT-elementer i samsvar med prosjektets spesifikasjoner og krav, og sikrer høy grad av nøyaktighet og kvalitet i produksjonsprosessen.

2.3 CEN-modellen

Treverk utsatt for trykk vinkelrett på fiberretningen har, grunnet treet's komplekse oppbygning, ikke en tydelig overgang fra elastisk til plastisk område. Spenning-/tøyningskurven vil ha en krumning i overgangen mellom lineær- og ikke-lineær oppførsel. Deretter vil kurven fortsette å øke gradvis i det ikke-lineære område, før den til slutt vil øke eksponentielt ved store tøyninger. Altså resulterer ikke nødvendigvis store tøyninger i belastet del til brudd, men det kan lede til skjevheter som gir andre bruddmekanismer andre steder i konstruksjonen, som for eksempel i øvrige etasjer i høyhus.

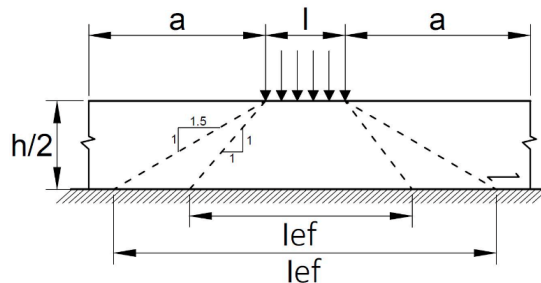
For å finne trykkstyrken ved trykk vinkelrett på fiberretningen baserer kommende Eurokode 5 seg på CEN-modellen (12, 14). Modellen, som er utviklet på 90-tallet, definerer trykkstyrken til trematerialet som spenningsnivået ved plastisk deformasjon under lastarealet på 0,01h, altså 1% tøyning. Prøvene som brukes til å bestemme trykkstyrken er uniformt lastet over hele overflaten, og er av dimensjoner 45x70x90 mm (bxhxl) for massivtre og 45x70x180 mm (bxhxl) for limtre. Fremgangsmetoden er forklart nærmere under pkt 3.2.

2.4 Spredningsmodellen

Prøvestykkene i CEN-modellen er i en uniform spenningstilstand over hele tverrsnittet, da hele prøvestykket er under lastarealet. Men trykkapasiteten er også avhengig av hvor mye tremateriale som er utenfor lastarealet, dvs avstanden fra lastarealet til enden av tre-elementet. Den påførte kraften, og da trykkspenningene, vil fordele seg utover i bredden på tverrsnittet, noe som gir et bæreareal som er større enn lastarealet.

Van der Put utviklet i 1988 en teoretisk modell som tar for seg denne spredningen (9) (figur 4). Den brukes til å beregne den effektive kompresjonslengden i et tre-element. Modellen er basert på likevekt med lineær plastisitet. I spredningsmodellen antas det at spredningen av lasten fra belastningsområdet til det ubelastede treet på sidene er lineær. Denne lineære

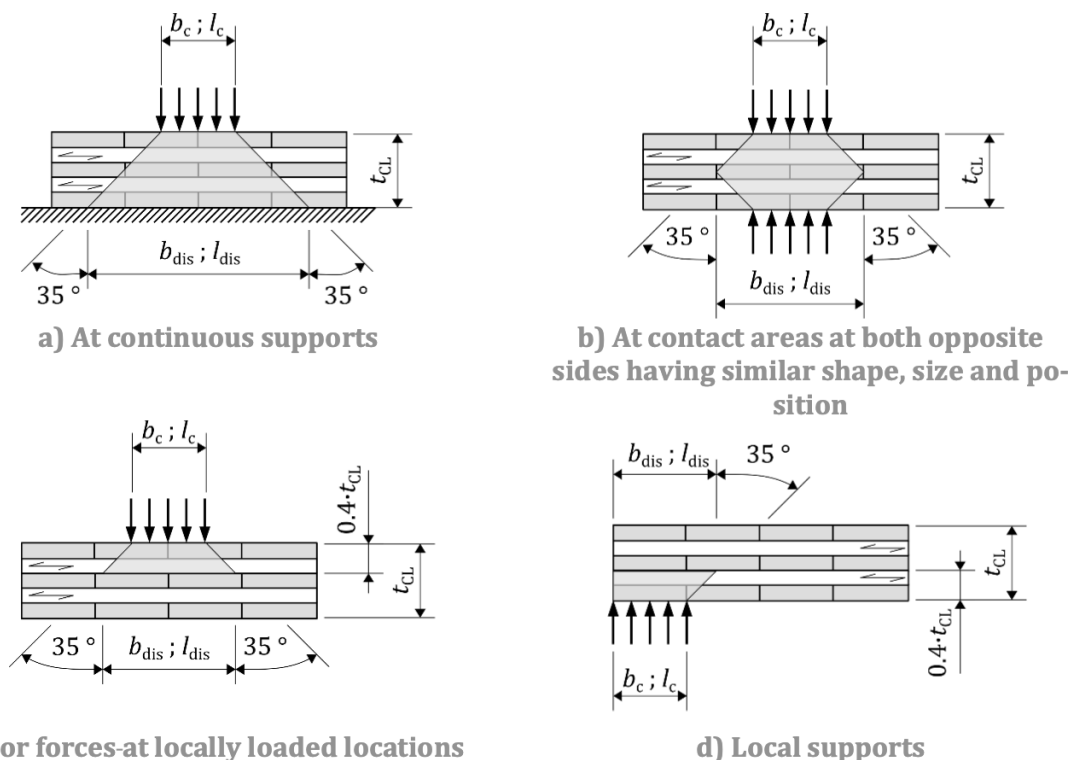
fordelingen gjør det mulig å beregne den effektive kompresjonslengden ved å multiplisere den faktiske kompresjonslengden med en spredningsfaktor. Spredningsfaktoren er 45 grader (1:1 gradient) ved små tøyninger (3-4%) og 56 grader (1:1.5 gradient) ved større tøyninger (>10%).



Figur 4: Spredning av spenninger ved trykk vinkelrett på fiberretningen for trevirke foreslått av Van der Put. Kilde: Leijten og Steiger (9)

Selv om spredningsmodellen gir en enkel beregningsmetode, er det viktig å merke seg at den er en forenkling av virkeligheten. I praksis kan spredningen av belastningen være mer kompleks, spesielt hvis treet har ujevn tetthet eller forskjellige styrkeegenskaper i ulike retninger.

Brandner, 2018, videreutviklet denne spredningsmodellen til å gjelde for trykk vinkelrett på fiberretningen i CLT-plater (6) (figur 5). I motsetning til den lineære spredningsmodellen til Van der Put, tar Brandner-modellen hensyn til den faktiske tverrsnittsgeometrien, lastkonfigurasjon og opplagerbetingelser. Den tar også hensyn til at tre er et ortotropisk materiale. Brandner-modellen fastsetter spredningsfaktoren til 35 grader.

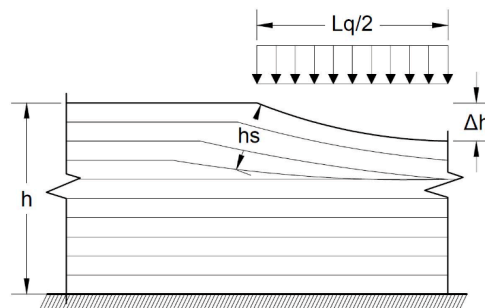


Figur 5: Spredning av spenninger ved trykk vinkelrett på fiberretningen for CLT foreslått av Brandner. Kilde: Brandner (6)

2.5 Hammock-effekten

En annen effekt som gir økt styrke er Hammock-effekten (15). Hammock-effekten i tre oppstår når fibrene på siden av lastarealet blir vippet på grunn av den påførte kompresjonskraften. Når tre blir komprimert, vil de langsgående fibrene påvirkes og begynne å vri seg eller bøye seg til siden. Dette skjer spesielt når tre-elementet er relativt smalt i forhold til belastningen den utsettes for.

Denne vippingen av fibrene skaper en buet form i tverrsnittet av tre-elementet, som ligner en hengekøye (figur 6). Derav kommer navnet "Hammock-effekten". Når fibrene blir vippet, oppstår det en konsentrasjon av spenninger på siden av belastningsflaten. Denne konsentrasjonen av spenninger bidrar til en ekstra bæremekanisme, som kan øke den totale bæreevnen til treet. Hammock-effekten blir tatt i betraktning i eksisterende modeller ved å multiplisere en faktor k_c med den trykkstyrken som er funnet med CEN-modellen (14).



Figur 6: Hammock-effekten. Kilde: Nilsen (15)

2.6 Eurokoden

Ved dimensjonering i henhold til kommende Eurokode 5 er det opp til konstruktøren å vurdere hvor stor tøyning man tillater i ulike deler av konstruksjonen (12). Konstruktøren kan tillate enten 2,5%, 10% eller 20% tøyning, som igjen gir en tillatt spenning. 2,5% tøyning velges når deformasjoner resulterer i ustabilitet i elementet eller systemet, eller forårsaker uakseptabel skade på andre komponenter. 10% tøyning velges når deformasjon ikke har noen betydelig effekt på stabiliteten til elementet eller systemet. 20% tøyning velges når deformasjon ikke har noen betydelig effekt på stabiliteten til elementet og svikt i elementet ikke fører til svikt i hele strukturen eller deler av den.

Etter at konstruktøren har valgt tillatt tøyning, vil dimensjonerende trykkspenning fås ved formelen:

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_p k_{c,90,CLT} f_{c,90,d}$$

Konstruktørens valgte tillatte tøyingsnivå vil gi verdien på faktoren k_p . Tabell viser samhörigheten mellom valgt tøyingsnivå og kommende Eurokode 5 sine foreslåtte verdier for k_p .

Valgt tøyingsnivå	2,5%	10%	20%
k_p	1,4	2,1	2,7

Tabell 1: k_p -faktorer

$f_{c,90,d}$ er dimensjonerende trykkfasthet vinkelrett på fiberretningen. Dimensjonerende trykkfasthet er karakteristisk trykkfasthet justert med sikkerhetsfaktorer ved at den er multiplisert med $\frac{k_{mod}}{\gamma_M} = \frac{0,9}{1,3}$. Innbakt i k_p -faktoren er det en reversering av disse sikkerhetsfaktorene. Ved 2,5% tøyning tillater kommende Eurokode 5 en kapasitet lik den karakteristiske styrken. Derfor vil k_p ved 2,5% tøyning være den inverse av sikkerhetsfaktorene, $\frac{\gamma_M}{k_{mod}} = 1,4$. Ved 10%- og 20%-tøyning foreslår kommende Eurokode 5 henholdsvis $k_p = 2,1$ og $k_p = 2,7$, basert på spenning-/tøyingskurven i den ikke-lineære fasen. Det er disse verdiene denne oppgaven vil vurdere ved bruk av data fra eksperimentelle forsøk.

Denne oppgaven introduserer en faktor $k_{p,ekv}$. Dette er k_p -faktoren uten reverseringen av sikkerhetsfaktorene. Dvs at $k_{p,ekv} = 1$ for 2,5%-tøyning, $k_{p,ekv} = 1,46$ for 10%-tøyning og $k_{p,ekv} = 1,9$ for 20%-tøyning. $k_{p,ekv}$ -faktoren er introdusert for å lettere kunne se sammenhengen mellom spenninger og beregnet verdi av $k_{p,ekv}$.

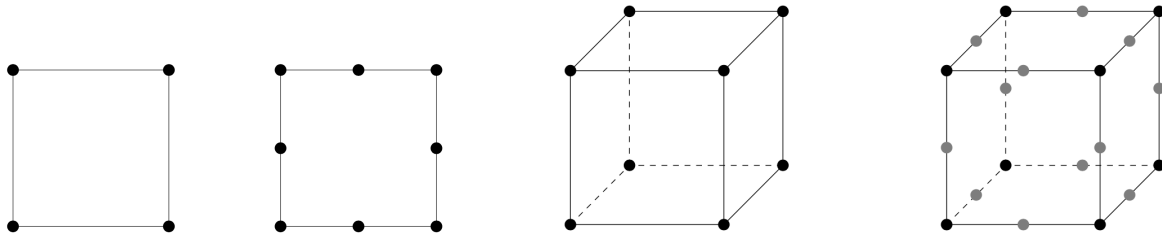
Faktoren $k_{c,90,CLT}$ tar høyde for lastspredningen og opplagerbetingelsene, samt oppbygningen av CLT-elementet. Faktoren finnes ved:

$$k_{c,90,CLT} = \sqrt{\frac{b_{dis}l_{dis}}{b_c l_c}} \leq 4.0$$

Lastspredningen vil ikke ha betydning siden vi sammenligner spenninger innenfor samme testoppsett. Derfor vil $k_{c,90}$ være lik i alle tilfeller, og vi ser kun på forholdet mellom spenningene ved 1%, 2,5%, 10% og 20% tøyning.

2.7 ABAQUS

ABAQUS er en programvareplattform som brukes til å utføre numeriske analyser ved hjelp av elementmetoden (FEM). Elementmetoden er en numerisk tilnærming som brukes til å løse komplekse ingeniør- og vitenskapsproblemer ved å dele domenet av interesse opp i mindre elementer. Hvert av disse elementene er av enkel geometrisk form, for eksempel trekant eller firkant i todimensjonale analyser, eller tetraeder eller kube i tredimensjonale analyser (figur 7).



Figur 7: 2D-elementer plan spenning (t.v) og 3D-elementer (t.h). Kilde: Dalheim og Bjerkeng (7)

I ABAQUS opprettes en FEM-modell ved å definere geometrien til strukturen og materialegenskapene til de ulike komponentene. Materialegenskapene, som elastisitetmodul, flytegrense og termiske egenskaper, tilordnes til de forskjellige elementene eller regionene i modellen.

Deretter defineres grensebetingelser og laster som virker på strukturen. Grensebetingelser inkluderer for eksempel feste-, frihetsgrads- og kontakt-betingelser som simulerer hvordan strukturen er festet eller samhandler med omgivelsene. Lastene kan være punktbelastninger, distribuerte belastninger, termiske belastninger eller andre fysiske påvirkninger.

Når modellen er fullstendig definert, utfører ABAQUS en numerisk analyse ved å løse ligningene som beskriver strukturens oppførsel under de gitte lastene og grensebetingelsene. Dette kan være å løse ligninger for mekanikk, termodynamikk og/eller andre relevante fysiske fenomener.

Resultatene av analysen kan omfatte spenningsfordeling, deformasjon, strømningshastighet, temperaturfordeling og andre fysiske størrelser av interesse. Disse resultatene kan visualiseres grafisk og brukes til å evaluere strukturens ytelse, vurdere svakhetene og optimalisere designet.

ABAQUS er en kraftig FEM-programvare som brukes i en rekke bransjer, herunder ingeniørvitenskap, bygg og konstruksjon, luftfart, bilindustri og biomedisinsk forskning. Det tillater ingeniører og forskere å utføre nøyaktige og realistiske simuleringer av komplekse strukturer og materialer for å forbedre design, optimalisere ytelse og forutsi oppførselen under ulike forhold.

3. Metode

3.1 Oppsett forsøk

Maskinen som produserer kompresjonskraften i forsøkene til Troller og Dalheim og Bjerkeng er en INSTRON med en maksimal belastning på 100 kN (7, 11). Denne maskinen er i stand til å måle både den påførte belastningen og tilhørende deformasjoner. Da Dalheim og Bjerkeng var usikre på om stivheten til maskinen i seg selv kunne være en mulig feilkilde, ble det under deres forsøk montert 3 stk LVDT-er på maskinen. En LVDT er en elektromekanisk sensor som brukes til å måle lineær forskyvning eller posisjon svært nøyaktig.

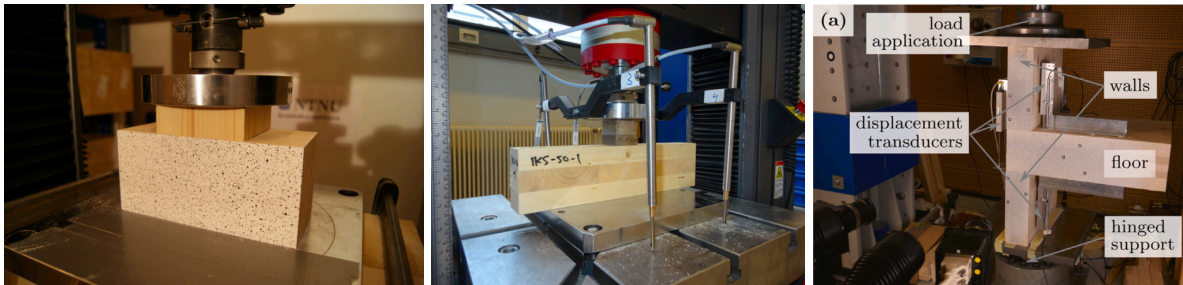
I forsøkene til Troller besto testsystemet av en kontinuerlig understøttet limtrebjelke belastet vinkelrett på fiberretningen (11) (figur 8). I forsøkene til Dalheim og Bjerkeng ble CLT-bjelker og plater testet med kontinuerlig- og punktopplagring (7) (figur 8). I forsøkene til Troller ble belastningen overført ved bruk av en treblokk som lastapplikator, mens det ble brukt stålkloss eller CLT-kloss som lastapplikator i Dalheim og Bjerkeng sine forsøk. Både treblokken og CLT-klossen har trykk parallelt med fiberretningen og vil derfor ikke forstyrre målingene av den totale deformasjonen i bjelken.

Varigheten av kompresjonstestene ble valgt slik at den estimerte bruddlasten vil oppstå innen 300 sekunder, en verdi anbefalt i NS-EN 408:2010+A1:2012 (16). For å kunne få så sammenlignbare resultater mellom de ulike testene som mulig, ble prøvene sjekket for uregelmessigheter som kvister og sprekker, og orienteringen av årringene under lasten ble holdt konstant.

Kompresjonsmaskinen ble innstilt slik at den ga en deformasjonshastighet på 2 millimeter per minutt. For referanseblokkene ble testene avsluttet da prøvene hadde nådd en total deformasjon under lasteområdet lik 20 mm. Dette skulle være nok til å finne de ønskede parameterne. Grunnen til å kjøre testene til en deformasjon på opptil 20 mm var å se hvordan materialet oppførte seg og hvilke mekaniske fenomener som oppstod ved denne deformasjonsstørrelsen. For prøvene med materiale også utenfor lastarealet ble det tillatt med en total deformasjon lik 30 mm. Dette er på grunn av at disse prøvestykkene har høyere kapasitet, noe som resulterer i brudd/svikt ved større deformasjoner.

Limtrebjelkene brukt i Troller sine forsøk er Norsk CE L40C, som er av samme kvalitet som GL32c (11). Dalheim og Bjerkeng sine CLT-prøvestykker besto av 3 lag, hvor de ytterste lagene hadde en høyere fasthetsklasse enn det midterste, henholdsvis T22 og T15 (7). Det midterste laget er orientert 90 grader i forhold til de ytterste lagene. Lagene har tykkelse 33 mm som gir en total høyde på CLT-elementene lik 100 mm.

I Schweigler et al sine forsøk ble en hydraulisk maskin med lastkapasitet på 500 kN brukt (1) (figur 8). CLT-prøvestykkene var av kvalitet C24 og var bygd opp av 5 lag, hvor lagene var orientert 90 grader på hverandre. Lagene hadde tykkelse 40-20-20-20-40 mm, som ga en total tykkelse på CLT-elementene på 140 mm. I forsøkene til Schweigler et al var også skive av CLT inkludert i oppsettet.



Figur 8: Typisk testoppsett for Troller (t.v), Dalheim og Bjerkeng (m) og Schweigler et al (t.h). Kilde: Troller, Dalheim og Bjerkeng, Schweigler et al (1, 7, 11)

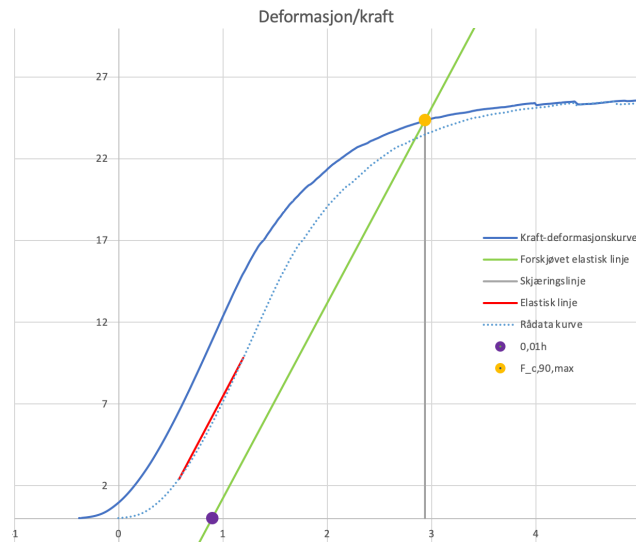
For mer detaljert informasjon om de ulike testoppsettene, se Troller, Dalheim og Bjerkeng og Schweigler et al (1, 7, 11).

3.2 Postprosessering av data fra lab

All postprosessering av data ble behandlet i Microsoft Excel i henhold med NS-EN 408:2010+A1:2012 «Trekonstruksjoner, Konstruksjonstre og limtre, Bestemmelse av noen fysiske og mekaniske egenskaper» (14).

Fra de eksperimentelle forsøkene ble det etablert et datablad med verdier for last og deformasjon. Fra Troller sine forsøk er deformasjonen gitt direkte fra maskinen, mens for Dalheim og Bjerkeng og Schweigler et al sine forsøk er deformasjonen gitt som snittet av LVDT-ene (1, 7, 11). Det ble plottet en last/deformasjonskurve fra disse data. I begynnelsen av denne kurven er vi i et område hvor treet enda ikke har kommet inn i den lineær-elastiske fasen. Denne S-formen skyldes at prøvestykket ikke er i full kontakt med lastapplikatoren og opplagringen. Prøvestykket må presses godt ned i opplagringsflaten før testen kan begynne. Kurven ble derfor forskjøvet mot venstre med en verdi her kalt *slipp*. *Slipp* er avstanden fra der den tenkte lineær-elastiske linjen til kurven treffer x-aksen. Slik oppnås en graf som videre kan brukes med CEN-modellen, hvor fremgangsmåten er som følger (14) (figur 9):

1. Estimerer en verdi for maksimal last $F_{c,90,max,est}$.
2. Kalkuler $0,1 * F_{c,90,max,est}$ og $0,4 * F_{c,90,max,est}$ og bestem hvor disse punktene treffer last/deformasjonskurven.
3. Trekk en rett linje igjennom disse punktene (linje 1).
4. Parallelt til linje 1, tegn linje 2 som har sitt nullpunkt i $0,01 h_0$ (1% tøyning). h_0 er høyden på prøvestykket.
5. Krysningpunktet mellom linje 2 og last/deformasjonskurven er $F_{c,90,max}$.
6. Hvis $F_{c,90,max}$ er innenfor 1% av $F_{c,90,max,est}$ kan $F_{c,90,max}$ brukes, hvis ikke gjenta prosedyren med et nytt estimat på $F_{c,90,max,est}$



Figur 9: CEN-modellen

Elastisitetmodulen $E_{c,90}$ bestemmes av:

$$E_{c,90} = \frac{(F_{40} - F_{10}) * h_0}{(w_{40} - w_{10}) * b * l}$$

Hvor $F_{10} = 0,1 * F_{c,90,max}$ og $F_{40} = 0,4 * F_{c,90,max}$.

w_{10} og w_{40} er deformasjonen korresponderende til F_{10} og F_{40} .

b og l er lastarealet.

Trykkfasthet $f_{c,90}$ bestemmes av:

$$f_{c,90} = \frac{F_{c,90,max}}{b * l}$$

Etter dette kan spenning-/tøyningskurven genereres og spenninger ved 2,5%, 10% og 20%-tøyningen kan hentes ut.

3.3 Kalkulering av faktor $k_{p,ekv}$

Den karakteristiske verdien av en materialparameter skal bestemmes med et pålitelighetsnivå på $a = 75\%$, hvor pålitelighetsnivået a defineres som sannsynligheten for at den karakteristiske verdien er større enn estimatoren på den karakteristiske verdien.

Pålitelighetsnivå på 75% er verdien anbefalt i NS-EN 14358:1990 (16). Den karakteristiske verdien m_k for materialstyrkeparameter defineres som 5-prosentielen i distribusjonsfunksjonen for m , korresponderende til en antatt uendelig stor testserie. Det er antatt n testerverdier som stammer fra en statistisk homogen populasjon. Testverdiene er antatt logaritmisk normal distribuerte og benevnes m_i .

Gjennomsnittsverdien $mean_{ln}$ og standardavviket s_y bestemmes av:

$$mean_{ln} = 1/n \sum_{i=1}^n \ln m_i$$

$$s_y = \max \left\{ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln m_i - y)^2, 0,05 \right\}$$

Gjennomsnittsverdien *average* og *mean* bestemmes av:

$$average = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i$$

$$mean = e^{mean_{ln}}$$

Den karakteristiske verdien m_k (senere benevnt 5% i tabeller under resultater) bestemmes av:

$$m_k = \exp (y - k_s(n) * s_y)$$

Der $k_s(n)$ forenklet bestemmes av:

$$k_s(n) = \frac{6,5n + 6}{3,7n - 3}$$

Antall prøvestykker	Faktor
n	$k_s(n)$
3	3,15
5	2,46
10	2,10

Tabell 2: $k_s(n)$ verdier for styrkeparameteren

Verdiene for $k_{p,ekv}$ hvor 1%-tøyning er referansen er regnet ut følgende:

$$k_{p,ekv,i} = \frac{mean_i}{mean_{1\%}}, \text{ for } i = 2,5\%, 10\% \text{ og } 20\%$$

3.4 Modellering i ABAQUS

Basert på Dalheim og Bjerkengs konvergensstudie i ABAQUS ble CPS8R og C3D20R valgt som elementtype (7). Elementstørrelse varierer fra globalstørrelse 3,3 mm til 9 mm, avhengig av hvor komplekst prøvestykket var og størrelsen. Det er i alle modellene minimum 5 elementer per side per lag. Kun ¼ av overflate arealet til prøvestykkene ble modellert, med låste opplagerbetingelser om symmetriaksene. Dette forhindret vridninger av prøvestykket som oppstod ved modellering av hele prøvestykket. Lasten er påført som en randbetingelse, dvs at modellen bes om å forskyve oversiden av prøvestykkene en gitt distanse, i disse tilfellene -20 mm (nedover). Med denne metoden har man større kontroll over deformasjonstørrelsen og hastigheten prøvestykkene deformeres med.

I prøvestykker bestående av flere lag er modellen modellert med partisjoner. Hver partisjon er så tildelt gjeldene materialegenskaper og orientering.

For modeller basert på Troller sine forsøk er materialegenskaper satt til (11):

E_L [N/mm ²]	E_R [N/mm ²]	E_T [N/mm ²]	ν_{LR}	ν_{LT}	ν_{RT}	G_{LR} [N/mm ²]	G_{LT} [N/mm ²]	G_{RT} [N/mm ²]
13000	Verdi fra CEN-modellen	Verdi fra CEN-modellen	0,5	0,6	0,6	760	760	76

Tabell 3: Materialegenskaper for modellering av Troller sine forsøk

E_L , G_{LR} , G_{LT} og G_{RT} er hentet fra datablad fra Moelven som var leverandør av prøvestykkene. ν_{LR} , ν_{LT} og ν_{RT} er hentet fra Dahl (5). Modellen baserer seg på en antagelse om at materialegenskapene i radial- og tangentialretningen er like. Derfor er ν_{LR} , ν_{LT} og ν_{RT} satt til en middelværdi av Poissons tallene funnet i Dahl (5). E_R og E_T er begge satt lik beregnet E-modul fra CEN-modellen, da modellen ikke skiller mellom radial- og tangentialretning (14).

For modeller basert på Dalheim og Bjerkeng sine forsøk er materialegenskaper satt til (7):

	E_L [N/mm ²]	E_R [N/mm ²]	E_T [N/mm ²]	ν_{LR}	ν_{LT}	ν_{RT}	G_{LR} [N/mm ²]	G_{LT} [N/mm ²]	G_{RT} [N/mm ²]
T15	11500	230	230	0,5	0,6	0,6	720	720	72
T22	13000	430	430	0,5	0,6	0,6	810	810	81

Tabell 4: Materialegenskaper for modellering av Dalheim og Bjerkeng sine forsøk

E_L , E_R , E_T , G_{LR} , G_{LT} og G_{RT} er hentet fra datablad fra Splitkon som var leverandør av prøvestykkene. Her er også E_R , E_T hentet fra datablad siden modellen ikke ga signifikant forskjell mellom å bruke beregnet E-modul fra CEN-modellen og E-modul oppgitt av Splitkon (14).

For modeller basert på Schweigler et al sine forsøk er materialegenskaper satt til (1):

E_L [N/mm ²]	E_R [N/mm ²]	E_T [N/mm ²]	ν_{LR}	ν_{LT}	ν_{RT}	G_{LR} [N/mm ²]	G_{LT} [N/mm ²]	G_{RT} [N/mm ²]
11000	370	370	0,5	0,6	0,6	690	690	69

Tabell 5: Materialegenskaper for modellering av Schweigler et al sine forsøk

E_L , E_R , E_T , G_{LR} , G_{LT} og G_{RT} er hentet fra British Standard (BS EN 338:2003) for styrkeklassifisering C24.

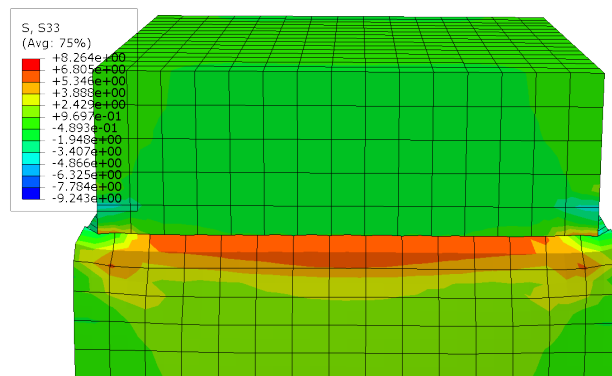
For modellering av 7 lags CLT er materialegenskapene satt lik materialegenskapene brukt i modelleringen av Schweigler et al (C24), bortsett fra én modell hvor materialegenskapene er lik materialegenskapene brukt i modeller basert på Dalheim og Bjerkeng (T15 og T22) (1, 7).

I alle modelleringene er overgangen mellom elastisk og plastisk område satt til 2,5%-tøyning, som i teorien skal være lik trykkfastheten. Der det har vært tilstrekkelig data er spenninger ved 10%- og 20%-tøyning også lagt inn for å beskrive prøvestykkenes oppførsel i det plastiske område.

Verdien for spenninger ved 2,5%-, 10%- og 20%-tøyning er i modelleringen av Troller og Dalheim og Bjerkeng sine forsøk hentet direkte fra spenning-/tøyningskurven (7, 11). For modellering av Schweigler et al sine forsøk er disse spenningene funnet ved å multiplisere trykkfastheten med gjennomsnittsverdien av $k_{p,ekv}$ fra forsøkene til Troller og Dalheim og Bjerkeng (1). Disse verdiene er $k_{p,ekv,2,5\%} = 0,94$, $k_{p,ekv,10\%} = 1,23$ og $k_{p,ekv,20\%} = 1,52$.

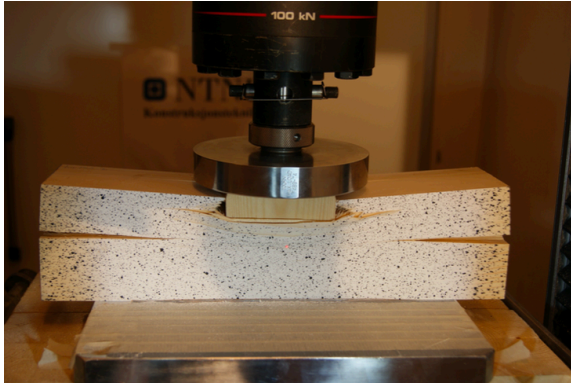
For 7 lags modellene er trykkfastheten satt lik gjennomsnittet av trykkfastheten til alle testseriene utført av Schweigler et al ($f_{c,90} = 4,76 \text{ N/mm}^2$), og spenningene ved 2,5%-, 10%- og 20%-tøyning er funnet på samme måte som for modelleringen av Schweigler et al (1).

Det ble gjort et modelleringsforsøk hvor prøvestykket, lastapplikator og underlag ble modellert med en friksjonskoeffisient mellom elementene (figur 10). Dette ble gjort fordi det ga en bedre representasjon av det eksperimentelle forsøket. Det viste seg at forskjellene i resultatene på dette modelleringsoppsettet og det forenklete oppsette ikke var signifikante. Da tidsbruken og bruken av datakraft var vesentlig høyere for det mer kompliserte oppsettet, ble det besluttet at det var hensiktsmessig å fortsette med det forenklete oppsettet.

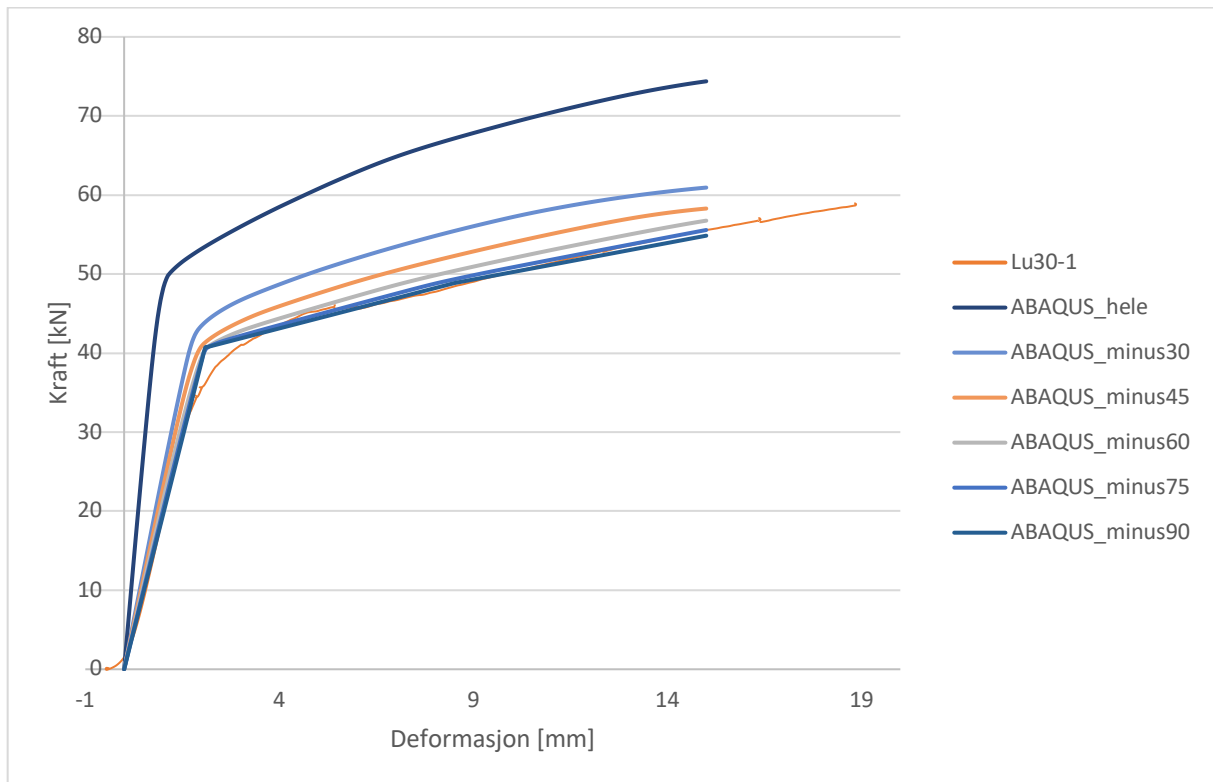


Figur 10: FEM-modell av prøvestykke og lastapplikator

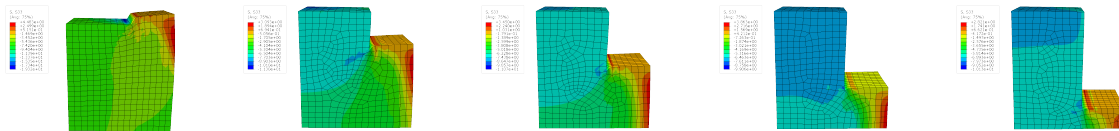
Ved tidlige modelleringsforsøk av de uniformt belastede prøvestykkene ga modellen resultater som sammenfalt godt med resultatene fra fysisk forsøk. Ved modellering av prøvestykker med areal utover lastarealet var resultatene ikke sammenfallende. Modellen var for stiv i det lineær-elastiske området. Ser man på bilder fra de eksperimentelle forsøkene ser det ut til at lastapplikatoren «skjærer» seg igjennom prøvestykket, og derfor gir ikke materialet rundt lastapplikatoren noen styrke (figur 11). Det ble derfor modellert forsøk hvor mer og mer av dette materialet er fjernet, i inkremerter på 15 mm (figur 13). Av disse resultatene ser man at modellen konvergerer mot resultater fra eksperimentelle forsøk jo mer man fjerner av materialet på sidene (figur 12). Det ble derfor konkludert med at videre modellering bruker en forenklet FEM-modell i ABAQUS som kun ser på materiale som er under lastarealet.



Figur 11: Lokal bruddmekanisme. Kilde: Troller (11)



Figur 12: Konvergenstudie



Figur 13: Modelleringsstudie. Fra venstre mot høyre; fjerner ubelastet materiale i inkremitter på 15 mm

4. Resultater

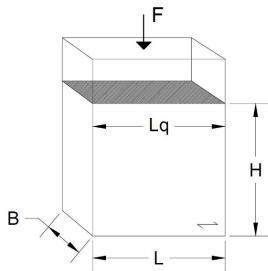
4.1 Symbolforklaring

$E_{c,90}$	Elastisitetsmodul for trykk vinkelrett på fiberretningen [N/mm ²]
<i>Slipp</i>	Slipp, gitt som tøyning
$\sigma_{h,1\%}$	Prøvestykkenes trykkfasthet [N/mm ²]
$\sigma_{2,5\%}$	Spenning ved 2,5%-tøyning [N/mm ²]
$\sigma_{5\%}$	Spenning ved 5%-tøyning [N/mm ²]
$\sigma_{10\%}$	Spenning ved 10%-tøyning [N/mm ²]
$\sigma_{20\%}$	Spenning ved 20%-tøyning [N/mm ²]
Average	Gjennomsnittsverdi av serien (normal distribuert)
Mean_In	Gjennomsnittsverdi av serien (logaritmisk normal distribuert)
mean	Gjennomsnittsverdi av serien omgjort fra logaritmisk ($e^{\text{mean_In}}$)
s_y	Standardavvik (logaritmisk normal distribuert)
s_y >> 0,05	Grenseverdi for standardavvik
k_s	Verdi for styrkeparameteren
5 %	5-prosentil, karakteristisk verdi
k_p	Faktor som øker dimensjonerende trykkspenning ut i fra valgt tøyingsnivå
$k_{p,ekv}$	k_p justert med sikkerhetsfaktorene
$k_{p,ekv,2,5\%}$	$k_{p,ekv}$ for 2,5%-tøyning
$k_{p,ekv,5\%}$	$k_{p,ekv}$ for 5%-tøyning
$k_{p,ekv,10\%}$	$k_{p,ekv}$ for 10%-tøyning
$k_{p,ekv,20\%}$	$k_{p,ekv}$ for 20%-tøyning

Tabell 6: Symbolforklaringer

4.2 Resultater fra Troller sine eksperimentelle forsøk

4.2.1 Uniformt belastede prøvestykker



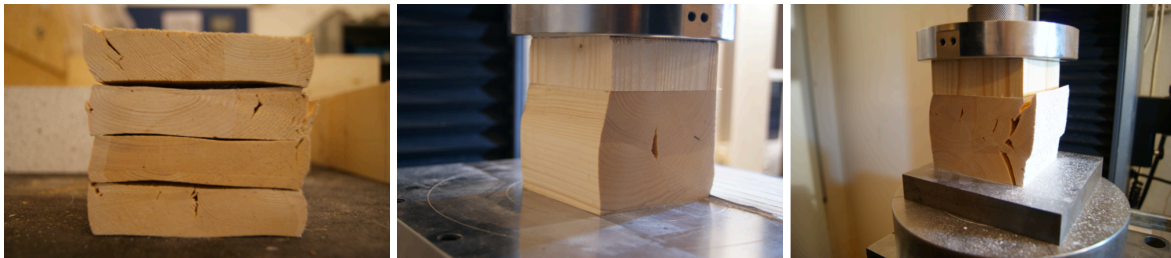
Specimen	H	L_q	L_u	L	B	Amount
R30-i	30	0	90	90	89	4
R60-i	60	0	90	90	89	4
R90-i	90	0	90	90	89	5
R120-i	120	0	90	90	89	4
R150-i	150	0	90	90	89	4

Total amount of tests: 21

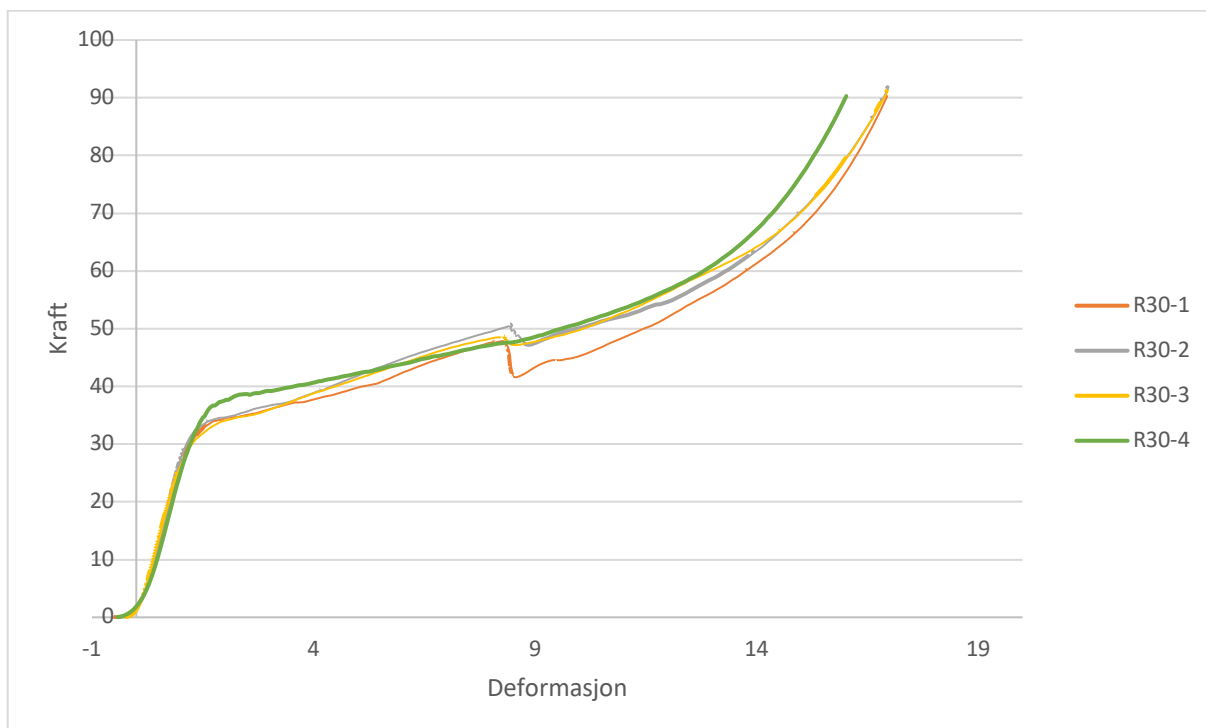
Figur 14: Dimensjoner på uniformt belastede prøvestykker [mm]. Kilde: Troller (11)

I dette testoppsettet hadde alle prøvene et konstant tverrsnittsareal på 90x89 mm (lxb), med hele oversiden belastet i kompresjon. Testene ble utført med variasjoner i høyden på 30-150 mm. For hvert prøvestykke ble det utført 4-5 tester.

I alle påfølgende grafer er kraft oppgitt i kN og deformasjon oppgitt i mm.



Figur 15: Typiske bruddmekanismer. Kilde: Troller (11)

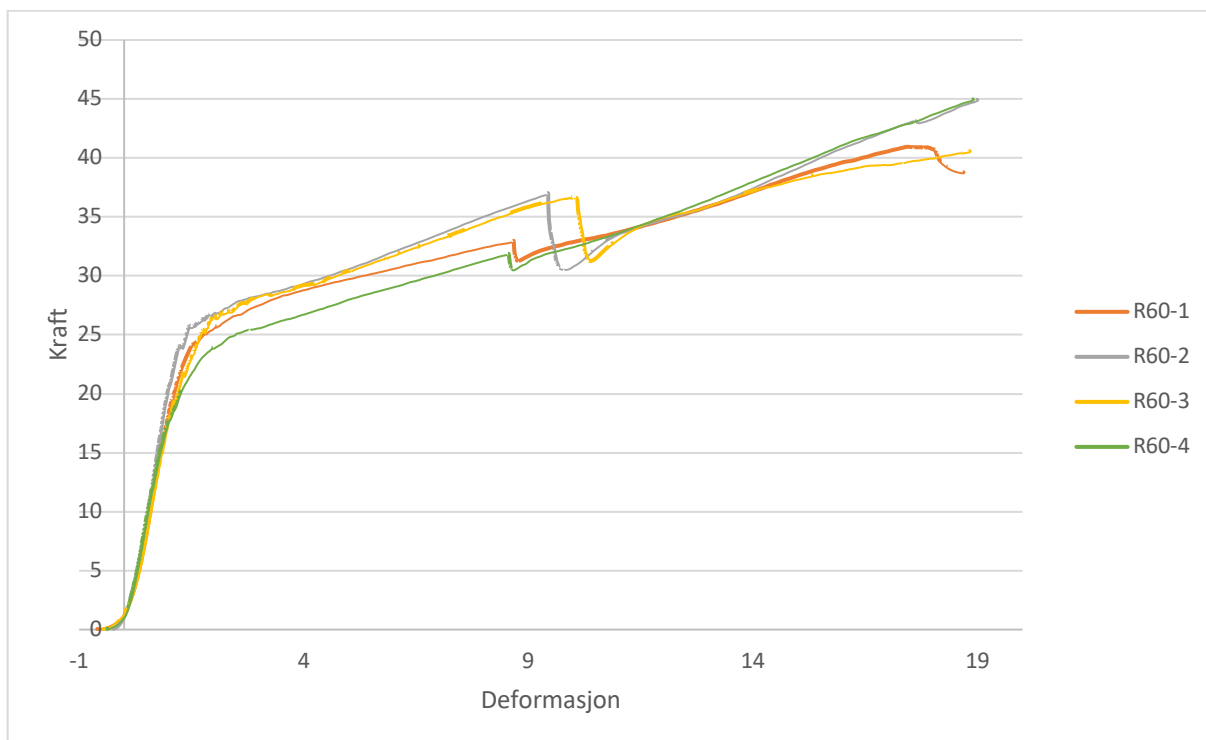


Figur 16: Kraft-/deformasjonskurve for R30

Testresultatet viser en lik materialoppførsel for alle prøvene. Alle prøvene er i lineær-elastisk område de første $\approx 1,5$ mm av deformasjonen, og når flytegrense ved ≈ 35 kN. Når deformasjonen er ≈ 9 mm, opplever alle prøvene en bruddmekanisme, noe som resulterer i et fall i lastkapasiteten. Bruddmekanismen er et resultat av at cellestrukturen begynner å bli revet fra hverandre. Dette skjer fordi materialet buler ut og skaper strekkspenninger. Videre utover i plastisk område genereres en rask økning i kapasitet som følge av at cellestrukturen blir mer og mer kompakt, og ingen flere sviktende mekanismer vil oppstå etter dette punktet. Resultatene fra kompresjonstestene viser en nesten identisk last-deformasjonskurve for alle prøvene, og det er derfor rimelig å anta at en god materialoppførsel er funnet.

R30	$E_{c,90}$ [N/mm ²]	Slipp	$\sigma_{h,1\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{2,5\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{10\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{20\%}$ [N/mm ²]
R30-1	93,16	0,50	4,21	2,53	4,52	5,31
R30-2	92,48	0,38	4,28	2,55	4,60	5,61
R30-3	103,52	0,25	3,97	2,62	4,51	5,52
R30-4	86,56	0,43	4,66	2,25	4,90	5,48
Average	93,93	0,39	4,28	2,49	4,63	5,48
mean_ln	4,54		1,45	0,91	1,53	1,70
mean	93,74		4,27	2,48	4,63	5,48
s_y			0,07	0,07	0,04	0,02
s_y >> 0,05			0,07	0,07	0,05	0,05
k_s			2,71	2,71	2,71	2,71
5 %			3,57	2,06	4,04	4,78
k_p,ekv				0,58	1,08	1,28

Tabell 7: Data - R30

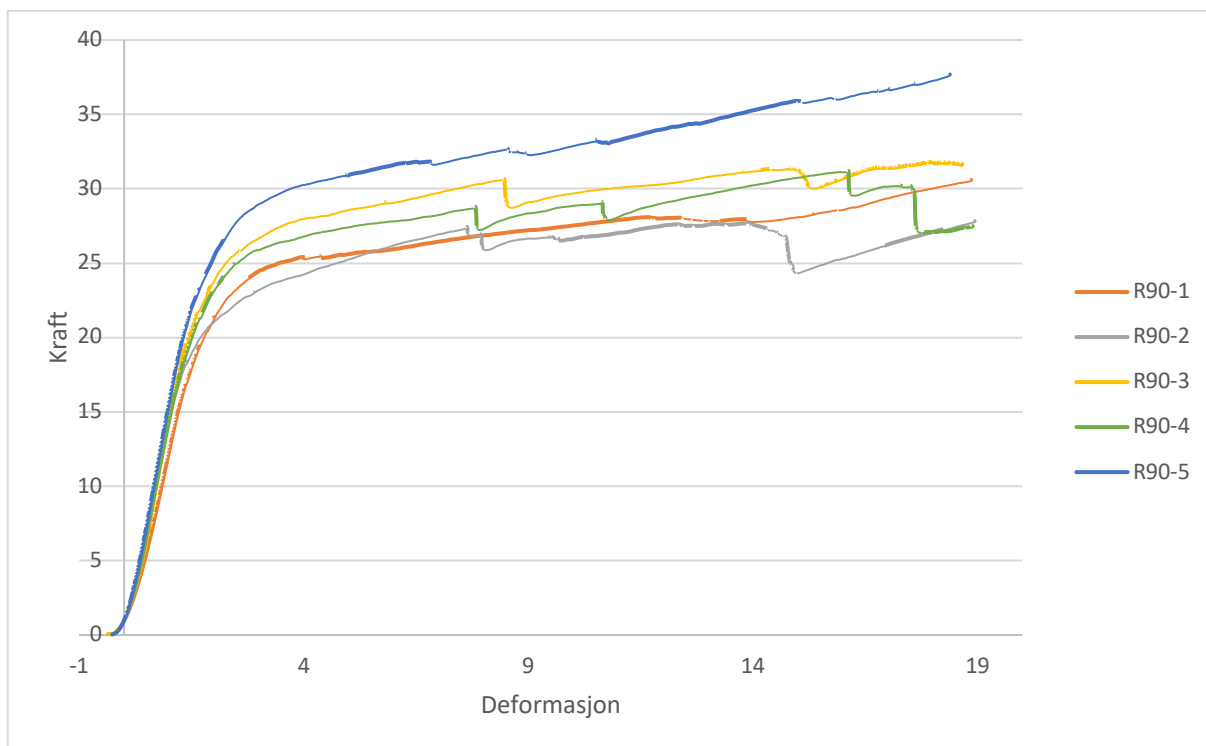


Figur 17: Kraft-/deformasjonskurve for R60

Alle prøvene er i lineær-elastisk område de første $\approx 1,7$ mm av deformasjonen, og når flytegrense ved ≈ 25 kN. Når deformasjonen er ≈ 10 mm, opplever alle prøvene en bruddmekanisme. Testene er avsluttet før materialet inntreer området med eksponentiell vekst i styrkeforholdet. Resultatene fra kompresjonstestene viser en nesten identisk last-deformasjonskurve for alle prøvene, og det er derfor rimelig å anta at en god materialoppførsel er funnet.

R60	$E_{c,90}$ [N/mm ²]	Slipp	$\sigma_{h,1\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{2,5\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{10\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{20\%}$ [N/mm ²]
R60-1	129,38	0,59	3,22	3,00	3,83	4,33
R60-2	143,06	0,24	3,33	3,20	4,01	4,35
R60-3	129,91	0,46	3,34	2,89	3,97	4,37
R60-4	143,44	0,39	2,93	2,73	3,64	4,38
Average	136,45	0,42	3,20	2,96	3,86	4,36
mean_ln	4,91		1,16	1,08	1,35	1,47
mean	136,28		3,20	2,95	3,86	4,36
s_y			0,06	0,07	0,04	0,00
s_y >< 0,05			0,06	0,07	0,05	0,05
k_s			2,71	2,71	2,71	2,71
5 %			2,72	2,46	3,37	3,81
k_p,ekv				0,92	1,21	1,36

Tabell 8: Data - R60

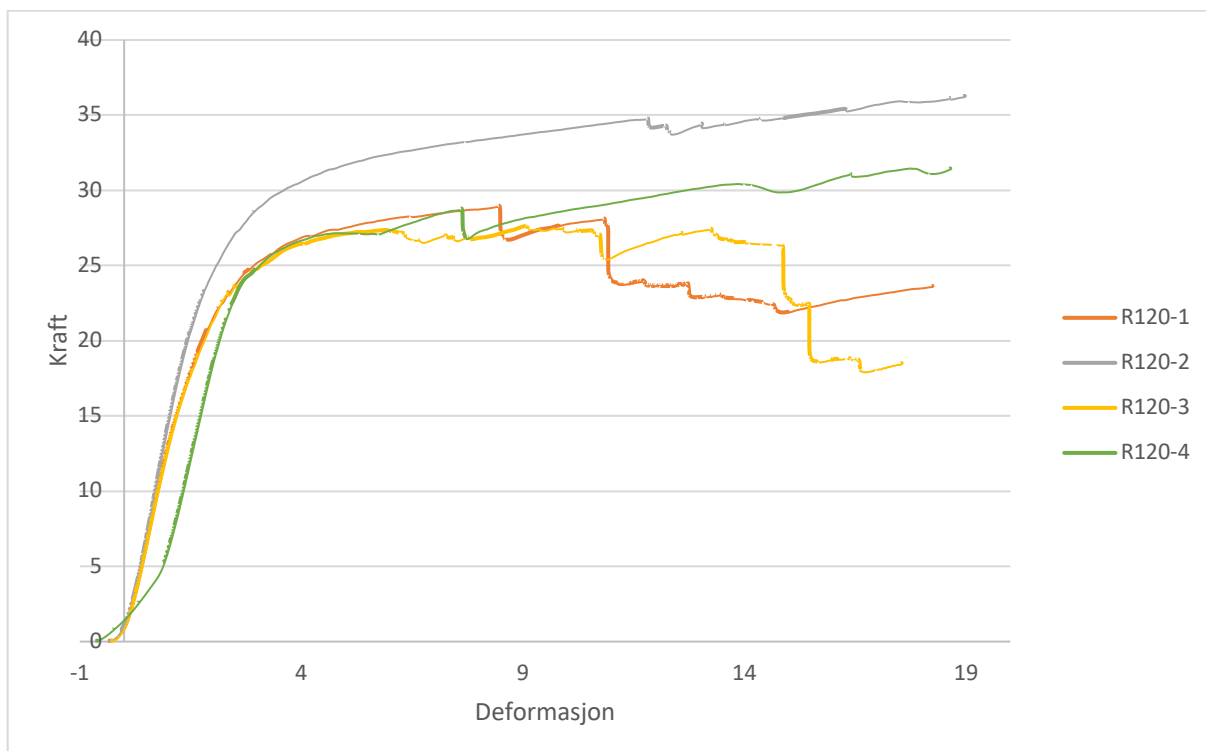


Figur 18: Kraft-/deformasjonskurve for R90

Alle prøvene er i lineær-elastisk område de første ≈ 2 mm av deformasjonen, og når flytegrense ved ≈ 25 kN. Her er det større spredning på resultatene enn tidligere. Bruddmekanismene som oppstår er også her at cellestrukturen blir revet fra hverandre, men det dannes også brudd på tvers av radialretningen til fibrene. Dette er også en konsekvens av strekkspenningene som oppstår på grunn av at materialet buler ut. Bruddet spredte seg i samme retningen som lasten.

R90	$E_{c,90}$ [N/mm ²]	Slipp	$\sigma_{h,1\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{2,5\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{10\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{20\%}$ [N/mm ²]
R90-1	134,21	0,37	3,04	2,82	3,40	3,76
R90-2	160,58	0,26	2,78	2,71	3,34	3,38
R90-3	158,39	0,35	3,29	3,13	3,64	3,97
R90-4	159,26	0,27	3,18	3,03	3,55	3,38
R90-5	172,80	0,25	3,57	3,34	4,04	4,66
Average	157,05	0,30	3,17	3,00	3,59	3,83
mean_In	5,05		1,15	1,10	1,28	1,34
mean	156,52		3,16	3,00	3,58	3,80
s_y			0,09	0,08	0,08	0,13
s_y >> 0,05			0,09	0,08	0,08	0,13
k_s			2,46	2,46	2,46	2,46
5 %			2,52	2,44	2,98	2,74
k_p,ekv				0,95	1,13	1,20

Tabell 9: Data - R90

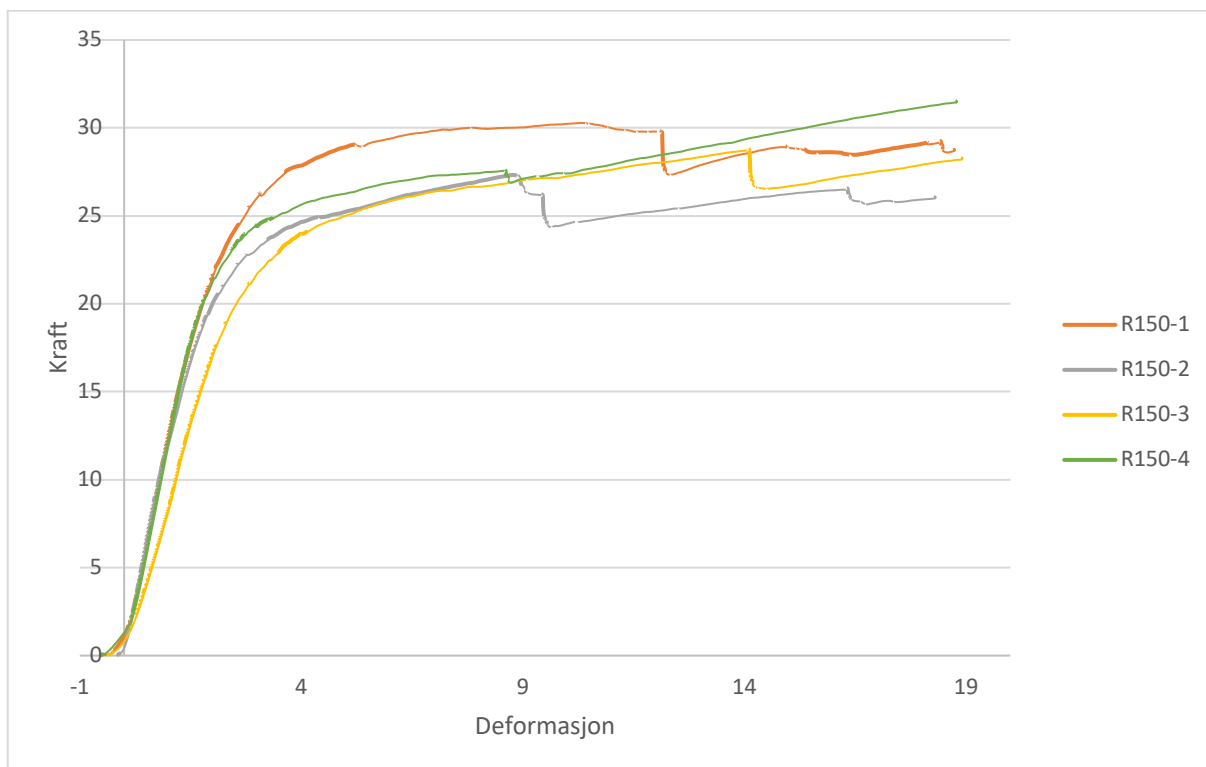


Figur 19: Kraft-/deformasjonskurve for R120

Alle prøvene er i lineær-elastisk område de første $\approx 2,5$ mm av deformasjonen, og når flytegrense ved ≈ 25 kN. Bruddmekanismer som ved R90 oppstår. Kapasitetsfallet som oppstår i R120-1 og R120-3 er et resultat av at en stor del av materialet ble revet av prøvestykket, som igjen ga et mindre tverrsnittsareal til å bære lasten.

R120	$E_{c,90}$ [N/mm ²]	Slipp	$\sigma_{h,1\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{2,5\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{10\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{20\%}$ [N/mm ²]
R120-1	199,24	0,35	3,18	3,15	2,96	
R120-2	219,95	0,31	3,66	3,60	4,27	
R120-3	197,33	0,29	3,12	3,09	3,33	
R120-4	116,86	0,63	3,40	3,11	3,71	
Average	183,35	0,39	3,34	3,24	3,57	
mean_ln	5,18		1,20	1,17	1,26	
mean	178,30		3,33	3,23	3,54	
s_y			0,07	0,07	0,16	
s_y >> 0,05			0,07	0,07	0,16	
k_s			2,71	2,71	2,71	
5 %			2,74	2,66	2,32	
k_p,ekv				0,97	1,06	

Tabell 10: Data - R120



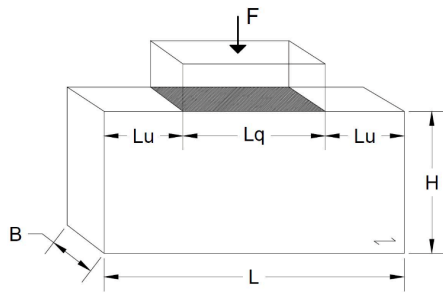
Figur 20: Kraft-/deformasjonskurve for R150

Alle prøvene er i lineær-elastisk område de første $\approx 2,5$ mm av deformasjonen, og når flytegrense ved ≈ 25 kN. Bruddmekanismer som ved R90 oppstår.

R150	$E_{c,90}$ [N/mm ²]	Slipp	$\sigma_{h,1\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{2,5\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{10\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{20\%}$ [N/mm ²]
R150-1	237,14	0,53	3,44	3,46	3,61	
R150-2	239,66	0,14	2,97	3,04	3,28	
R150-3	161,25	0,37	3,05	2,94	3,34	
R150-4	227,73	0,51	3,15	3,17	3,73	
Average	216,44	0,39	3,16	3,15	3,49	
mean_{ln}	5,36		1,15	1,15	1,25	
mean	213,73		3,15	3,15	3,49	
s_y			0,06	0,07	0,06	
s_y >< 0,05			0,06	0,07	0,06	
k_s			2,71	2,71	2,71	
5 %			2,65	2,61	2,95	
k_{p,ekv}				1,00	1,11	

Tabell 11: Data - R150

4.2.2 Ikke-uniformt belastede prøvestykker

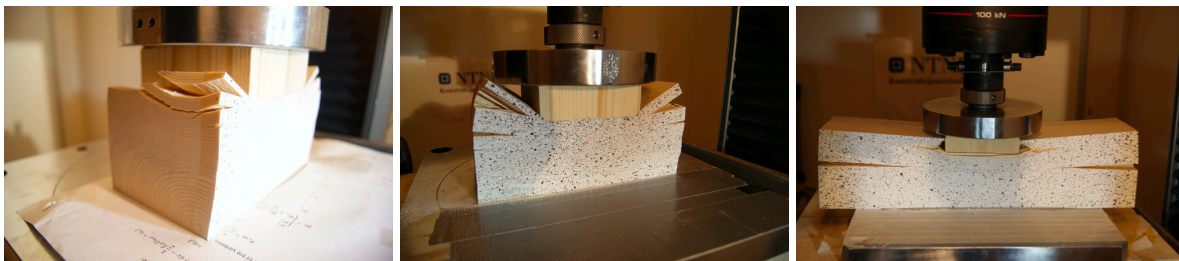


Specimen	H	L_q	L_u	L	B	Amount
Lu30-i	90	90	30	150	89	3
Lu50-i	90	90	50	190	89	5
Lu70-i	90	90	70	230	89	3
Lu100-i	90	90	100	290	89	3
Lu150-i	90	90	150	390	89	3
Lu200-i	90	90	200	490	89	3

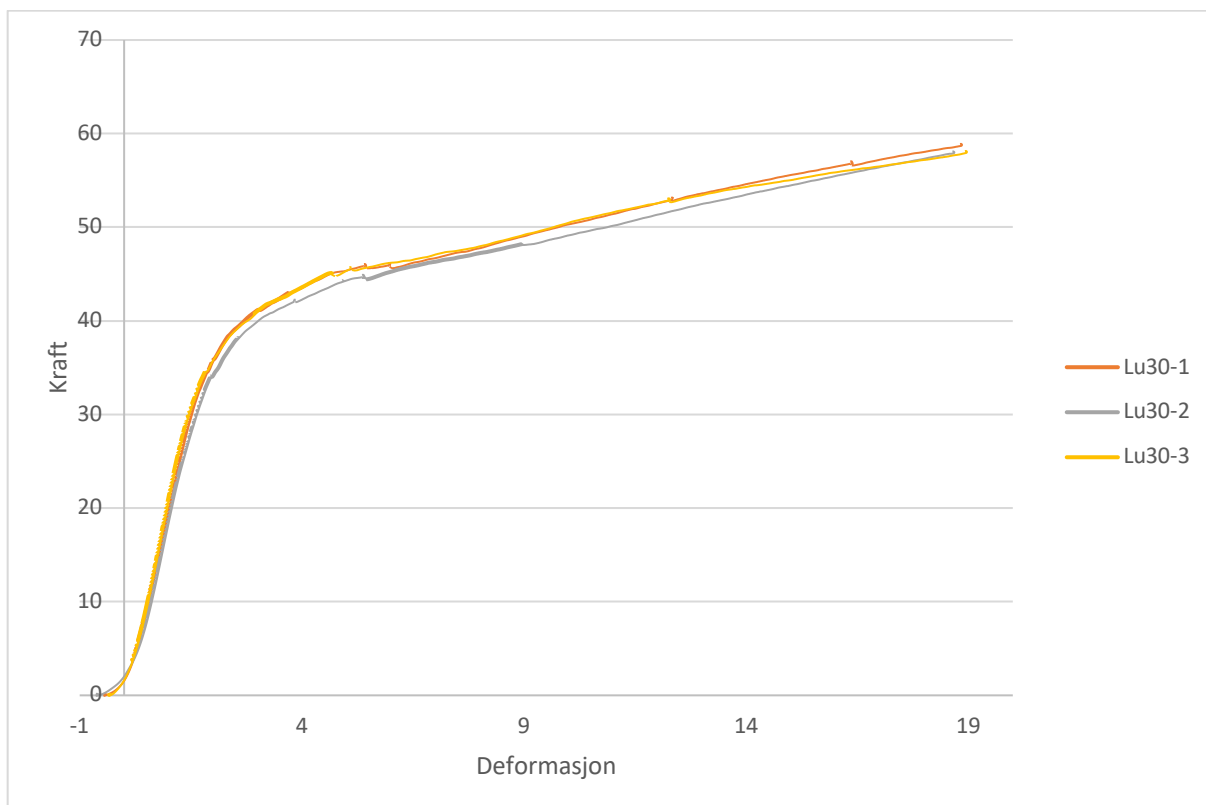
Total amount of tests: 20

Figur 21: Dimensjoner på ikke-uniformt belastede prøvestykker [mm]. Kilde: Troller (11)

I dette testoppsettet hadde alle prøvestykkene en konstant høyde lik 90 mm. Lastarealet er 90x89 (lxb). Prøvestykkene har ulik mengde ubelastet materiale, benevnt Lu, varierende fra 30-200 mm. For hvert prøvestykke ble det utført 3-5 tester.



Figur 22: Typiske bruddmekanismer. Kilde: Troller (11)

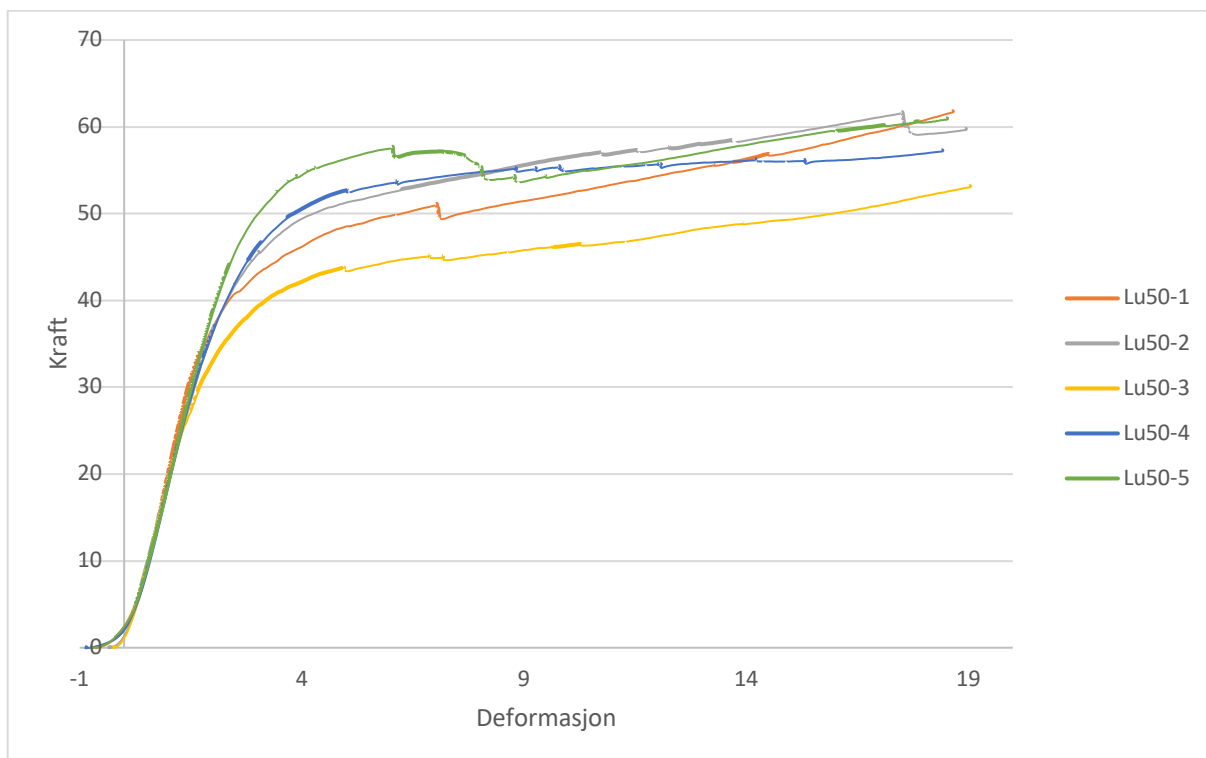


Figur 23: Kraft-/deformasjonskurve for Lu30

Alle prøvene er i lineær-elastisk område de første $\approx 2,7$ mm av deformasjonen, og når flytegrense ved ≈ 40 kN. Sammenlignet med R30 er disse prøvestykkene både stivere og har høyere trykkapasitet. Når deformasjonen er ≈ 7 mm, opplever alle prøvene en bruddmekanisme hvor ubelastet tremateriale på høyde med lastapplikatoren bøyes oppover og splittes langs fiberretningen. Dette resulterer i et lite kapasitetstap. Forskjellen på denne bruddmekanismen og den i R30 er bruddretningen, hvor retningen er på tvers av lastretningen for Lu30.

Lu30	$E_{c,90}$ [N/mm ²]	Slipp	$\sigma_{h,1\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{2,5\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{10\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{20\%}$ [N/mm ²]
Lu30-1	220,08	0,45	5,14	4,71	6,14	7,26
Lu30-2	206,77	0,62	5,05	4,51	6,02	7,17
Lu30-3	231,03	0,34	5,06	4,71	6,16	7,15
Average	219,29	0,47	5,08	4,64	6,10	7,19
mean_ln	5,39		1,63	1,54	1,81	1,97
mean	219,07		5,08	4,64	6,10	7,19
s_y			0,01	0,02	0,01	0,01
s_y >> 0,05			0,05	0,05	0,05	0,05
k_s			3,15	3,15	3,15	3,15
5 %			4,34	3,97	5,21	6,15
k_p,ekv				0,91	1,20	1,42

Tabell 12: Data - Lu30

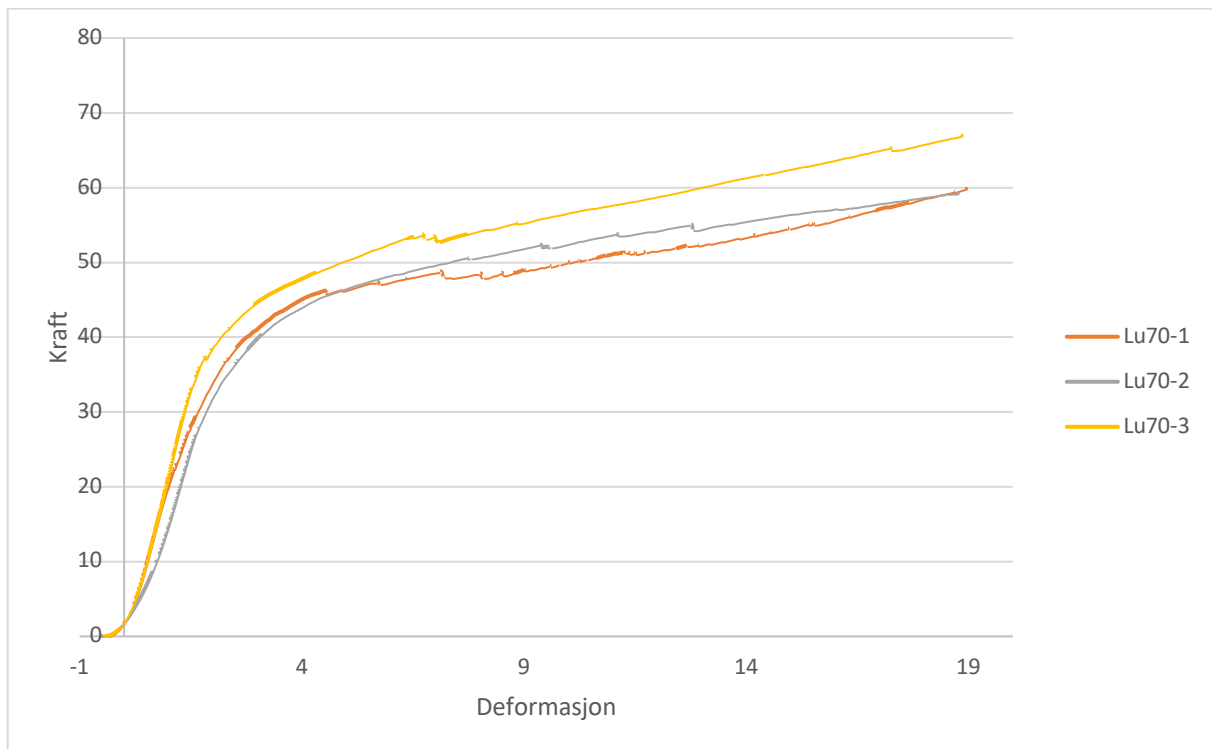


Figur 24: Kraft-/deformasjonskurve for Lu50

Alle prøvene er i lineær-elastisk område de første $\approx 2,5$ mm av deformasjonen, men det er større forskjeller på flytegrensen i testene. Prøve Lu50-3 har en flytegrense på 39 kN og Lu50-5 har en flytegrense på 54 kN. I tillegg til bruddmekanismen beskrevet for Lu30 dannes det også bruddlinjer i midten av materialet, på tvers av lastretningen. Tidspunktet disse bruddlinje inntraff varierer i testene. Ettersom lasten økte, jo mer markante ble bruddlinjene. Fallet i lastkapasiteten for Lu50-5 skyldes et brudd i lastretningen, tilsvarende som for de uniformt-belastede prøvestykkene.

Lu50	$E_{c,90}$ [N/mm ²]	Slipp	$\sigma_{h,1\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{2,5\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{10\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{20\%}$ [N/mm ²]
Lu50-1	223,97	0,63	5,43	4,92	6,44	7,60
Lu50-2	218,06	0,34	5,86	4,94	6,94	7,40
Lu50-3	213,35	0,25	4,88	4,38	5,73	6,51
Lu50-4	215,47	0,87	6,06	4,95	6,87	7,12
Lu50-5	218,13	0,75	6,70	5,33	6,72	7,57
Average	217,80	0,57	5,79	4,90	6,54	7,24
mean _{ln}	5,38		1,75	1,59	1,88	1,98
mean	217,77		5,75	4,89	6,52	7,23
s _y			0,12	0,07	0,08	0,06
s _y > 0,05			0,12	0,07	0,08	0,06
k _s			2,46	2,46	2,46	2,46
5 %			4,29	4,12	5,39	6,18
k _{p,ekv}				0,85	1,13	1,26

Tabell 13: Data - Lu50

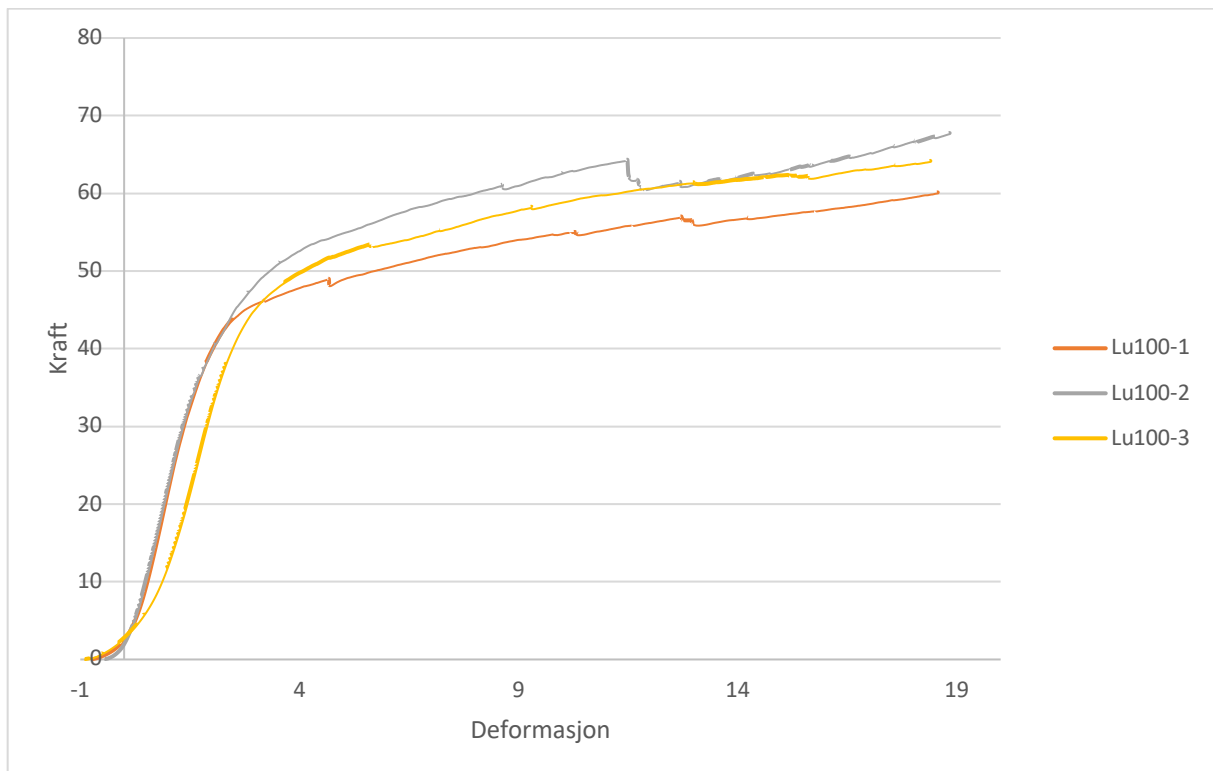


Figur 25: Kraft-/deformasjonskurve for Lu70

Alle prøvene er i lineær-elastisk område de første $\approx 2,7$ mm av deformasjonen, og når flytegrense ved ≈ 42 kN. I disse testene er det bruddmekanismen som gir sprekker i midten av materialet, på tvers av lastretningen, som er mest fremtredende.

Lu70	$E_{c,90}$ [N/mm ²]	Slipp	$\sigma_{h,1\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{2,5\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{10\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{20\%}$ [N/mm ²]
Lu70-1	229,47	0,33	5,07	4,57	6,12	7,31
Lu70-2	172,46	0,52	5,38	4,32	6,48	7,33
Lu70-3	235,94	0,43	5,60	5,07	6,91	8,22
Average	212,62	0,43	5,35	4,65	6,50	7,62
mean_ln	5,35		1,68	1,54	1,87	2,03
mean	210,58		5,34	4,64	6,49	7,61
s_y			0,05	0,08	0,06	0,07
s_y >< 0,05			0,05	0,08	0,06	0,07
k_s			3,15	3,15	3,15	3,15
5 %			4,56	3,59	5,36	6,17
k_p,ekv				0,87	1,21	1,42

Tabell 14: Data - Lu70

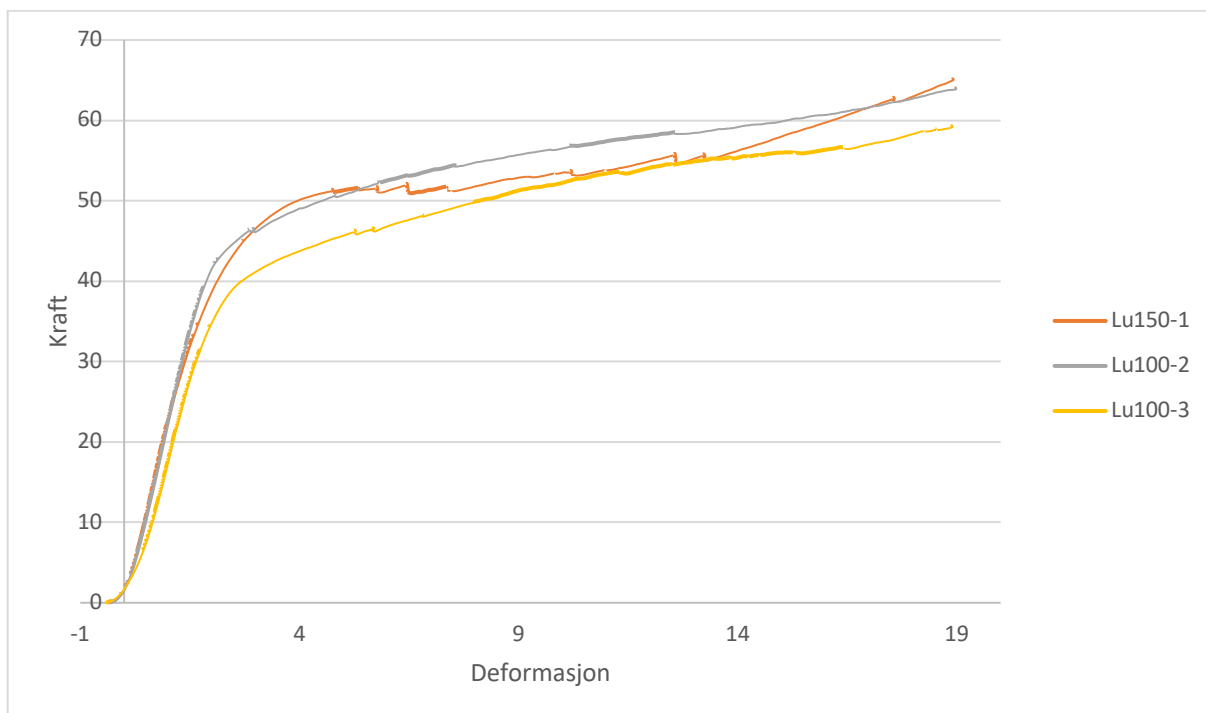


Figur 26: Kraft-/deformasjonskurve for Lu100

Alle prøvene er i lineær-elastisk område de første ≈ 3 mm av deformasjonen, og når flytegrense ved ≈ 45 kN. Bruddmekanismen som gir sprekker i midten av materialet, på tvers av lastretningen, er her i enda større grad dominerende.

Lu100	$E_{c,90}$ [N/mm ²]	Slipp	$\sigma_{h,1\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{2,5\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{10\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{20\%}$ [N/mm ²]
Lu100-1	235,94	0,71	5,76	5,28	6,76	7,44
Lu100-2	249,84	0,43	6,13	5,28	7,63	8,34
Lu100-3	159,06	0,89	6,41	4,63	7,23	7,98
Average	214,95	0,68	6,10	5,06	7,21	7,92
mean_{ln}	5,35		1,81	1,62	1,97	2,07
mean	210,87		6,09	5,05	7,20	7,91
s_y			0,05	0,08	0,06	0,06
s_y >< 0,05			0,05	0,08	0,06	0,06
k_s			3,15	3,15	3,15	3,15
5 %			5,14	3,98	5,95	6,60
k_{p,ekv}				0,83	1,18	1,30

Tabell 15: Data - Lu100



Figur 27: Kraft-/deformasjonskurve for Lu150

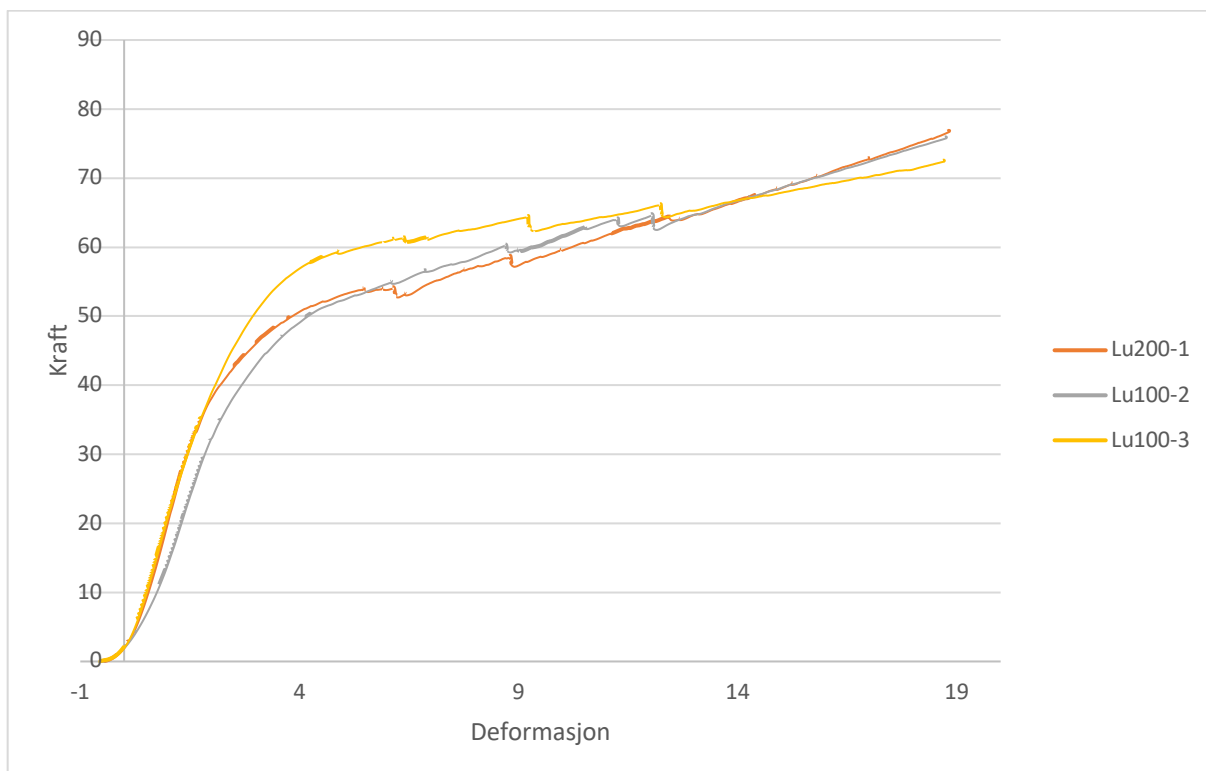
Alle prøvene er i lineær-elastisk område de første ≈ 3 mm av deformasjonen, og når flytegrense ved ≈ 46 kN. Bruddmekanismene er tilsvarende som for kortere prøvestykker, men inntreffer senere i deformasjonsprosessen.

I noen av prøvestykkene med lengde over 300 mm oppsto det ikke bruddmekanismer nevnt tidligere. Derimot oppsto det lokale brudd under lastapplikatoren. Lastapplikatoren «skjærer» seg nedover i prøvestykket og kutter over fibre.

Merk at for prøvestykker lengre enn 300 mm var ikke testoppsettet langt nok til å gi kontinuerlig opplagring over hele prøvestykket. Dette skal ikke ha påvirket resultatene nevneverdig.

Lu150	$E_{c,90}$ [N/mm ²]	Slipp	$\sigma_{h,1\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{2,5\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{10\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{20\%}$ [N/mm ²]
Lu150-1	258,55	0,37	5,76	5,18	6,62	7,88
Lu150-2	249,14	0,32	5,77	5,44	6,97	7,85
Lu150-3	197,92	0,40	5,27	4,68	6,40	7,30
Average	235,20	0,36	5,60	5,10	6,66	7,67
mean_ln	5,45		1,72	1,63	1,90	2,04
mean	233,61		5,59	5,09	6,66	7,67
s_y			0,05	0,08	0,04	0,04
s_y >< 0,05			0,05	0,08	0,05	0,05
k_s			3,15	3,15	3,15	3,15
5 %			4,75	4,00	5,69	6,55
k_p,ekv				0,91	1,19	1,37

Tabell 16: Data - Lu150



Figur 28: Kraft-/deformasjonskurve for Lu200

Alle prøvene er i lineær-elastisk område de første $\approx 3,5$ mm av deformasjonen, og når flytegrense ved ≈ 50 kN. Bruddmekanismene er tilsvarende som for kortere prøvestykker, men inntreffer senere i deformasjonsprosessen.

Lu200	$E_{c,90}$ [N/mm ²]	Slipp	$\sigma_{h,1\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{2,5\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{10\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{20\%}$ [N/mm ²]
Lu200-1	228,37	0,45	5,92	5,08	7,18	9,36
Lu200-2	174,76	0,52	6,21	4,48	7,43	9,30
Lu200-3	240,50	0,56	6,75	5,33	8,02	8,91
Average	214,54	0,51	6,29	4,96	7,54	9,19
mean_{ln}	5,36		1,84	1,60	2,02	2,22
mean	212,52		6,28	4,95	7,54	9,19
s_y			0,07	0,09	0,06	0,03
s_y >< 0,05			0,07	0,09	0,06	0,05
k_s			3,15	3,15	3,15	3,15
5 %			5,10	3,72	6,30	7,85
k_{p,ekv}				0,79	1,20	1,46

Tabell 17: Data - Lu200

4.2.3 Samling av data fra Troller sine forsøk

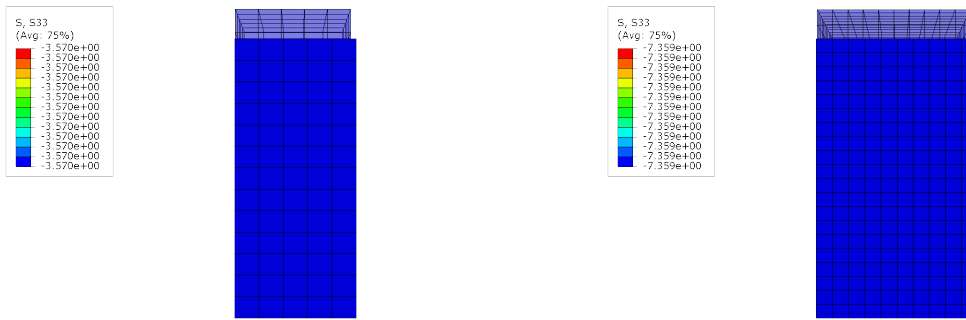
	$E_{c,90}$ [N/mm ²]	$\sigma_{h,1\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{2,5\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{10\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{20\%}$ [N/mm ²]
Lu30	219,07	5,08	4,64	6,10	7,19
Lu50	217,77	5,75	4,89	6,52	7,23
Lu70	210,58	5,34	4,64	6,49	7,61
Lu100	210,87	6,09	5,05	7,20	7,91
Lu150	233,61	5,59	5,09	6,66	7,67
Lu200	212,52	6,28	4,95	7,54	9,19
R30	93,74	4,27	2,48	4,63	5,48
R60	136,28	3,20	2,95	3,86	4,36
R90	156,52	3,16	3,00	3,58	3,80
R120	178,30	3,33	3,23	3,54	
R150	213,73	3,15	3,15	3,49	
mean	189,36	4,66	4,01	5,42	6,71

Tabell 18: Samling av data fra Troller sine forsøk

	$k_{p,ekv,2,5\%}$	$k_{p,ekv,10\%}$	$k_{p,ekv,20\%}$
R30	0,58	1,08	1,28
R60	0,92	1,21	1,36
R90	0,95	1,13	1,20
R120	0,97	1,06	
R150	1,00	1,11	
Lu30	0,91	1,20	1,42
Lu50	0,85	1,13	1,26
Lu70	0,87	1,21	1,42
Lu100	0,83	1,18	1,30
Lu150	0,91	1,19	1,37
Lu200	0,79	1,20	1,46
mean inkludert R30	0,87	1,16	1,34
mean ekskludert R30	0,90	1,16	1,35

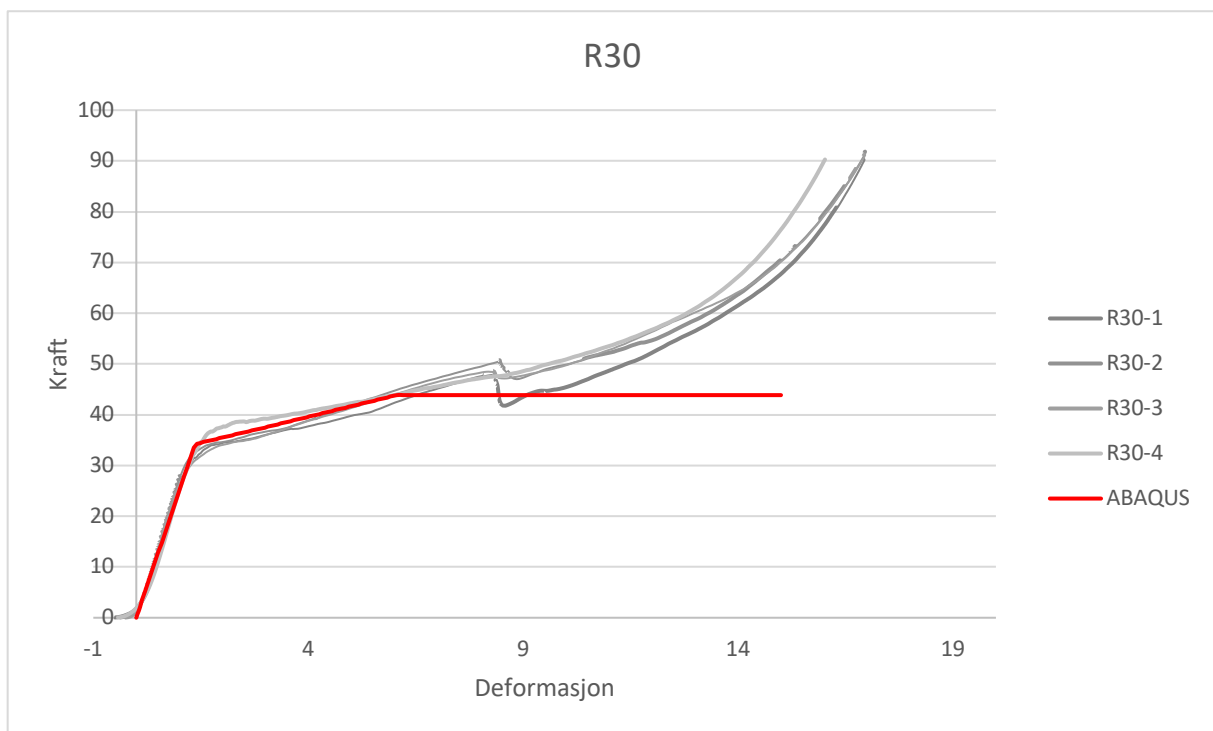
Tabell 19: Beregnet $k_{p,ekv}$ fra Troller sine forsøk

4.3 FEM-modellering basert på Troller

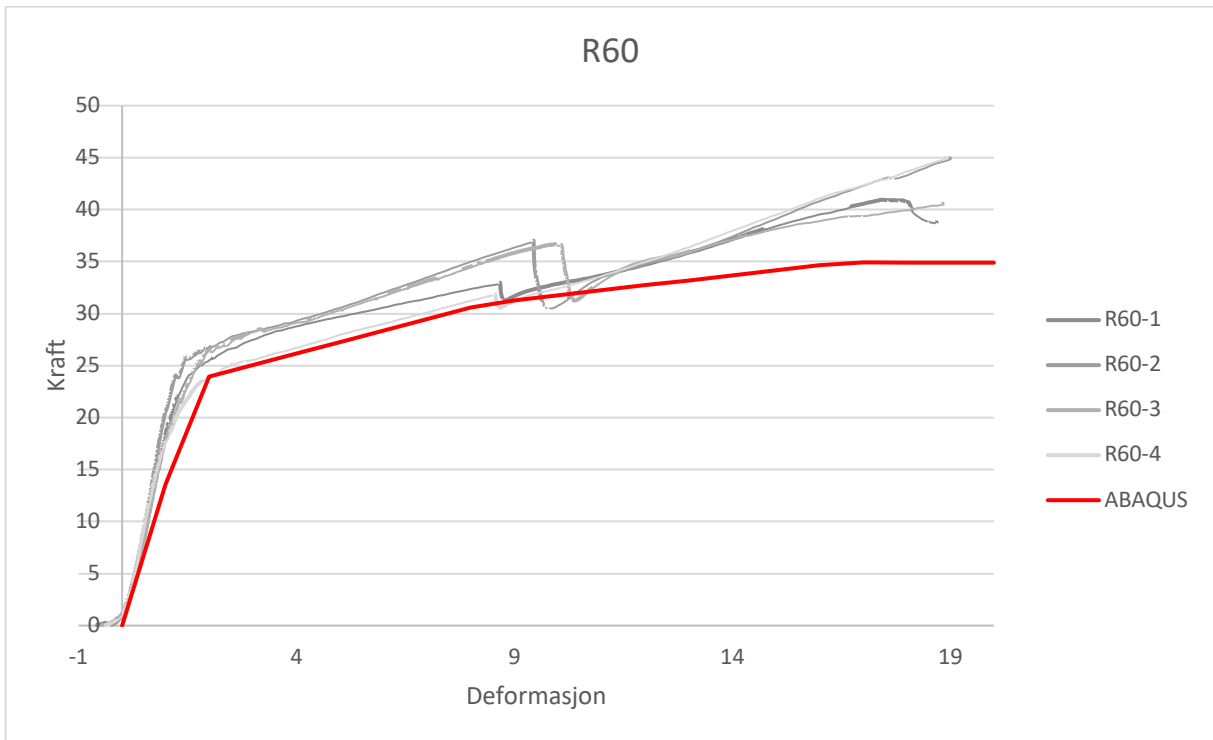


Figur 29: R120 (t.v.) og Lu150 (t.h)

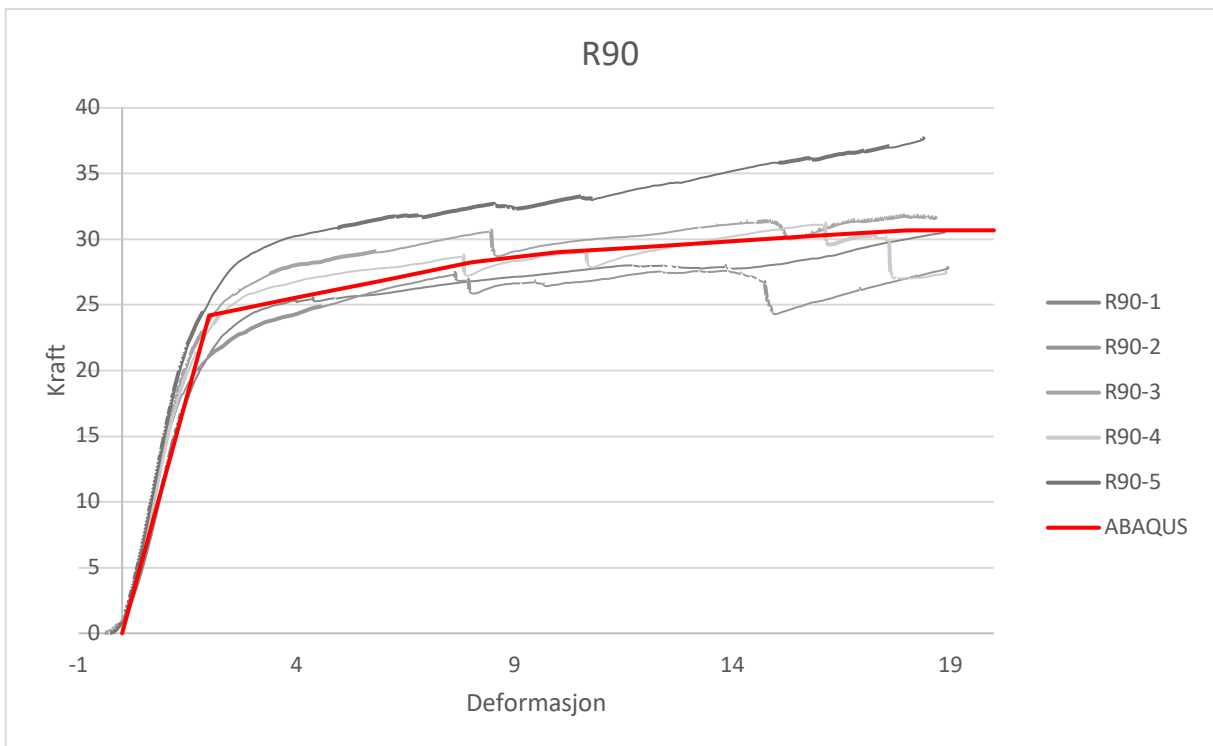
4.3.1 Uniformt belastede prøvestykker



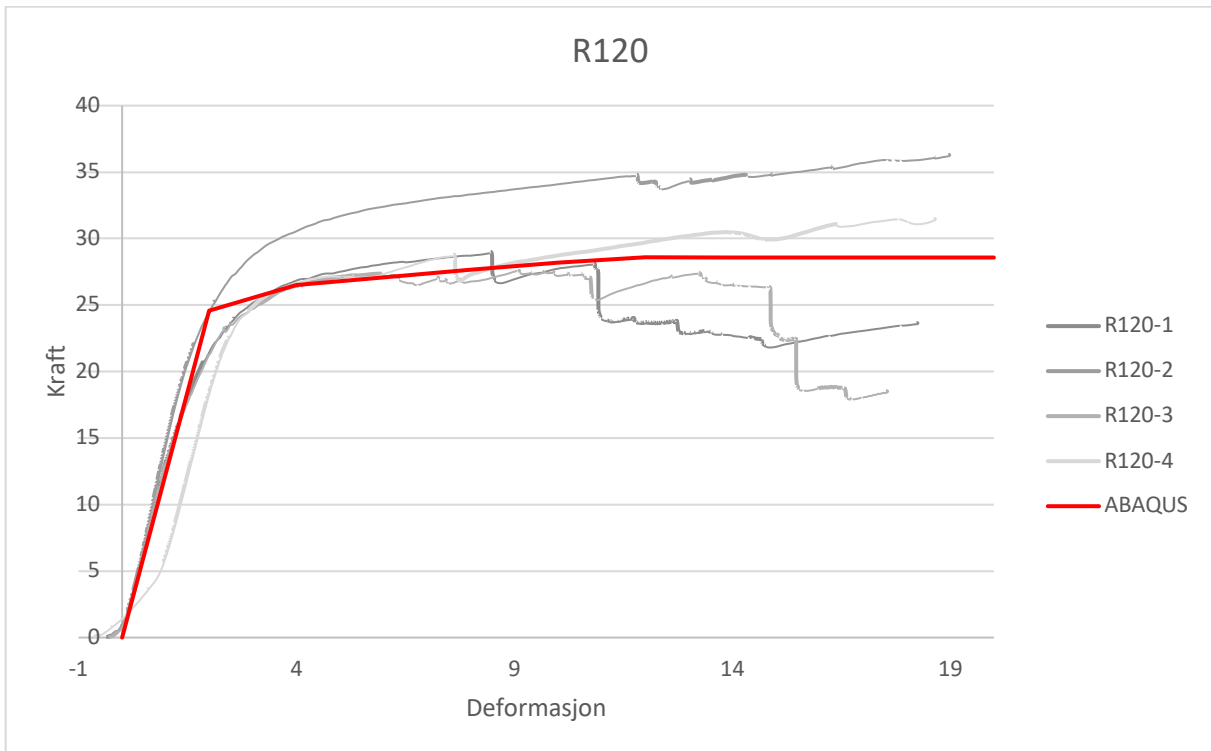
Figur 30: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for R30



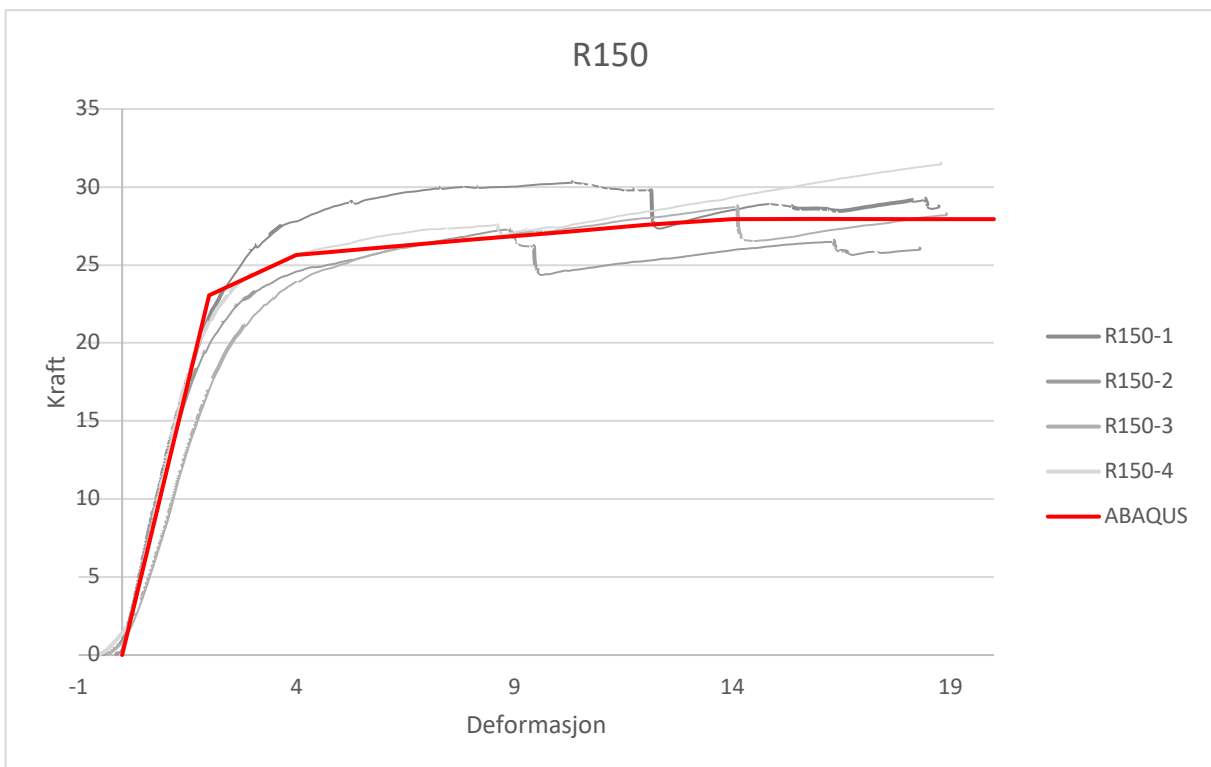
Figur 31: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for R60



Figur 32: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for R90

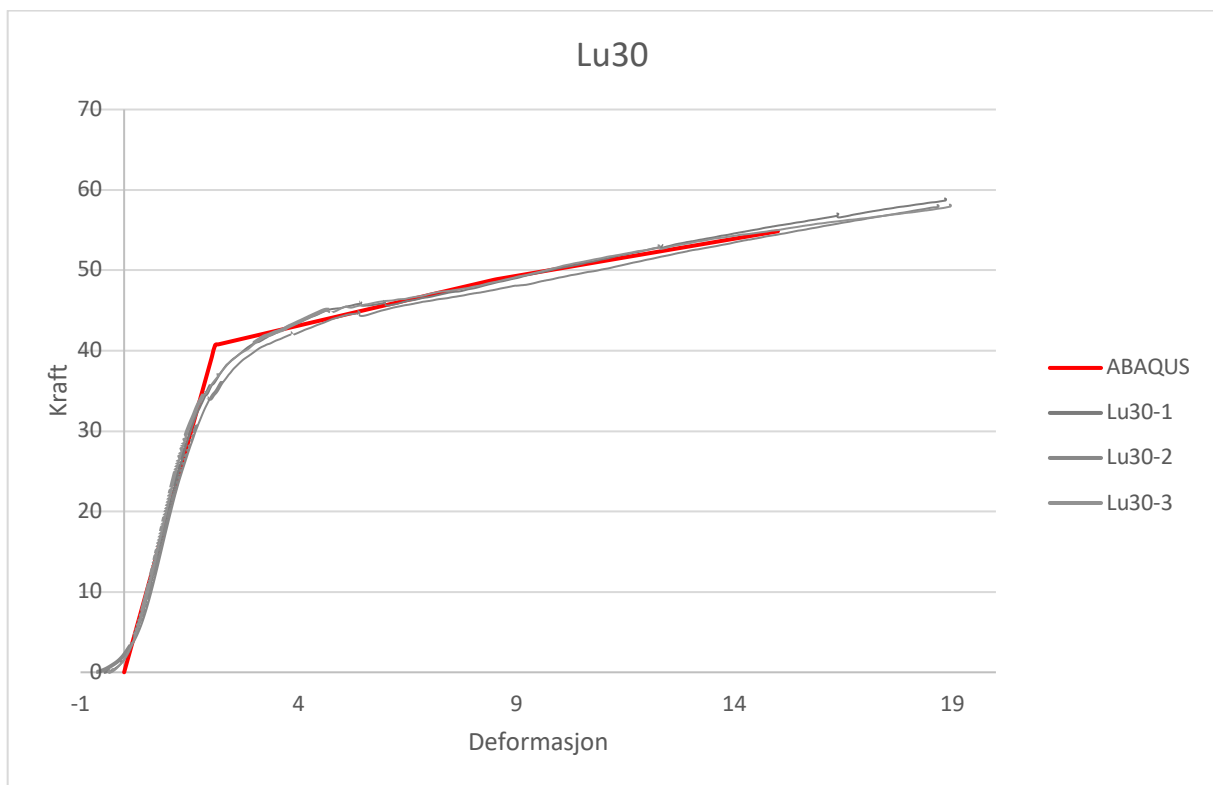


Figur 33: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for R120

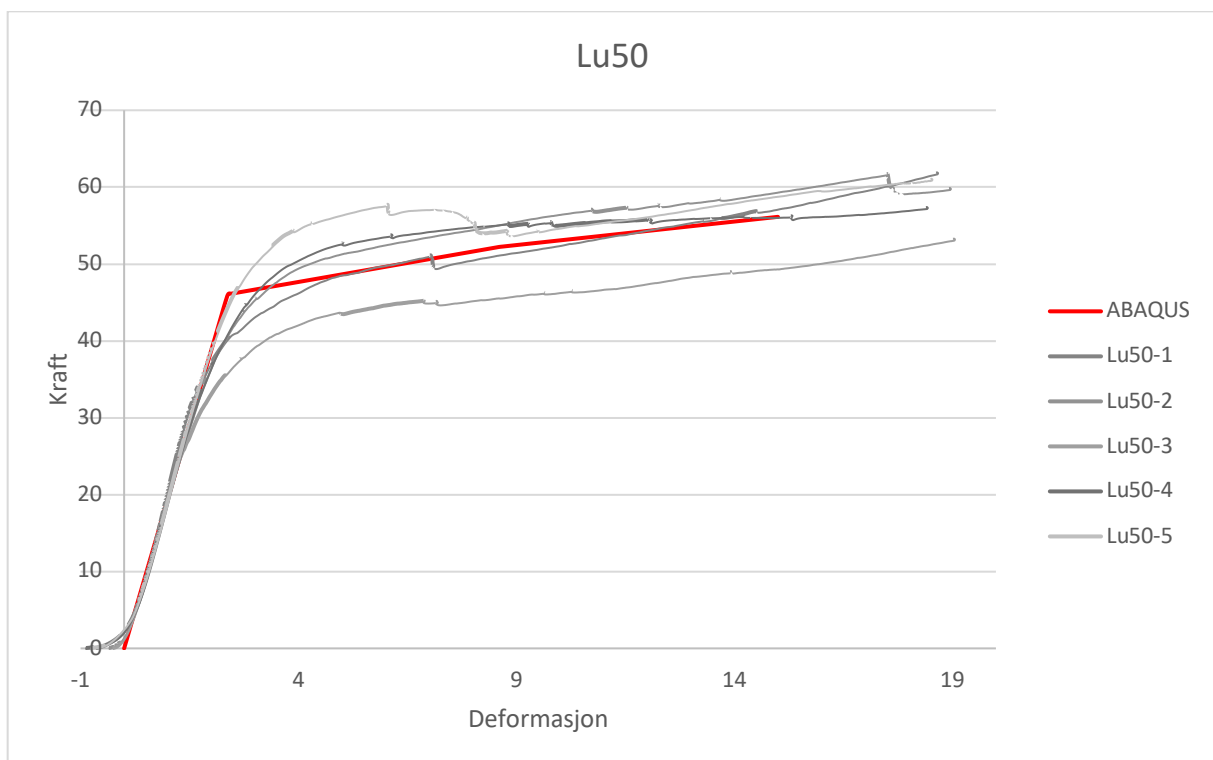


Figur 34: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for R150

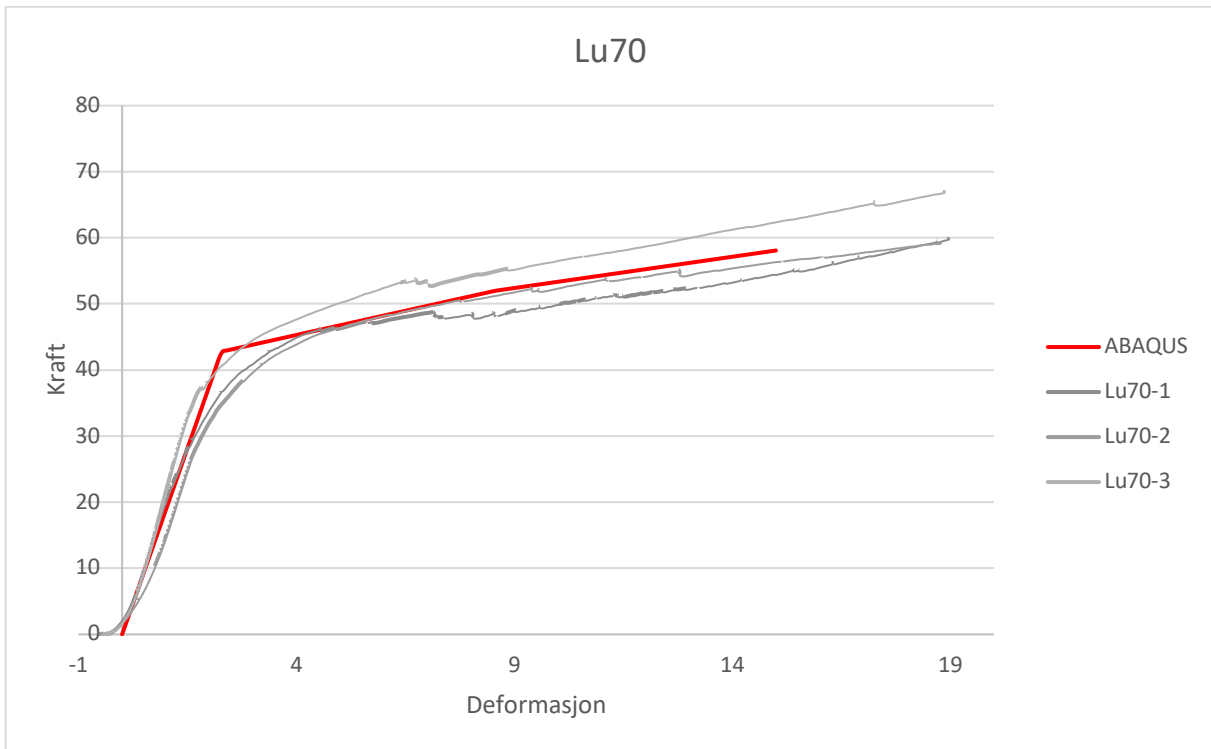
4.3.2 Ikke-uniformt belastede prøvestykker



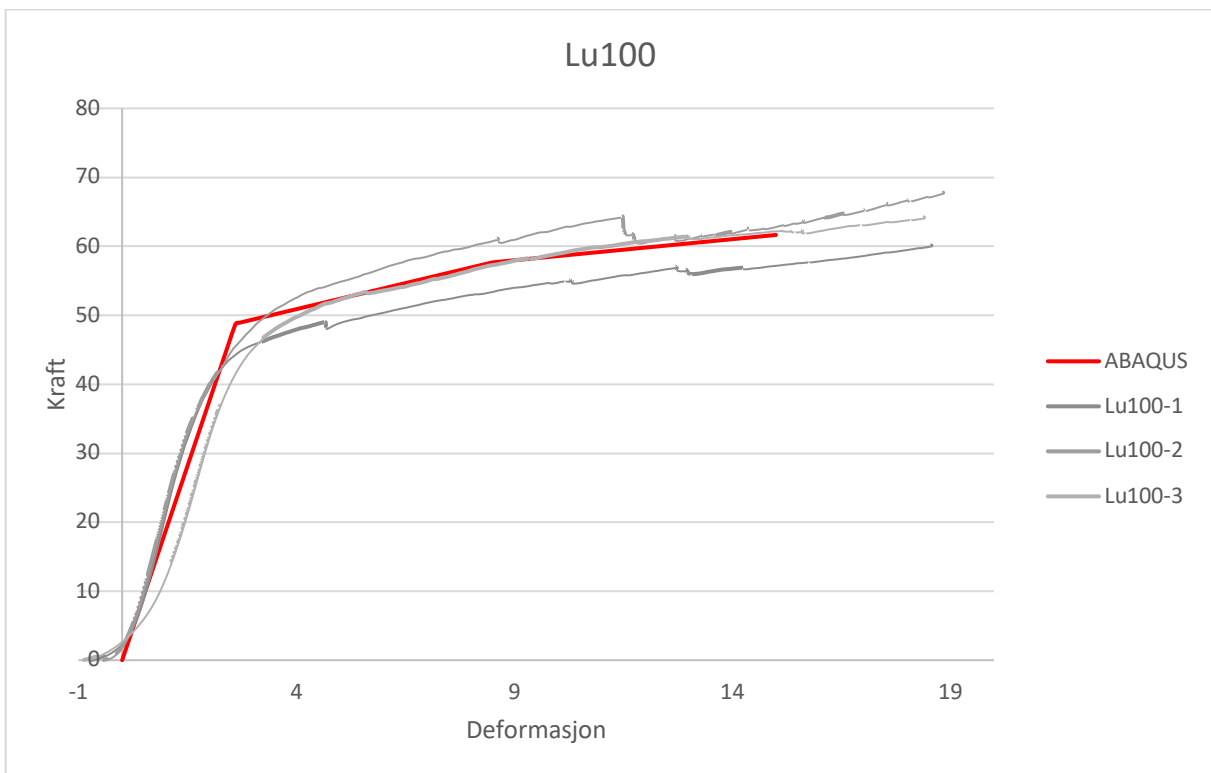
Figur 35: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for Lu30



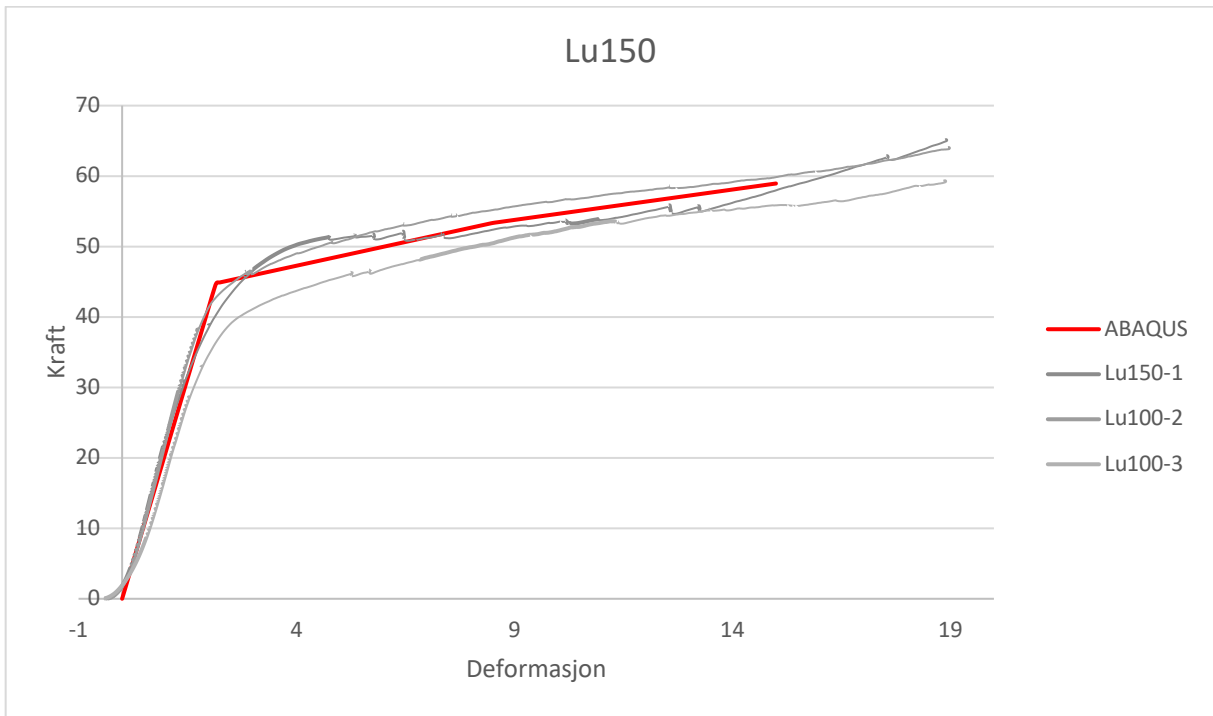
Figur 36: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for Lu50



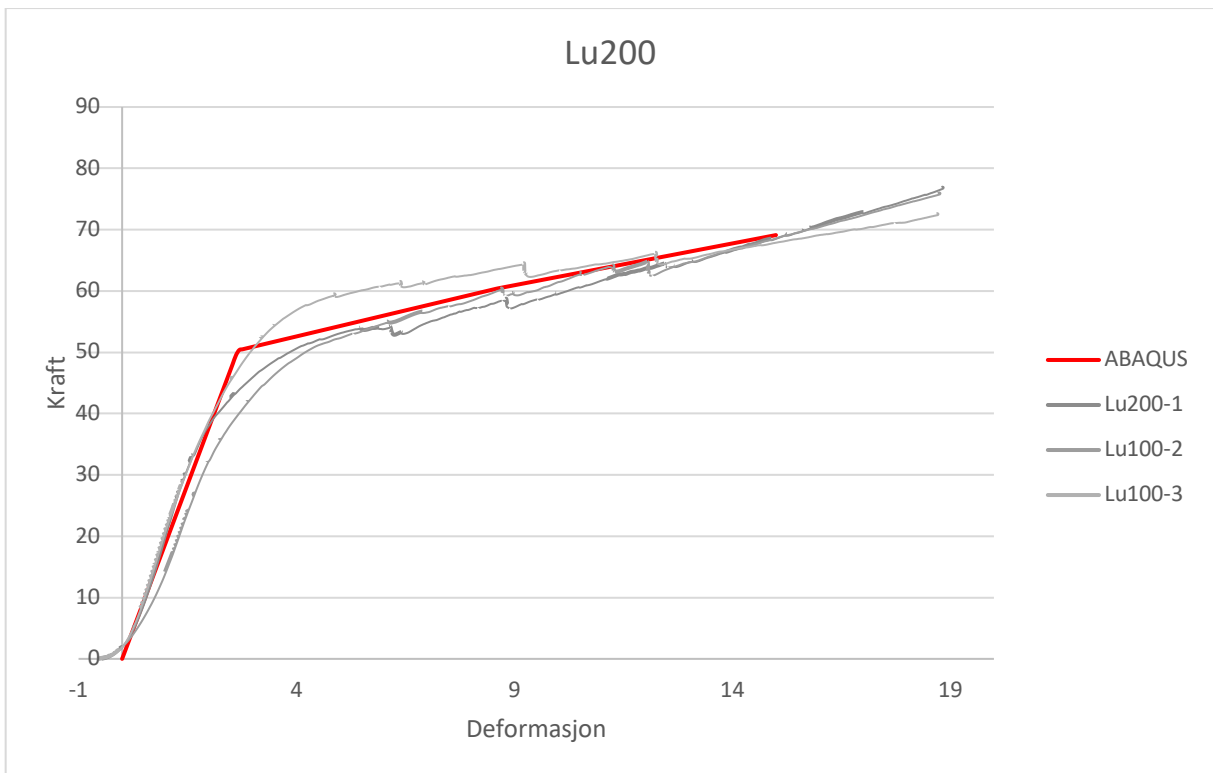
Figur 37: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for Lu70



Figur 38: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for Lu100



Figur 39: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for Lu150



Figur 40: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for Lu200

4.4 Resultater fra Dalheim og Bjerkeng sine eksperimentelle forsøk

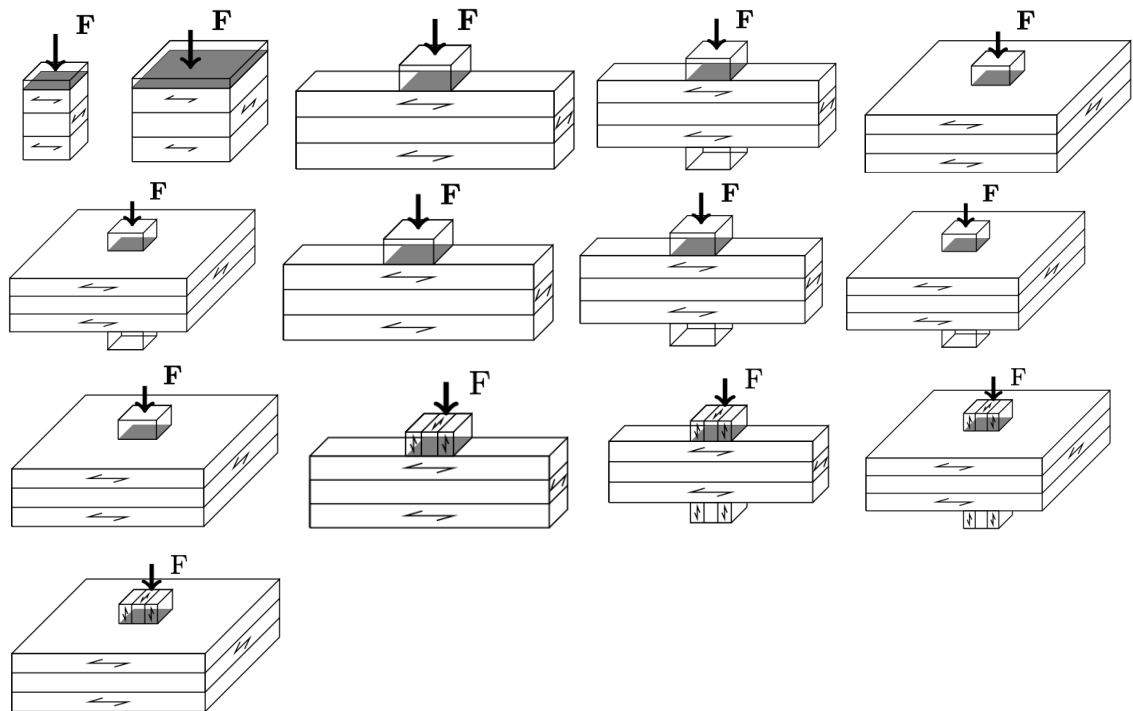
4.4.1 Uniformt belastede prøvestykker

Dimensjoner på prøvestykket			
Testserie	b [mm]	l [mm]	h [mm]
U50	50	50	100
U100	100	100	100
IKS-50	50	400	100
IPS-50	50	400	100
IKP-50	300	300	100
IPP-50	300	300	100
IKS-100	100	400	100
IPS-100	100	400	100
IPP-100	300	300	100
IKP-100	300	300	100
C-IKS-100	100	400	100
C-IPS-100	100	400	100
C-IPP-100	300	300	100
C-IKP-100	300	300	100

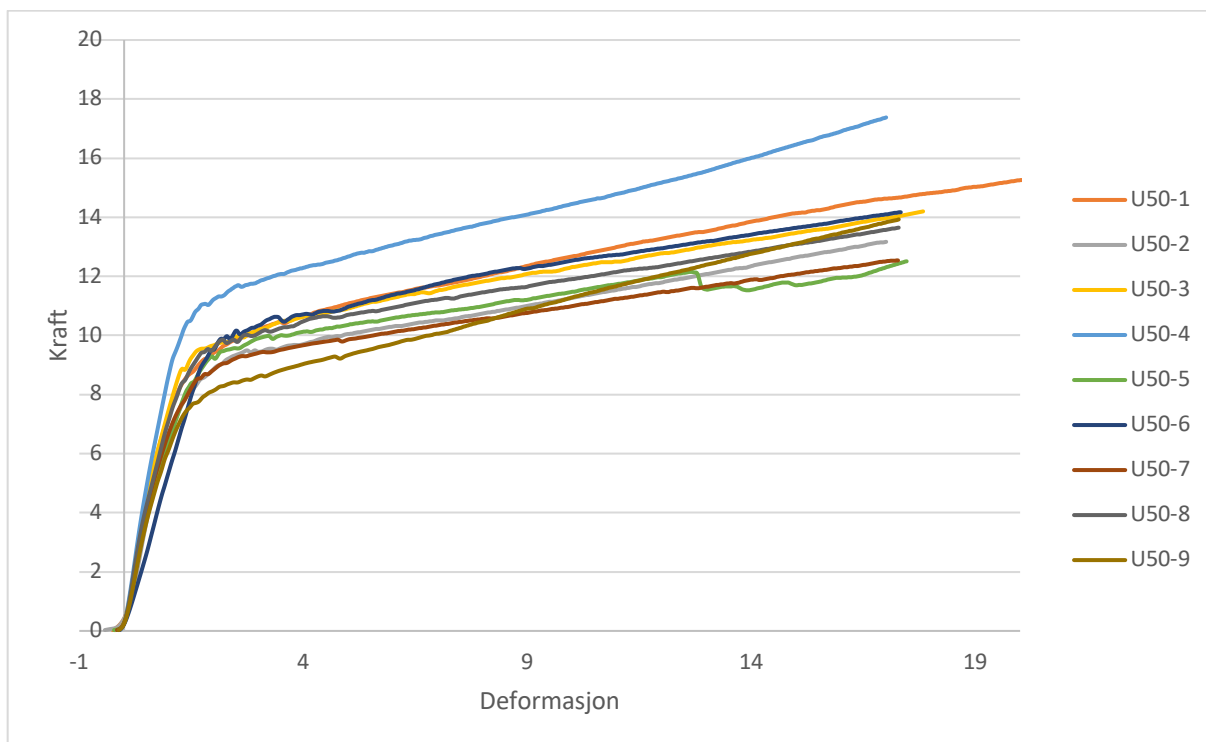
Tabell 20: Dimensjoner på prøvestykkene testet av Dalheim og Bjerkeng

Dalheim og Bjerkeng oppgir for uniformt belastede prøvestykker ikke annet enn at fall i lastkapasiteten skyldes lokale brudd. Antar at dette er brudd av samme type og form som beskrevet i resultatene for Troller sine forsøk.

I alle påfølgende grafer er kraft oppgitt i kN og deformasjon oppgitt i mm.



Figur 41: Fra øverst til venstre til neders til høyre; Testoppsett for U50, U100, IKS-50, IPS-50, IKP-50, IPP-50, IKS-100, IPS-100, IPP-100, IKP-100, C-IKS-100, C-IPS-100, C-IPP-100 og C-IKP-100. Kilde: Dalheim og Bjerkeng (7)

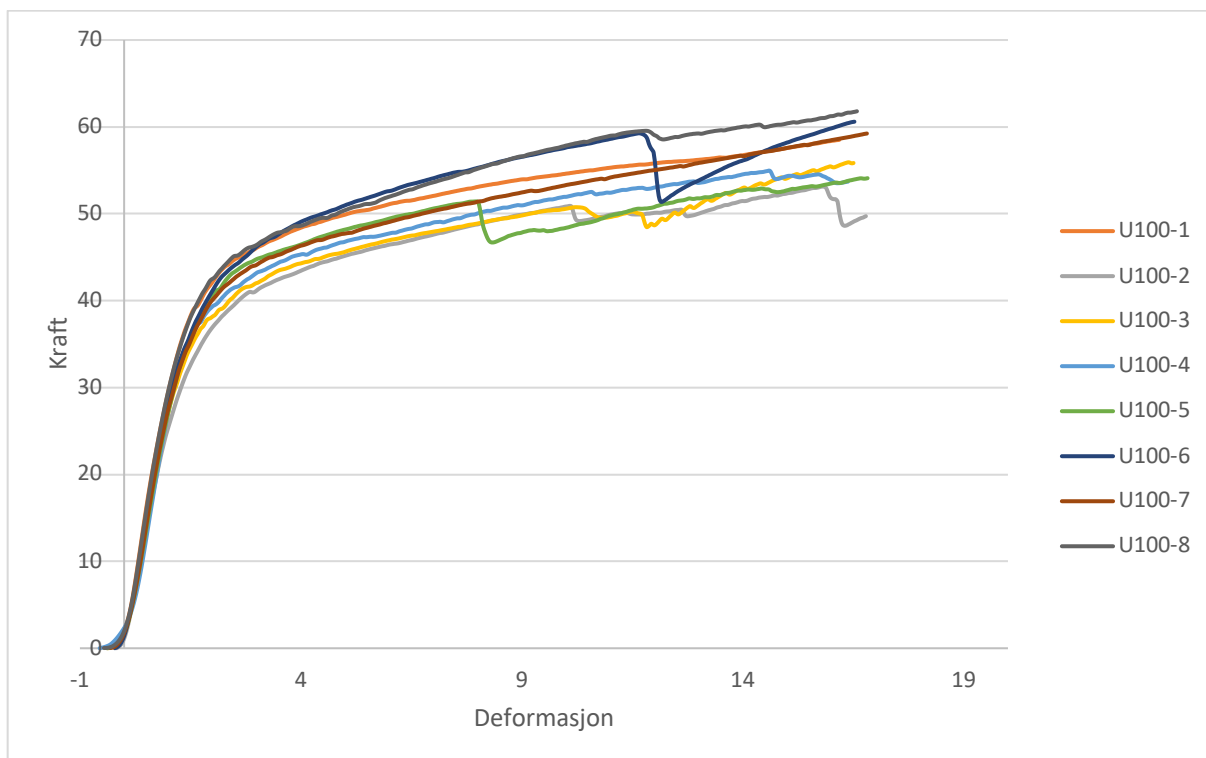


Figur 42: Kraft-/deformasjonskurve for U50

Alle prøvene er i lineær-elastisk område de første $\approx 1,5$ mm av deformasjonen, og når flytegrense ved ≈ 10 kN. For U50-5 har et brudd når deformasjonen er ≈ 13 mm, noe som resulterer i et fall i lastkapasiteten.

U50	$E_{c,90}$ [N/mm ²]	Slipp	$\sigma_{h,1\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{2,5\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{10\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{20\%}$ [N/mm ²]
U50-1	333,90	0,26	3,65	3,79	4,87	5,86
U50-2	284,64	0,43	3,52	3,60	4,35	
U50-3	362,08	0,21	3,79	3,89	4,81	
U50-4	383,36	0,11	4,41	4,54	5,62	
U50-5	306,13	0,22	3,66	3,70	4,43	
U50-6	211,37	0,10	3,99	3,95	4,87	
U50-7	316,10	0,16	3,48	3,58	4,26	
U50-8	337,73	0,12	3,79	3,80	4,62	
U50-9	290,34	0,12	3,17	3,25	4,35	
Average	313,96	0,19	3,72	3,79	4,69	5,86
mean _{ln}	5,74		1,31	1,33	1,54	1,77
mean	310,03		3,70	3,78	4,67	5,86
s _y			0,09	0,09	0,09	
s _y > 0,05			0,09	0,09	0,09	0,05
k _s			2,13	2,13	2,13	17,86
5 %			3,04	3,11	3,88	2,40
k _{p,ekv}				1,02	1,26	1,58

Tabell 21: Data - U50



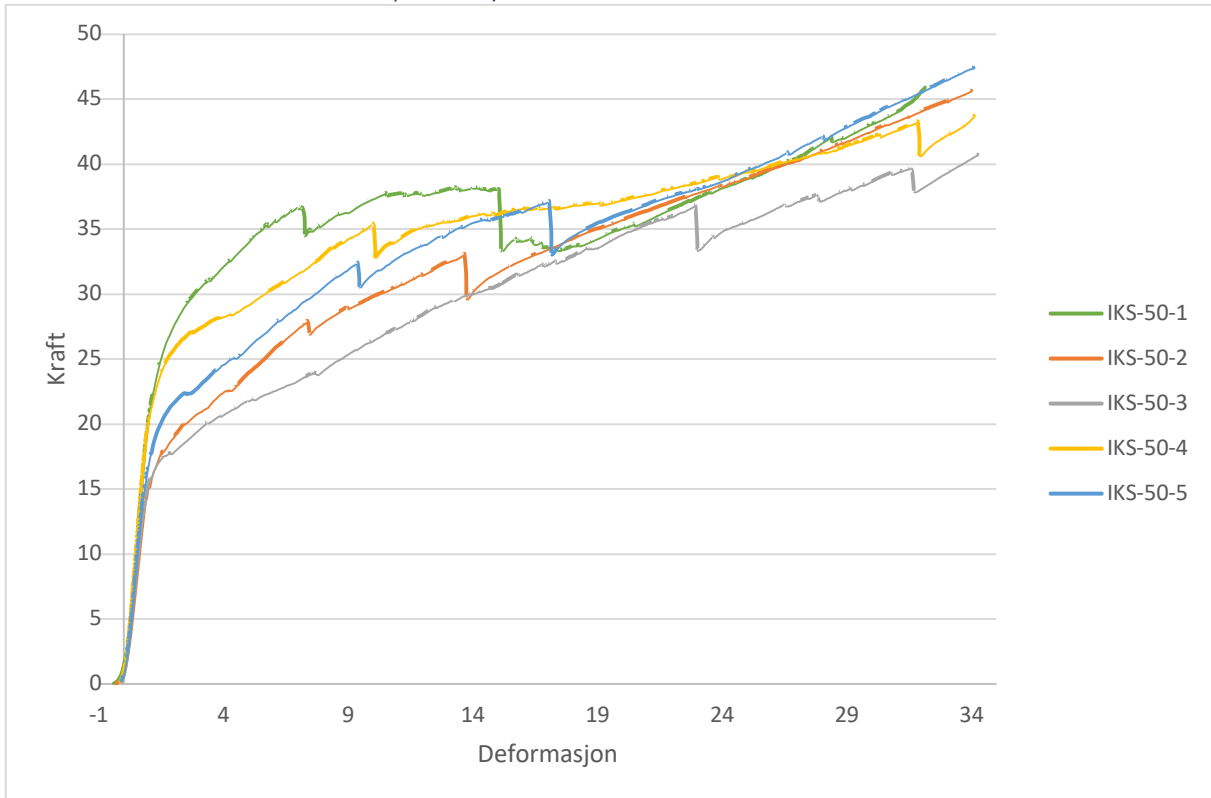
Figur 43: Kraft-/deformasjonskurve for U100

Alle prøvene er i lineær-elastisk område de første $\approx 1,5$ mm av deformasjonen, og når flytegrense ved ≈ 44 kN. Flere av prøvene har brudd, hvor det første inntreffer når deformasjonen er ≈ 8 mm.

U100	$E_{c,90}$ [N/mm ²]	Slipp	$\sigma_{h,1\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{2,5\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{10\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{20\%}$ [N/mm ²]
U100-1	317,20	0,38	4,37	4,42	5,39	
U100-2	269,83	0,17	3,89	3,92	5,03	
U100-3	284,24	0,36	3,96	4,02	5,01	
U100-4	260,21	0,55	4,13	4,11	5,15	
U100-5	273,97	0,38	4,28	4,27	4,76	
U100-6	291,74	0,21	4,34	4,35	5,69	
U100-7	281,44	0,32	4,20	4,20	5,26	
U100-8	311,90	0,46	4,41	4,45	5,70	
Average	286,32	0,35	4,20	4,22	5,25	
mean_{ln}	5,66		1,43	1,44	1,66	
mean	285,72		4,19	4,21	5,24	
s_y			0,05	0,05	0,06	
s_y >> 0,05			0,05	0,05	0,06	
k_s			2,18	2,18	2,18	
5 %			3,76	3,78	4,57	
k_{p,ekv}				1,00	1,25	

Tabell 22: Data - U100

4.4.2 Ikke-uniformt belastede prøvestykker

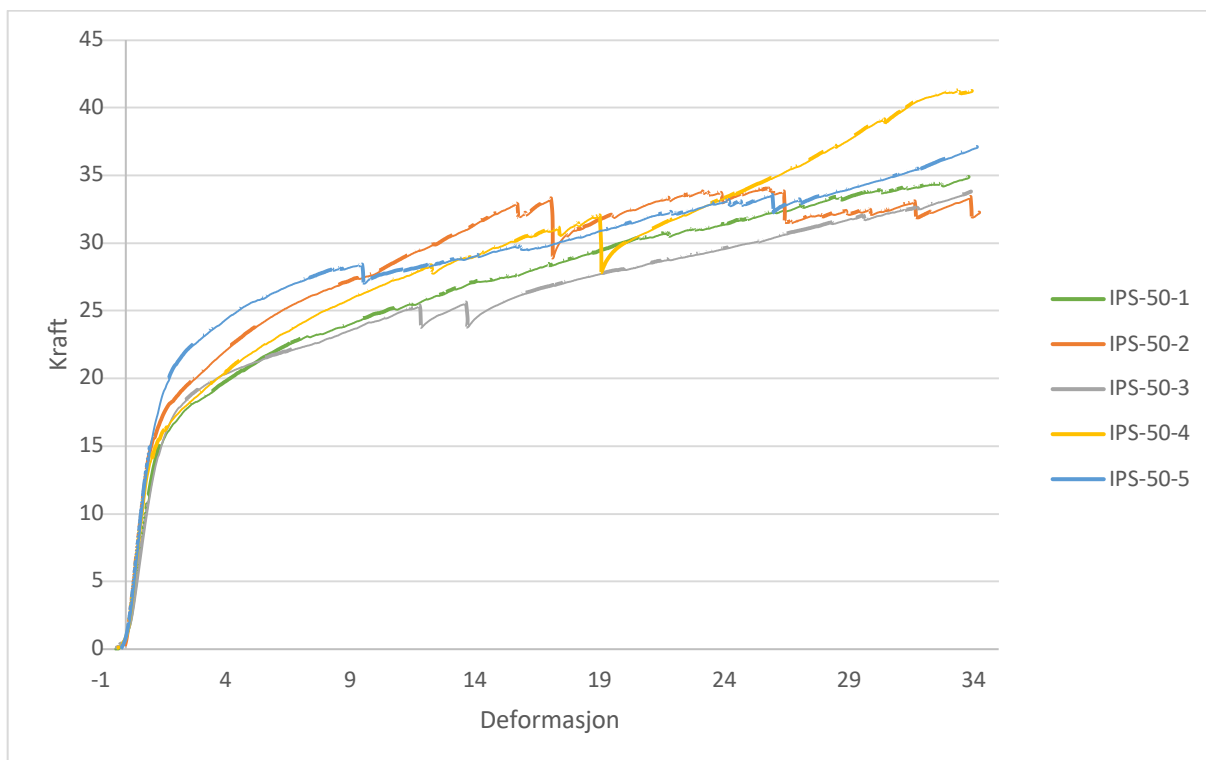


Figur 44: Kraft-/deformasjonskurve for IKS-50

Alle prøvene er i lineær-elastisk område de første $\approx 1,5$ mm av deformasjonen. Svært varierende trykkfasthet for prøvestykke, varierende mellom 18-29 kN. Bruddmekanismene som oppstår er en blanding av globale og lokale brudd. Globalt splittes øverste og midterste lag. Lokalt «skjærer» lastapplikatoren seg nedover i materialet og kutter over fibre. Tilsvarende bruddmekanisme finnes igjen i Troller sine forsøk, for prøvestykkene Lu150 og Lu200.

IKS-50	$E_{c,90}$ [N/mm ²]	Slipp	$\sigma_{h,1\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{2,5\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{10\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{20\%}$ [N/mm ²]
IKS-50-1	839,25	0,40	11,58	11,71	14,94	14,03
IKS-50-2	636,05	0,29	7,82	8,04	11,91	14,28
IKS-50-3	691,82	0,11	7,19	7,50	10,58	13,85
IKS-50-4	859,42	0,16	10,48	10,70	14,14	14,90
IKS-50-5	743,19	0,12	8,78	8,93	12,64	14,49
Average	753,95	0,21	9,17	9,37	12,84	14,31
mean_In	6,62		2,20	2,22	2,55	2,66
mean	749,09		9,03	9,24	12,75	14,30
s_y			0,20	0,19	0,14	0,03
s_y >> 0,05			0,20	0,19	0,14	0,05
k_s			2,46	2,46	2,46	2,46
5 %			5,54	5,81	9,10	12,65
k_p,ekv				1,02	1,41	1,58

Tabell 23: Data - IKS-50

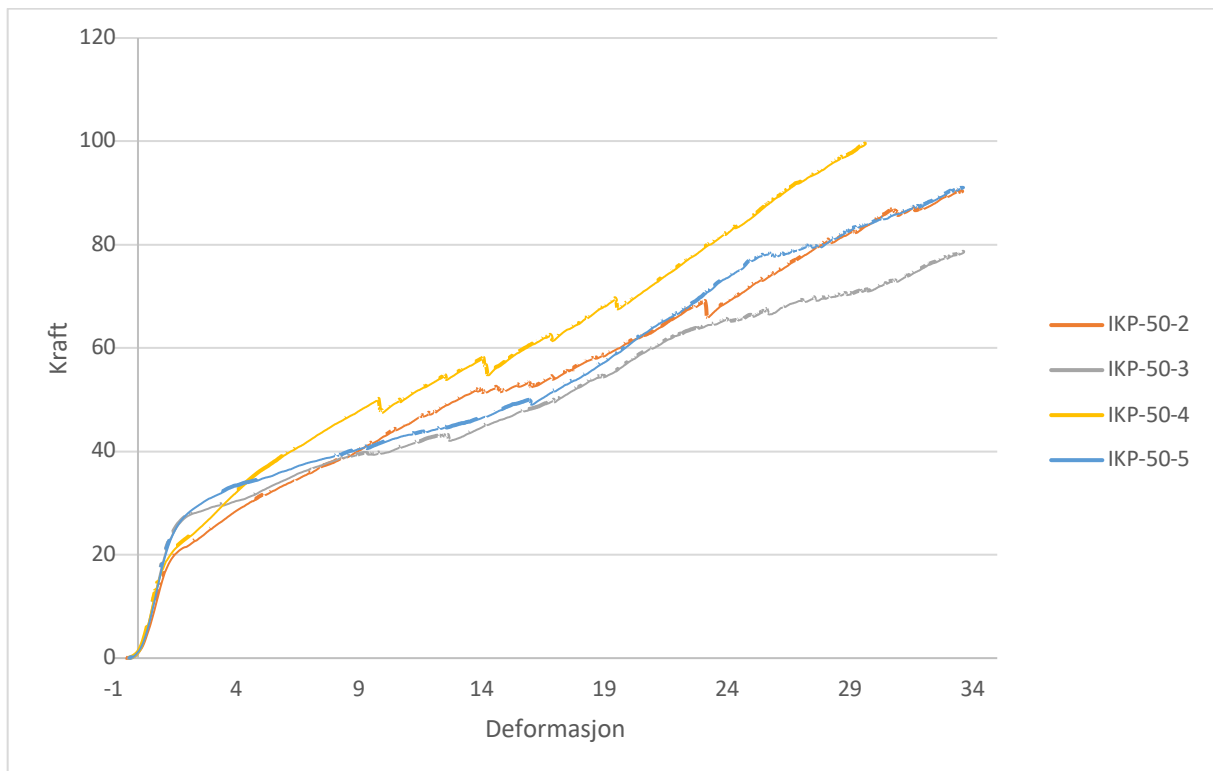


Figur 45: Kraft-/deformasjonskurve for IPS-50

Alle prøvene er i lineær-elastisk område de første $\approx 1,5$ mm av deformasjonen. Varierende trykkfasthet for prøvestykke, varierende mellom 18-22 kN. Bruddmekanismene som oppstår er svært like som for IKS-50, men her «skjærer» også opplager seg inn i materialet.

IPS-50	$E_{c,90}$ [N/mm ²]	Slipp	$\sigma_{h,1\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{2,5\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{10\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{20\%}$ [N/mm ²]
IPS-50-1	514,84	0,41	7,10	7,17	9,91	12,01
IPS-50-2	658,42	0,03	7,55	7,83	11,10	12,92
IPS-50-3	484,12	0,36	7,47	7,43	9,71	11,23
IPS-50-4	633,32	0,33	7,01	7,29	10,69	12,01
IPS-50-5	658,63	0,17	8,74	8,87	11,00	12,57
Average	589,86	0,26	7,57	7,72	10,48	12,15
mean_ln	6,37		2,02	2,04	2,35	2,50
mean	584,89		7,55	7,69	10,47	12,13
s_y			0,09	0,09	0,06	0,05
s_y >< 0,05			0,09	0,09	0,06	0,05
k_s			2,46	2,46	2,46	2,46
5 %			6,08	6,22	9,00	10,64
k_p,ekv				1,02	1,39	1,61

Tabell 24: Data - IPS-50

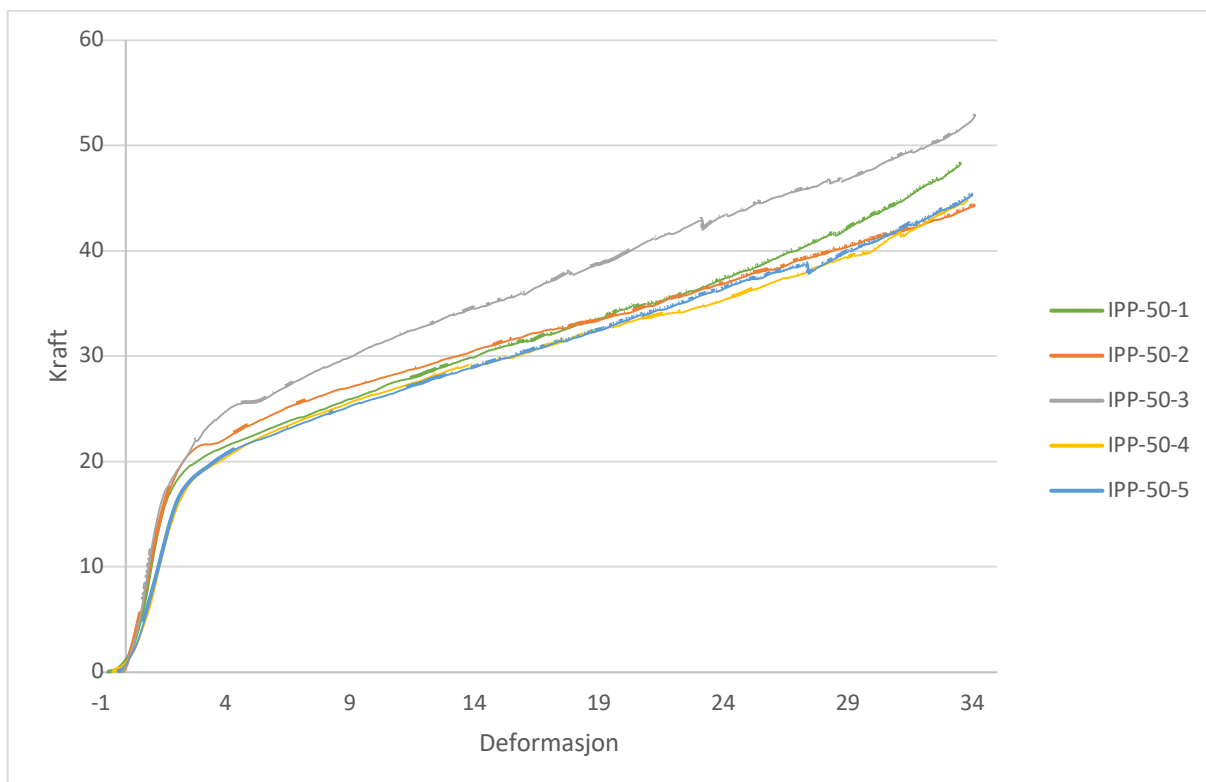


Figur 46: Kraft-/deformasjonskurve for IKP-50

Alle prøvene er i lineær-elastisk område de første ≈ 1 mm av deformasjonen. Varierende trykkfasthet for prøvestykke, varierende mellom 24-30 kN. Bruddmekanismene som oppstår er svært like som for IKS-50, hvor øverste og midterste lag splittes. Splittingen skjer langs med fibrene i øverste lag.

IKP-50	$E_{c,90}$ [N/mm ²]	Slipp	$\sigma_{h,1\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{2,5\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{10\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{20\%}$ [N/mm ²]
IKP-50-1						
IKP-50-2	595,42	0,47	9,53	9,39	17,24	24,56
IKP-50-3	728,99	0,40	11,44	11,41	15,92	22,90
IKP-50-4	732,41	0,36	9,86	10,15	19,11	27,60
IKP-50-5	714,10	0,33	12,23	11,97	16,79	24,48
Average	692,73	0,39	10,77	10,73	17,26	24,88
mean_ln	6,54		2,37	2,37	2,85	3,21
mean	690,26		10,71	10,68	17,23	24,83
s_y			0,12	0,11	0,08	0,08
s_y >< 0,05			0,12	0,11	0,08	0,08
k_s			2,71	2,71	2,71	2,71
5 %			7,76	7,92	13,99	20,12
k_p,ekv				1,00	1,61	2,32

Tabell 25: Data - IKP-50

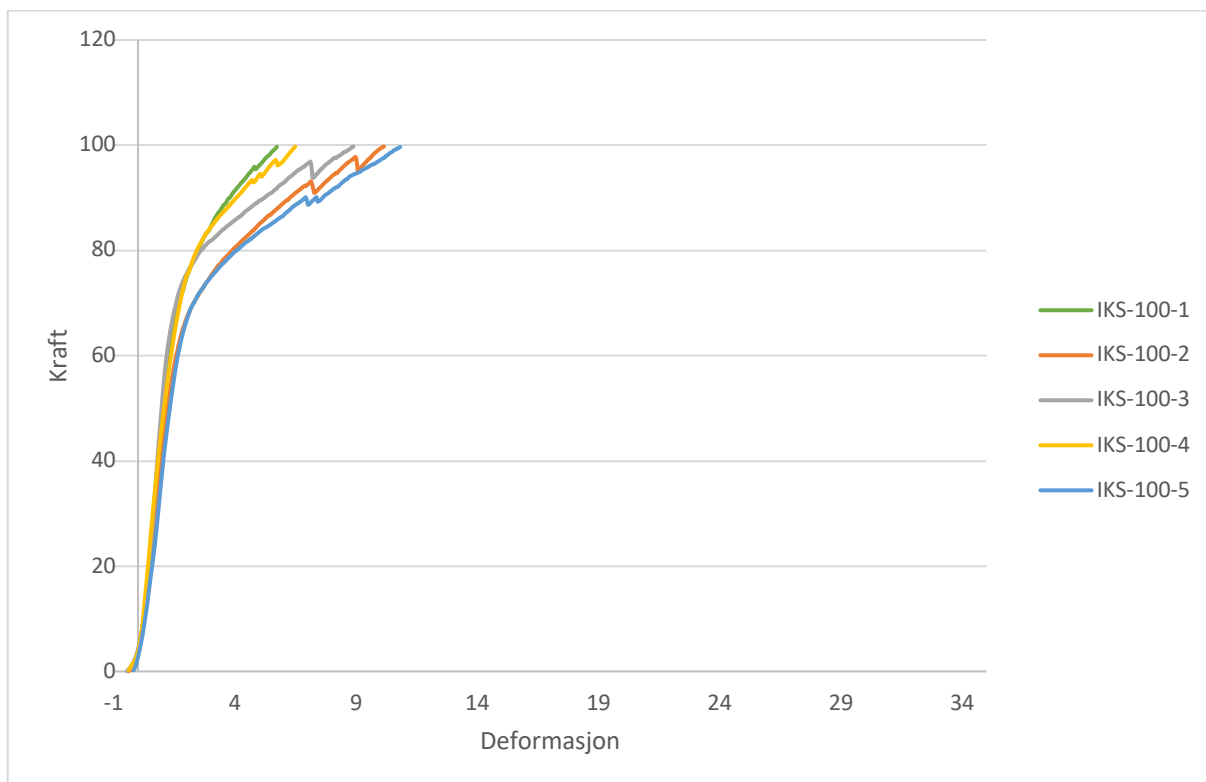


Figur 47: Kraft-/deformasjonskurve for IPP-50

Alle prøvene er i lineær-elastisk område de første $\approx 2,5$ mm av deformasjonen. Noe varierende trykkfasthet for prøvestykkene, varierende mellom 20-23 kN. Bruddmekanismene som oppstår er like som for IKP-50.

IPP-50	$E_{c,90}$ [N/mm ²]	Slipp	$\sigma_{h,1\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{2,5\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{10\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{20\%}$ [N/mm ²]
IPP-50-1	376,87	0,73	8,25	7,83	10,72	13,80
IPP-50-2	413,39	0,13	8,67	8,29	11,13	13,65
IPP-50-3	438,90	0,19	9,08	8,33	12,45	15,88
IPP-50-4	286,12	0,49	8,09	7,13	10,58	13,27
IPP-50-5	297,68	0,28	8,12	7,19	10,42	13,37
Average	362,59	0,37	8,44	7,75	11,06	13,99
mean_ln	5,88		2,13	2,05	2,40	2,64
mean	357,31		8,43	7,74	11,04	13,96
s_y			0,05	0,08	0,07	0,07
s_y >> 0,05			0,05	0,08	0,07	0,07
k_s			2,46	2,46	2,46	2,46
5 %			7,46	6,43	9,25	11,65
k_p,ekv				0,92	1,31	1,66

Tabell 26: Data - IPP-50

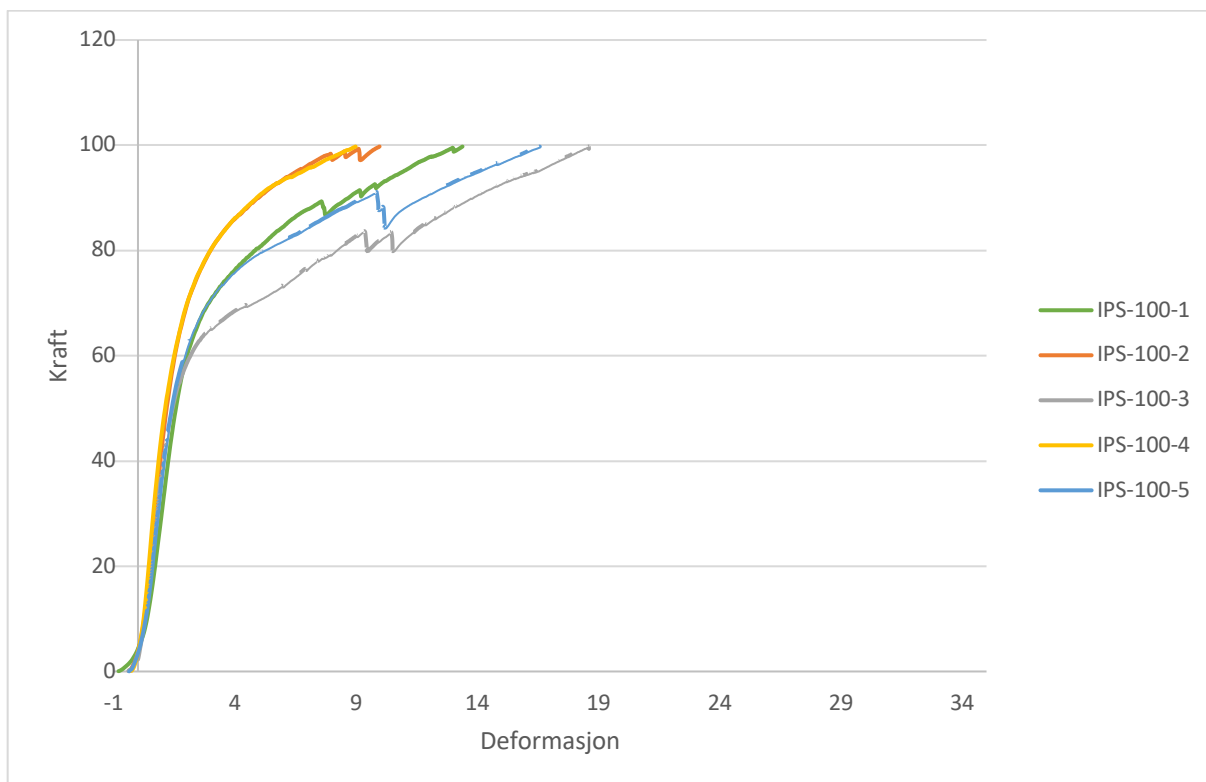


Figur 48: Kraft-/deformasjonskurve for IKS-100

Alle prøvene er i lineær-elastisk område de første $\approx 2,5$ mm av deformasjonen. Trykkfasthet er relativt lik for prøvestykkene, varierende mellom 75-80 kN. Bruddmekanismene som oppstår er like som for IKS-50, men dimensjonene på bruddmekanismene er mindre.

IKS-100	$E_{c,90}$ [N/mm ²]	Slipp	$\sigma_{h,1\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{2,5\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{10\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{20\%}$ [N/mm ²]
IKS-100-1	465,27	0,30	8,29	8,03		
IKS-100-2	415,05	0,40	7,35	7,16	9,94	
IKS-100-3	483,78	0,46	8,04	7,94		
IKS-100-4	488,29	0,39	8,21	8,05		
IKS-100-5	359,76	0,18	7,53	7,16	9,70	
Average	442,43	0,34	7,88	7,67	9,82	
mean_ln	6,09		2,06	2,04	2,28	
mean	439,57		7,87	7,66	9,82	
s_y			0,05	0,06	0,02	
s_y >< 0,05			0,05	0,06	0,05	
k_s			2,46	2,46	4,32	
5 %			6,90	6,58	7,91	
k_p,ekv				0,97	1,25	

Tabell 27: Data - IKS-100

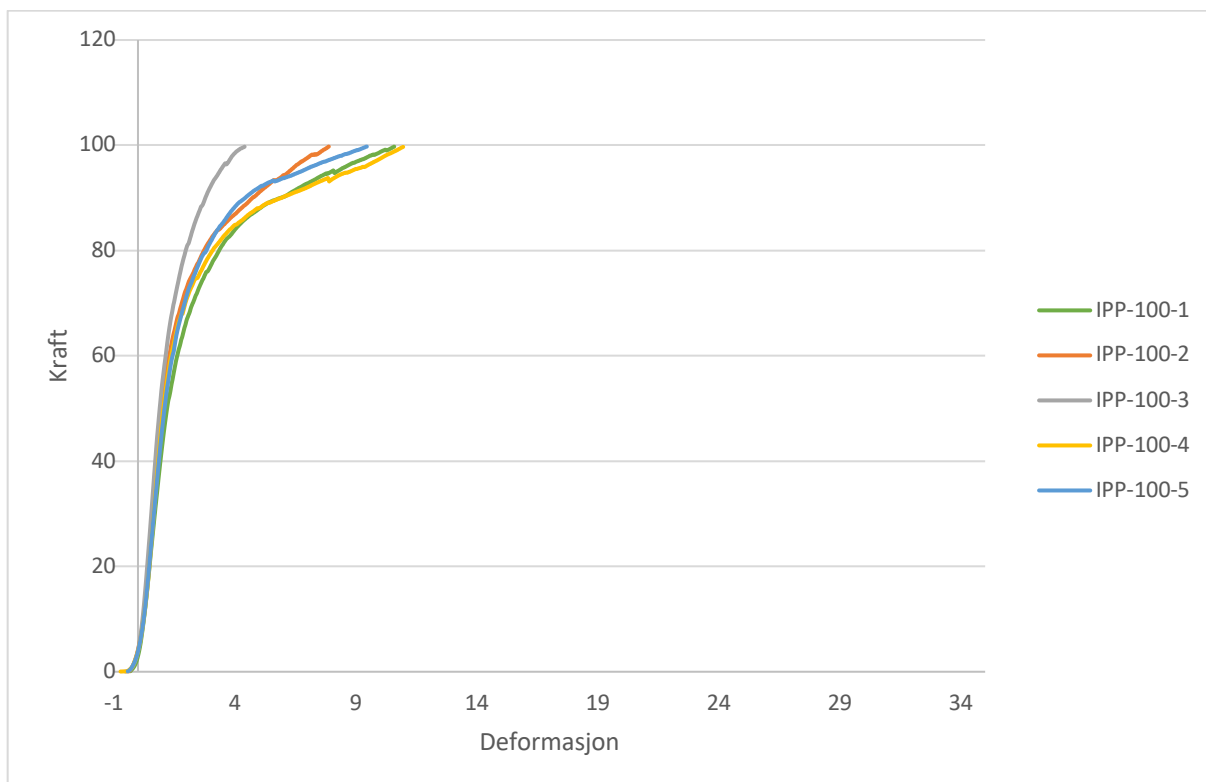


Figur 49: Kraft-/deformasjonskurve for IPS-100

Alle prøvene er i lineær-elastisk område de første ≈ 2 mm av deformasjonen. Varierende trykkfasthet for prøvestykkene, varierende mellom 63-76 kN. Bruddmekanismene som oppstår er like som for IPS-50, men dimensjonene på bruddmekanismene er mindre.

IPS-100	$E_{c,90}$ [N/mm ²]	Slipp	$\sigma_{h,1\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{2,5\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{10\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{20\%}$ [N/mm ²]
IPS-100-1	304,63	0,80	7,32	6,62	9,25	
IPS-100-2	420,50	0,36	7,88	7,53	9,96	
IPS-100-3	386,58	0,40	6,34	6,26	8,18	
IPS-100-4	471,63	0,27	7,67	7,56		
IPS-100-5	358,20	0,37	7,07	6,70	8,77	
Average	388,31	0,44	7,26	6,93	9,04	
mean_ln	5,95		1,98	1,93	2,20	
mean	384,15		7,24	6,91	9,02	
s_y			0,08	0,08	0,08	
s_y >< 0,05			0,08	0,08	0,08	
k_s			2,46	2,46	2,71	
5 %			5,87	5,62	7,19	
k_p,ekv				0,96	1,25	

Tabell 28: Data - IPS-100

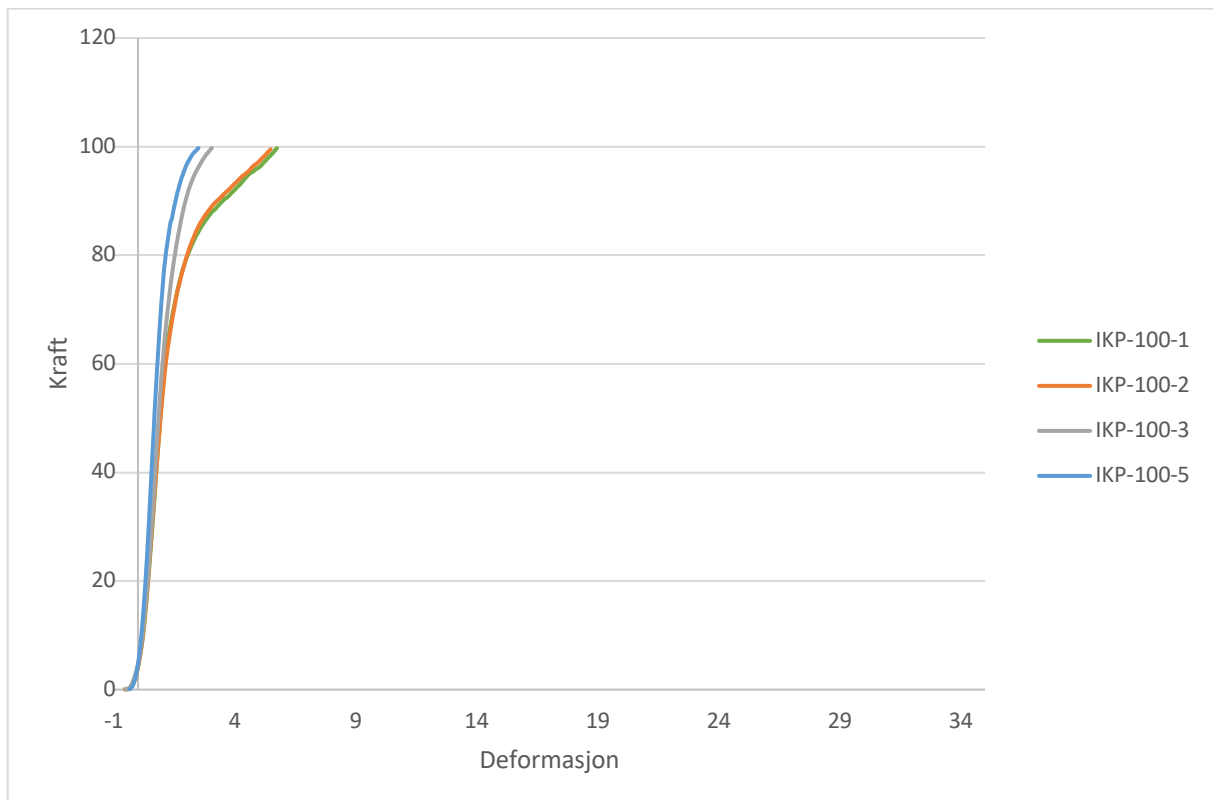


Figur 50: Kraft-/deformasjonskurve for IPP-100

Alle prøvene er i lineær-elastisk område de første ≈ 3 mm av deformasjonen. Varierende trykkfasthet for prøvestykkene, varierende mellom 75-89 kN. Små bruddmekanismer oppsto ved deformasjon på ≈ 9 mm, men ingen tydelige skader foruten at lastapplikatoren skar seg noe inn i materialet.

IPP-100	$E_{c,90}$ [N/mm ²]	Slipp	$\sigma_{h,1\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{2,5\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{10\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{20\%}$ [N/mm ²]
IPP-100-1	432,64	0,31	7,52	7,28	9,88	
IPP-100-2	511,65	0,39	7,80	7,77		
IPP-100-3	557,06	0,51	8,83	8,72		
IPP-100-4	460,01	0,72	7,67	7,51	9,74	
IPP-100-5	456,03	0,42	7,95	7,72		
Average	483,48	0,47	7,95	7,80	9,81	
mean_{ln}	6,18		2,07	2,05	2,28	
mean	481,45		7,94	7,79	9,81	
s_y			0,06	0,07	0,01	
s_y >< 0,05			0,06	0,07	0,05	
k_s			2,46	2,46	4,32	
5 %			6,81	6,58	7,90	
k_{p,ekv}				0,98	1,24	

Tabell 29: Data - IPP-100



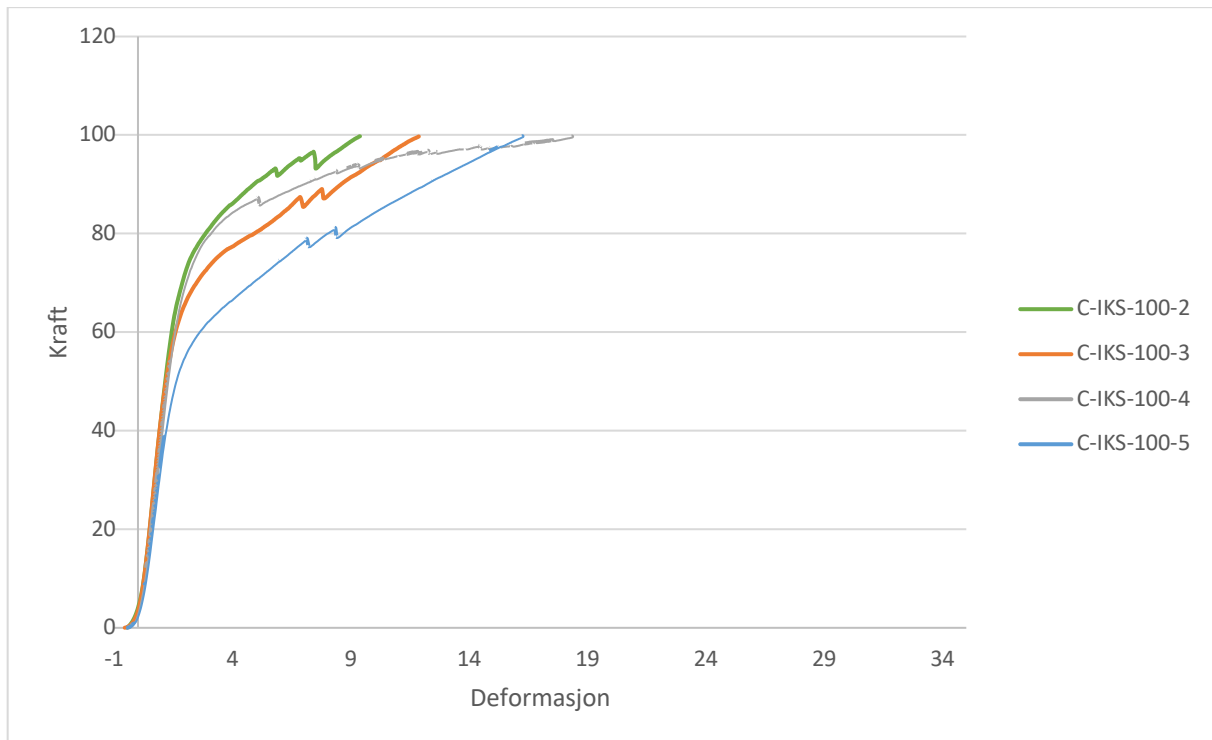
Figur 51: Kraft-/deformasjonskurve for IKP-100

Alle prøvene er i lineær-elastisk område de første ≈ 3 mm av deformasjonen. Varierende trykkfasthet for prøvestykkene, varierende mellom 86-99 kN. Ingen tydelige bruddmekanismer foruten at lastapplikatoren skar seg noe inn i materialet.

IKP-100	$E_{c,90}$ [N/mm ²]	Slipp	$\sigma_{h,1\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{2,5\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{10\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{20\%}$ [N/mm ²]
IKP-100-1	514,82	0,55	8,56	8,43		
IKP-100-2	524,18	0,54	8,65	8,53		
IKP-100-3	563,55	0,53	9,80	9,62		
IKP-100-4						
IKP-100-5	716,79	0,35	9,92	9,97		
Average	579,83	0,49	9,23	9,14		
mean_ln	6,35		2,22	2,21		
mean	574,60		9,21	9,11		
s_y			0,08	0,08		
s_y >< 0,05			0,08	0,08		
k_s			2,71	2,71		
5 %			7,43	7,24		
k_p,ekv				0,99		

Tabell 30: Data - IKP-100

4.4.3 Prøvestykker med CLT-kloss som lastapplikator

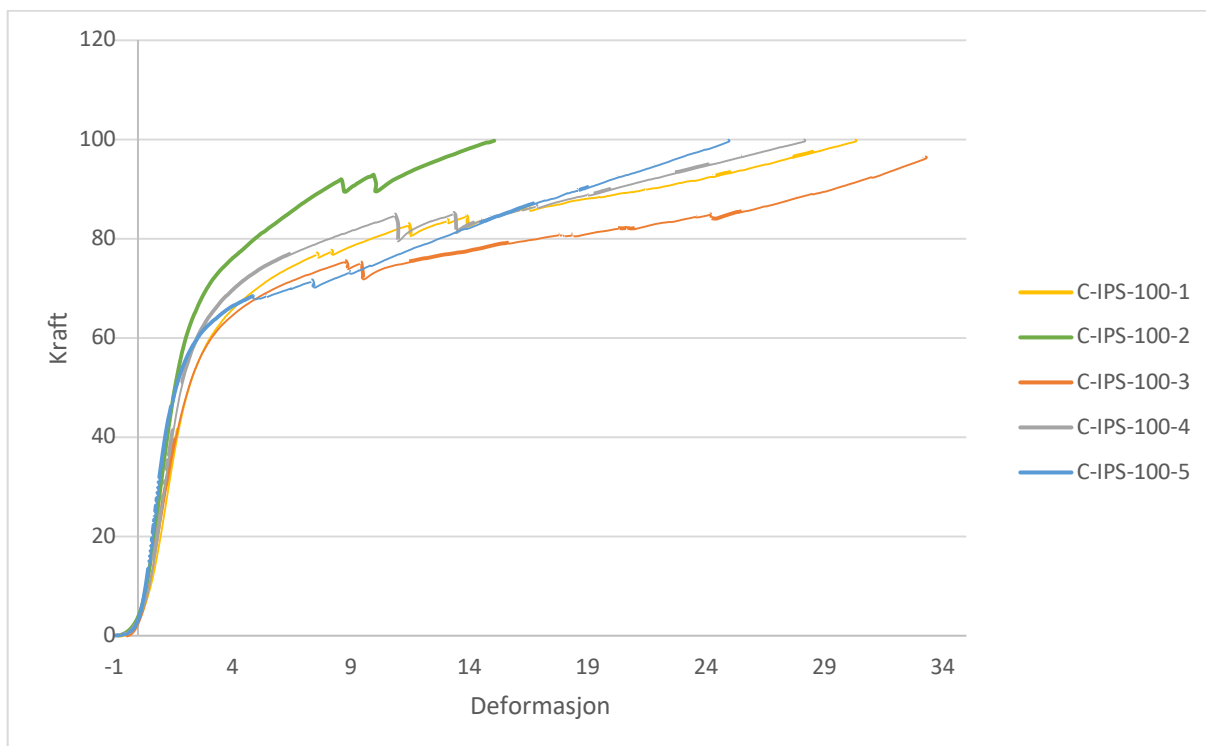


Figur 52: Kraft-/deformasjonskurve for C-IKS-100

Alle prøvene er i lineær-elastisk område de første ≈ 2 mm av deformasjonen. Trykkfasthet er svært ulik for prøvestykkene, varierende mellom 61-80 kN. Bruddmekanismene som oppstår er like som for IKS-50, men dimensjonene på bruddmekanismene er mindre.

C-IKS-100	$E_{c,90}$ [N/mm ²]	Slipp	$\sigma_{h,1\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{2,5\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{10\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{20\%}$ [N/mm ²]
C-IKS-100-1						
C-IKS-100-2	431,77	0,46	8,01	7,75		
C-IKS-100-3	428,18	0,56	7,14	7,03	9,45	
C-IKS-100-4	390,32	0,40	8,01	7,63	9,47	
C-IKS-100-5	339,60	0,46	6,15	5,96	8,44	
Average	397,47	0,47	7,33	7,09	9,12	
mean_ln	5,98		1,99	1,95	2,21	
mean	395,65		7,29	7,05	9,11	
s_y			0,13	0,12	0,07	
s_y >< 0,05			0,13	0,12	0,07	
k_s			2,71	2,71	3,15	
5 %			5,19	5,09	7,41	
k_p,ekv				0,97	1,25	

Tabell 31: Data - C-IKS-100

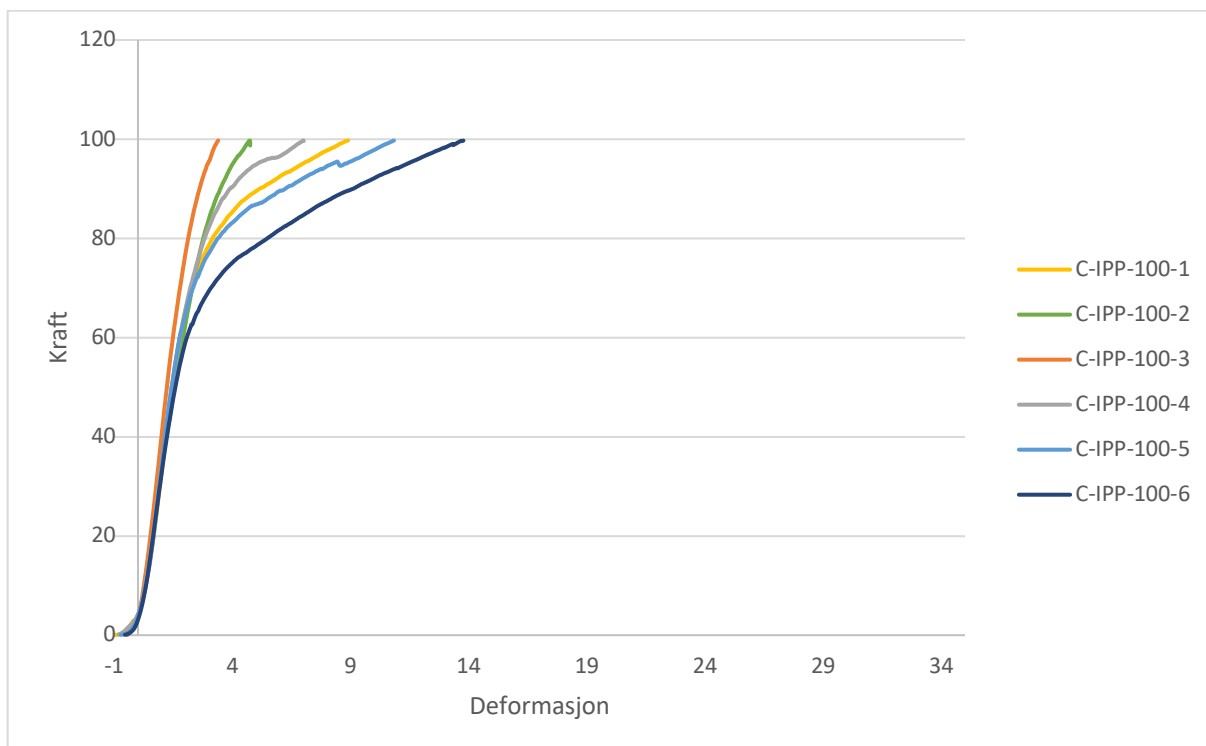


Figur 53: Kraft-/deformasjonskurve for C-IPS-100

Alle prøvene er i lineær-elastisk område de første ≈ 3 mm av deformasjonen. Noe varierende trykkfasthet for prøvestykkene, varierende mellom 62-72 kN. Bruddmekanismene som oppstår er like som for IPS-50, men dimensjonene på bruddmekanismene er mindre.

C-IPS-100	$E_{c,90}$ [N/mm ²]	Slipp	$\sigma_{h,1\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{2,5\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{10\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{20\%}$ [N/mm ²]
C-IPS-100-1	230,81	0,75	6,51	5,50	8,04	8,88
C-IPS-100-2	309,95	0,82	7,27	6,59	9,28	
C-IPS-100-3	254,87	0,47	6,24	5,52	7,34	8,20
C-IPS-100-4	264,75	0,88	6,75	6,00	8,34	9,00
C-IPS-100-5	345,77	0,97	6,16	5,98	7,50	9,21
Average	281,23	0,78	6,59	5,92	8,10	8,82
mean_ln	5,63		1,88	1,78	2,09	2,18
mean	278,29		6,58	5,90	8,07	8,81
s_y			0,07	0,07	0,09	0,05
s_y >< 0,05			0,07	0,07	0,09	0,05
k_s			2,46	2,46	2,46	2,71
5 %			5,58	4,92	6,41	7,69
k_p,ekv				0,90	1,23	1,34

Tabell 32: Data - C-IPS-100

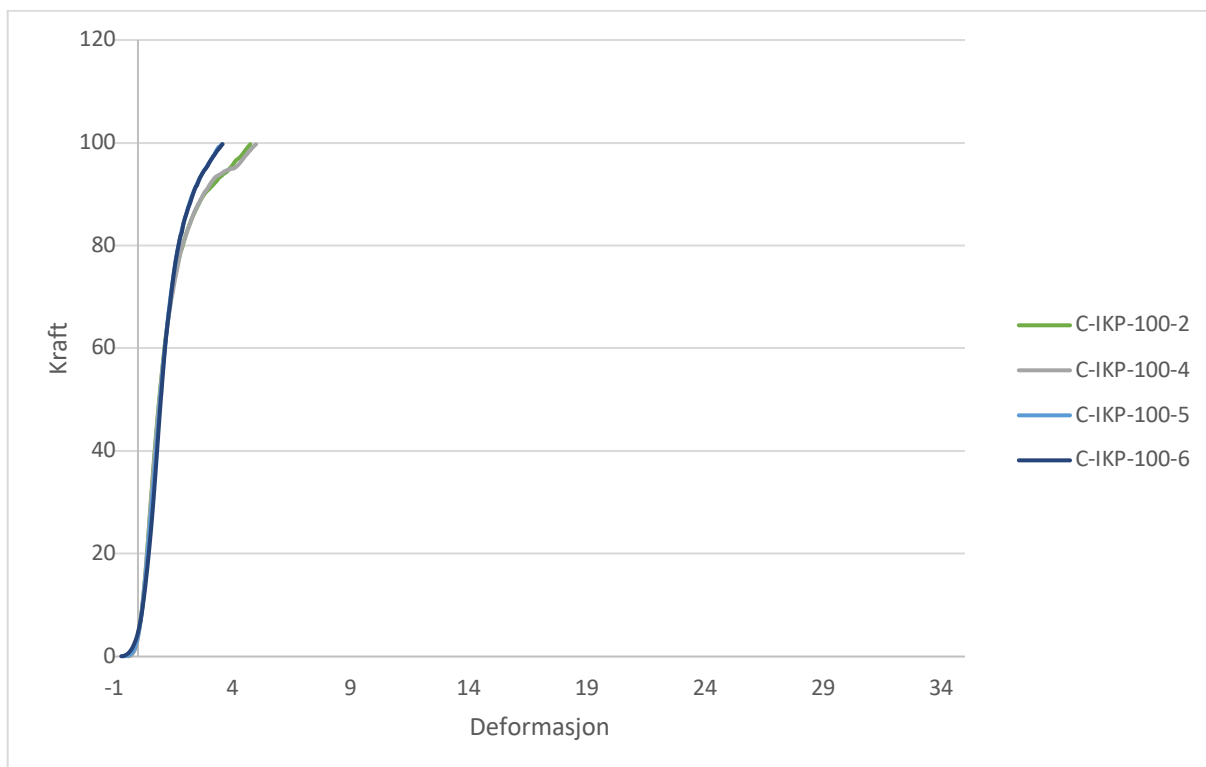


Figur 54: Kraft-/deformasjonskurve for C-IPP-100

Alle prøvene er i lineær-elastisk område de første ≈ 3 mm av deformasjonen. Svært varierende trykkfasthet for prøvestykkene, varierende mellom 70-100 kN. Ingen tydelige brudd foruten at lastapplikatoren skar seg noe inn i materialet.

C-IPP-100	$E_{c,90}$ [N/mm²]	Slipp	$\sigma_{h,1\%}$ [N/mm²]	$\sigma_{2,5\%}$ [N/mm²]	$\sigma_{10\%}$ [N/mm²]	$\sigma_{20\%}$ [N/mm²]
C-IPP-100-1	326,69	1,02	8,24	7,27		
C-IPP-100-2	333,33	0,45	9,27	7,45		
C-IPP-100-3	399,67	0,47	9,98	8,78		
C-IPP-100-4	341,36	0,81	8,77	7,48		
C-IPP-100-5	333,52	0,72	8,00	7,20	9,77	
C-IPP-100-6	321,80	0,55	7,06	6,50	9,20	
Average	342,73	0,67	8,55	7,45	9,49	
mean_ln	5,83		2,14	2,00	2,25	
mean	341,80		8,50	7,42	9,48	
s_y			0,12	0,10	0,04	
s_y >< 0,05			0,12	0,10	0,05	
k_s			2,34	2,34	4,32	
5 %			6,40	5,90	7,64	
k_p,ekv				0,87	1,12	

Tabell 33: Data - C-IPP-100



Figur 55: Kraft-/deformasjonskurve for C-IKP-100

Alle prøvene er i lineær-elastisk område de første $\approx 3,5$ mm av deformasjonen. Trykkfasthet er relativt lik for prøvestykkene, varierende mellom 88-95 kN. Ingen tydelige bruddmekanismer foruten at lastapplikatoren skar seg noe inn i materialet.

C-IKP-100	$E_{c,90}$ [N/mm ²]	Slipp	$\sigma_{h,1\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{2,5\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{10\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{20\%}$ [N/mm ²]
C-IKP-100-1						
C-IKP-100-2	561,52	0,41	8,79	8,73		
C-IKP-100-3						
C-IKP-100-4	550,23	0,43	8,84	8,75		
C-IKP-100-5	512,78	0,63	9,48	9,18		
C-IKP-100-6	485,76	0,71	9,55	9,16		
Average	527,57	0,54	9,17	8,96		
mean_ln	6,27		2,21	2,19		
mean	526,70		9,16	8,95		
s_y			0,04	0,03		
s_y >< 0,05			0,05	0,05		
k_s			2,71	2,71		
5 %			8,00	7,82		
k_p,ekv				0,98		

Tabell 34: Data - C-IKP-100

4.4.4 Samling av data Dalheim og Bjerkeng sine forsøk

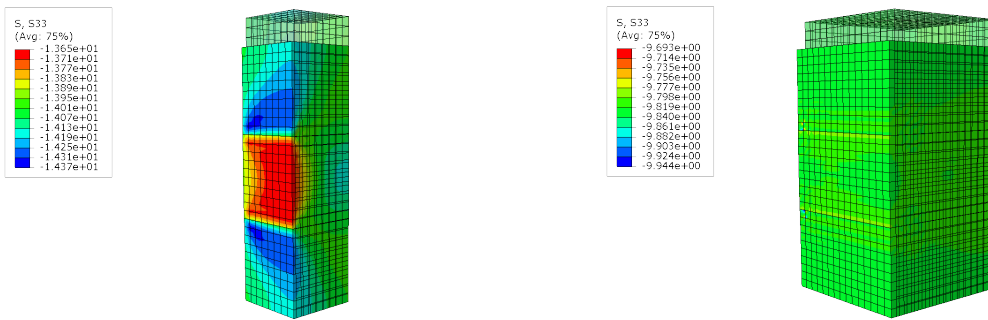
	$E_{c,90}$ [N/mm ²]	$\sigma_{h,1\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{2,5\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{10\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{20\%}$ [N/mm ²]
U50	310,03	3,70	3,78	4,67	5,86
U100	285,72	4,19	4,21	5,24	
IKP-50	690,26	10,71	10,68	17,23	24,83
IPP-50	357,31	8,43	7,74	11,04	13,96
IKS-50	749,09	9,03	9,24	12,75	14,30
IPS-50	584,89	7,55	7,69	10,47	12,13
IKS-100	439,57	7,87	7,66	9,82	
IPS-100	384,15	7,24	6,91	9,02	
IPP-100	481,45	7,94	7,79	9,81	
IKP-100	574,60	9,21	9,11		
C-IKS-100	395,65	7,29	7,05	9,11	
C-IPS-100	278,29	6,58	5,90	8,07	8,81
C-IPP-100	341,80	8,50	7,42	9,48	
C-IKP-100	526,70	9,16	8,95		
mean	457,11	7,67	7,44	9,72	13,32

Tabell 35: Samling av data fra Dalheim og Bjerkeng sine forsøk

	$k_{p,ekv,2,5\%}$	$k_{p,ekv,10\%}$	$k_{p,ekv,20\%}$
U50	1,02	1,26	1,58
U100	1,00	1,25	
IKP-50	1,00	1,61	2,32
IPP-50	0,92	1,31	1,66
IKS-50	1,02	1,41	1,58
IPS-50	1,02	1,39	1,61
IKS-100	0,97	1,25	
IPS-100	0,96	1,25	
IPP-100	0,98	1,24	
IKP-100	0,99		
C-IKS-100	0,97	1,25	
C-IPS-100	0,90	1,23	1,34
C-IPP-100	0,87	1,12	
C-IKP-100	0,98		
mean	0,97	1,30	1,68

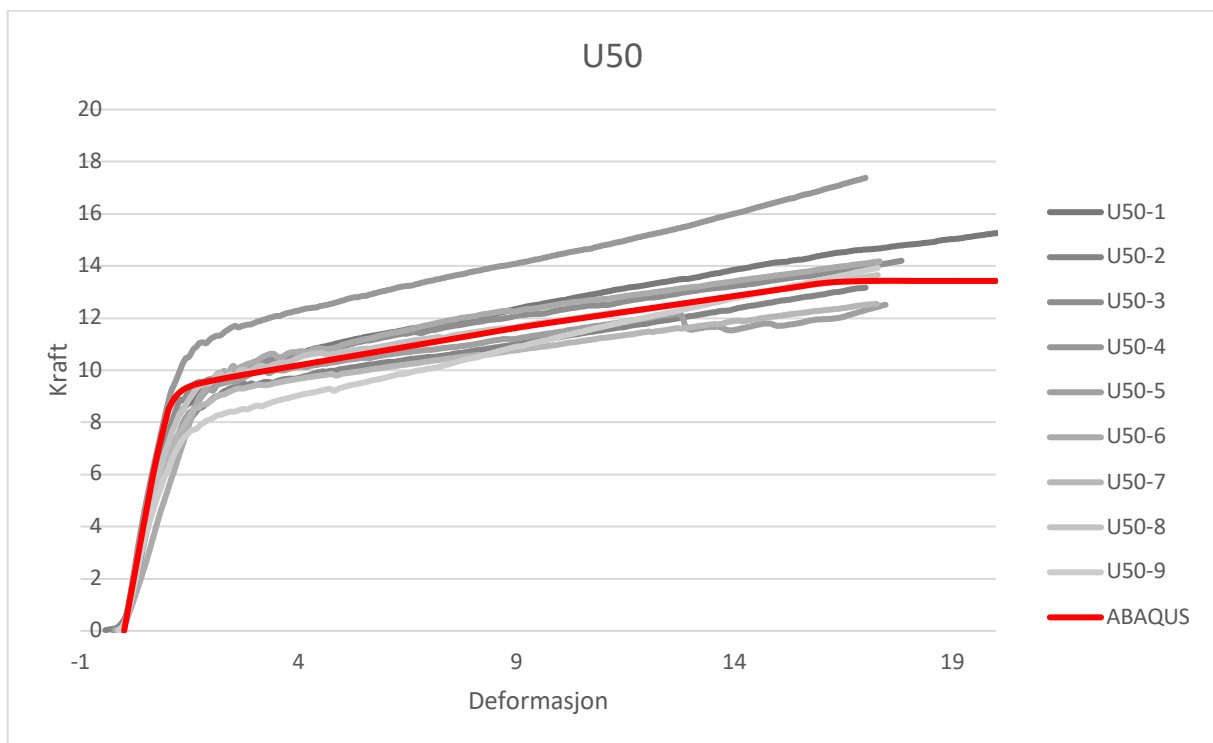
Tabell 36: Beregnet $k_{p,ekv}$ fra Dalheim og Bjerkeng sine forsøk

4.5 FEM-modellering basert på Dalheim og Bjerkgeng

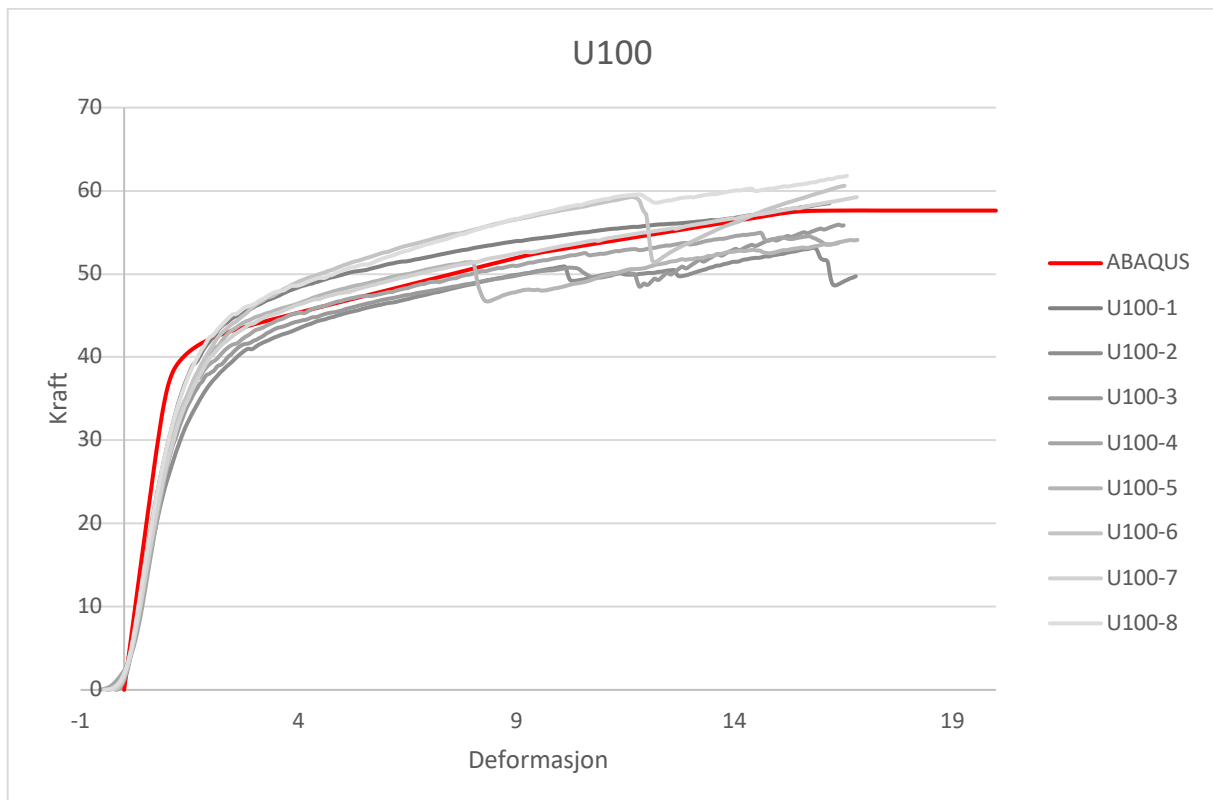


Figur 56: IKS-50 (t.v) og IKS-100 (t.h)

4.5.1 Uniformt belastede prøvestykker

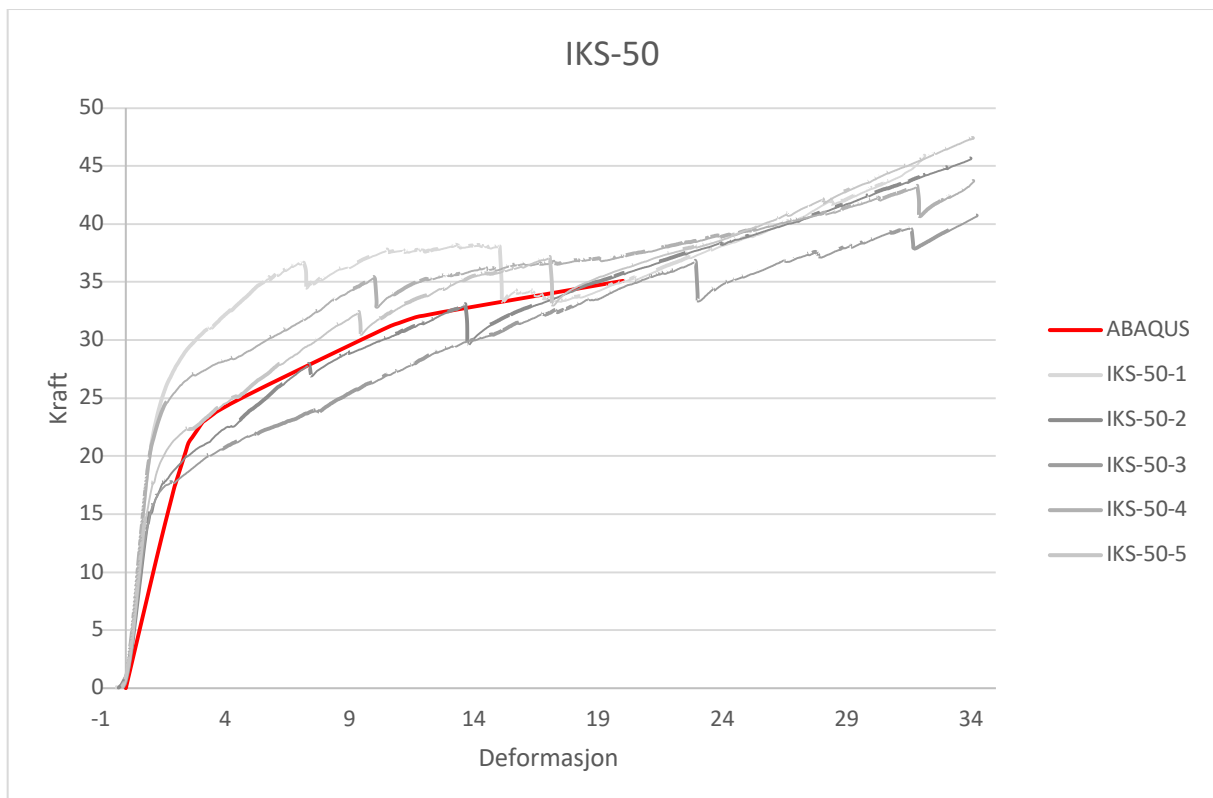


Figur 57: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for U50

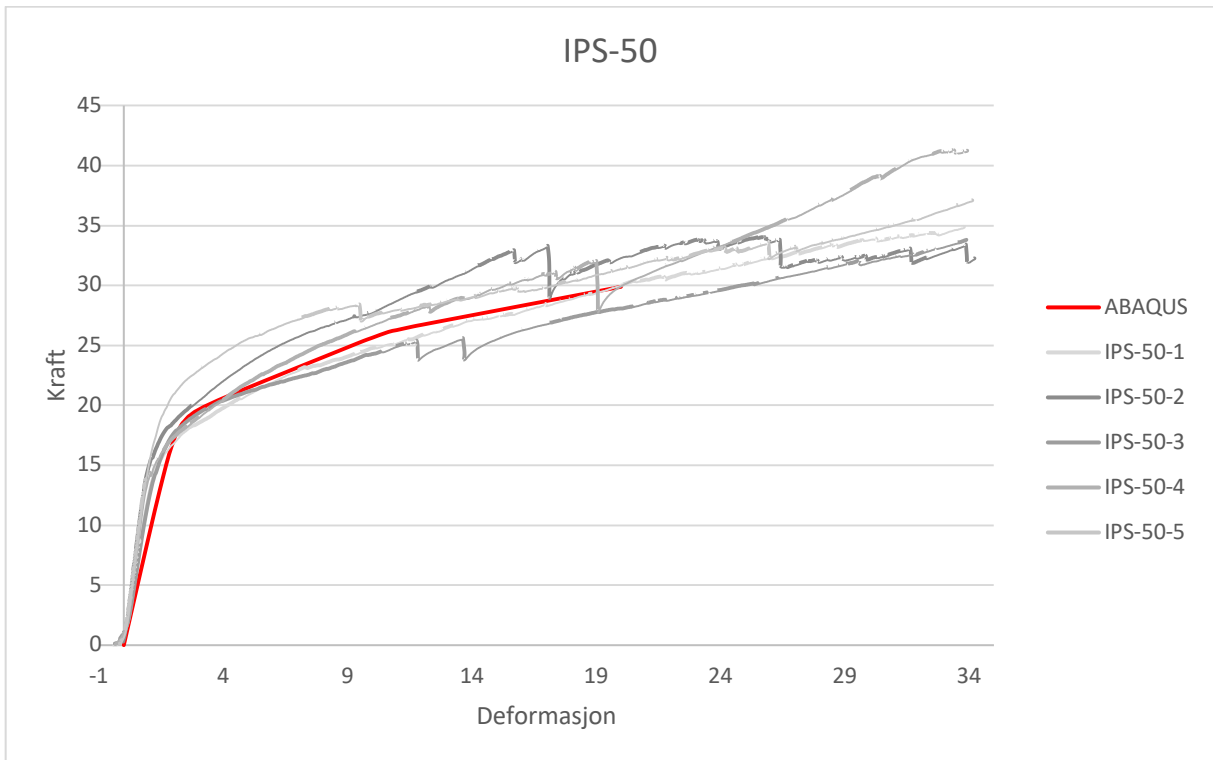


Figur 58: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for U100

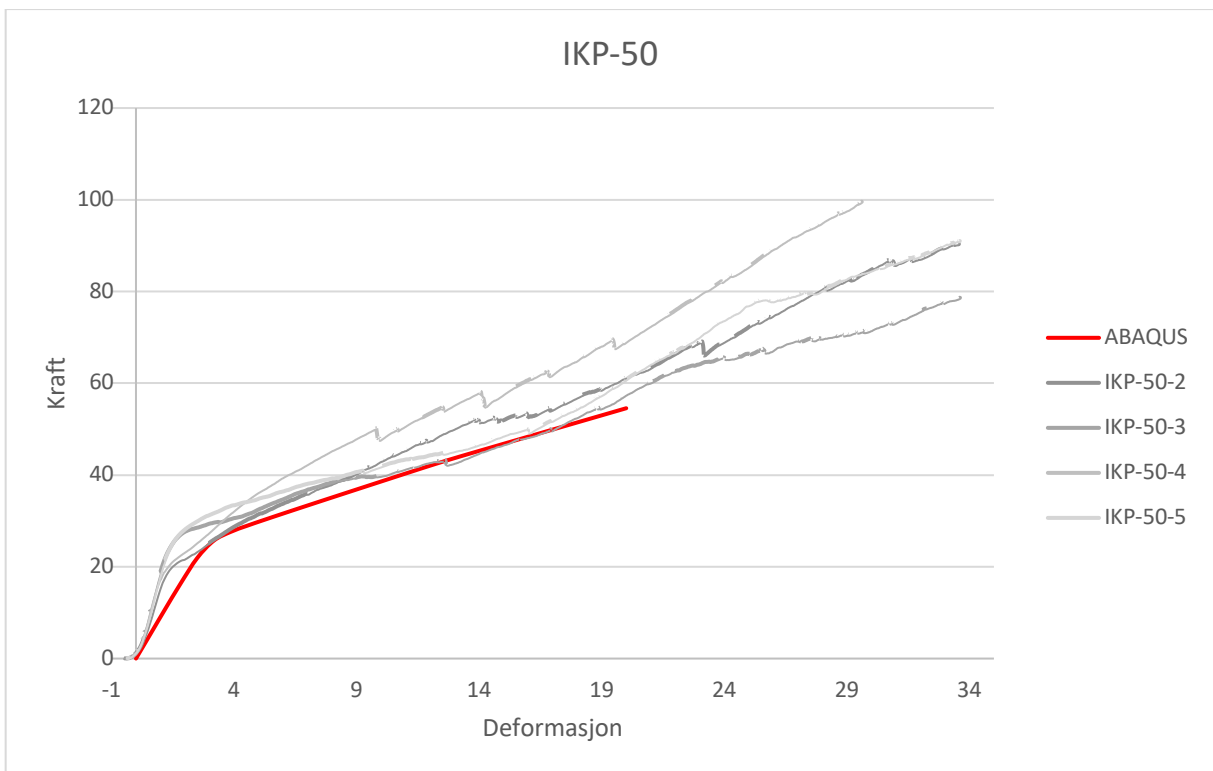
4.5.2 Ikke-uniformt belastede prøvestykker



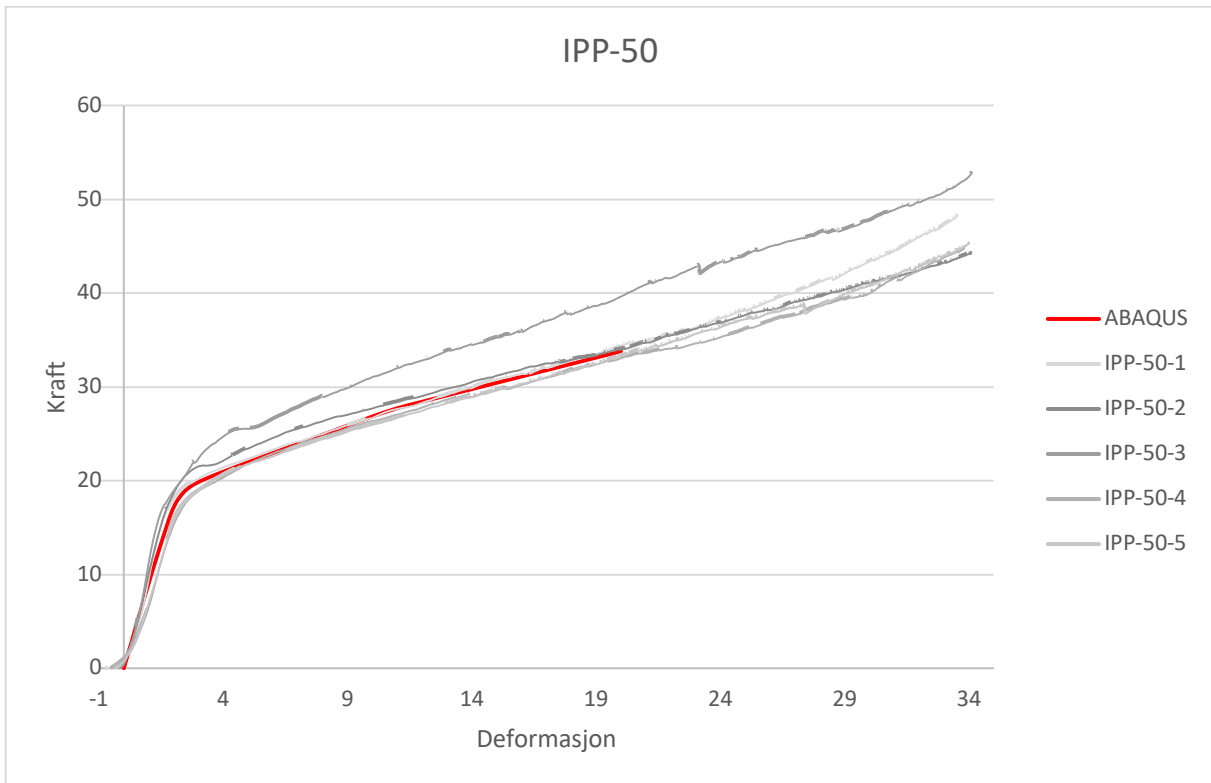
Figur 59: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for IKS-50



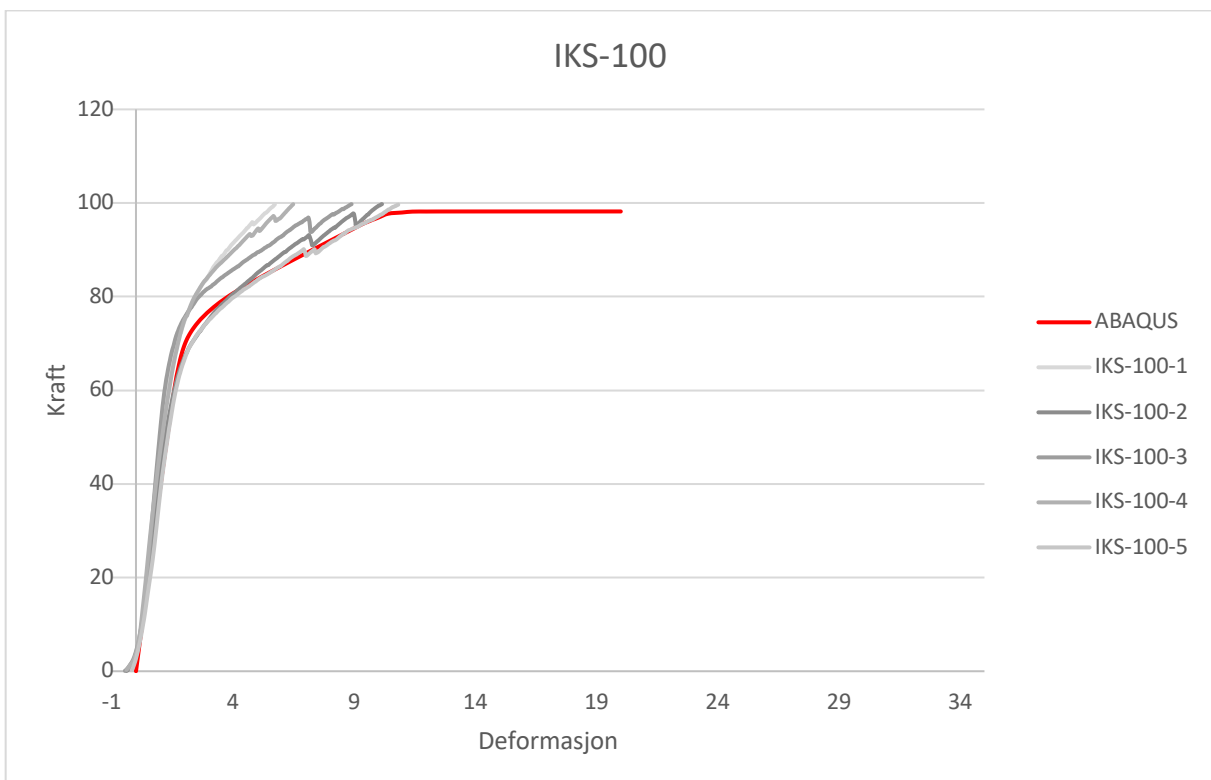
Figur 60: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for IPS-50



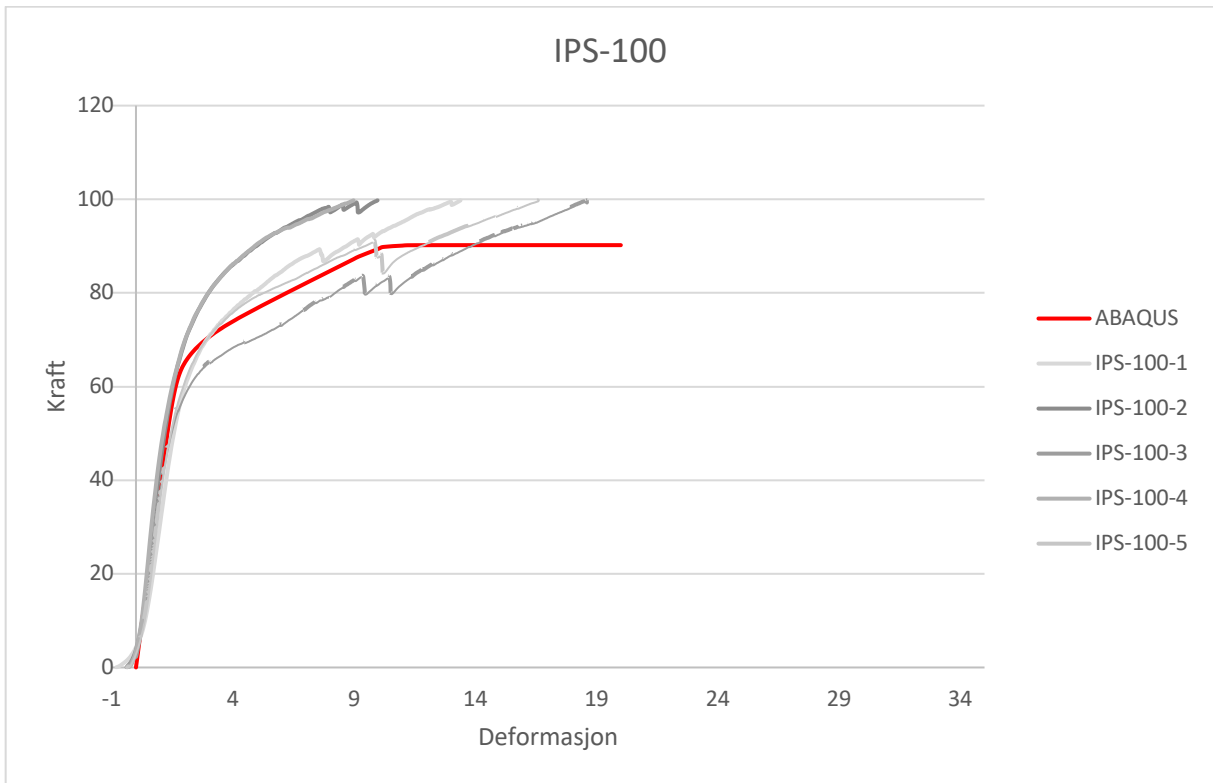
Figur 61: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for IKP-50



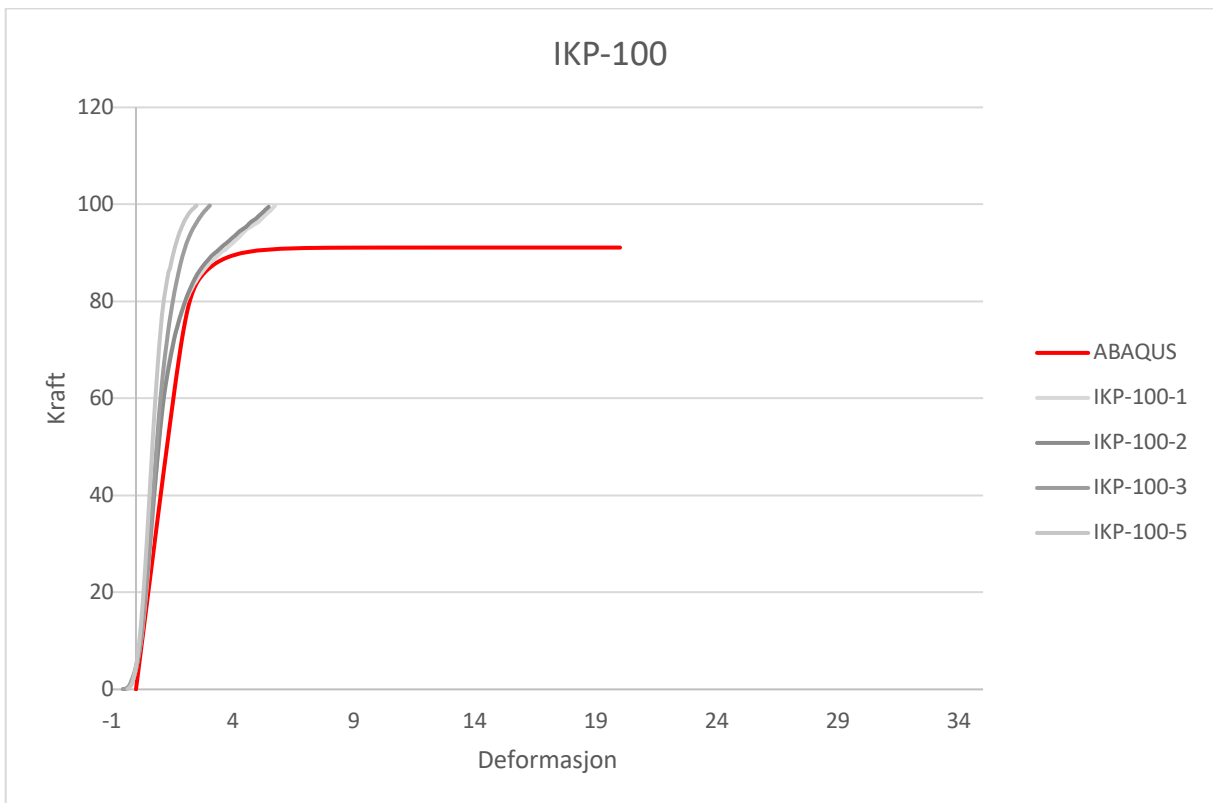
Figur 62: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for IPP-50



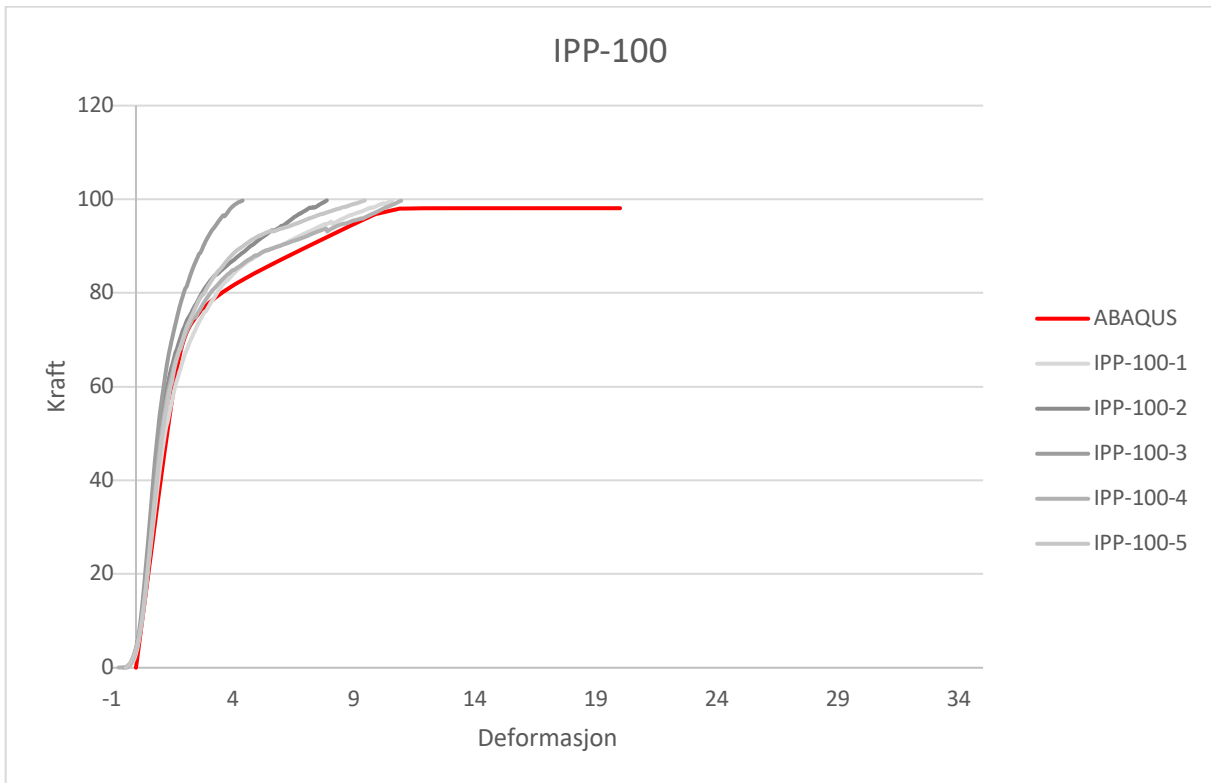
Figur 63: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for IKS-100



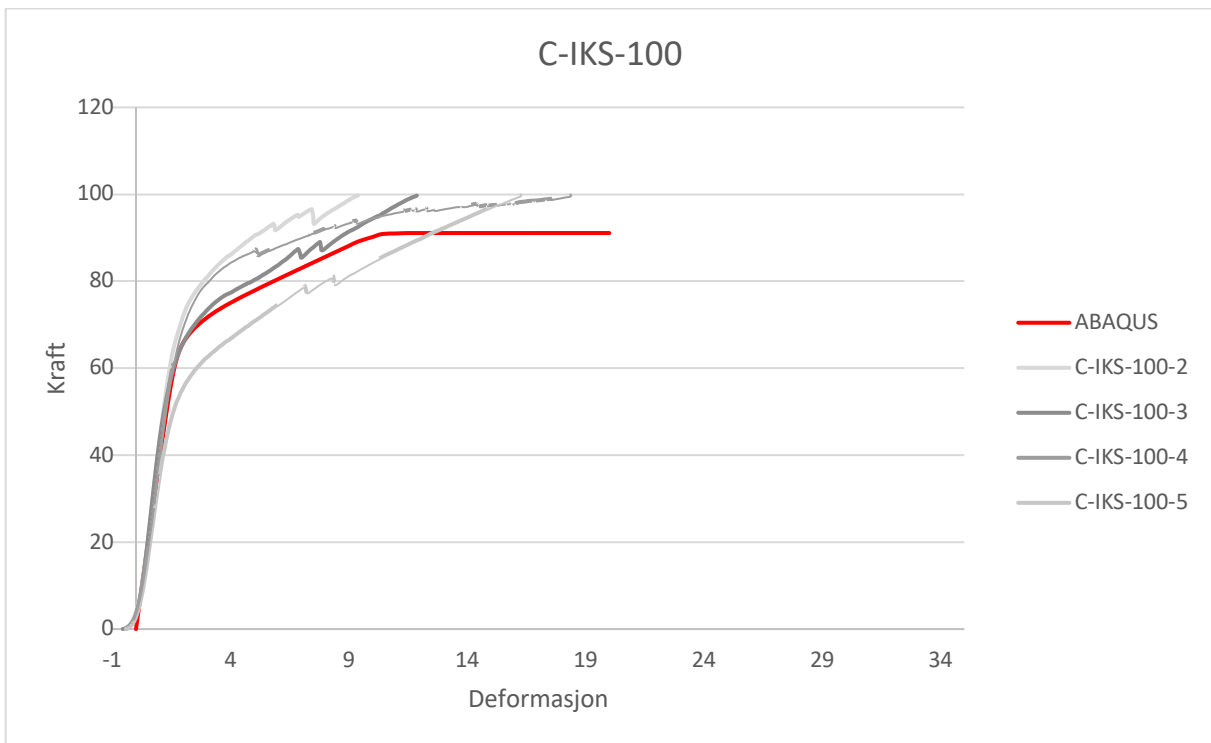
Figur 64: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for IPS-100



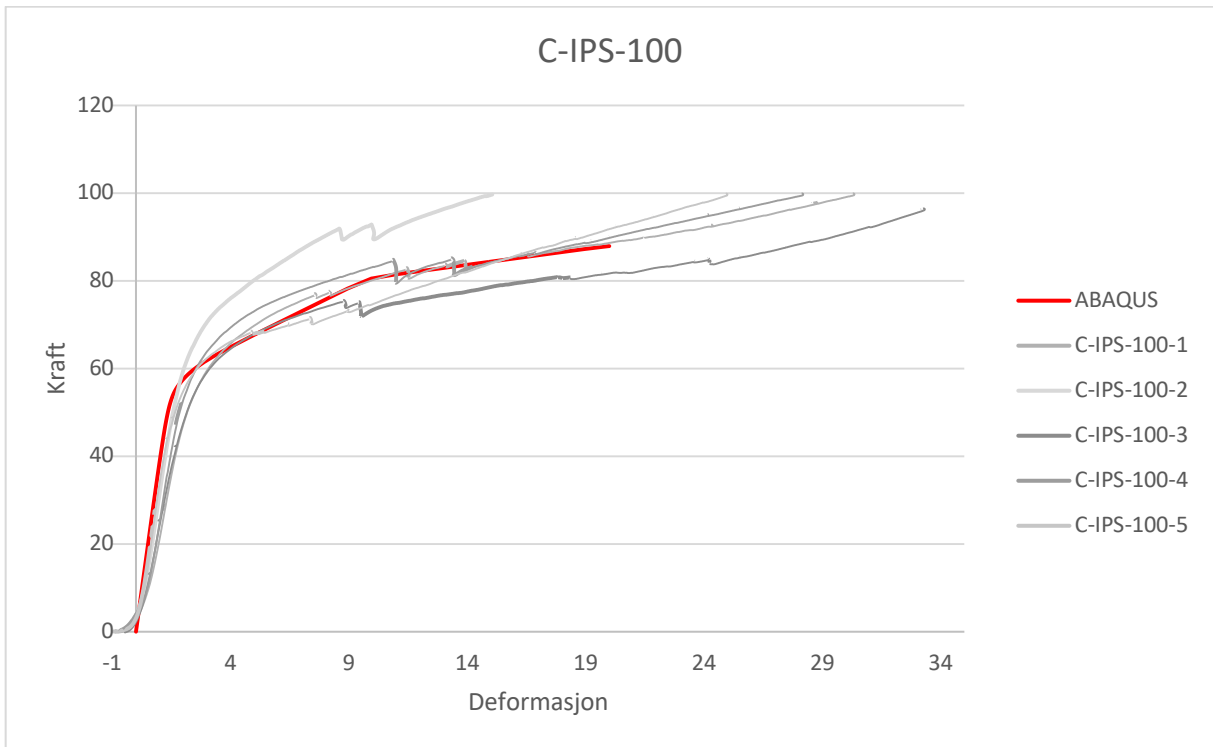
Figur 65: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for IKP-100



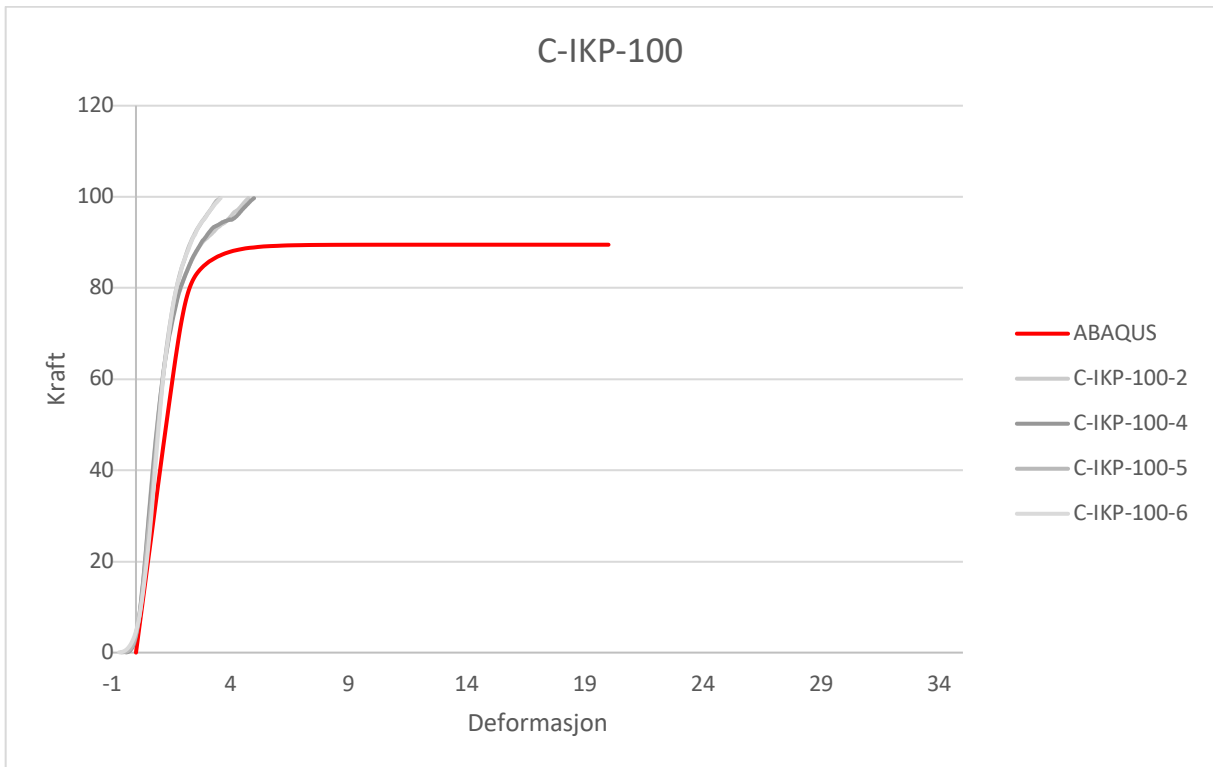
Figur 66: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for IPP-100



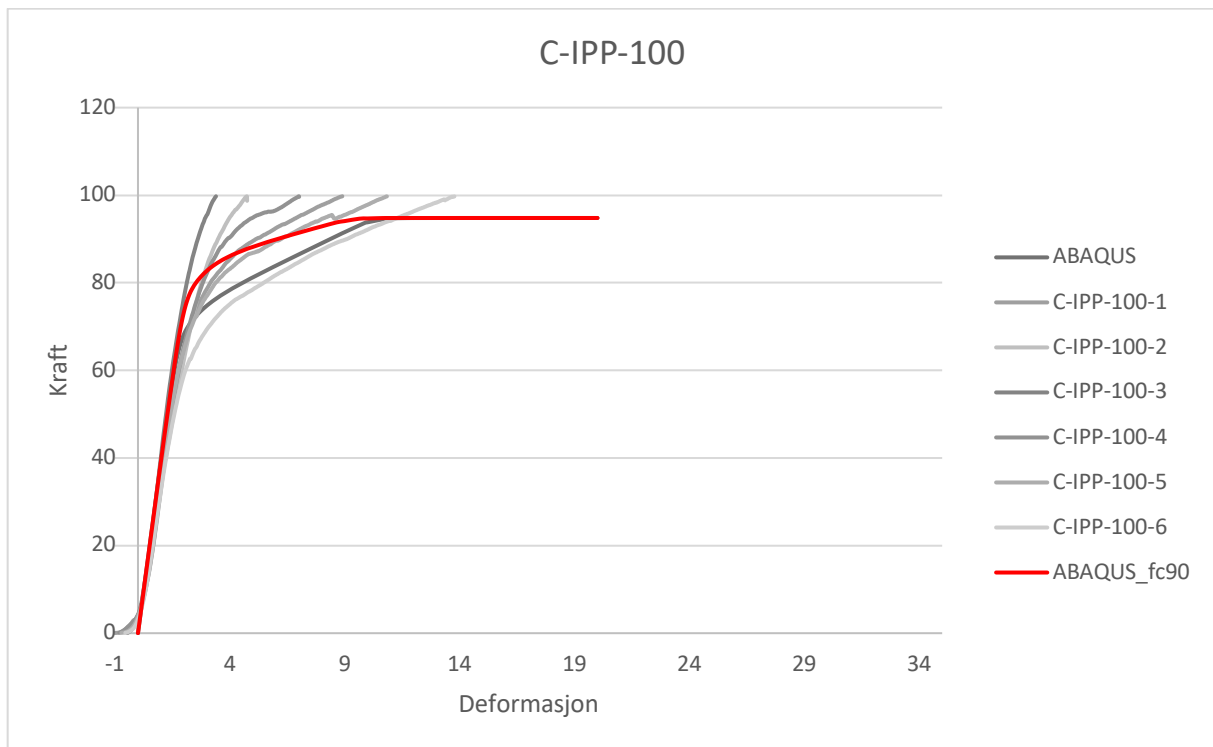
Figur 67: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for C-IKS-100



Figur 68: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for C-IPS-100

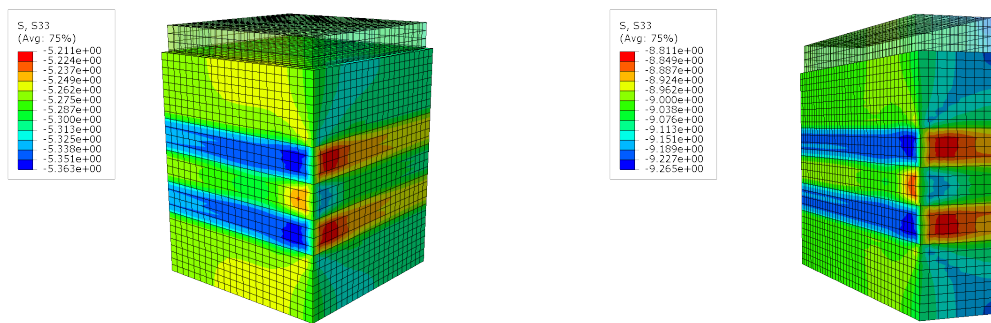


Figur 69: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for C-IKP-100



Figur 70: Kraft-/deformasjonskurve fra ABAQUS for C-IPP-100

4.6 Resultater for modellering av Schweigler et al sine eksperimentelle forsøk



Figur 71: Full surface tests (t.v) og W80-F140-ww-cen (t.h)

Gjennomsnittsverdien av $k_{p,ekv}$ for forsøkene til Troller og Dalheim og Bjerkeng (7, 11):

Testserie	$k_{p,ekv,2,5\%}$	$k_{p,ekv,10\%}$	$k_{p,ekv,20\%}$
Troller	0,97	1,30	1,68
Dalheim og Bjerkeng	0,90	1,16	1,35
Gjennomsnitt	0,94	1,23	1,52

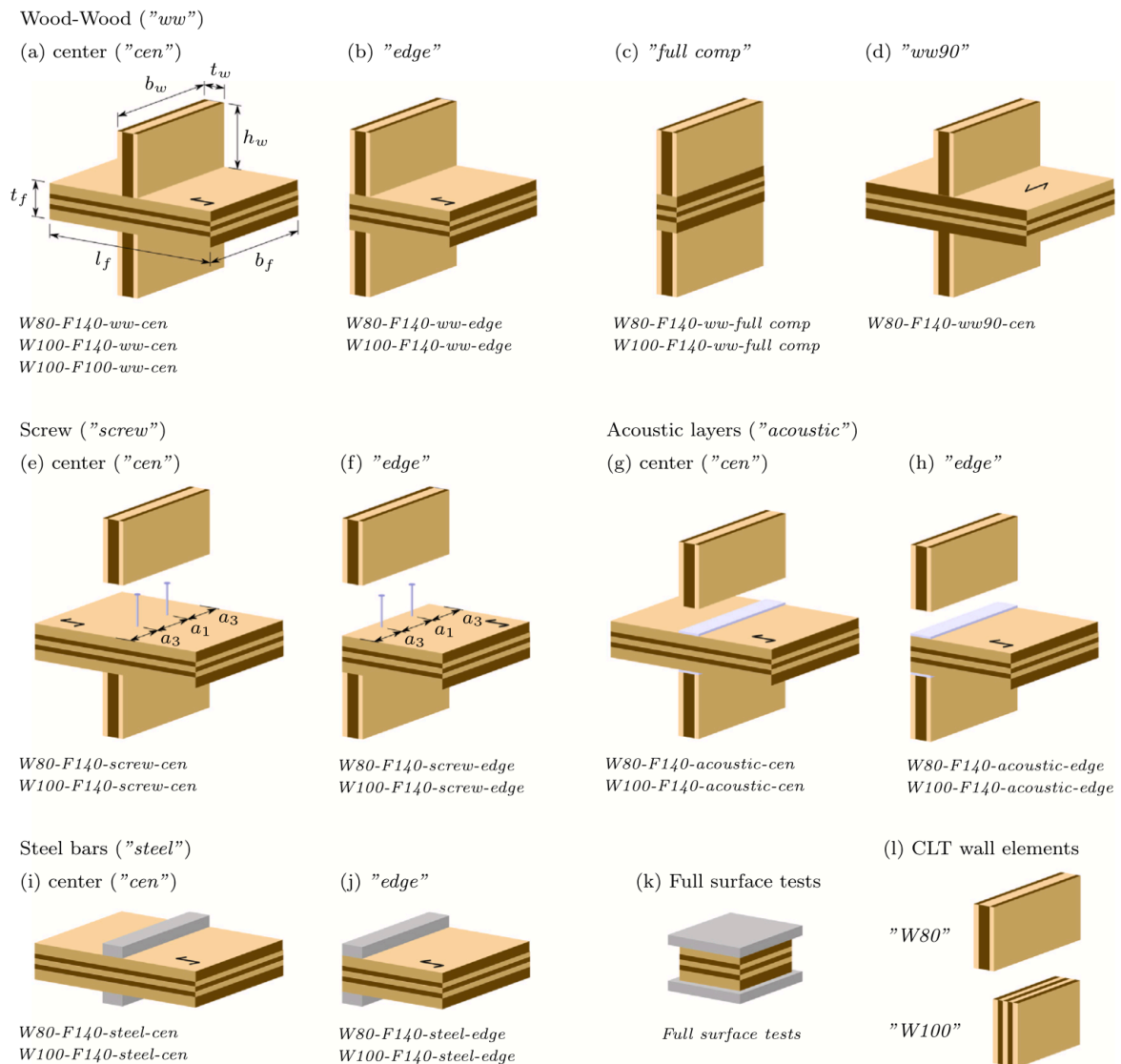
Tabell 37: Beregnet $k_{p,ekv}$ for Troller og Dalheim og Bjerkeng sine forsøk samlet

Tabell 38 viser dimensjonene på FEM-modellene. Merk at kun $\frac{1}{4}$ av arealet er modellert, så de eksperimentelle prøvestykkene har dobbel bredde og lengde.

Testserie	Dimensjoner på modellen		
	b [mm]	l [mm]	h [mm]
W80-F140-ww-cen	175	40	140
W80-F140-ww-edge	175	40	140
W80-F140-acoustic-cen	175	40	140
W80-F140-acoustic-edge	175	40	140
W80-F140-ww-full comp	175	40	140
W80-F140-ww90-cen	175	40	140
W80-F140-steel-cen	175	40	140
W80-F140-steel-edge	175	40	140
W100-F140-ww-cen	125	50	140
W100-F140-ww-edge	125	50	140
W100-F140-acoustic-cen	125	50	140
W100-F140-acoustic-edge	125	50	140
W100-F140-ww-full comp	125	50	140
W100-F140-steel-cen	125	50	140
W100-F140-steel-edge	125	50	140
Full surface tests	100	100	140

Tabell 38: Dimensjoner på prøvestykkene testet av Schweigler et al

Figur 72 viser de forskjellige testoppsettene. Merk at materiale som ikke er rett under vegg ikke er tatt med i FEM-modellene. Testoppsett som involverer skruer er heller ikke studert i ABAQUS.



Figur 72: Testoppsett for Schweigler et al. Kilde: Schweigler et al (1)

Tabell 39 viser trykkfasthet og spenninger ved 2,5%-, 10%- og 20%-tøyning for de eksperimentelle forsøkene utført av Schweigler et al og modelleringene.

Testserie	Experiment	FEM	Experiment	FEM	Experiment	FEM	Experiment	FEM
	$\sigma_{h,1\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{h,1\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{2,5\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{2,5\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{5\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{5\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{10\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{10\%}$ [N/mm ²]
W80-F140-ww-cen	6,22	6,01	6,46	6,05	7,67	6,86	9,19	8,25
W80-F140-ww-edge	5,07	4,90	5,14	5,02	5,99	5,65	6,76	6,79
W80-F140-acoustic-cen	5,61	5,38	4,47	5,50	6,86	6,21	8,44	7,48
W80-F140-acoustic-edge	4,79	4,65	4,73	4,77	5,73	5,36	6,76	6,43
W80-F140-ww-full comp	3,66	3,56	3,72	3,70	4,07	4,15	4,57	4,96

W80-F140-ww90-cen	4,55	4,42	4,65	4,55	4,93	5,11	5,33	6,12
W80-F140-steel-cen	5,76	5,57	6,10	5,63	7,05	6,37	8,36	7,66
W80-F140-steel-edge	4,57	4,44	4,69	4,56	5,23	5,13	5,68	6,15
W100-F140-ww-cen	5,84	5,78	5,88	5,70	6,71	6,43	7,89	7,77
W100-F140-ww-edge	4,53	4,51	4,50	4,53	5,17	5,08	5,84	6,09
W100-F140-acoustic-cen	5,17	5,11	5,04	5,13	6,10	5,75	7,48	6,92
W100-F140-acoustic-edge	4,28	4,27	4,12	4,29	4,91	4,81	5,71	5,77
W100-F140-ww-full comp	3,30	3,25	3,34	3,36	3,66	3,76	4,21	4,48
W100-F140-steel-cen	5,04	4,98	5,28	5,01	6,22	5,61	7,62	6,76
W100-F140-steel-edge	4,24	4,24	4,32	4,26	4,90	4,77	5,59	5,71
Full surface tests	3,56	3,59	3,64	3,61	3,99	4,04	4,40	4,82
mean	4,76	4,67	4,76	4,73	5,57	5,32	6,49	6,39

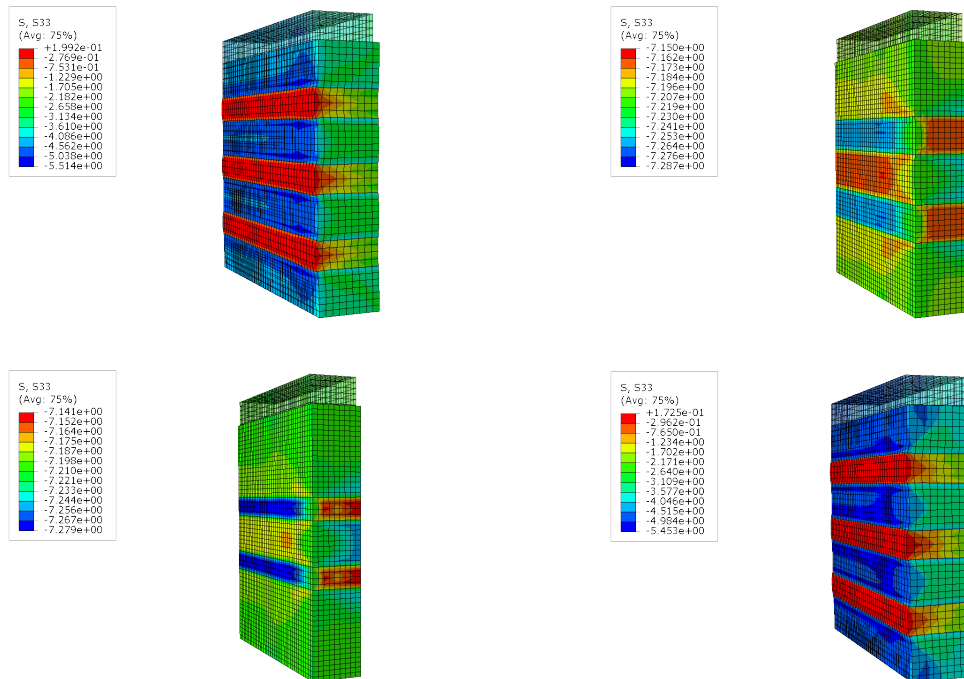
Tabell 39: Data - Schweigler et al

Tabell 40 viser $k_{p,ekv}$ -verdiene for alle seriene.

Testserie	Experiment		FEM		Experiment		FEM	
	$k_{p,ekv,2,5\%}$	$k_{p,ekv,2,5\%}$	$k_{p,ekv,5\%}$	$k_{p,ekv,5\%}$	$k_{p,ekv,10\%}$	$k_{p,ekv,10\%}$	$k_{p,ekv,10\%}$	$k_{p,ekv,10\%}$
W80-F140-ww-cen	1,04	1,01	1,23	1,14	1,48	1,37		
W80-F140-ww-edge	1,01	1,02	1,18	1,15	1,33	1,39		
W80-F140-acoustic-cen	0,80	1,02	1,22	1,15	1,50	1,39		
W80-F140-acoustic-edge	0,99	1,03	1,20	1,15	1,41	1,38		
W80-F140-ww-full comp	1,02	1,04	1,11	1,17	1,25	1,39		
W80-F140-ww90-cen	1,02	1,03	1,08	1,16	1,17	1,38		
W80-F140-steel-cen	1,06	1,01	1,22	1,14	1,45	1,38		
W80-F140-steel-edge	1,03	1,03	1,14	1,16	1,24	1,39		
W100-F140-ww-cen	1,01	0,99	1,15	1,11	1,35	1,34		
W100-F140-ww-edge	0,99	1,00	1,14	1,13	1,29	1,35		
W100-F140-acoustic-cen	0,97	1,00	1,18	1,13	1,45	1,35		
W100-F140-acoustic-edge	0,96	1,00	1,15	1,13	1,33	1,35		
W100-F140-ww-full comp	1,01	1,03	1,11	1,16	1,28	1,38		
W100-F140-steel-cen	1,05	1,01	1,23	1,13	1,51	1,36		
W100-F140-steel-edge	1,02	1,00	1,16	1,13	1,32	1,35		
Full surface tests	1,02	1,01	1,12	1,13	1,24	1,34		
mean	1,00	1,01	1,16	1,14	1,35	1,37		

Tabell 40: Beregnet $k_{p,ekv}$ for Schweigler et al sine eksperimentelle forsøk og $k_{p,ekv}$ for resultater fra ABAQUS

4.7 Resultater for modellering av 7 lags CLT-elementer



Figur 73: "180" (o.v), "220" (o.h), "240" (n.v) og "180_T15 og T22" (n.h)

I alle modellene er trykkfastheten satt lik gjennomsnittet av trykkfastheten til alle testseriene utført av Schweigler et al ($f_{c,90} = 4,76 \text{ N/mm}^2$), og spenningene ved 2,5%-, 10%- og 20%-tøyning er funnet på samme måte som for modelleringen av Schweigler et al (1). Alle modellene har tverrsnittsareal lik serien W80-F140-ww-cen.

«Referanse» er en modell tilsvarende serien W80-F140-ww-cen, men nå med en annen trykkfasthet og spenninger ved 2,5%-, 10%- og 20%-tøyning.

«180» har høyde 180 mm. Oppbygningen av lagene i denne modellen er 30-20-30-20-30-20-30 (høyde i mm), hvert lag orientert 90 grader på hverandre.

«220» har høyde 220 mm, og oppbygningen er 30-30-20-30-20-30-30 (høyde i mm). Lag med samme høyde har samme orientering (lag med høyde 20 mm snudd 90 grader i forhold til lag med høyde 30 mm).

«240» har høyde 240 mm, og oppbygningen er 40-40-20-40-20-40-40 (høyde i mm). Lag med samme høyde har samme orientering (lag med høyde 20 mm snudd 90 grader i forhold til lag med høyde 40 mm).

«180_T15 og T22» har høyde 180 mm. Oppbygningen av lagene i denne modellen er 30-20-30-20-30-20-30 (høyde i mm), hvert lag orientert 90 grader på hverandre. I denne modellen har lag med høyde 30 mm materialeegenskaper lik klassifiseringsklasse T22, og lag med høyde 20 mm har materialeegenskaper lik klassifiseringsklasse T15.

Tabell 41 og tabell 42 viser resultatene fra modelleringen.

Testserie	$E_{c,90}$ [N/mm ²]	$\sigma_{h,1\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{2,5\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{10\%}$ [N/mm ²]	$\sigma_{20\%}$ [N/mm ²]
«Referanse»	435	4,58	4,67	5,97	7,21
«180»	452	4,56	4,67	5,96	7,21
«220»	422	4,61	4,67	5,97	7,21
«240»	227	4,82	4,64	5,96	7,21
«180_T15 & T22»	446	4,51	4,63	5,95	7,21

Tabell 41: Data - 7-lags CLT

Testserie	$k_{p,ekv,2,5\%}$	$k_{p,ekv,10\%}$	$k_{p,ekv,20\%}$
Referanse	1,02	1,30	1,58
180	1,02	1,31	1,58
220	1,01	1,29	1,56
240	0,96	1,24	1,50
180_T15 & T22	1,03	1,32	1,60
mean	1,01	1,29	1,56

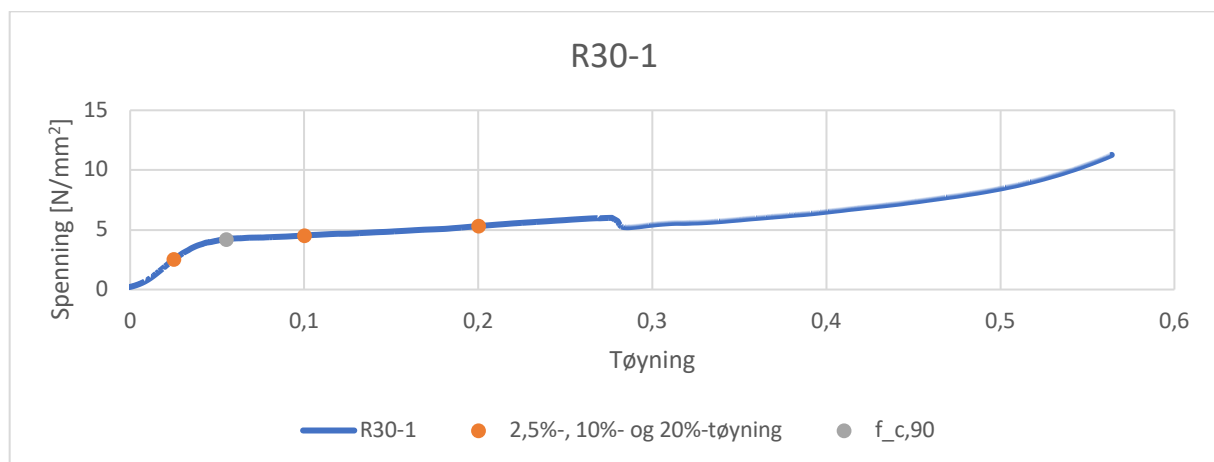
Tabell 42: Beregnet $k_{p,ekv}$ for 7-lags CLT

5. Diskusjon

For de uniformt belastede prøvestykkene testet av Troller er resultatene i bra samsvar med produsentens oppgitte verdier (11). Moelven, produsent av prøvestykkene, oppgir trematerialets karakteristiske trykkapasitet vinkelrett på fiberretningen til $2,7 \text{ N/mm}^2$. Dette kan sammenlignes direkte med 5-prosentilen for trykkfastheten fra R30-R150 som gir en karakteristisk trykkapasitet på $2,84 \text{ N/mm}^2$. Dette viser at testoppsettet fungerer godt.

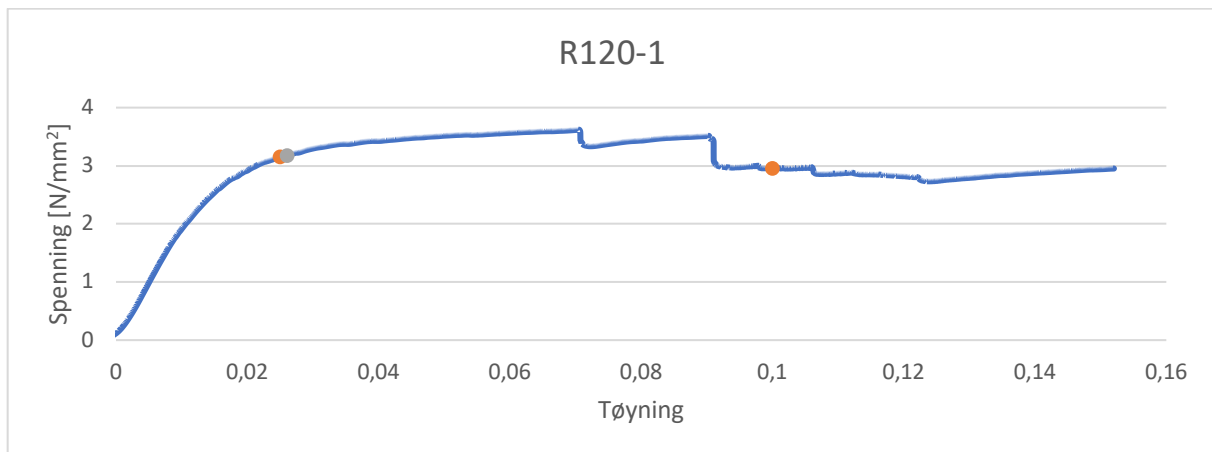
Også for de uniformt belastede prøvestykkene testet av Dalheim og Bjerkeng er resultatene i bra samsvar med produsentens oppgitte verdier (7). Splitkon, produsent av prøvestykkene, oppgir trematerialets karakteristiske trykkapasitet vinkelrett på fiberretningen til 3 N/mm^2 . 5-prosentilen for trykkfasthet fra U50 og U100 som gir en karakteristisk trykkapasitet på $3,40 \text{ N/mm}^2$.

I teorien skal trykkfastheten $\sigma_{h,1\%}$ og spenningene ved 2,5%-tøyning være like. Dette stemmer nokså godt for testserier med høyde minimum 90 mm, men for testserier med lavere høyde stemmer dette mindre godt. For R30 er det store forskjeller, og trykkfastheten er nesten det dobbelte av spenningene ved 2,5%-tøyning. Utrekning av trykkfastheten baserer seg på CEN-modellen og er avhengig av E-modulen, mens 2,5%-tøyning er hentet direkte fra spenning-/tøyningskurven. E-modulen er igjen avhengig av høyden til prøvestykket, med økende E-modul for økende høyde. Det kan derfor være at for lave prøvestykker blir E-modulen for liten ved beregning etter CEN-modellen, og antagelsen om at trykkfastheten tilsvarer 2,5%-tøyning blir feil. Det er mulig man derfor bør ha et krav for minimum høyde på prøvestykker i studier tilsvarende denne oppgaven.



Figur 74: Spenning-/tøyningskurve for R30-1

I enkelte serier er relevante spenninger (spenninger ved 10%- eller 20%- tøyning) i områder hvor det er et kapasitetsfall pga bruddmekanismer. R120-1 er et slikt tilfelle. Her er verdien på $\sigma_{10\%}$ hentet ut etter at prøvestykket har fått revet av en stor bit av materialet. Spenningen er derfor feil. Med en mer selektiv utvelgelse av testverdier, kan man om mulig få bedre resultater. Dette er det ikke gjort i denne oppgaven, da mengden testverdier er begrenset.



Figur 75: Spenning-/tøyingskurve for R120-1

Det er usikkert om man i kommende Eurokode 5 ønsker å beregne k_p som forholdet mellom karakteristisk trykkfasthet og gjennomsnittsverdien for spenningene, eller forholdet mellom karakteristisk trykkfasthet og 5-prosentilen til spenningene. Bruker man 5-prosentilene er man avhengig å ha tilstrekkelig antall tester. 5-prosentilen beregnes som følger:

$$5\% = \exp(y - k_s(n) * s_y)$$

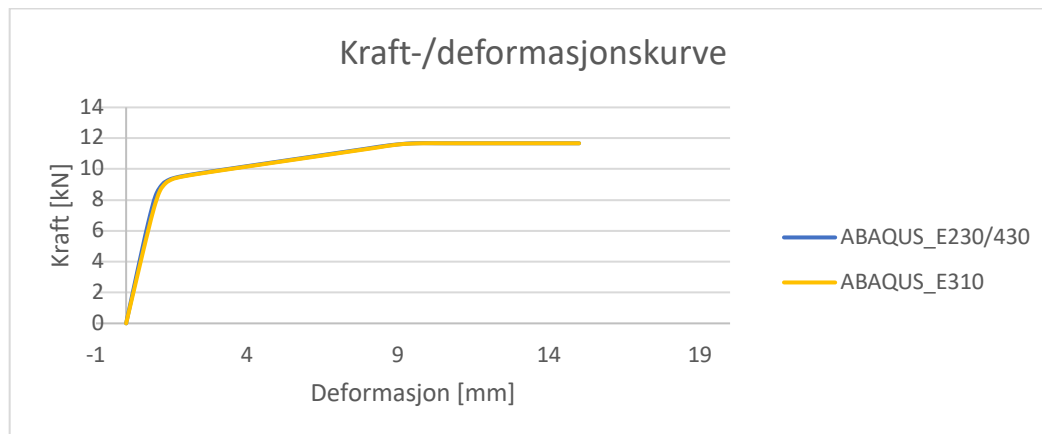
Parameteren er altså avhengig av standardavviket og antall tester. $k_s(n)$ er parameteren som tar for seg antall tester, og den varierer fra 3,15 for 3 tester til 1,64 for uendelig mange tester. Dvs verdien på 5-prosentilen øker med økende antall tester. Dette gir utslag i at 5-prosentilen kan være falsk lav i enkelte/flere serier med få testserier. Det er usikkert hvor mange tester som bør være minimum for at 5-prosentilen kan brukes. Uansett er k_p kun et forholdstall og derfor er $k_{p,ekv}$ beregnet fra forholdet mellom karakteristisk trykkfasthet og testenenes gjennomsnittsverdi av spenningene ved 2,5%-, 10%- og 20%-tøyning.

I Troller sine forsøk begynte lastapplikatoren å skjære seg ned i materialet i noen av prøvestykkene i Lu150- og Lu200-serien. Lu150 har en total lengde på 390 mm. Denne lokale bruddmekanismen finnes igjen i alle testseriene til Dalheim og Bjerkeng, særlig for testserier med en lastapplikator på 50x50 mm. Lengden på prøvestykkene brukt av Dalheim og Bjerkeng er 400 mm. Det kan derfor virke som om denne lokale bruddmekanismen vil være dimensjonerende ved en lengde på ca 400 mm og lengre.

I modelleringen i ABAQUS er det gjort en forenkling ved at modellen kun ser på materiale rett under lastapplikatoren. Denne forenklingen er basert på de lokale og globale bruddmekanismene som oppsto i de eksperimentelle forsøkene. Ved korte lengder på prøvestykkene ble tremateriale rundt lastapplikatoren løftet opp og splittet langs fiberretningen. Oppsplittet materiale vil ikke lenger ha betydning for styrken, da Hammock-effekten ikke lenger gjelder. I prøvestykker med lengde >390 mm skjærer lastapplikatoren seg inn i prøvestykkene og materiale rundt lastapplikatoren vil heller ikke her ha betydning for styrken. Men materiale som ikke er splittet eller skåret over gir fremdeles styrke. Hadde materialet på sidene ikke gitt noen effekt ville testresultatene for de uniformt belastede prøvestykkene vært lik testresultatene for de ikke-uniformt belastede prøvestykkene. Derfor

er det viktig å påpeke at modelleringsmodellen er en forenkling, og at reell oppførsel er mye mer komplisert.

Figur 76 viser kraft-/deformasjonskurve for to FEM-modeller. *ABAQUS_E230/430* er modellering av 3-lags CLT, hvor $E_{c,90}$ er 430 N/mm² i de ytterste lagene og 230 N/mm² i laget i midten. Verdiene er hentet fra datablad levert av Splitkon. *ABAQUS_E310* har samme $E_{c,90}$ i alle lagene, og er beregnet fra CEN-modellen til 310 N/mm². Figuren viser at FEM-modellen fungerer både for verdier oppgitt av leverandør av prøvestykkene og beregnet verdi ved bruk av CEN-modellen.



Figur 76: Sammenligning av FEM-modell basert på datablad og FEM-modell basert på CEN-modellen

I tabell 40 er $k_{p,ekv}$ regnet ut for både de eksperimentelle forsøkene gjort av Schweigler et al og resultatene fra modelleringen av forsøkene (1). Gjennomsnittsverdien av utregnet $k_{p,ekv}$ er sammenlignet og resultatene er svært like. I Schweigler et al sine eksperimentelle forsøk er prøvestykkene studert ved 2,5%-, 5%- og 10%-tøyning. Selv om modellen i ABAQUS er basert på spenninger ved 2,5%-, 10%- og 20%-tøyning, stemmer også spenningene ved 5%-tøyningen svært godt. Dette viser at modellen fungerer godt, selv i områder mellom 2,5%-, 10%- og 20%-tøyning.

Nøyaktigheten i påfølgende tabeller tar utgangspunkt i kommende Eurokode 5 sine verdier for $k_{p,ekv}$ (= 1, 1,46 og 1,9) og viser hvor mange prosent testresultatene avviker fra disse.

Tabell 43 og tabell 44 presenterer beregnet $k_{p,ekv}$ -verdi fra Troller sine forsøk (11). Det fremkommer at $k_{p,ekv}$ -verdiene fra forsøk er konsekvent lavere enn hva kommende Eurokode 5 foreslår, med økende differanse og unøyaktig jo større tøyning. Stort avvik for R30-serien som kan begrunnes med at prøvestykket i denne serien er for lavt.

Testserie	$k_{p,ekv,2,5\%}$	$k_{p,ekv,10\%}$	$k_{p,ekv,20\%}$
R30	0,58	1,08	1,28
R60	0,92	1,21	1,36
R90	0,95	1,13	1,20
R120	0,97	1,06	
R150	1,00	1,11	
mean	0,88	1,12	1,28

Nøyaktighet	11,6 %	23,4 %	32,5 %
--------------------	--------	--------	--------

Tabell 43: Beregnede $k_{p,ekv}$ -verdier med nøyaktighet for R-serier

Testserie	$k_{p,ekv,2,5\%}$	$k_{p,ekv,10\%}$	$k_{p,ekv,20\%}$
Lu30	0,91	1,20	1,42
Lu50	0,85	1,13	1,26
Lu70	0,87	1,21	1,42
Lu100	0,83	1,18	1,30
Lu150	0,91	1,19	1,37
Lu200	0,79	1,20	1,46
mean	0,86	1,19	1,37
Nøyaktighet	14,0 %	18,7 %	27,8 %

Tabell 44: Beregnede $k_{p,ekv}$ -verdier med nøyaktighet for Lu-serier

Tabell 45, tabell 46 og tabell 47 presenterer beregnet $k_{p,ekv}$ -verdi fra Dalheim og Bjerkeng sine forsøk (7).

Tabell 45 viser serier med lastareal 50x50 mm. Ved 2,5%-tøyning korrelerer $k_{p,ekv}$ -verdiene svært godt med kommende Eurokode 5 (12). Ved 10%-tøyning har testseriene med kontinuerlig opplager (IKS-50 og IKP-50) en høyere verdi enn standarden, mens seriene med punkttopplagring (IPS-50 og IPP-50) har lavere verdi. Ved 20%-tøyning er det kun IPP-50 som har høyere verdi enn standarden. Nøyaktigheten er relativt god ved 2,5%- og 10%-tøyning, noe dårligere ved 20%-tøyning.

Testserie	$k_{p,ekv,2,5\%}$	$k_{p,ekv,10\%}$	$k_{p,ekv,20\%}$
U50	1,02	1,26	1,58
IKS-50	1,02	1,41	1,58
IPS-50	1,02	1,39	1,61
IKP-50	1,00	1,61	2,32
IPP-50	0,92	1,31	1,66
mean	1,00	1,40	1,75
Nøyaktighet	0,5 %	4,4 %	7,9 %

Tabell 45: Beregnede $k_{p,ekv}$ -verdier med nøyaktighet for prøvestykker hvor arealet til lastapplikatoren er 50x50 mm

Tabell 46 og tabell 47 viser serier med lastareal 100x100 mm. Det mangler verdier ved 20%-tøyning, bortsett fra for C-IPS-100, pga at kompresjonsmaskinen ikke hadde nok kapasitet til å skape disse tøyningene. Av tabellen fremkommer det at $k_{p,ekv}$ -verdiene fra forsøkene er konsekvent lavere enn standardens verdier. Nøyaktigheten er god ved 2,5%-tøyning for seriene hvor det er brukt stål-kloss som lastapplikator, og mindre god for serier hvor det er brukt CLT-kloss som lastapplikator. Det kan begrunnes med at CLT-klossen ikke er homogen og kan tilføre testoppsettet flere usikkerheter. Nøyaktigheten er lite god ved 10%- og 20%-tøyning.

Testserie	$k_{p,ekv,2,5\%}$	$k_{p,ekv,10\%}$
U100	1,00	1,25
IKS-100	0,97	1,25
IPS-100	0,96	1,25

IKP-100	0,99	
IPP-100	0,98	1,24
mean	0,98	1,24
Nøyaktighet	1,9 %	14,8 %

Tabell 46: Beregnede $k_{p,ekv}$ -verdier med nøyaktighet for prøvestykker hvor arealet til lastapplikatoren er 100x100 mm

Testserie	$k_{p,ekv,2,5\%}$	$k_{p,ekv,10\%}$	$k_{p,ekv,20\%}$
C-IKS-100	0,97	1,25	
C-IPS-100	0,90	1,23	1,34
C-IPP-100	0,87	1,12	
C-IKP-100	0,98		
mean	0,93	1,20	1,34
Nøyaktighet	7,1 %	18,0 %	29,4 %

Tabell 47: Beregnede $k_{p,ekv}$ -verdier med nøyaktighet for prøvestykker hvor lastapplikatoren er en CLT-kloss

Tabell 48 og tabell 49 viser beregnet $k_{p,ekv}$ -verdi fra ABAQUS-modellene tilsvarende Schweigler et al sine forsøk. Her er nøyaktigheten svært god.

Testserie	$k_{p,ekv,2,5\%}$	$k_{p,ekv,10\%}$
W80-F140-ww-cen	1,01	1,37
W80-F140-ww-edge	1,02	1,39
W80-F140-acoustic-cen	1,02	1,39
W80-F140-acoustic-edge	1,03	1,38
W80-F140-ww-full comp	1,04	1,39
W80-F140-ww90-cen	1,03	1,38
W80-F140-steel-cen	1,01	1,38
W80-F140-steel-edge	1,03	1,39
mean	1,02	1,38
Nøyaktighet	-2,3 %	5,2 %

Tabell 48: Beregnede $k_{p,ekv}$ -verdier med nøyaktighet for FEM-modell av Schweigler et al sine forsøk

Testserie	$k_{p,ekv,2,5\%}$	$k_{p,ekv,10\%}$
W100-F140-ww-cen	0,99	1,34
W100-F140-ww-edge	1,00	1,35
W100-F140-acoustic-cen	1,00	1,35
W100-F140-acoustic-edge	1,00	1,35
W100-F140-ww-full comp	1,03	1,38
W100-F140-steel-cen	1,01	1,36
W100-F140-steel-edge	1,00	1,35
Full surface tests	1,01	1,34
mean	1,01	1,35
Nøyaktighet	-0,6 %	7,3 %

Tabell 49: Beregnede $k_{p,ekv}$ -verdier med nøyaktighet for FEM-modell av Schweigler et al sine forsøk

Tabell 50 viser beregnet $k_{p,ekv}$ -verdi fra ABAQUS-modellene med 7-lag CLT. Her er nøyaktigheten svært god ved 2,5%-tøyningen. Mindre god ved 10%- og 20%-tøyning. Disse

verdiene er ikke tatt med i endelig utregning av $k_{p,ekv}$ -verdiene og k_p -verdiene da disse FEM-modellene ikke kan verifiseres.

Testserie	$k_{p,ekv,2,5\%}$	$k_{p,ekv,10\%}$	$k_{p,ekv,20\%}$
Referanse	1,02	1,30	1,58
180	1,02	1,31	1,58
220	1,01	1,29	1,56
240	0,96	1,24	1,50
180_T15 & T22	1,03	1,32	1,60
mean	1,01	1,29	1,56
Nøyaktighet	-0,9 %	11,5 %	17,7 %

Tabell 50: Beregnede $k_{p,ekv}$ -verdier med nøyaktighet for FEM-modeller med 7-lags CLT

Tabell 51 viser gjennomsnittet av $k_{p,ekv}$ -verdiene til alle testseriene, foruten 7 lags CLT. Trenden er at nøyaktigheten er nokså god for lave tøyninger, men unøyaktigheten øker med økende tøyning. Merk at $k_{p,ekv}$ -verdiene er konsekvent lavere enn kommende Eurokode 5 sine foreslåtte verdier (12).

Testserie	$k_{p,ekv,2,5\%}$	$k_{p,ekv,10\%}$	$k_{p,ekv,20\%}$
Troller	0,87	1,16	1,34
Dalheim og Bjerkeng	0,97	1,30	1,68
Schweigler	1,01	1,37	
mean	0,95	1,27	1,51
Nøyaktighet	4,8 %	12,8 %	20,5 %

Tabell 51: Beregnede $k_{p,ekv}$ -verdier med nøyaktighet for alle testseriene

Den kommende Eurokode 5 velger å multiplisere den dimensjonerende trykkfastheten med en k_p -faktor som inneholder $\frac{\gamma_M}{k_{mod}} = \frac{1,3}{0,9} = 1,4$. Dette er gjort for å få karakteristisk trykkfasthet. Tabell ## viser gjennomsnittet av k_p -verdiene til alle testseriene, altså tilsvarende slik kommende Eurokode 5 presenterer verdiene. k_p -verdiene er $k_{p,ekv}$ -verdiene multiplisert med sikkerhetsfaktoren $\frac{\gamma_M}{k_{mod}} = \frac{1,3}{0,9} = 1,4$.

Testserie	$k_{p,2,5\%}$	$k_{p,10\%}$	$k_{p,20\%}$
Troller	1,26	1,67	1,94
Dalheim og Bjerkeng	1,40	1,87	2,43
Schweigler	1,47	1,98	
mean	1,38	1,84	2,18
Nøyaktighet	1,7 %	12,4 %	19,1 %

Tabell 52: Beregnede k_p -verdier med nøyaktighet for alle testseriene

5.1 Videre arbeid

Flere av testseriene mangler verdier ved 10%- og 20%-tøyning pga kompresjonsmaskinens begrensninger. Disse seriene bør derfor gjennomføres på nytt med en kompresjonsmaskin med høyere trykkapasitet enn 100 kN. Det bør også gjennomføres flere tester per serie, slik at man får en bedre representativ verdi. Dette vil også gjøre at verdiene for 5-prosentilen forbedres og muligens kan brukes til utregning av $k_{p,ekv}$ -verdiene.

I denne oppgaven var det i utgangspunktet tenkt å teste 7-lags CLT-elementer tilsvarende testene til Troller og Dalheim og Bjerkeng. Dette lot seg ikke gjøre fordi elementene var for store til at laboratoriet på NTNU klarte å kutte de til. Det bør finnes en måte å kutte elementene slik at FEM-modellen for 7-lags CLT har eksperimentelle forsøk å sammenlignes med. Da kan man evt validere eller forkaste den forenklete modellen.

Det bør også gjøres eksperimentelle forsøk på 7-lags CLT-elementer med ulik oppbygning. Det hadde vært interessant å studere elementer hvor lagene ikke er alternerende 90 grader på hverandre.

Den forenklete FEM-modellen bør utvikles til å beskrive lastspredningen. Den bør også utvikles til å simulere de lokale og globale bruddmekanismene som oppsto i de eksperimentelle forsøkene.

6. Konklusjon

Testresultatene fra de eksperimentelle forsøkene gir grunn til å tro at kommende Eurokode 5 gir for høye verdier for k_p ved 2,5%-, 10%- og 20%-tøyning. Beregnet k_p -verdier i denne oppgaven er henholdsvis 1,7%, 12,4% og 19,1% lavere enn kommende Eurokode 5 sine foreslåtte verdier ved 2,5%-, 10%- og 20%-tøyning. Dette medfører at kommende Eurokode 5 muligens har for høy verdi for dimensjonerende trykkspenning vinkelrett på fiberretningen i CLT-elementer.

Den forenklete FEM-modellen i ABAQUS gir god korrelasjon med de eksperimentelle forsøkene. Den gir også svært gode resultater i modellering av forsøkene gjort av Schweigler et al Derfor er konklusjonen at den forenklete modellen er en god indikator på spenningsnivået som vil oppstå. Men modellen er for enkel og baserer seg på for lite data til at den kan verifiseres som et prosjekteringsverktøy.

7. Kilder

1. Schweigler M, Akter ST, Sabaa S, Bader TK. An experimental study of the stiffness and strength of cross-laminated timber wall-to-floor connections under compression perpendicular to the grain. *Engineering Structures*. 2022;271:114850.
2. Standard Norge. Eurokode 5 — Prosjektering av trekonstruksjoner — Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger. NS-EN1995-1-12010.
3. Akter ST, Schweigler M, Serrano E, Bader TK. A Numerical Study of the Stiffness and Strength of Cross-Laminated Timber Wall-to-Floor Connections under Compression Perpendicular to the Grain. *Buildings*. 2021;11(10):442.
4. Akter ST, Bader TK. Experimental assessment of failure criteria for the interaction of normal stress perpendicular to the grain with rolling shear stress in Norway spruce clear wood. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2020;78(6):1105-23.
5. Dahl K. Mechanical properties of clear wood from Norway spruce. 2009.
6. Brandner R. Cross laminated timber (CLT) in compression perpendicular to plane: Testing, properties, design and recommendations for harmonizing design provisions for structural timber products. *Engineering Structures*. 2018;171:944-60.
7. Dalheim H-K, Bjerkgeng BH. Trykk vinkelrett på fiberretningen i krysslaminerte plater: NTNU; 2022.
8. Leijten AJM. The bearing strength capacity perpendicular to grain of norway spruce – Evaluation of three structural timber design models. *Construction and Building Materials*. 2016;105:528-35.
9. Leijten AJM, Larsen HJ, Van der Put TACM. Structural design for compression strength perpendicular to the grain of timber beams. *Construction and Building Materials*. 2010;24(3):252-7.
10. Serrano E, Enquist B, editors. Compression strength perpendicular to grain in cross-laminated timber (CLT). *WCTE2010*; 2010.
11. Troller JB, editor *Compression Capacity of Timber Sills Loaded Perpendicular to the Grain: Ultimate Limit State (ULS) and Serviceability Limit State (SLS)2014*.
12. CEN/TC 250/SC 5 N 1489. Consolidated draft prEN 1995-1-1 with markups. Eurocode 5: Design of timber structures - Common rules and rules for buildings - Part 1-1: General.
13. Øvrum A. FOKUS på tre: Konstruksjonsvirke 2012 [6000/10/07:[Available from: <http://www.trefokus.no/resources/filer/fokus-pa-tre/43-Konstruksjonsvirke.pdf>.
14. Standard Norge. Trekonstruksjoner - Konstruksjonstre og limtre - Bestemmelse av noen fysiske og mekaniske egenskaper. NS-EN 408:2010+A1:2012. 1 (2012-10-01) ed.
15. Nilsen TS. Numerical modelling of Wood Microstructure. 2015.
16. Standard Norge. Trekonstruksjoner - Beregning og verifisering av karakteristiske verdier. NS-EN 14358:20162016-09-01.

