

# STYRKE OG STIVHET FOR SKRUEFORBINDELSER I MASSIVTRE

STRENGTH AND STIFFNESS VALUES OF CONNECTIONS WITH SELF-TAPPING  
SCREWS IN CROSS LAMINATED TIMBER

ARNE SCHRØDER

UNIVERSITETET FOR MILJØ- OG BIOVITENSKAP  
INSTITUTT FOR MATEMATISKE REALFAG OG TEKNOLOGI  
MASTEROPPGAVE 30 STP. 2013



## Innholdsfortegnelse

Forord .....	3
Sammendrag .....	4
Abstract .....	5
1 Innledning.....	6
1.1 Bakgrunn .....	6
1.1.1 Bygge med massivtre .....	6
1.1.2 Nye studentboliger på Ås .....	6
1.2 Problemstilling.....	10
2 Teori .....	11
2.1 Bruddstyrke i vinkelrette skruer (EC5) .....	11
2.2 Bruddstyrke i skråstilte skruer .....	13
2.3 Hullkantfasthet.....	14
2.4 Uttrekkskapasitet .....	15
2.5 Stivhet i bruksgrensetilstand.....	16
3 Metode.....	19
3.1 Materialer.....	19
3.2 Oppsett av labforsøk.....	20
3.3 Utrekninger og analyser av data .....	23
3.4 Fukt- og densitetsmålinger .....	23
4 Resultater.....	24
4.1 Fukt- og densitetsmålinger .....	24
4.2 Strekkforbindelser .....	25
4.3 Kryssede forbindelser .....	28
5 Diskusjon.....	31
5.1 Densitet.....	31
5.2 Stivhet og kapasitet.....	31

5.3	Metoden – vurdering av feilkilder .....	32
6	Konklusjon .....	34
7	Videre arbeid .....	35
8	Referanser.....	36
9	Vedlegg .....	38
9.1	Vedlegg A – Arbeidlinjer .....	38
9.2	Vedlegg B – detalj, skrueforbindelse .....	58
9.3	Vedlegg C – Elektroniske vedlegg .....	59

## Forord

Denne oppgaven er et resultat av det avsluttende arbeidet i en femårig mastergrad i Byggeteknikk og Arkitektur ved Institutt for Matematiske realfag og Teknologi på Universitetet for Miljø og Biovitenskap. Arbeidet er gjort i løpet av høsten 2013, og har et omfang på 30 studiepoeng.

Tema for oppgaven ble foreslått av min veileder Nils Ivar Bovim, som er ansvarlig for UMBs del i forskningsprosjektet «Wood/Be/Better – Økt bruk av tre i urbane områder» (WBB).

Resultatene fra oppgaven skal inngå i det videre arbeidet med dette prosjektet. WBB har også finansiert alle utgifter i forbindelse med innkjøp av materialer til oppgaven.

Å jobbe med masteroppgaven har vært veldig lærerikt, både rent teoretisk om trekonstruksjoner, og om planlegging og praktisk gjennomføring av forskningsprosjekter. Særlig utfordrende har det vært å finne balansegangen mellom å planlegge grundig, men samtidig ha den fleksibiliteten som kreves når uforutsette ting oppstår. Jeg har for det meste jobbet selvstendig, men jeg vil takke flere mennesker som har bidratt til at jeg kom i mål. For det første Nils Ivar, som har tatt seg tid til et ukentlig møte og har møtt meg med optimisme, kunnskap og nyttige Excel-knep, i tillegg til å dele av sitt omfattende og nyttige kontaktnettverk i trebransjen. Videre retter jeg en takk til Sebastian Knutsen for assistanse på laben på Fløy 5, Even Hoffart for motorsagkyndig arbeid, Andreas Flø for hjelp med måleinstrumenter og Odd Grøthe som sørget for gratis skruer. Sist, men ikke minst, til gode studiekamerater gjennom fem korte år, og spesielt Camilla, som blir med meg videre til ukjent destinasjon når studietida er over.

Ås, desember 2013

Arne Schrøder

## Sammendrag

Bygninger med krysslaminerte massivtreelementer som bærende struktur har de senere år blitt stadig mer utbredt. Byggemåten er fleksibel, rask og miljøvennlig. Materialets lave vekt gjør det imidlertid utfordrende å begrense horisontale bevegelser forårsaket av vind i høye bygninger. Krav til brukernes komfort gjør at disse bevegelsene i mange tilfeller kan bli dimensjonerende for hele bygget. Massivtreelementenes høye stivhet i plateplanet gjør det sannsynlig at mesteparten av horisontalbevegelsene skjer ved glidninger i forbindelsene mellom elementene. Dersom man kan utforme forbindelsene på en måte som holder tilstrekkelig igjen mot glidninger, kan man redusere omfanget av forbindelser, unngå kostbare ekstra forankringer og konstruere høyere bygninger. Det kreves mer kunnskap om egenskapene til mekaniske forbindelser mellom tilstøtende elementer.

Målet med denne masteroppgaven var å undersøke og dokumentere styrke- og stivhetsverdier for forbindelser i massivtre utført med lange, selvborende skruer. Utgangspunktet for forsøkene var gulv-vegg skrueforbindelsene som er benyttet i Palisaden, to boligblokker på Ås som foreløpig er Norges høyeste trebygg. Totalt 40 prøver har blitt trykktestet i laboratorium. Skruene er ført inn med varierende vinkel mellom skrueakse og kraftretning, og med to forskjellige elementtyper.

Labforsøkene viste at stivheten økte dramatisk når vinkelen mellom skrueaksen og kraftretningens normal ble større, og nådde maksimum ved 45 grader. Bruddstyrken var høyest ved 30 grader. Viktigheten av å være bevisst på massivtre lamellens fiberretning i området ved forbinderen er også belyst.

## Abstract

Cross laminated timber (CLT) elements are more and more commonly used as a building material in Norway. It is a flexible, fast and environment friendly way of building. However, since these structures are very light-weighted, it is challenging to limit horizontal movements caused by wind pressure in tall buildings. CLT panels have a high in-plane stiffness value, which makes the behavior of the mechanical connections important when considering such movements. More knowledge is needed about connections in CLT, to make it possible to build taller buildings and to reduce the amount connectors.

The goal of this master's thesis was to examine and document strength and stiffness values for connections with long, self-tapping screws in CLT. The basis for the research is the wall-to-floor connections used in *Palisaden*, two apartment buildings in Ås, which are the tallest wooden buildings in Norway. A total of 40 samples have been tested with push-out tests in a laboratory. The screws were inserted with varying inclination, in two different types of CLT-panels.

The test results show that the connection stiffness increased with decreasing screw-force direction angles, with maximum reached at 45 degrees. The load carrying capacity reached maximum at 30 degrees. The importance of the fiber direction of the lamellas is also discussed.

## 1 Innledning

### 1.1 Bakgrunn

#### 1.1.1 Bygge med massivtre

Massivtre har de siste årene blitt stadig mer benyttet i bygninger. Det er flere grunner til at materialet har fått økt anvendelse. Massivtreelementer er anvendelig som bærende struktur i både gulv-, vegg- og takkonstruksjoner. De er svært lette sammenlignet med konstruksjoner av stål eller betong. Dette, kombinert med muligheten til å «skreddersy» prefabrikerte elementer, gjør monteringen på byggeplass særdeles rask. I tillegg har massivtre gode og forutsigbare branntekniske egenskaper. Det blir også regnet som en miljøvennlig byggemetode, i og med at man bruker relativt store volumer trevirke som lagrer CO<sub>2</sub> i hele byggets levetid. Sist, men ikke minst, er massivtrebygg konkurransedyktige i pris sammenlignet med bygg av andre materialer.

Massivtre består av lameller som er satt sammen til større elementer. Lamellene kan ligge krysslågt lagvis eller stå kantstilt, og er festet til hverandre med lim, skruer, spiker, treplugger eller oppspente stålstag. I krysslimte elementer, som denne oppgaven tar for seg, ligger plankene i sjikt med fiberretningen i 90 graders vinkel i forhold til underliggende sjikt. Elementene består vanligvis av 3 til 9 sjikt som hver kan ha ulik tykkelse.

#### 1.1.2 Nye studentboliger på Ås

Massivtre er også anvendelig i høye hus. I 2013 ble to blokker med studentboliger ferdigstilt på området som kalles *Nye Pentagon* eller *Palisaden* ved Universitetet for Miljø og Biovitenskap (UMB) på Ås (Figur 1). Hver av blokkene er på åtte etasjer, med kun massivtre som bærende element, noe som gjør de til Norges høyeste trebygninger. Massivtreelementene er produsert i Østerrike av Mayr-Melnhof.



Figur 1: Palisaden, studenthybler i 8-etajers massivtreblokker på Ås.



Figur 2: Montering av skrueforbindelser i massivtre, studenthybler i Palisaden i Ås.



I trebygg med så mange etasjer vil vindlast utgjøre en betydelig faktor i dimensjoneringen. Stor høyde kombinert med relativt lav vekt gjør det til en utfordring å begrense horisontale bevegelser forårsaket av vinden. Brukernes komfort avhenger av at slike bevegelser, og spesielt bevegelsenes akselerasjon, ikke er for store. Bevegelser i et massivtrebygg oppstår både på grunn av skjærdeformasjon i elementene, og glidninger i de mekaniske forbindelsene mellom tilstøtende elementer. Selve massivtreelementene har meget høy stivhet i plateplanet, og egner seg derfor godt som avstivende skiver i konstruksjonen. Mye tyder derfor på at forbindelsenes mekaniske egenskaper er desto viktigere for å avgjøre konstruksjonens totale stivhet (Ashtari, 2012). Gjeldende standarder (Eurocode 5) inneholder foreløpig ikke gode nok regler for dimensjonering av slike forbindelser, og derfor kan man tvinges til å prosjektere på «sikker side» i unødvendig grad.

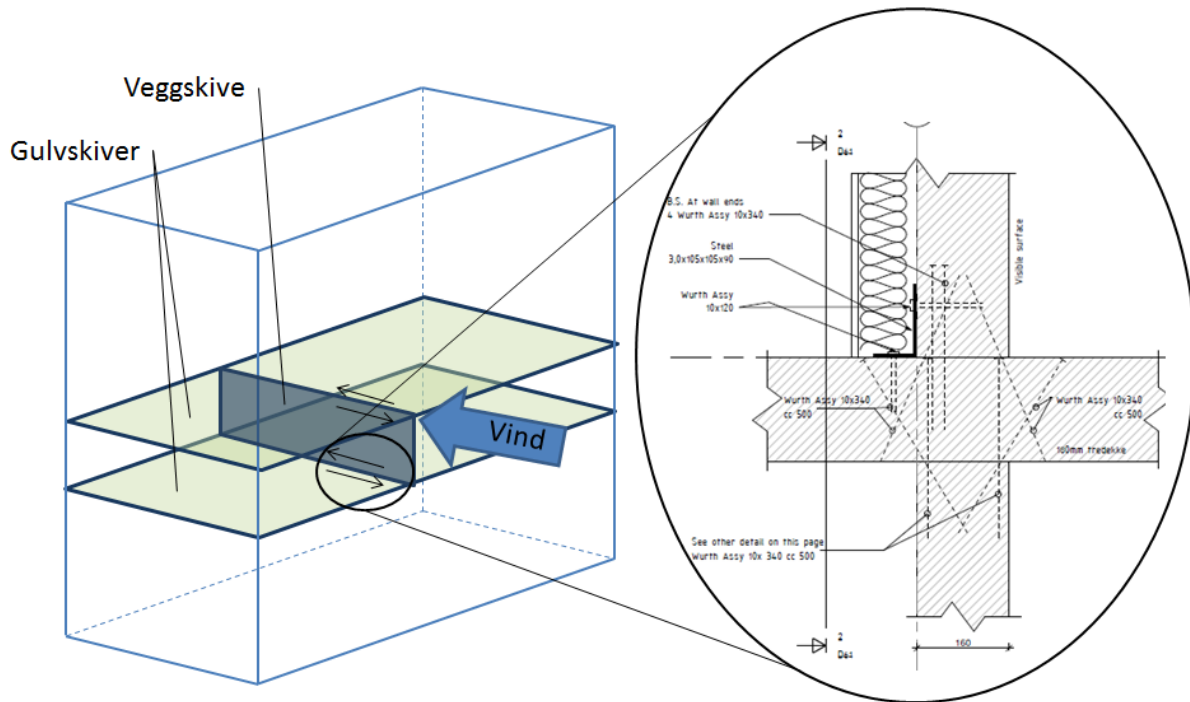
I Palisaden er elementene festet til hverandre med lange, helgjengede skruer. Disse forbindelsene ble ikke ansett å gi tilstrekkelig forankring av massivtreskivene. For å redusere bevegelser under vindlast er det derfor festet en rekke brede stålbeslag som går kontinuerlig langs hele byggets høyde, og er forankret i fjellgrunnen (se Figur 3.) Ved prosjektering av et 14 etasjes høyt trebygg i Bergen viste det seg at horisontalbevegelsen og -akselerasjonen var dimensjonerende. Det er derfor viktig å få tilstrekkelig kunnskap om horisontal stivhet og spesielt effekten av forbindelsene i massivtrebygg med hensyn til brukernes komfortopplevelse. Både muligheter for å redusere forbindelsenes omfang, og for å bygge høyere massivtrebygg enn 8 etasjer vil også avhenge av god kunnskap om forbindelsenes egenskaper. En del forbindelsestyper og egenskaper ved massivtre er undersøkt de siste årene (bl.a. Gavric et.al. 2012, Muñoz et.al. 2010, Vessby et.al. 2009), men behovet for mer innsikt i ulike varianter er nødvendig for å utarbeide gode dimensjoneringsregler.



**Figur 3: Avstivende stålbeslag i Palisaden. Bildet er tatt i heissjakten.**

Forskningsprosjektet Wood/Be/Better, koordinert av Arkitekt høyskolen i Oslo (AHO) og finansiert av Norges Forskningsråd, har som mål å gjøre trebygg mer anvendelige i urbane områder. Aktuelle problemstillinger belyses både ved arkitektur, design, økonomi, bygningsfysikk og konstruksjonsteknikk. UMB v/Institutt for Matematiske realfag og Teknologi (IMT) har ansvaret for «Work Package 3» (WP3), som går på konstruksjonsteknikk, herunder skrueforbindelser.

I denne oppgaven er det tatt utgangspunkt i å simulere variasjoner av en type gulv/veggforbindelse som er benyttet i høyblokkene i Palisaden. Figur 4 er en prinsippskisse av ett av byggene som viser hvor disse forbindelsene sitter, og hvordan den horisontale vindlasten forplanter seg som skjærkrefter langs randen av den avstivende veggskiven.



**Figur 4:** Til venstre: Skisse av en av hybelblokkene. To gulvplan og en innvendig, avstivende vegg er tegnet inn. Detaljen til høyre viser en typisk forbindelse mellom gulv og vegg som er simulert i arbeidet med denne oppgaven. Forbindelsesdetaljen er hentet fra As-Built-dokumentasjon fra prosjektet, utarbeidet av Høyser-Finseth/Veidekke (Vedlegg B)

## 1.2 Problemstilling

Målet med denne oppgaven var å undersøke og dokumentere stivhets- og styrkeverdier til skrueforbindelser i massivtre, tilsvarende de som er brukt i Palisaden, spesielt hvordan disse egenskapene påvirkes ved endring av vinkel mellom skrueakse og kraftretning.

Verdiene dokumenteres ved å teste forbindelsene i laboratorium.

## 2 Teori

Eurocode 5 gir grunnlaget for all dimensjonering av trekonstruksjoner i Norge og resten av Europa. Standarden dekker imidlertid ikke alt, men ettersom nye produkter og trender utvikles blir standarden oppdatert. Underlaget til innholdet i Eurocode 5 utarbeides av CIB-W18, en arbeidsgruppe bestående av forskere fra hele verden. Nedenfor presenteres gjeldende teori fra Eurocode sammen med resultater fra nyere forskning, fra bl.a. CIB-konferanser, om skrueforbindelser og massivtre.

For forståelse av dette kapitlet forutsettes det at leseren innehar et grunnleggende kunnskapsnivå om konstruksjonsteknikk, statikk og materiallære om tre og stål.

### 2.1 Bruddstyrke i vinkelrette skruer (EC5)

I Eurocode 5 beregnes kapasiteten til skruer i tre mot tre-forbindelser med Johansens bruddteori. Formlene angir kapasitet for alle aktuelle bruddformer, med og uten plastiske flyteledd i forbinderen. For enkeltsnittede forbindere settes karakteristisk kapasitet per forbinde,  $F_{v,Rk}$  lik den minste av følgende verdier:

$$F_{v,Rk,a} = f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \quad (a)$$

$$F_{v,Rk,b} = f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d \quad (b)$$

$$F_{v,Rk,c} = \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1+\beta} \left[ \sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \left[ 1 + \frac{t_2}{t_1} + \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \cdot \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \cdot \left( 1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (c)$$

$$F_{v,Rk,d} = 1,05 \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2+\beta} \left[ \sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2+\beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (d)$$

$$F_{v,Rk,e} = 1,05 \frac{f_{h,1,k} \cdot t_2 \cdot d}{1+2\beta} \left[ \sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (1+2\beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (e)$$

$$F_{v,Rk,f} = 1,15 \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1+\beta}} \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (f)$$

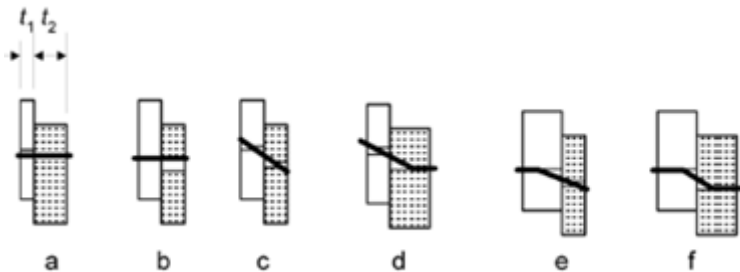
$$F_{v,Rk} = \min\{F_{v,Rk,a}; F_{v,Rk,f}\} \quad (1)$$

Hvor:

- $f_{h,i,k}$  er hullkantfasthet i tredel  $i$ ,
- $t_i$  er tykkelsen til tredel  $i$  eller inntrengningsdybden til skruen,
- $d$  er forbindeens diameter,

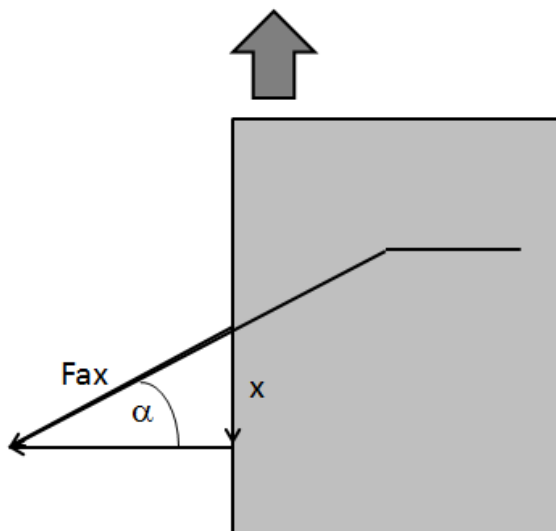
- $\beta$  er forholdet mellom tredelens hullkantfasthet,  $f_{h,2,k}/f_{h,1,k}$
- $M_{y,Rk}$  er forbindeens karakteristiske flytemoment,
- $F_{ax,Rk}$  er forbindeens uttrekkskapasitet.

Ligningene (1 a-f) svarer til bruddformene vist i Figur 5.



Figur 5: Bruddformer i enkeltsnittet tre-mot-treforbindelse. Figuren er hentet fra Eurocode 5.

I bruddformer hvor det opptrer flyteledd i forbindeens (c-f) får man et tilleggsbidrag kalt taueffekt på  $F_{ax,Rk}/4$ . Taueffekten oppstår når forbindelsens lengdeakse ikke lenger ligger vinkelrett på skjærflaten mellom tredelene, slik at en kraftkomponent danner strekkspenninger langs forbindeens akse. Strekkraftens komponent parallelt skjærflaten gir et bidrag til forbindelsens bæreevne (se Figur 6.) Skruer har høy motstand mot uttrekning, derfor gir taueffekten et betydelig bidrag når det benyttes lange skruer.



Figur 6: En halvdel av en forbindelse, med plastisk flyteledd i forbindeens.

Av figuren fremgår det at vertikalkomponenten blir

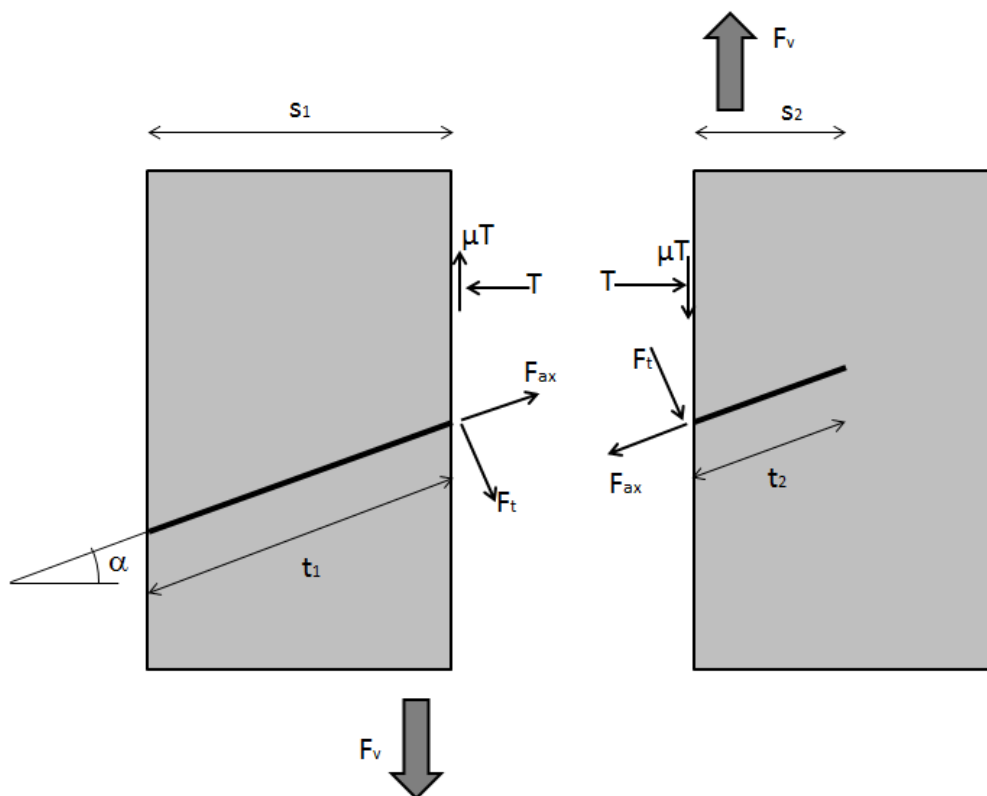
$$x = \sin \alpha \cdot F_{ax} \quad (2)$$

Dersom vinkel  $\alpha$  er ca  $14,5^\circ$ , vil løsningen bli  $0,25 \cdot F_{ax}$ . Kapasitetstillegget fra taueffekten beregnes altså i følge Eurocode fullt utnyttet når forbindeaksen har deformert seg med en vinkel på  $14,5^\circ$ . I tillegg skal bidraget begrenses til 100 % av Johansen-delen (første ledd i ligningssettet) i skrueforbindelser.

Taueffekten kan alternativt tolkes på følgende måte (Tomasi et al 2010):  $F_{ax}/4$  settes til  $\mu \cdot F_{ax}$ , hvor  $\mu$  er friksjonstallet til trevirke, lik 0,25. Med denne tolkningen kan bidraget fra aksialkapasiteten beregnes for alle skruvinkler, så lenge skruen er utsatt for strekk og ikke trykkraft. Den forenklete måten å beregne bidrag fra taueffekten i Eurocode tar ikke hensyn til en mulig kombinasjon av både friksjon og høy uttrekkskapasitet.

## 2.2 Bruddstyrke i skråstilte skruer

Skråstilte skruer vil umiddelbart bli påkjent av en kombinasjon av aksial last og tverrlast, som i sin tur fører til økt trykk mellom tredelene sammenlignet med skruer som står vinkelrett på skjærflaten.



Figur 7: opprettede krefter i skjærflaten mellom to tredeler i en forbindelse med en skråstilt skruer

I Figur 7 ser man at  $F_{ax} = F_v \cdot \sin(\alpha)$  og  $F_t = F_v \cdot \cos(\alpha)$ , mens trykkraften som oppstår mellom tredelene blir  $T = F_{ax} \cdot \cos(\alpha) - F_t \cdot \sin(\alpha)$ . Med basis i dette er følgende utvidelse av Johansen-ligningene blitt utledet av Blaß & Bejtka (2002):

$$F_{v,Rk,a} = F_{ax,k} \cdot \sin \alpha + f_{h,1,k} \cdot s_1 \cdot d \cdot \cos \alpha \quad (a)$$

$$F_{v,Rk,b} = F_{ax,k} \cdot \sin \alpha + f_{h,2,k} \cdot s_2 \cdot d \cdot \cos \alpha \quad (b)$$

$$F_{v,Rk,c} = F_{ax,k}(\mu \cdot \cos \alpha + \sin \alpha) + \frac{f_{h,1,k} \cdot s_1 \cdot d}{1+\beta} (1 - \mu \cdot \tan \alpha) \left[ \sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left[ 1 + \frac{s_2}{s_1} + \left( \frac{s_2}{s_1} \right)^2 \right]} + \beta^3 \cdot \left( \frac{s_2}{s_1} \right)^2 - \beta \cdot \left( 1 + \frac{s_2}{s_1} \right) \right] \quad (c)$$

$$F_{v,Rk,d} = F_{ax,k}(\mu \cdot \cos \alpha + \sin \alpha) + \frac{f_{h,1,k} \cdot s_1 \cdot d}{2+\beta} (1 - \mu \tan \alpha) \cdot \left[ \sqrt{2 \cdot \beta(1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta(2+\beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot s_1^2}} - \beta \right] \quad (d)$$

$$F_{v,Rk,e} = F_{ax,k}(\mu \cdot \cos \alpha + \sin \alpha) + \frac{f_{h,1,k} \cdot s_2 \cdot d}{1+2\beta} (1 - \mu \tan \alpha) \left[ \sqrt{2 \cdot \beta^2(1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta(1+2\beta) M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot s_2^2}} - \beta \right] \quad (e)$$

$$F_{v,Rk,f} = F_{ax,k}(\mu \cdot \cos \alpha + \sin \alpha) + (1 - \mu \cdot \tan \alpha) \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1+\beta}} \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d \cdot \cos^2 \alpha} \quad (f)$$

$$F_{v,Rk} = \min\{F_{v,Rk,a} ; F_{v,Rk,f}\} \quad (3)$$

Hvor

- $\alpha$  er vinkelen mellom skrueaksen og normalen til skjærplanet
- $s_i$  er forankringsdybde normalt på skjærplanet i del  $i$ .
- $\mu$  er friksjonskoeffisienten for tre-mot-tre-forbindelser.

Et viktig element er at forankringsdybden  $s_2$  vil minke når skruevinkelen  $\alpha$  øker. I dette ligningssettet er leddet for taueffekt i Eurocode erstattet med et ledd som tar hensyn til skruens vinkel og uttrekkskapasitet, samt friksjon mellom tredelene. Dersom pålasting gir trykkspenning i skruen må  $\mu$  settes lik 0 siden tredelene vil skyves fra hverandre og hindre friksjon i å oppstå.

## 2.3 Hullkantfasthet

Hullkantfasthet avhenger av trevirkets densitet og vinkel mellom kraft- og fiberretning. I krysslaminert massivtre vil imidlertid forbinderen krysse flere lag med ulik fiberretning. Forbindelsens kapasitet vil avhenge av oppbygningen til massivtreelementet og i hvilket lag det oppstår plastisk flyteledd (Blaß & Uibel 2006). Det er mulig å utlede formelverk for

hullkantfasthet for alle mulige oppbygninger og bruddformer, men det blir fort veldig omfattende og komplekse utregninger. Dessuten er det umulig å få tatt nødvendige hensyn til eventuelle sprekker mellom planker i et lag, og at lagene kan ha ulik densitet. I samme rapport er det utarbeidet et forslag til en forenklet utregning, basert på en rekke forsøk, som tar hensyn til vinkelen mellom last og fiberretningen til det ytterste laget i massivtreelementet:

$$f_{h,k} = \frac{0,031 \cdot (1 - 0,15 \cdot d) \rho_k^{1,16}}{1,1 \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (4)$$

Hvor

- $\rho_k$  er karakteristisk densitet for hele elementet
- $\alpha$  er vinkel mellom last og fiberretning i ytterste lag
- $d$  er skruens diameter. Med helgjengede skruer benyttes en effektiv diameter,  $d_{ef}$ , som settes lik 1,1 ganger skruens kjernediameter (Eurocode)

Metoden er nesten identisk med den i Eurocode, men med noe forskjellige tallverdier. Dette kan forklares med at krysslamineringen i massivtre gir en armerende effekt. For skruer med liten diameter ( $d_{ef} < 6$  mm) og spiker kan reglene fra Eurocode brukes direkte, da det ikke er funnet noen effekt av lagenes retning for disse (Sandhaas et. al. 2009.) Ligning (4) tar imidlertid ikke hensyn til vinkel mellom skrueaksen og fiberretning. Blaß & Bejtka (2006) fant følgende sammenheng:

$$f_{h,k} = \frac{0,022 \cdot \rho_k^{1,24} \cdot d^{-0,3}}{2,5 \cdot \cos^2 \varepsilon + \sin^2 \varepsilon} \quad (5)$$

Her er  $\varepsilon$  vinkelen mellom skrueaksen og fiberretningen.

## 2.4 Uttrekkskapasitet

Uttrekkskapasiteten beskriver den aksielle delen av skruens kapasitet. Her er det gjengene, og eventuelt skruehodet med skive som avgjør kapasiteten. Med lange, helgjengede skruer vil gjennomtrekking av skruehodet ikke være et aktuelt problem, siden gjengene holder igjen på begge sider av forbindelsen. Bidraget fra skruehodet kan neglisjeres, da det har relativt liten diameter og er laget med henblikk på forsenking. Uttrekkskapasiteten til selvborende skruer i massivtreforbindelser er testet (Blaß 2007), og følgende er foreslått til beregning:

$$F_{ax,k} = \frac{0,35 \cdot \rho_k^{0,75} \cdot d^{0,3} \cdot l_{ef}^{0,9}}{2,5 \cdot \cos^2 \varepsilon + \sin^2 \varepsilon} \quad (6)$$



Hvor  $l_{ef}$  er den effektive inntrengingsdybden til skruen. Når det gjelder skråstilte skruer er følgende ligning utledet:

$$F_{ax,k} = f_{ax,k} \cdot d \cdot \frac{s}{\cos \alpha} \quad (7)$$

Hvor  $f_{ax,k}$  kan regnes ut ihht Eurocode som:

$$f_{ax,k} = 0,52 \cdot d^{-0,5} \cdot l_{ef}^{-0,1} \cdot \rho_k^{0,8} \quad (8)$$

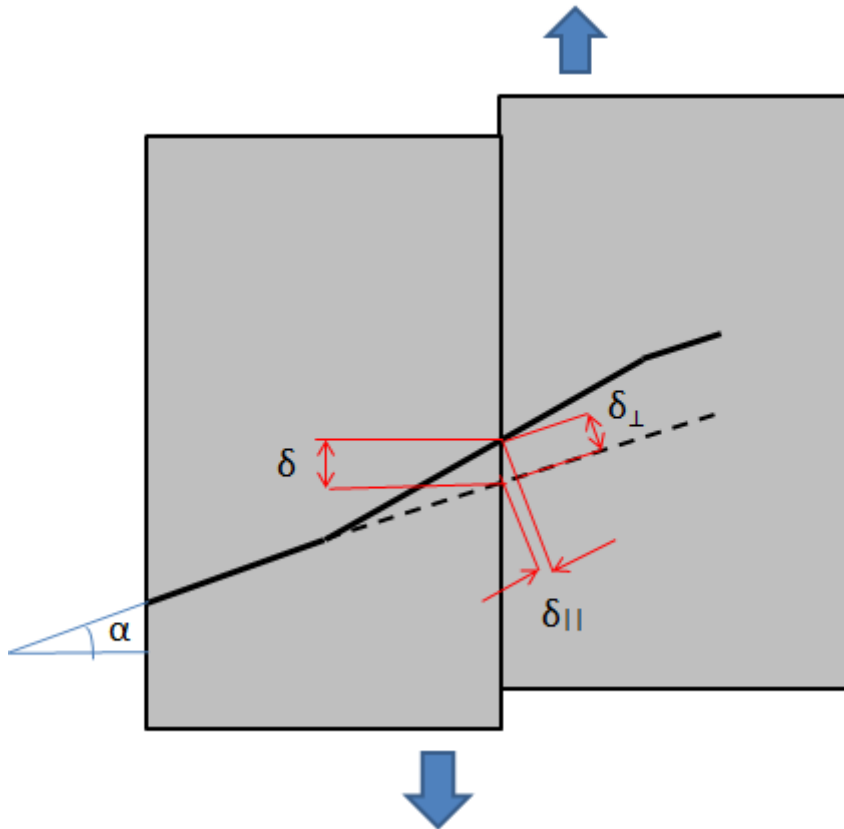
Uttrekkkapasiteten regnes ut for begge tredelene i forbindelsen og settes lik den minste verdien.

## 2.5 Stivhet i bruksgrensetilstand

Stivheten for skrueforbindelser i bruksgrensetilstanden er i Eurocode uavhengig av skruens vinkel:

$$K_{ser} = \rho_m^{1,5} \cdot \frac{d}{23} \quad (9)$$

En rekke forskningsrapporter fra de senere årene (f.eks Tomasi et. al. 2010) konkluderer likevel med at skråstilte skruer øker stivheten betraktelig når skruvinkelen øker opp til 45°. Dette gjelder skruer som belastes med skjær-strekkpåkjenninger, mens skruer med skjær-trykkpåkjenninger og tverrstilte skruer har vist en stivhet som passer godt med ligning (9) fra Eurocode.



Figur 8: Forskyvninger i forbindelse med skråstilt skruer

I Figur 8 vises at  $\delta_{\perp} = \delta \cdot \cos(\alpha)$  og  $\delta_{||} = \delta \cdot \sin(\alpha)$ .

Det er utledet følgende formel for stivhetsmodul med skråstilte skruer (Tomasi et. al. 2010), som også er testet i forbindelser i limtre (Jockwer et.al. 2013):

$$K_{ser} = K_{\perp} \cdot \cos \alpha (\cos \alpha - \mu \cdot \sin \alpha) + K_{||} \cdot \sin \alpha (\sin \alpha + \mu \cdot \cos \alpha) \quad (10)$$

Hvor

- $K_{\perp}$  er forbinderens stivhet ved tverrgående last
- $K_{||}$  er forbinderens stivhet ved aksial last
- $\alpha$  er vinkelen mellom skruerakse og normalen til skjærflaten
- $\mu$  er friksjonstallet til trevirke

Ligning (10) kombinerer stivhet på tvers av skruen og på langs av skruen, i tillegg til å ta med et bidrag fra friksjon mellom tredelene. Ligningen forutsetter at aksial last er i form av strekk, og at forbindelsen oppfører seg lineærelastisk i bruksgrensetilstanden, dvs at:

$$F_t = K_{\perp} \cdot \delta_{\perp} \quad (a)$$

$$F_{ax} = K_{\parallel} \cdot \delta_{\parallel} \quad (b)$$

(11)

Se Figur 7 og Figur 8 for definisjoner til ligning (11). Stivhetstallet  $K_{\perp}$  beregnes med ligning (9), mens  $K_{\parallel}$  må prøves for den enkelte skrue, eller tas fra skrueprodusentens tekniske dokumentasjon.

### 3 Metode

Utforming av prøver og forbindelsestype, og valg av massivtre er gjort med sikte på å simulere gulv-vegg-forbindelser som ligner mest mulig på forbindelsene i boligblokkene på Palisaden. Totalt 40 prøver ble testet under trykkbelastning. Hver prøve inneholdt fire skruer fordelt på to forbindelser. Testene ble utført på trelaboratoriet i Fløy 5 ved IMT. Laboratoriet er klimatisert til en temperatur på 20 °C og relativ luftfuktighet på 65 % (normalklima). Se Figur 11 for prøveoppsett og Tabell 2 for en oversikt over antall prøvestykker og forbindelser.

#### 3.1 Materialer

Massivtreelementene i studien er produsert av svenske Martinsons. To ulike elementtyper ble testet, se Tabell 1.

Tabell 1: Oppbygning av massivtreelementene i studien.

Type	Tykkelse	Antall lag	Oppbygning av sjikt [mm]
A	145 mm	5	19 - 44 - 19 - 44 - 19
B	170 mm	7	19 - 31,5 - 19 - 31,5 - 19 - 31,5 - 19

I begge elementtypene er de langsgående sjiktene tynnere enn de tverrgående. Lamellene er av gran, med oppgitte fasthetsklasser LS15 for de langsgående sjiktene og C14 for de tverrgående. Gjennomsnittlig densitet er oppgitt til ca 400 kg/m<sup>3</sup> (ETA Martinson.)



Figur 9: Til venstre: massivtreelement type A (145 mm). Til høyre: massivtreelement type B (170 mm)

Skruene som ble testet var Würth Assy Plus VG 10x320 mm. Skruene er selvborende og helgjengede. Oppgitt karakteristisk flytemoment,  $M_{y,k}$ , er 36,0 Nm. Kjernediameter er lik 6,2 mm.

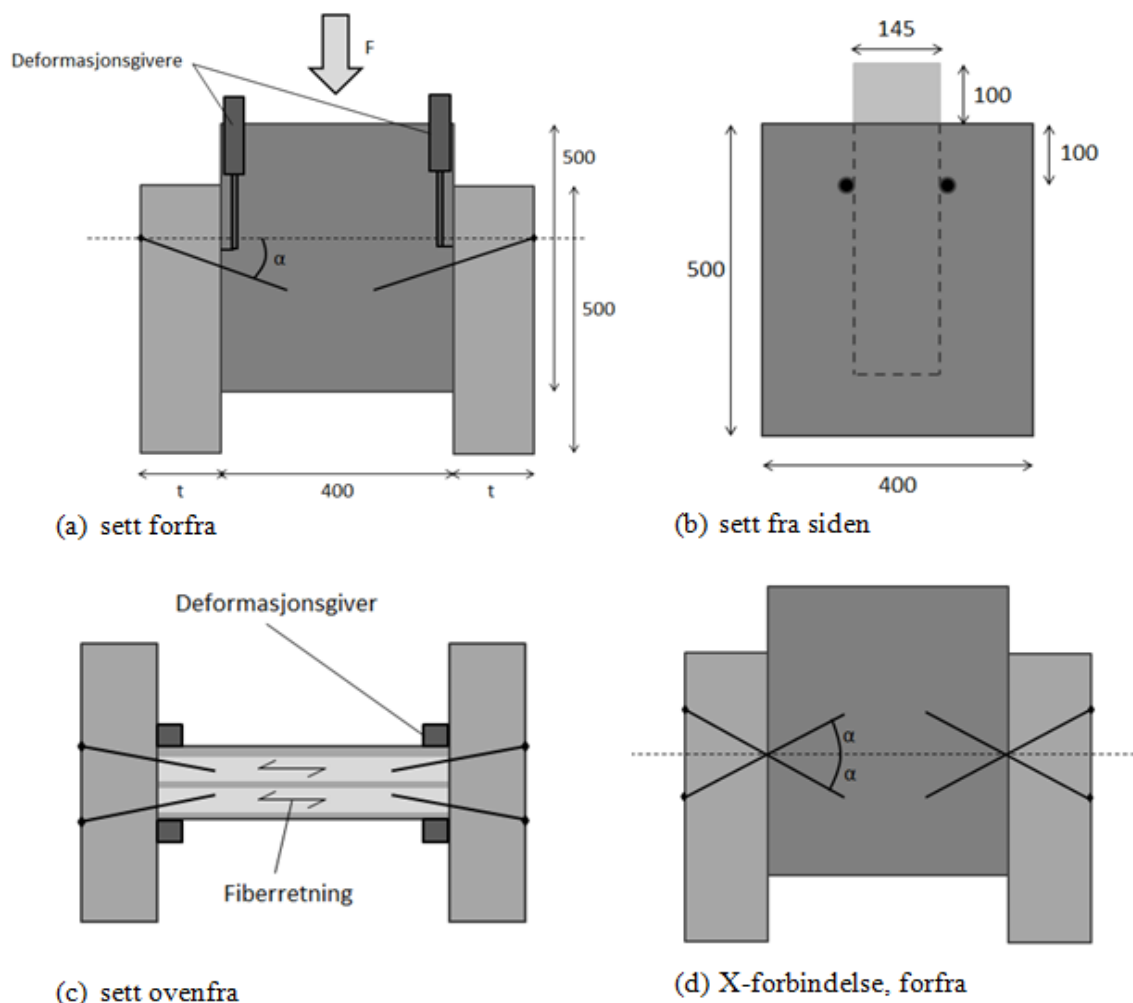


Figur 10: Würth Assy Plus VG 10x320 mm.

### 3.2 Oppsett av labforsøk

Massivtreemnene ble delt opp til prøvestykker og montert sammen som vist i Figur 11. I dette oppsettet skal sidepanelene simulere etasjeskillere, mens midtpanelet simulerer en veggskive. Forbindelsenes utforming og dimensjoner ble basert på As-built-dokumentasjon fra Veidekke (entreprenør på prosjektet Palisaden. Se Vedlegg B.) To ulike typer forbindelser ble testet; en type der begge skruene har samme vinkel i samme retning (strekforbindelse), og en type hvor skruene er satt inn i en x-form, der skruene har samme vinkel, men med forskjellig fortegn. I x-forbindelsene ble altså én skrue utsatt for strekkspenning og én for trykkspenning. Så nært som mulig var skruens vinkel  $\alpha$  den eneste variabelen mellom serie av samme type. I tilfellene med tykke sidepaneler (type B) og  $\alpha = 45^\circ$  ble skruene forsenket ca. 30 mm inn fra overflaten for å kompensere for at forankringslengden i innerste del ble meget kort som følge av den høye vinkelen.

Alle prøvene hadde midtpanel av A-typen. Skruene penetrerte disse i de indre, tykke sjiktene, hvor lamellene lå på tvers, altså inn i endeveden.



Figur 11: (a-c): Skisser av prøveoppsett for ordinær forbindelse sett hhv forfra, fra siden og ovenfra. Deformasjonsmåleres posisjon er angitt i (a) og (c). (d): forbindelse med krysstilte skruer. Alle mål i mm.  $t = 145$  mm for sidepanel type A og  $170$  mm for type B.

Testene ble utført i en Instron KN300- maskin, som har kapasitet opptil  $300$  kN i trykk eller strekk. Maskinen ble styrt av programvaren LabView, og innstilt på fast nedtrykkingshastighet på  $8$  mm/min. Trykkraft ble målt av en Instron kraftcelle. All vertikal deformasjon ble antatt å opptre i skjærflaten mellom elementene. Deformasjon i forbindelsene ble fortløpende målt av fire givere av typen Regal KTC-75, og sammenstilt med kraftmålingene. Giverne hadde en begrensning på ca  $60$  mm deformasjon.

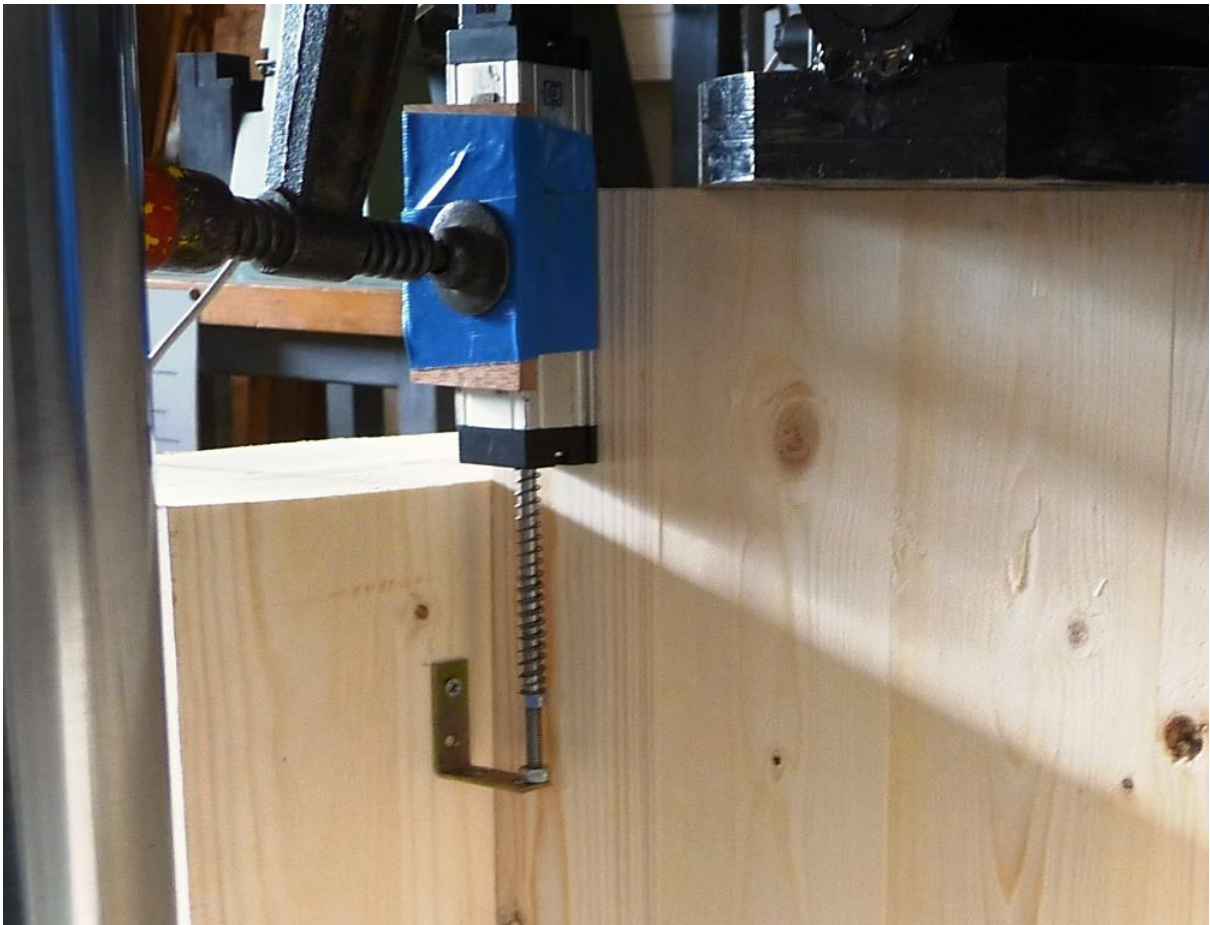
Tabell 2: Oversikt over antall prøvestykker og gjentak av de forskjellige forbindelsene.

Skruevinkel, $\alpha$	Antall prøver Type A, sidepanel $145$ mm	Antall prøver Type B, sidepanel $170$ mm
0	5	5
15	2	2
30	2	2
45	5	5
X30	3	3
X45	3	3





Figur 12: Bilde av prøve A-30-2, klar til å starte nedtrykking



Figur 13: Innfesting av deformasjonsgiver Bilde av prøve A-30-2, klar til å starte nedtrykking

### 3.3 Utregninger og analyser av data

Forventede verdier for bruddlast ble beregnet etter ligningene (3), (5) og (7). Forventet stivhet ble beregnet etter ligning (10). Følgende verdier er brukt for parametrene i formlene:

- $\rho$  = middelværdi av målt densitet for henholdsvis langsgående og tversgående sjikt.
- $d_{ef} = 1,1 \cdot d_{kjerne} = 6,82mm$  iht. Eurocode.
- $l_{ef}$  og  $s_i$  regnet ut etter geometrien i hver enkelt prøveserie.
- Friksjonskoeffisient  $\mu = 0,25$  i strekkforbindelsene og 0 i krysset forbindelse.

Hullkantfastheten og uttrekkskapasiteten ble regnet ut separat for sidepanel og midtpanel, med tilhørende middelværdi av densiteten i henholdsvis langsgående og tverrgående sjikt, da det antas at sjiktet nærmest skjærflaten har størst betydning.

Lasten ble antatt symmetrisk fordelt på de fire skruene i hver prøve, og dermed dividert på fire i resultatene. Deformasjonen i hvert prøvesett er middelværdien fra de fire deformasjonsgiverne.

Stivheten  $K_{ser}$  ble beregnet som stigningstallet til en linje som går gjennom de to punktene i 10 % og 40 % av bruddlasten  $P_{max}$ .  $P_{max}$  for hver test ble definert som den høyeste målte kraften innen deformasjon lik 15 mm var nådd (iht. NS-ISO 6891, pkt 8.4).

### 3.4 Fukt- og densitetsmålinger

Densiteten er en viktig parameter for både bruddstyrke og stivhet, derfor ble det tatt ut et utvalg av små prøver fra ulike punkter i massivtreelementene. For å få densitetsverdier fra hvert enkelt sjikt, ble prøvene delt i limfugen, slik at densiteten i langsgående og tverrgående sjikt ble målt separat. Prøvene hadde målene 50mm · 50mm · sjiktets tykkelse. Prøvene ble veid, tørket ved 103°C til absolutt tørr tilstand, og deretter veid igjen. Volum ble målt ved å senke bitene i vann, og måle oppdriften med vekt.

Fuktinnholdet ble målt for å kontrollere at prøvene lå nært opptil 12 %, som forventes etter klimatisering i normalklima.



## 4 Resultater

Nedenfor presenteres resultatene fra testene. Alle resultatene diskuteres nærmere i kapittel 5.

### 4.1 Fukt- og densitetsmålinger

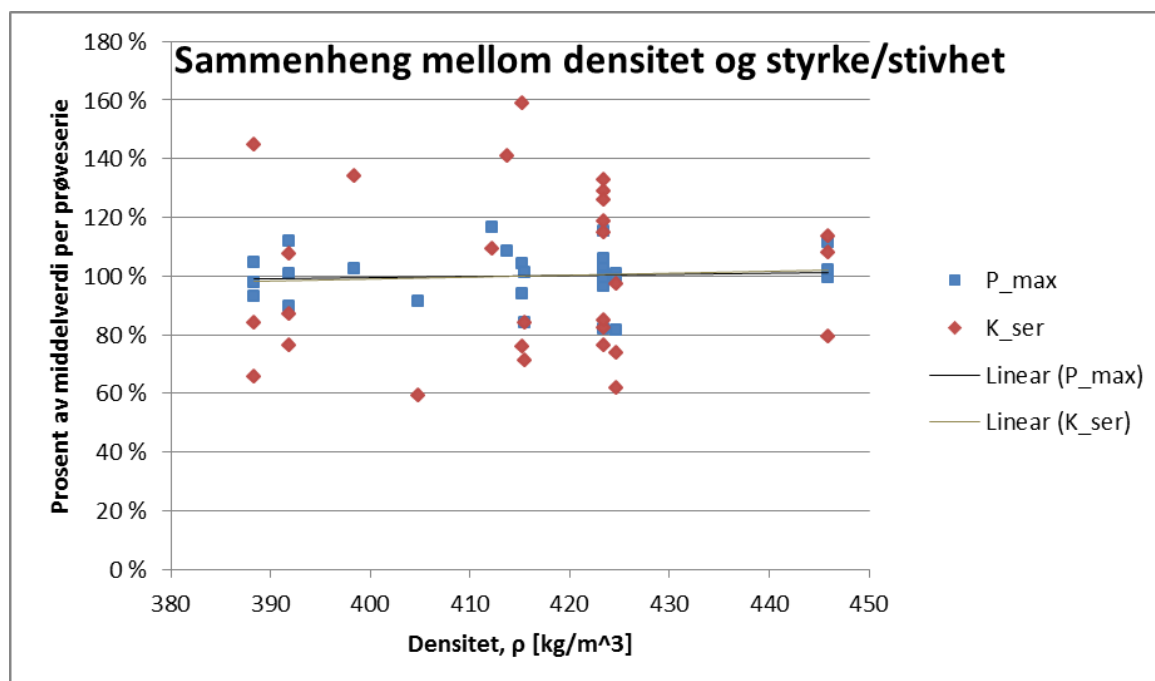
Følgende densitetsverdier ble målt:

Tabell 3: Densitetsmålinger fordelt på sjikt.

	densitet, $\rho_m$	var.koeffisient, $c_v$
Tversgående sjikt	397 kg/m <sup>3</sup>	9,69 %
Langsgående sjikt	426 kg/m <sup>3</sup>	7,86 %

Fuktmålingene ga en middelværdi på  $w = 11,4\%$ , med  $<1\%$  spredning og ingen forskjell på sjiktene.

Figur 14 viser sammenhengen mellom densitet og verdiene for stivhet og bruddstyrke. Hver enkelt prøve er sammenstilt med en densitetsmiddelværdi i emnet som prøvestykkene er skjært ut fra. Y-aksen er hver prøves prosentvise styrke/stivhet i forhold til den tilhørende prøveseriens middelværdi. Figur 14 gir ingen indikasjon på at de målte densitetsvariasjonene i prøveseriene har hatt signifikant innvirkning på testresultater for styrke eller stivhet.

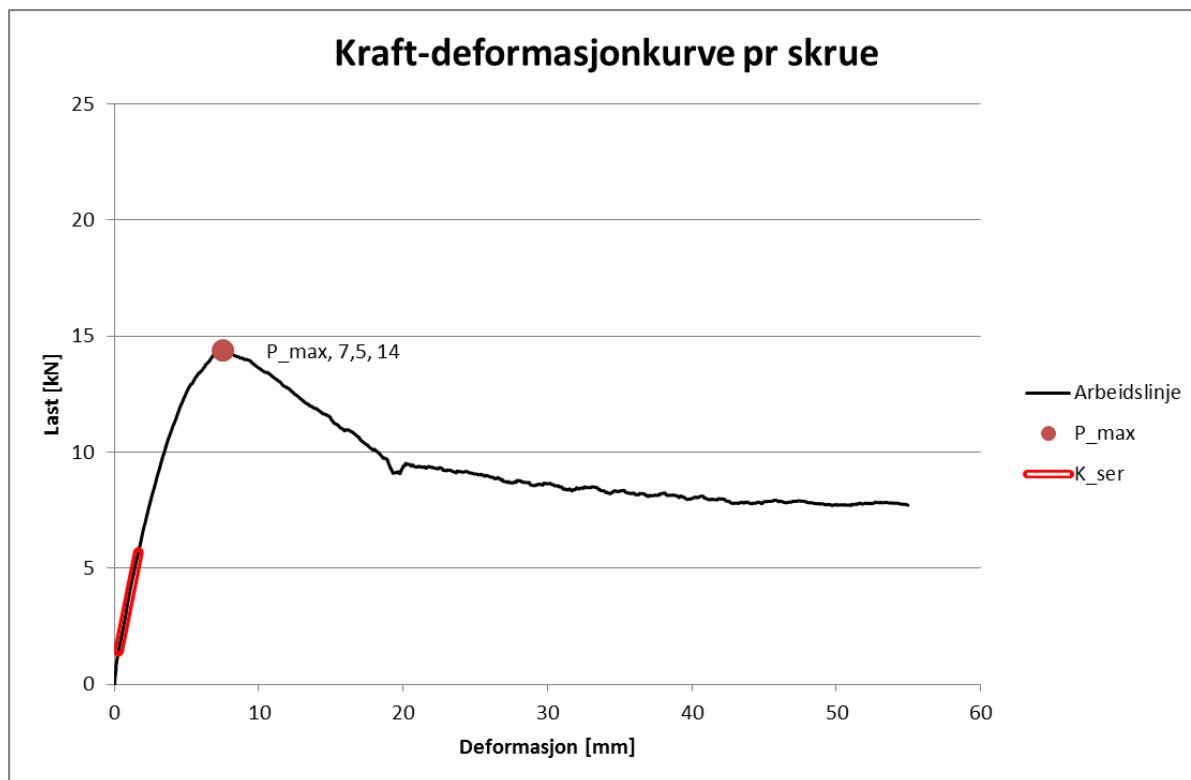


Figur 14: Densitet mot relativ styrke og stivhet.

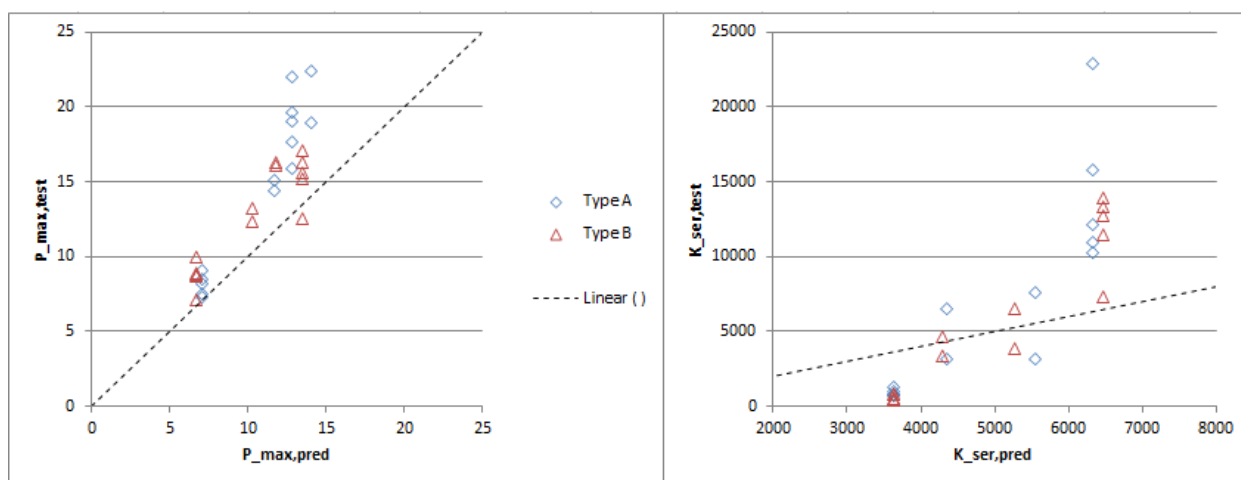
## 4.2 Strekkforbindelser

Figur 15 viser en arbeidslinje merket med bruddlast og stivhet for en typisk enkeltp prøve, med vinkel  $\alpha = 15$ . Tilsvarende arbeidslinjer for samtlige enkeltp prøver er presentert i Vedlegg A.

Figur 15 viser en sammenstilling mellom forventede verdier og verdier fra prøveresultatene.

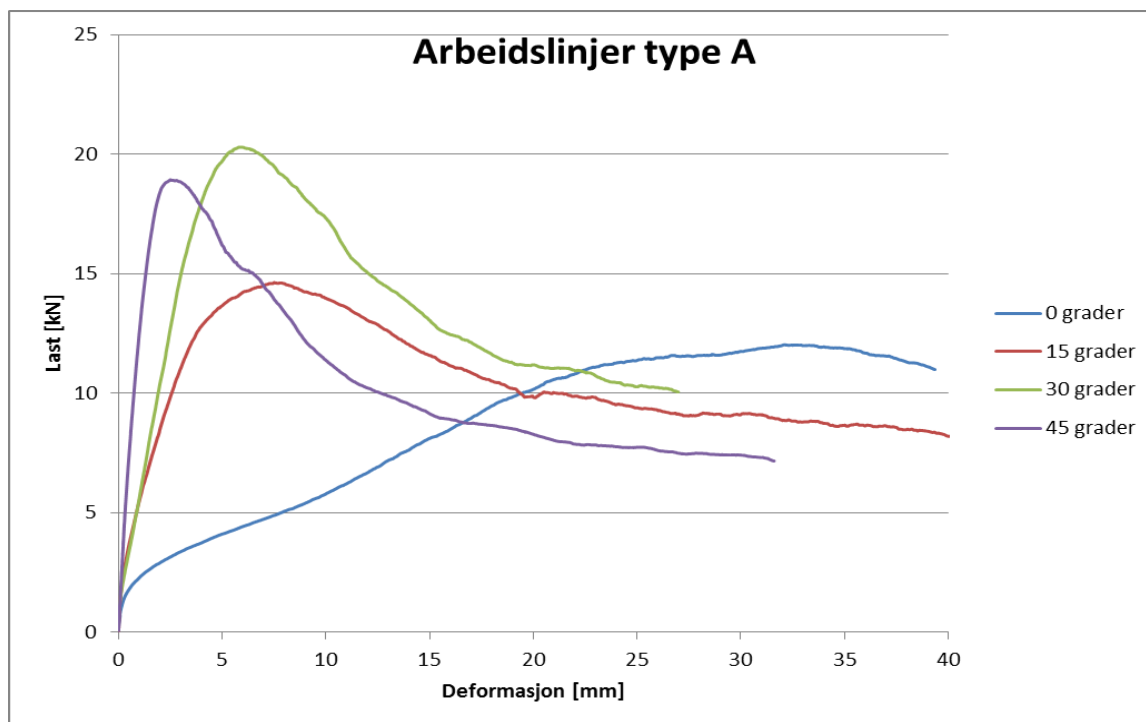


Figur 15: Arbeidslinje for prøve A-15-1 (Type A, 15 grader skruvinkel, gjentak nr 1.) Pmax er på 14 kN og inntreffer ved 7,5 mm deformasjon. Stivheten vises som stigningstallet til linjen  $K_{ser}$ .



Figur 16: Forventede verdier mot prøveresultater for hver enkelt prøve. Til venstre: kapasitet. Til høyre: stivhet.

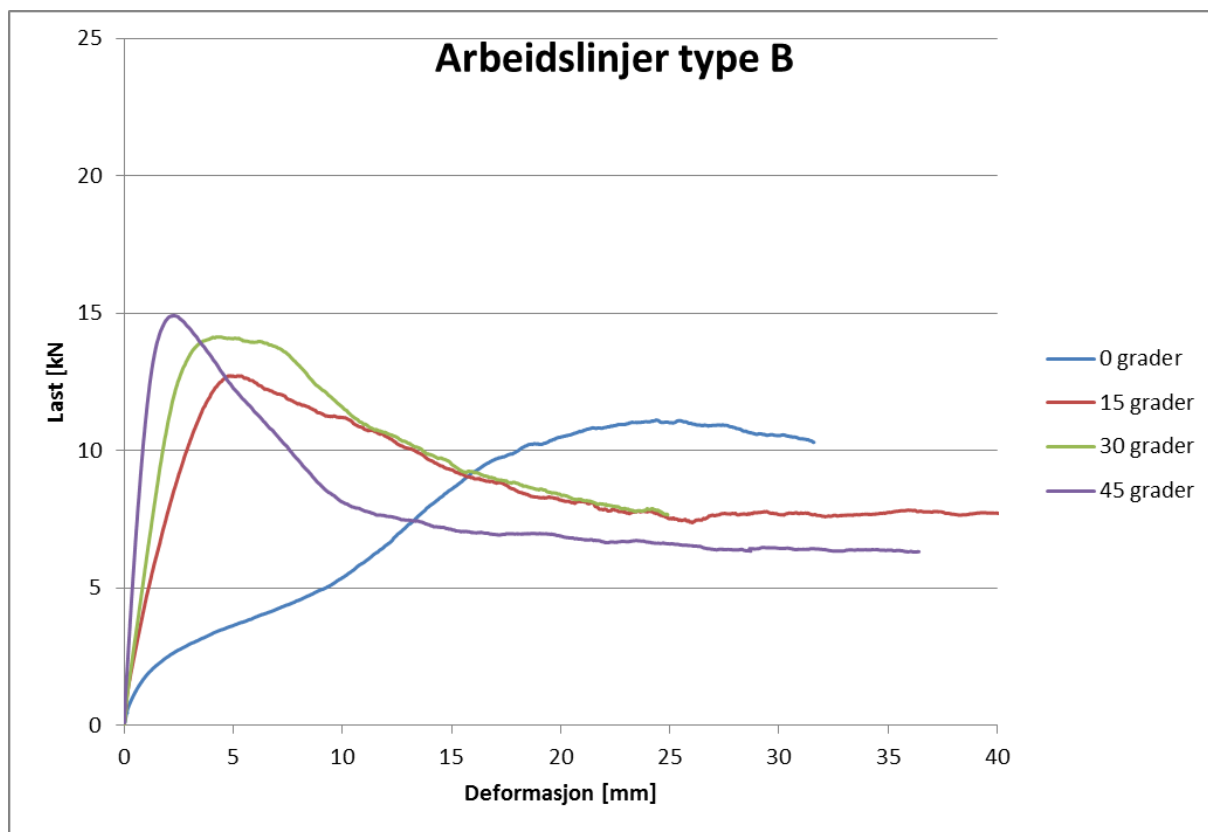
Figur 17 og Figur 18 viser arbeidslinjer for forbindelser med sidepanel av henholdsvis type A og type B. Grafene er basert på middelerverdier av alle prøver i samme serie. Tabell 4 og Tabell 5 viser resultatverdiene for alle enkeltprøver med sidepanel av henholdsvis type A og type B.



Figur 17: Midlere arbeidsdiagram for ulike forbindervinkler med sidepanel type A.

Tabell 4: Prøveresultater og forventede verdier for alle prøver med strekkforbindelse og sidepanel type A. Symboler:  $P_m$  = middelerverdi av bruddlast  $P_{max}$ ,  $P_{pred}$  = forventet bruddlast.  $K_m$  = middelerverdi av stivetsparameter  $K_{ser}$ ,  $K_{pred}$  = forventet stivhet. Spredningen i resultatene er angitt ved variasjonskoeffisienten.

$P_{max}$	Prøvenr	0 grader	15 grader	30 grader	45 grader	
		1	7 269	14 393	18 944	19 631
	2	9 045	15 106	22 429	17 706	N
	3	8 165			19 055	N
	4	8 462			22 021	N
	5	7 539			15 897	N
	$P_m$	<b>8 096</b>	<b>14 750</b>	<b>20 687</b>	<b>18 862</b>	N
	var.koeff	8 %	2 %	8 %	11 %	
	$P_{pred}$	7 035	11 694	14 084	12 793	N
	Faktor	115 %	126 %	147 %	147 %	
$K_{ser}$	Prøvenr					
	1	974	3 179	3 191	22 881	N/mm
	2	693	6 501	7 605	10 976	N/mm
	3	788			10 278	N/mm
	4	760			15 756	N/mm
	5	1 313			12 142	N/mm
	$K_m$	<b>906 (25%)</b>	<b>4 840 (34%)</b>	<b>5 398 (41%)</b>	<b>14 407 (32%)</b>	N/mm
	var. koeff	25 %	34 %	41 %	32 %	
	$K_{pred}$	3 626	4 345	5 547	6 330	N/mm
	Faktor	25 %	111 %	97 %	228 %	



Figur 18: Midlere arbeidsdiagram for ulike forbindervinkler med sidepanel type B.

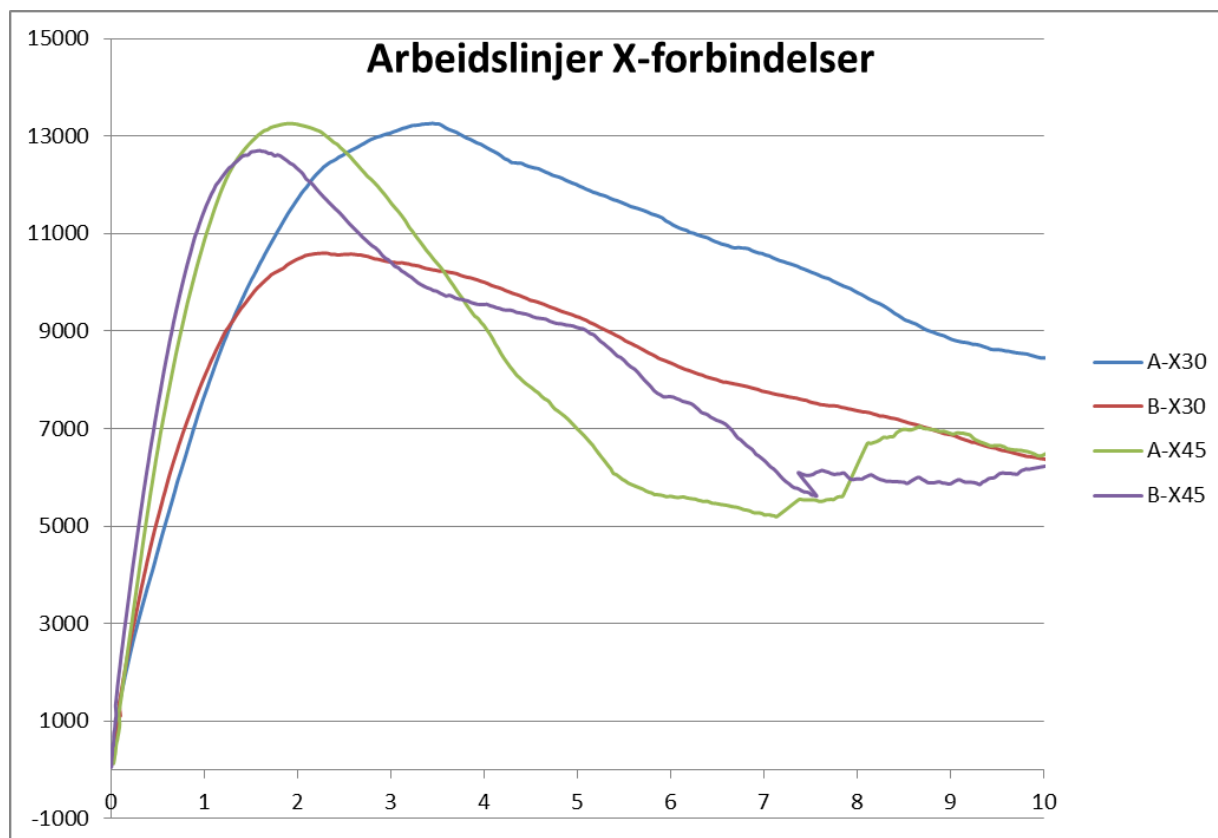
Tabell 5: Prøveresultater og forventede verdier for alle prøver med strekkforbindelse og sidepanel type B. Symboler:  $P_m$  = middelerverdi av bruddlast  $P_{max}$ ,  $P_{pred}$  = forventet bruddlast,  $K_m$  = middelerverdi av stivetsparameter  $K_{ser}$ ,  $K_{pred}$  = forventet stivhet. Spredningen i resultatene er angitt ved variasjonskoeffisienten.

$P_{max}$	Prøvenr	0 grader	15 grader	30 grader	45 grader	
		1	8 774	13 217	16 106	17 056
	2	8 859	12 319	16 308	16 248	N
	3	10 007			15 173	N
	4	7 110			12 520	N
	5	8 647			15 617	N
	$P_m$	<b>8 679</b>	<b>12 768</b>	<b>16 207</b>	<b>15 323</b>	N
	var.koeff	11 %	4 %	1 %	10 %	
	$P_{pred}$	6 648	10 302	11 824	13 487	N
	Faktor	131 %	124 %	137 %	114 %	
$K_{ser}$	Prøvenr					
	1	780	3 415	6 490	13 358	N/mm
	2	757	4 620	3 815	13 923	N/mm
	3	485			11 445	N/mm
	4	448			7 269	N/mm
	5	466			12 703	N/mm
	$K_m$	<b>587</b>	<b>4 018</b>	<b>5 153</b>	<b>11 740</b>	N/mm
	var.koeff	25 %	15 %	26 %	20 %	
	$K_{pred}$	3 626	4 292	5 269	6 461	N/mm
	Faktor	16 %	94 %	98 %	182 %	

Stivheten er mer enn tidoblet fra 0 til 45 grader. Bruddkapasiteten øker også ved økende vinkel.

### 4.3 Kryssede forbindelser

Figur 19 og Tabell 6 viser resultatene for forbindelsene med kryssede skruer.



Figur 19: Arbeidslinje for kryssede forbindelser.

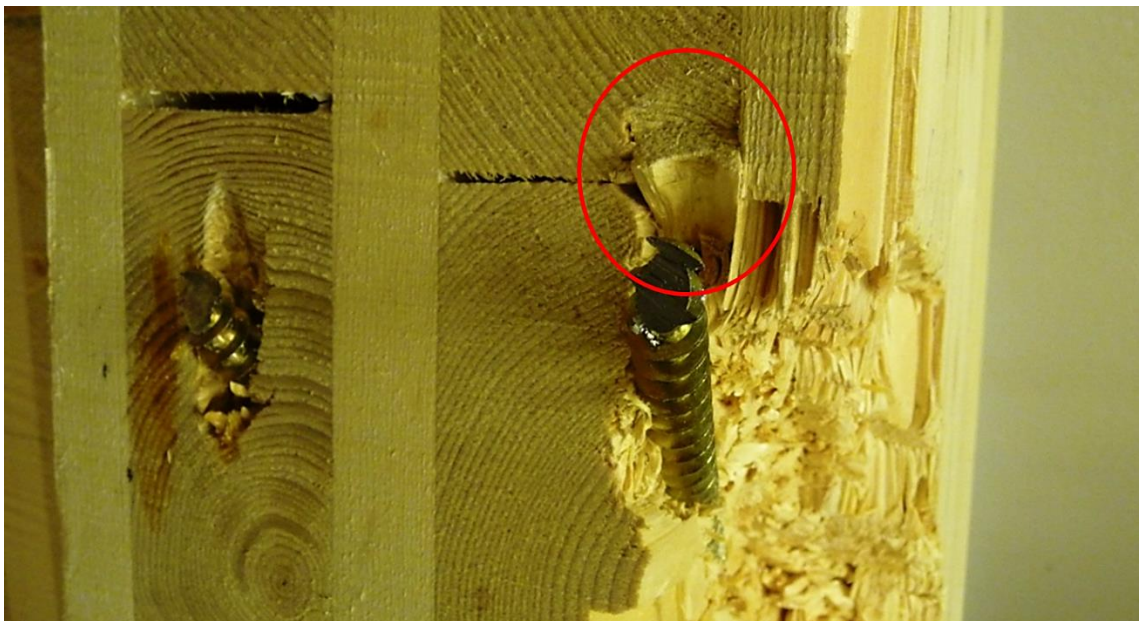
Tabell 6: Prøveresultater og forventede verdier for kryssede forbindelser. Spredningen i resultatene er angitt ved variasjonskoeffisienten.

$P_{max}$	Prøvenr	A-X30	B-X30	A-X45	B-X45	
	1	12 744	9 807	13 346	14 515	N
	2	12 560	11 367	12 763	11 901	N
	3	15 210	11 914	13 991	12 602	N
	$P_m$	<b>13 505</b>	<b>11 029</b>	<b>13 367</b>	<b>13 006</b>	N
	var.koeff.	9 %	8 %	4 %	8 %	
	$P_{pred}$	11 221	9 655	11 714	12 265	N
	Faktor	120 %	114 %	114 %	106 %	
$K_{ser}$	Prøvenr					
	1	8 185	11 198	19 575	21 530	N/mm
	2	9 113	7 990	11 516	17 047	N/mm
	3	6 052	12 939	11 248	12 192	N/mm
	$K_m$	<b>7 783</b>	<b>10 709</b>	<b>14 113</b>	<b>16 923</b>	N/mm
	var.koeff.	16 %	19 %	27 %	23 %	
	$K_{pred}$	5 028	4 843	5 936	6 036	N/mm
	Faktor	155 %	221 %	238 %	280 %	

Figurene 20 – 22 viser innsiden av prøve B-30-2 etter brudd. For å gjøre det lettere å håndtere er skruene saget over med baufil og trestykkene delt i mindre biter etter testing. Man ser her tydelig at begge delene av skruen er plastisk deformert, og at det er oppstått hullkantbrudd i tredelene og uttrekk av skruespissen.

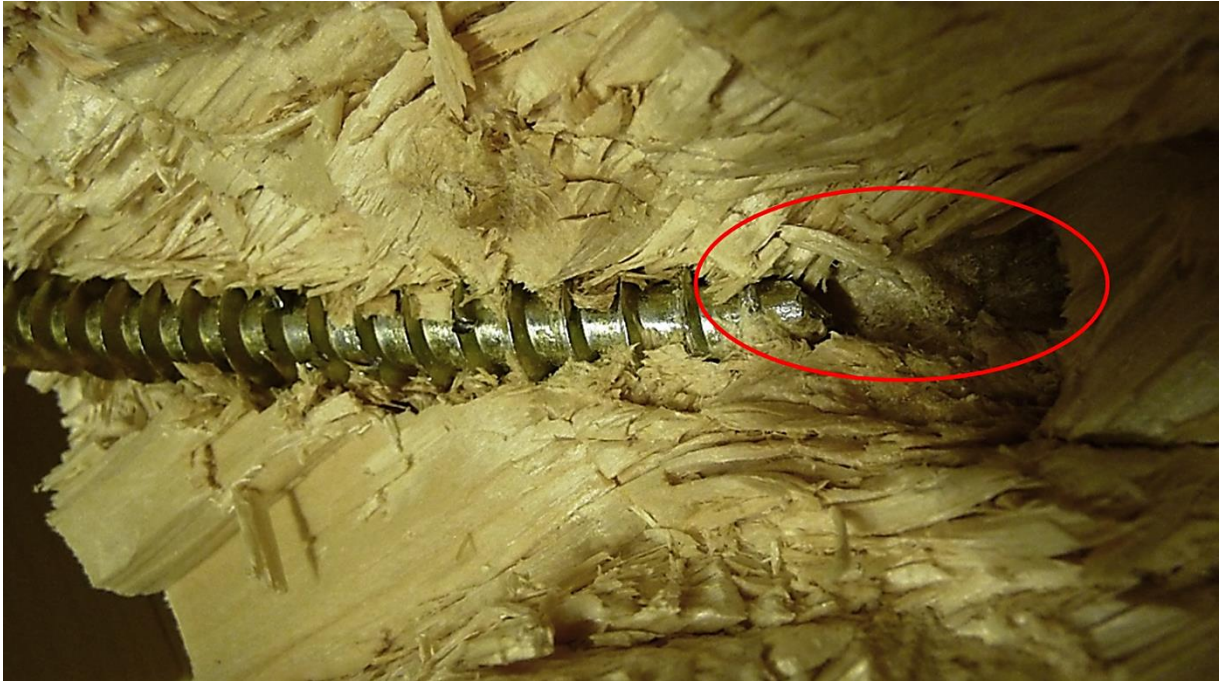


**Figur 20:** Hele skruen eksponert etter brudd i prøve nr B-30-2. Tredelen til venstre er sidepanelet. Et tydelig flytledd har oppstått, markert med den røde ringen til venstre. Delen av skruen i midtpanelet til høyre i bildet har også plastisk deformasjon, men uten det markante leddet, siden fiberretningen der er «vannrett».



**Figur 21:** Sammentrykning av fibre i hullkantsonene i den midterste tredelen i prøve B-30-2.





Figur 22: Spissen på en av skruene i prøve B-30-2. Til høyre for spissen synes sporet hvor skruen har sittet, og er trekt ut fra.

## 5 Diskusjon

### 5.1 Densitet

Densitetsmålingene lå tett opp mot verdiene som produsenten av massivtreelementene hadde oppgitt. Som ventet var de langsgående lamellene tyngre enn de tverrgående. Som man ser av Figur 14 gir ikke målingene noe bidrag til å forklare variasjonen i verken stivhet eller bruddstyrke. Dette gir imidlertid ikke noe reelt bilde på sammenhengen; det er vanskelig å gjøre gode målinger på massivtre, for selv om bitene til densitetsmåling ble tatt ut rett ved siden av skruene, kan selve skruen ha gjennomtrengt en annen lamell, med ulik densitet enn den som ble målt.

### 5.2 Stivhet og kapasitet

Testene viser en klar tendens ved: Stivheten i bruksgrensetilstanden øker med økende skruevinkel. Prøvene med  $\alpha = 0$  hadde meget lav stivhet, sammenlignet med estimert verdi. Dette kan trolig forklares med at skruene her lå tilnærmet parallelt med fiberretningen i midtpanelet, og således trykket sammen trefibrene på tvers med lav motstand. Formelverket fra Eurocode forutsetter at forbinderen står normalt på fiberretningen, og resultatet er derfor ikke overraskende. Likevel er det interessant å se hvor liten vinkelendring som må til for å oppnå en dramatisk økning i stivhet. Det viser at det er meget viktig at både den som dimensjonerer forbindelsene og den som utfører monteringen har kunnskap om betydningen av skruens vinkel og oppbygningen av sjiktene i massivtreelementene.

Man må også legge merke til at selv om stivhet og styrke øker med større vinkel, øker også spredningen i testresultatene. En høy spredning er ikke gunstig, da dette gir en lav 5 %-fraktilverdi som er utgangspunktet for den karakteristiske kapasiteten til forbinderen, og gjør et stort system av forbindelser uforutsigbart.

Grunnen til at både estimert og målt bruddstyrke er lavere for forbindelsene på 45 grader, er at forankringslengden blir betraktelig mye mindre i den innerste delen av forbindelsen. For eksempel ble  $l_{ef}$  bare redusert med ca 20 mm når vinkelen går fra 0 til 30 grader, men hele 40 mm ekstra fra 30 og 45 grader (med geometrien i forbindelsene med sidepanel type A.) 45 grader gir altså de stiveste og sterkeste forbindelsene relativt sett, men man må kompensere for forankringsreduksjonen med å bruke lengre skruer eller forsenke skruene godt inn i treverket for å få gevinsten av det.



Arbeidslinjene for forbindelsene med 15, 30 og 45 grader har ganske lignende form, med samme mekanismer gjennom forløpet: Først et lineært, elastisk område, før det oppstår et brudd i forbindelsen, med plastiske flyteledd i skruene. Her synker kurven ganske brått, da hullkanten har gitt etter. Etter litt flater kurven ut, og den synker langsomt mens skruen blir trekt ut fra den innerste tredelen. Hvis ikke deformasjonsmålerne var begrenset og det hadde vært mulig å presse videre, ville man trolig fått en jevn, slak linje helt til skruen var trukket helt ut. Som man ser i figurene i kapittel 4, ligger denne restkapasiteten på et nivå som i de fleste tilfellene faktisk er noe større enn bruddkapasiteten  $P_{\max}$  til forbindelsene med 0 graders skruevinkel. Det er også verdt å merke seg at toppunktet på hver kurve er spissere med økt vinkel, altså får man et bråere og mer sprøtt brudd når skruevinkelen er høy.

Basert på selve testverdiene, spredningen av dem og formen på arbeidslinjene, kan det se ut som om en vinkel på et sted mellom 15 og 30 grader er det ideelle for slike forbindelser. Da vil man få både gode og forutsigbare resultater, og selve monteringsarbeidet går enkelt.

I forbindelsene med kryssede skruer oppsto det sideveis momentkrefter som førte til vridning av prøvene under trykklast. Dette var en svakhet i forsøksoppsettet som ikke ble forutsett. Det ble forsøkt å montere fastholdinger, men disse var ikke effektive nok til å forhindre problemet helt. Vridningene gjorde at givene som målte deformasjon ikke ga målinger som stemte med virkeligheten. Problemet gjorde seg gjeldende først etter brudd i forbindelsene, så resultatene for stivhetsberegning skal være pålitelige. Også her ser vi en høyere stivhetsverdi med større vinkel. Noe overraskende ble det målt forholdsvis mye høyere stivhet i X-forbindelsene med  $\alpha = 30^\circ$  enn i strekkforbindelsene med samme vinkel.

### 5.3 Metoden – vurdering av feilkilder

Det er en rekke mulige feilkilder som kan ha bidratt til å gjøre spredningen i resultatene større enn ønsket. For det første var det utfordrende å skru inn alle skruene med akkurat den vinkelen de skulle ha. Det ble brukt håndholdt verktøy, og vinkelnøyaktigheten kan anslås til +/- 3 grader. Under oppdeling av de store elementene til mindre prøvestykker kan snittflatene ha blitt noe ujevne, noe som kan ha hatt betydning de stedene snittflaten også er kontaktflaten i forbindelsen. Videre gjør massivtreets krysslaminerte oppbygning at kvist, sprekker og ulike virkesfeil kan ligge godt skjult inne i elementet der skruen er satt inn. Alle disse tingene er imidlertid usikkerheter som også vil være tilstede i «det virkelige liv» utenfor laboratoriet.

I resultatene for X-forbindelser er det viktig å merke seg at verdiene i Figur 19 og Tabell 6 er middelverdier av alle fire skruene per prøve, altså både de som er trykkbelastet og de som er

stekkbelastet. I virkeligheten kan spenningsfordelingen være ulik for de to skruene i hvert skruepar.

## 6 Konklusjon

Ved å montere gulv-vegg-forbindelser med helgjengede skruer i massivtreelementer, satt inn med en vinkel mot kraftretningen ble det oppnådd høy styrke og stivhet. Forbindelsene med vinkelrette skruer ble målt til verdiene  $K_{ser} = 0,7$  kN/mm og  $P_{max} = 8,4$  kN per skrue. I strekkforbindelser med vinkel  $\alpha = 45$  grader ble det målt  $K_{ser} = 13,1$  kN/mm og  $P_{max} = 17,1$  kN. Dette tilsvarer en økning på nærmere 20 ganger i stivhet og over dobling av styrke, fra 0 til 45 graders kraft-skruevinkel. Det viser også at det er viktig å ta hensyn til at en forandring av skruevinkelen endrer ikke bare kraft-skrue-vinkel, men også fiber-skrue-vinkelen. Skruer som ligger parallelt med fiberretningen gir ekstremt lave stivhetsverdier, som forårsaker store glidninger i forbindelsen, men det kreves kun en relativt liten vinkel mot fiberretningen for å få stor gevist i stivhet. Den optimale vinkelen er  $\alpha =$  mellom 15 og 30 grader, da slike forbindelser gir lav spredning i resultatene og ikke-sprøe brudd, samtidig som at man er sikret mot at skruen står parallelt med fiberretningen, uavhengig av orienteringen til lamellen man treffer.

Resultatene viser at det er av stor viktighet å ta hensyn til gulv-vegg-forbindelsene ved prosjekteringen av nye massivtrebygg. I skrueforbindelser av den typen som er brukt i hybelblokkene på Ås vil variasjoner i kraft-skrue-vinkelen ha en helt avgjørende effekt på byggets samlede mekaniske egenskaper og horisontalbevegelser under påkjenning av f.eks. vindlast.

## **7 Videre arbeid**

Verdier fra denne masteroppgaven skal benyttes videre i en fullstendig FEM-analyse av hele bygningen i Palisaden. Dette inngår i en masteroppgave av Lars Christian Mørch. I tillegg gjøres det målinger på det ferdige byggets bevegelser under vindlast, som skal sammenlignes med simuleringene. Phd-stipendiat Anders Steinsvik Nygård skal også jobbe videre med temaet i forskningsprosjektet Wood/Be/Better finansiert av Norges Forskningsråd.

## 8 Referanser

Ashtari, S. (2012). *In-plane Stiffness of Cross-laminated Timber Floors*. Master's Thesis. The University of British Columbia, Vancouver.

Bejtka I.; Blaß, H. J. (2001) Screws with continuous threads in timber connections. *RILEM proceedings PRO 22*, Stuttgart

Bejtka I.; Blaß, H. J. (2002). Joints with inclined screws. *Proceedings CIB-W18 Meeting*, Kyoto, Japan. Paper 35-7-5

ETA-11/0190 European Technical Approval, Würth self-tapping screws

ETA-13/0684 European Technical Approval, Martinsons KL-Trä

Gavric, I., Fragiaco, M., Ceccotti, A. (2012). Strength and Demormation Characteristics of Typical X-lam Connections. *World Conference on Timber Engineering*. Auckland, New Zealand.

Jockwer, R., Steiger, R., Frangi, A. (2013). Fully Threaded Self-tapping Screws Subjected to Combined Axial and Lateral Loading with Different Load to Grain Angles. *Materials and Joints in Timber Structures, RILEM Bookseries 9*.

Muñoz, W., Mohammad, M., Gagnon, S. (2010). Lateral and Withdrawal Resistance of Typical CLT Connections. *11th World Conference on Timber Enineering*. Trentino, Italy.

Sandhaas, C.; van de Kuilen, J.-W. G.; Boukes, J.; Ceccotti, A. (2009) Analysis of X-lam panel-to-panel connections under monotinic and cyclic loading. *Proceedings CIB-W18 Meeting*, Dübendorf, Switzerland, Paper 42-12-2

Standard Norge, NS-EN 1995-1-1:2004+A1:2008+NA:2010. Eurocode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner. Del 1-1: Almenne regler og regler for bygninger.

Standard Norge, NS-ISO 6891. Trekonstruksjoner, Mekaniske forbindelsesmidler, Generelle prinsipper for bestemmelse av styrke og deformasjonsegenskaper.

Tomasi, R.; Crosatti, A.; Piazza, M. (2010). Theoretical and experimental analysis of timber-to-timber joints connected with inclined screws. *Construction and Building Materials 24*, University of Trento, Italy.

Uibel T.; Blaß, H. J. (2006). Load carrying capacity of joints with dowel type fasteners in solid wood panels. *Proceedings CIB-W18 Meeting*, Florence, Italy. Paper 39-7-5

Uibel T.; Blaß, H. J. (2007). Edge Joints with dowel type fasteners in cross laminated timber. *Proceedings CIB-W18 Meeting*, Bled, Slovenia. Paper 40-7-2

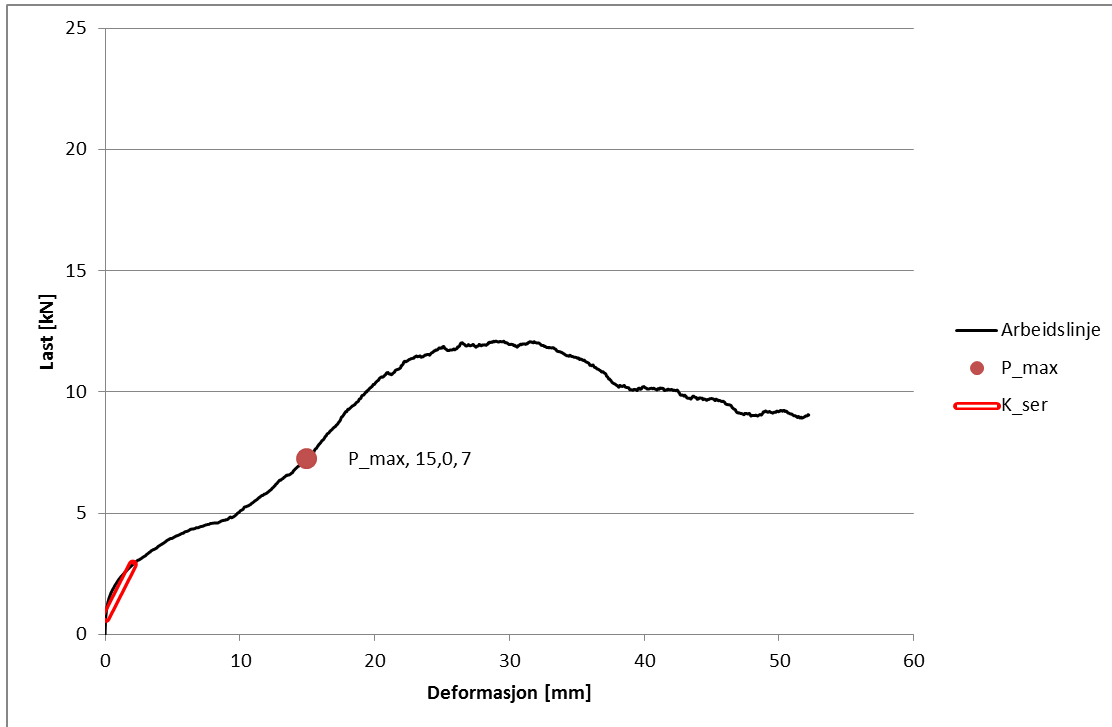
Vessby, J., Enquist, B., Petersson, H., Alsmarker, T. (2009). Experimental study of Cross-laminated timber wall panels. *Eur. J. Wood Prod.*, 67: 211-218.

## 9 Vedlegg

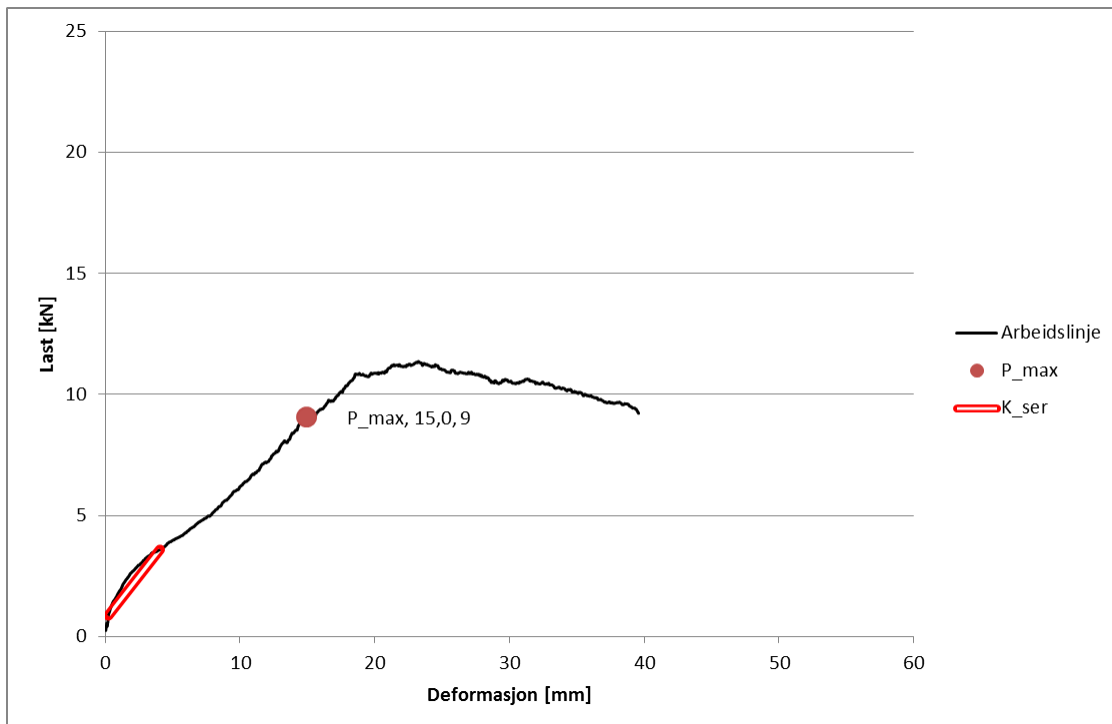
### 9.1 Vedlegg A - Arbeidlinjer

Arbeidslinjer for alle prøver vises under. Forklaring på nummereringen: A-0-1 = Type A- vinkel 0 grader-prøve nr 1 i serien. Strekkforbindelser:

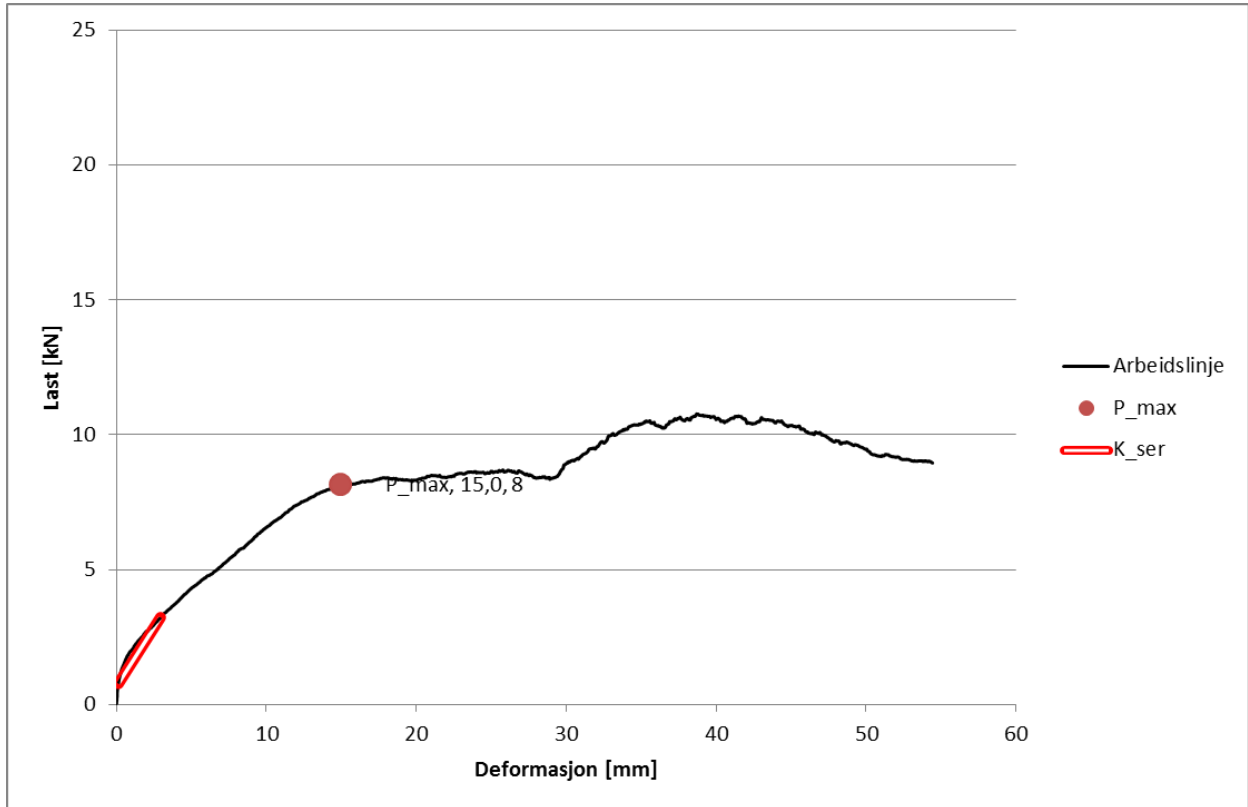
A-0-1:



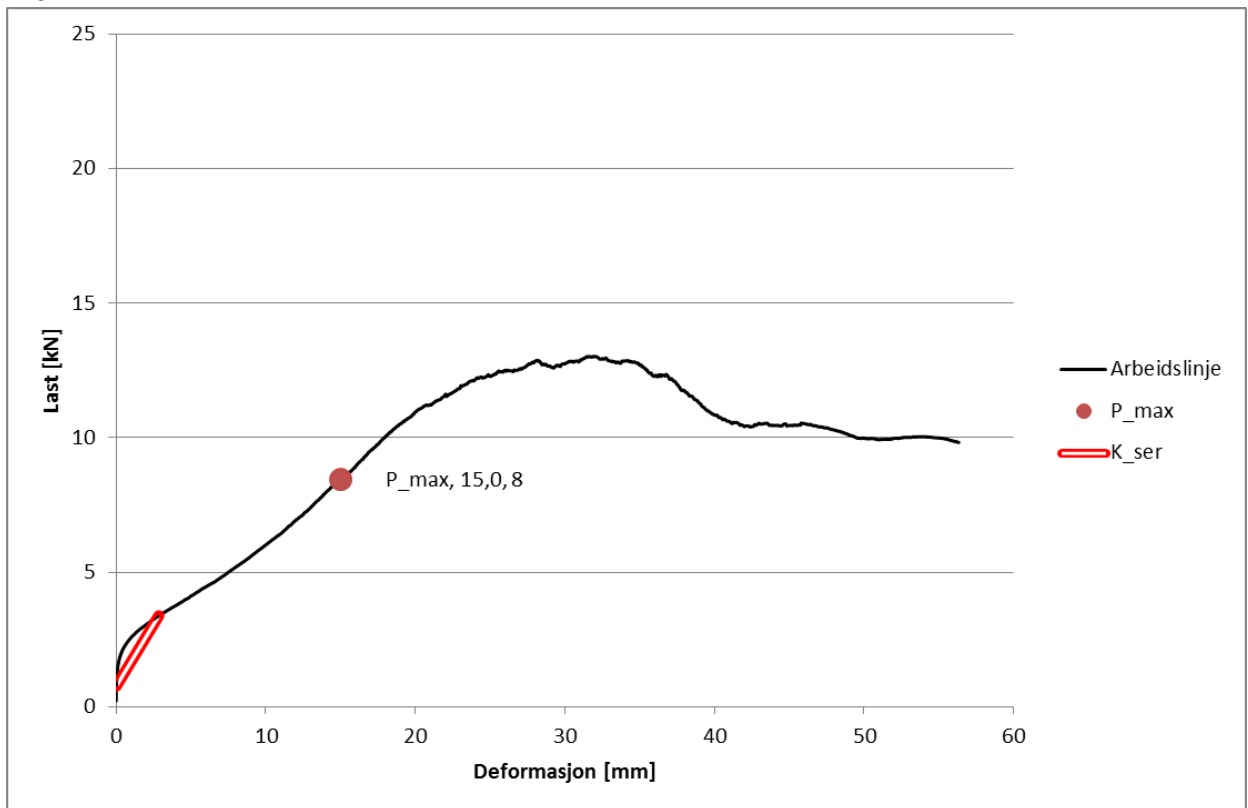
A-0-2:



A-0-3:

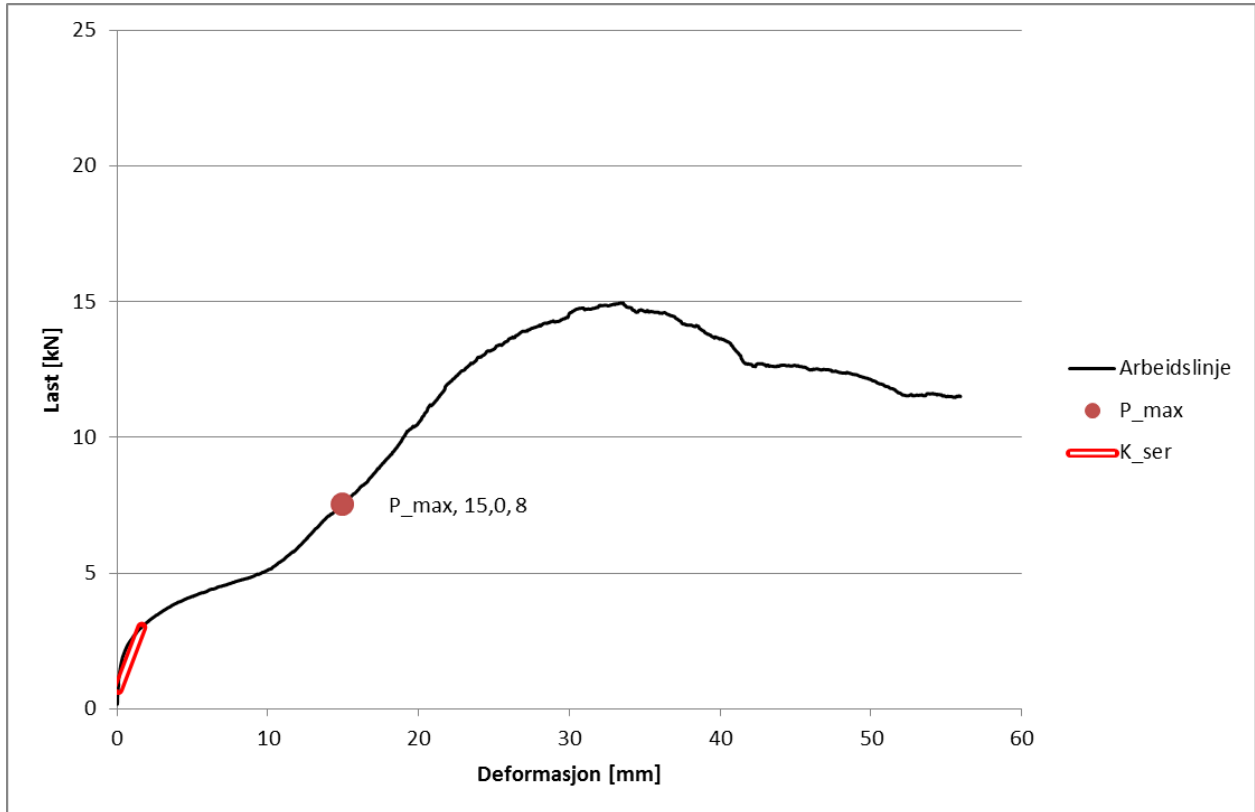


A-0-4:

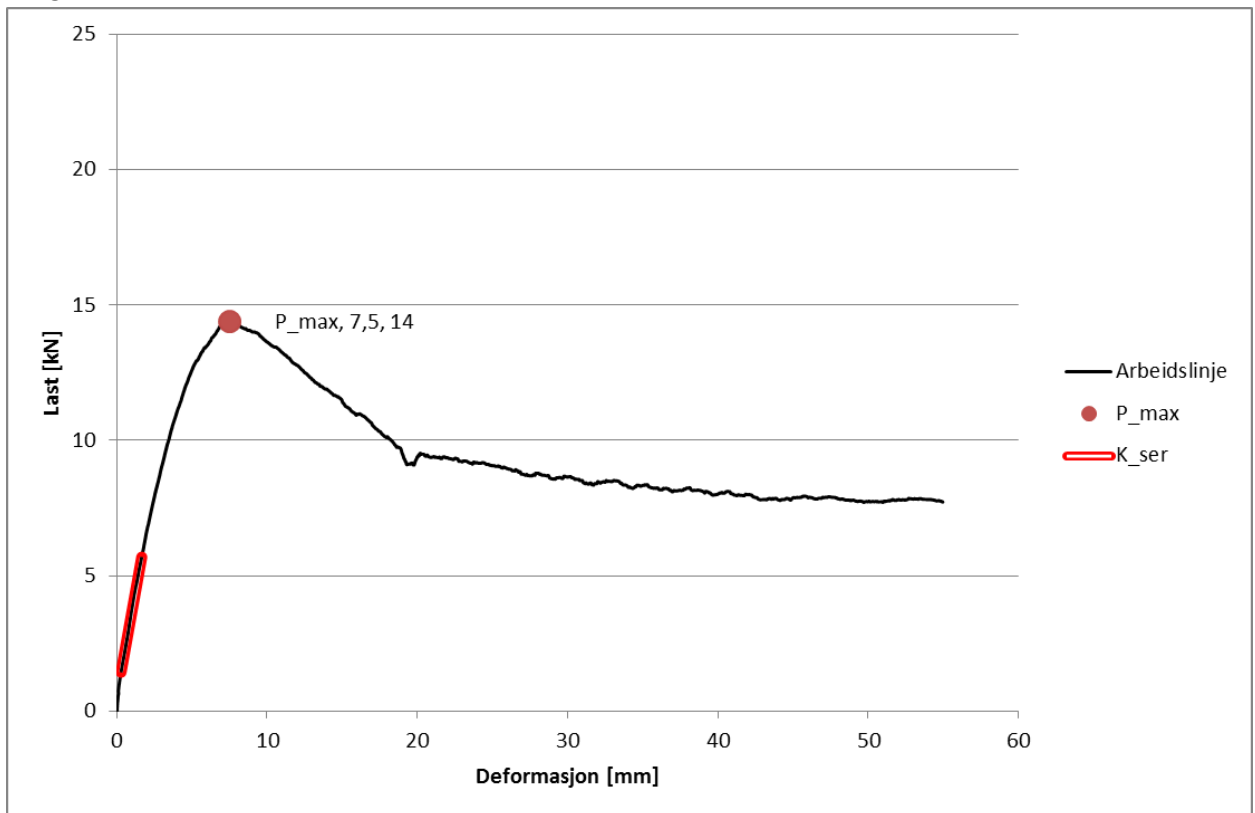




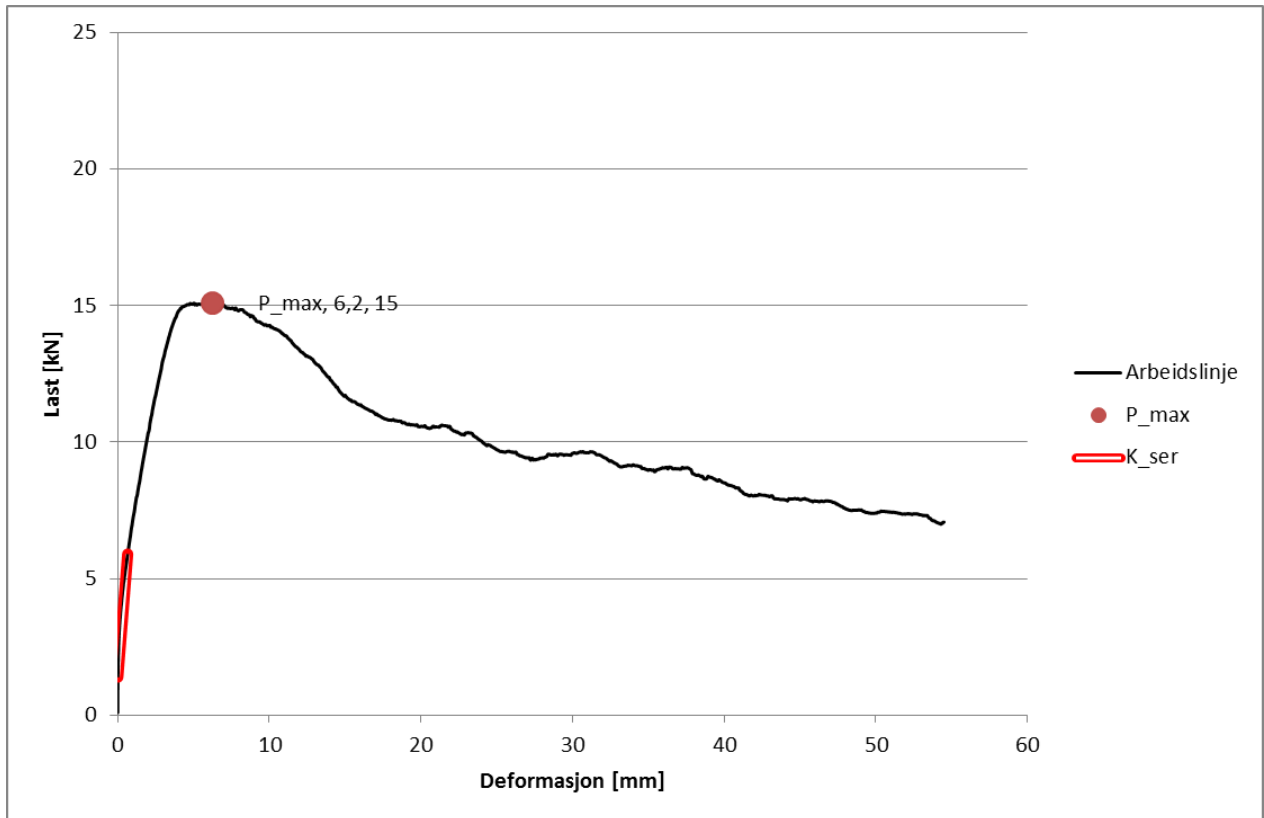
A-0-5:



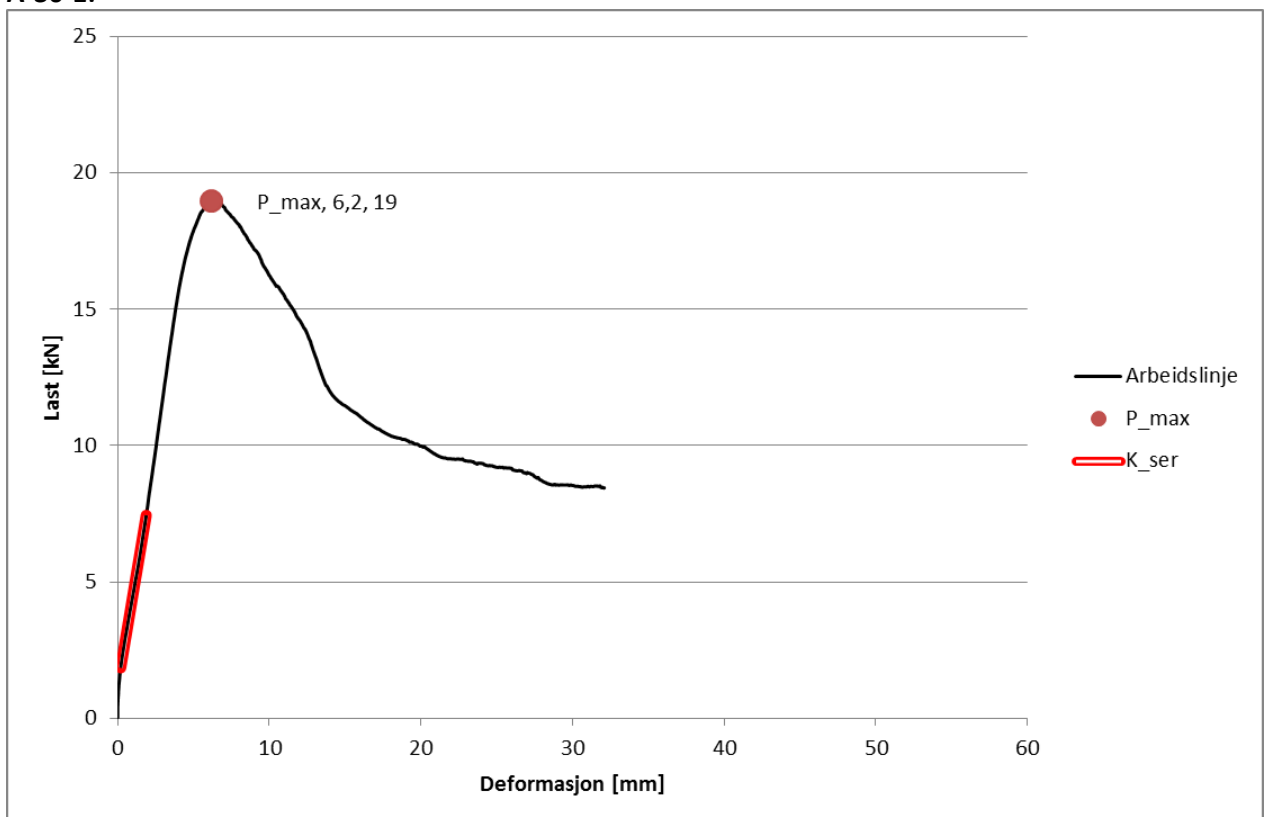
A-15-1:



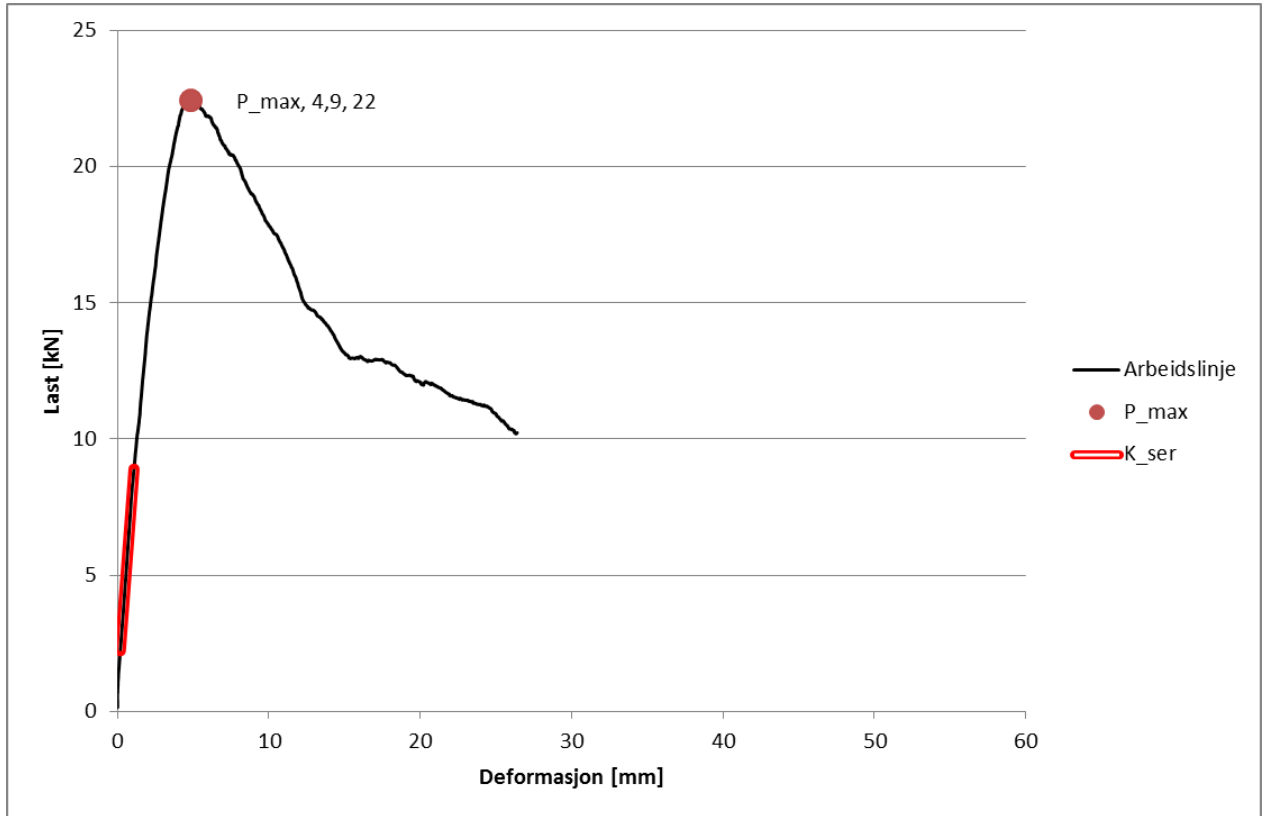
A-15-2:



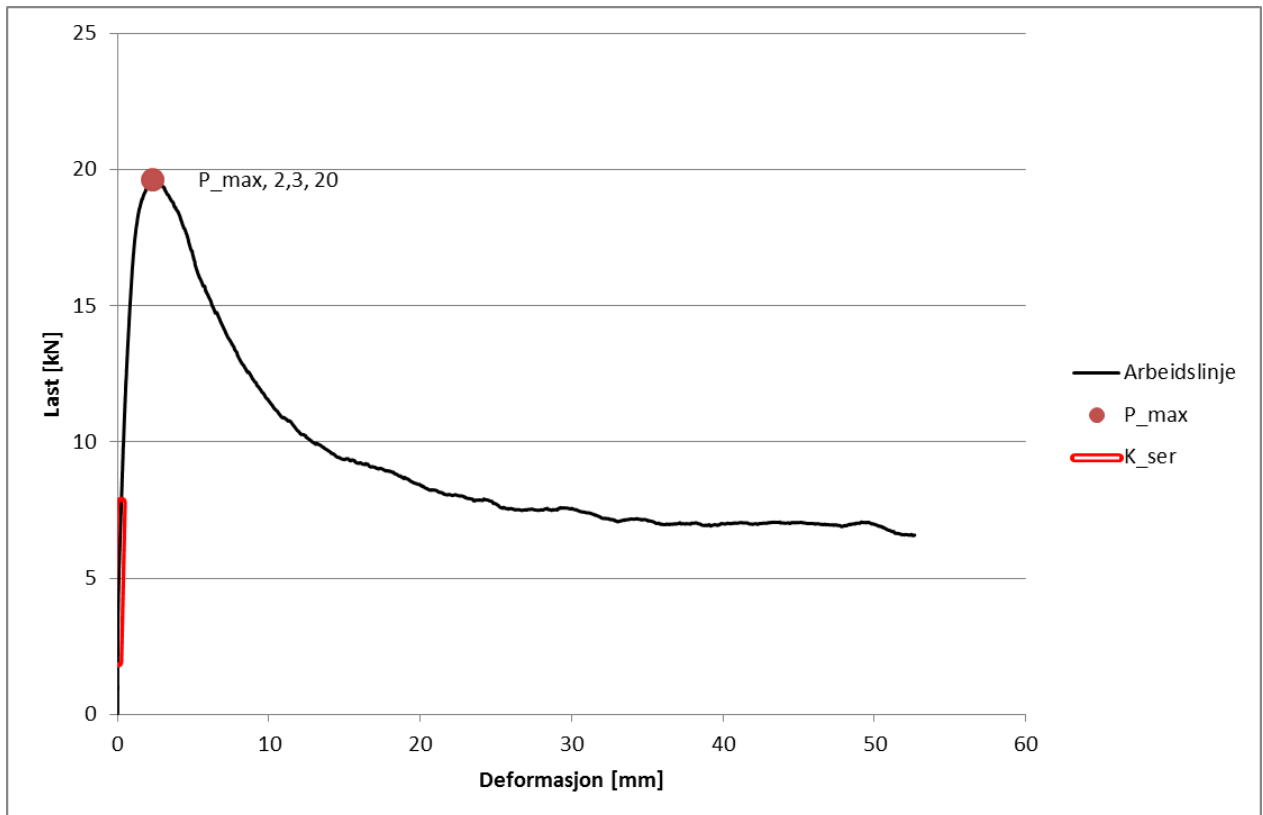
A-30-1:



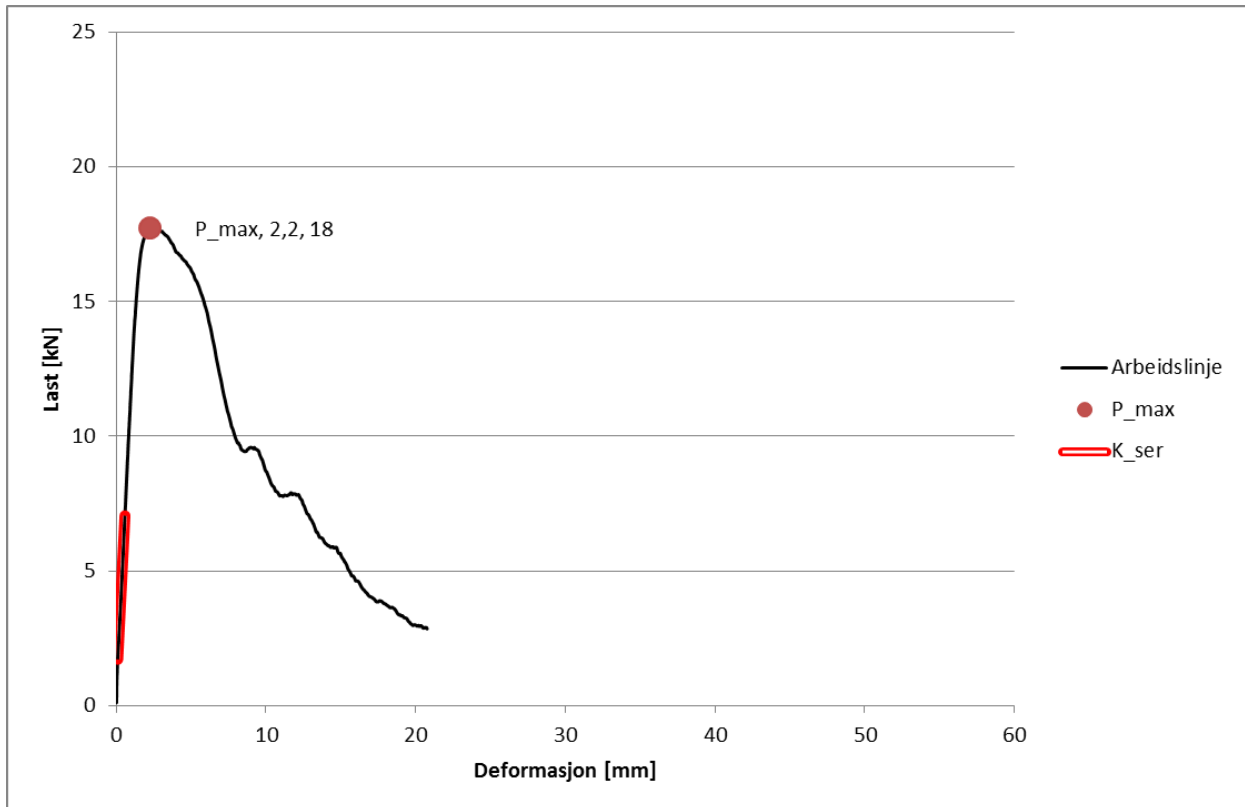
A-30-2:



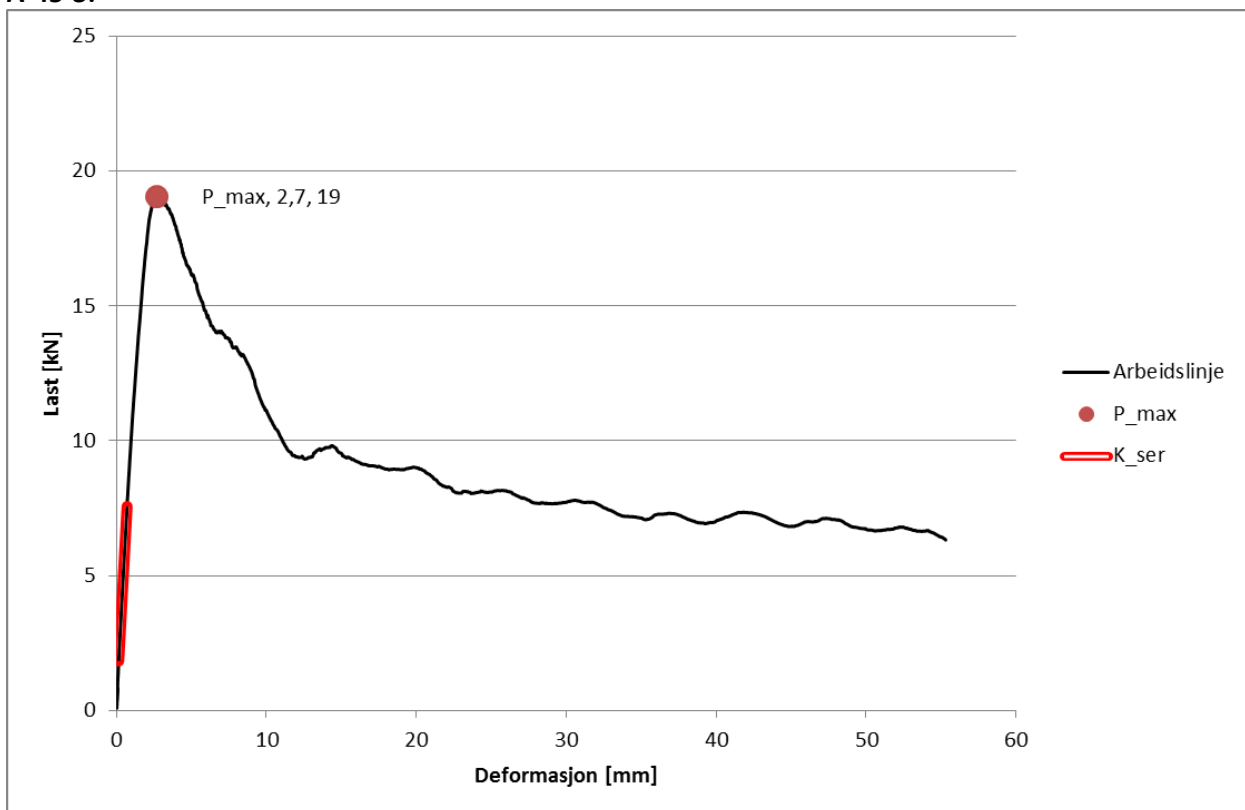
A-45-1:



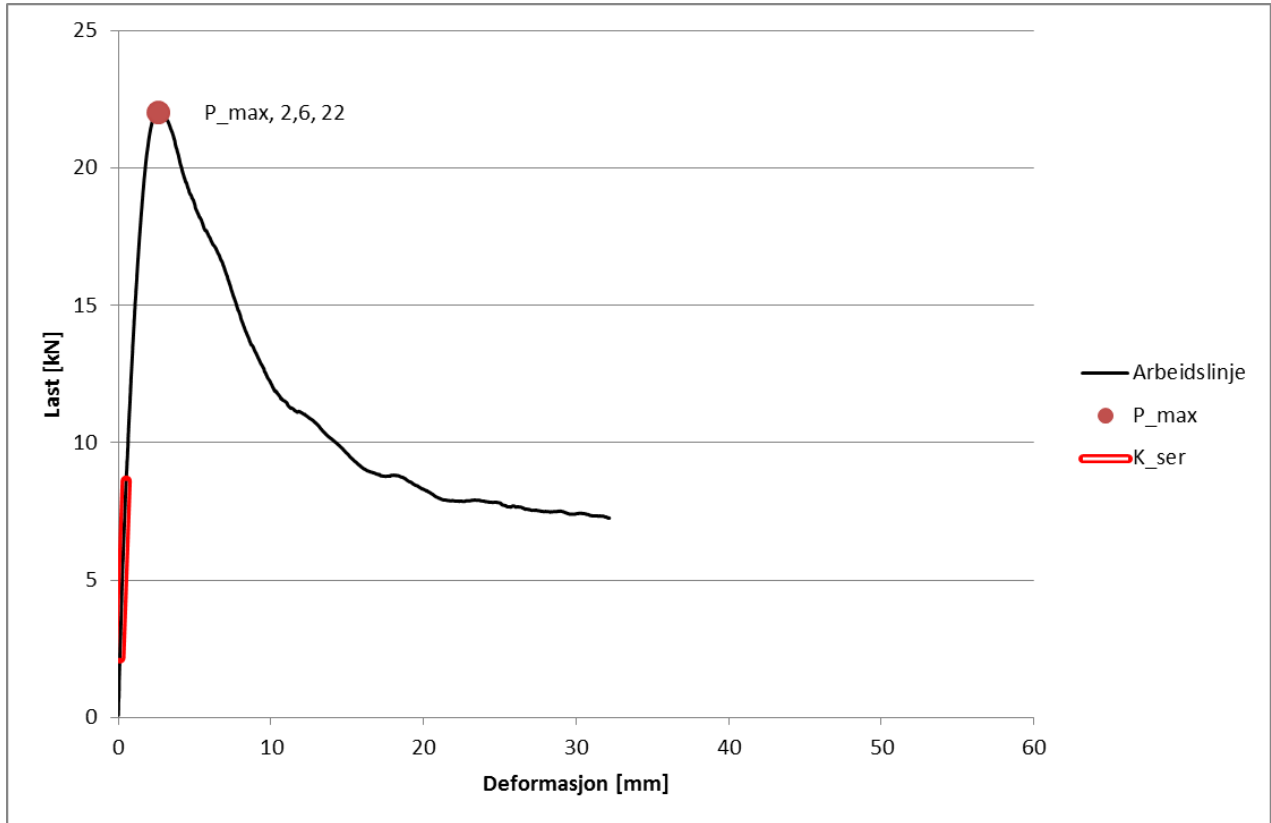
A-45-2:



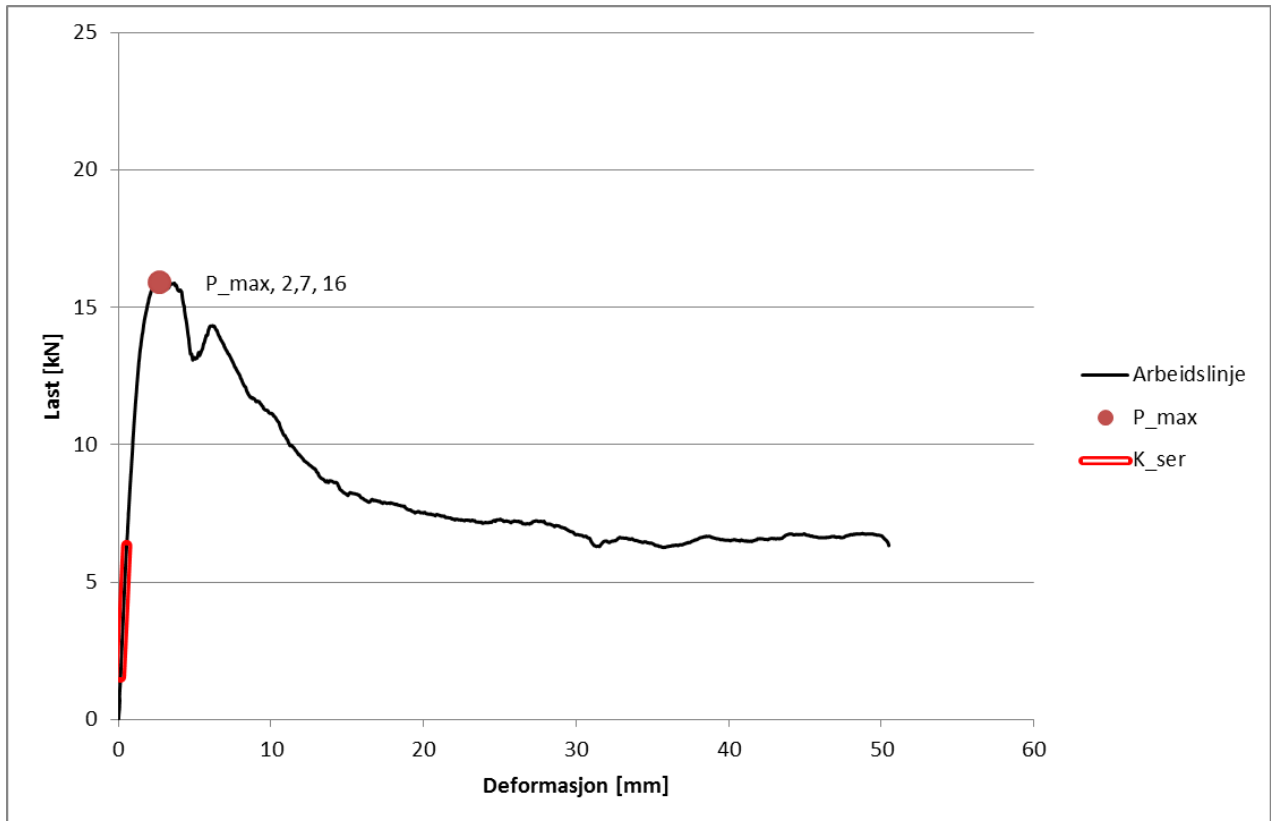
A-45-3:



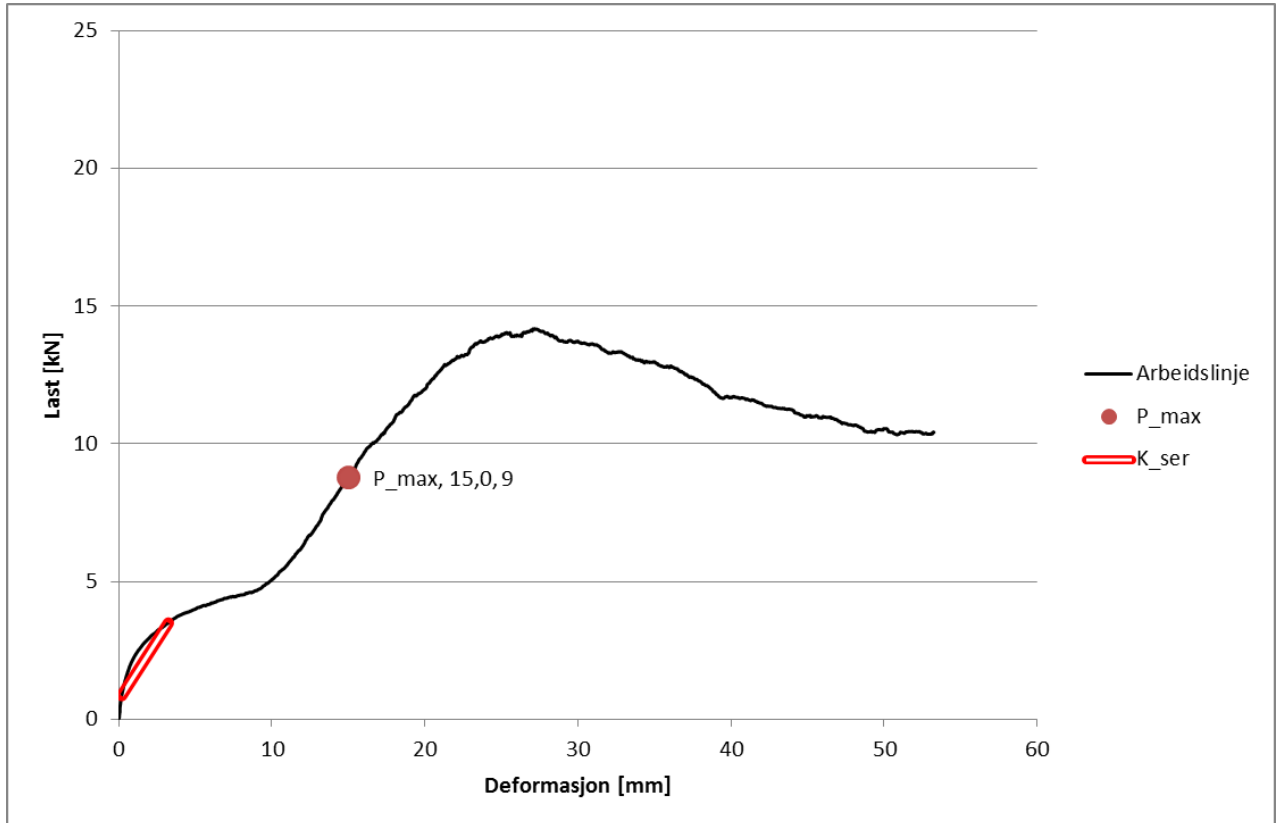
A-45-4:



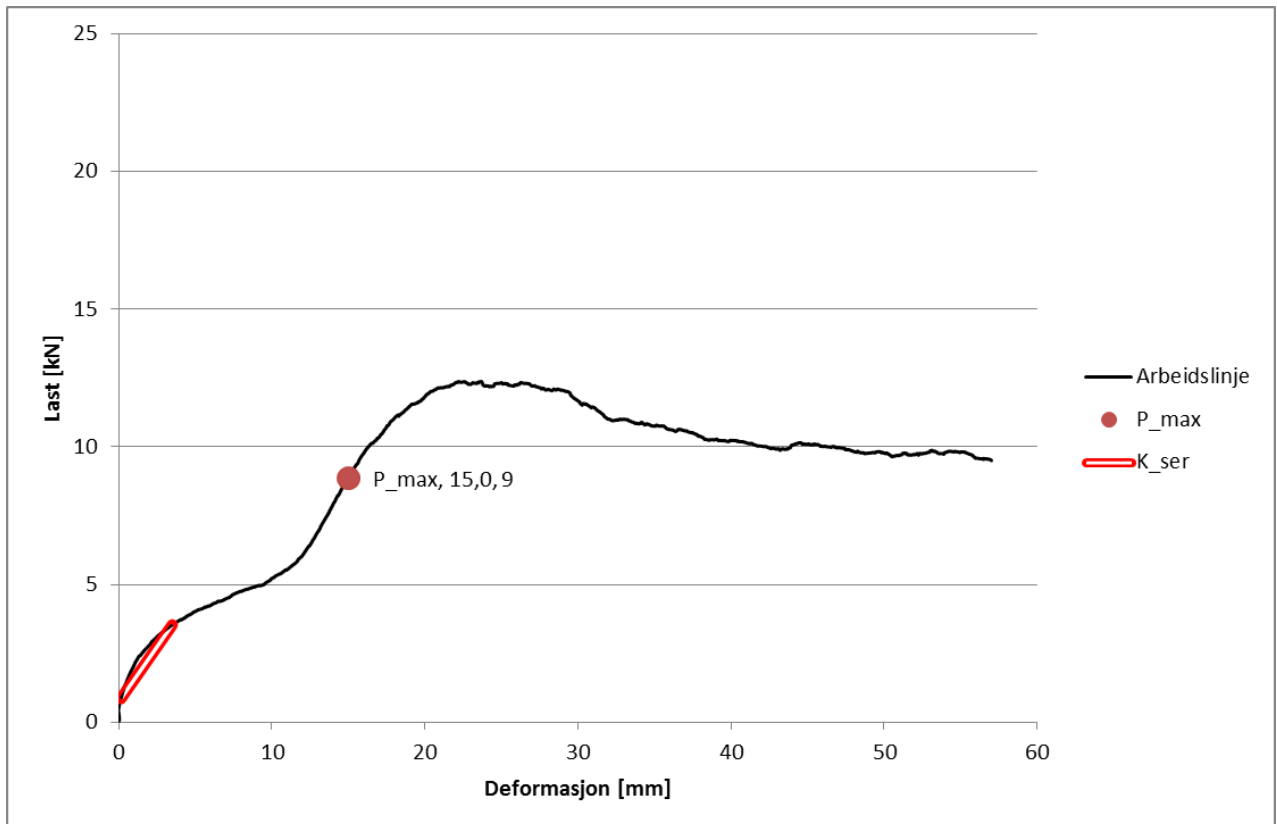
A-45-5:



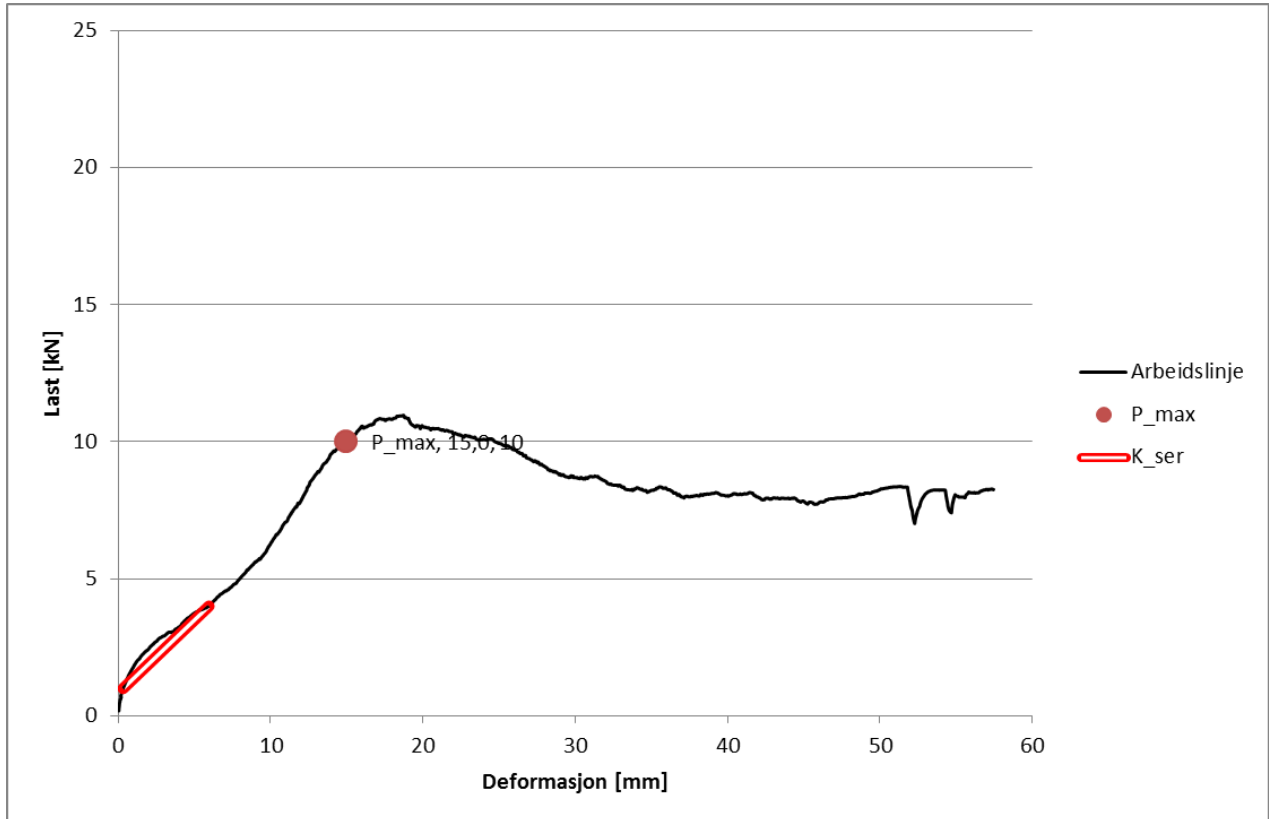
B-0-1:



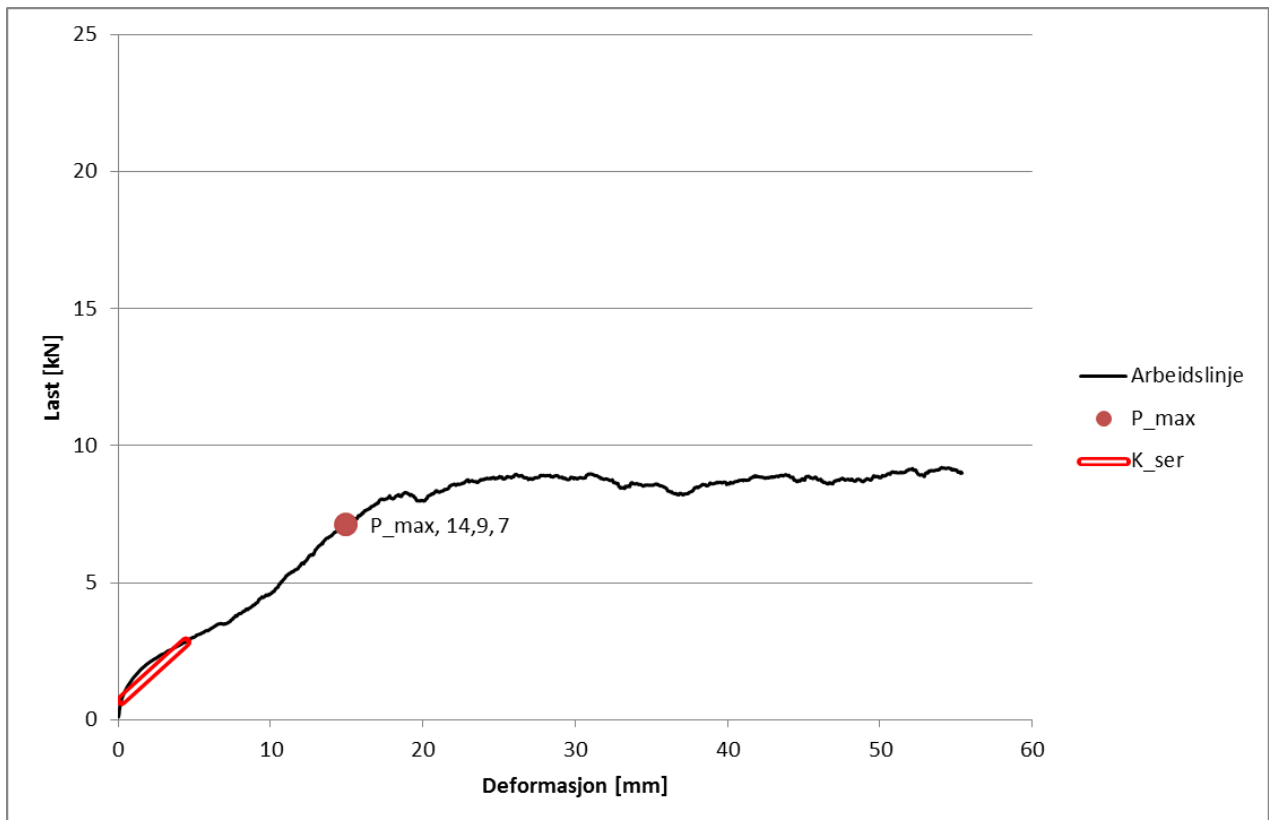
B-0-2:



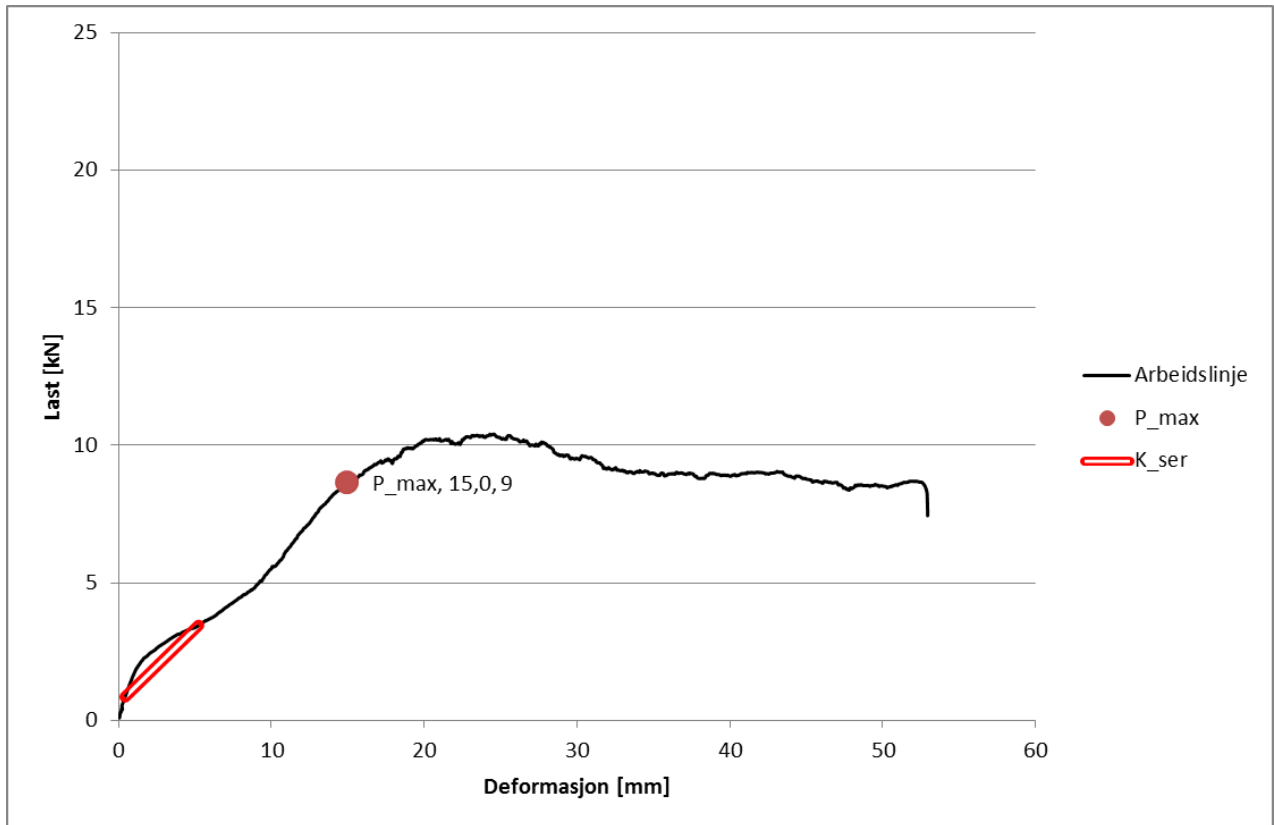
B-0-3:



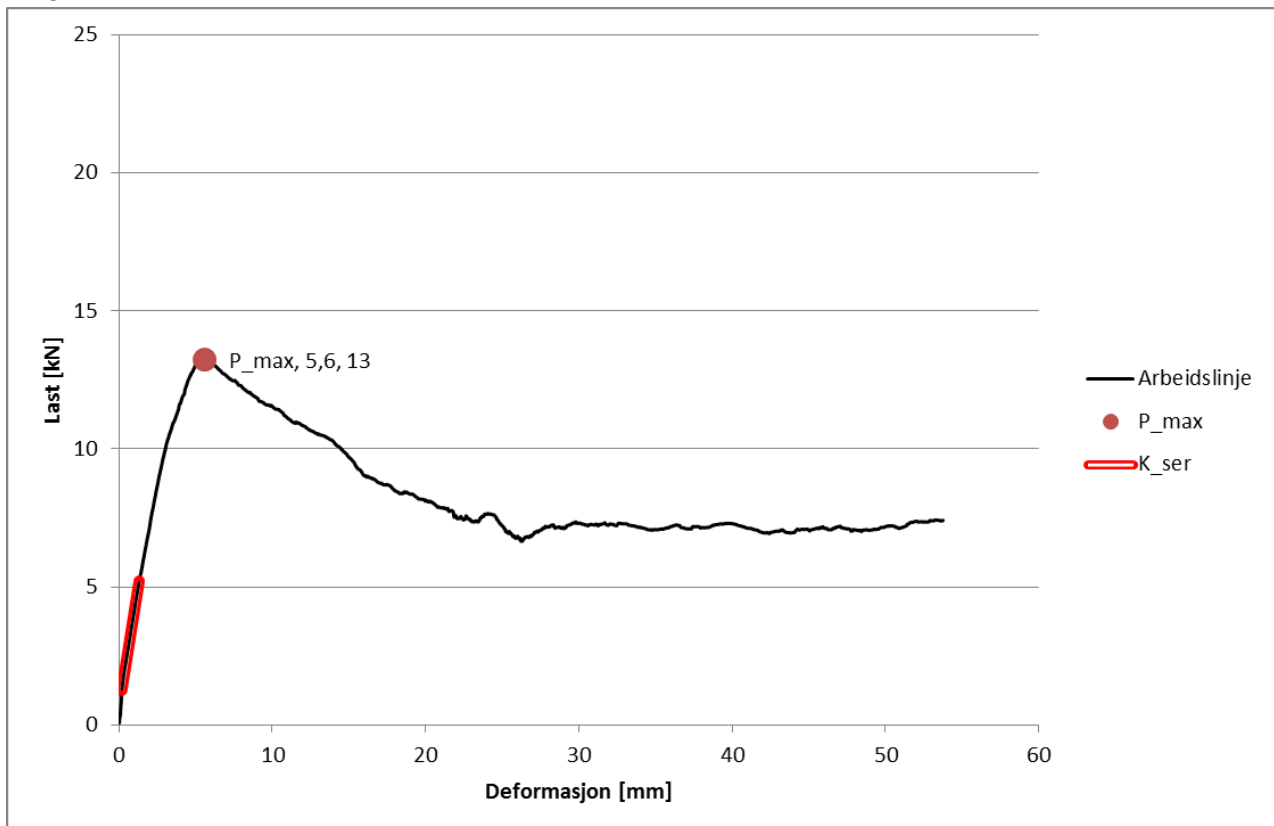
B-0-4:



B-0-5:

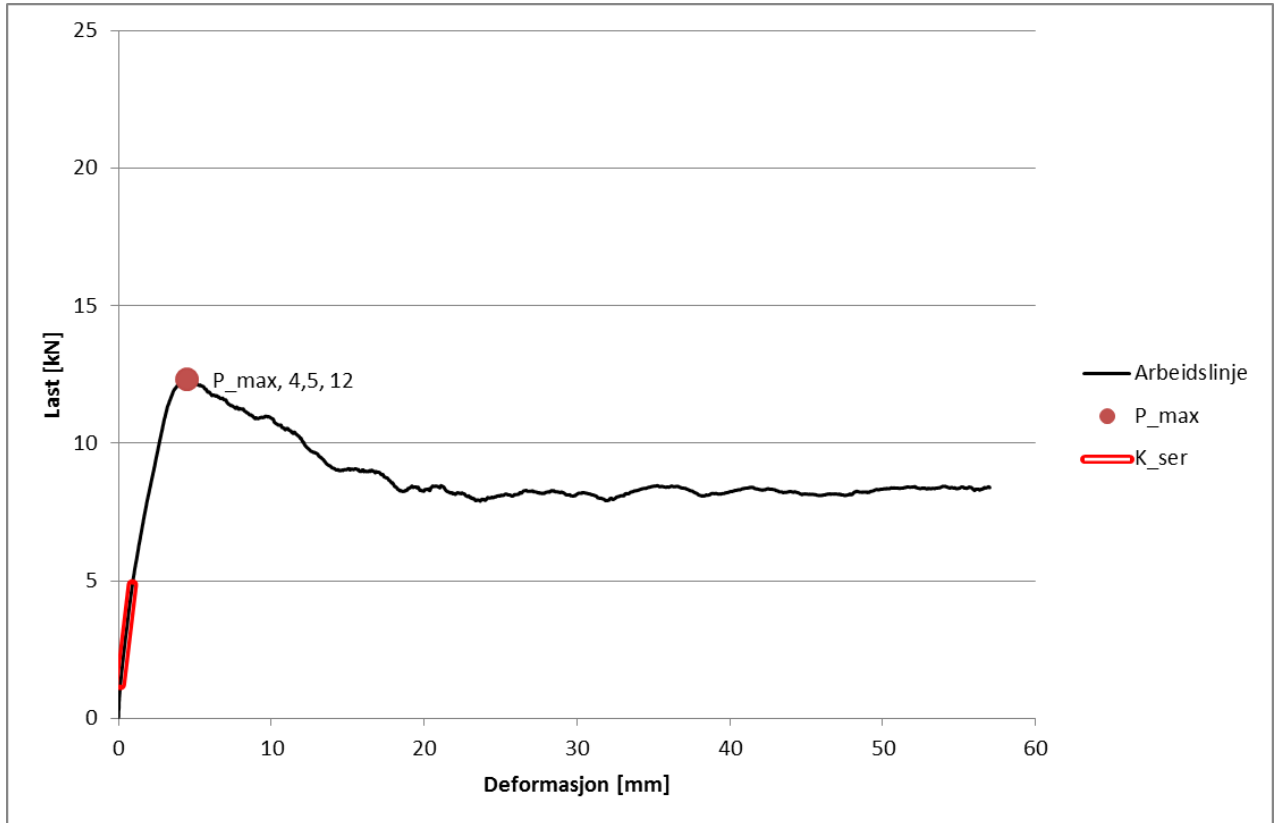


B-15-1:

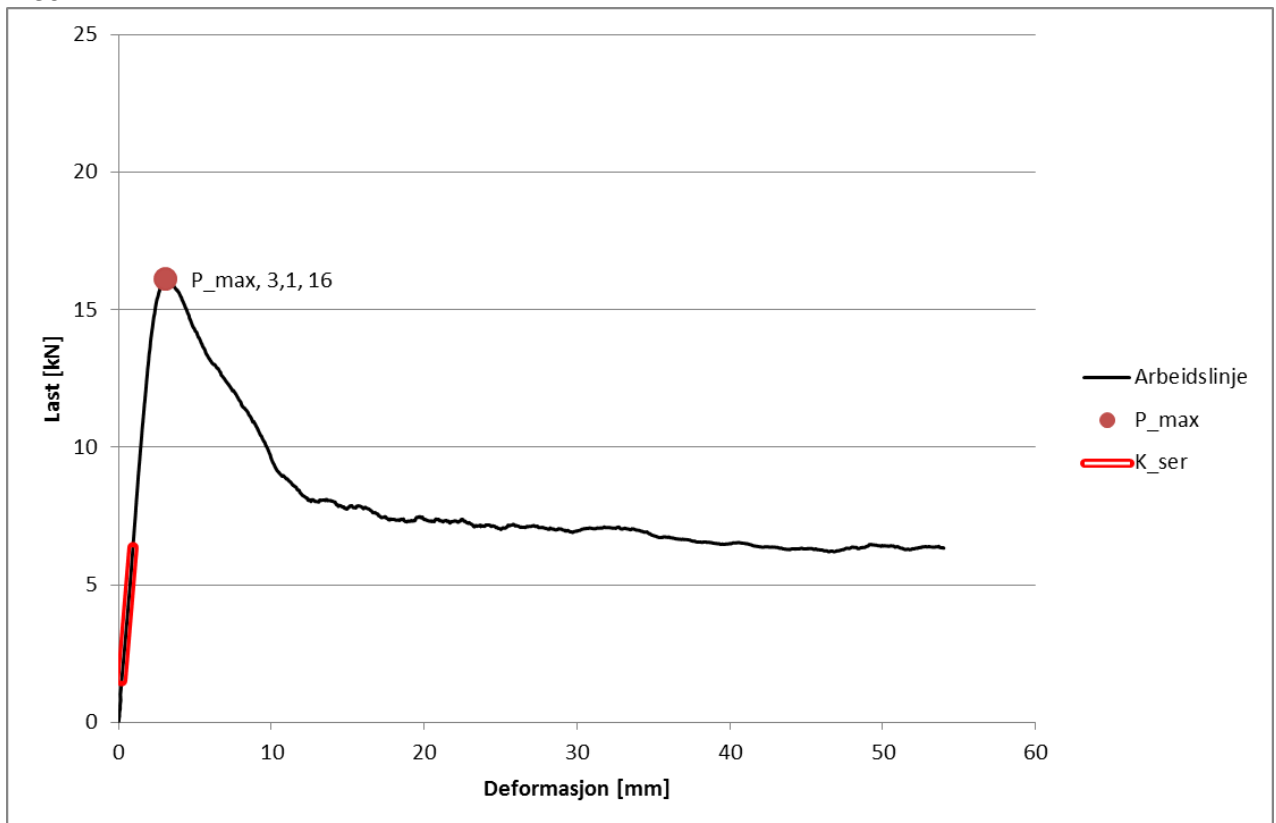




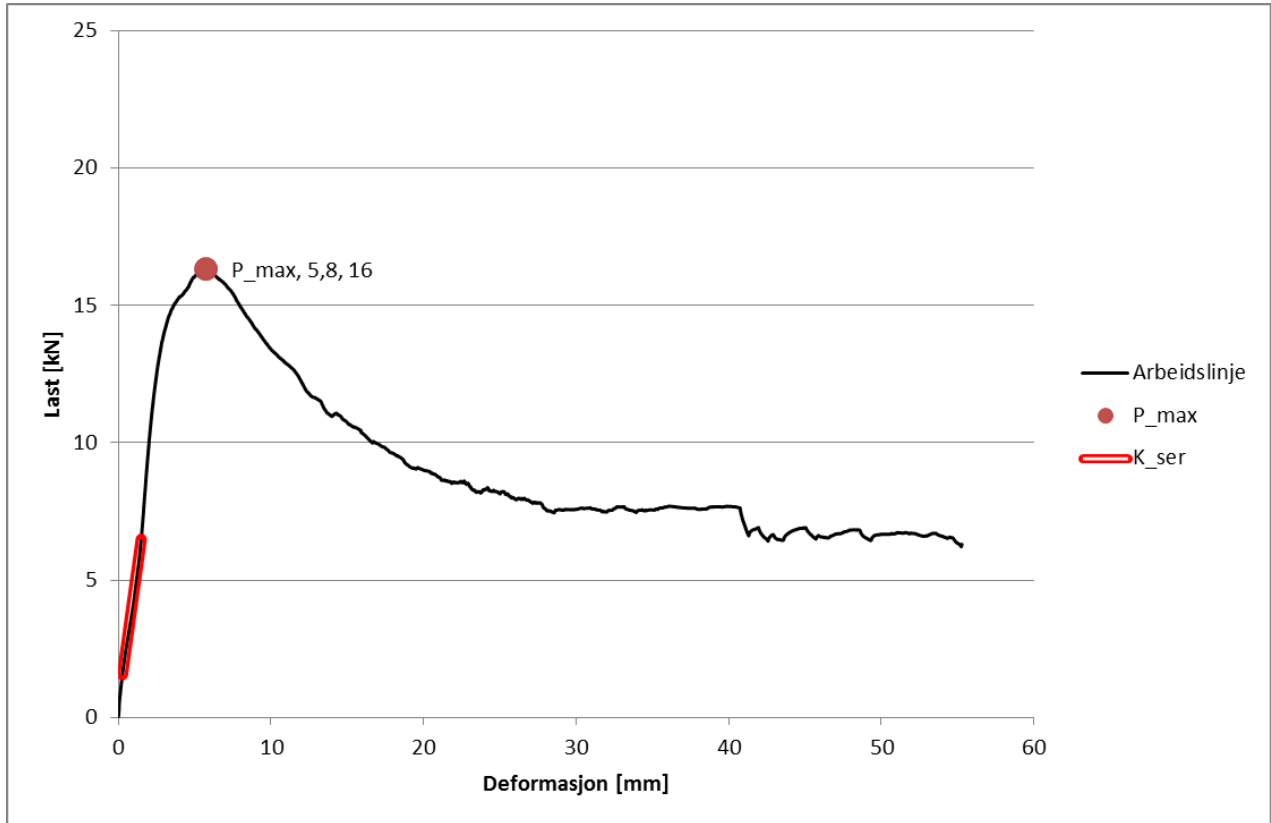
B-15-2:



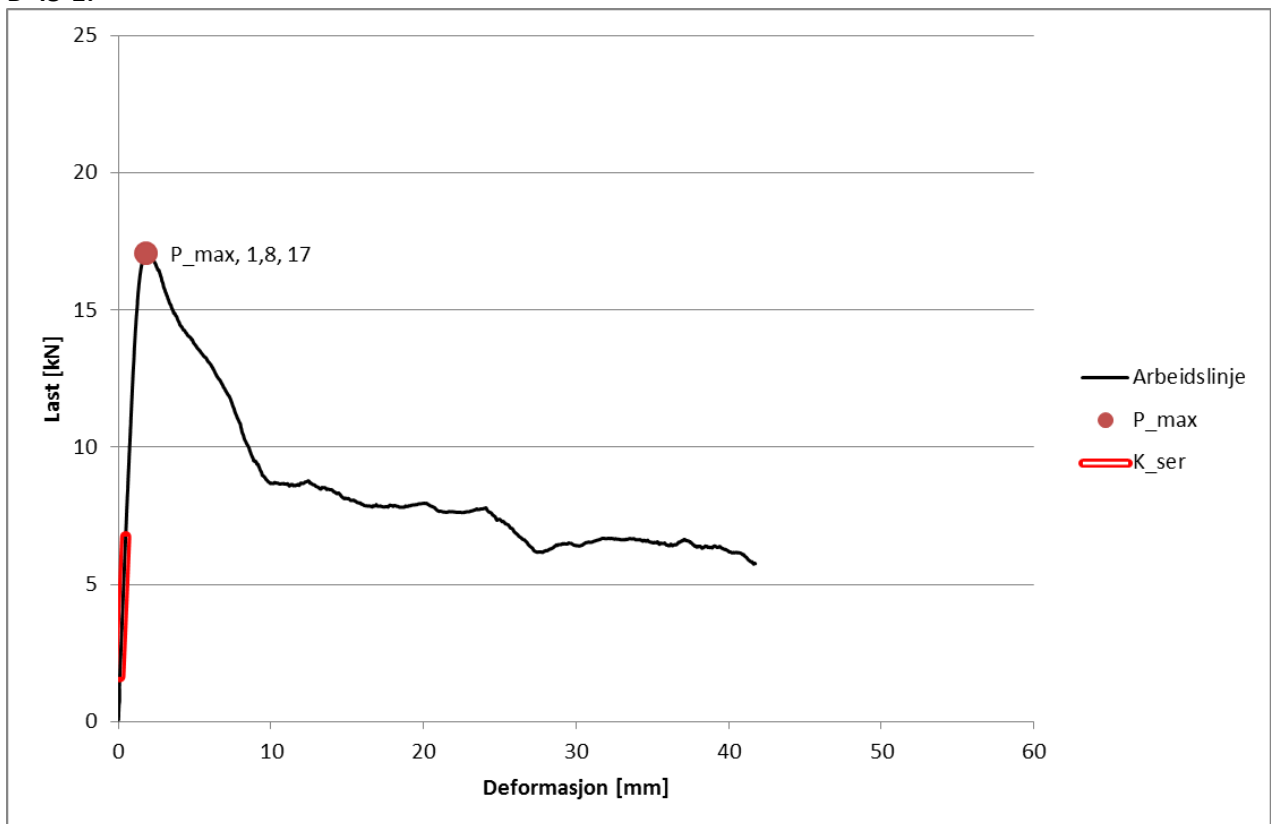
B-30-1:



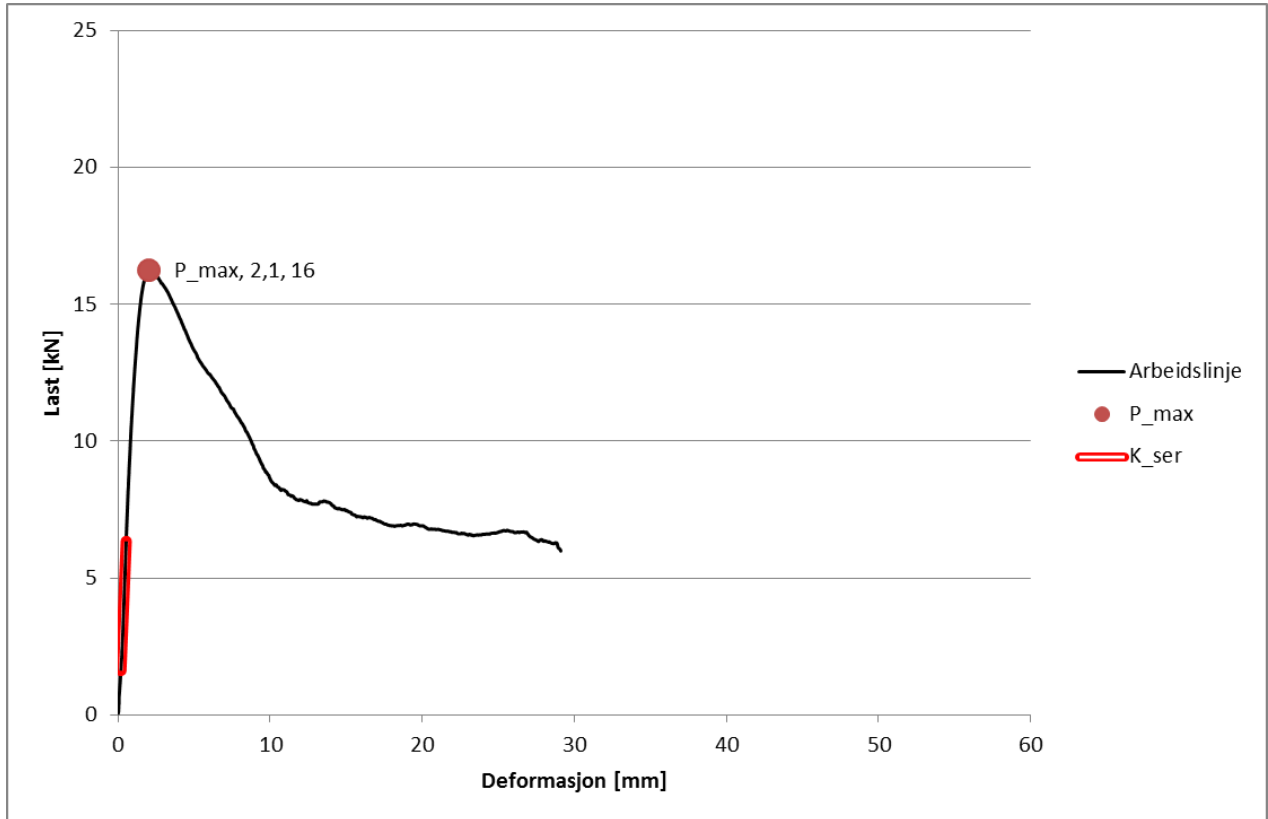
B-30-2:



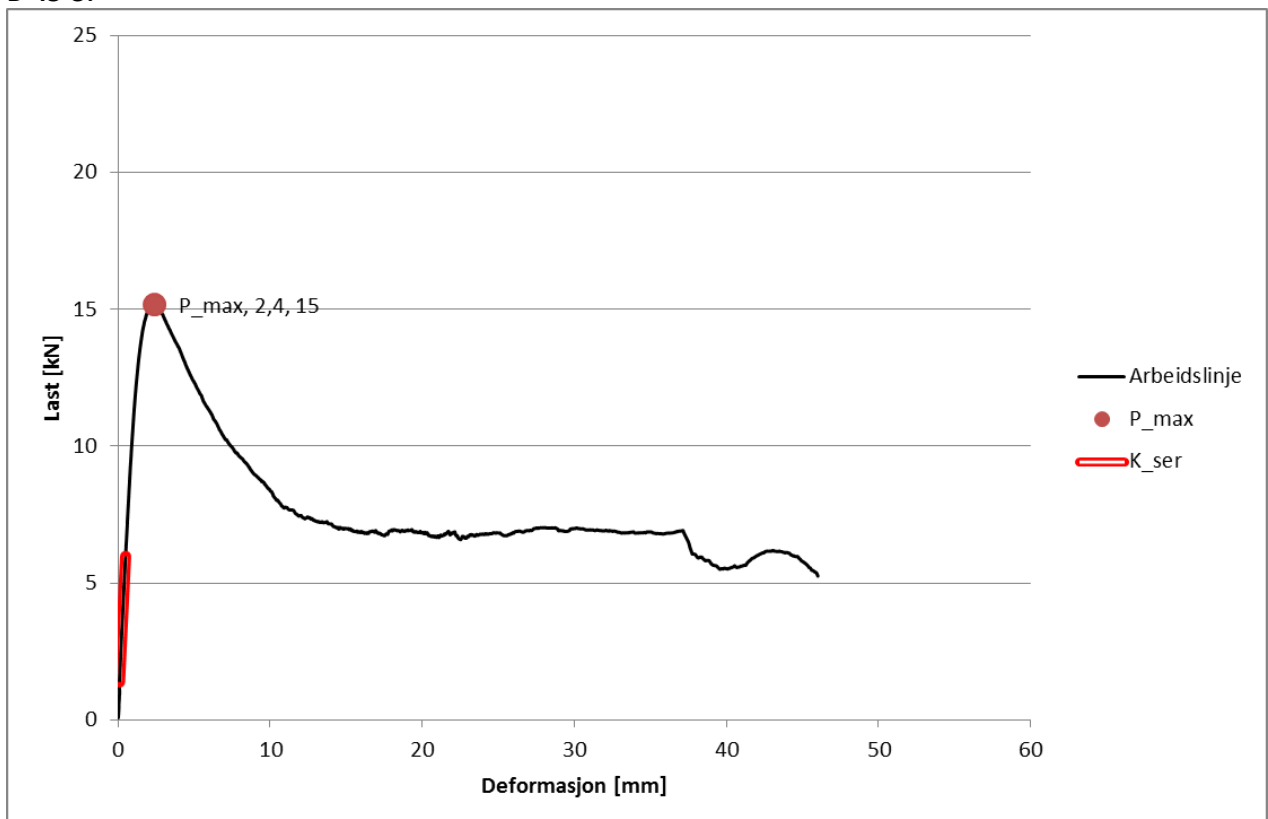
B-45-1:



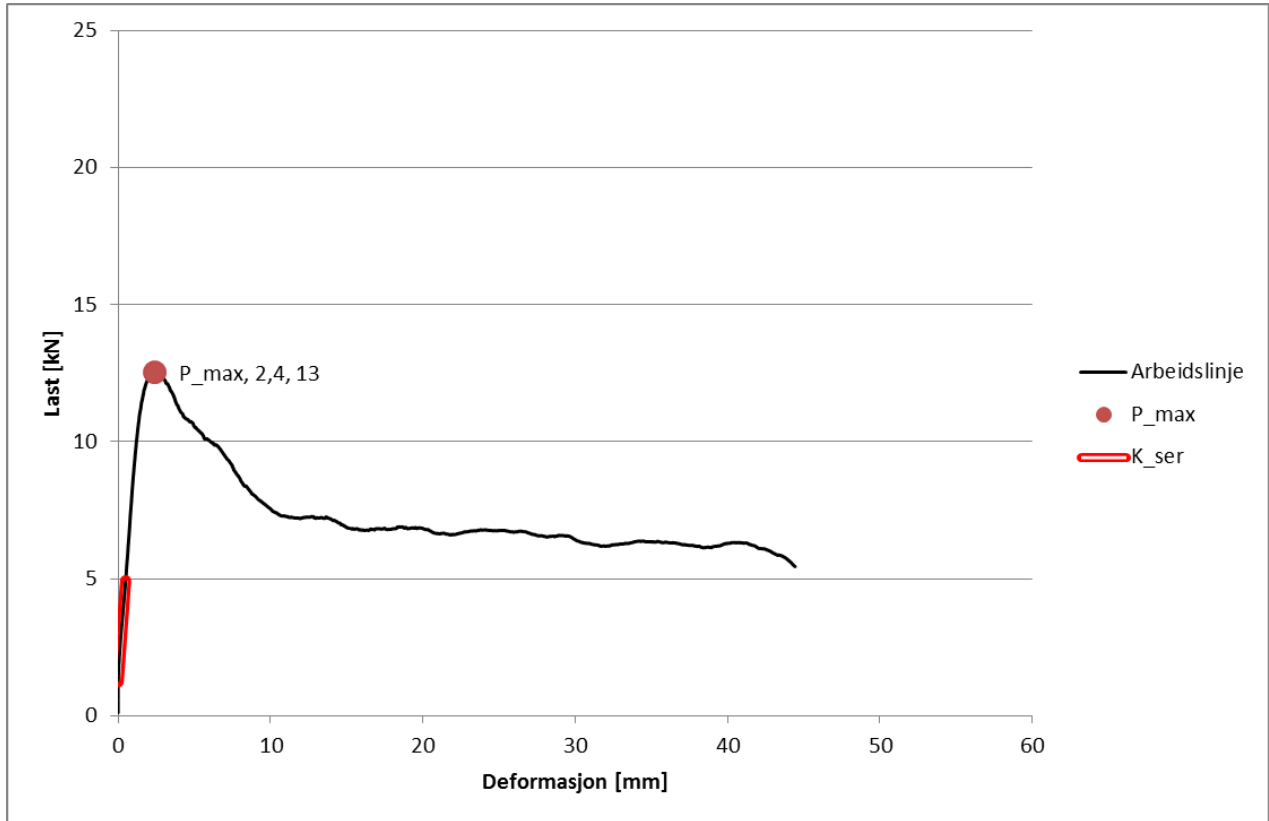
B-45-2:



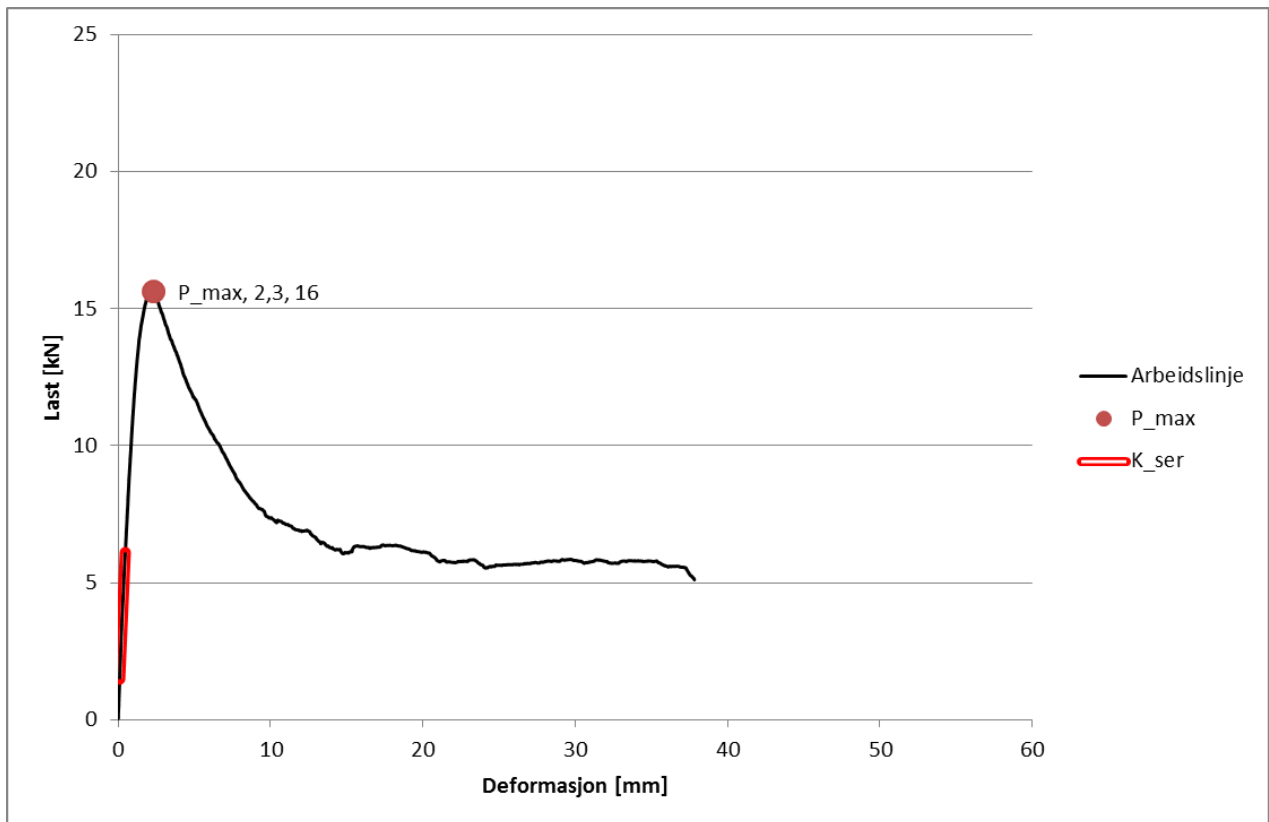
B-45-3:



B-45-4:

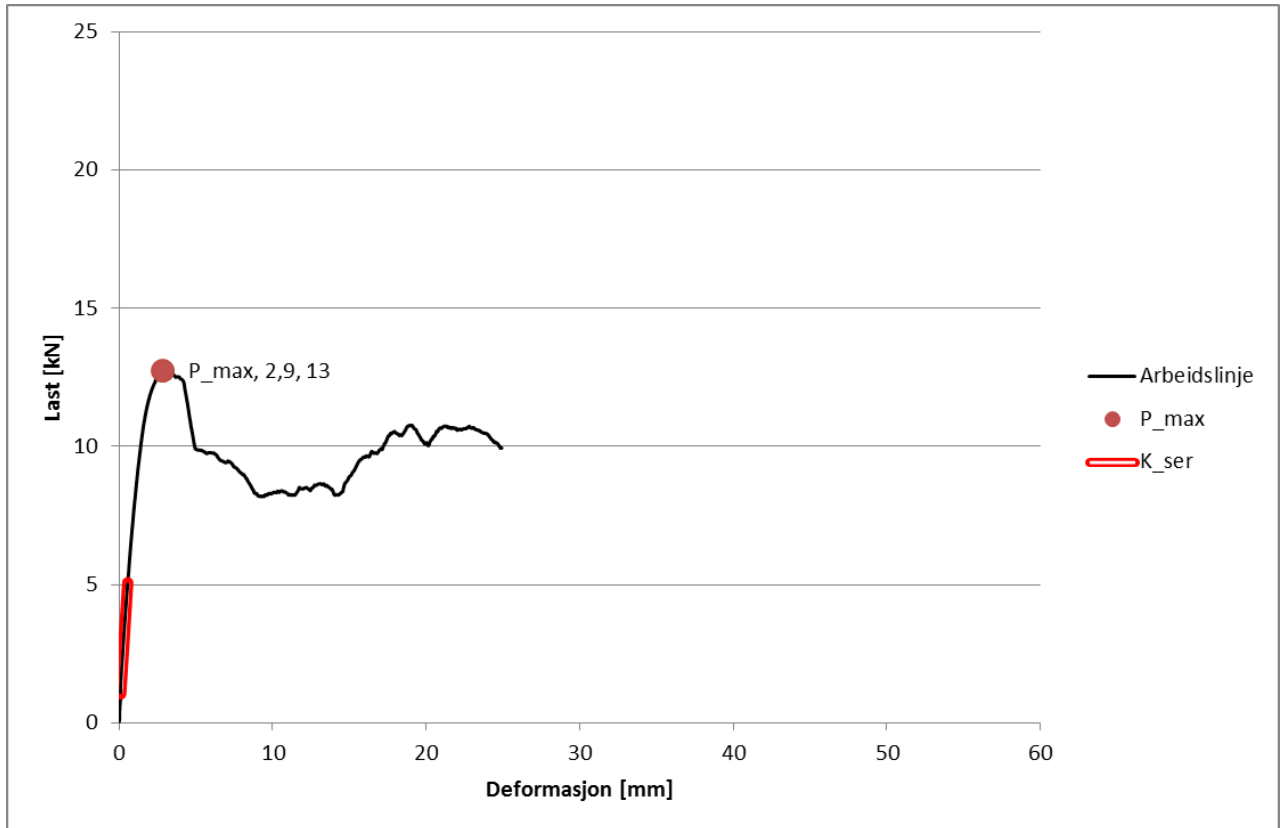


B-45-5:

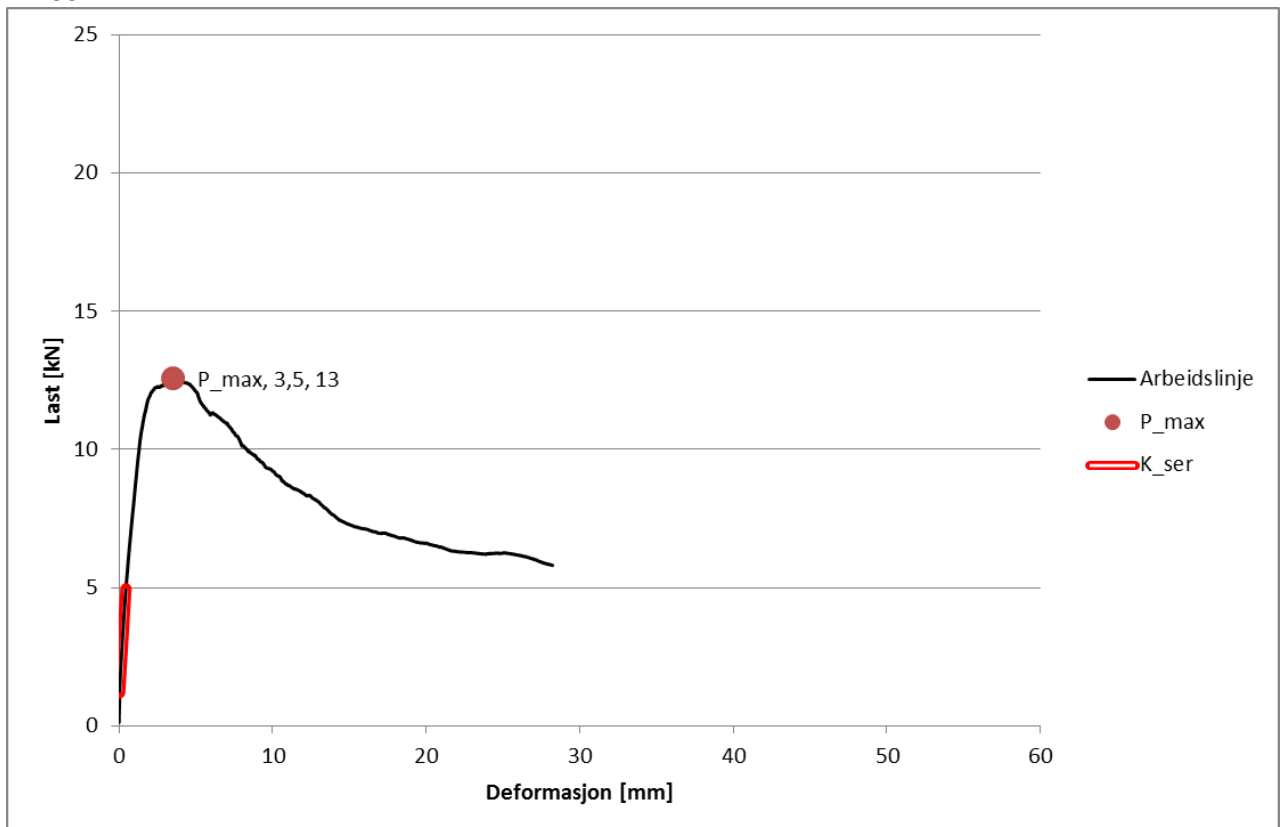


Kryssede forbindelser:

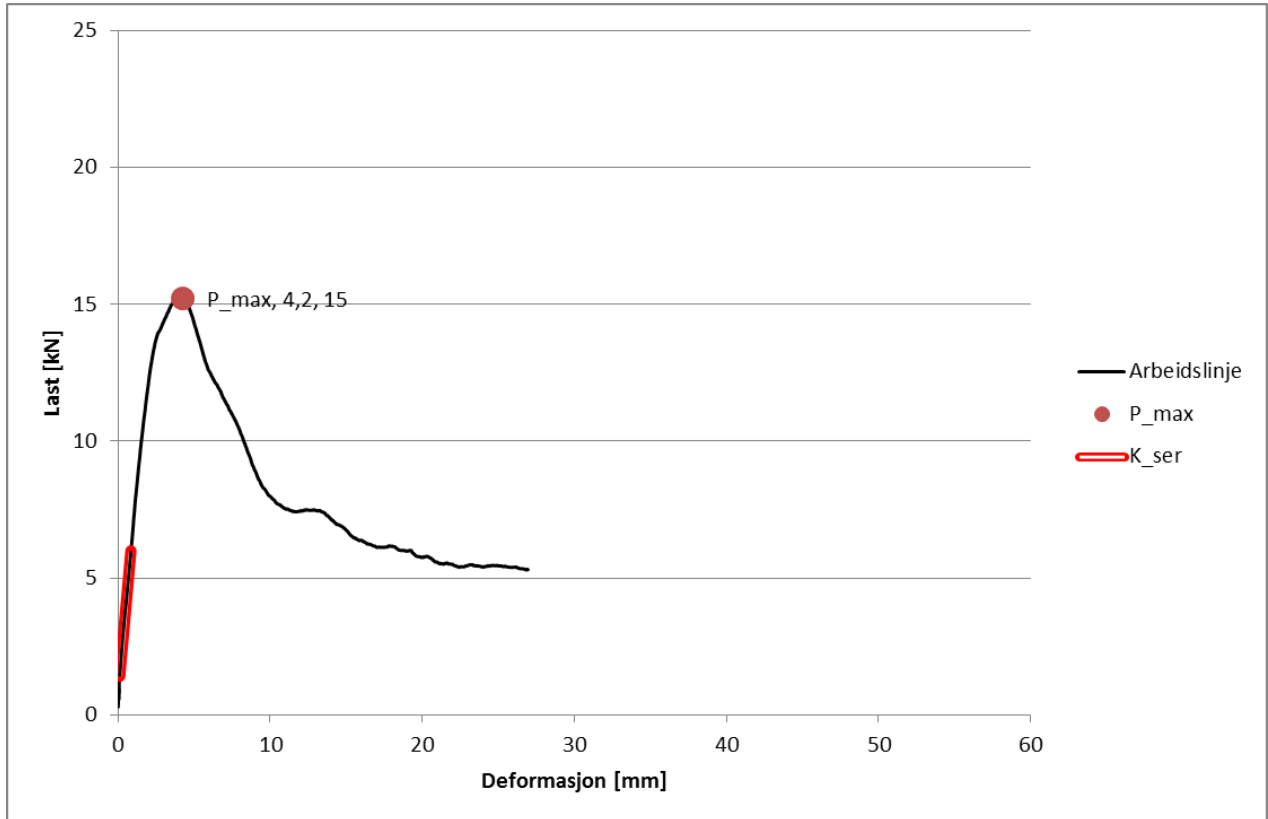
A-X30-1:



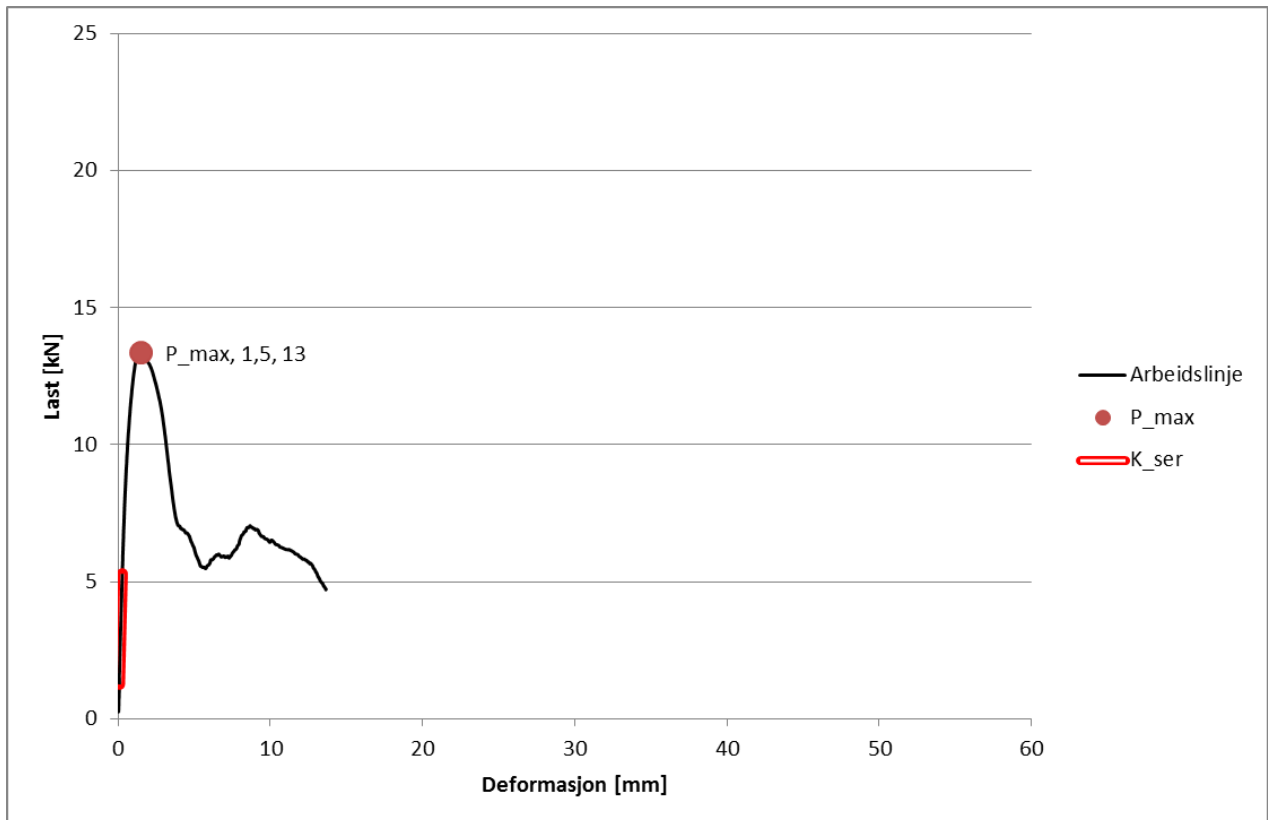
A-X30-2:



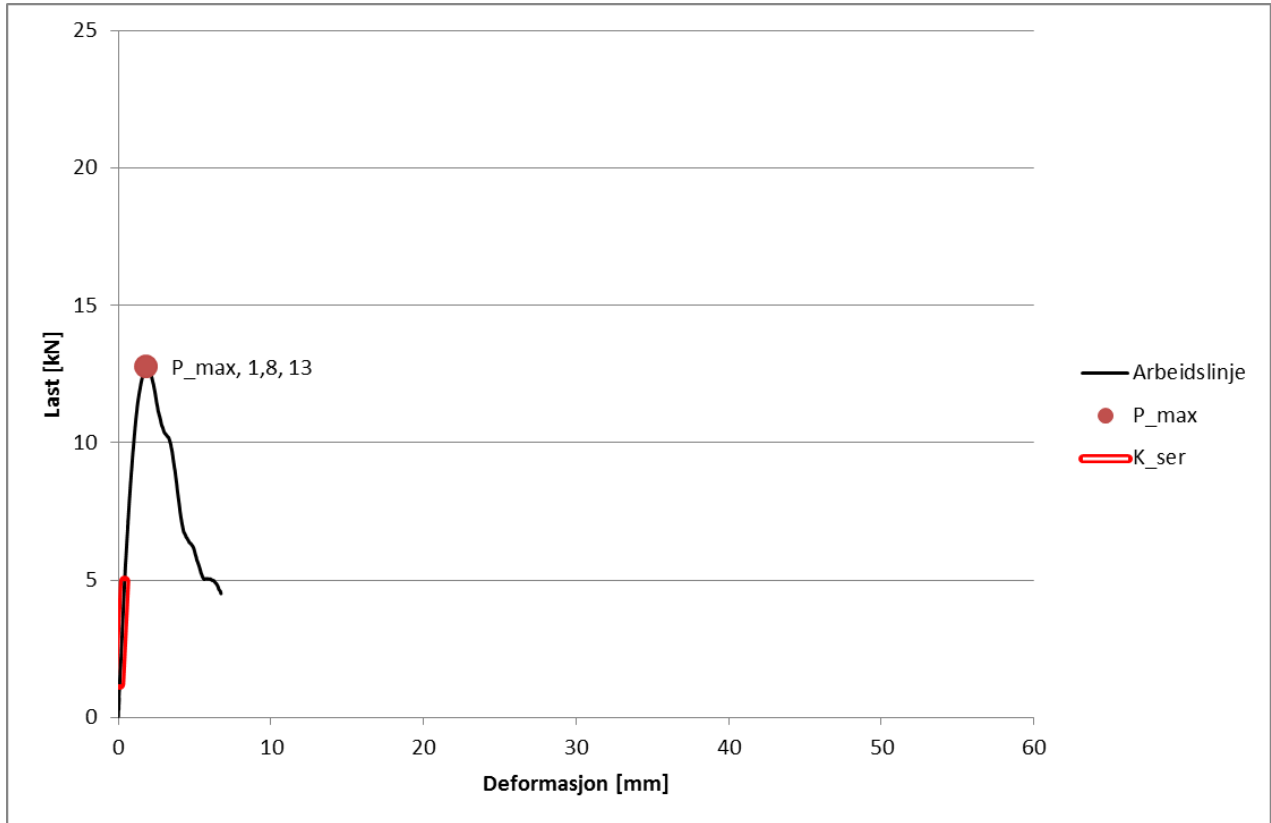
A-X30-3:



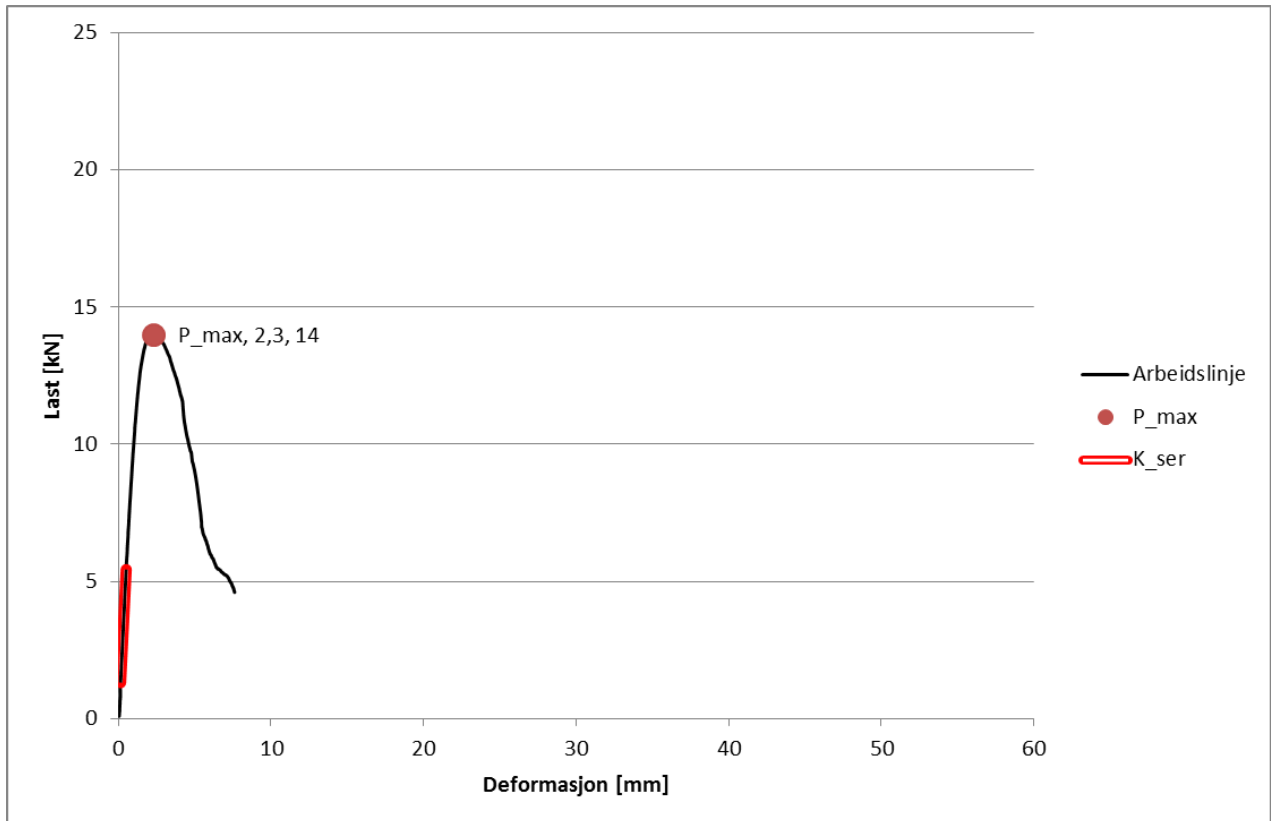
A-X45-1:



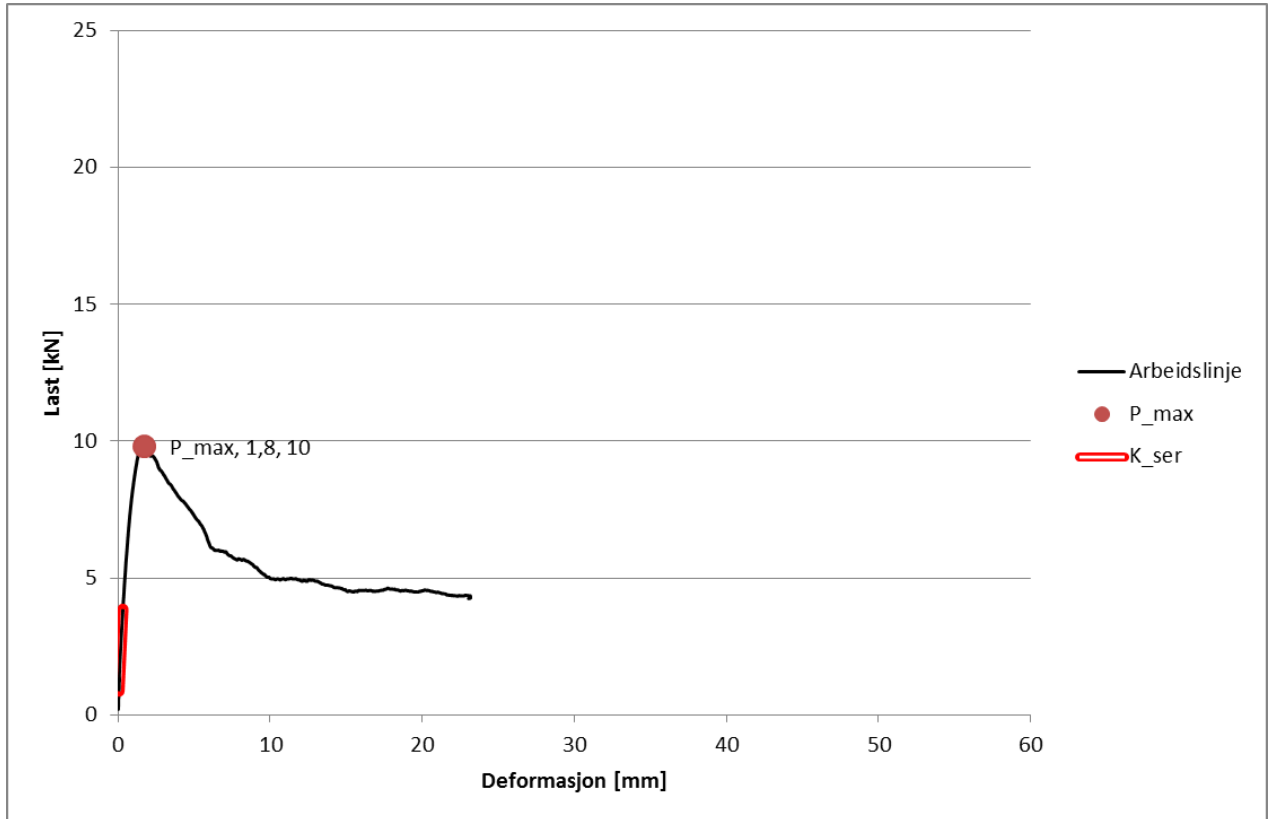
A-X45-2:



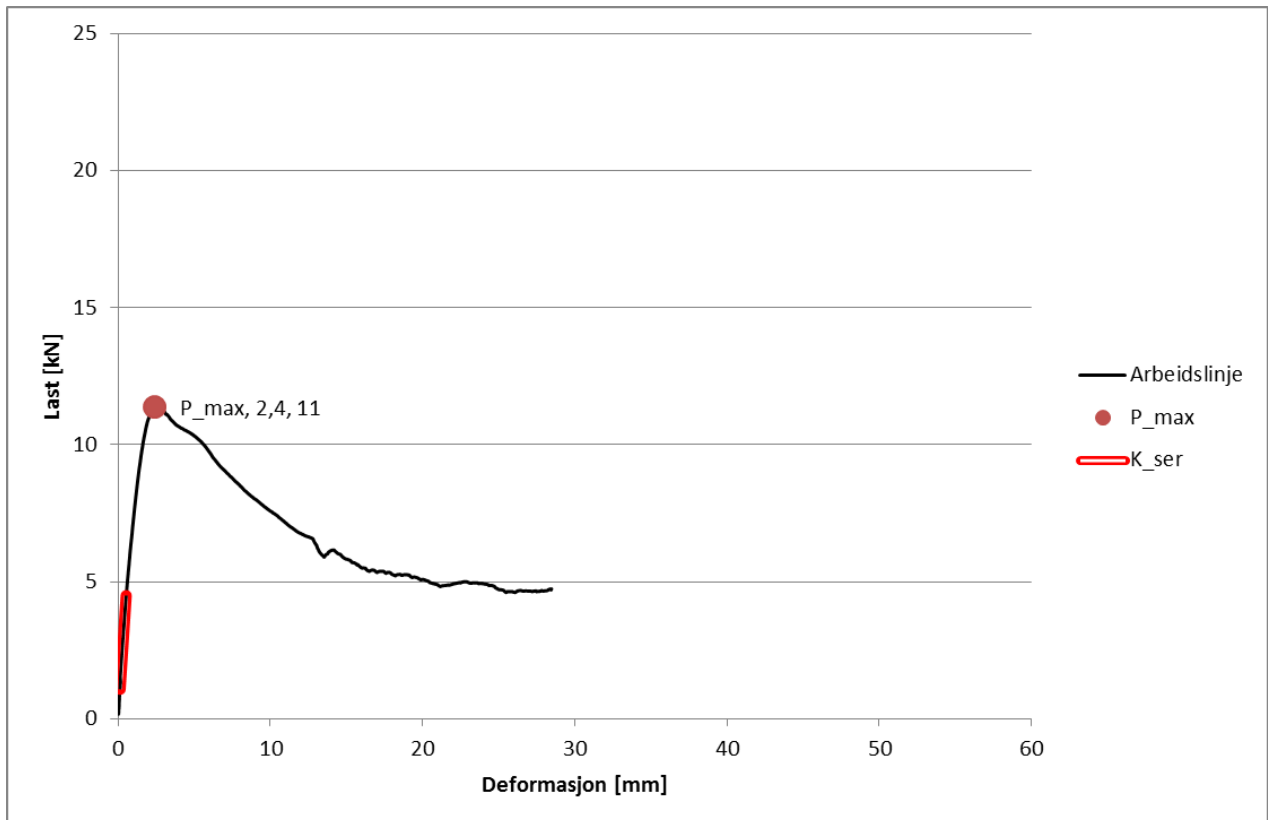
A-X45-3:



B-X30-1:

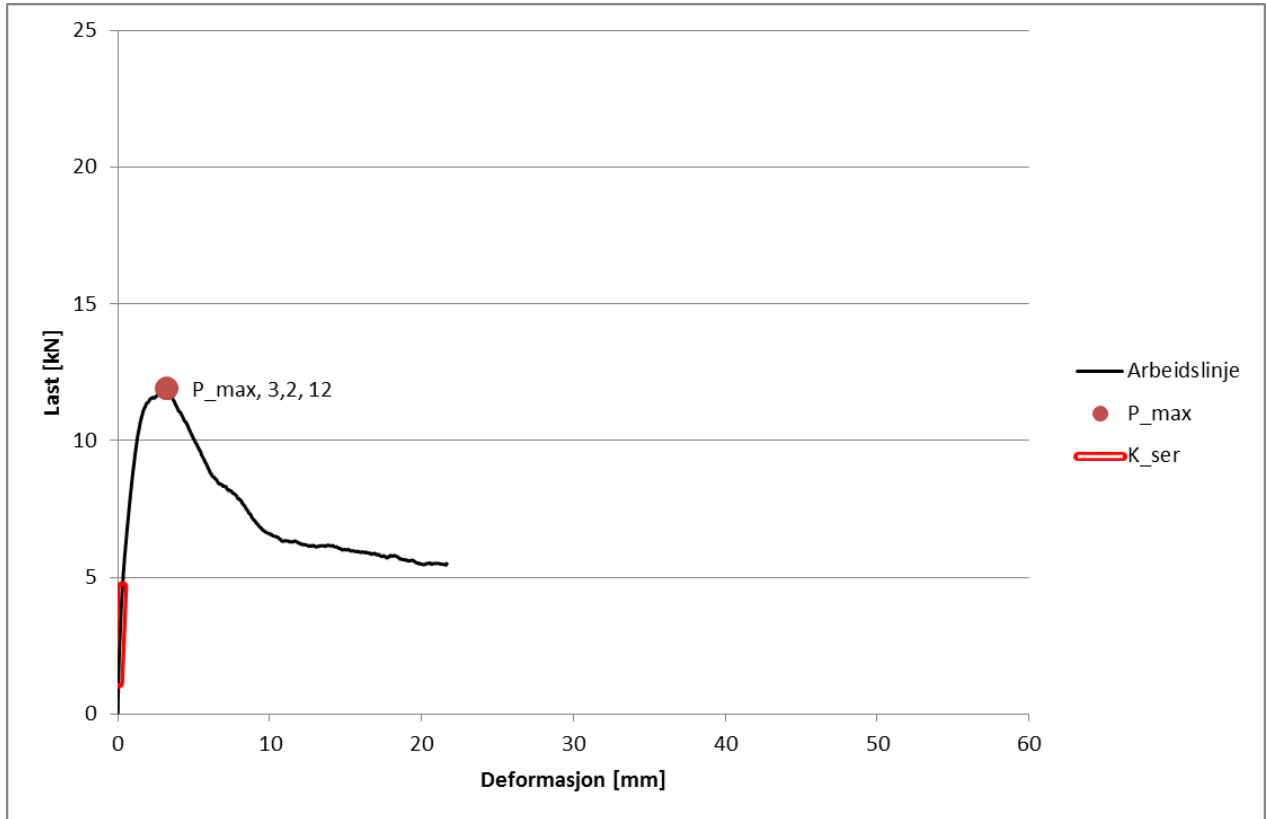


B-X30-2:

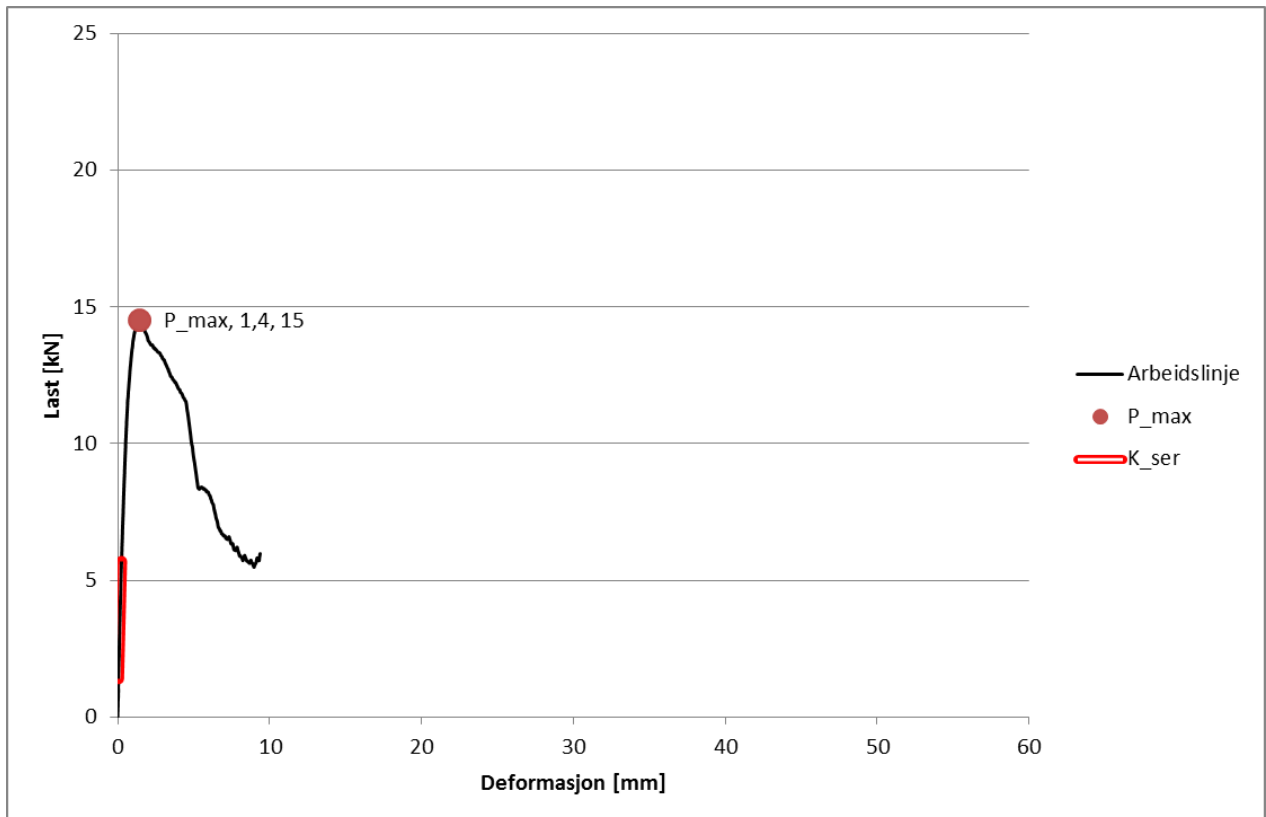




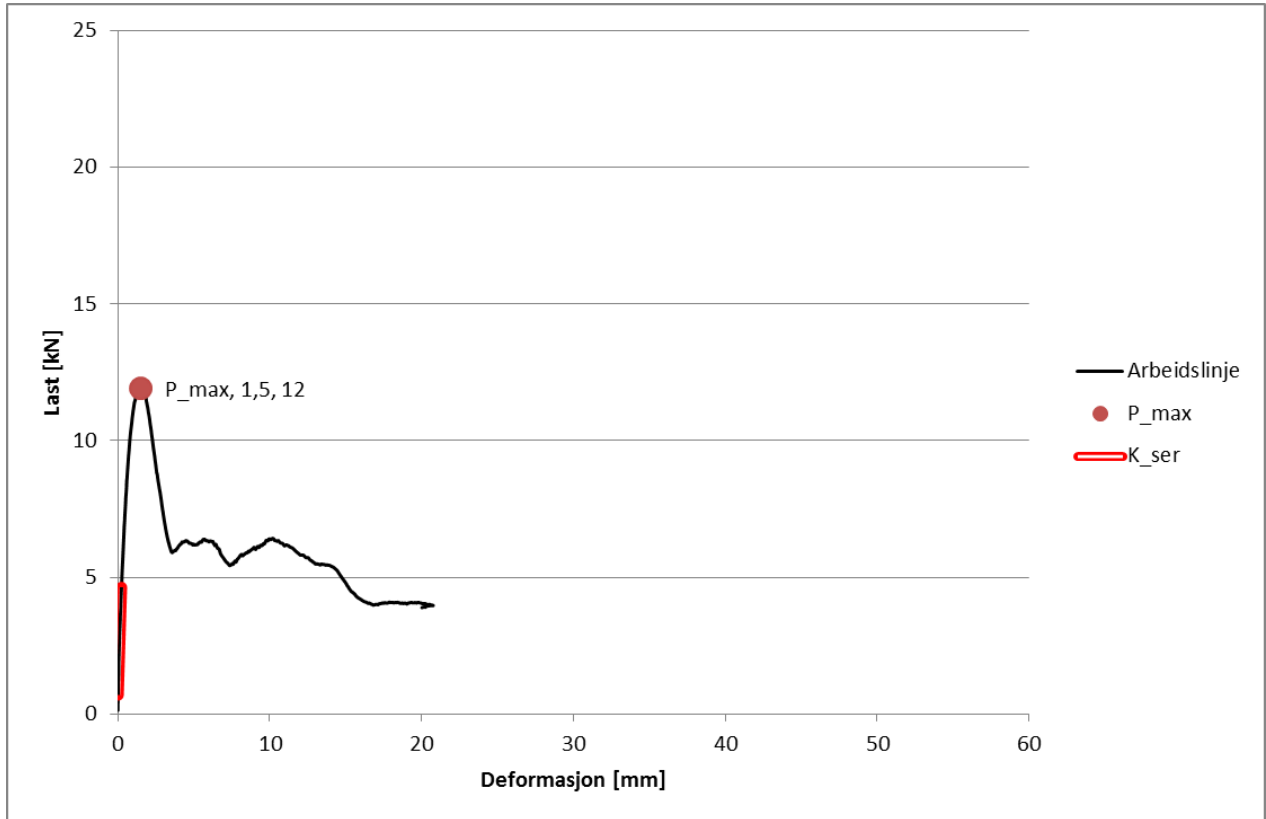
B-X30-3:



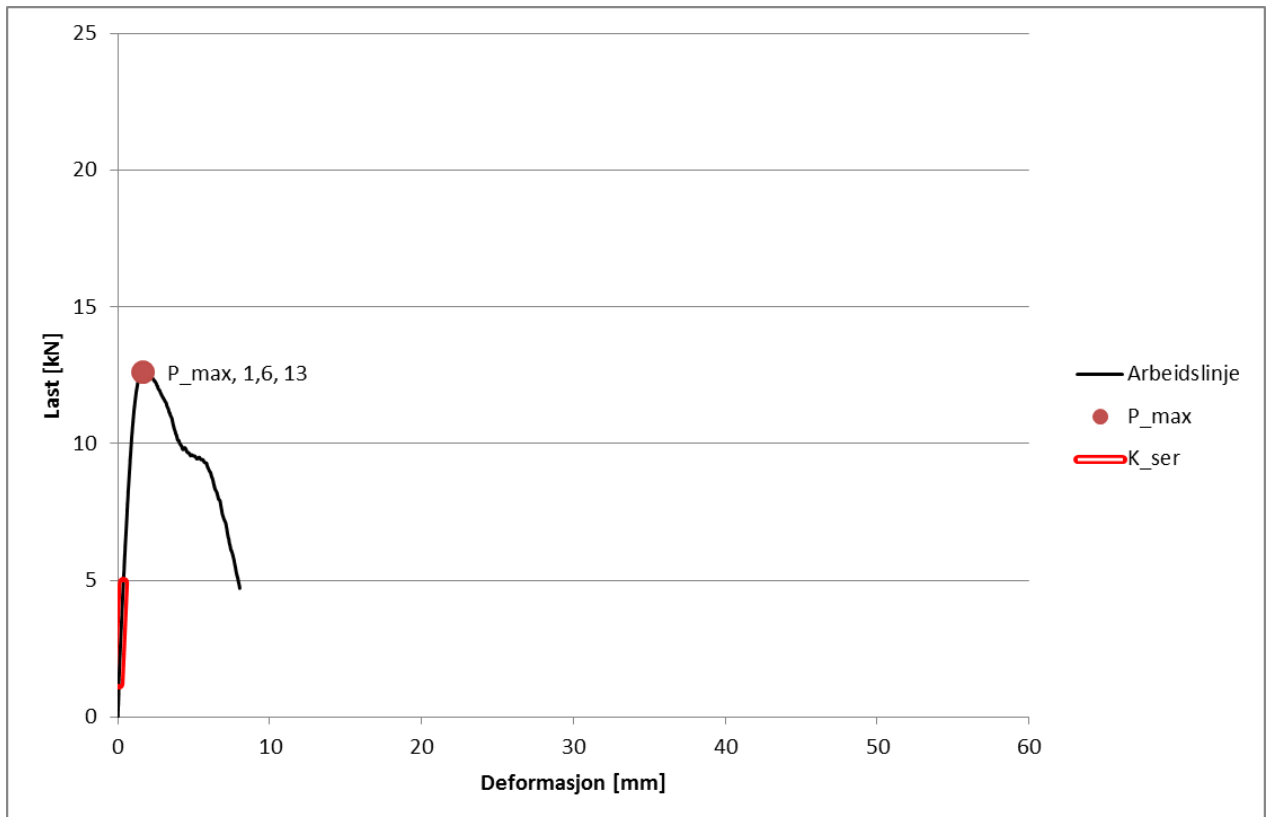
B-X45-1:



B-X45-2:

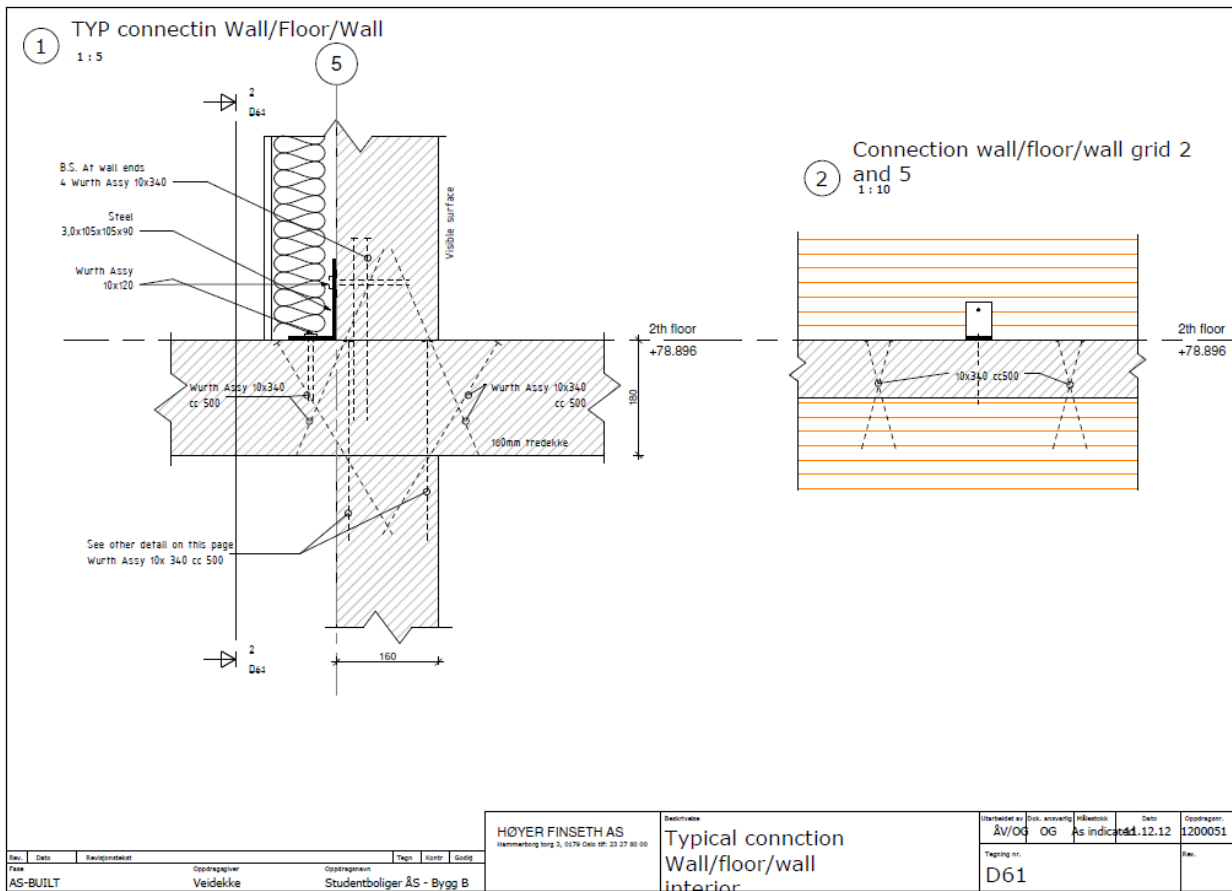


B-X45-3:



## 9.2 Vedlegg B – detalj, skrueforbindelse

Typisk detalj fra gulv/vegg-forbindelse fra As-built-dokumentasjon fra Palisaden.



### **9.3 Vedlegg C - Elektroniske vedlegg**

Vedlagt på CD ligger følgende filer:

- Excel-filer med data, utregninger og arbeidslinjer for samtlige prøver.
- Pdf-versjon av denne masteroppgaven.